CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

UNIDADE ARAXÁ

INGRID GUIMARÃES SILVEIRA E SILVA

MODELAGEM HIDROGEOTÉCNICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS ALTEADA PELA LINHA DE CENTRO

ARAXÁ

2022

INGRID GUIMARÃES SILVEIRA E SILVA

MODELAGEM HIDROGEOTÉCNICA DE UMA BARRAGEM DE REJEITOS ALTEADA PELA LINHA DE CENTRO

Trabalho de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Minas na linha de pesquisa em Engenharia Geotécnica.

Orientadora: Prof. Dra. Denise de Carvalho Urashima
Coorientadores: Me. Gilvan Sá. e Prof. Me. Guilherme Alzamora

ARAXÁ

2022

ATA DA 12ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 31 (trinta e um) dias do mês de outubro do ano de 2022 (dois mil e vinte dois), às 14h00min (quatorze horas), por meio da Plataforma ConferênciaWeb (https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/denise-de-carvalho-urashima), foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação da Mestranda Ingrid Guimarães Silveira e Silva, sob a forma totalmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020), com a banca examinadora composta pela Profª. Titular Drª. Denise de Carvalho Urashima (Presidente) – CEFET- MG, Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido (Membro externo) – Universidade Federal de Lavras – UFLA e Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira (Membro externo) – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Dando início aos trabalhos a Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu a Mestranda Ingrid Guimarães Silveira e Silva, até 40 (quarenta) minutos para a apresentação do seu trabalho intitulado "**Modelagem Hidrogeotécnica de Uma Barragem de Rejeitos Alteada Pela Linha de Centro**", na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa *Geologia de Engenharia na Mineração*. Terminada a exposição, a Presidente da Banca examinadora passou a arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, a Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que a Mestranda foi aprovada, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, será assinada pelos membros da Banca Examinadora e pela Mestranda.

Araxá,31 de outubro de 2022

_____

Profª. Drª. Denise de Carvalho Urashima
Presidente (CEFET-MG)

_____

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Membro externo (UFLA)

_____

Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira
Membro externo (UFOP)

_____

Engª. Ingrid Guimarães Silveira e Silva
Discente

Emitido em 04/11/2022

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 1/2022 - DCECVG (11.64.04)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 04/11/2022 09:37)
DENISE DE CARVALHO URASHIMA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DCECVG (11.64.04)
Matrícula: ###293#3

(Assinado digitalmente em 04/11/2022 10:54)
INGRID GUIMARÃES SILVEIRA E SILVA
DISCENTE
Matrícula: 2019######0

(Assinado digitalmente em 04/11/2022 15:14)
EDUARDO SOUZA CANDIDO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.686-##

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: **1**, ano: **2022**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de emissão: **04/11/2022** e o código de verificação: **b091e673de**

S586m Silva, Ingrid Guimarães Silveira e
Modelagem hidrogeotécnica de uma barragem de rejeitos alteada pela linha de centro / Ingrid Guimarães Silveira e Silva. – 2022.
156 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima.
Coorientador: Prof. Me. Gilvan Sá.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2022.
Bibliografia.

1. Barragens – Teses. 2. Barragens – Medidas de segurança – Teses. I. Urashima, Denise de Carvalho. II. Sá, Gilvan. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 624.136

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Márcia Martins da Silva CRB-6/2578

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Marcos e Luciana
que com muito incentivo, amor e confiança
me apoiaram para conquistar essa meta.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado paciência e sabedoria para chegar até aqui.

Ao meu pai José Marcos, pela inspiração, pelo amor infinito e apoio incondicional, que possibilitou a minha chegada até aqui. À minha mãe Luciana, por me compreender, por tanto amor e carinho, por sempre ter me dado forças quando eu precisava. Aos meus irmãos, Marco Antônio e Maria Alice por existirem e que mesmo sem saber, me apoiaram nessa caminhada. À minha avó Ana, ao meu avô David, à minha avó Lourdes e à minha madrinha Helen, pela inspiração, pelo incentivo, pela compreensão quando estive ausente, pelo amor como mães e como pai e pelos ensinamentos repassados durante longas conversas.

À minha orientadora, Profa. Dra. Denise de Carvalho Urashima, que mesmo pela distância aceitou ser minha orientadora. Pela atenção e pelos conselhos que foram além de orientações acadêmicas. Agradeço o privilégio que tive por ser sua orientada e, principalmente, por não me ter deixado enfraquecer nos momentos de dificuldade.

Ao meu marido Luiz Pablo, que sempre me apoiou durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Pelo amor e compreensão, que me incentivou a continuar e me tornou mais feliz. Pelas longas conversas e por tanto amor em momentos difíceis, que tornaram essa caminhada mais leve.

Aos meus amigos, que me incentivaram e me compreenderam durante o tempo que estive ausente. Obrigada por todo os momentos e por toda amizade e companheirismo. Agradecimento especial ao meu amigo Gerê e sua família, que acreditaram em mim para desenvolver este trabalho. Aos meus colegas de trabalho, que me apoiaram e sempre estiveram disponíveis para tirar minhas dúvidas.

À empresa proprietária da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, que forneceu os dados de entrada para realização deste trabalho. Aos seus funcionários, que sempre estiveram de prontidão para me receber durante as visitas de campo, tirar minhas dúvidas quando foi necessário e revisar o texto final da dissertação. Agradeço imensamente a oportunidade de conhecê-los e trabalhar com vocês. Foram momentos inspiradores, em que conheci pessoas que amam o que fazem e sempre me ajudaram, mesmo quando houve distância ou o tempo era curto. Agradeço por todo aprendizado e pela ótima recepção que tive.

Ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, pelo suporte financeiro, durante parte do desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Esquema representativo de uma barragem de rejeitos típica. 21
Figura 2-2 - Variação da permeabilidade média em função do índice de vazios. 27
Figura 2-3 - Permeabilidade para os principais tipos de solo. 28
Figura 2-4 – Determinação da Envoltória de Resistência 31
Figura 2-5 – Curva de retenção de água, determinadas por secagem e umedecimento. 33
Figura 2-6 – Elementos do modelo conceitual. 36
Figura 2-7 – Fluxos de Água Subterrânea em um Modelo Conceitual Genérico. 37
Figura 2-8 – Esquema de Fluxo de um aterro homogêneo de composição arenosa... 38
Figura 2-9 – Carga hidráulica h para um piezômetro. 39
Figura 2-10 – Esquemas de Discretização de Elementos Finitos. (A) Discretização usando rede regular de diferenças finitas, (B) discretização usando elementos finitos triangulares, (C) discretização usando elementos isoparamétricos quadráticos. 40
Figura 2-11 – Esquema Representativo de componentes de Rede de Fluxo. 43
Figura 2-13 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada para uma superfície de deslizamento 46
Figura 2-14 – Tipos de superfície de ruptura. 47
Figura 2-15 – Fatias e forças em uma massa deslizante. 49
Figura 2-16 – Localização de pontos de monitoramento em uma barragem de rejeitos. 51
Figura 2-17 – a) Pluviômetro modelo Ville de Paris. 52
Figura 2-18 - Indicador de Nível de Água. 54
Figura 2-19 – Piezômetro de Casagrande. 55
Figura 2-20 – Poço de Bombeamento com bomba instalada. 56
Figura 2-21 – (A) Início do Desenvolvimento do Poço (B) Final do Desenvolvimento do Poço 58
Figura 2-22 – Esquema em subsuperfície de um teste de bombeamento em operação. 59
Figura 2-23 – Ensaio de permeabilidade com *Slug Test* - (A) Rebaixamento (B) Recuperação 62
Figura 2-24 - Parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951). 63
Figura 2-25 – Permeâmetro à carga constante. 64
Figura 2-26 – Permeâmetro à carga variável. 65

Figura 3-1 Situação da estrutura meados dos anos 70..... 68
Figura 3-2 – Topografia da Barragem de Rejeitos Fosfáticos..... 68
Figura 3-3 – Método construtivo dos alteamentos. 69
Figura 3-4 - Locação das seções da Barragem 1 72
Figura 3-5 – Locação das seções da Barragem 2..... 72
Figura 3-6 – Seção geológico-geotécnica B-B' da barragem 1, evidenciando a localização dos componentes da estrutura. 73
Figura 3-7 – Seção geológico-geotécnica E-E' da Barragem 2, evidenciando a localização dos componentes da estrutura. 73
Figura 3-8 – Execução de Canais de Drenagem na Praia. 75
Figura 3-9 – Canal de Drenagem Principal instituído ao longo da praia. 75
Figura 3-10 – Sump à jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, situado no reservatório da barragem de rejeitos à jusante. 76
Figura 3-11 – Sump à jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, situado no reservatório da barragem de rejeitos à jusante. 76
Figura 3-12 – Localização dos Poços de Rebaixamento. 77
Figura 3-13 - (A) Perfuração com Hollow (B) Retirada dos Trados e do Hollow..... 78
Figura 3-14 - (A) Instalação do tubo liso e revestimento (B) Calda de Cimento/Cimento Anular 79
Figura 3-15 – (A) Corte do cimento com broca especial (B) Corte do Cimento com Circulação..... 79
Figura 3-16 – (A) Instalação do Tubo Ranhurado (B) Descida do Martelo com Bit Tubex 80
Figura 3-17 – (A) Perfuração com *Bit Tubex* (B) Conclusão da Perfuração e Retirada do *Bit Tubex.*..... 81
Figura 3-18 – Desenvolvimento com Compressor e Amostras de água obtidas para o Poço 04..... 82
Figura 3-19 – Bomba de rebaixamento de nível d´água instalada e teste de vazão. .. 82
Figura 3-20 - Seção típica adotada e detalhes para a berma de reforço na seção B-B da Barragem 1'. 84
Figura 3-21 - Seção típica adotada e detalhes para a berma de reforço na seção E-E da Barragem 2'. 84
Figura 3-22 – Execução do Reforço na Barragem 2. 85
Figura 3-23 – Reforço à Jusante na Barragem de Rejeitos Fosfáticos finalizado..... 85
Figura 4-1 – Comparativo entre (A) geometria original; e (B) geometria simplificada.. 88
Figura 4-2 – Seção geológico-geotécnica B-B' do cenário pré-obra da Barragem 1. .. 89
Figura 4-3 – Seção geológico-geotécnica E-E' do cenário pré-obra da Barragem 2. .. 89

Figura 4-4 – Seção geológico-geotécnica B-B’ com reforço para a Barragem 1. 90
Figura 4-5 – Seção geológico-geotécnica E-E’ com reforço para a Barragem 2. 90
Figura 4-6 – Malha com 1000 elementos 92
Figura 4-7 – Malha com 1500 elementos 92
Figura 4-8 – Malha com 2000 elementos 93
Figura 4-9 – Malha com 2500 elementos 93
Figura 4-10 – Malha com 3000 elementos 94
Figura 4-11 – Localização dos ensaios de infiltração e coleta de amostras indeformadas. 97
Figura 4-12 – Leitura dos Medidores de Nível de Água na Seção B-B’ 99
Figura 4-13 – Leitura dos Medidores de Nível de Água na Seção E-E’ 99
Figura 4-14 – Leitura dos Piezômetros na Seção B-B’ 100
Figura 4-15 – Leitura dos Piezômetros na Seção E-E’ 100
Figura 4-16 – Leitura Piezômetros Elétricos na Seção B-B’ 100
Figura 4-17 – Leitura dos Piezômetros Elétricos na Seção E-E’..... 101
Figura 4-18 – Nível Dinâmico dos Poços de Rebaixamento 101
Figura 4-19 – Funções de Condutividade Hidráulica Definidas para (A) Dique de Partida (B) *Overflow* (Finos) (C) Enrocamento. 102
Figura 5-1 – Pluviometria Mensal Registrada na Área da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. 105
Figura 5-2 – Registros do Google Earth durante a fase pré-obra. 109
Figura 5-3 – Infiltração Horizontal incluída como condição de contorno. 109
Figura 5-4 - Pré-obra - Análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica B-B' para as condições drenadas. 110
Figura 5-5 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição drenada. 112
Figura 5-6 – Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição drenada. 113
Figura 5-7 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição não drenada. 114
Figura 5-8 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição não drenada. 115
Figura 5-9 - Pré-obra - Análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica E-E’ para as condições drenadas. 117
Figura 5-10 - Pré-obra - da Seção Geológico-geotécnica E-E’ com fator de segurança global para a condição drenada. 119

Figura 5-11 - Pré-obra - da Seção Geológico-geotécnica E-E’ com fator de segurança local para a condição drenada..... 120
Figura 5-12 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica E-E’ com fator de segurança global para a condição não drenada. 121
Figura 5-13 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica E-E’ com fator de segurança local para a condição não drenada. 122
Figura 5-14 – Pós-obra – Análise de Percolação da Seção Geológico-geotécnica B-B' para as condições drenadas..... 126
Figura 5-15 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição drenada. 128
Figura 5-16 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição drenada. 129
Figura 5-17 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição não drenada. 130
Figura 5-18 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição não drenada. 131
Figura 5-19 – Pós-obra – Análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica E-E' para as condições drenadas..... 133
Figura 5-20 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança global para a condição drenada. 135
Figura 5-21 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança local para a condição drenada. 136
Figura 5-22 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança global para a condição não drenada. 137
Figura 5-23 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança local para a condição não drenada. 138
Figura 5-24 – Pós-obra – Fotografias da região de jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. 139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1- Frequência de anotações do teste de bombeamento 59
Tabela 4-1 – Fatores de Segurança mínimos para a situação avaliada. 88
Tabela 5-1 – Valores de permeabilidade para materiais do aterro e da fundação..... 104
Tabela 5-2 – Parâmetros geotécnicos de resistência 104
Tabela 5-3 – Leitura dos instrumentos na Seção B-B' da Barragem 1. 106
Tabela 5-4 – Leitura dos instrumentos na Seção E-E' da Barragem 2. 106
Tabela 5-5 – Dados Cadastrais e Nível Dinâmico dos Poços de Rebaixamento..... 107

LISTA DE QUADROS

Quadro 2-1- Características Gerais dos métodos construtivos de barragens de rejeitos 23
Quadro 2-2 – Comparativo entre os métodos de fatias disponíveis para cálculo do FS 48
Quadro 2-3 – Classificação dos ensaios de permeabilidade e suas aplicações. 60
Quadro 4-1 – Cenários de Estudo 86
Quadro 4-2 – Parte 1 - Quadro-resumo dos ensaios de infiltração e suas respectivas litologias 95
Quadro 4-3– Parte 2 - Quadro-resumo dos ensaios de infiltração e suas respectivas litologias 96
Quadro 5-1 - Cenários pré-obra modelados 108
Quadro 5-2 – Quadro-resumo dos Fatores de Segurança mínimos – Cenário Pré-obra. 123
Quadro 5-3 - Cenários pós-obra modelados 124
Quadro 5-4 – Fatores de Segurança mínimos obtidos cenário pós-obra..... 139

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO 15

1.1 Considerações Iniciais 15
1.2 Justificativa e Relevância da Pesquisa 16
1.3 Objetivos 17
1.3.1 Objetivo principal 17
1.3.2 Objetivos específicos 18
1.4 Restrições e Limitações da Pesquisa 18
1.5 Escopo da Dissertação 18

2.0 REVISÃO DA LITERATURA 20

2.1 Barragens de Rejeitos 20
2.1.1 Métodos Construtivos 21
2.1.2 Propriedades Geológico-geotécnicas dos Rejeitos 23
2.1.3 Comportamento dos Rejeitos 31
2.2 Águas Subterrâneas 35
2.2.1 Modelo Conceitual Para Fluxo de Águas Subterrâneas 35
2.2.2 Fluxo de Água Subterrânea em Barragens de Rejeitos 38
2.2.3 Lei de Darcy e Definição de Hubbert 39
2.2.4 Modelo Numérico Para Fluxo de Águas Subterrâneas 40
2.2.5 Método dos Elementos Finitos 41
2.2.6 Rede de Fluxo 42
2.3 Método do Equilíbrio Limite 45
2.4 Instrumentos de Monitoramento 49
2.4.1 Pluviômetros 52
2.4.2 Indicador de Nível D'água – INA 53
2.4.3 Piezômetros de Tudo Aberto ou Casagrande (Standpipe) 54
2.4.4 Poços Tubulares 56
2.5 Ensaios de Permeabilidade 60
2.5.1 Ensaios de Permeabilidade In Situ 60
2.5.2 Slug Test 62
2.5.3 Ensaios de permeabilidade em laboratório 64

3.0 ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DE REJEITOS FOSFÁTICOS ALTEADA PELA LINHA CENTRO 67

3.1 Histórico da Estrutura 67
3.1.1 Fundação 68
3.1.2 Maciço 69
3.2 Elaboração de Projetos e Execução de Estabilização Física 70
3.2.1 Estudos Geotécnicos Anteriores 70
3.2.2 Canteiro de Obras 74
3.2.3 Rebaixamento dos Níveis de Água Por Meio da Execução de Poços Tubulares 76
3.2.4 Berma de Equilíbrio em Enrocamento no Talude de Jusante 83

4.0 METODOLOGIA 86

4.1 Análises Computacionais 86
4.2 Seções Geológico-geotécnicas 88

4.3 Malha de Elementos Finitos 91
4.4 Investigações Geológico-geotécnicas, Parâmetros Hidráulicos e Parâmetros de Resistência 94
4.5 Leitura de Nível d'água e Piezometria 98
4.6 Leitura dos Poços de Rebaixamento 101
4.7 Funções de condutividade hidráulica 102
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES 103
5.1 Dados de Entrada 103
5.1.1 Parâmetros Hidromecânicos e Geotécnicos 103
5.1.2 Pluviometria 105
5.1.3 Leitura de Nível d'água, Piezometria e Nível Dinâmico dos Poços 105
5.1.4 Leitura de Nível Dinâmico dos Poços Tubulares 107
5.2 Cenários pré-obra 108
5.2.1 Seção geológico-geotécnica B-B' 108
5.2.2 Seção geológico-geotécnica E-E' 116
5.3 Cenários pós-obra 124
5.3.1 Seção geológico-geotécnica B-B' 124
5.3.2 Seção geológico-geotécnica E-E' 132
6.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 141
REFERÊNCIAS 144

RESUMO

SILVA, I. G. S. **Modelagem Hidrogeotécnica de Uma Barragem de Rejeitos Alteada Pela Linha de Centro**. 2022. 154p. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional de Engenharia de Minas – PPGEMIN, CEFET-MG.

No processo de beneficiamento de minérios são gerados rejeitos, que são comumente descartados na forma de polpa ou lama em estruturas como barragens ou diques. O processo de monitoramento e segurança de barragens de rejeitos apresenta complexidade hidrogeotécnica significativa, e em caso de rompimento da barragem, os rejeitos liberados podem causar elevados danos ambientais, sociais e econômicos. Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo de estabilidade de uma barragem de rejeitos fosfáticos no qual foram modelados dois cenários. O cenário inicial mostrou alto grau de saturação no pé a jusante da barragem e indicou baixos fatores de segurança para a condição não drenada. Um segundo cenário avaliou as melhorias dos fatores de segurança, após a execução de um projeto de estabilização da barragem de rejeitos fosfáticos, que sugeriu o rebaixamento do lençol freático do reservatório e uma construção de reforço a jusante. A modelagem numérica foi realizada adotando-se os métodos de elementos finitos e equilíbrio limite utilizando o software SLIDE 2D versão 9.0, desenvolvido pela ROCSCIENCE®. Os parâmetros hidrodinâmicos e geotécnicos foram validados com os resultados de investigações geológicas/geotécnicas de campo e de laboratório. Como principais resultados, as seções geológico-geotécnicas transversais B-B’ e E-E' apresentaram, para a condição não drenada do primeiro cenário, fatores de segurança globais iguais a 1,19 e 1,11, respectivamente. Em condições semelhantes, para o segundo cenário, os fatores de segurança globais aumentaram para 1,93 e 1,71, respectivamente. Os resultados indicaram que a obra de estabilização executada apresentou resultados satisfatórios para os trechos analisados, com fatores de segurança acima do mínimo recomendado pelas normas, bem como região seca a jusante da barragem.

Palavras-chave: barragem de rejeitos; estabilidade; fator de segurança; modelagem numérica.

ABSTRACT

SILVA, I. G. S. **Hydrogeotechnical Modeling of a High Centerline Tailings Dam**. 2022. 154p. Dissertation, Programa de Pós-graduação Mestrado Profissional de Engenharia de Minas – PPGEMIN, CEFET-MG.

In the ore beneficiation process are generated tailings, which are commonly discarded in the form of pulp or mud in structures such as dams or dykes. The process of monitoring and safety of tailings dams presents some hydro-geotechnical complexity, and in the event of a dam failure, the tailings released can cause high environmental, social and economic damages. In this context, this work presents a stability study of a phosphate tailings dam in which two scenarios were modeled. The first scenario showed high degree of saturation in the downstream toe of dam and indicated low safety factors for the undrained condition. The second scenario evaluated the improvements of safety factors of a stabilization project of the phosphate tailings dam, after the execution the drawdown of the reservoir water table and a downstream reinforcement construction. The numerical modeling was performed by adopting finite element and limit equilibrium methods using SLIDE 2D version 9.0 software, developed by ROCSCIENCE®. The hydrodynamic and geotechnical parameters were validated with the results of geological/geotechnical field and laboratory investigations. As main results, of the geological-geotechnical cross-sections B-B' and E-E', for the undrained condition of the first scenario, presented global safety factors equal to 1.19 and 1.11, respectively. Under similar conditions, for the second scenario, the global safety factors increased to 1.93 and 1.71, respectively. The results indicated that the stabilization project execution presented satisfactory results for the analyzed sections, with safety factors above the minimum recommended by the standards, as well as a dry region downstream of the dam.

Keywords: tailings dam; stability; safety factor; numerical modeling.

1.0 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata acerca da introdutória e apresentação do contexto de elaboração da pesquisa, bem como apresentação dos objetivos, restrições e limitações, além da apresentação da estruturação do trabalho.

1.1 Considerações Iniciais

A exploração mineral é uma das atividades primordiais para o desenvolvimento de uma sociedade, sendo responsável pela produção de um conjunto de minerais e matérias-primas, pela geração de mais de um milhão de empregos diretos e indiretos, além de contribuir com significativa parte do Produto Interno Bruto (PIB) em diversos países (LYU *et al.,* 2019a).

O crescimento populacional dos últimos anos e a busca contínua por conforto e prosperidade, aumentou a necessidade de produtos oriundos da mineração, evidenciando a importância socioeconômica dessa atividade em todo o planeta. Todavia, apesar de sua relevância, a mineração enfrenta diversos desafios técnicos, legais, ambientais, econômicos e culturais, principalmente, devido a geração de rejeitos (KOSSOFF *et al.,* 2014).

Os rejeitos são coprodutos da mineração, que podem ser descartados na forma de polpa ou lama, em barragens, diques e cavas – a céu aberto ou subterrâneas – exauridas; e na forma de rejeito desaguado em pilhas controladas.

Estruturas conhecidas por barragens e diques possuem certa complexidade geotécnica, devido ao fato de que muitas vezes são construídas com os próprios rejeitos, desta forma, projetos construtivos devem ser consistentes e estar atrelados a um monitoramento contínuo na estrutura (LIMA, 2009).

Para execução de investigações geológico-geotécnicas em barragens ou diques são comumente executados ensaios de campo e de laboratório. Após obtenção dos resultados, deve-se realizar uma análise integrada e sistemática dos resultados adquiridos, com estudos anteriores, de forma a aumentar confiabilidade de informações. Além disso, é importante o acompanhamento da estrutura por meio monitoramento contínuo dos instrumentos, realização de análises computacionais consistentes, bem como aplicação de medidas preventivas e corretivas, quando necessário.

No Brasil, destaca-se a ocorrência de dois acidentes trágicos com barragens de rejeitos que geraram inúmeras fatalidades, além de impactos ambientais e socioeconômicos significativos. Foram estas a barragem do Fundão no município de Mariana – MG, em

novembro de 2015, da empresa Samarco e da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão no município de Brumadinho - MG, em janeiro de 2019, da empresa Vale S.A. Esses acidentes geraram o carregamento de 32,6 milhões de m³ de rejeitos em Mariana, o que ocasionou a morte de 19 pessoas e 7 milhões de m³ em Brumadinho que culminou na morte de cerca de 270 pessoas (ROTTA *et al.,* 2020).

Os acidentes decorridos, levaram a atualização de leis e regulamentos estaduais e federais, que estipulam novas regras para as empresas mineradoras, das quais se destacam a necessidade de descaracterizar barragens alteadas pelo método a montante e a necessidade de apresentação de um Plano de Ação Emergencial (PAE). Algumas das leis e regulamentos propostos nesse contexto foram a Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, atualizada pela Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020; a Resolução ANM nº 13/2019, que serve de auxílio para estabelecer o controle dos processos de disposição de resíduos; e a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, que consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

1.2 Justificativa e Relevância da Pesquisa

Acidentes como os que ocorreram na barragem de Fundão e da barragem da Mina Córrego do Feijão podem ser evitados, por exemplo, por meio de monitoramento contínuo dos níveis de água e das poropressões atuantes, além da realização de análises computacionais e dos possíveis movimentos microssísmicos ou sísmicos locais. O desenvolvimento tecnológico não se deve apenas à produção, é imprescindível a preocupação com uma adequada gestão de segurança de barragens e desenvolvimento sustentável (JONES; BOGER, 2012).

A maior parte das patologias associadas às barragens de terra estão relacionadas ao galgamento, erosão interna no corpo da barragem e erosão interna na fundação (ICOLD, 1995). O fluxo de água não controlado, pode provocar a erosão interna e/ou *piping*, na qual se forma um tubo, gerado pelo carreamento de partículas, que tende a aumentar seu diâmetro, caso não sejam criados elementos ou soluções para o correto encaminhamento do fluxo de água pela barragem.

Nesse sentido, estudos de percolação de água subterrânea e a busca por um diagnóstico correto das estruturas de barragens de rejeitos tem sido um assunto recorrente em diversos trabalhos (NAEINI; AKHTARPOUR, 2018; LYU *et al.,* 2019b; ZHANG *et al.,* 2020; CLARK *et al.,* 2020).

Para ter o conhecimento adequado no que concerne a estabilidade de uma estrutura, é imprescindível a definição de parâmetros geotécnicos característicos dos materiais constituintes do maciço e da fundação. Além disso, para se conhecer, às condições de fluxo subterrâneo, deve-se discorrer a respeito da condutividade hidráulica ou permeabilidade dos solos (K).

Nesse contexto, essa pesquisa visa apresentar as análises de percolação e análises de estabilidade das condições drenadas e não drenadas de uma barragem de rejeitos fosfáticos. As análises foram realizadas por meio de modelagem numérica em fases de pré-obra e pós-obra de execução de medidas corretivas. No decorrer desse trabalho, serão discutidos assuntos relativos as propriedades geotécnicas e hidrodinâmicas das barragens de rejeitos, fundamentos básicos para entendimento dos fluxos de água subterrânea, instrumentos de monitoramento e ensaios hidráulicos. Posteriormente, serão apresentados os dados históricos da estrutura objeto de estudo de caso, a metodologia adotada e, mais adiante, serão discutidos os resultados obtidos nas modelagens numéricas.

Ressalta-se que, esse trabalho possui caráter meramente acadêmico e não pode ser adotado como referência para elaboração de projetos e análises técnicas posteriores da estrutura analisada.

1.3 Objetivos

O objetivo principal e os objetivos específicos da pesquisa são apresentados nos subitens específicos.

1.3.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é apresentar um estudo de estabilidade geotécnica de uma barragem de rejeitos, por meio da realização da modelagem numérica da rede de fluxo e análises do fator de segurança. O primeiro cenário considera a avalição da estabilidade geotécnica em uma condição pré-obra e o segundo cenário, avalia novas condições de segurança em cenário de pós-obra, em que são avaliadas as melhorias dos fatores de segurança após a execução de obras de medidas corretivas.

Adicionalmente, serão apresentadas as principais observações realizadas durante as visitas de campo realizadas no local de implantação da barragem, bem como serão descritas as etapas básicas de execução do projeto de estabilização da barragem de rejeitos, que foi desenvolvido por uma equipe multidisciplinar de consultores e pela empresa proprietária da barragem.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar análise do banco de dados de auscultação e das campanhas de investigação de campo e de laboratório;
- definir as condições de contorno a partir de instrumentação geotécnica de campo e os cenários a serem estudados;
- modelar regimes de fluxo de água pelo Método de Elementos Finitos e obter suas respectivas vazões;
- realizar análises de estabilidade pelo Método do Equilíbrio Limite;
- obter os fatores de segurança globais e locais em cada cenário; e
- verificar a influência nos fatores de segurança, a partir das obras de medidas corretivas executadas, de forma a comparar os resultados obtidos para os diferentes cenários modelados.

1.4 Restrições e Limitações da Pesquisa

As limitações dessa pesquisa estão correlacionadas ao banco de dados disponibilizado pela empresa, uma vez que, não foi possível a realização de campanhas de investigação geológico-geotécnicas complementares, que pudessem contribuir para eventuais dúvidas acerca das características dos materiais constituintes da barragem em estudo.

Adicionalmente, cabe ressaltar que devido ao compromisso com a segurança da informação nessa pesquisa, não puderam ser publicados alguns dados ou referências oriundas do banco de dados disponibilizado pela empresa mineradora, proprietária da barragem de rejeitos, que foi avaliada durante estudo de caso. Para referir-se a barragem optou-se por utilizar o heterônimo “Barragem de Rejeitos Fosfáticos”, além de “Fosfato Mineração” para referir-se a empresa proprietária da estrutura e “GEOX Engenharia” e “GEOY Engenharia” para referir-se as empresas de consultoria que estiveram envolvidas na elaboração dos projetos de engenharia e execução das obras de estabilização.

1.5 Escopo da Dissertação

Para atingir seus objetivos, a dissertação está estruturada em seis capítulos. Na introdução (Capítulo 1) é feita uma contextualização do assunto da obra, em seguida são apresentados os objetivos do trabalho e uma apresentação resumida do conteúdo dos capítulos, de forma auxiliar na sua leitura.

No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura para o entendimento do contexto geral do trabalho e sua fundamentação. Assim, neste capítulo os assuntos tratados são, sobre

as barragens de rejeitos e seu comportamento hidráulico, modelagem de água subterrânea e método dos elementos finitos, instrumentos de monitoramento e; ensaios de permeabilidade em campo e laboratório.

No capítulo 3 é apresentado o histórico da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, objeto de estudo de caso deste trabalho, bem como as características técnicas da barragem e o contexto geológico regional, o qual está inserida. É apresentada ainda a situação atual da barragem e o acompanhamento dos projetos executivos realizados nos últimos anos.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia da pesquisa. Ficam explícitos os trabalhos realizados no que concernem a análise do banco de dados de auscultação e das campanhas de investigação de campo e de laboratório, os quais apresentam os dados de permeabilidade dos materiais e a definição das cargas piezométricas. Além disso, neste capítulo, são definidas as condições de contorno da estrutura e os momentos a serem estudados.

O capítulo 5 dispõe acerca dos resultados e discussões da pesquisa, o qual irá demonstrar produtos dos modelos numéricos, propriamente ditos. Neste capítulo, são apresentados os modelos de fluxo e as análises de estabilidade para dois momentos distintos e considerando material de rejeito drenado e não drenado. Os fatores de segurança são apresentados para cada caso estudado.

O capítulo 6 mostra as conclusões deste trabalho, em que são apresentados os principais resultados obtidos e algumas sugestões para pesquisas futuras e técnicas de melhoria operacional da estrutura avaliada.

Ao final, estão reservadas as referências, nas quais se baseiam este trabalho.

2.0 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Barragens de Rejeitos

A princípio, os impactos ambientais advindos da exploração de recursos minerais eram considerados desprezíveis e os rejeitos de mineração eram descartados em rios ou aterros de forma descontrolada. A literatura aponta que no Brasil, apenas em 1930 foram construídas as primeiras barragens de rejeitos, devido ao desenvolvimento tecnológico da sociedade e o aumento significativo na geração de resíduos. Estas estruturas eram pouco estáveis e existia pouco critério técnico para construção e operação das barragens. Apenas a partir de 1950, princípios fundamentais da geotecnia começaram a ser aplicados; e após 1970 aspectos técnicos como infiltração, liquefação e estabilidade da fundação foram inferidos pelos projetistas. Em 1980, começaram a ser considerados danos ambientais e estabilidade física e econômica de barragens (ÁVILA; SAWAYA, 2011).

Em 1988, a Constituição da República Federativa do Brasil, não trouxe expressamente a terminologia “Desenvolvimento Sustentável”, entretanto o Art. 225 estabeleceu este conceito da seguinte maneira:

> “Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988, Art. 225).”

Desta forma, foi possível assimilar que o “Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado” estava sendo tutelado, ou seja, não se cogitava manter o meio ambiente de forma intocável, pois já era evidente a necessidade dos seres humanos de usufruir de recursos naturais para sua própria existência.

No ano de 2022, o Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração – SIGBM apresentou, em fevereiro de 2022, 905 barragens cadastradas, sendo 188 construídas pelo método de jusante, 69 pelo método de montante ou desconhecido, 105 pela linha de centro, 504 construídas em única etapa ou apenas dique de partida e 39 não possuíam preenchimento.

Presentemente, no Século XXI, tem-se um novo desafio: proporcionar o desenvolvimento sustentável das mineradoras e reforçar a gestão de segurança de barragens por meio da solução de problemas operacionais que causam falhas, acidentes e/ou rupturas.

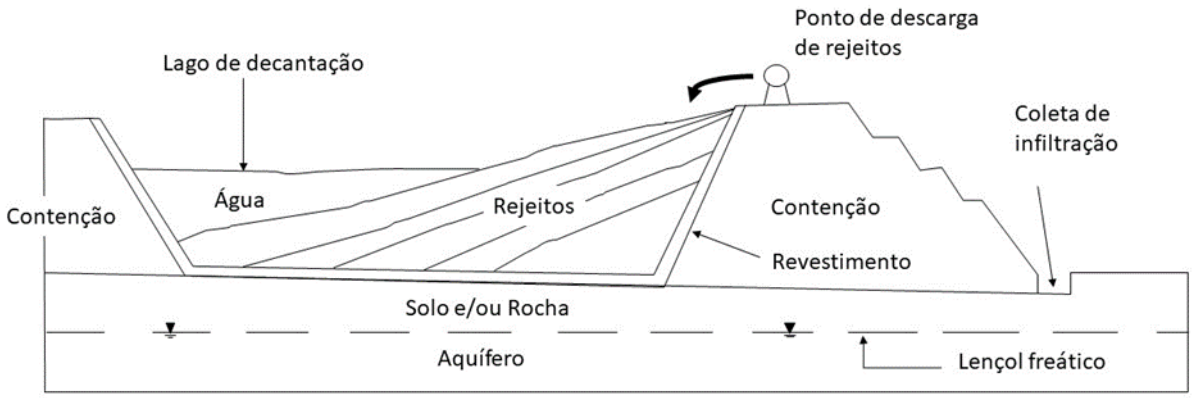
Segundo o *International Commission On Large Dams* – ICOLD (Boletim 121), os acidentes de barragens de rejeitos estão relacionados com: o método construtivo, balanço hídrico da estrutura e a inadequada gestão de segurança da operação.

2.1.1 Métodos Construtivos

Barragens de rejeitos (Figura 2-1) são estruturas construídas por aterro hidráulico, que recebem alteamentos sucessivos ao longo dos anos. São contenções destinadas a receber água e resíduos gerados no processo de beneficiamento de minério, os quais podem ser transportados, em forma de mistura, comumente chamada de polpa ou lama. O transporte da polpa, geralmente, é realizado com auxílio de tubulações que fazem a disposição hidráulica de rejeitos a partir das ombreiras ou extremidades do barramento (IBRAM, 2016).

Uma barragem de rejeitos é instituída por meio de um dique de partida, geralmente composto por enrocamento ou solo compactado e material drenante. Após o enchimento até a cota limite, o dique de partida é alteado. O material utilizado para construção dos alteamentos é o próprio rejeito lançado hidraulicamente ou material proveniente de áreas de empréstimo (IBRAM, 2016; SOARES, 2010).

Figura 2-1 - Esquema representativo de uma barragem de rejeitos típica.



Fonte: Adaptado Price (2009).

Cardozo; Pimenta; Zingano (2016) fizeram uma revisão sobre os diferentes métodos de construção de barragens de rejeitos existentes, podendo ser alteados por três métodos distintos: método de montante, método de jusante e método da linha de centro. Neste sentido, a escolha de um ou outro método de execução irá depender de diversos fatores, tais como características geotécnicas do rejeito, altura necessária para construção da barragem, nível de produção da mina, presença de sismicidade, topografia, disponibilidade de materiais de áreas de empréstimo ou estéreis próximos ao local da obra, pluviometria local entre outros. Todos estes fatores devem ser mensurados de acordo com as vantagens e desvantagens

associadas a cada método de alteamento e considerados durante a elaboração do projeto construtivo da barragem.

O Quadro 2-1 apresenta, resumidamente, as características de cada método construtivo e para auxiliar na leitura desse quadro algumas definições, como:

- Crista – Componente de acesso à barragem, localizado no topo do barramento. Também chamada de coroamento;
- *Spigots* ou hidrociclones – Equipamentos muito utilizados por mineradoras para lançamento da polpa na bacia de contenção. Os *Spigots* são uma sequência de pequenas tubulações e os hidrociclones são equipamentos que funcionam como ciclones que separam os materiais por densidade;
- Dique inicial ou dique de partida – estrutura de contenção feita com material argiloso compactado. Consistem em uma zona impermeável, que serve de base para construção de barragens (MACHADO, 2007).
- *Underflow* – Material que deixa o hidrociclone pela parte inferior, que por sua vez consiste na fração grosseira de rejeito;
- *Overflow* – Material que deixa o hidrociclone pela parte superior, que por sua vez consiste na fração fina de rejeito. Também chamada de lama;
- Liquefação – Fenômeno que ocorre em solos granulares saturados quando submetidos a carregamentos suficientemente rápidos para produzir um grande acréscimo das poropressões com a consequente redução das tensões efetivas e da resistência ao cisalhamento, resultando em uma passagem do rejeito do estado sólido para o estado líquido (FREIRE NETO, 2009).

Quadro 2-1- Características Gerais dos métodos construtivos de barragens de rejeitos

Método Construtivo	Método de montante	Método de jusante	Método de linha de centro
Características gerais	- Lançamento dos rejeitos a partir da crista, utilizando *spigots* ou hidrociclones; - As frações groseiras se depositam junto ao corpo da barragem.	- Separação dos rejeitos na crista por meio de hidrociclones; - Barragem com drenagem interna e impermeabilização a montante.	- Variação do Método de Jusante, em que a construção e alteamento do barramento ocorre tanto para montante quanto para jusante, acompanhando um eixo vertical, chamado de linha de centro.
Vantagens	- Menor custo; - Maior velocidade de alteamento.	- Maior segurança; - Compactação de todo o corpo da barragem.	- Menor quantidade de material de *underflow* em relação ao método a jusante.
Desvantagens	- Maior probabilidade de instabilidade em virtude da existência de finos não adensados próximo ao corpo da barragem; - Baixa compacidade do material; - Possibilidade de liquefação.	- Necessidade de grandes quantidades de *underflow* nas primeiras etapas; - Proteção superficial só no final da construção.	- Pode ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem; - Possibilidade de liquefação.

Fonte: Adaptado Cardozo; Pimenta; Zingano (2016).

Na prática, ainda é possível encontrar estruturas de contenção que utilizam mais de uma metodologia em sua construção. Tal combinação, pode ser utilizada em decorrência das diferentes fases de operações e as exigências em cada uma delas.

2.1.2 Propriedades Geológico-geotécnicas dos Rejeitos

A variabilidade das características dos rejeitos e sua influência no comportamento estrutural de barragens têm sido largamente estudadas há alguns anos. É comum observar divergências na obtenção de parâmetros ensaiados e dificuldades para estabelecer as condições de contorno adequadas ao realizar modelagens matemáticas. As causas para tal são abundantes, já que variabilidades podem ser encontradas tanto na formação e estrutura geológica natural, quanto no processamento de rejeitos, como na construção e operação das estruturas de contenção (SANTOS, 2004; CAVALCANTE; RIBEIRO; ASSIS, 2013; HU *et al.*, 2014; NAEINI; AKHTARPOUR, 2018; YAO *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020).

Conforme Hu *et al.* (2016) e Santos; Ribeiro (2007) compreender os efeitos químicos, mecânicos e operacionais de uma barragem de rejeitos exige amplo conhecimento, uma vez que, estas estruturas possuem, comportamento singular umas das outras em decorrência dos diferentes tipos de minérios e da variabilidade dos processos de beneficiamento empregados. Este fato pode acarretar a formação de rejeitos com diferentes granulometrias, densidade e formato dos grãos, que interferem diretamente na composição estrutural do aterro, apresentando discrepância dos parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade em uma mesma estrutura.

Um outro grande motivo para variabilidade recorrentemente encontrado na literatura é a técnica de lançamento de rejeitos por aterro hidráulico, cuja aplicação provoca um gradiente de concentração de partículas no aterro. Sendo assim, são encontradas distribuições aleatórias, ou em outros casos, também pode fazer com que partículas mais grosseiras sejam depositadas precocemente, enquanto partículas mais finas são depositadas, gradualmente, ao longo da trajetória de fluxo. Dessa forma, a dinâmica de deposição de rejeitos pode causar efeitos de segregação hidráulica com imprevisibilidade significativa (CAVALCANTE; RIBEIRO; ASSIS, 2013; VICK, 1990).

Albuquerque Filho (2004), investigou efeitos de segregação hidráulica, parâmetros de resistência e condições de fluxo em quatro barragens de rejeitos granulares utilizando Ensaios de Piezocone (CPTU) e ensaios de laboratório. Ao decorrer da pesquisa, o autor identificou a influência de diversos parâmetros como variabilidade da distribuição granulométrica ao longo da praia e ao longo da profundidade do depósito de rejeitos, densidade relativa, tamanho dos grãos, formato das partículas, ângulo de atrito efetivo, módulo de deformabilidade e anisotropia da condutividade hidráulica. Em seu trabalho, a variabilidade de resposta em decorrência das diferentes interpretações de autores para um mesmo tipo de ensaio ficou bastante evidenciada. A segregação hidráulica foi bem definida, mas por outro lado houve grande dificuldade para associar parâmetros do CPTU às granulometrias de rejeitos arenosos.

Mio (2005), estudou de maneira extensiva a influência da variabilidade do solo nas correlações de ensaios de campo utilizando CPTU e Piezocone Sísmico (SCPTU). O autor, afirmou que a variabilidade natural do solo está associada a fatores como condições geológicas locais e intemperismo. Para entender esses fatores foi necessária uma investigação intensiva e de boa qualidade, ao executar ensaios com tamanho adequado de banco de dados, o qual levava em consideração a variabilidade amostral presente na estrutura e o nível de conhecimento do problema. Desse modo, o grau de correlação entre as variáveis analisadas, a identificação de estratigrafias de transição, o comportamento colapsível e a

variabilidade interna do maciço de solo foram interpretados da maneira mais crítica e confiável possível.

Em modelagens matemáticas divergências entre parâmetros de campo, laboratório e a variabilidade de características no maciço de rejeitos e na fundação geralmente são contornados avaliando diferentes condições de contorno. Os autores Hu *et al.* (2014); Mengistu *et al.* (2019); Naeini e Akhtarpour (2018); Yao *et al.* (2020) e Zhang *et al.* (2020) estabeleceram comparações dos diferentes cenários com valores de campo (nível d'água, anisotropia, resistência ao cisalhamento). Logo, estabelecer resultados coerentes com os vistos em campo aumentaram fatores de segurança sob diferentes condições de trabalho e a confiabilidade de informações processadas.

2.1.2.1 Peso Específico

O peso específico ou densidade real de uma amostra de solo ou de rejeito é definido como a relação entre o peso das partículas do material e o peso de igual volume de água. Já a densidade aparente é definida pela relação entre o peso do sólido e seu volume total. Assim, tendo-se a densidade aparente e a real determinam-se os pesos saturados, naturais e secos dos grãos. O método para a obtenção da massa específica dos grãos é estabelecido pela ABNT NBR 6458: 2016.

2.1.2.2 Índice de Vazios

Segundo Fell *et al.* (2014), a proporção de vazios de um solo tem um efeito importante na permeabilidade tanto de materiais argilosos (também chamados de solos coesivos) como para solos arenosos. As argilas quando compactadas para uma razão de alta densidade (por exemplo, 98% da densidade seca máxima padrão) terão menor permeabilidade do que aquelas compactadas para uma razão menor densidade (por exemplo, 90%). Efeito similar ocorre em solos granulares, uma vez que, ao serem compactados a uma pequena razão de vazios (denso) comumente apresentam permeabilidades mais baixas, do que aqueles com uma alta razão de vazios (solto).

Os índices máximo e mínimo de uma amostra de solo ou de rejeito são determinados em ensaios de laboratório conforme NBR 16840: 2020 e NBR 16843: 2020, respectivamente. Essas normas estabelecem a determinação dos índices de vazios máximos e mínimos de solos não coesivos, que apresentam teor de finos inferior a 12%.

Hu *et al.* (2017) realizaram testes de laboratório para definição da condutividade hidráulica de rejeitos finos e grossos de cobre e ferro. Neste estudo, foi definida a relação do

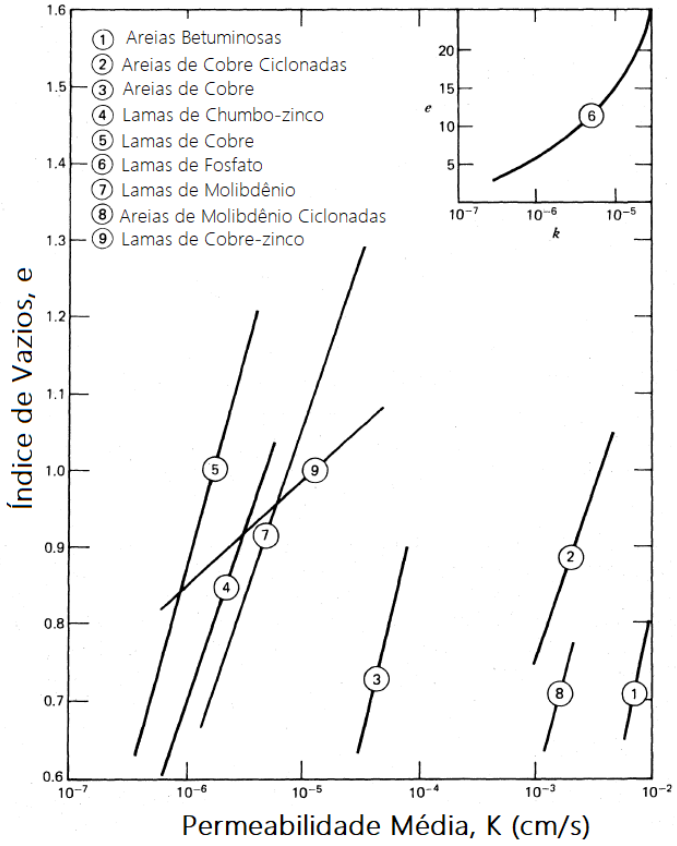
índice de vazios com parâmetro K por meio de testes de consolidação. Para melhor compreensão, os autores recomendaram a aplicação dos dados em modelagem numérica para análise de estabilidade das barragens.

Segundo Vick (1990) e Witt *et al.* (2004), a dependência entre o índice de vazios e a permeabilidade é quase linear e consistente para a maioria das areias de rejeitos e lamas de baixa plasticidade. Em geral, as areias podem apresentar uma diminuição da permeabilidade em torno de 5 vezes, enquanto a permeabilidade das lamas pode diminuir em aproximadamente um fator de 10 vezes, devido à sua maior compressibilidade (Figura 2-2). Assim sendo, tem-se que, geralmente, as lamas são capazes de controlar a permeabilidade vertical em um reservatório, onde as mesmas são depositadas juntamente com rejeitos arenosos. Dessa forma, as lamas podem aumentar a razão de anisotropia kh/kv no reservatório.

Por outro lado, a literatura aborda que as lamas de fosfato costumam ser exceções às generalizações sobre os efeitos da proporção de vazios. Apesar da alta plasticidade e a sua granulometria com dimensões de argila, razões de vazios extremamente altas deste material, apresentam permeabilidade em torno de 10^{-4} cm/s, enquanto graus de consolidação maiores, fornecem baixo índice de vazios e apresentam permeabilidade em torno de 10^{-8} cm/s, conforme Figura 2-2 (VICK, 1990; BITTAR, 2006; NICOLI, 2014; PEREIRA, 2017).

À vista disso, uma boa alternativa para entender esses parâmetros de maneira mais adequada é a realização de investigação geológico-geotécnica do material. Isto é feito por meio de perfurações, amostragem cuidadosa e a disposição de um histórico tão completo quanto possível do monitoramento das águas subterrâneas. É imprescindível, a definição da localização e o monitoramento das taxas de infiltração, dos níveis de água subterrânea e a resposta destes níveis em relação à chuva. Um refinamento pode ser feito da caracterização dos valores de permeabilidade em locais individuais, de forma a evitar falhas no registro de informações como em um período de chuva extrema (DANIEL, 1993; FELL *et al*., 2014).

Figura 2-2 - Variação da permeabilidade média em função do índice de vazios.



Fonte: Adaptado Vick (1990).

2.1.2.3 Condutividade hidráulica e permeabilidade

Na engenharia, a permeabilidade dos solos saturados é expressa em termos de condutividade hidráulica. Sendo este um parâmetro calculado por meio da lei de Darcy, cuja velocidade de escoamento do solo permeável é avaliada em uma única direção para simplificação de cálculo. Na prática, a água, tende a escoar por caminhos tortuosos e os solos possuem poros de tamanhos variados, fazendo com que a condutividade hidráulica possa apresentar diferentes taxas de escoamento nas direções horizontal e vertical. Ademais, vale acrescentar que, no caso de rejeitos, a condutividade hidráulica desses materiais depende, ademais, de vários fatores como formato e tamanho dos grãos, propriedades químicas do rejeito que afetam a molhabilidade e aderência da água no material, além de mudanças na textura, estrutura e compactação (VICK, 1990; PRICE, 2009; FELL *et al.*, 2014).

