



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



THALES FURTADO COTA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA DE BARRAGEM DE
REJEITO: ELABORAÇÃO DE CARTA DE RISCO**

OURO PRETO

Março 2025

THALES FURTADO COTA

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO NÍVEL D'ÁGUA DE BARRAM DE REJEITO:
ELABORAÇÃO DE CARTA DE RISCO**

Trabalho Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheiro Civil na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite

Coorientador: Prof. Thiago Cruz Bretas

OURO PRETO

Março 2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C843a Cota, Thales Furtado.

Análise de sensibilidade do nível d'água de barragem de rejeito
[manuscrito]: elaboração de carta de risco. / Thales Furtado Cota. - 2025.
71 f.

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite.

Coorientador: Prof. Me. Thiago Cruz Bretas.

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

1. Engenharia geotécnica - Monitoramento geotécnico. 2. Barragens
de rejeitos. 3. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 4. Documentos
oficiais - Carta de risco. 5. Hidrometria - Nível das águas. I. Leite, Adilson
do Lago. II. Bretas, Thiago Cruz. III. Universidade Federal de Ouro Preto.
IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thales Furtado Cota

Análise de Sensibilidade do Nível d'água de Barragem de Rejeito: Elaboração de Carta de Risco

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil

Aprovada em 26 de março de 2025

Membros da Banca

Professor Dr. Adilson do Lago Leite - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Professor Dr. Felipe de Campos Loch (Universidade Federal de Ouro Preto)
Professor MSC Thiago Cruz Bretas (TBretas Consultoria - PUC Minas)

Prof. Dr. Adilson do Lago Leite, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/03/2025



Documento assinado eletronicamente por **Adilson do Lago Leite, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/05/2025, às 14:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0915023** e o código CRC **08A62640**.

*Em memória do meu avô, Walter, que se foi antes de
me ver escolher, mesmo sem saber ainda,
seguir a profissão que mais transbordaria seu
coração de orgulho. Seus olhos não
testemunharam minha jornada na graduação,
mas senti sua presença e cuidado todas as
vezes que visitou meus sonhos durante esses
anos. Fui salvo em cada uma delas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Mislene, por todo apoio, amor, carinho, compreensão e incentivo. Sem você nada disso seria possível.

A minha irmã, Larissa, por todos os momentos, cuidados e atenção.

Aos meus avós, Walter (em memória) e Deli, por serem minha referência e motivação para nunca desistir.

A toda minha família e amigos pelo incentivo, conversa, risadas, vocês foram essenciais para a conclusão dessa etapa.

A Carine, por ser minha confidente e meu porto seguro durante todo esse tempo.

Aos professores, por todo ensinamento e dedicação. Em especial, ao Adilson do Lago Leite pela disponibilidade e atenção nessa etapa final.

A Escola de Minas e a Fundação Gorceix, pelo ensino de qualidade.

A República Baviera por proporcionar muito mais que um lar, uma família.

RESUMO

Considerando os riscos socioambientais decorrentes de falhas estruturais, analisar a segurança de barragens de rejeito configura-se como medida indispensável na engenharia geotécnica. Este trabalho tem como objetivo a análise da sensibilidade do nível d'água em barragens de rejeito, com foco na elaboração de níveis de controle que auxilie na identificação de potenciais gatilhos estáticos de ruptura. Para isso, foram analisados dados de monitoramento geotécnico de uma barragem real, incluindo dados referentes a leituras de piezômetros e indicadores de nível d'água, a fim de compreender a influência da variação da linha freática na estabilidade da estrutura. A análise foi feita por meio de simulações numéricas com o uso do software Slide2, permitindo a avaliação do fator de segurança sob diferentes cenários de variação da linha freática, considerando condições operacionais normais, atenção, alerta e emergência. Os resultados demonstram que o aumento do nível d'água influencia negativamente a estabilidade da estrutura, reduzindo o fator de segurança a níveis críticos em situações extremas. A carta de risco proposta fornece subsídios técnicos para a tomada de decisão e a implementação de medidas preventivas, colaborando para a mitigação dos riscos e a preservação da integridade da barragem.

Palavras-chaves: Monitoramento geotécnico, barragem de rejeito, estabilidade de taludes, carta de risco, variação do nível da água.

ABSTRACT

Considering the socio-environmental risks resulting from structural failures, analyzing the safety of tailings dams is an essential measure in geotechnical engineering. This study aims to analyze the sensitivity of the water level in tailings dams, focusing on the development of control thresholds to help identify potential static failure triggers. To achieve this, geotechnical monitoring data from a real dam were analyzed, including piezometer readings and water level indicators, in order to understand the influence of phreatic line variations on the stability of the structure. The analysis was conducted through numerical simulations using Slide2 software, enabling the assessment of the factor of safety under different scenarios of phreatic line variation, considering normal, attention, alert, and emergency operating conditions. The results show that an increase in the water level negatively affects the structure's stability, reducing the factor of safety to critical levels under extreme conditions. The proposed risk chart provides technical support for decision-making and the implementation of preventive measures, contributing to risk mitigation and the preservation of dam integrity.

Keywords: Geotechnical monitoring, tailings dam, slope stability, Risk chart, Water level variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de medidor de nível d'água	18
Figura 2 – Piezômetro de tudo aberto instalado em um furo de sondagem.....	19
Figura 3 – Exemplo esquemático do funcionamento de um piezômetro pneumático.....	21
Figura 4 – Exemplo esquemático do funcionamento de um piezômetro pneumático.....	22
Figura 5 – Esquema de funcionamento de um transdutor de corda vibrante.....	23
Figura 6 – Esquema de funcionamento de um piezômetro de corda vibrante.....	23
Figura 7 – Esquema de funcionamento de um piezômetro elétrico.....	25
Figura 8 – Piezômetro de fibra óptica.	26
Figura 9 – Etapas de desenvolvimento do fenômeno piping.....	30
Figura 10 – Superfície de ruptura acima e abaixo do pé do talude, respectivamente, à esquerda e à direita.	33
Figura 11 – Esforços na fatia n.....	34
Figura 12 – Fatia genérica e polígono de forças (Método de Spencer).....	36
Figura 13 – Algoritmo do Particle Swarm Search.....	38
Figura 14 - Fluxograma de atividades	41
Figura 15 – Seção 1	44
Figura 16 – Seção 2	44
Figura 18 – Correlação entre características de campo de solos e rochas e a resistência à compressão uniaxial	46
Figura 19 – Seção 1 com nível d'água máximo de acordo com as leituras dos instrumentos de 2024.	49
Figura 20 – Seção 2 com nível d'água máximo de acordo com as leituras dos instrumentos de 2024.	49
Figura 21 – Médias de precipitações durante 75 anos.....	52
Figura 22 – Métodos de análise.....	54
Figura 23 – Tipos de superfície para cunhas circulares.....	55
Figura 24 – Tipos de superfície para cunhas não circulares.....	55
Figura 25 – Nível d'água máximo do ano 2024 – Seção 1	56
Figura 26 – Nível d'água máximo do ano 2024 – Seção 2	57
Figura 27 – Nível d'água máximo para o tempo de retorno de 10.000 anos – Seção 1 ...	58
Figura 28 – Nível d'água máximo para o tempo de retorno de 10.000 anos – Seção 2 ...	59

Figura 29 – Nível de atenção – Seção 1	60
Figura 30 – Nível de atenção – Seção 2	61
Figura 31 – Nível de alerta – Seção 1.....	62
Figura 32 – Nível de alerta – Seção 2.....	63
Figura 33 – Nível de emergência – Seção 1	64
Figura 34 – Nível de emergência – Seção 2	65
Figura 35 – Resumo dos níveis de emergência – Seção 1.....	66
Figura 36 – Resumo dos níveis de emergência – Seção 2.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fissuração típica devida a recalque diferencial em barragens (Sherard et al, 1963)	16
Tabela 2: Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração	38
Tabela 3: Instrumentos	47
Tabela 4: Leituras máximas de 2024 dos instrumentos.....	48
Tabela 5: Precipitações máximas por ano hidrológico – Estação Rio do Peixe (MMV)	50
Tabela 6: Quantis de precipitação para períodos de retorno notáveis (mm)	53
Tabela 7: Níveis de controle da instrumentação da barragem	67

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo	15
1.1.1. Objetivos específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Monitoramento por instrumentos	16
2.2. Medidores de nível d'água	17
2.3. Piezômetros	18
2.3.1. Piezômetro de tubo aberto ou de Casagrande.....	19
2.3.2. Piezômetro pneumático	20
2.3.3. Piezômetro hidráulico.....	21
2.3.4. Piezômetro de corda vibrante	23
2.3.5. Piezômetro de resistência elétrica.....	24
2.3.6. Piezômetro de fibra óptica	25
2.4. Instrumentos para avaliação de deslocamentos.....	26
2.5. Modos de falha	28
2.5.1. Liquefação	28
2.5.2. Erosão interna - Piping	29
2.5.3. Galgamento.....	31
2.5.4. Estabilidade do maciço	31
2.6. Análises de estabilidade.....	32
2.6.1. Método de equilíbrio limite (MEL).....	32
2.6.2. Método Numérico de Elementos Finitos (MEF)	36
2.6.3. Métodos de pesquisa de superfícies de ruptura	37
2.6.4. Estabilidade de barragens de rejeito	38

3. METODOLOGIA.....	40
3.1. Seções analisadas	43
3.2. Parâmetros de resistência	44
3.3. Instrumentação	47
3.4. Níveis do reservatório e da freática.....	47
3.5. Estudo hidrológicos	49
3.6. Parâmetros do software	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1. Análises preliminares	56
4.2. Nível de atenção	59
4.3. Nível de alerta	61
4.4. Nível de emergência.....	63
4.5. Análise sintética dos resultados	65
5. CONCLUSÃO.....	69

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade essencial para o desenvolvimento econômico e para o fornecimento de matérias-primas, porém pode apresentar grandes riscos ambientais e sociais na ausência de boas práticas de engenharia. Dentre os principais desafios estão a degradação ambiental, a contaminação de recursos hídricos e a segurança de barragens de rejeito, que necessitam de monitoramento contínuo e políticas rigorosas de gestão de risco (Silva, 2011).

A consolidação e interpretação dos dados de monitoramento, associadas a simulações numéricas bem elaboradas, são capazes de prover análises profundas e mais assertivas perante a condição atual da barragem, podendo auxiliar na identificação precoce de potenciais gatilhos de falha, criando níveis de alerta importantes para a manutenção da segurança da estrutura.

Dessa forma, o monitoramento tornou-se uma prática essencial e insubstituível em qualquer empreendimento geotécnico, especialmente no que se refere à segurança e integridade de estruturas de grande porte, como barragens de rejeito. Dentre os instrumentos comumente utilizados estão: medidores de nível de água, piezômetros, inclinômetros, medidores de recalques, marcos superficiais, medidores de vazão e interferométricos via InSAR.

Entretanto, a grande quantidade de gerados por esses instrumentos impõe desafios na sua correta interpretação. Neste contexto, a questão central deste estudo é: Como identificar gatilhos de falha em barragens de rejeito por meio de dados de monitoramento geotécnico?

O presente estudo visa analisar a sensibilidade do nível d'água em barragens de rejeito, com ênfase na elaboração de uma carta de risco para identificar gatilhos de ruptura. Para tal, foram utilizados dados de monitoramento geotécnico de uma barragem real, abrangendo medições piezométricas e de nível d'água, para compreender a influência da variação da linha freática na estabilidade da estrutura. A análise foi realizada por meio de simulações numéricas utilizando o software Slide2, permitindo a avaliação do fator de segurança sob diferentes cenários de variação do nível d'água. A pesquisa tem como objetivo contribuir para a segurança operacional das barragens, oferecendo subsídios para a tomada de decisões e a implementação de medidas preventivas. A determinação de níveis de controle se alinha com a necessidade crescente de se adotar políticas rigorosas de gestão de riscos nas operações geotécnicas.

1.1. Objetivo

Identificar possíveis gatilhos de ruptura de uma barragem de rejeito com base em dados de monitoramento geotécnico, através de análises numéricas, e determinar níveis de controle para a segurança da estrutura.

1.1.1. Objetivos específicos

- Consolidar e analisar os dados de monitoramento geotécnico
- Avaliar problemas recorrentes na coleta de dados
- Verificar a influência da variação do nível d'água na estabilidade da estrutura
- Examinar os principais modos de falha decorrentes dessa variação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os seis principais tópicos abordados são: monitoramento dos instrumentos, medidores de nível d'água, piezômetros, instrumentos para avaliação de deslocamento, modos de falha e análises de estabilidade de barragens de rejeito. Esses temas são essenciais para interpretação correta acerca dos dados obtidos.

2.1. Monitoramento por instrumentos

O monitoramento dos instrumentos instalados nas barragens permite a avaliação contínua do comportamento da estrutura, auxiliando na identificação de possíveis anomalias, fornecendo subsídios e viabilizando a tomada de decisões, contribuindo para a sua segurança global.

Os instrumentos são empregados no monitoramento de parâmetros essenciais à segurança e à confiabilidade da estrutura. A Tabela 1 apresenta os principais dados que devem ser acompanhados, com o objetivo de assegurar que a barragem permaneça em condições adequadas de estabilidade e desempenho.

Tabela 1 – Informações que podem ser coletadas através da instrumentação (Sherard et al, 1963).

Barragem de concreto	Barragem de aterro	Fundações
Deformações estruturais	Deformações no corpo da barragem	Deformações movimentos do encontro
Movimentos especiais (trincas, juntas)	Deslocamentos especiais (vínculos com uma estrutura de concreto)	Deslocamentos especiais (trincas, diaclases)
Temperatura do corpo da barragem	Temperatura do corpo da barragem para detectar infiltração (possível)	Temperatura do corpo da barragem para detectar infiltração (possível)
Pressões de elevação (Contato fundação de concreto e na rocha)	Pressões intersticiais no corpo da barragem de aterro e nível piezométrico	Pressões intersticiais Pressão de elevação do corpo profundo Nível piezométrico Nível da linha freática

Barragem de concreto	Barragem de aterro	Fundações
Taxas de infiltração e drenagem	Taxas de infiltração e drenagem	Taxas de infiltração e drenagem e ressurgências (fontes)
Análise química da água de infiltração turbidez (possível)	Análise química da água de infiltração turbidez	Análise química da água de infiltração turbidez

Fonte: DAM SURVEILLANCE GUIDE – Bulletin 158 – International Commission on Large Dams (ICOLD).

O projeto de instrumentação deve atender às especificidades de cada estrutura, não havendo recomendação mínima por norma em relação a quantidade de instrumentos. A seleção dos instrumentos é feita de acordo com a necessidade de monitoramento da estrutura, porém a norma comenta sobre a obrigatoriedade do monitoramento ser realizado 24/7, considerando parâmetros que assegurem a estabilidade da barragem. Além disso, a disposição desses instrumentos é definida pelos responsáveis técnicos pelo empreendimento, sendo normalmente instaladas em seções consideradas críticas, possibilitando uma melhor avaliação do comportamento da estrutura.

