CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNÓLOGICA DE MINAS GERAIS

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas

DANIELLE FERREIRA MAGALHÃES

ANÁLISE DE ESTABILIDADE GEOTÉCNICA DE PILHA DE FOSFOGESSO

Araxá - MG

2023

DANIELLE FERREIRA MAGALHÃES

ANÁLISE DE ESTABILIDADE GEOTÉCNICA DE PILHA DE FOSFOGESSO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Campus Araxá, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto

Araxá - MG

2023

ATA DA 17ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS – MESTRADO PROFISSIONAL

Aos 28 (vinte e oito) dias do mês de fevereiro do ano de 2023 (dois mil e vinte e três), às 18h00min (dezoito horas), através da Plataforma Microsof TEAMS,foi instalada a Sessão Pública para a Defesa de Dissertação do(a) Mestrando(a) DANIELLE FERREIRA MAGALHÃES, *sob a forma totalmente remota (Resolução CPPG 08/2020, de 09/07/2020; Resolução CEPE 09/2020, de 17/11/2020)*, sendo a banca examinadora composta pelo(a) Prof. Dr. THIAGO BOMJARDIM PORTO (Presidente) – CEFET- MG, Profa. Dra. TEREZINHA DE JESUS ESPÓSITO BARBOSA (Membro externo) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Prof. Dr. HILDOR JOSÉ SEER (Membro interno) – (CEFET-MG) e Prof. Dr. ALLAN ERLIKHMAN MEDEIROS SANTOS (Membro interno) – (CEFET-MG). Dando início aos trabalhos o Presidente, com base no Regulamento do Programa e nas Normas que regem as Sessões de Defesa de Dissertação, concedeu ao (a) Mestrando(a) ***DANIELLE FERREIRA MAGALHÃES***, até 40 (quarenta) minutos para a apresentaçãodo seu trabalho intitulado "ANÁLISE DE ESTABILIDADE GEOTÉCNICA DE PILHA DE FOSFOGESSO", na Área de Concentração: *Engenharia de Minas* e Linha de Pesquisa de *Geologia de Engenharia na Mineração*. Terminada a exposição, o Presidente da Banca examinadora passou a arguição do(a) candidato(a) pelos membros da banca examinadora. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a Sessão, o Presidente solicitou aos presentes que se retirassem do recinto para que a banca examinadora procedesse a análise e decisão, anunciando, a seguir publicamente, que o(a) Mestrando(a) foi aprovado (a) com recomendações, por unanimidade. Para constar, foi lavrada a presente ATA que, após aprovada, vai assinada pelos membros da Banca Examinadora e pelo(a) Mestrando(a).

Araxá-MG, 28 de fevereiro de 2023.

_____
Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto
Presidente (CEFET-MG)

_____
Profa. Dra. Terezinha de J. E. Barbosa
Membro externo (UFMG)

_____
Prof. Dr. Hildor Jose Seer
Membro interno (CEFET-MG)

_____
Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos
Membro interno (CEFET-MG)

_____
Engª. Danielle Ferreira Magalhães
Discente

Emitido em 04/03/2023

ATA Nº 01/2023 - DECMCV (11.59.04)
(Nº do Documento: 20)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 07/03/2023 09:01)
ALLAN ERLIKHMAN MEDEIROS SANTOS
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCAX (11.57.04)
Matrícula: ###675#8

(Assinado digitalmente em 07/03/2023 09:44)
HILDOR JOSE SEER
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMCAX (11.57.04)
Matrícula: ###186#5

(Assinado digitalmente em 04/03/2023 10:12)
THIAGO BOMJARDIM PORTO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DECMCV (11.59.04)
Matrícula: ###247#0

(Assinado digitalmente em 04/03/2023 09:58)
DANIELLE FERREIRA MAGALHAES
DISCENTE
Matrícula: 2021######1

(Assinado digitalmente em 10/03/2023 17:34)
TEREZINHA ESPOSITO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.016-##

Visualize o documento original em https://sig.cefetmg.br/documentos/ informando seu número: **20**, ano: **2023**, tipo: **ATA**, data de emissão: **04/03/2023** e o código de verificação: **7c05d643d6**

Magalhães, Danielle Ferreira
M189a Análise de estabilidade geotécnica de pilha de fosfogesso / Danielle Ferreira Magalhães. – 2023.
98 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2023.
Bibliografia.

1. Mecânica dos solos – Estabilidade – Teses. 2. Geotecnia – Teses. 3. Fosfogesso – Teses. I. Porto, Thiago Bomjardim. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDU 624.131

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

DANIELLE FERREIRA MAGALHÃES

ANÁLISE DE ESTABILIDADE GEOTÉCNICA DE PILHA DE FOSFOGESSO

Dissertação analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Geologia de Engenharia na Mineração e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Minas – PPGEMIM do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus Araxá.

Aprovada em 28/02/2023 pela banca examinadora:

_____

Dr. Prof. Dr. Thiago Bomjardim Porto (CEFET-MG)

(Orientador)

_____

Prof. Dr. Hildor Jose Seer – (PPGEMIN/CEFET-MG)

_____

Profa. Dra. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa (DETG - UFMG)

_____

Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos (PPGEMIN/CEFET - MG)

Dedico este trabalho à Deus, que me guia, me dá forças e ilumina constantemente meus pensamentos.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação de mestrado demandou uma considerável quantidade de tempo, dedicação e persistência. Agora, quando pronta, gera uma grande satisfação, que deve ser compartilhada com todos os envolvidos nesta empreitada.

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu até aqui chegar.

Aos meus pais, pela minha formação como pessoa e por terem fornecido a base necessária para ser quem hoje sou.

Às minhas amadas irmãs por serem meu orgulho.

A Cesar, meu esposo, pelo companheirismo e compreensão, por entender minhas ausências e estar sempre ao meu lado.

Ao grande amigo Adalberto Hideo Viana, por compartilhar comigo seu elevadíssimo conhecimento na Pilha de Fosfogesso.

À empresa detentora da base de dados pelo fornecimento das informações e pela oportunidade do mestrado profissional, em especial a Luís Almeida, Ricardo Telles, Gerson Cavalcante e William Arrieiro.

Ao professor Thiago Bomjardim Porto, pela oportunidade, paciência e dedicação durante a orientação deste trabalho e, sobretudo, por acreditar e confiar no meu potencial. Agradeço ainda à sua família, por entender sua ausência nos momentos de dedicação a este trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas – Mestrado Profissional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus de Araxá, pela dedicação e preocupação em transmitir o conhecimento da melhor forma possível.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização e divulgação deste trabalho, muito obrigada!

“Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende da nossa vontade e perseverança.”

(Albert Einstein)

RESUMO

O presente trabalho, de cunho exclusivamente acadêmico, tem como objetivo analisar a estabilidade geotécnica de uma pilha de fosfogesso localizada no Estado de Minas Gerais, a partir de dados geotécnicos obtidos em investigações de campo e laboratório, disponibilizados pela empresa detentora dos dados, de modo a esclarecer perante a sociedade o comportamento da respectiva estrutura geotécnica no que tange a segurança para todos que trabalham na Pilha de Fosfogesso, ou que transitam na área de influência da mesma. A escolha do tema deste trabalho foi motivada pela busca do entendimento do comportamento de uma estrutura geotécnica única no Brasil, que até então era classificada pelos órgãos fiscalizadores como barragem, e recentemente reclassificada como empilhamento drenado. Com base na topografia utilizada neste estudo, o trecho mais alto da pilha possui cerca de setenta metros de altura e uma área estimada de 160 hectares. Para setorização do trecho crítico do talude da pilha desta pesquisa, utilizou-se a seção transversal mais íngreme e com parâmetros geotécnicos conservadores. Discute-se neste trabalho também a magnitude dos parâmetros geotécnicos (coesão, ângulo de atrito, peso específico e coeficiente de permeabilidade) obtidos nas bases de dados pesquisadas. Foram realizadas análises de estabilidade e de percolação em duas seções próximas às seções estabelecidas em projeto, sendo a análise de percolação mais indicada para referida estrutura, devido às propriedades hidráulicas das Pilha de Fosfogesso, na qual se considera a perda de carga do fluxo da drenagem interna, causando alivio de pressão no interior da referida estrutura geotécnica e aumentando consequentemente a estabilidade da mesma. As referidas análises foram elaboradas com base nos Métodos de Equilíbrio Limite proposto por Spencer e Morgenstern Price conjuntamente com a metodologia *Ground Water - Method Steady State FEA* disponível no *software* Slide2 da Rocscience. A Pilha de Fosfogesso, reclassificada pela FEAM como "empilhamento drenado", com base nas análises realizadas, está operando dentro da normalidade e atendendo aos fatores de segurança mínimo exigidos pela legislação aplicável à referida estrutura geotécnica. Portanto, para as condições estudadas, pode-se considerar a Pilha de Fosfogesso estável.

Palavras-chave: Estabilidade Geotécnica de Fosfogesso. Ensaios Geotécnicos. Pilha de Fosfogesso. Monitoramento de Pilha de Fosfogesso.

ABSTRACT

The present work, of an exclusively academic nature, aims to analyze the geotechnical stability of a pile of phosphogypsum located in the State of Minas Gerais, based on geotechnical data obtained in field and laboratory investigations, made available by the company that owns the data, in order to to clarify before society the behavior of the respective geotechnical structure in terms of safety for all those who work in the Phosphogypsum Pile, or who transit in its area of influence. The choice regarding the theme of this work was motivated by the search for understanding the behavior of a unique geotechnical structure in Brazil that until then was classified by the inspection bodies as a dam, and recently reclassified as drained piling. Based on the topography used in this study, the highest section of the pile is about seventy meters high and has an estimated area of 160 hectares. For the sectorization of the critical section of the slope of the pile in this research, the steepest cross section was used, with very conservative geotechnical parameters. This work also discusses the magnitude of the geotechnical parameters (cohesion, friction angle, specific weight and permeability coefficient) obtained in the searched databases. Stability and percolation analyses were carried out in two sections close to the sections established in the project, being the percolation analysis most indicated for that structure, due to the hydraulic properties of the Phosphogypsum Stack, in which it considers the head loss of the flow of the internal drainage, causing pressure relief inside the said geotechnical structure, consequently increasing its stability. These analyses were based on the Limit Equilibrium Methods proposed by Spencer and Morgenstern e Price, together with the "Ground Water - Method Steady State FEA" methodology available in the Slide2 software from Rocscience. The Phosphogypsum Stack, reclassified by FEAM as "drained stacking", based on the analyses carried out, is operating within normal limits, and meeting the minimum safety factors required by the legislation applicable to the aforementioned geotechnical structure. Therefore, for the conditions studied, the Phosphogypsum Stack can be considered stable.

Keywords: Geotechnical Stability of Phosphogypsum. Geotechnical Tests. Phosphogypsum Pile. Phosphogypsum Stack Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Líderes no mercado global de fertilizantes 18
Figura 2 - Vista aérea da Pilha de Fosfogesso 20
Figura 3 - Detalhe de rachaduras em pilha de fosfogesso seco 28
Figura 4 - Fluxograma simplificado do processo de produção de fosfogesso 29
Figura 5 - Linha de PEAD - Transporte da polpa de fosfogesso 30
Figura 6 - Ponto de descarga do fosfogesso no topo da pilha 30
Figura 7 - Principais componentes de uma pilha de gesso 32
Figura 8 - Sistema de drenagem interna de uma típica pilha de fosfogesso 33
Figura 9 - Geomembrana instalada na fundação da pilha de fosfogesso 34
Figura 10 - Elevação da Pilha de Fosfogesso 35
Figura 11 - Elevação da pilha de fosfogesso 36
Figura 12 - Praia formada a partir de *rim ditch* 37
Figura 13 - Água fluindo no talude 37
Figura 14 - Limites de Atterberg 40
Figura 15 - Desenho esquemático da câmera de ensaios triaxiais 43
Figura 16 - Aparelho utilizado para ensaios de cisalhamento direto 44
Figura 17 - Marco superficial 45
Figura 18 - Esquema do Indicador de Nível de Água – INA 46
Figura 19 - Esquema do piezômetro de tubo aberto 47
Figura 20 - Medidor de vazão do tipo triangular 48
Figura 21 – Pluviômetro 49
Figura 22 - Seção típica de barragem de terra 53
Figura 23 - Detalhe da barragem cisalhada 53
Figura 24 - Detalhe de piping e galgamento em barragem 54
Figura 25 - Pilha de fosfogesso dividida por compartimento 57
Figura 26 - Fotomicrografia de amostras de fosfogesso 57
Figura 27 - Comportamento hídrico da pilha de fosfogesso 58
Figura 28 - Localização dos pontos de sondagem e coleta de amostras 61
Figura 29 - Amostras Shelby 62
Figura 30 - Curvas granulométricas de fosfogesso 64
Figura 31 - Curvas granulométricas do fosfogesso 65

Figura 32 - Análises de peso específico x densidade do material 66
Figura 33 - Variação da condutividade hidráulica vertical versus taxa de vazios 70
Figura 34 - Ensaios triaxiais do gesso 73
Figura 35 - Mapa de localização de instrumentos e pontos de monitoramento 75
Figura 36 - Leituras dos marcos superficiais 76
Figura 37 - Leituras dos INA's (OW) e PZ's (P's) – Freática 77
Figura 38 - Leituras das vazões da drenagem interna 78
Figura 39 - Seções analisadas 79
Figura 40 - Análise de estabilidade de percolação - Seção A 80
Figura 41 – Análise de estabilidade de percolação – Seção B 81
Figura 42 - Seções analisadas 84
Figura 43 – Seção A 85
Figura 44 – Seção B 85
Figura 45 - Seção A 86
Figura 46 - Seção B 87
Figura 47 - Seção A 87
Figura 48 - Seção B 88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fatores de segurança mínimos para mineração 25
Tabela 2- Investigações de campo 38
Tabela 3 - Ensaios laboratoriais 39
Tabela 4- Frequência de inspeções regulares 49
Tabela 5 - Hipóteses quanto às forças entre fatias 51
Tabela 6 - Dados gerais da pilha de fosfogesso 59
Tabela 7 - Pontos de coordenadas da investigação de campo 63
Tabela 8 - Pontos de coordenadas da investigação de campo 63
Tabela 9 - Correlação de identificação das amostras de campo e laboratório 64
Tabela 10 - Resultados de massa especifica (ρ) 67
Tabela 11 - Massa específica real dos grãos 67
Tabela 12 - Massa específica aparente das amostras 68
Tabela 13 - Teores de umidade natural 69
Tabela 14 - Teores de umidade natural 69
Tabela 15 - Resultados de índices de vazios (e) 70
Tabela 16 - Resultados limites de Atteberg 71
Tabela 17 - Parâmetros de resistência do fosfogesso 72
Tabela 18 - Pontos de monitoramento 75
Tabela 19 – Propriedades dos materiais das análises de estabilidade – Seção A 80
Tabela 20 - Propriedades dos materiais das análises de estabilidade – Seção B 82
Tabela 21 - Parâmetros de resistência adotados nas análises 84
Tabela 22 - Resumo de FS mínimo obtido nas análises 89

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

c - Coesão;

c’ - Coesão em Termos de Tensões Efetivas;

w - Umidade;

u - Poro-pressão;

σ - Tensão normal;

σc - Tensão confinante;

ϕ - Ângulo de Atrito

ϕ' - Ângulo de Atrito Interno do Material em Termos de Tensões Efetivas;

σ' vo - Tensão total vertical;

σ' vo - Tensão efetiva vertical;

ρs - Massa específica dos sólidos;

γ - Peso específico

e - Índice de vazios natural;

k - Coeficiente de permeabilidade;

K_0 - Coeficiente de empuxo no repouso;

K_h - Coeficiente de condutividade hidráulica horizontal;

K_v - Coeficiente de condutividade hidráulica vertical.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO 17

1.1- Generalidades 17

1.2 - Estrutura da dissertação 21

1.3 - Objetivos 21

1.3.1 - Objetivos específicos 22

1.4 - Justificativa 22

2 - REFERENCIAL TEÓRICO 23

2.1- Caracteristicas do fosfogesso 23

2.1.1 - Características físicas 23

2.1.2 - Características químicas 24

2.2 - Legislação aplicável 24

2.3 - Barragem convencional *versus* empilhamento drenado 25

2.4 - Potencial de liquefação em pilha de fosfogesso *versus* barragem 26

2.5 - Pilhas de fosfogesso à úmido *versus* pilhas à seco 27

2.6 - Processo de obtenção do fosfogesso 28

2.7 - Metodologia construtiva da pilha de fosfogesso 31

2.7.1 - Construção da pilha 31

2.7.2 - Componentes da pilha de fosfogesso 31

2.7.3 - Sistema de drenagem interna 32

2.7.4 - Revestimento da pilha de fosfogesso (Geomembrana) 33

2.7.5 - Dique perimetral de argila 34

2.7.6 - Método construtivo da pilha (*rim ditching*) 35

2.7.7 - Linhas de sifão 37

2.8 - Investigação geotécnica de campo 38

2.8.1 - Investigação geotécnica de laboratório 38

2.8.1.1 - Granulometria por peneiramento e sedimentação 39

2.8.1.2 - Massa específica real dos grãos 39

2.8.1.3 - Índices de consistência (Limites de Atterberg) 40

2.8.1.4 - Índice de vazios 41

2.8.1.5 - Umidade natural 41

2.8.1.6 - Massa específica aparente 41

2.8.1.7 - Ensaio triaxial 42
2.8.1.8 - Cisalhamento direto 43
2.9 - Auscultuação e controle de pilha de fosfogesso 44
2.9.1 - Instrumentação e monitoramento 44
2.9.1.1 - Marcos superficiais 45
2.9.1.2 - Indicadores de nível de água 46
2.9.1.3 - Piezômetros de tubo aberto (Casa grande) 47
2.9.1.4- Medidores de vazão 48
2.9.1.5 - Pluviômetro 48
2.10 - Inspeção Visual de Campo 49
2.11 - Modelagem computacional 50
2.11.1 - Modelo Computacional 50
2.11.2 - Métodos de Equilíbrio Limite 51
2.12 - Mecanismos de ruptura de barragens 52
3 - MATERIAIS E MÉTODOS 55
3.1 - Metodologia 55
3.2 - Pilha de fosfogesso do estudo 56
3.2.1 - Comportamento hídrico da pilha de fosfogesso 58
3.3 - Informações gerais da pilha de fosfogesso 59
3.3.1 - Base de dados 60
3.3.2 - Ensaios de campo 60
3.3.3 - Metodologia para sondagens e coleta de amostras 61
3.3.4 - Ensaios de laboratório 63
3.3.4.1- Granulometria 64
3.3.4.2 - Densidade e peso específico 65
3.3.4.3 - Massa específica real dos grãos 67
3.3.4.4 - Massa específica aparente natural 69
3.3.4.5 - Umidade 69
3.3.4.6 - Condutividade hidráulica e índice de vazios 69
3.3.4.7 - Limites de Atteberg 70
3.3.4.8 - Ensaios especiais 71
3.3.4.8.1 - Ensaio Triaxial CIU 71
3.4 - Dados de Instrumentação e Monitoramento 74
3.5 - Projeto pilha de fosfogesso 79

4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 83
4.1 - Análise de estabilidade e percolação 83
4.2 - Parâmetros de resistência do fosfogesso 83
4.3 - Seções geotécnicas 84
4.4 - Análise de estabilidade 86
4.5 - Análise de percolação 87
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURAS 90
5.1 - Considerações finais 90
5.2 - Sugestões para pesquisas futuras 91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 92

1 – INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

A presente dissertação visa avaliar a estabilidade da pilha de fosfogesso localizada na microrregião do Triângulo Mineiro, sudoeste do estado de Minas Gerais utilizando informações do próprio banco de dados de monitoramento da respectiva estrutura geotécnica. O fosfogesso é um sulfato de cálcio hidratado formado na produção de fertilizantes, a partir da produção de ácido fosfórico com utilização de rocha fosfática (PRATT, 2021). Atualmente há uma indústria química que utiliza rocha fosfática concentrada, proveniente de mineração, como matéria-prima para produzir fertilizantes fosfatados (ácido fosfórico), e como coproduto gera fosfogesso, também conhecido como gesso agrícola, e que antes era considerado um mero resíduo industrial, mas que na atualidade está sendo vendido, com inúmeras aplicações, algumas das quais são bem conhecidas, tais como: agricultura, construção civil, indústria cimenteira, e pavimentação (FERRARI, 2012).

Com as recentes mudanças na legislação de barragens de Minas Gerais, a pilha de fosfogesso do presente estudo foi reclassificada, em fevereiro de 2022, pelo órgão fiscalizador (FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente) como barragem, sendo atualmente enquadrada como empilhamento drenado, fato este que não eximi o empreendedor da responsabilidade de monitorar e garantir a estabilidade da estrutura geotécnica denominada pilha de fosfogesso. (BRASIL, 2022).

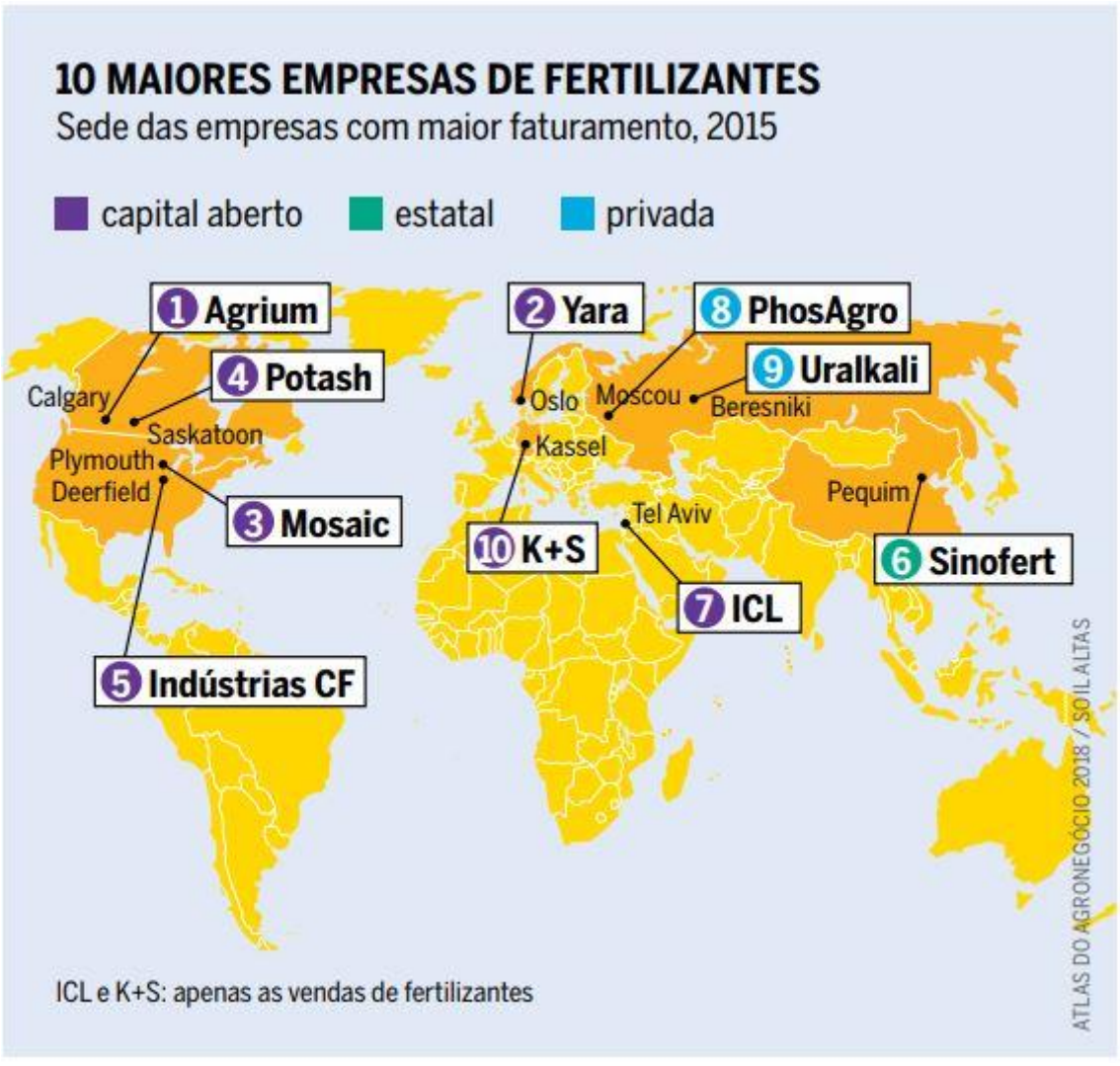
As reservas brasileiras de fertilizantes se concentram principalmente nos estados de Minas Gerais (MG), Goiás (GO), São Paulo (SP), Sergipe (SE) e (Dubiela, 2022).