Características de permeabilidade dos rejeitos são utilizadas para integrar-se de conhecimentos como a posição da superfície freática, gradiente hidráulico, nível de poropressões no interior do depósito e a capacidade de armazenamento no reservatório. À vista disso, a avaliação da condutividade hidráulica dos rejeitos é fundamental para segurança

construtiva e operacional dos sistemas de drenagem interna e superficial da barragem. (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

A permeabilidade, ou melhor, coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (K) de um meio, descreve a habilidade com que um determinado fluido, geralmente água, tem para fluir através desse meio. A condutividade hidráulica é uma propriedade dependente tanto do meio poroso como do fluido que o atravessa, uma vez que, depende do grau de saturação, da densidade e da viscosidade do fluido, bem como da permeabilidade intrínseca do meio; que por sua vez, dependente da composição mineralógica, diâmetro médio do grão, formato, textura e distribuição de poros, conforme Equação 1 (PRICE, 2009; SARSBY, 2013; FELL *et al.*, 2014).

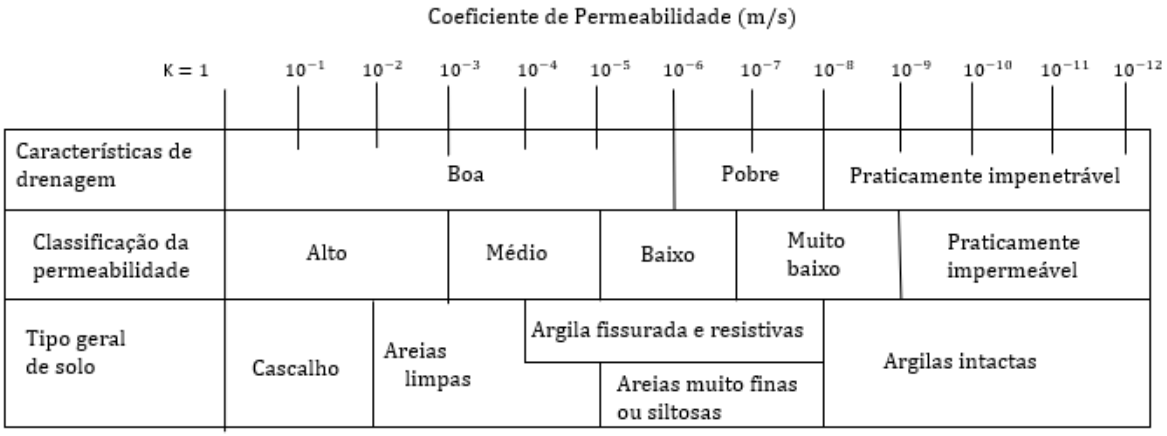
Equação 1

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

Onde, K é a condutividade hidráulica em m/s, k é a permeabilidade intrínseca em m², ρ é a densidade do fluido em kg/m³, g é a aceleração da gravidade em m/s²m e μ é a viscosidade dinâmica em N.s/m².

Com base nos estudos de Fell *et al.* (2014), faixas gerais de permeabilidade de solos naturais são mostrados na Figura 2-3.

Figura 2-3 - Permeabilidade para os principais tipos de solo.



Fonte: Adaptado Fell *et al.* (2014).

Já no caso de materiais de rejeitos, a permeabilidade média pode abranger cinco ou mais ordens de grandeza, de cerca de 10^{-4} m/s para rejeitos de areia limpos e grosseiros a 10^{-9} m/s para argilas bem consolidadas (SARSBY, 2000).

Entretanto, estimativas de permeabilidade média de rejeitos com base apenas no tamanho do grão, pode ser pouco representativo para os parâmetros de permeabilidade. Segundo Mittal; Morgenster (1975) além do monitoramento usual de controle de infiltração por

instalações de piezômetros, medições de densidade e permeabilidade *in situ* também são necessárias.

2.1.2.4 Isotropia e Anisotropia

Como explanado anteriormente, o parâmetro condutividade hidráulica é dependente tanto do fluído como do meio poroso. Logo, diferenças na formação geológica local ou irregularidades na deposição hidráulica dos rejeitos no aterro podem ocasionar diferentes valores para K nas direções vertical e horizontal. Quando K é independente da direção e posição, a formação geológica é isotópica e homogênea. Por outro lado, solos anisotrópicos e heterogêneos resultam em um K dependente da direção e posição de cada ponto (FREEZE; CHERRY, 1979; ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Em três dimensões, é possível considerar o sistema de coordenadas xyz coincidentes com as direções principais de anisotropia. Assim, obtém-se direções principais K_x, K_y e K_z. Em qualquer ponto (x, y, z), uma formação isotrópica possui $K_x = K_y = K_z$, enquanto uma formação anisotrópica apresenta-se com $K_x \neq K_y \neq K_z$ ou $K_x = K_y \neq K_z$. Vale lembrar que nem sempre o ângulo entre as direções é de 90°.

A velocidade de Darcy, anteriormente, apresentada na Equação 1, foi reescrita em vetor com componentes v_x, v_y e v_z, em função de h com derivadas parciais em três dimensões, conforme Equação 2:

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \qquad \text{Equação 2}$$

$$v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Naeini e Akhtarpour (2018) estudaram a poropressão acoplada a uma análise de estabilidade para uma barragem de rejeitos de cobre alteada pela linha de centro. Um modelo matemático considerou relações kv/kh diferentes para cada material constituinte da barragem. Sendo que esta relação recebeu valor de 0,8 para rejeitos granulares, 0,1 para lamas e, 0,4 para dique de partida composto por argila. A fundação com 10 m de espessura de argila e areia granular aparentou-se isotrópica.

Yu *et al.* (2020) estudaram o mecanismo de infiltração da chuva e os fatores que influenciam na instabilidade de taludes. A fim de prevenir e controlar desastres de deslizamento de terra, dois tipos de solo (argila e areia) e a direção principal da anisotropia

da condutividade hidráulica foram investigados. Ademais os fatores de segurança da inclinação sob diferentes relações de anisotropia foram avaliados. Os resultados mostraram que os efeitos da anisotropia para solo argiloso são muito pequenos e tem pouco efeito nos fatores de segurança. Por outro lado, solos arenosos tendem a maior variabilidade anisotrópica e menores fatores de segurança. À vista disso, os autores consideram imprescindíveis as considerações e avaliações para efeitos de anisotropia em solos arenosos, enquanto solos argilosos podem ser tratados como meio isotrópico, com o propósito de simplificação de cálculos.

Segundo Vick (1990), em reservatórios de rejeitos, onde têm-se zonas de transição entre areias relativamente limpas e lamas, há possibilidade de haver taxas de anisotropia mais elevadas, devido ao intervalo de partículas mais finas e mais grossas. Em estruturas onde procedimentos de descarga de rejeitos não são bem controlados, é possível encontrar extensas camadas de transição, em que kh/kv pode ser tão grande quanto 100 ou mais.

2.1.2.5 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo, consiste na resistência interna que o solo possui, em resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior. Os solos resistem a esforços cisalhantes em decorrência da mobilização da resistência no contato entre grãos, além da interferência do arranjo estrutural, que se promove um deslocamento relativo entre partículas. Assim, a resistência entre partículas depende do atrito entre grãos e da existência ou não de ligações físico-químicas entre partículas (coesão). Por sua vez, o imbricamento refere-se à resistência adicional causada pelas diferenças nos arranjos entre partículas (GERSCOVICH, 2009; DAS; SOBHAN, 2014).

Os parâmetros de resistência do solo podem ser representados por uma curva de tensão x deformação, que define o e estado de tensões arbitrário e as envoltórias de ruptura. Diversos critérios são aplicados para se estabelecer o melhor ajuste para o estado de tensões característico. Dentre eles, destaque o critério de Mohr, que se difere dos demais, devido a ruptura consistir em uma combinação das tensões normal e cisalhante. A equação matemática que define a envoltória de resistência segundo critério de Mohr-Coulomb é definida pela Equação 10:

Equação 3

$$\tau' = c' + \sigma' \, tg\phi'$$

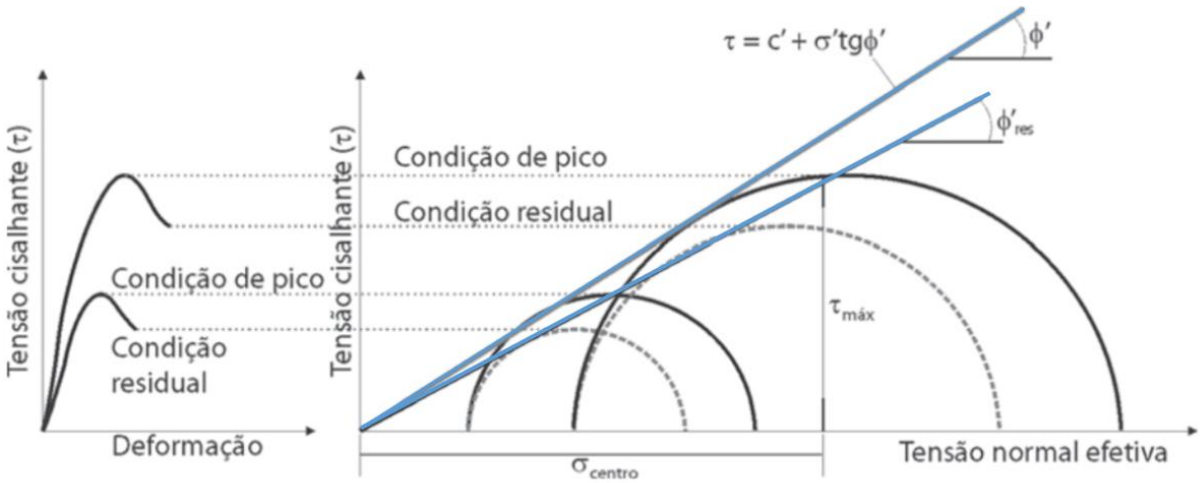
Onde,

c’, é o intercepto de coesão da reta tangente;

σ', é a tensão normal atuante no plano de cisalhamento;
ϕ', é o ângulo de atrito da reta tangente.

A Figura 2-4 mostra um exemplo dos círculos de Mohr correspondentes ao traçado da envoltória de resistência, a partir da ruptura nas condições de pico e residual.

Figura 2-4 – Determinação da Envoltória de Resistência



Fonte: Adaptado Gerscovich (2009)

Segundo Pinto (2006), os ensaios triaxiais básicos, no que se referem a avaliação das condições de drenagem específicas de uma amostra de solo, são: ensaio adensado drenado (CD), ensaios adensado não drenado (CU) e ensaio não adensado e não drenado (UU).

Para mais informações acerca da execução de ensaios triaxiais de laboratório, consultar Bishop; Henkel (1962); Das; Sobhan (2014).

2.1.3 Comportamento dos Rejeitos

A seguir são abordados assuntos acerca dos diferentes comportamentos saturado e não-saturado e drenado e não-drenado dos rejeitos.

2.1.3.1 Saturado e Não-saturado

É comum observar diferentes comportamentos saturado e não-saturado, onde há solos naturais ou aterros construídos. No caso de uma construção de um aterro, a compactação resulta em uma alteração de volume sob condições não drenadas, que pode aumentar a tensão total do aterro e, consequentemente, as poropressões dentro da estrutura (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

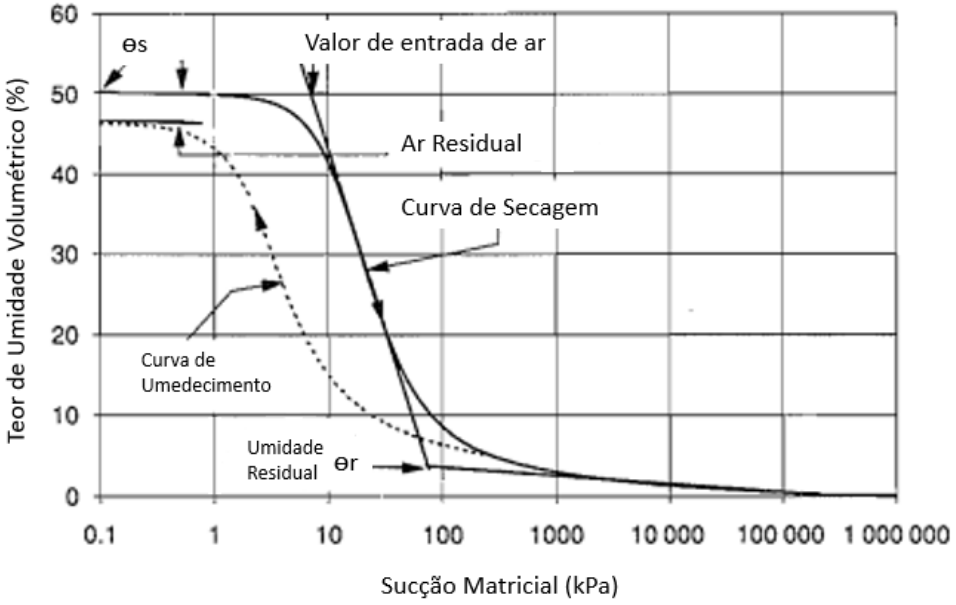
A condição de não saturação do solo ocorre na camada acima do lençol freático, onde a água preenche parcialmente os vazios e as tensões no fluido acima do nível d'água são negativas e denominadas de sucção. Poropressões positivas de água tendem a afastar as partículas sólidas, enquanto as negativas atuam como agentes de atração das partículas e, nesse caso, promovem um ganho de resistência adicional que depende do valor da sucção. Por outro lado, quando o solo se torna saturado, a pressão na água se aproxima da pressão do ar; tornando-se a sucção nula. Com isso, a envoltória de resistência passa a ser definida em termos de tensão efetiva (GERSCOVICH, 2016).

Uma curva de retenção pode ser aplicada para entender como o solo não saturado controla a presença da água no seu interior. A curva de retenção consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso e a energia necessária para remover essa água (CARVALHO *et al.*, 2015).

Segundo Fredlund e Xing (1994), uma curva de retenção de água pode ser aplicada para estimar vários parâmetros que são comumente utilizados para descrever solos não saturados, sendo, além disso, um procedimento aceitável para prever empiricamente a função de permeabilidade para um solo não saturado, usando, inclusive, o coeficiente saturado de permeabilidade e a curva característica. A Figura 2-5 apresenta um exemplo de curvas de retenção de água, uma determinada por secagem e outra por umedecimento.

Segundo Lu e Likos (2004), não existe um padrão definido para a apresentação das curvas de retenção e das funções de condutividade hidráulica, já que a configuração dessa curva depende de vários fatores, como por exemplo o tipo de solo. Numerosas abordagens foram propostas para representação matemática ou para previsão de uma curva de retenção. A maioria das publicações apresenta a condutividade hidráulica do solo em termos de sucção matricial, grau de saturação ou umidade volumétrica; sendo que três modelos são comumente adotados para aplicações de engenharia geotécnica, especificamente: o modelo de Brooks e Corey (1964), o modelo de Van Genuchten (1980) e o modelo de Fredlund e Xing (1994).

Figura 2-5 – Curva de retenção de água, determinadas por secagem e umedecimento.



Fonte: Adaptado Fredlund e Xing (1994).

Ainda segundo Lu e Likos (2004), tais modelos, mais adotados, são funções matemáticas simples que incorporam a condutividade hidráulica saturada e vários parâmetros de ajuste de curva. Os valores dos parâmetros de ajuste estão relacionados com a forma da curva de retenção de água e devem ser otimizados de acordo com o tipo de solo e tamanho de poro.

Conferir mais detalhes sobre as abordagens apresentadas em Leong e Rahardjo (1997); Soto (2004) e Carvalho *et al.* (2015).

Pak e Nabipour (2017), avaliaram como as diferentes características de infiltração afetam na estabilidade de barragens de rejeitos genéricas com diferentes geometrias. Os materiais de argila siltosa, silte arenoso e areia fina do corpo do aterro foram estudados como tendo características saturado-insaturado por meio da aplicação da função da condutividade hidráulica e método dos elementos finitos. Segundo os autores, o comportamento saturado-insaturado pode afetar no volume de descarga da estrutura, e na posição da superfície freática dentro da barragem, que por sua vez afeta fortemente na estabilidade da barragem. A partir dos estudos realizados, concluiu-se que o coeficiente de permeabilidade diminui com o a profundidade, devido a consolidação do peso próprio dos materiais de rejeito.

2.1.3.2 Drenado e Não-drenado

Em um mesmo caso pode haver solos saturados e não-saturados e/ou condição drenada e não drenada ocorrendo simultaneamente nos diferentes materiais envolvidos na

análise, sendo necessário ter um conhecimento adequado acerca das envoltórias de ruptura (ou de resistência) para cada um dos materiais (GERSCOVICH, 2009).

O comportamento drenado, refere-se a materiais de alta permeabilidade, como no caso das areias e rejeitos granulares, em que a drenagem ocorre rapidamente, dissipando o excesso de poropressão tão logo que o carregamento é aplicado. Já o comportamento não-drenado, refere-se a materiais, em que a drenagem se encontra impedida, como o caso de argilas saturadas.

O processo de beneficiamento de minérios, que geram elevada quantidade de finos, bem como a forma de deposição hidráulica em barragens e aterros construídos rapidamente, comumente, ocasionam materiais com características de comportamento não-drenado (ORTIGÃO, 2007).

Segundo Gerscovich (2016), os parâmetros geotécnicos de interesse prático para compreender o comportamento saturado/não-saturado e drenado/não-drenado de uma barragem são determinados por meio de investigações geotécnicas e ensaios de laboratório, a saber:

- parâmetros de condutividade: condutividade hidráulica saturada (k), função condutividade hidráulica k=f(Θ), curva característica ψ=f(Θ);
- características físicas: peso específico (γ), índice de vazios (e);
- parâmetros de resistência: ângulo de atrito (ø) e intercepto de coesão (c).

As solicitações não drenadas são típicas de solos argilosos e, também, podem ser observadas em areias com 20%, 30% e 40% de finos, uma vez que, têm seu comportamento influenciado pela fração de argila equivalente e podem ser denominadas de “areias fofas” (PINTO, 2006).

Sucumangi (2021) estudou o comportamento da uma barragem de rejeito de ferro em condições drenadas e não drenadas dos materiais mais finos pelo método de elementos finitos. Os resultados indicaram que para as análises de estabilidade, o fator de segurança foi cerca de 1,15 tanto para o comportamento drenado como para o não drenado em todos os últimos alteamentos acima da zona correspondente ao recuo do talude, refletindo uma forte perda de capacidade de carga nos rejeitos que constituem a fundação de novos alteamentos.

Em um estudo similar, Gitirana Jr.; Souza; Moura (2020), tiveram como resultados, fatores de segurança drenados na ordem de 1,74 e não drenados na ordem de 1,0. Segundo os autores, a diferença observada se deve à forma como a resistência ao cisalhamento foi

representada, uma vez que, se aplicou a condição drenada acima de linha freática. Desse modo considerou-se que solos não saturados apresentariam comportamento de materiais secos, sem excesso de poropressão. Ao contrário do comportamento não drenado, em que se aplicou a resistência não drenada em todo o maciço, independentemente da posição em relação à linha freática.

Nesse contexto, observa-se a necessidade de se estudar a estabilidade de uma estrutura geotécnica em diferentes condições, sendo muito importante a avaliação da capacidade do solo de resistir à determinada variação em seu estado de tensões, em casos onde o material possa apresentar um comportamento não-drenado. Vários autores aplicam os conhecidos de mecânica dos solos dos estados críticos para avaliar condições de segurança de estruturas em modelagem numérica. Citam-se os autores Souza (2020); Fonseca[1]; Fonseca[2]; Oliveira (2021), que também realizaram análises de estabilidade em condições drenadas e não drenadas para estruturas geotécnicas.

2.2 Águas Subterrâneas

Grande parte dos estudos sobre águas subterrâneas são voltadas para a sua importância como recurso. Para os fins deste capítulo, o termo “água subterrânea” será utilizado para identificar toda a água que ocorre em vazios abaixo da superfície do rejeito e que eventualmente poderá acarretar problemas de estabilidade de barragens.

Os modelos conceituais e modelos numéricos são ferramentas para entender e interpretar os fluxos de água subterrâneas no subsolo. Diferenças e justificativas são empregadas para aplicação de cada modelo, bem como as premissas iniciais para estudar e entender o comportamento de águas subterrâneas. As premissas são pautadas principalmente em equações, condições de modelagem, entendimento do problema, disponibilidade de informações e nas ferramentas de trabalho dos modelos.

2.2.1 Modelo Conceitual Para Fluxo de Águas Subterrâneas

Para simular fluxos de águas subterrâneas e entender o seu comportamento hidráulico é comum a elaboração de modelos conceituais, que por sua vez consistem em uma representação simplificada de um sistema físico hidrogeológico da área de interesse. Diversos autores estudaram o comportamento das águas subterrâneas utilizando modelos conceituais (Kpegli *et al.,* 2018; Segadelli *et al.*, 2016; Pham; Tsai, 2016; Lopert *et al.*, 2016; Cruz, 2014; Izady *et al.,* 2013; Machado, 2011; Silva; Loureiro; Pessoa, 2004). Para elaborar um modelo conceitual representativo e eficaz, é necessário a interpretação de especialistas para

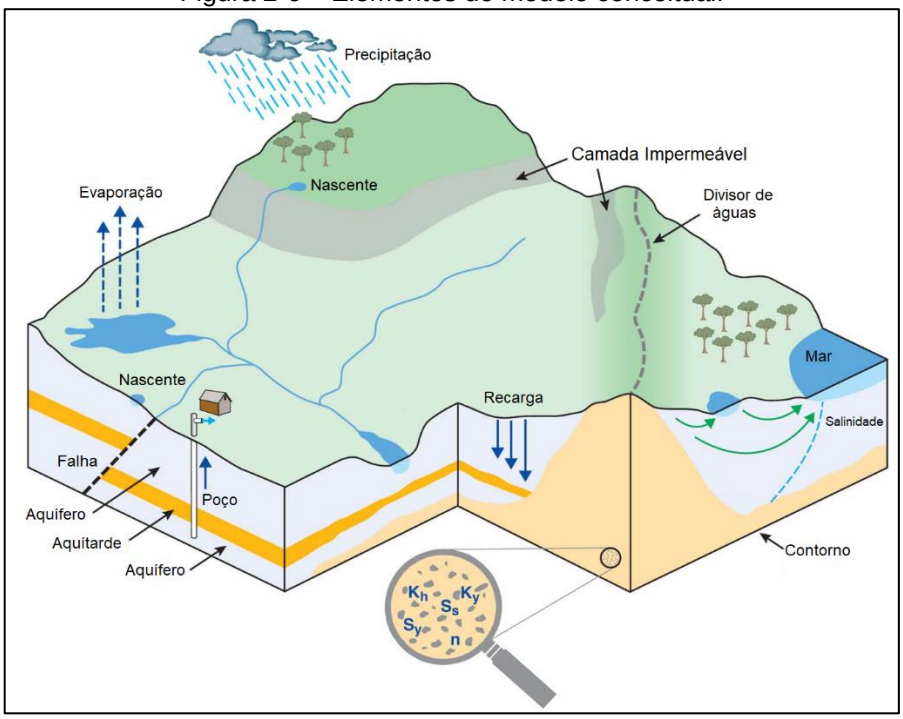
proporcionar confiança (Gedeon *et al.* 2013) e a apresentação de vários cenários que representam o mesmo problema (NEUMAN; WIERENGA, 2003).

Para elaborar um modelo conceitual são necessárias à compilação, interpretação e síntese de dados observados em campo como informações geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas. Desse modo, são relevantes a coleta de dados de níveis de água, cargas piezométricas, informações de poços e sondagens (BARNETT *et al.,* 2012).

Adicionalmente, isótopos (traçadores ambientais) e resultados de testes de bombeamento também são ferramentas úteis para definir e compreender a complexidade de um sistema hidrogeológico local, e por consequência, são boas ferramentas para construção de modelos conceituais e modelos numéricos. Os isótopos são capazes de identificar a idade das águas que estão diretamente relacionadas com a origem dos aquíferos. Por sua vez, os testes de bombeamento oferecem conhecimentos de parâmetros hidráulicos do aquífero como transmissividade, condutividade hidráulica, anisotropia, coeficiente de armazenamento e, também, o conhecimento das condições de contorno ou barreiras hidráulicas existentes (SEGADELLI *et al*., 2016; GEDEON *et al.,* 2013; MADRALA *et al.,* 2017).

A Figura 2-6, adaptada de Enemark *et al.* (2019), apresenta os elementos básicos de um modelo conceitual, que são: Kh = condutividade hidráulica horizontal, Kv = condutividade hidráulica vertical, n= porosidade, Ss= armazenamento específico e Sy= porosidade específica.

Figura 2-6 – Elementos do modelo conceitual.



Fonte: Adaptado Enemark *et al.* (2019).

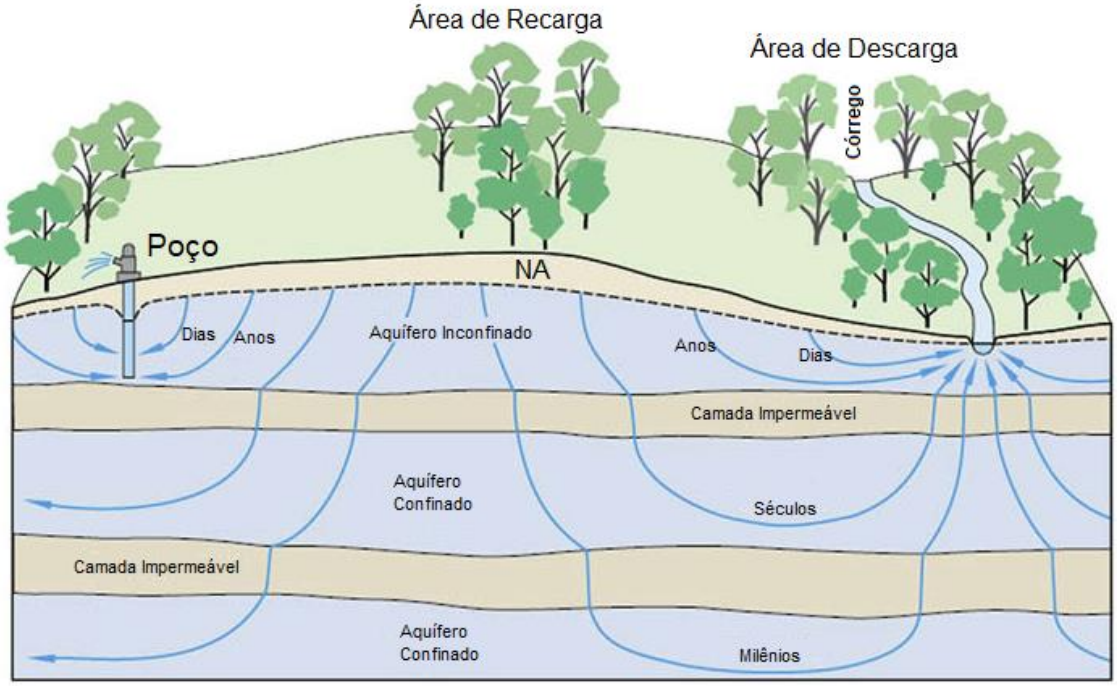
Segundo Cruz (2014) o modelo conceitual normalmente envolve um processo iterativo e deve ser continuamente atualizado quando novos dados são disponibilizados e/ou quando o entendimento do sistema é aperfeiçoado.

Para verificar o modelo conceitual, pode ser utilizado um modelo numérico. Deve-se ressaltar que um modelo numérico só pode ser suficientemente bem elaborado quando o modelo conceitual for preciso. Para maior representatividade dados piezométricos e dados geológicos são frequentemente usados para calibração e organização dos modelos. O modelo conceitual deve ser simples, porém, mantendo uma complexidade o suficiente para:

- Representar adequadamente os elementos físicos do sistema;
- Reproduzir o comportamento do sistema a ser estudado; e
- Facilitar as respostas relacionadas aos objetivos da modelagem.

Os pontos citados acima devem envolver a compreensão da geometria e as características do aquífero, bem como sua relação com os corpos hídricos superficiais. Também deve-se ater para a possibilidade de interpretar as condições de circulação e armazenamento das águas subterrâneas, desde a infiltração no solo, até a descarga de água. A Figura 2-7 representa um esquema de fluxo de águas subterrâneas, contendo elementos tais como Aquífero Confinado, Aquífero Inconfinado, Camada Permeável (azul), Camada Impermeável, Área de Recarga e Área de Descarga (IZADY *et al.,* 2013; KPEGLI *et al.,* 2018).

Figura 2-7 – Fluxos de Água Subterrânea em um Modelo Conceitual Genérico.



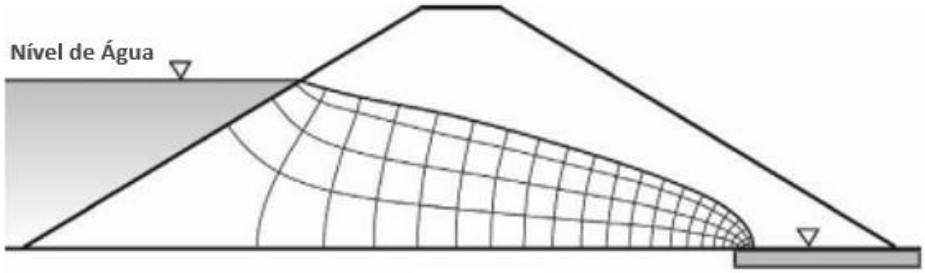
Fonte: Adaptado Anderson *et al.* (2015).

Segundo Anderson *et al.* (2015), os modelos conceituais de fluxo de água subterrânea devem incluir informações sobre condições de contorno, hidroestratigrafia, propriedades hidrogeológicas; direções de fluxo, fontes e sumidouros. Além disso, é importante apresentar uma informação que ajude a definir e restringir a conceituação, (estimativa de produção de águas subterrâneas baseada em campo, informações sobre a química da água.

2.2.2 Fluxo de Água Subterrânea em Barragens de Rejeitos

A Figura 2-8 apresenta um esquema de fluxo de águas subterrâneas característico de uma barragem implantada por um aterro homogêneo com composição, essencialmente, arenosa. Evidencia-se linhas equipotenciais (linhas verticiais) e caminhos de fluxo (linhas horizontais). Observa-se a queda do nível d'água em decorrência da presença da barreira hidráulica, com a água represada a montante da estrutura.

Figura 2-8 – Esquema de Fluxo de um aterro homogêneo de composição arenosa.



Fonte: Adaptado Laurence and Martin (2019).

Com relação as condições de contorno, deve-se considerar quais as futuras tensões a serem simuladas no modelo, assim é necessário responder as seguintes indagações:

- onde as águas subterrâneas e os solutos entram e saem do sistema de águas subterrâneas;
- quais as características físicas e os parâmetros geotécnicos das unidades geológico-geotécnicas envolvidas no processo;
- qual é a geometria do limite; isto é, sua extensão espacial;
- qual(is) processo(s) está(ão) ocorrendo na fronteira, isto é, recarga ou descarga;
- qual a magnitude e a variabilidade temporal dos processos que ocorrem na fronteira;
- Caso os processos foram cíclicos determinar qual é a frequência do ciclo.

Dessa maneira, nota-se que o contorno ou limite está relacionado com recursos físicos, como corpos d'água superficiais e rochas relativamente impermeáveis a impermeáveis, zonas de falhas ou fraturas; recursos hidráulicos, como divisões de águas subterrâneas, lagos, rios; e o lençol freático que forma o limite superior de um modelo (BARNETT *et al.,* 2012).

2.2.3 Lei de Darcy e Definição de Hubbert

Para estudar fluxos de água subterrânea, é comum utilizar a lei de conservação de massa de fluxo em estado estacionário proposta por Henry Darcy, em 1856. Assim sendo, caracteriza-se o fenômeno de percolação de fluidos em meios porosos, obedecendo as seguintes hipóteses:

- solo homogêneo;
- regime laminar e permanente;
- aproximação da Série Taylor;
- validade da lei de Darcy.

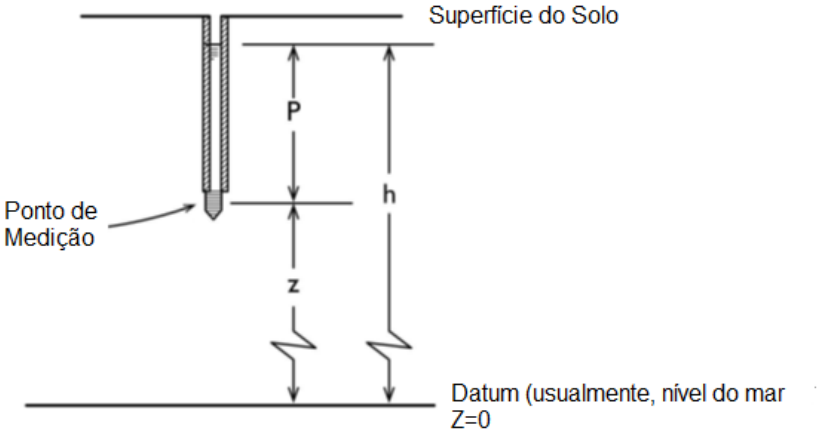
Segundo Hubbert (1940), para resolver problemas de fluxo, na prática, é necessário, uma quantidade física capaz de medir cada ponto do sistema, cujas propriedades são tais que o fluxo sempre ocorre a partir de regiões em que a quantidade tem valores maiores para aquelas em que tem valores menores, independentemente da direção no espaço. Assim sendo, a carga hidráulica definida por Darcy (1856), pode ser medida como a quantidade potencial, em que são necessárias a elevação e a pressão do fluido, conforme a Equação 4.

Equação 4

$$h = Z + \frac{P}{\Upsilon}$$

Desta forma, a carga hidráulica h é a somatória dos componentes: elevação no ponto de medição, ou carga de elevação z; p, a pressão atmosférica ou pressão exercida no ponto; Υ, o peso específico. Essa relação é fundamental para o entendimento do fluxo de água subterrânea, a Figura 2-9 apresenta como esse parâmetro pode ser medido no campo.

Figura 2-9 – Carga hidráulica h para um piezômetro.



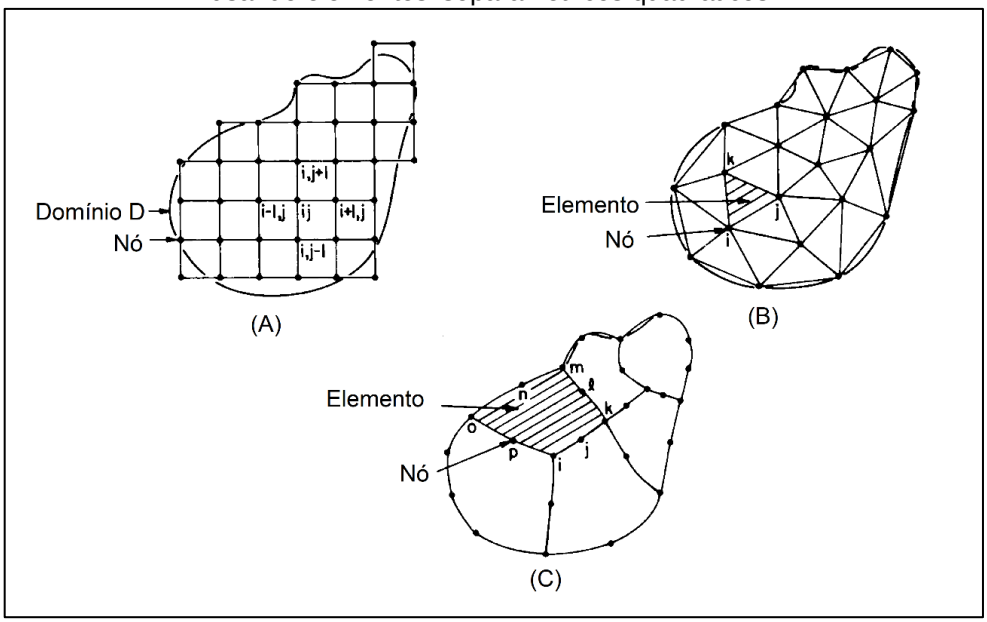
Fonte: Adaptado Freeze e Cherry (2017).

2.2.4 Modelo Numérico Para Fluxo de Águas Subterrâneas

Os modelos conceituais e os modelos numéricos sempre são desenhados para responder a uma pergunta específica ou conjunto de perguntas, seja para entender uma ação futura ou recriar condições passadas. Deve-se optar por aplicar o método numérico quando o problema é de grande complexidade e são necessárias informações mais robustas. Ainda hoje há uma grande incerteza nos modelos de água subterrâneas, que surge de uma série de fatores relacionados com a própria representação de processos de águas subterrâneas. Apesar disso, quando as condições representadas em um modelo conceitual não podem ser totalmente descritas ou quantificadas, como características de heterogeneidades no subsolo, uma boa saída para que a incerteza possa ser reduzida é a aplicação de modelagem numérica (GEDEON *et al.,* 2013; ANDERSON *et al.,* 2015).

A simulação numérica para a construção da rede de fluxo pode ser feita por meio de um programa computacional. Tais simulações são baseadas na discretização da região do fluxo (Figura 2-10), que consiste na divisão da região em um número finito de elementos. Durante o processo de simulação, as cargas hidráulicas e as propriedades hidrogeológicas serão apresentadas de maneira distinta para cada elemento. Dessa maneira, esta modelagem poderá trabalhar as complexidades e/ou propriedades de maneira singular com boas aproximações (PINDER; GRAY, 1977).

Figura 2-10 – Esquemas de Discretização de Elementos Finitos. (A) Discretização usando rede regular de diferenças finitas, (B) discretização usando elementos finitos triangulares, (C) discretização usando elementos isoparamétricos quadráticos.



Fonte: Adaptado de Pinder e Gray (1977).

Na literatura é possível encontrar diversos tipos de métodos numéricos, sendo que os mais comuns são a equação de diferenças finitas e método dos elementos finitos. Como visto na Figura 2-10, esses métodos diferem entre si pela formação de nós, o primeiro realiza varreduras por meio da rede nodal de malha retangular regular, ou seja, é aplicada uma equação de diferença finita para cada nó onde a carga hidráulica é desconhecida. Já o método de elementos finitos possui rede nodal de uma malha irregular, triangular ou quadrangular, podendo ser projetada pelo modelador conforme a sua necessidade (FREEZE; CHERRY, 2017).

Para casos mais simples é suficiente a aplicação de diferenças finitas, uma vez que, este gera economias resultantes no esforço computacional. Por outro lado, o método dos elementos finitos é capaz de lidar com situações mais complexas como a capacidade de estudar anisotropia em diversas direções, aquíferos heterogêneos, aquíferos irregulares ou curvos, situações dependentes do tempo e transporte de soluto (ISTOK, 1989).

Deve-se lembrar que o nível de detalhe a ser alcançado deverá depender do propósito da modelagem, além da disposição de dados de campo e das condições de contorno, que por sua vez, influenciam fortemente nas direções de fluxo calculadas no modelo numérico tanto no estado estacionário, como também na maioria dos modelos transitórios (ANDERSON *et al.,* 2015).

2.2.5 Método dos Elementos Finitos

Segundo Istok (1989) há cinco categorias no processo de modelagem: fluxo estacionário de água saturada, fluxo estacionário de água insaturada, fluxo transiente (dependente do tempo) de água saturada, fluxo transiente de água insaturada e transporte de solutos.

Segundo Barnett *et al.* (2012) para o estudo de rede de fluxo deve-se utilizar o método mais adequado para calibração do modelo. Será mais fácil e rápido obter soluções numéricas para o estado estacionário do que para fluxo transitório ou transporte de soluto; e, também, para soluções de água saturada, do que para água não saturada. Entretanto, deve-se ater, principalmente, para que o modelo seja bem calibrado e representativo. Por exemplo, o estado transitório irá resultar mais alto nível de confiança quando as variações no fluxo de águas subterrâneas devam ser avaliadas em curto espaço de tempo. Sendo assim, é também necessário definir a escala espacial (local ou regional) e a escala de tempo (estado estacionário ou transiente em diária, sazonal ou anual) dos vários processos, já que esta definição poderá influenciar o balanço hídrico da área específica de interesse.

A equação diferencial parcial que será usada neste trabalho, é também chamada de Equação de Laplace, que é derivada da Equação 4, levando em consideração o estado estacionário da água saturada em um meio homogêneo e isotrópico, obtendo a Equação 5.

Equação 5

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z}\right) = 0$$

Caso seja considerado o estado estacionário de um meio poroso anisotrópico a Equação 4 pode ser reescrita como (Equação 6):

Equação 6

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = 0$$

Onde K é condutividade hidráulica; e k_x, k_y, k_z são os componentes da condutividade hidráulica saturada nas direções das coordenadas x, y, z respectivamente.

Segundo Freeze e Cherry (2017) em um sistema de fluxo em estado estacionário, a velocidade pode variar de ponto para ponto, mas não varia com o tempo para qualquer dado ponto. Sendo assim, uma linha de fluxo a montante da barragem deve ser a mesma linha a jusante, e estas devem ser ortogonais as linhas equipotenciais em toda região do aterro. A escolha desta categoria deve-se pelo fato de que modelos matemáticos para barragens de rejeitos envolvem apenas água local em um período determinado.

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é o método mais utilizado para resolver problemas geotécnicos. Além de modelar o fluxo de água em barragens, também é comumente empregado para determinar o comportamento tensão-deformação nas diferentes etapas de construção e operação de barragens e na estabilidade de taludes (FELL *et al.,* 2014).

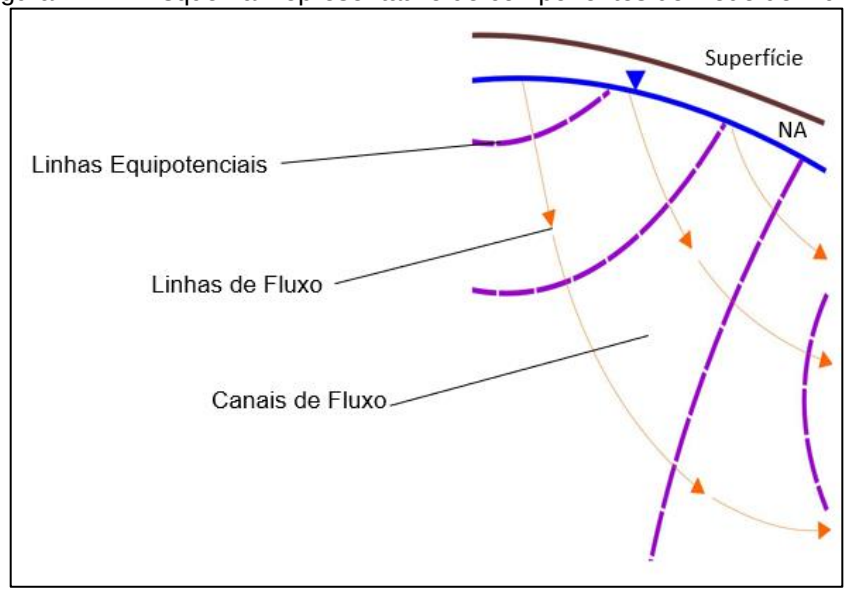
2.2.6 Rede de Fluxo

O resultado da modelagem numérica é a rede de fluxo de água subterrânea, o qual consiste em uma ou mais equações diferenciais parciais e um conjunto de condições de contorno (FREEZ; CHERRY, 2017).

Os modelos que utilizam as redes de fluxo, consistem basicamente em linhas de fluxo imaginárias, que ocorrem ao longo da qual uma partícula de água sai de uma zona de alto potencial (a montante) para uma zona de baixo potencial (a jusante). Existem um número infinito de linhas de fluxo, mas para um fluxo não turbulento, estas linhas não se cruzam. O espaço entre as linhas de fluxo adjacentes é denominado caminho de fluxo.

Um outro conjunto de linhas, denominadas linhas equipotenciais, também devem aparecer no modelo. As linhas equipotenciais se cruzam com as linhas de fluxo em ângulos retos, nelas um mesmo caminho de fluxo deve conter a mesma taxa de fluxo igual em todos os pontos. Dessa maneira, o conjunto de linhas de fluxo e linhas equipotenciais resultam em uma rede de fluxo, conforme esquema apresentado na Figura 2-11.

Figura 2-11 – Esquema Representativo de componentes de Rede de Fluxo.



Autoria Própria.

Os intervalos entre linhas equipotenciais adjacentes representam uma diferença constante na perda de carga total e a perda de carga total é compartilhada igualmente entre as quedas de cargas hidráulicas. Um cálculo prático pode ser traduzido conforme Equação 7.

Equação 7

$$\Delta H = \frac{H}{N_q}$$

N_q é o número de linhas equipotenciais do sistema; ΔH é a perda de carga total; H é a carga hidráulica no ponto observado.

A Figura 2-8 mostrou uma rede de fluxo isotrópica no interior de uma barragem homogênea. Nota-se que os caminhos de fluxo não são realmente quadrados, dado que eles são maiores e mais distorcidos em direção às extremidades das linhas de fluxo.

Bittar (2006), calibrou um modelo de fluxo estacionário para barragem de rejeitos fosfáticos utilizando MEF. O autor avaliou a estabilidade do depósito para seções críticas e o efeito de anisotropia da condutividade hidráulica. Para isso, foi feita a simulação em diferentes condições operacionais. A modelagem foi realizada com base nos dados de instrumentação e dados de permeabilidade de rejeitos estimados a partir de ensaio de campo e ensaios de laboratório. Dados de permeabilidade da fundação, dique de partida e elementos de

drenagem foram coletados do projeto construtivo. Dados de saída foram obtidos como cargas hidráulicas, pressões neutras, gradientes e vazões. Em diferentes cenários, o modelo de fluxo mostrou-se mais sensível para efeitos de segregação hidráulica durante rebaixamento da linha freática a montante. O modelo apresentou ajuste adequado utilizando leituras de piezômetro, ensaios de campo e permeâmetro de Guelph, enquanto permeabilidades baseadas em ensaios de laboratório não foram coerentes. Ademais, o talude de jusante da barragem, mesmo para o caso crítico simulado, encontrou-se praticamente seco.

Hu *et al.* (2014), estudaram o efeito do controle de infiltração na estabilidade de uma barragem de rejeitos durante sua construção em estágios. O recalque e a deformação dos rejeitos sob carga de gravidade foram modelados utilizando o MEF. Os resultados dos ensaios de campo e de laboratório foram inseridos como parâmetros do modelo e dessa maneira calculou-se a dependência da condutividade hidráulica com a porosidade e deformação volumétrica dos rejeitos. O desempenho dos drenos destinados e sua influência na estabilidade dos rejeitos também foram avaliados. Os resultados numéricos mostram que a variação induzida por tensão na permeabilidade de rejeitos pode ser de 1-2 ordens de magnitude. Foi possível concluir que um projeto adequado do sistema de drenagem é de grande importância para diminuir a superfície freática e proteger os rejeitos da erosão por infiltração.

Johari e Heydari (2018), utilizam o MEF para determinar a precisão de saídas e a exatidão de um método semi-analítico. Ao considerar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica nos rejeitos, foi avaliada a confiabilidade de infiltração em estado estacionário. O índice de confiabilidade do fator de segurança frente a um possível fenômeno de *piping* da barragem também foi avaliado. A abordagem proposta modelou geometrias complexas com bons resultados e afirmou concordância aceitável do método semi-analítico.

Naeini e Akhtarpour (2018), estudaram o comportamento dinâmico de uma barragem alterada pela linha de centro por meio de Método do Equilíbrio Limite (MEL) com acoplamento de análise de percolação pelo MEF. Além disso, foram analisados dados de infiltração saturado-insaturado, diferentes critérios sísmicos e análise de redistribuição de tensões. Como resultado, evidenciou-se que os contornos de tensão efetiva horizontal e vertical e excesso de poropressão mostraram que uma possível liquefação começaria a partir das camadas superficiais, e que sob entradas sísmicas mais fortes, o excesso de poropressão se desenvolveria em maiores profundidades do reservatório.

Zhang *et al.* (2020), utilizaram MEF em análises numéricas de percolação bidimensional e tridimensional, em que foram simuladas diferentes variações do nível de água na praia do

reservatório e de declividade do talude de montante. Posteriormente, os resultados foram acoplados nas análises de estabilidade dos rejeitos para verificação do maior fator de segurança. Os resultados apresentaram que uma menor linha freática na região da praia do reservatório obtém maior fator de segurança e, também, quanto mais alto for o declive a montante, maior o fator de segurança.

López-Acosta *et al.* (2019) utilizaram a aplicação de MEF 3D como uma ferramenta para avaliar sistemas complexos de poços de bombeamento. Na análise 3D foi necessário representar topografia com espessura e estratigrafia variáveis. Para isso essa análise definiu diferentes propriedades hidráulicas em cada unidade de solo e, posteriormente, realizou uma avaliação dos testes de bombeamento para auxiliar nas definições das condições de contorno do modelo e as propriedades hidrogeológicas do aquífero. Como resultado foi possível avaliar as condições de bombeamento em poços individuais e a interação entre cada poço no sistema. Sendo assim foi definido um projeto de poços de bombeamento com distância adequada entre eles, para otimizar seu funcionamento e prever a eficiência do projeto.

2.3 Método do Equilíbrio Limite

O conhecimento das condições de segurança de obras geotécnicas, tais como taludes e barragens, pode ser executada por meio de vários métodos, e o Método de Equilíbrio Limite (MEL) é um dos mais conhecidos (KALATEHJARI e ALI, 2013).

As equações dos métodos de equilíbrio limite, comumente, utilizadas para realizar análise de estabilidade de taludes fundamentam-se na hipótese de que as massas terrosas se encontram em equilíbrio e se comportam como um corpo rígido-plástico na iminência de deslizamento. Segundo Silva (2013), tais métodos têm por base três princípios:

- definição de fator de segurança;
- aplicação do critério de rotura de Mohr-Coulomb (mais utilizado) ou de Barton;
- seleção de uma superfície teórica de ruptura no talude, ou seja, a superfície de deslizamento.