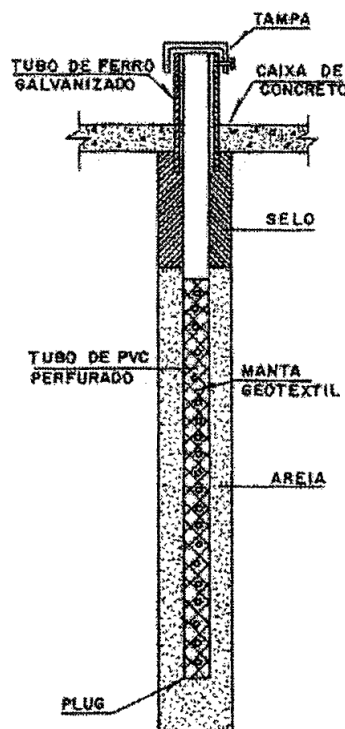
2.2. Medidores de nível d'água

Dentre os instrumentos utilizados para determinar a posição da linha freática nos maciços terrosos, o mais simples e eficaz consiste na execução de um furo de sondagem, como os realizados por trado, ou escavação de poço (Cruz, 2004). Para garantir a integridade estrutural do furo e evitar o colapso das suas paredes, recomenda-se a instalação de um tubo PVC perfurado, envolto de um material filtrante, como camadas de manta geotêxtil, e por um material drenante, como areia. Além disso, acima do material filtrante é necessário realizar a vedação e sinalização na superfície do terreno, evitando-se infiltração indesejada de materiais externos e garantindo a integridade do instrumento. Essa vedação normalmente é feita com selo de bentonita e concreto na superfície (Figura 1).

A medição do nível d'água é feita por meio de um cabo elétrico graduado, contendo dois condutores e um sensor em sua extremidade. Esse sensor é composto por dois eletrodos dispostos concêntricamente, isolados entre si. O sensor é inserido no tubo e quando atinge o nível d'água, a água fecha o circuito elétrico e um aviso sonoro é emitido. A leitura é feita através de uma trena considerando a inclinação junto à graduação, informação obtida através

do deslocamento do ponteiro do galvanômetro, que é repassada a extremidade superior do tubo de PVC (Figura 1).

Figura 1 – Esquema de medidor de nível d'água.



Fonte: Cruz (2004).

De acordo com Fonseca (2003), as principais vantagens dos medidores de nível d'água são a confiabilidade, a simplicidade e a possibilidade de verificação do desempenho por meio de ensaios de equalização, que consistem na adição ou remoção de água pelo tubo, seguido de leituras até a estabilização do nível.

2.3. Piezômetros

O piezômetro é um dos instrumentos mais utilizados na engenharia geotecnia e hidrogeológica. Sendo responsável por medir as pressões da água intersticial no solo ou na rocha, monitoramento do nível d'água, controle da eficiência dos sistemas de drenagem, auxiliando na confiabilidade das avaliações de estabilidade das estruturas.

Os piezômetros são comumente utilizados no controle do nível d'água em barragens de rejeito, podendo emitir leituras manuais ou automatizadas e detectando variações com precisão

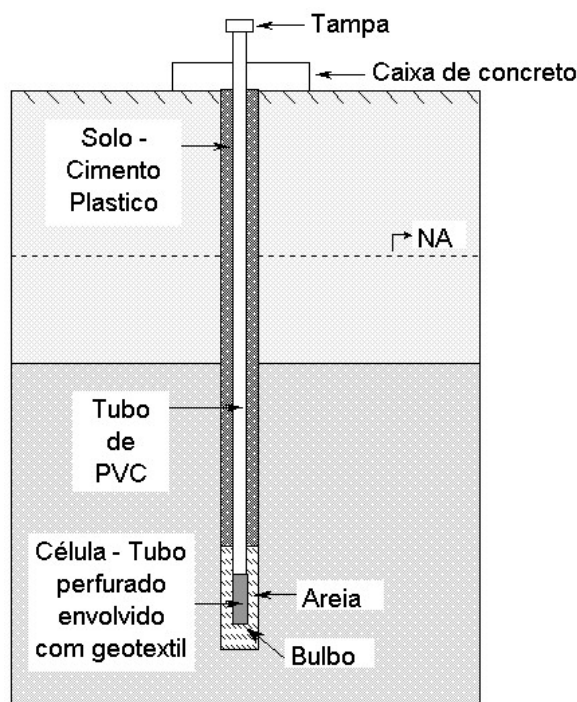
milimétrica. Os modelos de piezômetros mais utilizados são os de tubo aberto (Casagrande), o hidráulico, o pneumático e o de corda vibrante.

A seleção do tipo de piezômetro a ser utilizado deve considerar diversos aspectos, como a precisão do monitoramento de poropressões, posição do equipamento em relação ao sistema de leitura, disponibilidade do instrumento no mercado e custos. Diante dessas variáveis, o modelo mais adequado é aquele que se adapta melhor as particularidades do projeto. Conclui-se que não existe um modelo de piezômetro ideal, mas sim o mais adequado a cada situação.

2.3.1. Piezômetro de tubo aberto ou de Casagrande

O piezômetro de tubo aberto, também conhecido como piezômetro de Casagrande ou *standpipe*, é um modelo amplamente utilizado no monitoramento de barragens. Segundo Cruz (2004), o modelo é utilizado com recorrência nas fundações, ombreiras, filtros e no corpo das barragens, além de ser empregado durante os processos de escavações. Este tipo piezômetro é indicado para medições em pequenas profundidades. A Figura 2 ilustra a instalação de um piezômetro de tubo aberto em um furo de sondagem, destacando a proteção da superfície com uma tampa.

Figura 2 – Piezômetro de tudo aberto instalado em um furo de sondagem.



Fonte: Fonseca (2003).

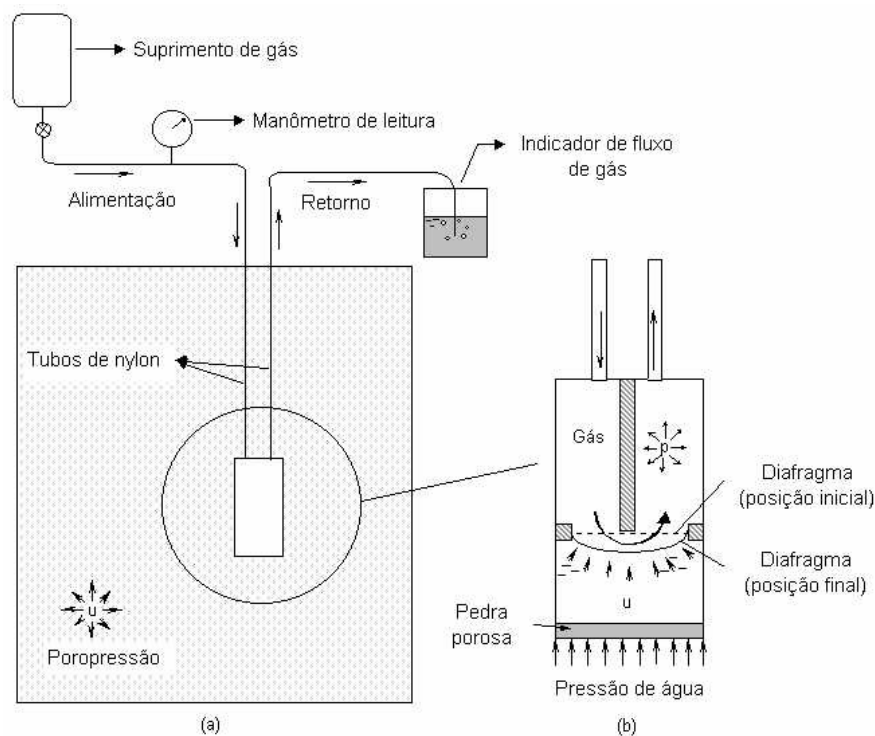
Fonseca (2003) aponta que as principais vantagens do piezômetro de tubo aberto são: elevada confiabilidade, estrutura simplificada, durabilidade e custos reduzidos. Além disso, destaca-se a possibilidade da verificação do seu desempenho ao longo do tempo. No entanto, devem ser destacadas algumas limitações, como: elevado tempo de resposta em materiais com baixa permeabilidade, interferência no ambiente de construção, não é adequado para medir poropressão durante o período de execução da obra e não permite a leitura de pressões negativas. – Exemplo esquemático do funcionamento de um piezômetro pneumático.

2.3.2. Piezômetro pneumático

Fonseca (2003) comenta que a medida de poropressão deste modelo de piezômetro é realizada através de um processo pneumático, podendo ser realizado por injeção de um gás. Tendo por objetivo principal a equalização das pressões internas na célula piezométrica, ao mesmo tempo em que promove a deflexão do diafragma a ela associado.

De acordo com Cruz (2004), o procedimento de leitura consiste em abrir gradualmente a válvula do recipiente que contém o gás comprimido, permitindo sua passagem de modo controlado. Em seguida, observa-se a indicação do retorno do gás ao painel. Após essa etapa, a válvula é fechada, e aguarda-se estabilização da pressão registrada no manômetro para obtenção da leitura precisa, tornando a poropressão igual a leitura do instrumento (Figura 3).

Figura 3 – Exemplo esquemático do funcionamento de um piezômetro pneumático.



Fonte: Fonseca (2003).

O piezômetro pneumático possui diversas vantagens, dentre as principais destacam-se a leitura centralizada, baixa interferência durante o período de construção, independência dos recalques sofridos. Além disso, não requer a circulação de água desaerada, não fornece água ao maciço, insensibilidade a descargas atmosféricas, possui tempo de resposta relativamente curto com tecnologia de fabricação relativamente simples.

Como pontos negativos, podem ser destacadas a menor confiabilidade na medição de pressões neutras negativas, a sensibilidade inferior em comparação aos sensores de corda vibrante, necessidade de recarga periódica das ampolas de gás comprimido, geralmente nitrogênio.

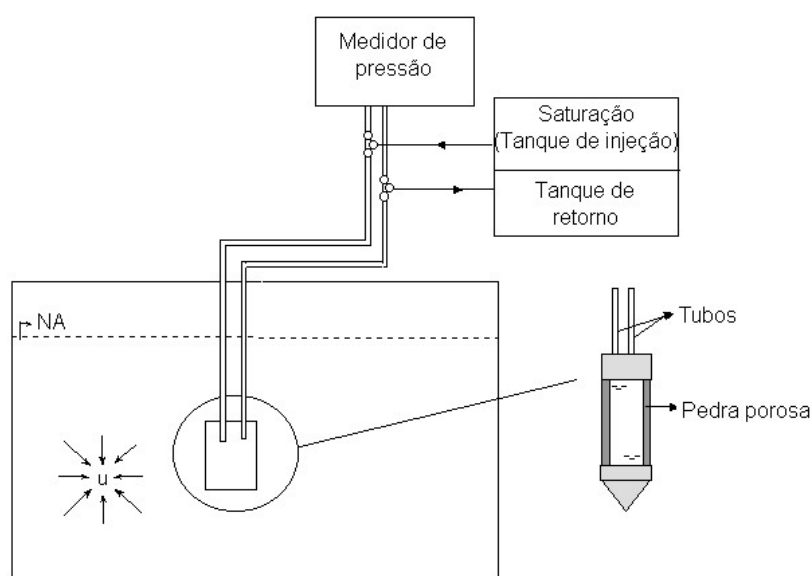
2.3.3. Piezômetro hidráulico

Segundo Silveira (2006), os piezômetros hidráulicos foram elaborados para instalação na fundação e no aterro de barragens de terra durante a construção. Cruz (2004) comenta sobre a grande utilização desse instrumento durante o período de enchimento e operação dos reservatórios.

Fonseca (2003) relata que os piezômetros hidráulicos são compostos por uma pedra porosa conectada a um painel de leitura externo, por meio de dois tubos flexíveis de aproximadamente 3 mm de diâmetro, feitos em nylon e revestidos com polietileno (Figura 4). Os tubos são saturados com água destilada e livre de gases dissolvidos, garantindo a eficiência na transmissão das variações de pressões. A pedra porosa permite o contato entre a água presente nos poros do solo ou nas fraturas de materiais rochosos com a água contida no interior da tubulação, assim como no painel de leituras. Dessa forma, qualquer alteração na pressão intersticial próximas a célula piezométrica é transferida para o sistema de medição externo, que pode ser composto por manômetros mecânicos ou de mercúrio, além de transdutores elétricos de pressão.

Entre as principais vantagens dos piezômetros hidráulicos, destacam-se sua simplicidade operacional, confiabilidade e rápida resposta, mesmo que em solos de baixa permeabilidade. Além disso, pode ser utilizado para realização de ensaios de permeabilidade in situ (carga variável ou constante), medir poropressão negativas e não causa interferência nas etapas construtivas.

Figura 4 – Exemplo esquemático do funcionamento de um piezômetro pneumático.



Fonte: Fonseca (2003).

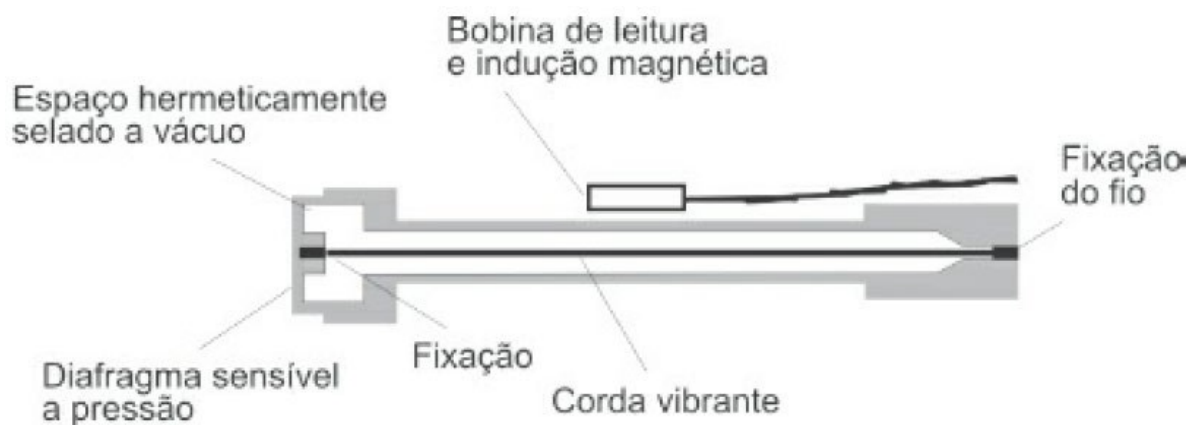
No entanto, apresenta algumas limitações, sendo a principal delas a impossibilidade de realizar leituras das pressões quando o nível piezométrico da célula estiver abaixo dos medidores de pressão, assim recomenda-se que esse desnível não ultrapasse 6 metros, a fim de evitar problemas de cavitação no sistema.

2.3.4. Piezômetro de corda vibrante

De acordo com Silveira (2006), a técnica de medição empregando corda vibrante foi desenvolvida próximo de 1930. Considerado instrumento de alta sensibilidade, ele funciona a partir da transmissão da pressão intersticial da água por meio de uma pedra porosa até o diafragma interno. A deflexão desse diafragma é então captada por um transdutor de corda vibrante posicionado perpendicularmente ao seu plano.

Na Figura 5, apresenta-se uma ilustração do mecanismo de funcionamento do piezômetro, destacando a disposição da corda, da pedra porosa e sua interface com a água. Na Figura 6, é possível observar diferentes modelos de piezômetros de corda vibrante, evidenciando variações nos formatos e nas posições da pedra porosa.