Os quatro principais fabricantes de fertilizantes – EuroChem (desde 2021 detém os ativos da antiga Yara no Brasil), Mosaic, Fertipar e Heringer - controlam cerca de 73% dos Mercado brasileiro de fertilizantes. A Yara é a maior empresa de fertilizantes, com uma quota de mercado de 25%. A Mosaic ocupa o segundo lugar, com quase 20%. Em terceiro lugar aparece a Fertipar, com participação de 15%, seguida pela Heringer, com 13%. Os restantes 27% dividem-se entre as restantes empresas do setor (SOUZA, 2022).

Atualmente, o Brasil responde por aproximadamente 8% do consumo global de fertilizantes, ocupando o quarto lugar no hanking mundial, ficando atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos. O nutriente mais utilizado no Brasil é o potássio (38%), seguido do cálcio (33%) e do nitrogênio (29%). A soja é a cultura agrícola mais importante do Brasil, representando mais de 40% do fertilizantes consumidos na agricultura brasileira (BRASIL, 2020).

Certos fabricantes monopolizam o mercado mundial de fosfato e potássio. Os maiores investidores deste tipo de negócio são: Agrium do Canadá, Yara da Noruega e Mosaic Company dos Estados Unidos (Figura 1). Essas empresas operam suas próprias minas e indústrias. Juntas, representando cerca de 21% das mercado global de mineração (BRASIL, 2020).

Figura 1 – Líderes no mercado global de fertilizantes



Fonte: Santos e Glass (2018, p.18).

Segundo Cichy (2018), cerca de 100 a 280 milhões de toneladas de fosfogesso são produzidos em todo o mundo a cada ano, sendo empilhado em terra ou até mesmo despejado no mar por alguns paises.

Neste contexto, por muitas décadas o fosfogesso tem sido objeto de pesquisa em grande parte do mundo, uma vez que o fosfogesso de alguns paises não podem ser comercializados devido ao grau de impurezas radioativas, não sendo o caso do fosfogesso brasileiro que é totalmente comercializável. No entanto, o recente aumento de fosfogesso estocado em todo mundo aumentou a necessidade de um estudo que investiga a lacuna de conhecimento sobre a estabilidade do fosfogesso (HUSEIN MALKAWI et. al., 2002).

A pilha de fosfogesso em estudo é uma estrutura única no Brasil. Os projetos da pilha de fosfogesso alvo deste estudo seguem regulamentos rígidos do Department of Environmental Protection - FDEP, órgão responsável pelo regimento da gestão do fosfogesso nos EUA, bem como os requisitos mínimos para os diques utilizados nas pilhas de fosfogesso para retenção de água e procedimentos para elevação e aumento do fosfogesso pilhas com decantação de água de processo no topo da os pilhas, conforme observado na estrutura geotécnica do estudo (ARDAMAN, 2019).

A Pilha de Fosfogesso não está localizada em uma mineradora. Este fato a exime de ser fiscalizada pela Agência Nacional de Mineração – ANM, sendo fiscalizada pela Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM. (BRASIL, 2022).

De maneira geral, o tamanhodas pilhas de fosfogesso varia de acordo com a área disponível para deposição. As inclinações laterais normalmente são de 3.0H: 1.0V (Horizontal: Vertical). A base da pilha é composta por uma camada com cerca de 1m de espessura de argila compactada, e uma camada de 2m de argila siltosa. O sistema de drenagem é composto por tubos de PEAD com pontos de saída em diversos locais, cujo objetivo é transmitir toda água do topo da geomembrana, para o canal de retorno de água de processo. As pilhas de fosfogesso, possuem ainda feições superficiais coesas, as quais corroboram para o aumento de resistência e consequente estabilidade da estrutura geotécnica. (ARDAMAN, 2019).

Os trabalhos acadêmicos relacionados ao tema fosfogesso no contexto da geologia e geotecnia podem ser subdivididos em: (a) Pesquisas relacionadas às propriedades do fosfogesso, conforme FIPR (2002) e CICHY et al. (2018); (b) Estudos relacionados à utilização do fosfogesso na Engenharia, conforme SILVA et al, REZENDE et al., ANJOS et al.

OLIVEIRA (2019), ROBINSON et al. (2022) e CICHY et al. (2018); (c) Análises de Estabilidade de Pilhas de Fosfogesso, conforme DARDENNE et al. (2017), MALKAWI et al. (2022), TULASI et al. (2022), ZMEMLA et al (2019) e VALVERDE et al (2011); e (d) Estudos relacionados à sustentabilidade (meio ambiente), conforme CANUT (2006), FULEIHAN (2012), MALKAWI et al. (2022), BANI-HANI (2022), PINTO (2007), SPIRLANDELLI (2017), SOUZA et al CAMARINI (2019).

O estudo de estabilidade geotécnica de Pilha de Fosfogesso localizada no Estado de Minas Gerais (Figura 2) foi realizado a partir de informações disponiblizadas pelo empreendedor, provenientes do próprio monitoramento da respectiva estrutura geotécnica dos resultados da campanha de investigação geológico-geotécnica realizada no local de estudo, atualizada pela topografia do mês de julho de 2021, levando sempre em consideração quesitos preconizados pela legislações aplicáveis à estrutura geotécnica do referido estudo.

Figura 2 - Vista aérea da pilha de fosfogesso



Fonte: Empresa detentora dos dados (2021)

1.2 - Estrutura da dissertação

Para a discussão dos resultados da pesquisa, esta dissertação foi organizada em quatro capítulos inseridos nos quais se discutem as questões abaixo mencionadas.

No primeiro capítulo são apresentados os aspectos gerais da geração do fosfogesso e os objetivos da pesquisa, bem como a motivação e/ou justificativa da respectiva dissertação.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica, buscando detalhar o método construtivo da pilha de fosfogesso, o comportamento hídrico da respectiva estrutura geotécnica, bem como as investigações de campo e ensaios laboratoriais comumente realizados em pilhas de fosfogesso. Este capitulo ainda apresenta as principais ferramentas de monitoramento utilizadas para coleta de dados de pilha de fosfogesso, que também tem como função atuar no acompanhamento das condições de segurança da estrutura através de inspeção visual de campo e modelagem computacional.

O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos utilizados, a base de dados adotada no referido estudo, a legislação aplicável à pilha de fosfogesso e o mecanismo de ruptura, bem como a área de abrangência da pesquisa.

O quarto capítulo apresenta as análises de estabilidade e percolação realizadas, com os fatores de segurança obtidos nas respectivas análises e discussões referentes aos respectivos resultados. Ainda no quarto capítulo apresentam-se as considerações finais, e um último capítulo são apresentadas as referências bibliográficas que orientaram a escrita deste texto.

1.3 - Objetivos

1.3.1- Objetivo geral

A presente pesquisa tem por objetivo realizar um estudo técnico de análise de estabilidade de uma estrutura geotécnica de disposição de Fosfogesso.

1.3.2 - Objetivos específicos

Nessa dissertação tem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Realizar revisão bibliográfica referente ao tema Fosfogesso;
2. Apresentar os dados de instrumentação e monitoramento referente ao tema abordado;
3. Apresentar as últimas campanhas de ensaios geotécnicos (campo e laboratoriais);
4. Elaborar um estudo de percolação na Pilha de Fosfogesso.

1.4 – Justificativa

Com os últimos acidentes ocorridos envolvendo estruturas geotécnicas no Brasil, há uma intensa preocupação por parte de toda população, bem como do empreendedor, no que tange à estabilidade das respectivas estruturas, justificando-se assim este trabalho.

Até pouco tempo não havia no Brasil uma definição clara sobre o enquadramento legal da Pilha de Fosfogesso, recentemente reclassificada pelo órgão fiscalizador como "empilhamento drenado". Este fato corrobora para realização da análise de estabilidade da estrutura com base em normas regulamentadoras conservadoras, ainda que como "boas práticas", uma vez que não há uma legislação totalmente aplicável à respectiva estrutura.

2- REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo são apresentados os conceitos de barragens de rejeitos *versus* empilhamento drenado; o processo industrial de obtenção do fosfogesso; as características do fosfogesso; a metologia construtiva; os componentes da pilha; o comportamento hídrico; as investigações geotécnicas de campo; os ensaios de laboratório; a instrumentação e inspeção visual de campo; a modelagem computacional; os métodos de equilíbrio limite e o mecanismo de ruptura.

2.1- Caracteristicas do fosfogesso

2.1.1 - Caracteristicas físicas

Chang (1989) mostra que a granulometria do fosfogesso varia de acordo com o método utilizado para produzir ácido fosfórico, a composição mineral da rocha fosfática e o período de tempo em que o material é lixiviado nos depósitos. O grau de moagem da rocha durante a fase inicial de produção de ácido fosfórico é um dos fatores que determina a composição granulométrica do fosfogesso.

Com mais de 75% de suas partículas passantes pela peneira da malha de 200#, o fosfogesso pode ser classificados entre os siltes (SILVESTRE, 2001; KOBAYASHI, 2001).

Além da origem da rocha fosfática e do processo de reação, as propriedades físicas do fosfogesso - tais como densidade, condutividade hidráulica, compressibilidade e resistência - são afetadas pelo método de disposição, idade do gesso, localização e profundidade do material disposto em pilhas (ARDAMAN, 2019).

2.1.2 - Características químicas

Segundo Canut (2006), a composição do fosfogesso possui enxofre (S), óxido de cálcio, flúor (F) e fósforo (P), formando assim o sulfato de cálcio di-hidratado (CaSO4.2H2O). O fosfogesso é um composto químico com propriedades físicas e químicas similares ao gesso natural, proveniente da gipsita.

A composição química do fosfogesso varia de acordo com a origem da rocha fosfática e dos processos industriais utilizados para a obtenção do ácido fosfórico. Como resultado, a concentração de cada elemento ou composto químico neste material pode sofrer variações. A definição da composição química do fosfogesso no processo úmido está relacionada com as reações químicas que ocorrem entre os seus materiais constituintes e o nível de filtragem utilizado para separar o fosfogesso do ácido fosfórico (MESQUITA, 2007).

Ardaman (2019) define que a micromorfologia dos fosfogessos é semelhante aos gessos produzidos em diversas indústrias de fertilizantes espalhadas pelo mundo, todas com entrelaçamento significativo entre os cristais de gesso, o que demonstra que o índice de vazios entre os cristais individuais é nulo, isto devido ao entrelaçamento das particulas dos cristais umas sobre as outras.

A morfologia e composição química do gesso, em conjunto com a água ácida (reação química) e o efeito de consolidação/compactação do material devido ao empilhamento (quanto mais profundo e antigo o gesso, mais denso e compacto ele é na pilha) produz um efeito coeso, conferindo maior resistência, aumentando a segurança e garantindo a estabilidade da pilha de fosfogesso (MATOS, 2011).

2.2 - Legislação aplicável

Os projetos da pilha de fosfogesso, alvo deste estudo, são baseados em regulamentos americanos do *Department of Environmental Protection* - FDEP, que preconiza o gerenciamento de fosfogesso, além de requisitos mínimos para diques usados em pilhas de fosfogesso para represamentos de água e procedimentos para elevação e aumento de pilha de fosfogesso com a decantação de água do processo no topo das pilhas, respectivamente,

conforme ocorre na estrutura geotécnica em estudo (ARDAMAN, 2019).

No Brasil não existe uma legislação especifica que determine os fatores de segurança mínimos exigidos em análises de estabilidade de pilha de fosfogesso. Desta forma, no presente estudo foram adotados como “boas praticas” fatores mencionados na NBR 13.028 (ABNT, 2017), que normatiza análise de estabilidade de barragens (Tabela 1).

Tabela 1 – Fatores de segurança mínimos para mineração

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível de água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre Bermas	1,3
Solicitação Sísmica com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,1

Fonte: Adaptado da NBR13.028 (ABNT, 2017)

2.3 - Barragem convencional *versus* empilhamento drenado

Brasil (2022, p.1) define que barragem de mineração, bem como os demais dispositivos da Resolução 95 abrangidas pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), apresentem pelo menos uma das seguintes características, conforme o parágrafo único do art. 1º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010:

> I - altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
>
> II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de

> metros cúbicos);
>
> III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
>
> IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto, conforme definido no inciso XVI do art. 2º e no Anexo IV; e
>
> V - categoria de risco alto, conforme definido no inciso XI do art. 2º, § 1º do art. 5º e Anexo IV desta Resolução.

Brasil (2022, p.1) ainda define empilhamento drenado como "estrutura construída hidráulica ou mecanicamente com rejeitos, que se configura como um maciço permeável, dotado de sistema de drenagem de fundo, com formação de espelho de água reduzido podendo ser implantada em fundo de vale, encosta ou outra área".

Segundo Ardaman (2019), na pilha de fosfogesso existe o risco de ruptura das tubulações que transportam a polpa do fosfogesso para o topo da pilha e nos dutos que devolvem a água de processo decantada para a planta industrial, como forma de recirculação. O risco de erosão da superfície de fosfogesso em pilhas é tipicamente baixo, porque lama de fosfogesso e água de processo normalmente não causam erosão quando fluem sobre as superfícies de pilhas que exibem crostas, como a estrutura do referido estudo. Já em barragem típica de rejeitos, um colapso em um duto transportando rejeitos ou recirculando a água pode causar erosão significativa dos materiais de terra da barragem, particularmente se forem siltosos ou arenosos.

A prática de armazenamento de água no topo de pilhas de fosfogesso em operação é muito comum nos Estados Unidos e Canadá. As pilhas de fosfogesso não recebem nenhuma outra contribuição além da sua própria bacia hidrográfica no compartimento superior. Com isso, é possível armazenar chuvas intensas, uma vez que todo volume precipitado na área da pilha deve ser tratado antes de ser devolvido ao meio ambiente. Isso ocorre devido ao PH da água em contato com o fosfogesso ser baixo, ou seja ácido (ARDAMAN, 2019).

2.4 - Potencial de liquefação em pilha de fosfogesso versus barragem

Segundo Ardaman (2019), embora várias pilhas terem apresentado falhas em talude, em

sua maioria, em falhas na fundação, não há casos relatados de falha por liquefação em pilha de fosfogesso. Há uma característica muito particular nelas, uma vez que quanto mais velho o fosfogesso, mais denso ele se torna, podendo ter ângulos de atritos interno até 48°.

As barragens de rejeito de mineração, por sua vez, possuem areia e partículas de sedimentos, geralmente sub-arredondados a sub-angular, não-plástico; alem disso, não aumentam significativamente em densidade com profundidade ou idade, e não causam o efeito de "cimentação", ou seja, entrelaçamento das partículas. Os ângulos de atrito interno para barragem de rejeitos de mineração apresentam tipicamente a faixa de 26 a 37 graus. Para rejeitos de mineração com "N" menores que 10, quando aumentada a tensão de cisalhamento resulta em uma suavização da tensão cisalhante e são suscetíveis à liquefação tanto sob carga dinâmica como estática, tanto no laboratório como no campo (ARDAMAN, 2019).

2.5 - Pilhas de fosfogesso à úmido *versu*s pilhas à seco

As pilhas de fosfogesso formadas a partir da produção de ácido fosfórico com utilização do concentrado de rocha fosfática podem ser obtidas de duas maneiras: a seco ou úmido. De modo geral, em mais de 90% das plantas industriais a produção mundial de ácido fosfórico é realizada através do processo úmido. Estados Unidos, Austrália, Arábia Saudita, Turquia, Índia, e México, são alguns paises que trabalham com o empilhamento de fosfogesso úmido (ARDAMAN, 2019).

Segundo Fuleihan (2012), cerca de 10 a 20% das instalações em todo o mundo utilizam transporte e empilhamento seco do fosfogesso, sendo que a maioria das instalações estão localizadas em climas áridos (onde os recursos de água doce são escassos) como o norte da África (por exemplo, Tunísia) e o Oriente Médio (Jordânia e Arábia Saudita), ou em climas muito frios como a antiga União Soviética (por exemplo, Rússia).

Uma Pilha de fosfogesso à úmido pode lidar mais facilmente com a precipitação de tempestades extremas em comparação com uma pilha seca que tem limitada a capacidade de armazenamento de pico. Trincas e rachaduras em uma pilha seca não apresentam risco de segurança, quando preenchidas rotineiramente (Figura 3). A única vantagem que uma pilha a seco apresenta é a redução no uso de água, principalmente em climas áridos, em que os recursos

de água doce são escassos. No entanto, na maioria dos casos, mesmo em climas secos, é opinião do autor que o empilhamento úmido é preferível ao empilhamento seco com base em considerações econômicas e de manutenção de equipamentos (FULEIHAN, 2012)

Segundo Ardaman (2019), o processo de empilhamento a seco de fosfogesso, normalmente acontece com o transporte do produto até a área de disposição por correias transportadoras ou caminhão, e há necessidade de empilhadeiras mecânicas e tratores de esteira para condicionar o fosfogesso na área de disposição. Já o consumo de energia no processo a úmido pode chegar a ser cinco vezes menor que do processo a seco (SANTOS, 2002).

Figura 3 – Detalhe de rachaduras em pilha de fosfogesso seco



Fonte: Fuleihan (2012, p. 201)

2.6 - Processo de obtenção do fosfogesso

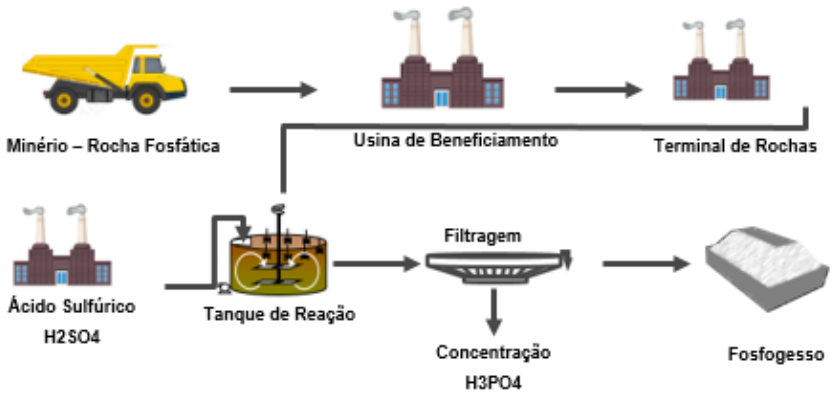
A principal matéria prima utilizada no processo de geração do fosfogesso é o concentrado de rocha fosfática proveniente de extração do mineral apatita. (MESQUITA, 2007; CANUT, 2006).

Smith (2005) define que a produção industrial de fosfogesso inicia-se a partir de uma reação entre o concentrado de rocha fosfática e ácido sulfúrico, resultando em um lama contendo aproximadamente 70% de sólidos, que então passa por um processo de separação, no qual a porção líquida é designada como ácido fosfórico e a porção sólida como fosfogesso, e ambos são considerados produtos.

Ardaman (2019) relata que, dependendo do tipo de rocha fosfática utilizada, 4,5 a 5,5 toneladas de fosfogesso são geradas para cada tonelada de P2O5 produzida na indústria alvo do referido estudo. Produzindo-se, assim, cerca de 880 mil toneladas de P2O5 por ano, sendo que 4,8 toneladas de fosfogesso são geradas para cada tonelada de P2O5 produzida.

A Figura 4 mostra um fluxograma simplificado que contempla o processo industrial desde a fase de lavra do mineral (apatita), passando pela usina de beneficiamento, que gera o concentrado de rocha fosfática, e pelo terminal de rochas que armazena a rocha fosfática proveniente da usina de beneficiamento. Posteriormente, a rocha fosfática e o ácido sulfúrico são colocados em um tanque de reação, no qual se gera uma polpa. A polpa proveniente do processo de reação passa por um processo de filtragem, quando ocorre a separação de material. A parte líquida é denominada ácido fosfórico (produto principal) e a parte sólida denominada fosfogesso.

Figura 4 - Fluxograma simplificado do processo de produção de fosfogesso.



Fonte: Adaptado de Mesquita (2007, p. 27).

O fosfogesso, em condição de polpa e com 23% de sólidos, é estocado nas pilhas. A Figura 5 mostra o meio de transporte deste produto, o qual acontece através de bombeamento da polpa (sólido + água ácida) que parte de uma estação de bombeamento, sendo conduzido através de linhas de PEAD (polietileno de alta densidade), a qual direciona o fluxo até o ponto de lançamento na pilha de fosfogesso (Figura 6).

Figura 5 – Linha de PEAD - Transporte da polpa de fosfogesso.



Fonte: Fuleihan (2012, p.3)

Figura 6 - Ponto de descarga do fosfogesso no topo da pilha.



Fonte: Fuleihan (2012, p.3)

O ponto de descarga de fosfogesso é bem dinâmico, sendo definido pela área operacional do empreendedor com base no planejamento de alteamento da estrutura em determinada região da pilha.

2.7 - Metodologia construtiva da pilha de fosfogesso

2.7.1 - Construção da pilha

A construção de uma pilha de fosfogesso é baseada em normas internacionais que geralmente regem as obrigações relativas à construção de pilha de fosfogesso que devem ser seguidas por empresas operantes neste setor e exigem a construção deste tipo de estrutura geotécnica (FALCON, 1993).

US EPA (1997) define que a altura e a superfície de uma pilha de gesso são determinadas pela configuração das propriedades da instalação e pela capacidade da fundação da pilha. Esses dois fatores determinam a vida útil de uma pilha de gesso. A medida que as indústrias de ácido fosfórico continuam em operação, sua capacidade máxima será atingida e novas pilhas precisarão ser construídas de acordo com as regulamentações americanas que subsidiam os projetos (FALCON, 1993).

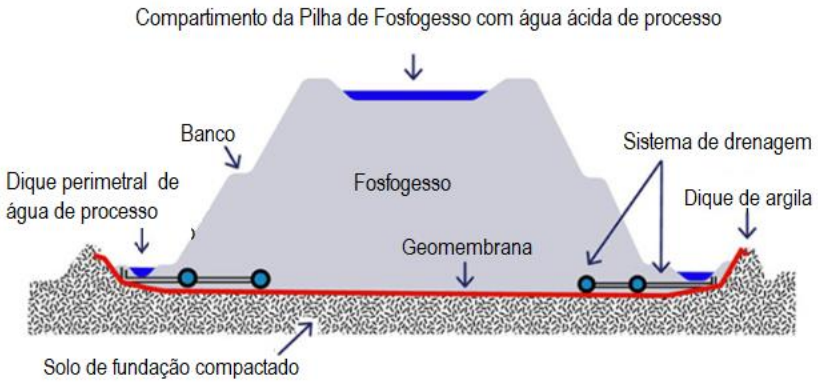
A pilha de fosfogesso é uma estrutura muito dinâmica, uma vez que, enquanto um dos compartimentos da pilha é usado para disposição do fosfogesso produzido, em outros compartimentos o mesmo é extraído e comercializado para fins agrícolas e para setores químicos (ARDAMAN, 2019).