Dessa maneira, tem-se que o objetivo da análise de estabilidade é determinar o fator de segurança de uma superfície de falha potencial. Conforme Yang (2014), o fator de segurança é definido como a razão entre a força de resistência e a força atuante, ambas aplicadas ao longo da superfície de ruptura, ou seja:

Equação 8

$$Fator\ de\ segurança\ = \frac{Força\ de\ resistência\ ao\ longo\ da\ superfície\ de\ falha}{Força\ atuante\ ao\ longo\ da\ superfície\ de\ falha}$$

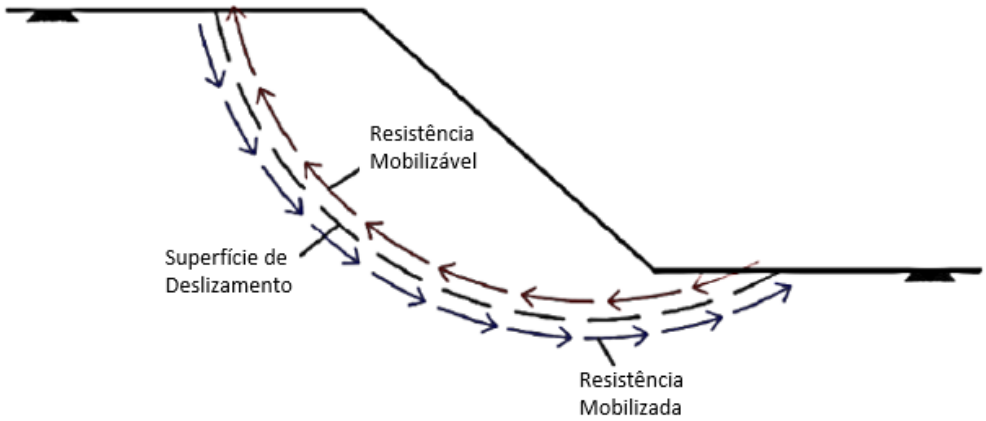
Para determinar o fator de segurança do talude, primeiramente, deve-se saber a resistência máxima que o talude irá suportar antes da ocorrência do deslizamento. Esta resistência máxima pode ser obtida pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, segundo o qual os materiais rompem, quando a tensão de cisalhamento, expressa pela Equação 9, dada em função da tensão normal (σ'), num determinado plano é igual ou superior a resistência ao corte do material. Para que não ocorra ruptura no talude é necessário que a tensão de cisalhamento que atua, ou seja que a tensão mobilizada, seja inferior que uma tensão mobilizável, conforme representado na Figura 2-12 (SILVA, 2013):

Equação 9

$$T_f = C' + \sigma' \tan \Phi'$$

Sendo C' a coesão efetiva; σ' a tensão efetiva atuante no plano e; **Φ**' o ângulo de atrito.

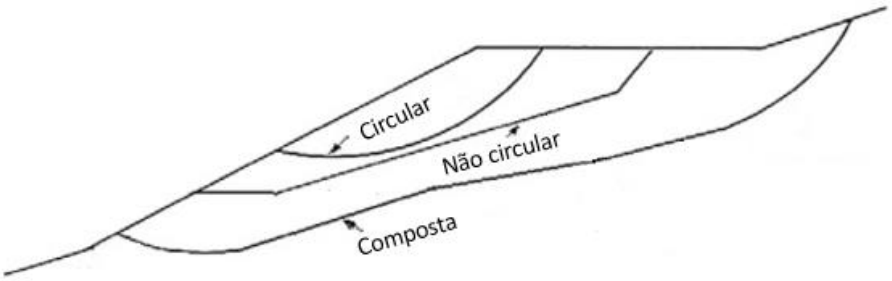
Figura 2-12 – Resistência mobilizável e resistência mobilizada para uma superfície de deslizamento



Fonte: Adaptado SILVA (2013).

Quando a força atuante devido ao peso e carregamento é igual à força resistente devido à resistência ao cisalhamento, o fator de segurança é igual a 1 e a falha é iminente. A forma da superfície de ruptura pode ser irregular, dependendo da homogeneidade dos materiais no talude, o que é comum em taludes naturais, onde as juntas relíquias e fraturas determinam o local da superfície de falha (YANG, 2014). A Figura 2-13 mostra três tipos de superfície de falha: circular, não circular e composta.

Figura 2-13 – Tipos de superfície de ruptura.



Fonte: Adaptado Yang (2014).

Quanto maior for o valor de FS acima de 1, maior é a margem de segurança do talude. Um coeficiente de segurança superior a 1,00 indicaria que o talude se encontra estável visto que, a probabilidade de ruptura não é significante. Por outro lado, a ruptura estará na iminência de ocorrer ou já ocorreu se o coeficiente de segurança for inferior a 1,00 (SILVA, 2013).

Segundo Yang (2014), existem dois métodos para analisar a estabilidade de taludes: análise de tensão total e análise de tensão efetiva. A análise de tensão total é baseada na resistência ao cisalhamento não drenada, dado que, nesta análise, a pressão dos poros deve ser tomada como 0 ao longo de qualquer superfície de falha, onde a resistência não drenada é especificada. Esta etapa não implica que as poropressões sejam realmente zero, mas, em vez disso, é feita para ser consistente com o fato de que a resistência não drenada determinada nos testes já incluiu o efeito da poropressão e não precisa ser considerada novamente na análise de estabilidade. Por outro lado, a análise de tensão efetiva é baseada na resistência ao cisalhamento drenada, portanto, a mesma não requer o conhecimento da poropressão (u).

De acordo com as boas práticas de engenharia (ABNT NBR 13028:2017), com relação ao método de análise de tensão efetiva, há três casos que precisam ser considerados: infiltração em estado estacionário, rebaixamento rápido e terremoto.

Já para calcular o fator de segurança, bem como realizar a análise de estabilidade, existem diversos métodos de cálculo como métodos de superfície de falhas planas, métodos gráficos, método de fatias, tridimensionais, probabilística, dentre outras. Dentre estes métodos se destacam o método das fatias, que se apresenta como uma ferramenta poderosa que pode ser usada para analisar declives de qualquer configuração, para diferentes solos e condições de águas subterrâneas (YANG, 2014).

No contexto do método de fatias, existem diversos métodos de cálculo, sendo que a principal diferença entre cada método está em quais equações de estática são consideradas e satisfeitas, quais forças normais e de cisalhamento entre fatias são incluídas e a relação assumida entre as forças entre fatias. O Quadro 2-2 resume as condições para alguns dos métodos comuns. Esta tabela lista quais equações de equilíbrio são satisfeitas, se a normal entre fatias está incluída, se o cisalhamento entre fatias é considerado e qual é a relação assumida entre a normal entre fatias e as forças de cisalhamento (KRAHN, 2002).

Quadro 2-2 – Comparativo entre os métodos de fatias disponíveis para cálculo do FS

Método	Equilíbrio de Momento	Equilíbrio de Força Horizontal	Intercorte normal (E)	Cisalhamento entre fatias (X)	Inclinação de X/E resultante
Ordinário ou Fellenius	Sim	Não	Não	Não	Sem Força
Bishop Simplificado	Sim	Não	Sim	Não	Horizontal
Janbu Simplificado	Não	Sim	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern-Price	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável
Corps of Engineers - 1	Não	Sim	Sim	Sim	Inclinação de uma linha da crista ao pé
Corps of Engineers - 2	Não	Sim	Sim	Sim	Fatia a inclinação da superfície do solo superior
Lowe-Karafiath	Não	Sim	Sim	Sim	Média da inclinação da superfície do terreno e inclinação da base da fatia

Fonte: Adaptado KRAHN (2002).

De acordo com o Quadro 2-2, nota-se que a equação proposta por Morgenstern-Price é um método conservador que utiliza todos os critérios e condições disponíveis. O método do Equilíbrio Limite Geral – General Limit Equilibrium Method (GLE) – foi proposto por Fredlund e Krahn na década de sessenta do século XX, baseando-se pela Equação 10 proposta por Morgenstern-Price (KRAHN, 2003).

Equação 10

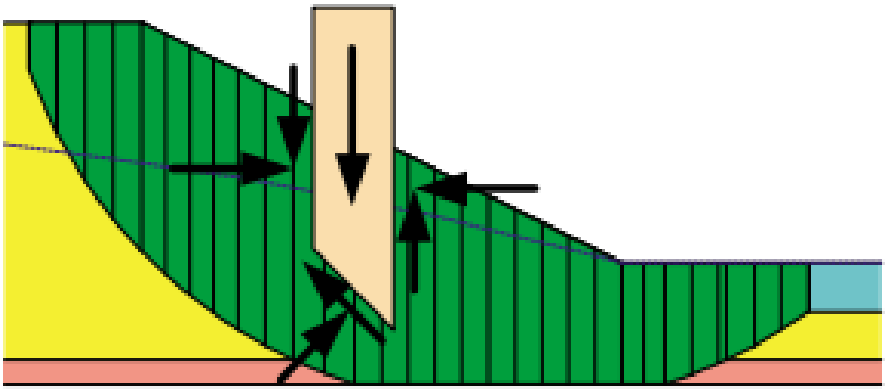
$$X = E * \lambda * f(x)$$

Onde, f(x) é uma função, λ é a porcentagem (em forma decimal) da função usada, E é a força normal entre fatias e X é a força de cisalhamento entre fatias.

Em especial, este método fundamenta-se em dois fatores de segurança, por isso satisfaz todas as equações de equilíbrio. Uma destas equações traduz o coeficiente de segurança tendo em conta o equilíbrio de momentos (FSm) e a outra o coeficiente de segurança tendo em conta o equilíbrio das forças (FSf). Assim, o fator de segurança que satisfaz as duas de condições de equilíbrio será o FS (SILVA, 2013).

A Figura 2-14 ilustra uma fatia típica em uma massa deslizante potencial com as forças atuando na fatia. Forças normais e de cisalhamento atuam na base da fatia e nos lados esquerdo e direito da fatia (KRAHN, 2003).

Figura 2-14 – Fatias e forças em uma massa deslizante.



Fonte: Adaptado KRAHN (2002).

A análise por Equilíbrio Limite pode ser feita manualmente, mas, com o desenvolvimento de *softwares* específicos, a aplicação dos métodos de análise de estabilidade ficou mais rápida e simples (ARAÚJO, 2006). Com a utilização do *software*, a análise de elementos finitos pode ser acoplada em uma análise de equilíbrio limite, onde o estado de tensão é calculado, por meio de inserção de parâmetros de resistência e o peso específico dos materiais envolvidos. O resultado corresponde a qualquer superfície de deslizamento possível e na obtenção de fatores de segurança (FS) de superfície de ruptura. Por outro lado, também é possível considerar uma análise de estabilidade direta, simplesmente denominada de Método de Equilíbrio Limite (MEL).

Mais abordagens e detalhamentos sobre método do equilíbrio limite e os cálculos de fator de segurança podem ser encontrados nas referências especificas sobre o tema, conforme KRAHN (2002), (SILVA, 2013) e YANG (2014).

2.4 Instrumentos de Monitoramento

No contexto da segurança de barragens, este capítulo aborda sobre os métodos necessários para monitorar o nível d´água e nível piezométrico. Os estudos envolvem inspeções visuais e monitoramento de nível de água e/ou piezométrico de forma manual ou automatizada.

Segundo Sarsby (2013), os instrumentos instalados em campo, geralmente possuem o propósito de verificar a segurança de uma estrutura durante sua operação, construção ou para confirmar as premissas do projeto. Outros objetivos consistem em determinar as condições

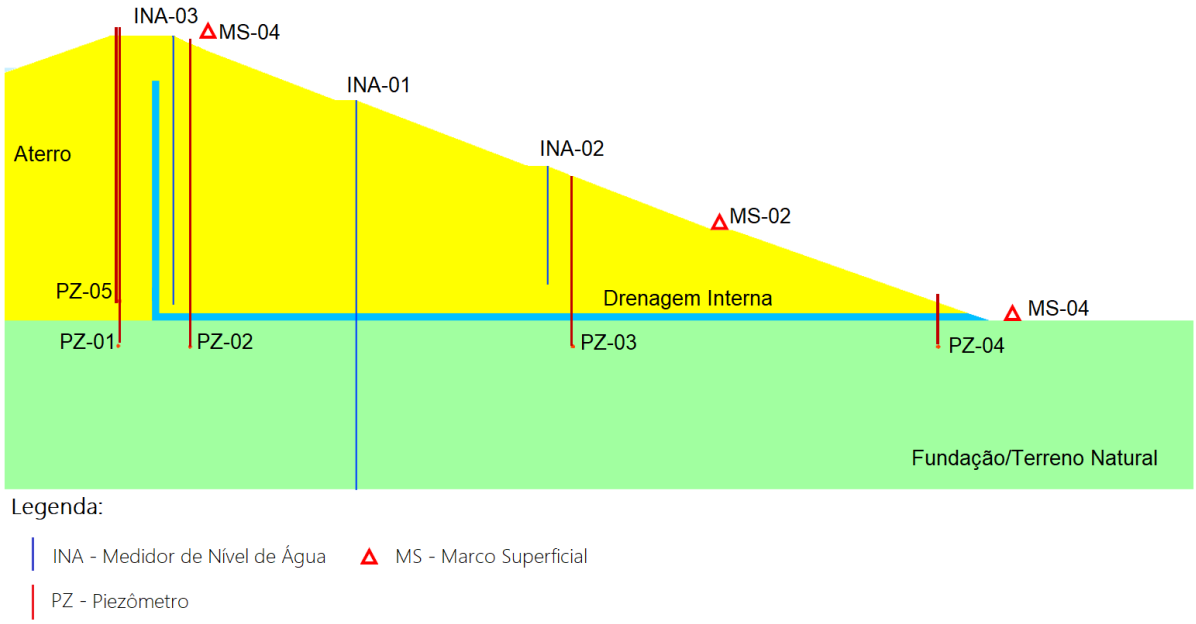
iniciais do solo ou do ambiente, como realizar observações da água subterrânea (investigação do solo) antes de uma construção. À vista disso, todo instrumento instalado deve ser justificável e deve ser localizado de forma a auxiliar na resposta de uma questão definida e específica. Em geral, os parâmetros a serem monitorados são os seguintes:

- poropressão / água subterrânea – refere-se à tensão efetiva, resistência ao cisalhamento, consolidação e recalque;
- tensão total – geralmente é a pressão total medida em um limite, embora as tensões dentro de uma massa de solo possam ser importantes; e
- movimentos – recalque, recalque diferencial e deflexão lateral.

Em específico, o monitoramento de infiltração das águas subterrâneas deve ser considerado como uma parte básica e indispensável de um sistema de monitoramento de barragens. Juntamente com a instrumentação instalada na barragem, devem ser realizadas inspeções visuais, que são muito eficazes para detectar infiltrações diretamente (água de infiltração na superfície) ou indiretamente (mudanças na vegetação). Quando ocorre a infiltração indesejada, ou seja, em locais não planejados, esta geralmente se manifesta na encosta a jusante e no contato com a massa rochosa. Logo, ao notar o aumento significativo de infiltração é necessário monitorar a quantidade do fluxo de infiltração (ICOLD, 2018).

O tipo de fundação da barragem como solo permeáveis normalmente requerem mais inspeção e monitoramento do que a mesma barragem em uma fundação rochosa, além disso barragens mais antigas e de grande porte também possuem um nível mais alto de inspeção e monitoramento. Logo, reitera-se a necessidade de que os instrumentos devem ser determinados de forma singular, levando em consideração a necessidade do projeto construtivo e de cada barragem (DUNNICLIFF, 1982; FELL *et al.*, 2014). A Figura 2-15 apresenta um arranjo estratégico de pontos de monitoramento em uma barragem de rejeitos.

Figura 2-15 – Localização de pontos de monitoramento em uma barragem de rejeitos.



Fonte: Adaptado Ribeiro (2021).

A taxa total de descarga natural, ou seja, a vazão de saída no sistema de drenagem interna, fornece uma indicação do comportamento global das infiltrações, podendo variar de acordo com a elevação do reservatório e pelas condições atmosféricas. Entretanto, quando ocorre anomalias na infiltração através e embaixo de uma barragem, a origem de pressões intersticiais assumem uma importância primordial para a estabilidade da estrutura. As infiltrações de água devem, portanto, ser monitoradas de perto, pois cada desvio do estado normal representa uma evolução das pressões intersticiais, que também são chamadas de aumento de poropressão (ICOLD, 2018).

Para ter conhecimento das condições de estabilidade de uma estrutura é necessário controlar todas as variáveis/fatores que afetam a equação de equilíbrio de estabilidade de uma barragem. Para isso, podem ser instalados e monitorados diversos tipos de instrumentos na barragem como Piezômetros (PZ), Indicadores de nível de água (INA), Marcos superficiais (MS), Medidores de vazão (MV), pluviômetros entre outros. Estes podem identificar excessos de poropressões, nível de freático da estrutura e deslocamentos horizontais ou verticais.

O registro contínuo dos níveis de água utilizando instrumentos como INA's e piezômetros, fornecem o conhecimento da linha freática e das poropressões existentes, que é um fator primordial para estudos de comportamento geotécnico de barragens.

Hui; Charlebois e Sun (2018) fizeram um breve histórico acerca dos acidentes de barragens nos últimos anos, associando os acidentes a falta de projetos adequados, operação diligente e contínua, além de monitoramento básico. Ademais, foram comparados

instrumentos convencionais e os de nova tecnologia em relação as suas aplicações, vantagens e limitações tecnológicas. Os autores relatam a necessidade de que o monitoramento e inspeção periódica dos instrumentos, devem ser atrelados a sistemas de monitoramento semiautomático e em tempo real para aumentar a confiança no desempenho destas estruturas.

De maneira similar Lima e Guimarães (2019), apresentaram características, vantagens e desvantagens da utilização de instrumentos automatizados. Os autores confirmaram a facilidade de uso pelas equipes de campo, aumento na qualidade de informação que minimizam erros, redução de custos e aumento da qualidade de informações. Entretanto, reforçam a necessidade destes equipamentos serem continuamente aprimorados, para que alcancem cada vez mais confiabilidade nas medições de campo.

2.4.1 Pluviômetros

Para medir certa quantidade de chuva precipitada são utilizados instrumentos graduados contendo um reservatório e uma superfície coletora. O volume do equipamento deve ser suficiente para coletar precipitações de diferentes alturas em um determinado período. Geralmente, localizam-se em pontos mais altos em torno da barragem, longe de árvores ou estruturas que atrapalhem a coleta de água, podendo ser equipamentos manuais ou automatizados. Estes primeiros são chamados de pluviômetros (Figura 2-16), os quais realizam leituras em intervalos de vinte e quatro horas. Já os automatizados são chamados de pluviógrafros e são utilizados em estações meteorológicas, cujo funcionamento se dá por meio de um *software* acoplado com memória, que permite registro de chuva ao longo do tempo.

Figura 2-16 – a) Pluviômetro modelo Ville de Paris.



Fonte: Adaptado Batista (2019).

Segundo Machado (2007), as medidas realizadas pelos pluviômetros são: altura pluviométrica, intensidade de precipitação e duração da chuva. Tais medidas, determinam vazões de escoamento superficial e taxas de infiltração. Além disso, auxiliam no dimensionamento de dispositivos de drenagem superficial ou a necessidade da implantação de novos dispositivos.

Segundo Castro (2008), medições pluviométricas serão indispensáveis para avaliação do comportamento do nível d'água no corpo da barragem, uma vez que, medidas pluviométricas ao serem comparadas com medidas de vazão à jusante da barragem, promovem a diminuição de erros na interpretação dos dados e maior confiabilidade na interpretação de resultados.

2.4.2 Indicador de Nível D'água – INA

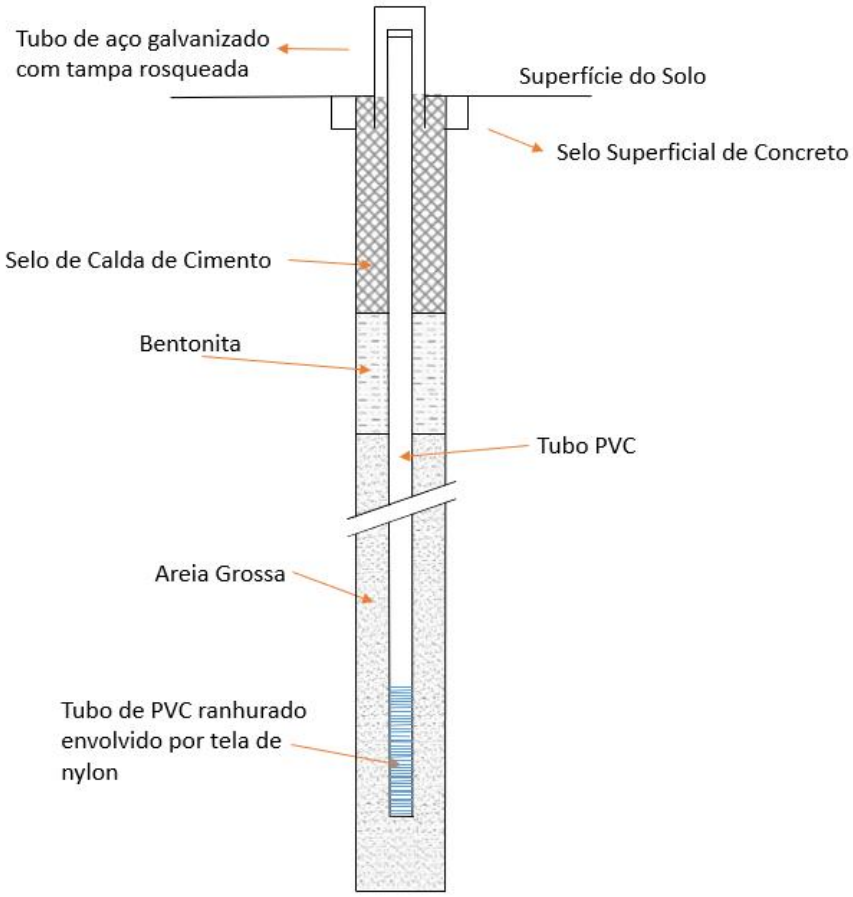
O Indicador de Nível de Água – INA é um instrumento simples, largamente utilizado e fácil de operar. Seu objetivo é determinar a posição da linha freática ao longo do maciço, ou seja, determinar somente o nível médio da água do solo ou rocha.

Para instalação deste dispositivo é necessário a execução de um furo de sondagem ou poço. Na prática, muitas vezes ocorre de um furo de sondagem já planejado, que também servirá, posteriormente, para implantação deste dispositivo.

O INA consiste em um tubo de PVC com ranhuras ou perfurações em sua totalidade ou na grande maioria de seu comprimento, permitindo a entrada de água subterrânea. Dessa maneira, o nível da água do terreno será correspondente ao nível d'água – N.A dentro do tubo.

No local onde o instrumento é instalado deve haver uma simples caixa de proteção de concreto, de forma a evitar movimentação do tubo e garantir a união entre o furo de sondagem e o tubo. Dessa maneira, o instrumento estará protegido de águas superficiais ou chuvas que inviabilizam a leitura corretamente. Um selo inferior é composto lama bentonítica acima do nível freático. A Figura 2-17 apresenta a estrutura de um INA padrão.

Figura 2-17 - Indicador de Nível de Água.



Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Segundo Bittar (2006) a posição da linha freática é essencial para análise de estabilidade do talude de jusante da barragem e sua posição depende de três fatores, são eles: localização do N.A. de operação do reservatório em relação à crista da barragem; do efeito da anisotropia ao longo da praia e do efeito das condições de permeabilidade da fundação da barragem.

2.4.3 Piezômetros de Tudo Aberto ou Casagrande (Standpipe)

O piezômetro é um dispositivo básico para medir a carga hidráulica, com o qual a carga de pressão e elevação do nível de água pode ser determinados. De mesmo modo que os INAs, os piezômetros também devem ser selados ao longo de seu comprimento, mantendo-se uma porção de tubo ranhurado disponível para o fluxo de água na parte inferior e aberto no topo para a atmosfera.

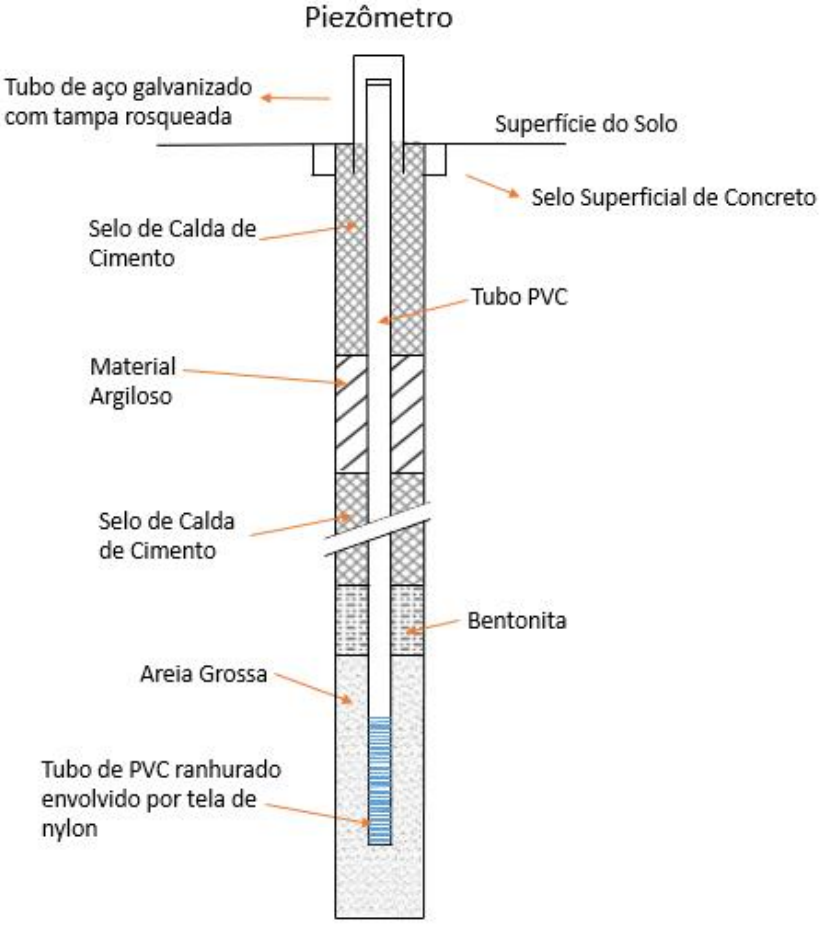
A diferença entre esses dois instrumentos é que o piezômetro realiza a medição da sua base, e não a medição do nível da superfície do fluido. Para que isso seja possível, a ranhura tubo é isolada com bentonita (comprimida e seca) no topo do filtro. O restante do orifício acima

do filtro é preenchido e selado normalmente com uma argamassa de cimento e bentonita. A Figura 2-18 apresenta um piezômetro padrão, também chamado de piezômetro de Casagrande. O piezômetro consiste em elemento poroso para medir as pressões dos poros e assim como os INAs, os piezômetros também são instalados após a execução de um furo de sondagem ou poço e, também, podem ser instalados tanto em solo como em rocha.

Segundo Machado (2007) as variações dos registros piezométricos podem ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições:

- Aumento da vazão de percolação;
- Elevação do nível de água de montante e jusante;
- Aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezômetro; e
- Redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezômetro.

Figura 2-18 – Piezômetro de Casagrande.



Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Segundo Mendes (2008), o uso de piezômetros próximos à base ou em profundidades mais rasas pode ser irrelevante, pois as poropressões aproximam-se da hidrostática. Adicionalmente, o autor ressaltou que os piezômetros tipo e Indicadores de Nível de Água não possuem um tempo de resposta rápido. Em algumas barragens de rejeito são necessários vários dias para que ocorra a equalização da leitura.

2.4.4 Poços Tubulares

Poço tubular, artesiano ou de bombeamento (Figura 2-19), é aquele onde a perfuração é feita por meio máquinas perfuratrizes à percussão, rotativas e rotopneumáticas. Possui alguns centímetros de abertura (no máximo 50 cm), revestido com canos de ferro ou de plástico (COSTA FILHO, 1998).

Figura 2-19 – Poço de Bombeamento com bomba instalada.



Fonte: Fosfato Mineração (2020).

Em geral, poços tubulares são na maioria das vezes utilizados para captação de água subterrânea de aquíferos. Por outro lado, na mineração, além da captação de água, os poços tubulares também, são comumente, construídos para rebaixamento de nível de água local e monitoramento ambiental.

Os poços de bombeamento podem ser utilizados para rebaixamento de nível de água em barragens, diques ou *sumps* ou quando há a necessidade de execução de pontos de alívio

na fundação. Além disso, podem ser aplicados para rebaixar o nível freático natural, quando há presença de uma cava de mineração ou de um aterro de resíduos.

Já os poços de monitoramento são instrumentos permanentes, que permitem a caracterização do meio saturado e meio não saturado, medição do nível d´água, execução de ensaios de caracterização hidráulica, coleta de amostras de solo representativas para descrição litológica e caracterização dos possíveis contaminantes, coleta de amostras de água subterrânea para análises químicas, físicas e biológicas e monitoramento das condicionantes hidrogeológicas e hidrogeoquímicas locais.

A instalação de um poço tubular, em rochas duras ou brandas, deve ser realizada de acordo com as especificações da ABNT NBR 15495 (2007). Em suma, as seguintes operações devem ser executadas: (a) Perfuração; (b) Aplicação do revestimento; (c) Encascalhamento - quando for o caso de aplicar seções filtrantes no revestimento; (d) Desenvolvimento - destinado a assegurar a produção de água limpa sem carreamento de areia; (e) Cimentação - necessária para confecção de uma proteção sanitária ou isolamento de águas de má qualidade; e (f) Teste de produção.

Nesse contexto, um poço tubular é, comumente, composto por um tubo revestimento de material inerte, filtro com ranhuras, pré-filtro, bentonita (argilomineral com característica expansiva), além de um espaço anelar entre as paredes do poço e a sondagem, que por sua vez será preenchido com material filtrante e pré-filtro de areia grossa. Por fim, o poço deve ser protegido, fechado com tampa e cadeado, para que não haja influência externa.

Para instalação do poço tubular, poderá ser necessária a aplicação de areia grossa e de material filtrante (como tela de *nylon*) para evitar que o material natural da subsuperfície migre para o interior do equipamento.

Para a instalação do conjunto de bombeamento em poço tubular, conforme preconiza a norma ABNT NBR 12244 (2006), deve-se ater para que o conjunto seja instalado abaixo do nível dinâmico previsto e jamais junto aos filtros. Além disso, deve-se colocar uma tubulação auxiliar destinada a medir os níveis da água, com um medidor que permita leituras com precisão centimétrica.

Após a instalação do equipamento e do conjunto de bombeamento, é necessário realizar o desenvolvimento do poço; que nada mais é do que a remoção do material fino, que pode interferir na qualidade de análises ou no perfeito funcionamento do poço. A Figura 2-20 exibe o processo inicial (A) e o final (B) de desenvolvimento do poço.

Figura 2-20 – (A) Início do Desenvolvimento do Poço (B) Final do Desenvolvimento do Poço

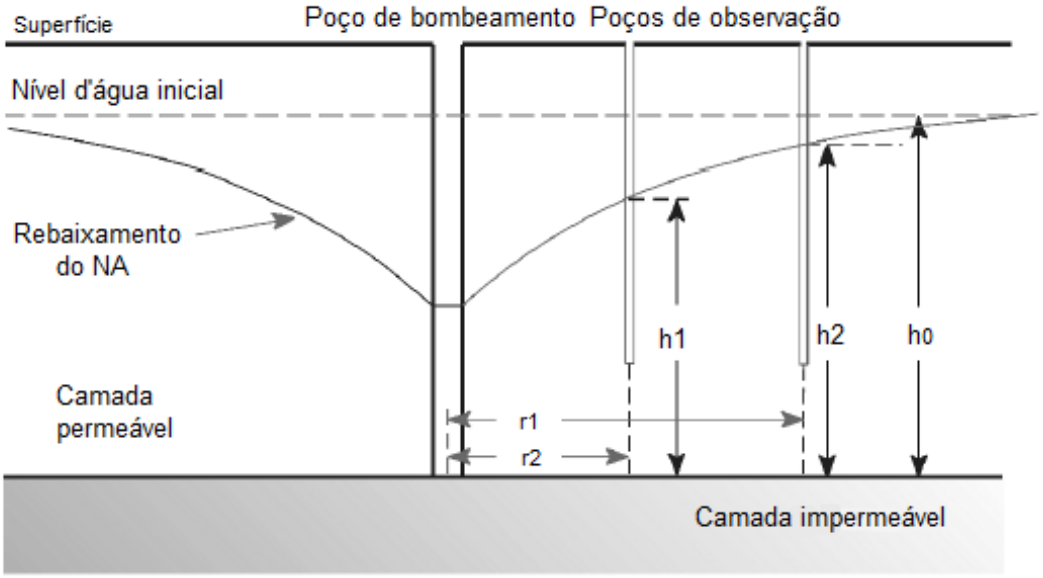


Fonte: Fosfato Mineração (2020).

Após o término do desenvolvimento do poço, é possível realizar ensaios de vazão e colocar o poço em operação efetivamente. Para auxiliar nas respostas dos testes de bombeamento, é fundamental, considerar um bombeamento preliminar de 24 horas (FEITOSA *et al.,* 2008).

Para a execução da atividade de rebaixamento do nível d'água de uma barragem de rejeitos, devem ser utilizados poços de observação compostos por instrumentos instalados no maciço, que por sua vez quantificam e/ou controlam a queda do nível da água do entorno. A Figura 2-21 evidencia um esquema do que ocorre em subsuperfície quando um teste de bombeamento entra em operação. Esses testes são de simples execução, entretanto são onerosos e demorados.

Figura 2-21 – Esquema em subsuperfície de um teste de bombeamento em operação.



Fonte: Adaptado Price (2009).

Na prática, antes de iniciar o bombeamento, o operador deve certificar-se do nível estático do poço, posteriormente, anota-se o tempo zero ao iniciar o bombeamento de água do furo. Para a tubulação de descarga da água deve-se implantar uma válvula de regulagem sensível e de fácil manejo, permitindo controlar e manter constante a vazão em diversos regimes de bombeamento. O lançamento da água extraída deve ser feito a uma distância do poço que não interfira nos resultados dos ensaios. As medidas de nível da água no poço durante o bombeamento devem ser efetuadas nas frequências de tempos indicadas na Tabela 2-1, a partir do início do ensaio. Os procedimentos foram descritos conforme a ABNT NBR 12.244 (2006).

Tabela 2-1- Frequência de anotações do teste de bombeamento

Período (min)	Intervalo de Leitura (min)
0-10	1
10-20	2
20-60	5
60-120	10
120-600	30
600-900	60
900 em diante	120

Fonte: ABNT NBR 12.244 (2006)

Para obter bons resultados durante execução de controle de NA de uma barragem e evitar um rebaixamento rápido da estrutura, é importante que, inicialmente, seja realizado alguns testes de vazão para estabelecer o nivelamento da vazão do poço, mais adiante, quando o nível d'água no interior do furo e a vazão permanecerem praticamente estáveis, define-se a vazão padrão a ser executada.

2.5 Ensaios de Permeabilidade

Os parâmetros de permeabilidade ou condutividade hidráulica (K) podem ser obtidos por meio de ensaios de permeabilidade em campo e laboratório. No contexto da segurança de barragens, quando esses dados são utilizados como dados de entrada nos modelos conceituais e modelos numéricos, os resultados obtidos podem auxiliar na observação de particularidades no que se refere aos perfis de infiltração e percolação das águas pelas estruturas. Neste item, serão apresentados os métodos comumente utilizados para obtenção da permeabilidade característica tanto dos materiais da fundação, como do aterro construído.

Ressalta-se que esse trabalho dá um enfoque maior a este tema, tendo em vista que esse parâmetro será mais bem estudado no decorrer do desenvolvimento do trabalho; enquanto os demais parâmetros de resistência e peso específico foram compilados por meio de dados pré-estabelecidos.

2.5.1 Ensaios de Permeabilidade In Situ

Em campo, os ensaios de permeabilidade são comumente denominados apenas de "ensaios de permeabilidade *in situ"*, entretanto, é comum encontrar outros termos. Quando se trata, exclusivamente, da execução desses ensaios em furos de sondagem a percussão, estes são conhecidos por "ensaio de perda d'água específica". Quando se trata de ensaios de permeabilidade em sondagens rotativas, denomina-se "ensaio de perda d'água sob pressão". Denomina-se, ainda, de maneira mais genérica "ensaio de infiltração", quando a execução desses ensaios é feita durante a execução de sondagens a percussão, em poços de monitoramento ou até mesmo em trincheiras e em piezômetros.

Do ponto de vista hidrogeotécnico, os ensaios de permeabilidade *in situ,* podem ser classificados basicamente conforme a maneira de realização (ensaios a nível constante e a nível variável) e o diferencial de pressão aplicado ao aquífero, positivo (carga) ou negativo (descarga). O Quadro 2-3 a seguir apresenta a classificação proposta segundo Azevedo *et al.* (2013).

Quadro 2-3 – Classificação dos ensaios de permeabilidade e suas aplicações.

Modo de Execução	Pressão Aplicada	Denominação dos Ensaios	Método de Prospecção
Nível Constante	Carga	Infiltração	Sondagens, poços, trincheiras e piezômetros
	Descarga	Bombeamento	Poços e sondagens
Nível Variável	Carga	Rebaixamento	Poços e sondagens
	Descarga	Recuperação	Poços e sondagens

Fonte: Azevedo *et al.* (2013).

O ensaio a nível constante deve ser realizado com a manutenção da cota de elevação do nível d'agua dentro do furo ou poço durante todo o ensaio. Este ensaio também pode ser feito após a instalação de um piezômetro. A posição do N.A deve ser constante ao longo de toda duração do ensaio, podendo ser mantido de duas maneiras:

- Pela introdução de água (ensaios de infiltração): neste caso mede-se a vazão injetada e o longo do ensaio deve-se manter o nível d'água constante; e
- Por meio da retirada de água (ensaios de bombeamento): neste caso, o aquífero é descarregado, medindo-se a vazão bombeada necessária para manter constante o nível d'água rebaixado, sempre na mesma posição.

O ensaio a nível variável, aceita que o nível d´água inicial seja alterado. Dessa maneira, deve-se monitorar a tendência de o nível d'água voltar à posição original, ao longo do tempo de realização do ensaio. O nível d'água inicial pode ser monitorado de duas maneiras:

- Pela introdução de água (ensaios de rebaixamento) e medindo-se em seguida sua velocidade de rebaixamento do NA; e
- Por meio da retirada de água (ensaios de recuperação) e medindo-se, em seguida, a velocidade da recuperação do NA.

Todos os ensaios de permeabilidade auxiliam na determinação da vazão do sistema estudado. Para todos os testes, deve-se ter em mãos um conjunto de aparelhagem antes de iniciar os testes, como planilhas de anotações, cronômetro, régua, indicador de nível, amostradores de água, entre outros. Posteriormente, as anotações irão auxiliar na determinação da permeabilidade dos materiais estudados (FEITOSA *et al.,* 2008).

Azevedo *et al.* (2013), publicou um manual de orientações, para auxiliar no acompanhamento da execução de ensaios de permeabilidade, o qual contém tabelas para anotações de campo, gráficos e ábacos para interpretação dos resultados e equações pré-estabelecidas para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (K) do trecho ensaiado.

Em suma, o ensaio de permeabilidade consiste na medida da vazão, representada pelo volume d'água absorvido, durante um certo intervalo de tempo; sendo que essa medida é realizada em função da aplicação de diferenciais de pressão induzida por colunas d'água, ou seja, da aplicação de carga hidráulica resultante da injeção ou da retirada de água do furo.

Além disso, é importante o registro completo das informações necessárias ao cálculo do coeficiente de permeabilidade, tais como: vazão, nível d'água, diâmetro e profundidade do furo, comprimento do trecho de ensaio. Tendo todas essas anotações, para o cálculo do

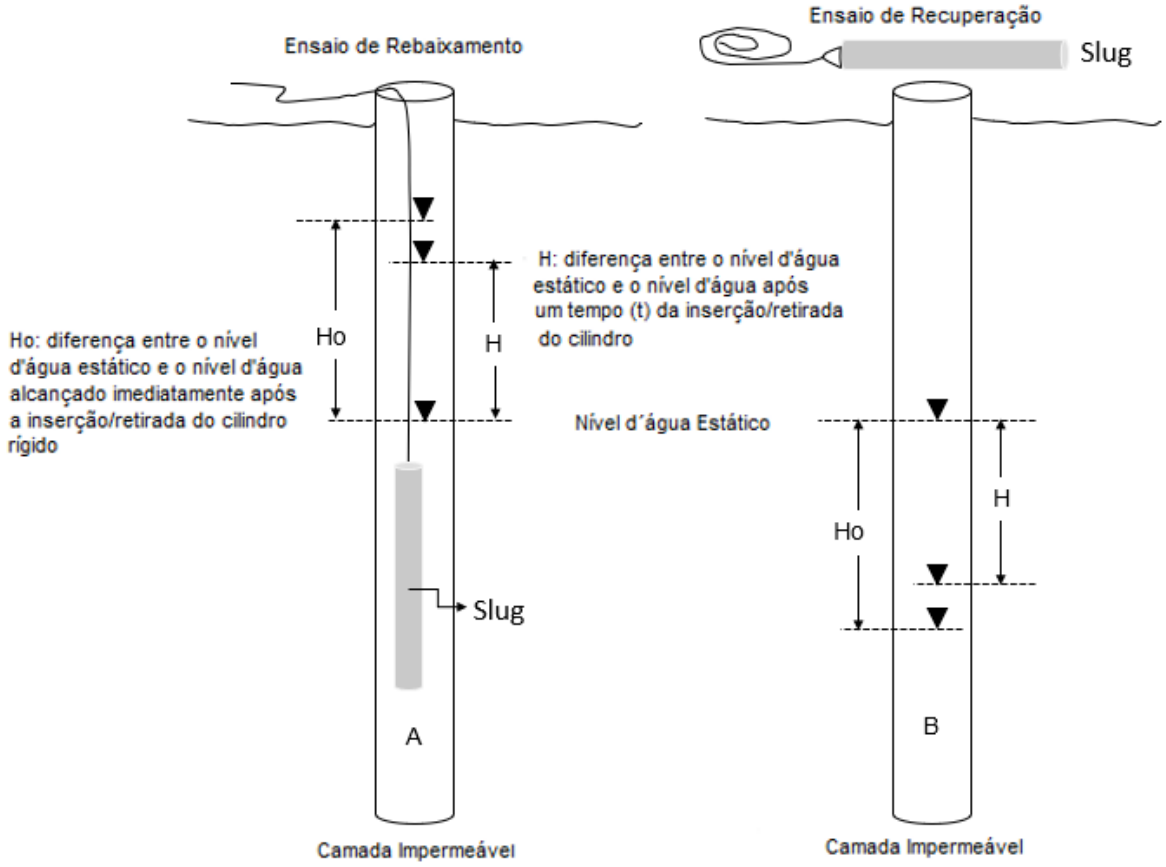
parâmetro de permeabilidade, deve-se consultar os gráficos e ábacos específicos a depender do método ensaiado, conforme proposto por Azevedo *et al.* (2013).

2.5.2 Slug Test

O *Slug Test* é um ensaio de permeabilidade, realizado em nível variável (zona saturada), e, geralmente, executado em poços de monitoramento, piezômetros ou trechos de sondagem que não contém nenhum tipo de completação, ou seja, que se encontram totalmente abertos lateralmente com a água de preenchimento em contato direto com o material (NASCIMENTO, 2015).

O ensaio consiste na verificação da variação da coluna de água em um poço, que pode ser feita aplicando-se uma carga ou descarga por meio da introdução ou remoção de água ou de um cilindro rígido com volume conhecido dentro do poço, conforme ilustrado na Figura 2-22.

Figura 2-22 – Ensaio de permeabilidade com *Slug Test* - (A) Rebaixamento (B) Recuperação



Fonte: Adaptado Azevedo *et al.* (2013).

Durante o ensaio, deve-se registrar em planilha adequada, as observações para recuperação do nível estático inicial, que pode ser obtido manualmente, com auxílio de

medidores de nível, ou automaticamente, com auxílio de transdutor de pressão, caso o retorno às condições estáticas seja muito rápido. As medições de nível devem ser realizadas em intervalos de tempo pré-determinados (OLIVA *et al*., 20015).

O método de cálculo da condutividade hidráulica de Hvorslev (1951), é um método bastante utilizado para tratamento dos dados após a realização dos ensaios de *Slug Test*. O método é aplicado para aquíferos confinados e livres, homogêneos, isotrópicos, de espessura uniforme e de baixo gradiente hidráulico. A fórmula proposta por Hvorslev (1951) é dada conforme a Equação 11. Um desenho esquemático apresentando os parâmetros geométricos, necessários para estimar a condutividade hidráulica por esse método é apresentado na Figura 2-23.

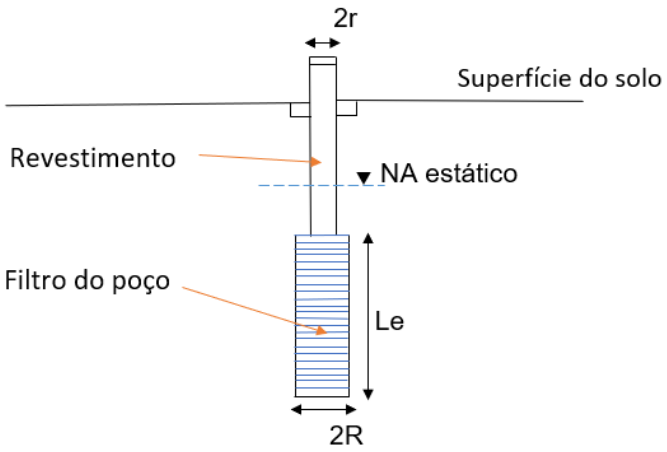
Equação 11

$$K = \frac{r^2 \ln(\frac{L_e}{R})}{2L_e T_o}$$

Onde:

K é a condutividade hidráulica em cm/s;
r é o raio do revestimento em cm;
R é o raio do poço em cm;
L_e é o comprimento do trecho filtrante em cm;
T_o é o tempo que leva para o nível d'água cair a 37% da posição inicial (s).

Figura 2-23 - Parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev (1951).



Fonte: Adaptado Hvorslev (1951).

2.5.3 Ensaios de permeabilidade em laboratório

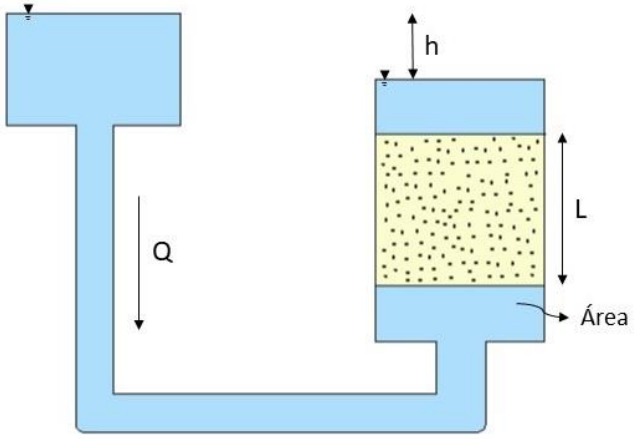
Os ensaios de laboratório, mais usuais, para determinação da permeabilidade saturados dos solos são os que utilizam o equipamento permeâmetro. Esses ensaios podem ser realizados à carga constante ou à carga variável (ORTIGÃO, 2007).

2.5.3.1 Permeabilidade à carga constante

Os ensaios de permeabilidade à carga constante são o mesmo tipo de ensaio empregado por Darcy, do qual consta de dois reservatórios onde os níveis d'água são mantidos constantes e com diferença de altura h, conforme a Figura 2-24.

O equipamento do ensaio é denominado de permeâmetro e possui parede flexível, que consiste em uma câmara triaxial simplificada adaptada ao ensaio de condutividade hidráulica. A amostra é confinada por membrana de látex e o sistema é confinado por água.

Figura 2-24 – Permeâmetro à carga constante.



Fonte: Adaptado Ortigão (2007).

Os ensaios de permeabilidade à carga constante são destinados a testar solos granulares não coesivos e cascalhos limpos. Nesses ensaios o solo é recompactado na célula, por meio de um esforço de compactação especificado ou para alcançar uma certa densidade seca, isto é, razão de vazios. Nesse ensaio, a água deve fluir através de uma coluna de solo sob a aplicação de uma diferença de pressão que permanece constante, de forma a garantir um fluxo laminar. A quantidade de água que passa pelo solo em um tempo conhecido é medida e a permeabilidade da amostra é calculada usando a Equação 12.

Equação 12

$$k = \frac{QL}{Ah}$$

Onde:

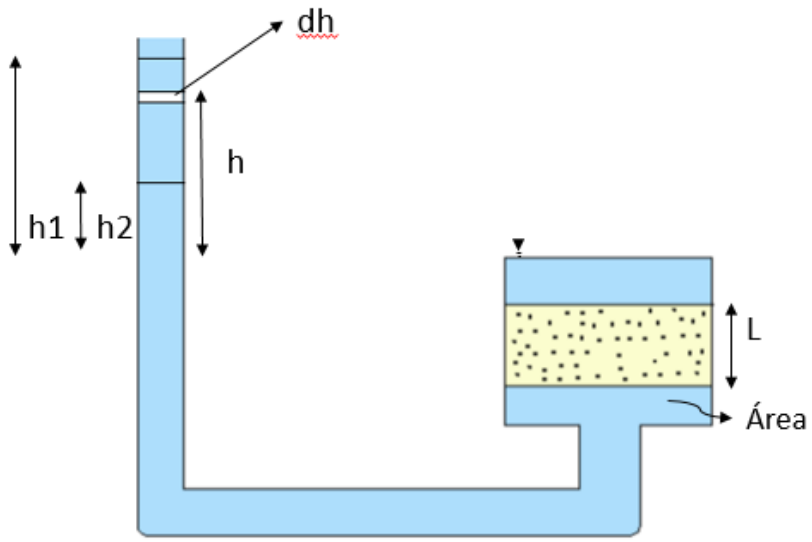
Q é a vazão em m³/s;
L é o comprimento do corpo de prova em m;
A é a área da seção transversal do corpo de prova em m².