Figura 5 – Esquema de funcionamento de um transdutor de corda vibrante.



Fonte: Silveira (2006).

Figura 6 – Esquema de funcionamento de um piezômetro de corda vibrante.



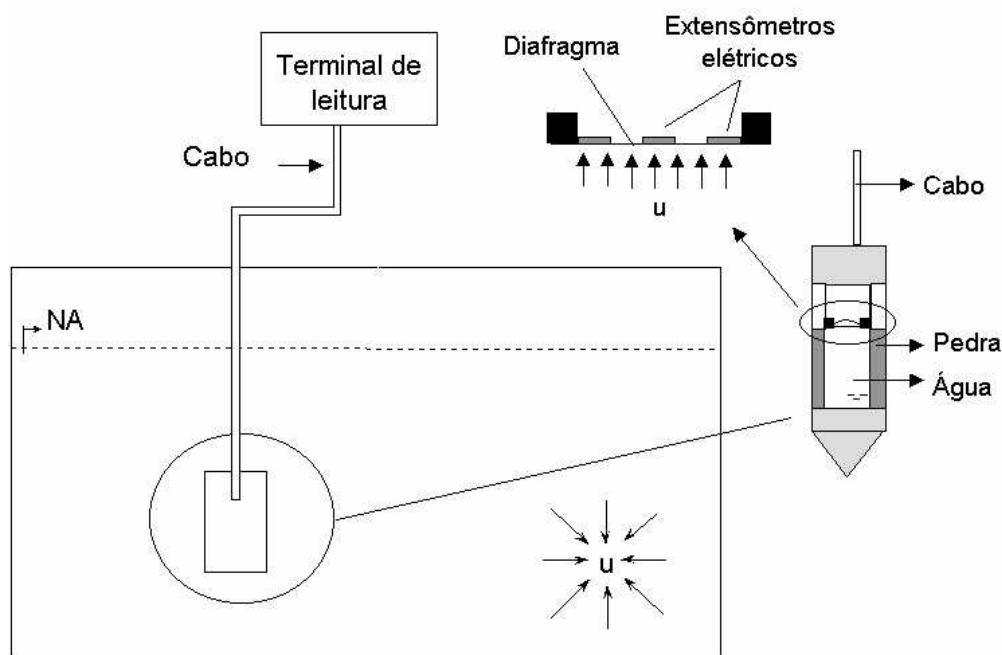
Fonte: Silveira (2006).

Esses instrumentos são bastante difundidos em monitoramento de barragens de terra, destacando-se pela elevada precisão, alta sensibilidade e capacidade de leitura remota, o que possibilita sua integração aos sistemas automatizados de auscultação dessas estruturas.

2.3.5. Piezômetro de resistência elétrica

Conforme exposto por Fonseca (2003), os piezômetros de resistência elétrica possuem um diafragma de aço inoxidável, em que são instalados extensômetros elétricos de resistência (Figura 7). As variações na poropressão provocam deflexões no diafragma, resultando em alterações imediatas na resistência elétrica dos extensômetros fixados em sua superfície. Essas variações são convertidas em um sinal elétrico proporcional à poropressão medida, sendo posteriormente captadas por um medidor externo.

Figura 7 – Esquema de funcionamento de um piezômetro elétrico.



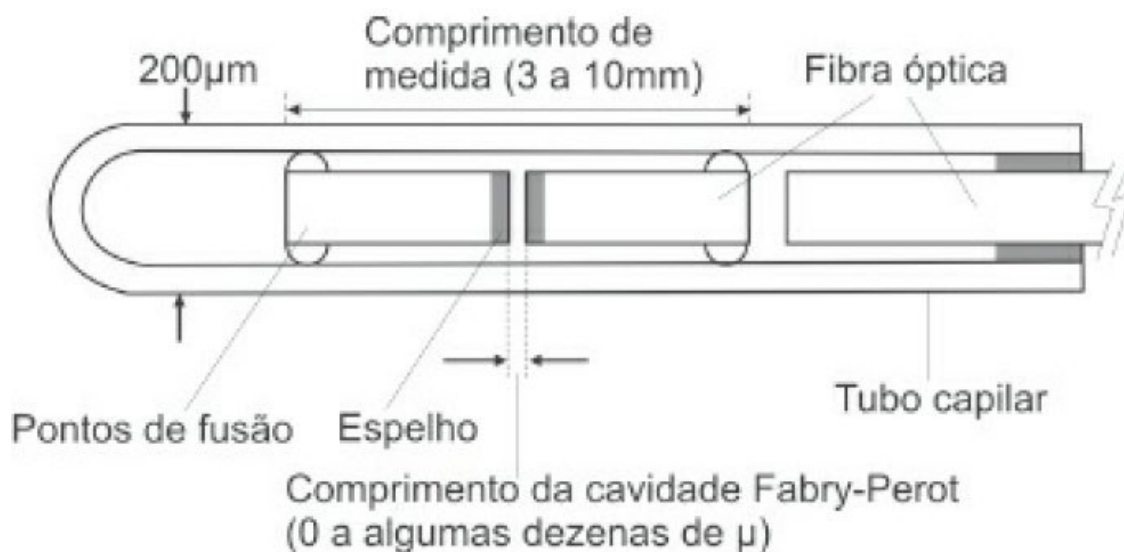
Fonte: Fonseca (2003)

Cruz (2004) relata que os piezômetros de resistência elétrica se destacam por apresentarem tempos de resposta reduzidos, uma vez que demandam um volume mínimo de água para provocar deflexão do diafragma do transdutor. Além disso, são capazes de realizar medições dinâmicas da pressão neutra com registro contínuo, característica relevante para o monitoramento de barragens localizadas em áreas de elevada sismicidade. Outro ponto positivo do instrumento é a facilidade na automação das leituras, mesmo em condições estáticas, bem como a capacidade de medir pressões neutras negativas.

2.3.6. Piezômetro de fibra óptica

Os piezômetros de fibra óptica são dispositivos projetados para conduzir um feixe de luz branca através de um cabo, garantindo a propagação do sinal com velocidade elevada e mínima perda de intensidade do fluxo ao longo de grandes distâncias. A partir do fenômeno da reflexão, torna-se possível detectar o nível de água, uma vez que este está diretamente relacionado à deformação observada em uma membrana sensível à variação de pressão (Figura 8).

Figura 8 – Piezômetro de fibra óptica.



Fonte: Silveira (2006).

Dentre as vantagens dos piezômetros de fibra óptica, destacam-se a sua alta sensibilidade e precisão, baixa atenuação de sinal, permitindo transmissão de dados por longas distâncias. Outro aspecto relevante é a imunidade a interferências eletromagnéticas, visto que não são afetados por campos magnéticos ou ruídos elétricos. Além disso, existe a possibilidade do monitoramento em tempo real dos piezômetros de fibra óptica, permitindo uma análise de dados continua facilitando a identificação de variações no nível d'água.

2.4. Instrumentos para avaliação de deslocamentos

Para controle de deslocamentos em barragens de rejeito são utilizados instrumentos capazes de detectar movimentação horizontal e vertical. De acordo com Bartholomew e Murray (1987), os recalques verticais estão relacionados com adensamento dos materiais que compõem a fundação ou o próprio maciço da barragem, além da dissipação das poropressões geradas durante a construção. Por outro lado, os deslocamentos horizontais estão relacionados com o empuxo do reservatório, através da propagação lateral dos materiais da fundação ou ainda pela baixa resistência ao cisalhamento dos solos que compõe a estrutura.

Os instrumentos habitualmente utilizados na mineração para detectar movimentos são: inclinômetros, extensômetros, prismas, tiltímetros, InSAR (*Synthetic Aperture Radar Interferometry*), sismógrafos e sensores de fibras ópticas.

Os inclinômetros são utilizados para medir deslocamentos horizontais em solos. Para o seu funcionamento é necessário a inserção de um tubo vertical no corpo da barragem, através desse tubo é inserida uma sonda capaz de detectar mudanças de inclinação ao longo do canal, permitindo detectar deslocamentos e variações ao longo do tempo.

O extensômetro por sua vez é utilizado para detecção tanto de deslocamentos verticais quanto horizontais ao longo de um eixo específico dentro do corpo da barragem. O extensômetro é responsável por medir a mudança de distância entre dois pontos em diferentes profundidades.

Os marcos superficiais são lidos através da estação total, geralmente robotizadas, acompanhando a movimentação superficial das barragens. As placas dos marcos são fixadas em posições estratégicas. Os dados coletados diariamente são comparados a posição de instalação, através da diferença entre as duas coordenadas é possível obter o deslocamento da estrutura.

Os tiltímetros são utilizados para monitorar pequenas mudanças de inclinação em estruturas e superfícies. O instrumento detecta variação do ângulo de inclinação dos taludes, podendo indicar deslocamentos antes de ocorrer falhas maiores.

Insar é uma técnica avançada de sensoriamento remoto utilizada para monitorar deformações e deslocamentos em grandes áreas com alta precisão. Baseia-se na análise de imagens obtidas por satélites equipados com radares de abertura sintética (SAR), capturadas em diferentes momentos sobre a mesma região. A comparação entre essas imagens permite identificar variações na topografia da superfície ao longo do tempo. Apesar de sua ampla cobertura e boa resolução temporal, o InSAR pode apresentar menor precisão quando comparado com outros equipamentos.

Sismógrafos são utilizados para medir vibrações e deslocamentos causados por atividades sísmicas. Eles são capazes de registrar a intensidade, a frequência e a duração das vibrações que podem impactar a estabilidade de estruturas como barragens. Esses dispositivos também são úteis na detecção de vibrações provocadas por atividades antrópicas, como operações de mineração ou o uso de equipamentos pesados, que podem induzir deslocamentos estruturais.

Sensores de fibras ópticas são capazes de realizar monitoramentos contínuos de deslocamentos e deformações. Esse instrumento é capaz de detectar deformações, deslocamentos e tensões em tempo real ao longo da fibra óptica instaladas no interior da barragem.

2.5. Modos de falha

Os modos de falha típicos de barragens são estabilidade, liquefação, galgamento e piping. Esses processos podem estar associados a uma série de fatores, como condições ambientais, interferência antrópica e ausência de um sistema de monitoramento eficiente. Frequentemente, o maciço da barragem sofre modificações ao longo do tempo devido à necessidade de ampliar sua capacidade de armazenamento de rejeitos. O maciço inicial é progressivamente adaptado por meio de alteamentos sucessivos, com o objetivo de aumentar o volume armazenado, o que acarreta desafios adicionais tanto para o projeto quanto para a garantia da segurança estrutural da barragem.

Nesse contexto, a implementação de um sistema de drenagem eficiente é imprescindível para garantir a estabilidade e segurança das barragens. A instalação da drenagem interna constitui de uma prática amplamente adotada em diferentes métodos construtivos, com a finalidade de mitigar os riscos associados ao acúmulo excessivo de poropressão. Este sistema contribui diretamente para o controle do fluxo de água no interior do maciço, prevenindo processos que possam comprometer a estabilidade e induzir movimentações na estrutura.

Casos de rompimento de barragem sempre foram objetivo de estudo, contribuindo significativamente para a compreensão dos principais gatilhos envolvidos nos mecanismos de ruptura dessas estruturas. Entre os modos de falha mais relevantes, destacam-se gatilhos estáticos e dinâmicos, como o aumento da poropressão, liquefação, erosão interna (piping), sismos, galgamento e instabilidade do maciço. A análise detalhada desses gatilhos é fundamental para a prevenção de acidentes e a mitigação de riscos em empreendimentos que envolvem barragens.

2.5.1. Liquefação

De acordo com Wahl (2001), a liquefação ocorre quando um solo saturado, sujeito a tensões dinâmicas ou estáticas, perde temporariamente sua resistência ao cisalhamento e se comporta como um fluido.

Segundo da Silva (2011), a liquefação pode ser caracterizada pelo aumento das pressões intersticiais sob condições não drenadas, resultando na perda de resistência de um material. Fenômeno que predomina em solos finos, de baixa coesão, saturados e com tendência à contração quando submetidos a esforços de cisalhamento.

Essa perda de resistência do solo pode levar a rupturas de grande magnitude, resultando em deslocamentos rápidos, fenômeno conhecido como “fluxo de ruptura por liquefação”. O solo tende a assumir comportamento de fluido, espalhando-se até que as tensões cisalhantes atuantes sejam equilibradas pelas reduzidas resistências ao cisalhamento ainda presentes na massa em movimento.

Segundo Aubertin (2003), a liquefação pode, também, ocorrer em solos que não estejam completamente saturados, mas apresentam grau de saturação suficiente para que a contração resulte em expulsão de água ao invés de ar.

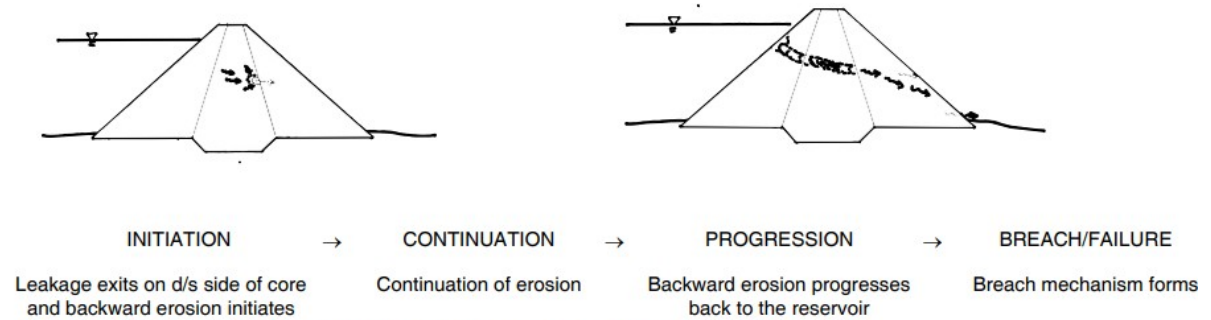
Considerando que a liquefação ocorre em materiais finos de baixa coesão, é preciso avaliar esse problema principalmente em barragens de rejeito, onde esse material apresenta todas essas características. Visto que, o jeito precisa ser saturado ou com grau de saturação na ordem de 80% (Martin, 1999), é de suma importância o monitoramento da linha freática.

2.5.2. Erosão interna - Piping

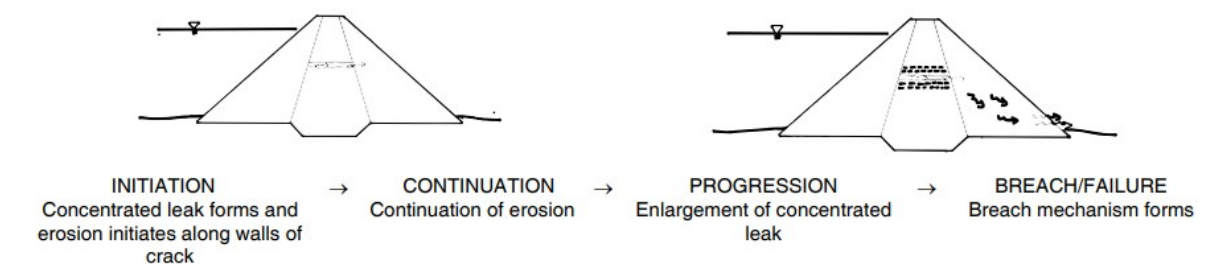
A erosão interna ocorre quando as partículas do solo são transportadas pelo fluxo de percolação existente. Esse processo tem diferentes gatilhos, tais como erosão provocadas por escoamentos concretados, erosões regressivas e erosões de contato (Fell et al., 2008).