2.7.2 - Componentes da pilha de fosfogesso

A Figura 7 apresenta um desenho esquemático com os principais componentes da pilha, sendo: sistema de drenagem interna (outlets) e externa (canais de pé e periféricos),

geomembrana e dique de argila compactado (MILBERG, 2021).

Figura 7 - Principais componentes de uma pilha de gesso

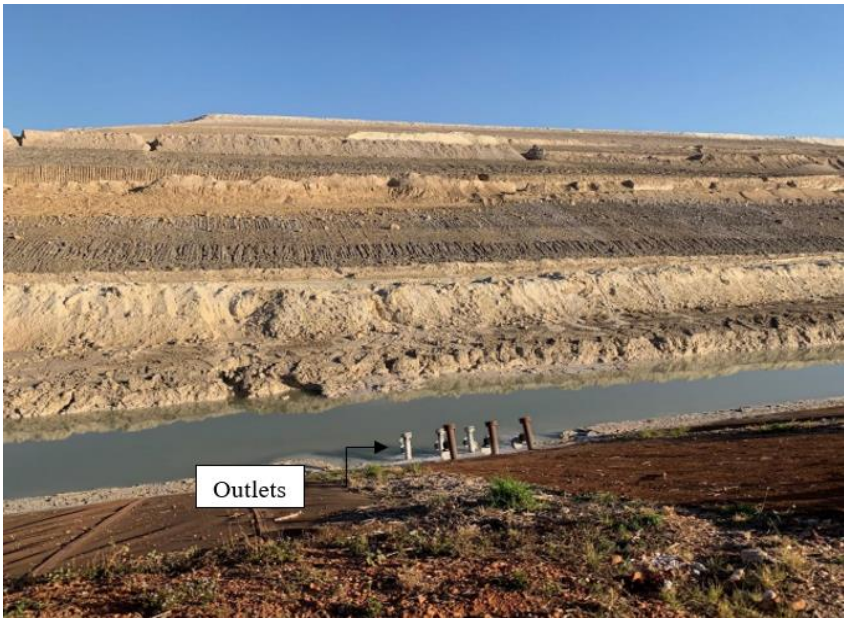


Fonte: Milberg (2021, p.4)

2.7.3 - Sistema de drenagem interna

A função do sistema de drenagem interna (outlets) apresentado pela Figura 8 é garantir a estabilidade da pilha, pois através do monitoramento das vazões é possível compreender o comportamento do fluxo de água no interior da estrutura. O sistema de drenagem da pilha de fosfogesso é composto por tubos PEAD que transmitem a água de processo do topo da manta PEAD para o canal de perimetral (ARDAMAN, 2012).

Figura 8 – Sistema de drenagem interna de uma típica pilha de fosfogesso.



Fonte: Autoria própria (2021)

2.7.4 - Revestimento da pilha de fosfogesso (Geomembrana)

Através dos geossintéticos (geomembranas) instalados na fundação ou em outras regiões da pilha de fosfogesso indicadas em projeto é possível impedir o contato da água ácida do processo de infiltração com as camadas inferiores à geomembrana instalada. A Figura 9 apresenta a impermeabilização da pilha de gesso com HDPE (High-density polyethylene), localizada no norte da Flórida (COMANCO, 2019).

Figura 9 - Geomembrana instalada na fundação da pilha de fosfogesso.



Fonte: Comanco (2019, p. 10)

2.7.5 - Dique perimetral de argila

A função do dique perimetral é conduzir toda água proveniente do processo de geração do fosfogesso para reaproveitamento e/ou ser conduzida para a estação de tratamento de efluentes, na qual posteriormente, após passar por dois estágios de tratamento, a água será direcionada para o Rio Grande, dentro dos padrões aceitáveis de qualidade de água (ARDAMAN, 2019).

Segundo Ardaman (2019) o dique perimetral de argila compactada circunda os lados oeste, norte e leste da Pilha F. Para conter “água de tempestade” e decantação de gesso há um dique (canal) entre o dique de partida e o “pé” do talude da pilha, denominado dique perimetral.

A Figura 10 apresenta dique perimetral circundando a pilha de fosfogesso do referido estudo.

Figura 10 - Elevação da Pilha de Fosfogesso



Fonte: Curt (2022).

2.7.6 - Método construtivo da pilha (*rim ditching*)

O método de construção da pilha é conhecido como *rim ditching*, uma metodologia americana que utiliza a técnica de canal circundante para distribuição de polpa de gesso. Neste método de construção o fosfogesso é descarregado, na forma de polpa, em uma lagoa de sedimentação contida dentro de um dique de partida perimetral.

Segundo Fuleihan (2012), uma maneira muito eficiente e econômica de gerenciar a construção de uma pilha é por meio do uso de canal e/ou valas de borda elevada (Figura 11). A polpa de fosfogesso é descarregada em um único ponto, na borda da vala do perímetro e encaminhada ao redor da pilha, através de gravidade, com o canal inclinado de 3 a 8 metros por quilômetro, ou seja, no ângulo natural de deposição da polpa de gesso. O canal (vala) é mantido em um nível mais alto do que o compartimento interno da lagoa, de modo que o fosfogesso da borda esteja sempre prontamente disponível e adequado para a construção de diques sem a necessidade de condicionamento de umidade.

Figura 11 - Elevação da pilha de fosfogesso



Fonte: Fuleihan (2012, p.4)

Após o preenchimento da borda da vala com gesso, a área operacional executa uma abertura no dique interno de modo que a polpa seja direcionada para o compartimento interno, formando praias de gesso nas imediações da vala (canal), essencialmente em todo o compartimento. Desta forma, o tubo de lançamento de fosfogesso é mantido em um local nas margens do canal, transferindo-se o gesso para região planejada pela área operacional, da maneira mais eficiente.

Quando sedimentado, o fosfogesso é escavado para ser utilizado na elevação da pilha, limite exterior do compartimento, onde é compactado mecanicamente com utilização de equipamentos de terraplenagem (ARDAMAN, 2019).

A Figura 12 apresenta a formação da praia a partir do *rim ditch*. Este material também é utilizado na formação da pilha de fosfogesso.

Figura 12 - Praia formada a partir de *rim ditch*



Fonte: Fuleihan, (2012, p.3)

2.7.7 - Linhas de sifão

Linhas de sifão flutuantes são comumente usadas em pilhas de fosfogesso para decantação de água de processo e podem ser realocadas de acordo com a necessidade operacional. A decantação através de um corte no dique perimetral de gesso é uma forma muito fácil, cômoda, segura e método barato praticado em muitas pilhas com método operacional à úmido na Flórida Central (Figura 13). Neste método, um corte é feito através do dique de gesso e a água de processo pode simplesmente fluir pelo talude. Esse método de decantação com gesso e água saturada rica em fluorosilicatos afloram na encosta da pilha formando uma crosta dura, resistente à erosão, apesar do fluxo turbulento (FULEIHAN, 2012).

Figura 13 - Água fluindo no talude



Fonte: Fuleihan (2012, p. 6)

2.8 - Investigação geotécnica de campo

Schnaid e Odebrecht (2012) descrevem que o plano de investigação geotécnica depende de fatores relacionados às características do ambiente físico, à complexidade do objetivo e aos riscos associados, que determinam a estratégia a ser empregada no projeto.

Segundo Petronilho (2010), a partir de investigações geotécnicas e coleta de dados de campo realizadas nas áreas de interesse é possível a elaboração de seções geológico-geotécnicas que, quando analisadas em conjunto com as informações obtidas através das sondagens executadas e amostras coletadas, permitem a elaboração do perfil geotécnico do terreno, bem como a contextualização de unidades geológicas.

A Tabela 2 apresenta alguns tipos de investigação de campo e metodologias aplicadas, que são utilizados para subsidiar parâmetros de resistência e de permeabilidade que servem de *input* em *softwares* que geram as análises de estabilidade e percolação de estruturas geotécnicas.

Tabela 2 - Investigações de campo

Tipos de investigação de Campo	Metodologia aplicada
Abertura de poço e trincheira de inspeção (coleta de amostras deformadas e indeformadas - blocos)	NBR 9604/2016 e DIRETRIZES DA ABGE3
Coleta de Amostra indeformada (shelby)	NBR 9820/1997
Sondagem Mista (Rotativa e SPT)	NBR 6484/ 2020

Fonte: Adaptado (PÖYRY, 2018, p. 3)

2.8.1- Investigação geotécnica de laboratório

Segundo Chiossi (2013), os ensaios mais simples de caracterização preliminar de solos consistem na determinação, em laboratório, da umidade natural, dos limittes de Atteberg e da granulometria.

A Tabela 3 apresenta alguns desses ensaios de laboratório comumente realizados em estruturas geotécnicas, tais como: barragens convencionais, cavas, pilhas de estéril, pilhas de

produtos, entre outros.

A metodologia utilizada para cada ensaio é a aplicação direta das normas nacionais e/ou internacionais para cada tipo de ensaio visando a obtenção de parâmetros geotécnicos fidedignos ao comportamento de cada tipo de material analisado.

Tabela 3 - Ensaios laboratoriais

Tipos de ensaios	Metodologia aplicada
Granulometria Completa - (peneiramento e sedimentação)	NBR 7181/2016
Massa específica real dos grãos	NBR 6458/2016
Índice de vazios máximo e mínimo	NBR 16840/2020 e NBR 16843/2020
Limites de Atterberg (Liquidez e Plasticidade)	NBR 6459/2017 e NBR 7180/2016
Teor de umidade natural	NBR 6457/2016
Massa Específica Aparente	NBR 16867/2020
Triaxial CIU	ASTM D4767
Cisalhamento Direto	ASTM D3080:2011

Fonte: Adaptado (PÖYRY, 2018, p.7)

2.8.1.1 - Granulometria por peneiramento e sedimentação

Em geral, dois métodos experimentais são utilizados para determinar o tamanho das partículas presentes no solo. Para partículas maiores que 0,075 milímetros utiliza-se o ensaio de peneiramento. Para partículas menores que 0,075 milímetros utiliza -se o ensaio de sedimentação (PEIXOTO, 2019). O procedimento para a realização do ensaio de granulometria é de acordo com a norma técnica NBR 7181/16.

2.8.1.2 - Massa específica real dos grãos

A massa específica real é numericamente igual à densidade do mineral que constitui os grãos e pode ser determinada facilmente por um picnômetro. Os procedimentos para a realização dos ensaios são de acordo com a norma técnica NBR 6458/16.

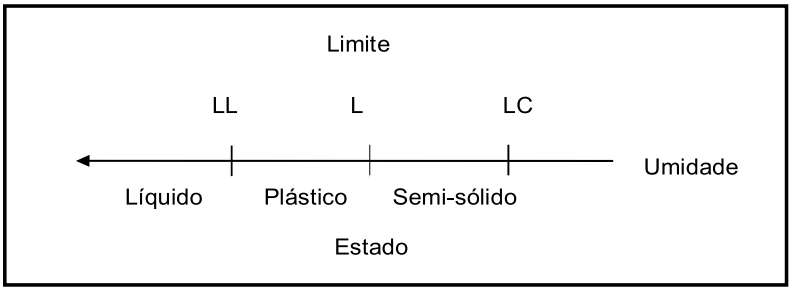
Os resultados dos ensaios são apresentados em planilha de acompanhamento do ensaio, em conformidade com as normas da ABNT, contendo a média de, pelo menos, duas determinações de massa específicas consideradas satisfatórias e valor do teor de umidade (PATTROL, 2022).

2..8.1.3 - Indices de consistência (Limites de Atterberg)

Pinto (2006) descreve que os limites de Atterbertg são baseados no comportamento distinto do solo quando submetido a condições de umidade.

À medida que o solo apresenta teor de umidade elevado, o mesmo tem predisposição a tornar-se líquido. Ao perder parte da água contida no solo, o mesmo torna-se plástico, e quando mais seco torna-se quebradiço. A Figura 14 apresenta a transição de um estado para outro, sendo eles: Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP) e Limites de Contração de um solo (LC).

Figura 14 - Limites de Atterberg



Fonte: Campanha (2011, p.3)

O ensaio de Limite de Liquidez (LL) é padronizado pelo procedimento da ABNT - NBR 6459/17, definindo-se o teor de umidade do solo. Já o ensaio de Limite de Plasticidade (LP) é conhecido pela possibilidade de se moldar um cilindro de 3mm de diâmetro, rolando o solo com menor teor de umidade com a palma da mão. Este procedimento é padronizado pela ABNT - NBR 7180/2016 (PINTO, 2006).

Campanha (2011) descreve o Limite de Contração (LC) como o teor de umidade que decorre da transição entre o estado sólido e semi-sólido. Este ensaio era padronizado pela ABNT – NBR 7183/82, porém a mesma foi cancelada.

2.8.1.4 - Indice de vazios

Para a obtenção do índice de vazios mínimo é necessária a determinação da massa específica aparente seca máxima. Este índice corresponde ao estado mais compacto em que um solo não coesivo pode ser colocado. Já para determinar o índice de vazios máximo é necessária a determinação da massa específica aparente seca mínima, que corresponde ao estado mais fofo em que um solo não coesivo pode ser colocado. O ensaio de Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos é regido pela NBR16843 de 05/2020. Já o ensaio de Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos é regido pela NBR16840 de 10/2021.

2.8.1.5 - Umidade natural

Este tipo de ensaio tem o procedimento padronizado pela ABNT – NBR 6457/16. A secagem da amostra é realizada em estufa, não utilizando os métodos “da frigideira” ou *Speedy Test*. Como resultado final, é fornecido o teor de umidade natural do solo, calculado como a média aritmética de 03 determinações, no mínimo, dentro dos limites de variação estipulados na norma (PATTROL, 2022).

2.8.1.6 - Massa específica aparente

A execução do ensaio de massa específica aparente é normatizada pela ABNT – NBR 16867/2020.

Como procedimento realiza-se a talhagem do corpo de prova até que se obtenha uma conformação aproximadamente esférica, com diâmetro mínimo de 5 cm, e em seguida é feito a pesagem. Eventuais vazios no corpo de prova são preenchidos com utilização de parafina derretida. Na sequência, amarra-se o corpo de prova com uma linha e o mesmo é recoberto por completo, imergindo-o sucessivas vezes na parafina derretida. Pesa-se o corpo de prova parafinado. Logo após imerge-se o corpo de prova parafinado totalmente na água, certificando-se que não há bolhas de ar retidas em sua parede. Determina-se a massa do corpo de prova parafinado e imerso na água. Após a imersão e subsequente pesagem, retira-se o corpo de prova e é feita a secagem de sua superfície e remoção de toda a película de parafina. Toma-se uma amostra para determinação do teor de umidade do centro do corpo de prova (PATTROL, 2022).

2.8.1.7 - Ensaio triaxial

Segundo Fadanelli (2021), o objetivo do ensaio de compressão triaxial é a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e deformação dos solos. O exercício consiste em aplicar a um corpo cilndrico de solo, circundado por uma membrana látex, uma pressão de água conhecida como pressão confinante, que opera em todas as direções, deixando o corpo em estado hidrostático de tensões.

Em seguida, um carregamento de compressão axial é aplicado. Há duas maneiras de executar o carregamento axial: por meio da aplicação de forças no pistão que penetra na câmara, chamado de ensaio com carga controlada; ou colocando-se a câmara em uma prensa que a desloca para cima, pressionando-se o pistão, denominado de ensaio de deformação controlada.

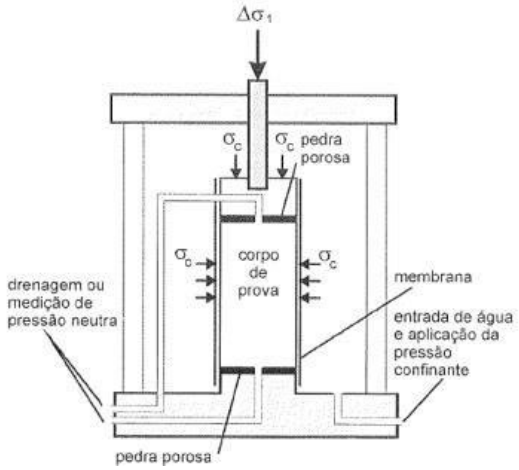
Os ensaios triaxiais mais comuns são: ensaios não adensados e não drenados (UU); ensaios adensados isotropicamente e não drenados (CIU); e ensaios adensados isotropicamente e drenados (CID).

Este tipo de ensaio é regulamentado pela norma internacional estadunidense ASTM D4767 – 11, método ensaio de compressão triaxial não drenado consolidado para solos coesivos.

A Figura 15 apresenta o desenho esquemático da câmara utilizada para a execução dos

ensaio triaxiais.

Figura 15 - Desenho esquemático da câmera de ensaios triaxiais.

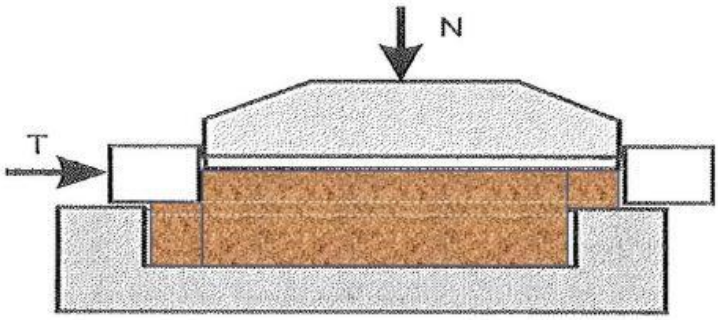


Fonte: Pinto (2006, p.3).

2.8.1.8 - Cisalhamento direto

Os ensaios de Cisalhamento direto são normatizados pela ASTM D3080/2011. Pinto (2006) relata que o ensaio de cisalhamento direto é o método mais antigo e simples para determinar a resistência ao cisalhamento do solo, no qual utiliza-se uma caixa metálica para colocar o corpo de ensaio e uma força horizontal é aplicada para separar a caixa – Figura 16.

Figura 16 - Aparelho utilizado para ensaios de cisalhamento direto



Fonte: Adaptado Pinto (2006)

2.9 - Auscultuação e controle de pilha de fosfogesso

Através da instrumentação de auscultação é possível monitorar as condições de segurança de determinada estrutura geotécnica e seus materiais durante etapas como construção, operação ou descomissionamento. Para garantir que não se colocará as populações futuras em risco ou causará danos significativos ao ambiente, o empreendimento também deve planejar o fim de utilização da estrutura. Os riscos de um colapso e risco estrutural de pilhas são agora conhecidos graças aos dados obtidos da instrumentação geotécnica e inspeções visuais de campo.

2.9.1 - Instrumentação e monitoramento

Segundo Machado (2007), as estruturas geotécnicas devem ser monitoradas através de instrumentos adequados que permitam gerar leituras das informações mais pertinentes sobre os seus comportamentos. As técnicas mais utilizadas na auscultação do comportamento de pilhas de fosfogesso consideram: definição do tipo de instrumentação, quantificação dos instrumentos a instalar, localização, instalação, aquisição de dados, análise dos dados e interpretação dos resultados do monitoramento. Essas técnicas descrevem a instrumentação geotécnica.

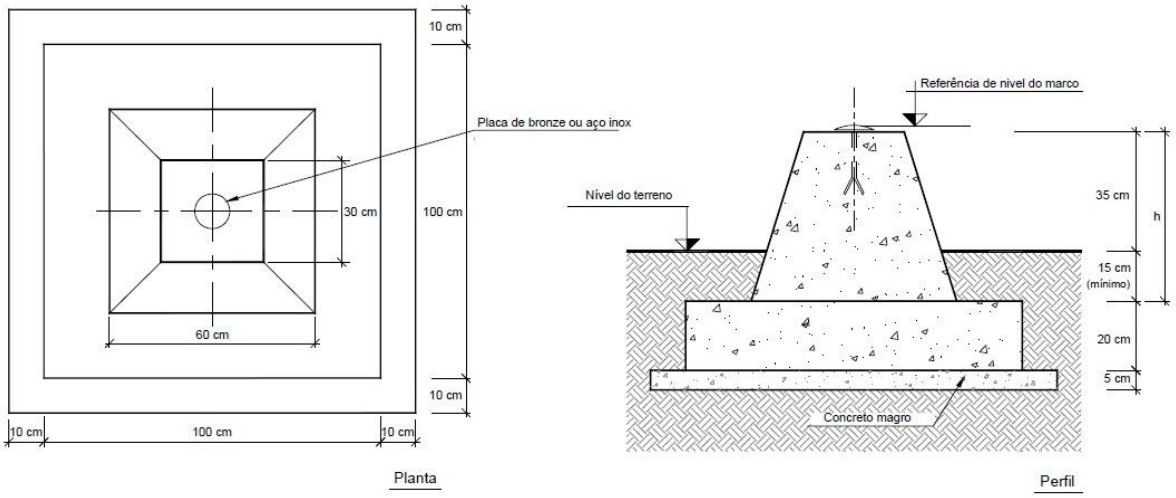
Os instrumentos mais comuns em estruturas geotécnicas são: marcos superficiais (MS), Indicador de nível de água (INA) e piezômetros (PZs) (MACHADO, 2007).

2.9.1.1 - Marcos superficiais

De acordo com Machado (2007), as medidas angulares são realizadas utilizando-se um medidor de distância eletrônico, podendo ser estação total, RTK e qualquer variação nas coordenadas indica alterações planimétricas ou altimétricas. Para determinar as diferenças altimétricas, o nivelamento geométrico é realizado em marcos superficiais instalados ao longo a estrutura geotécnica. Os marcos superficiais servem como pontos de referência para o controle de recalques e deslocamentos dos maciços.

A Figura 17 apresenta o desenho esquemático de marcos superficiais utilizados em estruturas geotécnicas.

Figura 17 - Marco superficial



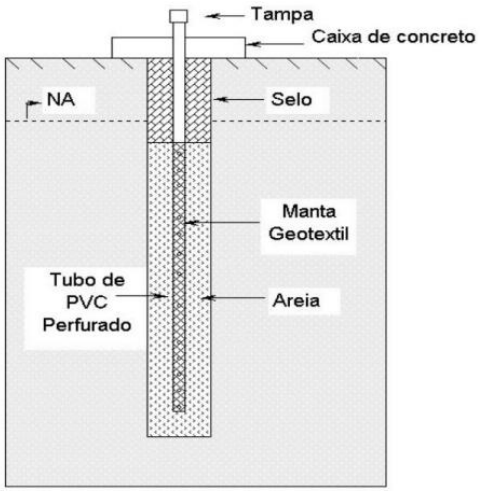
Fonte: CoMMetro (2021)

2.9.1.2 - Indicadores de nível de água

Através do instrumento de monitoramento de estruturas geotécnicas, o Indicador de Nível de Água (INA), é possível determinar a localização da linha freática em estruturas geotécnicas. Este tipo de instrumento é simples de construir e operar (Machado, 2007).

A Figura 18 apresenta o detalhe construtivo do indicador de nível de água, o qual apresenta muita semelhança com o perfil construtivo do piezômetro. Sendo que com base em diretrizes da empresa projetista, o tubo perfurado do piezômetro pode ter um comprimento maior, podendo atingir o nível de água na fundação da respectiva estrutura geotécnica (MACHADO, 2007).

Figura 18 - Esquema do Indicador de Nível de Água – INA.