Para realizar o ensaio de permeabilidade, à carga constante, a norma ABNT NBR 13.292 (2021) indica a metodologia usual para realizar o ensaio e a padronização do tamanho da célula.

2.5.3.2 Permeabilidade à carga variável

No permeâmetro de carga variável o corpo-de-prova é submetido a um nível d'água variável e, da mesma forma, com uma aplicação de carga variável (Figura 2-25). Durante o ensaio, observa-se a descida do nível d'água, de h1 para h2, em função do tempo, t1 para t2. O cálculo da permeabilidade é feito pela Equação 13.

Figura 2-25 – Permeâmetro à carga variável.



Fonte: Adaptado de Ortigão (2007)

Equação 13

$$k = \frac{a \times L}{A\,(t2 - t1)} \ln \frac{h1}{h2}$$

Onde:

L é o comprimento do corpo de prova em m;
a é a seção transversal do tubo transparente ou bureta de vidro;
A é a área da seção transversal do corpo de prova em m².

Para realizar o ensaio de permeabilidade à carga variável a norma ABNT NBR 14545 (2021) indica a metodologia usual para realizar o ensaio e a padronização do tamanho da célula.

Segundo Vick (1990) os valores típicos de permeabilidade para solos arenosos saturados são na ordem de $10E^{-04}$ a $10E^{-06}$ cm/s e para solos argilosos é na ordem de $10E^{-6}$ e $10E^{-08}$ cm/s. Mais adiante, esses valores serão comparados com os resultados dos ensaios de campo e laboratório executados e recebido por meio do banco de dados.

3.0 ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DE REJEITOS FOSFÁTICOS ALTEADA PELA LINHA CENTRO

Neste capítulo será feita a descrição do contexto histórico de uma barragem de rejeitos fosfáticos, localizada na região de Minas Gerais, Brasil. Adicionalmente, serão descritas e apresentadas as etapas de execução de obras de estabilização implantadas na região do talude de jusante da barragem de rejeitos. Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas visitas de campo na barragem de rejeitos para o acompanhamento das obras de estabilização, que estavam sendo executadas na estrutura na mesma época de desenvolvimento deste trabalho. As obras consistiram em perfuração e instalação de poços de bombeamento, programados para rebaixar o lençol freático do reservatório; e construção de reforço em enrocamento a jusante do maciço.

Por motivos de segurança da informação as referências técnicas não serão divulgadas nesse documento e, a estrutura, sempre que mencionada, será denominada simplesmente de “Barragem de Rejeitos Fosfáticos”. O heterônimo a ser utilizado para a empresa proprietária da barragem de rejeitos será “Fosfato Mineração”, e para as empresas de consultorias envolvidas nas etapas de elaboração de projeto e execução das obras de estabilização, serão designados os heterônimos “GEOX Engenharia” e “GEOY Engenharia” quando mencionadas.

3.1 Histórico da Estrutura

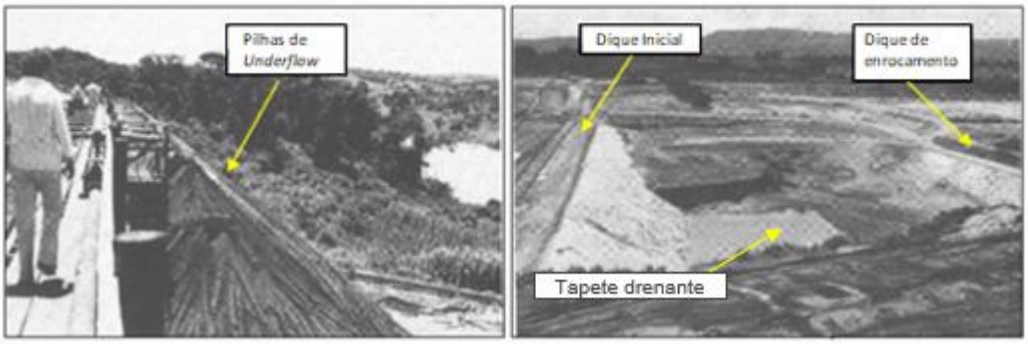
De acordo com o Relatório *As Is* apresentado, em 2020, pela GEOX Engenharia, o projeto inicial da Barragem de Rejeitos Fosfáticos foi implantado com a finalidade de contenção dos rejeitos finos provenientes da usina de beneficiamento. A estrutura era formada inicialmente por duas estruturas independentes, os barramentos 1 (vale da esquerda) e 2 (vale da direita), os quais se uniram a partir da elevação 978,00 m formando um único barramento. Os projetos das estruturas previam inicialmente, o alteamento até a cota 993,00 m.

A Figura 3-1 demonstra a situação da estrutura durante a etapa construtiva, em que se observa os seguintes elementos:

- a esquerda na Figura 3-1 observa-se pilhas de “*underflow*” que foram utilizadas para o alteamento da barragem;
- a direita na Figura 3-1, observa-se o talude de jusante do dique inicial recoberto com a camada de areia, o dique de enrocamento de “pé”, já com a camada de transição sobre o talude de montante (Figura 3-1, direita); e

- o tapete drenante de areia sobre o terreno de fundação, entre os dois diques (Figura 3-1, direita).

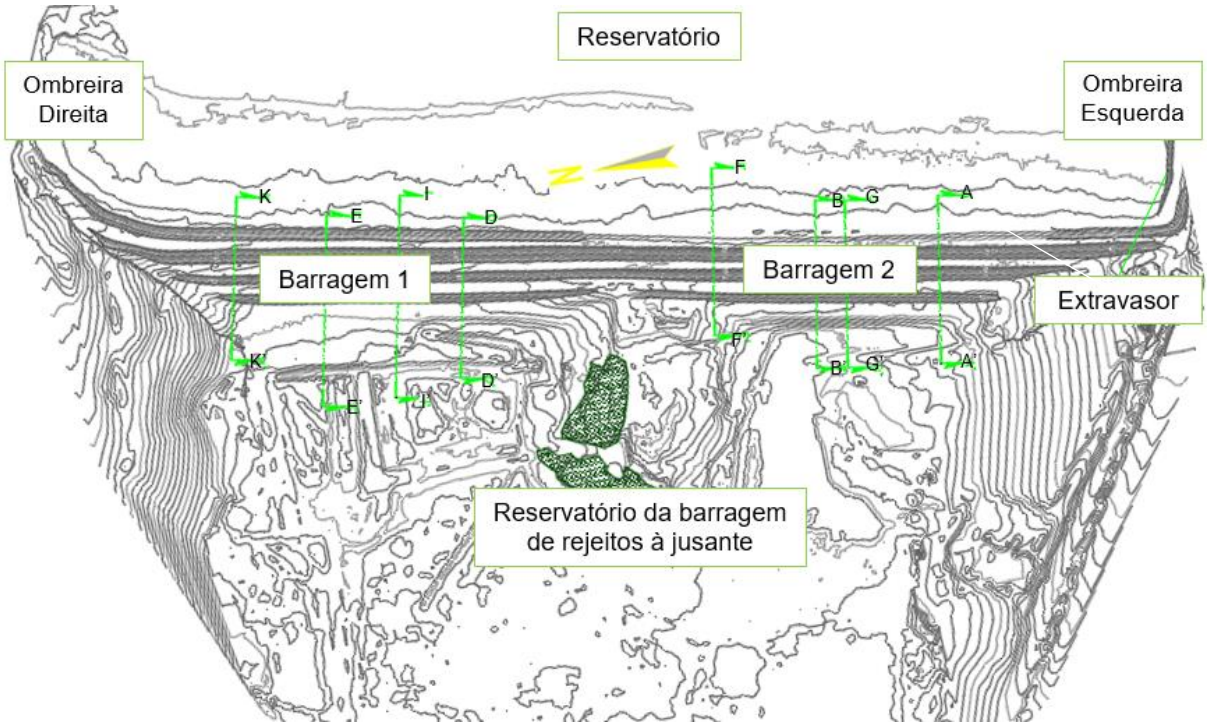
Figura 3-1 Situação da estrutura meados dos anos 70.



Fonte: Adaptado *As Is* (GEOX Engenharia, 2020).

A Figura 3-2 evidencia a topografia da Barragem de Rejeitos Fosfáticos e a localização dos barramentos 1 e 2, assim como as suas respectivas seções transversais. Na Figura 3-2, observa-se que o pé do talude de jusante dos barramentos está assentado sobre o reservatório de uma outra barragem de rejeitos, que está localizada imediatamente à jusante.

Figura 3-2 – Topografia da Barragem de Rejeitos Fosfáticos.



Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2022).

3.1.1 Fundação

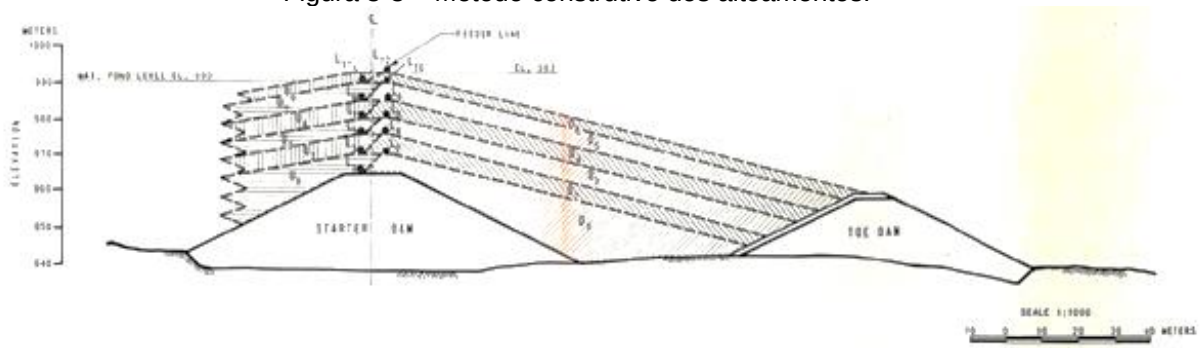
De acordo com as sondagens mistas executadas na região do maciço e na fundação, foi observado que a Barragem de Rejeitos Fosfáticos está assentada, inicialmente, sob uma

camada de solo residual de micaxisto com espessura média entre 11,0 a 26,0 m, apresentando uma textura variando entre silto-arenoso (areia fina), de coloração variegada (rosa, amarelo, marrom, verde, com veios cinza ou laranja), e índice N_{SPT} variando entre 11 a 49, conferindo uma compacidade medianamente compacta a muito compacta e consistência rija a dura. Sotoposto a camada de solo residual, é encontrado o maciço rochoso composto por filito e gnaisse alterados.

3.1.2 Maciço

Segundo *As Is* elaborado pela GEOY Engenharia (2020), as barragens 1 e 2 foram construídas e alteadas pelo método linha de centro usando-se rejeito de fração mais grossa, a jusante, e a fração mais fina, a montante. O projeto inicial destas estruturas foi desenvolvido conforme o desenho apresentado na Figura 3-3.

Figura 3-3 – Método construtivo dos alteamentos.



Fonte: Adaptado *As Is* (GEOY Engenharia, 2020).

Em 2004, foi elaborado o projeto de alteamento dos barramentos para a El. 998,0 m. Esse projeto previa uma geometria do maciço diferente do projeto inicial, uma vez que, o projeto inicial previa um talude único de jusante, enquanto o novo projeto contemplava bancos (talude e berma) em sua porção de jusante.

O sistema extravasor da Barragem de Rejeitos Fosfáticos é constituído por um vertedouro poço galeria e por um vertedouro auxiliar em canal escavado. Ambos localizados na ombreira esquerda.

Em 2012, foi elaborado o projeto de alteamento de uma outra barragem de rejeitos, que se encontra implantada imediatamente a jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. O projeto de alteamento previa comportar todo o material de rejeito, que fosse gerado pela usina, uma vez que, o reservatório da Barragem de Rejeitos Fosfáticos estava com previsão de exaurir todo o seu volume disponível nos próximos anos. O projeto de alteamento da barragem de rejeitos localizada à jusante, contou com a previsão de uma proteção de saída da

drenagem interna da Barragem de Rejeitos Fosfáticos para evitar a colmatação do sistema do dreno de fundo, que se encontrava implantado.

No ano de 2018, a Barragem de Rejeitos Fosfáticos passou a apresentar cargas piezométricas elevadas em todo seu maciço e pé de jusante do barramento alagado, onde constatou-se o afogamento do dreno de fundo pelo material de rejeito mole, proveniente do reservatório da barragem de rejeitos localizada à jusante.

Para solução deste problema, no ano de 2020, foram programadas e executadas obras de estabilização da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, para aumentar a estabilidade física da barragem e reduzir o risco da estrutura. As obras consistiram em:

- rebaixamento dos níveis de água do reservatório por meio da execução de poços tubulares; e
- execução de berma de equilíbrio em enrocamento no talude de jusante.

A seguir, serão descritas as fases preliminares e as etapas dos Projetos Executivos de estabilização da estrutura, que foi fundamentado em visitas de campo para acompanhamento das obras, entrevistas e reuniões com os funcionários da empresa.

3.2 Elaboração de Projetos e Execução de Estabilização Física

Para o desenvolvimento do projeto de estabilização física da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, foi necessária uma equipe técnica multidisciplinar para desenvolver estudos geológicos, geotécnicos e hidrológico-hidráulicos. Paralelamente, este projeto de mestrado teve o objetivo de acompanhar a execução das obras e avaliar os seus efeitos por meio da realização de análises de percolação e de estabilidade dos períodos de pré-obra e pós-obra. Ressalta-se que as obras foram executadas pela Fosfato Mineração, por um período de, aproximadamente, 2 anos. A seguir será apresentado um breve resumo dos estudos geotécnicos realizados e descritas as etapas de execução das obras, que foram acompanhadas em campo.

3.2.1 Estudos Geotécnicos Anteriores

Os estudos geotécnicos para elaboração dos projetos de estabilização física da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, compreenderam em análise integrada de informações disponíveis sobre a estrutura, como os estudos geofísicos realizados na fase anterior à dissertação, topografia do terreno, dados de investigações geológico-geotécnicas de campo e laboratório, bem como análise do histórico construtivo da estrutura. Dessa maneira, foi

possível conhecer a geometria da barragem, os elementos associados e distribuição dos materiais em subsuperfície.

3.2.1.1 Estudos Geofísicos

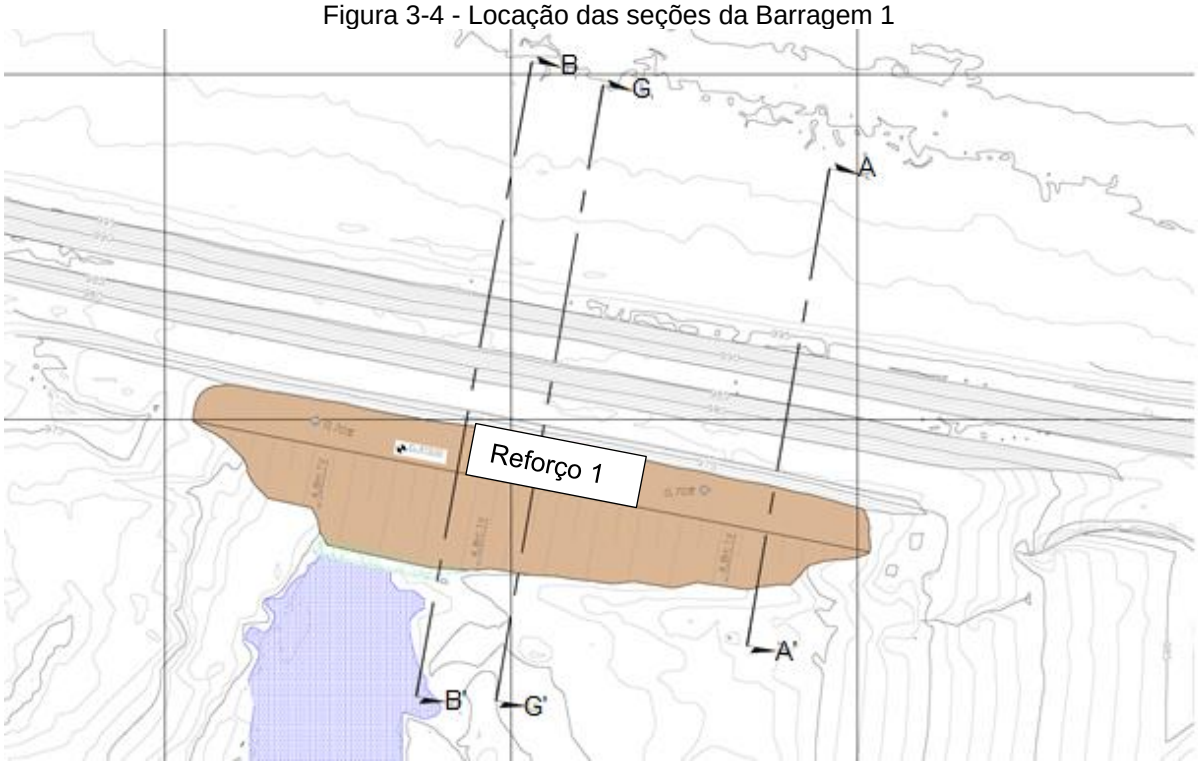
A investigação geofísica, realizada pelo método de Eletrorresistividade (CE), teve como objetivo principal mapear anomalias não-resistivas, que pudessem indicar a presença de nível de água elevado no interior do maciço da estrutura. Outra questão importante, foi a possibilidade de identificar regiões resistivas, que indicavam a localização aproximada dos elementos geométricos associados, como o dique de partida constituído em enrocamento e o filtro de areia. Estes estudos juntamente com as investigações de campo, permitiram o conhecimento exato da localização de todos os elementos da barragem, que se encontravam sotopostos ao reservatório da barragem de rejeitos à jusante.

3.2.1.2 Seções Geológico-geotécnicas

A partir dos conhecimentos obtidos a partir dos estudos geofísicos realizados, associados com a análise e interpretação das sondagens executadas no maciço da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, assim como dos resultados dos ensaios de laboratórios realizados a partir da coleta de amostras indeformadas, foi possível a elaboração de seções geológico-geotécnicas longitudinais e transversais, que pudessem representar a distribuição das unidades geológico-geotécnicas existentes. A Figura 3-4 e Figura 3-5 evidenciam a localização em planta das seções geológico-geotécnicas da Barragem 1 e da Barragem 2, respectivamente.

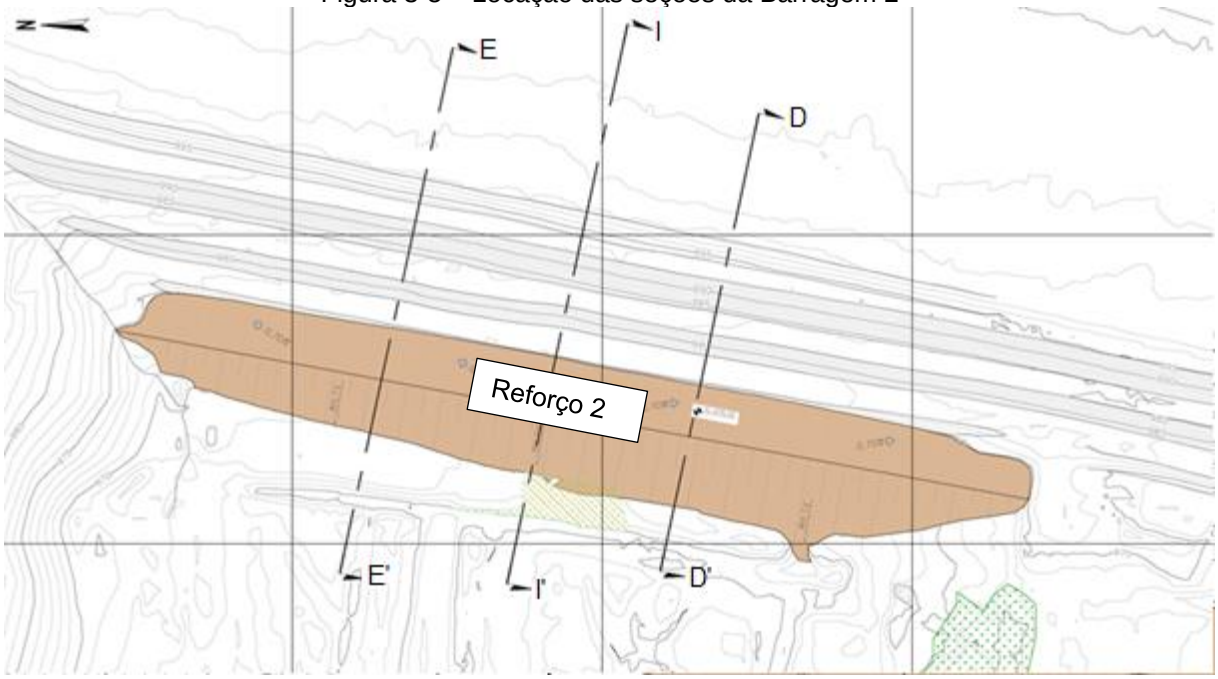
Seções geológico-geotécnicas transversais são importantes para verificação das condições de equilíbrio dos barramentos. As seções permitem o conhecimento do comportamento geotécnico e controle dos níveis piezométricos, além disso são importantes para estimar as vazões de saídas de maneira setorizada. Além disso, pode ser plotada uma seção geológico-geotécnica longitudinal paralela ao eixo da crista da estrutura, que por sua vez poderá ser utilizada para auxiliar na distribuição de pontos para investigações geotécnicas de campo.

Figura 3-4 - Locação das seções da Barragem 1



Fonte: Adaptado GEOY Engenharia (2020).

Figura 3-5 – Locação das seções da Barragem 2

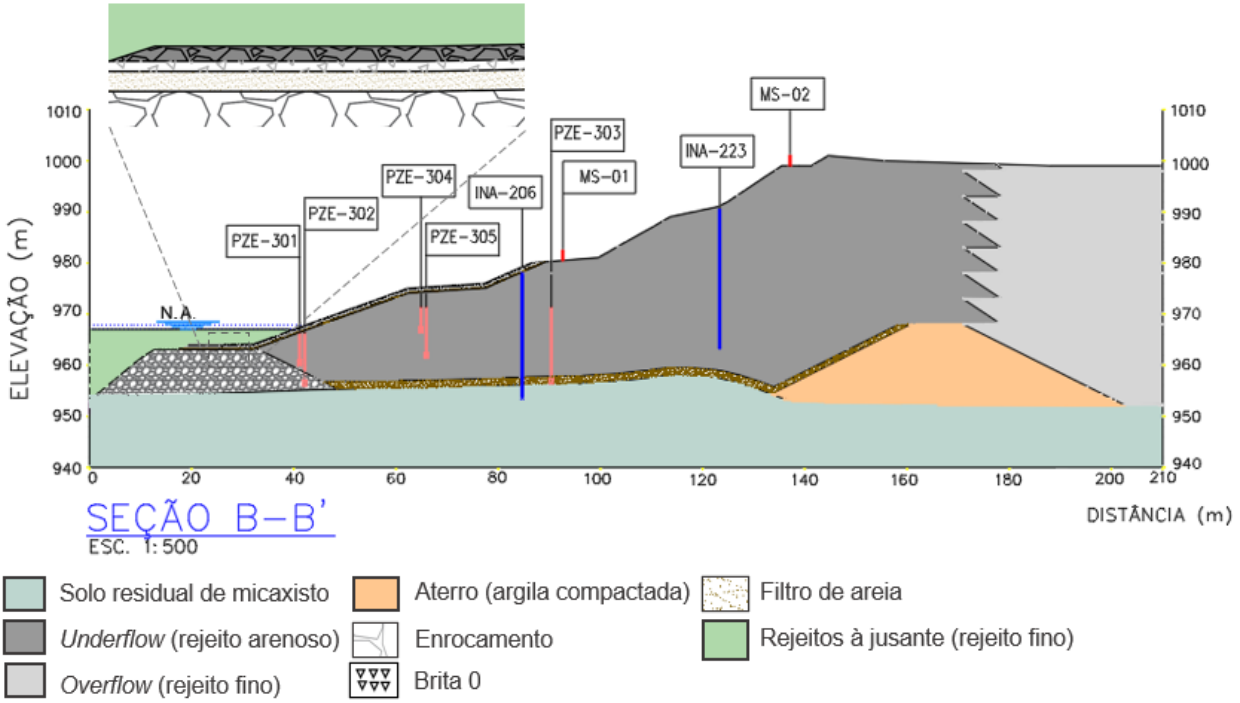


Fonte: Adaptado GEOY Engenharia (2020).

A Figura 3-6 e Figura 3-7 exibem as seções transversais geológico-geotécnicas B-B’ e E-E’ da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, que representam as seções críticas principais de

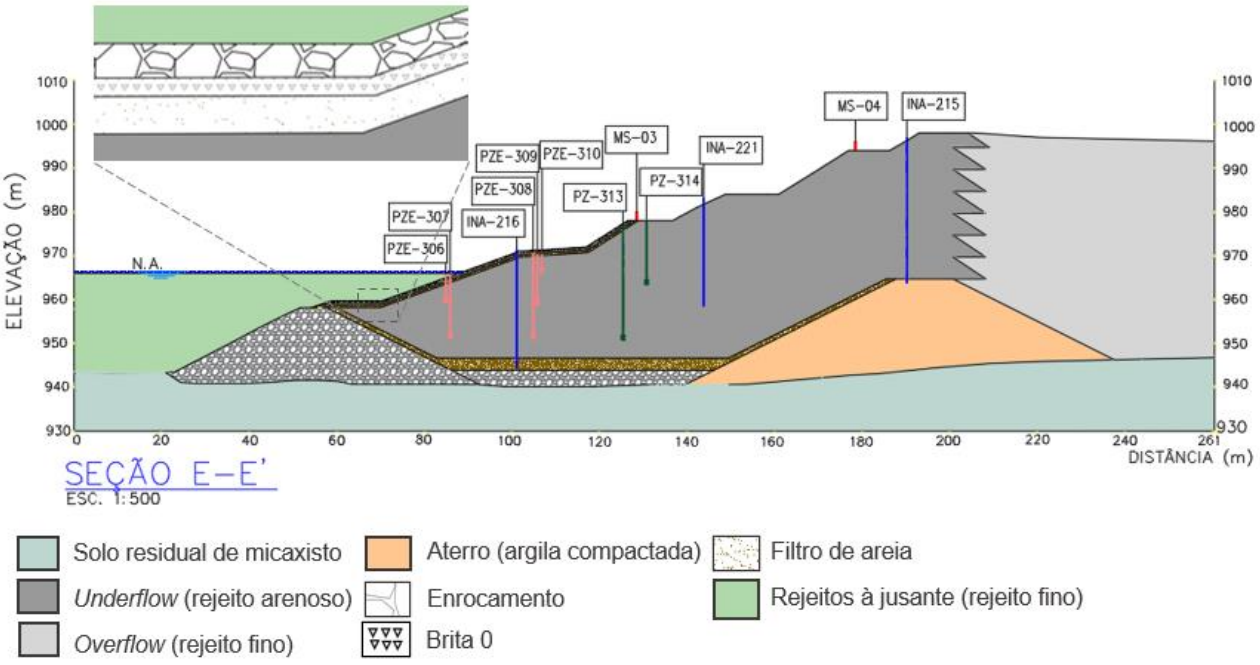
maior altura do maciço da barragem 1 e da barragem 2, respectivamente. Neste trabalho, serão apresentados os principais aspectos geotécnicos e discutidas as condições de estabilidade, exclusivamente, destas seções.

Figura 3-6 – Seção geológico-geotécnica B-B' da barragem 1, evidenciando a localização dos componentes da estrutura.



Fonte: Adaptado GEOY Engenharia (2020).

Figura 3-7 – Seção geológico-geotécnica E-E' da Barragem 2, evidenciando a localização dos componentes da estrutura.



Fonte: Adaptado GEOY Engenharia (2020).

Na Figura 3-6 e Figura 3-7 observa-se a implantação de filtro de areia e material de transição (brita 0), seguido de enrocamento conforme o zoom apresentado do pé do talude de jusante. Essa observação corrobora com o contexto histórico da estrutura, em que foi mencionada a implantação de proteção de saída da drenagem interna da Barragem de Rejeitos fosfáticos.

Além disso, observa-se que os diques de Partida da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, estão conectados ao filtro de areia, que deveriam funcionar como um dreno de fundo para a estrutura, mas encontram-se afogados pelo material de rejeito mole, que foram depositados sobre o dreno.

Dessa maneira, os estudos de rebaixamento de nível de água do reservatório foram desenvolvimentos com base na premissa de que os poços tubulares deveriam ser perfurados no reservatório da barragem de rejeito à jusante e instalados no dreno de fundo da barragem em estudo, junto ao material de enrocamento, para servir como poços de alívio para a estrutura.

A partir da Figura 3-6 e Figura 3-7, observa-se que apesar de serem estruturas semelhantes, em termos de unidade geológico-geotécnicas e de possuírem um único reservatório; para o desenvolvimento das modelagens numéricas, é interessante, estudar as estruturas de forma individualizada. Tais estruturas possuem diferenças significativas nas alturas dos barramentos, nos volumes das bacias e dos volumes de material de aterro, o que pode ocasionar singularidades no comportamento geotécnico entre elas.

3.2.2 Canteiro de Obras

Para auxiliar a execução de rebaixamento de nível de água, foi realizada a construção de canais de drenagem na praia, para melhorar a infiltração de água através do rejeito depositado.

A Figura 3-8 exibe trincheiras escavadas para promover a drenagem na praia do reservatório e, a Figura 3-9 apresenta o canal de drenagem principal instituído longitudinalmente ao maciço.

Figura 3-8 – Execução de Canais de Drenagem na Praia.



Fonte: Fosfato Mineração.

Figura 3-9 – Canal de Drenagem Principal instituído ao longo da praia.



Fonte: Fosfato Mineração.

Adicionalmente, foram escavados e construídos *Sumps* à jusante da barragem, com fins de coletar a água proveniente do bombeamento dos poços. A Figura 3-10 e Figura 3-11 exibem a obra de escavação dos *Sumps*.

Figura 3-10 – Sump à jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, situado no reservatório da barragem de rejeitos à jusante.



Fonte: Fosfato Mineração.

Figura 3-11 – Sump à jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, situado no reservatório da barragem de rejeitos à jusante.

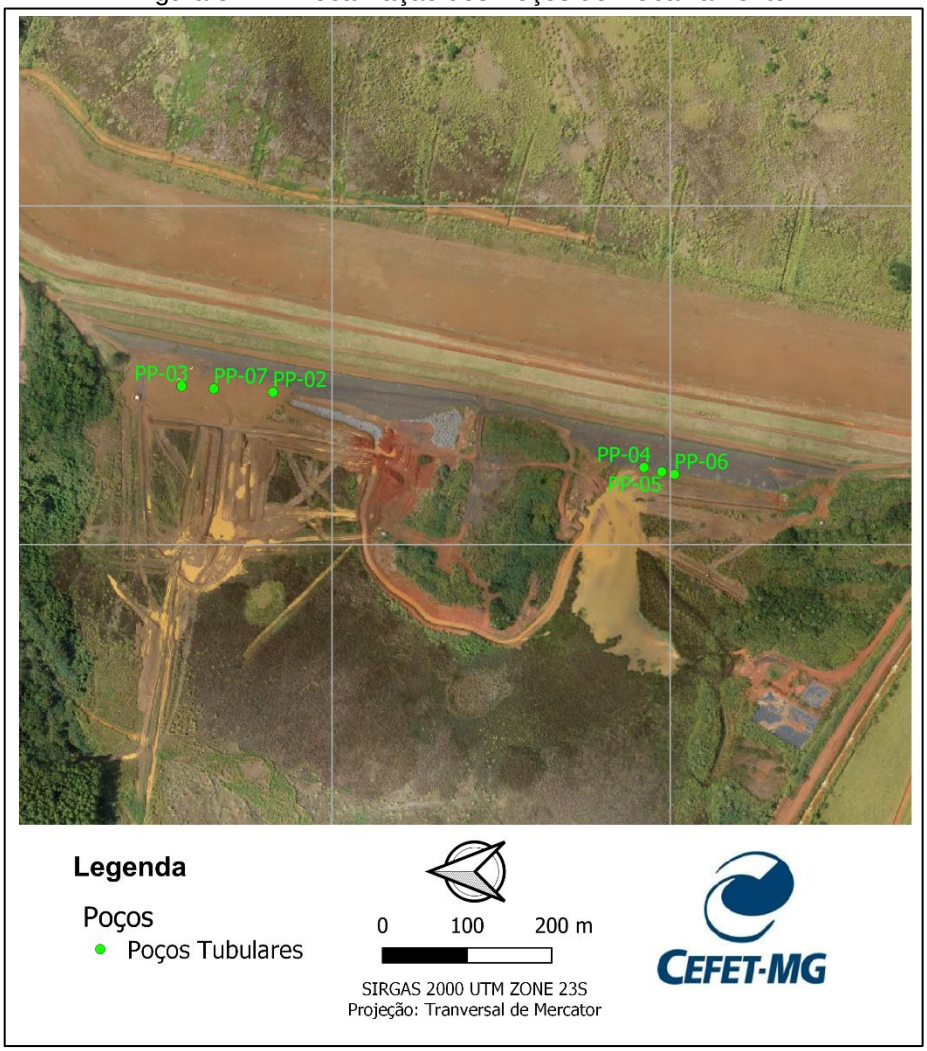


Fonte: Fosfato Mineração.

3.2.3 Rebaixamento dos Níveis de Água Por Meio da Execução de Poços Tubulares

Para promover o rebaixamento do nível freático do reservatório da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, foram projetados 06 (seis) poços tubulares para serem perfurados na região do reservatório da barragem de rejeitos à jusante, próximo ao pé dos barramentos 1 e 2, onde deveria ser encontrado o dreno de fundo sotoposto aos rejeitos moles. A Figura 3-12 exibe a localização dos poços.

Figura 3-12 – Localização dos Poços de Rebaixamento.



Autoria própria.

Os poços tubulares instalados no dreno de fundo (enrocamento) passaram a funcionar como poços de alívio da estrutura, promovendo a drenagem do fluxo interno e o rebaixamento do N.A da barragem. Dessa maneira, para cada um dos poços foram perfurados, em média, 12 metros de material mole de rejeito e, em média, 6 metros de enrocamento.

Visando utilizar uma metodologia específica para o material de rejeito mole e o enrocamento, os poços tubulares foram perfurados com método rotativo direto a seco, seguido do método rotopneumático com injeção de ar comprimido, uma vez que, não foi possível utilizar brocas comuns, já que favoreciam o desmoronamento da parede dos poços. Adicionalmente, foi necessário fazer o revestimento dos poços, ao mesmo tempo que era executada a perfuração.

A seguir descreve-se, de forma geral, a sequência construtiva dos poços. As fotos dos Poços Tubulares 04 e 07, tiradas em campo, são apresentadas para auxiliar na visualização da metodologia adotada.

A Figura 3-13-A, exibe a perfuração de solo mole, utilizando método rotativo a seco e broca tipo Hollow. Após perfurar todo solo mole e encontrar o enrocamento, foram retirados os Trados e o Hollow, conforme apresentado na Figura 3-13-B.

Figura 3-13 - (A) Perfuração com Hollow (B) Retirada dos Trados e do Hollow



Fonte: Fosfato Mineração.

Após retirada do trado, foi instalada a coluna de revestimento (tubo liso + filtro), conforme a Figura 3-14-A. Logo após, foi executada a cimentação do espaço anelar e a sapata de cimentação para revestimento (Figura 3-14-B). Onde o enrocamento era mais profundo, ou seja, tinha-se mais solo mole, o poço desmontava. Para isso, foi utilizada bentonita fluída em algumas perfurações.

Figura 3-14 - (A) Instalação do tubo liso e revestimento (B) Calda de Cimento/Cimento Anular



Fonte: Fosfato Mineração.

Depois do preenchimento do espaço anelar, foi realizada a descida da broca especial para corte do cimento; e realizado o corte do cimento com circulação, conforme as Figura 3-15-A e B, respectivamente.

Figura 3-15 – (A) Corte do cimento com broca especial (B) Corte do Cimento com Circulação



Fonte: Fosfato Mineração.

Após a finalização do corte do cimento, foi instalado um Tubo Ranhurado (Figura 3-16-A), que caracteriza a finalização da primeira parte do solo mole. Logo após, realizada a substituição da broca tipo *Hollow* pela broca tipo *Bit Tubex*, para perfurar o enrocamento.

Figura 3-16 – (A) Instalação do Tubo Ranhurado (B) Descida do Martelo com Bit Tubex



Fonte: Fosfato Mineração.

A perfuração do enrocamento e a instalação do revestimento concomitantemente, foi executada utilizando método rotopneumático com injeção de ar comprimido e broca *Bit Tubex* (Figura 3-17-A).

A Figura 3-17-B, evidencia a finalização da perfuração do Poço 04 com, aproximadamente, 12 metros de profundidade de solo mole e 6 metros de profundidade de enrocamento. Não foi necessário instalar filtro e pré-filtro no enrocamento, uma vez que, este conjunto de materiais já funcionavam como tal.

Figura 3-17 – (A) Perfuração com *Bit Tubex* (B) Conclusão da Perfuração e Retirada do *Bit Tubex.*



Fonte: Fosfato Mineração.

Após a conclusão dos poços foi feito o desenvolvimento, para que não houvesse carreamento de areia ou de qualquer outro material através dos filtros para dentro do poço. A Figura 3-18 exibe a fase inicial e final do desenvolvimento com compressor e as amostras de água obtidas para o Poço 04.

A Figura 3-19 exibe o Poço Tubular 04 instalado e execução do teste de vazão, na foto mais à direita. Ressalta-se que todos os Poços Tubulares 02, 03, 04, 05, 06 e 07 foram executados utilizando a mesma metodologia. Exceto o poço 01, que foi instalado no material mole de rejeito, pois não alcançou o enrocamento.

Figura 3-18 – Desenvolvimento com Compressor e Amostras de água obtidas para o Poço 04.



Fonte: Relatório Técnico dos Serviços de Perfuração do Poço Tubular – Fosfato Mineração.

Figura 3-19 – Bomba de rebaixamento de nível d´água instalada e teste de vazão.



Fonte: Relatório Técnico dos Serviços de Perfuração do Poço Tubular – Fosfato Mineração.

As equipes técnicas de geotécnica e hidrogeologia envolvidas nos trabalhos, estipularam que os Poços Tubulares 02 a 07 deveriam operar, durante 24 horas por dia, direcionando a vazão bombeada aos Sump's (Figura 3-10 e Figura 3-11).

As equipes técnicas de geotécnica e hidrogeologia, estipularam, ainda que, para o mantimento adequado do fator de segurança do maciço e para evitar ocorrência de um rebaixamento rápido na estrutura, era necessário que a vazão de bombeamento dos poços

se limitasse a um rebaixamento de no máximo 5 cm/dia do nível dinâmico dos poços instalados. Dessa maneira, os poços deveriam operar continuamente, mas não poderiam operar com sua capacidade máxima de bombeamento.

Para acompanhar estes níveis de rebaixamento projetados, foram utilizados os instrumentos instalados próximos, como poços de observação.

3.2.4 Berma de Equilíbrio em Enrocamento no Talude de Jusante

O projeto de execução da berma de equilíbrio em enrocamento no talude de jusante consistiu em dois reforços distintos, um para a Barragem 1 e outro para a Barragem 2. Apesar da existência de algumas diferenças geométricas entre os barramentos, o procedimento para implantação dos reforços foi o mesmo, e foi executado ao mesmo tempo, de forma contínua, em ambas as estruturas.

O reforço da Barragem de Rejeitos Fosfáticos consistiu em uma alternativa mista em aterro compactado composto por materiais granulares (enrocamento e magnetita) com altura de aproximadamente 8,0 m em seu ponto mais alto e 25,0 m de largura para a Barragem 1 e 26,00 de largura para a Barragem 2.

A alternativa mista composta por material granular de magnetita, foi escolhida para reutilização deste material, que é subproduto do processo de beneficiamento de fosfato e se encontra disponível no local, em quantidade significativa.

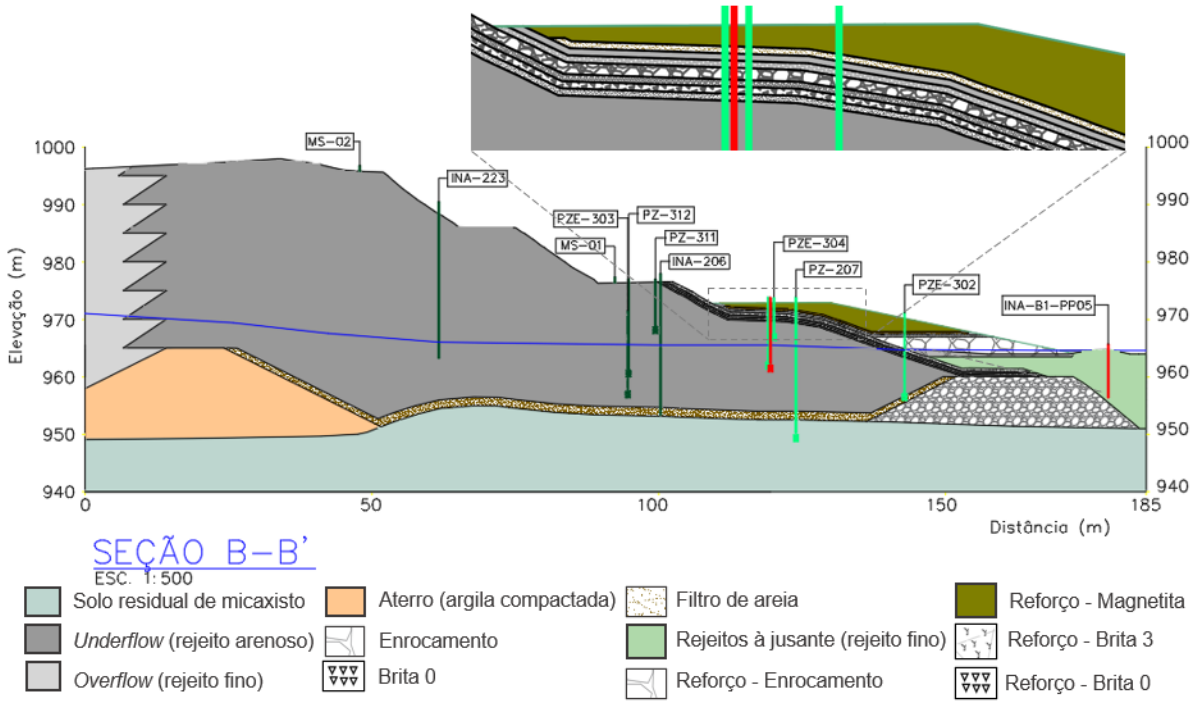
O reforço foi executado material de enrocamento D_{50} igual a 300 mm até a elevação de 967,0 m para Barragem 1 e até a elevação de 971,8m para a Barragem 2, seguida por uma camada de aterro de magnetita compactada a 98% do Proctor Normal, até a elevação de 973,0 m e a elevação de 976,0 mm, respectivamente. O talude de jusante apresentou inclinação de 4,8 (H): 1,0 (V) para ambas as estruturas.

Para evitar a colmatação do aterro no contato entre os materiais granulares, foi previsto um dreno invertido na face do talude, no contato com o enrocamento e a magnetita. A transição era composta por brita 3, brita 0 e areia, com todas as camadas com 0,30 m de espessura. A Figura 3-20 apresenta a seção típica B-B’ do reforço da Barragem 1 e a Figura 3-21 apresenta a seção típica E-E’ do reforço da Barragem 2.

As transições foram implantadas de forma a atender as condições apresentadas a seguir:

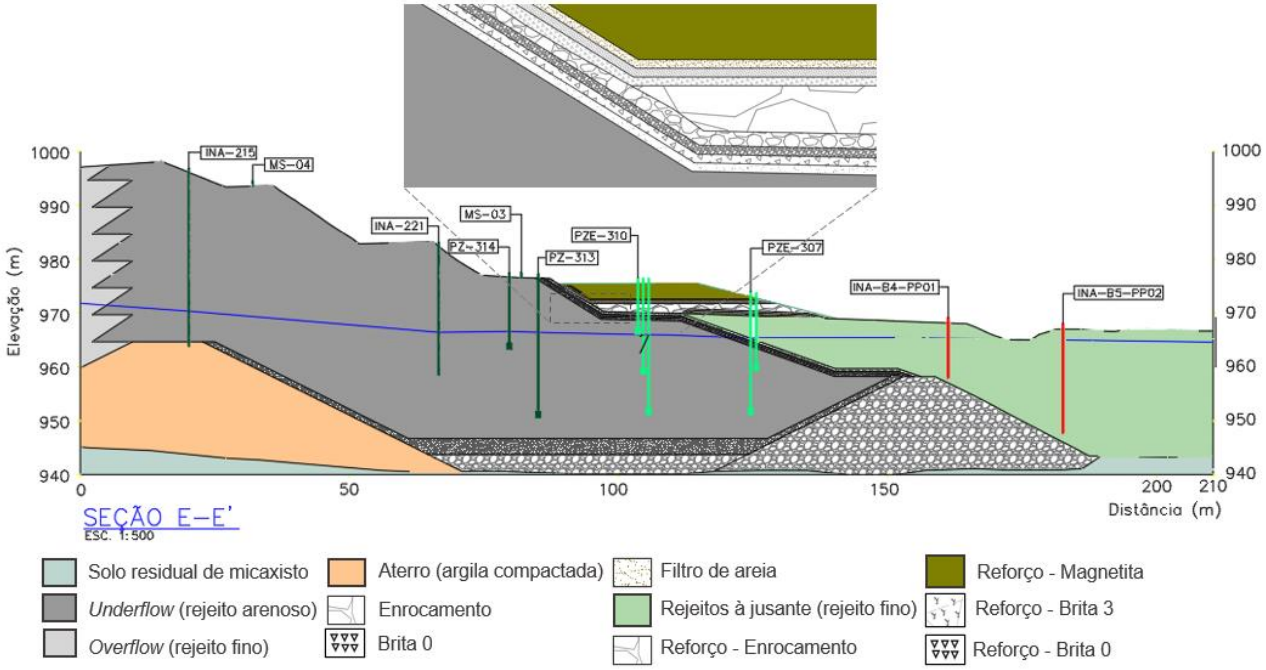
- critério de contenção: as dimensões dos vazios no material do filtro são suficientemente pequenas para reter as partículas maiores do material protegido; e
- critério de permeabilidade: o material do filtro possui alta condutividade hidráulica para impedir a geração de grandes forças de percolação e pressões hidrostáticas aplicadas aos filtros.

Figura 3-20 - Seção típica adotada e detalhes para a berma de reforço na seção B-B da Barragem 1'.



Fonte: Projeto de Reforço à jusante (GEOY Engenharia, 2020).

Figura 3-21 - Seção típica adotada e detalhes para a berma de reforço na seção E-E da Barragem 2'.



Fonte: Projeto de Reforço à jusante (GEOY Engenharia, 2020).

A Figura 3-22 e Figura 3-23 exibem imagens aéreas da obra de reforço na região de jusante da Barragem de Fosfáticos. Ressalta-se que, a obra só se iniciou quando o nível de água na região de jusante se encontrava abaixo do nível do terreno. Caso o reforço tivesse sido executado com saturações elevadas no maciço, o peso dos materiais da obra, poderiam elevar os níveis de poropressões da barragem, diminuindo mais ainda os fatores de segurança vigentes à época.

Figura 3-22 – Execução do Reforço na Barragem 2.



Fonte: Fosfato Mineração (2020).

Figura 3-23 – Reforço à Jusante na Barragem de Rejeitos Fosfáticos finalizado.



Fonte: Fosfato Mineração (2020).

4.0 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os métodos utilizados para realizar as análises de percolação e de estabilidade drenada e não drenada da Barragem de Rejeitos Fosfáticos.

O cenário pré-obra avaliou um cenário crítico da estrutura, que foi observado na primeira visita técnica ao local. Nessa situação os históricos de monitoramento dos instrumentos instalados na estrutura indicaram alto grau de saturação no pé a jusante da barragem e níveis de água elevados no interior do reservatório.

O cenário pós-obra, visou a reavaliação dos fatores de segurança após a finalização das obras de estabilização na Barragem de Rejeitos Fosfáticos, cujas condições de contorno foram estabelecidas por meio da adoção de uma nova posição do N.A. no interior da estrutura. Considerou-se a utilização de leituras do N.A. após três (03) meses da finalização das obras de reforço, dado que, estas leituras já estariam estabilizadas.

4.1 Análises Computacionais

Para avaliar a segurança geotécnica por meio do *software* SLIDE 2D versão 9.0, desenvolvido pela empresa ROCSCIENCE®, estabeleceu-se 16 (dezesseis) cenários a serem estudados, conforme ilustrado no Quadro 4-1.

Quadro 4-1 – Cenários de Estudo

Fase	Seção Geológico-geotécnica	Condição dos Materiais	Fator de Segurança
Pré-obra	B-B’	Condição Drenada	Global
			Local
		Condição Não Drenada	Global
			Local
Pré-obra	E-E’	Condição Drenada	Global
			Local
		Condição Não Drenada	Global
			Local
Pós-obra	B-B’	Condição Drenada	Global
			Local
		Condição Não Drenada	Global
			Local
Pós-obra	E-E’	Condição Drenada	Global
			Local
		Condição Não Drenada	Global
			Local

Autoria Própria.

Os cenários da condição drenada consideram o acoplamento das análises de percolação, modeladas pelo método de elementos finitos, e análise de estabilidade, a partir do critério de ruptura de Mohr-coulomb.

Já os cenários da condição não drenada consideram a aplicação direta do método do Equilíbrio-limite, a partir do critério de ruptura de Mohr-coulomb para todos os materiais, exceto para materiais de rejeitos arenosos e rejeitos finos, que foram avaliados pelo critério de Razão de Tensão Vertical, pois ambos apresentam comportamento não-drenado.

Fundamentando-se na teoria Equilíbrio-limite, os materiais do maciço da barragem e os rejeitos finos dos reservatórios foram considerados como materiais isotrópicos homogêneos. Por outro lado, o material da fundação foi considerado anisotrópico homogêneo, tendo em vista a sua composição por filito, que pode ser, naturalmente, capaz de apresentar uma foliação bem-marcada.