De acordo com Fell (2008), dentre os diferentes processos de erosão interna, destaca-se o piping, que se caracteriza pelo desenvolvimento de uma erosão regressiva, causando formação de um canal (caminho preferencial), ao longo do qual o fluxo de água é percolado. Esse é capaz de estabelecer uma comunicação continua entre a porção montante e a jusante do maciço ou fundação da barragem, podendo resultar na formação de fissuras e até mesmo ruptura da estrutura, esses mecanismos de formação do piping são ilustrados na Figura 9.

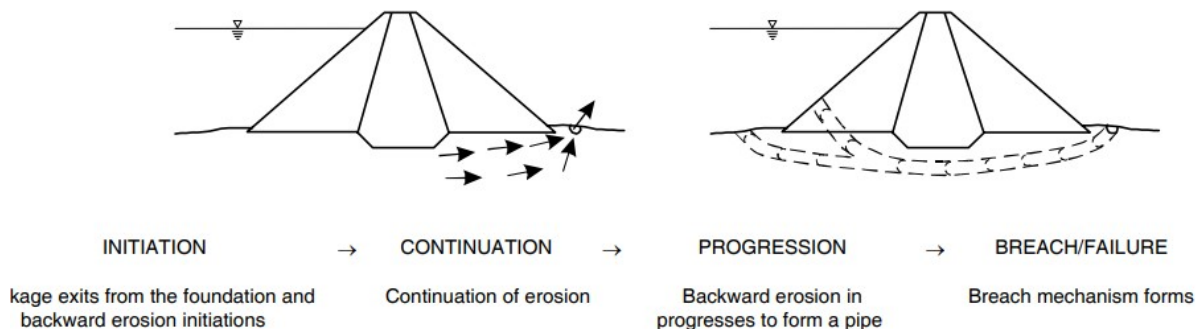
Figura 9 – Etapas de desenvolvimento do fenômeno piping.



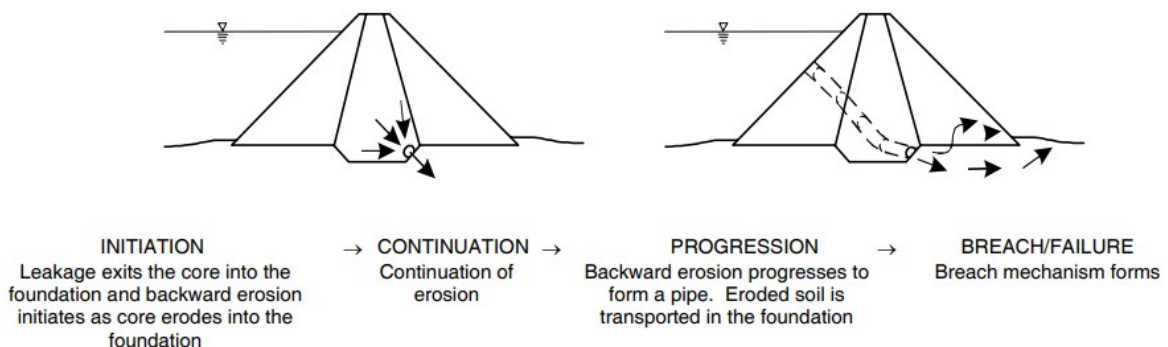
(A) PIPING IN THE EMBANKMENT INITIATED BY BACKWARD EROSION



(B) PIPING IN THE EMBANKMENT INITIATED BY EROSION IN A CONCENTRATED LEAK



(C) PIPING IN THE FOUNDATION INITIATED BY BACKWARD EROSION



(D) PIPING FROM THE EMBANKMENT TO FOUNDATION INITIATED BY BACKWARD EROSION

Fonte: Fell (2008)

2.5.3. Galgamento

O galgamento de uma barragem é o fenômeno em que a água ultrapassa a crista da barragem, escoando sobre o corpo da estrutura. De acordo com Saliba (2009), a partir da década de 70 houve um aumento na frequência de ruptura em âmbito mundial, fazendo com que voltassem as atenções aos fenômenos, buscando documentar e analisar as ocorrências.

No caso de rupturas causadas por galgamento, Ponce e Tsivoglou (1981) indicam que, com base nos registros disponíveis, esse tipo de falha não ocorre de forma abrupta. Pelo contrário, observa-se o desenvolvimento progressivo de uma brecha, resultante da ação erosiva contínua do escoamento.

A extensão dos danos provocados por um evento de galgamento em barragens de aterro está diretamente relacionada à duração do escoamento sobre o coroamento, bem como às características do material e à qualidade construtiva da estrutura, conforme destacado por Singh (1996). Além disso, os efeitos associados a esse tipo de ocorrência também dependem da altura da lâmina de água sobre a crista no momento do galgamento.

Contudo, a dinâmica de evolução das brechas em barragens de aterro ainda não é plenamente compreendida ou generalizável. Wahl (2001) apresenta diversas formulações empíricas para a previsão dos parâmetros envolvidos nesse processo, evidenciando a dispersão de abordagens teóricas na literatura.

2.5.4. Estabilidade do maciço

A estabilidade do maciço é um dos aspectos críticos no desempenho seguro de uma barragem, especialmente em estruturas construídas com solo compactado ou enrocamento. Falhas nesse componente podem resultar em deslocamentos, escorregamentos e rupturas catastróficas. A ABNT NBR 13028:2024 trata diretamente dessa questão, recomendando a implantação de sistemas de instrumentação que possibilitem o monitoramento contínuo do comportamento da estrutura, por meio de piezômetros, inclinômetros e medidores de recalque.

Além disso, a Resolução ANM nº95/2022, voltada para barragens de mineração, reforça que a estabilidade física e hidráulica deve ser garantida em todas as fases da barragem, exigindo emissão periódica da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE). Declaração que deve ser

baseada em inspeções de campo, análise de dados instrumentais e avaliação técnica conduzida por profissionais.

Já no cenário internacional, a ICOLD (Internacional Commission on Large Dams) estabelece diretrizes amplamente reconhecidas para projetos de barragens, recomendando que as análises de estabilidade considerem diferentes cenários operacionais, incluindo condições estáticas, sísmicas e situações considerando carregamentos. A ICOLD ainda orienta a adoção de fatores de segurança compatíveis com a criticidade da estrutura, visando reduzir a probabilidade de falhas por instabilidade do maciço e preservar a integridade física, ambiental e social das áreas a jusante.

2.6. Análises de estabilidade

De acordo com Pereira (2013), a análise de estabilidade é responsável por reunir diversos procedimentos para determinação de grandezas e índices (pressões neutras, sobrecargas, geométrica etc.), sendo fundamentais para avaliar a condição de estabilidade do talude. Além disso, considera-se que as equações de equilíbrio estático permanecem válidas até o momento imediatamente anterior à ruptura, momento em que o fator de segurança se manteve constante ao longo da linha de ruptura.

Atualmente os métodos analíticos são bem difundidos para utilização na avaliação da estabilidade, sendo classificados, principalmente, em dois grupos: o método do equilíbrio limite (MEL) e o método dos elementos finitos (MEF). O MEL é utilizado para determinação do fator de segurança por meio do equilíbrio de forças e momentos, enquanto o MEF é frequentemente utilizado para análises mais complexas, envolvendo tensão e deformação.

2.6.1. Método de equilíbrio limite (MEL)

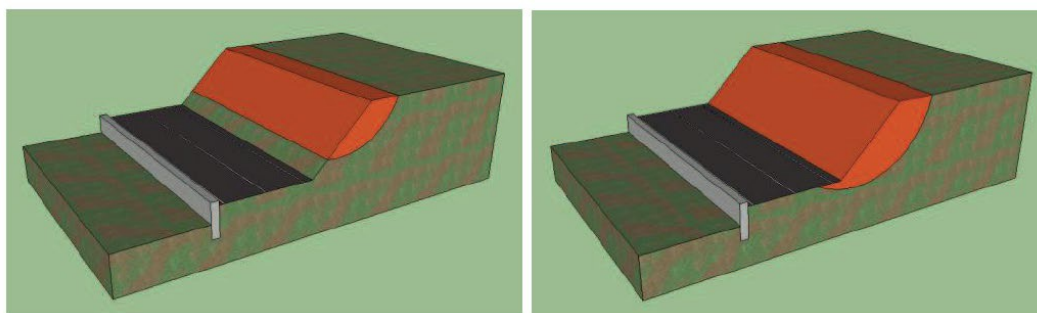
Segundo Massad (2010) o método de equilíbrio limite baseia-se em premissas fundamentais, como a suposição de que o solo se rompe de forma brusca, sem apresentar deformações prévias significativas. Além disso, os cálculos para esse método dependem da interpretação dos dados os ensaios de laboratório, definindo os parâmetros de resistência para cada camada do modelo numérico.

Da Silva (2011) ressalta que a teoria de equilíbrio limite permite a determinação do equilíbrio de uma massa de solo a partir de diferentes superfícies de ruptura, que podem ser

planas, circulares, poligonais ou mistas. Essas superfícies podem atravessar tanto acima quanto abaixo do pé do talude, como é ilustrado na Figura 10.

Dessa forma, ambos os autores concordam ao destacar a importância dos princípios adotados no método, que, apesar de suas simplificações, permitem uma análise eficiente.

Figura 10 – Superfície de ruptura acima e abaixo do pé do talude, respectivamente, à esquerda e à direita.



Fonte: da Silva (2011)

A análises de estabilidade por equilíbrio limite considera o equilíbrio entre as forças e os momentos, conforme as equações 1 e 2 (Silva, 2011). Gatilhos podem causar a ruptura ou deslocamento da massa de solo.

$$\text{Equilíbrio de forças} \quad FFFF = \frac{\sum T_i}{\sum F_i} \quad (1)$$

$$\text{Equilíbrio de momentos} \quad FFFF = \frac{\sum M_i}{\sum M_i} \quad (2)$$

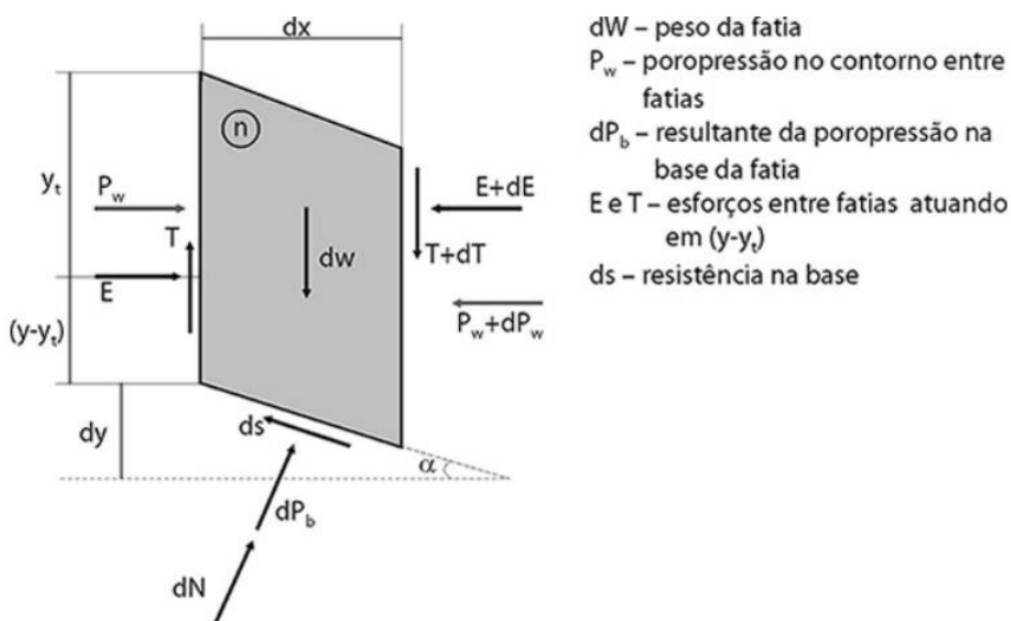
De acordo com Thomaz (1984), o método de equilíbrio limite se destaca pela simplicidade, nível satisfatório dos resultados em relação segurança do maciço e, pela facilidade na obtenção dos parâmetros de resistência do solo.

Dentre os métodos utilizados para determinação de fator de segurança do equilíbrio limite, se destacam Fellenius, Bishop, Janbu (simplificado) e Spencer, Morgenstern-Price. A seguir serão brevemente apresentados os métodos Morgenstern-Price e Spencer, posteriormente utilizados nas análises de estabilidade.

2.6.1.1. GLE/Morgenstern-Price

Segundo Gerscovich (2016), o método desenvolvido por Morgenstern e Price (1965) é considerado o mais abrangente entre os métodos de equilíbrio limite, sendo bastante utilizado nas análises de estabilidade de superfícies de ruptura tanto circulares quanto não circulares. Na Figura 11 são apresentados os esforços atuantes nas fatias infinitesimais segundo esse método.

Figura 11 – Esforços na fatia n.



Fonte: Gerscovich (2016).

O termo General Limit Equilibrium (GLE) pode ser utilizado para vários métodos como Bishop modificado, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price. O GLE apresenta uma abordagem simplificada, podendo considerar apesar duas condições de equilíbrio (forças verticais e momentos), utilizando aproximações mais rápidas, com menor rigor ao se comparar com o método tradicional (ROCSCIENCE, 2025).

Ao comparar o método GLE/Morgenstern-Price com a abordagem tradicional, observa-se que o GLE geralmente apresenta procedimentos iterativos simplificados, exigindo um menor esforço computacional. Isso porque o método possibilita uma flexibilidade na consideração das forças de interação entre as fatias.

O método GLE utiliza uma função de distribuição de forças interslice, definida por uma função de forma $f(x)$ e um parâmetro escalar λ , que relacionam a componente tangencial e normal das forças entre as fatias. A equação geral das forças entre fatias é:

$$\text{Força tangencial entre fatias} \quad TT = \lambda \lambda * ff(xx) * NN \quad (3)$$

T é a força tangencial entre fatias;

N é a força normal entre fatias;

$f(x)$ é a função de forma que define como essas forças variam ao longo do talude;

λ é um parâmetro ajustado iterativamente para satisfazer o equilíbrio global.