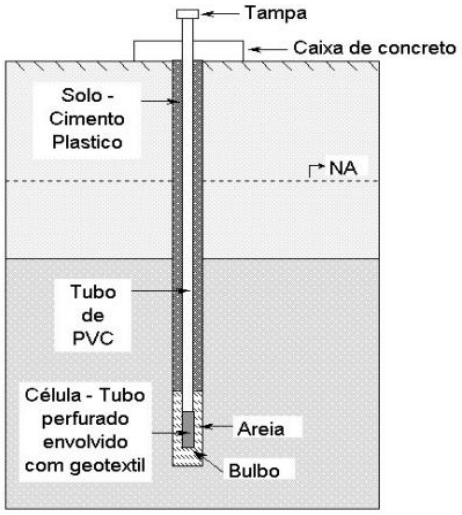
Fonte: Fonseca (2003, p.8)

2.9.1.3 - Piezômetros de tubo aberto (Casa grande)

Segundo Dunnicliff (1988), o instrumento de monitoramento comumente utilizado em estrutura geotécnica, denominado como Piezômetro de Casagrande, e também conhecido como tubo aberto, é um instrumento semelhante ao Indicador de Nível de Água (INA) (conforme Figura 19). Este dispositivo de simples operação é frequentemente utilizado em pilhas e barragens e foi desenvolvido por Casagrande em 1923, durante a fase de construção do Aeroporto Logan, localizado em Boston (EUA).

Ainda segundo Machado, (2007), além do piezômetro de Casagrande possuir alto grau de simplicidade de instalação e baixo custo, produz muitos resultados positivos. As duas principais diferenças entre um piezômetro e um medidor de nível de água são o tamanho do trecho perfurado e o comprimento do trecho drenante (areia), que é normalmente limitado entre 1,0 e 1,5 metros. O objetivo do piezômetro é medir a pressão hidrostática ou poropressão (pressão neutra) no nível da água.

Figura 19 - Esquema do piezômetro de tubo aberto



Fonte: Fonseca (2003, p.8)

2.9.1.4- Medidores de vazão

Segundo Silveira (2006), toda barragem exige que medições de vazões sejam realizadas, uma vez que todas elas possuem percolações através do aterro compactado (maciço) ou através da fundação. Por isto, a importância de se monitorar o controle do desempenho das vazões.

O principal objetivo das leituras de vazão é identificar como o fluxo percola ao longo da estrutura geotécnica. De modo geral, para medir as vazões normalmente são instalados dispositivos de drenagem superficial (canaletas) que auxiliam no direcionamento do fluxo CRUZ (1996). A Figura 20 apresenta um exemplo de medidor de vazão do tipo triangular, muito utilizado em estruturas geotécnicas.

Figura 20 - Medidor de vazão tipo triangular



Fonte: Smiderle, (2014, p.3)

2.9.1.5 - Pluviômetro

Balbino (2016) menciona que através de um pluviômetro, ou estação meteorológica, é possível obter dados para análise pluviométrica. Desta forma, é possível calcular as chuvas precipitadas em determinada área durante um tempo específico. A Figura 21 apresenta um

modelo de pluviômetro muito utilizado.

Figura 21 - Pluviômetro



Fonte: https://www.postposmo.com/pt/pluvi%C3%B4metro/

2.10 - Inspeção Visual de Campo

Segundo Ana (2016), a inspeção de segurança regular é uma obrigação do empreendedor, e destina-se a identificar potenciais riscos existentes associados à estrutura geotécnica. A frequência dessas inspeções deve ser determinada pela categoria de risco e potenciais danos associados à barragem (Tabela 4).

Tabela 4- Frequência de inspeções regulares

Dano Potencial Associado	Categoria de Risco		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	Semestral	Semestral	Semestral
Médio	Semestral	Semestral	Anual
Baixo	Anual	Anual	Bianual

Fonte: Adaptado ANA (2016, p.3)

O Relatório Técnico de Auditoria de Segurança da Pilha é realizado anualmente e protocolado na FEAM, órgão fiscalizador da respectiva estrutura geotécnica. Contudo a inspeção visual de campo da pilha de fosfogesso é realizada semanalmente, por boa prática do empreendedor. O órgão fiscalizador, FEAM, não possui um regulamento próprio quanto à fiscalização de pilhas de fosfogesso.

Desta forma, o empreendedor deve avaliar durante as inspeções o estado de conservação de itens tais como: cristas de diques periféricos; taludes de diques periféricos; surgências nas faces dos taludes; reservatório; tubo extravasor; canal periférico; canais de "pé" de taludes; drenos de fundo/*Outlet*; trincheiras drenantes/drenos de detecção de vazamento; tubulação de polpas de gesso; estradas de acesso; sinalizações (estrutura geotécnica, saídas de drenagem, instrumentos, tubulações, etc).

2.11 - Modelagem computacional

2.11.1 - Modelo Computacional

Com a necessidade cada vez maior das empresas ligadas ao ramo de mineração serem exponencialmente mais acuradas na entrega de informações que auxiliem nas tomadas de decisões, que muitas vezes implicam na continuidade operacional do empreendimento, os modelos computacionais se tornam parte integrante de atividades que necessitam do auxílio de representações simplificadas que visem simulações e entendimento mais apurado sobre determinados assuntos que envolvem a engenharia geotécnica.

Segundo Hachich (2000, apud Boscov, 2008), a eficiência dos modelos está diretamente relacionada à finalidade dos mesmos, e para que os modelos consigam se aproximar da realidade é de fundamental importância que sejam incorporados todos os parâmetros relevantes e suas respectivas interações. No entanto, considerando problemas práticos de infraestrutura da engenharia geotécnica, os modelos devem preferencialmente ser simples e depender de poucos parâmetros fáceis de obtenção, visto que nem sempre o modelo mais completo é necessariamente o melhor, quando avaliado pela ótica da engenharia.

Hachich (2000, apud Boscov, 2008) enfatiza que mesmo modelos simples devem gerar modelos conceituais, e que o conhecimento não pode ser descartado apenas por causa de algumas objeções, pois os modelos empíricos derivados da experiência cotidiana são muito úteis quando não há uma necessidade de precisão da dimensão do significado de variáveis fenomenológicas.

A análise de estabilidade de taludes é a modelagem mais comum na geotecnia. Para tal, os s*oftwares* mais utilizados são:

- ✓ SLOPE/W, desenvolvido por Geoslope International Ltd. de Calgary, Alberta, Canadá;
- ✓ Slide 2D e 3D, desenvolvida pela emrpesa Rocscience Inc., Toronto, Canadá.

2.11.2 - Métodos de Equilíbrio Limite

Segundo Gerscovich (2012), a formulação do conceito de equilíbrio limite requer mais *insights* do que as equações disponíveis, tornando o problema essencialmente indeterminado. Portanto, o método das fatias difere na direção e no sentido em que o equilíbrio de esforços (momentos e forças) é realizado (vertical e horizontal ou normal e tangente à base da fatia ou lamela). Além disso, os pressupostos adotados em relação à força entre lamelas são diferentes, conforme resumido na Tabela 5.

Tabela 5 - Hipóteses quanto às forças entre fatias

Método	Hipótese
Fellenius (1936)	Resultante é paralela à inclinação
Bishop (1955) simplificado	Resultante é horizontal
Jambu (1968) simplificado	Resultante é horizontal e um fator de correção é usado para considerar a força entre fatias
Jambu (1957) generalizado	A localização da força normal entre fatias é assumida como uma linha de empuxo
Spencer (1967, 1968)	A resultante possui uma inclinação constante ao longo de toda a massa
Morgenstern-Price (1965)	A direção da resultante é definida por uma função

Fonte: Day (1999, p.8)

Gerscovich (2012) acredita que o Bishop Simplificado e o Jambu sejam os métodos de equilíbrio limite mais populares. Embora esses métodos não garantam o equilíbrio horizontal de forças ou o equilíbrio dos momentos, são métodos aceitos para estudos de estabilidade de talude.

Em superfícies circulares, a diferença entre o Fator de Segurança (FS) determinado pelo método Bishop simplificado e os métodos mais conservadores (Spencer, ou Bishop, e Morgenstern-Price), não excede 5%. No caso de superfícies não circulares, o método de Jambu é mais conservador, permitindo que a diferença entre ele e os outros métodos possa atingir até 30% (ABRAMSON *et al.*, 1996). Contudo, como as superfícies críticas são bem diferentes umas das outras, é comum considerar em análises de estabilidade os diversos métodos.

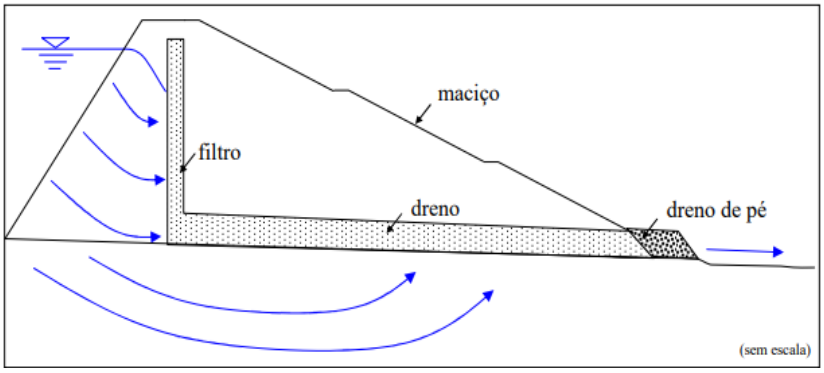
Fredlund e Krahn (1977) compararam os mecanismos de ruptura circular e não circular, e os resultados mostraram que o momento de equilíbrio não é muito sensível às forças inter-lamelares, e que os valores com o uso de várias metodologias são muito próximos. No entanto, a escolha da forma da superfície de ruptura tem uma influência significativa nos estudos de estabilidade, e aspectos significativos devem ser melhor observados, tais como: possíveis trincas de tração e empuxo da água na trinca como força instabilizadora; rupturas progressivas e necessidade de realização de análises de sensibilidade por meio de variação dos parâmetros de coesão; ângulo de atrito; nível de água e etc. Esse cuidado pode vir a minimizar incertezas relacionadas à escolha do modelo de análise e propriedades geotécnicas dos materiais envolvidos.

2.12 - Mecanismos de ruptura de barragens

Com a relação à segurança da pilha de fosfogesso, os possíveis modos de ruptura da estrutura são: cisalhamento, erosão interna (*piping*) e galgamento. Contudo, não há relatos de registros de modo de falha na estrutura geotécnica em estudo.

A Figura 22 apresenta a seção típica de uma barragem de terra, basicamente composta por maciço, dreno de pé, dreno horizontal e filtro.

Figura 22 - Seção típica de barragem de terra

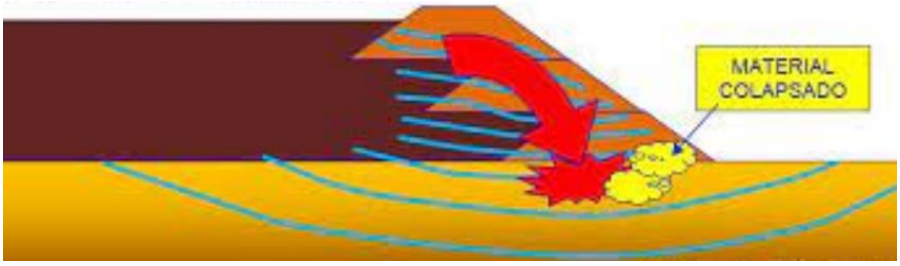


Fonte: Saliba (2009, p. 9)

Segundo Medeiros (2005), as principais causas de ruptura de barragens são: cisalhamento, erosão interna (*piping*) e galgamento.

Marques (2016) considera que o cisalhamento acontece quando o material é submetido a esforços que fazem com que as camadas de superficie venham a deslizar uma sobre as outras, causando uma deformação na transversal. Essa ação pode ocasionar o aparecimento de trincas, perda de resistência do material e, em consequência, eventuais rupturas (ver Figura 23).

Figura 23 - Detalhe da barragem cisalhada



Fonte: Ebanataw, (2018, p.7)

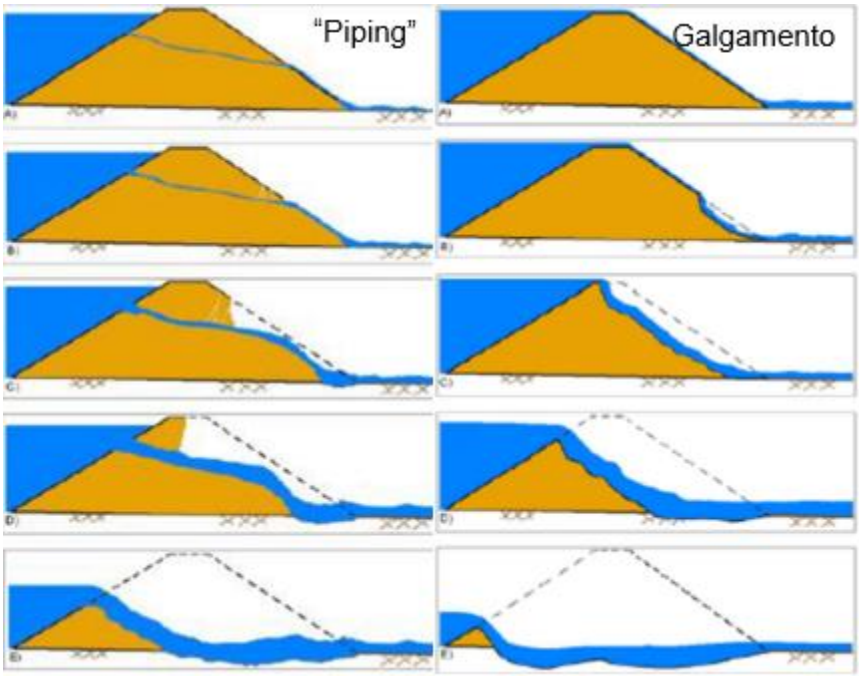
A Figura 24 apresenta detalhes dos mecanismos de rupturas: erosão interna ou *piping* e galgamento.

A erosão interna é definida pelo arraste de materiais no interior da estrutura através da percolação de água (XIONG, 2011).

Brasil (2012) relata que o galgamento refere-se a um aumento no nível de água no

reservatório acima da crista da barragem que, por muitas vezes, é causado principalmente por precipitação pluviométrica acima do esperado.

Figura 24 - Detalhe de *piping* e galgamento em barragem



Fonte: Usace (2014)

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Metodologia

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foi escolhida uma pilha de fosfogesso localizada na microrregião do Triângulo Mineiro, sudoeste do estado de Minas Gerais. O empreendimento no qual foi realizado o estudo de caso deste trabalho iniciou suas atividades em 1979, quando foram produzidas as primeiras toneladas de fosfogesso do complexo industrial.

O projeto da pilha de fosfogesso foi inicialmente concebido para ter 85 metros. Atualmente o trecho mais alto da pilha já possui cerca de 85 metros de altura e uma área estimada de 160 hectares, valores estes revisados anualmente pelo empreendedor.

A presente dissertação trata-se de um estudo de caso que teve como principal objetivo analisar a estabilidade geotécnica de uma pilha de fosfogesso utilizando-se dados geotécnicos disponibilizados pelo empreendedor, obtidos através de investigações de laboratório e de campo, bem como informações obtidas através de instrumentos de monitoramento da respectiva estrutura geotécnica, destacando-se: marcos superficiais, piezometros, indicadores de nível de água (INA), outlets, dentre outros.

A campanha de investigação de campo foi formada por ensaios de sondagem mista e coleta de amostras (deformadas e indeformadas). Os ensaios de laboratório convencionais utilizados foram: granulometria, massa específica real dos grãos, massa específica natural, índice de vazios máximos e mínimos, limites de consistencia (Atterberg), teor de umidade e compressão simples. Os ensaios de laboratório especiais utilizados foram: adensamento, cisalhamento direto (saturado e não saturado) e ensaios triaxiais (CD e CU).

Diante dos novos projetos concebidos, em função da necessidade de estocar fosfogesso em áreas diversas, considerou-se nesta pesquisa o trecho mais crítico do talude da pilha, a partir da definição de duas seções transversais mais íngreme da topografia utilizada no estudo.

Foram adotados parâmetros geotécnicos (coesão, angulo de atrito, peso específico e coeficiente de permeabilidade) obtidos a partir dos ensaios de campo e laboratório que servem

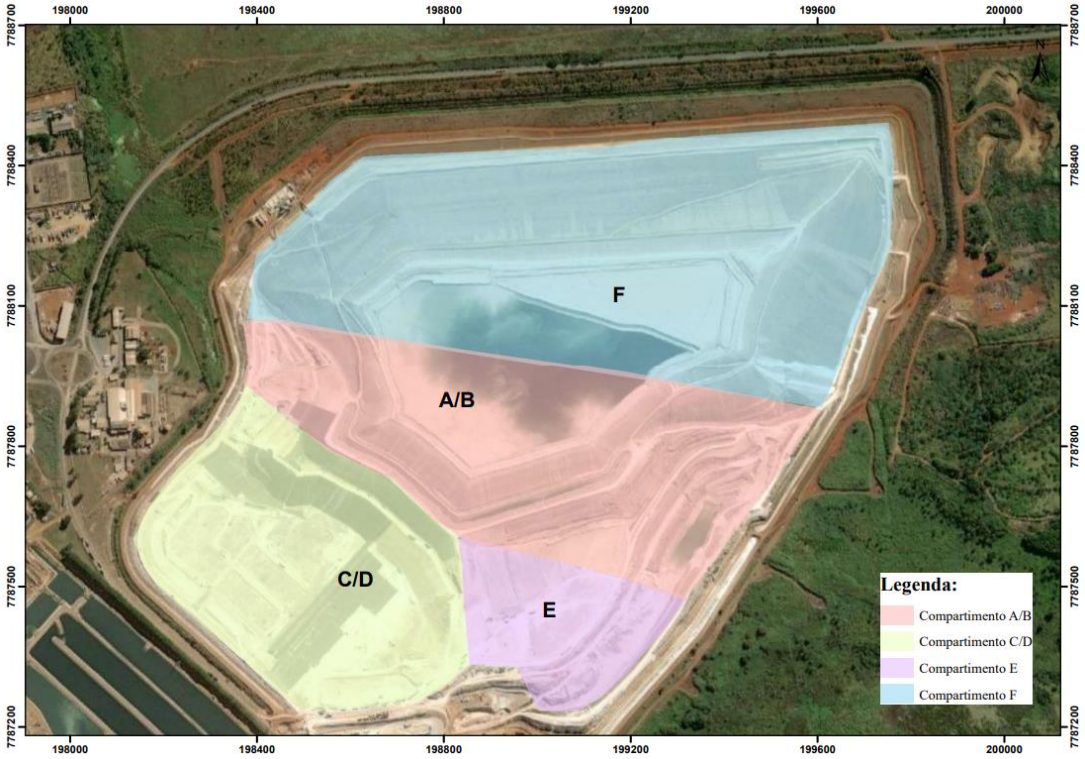
de *in put* nos *softwares* utilizados na verificação da estabilidade da estrutura geotécnica. Estes ensaios encontram-se no banco de dados disponibilizado pela empresa detentora da estrutura geotécnica. Os parâmetros geotécnicos do material deste estudo de caso, fosfogesso, são muito individualizados, uma vez que suas características são raramente encontradas no mundo, quando comparados à outros minerais, portanto pode-se dizer que são únicos.

Para realização das análises de estabilidade foi utilizado o *Software* Slide 2 da empresa Rocscience, Método do Equilíbrio Limite Geral proposto por Morgenstern e Price, possibilitando assim a realização de uma análise em termos de equilíbrio de forças e momentos concomitantemente.

3.2 - Pilha de fosfogesso do estudo

Ardaman (2019) define que o sistema da pilha de fosfogesso do referido estudo é composto por compartimentos, sendo eles: (AB/, C/D, E e F) (Figura 25).

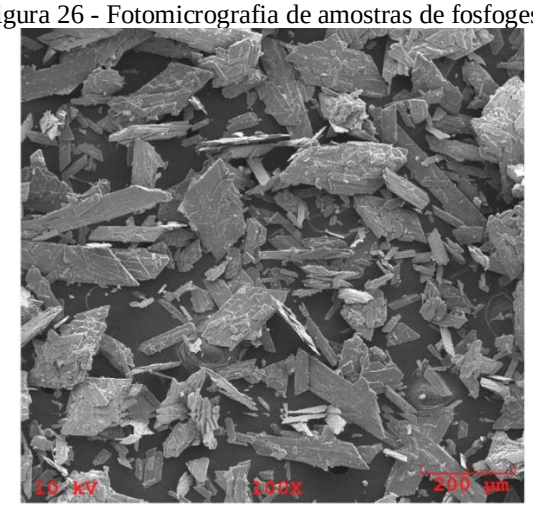
Figura 25 - Pilha de fosfogesso dividida por compartimento.



Fonte: Imagem Google Earth (2021, p. 10)

O fosfogesso alvo deste estudo contém principalmente partículas de cristais de gesso com morfologia em forma de agulha, siltoso, com superfícies lisas e bordas relativamente agudas. A Figura 26 apresenta uma microfotografia com aumento aproximado de 100 vezes dos cristais do fosfogesso.

Figura 26 - Fotomicrografia de amostras de fosfogesso



Fonte: Ardaman, (2019, p. 14)

3.2.1 - Comportamento hidrico da pilha de fosfogesso

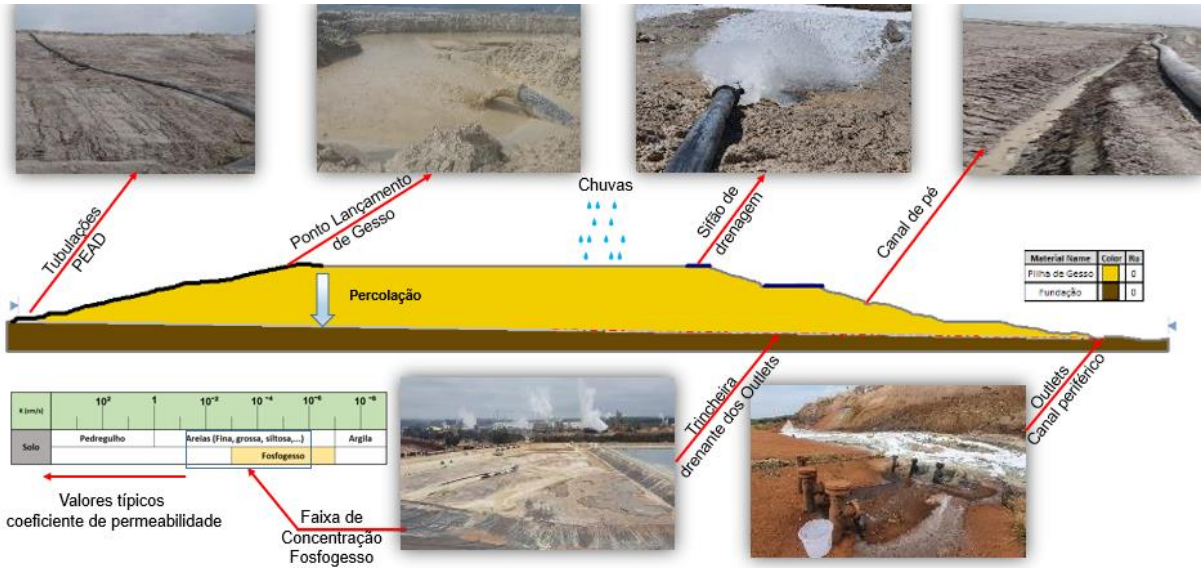
A Figura 27 apresenta de forma sucinta o comportamento hídrico da pilha de fosfogesso do referido estudo, no qual chega-se aos pontos de lançamento de polpa através das tubulações de PEAD que partem de uma estação de bombeamento.

Parte da contribuição hídrica da pilha advém do índice pluviométrico, registrado através de uma estação meteorológica, e outra parte do escoamento do fluxo de água nos taludes *run off*, provenientes do reservatório e direcionados para o canal de "pé".

A parcela de água que infiltra converge para a trincheira drenante e sai pelos *outlets*, que são os drenos de fundo (ARDAMAN, 2019).