Para as análises de estabilidade, observou-se que o aterro da barragem poderia ser subdividido em três setores: rejeitos finos, rejeitos arenosos e aterro composto por material argiloso. Essa diferença de materiais foi avaliada por meio de superfícies críticas de ruptura do tipo circulares e não-circulares, pelo método do equilíbrio limite de Morgenstern-Price. Adicionalmente, serão adotados os métodos do equilíbrio limite de Bishop e Spencer, tendo em vista que ambos os métodos atendem aos requisitos de rigorosidade e satisfação em resolver todas as condições de equilíbrio estático.

Ainda sobre os métodos de pesquisa de superfície críticas de ruptura, ressalta-se que foram avaliadas rupturas em taludes globais e locais. Para rupturas globais foram consideradas potenciais superfícies de rupturas, generalizadas, entre a crista e o pé do talude a uma profundidade mínima de 10 metros; enquanto para as rupturas locais, considerou-se uma potenciais superfícies de rupturas localizadas, que poderiam ocorrer até mesmo em apenas um talude e/ou até dois taludes com uma profundidade mínima de 10 metros. A profundidade mínima de 10 metros foi definida com a finalidade de filtrar cunhas muito superficiais, dado que na prática os taludes estavam todos recobertos por proteção vegetal e uma cunha menor que tal profundidade não seria fidedigna.

As análises de estabilidade são realizadas com auxílio da ABNT NBR 13.028/2017. Essa norma dispõe acerca dos requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projetos de barragens de rejeitos, sedimentos e água. Em ambos os cenários pré-obra e pós-obra os fatores de segurança mínimos requeridos, deverão seguir a Tabela 4-1.

Tabela 4-1 – Fatores de Segurança mínimos para a situação avaliada.

Fase	Tipo de Ruptura	Talude	Fator de Segurança Mínimo
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5

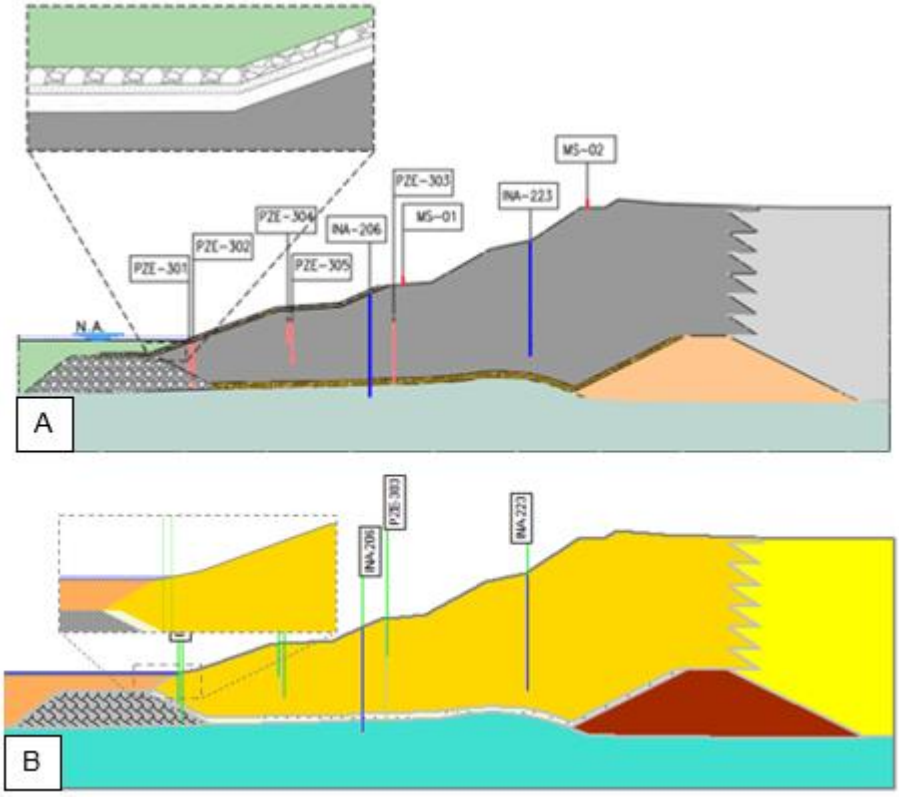
Fonte: ABNT NBR 13.028/2017.

4.2 Seções Geológico-geotécnicas

As seções geológico-geotécnicas apresentadas no capítulo de 3.0 do estudo de caso, mas especificamente nos itens 3.2.1.2 e 3.2.4, serviram como geometria de entrada para o modelo numérico.

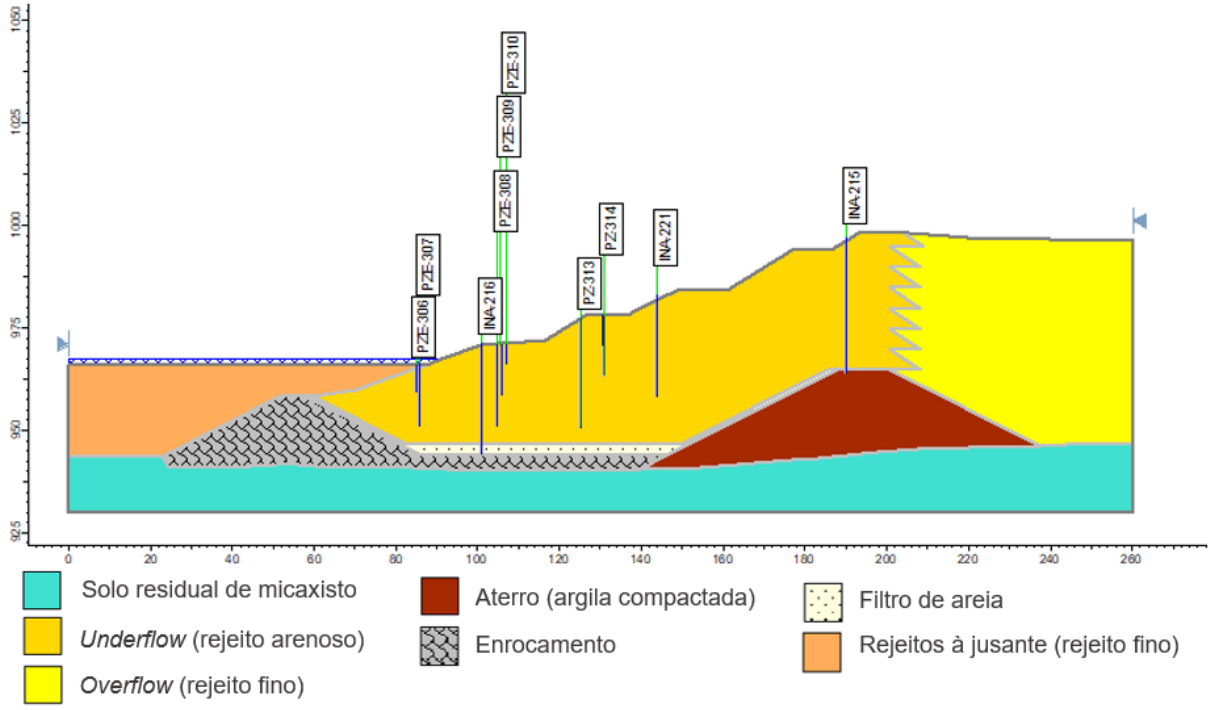
Para a modelagem numérica, as seções originais foram reconstruídas no *software* AutoCAD 2021, por meio de uma simplificação das geometrias nos locais onde havia uma proteção superficial do talude de jusante (areia e enrocamento). Essa simplificação foi feita de forma a evitar divergências ou complexidades durante a avaliação das condições de contorno, com o objetivo de possibilitar uma avaliação mais acadêmica e sintética. Para maior clareza, a Figura 4-1 evidencia um zoom comparativo entre uma geometria original (A) e uma geometria simplificada (B), que por sua vez foi realizado em todas as seções das análises numéricas.

Figura 4-1 – Comparativo entre (A) geometria original; e (B) geometria simplificada.



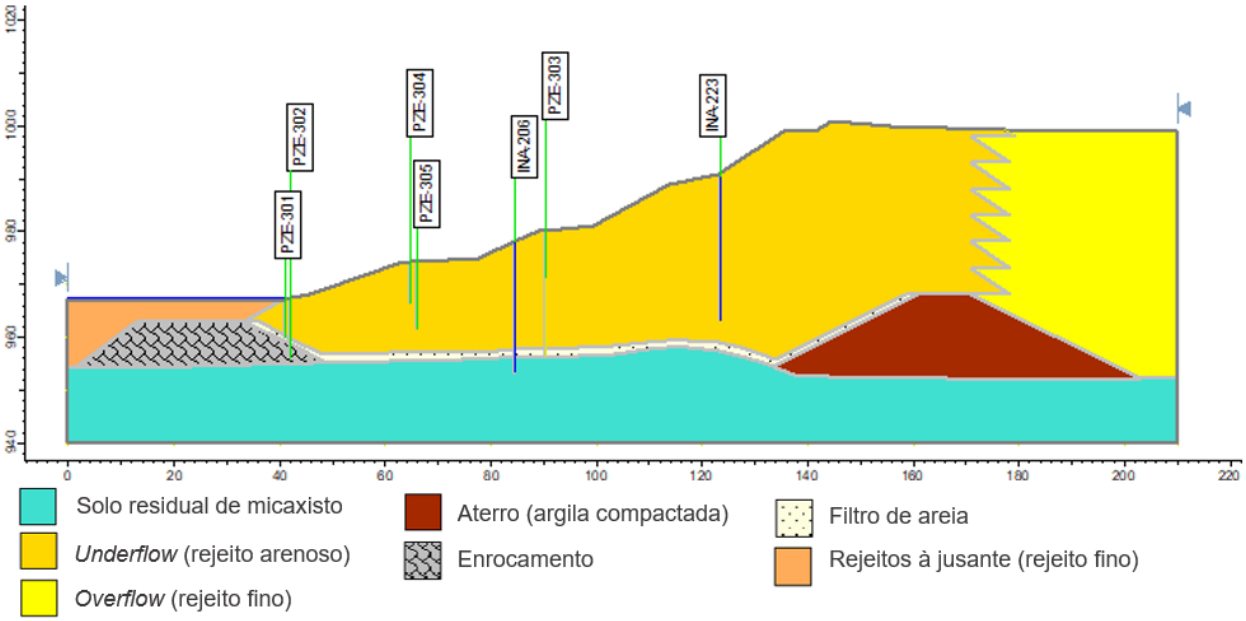
A Figura 4-2 e Figura 4-3 exibem, respectivamente, as principais unidades mapeadas para a seção geológico-geotécnica B-B' e E-E', antes da execução das obras de estabilização. Nas figuras observa-se a localização e profundidade dos instrumentos – Medidores de Nível de Água, Piezômetros – instalados em cada seção. O item 4.5 irá tratar especificamente sobre a definição da posição da freática e níveis piezométricos dos instrumentos de monitoramento.

Figura 4-2 – Seção geológico-geotécnica B-B' do cenário pré-obra da Barragem 1.



Fonte: Autoria própria – SLIDE 2D.

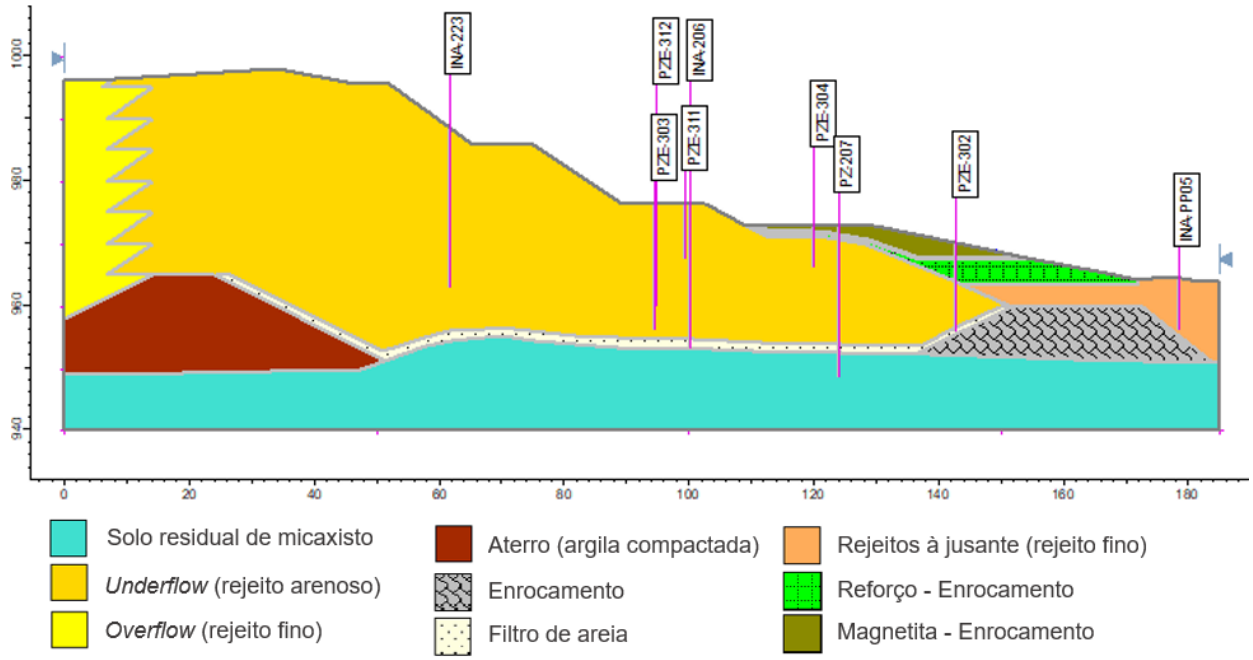
Figura 4-3 – Seção geológico-geotécnica E-E' do cenário pré-obra da Barragem 2.



Fonte: Autoria própria – SLIDE 2D.

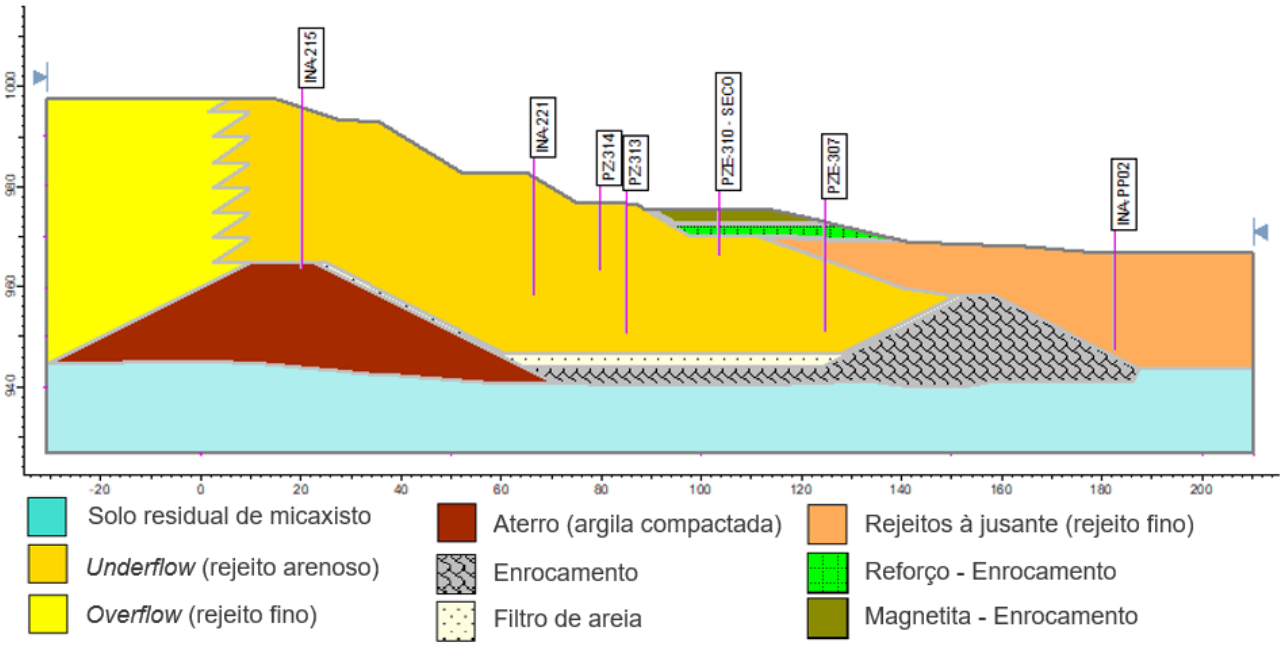
De mesmo modo a Figura 4-4 e Figura 4-5 exibem, respectivamente, as geometrias da seção geológico-geotécnica B-B' e E-E', após a execução das obras de estabilização. Observa-se que para o reforço foram considerados os materiais de enrocamento e aterro compactado em magnetita, como os principais responsáveis pela estabilidade física da estrutura.

Figura 4-4 – Seção geológico-geotécnica B-B' com reforço para a Barragem 1.



Fonte: Autoria própria – SLIDE 2D.

Figura 4-5 – Seção geológico-geotécnica E-E' com reforço para a Barragem 2.



Fonte: Autoria própria – SLIDE 2D.

Ressalta-se que, a Figura 4-4 e Figura 4-5, referentes as seções pós-obra, exibem ainda os poços de rebaixamento PP-05 e PP-02 instalados nestas respectivas seções.

4.3 Malha de Elementos Finitos

Conforme mencionado durante a revisão da literatura (item 2.2.4), o método dos elementos finitos é capaz de lidar com situações mais complexas, quando comparado com o método de diferenças finitas.

A compreensão dos fluxos de águas subterrâneas associados às barragens de rejeitos podem ser tanto quanto complexa e o método mais utilizado para resolver problemas geotécnicos é o método de elementos finitos (FELL *et al.* 2014).

Para as análises de percolação, a serem desenvolvidas neste trabalho, será adotado o método dos elementos finitos e será considerado o estado estacionário da água subterrânea, dado que cenários pré-obra e pós-obra podem ser considerados períodos isolados e não dependentes.

Foram avaliadas diferentes condições de contorno para definição de uma malha de elementos finitos mais representativa da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. As figuras que se seguem, apresentam malhas triangulares de três nós com 1000 (Figura 4-6), 1500 (Figura 4-7), 2000 (Figura 4-8), 2500 (Figura 4-9) e 3000 (Figura 4-10) elementos.

Esta avaliação teve como objetivo realizar a calibração dos modelos numéricos em relação as seções de descarga, que foram inseridas nos modelos. As seções de descarga, por sua vez, permitem simular a vazão de saída dos drenos de fundo instalados nos pés dos taludes de jusante dos barramentos 1 e 2.

Figura 4-6 – Malha com 1000 elementos

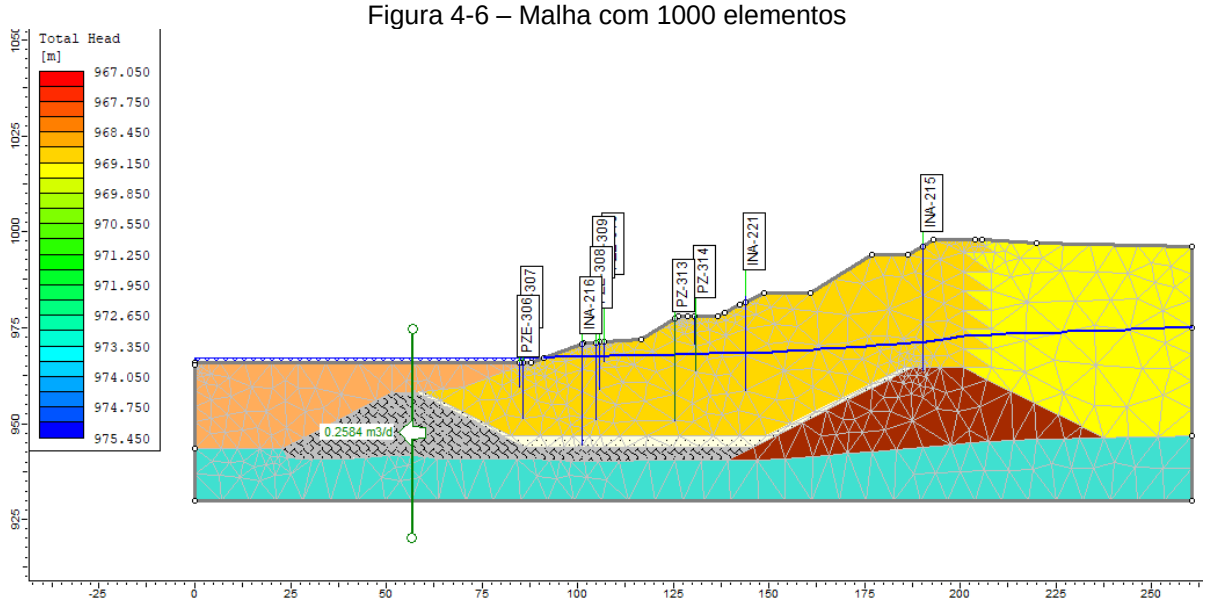
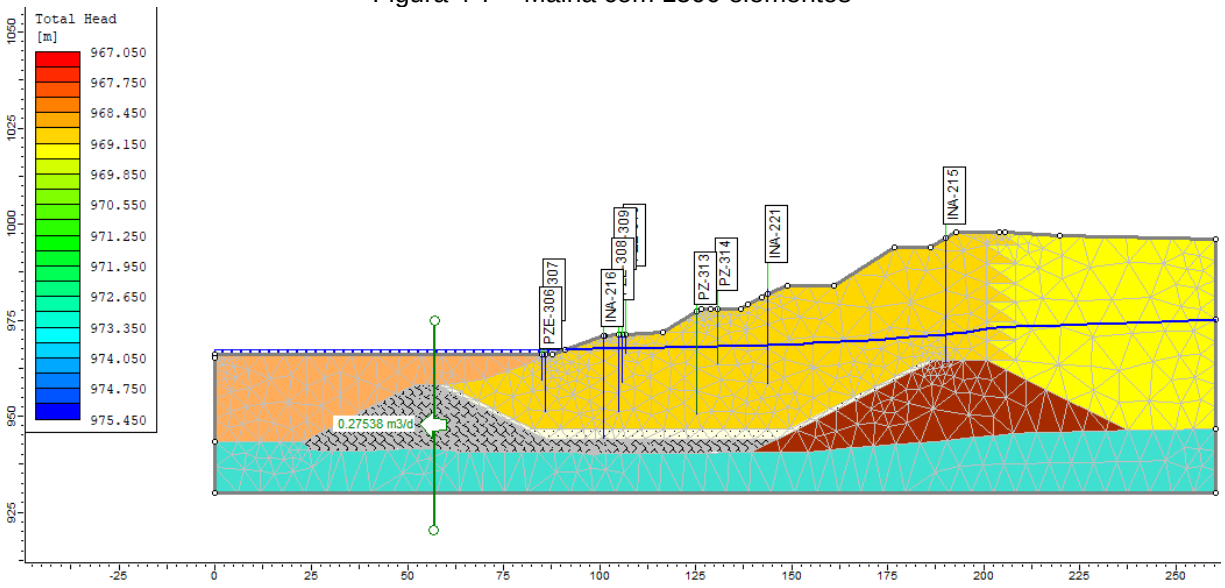
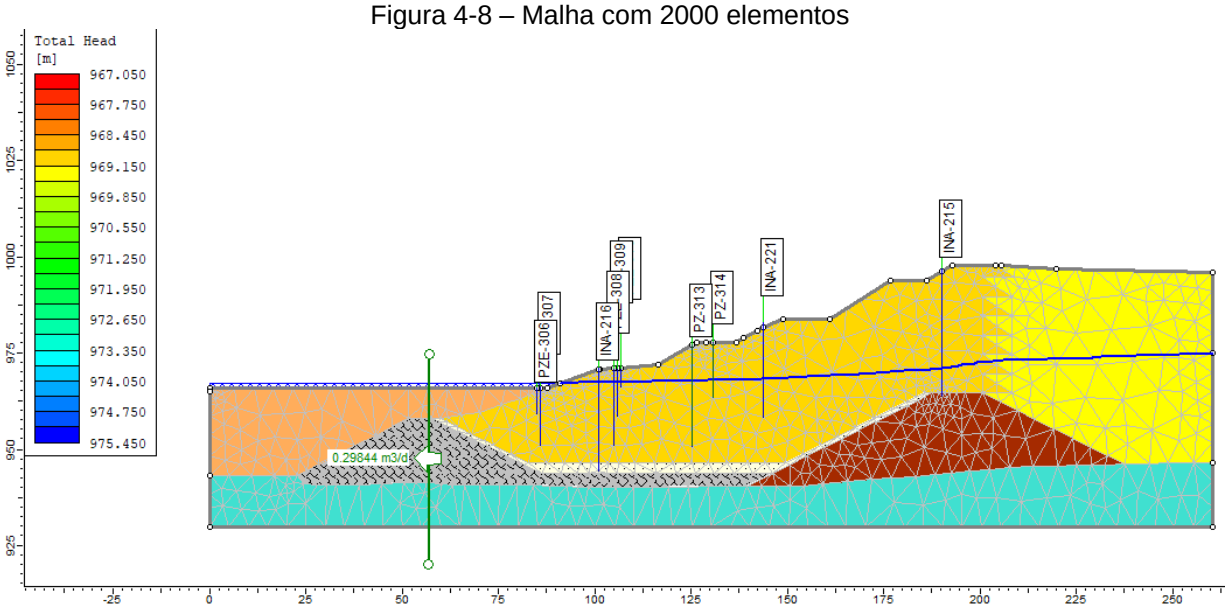


Figura 4-7 – Malha com 1500 elementos



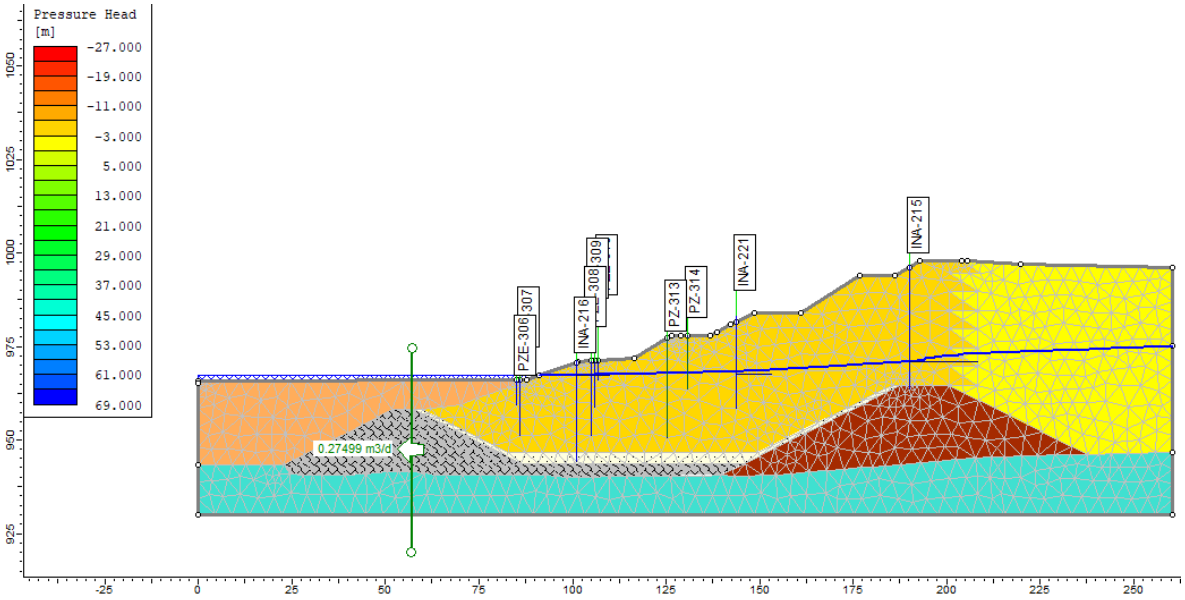
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 4-8 – Malha com 2000 elementos



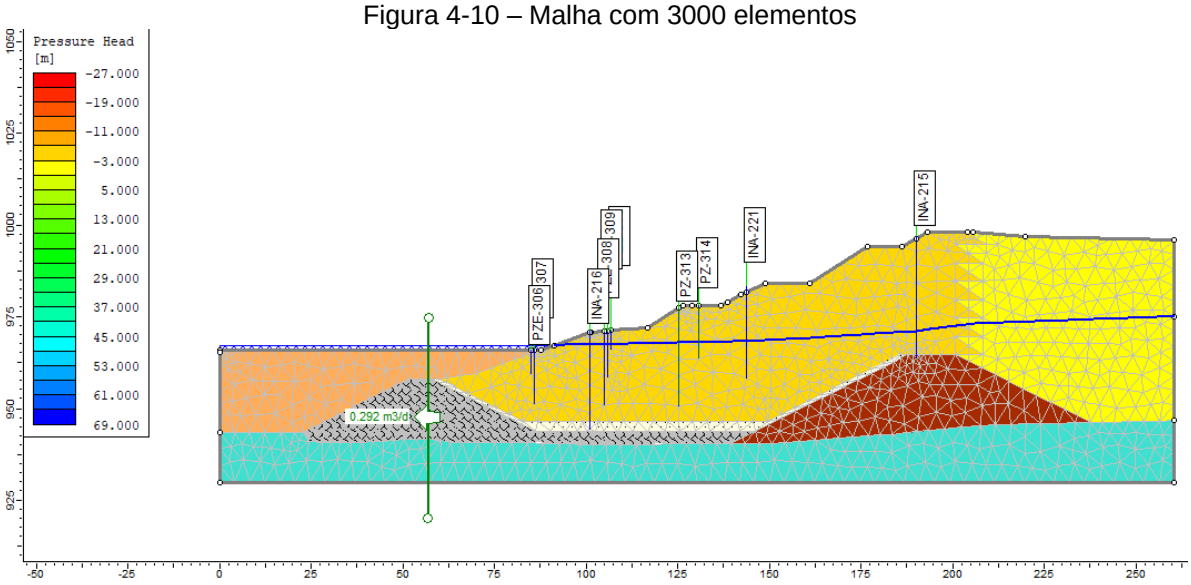
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 4-9 – Malha com 2500 elementos



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 4-10 – Malha com 3000 elementos



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

De acordo com as figuras apresentadas, o melhor ajuste poderá ser feito com a malha de 2.000 elementos finitos, dado que esta malha indicou maiores vazões de saída no dreno de fundo, quando comparadas com as malhas de 1.000, 1.500, 2.500 ou 3.000 elementos finitos.

Dessa maneira, definiu-se a utilização da uma malha de elementos finitos triangulares com três nós contendo 2.000 elementos.

Adicionalmente, foram feitos refinamentos nas malhas em regiões de descontinuidades de materiais, onde encontram-se materiais de filtro e/ou enrocamento. O refinamento foi feito pontualmente por meio do acréscimo de densidade de discretização.

4.4 Investigações Geológico-geotécnicas, Parâmetros Hidráulicos e Parâmetros de Resistência

Para realização da modelagem numérica, é necessário o conhecimento dos parâmetros hidráulicos e de resistência.

A permeabilidade dos materiais de aterro e da fundação foram obtidos por meio de resultados de ensaios de campo e laboratório, executados entre os anos de 2018 e 2020. Desse modo, foram compilados os resultados dos seguintes ensaios:

- Ensaio de permeabilidade saturado *in situ*, à carga constante, realizados nos furos de sondagem à percussão (Ensaio de infiltração);
- Ensaios de permeabilidade saturado em laboratório, à carga variável, realizados por meio de amostras indeformadas.

A investigação geotécnica realizada pela Fosfato Mineração (2020), por meio de vinte e nove (29) boletins de sondagem a percussão (SPT) e mista (SM), que continham a descrição dos respectivos litotipos característicos em profundidade e resultados de ensaios de permeabilidade; bem como resultados de dois (02) ensaios de laboratório de permeabilidade à carga variável, realizados por meio de pontos de coleta (PC) de amostra indeformada, permitiram a definição dos materiais correspondentes para cada ensaio de permeabilidade realizado, conforme disposto no Quadro 4-2 e Quadro 4-3.

Os materiais tiveram como base as unidades geológico-geotécnicas definidas anteriormente: Solo residual de micaxisto, underflow (rejeito arenoso), overflow (rejeito fino), aterro (argila compactada), enrocamento, filtro de areia, e rejeitos à jusante (rejeito fino). As localizações dos ensaios de infiltração *in situ* e dos pontos de coleta de amostras indeformadas estão dispostas na Figura 4-11.

Quadro 4-2 – Parte 1 - Quadro-resumo dos ensaios de infiltração e suas respectivas litologias

ID	Prof. (m)	Litologia	Material	K_{sat} (cm/s)
SM-01	34,0 a 35,0	Solo residual silte arenoso de cor Variegada com presença de minerais Micáceos, medianamente compacto a Compacto de baixa plasticidade e Umidade.	solo residual	2,53E-05
SM-01	37,0 a 38,0	Solo residual silte arenoso de cor Variegada com presença de minerais Micáceos, medianamente compacto a Compacto de baixa plasticidade e Umidade.	solo residual	5,27E-05
SM-03	48,0 a 49,0	Argila siltosa de cor rosa variegada. Compacidade dura e consistência plástica. Presença de mica e grãos de quartzo.	aterro	3,73E-05
SM-03	51,0 a 52,0	Argila siltosa de cor rosa variegada. Compacidade dura e consistência plástica. Presença de mica e grãos de quartzo.	aterro	4,91E-05
SM-08	28,0 a 29,0	Silte argilo-arenoso de cor vermelho. Compacidade rijo e consistência pouco plástica. Presença de mica e de grãos de quartzo.	*underflow*	3,30E-05
SM-08	31,0 a 32,0	Silte argilo-arenoso de cor vermelho. Compacidade rijo e consistência pouco plástica. Presença de mica e de grãos de quartzo.	*underflow*	2,16E-05
SM-09	45,0 a 46,0	Silte arenoso de cor vermelho amarelado. Compacto e pouco plástico. Presença de mica e grãos de quartzo.	*underflow*	5,09E-05
SM-09	48,0 a 49,0	Silte argilo-arenoso de cor rosa variegado. Duro e pouco plástico. Presença de mica e grãos de quartzo.	*underflow*	4,88E-05
SM-10	35,0 a 36,0	Silte argilo-arenoso de cor amarelo variegado. Compacidade duro e consistência pouco plástica. Presença De mica e grãos de quartzo.	*underflow*	6,03E-05

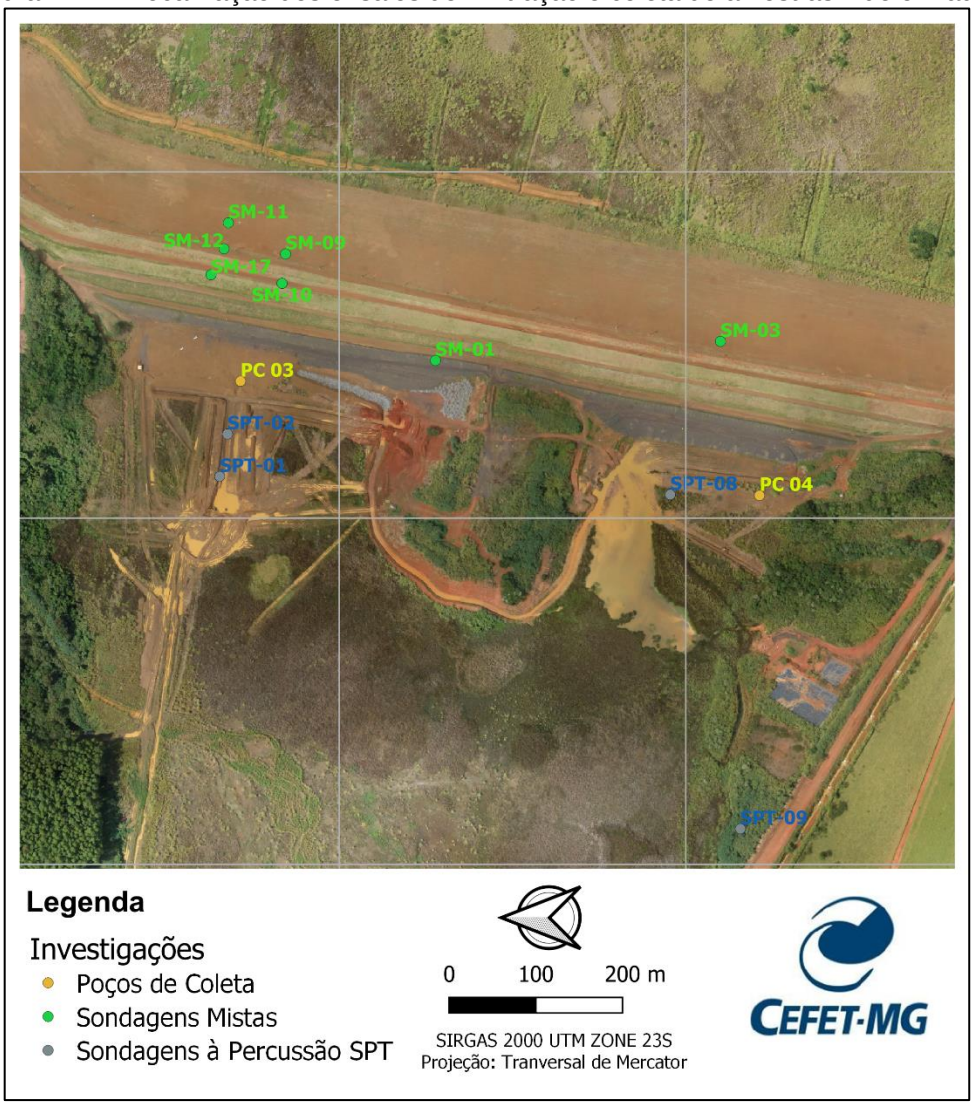
Fonte: adaptado Fosfato Mineração (2020).

Quadro 4-3– Parte 2 - Quadro-resumo dos ensaios de infiltração e suas respectivas litologias

ID	Prof. (m)	Litologia	Material	K_{sat} (cm/s)
SM-10	38,0 a 39,0	Silte argilo-arenoso de cor amarelo variegado. Compacidade duro e consistência pouco plástica. Presença De mica e grãos de quartzo.	*underflow*	6,51E-05
SM-11	54,0 a 55,0	Argila siltosa de cor amarela variegada. Compacidade dura e Consistência plástica.	aterro	6,91E-05
SM-11	57,0 a 58,0	Argila siltosa de cor amarela variegada. Compacidade dura e Consistência plástica.	aterro	8,08E-05
SM-12	53,0 a 54,0	Silte argiloso de cor amarelo. Compacidade duro e consistência plástica. Presença de mica.	*underflow*	3,70E-05
SM-12	56,0 a 57,0	Silte argiloso de cor amarelo. Compacidade duro e consistência Plástico. Presença de mica.	*underflow*	6,24E-05
SM-17	45,0 a 46,0	Argila siltosa de cor amarelo variegado e aspecto sedoso. Material Apresenta mica e grãos de quartzo. Plástico.	aterro	4,70E-05
SPT-01	4,0 a 5,0	Areia fina, marrom escuro, fofo.	barragem à jusante	2,13E-04
SPT-01	9,0 a 10,0	Argila siltosa, amarelo, muito mole.	barragem à jusante	1,10E-04
SPT-01	14,0 a 15,0	Argila siltosa, amarelo, muito mole.	barragem à jusante	2,67E-04
SPT-01	19,0 a 20,0	Argila siltosa, amarelo, muito mole.	barragem à jusante	3,38E-04
SPT-01	24,0 a 25,0	Solo residual silte argiloso médio a rijo.	Solo residual	7,65E-04
SPT-02	4,0 a 5,0	Areia fina, marrom, fofo.	barragem à jusante	7,83E-04
SPT-02	9,0 a 10,0	Areia fina, marrom, fofo.	barragem à jusante	1,34E-03
SPT-02	14,0 a 15,0	Argila siltosa, amarelo, muito mole.	barragem à jusante	6,04E-04
SPT-02	19,0 a 20,0	Silte-arenoso, marrom claro, fofo a pouco compacto.	barragem à jusante	1,92E-04
SPT-02	24,0 a 25,0	Silte argiloso, marrom, médio a Rijo.	solo residual	1,12E-03
SPT-08	14,0 a 15,0	Areia fina, marrom escuro, fofo, rejeito.	barragem à jusante	1,45E-04
SPT-09	4,0 a 5,0	Argila siltosa, marrom escuro, mole, rejeito.	barragem à jusante	1,56E-02
SPT-09	9,0 a 10,0	Silte argiloso, amarelo claro, mole a médio, solo residual.	solo residual	8,02E-05
SPT-09	14,0 a 15,0	Silte argiloso, cinza claro, médio a duro, solo residual	solo residual	5,37E-04
PC 03	0,50 a 0,80	Areia Siltosa	barragem à jusante	3,77E-05
PC 04	0,50 a 0,80	Areia Siltosa	barragem à jusante	8,60E-05

Fonte: adaptado Fosfato Mineração (2020).

Figura 4-11 – Localização dos ensaios de infiltração e coleta de amostras indeformadas.



Fonte: Autoria própria.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram compilados os parâmetros de resistência e pesos específicos das unidades geológico-geotécnicas, definidos a partir de projetos anteriores desenvolvidos pela GEOX Engenharia e GEOY Engenharia. Os dados são resultantes de ensaios de laboratório, realizados entre os anos de 2018 e 2020 para amostras do maciço da barragem e na fundação, a saber:

- Ensaios de compressão triaxial do tipo CIU_{SAT} – saturados, pré-adensados e com medida de poropressão; e
- Ensaios de caracterização física do índice de vazios e massa específica real dos grãos.

Adicionalmente, foram disponibilizados pela Fosfato Mineração, dados provenientes dos ensaios de campo utilizando Piezocone Sísmico (SCPTu), que foram realizados nas unidades geotécnicas *underflow* (rejeito arenoso), *overflow* (rejeito fino) e na barragem à jusante (rejeito

fino). O ensaio SCPTu foi realizado com o objetivo de compreender se estas unidades poderiam apresentar um comportamento drenado ou não-drenado.

As avaliações dos resultados obtidos a partir das investigações com o Piezocone Sísmico (SCPTU), realizadas pela GEOX Engenharia concluíram que os materiais possuíam comportamento não-drenado. Apesar de possuírem granulometrias diferentes, o parâmetro de resistência não drenada de pico, obtido por meio da utilização de resultados de ensaios CPTu, conforme metodologias propostas por Fear e Robertson (1995) *apud* Olson e Stark (2003), ficaram na mesma ordem de grandeza.

De maneira similar, o parâmetro de resistência não drenada de pico foi definido para esse trabalho com base nas interpretações já realizadas anteriormente pela GEOX Engenharia, uma vez a determinação deste parâmetro não foi o foco dessa pesquisa.

4.5 Leitura de Nível d'água e Piezometria

Com o objetivo de avaliar os efeitos das intervenções realizadas na Barragem de Rejeitos Fosfáticos e o comportamento dos instrumentos antes e depois das obras executadas, foram plotados gráficos de leitura dos instrumentos. A partir disso, foram determinadas as datas específicas a serem avaliadas, que seriam representativas dos cenários pré e pós-obras de estabilização. As leituras das cotas relativas dos instrumentos instalados nas seções B-B' e E-E' respectivamente, estão apresentadas de acordo com os Indicadores de nível d'água (Figura 4-12 e Figura 4-13), piezômetros (Figura 4-14 e Figura 4-15) e piezômetros elétricos (Figura 4-16 e Figura 4-17).

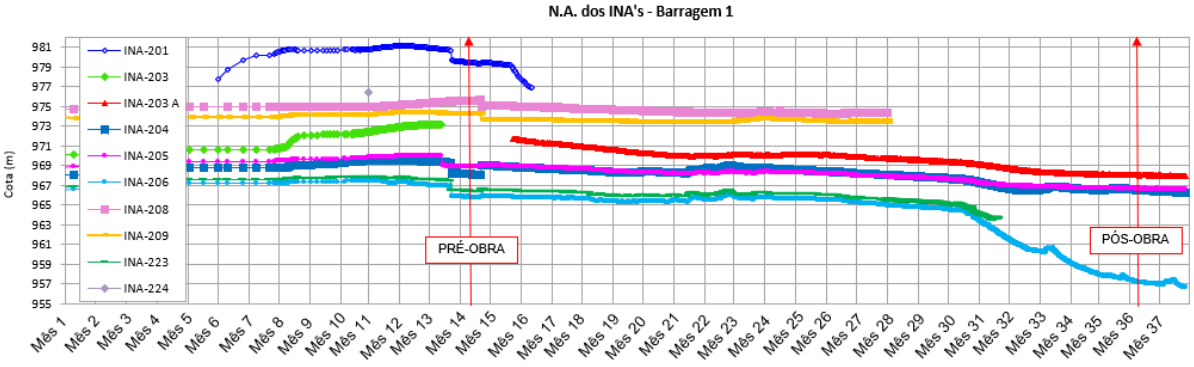
Reitera-se que, no contexto da execução da obra de estabilização, primeiramente foi realizado o rebaixamento do nível freático e, posteriormente, foi executado o reforço da berma de equilíbrio em enrocamento. Dessa maneira, foi considerado que o período "pós-obra" ocorre após três (03) meses da finalização das obras de reforço, dado que, estas leituras estariam estabilizadas.

A partir dos gráficos plotados, observa-se que os instrumentos PZE-305 e PZE-301 (seção B-B' – Figura 4-16); PZE-306, PZE-308 e PZE-309, (seção E-E' – Figura 4-17) e INA-216 (seção E-E' – Figura 4-13) estavam em operação apenas durante o período pré-obra. De maneira similar, os instrumentos PZ-207, PZ-311 e PZ-312 (SEÇÃO B-B – Figura 4-14); INA-PP-05 (SEÇÃO B-B – Figura 4-12) e INA-PP-02 (SEÇÃO E-E' – Figura 4-13) estavam em operação apenas no período pós-obra.

No caso dos instrumentos de monitoramento existentes apenas no período pré-obra, significa que os instrumentos pararam de operar, pois foram danificados durante a obra e, por isso, perderam a capacidade de leitura. Já no caso dos instrumentos de monitoramento que estavam operando apenas no período pós-obra, isso ocorreu, pois os instrumentos não existiam anteriormente e foram instalados para substituição dos instrumentos danificados e/ou para monitorar um fim específico, como no caso dos INAs instalados para monitoramento do nível de água dinâmico dos poços de rebaixamento. Ressalta-se que, por este fato, as seções geológico-geotécnicas são diferentes nas fases pré-obra e pós-obra, pois não possuem os mesmos instrumentos, conforme igualmente apresentado no item 4.2.

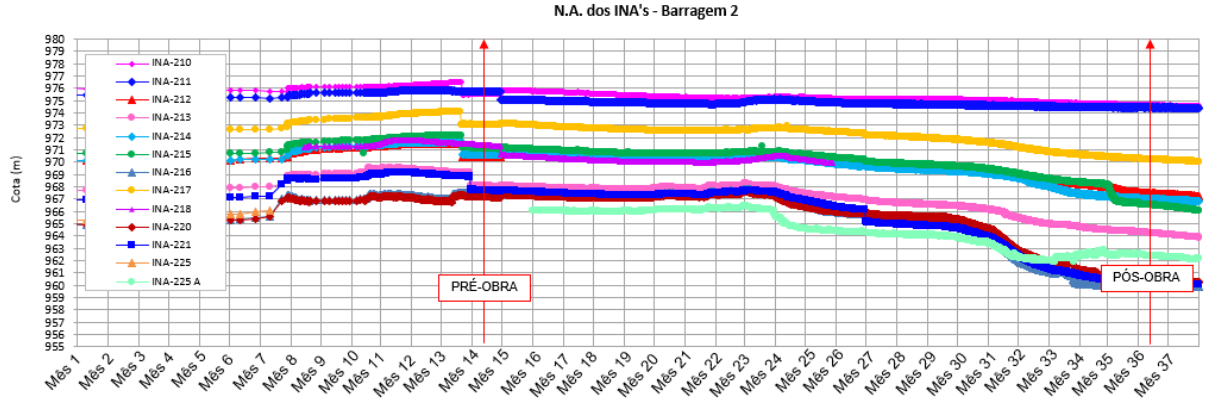
Conforme os gráficos plotados, observa-se uma queda continua na leitura dos instrumentos durante as fases pré-obra e pós-obra. Além disso, observa-se que os Piezômetros Elétricos apresentaram quedas mais evidentes, que os Piezômetros Casagrande e os INA's. Essa observação está coerente com o esperado, uma vez que, esses instrumentos tendem a respostas mais rápidas frente as mudanças que ocorrem nas seções das estruturas.

Figura 4-12 – Leitura dos Medidores de Nível de Água na Seção B-B'



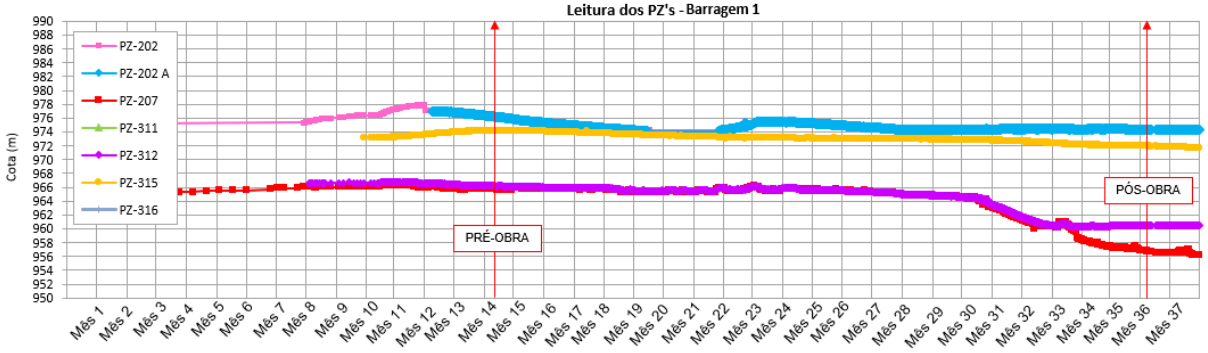
Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Figura 4-13 – Leitura dos Medidores de Nível de Água na Seção E-E'



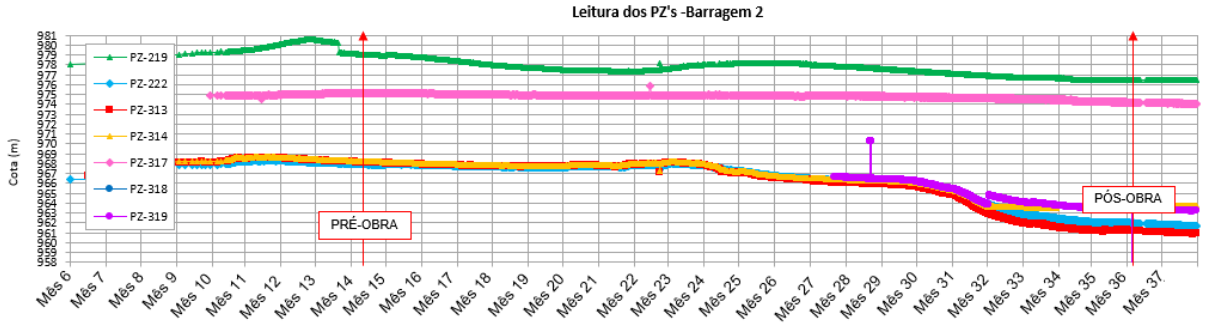
Fonte: Adaptado Empresa de Mineração G (2020).