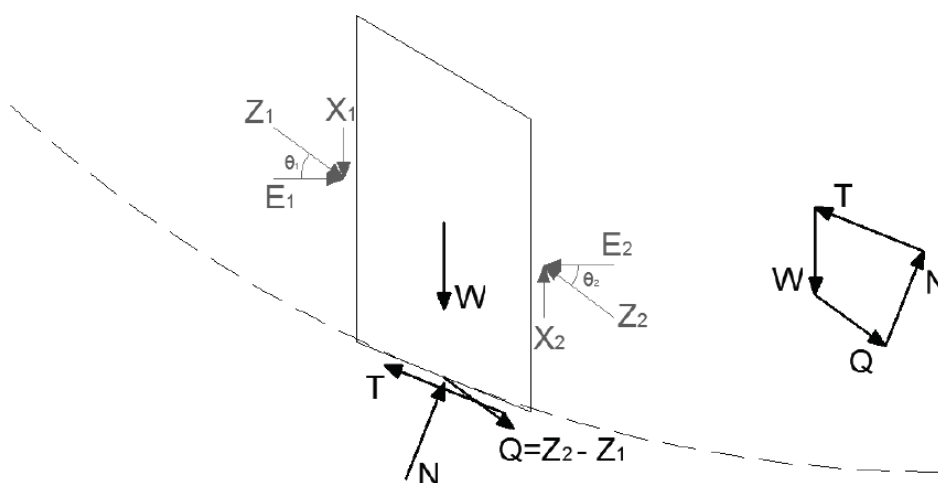
A grande vantagem da utilização do método é a flexibilidade e precisão, pois pode ser ajustado para representar com mais realismo o comportamento de taludes complexos, incluindo efeitos de heterogeneidade de materiais e variação da linha de percolação.

2.6.1.2. Spencer

O método de Spencer, assim como o método proposto por Morgenstern e Price, é caracterizado por uma metodologia rigorosa, satisfazendo todas as condições de equilíbrio, sem desconsiderar as forças interlamelares (Gerscovich, 2012).

Gerscovich (2012) comenta sobre as premissas de utilização desse método de análise. É admitida a existência de trinca de tração na superfície de ruptura. As forças de intersecção entre lamelas, representadas por X e E, podem ser expressas por suas resultantes Z_n e Z_{n+1} , onde o somatório resulta em uma força Q com inclinação θ . Essa força resultante Q inclui tanto a parcela efetiva quanto a pressão da água atuante na face de cada fatia. Além disso, para garantir o equilíbrio global, o somatório das componentes horizontal e vertical das forças entre as fatias devem ser zero (Figura 12).

Figura 12 – Fatia genérica e polígono de forças (Método de Spencer).



Fonte: Silva (2011).

2.6.2. Método Numérico de Elementos Finitos (MEF)

O método dos elementos finitos é baseado na subdivisão de um meio contínuo em elementos discretos, da qual a geometria e propriedades do material possibilitam a formulação do seu comportamento estrutural. De acordo com Filho (2013), a discretização do modelo é realizada através de uma malha composta por elementos conectados por nós, sendo que o aumento da quantidade de nós auxilia na convergência da solução numérica, de forma a apresentar um resultado com maior riqueza de detalhes.

A análise de estabilidade utilizando o MEF compara tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento do maciço, sendo capaz de identificar áreas de plastificação sem necessidade de definir previamente uma superfície de ruptura. Segundo Gerscovich (2012), o método possibilita avaliar níveis de tensão para ensaios laboratoriais, prevendo deformações, além de fornecer informações de grande importância que não apenas o fator de segurança.

Segundo Potts e Zdravkovic (1999) e Berisavljevic et al. (2015), o MEF é utilizado para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais parciais, se adequando a problemas relacionados a estabilidade de taludes. O método se utiliza de elementos em barras para problemas unidimensionais. Já para problemas bi ou tri-dimensionais são utilizados elementos triangulares, quadriláteros, tetraédricos e hexaédricos para compor a malha (Desai e Christian, 1977).

2.6.3. Métodos de pesquisa de superfícies de ruptura

Nesse estudo foi utilizado o método *Particle Swarm Search*, também denominado *Particle Swarm One* (PSO), classificado como um método de busca não circular. De acordo com Rocscience, o método é conhecido como pesquisa de enxame de partículas. A busca por superfícies de ruptura ocorre por meio de um processo iterativo, conforme representado na Equação 3.

$$\text{Fórmula das iterações} \quad FF_{i+1} = FF_i + W_i \quad (3)$$

S_i – Posição atual da partícula – representa a localização atual de uma solução candidata (superfície de ruptura) na iteração i .

S_{i+1} – Nova posição da partícula: representa a posição da partícula na próxima iteração $i + 1$, ou seja, a atualização da solução candidata.

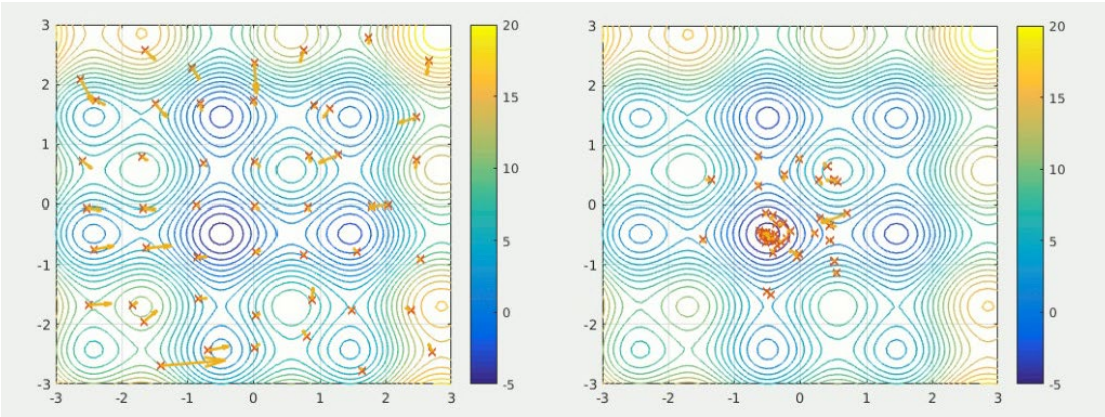
V_i – Velocidade da partícula: representa a variação da posição da partícula e é influenciada por:

- Melhor solução global encontrada até o momento (SG).
- Melhor solução que a própria partícula encontrou nas iterações anteriores (SB).
- Fator aleatório que introduz variabilidade e evita o travamento em mínimos locais.

O método de pesquisa utilizado é o PSO, no qual os parâmetros de atualização de V_i são selecionados aleatoriamente e determinados de acordo com a Equação 4. Desta forma a nova partícula é influenciada tanto pela melhor solução encontrada entre todas as partículas (SG), quanto pela melhor solução encontrada por essa partícula em iterações anteriores (SB), como ilustrado na Figura 13. De maneira geral, o algoritmo libera um enxame de partículas em toda a seção, onde são calculados vários fatores de segurança. Depois de calcular os fatores de segurança iniciais, as partículas do enxame passam a ser concentradas nas regiões associadas aos menores fatores de segurança, uma vez que o enxame é direcionado para as menores estimativas, recalculado repetidamente até obter um resultado muito preciso.

$$W_i = rrrrrrr1 * (FFSS - FF_i) + rrrrrrr2 * (FFSS - FF_i) \quad (4)$$

Figura 13 – Algoritmo do Particle Swarm Search



Fonte: Rocscience (2025).

2.6.4. Estabilidade de barragens de rejeito

As barragens devem passar por estudos a fim de determinar sua estabilidade quanto a ruptura do maciço (global e local) e fundação, de acordo com a fase final de construção, operação com rede de fluxo em condições extremas e normais, rebaixamento rápido e solicitação sísmica. Os fatores de segurança mínimo segundo a norma ABNT NBR13028:2024 são apresentados na Tabela 2. Conforme essa norma as análises devem ser realizadas em condição de carregamento drenado e não drenado para cada um dos materiais envolvidos.

Tabela 2: Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração.

Fase	Tipo de ruptura	Fator de segurança mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	1,1
Operação com rede de fluxo em condição de N.A. do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor)	Maciço	1,5
Operação com rede de fluxo em condição de N.A. do reservatório correspondente ao máximo normal com resistência não drenada de pico ^b	Maciço e fundações	1,3

Solicitação sísmica, em condição de N.A. do reservatório correspondente ao máximo normal (soleira do extravasor) ^c	Maciço e fundações	1,1
^A Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como final de construção, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação ^B Aplicável em análises sem presença de materiais com comportamento de strain-softening (amolecimento brusco em condições não drenadas). Para materiais com comportamento de strain-softening, as análises de estabilidade devem ser complementadas por meio de análise T-D utilizando modelos constitutivos que sejam capazes de reproduzir este fenômeno. ^C A análise pseudoestática é uma abordagem simplificada de equilíbrio limite, sendo que deve ser complementada por análises de tensão-deformação (condições dinâmicas), a critério e julgamento de engenharia apropriado ou quando os valores de fatores de segurança obtidos estiverem muito próximos ou inferiores do valor mínimo recomendado.		

Fonte: ABNT NBR 13028:2024

Além das análises de estabilidade para verificação dos taludes (montante e/ou jusante), deverão ser verificadas as condições de erosão interna (piping), liquefação e transbordamento provocando erosão tanto da crista, como do talude a jusante.

Os métodos de equilíbrio limite regularmente utilizados e fornecidos por softwares de análises de estabilidade são: Bishop, Morgenstern & Price, Spencer, Janbu, Sarma e Lowe e Karafiath, cada um desses métodos traz um tipo de abordagem com aplicabilidades diversificadas (ROCSCIENCE, 2025). Como mencionado anteriormente, optou-se pelos métodos de Morgenstern & Prince (1965) e Spencer (1967) porque ambos os métodos levam em consideração as condições de equilíbrio de forças e de momentos.

3. METODOLOGIA

O monitoramento de barragens é uma prática fundamental para garantir a segurança das estruturas de terra, sendo indispensável para mitigação de riscos e a preservação da integridade dessas construções. A interpretação dos dados gerados por esse monitoramento é essencial, permitindo avaliar o comportamento das estruturas ao longo do tempo.

A metodologia proposta será embasada em uma abordagem quantitativa, focada na análise de dados numéricos e estatísticos, com o objetivo exploratório de identificar padrões e comportamentos nos deslocamentos estruturais. O processo envolverá tanto a coleta de dados bibliográficos sobre estudos anteriores, quanto a realização de experimentos através de simulações numéricas, garantindo que os resultados sejam embasados em evidências científicas e práticas, contribuindo assim para o aprimoramento das metodologias de monitoramento e prevenção de falhas.

Na Figura 14 é apresentado o fluxograma de atividades da monografia. Inicialmente, realiza-se uma revisão bibliografia, de forma a permitir a fundamentação teórica do estudo, facilitando a escolha da metodologia mais adequada para as análises. Com base na revisão de literatura, selecionam-se os métodos que serão aplicados a avaliação da estabilidade da barragem.

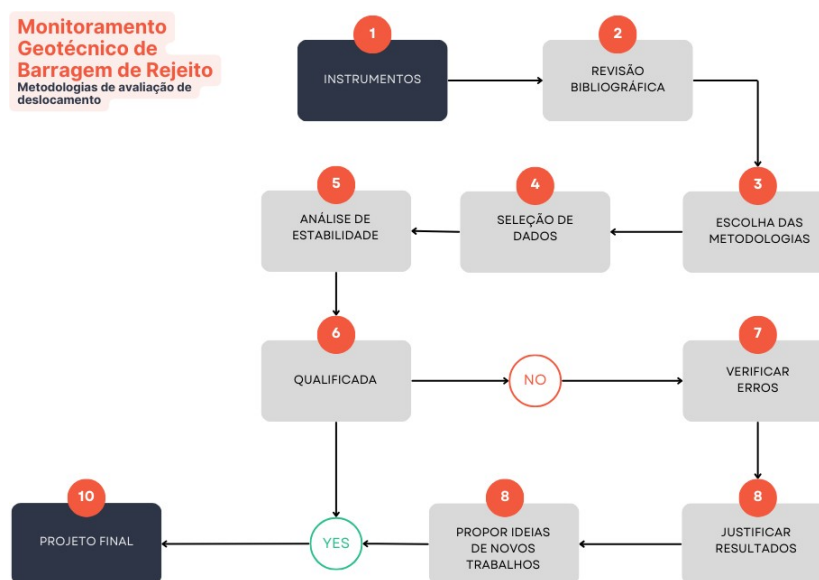
Em seguida, realiza-se o tratamento de dados referentes as leituras dos instrumentos, garantindo a qualidade dos dados coletados. Essas informações são avaliadas e utilizadas para determinar o nível d'água em softwares como o Slide2, a fim de realizar análises de estabilidade com as condições reais.

Após a realização das análises, os resultados obtidos são avaliados. Caso a qualificação dos resultados seja satisfatória, o estudo avança para a etapa final. No entanto, se forem identificadas inconsistências, inicia-se um processo de verificação e correções de possíveis erros.

Além da verificação, procura-se justificar todos os resultados obtidos, permitindo uma interpretação fundamentada do estudo. Caso necessário, será proposto novas abordagens e sugestões para estudo futuros, visando melhoria ou adaptações no estudo com base em outras metodologias. Por fim, caso a metodologia seja validada e os resultados sejam considerados

consistentes, o projeto é consolidado, apresentando os níveis adequados para posição do nível d'água e do monitoramento dos instrumentos.

Figura 14 - Fluxograma de atividades



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar o estudo foram adotadas duas seções críticas de uma barragem de rejeito real construída pelo método de montante, que por razões de sigilo contratual, não poderá ser aqui descrita, nem localizada.

Como mencionando anteriormente, o principal objetivo da análise foi se observar o quanto a variação do nível d'água impacta o fator de segurança e a estabilidade da barragem. A variação das leituras dos piezômetros pode ser explicada pelo aumento da recarga de água no maciço (chuva intensa ou elevação do nível de água no reservatório), alterações no sistema de drenagem (obstruções e danos no dreno), problemas na integridade do maciço (fissuras/fraturas no maciço, liquefação), intervenções operacionais (bombeamento de rejeito ou construções de alteamentos), problemas externos (terremotos e vibrações) e erro no sistema de monitoramento.

Para as análises de estabilidade, considera-se não drenada a condição do rejeito, adotando-se a resistência de pico. Essa perspectiva tem o objetivo de representar um cenário crítico, no qual a estrutura apresenta problemas na drenagem interna.

Esse estudo busca determinar limites aceitáveis para variação das leituras dos instrumentos. Através das análises de estabilidade será possível determinar condições de operações normais, alerta e emergência de acordo com a variabilidade do nível d'água. Como a estrutura abordada não apresenta anomalias, o projeto discute a variação do nível d'água causada por intensos períodos chuvosos resultando no aumento das pressões internas no maciço. Sendo capaz de comprometer a estabilidade da estrutura.

As análises de estabilidade foram feitas no software Slide 2 da Rocscience. O programa permite realizar estudos complexos com objetivo de determinar fator de segurança das estruturas e avaliar o comportamento do maciço. Suas análises são fundamentadas no método de equilíbrio limite.

Slide2 é um programa de estabilidade de taludes de equilíbrio limite 2D para avaliar o fator de segurança ou a probabilidade de falha, de superfícies de falha circulares ou não circulares em taludes de solo ou rocha. O Slide2 analisa a estabilidade de superfícies de deslizamento usando métodos de equilíbrio limite de fatia vertical ou fatia não vertical. Slide2 também inclui análises de infiltração de água subterrânea de elementos finitos incorporada diretamente no programa, para condições de estado estacionário e transitórias.