A Figura 27 ainda apresenta uma tabela contendo as faixas granulométricas do solo, e apesar do fosfogesso não ser exatamente um solo, na faixa granulométrica ele se apresenta entre areia e argila, podendo ser classificado como um material siltoso.

Figura 27 - Comportamento hídrico da pilha de fosfogesso



Fonte: Empresa detentora dos dados (2021)

3.3 - Informações gerais da pilha de fosfogesso

A empresa onde se fez o estudo de caso deste trabalho iniciou suas atividades em 1979. O projeto foi inicialmente concebido para ter 85 metros de altura. No período de realização deste estudo o trecho observado mais alto da pilha já possuia cerca de 70 metros de altura e uma área estimada de 160 hectares, valores estes revisados anualmente pela equipe de projetos do empreendedor. A Tabela 6 apresenta dados gerais referentes à estrutura em estudo.

Tabela 6 - Dados gerais da pilha de fosfogesso.

DADOS GERAIS				
Nome da Estrutura:	Pilha de Fosfogesso			
Coordenadas do Ponto Central da Pilha	Latitude:	7.788.518	Longitude:	199.171
Finalidade:	Estocagem de fosfogesso			
Tipo de Seção:	Homogênea			
Tipo de Fundação:	Solo coluvionar, residual e saprolitos			
Projetista:	Ardaman & Associates, Inc.			
Método de Alteamento:	Aterro Hidráulico			
Área	160 hectares			
Volume Atual da Pilha (m^3):	45.000.000			
Elevação Atual da Pilha (m):	170,00			
Cota de Projeto (m):	185,00			
Drenagem Interna:	O sistema de drenagem interna consiste em estrutura drenantes situados na base da pilha, envelopados em geossintéticos e ligados a tubulações de saída, denominadas outlets.			
Drenagem Superficial:	O sistema de drenagem superficial é composto por canaletas escavadas e canal periférico.			

Fonte: Adaptado Pöyry (2018, p. 9)

3.3.1 - Base de Dados

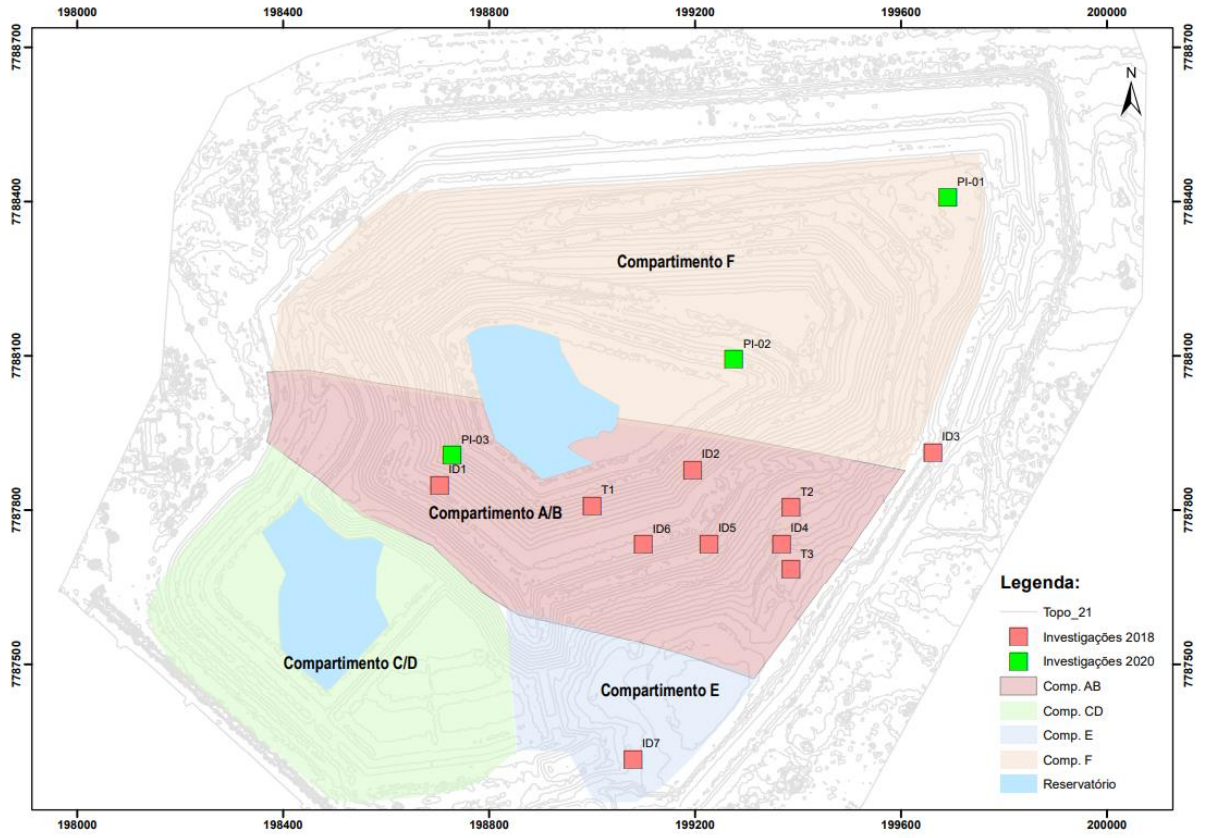
A base de dados utilizada para este trabalho contém as seguintes informações: topografia da pilha de fosfogesso com referência de Julho/21, dados de monitoramento, informações referentes às sondagens e coletas de amostras realizadas na área de estudo no período de 2018 e 2020.

3.3.2 - Ensaios de campo

As campanhas de sondagem tiveram como premissa a definição dos locais para realização dos ensaios de campo com base no projeto final das pilhas dos compartimentos A/B/E e F, o que resultou em um único compartimento, podendo ser alteado até a cota 185 m.

Na primeira campanha (2018) foram realizadas 7 sondagens para coleta de amostras deformadas e indeformadas em cada um dos pontos definidos (ID1 a ID7) e 3 amostras de material do interior do reservatório, sendo armazenadas em tambor (T1 a T3). Já na segunda campanha de investigação geotécnica (2020), definiu-se a execução de 3 poços de inspeção (PI) para coleta de amostra deformada (da ordem de 30 kg de amostra) e amostra indeformada de 30x30x30 cm. A Figura 28 apresenta as locações de campo da investigação geotécnica realizada nas campanhas de 2018 e 2020.

Figura 28 - Localização dos pontos de sondagem e coleta de amostras



Fonte: Autoria própria (2021)

3.3.3 - Metodologia para sondagens e coleta de amostras

Este capítulo contempla ainda as metodologias aplicadas tanto na investigação de campo quanto nos ensaios laboratoriais aplicados nas amostras deformadas e indeformadas ao longo da profundidade da pilha de fosfogesso do referido estudo, bem como os resultados das sondagens e testes para determinação de: granulometria, massa específica (densidade), umidade, índice de vazios e limites de liquidez e plasticidade.

A 1ª campanha de sondagem considerada neste estudo foi realizada em 2018, sendo executada pela empresa Geotork Sondagens e Perfurações Ltda. Esta investigação considerou 7 (sete) pontos de coleta de amostras (ID1 à ID7), indeformadas e deformadas de fosfogesso e 3 (três) amostras coletadas no interior do reservatório, conforme metodologia descrita a seguir.

As amostras indeformadas foram coletadas durante a perfuração, através do amostrador *Shelby* em aço inox, nas profundidades de 5, 10 e 15 metros. Este amostrador tipo *Shelby* permite coleta de amostras indeformadas de solos e foram realizadas conforme padrões estabelecidos na norma da ABNT NBR 9820 – Coleta de amostras indeformadas de solos em furos de sondagem. A Figura 29 apresenta uma foto dos tubos com o material coletado. A técnica utilizada consiste na perfuração mecanizada até a profundidade desejada, na qual insere-se o amostrador e por meio de cravação estática é realizada a coleta.

Figura 29 - Amostras *Shelby*



Fonte: PÖYRI (2018, p.2)

As coletas de amostras deformadas foram realizadas durante a perfuração de circulação rotativa com lavagem (circulação de água). Foram coletados 2 kg de cada amostra deformada, nas profundidades 3, 7 e 12 metros. Portanto, em cada ponto foram coletadas 3 amostras indeformadas nas profundidades de 5, 10 e 15 metros, e 3 amostras deformadas nas profundidades 3, 7 e 12 metros. As amostras T1 à T3 foram coletadas no interior do reservatório e armazenadas em tambor. A Tabela 7 apresenta os pontos de coordenadas nos quais a investigação de campo foi realizada.

Tabela 7 - Pontos de coordenadas da investigação de campo

Identificação dos pontos	Leste	Norte
ID1	198.703,818	7.787.848,039
ID2	199.195,225	7.787.878,483
ID3	199.661,432	7.787.912,221
ID4	199.367,826	7.787.734,858
ID5	199.227,229	7.787.734,564
ID6	199.099,470	7.787.734,088
ID7	199.079,592	7.787.315,221
T1	199.000,000	7.787.808,022
T2	199.386,184	7.787.805,283
T3	199.386,184	7.787.684,860

Fonte: Adaptado Pöyry (2018, p.12)

Na 2ª campanha de sondagem realizada em 2020, considerou-se 3 (três) pontos de coletas de amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 1,5 à 3,0, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 - Pontos de coordenadas da investigação de campo

Identificação dos pontos	Leste	Norte	Cota (m)
PI-01	199.690,86	7.788.407,83	125,47
PI-02	199.275,59	7.788.093,22	159,00
PI-03	198.727,96	7.787.907,18	158,57

Fonte: Adaptado Walm (2021, p.5)

3.3.4 - Ensaios de laboratório

As amostras coletadas em 2018 foram analisadas pelo IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológica, empresa do Governo Estadual de São Paulo. Já as amostras coletadas em 2020 foram analisadas pela Pattrol Investigações Geotécnicas. Ainda neste estudo também são apresentados alguns resultados de ensaios realizados pela empresa projetista da pilha de fosfogesso Ardaman and Associates Inc, que é referência mundial em projetos de pilhas de fosfogesso.

Dentre os ensaios laboratoriais realizados no fosfogesso, podemos citar: granulometria,

densidade, condutividade hidraúlica, índice de vazios, umidade e determinação do índice de consistência.

As amostras coletadas em campo foram registradas pelo laboratório conforme apresenta a Tabela 9.

Tabela 9 - Correlação de identificação das amostras de campo e laboratório

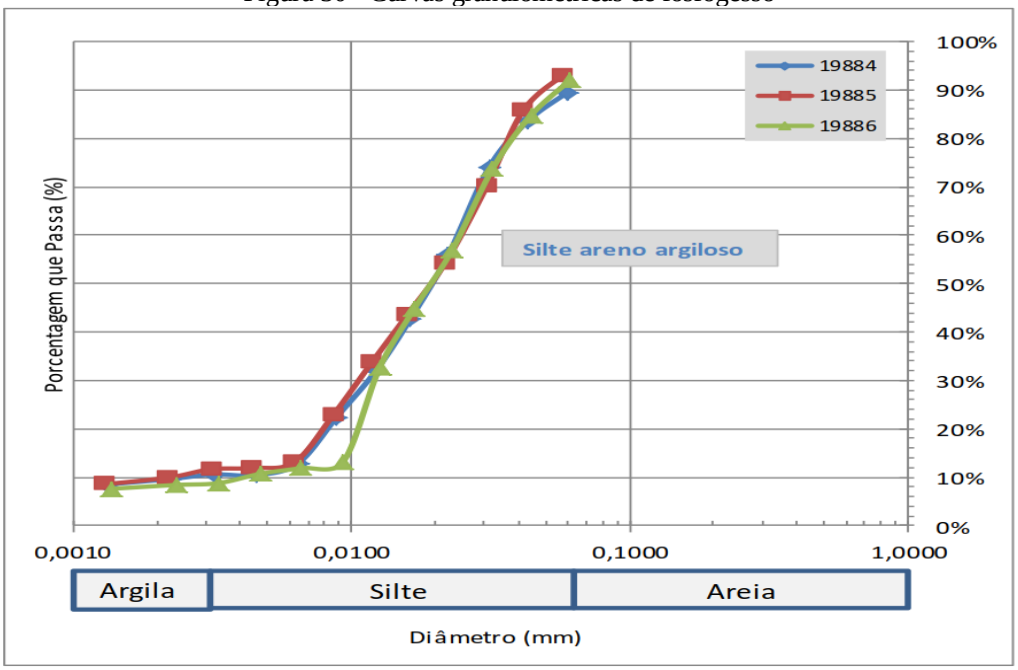
Amostras coletadas em campo	Registro de Laboratório
PI-01	15809 e 15812
PI-02	15810 e 15813
PI-03	1811 e 15814

Fonte: Autoria Própria (2023)

3.3.4.1 - Granulometria

Os ensaios de granulometria realizados mostraram que o material constituinte da pilha (fosfogesso) apresenta um comportamento similar ao de um solo siltoso (Figura 30), apresentando alta permeabilidade e elevada resistência para baixos teores de umidade.

Figura 30 - Curvas granulométricas de fosfogesso

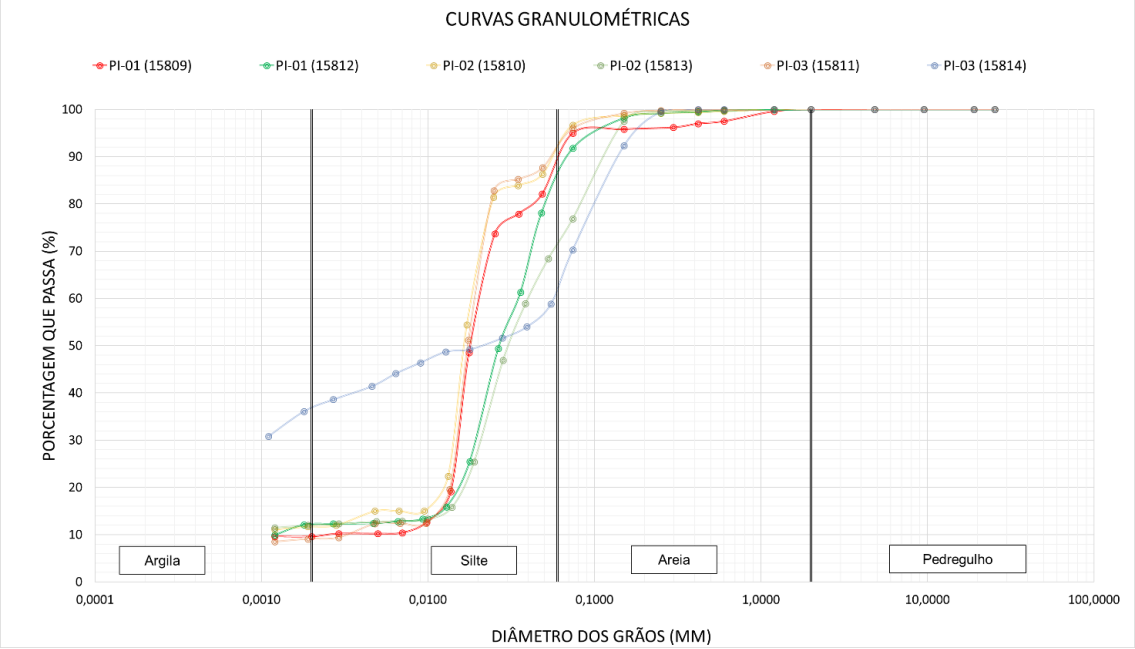


Fonte: Poyri (2018, p.3)

Através da Figura 31 pode-se observar que as referidas curvas demonstram a predominância da fração siltosa nos ensaios de granulometria das amostras PI-01 (15809, 15812), PI-02 (15810, 15813) e PI-03 (1811), exceto PI-03(15814).

O ensaio granulométrico da amostra PI-03 (15814) demonstra dominância para fração arenosa. Ainda através da Figura 30 é possível observar uma similaridade de diâmetros das partículas das amostras extraídas, podendo ser considerado predominantemente fino.

Figura 31 - Curvas granulométricas do fosfogesso



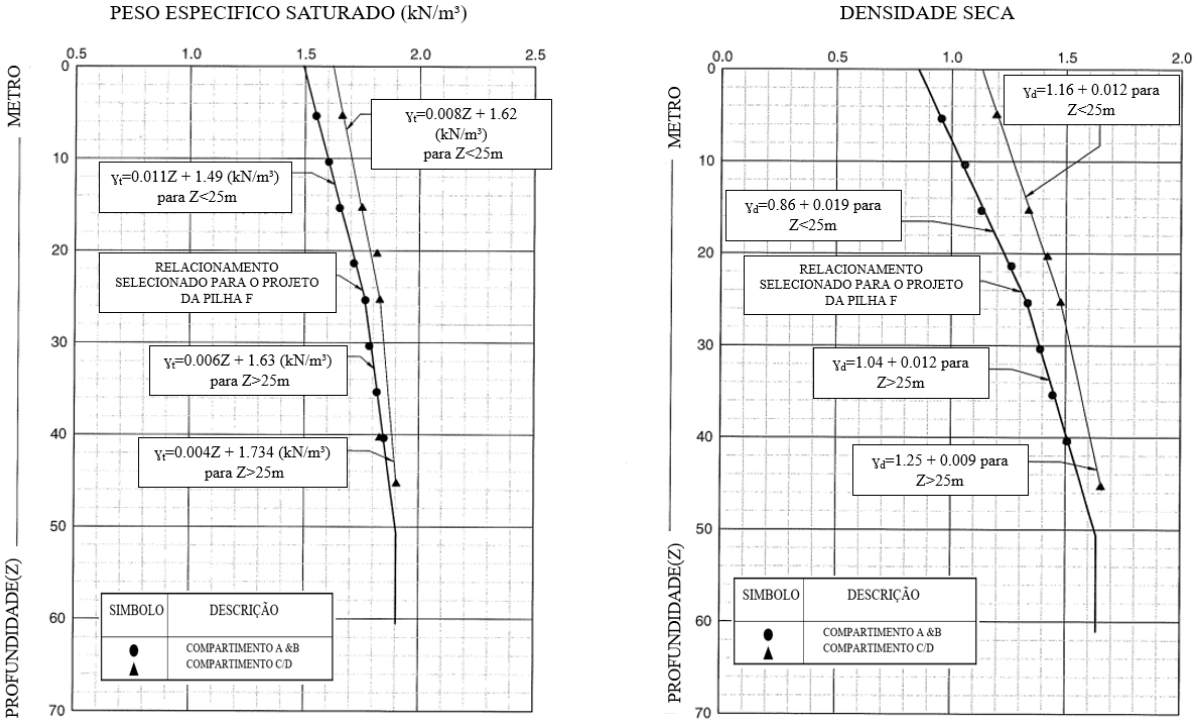
Fonte: Walm, (2021, p.8)

3.3.4.2 - Densidade e peso específico

Ardaman (2019) descreve que a consolidação e compressão secundária sob tensão do gesso subsequente, disposto em camadas, faz com que o material sedimentado se torne mais denso. À medida que aumentamos a profundidade amostral, sua densidade também aumenta. Isso é possível observar através das amostras de fosfogesso de compartimentos mais antigos, pois eles refletem essa diferença quando comparado com os dados obtidos com amostras das pilhas mais jovens.

A Figura 32 apresenta, através de gráficos, o peso específico do material saturado e os dados de densidade do gesso seco em função da profundidade. Os ensaios de densidade demonstram ainda que, em ambas as situações, o peso específico saturado e a densidade seca aumentam proporcionalmente à profundidade.

Figura 32 - Análises de peso específico x densidade do material



Fonte: Adaptado Ardamam (2012)

A Tabela 10 mostra os resultados de massa específica obtidos em ensaios das amostras de ID1à ID7.

Tabela 10 - Resultados de massa especifica (ρ).

Massa específica (kg/m3)				
Pontos/Profundidade	5 m	10 m	15 m	Unidade
ID1	1,6	1,6	1,5	kg/m3
ID2	1,5	1,5	1,5	
ID3	1,4	1,5	1,6	
ID4	1,5	1,6	1,6	
ID5	1,6	1,5	1,6	
ID6	1,5	1,5	1,6	
ID7	1,5	1,7	1,6	

Fonte: Adaptado Pöyry (2018, p.7)

É possível observar que os valores obtidos em ensaios realizados pela Ardaman (2019) estão em um range de 1,5 a 1,9 t/m³. Já os valores obtidos nas amostras de ID1à ID7, estão entre 1,4 a 1,7/ m³.

3.3.4.3 - Massa específica real dos grãos

A Tabela 11 apresenta a massa específica real dos grãos, nos ensaios realizados pela amostras deformadas e indeformadas.

Tabela 11 - Massa específica real dos grãos

Registro	Identificação	Tipos de Amostra	Massa Específica Real dos Grãos (g/cm³)
15809	Furo PI-01	Indeformada	3,2
15812	PI-01 Fosfogesso	Deformada	3,4
15810	Furo PI-02	Indeformada	3,3
15813	PI-02 Fosfogesso	Deformada	3,1
15811	Furo PI-03	Indeformada	3,3
15814	PI-03 Fosfogesso	Deformada	3,1

Fonte: Adaptado Walm (2021, p.3)

É possível notar uma variação entre os valores obtidos de 3,1 g/cm³ e 3,4 g/cm³, ou seja, diferença aproximada de 10% entre os valores extremos obtidos.

3.3.4.4 - Massa específica aparente natural

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica aparente natural, realizadas nas amostras de registros: 15809 (Furo PI-01), 15810 (Furo PI-02) e 15811 (Furo PI-03), as quais demonstram variação de valores obtidos entre 1,275 g/cm³ e 1,732 g/cm³.

Tabela 12 - Massa específica aparente das amostras

Registro	Identificação	Tipos de Amostra	Massa Específica Aparente Natural (g/cm³) média
15809	Furo PI-01	Indeformada	1,7
15810	Furo PI-02	Indeformada	1,6
15811	Furo PI-03	Indeformada	1,2

Fonte: Adaptado Walm (2021, p. 9)

Observa-se que o menor valor de massa específica aparente natural (γ) está atribuído ao menor valor de teor de umidade que, por sua vez, contém valores intermediários de ρs e granulometria (Tabela 13).

3.3.4.5 - Umidade

A Tabela 13 apresenta o teor de umidade natural obtido através de ensaios realizados em 2020, nas amostras indeformadas, com variação entre 33,5% e 54,7%, evidenciando heterogeneidade das umidades das amostras da pilha de fosfogesso.

Tabela 13 - Teores de umidade natural

Registro	Identificação	Tipos de Amostra	Umidade (%)
15809	Furo PI-01	Indeformada	54,7
15810	Furo PI-02	Indeformada	63,0
15811	Furo PI-03	Indeformada	33,5

Fonte: Adaptado Pattrol, (2021, p.3)

A Tabela 14 apresenta o teor de umidade natural obtido através de ensaios realizados em 2018, nas amostras indeformadas, com variação entre 50,9% (ID7- 10m) e 110,6% (ID3- 5m), evidenciando heterogeneidade das umidades das amostras da pilha de fosfogesso.