Figura 4-14 – Leitura dos Piezômetros na Seção B-B’



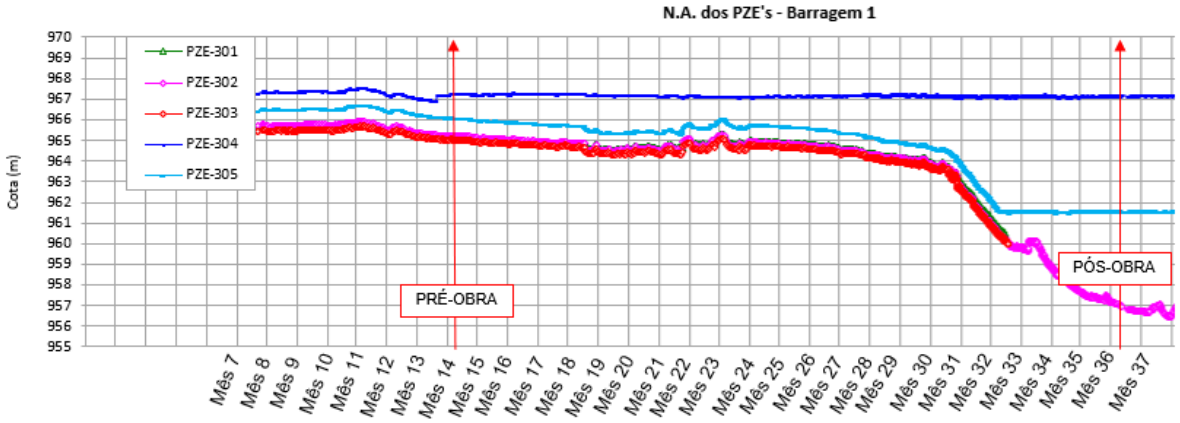
Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Figura 4-15 – Leitura dos Piezômetros na Seção E-E’



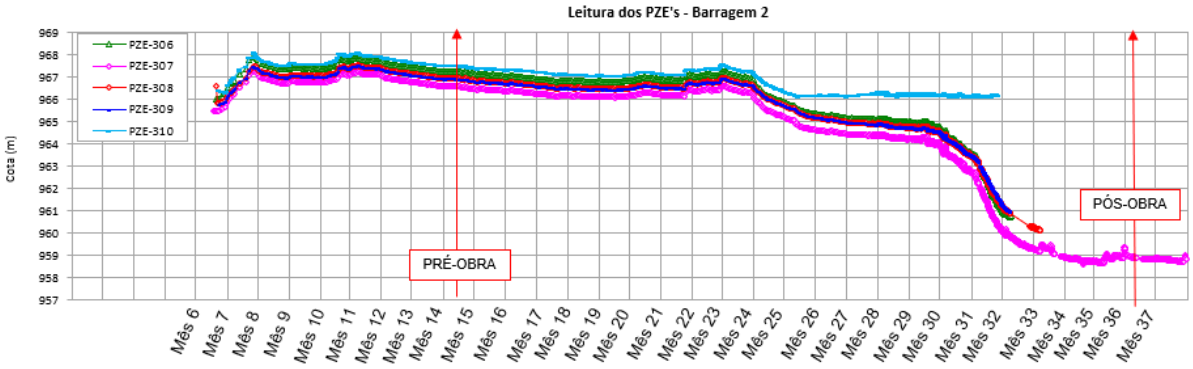
Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Figura 4-16 – Leitura Piezômetros Elétricos na Seção B-B’



Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Figura 4-17 – Leitura dos Piezômetros Elétricos na Seção E-E'



Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

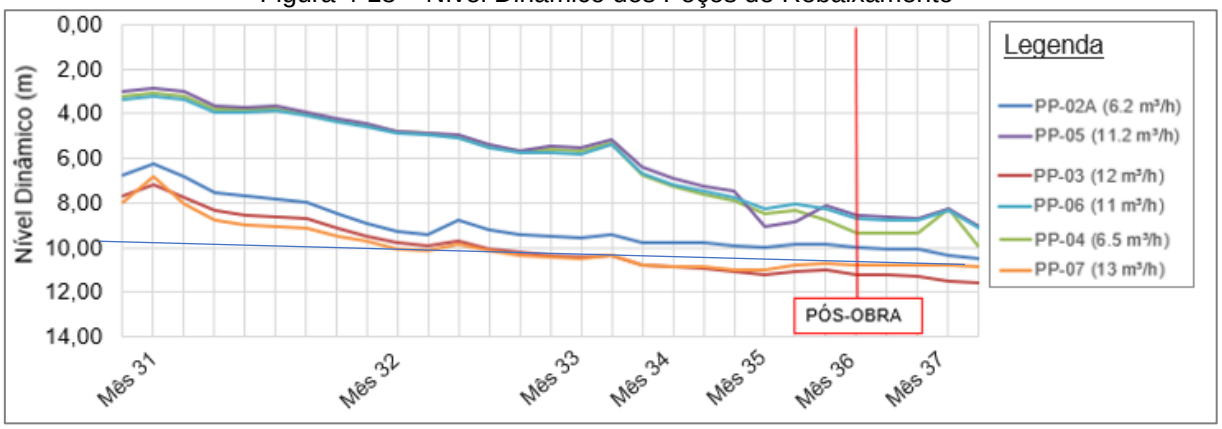
4.6 Leitura dos Poços de Rebaixamento

Para avaliar o efeito da operação dos poços do rebaixamento instalados na Barragem de Rejeitos Fosfáticos, observou-se as diferenças das leituras dos níveis dinâmicos, conforme o passar do tempo. A Figura 4-18 evidencia as leituras dos níveis dinâmicos dos poços de rebaixamento desde o início da operação (nível do terreno em 0,00 m), até o encerramento as obras de estabilização, sendo representado pela fase pós-obra.

Observa-se, que no início da operação, as leituras dos níveis dinâmicos apresentavam, em média, 2,50 m (PP-04, PP-05 e PP-06) m; e 7,50 m (PP-02A, INA-PP-03 e INA-PP-07) m de profundidade na Barragem 1 e na Barragem 2, respectivamente.

No cenário pós-obra, os níveis dinâmicos dos poços instalados chegaram, em média, a 8,0 m e 10,0 m de profundidade na Barragem 1 e na Barragem 2, respectivamente. Isso significa que, com o passar do tempo, a região de jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, deve apresentar uma superfície e subsuperfície cada vez mais seca e com nível de água mais rebaixado.

Figura 4-18 – Nível Dinâmico dos Poços de Rebaixamento



Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

4.7 Funções de condutividade hidráulica

Visando entender o comportamento saturado-insaturado dos materiais do aterro e do rejeito da estrutura, utilizou-se a correlação da condutividade hidráulica com a sucção matricial, segundo o método proposto por Fredlund; Xing (1994) para simular, as condições de fluxo d'água em meios não saturados durante as análises de percolação.

Para aplicação dessa ferramenta, utilizou-se os valores médios dos resultados de ensaios de permeabilidade saturados (ver Tabela 5-1) como dados de entrada para o modelo e, posteriormente utilizou-se o método de Fredlund and Xing (1994) que está disponível no SLIDE (2021) por meio da aplicação da Equação 14.

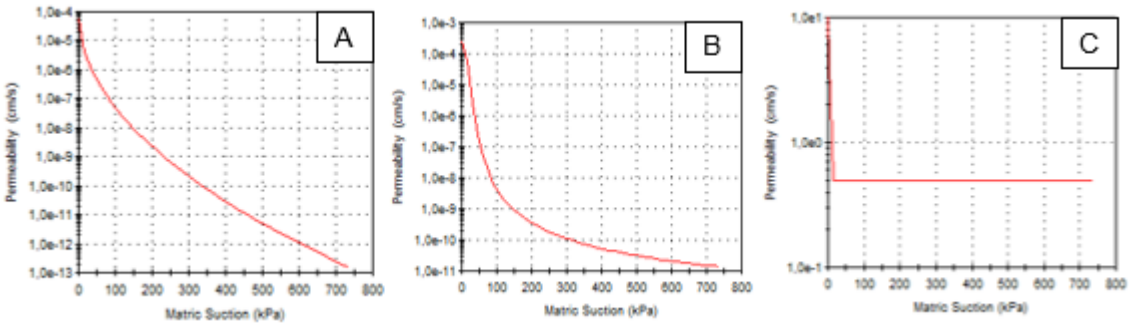
Equação 14

$$K_w = K_s \frac{1}{\left(\ln\left(e + \left(\frac{\varphi}{A}\right)^B\right)\right)^C}$$

Onde, Φ é a sucção matricial; K_s é a permeabilidade saturada; K_w é a permeabilidade não saturada; A, B e C são constantes da curva característica solo-água determinados por Leong e Rahardjo (1997)

Ressalta-se, que o *software* utilizado nessa pesquisa, disponibiliza funções de diferentes tipos de materiais, que podem ser editadas e ajustadas pelo usuário. Entretanto, devido a inexistência de resultados de ensaios de permeabilidade não saturados, esse método pode apresentar uma certa limitação com relação aos rejeitos arenosos e finos avaliados, uma vez que, não foi possível comparar os parâmetros prévios disponibilizados pelo método com ensaios de laboratório. A Figura 4-19 exibe os resultados obtidos para (A) Dique de partida (C) *Overflow* (Finos) e (D) Enrocamento.

Figura 4-19 – Funções de Condutividade Hidráulica Definidas para (A) Dique de Partida (B) *Overflow* (Finos) (C) Enrocamento.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, apresenta-se os dados de entrada e os estudos das simulações numéricas realizados para a Barragem de Rejeitos Fosfáticos. Um estudo de percolação mostrou as condições do fluxo bidimensional na barragem, que foram acoplados em análises de estabilidade para avaliação da condição drenada dos rejeitos.

As seções transversais geológico-geotécnicas de maior altura denominadas B-B' e E-E' da barragem, foram escolhidas para avaliar as condições de campo mais críticas e representativas da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. As simulações de fluxo foram realizadas no *software* SLIDE 2D versão 9.0, desenvolvimento pela empresa ROCSCIENCE®, considerando o regime permanente, em meios saturados e/ou não saturados.

As análises de estabilidade foram realizadas tanto para as em condições drenadas, como para condições não drenadas, visando prever os fatores de segurança gerados antes e após a execução de medidas corretivas na Barragem de Rejeitos Fosfáticos. Para realizar as análises de percolação e de estabilidade da condição drenada foi utilizado o acoplamento das análises pelo método de elementos finitos; já para avaliação da condição não drenada foi aplicada a teoria do equilíbrio limite e utilizados critérios de razão de tensão vertical para os materiais de rejeitos.

Foram gerados fatores de segurança globais e locais, considerando cunhas de ruptura circulares e não-circulares à uma profundidade mínima de 10 metros.

5.1 Dados de Entrada

Neste item, apresenta-se os dados de entrada para realização das simulações numéricas da Barragem de Rejeitos Fosfáticos.

5.1.1 Parâmetros Hidromecânicos e Geotécnicos

Após a compilação dos resultados de permeabilidade dos materiais, realizou-se uma análise estatística dos dados, por meio de gráficos do tipo diagrama de caixa. A ferramenta gráfica permitiu visualizar a distribuição dos dados, valores discrepantes (*outliers*) e, definir a permeabilidade média de cada material.

Evidencia-se que não foram encontrados, no banco de dados, ensaios de permeabilidade dos materiais de enrocamento e filtro ou para materiais os demais materiais de transição (brita 0 e brita 3). A partir da simplificação das geometrias, definiu-se a

permeabilidade do enrocamento com 10 cm/s, conforme valores de referência, apresentados por Bittar (2006), para um dreno similar; enquanto para o filtro de areia, foi considerada a Figura 2-3 como referência, em que a permeabilidade de areias limpas é igual a 1,00E-04 m/s. Entretanto, devido a barragem ter sido construída em meados dos anos 70, acredita-se ser pertinente considerar que os materiais do filtro podem ter sofrido alterações e não se encontram na forma de areia limpa, ou seja, podem estar com algumas obstruções.

A partir da calibração do modelo considerou-se mais adequado utilizar a permeabilidade do filtro de areia com 1,00E-05 m/s ou 1,00E-03 cm/s. A partir das definições estabelecidas, os valores de permeabilidade ou condutividade hidráulica estimados para cada um dos materiais e a anisotropia associada, seguirá conforme a Tabela 5-1.

Tabela 5-1 – Valores de permeabilidade para materiais do aterro e da fundação.

Material	Permeabilidade K_{sat} (cm/s)	Permeabilidade K_{sat} (m/s)	Anisotropia
Solo Residual	3,09E-04	3,09E-06	1,25H: 1V
Underflow (Rejeito Arenoso)	5,00E-05	5,00E-07	1,00H: 1V
Aterro (Argila Compactada)	5,67E-05	5,67E-07	1,00H: 1V
Enrocamento	1,00E+01	1,00E-01	1,00H: 1V
Filtro	1,00E-03	1,00E-05	1,00H: 1V
Barragem à jusante	2,40E-04	2,40E-06	1,00H: 1V
Overflow (Rejeitos finos)	2,40E-04	2,40E-06	1,00H: 1V

Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Os parâmetros geotécnicos de resistência e os pesos específicos característicos dos materiais da barragem e da fundação, definidos previamente em estudos anteriores apresentados pela GEOX Engenharia (2020) e GEOY Engenharia (2020), bem como o parâmetro de resistência não drenada de pico para os rejeitos arenosos e finos, definidos pela GEOX Engenharia (2020), seguem apresentados conforme a Tabela 5-2.

Tabela 5-2 – Parâmetros geotécnicos de resistência

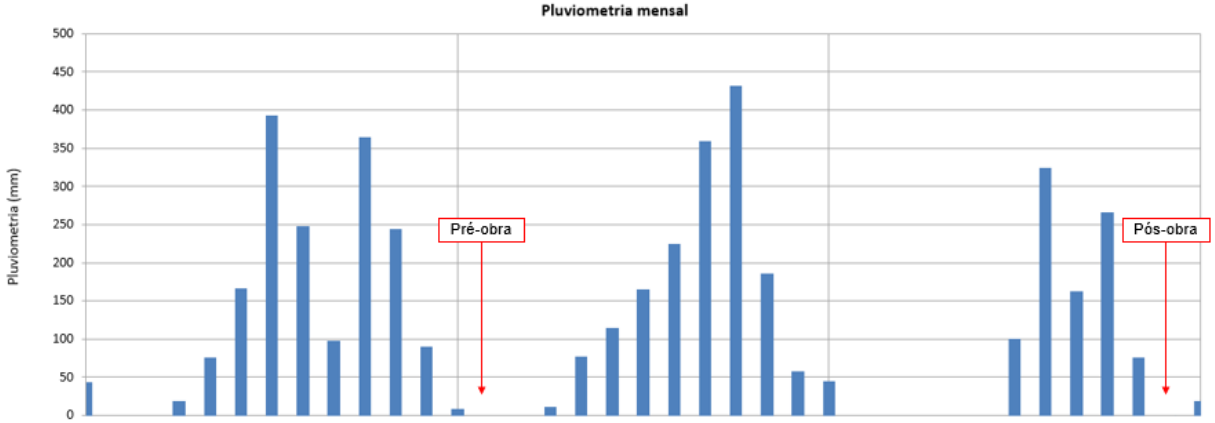
Material	Peso Específico γ (kN/m³)	Coesão c' (kN/m²)	Ângulo de Atrito ϕ' (°)	Su/σ_{v0}'
Overflow (Rejeito fino)	18	0	30	-
Underflow (Rejeito arenoso)	18	0	32	-
Aterro (Argila Compactada)	19	6	27	-
Solo Residual	18,5	17,2	27	-
Enrocamento	22	0	37	-
Filtro	19	0	30	-
Overflow (Rejeito fino) – Não drenado	20	-	-	0,23
Underflow (Rejeito arenoso) – Não drenado	20	-	-	0,23
Reforço – Enrocamento	22	0	37	-
Reforço – Magnetita	29	0	37	-

Fonte: Adaptado GEOX Engenharia (2020) e GEOY Engenharia (2020).

5.1.2 *Pluviometria*

As leituras do pluviômetro instalado em local próximo à estrutura, indicam se pode haver a necessidade de incluir uma condição de contorno correlacionada a precipitação e infiltração de água nos cenários avaliados. As leituras históricas registradas no instrumento estão apresentadas na Figura 5-1 para o cenário de 3 anos, onde destaca-se o mês de referência dos cenários pré-obra e pós-obra.

Figura 5-1 – Pluviometria Mensal Registrada na Área da Barragem de Rejeitos Fosfáticos.



Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

Ao observar as leituras registradas na Figura 5-1, conclui-se que apesar das análises se encontrarem nos finais de períodos chuvosos, nos intervalos de pelo menos 30 dias antes e 30 dias depois dos períodos pré-obra e pós-obra, não houve nenhuma precipitação significativa. Desse modo, não se considerou necessário incluir informações relativas à precipitação em nenhum dos cenários a serem estudados, dado que as leituras dos instrumentos de monitoramento já se encontrariam estabilizas. Ressalta-se que nesse trabalho, não foram consideradas a execução de análises de estabilidade em condições extremas de operação.

5.1.3 *Leitura de Nível d'água, Piezometria e Nível Dinâmico dos Poços*

Com o objetivo de avaliar os efeitos das intervenções realizadas na Barragem de Rejeitos Fosfáticos e o comportamento dos instrumentos antes e depois das obras executadas; a análise dos dados foi realizada para datas específicas e baseada nas diferenças das leituras dos instrumentos antes e após obras de estabilização. As leituras das cotas relativas aos indicadores de nível d'água, piezômetros, piezômetros elétricos, que foram utilizados como dados de entrada das condições do contorno dos modelos numéricos, estão disponibilizados conforme as Tabela 5-3 e Tabela 5-4 para a seção B-B' e Seção E-E', respectivamente.

Tabela 5-3 – Leitura dos instrumentos na Seção B-B' da Barragem 1.

Seção Geológico-geotécnica B-B'				
ID	**Cota de topo (m)**	**Prof. (m)**	**Cota (m) Pré-obra**	**Cota (m) Pós-obra**
PZ-315 (Reservatório)	996,38	26,21	973,790	971,93
INA-223	990,48	27,24	966,428	Seco
PZE-303	971,50	15,00	965,006	Seco
PZ-312	977,06	16,96	-	960,550
PZ-311	977,06	9,39	-	Seco
INA-206	996,83	22,75	965,813	960,550
PZE-305	973,89	12,39	966,061	*
PZE-304	973,90	7,40	967,241	967,170
PZ-207	973,92	25,05	-	956,709
PZE-302	971,23	15,19	965,185	956,992
PZE-301	959,98	6,30	967,500	*
INA-PP-05	965,75	12,68	-	957,180

Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

*Instrumento danificado durante a obra de reforço

Tabela 5-4 – Leitura dos instrumentos na Seção E-E' da Barragem 2.

Seção Geológico-geotécnica E-E'				
ID	**Cota de topo (m)**	**Prof. (m)**	**Cota (m) Pré-obra**	**Cota (m) Pós-obra**
PZ-317 (Reservatório)	997,48	25,08	975,12	974,16
INA-215	996,83	33,01	971,096	966,523
INA-221	983,13	24,64	967,692	960,306
PZ-314	977,49	14,08	968,200	963,720
PZ-313	977,28	26,56	968,100	961,160
PZE-310	976,47	10,20	967,541	Seco
PZE-309	976,47	17,66	966,925	*
PZE-308	976,48	25,27	966,952	*
INA-216	971,27	26,85	966,596	*
PZE-307	973,99	22,71	967,252	958,881
PZE-306	973,74	14,32	967,90	*
INA-PP-02	968,00	12,50	-	957,980

Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

*Instrumento danificado durante a obra de reforço

Os instrumentos de principal referência para calibração o modelo foram:

- reservatório – instrumentos PZ-315 e PZ-317 instalados no reservatório
- situação pré-obra – instrumentos PZE-307 e PZE-301 instalados mais a jusante, no pé da estrutura.
- situação pós-obra – instrumentos INA-PP-05 e INA-PP-02 instalados mais a jusante, nos poços de rebaixamento.

5.1.4 Leitura de Nível Dinâmico dos Poços Tubulares

Para avaliar o efeito da operação dos poços do rebaixamento instalados na Barragem de Rejeitos Fosfáticos, observou-se as diferenças das leituras dos níveis dinâmicos (ND), em data específica, para o cenário pós-obra. A Tabela 5-5 apresenta os dados cadastrais e as leituras das cotas relativas desde o início da operação, até dada como encerrada as obras de estabilização.

As leituras dos níveis dinâmicos ND (m) escolhidas para serem utilizadas no modelo numérico do cenário pós-obra, são as cotas referentes aos poços PP-05 e PP-02, uma vez que, estes se encontram instalados nas respectivas seções geológico-geotécnicas B-B' e E-E', consideradas nesse estudo.

Para aplicação no modelo numérico, as leituras dos níveis dinâmicos ND (m) foram subtraídas das respectivas cotas de elevação de instalação dos poços tubulares. Dessa maneira, os ND (m) considerados para os instrumentos INA-PP-05 e INA-PP-02 foram iguais a profundidade de 10,02 m e 8,57 m abaixo das cotas de elevação da cota do terreno 965,75 m e 968,00 m, conforme a Figura 4-4 e Figura 4-5, respectivamente. Feito isso, foi possível inserir corretamente o nível de água dinâmico dos poços tubulares no modelo numérico.

Tabela 5-5 – Dados Cadastrais e Nível Dinâmico dos Poços de Rebaixamento

ID	Prof. Rejeito (m)	Prof. Enrocamento (m)	Prof. Total (m)	ND Inicial (m)	ND (m) Pós-obra
PP-02	8,49	6,00	12,50	4,45	10,02
PP-03	12,00	6,00	18,00	5,85	11,18
PP-04	5,90	6,77	12,67	1,90	9,35
PP-05	5,60	7,00	12,68	2,89	8,57
PP-06	6,10	6,00	12,00	2,91	8,66
PP-07	12,70	6,00	18,70	6,82	10,75

Fonte: Adaptado Fosfato Mineração (2020).

5.2 Cenários pré-obra

Os cenários pré-obra das seções geológico-geotécnica B-B’ e E-E’ nas condições drenada e não drenada e os respectivos fatores de segurança e métodos de análise são apresentados no Quadro 5-1.

Quadro 5-1 - Cenários pré-obra modelados

Fase	Seção	Condição dos Materiais	Fator de Segurança	Métodos de Análise
Pré-obra	B-B’	Condição Drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
		Condição Não drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
	E-E’	Condição Drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
		Condição Não drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price

Autoria Própria.

5.2.1 Seção geológico-geotécnica B-B’

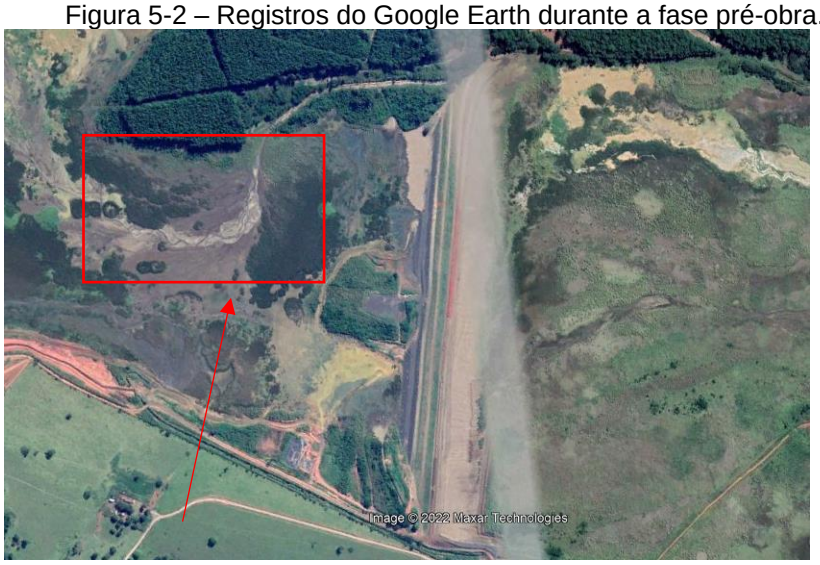
A avaliação das condições de contorno do modelo numérico da fase pré-obra, indicou que as leituras dos instrumentos da seção geológico-geotécnica B-B’ (Tabela 5-3), não evidenciavam queda de potencial no sentido de montante para jusante. Isso significa que a direção de fluxo interno da barragem era negativo, indicando a entrada de água pelo dreno de fundo localizado no pé do talude da barragem e, não a saída do fluxo com sinal positivo, como era esperado.

Diante da anomalia observada, considerou-se apenas a leitura dos medidores de nível de água INA-223 e INA-206 para seção geológico-geotécnica B-B’. Entretanto, ainda assim, as linhas equipotenciais resultantes para essa seção apresentaram inconsistências.

Visando entender o comportamento anômalo das linhas equipotenciais, foram avaliadas outras influências externas, que ainda não tinham sido contabilizadas. Reitera-se que, conforme discutido no item 5.1 - Figura 5-1, não houve contribuição proveniente de precipitação local para o período avaliado. Por outro lado, registros do Google Earth, indicaram que durante o período estudado, materiais de rejeitos estavam sendo depositados próximos ao pé do talude de jusante da seção geológico-geotécnica B-B’ (Figura 5-2).

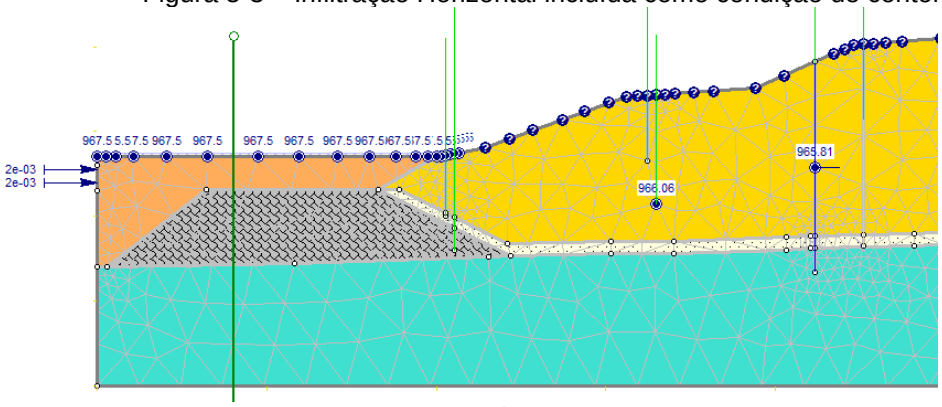
Dessa maneira, buscou-se representar o fluxo contrário de deposição de rejeitos neste local, por meio da inclusão de uma infiltração horizontal equivalente a $2x10E^{-3}$ m/d no pé do talude de jusante (Figura 5-3).

Figura 5-2 – Registros do Google Earth durante a fase pré-obra.



Fonte: Google Earth.

Figura 5-3 – Infiltração Horizontal incluída como condição de contorno.



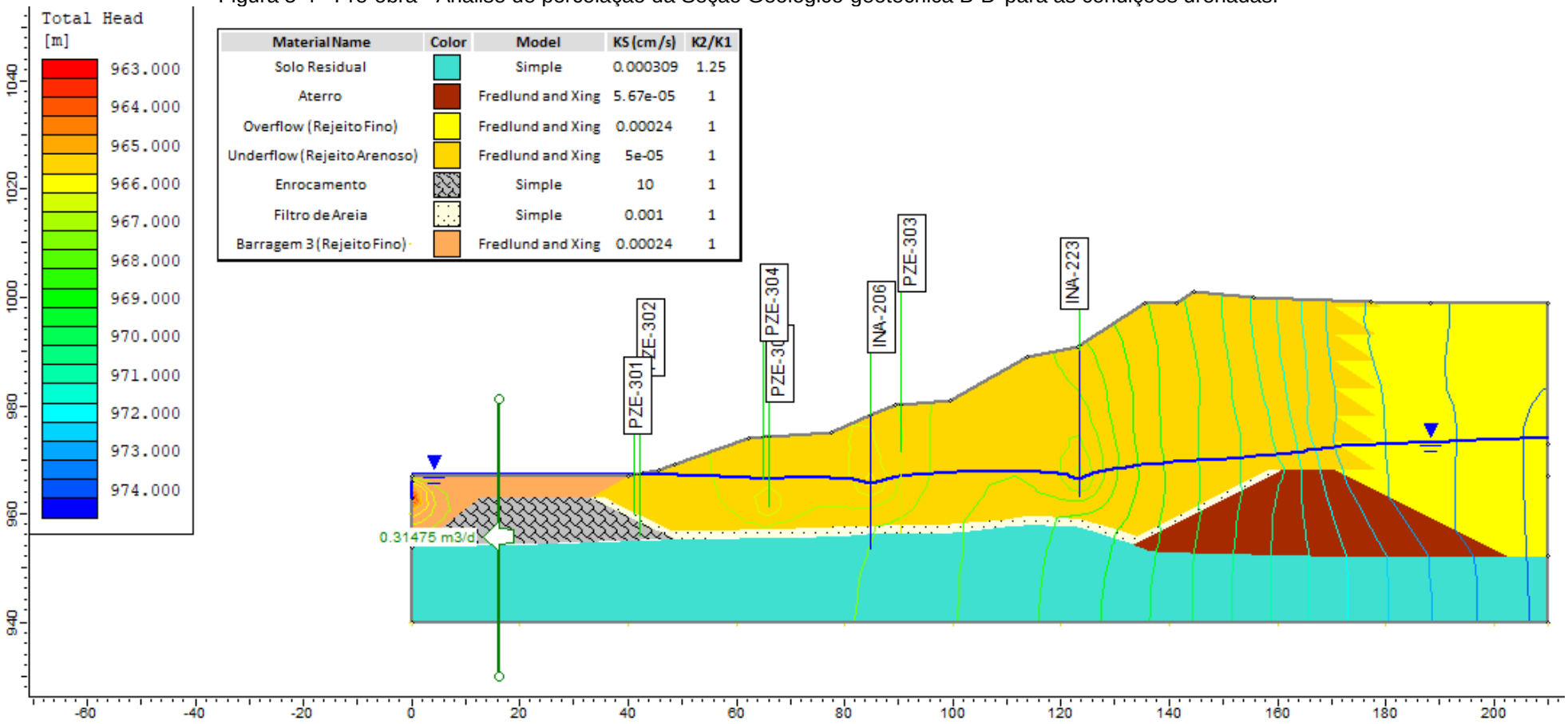
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

A Figura 5-4 apresenta o resultado da análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica B-B', evidenciando as linhas equipotenciais obtidas para as condições drenadas dos cenários pré-obra.

Em resposta, o modelo confirmou a hipótese que as condições de fluxo interno normal da barragem, poderiam estar sendo alteradas por influência de lançamento de lama de rejeitos proveniente da região do entorno. Observa-se que o modelo indicou corretamente a direção do fluxo de saída de água pelo sentido de jusante e quedas de potencial, aproximadamente, contínuas. A seção de descarga apresentou valores na ordem de 13,11 l/h (Figura 5-4).

Os resultados obtidos a partir da análise de percolação da seção geológico-geotécnica B-B’ são representativos para dar continuidade as análises de estabilidade para a condição drenada, entretanto, recomenda-se a realização de modelagem hidrogeológica 3D para simular com maior precisão a contribuição de deposição de rejeitos no local.

Figura 5-4 - Pré-obra - Análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica B-B' para as condições drenadas.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Após modelagem da rede de fluxo de percolação, foi acoplada análise de estabilidade para avaliação dos fatores de segurança para as condições drenadas. A Figura 5-5 e Figura 5-6 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 1.96 e local igual 1.70 para a condição drenada do cenário pré-obra.

Os resultados obtidos indicam que, apesar de haver um grande volume de deposição de rejeitos à jusante, os fatores de segurança foram satisfatórios para a condição drenada. Entretanto, conforme observado anteriormente, os fluxos internos aparentam não estar equilibrados, necessitando de um acompanhamento dos níveis de saturação no pé do talude de jusante da barragem.

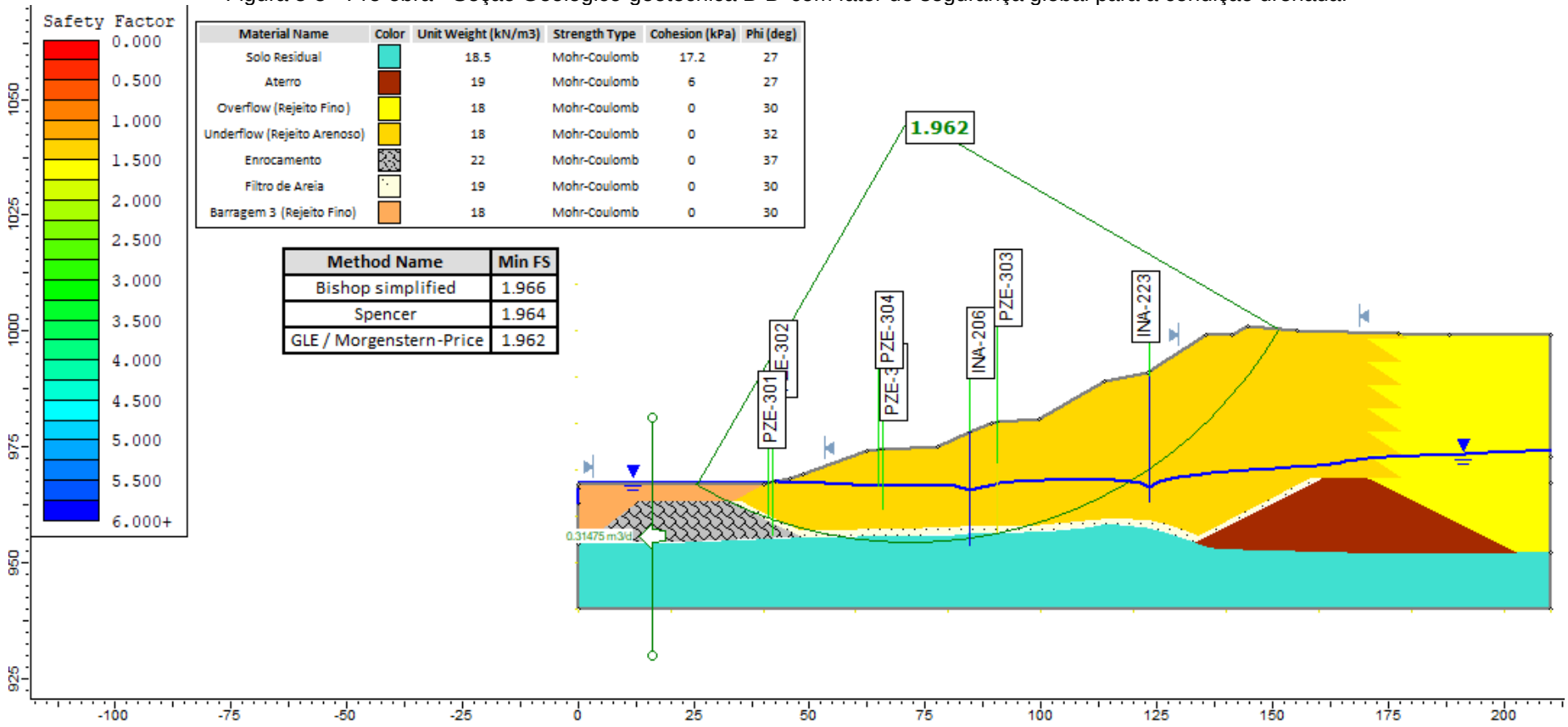
Adiante, foram realizadas análises de estabilidade para as condições não drenadas pelo método do equilíbrio-limite com aplicação geral dos critérios de Mohr-coulomb e aplicação da razão de tensão vertical. Ressalta-se que, a característica de comportamento não-drenado foi inclusa apenas para aqueles materiais que se encontram abaixo do lençol freático, sendo que os mesmos materiais que estão acima do lençol freático foram modelados considerando os mesmos critérios de Mohr-coulomb utilizados para a condição drenada. A condição de contorno do nível freático foi definido com auxílio dos medidores de nível de água INA-223 e INA-206.

A Figura 5-7 e Figura 5-8 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 1.19 e local igual 1.17 para a condição não drenada do cenário pré-obra. Os resultados obtidos indicam que, tanto o talude global como a região do pé do talude de jusante não atenderam os critérios de segurança desejados.

Dessa maneira, conclui-se que para condição não drenada, tanto os fatores de segurança global, como o local, ficaram abaixo do preconizado pela norma ABNT NBR 13.028/2017, que recomenda FS do talude de jusante de no mínimo 1,50 para condição de rede fluxo em operação normal.

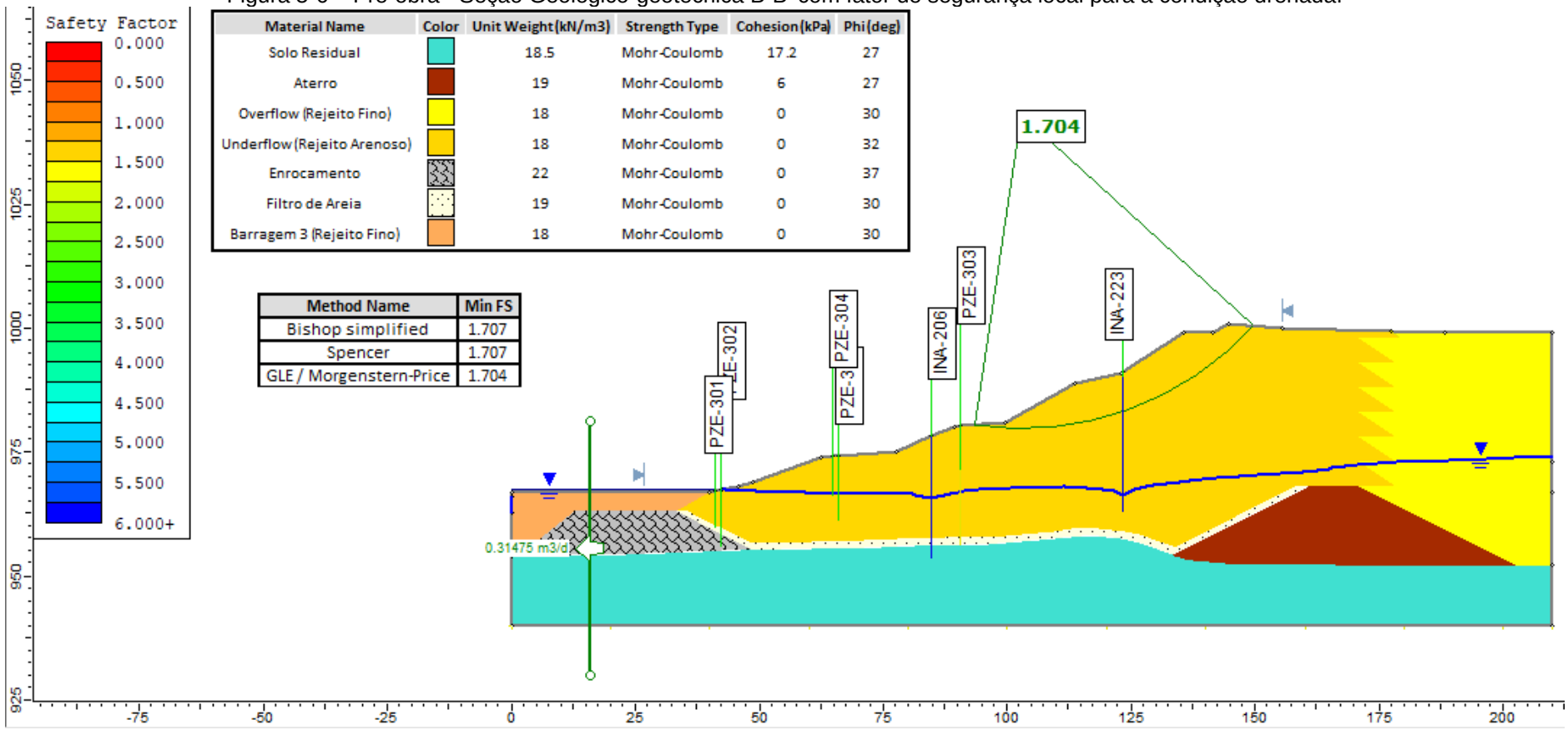
Uma outra observação importante é que um FS nessa ordem de grandeza, indica a necessidade de medidas corretivas emergenciais. Entretanto, propõe-se que a simplificação das geometrias originais que foram feitas na região de proteção no pé do talude de jusante, pode ter resultado fatores de segurança subestimados. Essa conclusão pode ser feita, tendo em vista que durante as visitas de campo realizadas, não foram observados processos de instabilização, presença de erosões, trincas ou surgências no talude de jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. Isso indica que a avaliação de estabilidade geotécnica com uma geometria complexa poderia alterar significativamente os resultados.

Figura 5-5 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição drenada.



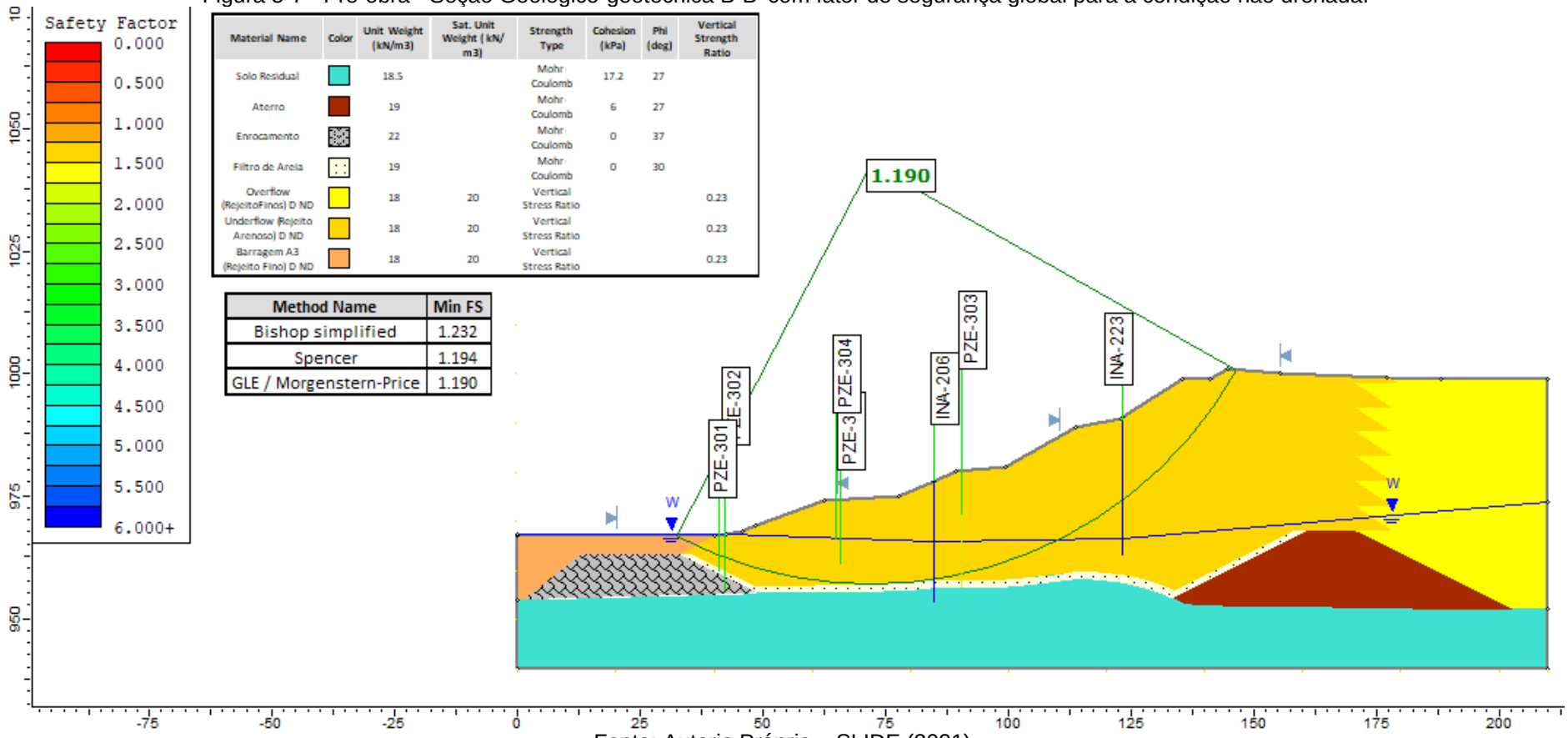
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-6 – Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição drenada.



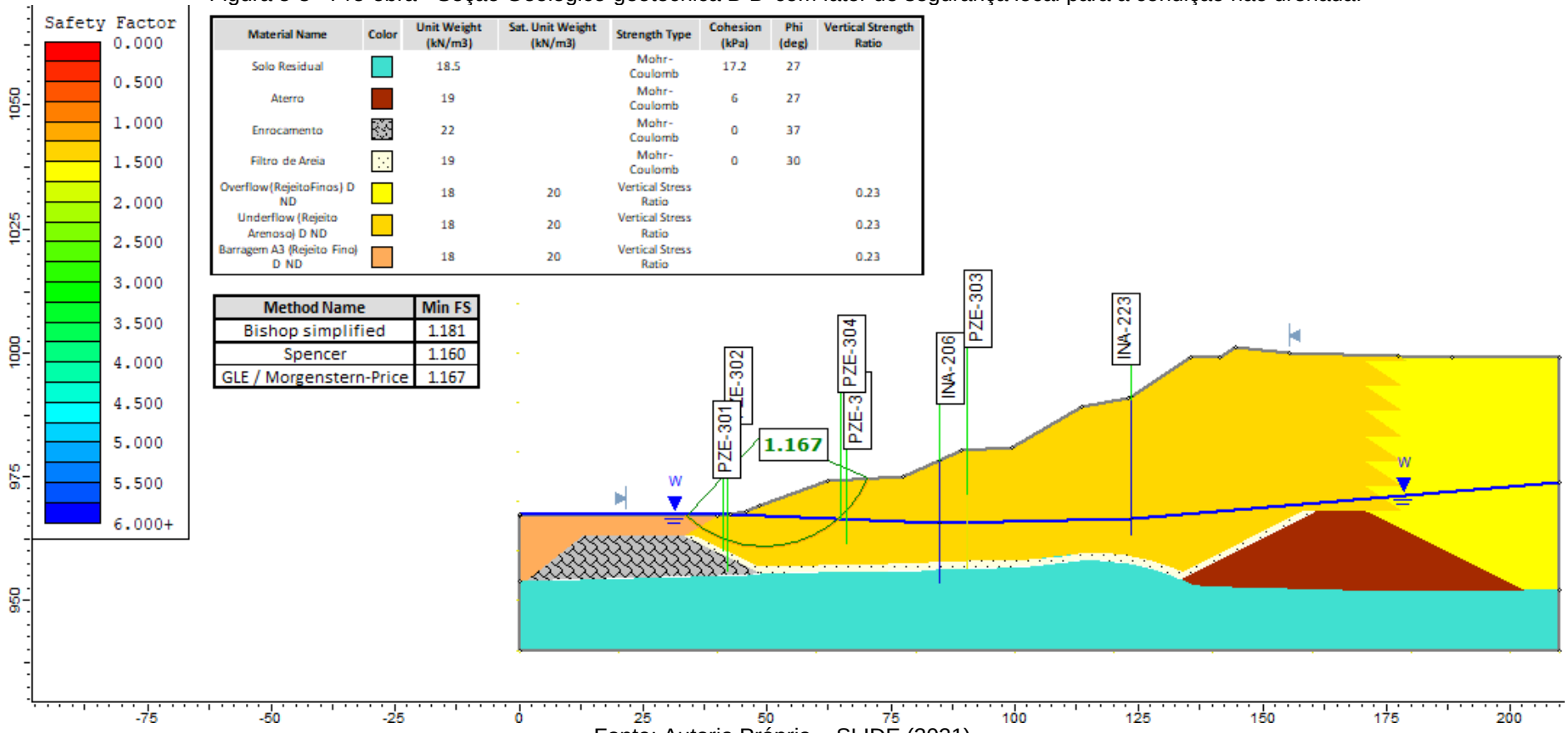
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-7 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-8 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

5.2.2 Seção geológico-geotécnica E-E’

As leituras dos instrumentos da seção geológico-geotécnica E-E’ (Tabela 5-4), apresentam queda de potencial no sentido de montante para jusante, indicando a saída do fluxo com sinal positivo. Dessa maneira, não foi necessário a aplicação de fluxo de infiltração horizontal, como foi realizado anteriormente para a seção B-B’.