Através do software foram aplicadas variações na linha freática das duas seções críticas, a fim de encontrar os valores máximos aceitáveis para variação das leituras dos instrumentos. Como base de análise foi aplicada a maior precipitação registrada na bacia onde se encontra a barragem. Caso o fator de segurança da estrutura seja maior que 1.30 após a adequação da superfície do nível d'água será dada continuidade ao estudo simulando uma elevação hipotética do nível d'água no interior do maciço.

O estudo simulou os níveis de segurança a serem adotados nas análises de estabilidade, a partir da condição não drenada de pico. Os níveis verificados serão Normal ($F.S. \geq 1.30$), Atenção ($1.30 > F.S. \geq 1.20$), Alerta ($1.20 > F.S. \geq 1.10$) e Emergência ($F.S. < 1.10$). Cada um desses níveis piezométricos refletem as seguintes condições:

- Nível Normal – Resultado satisfatório para o comportamento da estrutura, com base em análises não drenadas de pico, apresenta leituras de monitoramento de acordo com os níveis esperados e estabelecidos para a atual situação da barragem;

- Nível de Atenção - Desvio do comportamento estabelecido, apresentando um resultado pontual e fora do padrão em relação à segurança da estrutura, com base em análises não drenadas de pico, exigindo atenção especial e monitoramento constante dos níveis freático e piezométrico.
- Nível de Alerta - Evolução do Nível de Atenção em que ações/intervenções deverão ser tomadas para mitigar/corrigir os resultados não satisfatórios que sofreram uma evolução de comportamento em relação ao nível anterior, com base em análises não drenadas, exigindo alerta e medidas corretivas de segurança
- Nível de Emergência - Ações a serem tomadas para intervenções não detectadas e/ou não corrigidas no Nível de Alerta, considerando tanto análises drenadas como não drenadas, exigindo a tomada imediata de medidas corretivas de segurança.

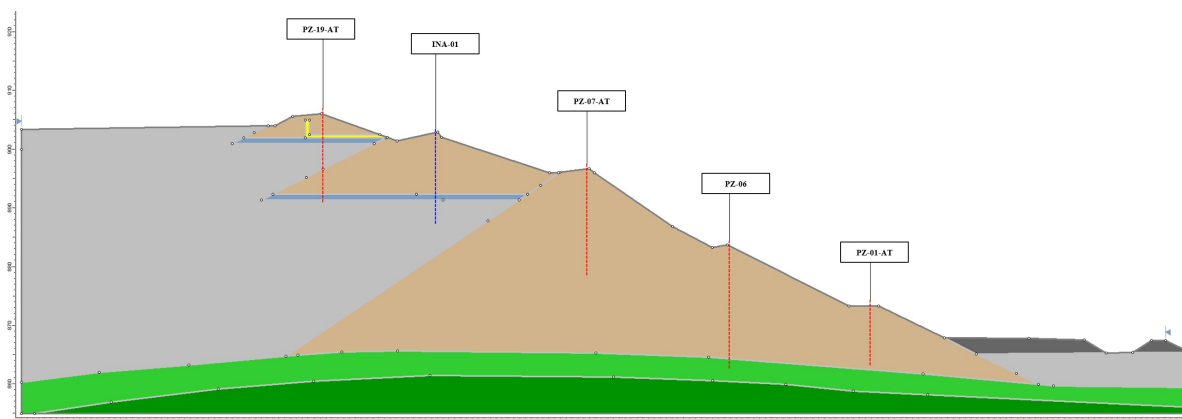
Os níveis de atenção, alerta e emergência são capazes de determinar os limites aceitáveis de variação no nível d'água da estrutura, de acordo com os fatores de segurança encontrados dentro das análises de estabilidade. Dessa forma, durante o desenvolvimento desse trabalho será apresentada os limites aceitáveis para atender os fatores de segurança de 1,30; 1,20 e 1,10, sendo respectivamente, atenção, alerta e emergência.

Este documento apresenta um estudo de estabilidade pelo método de equilíbrio-limite, utilizando rede de fluxo obtida por meio de modelagem com elementos finitos. Foram analisados três cenários distintos de variação da superfície freática: o cenário atual, a condição de chuva máxima com base no tempo de retorno (TR) e a elevação do nível freático até que se atinja um fator de segurança (F.S.) igual a 1.30. Essa abordagem permitiu uma análise aprofundada dos possíveis mecanismos de ruptura da estrutura.

3.1. Seções analisadas

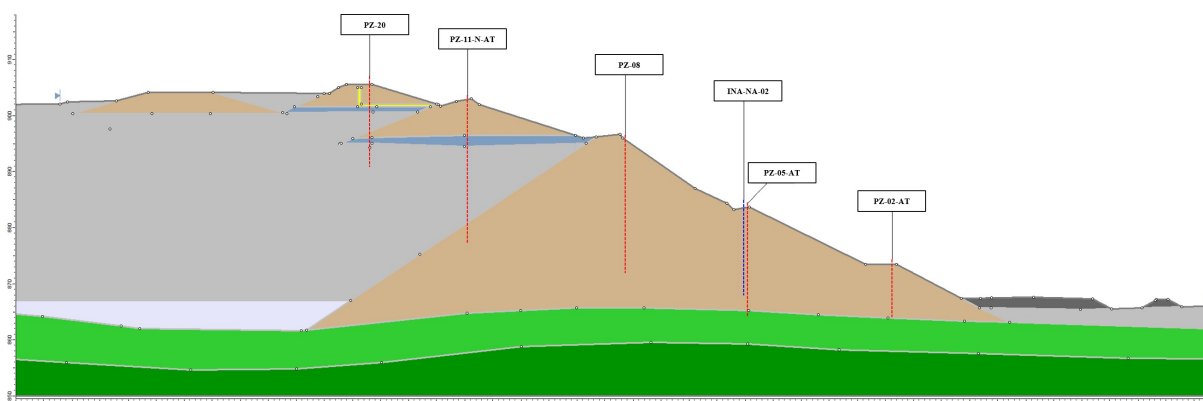
Foram adotadas duas seções situadas na região central do maciço de uma barragem real. As Figura 15 e Figura 16 apresentam essas seções, bem como a disposição dos instrumentos utilizados na pesquisa.

Figura 15 – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

As seções de estudo contam com os materiais de aterro, solo residual saprólito, lastro em enrocamento, filtro, enrocamento e dois tipos de rejeitos chamados de rejeitos S1/S2 e rejeito S3, os parâmetros utilizados em cada seção podem ser visualizados na Tabela 3. A diferenciação do rejeito é devido ao processo de beneficiamento. Todos os detalhes dos parâmetros utilizados estão apresentados no item 3.2.

3.2. Parâmetros de resistência

Os parâmetros utilizados na análise foram obtidos do último relatório de Inspeção de Segurança de Barragem (RISR) daquela estrutura. Considerando que o objetivo principal deste estudo é apresentar metodologias para avaliar sensibilidade do nível d'água, não se justifica a reinterpretação desses parâmetros, uma vez que já foram previamente discutidos e aceitos pelos

órgãos reguladores e profissionais responsáveis. Dessa forma, os parâmetros utilizados no RISR são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de resistência da análise.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Phi (°)	Vertical Stress Ratio
Aterro		19	18	30	
Rejeito S1/S2		19	2	30	
Rejeito S3		26,54	10	34	
Solo residual		20	27	26,5	
Lastro		22	0	40	
Lastro enrocamento		20	0	32	
Saprolito		20	37	32	
Filtro		18	0	30	
Enrocamento		20			
Rejeito S1/S2 saturado		19			0,206

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com estudos de caracterização, o rejeito da estrutura foi classificado com compacidade variando entre muito fofa (S1) a fofa (S2) (Tabela 4), apresentando textura arenosa fina a areno-siltosa. Além disso, o rejeito apresenta passagem métricas com textura argilosa com areia fina, possuindo consistência oscilando entre muito mole (S1) e mole (S2), conforme Tabela 3.

Tabela 4: Consistência de solos argilosos e silto-argiloso.

CLASSIFICAÇÃO		SPT
S5	Muito compacto	>40
S4	Compacto	19 a 40
S3	Medianamente compacto	9 a 18
S2	Fofa	5 a 8
S1	Muito fofa	<4

Fonte: International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1978.

Figura 17 – Correlação entre características de campo de solos e rochas e a resistência à compressão uniaxial.

Grau	Descrição	Identificação de campo	Campo aproximado de variação da resistência à compressão uniaxial (MPa)
S1	Solo muito mole	Facilmente penetrado por várias polegadas com o pulso	< 0,025
S2	Solo mole	Facilmente penetrado por várias polegadas com o dedo polegar	0,025 - 0,050
S3	Solo firme	Pode ser penetrado com o dedo polegar, por várias polegadas com moderado esforço	0,050 - 0,10
S4	Solo rígido	Prontamente amolgado pelo dedo polegar, mas penetrado somente com grande esforço	0,10 - 0,25
S5	Solo muito rijo	Prontamente recortado pela unha	0,25 - 0,50
S6	Solo duro	Recortado com dificuldade pela unha	> 0,50

Fonte: International Society for Rock Mechanics (ISRM), 1981.

A razão de resistência K (S_u/σ_v) é bastante utilizada nas análises de estabilidade de barragens em que os rejeitos de mineração possuem comportamento variável, apresentando mudanças de distribuição de tensões devido à deposição irregular do rejeito e à interação dele com a água. O vertical stress ratio ajuda a ponderar a redução da tensão efetiva sendo reduzida pelo acúmulo de pressões neutras, conforme equação

$$\pi = K K_v', \quad (1)$$

Rocscience (2025), K (razão de tensão vertical) é uma constante, igual à razão entre a resistência ao cisalhamento e atenção vertical. Dessa forma, se $K=0,3$ então a resistência ao cisalhamento será de 30% da tensão vertical efetiva.

3.3. Instrumentação

De acordo com dados disponibilizados, o maciço da barragem conta atualmente com 21 (vinte e um) piezômetros tipo Casagrande, 02 (dois) Indicadores de nível d'água, 04 (quatro) marcos superficiais com leituras automatizados e 07 (sete) com leituras manuais e 01 (um) medidor de vazão.

Na Tabela 5, são apresentados todos os instrumentos que estão locados nas seções de estudo, em conjunto com suas respectivas informações, incluindo a cota de topo, a cota de fundo e a profundidade de cada instrumento.

Tabela 5: Instrumentação

Seção	Instrumento	Cota de topo (m)	Cota de fundo (m)	Profundidade (m)
1	PZ-19-AT	906,8	891	15,8
	INA-01	903,3	887,37	15,93
	PZ-07-N-AT	897,5	878,53	18,97
	PZ-06	884,2	862,69	21,51
	PZ-01-AT	874,2	863,2	11
2	PZ-20	906,9	890,86	16,04
	PZ-11-N	903,5	877,39	26,11
	PZ-08	896,4	871,96	24,44
	INA-NA-02	884,8	867,95	16,85
	PZ-05-AT	884,4	864,1	20,3
	PZ-02-AT	874,2	864,05	10,15

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4. Níveis do reservatório e da freática

Para realizar os estudos referentes a posição da linha freática, foram utilizadas as leituras máximas dos instrumentos no intervalo de janeiro a dezembro de 2024. Dessa forma, foi possível determinar a linha freática máxima no referido ano e, com base nesse dado, iniciar o estudo da variação do nível d'água em função do maior índice de precipitação associado ao

maior tempo de retorno. Assim, a Tabela 6 apresenta as leituras máximas de cada instrumento ao longo de 2024, utilizadas como referência para a definição da linha freática máxima.

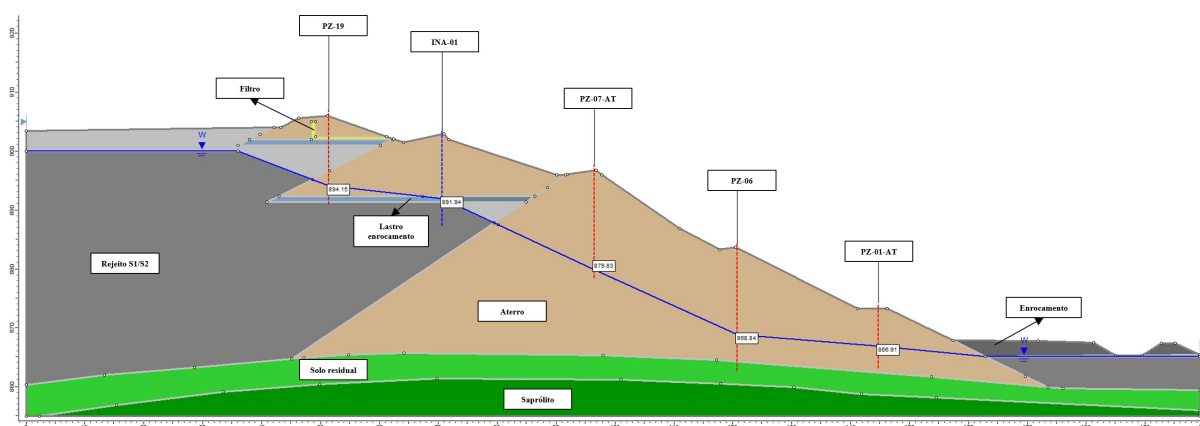
Tabela 6: Leituras máximas de 2024 dos instrumentos

Seção	Instrumento	Máxima (m)
1	PZ-19-AT	894,15
	INA-01	891,94
	PZ-07-N-AT	879,83
	PZ-06	868,84
	PZ-01-AT	866,91
2	PZ-20	894,34
	PZ-11-N	889,5
	PZ-08	871,96
	INA-NA-02	867,95
	PZ-05-AT	867,18
	PZ-02-AT	866,04

Fonte: Elaborado pelo autor

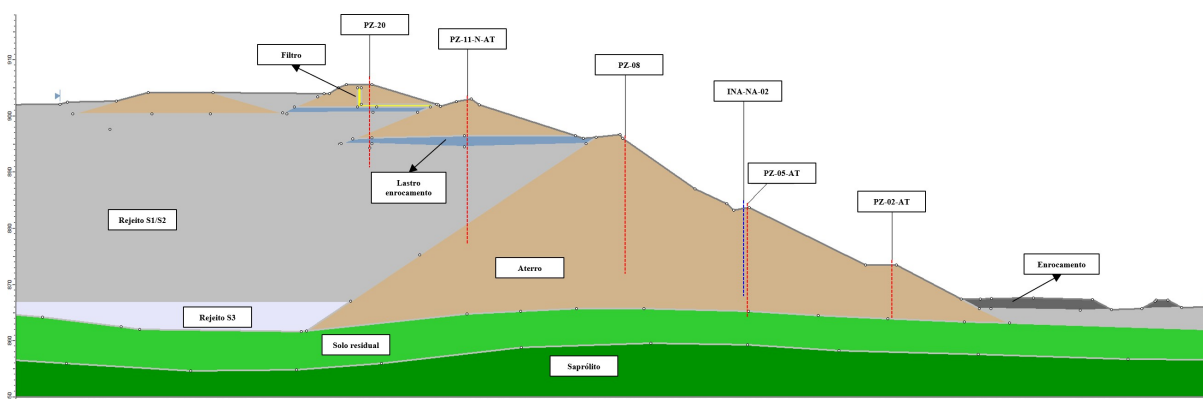
Na Figura 18 e na Figura 19 são apresentadas, respectivamente, a linha freática máxima da seção 1 e da seção 2.