Tabela 14 - Teores de umidade natural

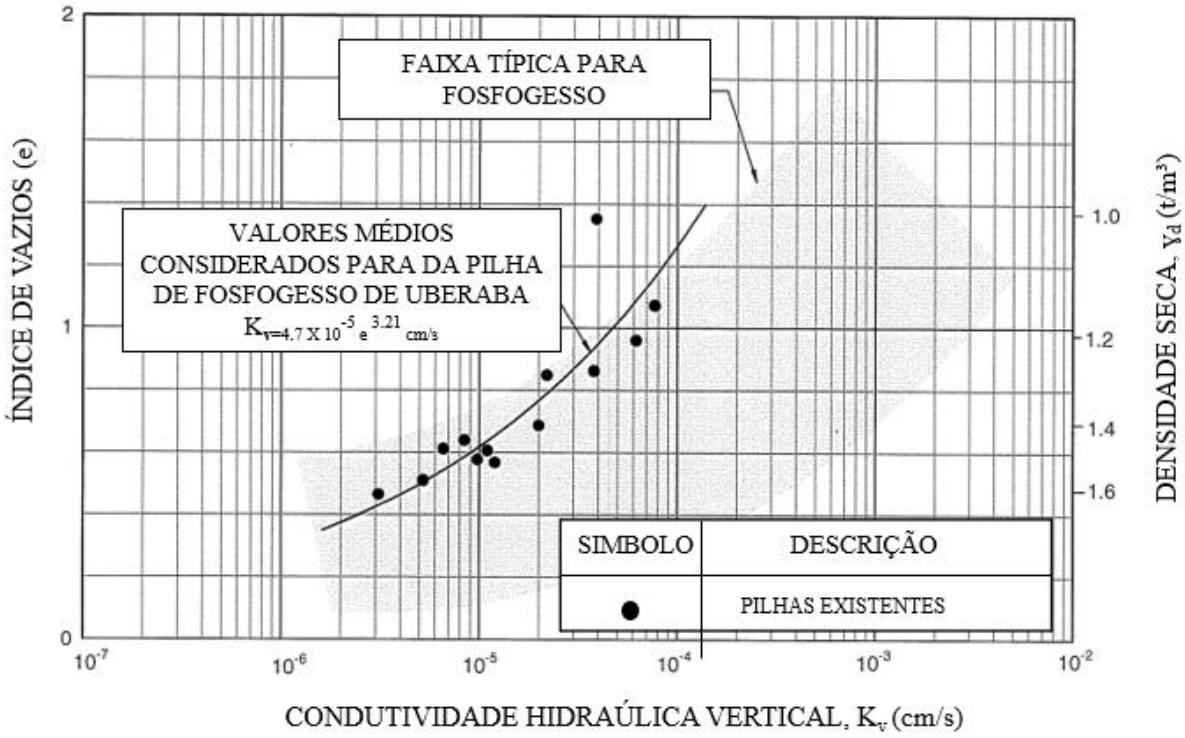
Umidade (%)				
Pontos/Profundidade	5 m	10 m	15 m	Unidade
ID1	75,0	77,3	83,0	%
ID2	101,3	82,9	98,8	
ID3	110,6	80,2	62,3	
ID4	79,3	66,8	65,7	
ID5	55,8	65,2	65,0	
ID6	80,2	78,9	71,7	
ID7	67,7	50,9	51,2	

Fonte: Pöyry (2018, p.2)

3.3.4.6 - Condutividade hidraúlica e índice de vazios

Segundo Ardaman (2019), a condutividade hidráulica vertical da pilha de fosfogesso também diminui com a profundidade conforme a pilha fica mais densa em profundidade. Como resultado, a porcentagem de indice de vazios diminui à medida que a densidade seca aumenta em profundidade. A Figura 33 apresenta a variação da condutividade hidráulica vertical versus indice de vazios para o fosfogesso da pilha em estudo.

Figura 33 - Variação da condutividade hidráulica vertical versus taxa de vazios



Fonte: Figura adaptada de Ardamam (2019)

Portanto, com o aumento da profundidade e o aumento da densidade seca, temos uma diminuição no índice de vazios e consequente diminuição da condutividade hidráulica. Nesta variável, é possível perceber uma diferença notável entre os dados das duas empresas.

Através de uma comparação direta, é possível notar que os valores obtidos de índices de vazios apresentados na Figura 32 estão em uma faixa de 0,4 a 1,7, enquanto os valores das amostras ID1 à ID7 se situam entre 1,75 e 3,76 (Tabela 15).

Tabela 15 - Resultados de índices de vazios (e).

Índice de vazios (e)				
Pontos/Profundidade	5 m	10 m	15 m	Unidade
ID1	2,7	2,5	2,8	kg/m3
ID2	3,2	2,8	3,1	
ID3	3,7	2,7	2,4	
ID4	2,7	2,0	2,2	
ID5	2,1	2,3	2,2	
ID6	2,8	2,8	2,6	

Índice de vazios (e)				
Pontos/Profundidade	5 m	10 m	15 m	Unidade
ID7	2,4	1,7	1,8	

Fonte: Adaptado Pöyry (2018, p.2)

3.3.4.7 - Limites de Atteberg

Através da Tabela 16, nota-se que os resultados dos ensaios de determinação dos limites de consistência (Limites de Atteberg) evidenciaram comportamento não líquido e não plástico para a totalidade das amostras ensaiadas (15809, 15812, 15810,15813, 15811, e 15814) . O comportamento evidenciado contraria a expectativa esperada para materiais com frações siltosas, cujo comportamento tende a ser de limites de liquidez consideráveis e baixas plasticidades.

Tabela 16 - Resultados Limites de Atteberg

Registro	Identificação	Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)
15809	Furo PI-01	Indeformada	NL	NP	-
15812	PI-01 Fosfogesso	Deformada	NL	NP	-
15810	Furo PI-02	Indeformada	NL	NP	-
15813	PI-02 Fosfogesso	Deformada	NL	NP	-
15811	Furo PI-03	Indeformada	NL	NP	-
15814	PI-03 Fosfogesso	Deformada	NL	NP	-

Fonte: Pattrol (2022, p.4)

3.3.4.8 - Ensaios especiais

3.3.4.8.1 - Ensaio Triaxial CIU

A Tabela 17 apresenta os parâmetros de resistência obtidos nos ensaios triaxiais

realizados nas amostras de fosfogesso de registros: 15809 (Furo PI-01), 15810 (Furo PI-02) e 15811 (Furo PI-03).

Tabela 17 - Parâmetros de resistência do fosfogesso

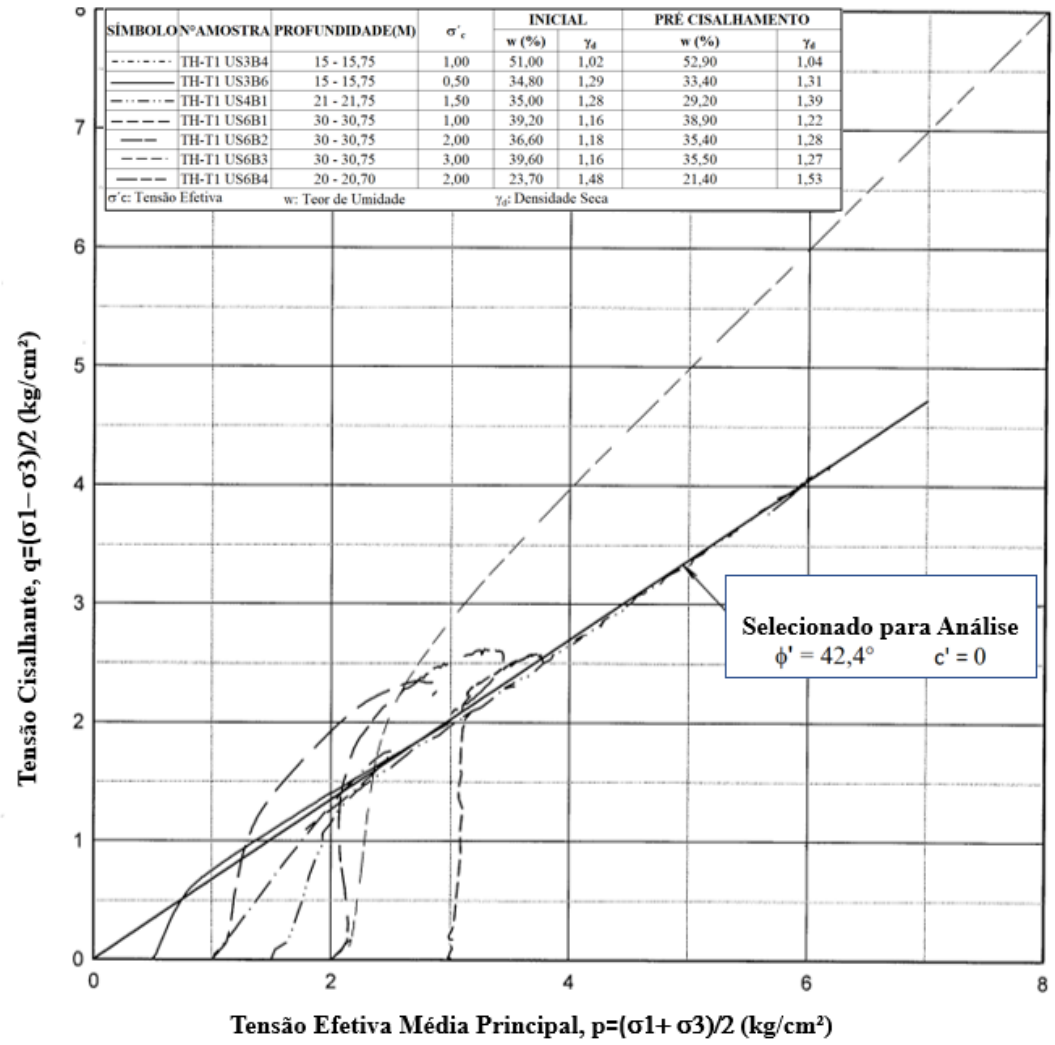
Registro	Identificação	Tensão total		Tensão Efetiva	
		C (kPa)	ϕ (º)	C (kPa)	ϕ (º)
15809	Furo PI-01	477	29,1	1,33	85,0
15810	Furo PI-02	62,5	25,7	0,3	45,4
15811	Furo PI-03	37,0	20,8	19,8	37,0

Fonte: Adaptado Pattrol (2022, p.3)

A amostra de registro 15809 e identificação Furo PI-01 apresentou o ângulo de atrito com valor de 85,0º, valor este considerado muito alto, quando comparado à outras amostras analisadas de fosfogesso, como pode se observar os valores obtidos nos registros 15810 (45,4º) e 15811 (37,0º).

O projeto de empilhamento do compartimento F, região estudada neste trabalho, elaborado pela empresa Ardaman & Associates, Inc.(RT-06-13-0093B), em março de 2012, apresenta detalhadamente os resultados de ensaios realizados no fosfogesso que embasaram os estudos, com os principais resultados apresentados na Figura 34.

Figura 34 - Ensaios triaxiais do gesso



Fonte: Adaptado de Ardaman (2012, p.4)

Os valores de permeabilidade são na ordem de 10-5 m/s, valores estes bem semelhantes aos de materiais com caracteristicas arenosas, para níveis de consolidação de até 59 kPa impostos sobre a amostra ID6, coletada à profundidade de 5,0 m, com índice de vazios (e) de 2,96.

De forma conservadora, neste estudo adota-se, para a totalidade do fosfogesso disposto na pilha, φ' de 42,4° e c' de 0 kPa. O valor de γ adotado, também de forma conservadora, para o fosfogesso da pilha, foi de 17,0 kN/m³, obtido para a amostra PI-01.

3.4 - Dados de instrumentação e monitoramento

O monitoramento de instrumentos da respectiva estrutura geotécnica é composto por: marcos superficiais, piezômetros, indicadores de nível de água (INA), outlets, dentre outros. Deste modo, é possível observar os deslocamentos, poropressão, nível freático, vazões de percolação e coeficiente de permeabilidade, possibilitando assim avaliar a análise de estabilidade geotécnica em termos de tensões efetivas (parâmetros drenados). A campanha de investigação de campo é formada por coleta de amostras deformadas e indeformadas. Os ensaios de laboratório convencionais utilizados foram: granulometria, massa específica real dos grãos, massa específica natural, índice de vazios máximos e mínimos, limites de consistencia (Atterberg), teor de umidade e compressão simples. Os ensaios de laboratório especiais utilizados foram: adensamento, cisalhamento direto (saturado e não saturado) e ensaios triaxiais (CD e CU). A empresa onde se realizou o estudo de caso deste trabalho iniciou suas atividades em 1979.

O método de estabilidade adotado para a presente pesquisa foi o Método do Equilíbrio Limite proposto por Morgenstern e Price. A escolha do mesmo deve-se ao seu rigor físico-matemático que possibilita fazer uma análise em termos de equilíbrio de forças e momentos concomitantemente.

As análises de estabilidade e percolação de projeto referente a possíveis falhas de superfícies da Pilha de Fosfogesso foram realizadas pela projetista usando o método de fatias e o *software* SLOPE/W, GeoStudio 2018, Versão 9.0.3.15488, desenvolvido por Geoslope International Ltd. de Calgary, Alberta, Canadá, com a utilização de método generalizado que satisfaz tanto a força e equilíbrio de momento e que incorpora a suposição de força lateral descrita por Spencer (1967), ou seja, forças laterais paralelas.

A Tabela 18 apresenta os instrumentos instalados e pontos de monitoramento da pilha de fosfogesso.

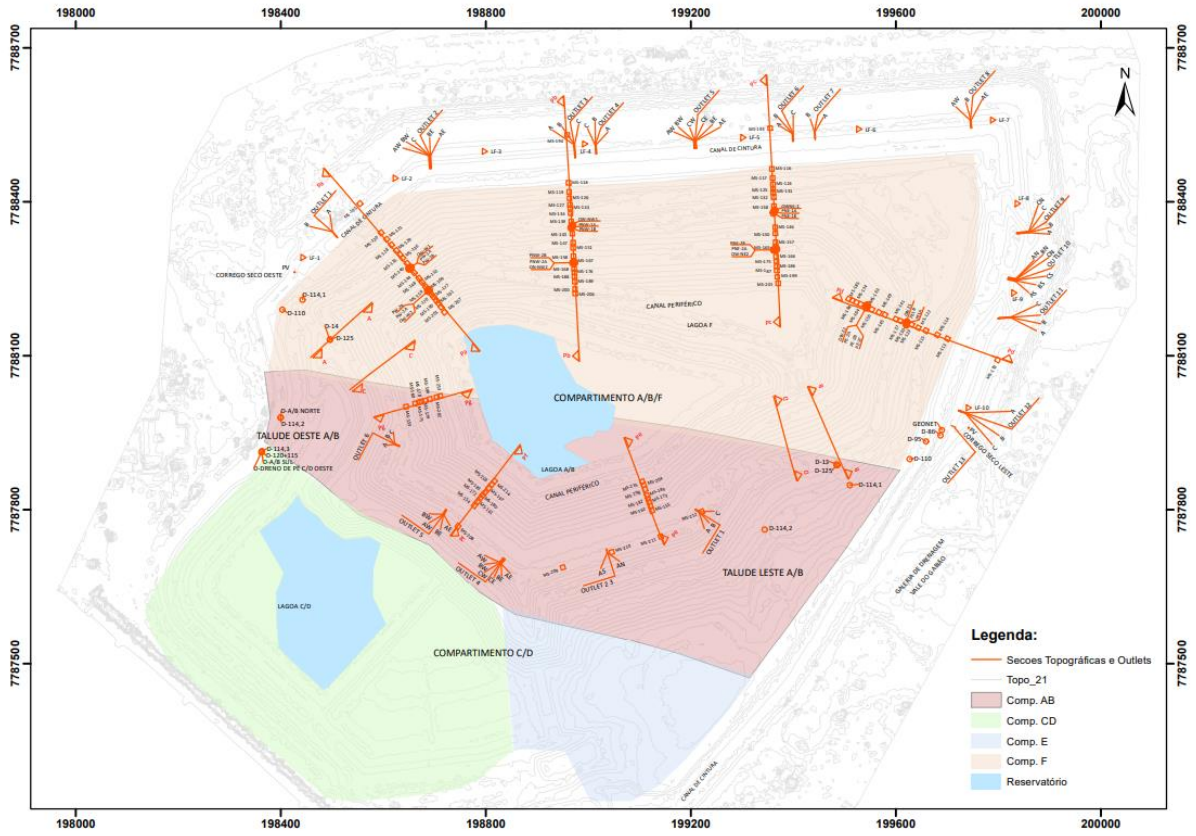
Tabela 18 - Pontos de monitoramento

Ponto Monitorado	Nº de Pontos Monitorados	Localização
Marcos superficiais	81	Compartimentos A/B e F
piezômetros (PZ's)	15	Compartimento F
Indicadores de nível d'água (OW's)	8	Compartimento F
Drenos de fundo	4	Vale do Gabião
Saídas de dreno de Outlets	44	Compartimento F
Saídas de dreno de Outlets	13	Compartimento A/B
Pluviômetro	1	Região da pilha

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 35 apresenta o mapa de localização dos instrumentos e pontos monitorados na estrutura geotécnica em estudo.

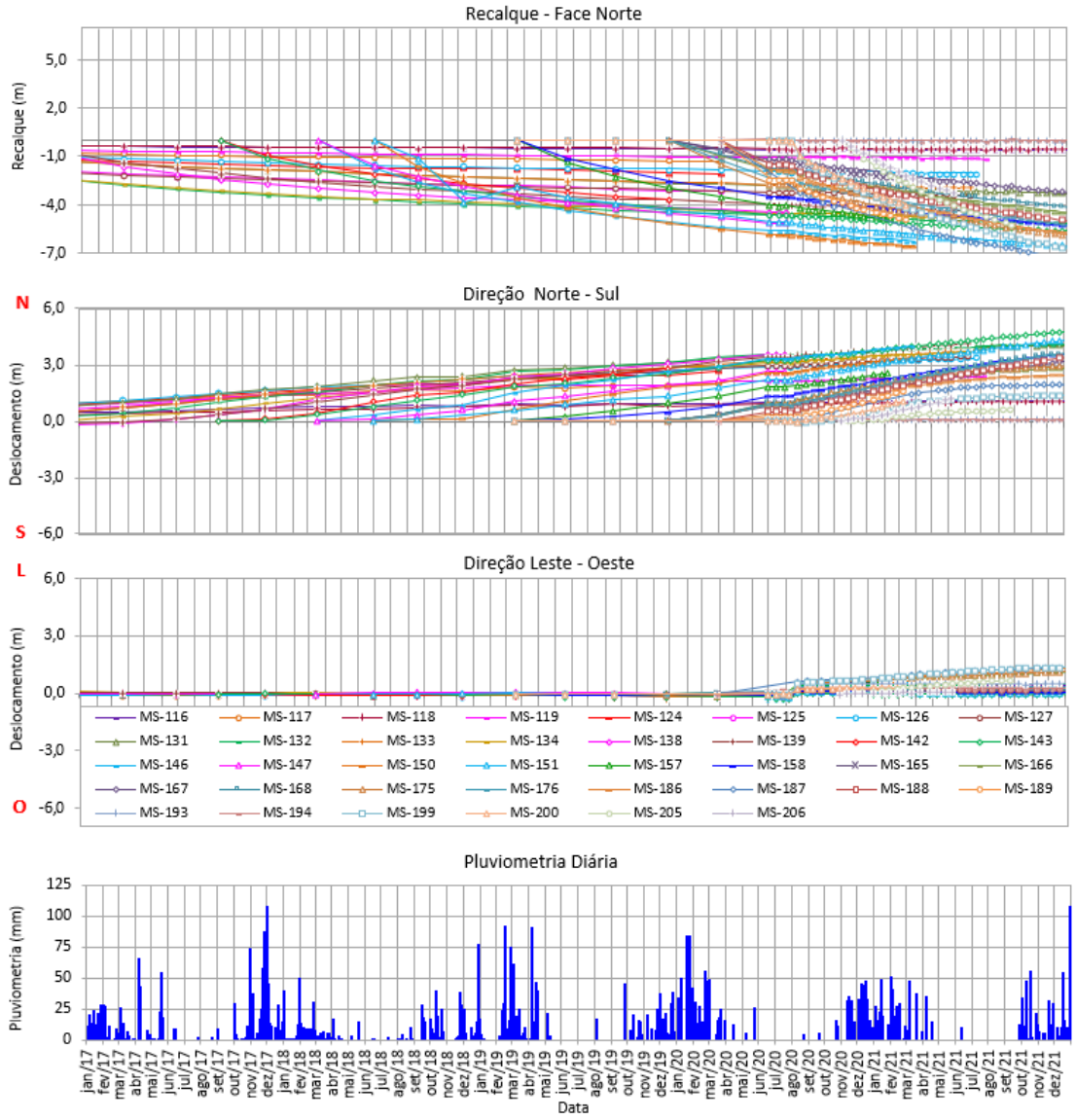
Figura 35 - Mapa de localização de instrumentos e pontos de monitoramento



Fonte: Figura de autoria própria (2023)

A Figura 36 apresenta o histórico de leituras dos marcos superficiais instalados na pilha de fosfogesso. Nota-se um acúmulo de recalques ao longo nos anos que chegam até 7,2 m, sendo aproximadamente 1,4 m/ano, conforme observa-se no MS-130, da seção Pd – face leste do compartimento F. Porém, o comportamento dos recalques chega a ser assintótico, ou seja apresentam valores muito próximos e com tendência de desaceleração. Horizontalmente, observam-se deformações coerentes com a posição das faces, ou seja, com deslocamentos preponderantes para o norte, para os marcos instalados na face norte e, assim, também para os das demais faces. O deslocamento máximo registrado é de 4,3 m, direção leste, caso do MS-130.

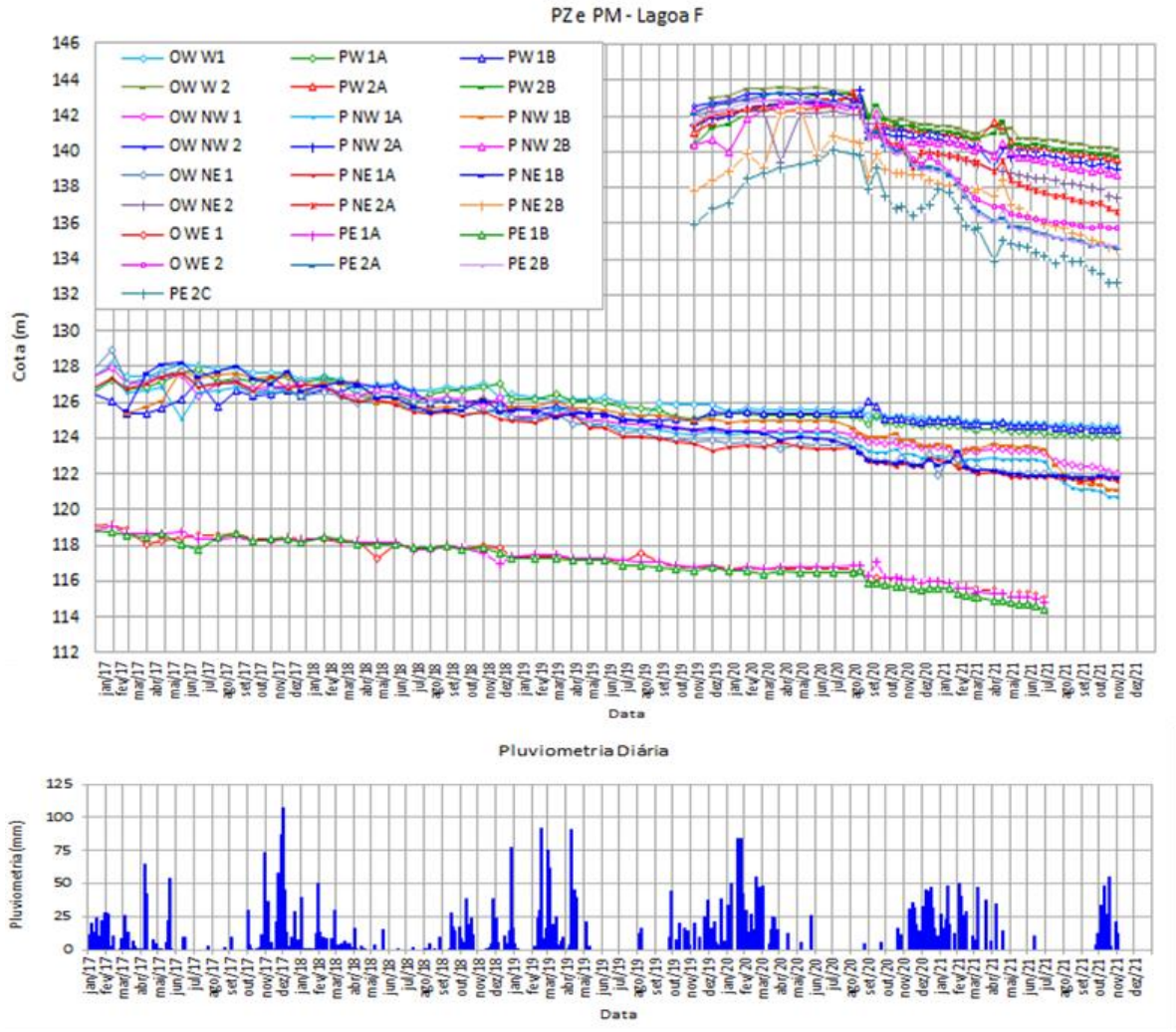
Figura 36 - Leituras dos marcos superficiais



Fonte: Geoconsultoria (2021)

A Figura 37 apresenta os piezômetros (PZ's) e indicadores de nível d'água (OW's) em operação no compartimento F com níveis bem semelhantes, demonstrando um comportamento estável. Os níveis medidos, praticamente desde o início do monitoramento, continuam com a tendência de redução. Para alguns instrumentos essa redução mostra aceleração em função da paralisação do lançamento de fosfogesso e início da expedição no compartimento F.