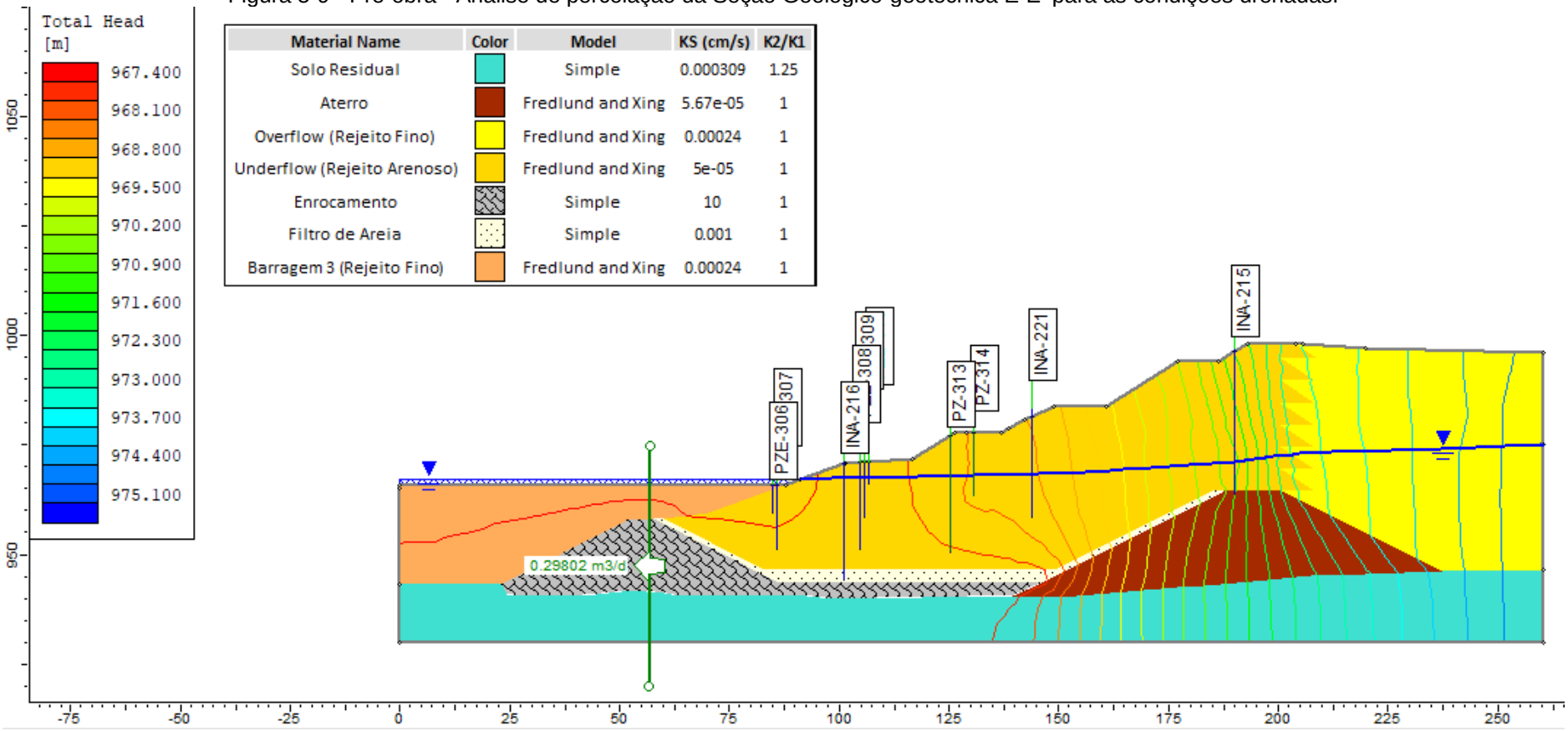
Como condições de contorno, foram incluídas as leituras do Indicador de nível de água INA-215 e dos piezômetros PZE-314, PZE-310 e PZE-307 instalados no maciço do barramento.

A Figura 5-9 apresenta o resultado da análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica E-E’, evidenciando as linhas equipotenciais obtidas para as condições drenadas dos cenários pré-obra. Observa-se que os fluxos de percolação estão sendo corretamente direcionados para o tapete drenante e, que a seção de descarga apresenta valores coerentes na ordem de 12,42 l/h.

A partir do resultado da Figura 5-9, observa-se a formação de uma região alagada à jusante da seção E-E’. De maneira similar a situação observada na análise de percolação da seção B-B’, este fato pode ser correlacionado com a presença de deposição de rejeito, durante o período avaliado. Essa observação, consiste em ponto de atenção importante do ponto de vista de saturação do maciço da barragem, uma vez que, a presença de materiais moles de rejeitos, podem promover uma obstrução do dreno de pé da estrutura.

Em consonância com o histórico de leituras dos medidores de nível de água da seção geológico-geotécnica E-E’ (Figura 4-13), nota-se uma tendência de acréscimo das leituras dos instrumentos até a fase de pré-obra.

Figura 5-9 - Pré-obra - Análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica E-E’ para as condições drenadas.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Após modelagem da rede de fluxo de percolação, foi acoplada análise de estabilidade para avaliação dos fatores de segurança para as condições drenadas. A Figura 5-10 e Figura 5-11 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 2.05 e local igual 1.96 para a condição drenada do cenário pré-obra.

Os resultados obtidos indicam que, apesar de haver um grande volume de deposição de rejeitos e a presença de uma região alagada à jusante, os fatores de segurança foram satisfatórios para a condição drenada.

De maneira similar a seção B-B', foram realizadas análises de estabilidade para as condições não drenadas pelo método do equilíbrio-limite com aplicação geral dos critérios de Mohr-coulomb e aplicação da razão de tensão vertical. Reitera-se que, a característica de comportamento não-drenado foi inclusa apenas para aqueles materiais que se encontram abaixo do lençol freático, sendo que os mesmos materiais que estão acima do lençol freático foram modelados considerando os mesmos critérios de Mohr-coulomb utilizados para a condição drenada. O lençol freático foi inserido segundo os medidores de nível de água INA-215, INA-221 e INA-216.

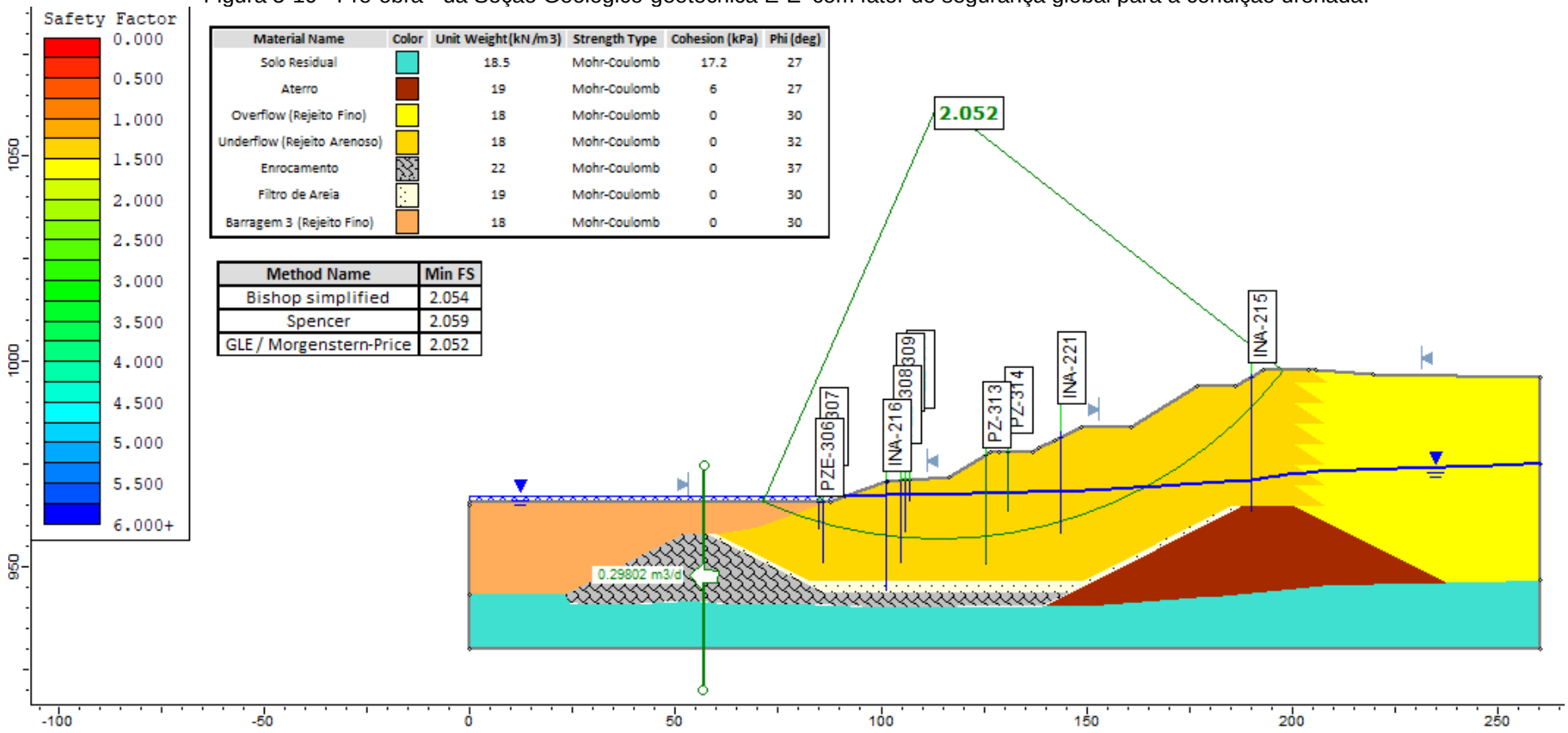
A Figura 5-12 e Figura 5-13 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 1.05 e local igual 1.95 para a condição não drenada do cenário pré-obra. Os resultados obtidos indicam que, o talude global não atende os critérios de segurança requeridos.

Assim, para a condição drenada, a seção E-E' apresenta fatores de segurança globais e locais satisfatórios. Por outro lado, para a condição não drenada, o fator de segurança global ficou abaixo do preconizado pela norma ABNT NBR 13.028/2017, que recomenda FS do talude de jusante de no mínimo 1,50 para condição de rede fluxo em operação normal. O mesmo não aconteceu com fator de segurança local, que foi avaliado nas bermas superiores do talude de jusante da estrutura e atendeu os requisitos de segurança.

Fator de segurança não drenado nessa ordem de grandeza, indica a necessidade de medidas corretivas emergenciais. Entretanto, conclusões similares podem ser feitas acerca dos FS, que aparentam estar subestimados em relação ao que foi visto durante as visitas de campo, uma vez que, não foram observados processos de instabilização, presença de erosões, trincas ou surgências no talude de jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos.

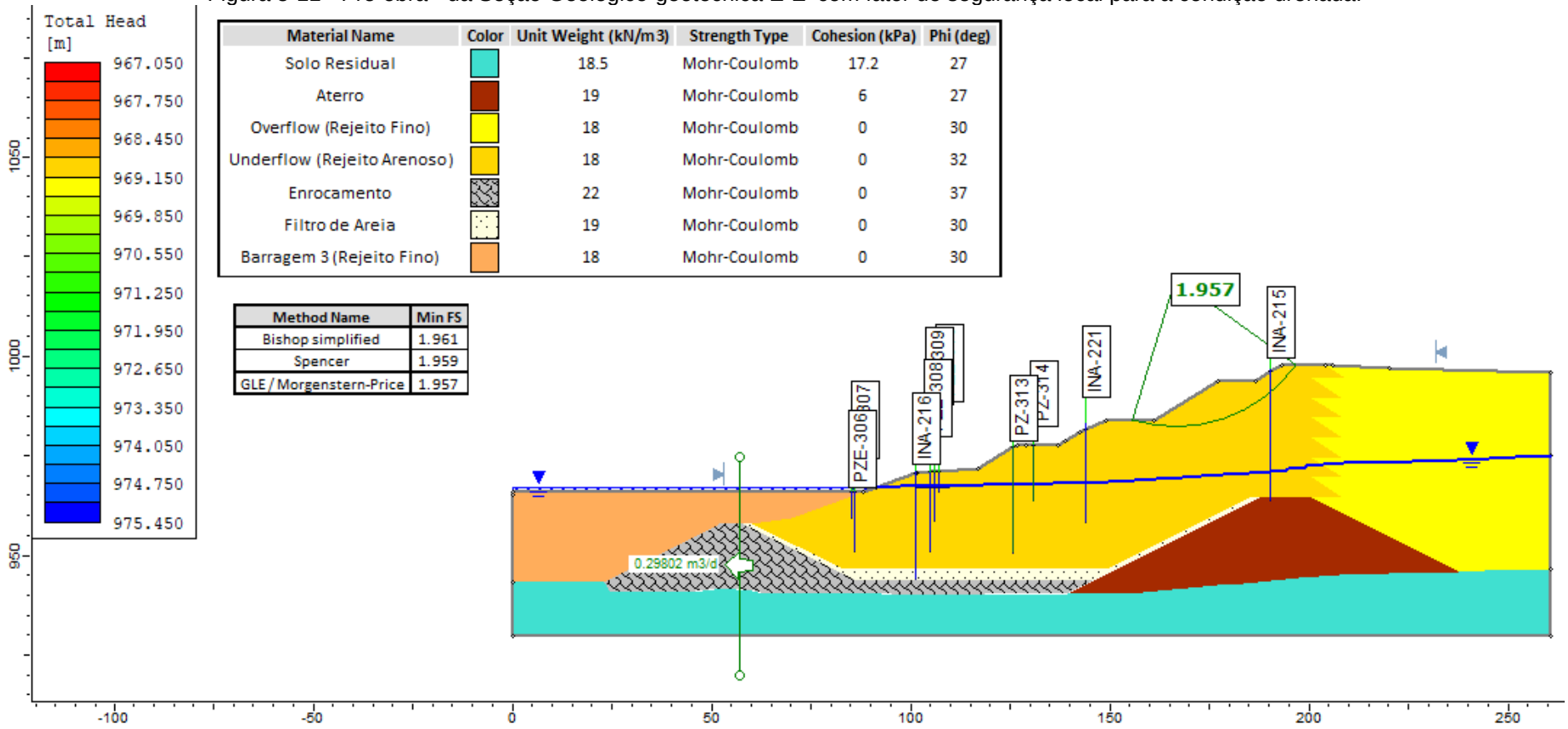
Tais observações confirmam que uma avaliação de estabilidade geotécnica com uma geometria complexa poderia alterar significativamente os resultados.

Figura 5-10 - Pré-obra - da Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança global para a condição drenada.



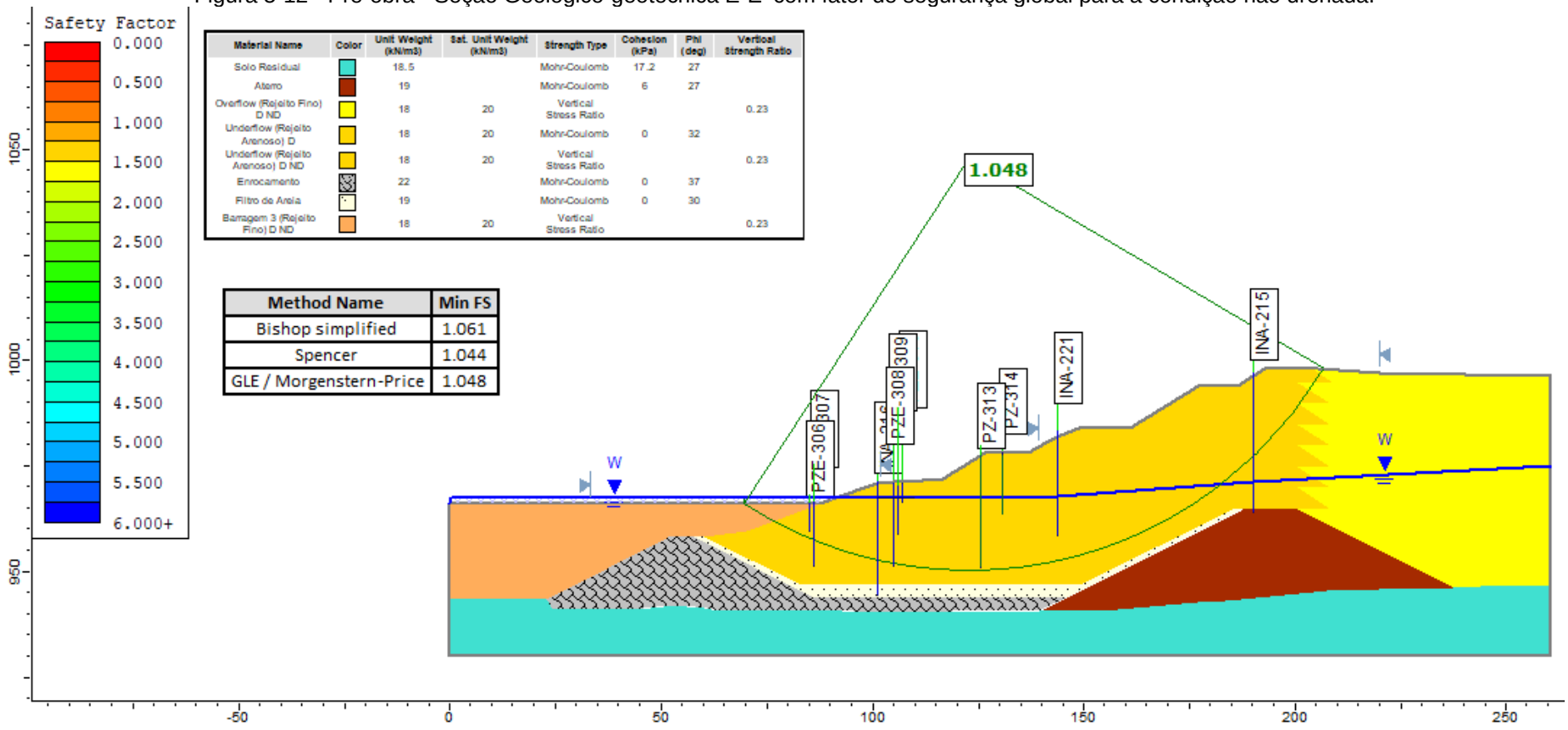
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-11 - Pré-obra - da Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança local para a condição drenada.



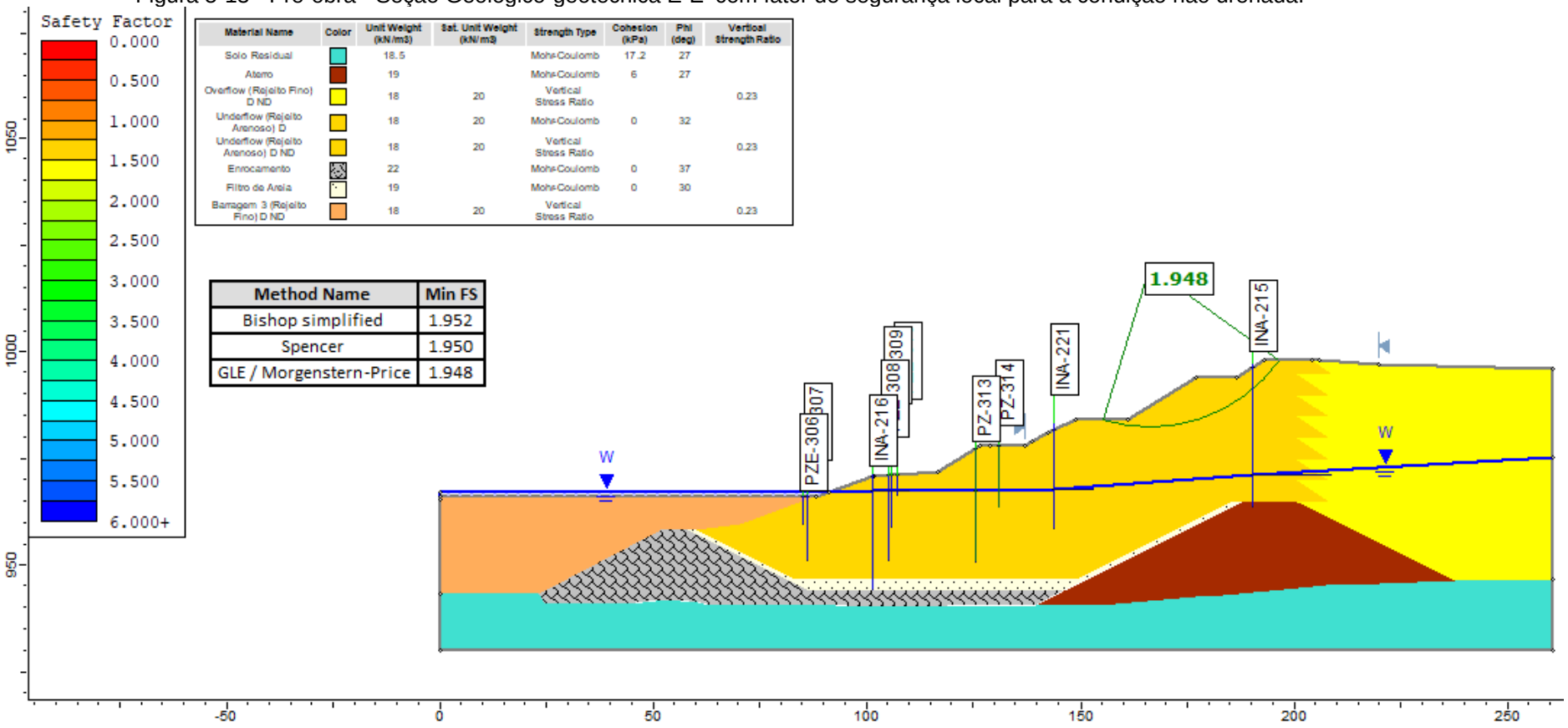
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-12 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica E-E’ com fator de segurança global para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-13 - Pré-obra - Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança local para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Um resumo dos fatores de segurança obtidos para a fase pré-obra de ambas as seções geológico-geotécnica B-B’ e E-E’, segue apresentado no Quadro 5-2.

Quadro 5-2 – Quadro-resumo dos Fatores de Segurança mínimos – Cenário Pré-obra.

Fase	Seção	Condição dos Materiais	Fator de Segurança	$FS_{mín.}$ Obtido*
Pré-obra	B-B’	Drenada	Global	1.96
			Local	1.70
		Não Drenada	Global	1.19
			Local	1.17
	E-E’	Drenada	Global	2.05
			Local	1.96
		Não Drenada	Global	1.05
			Local	1.95

*Os resultados apresentam fatores de segurança obtidos pelo método de busca de GLE, por ser um método que avalia tanto cunhas circulares como não-circulares.

Os resultados obtidos para as análises de estabilidade das seções geológico-geotécnica B-B’ e E-E’, indicaram que para a condição drenada de ambas as seções os fatores de segurança são satisfatórios. Entretanto, os resultados das análises de estabilidade para a condição não drenada foram insatisfatórios para ambas as seções, conforme citado pela ABNT NBR 13.028/2017, utilizada como referência para os estudos.

As análises de percolação, indicam a necessidade de rebaixamento de nível de água na região de jusante do maciço, assim como no reservatório da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. O objetivo é de proporcionar a redução de saturação do maciço como um todo.

Acrescenta-se que, a execução de reforço, constituído por enrocamento e transições de brita e areia, no pé do talude de jusante irão proporcionar melhoria na segurança geotécnica da estrutura que, consequentemente, aumentam os fatores de segurança globais e locais o maciço. Entretanto, conforme observado anteriormente nas Figura 3-6 e Figura 3-7, o talude de jusante já conta com uma proteção superficial que não foi modelada neste trabalho, que pode ter ocasionado fatores de segurança subestimados com relação ao que foi observado em campo.

O próximo tópico avalia novas condições de contorno, que consideraram rebaixamento do nível de água e execução de reforço nas seções geológico-geotécnicas B-B’ e E-E’. Foram incluídas as novas unidades geotécnicas magnetita e enrocamento, que são representativos do reforço executado.

5.3 Cenários pós-obra

Os cenários pós-obra das seções geológico-geotécnicas B-B e E-E’ nas condições drenada e não drenada, os respectivos fatores de segurança e os métodos de análise são apresentados no Quadro 5-3.

Quadro 5-3 - Cenários pós-obra modelados

Fase	Seção	Condição dos Materiais	Fator de Segurança	Métodos de Análise
Pós-obra	B-B’	Condição Drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
		Condição Não drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
	E-E’	Condição Drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
		Condição Não drenada	Global	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price
			Local	Bishop/ Spencer/ Morgenstern-Price

Autoria Própria.

5.3.1 Seção geológico-geotécnica B-B’

A Tabela 5-3 mostra as leituras dos instrumentos instalados na seção geológico-geotécnica B-B’, que foram consideradas como as condições de contorno do modelo. Com relação ao cenário pós-obra, foram obtidas leituras nulas nos instrumentos INA-223, PZE-303 e PZ-311, o que indica que não foi detectada a presença nível de água ou carga piezométrica nestes pontos. Esse fato observado está condizente com o esperado, já que foi realizado o rebaixamento do nível de água por meio dos poços tubulares.

Além disso, é importante ressaltar que os instrumentos PZE-305 e PZE-301 foram danificados durante a execução do reforço a jusante do maciço, o que impossibilitou a leitura das cargas piezométricas nestes pontos.

Neste contexto, foi possível avaliar as leituras do INA-206 e do INA-PP05, localizados, respectivamente, na terceira berma do talude de jusante e no poço de rebaixamento.

Adiante, verificou-se que, possivelmente, o piezômetro PZ-315 na El. 971,93 m – localizado no reservatório – apresentava leitura inconsistente, uma vez que, ao considerar tal informação, o INA-223, que apresentava leitura nula, seria acometido com o N.A interceptado no seu furo. Ressalta-se que, conforme mencionado no item 2.4, piezômetros e INAs possuem princípios de medição diferentes e podem apresentar atrasos de leitura. Dessa maneira,

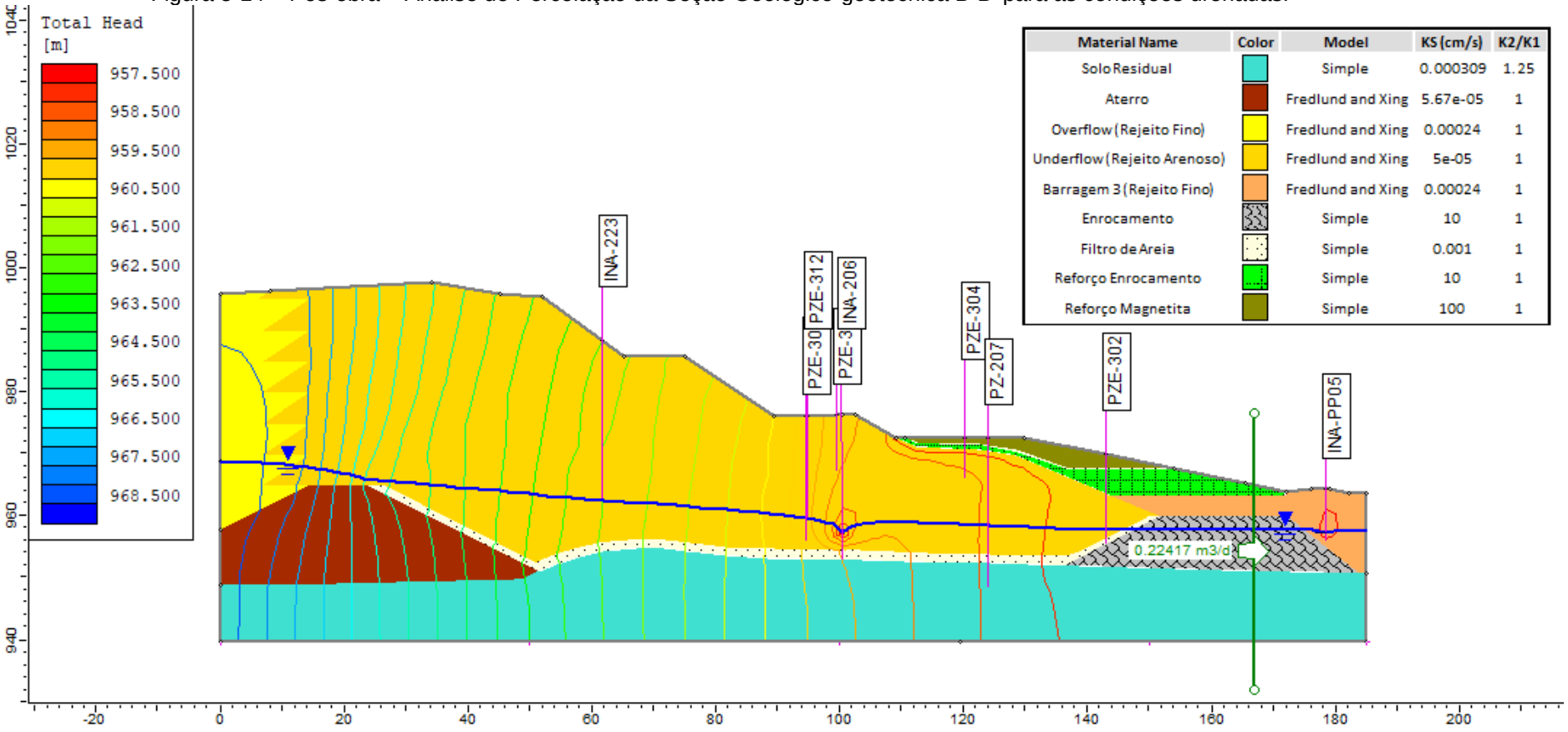
considerou-se a El. 968.83 m, mais coerente para o PZ-315, uma vez que, esta leitura não irá influenciar na leitura nula do INA-223.

A Figura 5-14 apresenta o resultado da análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica B-B', evidenciando as linhas equipotenciais obtidas para as condições drenadas dos cenários pós-obra. Observa-se que os fluxos de percolação são positivos e estão sendo corretamente direcionados para o tapete drenante.

Além disso, nota-se que a seção de descarga apresenta vazão de saída na ordem de 9,34 l/h, sendo esse dado, numericamente, menor do que aquele encontrado para a situação pré-obra da seção geológico-geotécnica B-B’. Em contrapartida, é importante mencionar que não será possível fazer uma comparação quali-quantitava direta destes valores, uma vez que, para o cenário pré-obra foi necessário considerar outras influências para se obter um resultado positivo da vazão de saída para o tapete drenante.

De uma forma geral, pode se observar que, o N.A encontra-se, substancialmente, abaixo do nível de terreno e, além disso, tem-se a formação de um cone de rebaixamento na região do PP-05, indicado por uma linha equipotencial no entorno do ponto do INA-PP05, sendo possível concluir que os poços implantados seguem a operação conforme planejado.

Figura 5-14 – Pós-obra – Análise de Percolação da Seção Geológico-geotécnica B-B' para as condições drenadas.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

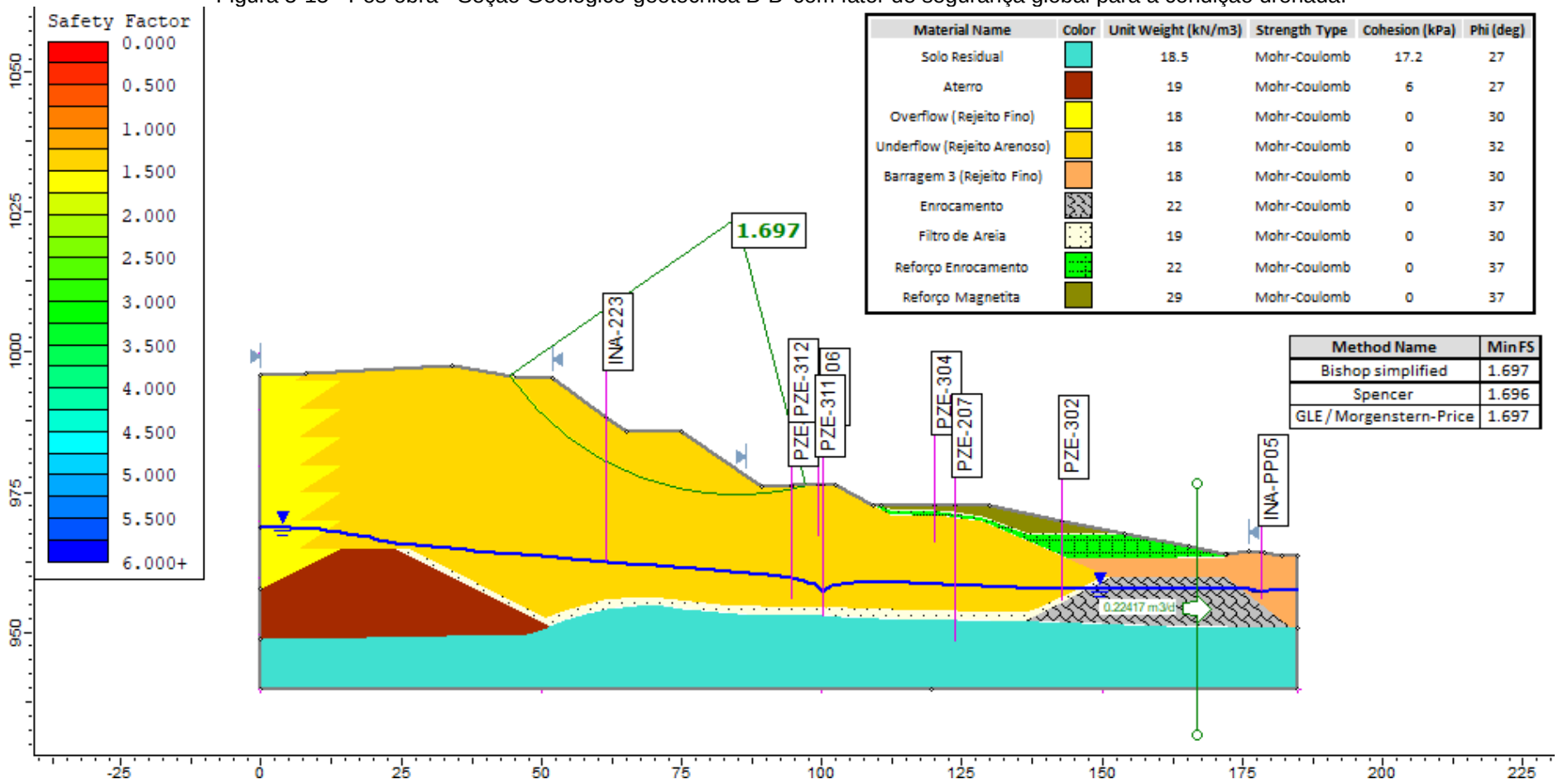
Após modelagem da rede de fluxo de percolação, foi acoplada análise de estabilidade para avaliação dos fatores de segurança para as condições drenadas. A Figura 5-15 e Figura 5-16 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 1.70 e local igual 1.70 para a condição drenada do cenário pós-obra.

Os resultados obtidos indicam nível de água abaixo do nível do terreno na região de jusante, na altura do dique de partida. Os fatores de segurança foram satisfatórios para a condição drenada. Os fluxos internos aparentam estar equilibrados, com nível de saturação insignificante no pé do talude de jusante da barragem.

Adiante, a Figura 5-17 e Figura 5-18 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 1.70 e local igual 1.70 para a condição não drenada do cenário pós-obra. Os resultados indicam que a execução do rebaixamento do nível de água seguido da execução do reforço no talude de jusante proporcionou resultados satisfatórios e que os projetos seguiram conforme planejado.

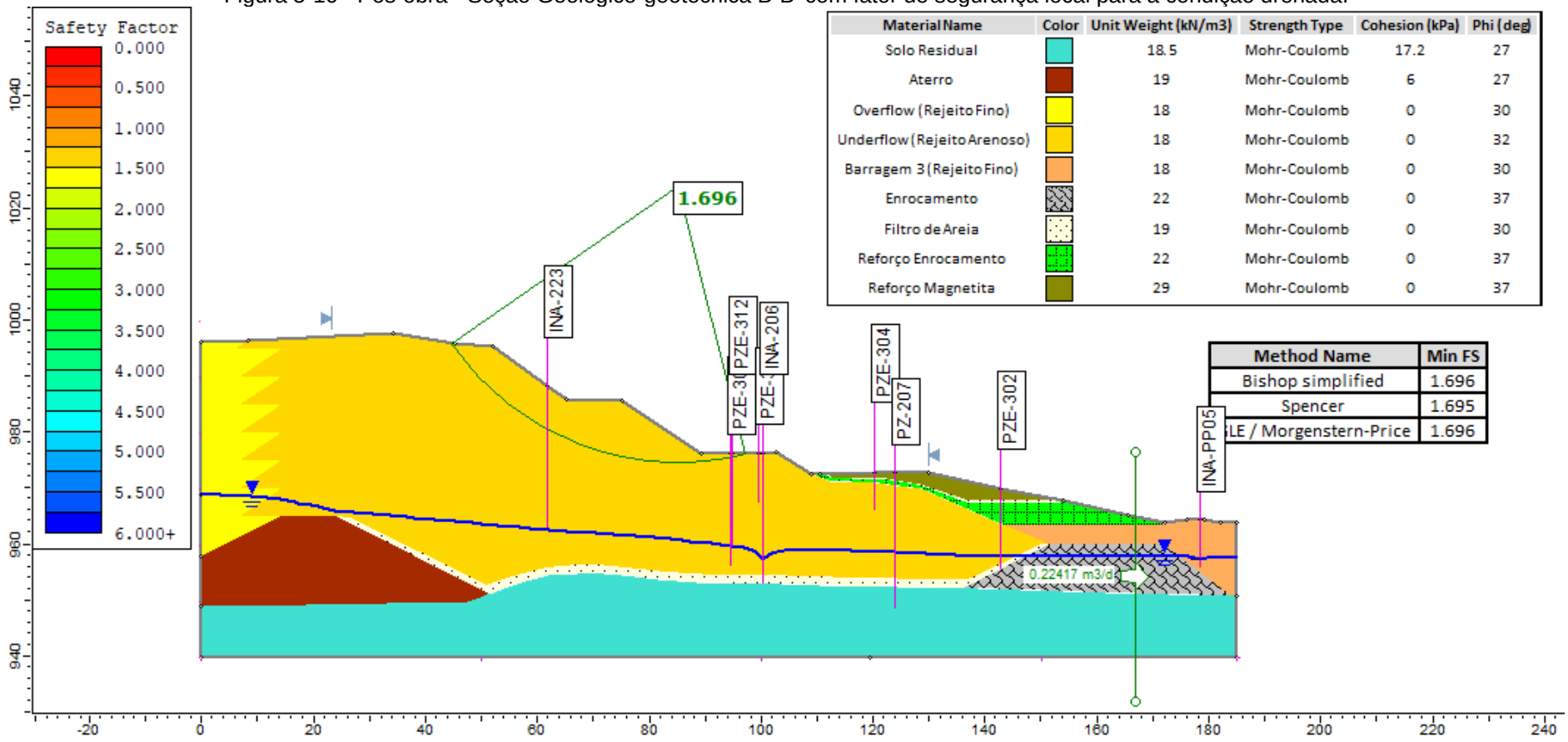
Dessa maneira, a seção B-B’ apresentou fatores de segurança globais e locais satisfatórios tanto para a condição drenada, como para a condição não drenada, conforme recomendado pela norma ABNT NBR 13.028/2017, que recomenda FS do talude de jusante de no mínimo 1,50 para condição de rede fluxo em operação normal.

Figura 5-15 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição drenada.



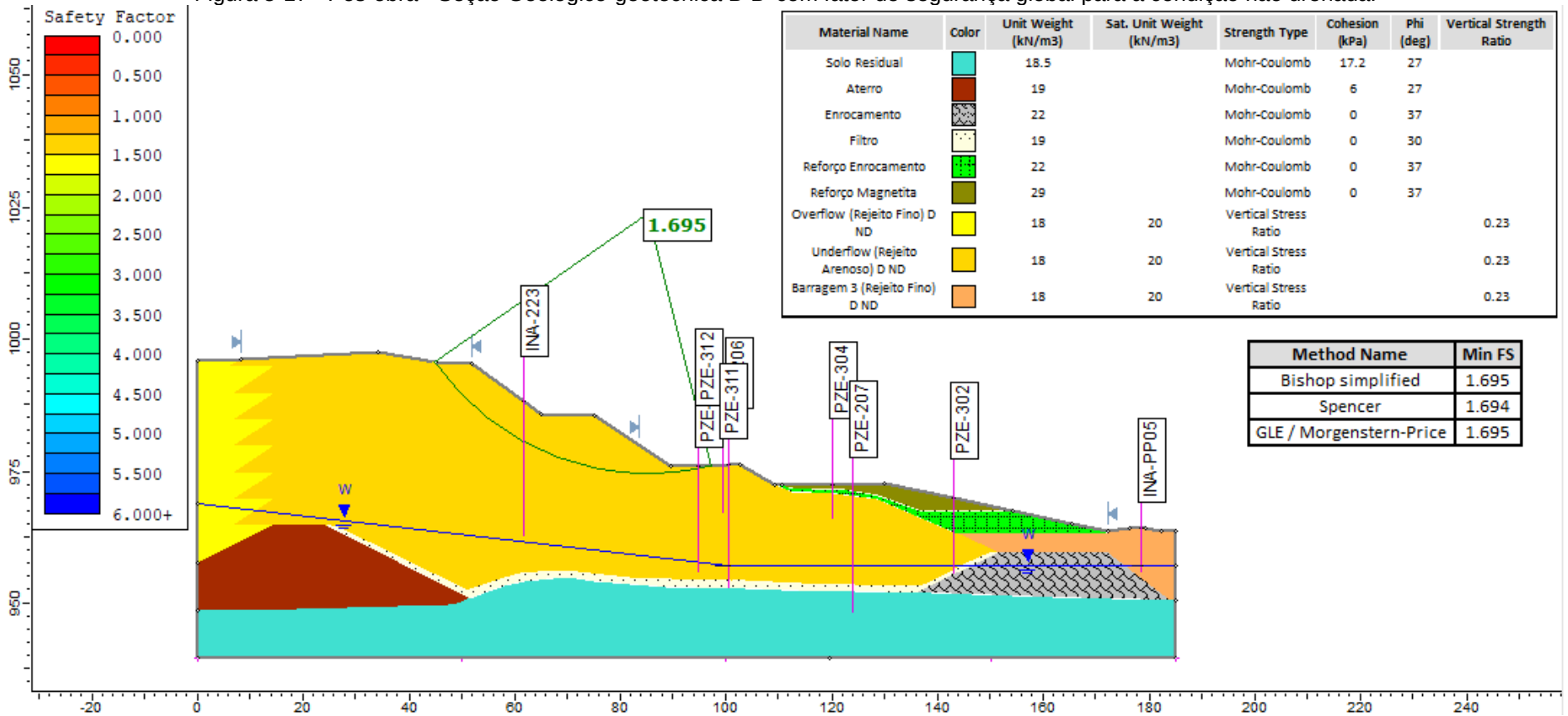
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-16 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição drenada.



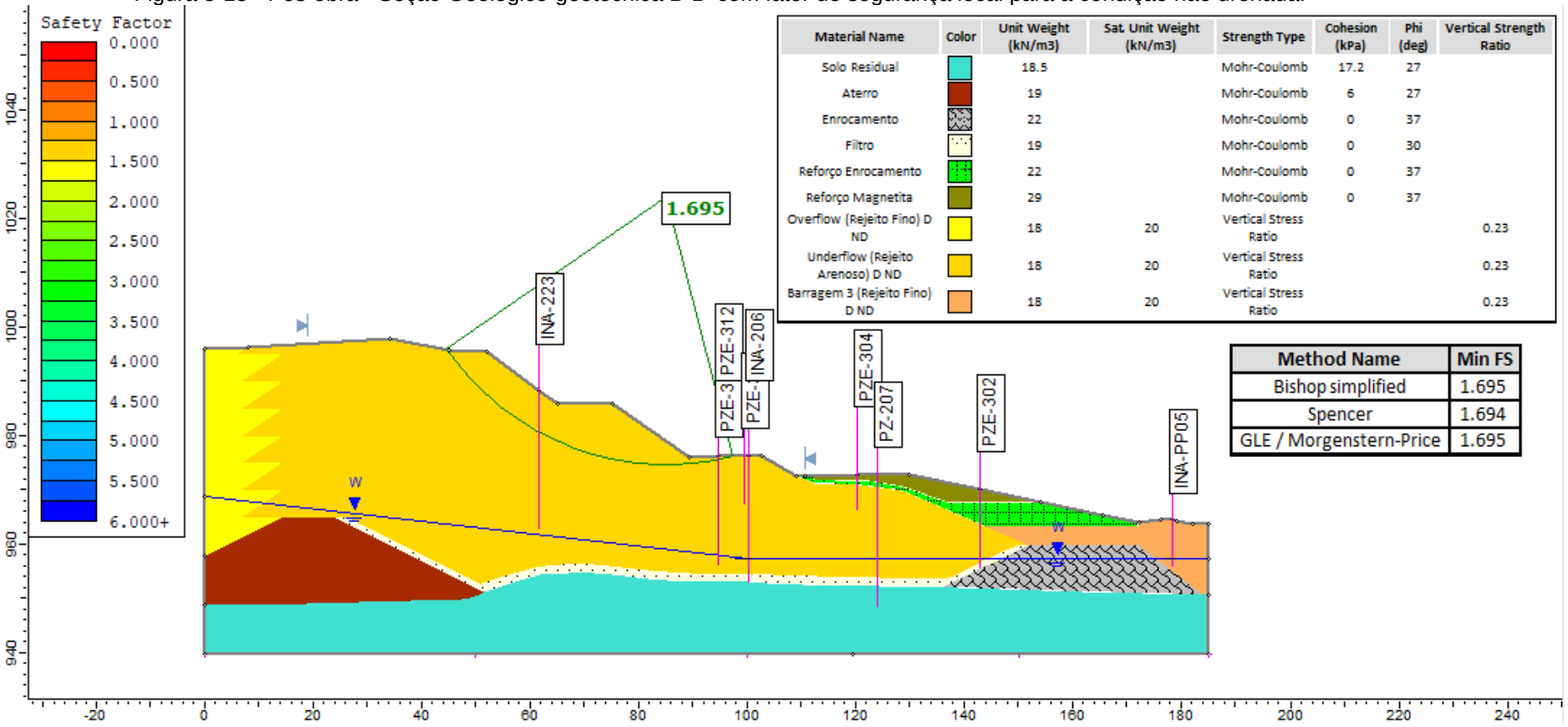
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-17 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança global para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-18 - Pós-obra - Seção Geológico-geotécnica B-B' com fator de segurança local para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

5.3.2 Seção geológico-geotécnica E-E’

A Tabela 5-4 mostra as leituras dos instrumentos instalados na seção geológico-geotécnica E-E’, que foram consideradas como as condições de contorno do modelo. Com relação ao cenário pós-obra, foram obtidas leituras nulas no instrumento PZE-310. Esse fato observado está condizente com o esperado, já que foi realizado o rebaixamento do nível de água por meio dos poços tubulares.

Além disso, é importante ressaltar que os instrumentos PZE-309, PZE-308, INA-216 e PZE-306 foram danificados durante a execução do reforço a jusante do maciço, o que impossibilitou a leitura de nível de água ou cargas piezométricas nestes pontos.

Neste contexto, foi possível avaliar as leituras do INA-215, INA-221, PZE-307 e INA-PP02, que se encontram localizados de forma distribuída ao longo de todo talude de jusante e no poço de rebaixamento.

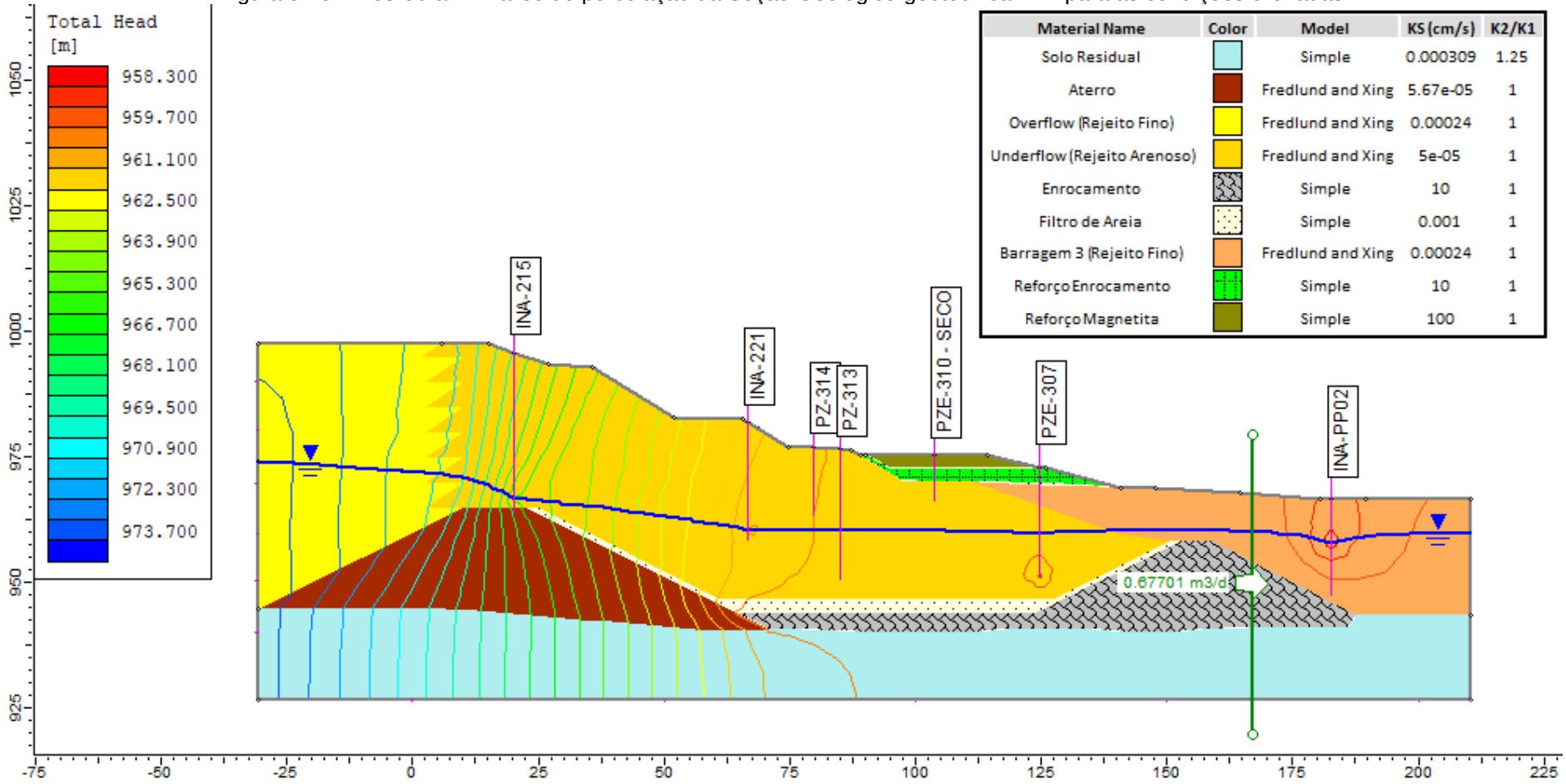
A Figura 5-19 apresenta o resultado da análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica E-E', evidenciando as linhas equipotenciais obtidas para as condições drenadas dos cenários pós-obra. Observa-se que os fluxos de percolação estão sendo corretamente direcionados para o tapete drenante e a seção de descarga apresenta valores coerentes na ordem de 28,21 l/h, sendo esse dado, numericamente, maior do que aquele encontrado para a situação pré-obra da seção geológico-geotécnica E-E’.