Figura 18 – Seção 1 com nível d'água máximo de acordo com as leituras dos instrumentos de 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Seção 2 com nível d'água máximo de acordo com as leituras dos instrumentos de 2024.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5. Estudo hidrológicos

Os dados de precipitação foram obtidos da Estação Meteorológica Rio do Peixe (MMV), localizada no município de Nova Lima/MG. A escolha dessa estação se deve à qualidade de seus dados, que apresentam poucas falhas e um grande histórico de medições de mais de 60 anos.

A Tabela 7 apresenta os registros de precipitação dos anos hidrológicos a partir de 1941, que permite uma análise criteriosa. As médias máximas de precipitação para 1, 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20 e 30 dias são apresentadas na Figura 20.

Tabela 7: Precipitações máximas por ano hidrológico – Estação Rio do Peixe (MMV).

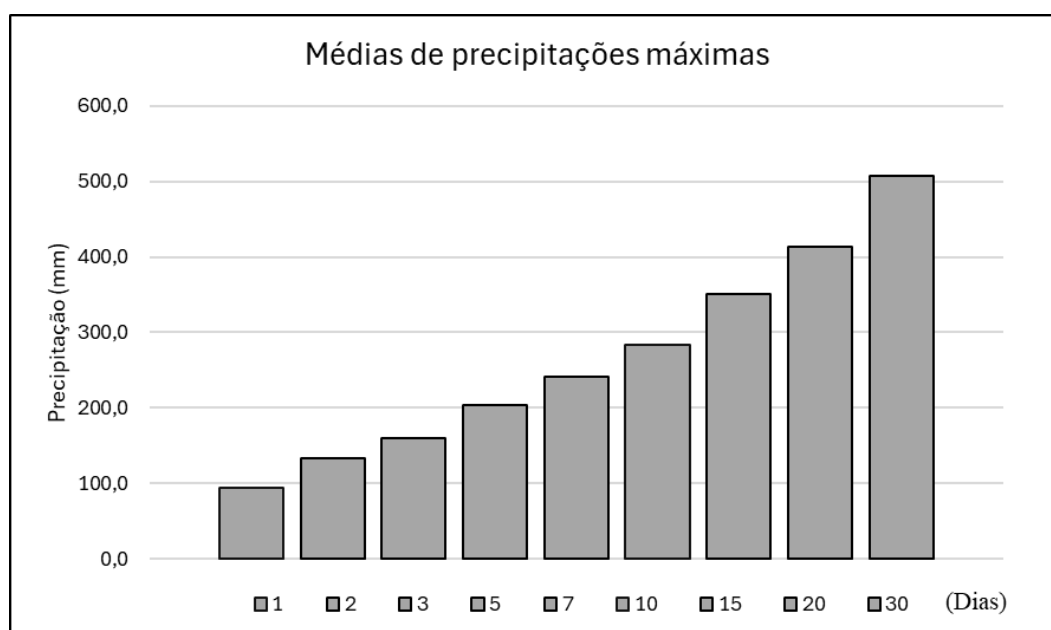
	Ano Hidrológico	Precipitação Máxima								
		1 Dia	2 Dias	3 Dias	5 Dias	7 Dias	10 Dias	15 Dias	20 Dias	30 Dias
Dados Consistidos	1941 - 1942	249,8	265,8	271,4	286,9	370,7	430,2	494,7	547,5	631,0
	1942 - 1943	78,5	100,8	123,7	173,5	211,1	276,6	404,6	423,2	599,2
	1943 - 1944	Ano Hidrológico Descartado								
	1944 - 1945	76,7	112,2	123,4	170,8	233,8	250,3	307,0	374,5	467,5
	1945 - 1946	100,6	108,2	131,1	168,4	204,2	295,4	377,1	455,4	551,2
	1946 - 1947	78,5	101,6	126,5	158,8	164,2	204,4	247,0	273,1	412,4
	1947 - 1948	103,9	142,5	179,6	213,4	243,4	248,7	289,1	362,9	436,3
	1948 - 1949	111,8	147,3	179,6	258,8	312,1	448,0	508,4	548,1	653,0
	1949 - 1950	66,5	77,9	92,4	135,4	193,5	200,8	277,6	319,4	369,2
	1950 - 1951	100,6	151,7	172,8	181,9	190,7	214,6	263,1	303,6	385,9
	1951 - 1952	66,3	98,3	130,8	142,7	165,6	222,9	304,7	372,5	447,6
	1952 - 1953	104,6	129,8	141,0	155,7	164,6	212,0	285,4	321,5	367,2
	1953 - 1954	86,1	132,3	137,9	147,3	162,4	174,6	230,5	261,3	367,6
	1954 - 1955	159,0	209,0	267,2	447,5	448,0	500,6	520,9	587,2	596,6
	1955 - 1956	97,5	133,1	140,7	206,2	231,1	249,0	323,2	407,2	506,3
	1956 - 1957	86,1	140,5	167,6	219,7	280,9	306,1	456,7	539,9	644,6
	1957 - 1958	117,6	174,8	179,1	182,9	223,0	256,4	345,1	433,3	541,7
	1958 - 1959	92,4	154,9	210,3	252,7	290,8	312,2	330,4	354,8	438,0
	1959 - 1960	73,7	110,2	138,5	164,9	209,1	256,1	365,6	455,5	524,0
	1960 - 1961	91,4	142,5	158,8	209,8	271,8	319,9	416,2	521,4	646,8
	1961 - 1962	79,5	106,7	129,8	141,0	194,3	220,2	271,8	376,9	492,9
	1962 - 1963	80,8	133,6	138,2	179,4	208,8	294,7	361,3	442,6	540,6
	1963 - 1964	92,5	172,8	217,5	255,6	289,1	299,7	373,8	469,0	624,2
	1964 - 1965	69,6	115,8	144,0	181,1	220,5	282,5	336,9	379,3	499,1
	1965 - 1966	76,2	100,6	139,7	192,8	233,4	263,9	309,5	327,3	510,4
	1966 - 1967	76,2	96,5	114,3	138,3	190,5	239,4	281,1	320,2	508,7
	1967 - 1968	58,4	109,3	132,2	175,4	237,7	274,5	318,6	371,9	398,6
	1968 - 1969	72,4	135,9	182,9	227,4	285,3	310,7	351,3	369,1	431,2
	1969 - 1970	63,5	91,4	102,3	132,8	161,3	254,0	287,0	389,8	464,7
	1970 - 1971	79,8	109,2	139,7	153,7	205,9	232,6	255,5	281,0	317,9
	1971 - 1972	180,3	281,9	307,3	381,0	430,5	506,7	676,9	785,4	1148,7
	1972 - 1973	99,0	151,2	195,1	218,4	271,0	296,0	335,3	398,7	443,0
	1973 - 1974	65,2	121,2	133,5	155,2	192,5	207,4	304,4	372,6	438,9

	Ano Hidrológico	Precipitação Máxima								
		1 Dia	2 Dias	3 Dias	5 Dias	7 Dias	10 Dias	15 Dias	20 Dias	30 Dias
	1974 - 1975	52,6	75,6	86,6	116,9	141,5	180,1	273,2	326,0	379,1
	1975 - 1976	44,0	78,0	107,5	148,5	160,0	175,1	203,6	295,8	360,8
	1976 - 1977	92,0	162,1	166,7	227,0	252,0	294,2	449,6	484,6	486,9
	1977 - 1978	125,0	198,0	223,0	258,1	290,1	334,1	408,1	408,1	495,1
	1978 - 1979	105,4	173,0	189,0	291,1	357,0	521,1	638,9	722,7	878,4
	1979 - 1980	96,3	121,4	184,2	209,3	240,1	270,1	316,9	374,7	513,9
	1980 - 1981	85,9	110,0	155,0	233,2	271,2	296,3	377,8	423,0	479,5
	1981 - 1982	90,0	107,0	133,6	201,1	291,1	305,1	388,8	427,8	490,7
	1982 - 1983	104,6	136,7	148,7	189,0	212,6	253,4	323,6	402,8	591,6
	1983 - 1984	60,6	94,0	97,2	122,5	128,5	185,2	203,5	232,4	345,5
	1984 - 1985	60,4	112,3	160,9	219,1	271,1	286,2	316,8	405,9	542,8
	1985 - 1986	75,4	101,6	102,7	144,7	187,1	235,5	286,5	374,3	471,4
	1986 - 1987	102,4	156,7	205,8	269,2	298,4	368,2	390,1	437,7	498,8
	1987 - 1988	104,0	111,0	139,1	186,4	239,7	302,2	398,1	432,9	529,7
	1988 - 1989	64,0	88,2	110,0	148,0	168,0	199,8	243,3	284,0	342,6
	1989 - 1990	94,1	129,7	178,1	246,3	286,7	372,9	393,1	395,5	490,8
	1990 - 1991	67,3	131,7	187,9	265,4	359,9	436,6	486,1	646,2	688,8
	1991 - 1992	120,2	168,5	208,8	252,8	295,1	364,0	560,5	610,1	733,9
	1992 - 1993	52,3	82,2	89,6	128,2	148,6	184,1	261,9	306,3	371,1
	1993 - 1994	101,0	133,6	143,9	171,0	181,3	246,3	319,5	359,3	458,1
	1994 - 1995	180,6	290,0	347,5	354,6	372,8	419,8	432,8	488,3	551,3
	1995 - 1996	223,5	270,5	289,5	313,5	327,3	354,0	510,0	603,0	708,2
	1996 - 1997	130,4	249,1	311,4	391,4	398,2	423,7	509,8	586,0	695,3
	1997 - 1998	83,4	102,9	118,4	145,6	157,8	189,9	230,4	246,3	336,2
	1998 - 1999	50,8	55,7	78,1	97,7	137,3	153,8	195,5	242,8	310,1
	1999 - 2000	116,5	176,7	223,1	248,2	277,6	290,2	414,2	426,4	443,0
	2000 - 2001	145,3	150,6	150,8	160,4	160,4	172,7	261,4	333,1	360,4
	2001 - 2002	82,4	105,6	154,2	173,4	198,2	225,6	318,9	406,8	451,7
	2002 - 2003	88,7	125,2	165,6	202,9	263,0	306,6	377,7	493,1	582,2
	2003 - 2004	76,5	114,3	136,0	149,8	222,4	260,8	321,6	346,9	438,5
	2004 - 2005	69,4	111,9	142,9	207,7	229,1	267,2	342,2	421,2	513,8
Dados Observados	2005 - 2006	78,8	86,5	102,2	147,4	192,6	244,5	290,2	416,8	459,0
	2006 - 2007	75,3	87,9	94,1	145,8	161,0	199,6	267,9	320,1	371,1
	2007 - 2008	81,5	137,4	147,2	203,8	220,0	271,0	324,3	351,7	394,8
	2008 - 2009	140,3	168,6	193,7	348,2	406,2	422,2	549,1	761,2	918,0

Ano Hidrológico	Precipitação Máxima								
	1 Dia	2 Dias	3 Dias	5 Dias	7 Dias	10 Dias	15 Dias	20 Dias	30 Dias
2009 - 2010	86,1	129,3	157,1	204,0	231,0	263,8	282,8	345,3	530,2
2010 - 2011	90,6	124,6	155,0	216,6	249,7	285,5	343,4	436,2	485,8
2011 - 2012	107,9	199,3	252,2	261,3	333,2	410,1	486,6	644,7	832,1
2012 - 2013	112,0	118,4	137,1	212,4	284,6	302,4	338,4	407,9	514,2
2013 - 2014	52,7	72,4	104,3	166,7	211,6	237,5	245,7	322,1	442,3
2014 - 2015	103,3	112,6	112,6	174,7	176,8	195,9	264,4	274,6	317,4
2015 - 2016	Ano Hidrológico Descartado								
2016 - 2017	84,4	116,2	127,7	146,5	179,9	240,2	311,9	355,3	456,1
2017 - 2018	63,9	100,3	138,4	170,0	217,6	243,0	268,7	309,2	384,7

Fonte: BDMEP – Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

Figura 20 – Médias de precipitações durante 75 anos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo ICOLD (1992), para determinar a chuva máxima associada a diferentes tempos de retorno (TR), é possível utilizar diferentes métodos baseados na distribuição teórica de probabilidades. Entre eles, destacam-se: Normal (Laplace-Gauss), Log-Normal (Galton), Exponencial (Fuller), Gamma, Pearson e Log-Pearson I e III, Gumbel, Goodrich e Weibull. No entanto, as mais utilizadas são as Gumbel, Lob-Pearson III, Log-Normal e Exponencial, devido à maior eficiência e aplicabilidade dos métodos.

A Tabela 8 apresenta os quantis de precipitação estimados para diferentes tempos de retorno, calculados com base no ajuste da função de densidade de probabilidade de Gumbel, utilizando o Método dos Momentos. Para a análise de estabilidade, considerou-se o maior índice pluviométrico correspondente a um tempo de retorno de 10.000 anos.

Tabela 8: Quantis de precipitação para períodos de retorno notáveis (mm).

Duração	Tempo de Retorno [anos]									
	2	5	10	25	50	100	200	500	1.000	10.000
5 min	12,7	17,2	20,3	24,1	26,9	26,4	28,9	32,2	34,7	42,9
10 min	17,9	24,4	28,6	33,8	37,6	38,1	41,7	46,4	50,0	61,1
25 min	25,8	35,1	41,0	48,3	53,6	55,6	60,8	67,8	73,0	88,3
30 min	28,4	38,7	45,2	53,1	58,9	61,4	67,2	74,9	80,7	97,3
1 hora	44,2	60,2	70,1	82,2	91,0	96,5	105,6	117,6	126,6	151,8
2 horas	48,9	66,6	77,6	91,2	101,2	108,1	118,3	131,7	141,9	171,1
3 horas	51,3	69,7	81,4	95,8	106,3	113,9	124,6	138,8	149,5	180,7
4 horas	53,6	72,9	85,2	100,3	111,4	119,7	131,0	145,9	157,1	190,3
6 horas	58,3	79,3	92,8	109,4	121,6	131,3	143,7	160,0	172,4	209,6
8 horas	63,0	85,7	100,3	118,5	131,8	142,9	156,4	174,2	187,6	228,9
10 horas	67,7	92,1	107,9	127,5	142,0	154,6	169,1	188,3	202,9	248,2
12 horas	72,4	98,5	115,4	136,6	152,3	166,2	181,8	202,5	218,1	267,5
18 horas	86,5	117,6	138,1	163,8	182,9	201,0	220,0	245,0	263,9	325,4
1 dia	100,5	136,8	160,8	191,1	213,5	235,9	258,1	287,4	309,6	383,2
2 dias	125,9	168,5	196,8	232,4	258,9	285,1	311,3	345,8	371,9	458,6
3 dias	151,0	199,7	231,9	272,6	302,8	332,7	362,6	402,0	431,8	530,6
5 dias	192,7	252,1	291,4	341,1	378,0	414,6	451,0	499,1	535,5	656,2
7 dias	229,2	293,1	335,3	388,7	428,4	467,7	506,9	558,6	597,7	727,4
10 dias	269,7	343,2	391,8	453,3	498,9	544,2	589,3	648,8	693,7	843,0
15 dias	334,8	422,9	481,3	555,1	609,8	664,1	718,2	789,5	843,5	1022,6
20 dias	394,4	498,6	567,5	654,7	719,3	783,4	847,4	931,7	995,4	1207,0
30 dias	483,3	612,5	698,0	806,0	886,2	965,7	1045,0	1149,5	1228,6	1491,0

Fonte: Pesquisas realizadas por empresa terceirizada.