Figura 37 - Leituras dos INA's (OW) e PZ's (P's) - Freática



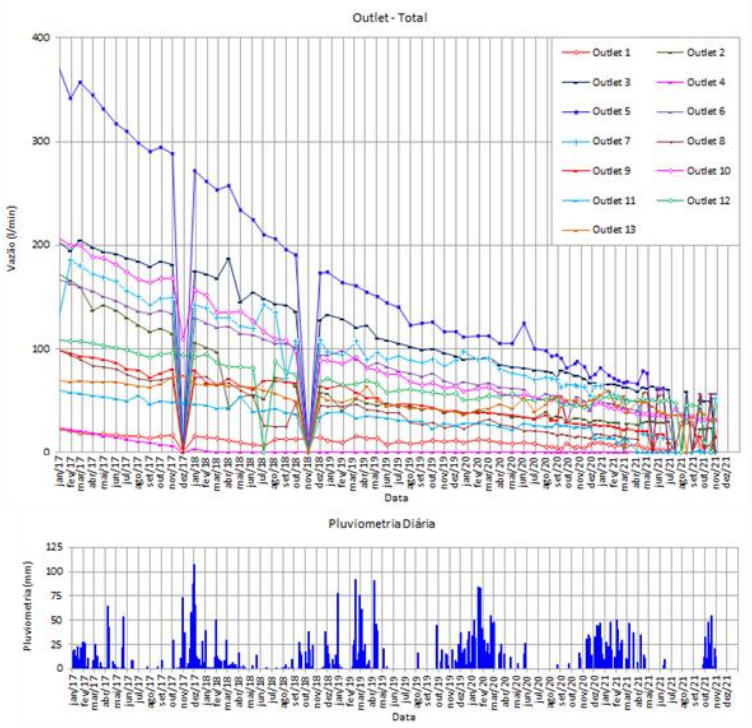
Fonte: Geoconsultoria (2021)

Esse comportamento dos PZ´s e INA´s demonstram influência positiva do sistema de drenagem interna, contribuindo para a drenagem da pilha, atendendo às premissas de projeto e

controle da estabilidade da pilha.

A Figura 38 indica que as vazões das drenagens internas vêm se reduzindo ao longo da elevação da pilha devido ao distanciamento do local de deposição e redução da permeabilidade em profundidade, entretanto, correlacionando com os dados de monitoramento, é possível afirmar que sua redução não apresenta prejuízo para a estabilidade da pilha, uma vez que não existe uma colmatação do dreno e perda completa de permeabilidade do gesso. Nota-se ainda que alguns *outlets* deixam de apresentar vazão (ínfimo do gráfico). Isso ocorre devido à interligação dos *outlets*, muito relacionados à disposição de material na pilha, que podem cessar por motivos de paradas de manutenção, avaliação do funcionamento do dreno ou alteração do ponto de disposição do gesso. Contudo, assim que retorna a operação normal, os outlets voltam a apresentar vazões normais. Essa situação comprova o correto funcionamento dos drenos (sem colmatação) e o retorno da percolação da pilha. O gráfico ainda apresenta o *Outlet* 5 no inicio do período analisado (Jan/17) com vazão superior entre 300 e 400l/min, quando comparado aos demais *outlets.* Este comportamento é considerado normal, pois se deve ao fato da proximidade da lâmina d'água do reservatório ao dreno, aumentando assim sua influência.Com o passar do tempo de disposição do fosfogesso, há uma redução da permeabilidade em profundidade, decorrente do processo de adensamento do gesso, com isso a vazão vai reduzindo.

Figura 38 - Leituras das vazões da drenagem interna



Fonte: Geoconsultoria (2021)

3.5 - Projeto pilha de fosfogesso

O projeto da Pilha de fosfogesso deste estudo, Stability Analyses for Stack F Excavation, de junho de 2020, de autoria da empresa Ardaman & Associates Inc apresenta duas seções (Figura 39) no compartimento F, sendo uma seção na região norte (seção A) e outra na região leste (seção B) do respectivo compartimento.

As análises foram realizadas para a configuração da Pilha F de fevereiro de 2020 e a geometria projetada do talude após a escavação do talude lateral e subsequente elevação até o topo, com elevações de 165 metros.

Para este estudo foram escolhidas seções próximas às seções de projeto, nas quais foram realizadas análises de estabilidade e percolação da respectiva estrutura geotécnica.

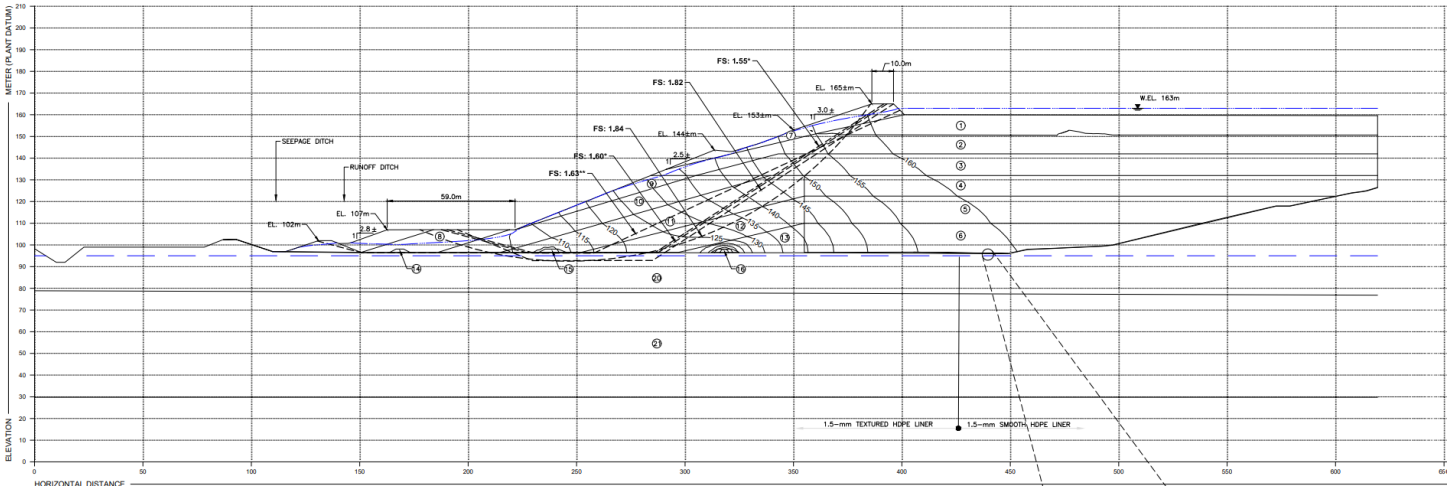
Figura 39 - Seções analisadas



Fonte: Ardaman (2020, p.5)

A Figura 40 apresenta a análise de estabilidade de percolação na Seção A de projeto que previa o comportamento da pilha de fosfogesso no compartimento F quando em operação. A Tabela 19 apresenta os parâmetros de resistência e coeficiente de permeabilidade dos materiais da Seção A a serem depositados na pilha quando na sua fase de operação.

Figura 40 - Análise de estabilidade de percolação - Seção A



Fonte: Ardaman (2020)

Tabela 19 – Propriedades dos materiais das análises de estabilidade – Seção A

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS USADOS EM ANÁLISES DE ESTABILIDADE E PERCOLAÇÃO						
Número da Camada	Descrição	k_v (cm/s)	k_h/k_v	γ (kg/m³)	ϕ (Deg)	c (kg/cm²)
1	Fosfogesso	$1.8x10^{-4}$	2	1540	42.4	0
2	Fosfogesso	$6.8x10^{-5}$	4	1640	42.4	0
3	Fosfogesso	$2.6x10^{-5}$	4	1740	42.4	0
4	Fosfogesso	$1.2x10^{-5}$	4	1830	42.4	0
5	Fosfogesso	$5.5x10^{-6}$	4	1950	42.4	0
6	Fosfogesso	$2.1x10^{-6}$	4	1950	42.4	0
7	Fosfogesso	$2.0x10^{-4}$	1.5	1650	42.4	0
8	Fosfogesso	$1.8x10^{-4}$	1.5	1850	42.4	0
9	Fosfogesso	$1.3x10^{-4}$	2	1580	42.4	0
10	Fosfogesso	$2.3x10^{-5}$	2	1600	42.4	0
11	Fosfogesso	$1.3x10^{-5}$	4	1700	42.4	0
12	Fosfogesso	$7.8x10^{-6}$	4	1840	42.4	0
13	Fosfogesso	$2.9x10^{-6}$	4	1950	42.4	0
14	Fosfogesso	$8.5x10^{-4}$	2	1850	42.4	0

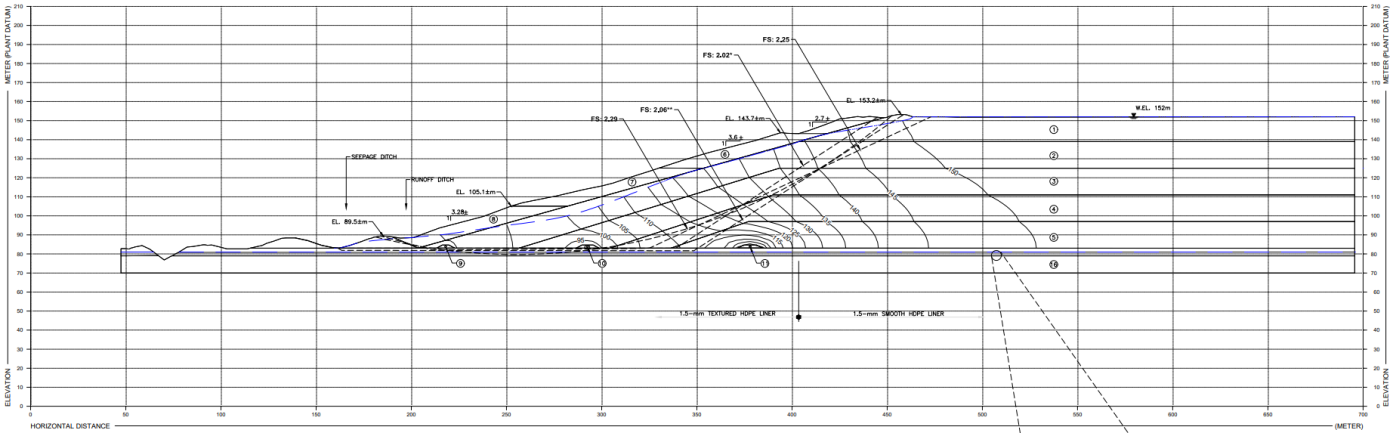
15	Fosfogesso	$9.5x10^{-6}$	4	1850	42.4	0
16	Fosfogesso	$9.5x10^{-6}$	4	1850	42.4	0
17	Solo argiloso compactado	$5.0x10^{-5}$	1	1922	26.5	0
18	Areia	$1.0x10^{-3}$	1	1922	30.0	0
19	Solo argiloso compactado	$5.0x10^{-5}$	1	1922	26.5	0
20	Solo argiloso natural	$5.0x10^{-5}$	1	1922	26.5	0
21	Areia	$1.0x10^{-3}$	1	1922	30	0

Fonte: Ardaman (2020, p.4)

A Figura 41 apresenta a análise de estabilidade de percolação na Seção B de projeto que previa o comportamento da pilha de fosfogesso no compartimento F quando em operação.

A Tabela 20 apresenta os parâmetros de resistência e coeficiente de permeabilidade dos materiais da Seção B a serem depositados na pilha, quando na sua fase de operação.

Figura 41 – Análise de estabilidade de percolação – Seção B



Fonte: Ardaman (2020)

Tabela 20 - Propriedades dos materiais das análises de estabilidade – Seção B

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS USADOS EM ANÁLISES DE ESTABILIDADE E PERCOLAÇÃO						
Número da Camada	Descrição	K_v (cm/s)	k_h/k_v	γ (kg/m³)	ϕ (Deg)	c (kg/cm²)
1	Fosfogesso	$1.4x10^{-4}$	2	1760	42.4	0
2	Fosfogesso	$3.5x10^{-5}$	2	1630	42.4	0
3	Fosfogesso	$1.1x10^{-5}$	4	1740	42.4	0
4	Fosfogesso	$4.1x10^{-6}$	4	1840	42.4	0
5	Fosfogesso	$1.3x10^{-6}$	4	1880	42.4	0
6	Fosfogesso	$1.6x10^{-4}$	1.5	1890	42.4	0
7	Fosfogesso	$1.3x10^{-4}$	1.5	1920	42.4	0
8	Fosfogesso	$1.0x10^{-4}$	1.5	1920	42.4	0
9	Fosfogesso	$4.9x10^{-5}$	2	1780	42.4	0
10	Fosfogesso	$1.9x10^{-5}$	4	1800	42.4	0
11	Fosfogesso	$2.4x10^{-6}$	4	1800	42.4	0
12	Solo argiloso compactado	$5.0x10^{-5}$	1	1922	26.5	0
13	Areia	$1.0x10^{-3}$	1	1922	30	0
14	Solo argiloso recompactado	$5.0x10^{-5}$	1	1922	26.5	0
15	Solo argiloso natural	$5.0x10^{-5}$	1	1922	26.5	0
16	Areia	$1.0x10^{-3}$	1	1922	30	0

Fonte: Ardaman, (2020, p. 6)

Esses dados do projeto são baseados em muitos ensaios de campo e laboratório realizados pela empresa projetista, uma vez que a mesma é referência mundial em projetos de pilha de fosfogesso.

4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 - Análise de estabilidade e percolação

Para o presente estudo foram definidas seções próximas às seções de projeto, nas quais foram realizadas análises de estabilidade e percolação da respectiva estrutura geotécnica, de modo a confirmar a estabilidade da mesma com base em informações de projeto obtidas em investigações de campo e ensaios laboratoriais pela empresa projetista da pilha de fosfogesso.

As análises de estabilidade e percolação foram realizadas com utilização da topografia levantada em julho de 2021, disponibilizada pela empresa detentora dados. Os métodos adotados nas análises foram os de Spencer e Morgenstern-Price, pois são métodos extremamente conservadores, sendo os mais utilizados na atualidade pelas empresas de engenharia para estruturas com características aproximadas à pilha de fosfogesso.

4.2 - Parâmetros de resistência do fosfogesso

Com a carência de informações sobre investigações geotécnicas sobre o fosfogesso na literatura, os resultados obtidos a partir de metodologias convencionais de estimativas de parâmetros geotécnicos são assumidos, neste estudo, como não convencionais, uma vez que o fosfogesso apresenta mudanças de características geotécnicas ao longo do tempo.

Diante dos dados obtidos através de investigações de campo e ensaios de laboratório, os quais encontram-se no banco de dados disponibilizado pela empresa responsável pela estrutura geotécnica, bem como apresentadas neste trabalho, considerou-se os parâmetros de resistência para as seções analisadas os valores obtidos através de investigações geotécnicas obtidos pela empresa projetista, e confirmadas em investigações de sondagem realizadas em 2020. Esses parâmetros estabelecidos em projeto são muito mais conservadores que os parâmetros obtidos em investigações de campo e ensaios laboratoriais.

Os ensaios de laboratório não mostram comportamento potencial de ruptura por liquefação.

Para as seções analisadas da Pilha de Fosfogesso foram considerados parâmetros conforme apresenta a tabela 21.

Tabela 21 - Parâmetros de resistência adotados nas análises

Parâmetros	Valor
Peso específico (kN/m³)	17,0
Coesão (kPa)	0
Ângulo de atrito (º)	44,6

Fonte: Adaptado de Ardaman (2012, p.8)

4.3 - Seções geotécnicas

As seções escolhidas para serem analisadas situam-se no compartimento F e foram escolhidas por serem consideradas as seções mais críticas da pilha devido à sua altura, sendo elas: Seção A e Seção B da pilha de fosfogesso (veja-se Figura 42).

Importante ressaltar que na base da pilha há uma manta de impermeabilização. Contudo, as estabilidades foram concentradas no fosfogesso.

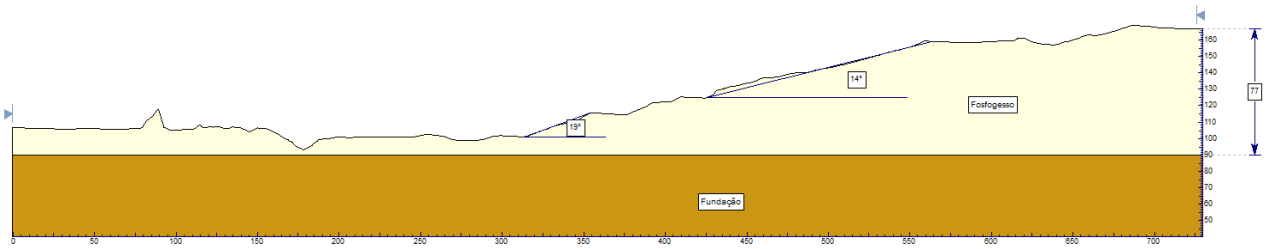
Figura 42 - Seções analisadas



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 43 apresenta a geometria da seção A, localizada no norte da pilha de fosfogesso, com altura máxima 77m, cota máxima de 167m, mínima de 90m, e inclinação de talude variando na seção analisada entre 14º e 19º.

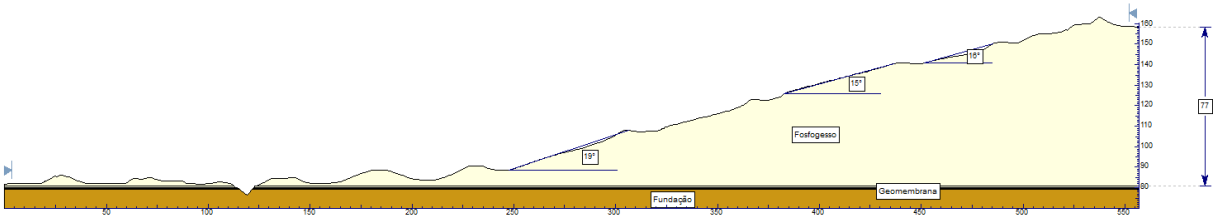
Figura 43 - Seção A



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 44 apresenta a geometria da seção B, localizada na região leste da pilha, com altura máxima de 77, cota máxima de 161 m, mínima de 81,25m, e inclinação de talude variando na seção analisada entre 15º e 19º.

Figura 44 – Seção B



Fonte: Autoria própria (2023).

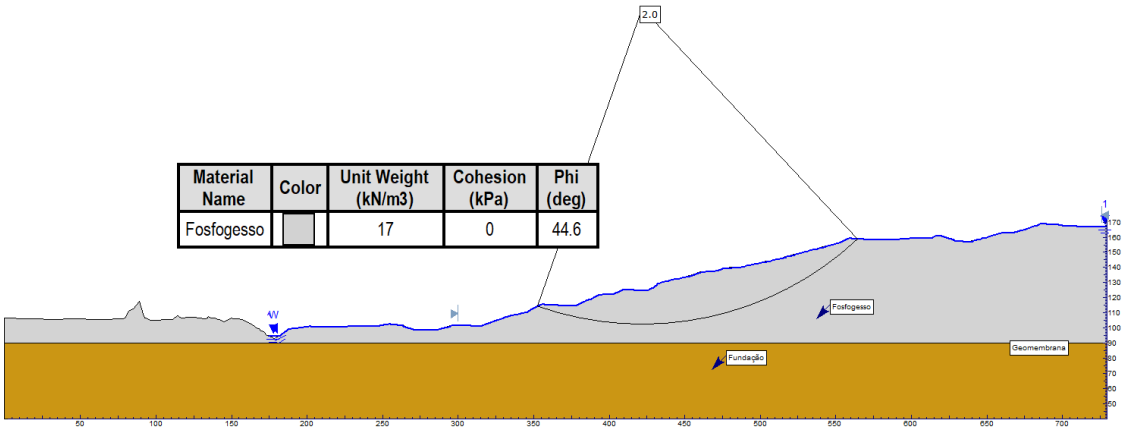
4.4 - Análise de estabilidade

As análises de estabilidade elaboradas consideram somente o fator de segurança global, visto que o fator de segurança do banco individual não representa a realidade da estrutura.

Para definição do posicionamento da linha freática das análises de estabilidade, utilizou-se como referência informações dos instrumentos de monitoramento mais próximos às seções avaliadas. Contudo, com o objetivo de avaliar o cenário mais crítico possível, a linha freática considerada nas análises foi posicionada a 10 cm abaixo da superfície.

A Figura 45 apresenta a análise de estabilidade realizada na Seção A, com o fator de segurança global 2,0.

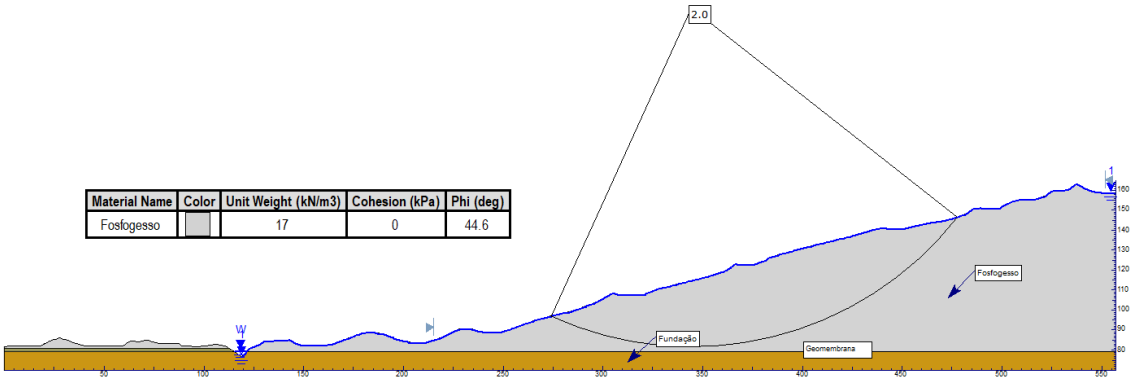
Figura 45 - Seção A



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 46 apresenta a análise de estabilidade realizada na Seção B, com o fator de segurança global 2,0.

Figura 46 - Seção B



Fonte: Autoria própria (2023).