O piezômetro PZ-317 na El. 974,16 m – localizado no reservatório – pode apresentar leitura inconsistente, pois ao considerar esse dado, a queda de potencial hidráulico no interior do maciço torna-se elevada até o INA-215, onde evidencia-se linhas pouco espaçadas e uma queda de nível de água significativamente inclinada, conforme observa-se na Figura 5-20.

É importante ressaltar que como dito anteriormente, piezômetros e INAs possuem princípios de medição diferentes e podem apresentar atrasos de leitura. Entretanto, o fato observado pode ser correlacionado com a operação do poço de bombeamento PP-02, localizado no pé do talude de jusante. Dessa maneira, poderá ser necessária a confirmação desta leitura por meio da instalação de outro instrumento nas proximidades.

Outro fato evidente é o nível de água do INA-PP02, localizado no interior do poço PP-02, que apresentou linhas equipotenciais no entorno do ponto, formando um cone de rebaixamento na região. Essa observação está coerente com o efeito esperado após a implantação dos poços de rebaixamento, evidenciando que a operação está seguindo conforme planejado.

Figura 5-19 – Pós-obra – Análise de percolação da Seção Geológico-geotécnica E-E' para as condições drenadas.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

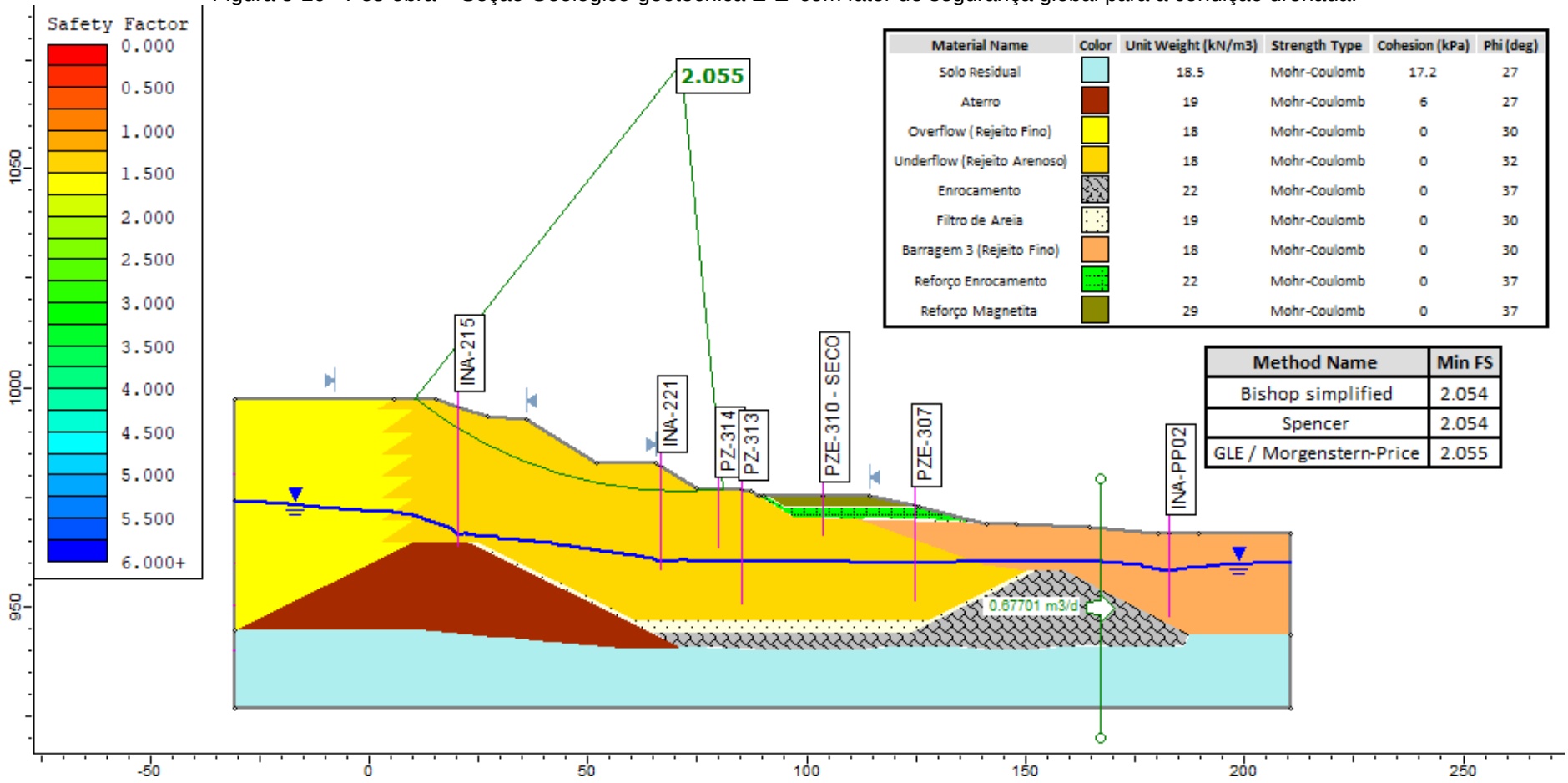
Após modelagem da rede de fluxo de percolação, foi acoplada análise de estabilidade para avaliação dos fatores de segurança para as condições drenadas. A Figura 5-20 e Figura 5-21 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 2.06 e local igual 1.95 para a condição drenada do cenário pós-obra.

Os resultados obtidos indicam nível de água abaixo do nível do terreno na região de jusante. Os fatores de segurança foram satisfatórios para a condição drenada. Os fluxos internos aparentam estar equilibrados, com nível de saturação insignificante no pé do talude de jusante da barragem.

Adiante, a Figura 5-22 e Figura 5-23 exibem os, respectivos, fatores de segurança global igual a 1.70 e local igual 1.95 para a condição não drenada do cenário pós-obra. Os resultados indicam que a execução do rebaixamento do nível de água seguido da execução do reforço no talude de jusante apresenta resultados satisfatórios e que os projetos seguiram conforme planejado.

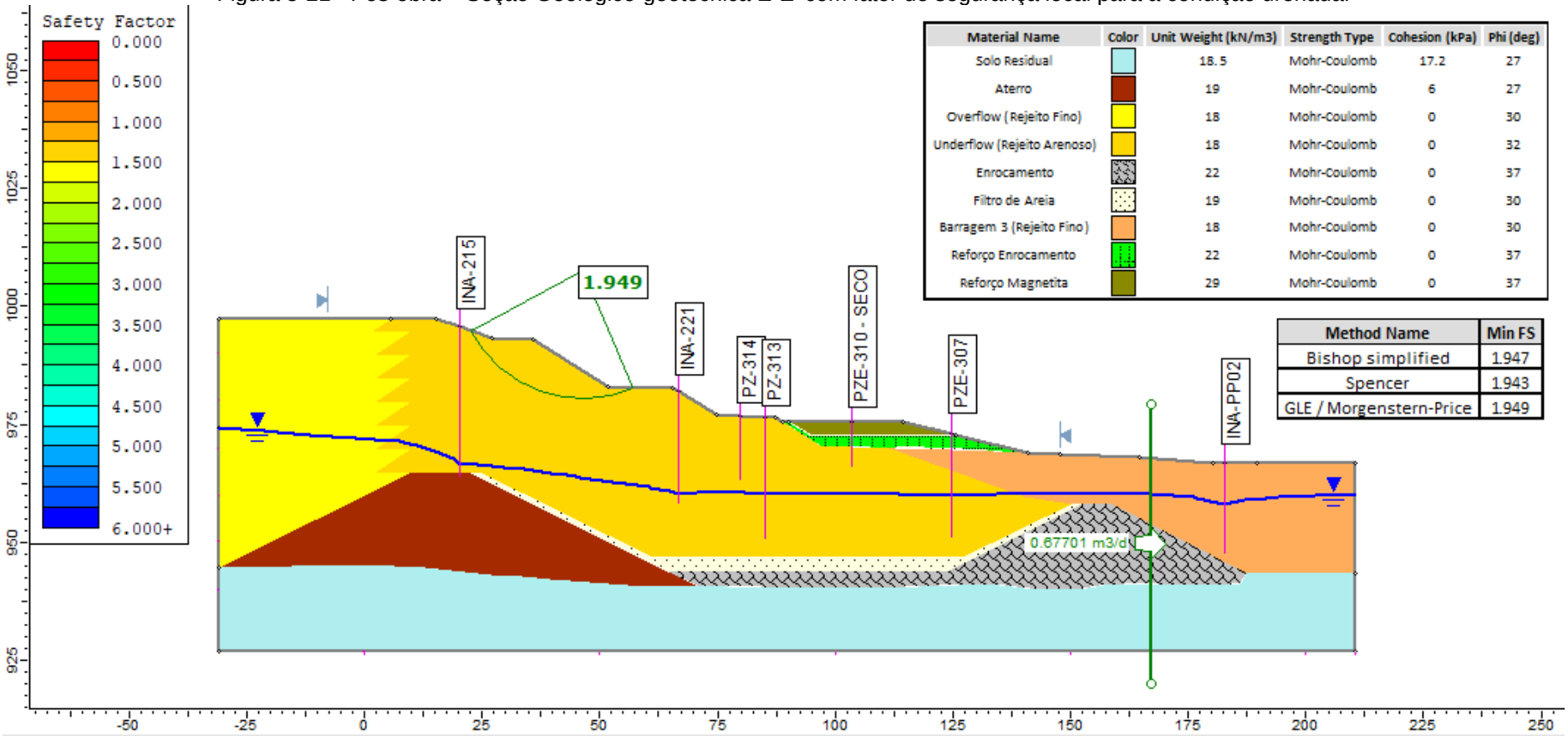
Dessa maneira, a seção E-E’ apresentou fatores de segurança globais e locais satisfatórios tanto para a condição drenada, como para a condição não drenada, conforme recomendado pela norma ABNT NBR 13.028/2017, que recomenda FS do talude de jusante de no mínimo 1,50 para condição de rede fluxo em operação normal.

Figura 5-20 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança global para a condição drenada.



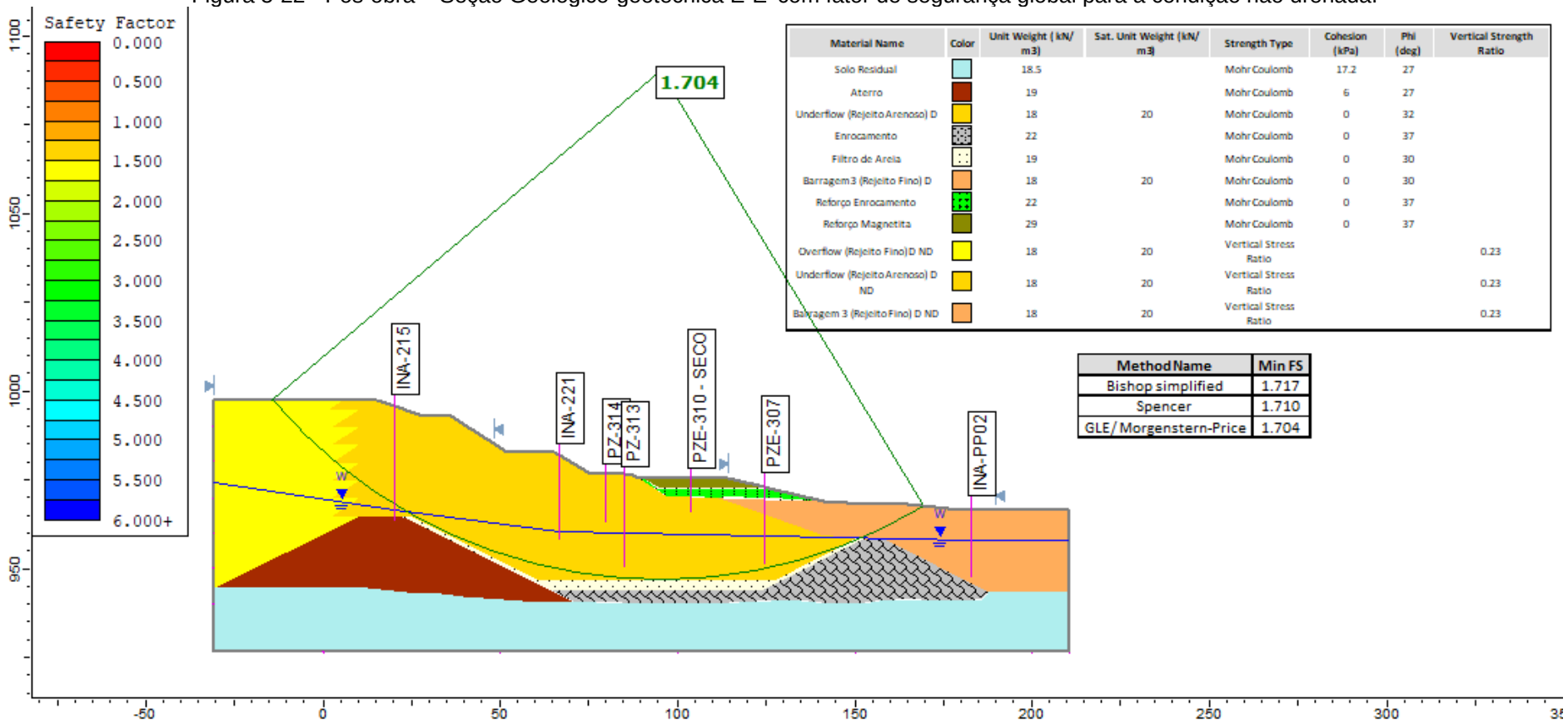
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-21 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança local para a condição drenada.



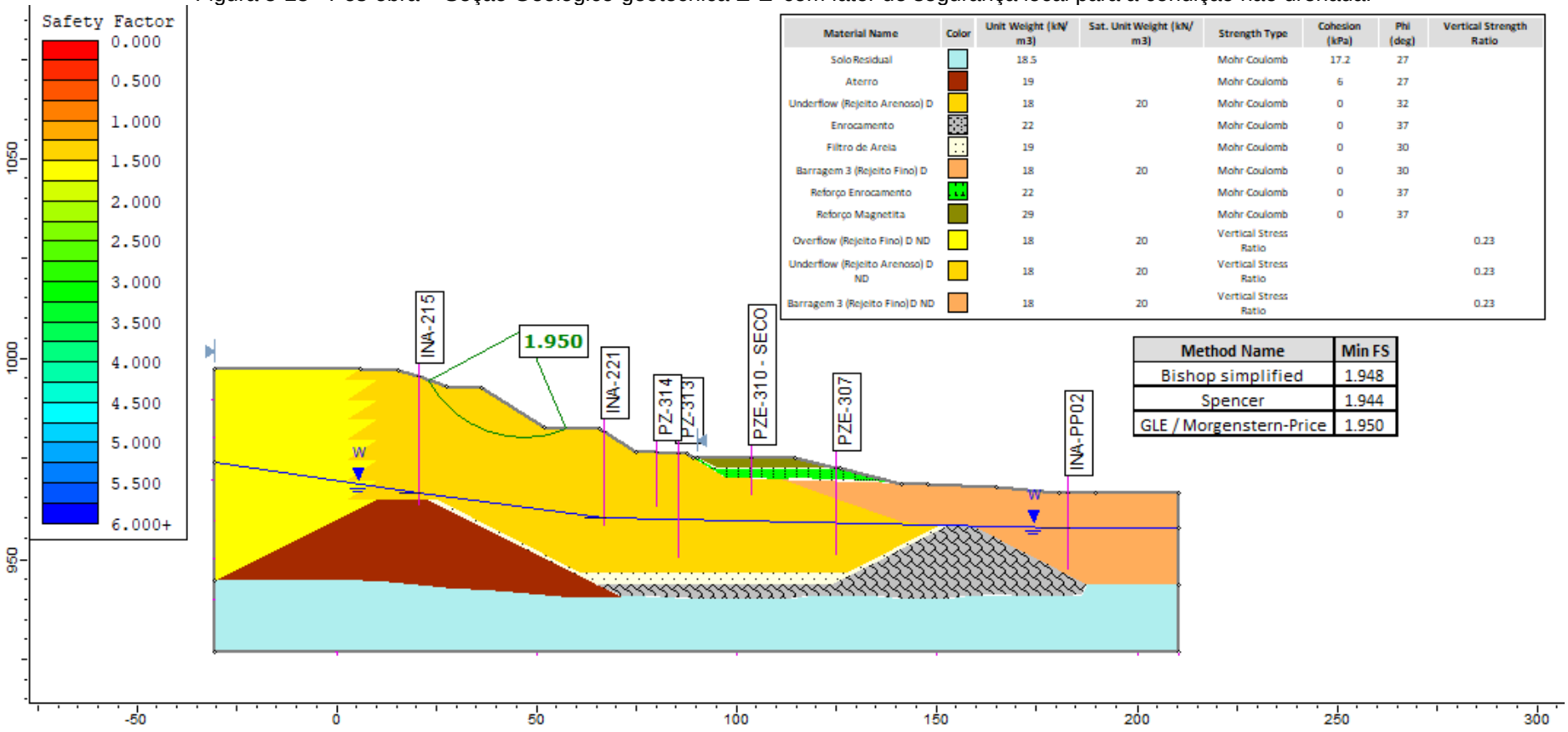
Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-22 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança global para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Figura 5-23 - Pós-obra – Seção Geológico-geotécnica E-E' com fator de segurança local para a condição não drenada.



Fonte: Autoria Própria – SLIDE (2021).

Um quadro-resumo dos fatores de segurança obtidos na análise de estabilidade para a fase de pós-obra das seções geológico-geotécnicas B-B’ e E-E’ é apresentado no Quadro 5-4.

Quadro 5-4 – Fatores de Segurança mínimos obtidos cenário pós-obra

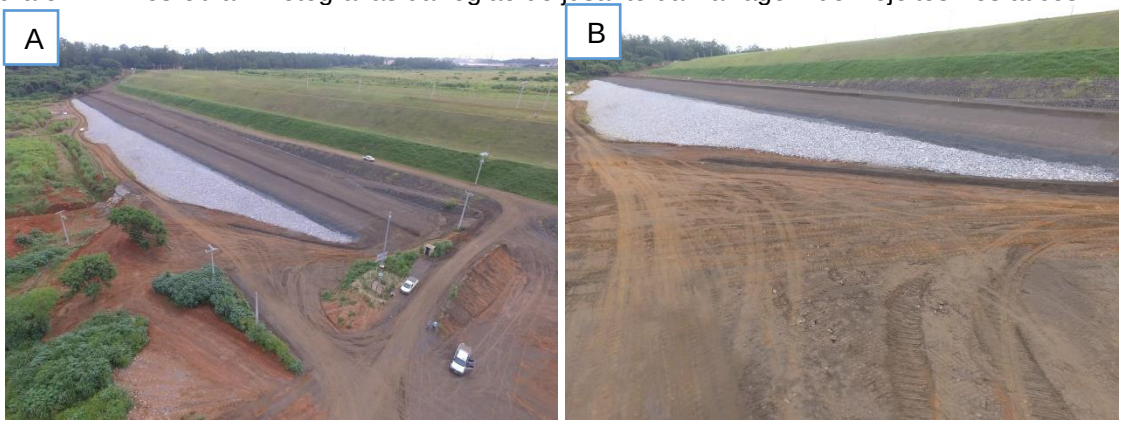
Fase	Seção	Condição dos Materiais	Fator de Segurança	$FS_{mín.}$ Obtido* Pré-obra	$FS_{mín.}$ Obtido* Pós-obra	Diferença Percentual (%)
Pós-obra	B-B’	Drenada	Global	1.96	1.70	-0,15%
			Local	1.70	1.70	0,00%
		Não Drenada	Global	1.19	1.70	0,30%
			Local	1.17	1.70	0,31%
	E-E’	Drenada	Global	2.05	2.06	0,00%
			Local	1.96	1.95	-0,01%
		Não Drenada	Global	1.05	1.70	0,38%
			Local	1.95	1.95	0,00%

*Os resultados apresentam fatores de segurança obtidos pelo método de busca de GLE, por ser um método que avalia tanto cunhas circulares como não-circulares.

A partir do quadro-resumo (Quadro 5-4), nota-se um ganho percentual nos fatores de segurança, para as situações que, inicialmente, apresentavam segurança insatisfatória. Dessa forma, para o segundo cenário pós-obra, ambas as seções geológico-geotécnicas, ficaram acima do preconizado pela norma a ABNT NBR 13.028/2017, que recomenda FS a jusante de no mínimo 1,50, para condição de rede fluxo em operação normal.

Ressalta-se as diferenças quali-quantitativas para as vazões de saída do tapete drenante da seção B-B’, quando foram comparados os cenários pré-obra e pós-obra, provavelmente se referem as interferências da deposição de rejeitos mapeadas no cenário pré-obra. Já que foi identificado nível freático abaixo dos níveis do terreno e a formação de cones de rebaixamento no interior dos poços. Esses fatos corroboram com o que foi observados durante as visitas de campo (Figura 5-24-A e Figura 5-24-B).

Figura 5-24 – Pós-obra – Fotografias da região de jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos.



Fonte: Fosfato Mineração (2020).

Os resultados indicam que a execução do rebaixamento do nível de água seguido da execução do reforço no talude de jusante apresenta resultados satisfatórios e que os projetos seguiram conforme planejado.

6.0 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A revisão bibliográfica da obra auxiliou no reconhecimento geral dos fatores que afetam o comportamento geotécnico de barragens de rejeitos, bem como das características peculiares de rejeitos finos e arenosos, que podem influenciar na interpretação de diferentes condições de contorno utilizadas para modelagem numérica destas estruturas.

A descrição do contexto da Barragem de Rejeitos Fosfáticos, permitiu compreender de maneira satisfatória, as características peculiares relativas aos processos de deposição. As visitas de campo foram imprescindíveis para compreender os resultados do modelo numérico e entender se os resultados apresentados eram condizentes com a realidade.

A modelagem numérica foi realizada com auxílio do *software* SLIDE 2D versão 9.0 desenvolvido pela empresa Rocscience®, que permitiu avaliar a estabilidade da barragem e obter o fator de segurança em diversos cenários em situações pré-obra e pós-obra.

Foi utilizado o método dos elementos finitos - MEF para análise de percolação dos materiais na condição drenada, acoplado a uma análise de estabilidade. Adiante, para materiais de rejeito, foi adicionada, ainda, a análise do comportamento não-drenado, por meio do método equilíbrio limite com a utilização do parâmetro de resistência de pico (Su/σv0'). Essa avaliação permitiu conhecer a influência na estabilidade geotécnica de uma barragem, quando na presença de materiais moles de rejeito.

Observou-se que o comportamento das águas subterrâneas, sofreu alteração significativa entre os cenários pré-obra e pós-obra para a região estudada. A presença de deposição de lama de rejeito apresentou divergências nas redes de fluxo geradas, evidenciando vazões de saída negativas, que precisaram ser corrigidas. Após a instalação dos poços tubulares, os fluxos subterrâneos foram alterados novamente, onde foram identificadas a presença de cones de rebaixamento de lençol freático na região à jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos.

Nesse contexto, é importante mencionar que, os instrumentos do tipo INA e PZ e/ou PZE localizados na seção geológico-geotécnica B-B' do cenário pré-obra, apresentaram certa dificuldade para calibração do modelo de análise de percolação. Para contornar o problema foi considerada uma infiltração lateral, para representar a contribuição proveniente de deposição de rejeitos, que estava sendo realizada no local, durante o período avaliado. Essa

foi a melhor solução adotada para uma análise 2D. Entretanto, seria interessante considerar a realização de modelagem hidrogeológica 3D, poderia responder melhor a esse cenário.

Evidenciou-se que a forma e deposição de rejeitos influenciam no comportamento do nível de água e, também, nas cargas piezométricas do interior do reservatório. Entretanto tais observações não resultaram em grandes alterações com relação a presença ou não de anisotropia dos materiais de rejeito, como era esperado. Sendo assim, um modelo mais genérico que considerou, exclusivamente, materiais isotrópicos, atendeu as expectativas da

Durante a avaliação das condições de contorno do modelo, foram realizadas simplificações geométricas nas seções principais da barragem. Tais simplificações são relativas às proteções no pé do talude de jusante dos barramentos 1 e 2, que compreendem de materiais de areia e enrocamento.

Como principais resultados, as seções geológico-geotécnicas B-B’ e E-E' apresentaram, na fase de pré-obra, fatores de segurança locais mínimos de 1.96 e 1.71 para a condição drenada e fatores de segurança globais mínimos de 1.04 e 1.15 para a condição não drenada, respectivamente.

Já na fase de pós-obra, os mesmos trechos apresentaram, coeficientes de segurança global e local mínimos iguais a 1.91 e 1.94 para a condição drenada e coeficientes de segurança global e local mínimos iguais a 1.70 e 1.71 para a condição não drenada, respectivamente.

Propõe-se que os fatores de segurança das condições não drenadas do cenário pré-obra, foram subestimados, tendo em vista que durante as visitas de campo não foram observados processos de instabilização, presença de erosões, trincas ou surgências no talude de jusante da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. Acredita-se que esse fato observado, pode ser resultado das simplificações geométricas realizadas nos pés de talude de jusante.

Para sanar essa dúvida, seria necessária a interpretação dos dados brutos dos parâmetros de resistência de todas as unidades presentes, que incluem brita 0 e brita 3 que não foram incluídas no modelo numérico. Ressalta-se que as características de resistência para materiais de enrocamento e areia foram obtidas com base na literatura discutida nesse trabalho e, portanto, não havia no banco de dados, dados relativos a ensaios de laboratório e de caracterização realizados para estes materiais ou para materiais de brita 0 e brita 3. Fato este, que justificou a simplificação geométrica, de forma a evitar a inclusão de parâmetros que não fossem representativos.

No contexto dessa obra, tem-se que a condição não drenada da fase pré-obra das seções B-B’ e E-E', não atenderam a norma ABNT NBR 13.028/2017, que recomenda FS do talude de jusante de no mínimo 1,50 para condição de rede fluxo em operação normal.

Para elevar a segurança geotécnica da estrutura, foram executadas obras de estabilização de rebaixamento de nível de água e reforço do talude de jusante no maciço da Barragem de Rejeitos Fosfáticos. Após a avaliação de fatores de segurança de diversos cenários do período pós-obra, pode-se concluir que estas obras executadas apresentam resultado satisfatório, uma vez que, conseguiram elevar o fator de segurança das seções estudadas, além de diminuir o nível de água presente na região a jusante do maciço.

Por fim, ressalta-se que, esse trabalho possui caráter meramente acadêmico e não pode ser adotado como referência para elaboração de projetos e análises técnicas posteriores da estrutura analisada.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Relatório Quantitativo, 2022**. SIGBM - Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração. Disponível em: https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica. Acesso em: 15 fevereiro. 2022.

ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

ALBUQUERQUE, R.; BRAGA, M. A. S.; OLIVEIRA, L. A.; DIAS, L. S. O.; ALMEIDA, L. A. P.; OLIVEIRA, A. H.; BRANDÃO, S. Caracterização de Barragens de Rejeito Usando Geofísica Rasa: Aplicação na Barragem B1 de Cajati, São Paulo. **Anuário do Instituto de Geociências**, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. v.42, n.1, p.567-579, 2019.

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**. v.17, p.1–29, 1981.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport**. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier & Book Aid, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6.458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6.484:** Solo – sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12.244**: Poço tubular - Construção de poço tubular para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.028**: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13.292:** Solo –

Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14.545**: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15.495** – Poço de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares – Parte 1: Projeto e Construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.840** – Solo — Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16.843** – Solo — Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ARAÚJO, Cecília Bhering de. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

ÁVILA, J. P.; SAWAYA, M. **As barragens de rejeitos no Brasil:** Sua evolução nos últimos anos (p. 369-373). In DE MELLO, F. M.; PIASENTIN, C. Histórias das barragens do Brasil: Séc. XIX, Séc XX e Séc. XXI. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

AZEVEDO, A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Ensaios de Permeabilidade em Solos:** Orientações para sua Execução no Campo. São Paulo: ABGE, 2013.

BARNETT, B.; TOWNLEY, L. R.; POST, V.; EVANS, R. E.; HUNT, R. J.; PEETERS, L.; RICHARDSON, S.; WERNER, A. D.; KNAPTON, A.; BORONKAY, A. **Australian groundwater modelling guidelines.** Australia: National Water Commission, 2012. ISBN: 978-1-921853-91-3.

BITTAR, Rafael Jabur. **Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises de estabilidade da barragem de rejeitos B5 da Bunge Fertilizantes S/A**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

BISHOP, S. W.; HENKEL, D. J. **The measurement of soil properties in the triaxial test**. 2.ed, London: Edward Arnold, 1962.

BENSON, C. H.; YESILLER, N. Variability of Saturated Hydraulic Conductivity Measurements Made Using a Flexible-Wall Permeameter. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM International, Conshohocken, v. 39, n. 3, p. 476–491, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/298429385_Variability_of_Saturated_Hydraulic_Conductivity_Measurements_Made_Using_a_Flexible-Wall_Permeameter. Acesso em: 28 maio. 2022.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, [2016]. Disponível em: https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88_Livro_EC91_2016.pdf. Acesso em: 7 abril. 2022.

BRASIL. **Lei n° 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Diário Oficial da União. Seção 1, Brasília, DF, ed. 189, p. 3, 1 de outubro. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração. **Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022.** Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Diário Oficial da União. Seção 1, Brasília, DF, ed. 33, p. 49, 16 fevereiro. 2022.

CASTRO, Leandro Vida Pinheiro de. **Avaliação do Comportamento do Nível d'água em Barragem de Contenção de Rejeito Alteada a Montante**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-30092008-153409/publico/Dissertacao_Re visada_2008.pdf. Acesso em: 4 junho. 2020.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – Uma revisão. **HOLOS**, ano 32, v. 8, p. 9, 2016. DOI: 10.15628/holos.2016.5367.

CAVALCANTE, A. L. B.; RIBEIRO, L. F. M.; ASSIS, A. P. Experimental and Physical Modeling of Bed Load Heterogeneous Sediment Transport. **International Journal of Geomechanics**, ASCE, Reston, v.13, n. 5, p. 545-556, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000246.

CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: ABMS, 2015. ISBN 9788567950037.

CLARK, C. L.; WINTER, C. L.; CORLEY, T. Effects of percolation on the effective conductivity of irregular composite porous media. **Advances in Water Resources**, Elsevier, p. 10, v. 137, 103507, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103507.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS – CODEMIG (BELO HORIZONTE). **Projeto Fronteiras de Minas Gerais, 2015**. Programa Mapeamento Geológico do Estado de Minas Gerais, Contrato CODEMIG 3473, FUNDEP 19967, Folha Araxá SE-23-Y-C-VI., Escala 1:100.000, 2015.

COSTA FILH, O. W. D. C.; GALVÃO, M. J. T. G.; LIMA, J. B.; LEAL, O. **Noções Básicas Sobre Poços Tubulares:** Cartilha Informativa. Serviço Geológico do Brasil, 1998.

DAS, B.; SOBHAN, K. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução da 8 edição norte-americana, São Paulo: CENGAGE Learning, 2014.

DANIEL, D. E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**. Austin: Springer Science, 1993. DOI 10.1007/978-1-4615-3070-1.

DARCY, H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856. Disponível em: https://pt.scribd.com/doc/111310800/Darcy-1856-Les-Fontaines-Publiques-de-La-Ville-de-DiJon. Acesso em: 28 maio. 2022.

DEBAO, L.; HUANG, D.; XU, G. Estimation of hydraulic conductivity by using pumping test data and electrical resistivity data in faults zone. **Ecological Indicators, Science Direct**. v. 129, 107861, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107861.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.** Massachusetts, 1982. Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_89.pdf. Acesso em: 28 setembro. 2020.

ENEMARK, T.; PEETERS, L. J. M.; MALLANTS, D.; BATELAAN, O. Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. **Journal of Hydrology**, v. 569, p. 310–329, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.007.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G.; FOSTER, M. **Geotechnical Engineering of Dams**. London: Taylor & Francis Group, 2. ed, 2014. ISBN: 9781138000087.

FEITOSA, F. A. C.; JOÃO FILHO, M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia Conceitos Básicos e Aplicações**. 3ª edição revisada e ampliada. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, p.835, 2008.

FONSECA, A. V.; FONSECA, A.; OLIVEIRA, S. Fatores de Segurança Determinísticos em Avaliação de Estabilidade de Barragens De Rejeitos: Uma Reflexão. **Geotecnia**, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, n.151, p. 53-76, 2021. DOI: 10.24849/j.geot.2021.151.04.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice Hall. 1979. Disponível em: https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20book%20-%20English.pdf. Acesso em: 28 setembro. 2020.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Can. Geotech. J.**, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, v.31, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. New Jersey: john Wiley & Sons, Inc. 2012.

FREIRE NETO, João Pimenta. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

FREITAS, Renata Delicio Andrade de. **Simulação numérica tridimensional do comportamento geotécnico de uma barragem de contenção de rejeitos por meio de ensaios de campo e microssísmica**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

GEDEON, M.; MALLANTS, D.; ROGIERS, B. **Building a staircase of confidence in groundwater modeling: a summary of ten years data collection and model development**. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/248706152_Building_a_stairc

ase_of_confidence_in_groundwater_modeling_a_summary_of_ten_years_data_collection_and_model_development. Acesso em: 28 maio. 2022.

GERSCOVICH, M. S. D. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

GIAMPÁ, C. E. Q.; GONÇALVES, V. G. **Águas subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo: Oficina de Textos, ed. 2, 2013. ISBN: 978-85-7975-086-1.

HUBBERT, M. K. Theory of Groundwater Motion. **Journal of Geology**, v. 48, p. 785-944, 1940. DOI: dx.doi.org/10.1086/624930.

HEAD, K. H.; EPPS, R. J. **Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 2**: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests. Scotland, UK: Whittles Publishing. 3ed, 2011. ISBN 978-1904445-69-2.

HU, L.; WU, H.; ZHANG, L.; ZHANG, P.; WEN, Q. Geotechnical Properties of Mine Tailings. **Journal of Materials in Civil Engineering**: ASCE, v. 29, n. 2, p. 10, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001736.

HU, S.; CHEN, Y.; LIU, W.; ZHOU, S.; HUA, R. Effect of Seepage Control on Stability of a Tailings Dam During its Staged Construction with a Stepwise-coupled Hydro-mechanical Model. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, Taylor e Francis. p.18, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/17480930.2013.870693.

HUI, S. R.; CHARLEBOIS, L.; SUN, C. Real-time Monitoring for Structural Health, Public Safety, and Risk Management of Mine Tailings Dams. **Can. J. Earth Sci**. v. 55, p. 221–229, 2018. DOI: dx.doi.org/10.1139/cjes-2017-0186.

HVORSLEV, M. J. Time Lag and Soil Permeability in Groundwater Observations. **Waterways Experiment Station**, U.S., Mississippi, n. 26, 1951. Disponível em: https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/bitstream/11681/4796/1/BUL-36.pdf. Acesso em: 10 janeiro. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração, 2016**. Disponível em: http://www.ibram.or g.br/sites/130 0/138 2/00006222.pdf. Acesso em: 15 março. 2020.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD. **Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences, Bulletim 121**. Haussmann, Paris: ICOLD/UNEP PNUE, 2001.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD. **Dam Surveillance Guide, Bulletin 158.** Balkema, France: ICOLD/CIGB, 2018. ISBN: 978-1-351-03578-1.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD. **Dam Failures Statistical Analysis**, **Bulletin, 99**. Haussmann, Paris: ICOLD/UNEP PNUE, 1995.

ISTOK, J. D. **Groundwater Modeling by the Finite Element Method**. Washington: American Geophysical Union, 1989. Disponível em: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1029/WM013. Acesso em: 28 maio. 2022.

IZADY, A.; DAVARY, K.; ALIZADEH, A.; ZIAEI, A. N.; ALIPOOR, A.; JOODAVI, A.; BRUSSEAU M. L. A Framework toward developing a groundwater conceptual model. **Arab J. Geosci,** Publish Online, Springer, p. 21, 2013. DOI: https://doi.org/10.1007/s12517-013-0971-9.

JOHARI, A.; HEYDARI, A. Reliability analysis of seepage using an applicable procedure based on stochastic scaled boundary finite element method. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, Elsevier. v. 94, p. 44–59, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2018.05.015.

JONES, H.; BOGER, D. V. Sustainability and waste management in the resource industries. **Ind. Eng. Chem. Res,** ACS Publications, American Chemical Society, v. 51, p. 10057–10065, 2012.

KALATEHJARI R.; ALI, N. A. Review of Three-Dimensional Slope Stability Analyses based on Limit Equilibrium Method. EJGE, v. 18, Bund. A, 2013.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; EDWARDS, H. K. A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, Science Direct, Elsevier, v. 51, p. 229–245, 2014.

KPEGLI, K. A. R.; ALASSANE, A.; ZEE, S. E. A. T. M. V. D.; BOUKARI, M.; MAMA, D. Development of a conceptual groundwater flow model using acombined hydrogeological, hydrochemical and isotopic approach: A case study from southern Benin. **Journal of Hydrology: Regional Studies,** Elsevier, v. 18, p. 50–67, 2018.

Krahn, J. *The 2001 R.M. Hardy lecture: The limits of limit equilibrium analyses*. **Canadian Geotechnical Journal**, v.40, p. 643-660, 2003. DOI: 10.1139/T03-024.

LAURENCE, W. L.; MARTIN P. A historical perspective on unconfined seepage: correcting a common fallacy. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering History and Heritage,** 172(2): 57–69, 2019. https://doi.org/10.1680/jenhh.19.00004.

LEONG, E. C.; RAHARDJO, H. Permeability Functions for Unsaturated Soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE Library, Florida, v. 123, p. 1118-1126.,1997.

LIMA, F. H. C.; GUIMARÃES, M. M. A. Importância da Automação da Instrumentação Geotécnica de Auscultação da Barragem Irapé – MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, X, 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, Ceará, 2019. Disponível em: http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/XI-097.pdf. Acesso em: 14 julho. 2020.

LIMA, Vagner Albuquerque de. **Uso das técnicas HCT e TDR no monitoramento de processo de consolidação em reservatórios de barragens de rejeitos**. 2009. Dissertação (Mestrado – Área de concentração em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

LU, N.; LIKOS, W. **Unsaturated Soil Mechanics**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004.

LYU, Z.; CHAI, J.; XU, Z.; QIN, Y.; CAO, J. A. Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. **Advances in Civil Engineering**, Hindawi, p.18, 2019.

LYU, Z.; CHAI, J.; XU, Z.; QIN, Y. Environmental Impact Assessment of Mining Activities on Groundwater: Case Study of Copper Mine in Jiangxi Province. **Journal Hydrology Engineering**, China, American Society of Civil Engineers, v. 24-1, 2019.

LÓPEZ-ACOSTA, N. P.; MARTÍNEZ-LÁZARO, M.; PROMOTOR, J. A. 3D Numerical Modeling for Analyses of Pumping Tests and Its Application on Pumping Well Systems Design. **Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges**, IOS Press, p.10, 2019. DOI: 10.3233/STAL190089.

MACHADO, Willian Gladstone de Freitas. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. São Paulo, 2011.

MADRALA, M.; WASIK, M.; MALOSZEWKI, P. Interpretation of environmental tracer data for conceptual understanding of groundwater flow: an application for fractured aquifer systems in the Kłodzko Basin, Sudetes, Poland. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, Taylor e Francis, p.1477-2639, 2017. DOI: 10.1080/10256016.2017.1330268.

MENGISTU, H. A.; DEMLIE, M. B.; ABIYE, T. A.; XU, Y.; KANYERERE, T. Conceptual hydrogeological and numerical groundwater flow modelling around the Moab Khutsong deep gold mine, South Africa. **Groundwater for Sustainable Development**, Elsevier, v. 9, p. 17, 2019. DOI: 10.1016/j.gsd.2 019.100266.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim do Setor Mineral, 3 TRIM, 2019**. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/pub licacoes-1/boletim-do-setor-mineral/boletim-do-setor-mineral-janeiro-2020.pdf/view. Acesso em: 15 de março de 2020.

MIO, Giuliano de. **Condicionantes Geológicos na Interpretação de Ensaios de Piezocone para Identificação Estratigráfica na Investigação Geotécnica e Geoambiental**. 2005. Tese. (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. DOI: 10.11606/T.18.2005.TDE-27042006-170324.

MITTAL, H. K.; MORGENSTERN, N. R. Parameters for the Design of Tailings Dams. **Can. Geotech. J.**, Los Angeles, UCLA, v.12, p. 235-262, 1975.

NAEINI, M.; AKHTARPOUR, A. Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. Iran, Ferdowsi, University of Mashhad, v. 107, p. 179–194, 2018.

NASCIMENTO, Gustavo Catão Silva. **Modelo conceitual e numérico do aquífero hospedeiro de depósito polimetálico - Caçapava do Sul: relações entre lavra e recursos hídricos subterrâneos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

NICOLI, T. A. **Proposição de uma nova sistemática de disposição dos rejeitos magnéticos provenientes do beneficiamento da rocha fosfática na Mina Chapadão, Catalão, GO**. 2014. 81 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

OLIVA, A.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. Determinação da Condutividade Hidráulica da Formação Rio Claro: Análise Comparativa Através de Análise Granulométrica e Ensaios com Permeâmetro Guelph e Testes de Slug. **Revista Águas Subterrâneas**, ABAS, v. 19, n. 2, p. 1-17, 2005.

OLSON, S. M.; STARK, T. D. Yield Strength Ratio and Liquefaction Analysis of Slopes and Embankments. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE v. 129, n. 8, p.727–737, 2003. DOI: 10.1061/_ASCE_1090-0241_2003_129:8_727_.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. Terratek, Ed.3, 2007.

PAK, A.; NABIPOUR, M. Numerical Study of the Effects of Drainage Systems on Saturated/Unsaturated Seepage and Stability of Tailings Dams. **Mine Water and the Environment**, Germany, Springer-Verlag, p.15, 2017. DOI: 0.1007/s10230-017-0468-y.

PEREIRA, Eleonardo Lucas. **Estudo das características de compressibilidade e adensamento de rejeitos de fosfato de baixa densidade com o uso de técnicas experimentais de laboratório e de campo**. 2017. 254 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

PHAM, H. V.; TSAI, F. T. C. Optimal observation network design for conceptual model discrimination and uncertainty reduction. **Water Resources Research**, Louisiana, USA, v. 52, p. 1245–1264, 2016. DOI: 10.1002/2015WR017474

PIMENTA, R. C.; MOREIRA, R. M.; PINTO, A. M. F.; BACELLAR, L. A. P.; FONSECA, F. H. R.; FERNANDES, F. M. Traçadores ambientais e intencionais aplicados na Avaliação de fugas de água em barragens: uma revisão - ID 191. In: CONGRESSO INTERNACIONAL RESAG, 3, 2017, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017. Disponível em: http://www.resag.org.br/congressoresag2017/anais/trabalhos /aprovado?q=191. Acesso em: 28 maio. 2022.

PINDER, G. F.; GRAY, W. G. **Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology**. London, Academic Press, Inc., p. 308, 1977. ISBN: 0125569505.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, ed. 3, p. 359, 2006.

PRICE D. G. **Engineering Geology, Principles and Practice**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, ed. 1, p .560, 2009. ISBN: 9783540292494.

RIBEIRO, Artur Bastos. **Avaliação do regime de fluxo e da poropressão de uma barragem alteada para montante: comparação das observações de campo e da modelagem numérica**. 2017. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia

Geotécnica) – Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

RIBEIRO, Saulo Gutemberg Silva. **Estabilidade e Percolação de Barragens**, Belo Horizonte: Geotechnical Modelling, p.124, 2021.

ROCHA, D. C. G.; BRAGA, M. A. S.; RODRIGUES, C. T. Geophysical Methods for BR Tailings Dam Research and Monitoring in the Mineral Complex of Tapira - Minas Gerais, Brazil**. Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geofísica, v. 37, n. 3, p. 275-289, 2019. Disponível em: https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/2007. Acesso em: 17 março. 2021.

ROTTA, L. H. S.; ALCÂNTARA, E.; PARK, E.; NEGRI, R. G.; LIN, Y. N.; BERNARD, N.; MENDES, T. S. G.; SOUZA FILHO, C. R. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. **Int J Appl Earth Obs. Geoinformation**, v. 90, p. 12, 2020.

SANTOS, Alexandre Gonçalves. **Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

SANTOS, A. G.; RIBEIRO, L. F. M. Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro. **R. Esc. Minas - REM**, Ouro Preto, v.60(3), p.465-470, 2007. DOI: 10.1590/S0370-44672007000300005.

SARSBY, R. W. **Environmental Geotechnics**. ed. 2, Westminster, London, ICE Publishing, p. 535, 2013. ISBN 978-0-7277-4187-5.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. Ed. 2, São Paulo: Oficina de Textos, 2012. ISBN 978-85-7975-059-5.

SEGADELLI, S.; VESCOVI, P.; OGATA, K.; CHELLI, A.; ZANINI, A.; BOSCHETTI, T.; PETRELLA, E.; TOSCANI, L.; GARGINI, A.; CELICO, F. A conceptual hydrogeological model of ophiolitic aquifers (serpentinised peridotite): The test example of Mt. Prinzera (Northern Italy). **Hydrological Processes**, John Wiley & Sons Ltd., p.1–16, 2016. DOI: 10.1002/hyp.11090.

SILVA, João Paulo de Sousa. **Avaliação da Influência do Regime de Fluxo no Comportamento Geotécnico de uma Barragem de Rejeitos Alteada Pelo Método de**

Montante. 2014. Dissertação. (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 162, 2014.

SILVA, J. C. S.; LOUREIRO, C. O.; PESSOA, P. F. P. Caracterização Hidrogeológica Ambiental da Área de Influência da Mina Lapa Vermelha, na Região Cárstica de Lagoa Santa, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, XIII, 2004. Revista Águas Subterrâneas, 2004. **Anais [...]**. Lagoa Santa, Minas Gerais, ABAS, p. 22, 2004. Disponível em: https://aguassubterraneas.abas.org/asub terraneas/article/view/23394. Acesso em: 28 maio. 2022.

SILVA, Maria João Félix. **Análise de Estabilidade de Taludes pelo Método de Equilíbrio Limite Geral**. (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. p. 109, 2013.

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos**. (p. 831-896). In ADÃO, B. L.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, ed. 5, p. 932, 2010. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/769. Acesso em: 12 maio. 2020.

SOTO, Miguel Angel Alfaro. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 2004. Tese. (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

SOUZA, Weber Anselmo dos Ramos. **Análise Numérica do Comportamento de Pilhas de Rejeito Filtrado e Co-disposição Durante a Construção**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

SUCUMANGI, Shelsea Denise Jorge. **Análise de Estabilidade no Decurso dos Alteamentos da Barragem do Fundão em Minas Gerais: Simulação Numérica pelo Método dos Elementos Finitos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2021.

VALERIANO, C. M.; DARDENNE, M. A.; FONSECA, M. A.; SIMÕES, L. S. A.; SEER, H. J. **A evolução tectônica da Faixa Brasília** (p. 575-592). In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques De Almeida, São Paulo: Beca, 2004.

VICK, S G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. BiTech, 1990. DOI: 10.14288/1.0394902.

WITT, K. J.; SCHÖNHARDT, M.; SAARELA, J.; FRILANDER, CSICSAK, J.; CSŐVARI, M.; VÁRHEGYI, A.; GEORGESCU, D. P.; RADULESCU, C. A.; ZLAGNEAN, M.; BÕHM, J.; DEBRECZENI, Á.; GOMBKÖTÕ, I.; XENIDIS, A.; KOFFA, E.; KOURTIS, A.; ENGELS, J. **Sustainable Improvement in Safety of Tailings Facilities TAILSAFE**. A European Research and Technological Development Project, Report Tailings Management Facilities – Risks and Reliability, p. 178, 20. Website: http://www.tailsafe.com/.

YAO, C.; WU, L.; YANG, J.; XIAO, L.; LIU, X.; JIANG, X.; ZHOU, C. Influences of Tailings Particle Size on Overtopping Tailings Dam Failures. **Mine Water and the Environment**, Germany, Springer, p.16, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s10230-020-00725-3.

YU, S.; REN, X.; ZHANG, J.; WANG, H.; ZHANG, Z. Sensibility Analysis of the Hydraulic Conductivity Anisotropy on Seepage and Stability of Sandy and Clayey Slope. **Water**, MDPI, v.12, p. 277, 2020. DOI: 10.3390/w12010277.

YANG, H. H. Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method: Fundamentals and Methods. **ASCEPress**, Cap 2, p. 23-44, 2014. DOI: https://doi.org/10.1061/9780784412886.

ZHANG, C.; CHAI, J.; CAO, J.; XU, Z.; QIN, Y.; LV, Z. Numerical Simulation of Seepage and Stability of Tailings Dams: A Case Study in Lixi, China. **Water**, MDPI, v. 12, p. 742, 2020. DOI: doi:10.3390/w12030742.