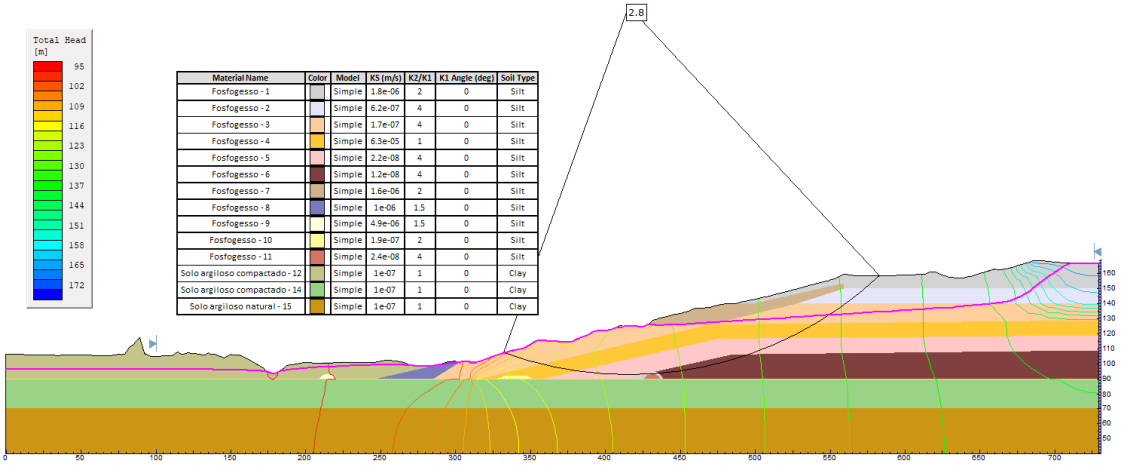
4.5 - Análise de percolação

Em estruturas geotécnicas com características semelhantes à Pilha de Fosfogesso não é recomendável a elaboração da análise de estabilidade desprezando a percolação, pois a análise de percolação se aproxima mais do comportamento real, uma vez que o fluxo interno da pilha condiciona a perda de carga do fluxo dos *outlets* (drenagem interna), fazendo com que as

pressões internas sejam aliviadas, consequentemente corroborando para a estabilidade da pilha e obtenção de fatores de segurança melhores e mais coerentes com a realidade da respectiva estrutura geotécnica.

A Figura 47 apresenta a análise de percolação realizada na Seção A, com o fator de global de 2,8, tanto no método de Spencer quanto no método de Morgenstern e-Price.

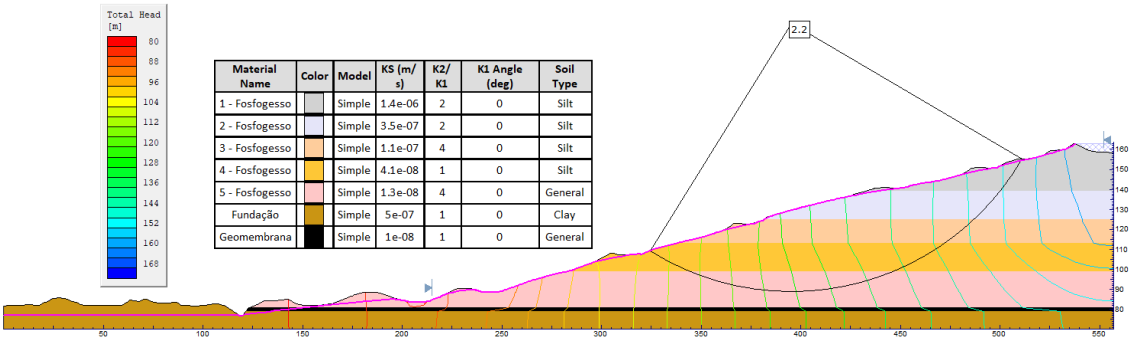
Figura 47 – Seção A



Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 48 apresenta a análise de percolação realizada na Seção B, com o fator de global de 2,2, tanto no método de Spencer quanto no método de Morgenstern e-Price.

Figura 48 – Seção B



Fonte: Autoria própria (2023)

A Tabela 22 apresenta o resumo dos fatores de segurança mínimo obtidos nas análises de percolação realizadas nas seções A e B.

Tabela 22 – Resumo de FS mínimo obtido nas análises

Seção Analisada	Método	FS Global	FS Mínimo Exigido	OBS
A	Spencer	2,8	1,30	Seção Estável
	Morgenstern e Price	2,8	1,30	Seção Estável
B	Spencer	2,2	1,30	Seção Estável
	Morgenstern e Price	2,2	1,30	Seção Estável

Fonte: Autoria própria (2021)

Nota-se ainda, através da Seção analisada A pelos métodos Spencer e Morgenstern e Price, que o fator de segurança mínimo obtido nas análises de percolação é 2,8 para ambos métodos.

Na Seção analisada B, o fator de segurança mínimo obtido nas análises de estabilidade e percolação é 2,2 para ambos métodos.

Todos os fatores de segurança obtidos nas análises atendem ao mínimo de 1,3 recomendando pela NBR 13.028 de “Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água”. Ressalta-se que a respectiva NBR foi utilizada apenas como referência, uma vez que a estrutura em estudo não se comporta como barragens de rejeitos e no Brasil não há uma legislação totalmente voltada para Pilha de Fosfogesso.

Desta forma, é possível afirmar que a estabilidade da estrutura para as condições apresentadas é favorável.

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 - Considerações finais

Estudos geotécnicos aplicados à análise de estabilidade envolvendo taludes de pilha de fosfogesso são extremamente importantes e necessários, tanto para o empreendedor como para a comunidade, pois trata-se de uma estrutura única no Brasil, sobre a qual não se tem muitas informações na literatura brasileira. Possíveis instabilidades com consequentes rupturas, dependendo do potencial, podem chegar a fechar e inviabilizar o negócio devido aos custos consequentes destes tipos de evento.

As análise de estabilidade e percolação realizadas retratam a condição da pilha em Julho de 2021, quando este estudo foi iniciado e foi definido que a base topográfica para as análises seria daquela data, uma vez que a estrutura geotécnica apresenta um dinamismo muito grande com relação às suas operações e, diferentemente de uma barragem de rejeitos convencional ou até mesmo pilha de estéril, a pilha de fosfogesso é considerada pelo empreendedor como uma pilha de produtos. Desta forma, todo material lançado na estrutura pode ser comercializado.

De modo a subsidiar as análises, foram realizados ensaios de laboratório nas amostras coletadas deformadas e indeformadas em campo, sendo: umidade natural, dos limittes de Atteberg, granulometria, ensaios triaxiais e etc.

A base da pilha é toda impermealizada. Por este motivo a cunha de ruptura passa somente pelo fosfogesso, e as análises de estabilidade e percolação são concentradas no respectivo produto.

As análises de percolação são as mais indicadas para avaliar a segurança da Pilha de Fosfogesso, pois consideram as propriedades hidraúlicas das pilha, bem como a perda de carga do fluxo da drenagem interna, que causam alivio de pressão no interior da estrutura geotécnica, fazendo com que a estrutura tenha fatores de segurança mais precisos e condizentes com a realidade de campo.

Os valores obtidos nas análise de percolação para a seção A foram superiores ao mínimo exigido pela NBR13.028/2017, tendo como FS mínimo 2,8 pelos métodos Spencer e

Morgenstern e Price. Para a Seção B, os valores obtidos também foram superiores ao mínimo exigido pela NBR13.028/2017, tendo como FS mínimo 2,2 pelos métodos Spencer e Morgenstern e Price.

Para a condição da pilha de fosfogesso, reclassificada pela FEAM como “empilhamento drenado”, com base em informações de 2021, as análises realizadas consideram a estrutura estável e operando dentro da normalidade, conforme preconizam as exigências da ABNT NBR13.028/2017. A equivalência de entendimento de enquadramento também pode ser observada na Resolução ANM Nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, que traz o conceito de empilhamento drenado. Os resultados obtidos corroboram com as informações identificadas na instrumentação e monitoramento da pilha.

5.2 – Sugestões para pesquisas futuras

Ao fim dessa pesquisa, ficam as seguintes sugestões para estudos futuros:

- Elaborar a análise de tensão-deformação da Pilha de Fosfogesso;
- Elaborar a modelagem 3D da Pilha de Fosfogesso;
- Elaborar análises de estabilidade considerando os métodos pseudo-estáticos;
- Elaborar análises com novas seções de diversos compartimentos, considerando topografia atualizada da Pilha de Fosfogesso;
- Elaborar análise de confiabilidade e ruína da Pilha de Fosfogesso;
- Elaborar análises paramétria/sensibilidade da Pilha de Fosfogesso.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL (ABGE). **Manual de Sondagens**, Boletim n°.3, 5 ed., São Paulo, 1996.

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. Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR 6457**: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, da massa especifica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR6459**: Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR6484**: Sondagem de simples reconhecimento com SPT, Rio de Janeiro, 2020.

____. **NBR7180**: Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR7181**: Análise granulométrica, Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR 9604**: Estabilidade de encostas, Rio de Janeiro, 2016.

____. **NBR9820**: Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagem, Rio de Janeiro, 1997.

____. **NBR16840**: Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos, Rio de Janeiro, 2020.

____. **NBR16843**: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos, Rio de Janeiro, 2020.

____. **BR16867:** Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas. 2020.

____. **Método da balança hidrostática**. Rio de Janeiro, 2020.

ABRAMSON, L.W.; THOMAS, S.; SHARMA, S.; BOYCE, G.M. **Slope Stability and Stabilization Methods**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.

ANA, **Agência Nacional de Águas**, abr, 2016. Disponível em: www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/volume-ii-guia-de-orientacao-e-formularios-para-inspecoes-de-seguranca-de-barragem, acesso em: 10/01/2023

ARDAMAN & ASSOCIATES, INC. **Stability Analyses for stack F. Excavation.** Uberaba, 2020, 6 p.

ARDAMAN & ASSOCIATES, INC. Minimum requirements fot easthen dams used n phosphogypsum stack system impoundments. Uberaba, 2012, 62 p.

ASTM. **Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils.** ASTM D4767 – 11, 2011.

ASTM. **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Condicions.** ASTM D3080 – 11, 2011.

BALBINO. B. **Agrosmart**, Estação meteorológica: como funciona e sua importância na agricultura. 2016. Disponível em: www.agrosmart.com.br. Acesso em: 05 fev. 2023.

BRASIL - **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas** / Agência Nacional de Mineração – ANM, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_2020_ano_base_2019_revisada2_28_09.pdf>. Acessado em 05/06/2022.

BRASIL -**Resolução nº 95** / Agência Nacional de Mineração – ANM, 2022. Disponível em:< https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>. Acessado em 06/06/2022.

BRASIL. **Aprova a nova legislação de barragens de mineração**. ANM, 2022. Disponível em: https://tratamentodeagua.com.br/anm-aprova-nova-legislacao-barragens-mineracao/. Acesso em: 09 fev. 2023.

BISHOP, A. W. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes, **Geotechnique**, Volume 5 Ed. p1, 1955.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia Ambiental.** São Paulo: Oficina de Texto, 2008.

CAMARINI, Gladis; SOUZA, Janaina D., Avaliação das Características do fosfogesso na reciclagem. **Congresso de Iniciação Científica.** Campinas, v. 16, n. 32, p. 41-56, 2019

CAMPANHA, Angela. M**. Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação**. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

CANUT, M. M. C. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

CHANG, W. F.; CHING, D. A.; HO, **R. Phosphogypsum for secondary road construction**. University of Miami. Florida Institute of Phosphate Research, Bartow, Florida, 1989.

CICHY, B., KRASZEWSKI, C., RAFALSKI, L.. Geotechnical properties of phosphogypsum and its use in road engineering. In: WU, W., YU, Hs. (eds). Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer Series: in **Geomechanics and Geoengineering**. Springer, Cham, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97115-5_166. Acesso em: 09 fev. 2023.

COMANCO, C. A. C. et al. **Comanco's Drone Captures Incredible Progress At North Florida Gypsum Stack** fev. 2019. Disponível em: https://comanco.com/blog/comancos-

drone-captures-incredible-progress-at-north-florida-gypsum-stack/. Acesso em: 21 jan. 2023.

COMMETRO, J.C. **Recalque - Benchmark ou Marco de Referência** (MR) abr. 2021. Disponível em: www.commetro.com.br/instrumento-detalhes/1/recalque--bench-mark-ou-marco-de-referencia-mr . Acesso em 19/02/23.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CURT, Anderson. **Pollution from Florida's phosphate mining industry a concern with Hurricane Ian.** Jan.2022. Disponível em: https://www.fox13news.com/news/pollution-florida-phosphate-mining-industry-hurricane-ian. Acesso em: 29/01/23.

DAY, R. **Geotechnical and foundation engineering:** Desing and construction. Nova York: McGraw Hill, 1999.

DARDENNE, Vincent et al. Phosphogypsum stacking: a new approach and case study. In: **Proceedings-International Fertiliser Society**. International Fertiliser Society, 2017. p. 1-24.

DUBIELA, V. **Saiba onde ficam as reservas de fertilizantes no Brasil**. Portal Sou Agro. Disponível em 14 mar. 2022.< https://souagro.net/2022/03/saiba-onde-ficam-as-reservas-de-fertilizantes-no-brasil/>. Acesso em: 29/05/2022.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: Wiley, 1988.

EBANATAW. **As partes de um reservatório**, Disponível em: https://www.ebanataw.com.br/talude/barragem.htm, 2018. Acesso em: 19/02/2023

FADANELLI, Samuel Citon. **Protocolo de agricultura de precisão como ferramenta de sustentabilidade**. Dissertação. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2021.

FALCON. **Closure of Unlined Systems.** 62-673.650. Florida Administrative Code & Florida Administrative Register. 01 de agosto de 1993. Disponível em:<https://www.flrules.org/Gateway/View_notice.asp?id=2296589>. Acesso em: 05/06/2022.

FELLENIUS, W.. Calculation of the Stability of Earth Dams. **2 nd International Congress on Large Darns, International Commission on Large Dams**, Washington, 1936.

FERRARI, F. O. S. **Utilização de fosfogesso, resíduos da produção de cal e areia da extração de ouro para produção de materiais da construção civil**. Dissertação. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

FONSECA, A.R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2003.

FREDLUND, D.G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian **Geotechnical Journal**, 1977. Disponível em:< https://cdnsciencepub.com/doi/10.1139/t77-045>. Acessado em: 05/06/2022.

FULEIHAN, Nadim. (2012). Phosphogypsum disposal-the Pros & Cons of Wet Versus Dry Stacking. **Procedia Engineering**. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.465. Acessado em: 04/04/2021.

GEOCONSULTORIA. **Relatório Técnico.** FF30-RT-74, São Paulo, 2021.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de Taludes**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GOOGLE EARTH 2021. Disponível em: https://earth.google.com/web/@-19.98606488,-47.87891659,4049.52121414a,0d,35y,-0.0049h,6.8302t,359.9997r?utm_source=earth7&utm_campaign=vine&hl=pt-BR Acesso em: 03/02/2023.

HACHICH, W. C. **Modelos Matemáticos e probabilistas em Engenharia Geotécnica**. **Uma sistematização na forma de sonata**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998. Disponível em: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29799.50087. Acessado em: 15/10/2021.

HUSEIN MALKAWI, D.A.; HUSEIN MALKAWI, A.I.; BANI-HANI, K.A. Slope stability analysis for the phosphogypsum stockpiles: A case study for the sustainable management of the phosphogypsum stacks in Aqaba Jordan. **Sustainability** 2022, 14, 15763. Disponível em: https://doi.org/ 10.3390/su142315763. Acesso em: 10/12/2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Exportação de minérios garantiu saldo da balança comercial positivo em 2021**. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/exportacao-minerios-saldo-balancacomercial-positivo-2021/>. Acesso em: 02/02/2022.

JAMBU, N. Earth pressure and bearing capacity calculation by generalized procedure of slices. In: **Int. Conf. on soil mechanics and foundations engineering**. 4. Proceedings. London, 1957.

JAMBU, N. **Slope stability computations**. Soil mechanics and foundation engineering report. Trondheim: Technical University of Norway, 1968.

MACHADO. W.G.F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeito da mineração.** 2007. Dissertação. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MARQUES. **Uso e expectativas sobre o sistema eletrônico de editoração de revistas**, v. 16, n. 32, p. 41-56, 2016. Disponível em: https://www.meiacolher.com/2016/03/cisalhamento-o-que-e-ensaio-tensao-e.html Acesso em: 19/02/2023.

MATOS, T.H.C. **Caracterização hidro-mecânica do fosfogesso e das misturas solo-fosfogesso**. Dissertação. Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

MEDEIROS, C. H. Segurança de barragens: O que fazer para convergir teoria e prática?

XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens. Anais. Goiânia: CBDB, 13 p., 2005.

MESQUITA, G. M. **Aplicação de misturas de fosfogesso e solos tropicais finos na pavimentação**.Dissertação. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2007.

MILBERG. **Florida phosphate plants threaten drinking water, biodiversity**. Disponível em:< Florida Phosphate Plants Threaten Drinking Water, Biodiversity - Milberg | Leading Class Action Law Firm >(2021). Acesso em: 14/05/2022.

MORGENSTERN, N. R., & PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Geotechnique**, London, v.15, 1965.

MOSAIC. **Relatório técnico-pilha de fosfogesso**. CIU21-PILHA-RT01-RO. Uberaba: dez, 2021.

OLIVEIRA, Jorge Ivan. **Estudo do resíduo fosfogesso na formulação de uma pasta para revestimento interno de edifícios**. Tese. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2014.

PATTROL **Estudos geotécnicos pilha de fosfogesso.** Relatório técnico. PAT-RT-LAB-2709-22-000, 1/17, MG, v. 25, 2022.

PATTROL. **Estudos geotécnicos pilha de gesso.** Relatório Técnico. PAT-RT-LAB-2504.21-001 REV.02, 2021

PEIXOTO, I.N. **Igeológico**. Ensaios de caracterização de solo. São Paulo, jan, 2019. Disponível em: http://igeologico.com.br/ensaios-de-caracterizacao-em-solos/. Acesso em: 06/02/23.

PETRONILHO, R. M. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco**. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

PINTO, Carlos Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: São Paulo: Ofícina de textos, 2006.

PINTO, Marcelo Martins. **Avaliação da Implantação de Cobertura Vegetal em uma Pilha de Fosfogesso**. Dissertação. UFMG. Belo Horizonte., 2007

PÖYRY. J. F. Estudo de Dam Break, PAE e PSB das pilhas de Fosfogesso e Lagoas existentes- complexo industrial de Uberaba- MG. **Relatório das sondagens, coleta de amostras e ensaios de laboratório.** RT-CIU-640-17-004, 2018.

PÖYRY, J. F. **Relatório das sondagens, coleta de amostras e ensaios de laboratório**. Mai. São Paulo: 2018

PRATT, John. **Diferença entre gesso e fosfogesso.** Jan.2021. Disponível em: https://pt.strephonsays.com/gypsum-and-phosphogypsum. Acesso em: 29/01/23.

ROBINSON, M.J.C.; DHAR, A.; NAETH, M.A.; NICHOL, C.K. Phosphogypsum Stack Reclamation Using Soil Amendments and Short-Rotational Woody Species. **Land**

2022, 11, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.3390/land11112003. Acesso em: 05/12/22.

SALIBA, Aloysio Portugal Maia. **Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado**. Tese. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009

SANTOS, Maureen; GLASS, Verena (Org.). **Atlas do agronegócio: fatos e números sobre as corporações que controlam o que comemos**. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll, 2018.

SANTOS, R.L.C.; Sobral, L.G.S.; Araújo, R.V.V. Produção de fosfato no Brasil: Complexo de Mineração de Tapira (CMT) / Fosfertil. **XIX ENTMME**, Recife, Pernambuco, 2002.

SCHNAID, F. e ODEBRECHT, E. **Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2ª ed.. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SILVA, M.V.; REZENDE, L.R de.; ANJOS, M.M.M dos.; OLIVEIRA, R.B. de. Phosphogypsum, tropical soil and cement mixtures for asphalt pavements under wet and dry environmental conditions. **Resour. Conserv. Recycl**. 2019, 144, 123–136.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SILVESTRE, O. B., PARREIRA, A. B., KOBAYASHI, A. R. K. **Influência do tipo de cimento na resistência e deformabilidade das misturas de fosfogesso e cimento**. ANPET. Rio de Janeiro, vol. 1, 2001.

SMITH, P.. Gypsum – a world problem? Seminário interno da Empresa Fosfértil sobre fosfogesso. F**osfértil,** Uberaba, 2005.

SMIDERLE, Camila de Souza Dahm. **Segurança de Barragens**: Análise de instrumentos da Barragem de Itaúba. Dissertação. UFRGS. Porto Alegre, 2014.

SPENCER, E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. **Geotechnique**, Vol. 17, 1967.

SPIRLANDELLI. G. S. Impactos ambientais do sulfato de cálcio provenientes da produção de ácido fosfórico. **I Encontro de Desenvolvimento de Processos Agroindustriais.** UNIUBE. Universidade de Uberaba DPTEQ., 2017. Disponível em: http://dspace.uniube.br:8080/jspui/bitstream/123456789/886/1/IMPACTOS%20AMBIENTAIS%20DO%20SULFATO%20DE%20C%c3%81LCIO%20PROVENIENTES%20DA%20PRODU%c3%87%c3%83O%20DE%20%c3%81CIDO%20FOSF%c3%93RICO.pdf. Acessado em 28.05.2022.

SOUZA, Nayra. 21 maiores fábricas de fertilizantes do Brasil. **Só Hélices**, 2022. Disponível em: http://sohelices.com.br/21-maiores-fabricas-de-fertilizantes-do-brasil/. Acesso em: 03 fev. 2023.

TULASI, K., SATYANARAYANA REDDY, C.N.V. (2022). Phosphogypsum Dumping Yards - A Review. In: Dey, A.K., Mandal, J.J., Manna, B. (eds) Proceedings

of the 7th Indian Young. **Geotechnical Engineers Conference**. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 195. Springer, Singapore.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center. Training Documents – **Using HEC-RAS for Dam Break Studies**. TD-39, August 2014.

US EPA. **Characterization of Municipal Solid Waste in the United States**. U.S, Report No. EPA530-R-98-007. Environmental Protection Agency Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste, 1997. Disponível em: <https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/pdf/msw97rpt.pdf>. Acesso em: 02/02/2022.

US FIPR. Phosphogypsum Stack Closure: Evaluation of Phosphogypsum as an Alternate Final Cover. **Flórida Institute of Phosphate research**. Nº 03-125-195, 2002. Disponível em: https://fipr.floridapoly.edu/wp-content/uploads/2014/11/03-125-195Final. Acesso em:10/02/2023.

WALM. **Diagnóstico Técnico de Enquadramento Legal da Pilha de Gesso de Uberaba**, 2021.

WALM. **Diagnóstico de enquadramento técnico pilha de gesso de Uberaba nota técnica**. n. WA12217201-1-GT-rte-0006, 2021.

WALM. **Estudo técnico Diagnóstico Técnico de Enquadramento Legal da Pilha de Gesso de Uberaba**. Pilha de gesso de Uberaba - Analise de ensaios de campo e laboratório, especificação técnica. WA12217201-1-GT-RTE-004. 2021

XIONG, Y. A dam break analysis using HEC-RAS. **Journal of Water Resource and Protection.** Mississippi, p. 370-379, 2011.

ZMEMLA R, SDIRI A, NAIFAR I, BENJDIDIA M, ELLEUCH B. Tunisian phosphogypsum tailings: Assessment of leaching behavior for an integrated management approach [Internet]. **Environmental Engineering Research**. Korean Society of Environmental Engineering; vol. 25, 2019. p. 345– 55. Disponível em: DOI: https://doi.org/10.4491/eer.2019.046. Acessado em: 16/09/2021.