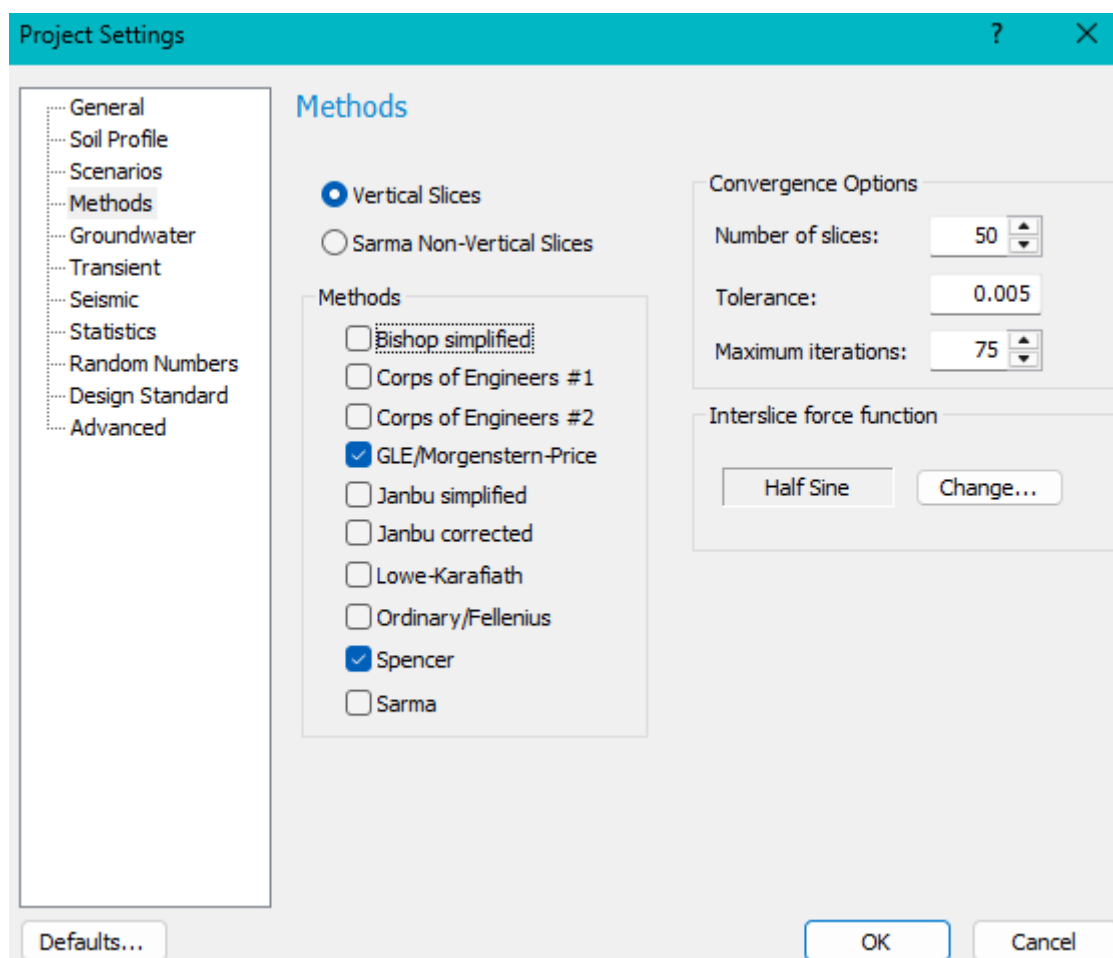
A princípio será utilizada a precipitação acumulada em 30 dias de 1491 mm de chuva. A partir desses dados foi feita a variação do nível d'água para as análises de estabilidade. Caso a estrutura suporte e tenha fator de segurança adequado pelas normas, o estudo será dado seguimento variando o nível d'água, ponderando a falta de drenabilidade da estrutura e aumento significativo do nível d'água.

A variação do nível d'água será interrompida quando obtiver fator de segurança iguais aos níveis de atenção ($F.S. > 1.30$), alerta ($F.S. \geq 1.20$) e emergência ($F.S. \geq 1.10$).

3.6. Parâmetros do software

O software utilizado para pesquisa foi o Slide 2. Dentre os vários métodos existentes no programa, foram considerados os mais adequados para o estudo o método de análise de Morgenstern-Price e Spencer, conforme ilustrado na Figura 21.

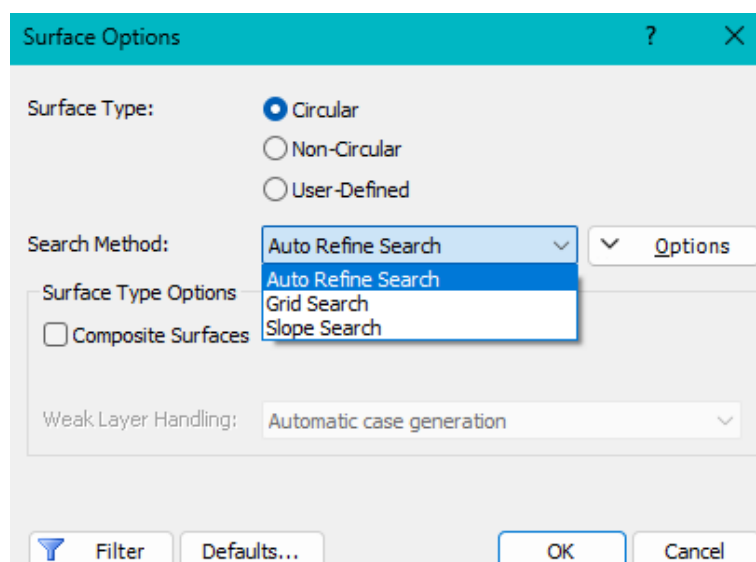
Figura 21 – Métodos de análise



Fonte: Elaborado pelo autor

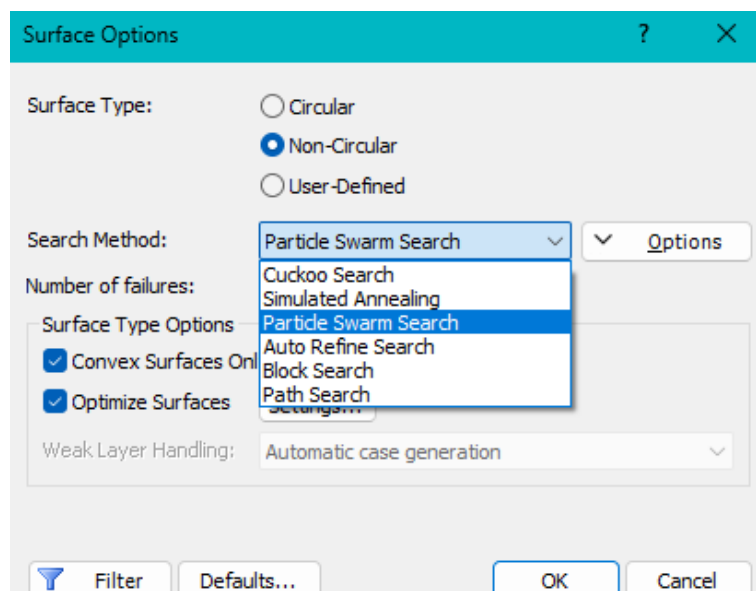
O programa conta com dois tipos de busca por ruptura, circular e não circular. Os métodos de ruptura circular são apresentados na Figura 22, enquanto os métodos de ruptura não circular são ilustrados na Figura 23. Dentre todas as opções disponíveis foi adotada a superfície não circular e o método de busca Particle Swarm One.

Figura 22 – Tipos de superfície para cunhas circulares.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 23 – Tipos de superfície para cunhas não circulares



Fonte: Elaborado pelo autor

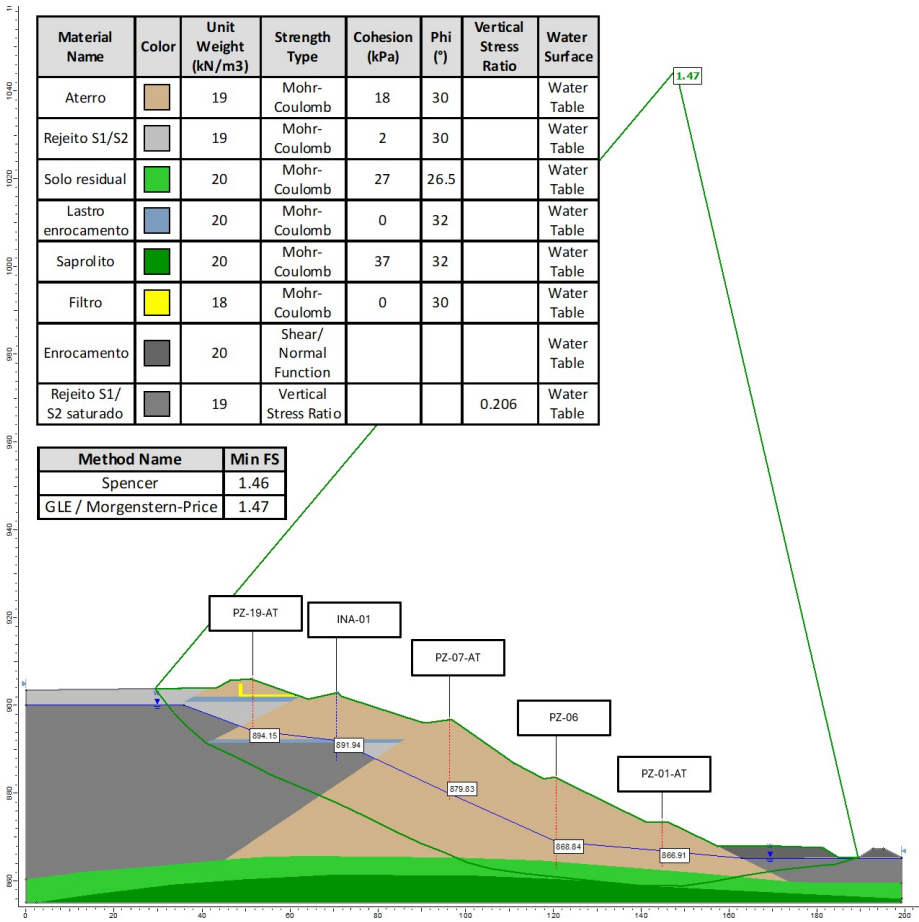
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises apresentam cinco cenários distintos de risco para cada uma das duas seções analisadas, conforme ilustrado nas Figura 24 a Figura 33. Os cenários incluem: o nível d’água máximo durante as leituras dos instrumentos ao longo do ano de 2024, condição correspondente a um tempo de retorno de 10.000 anos, além das condições de nível de atenção, alerta e emergência.

4.1. Análises preliminares

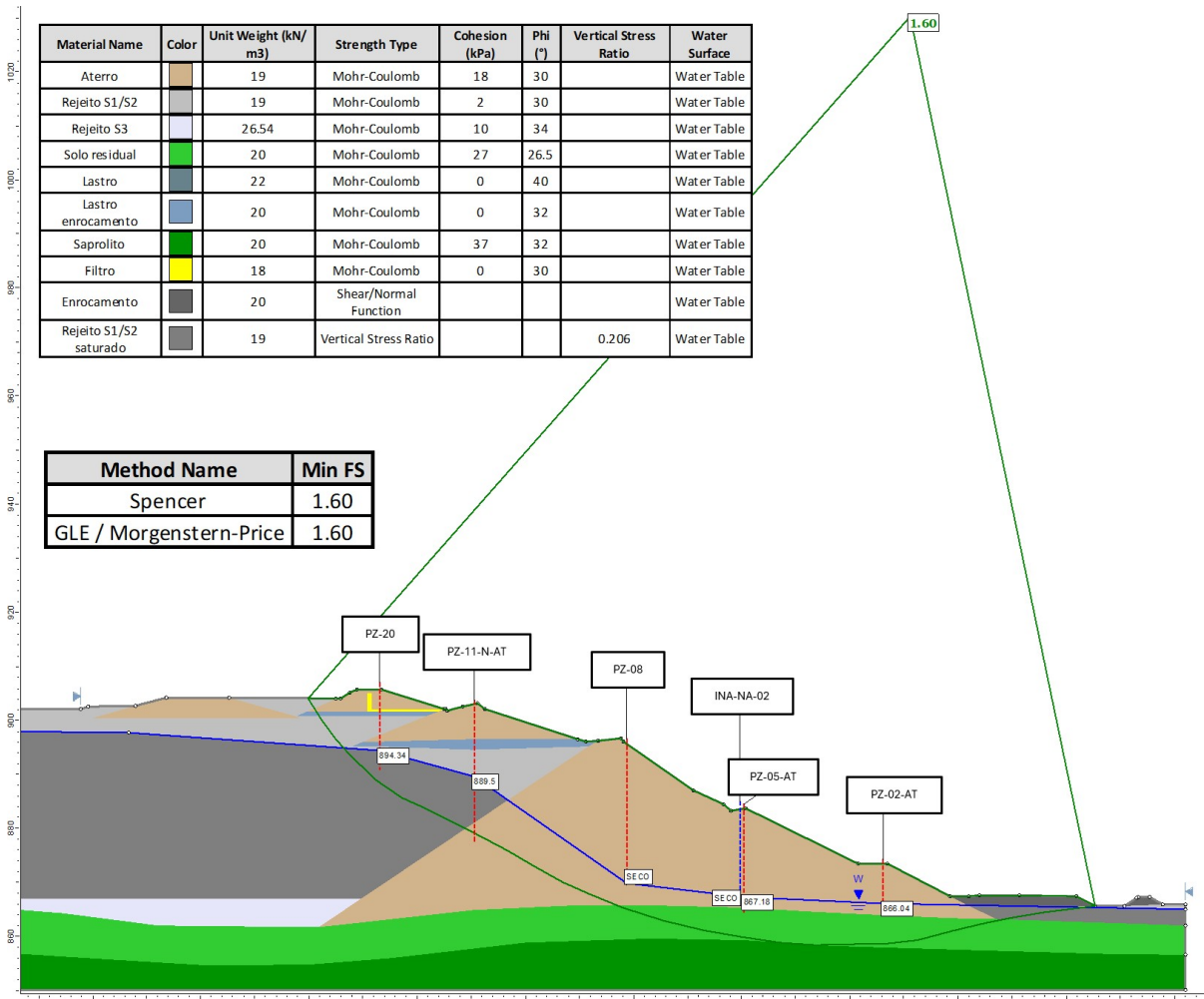
Neste tópico, serão apresentados os resultados referente ao cenário do nível d’água máximo registrado durante as leituras dos instrumentos ao longo do ano de 2024 (Figura 24 e Figura 25), bem como a análise da condição que considera um nível d’água para um tempo de retorno (TR) de 10.000 anos com precipitação total de 1500mm em 30 dias (Figura 26 e Figura 27).

Figura 24 – Nível d’água máximo do ano 2024 – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor

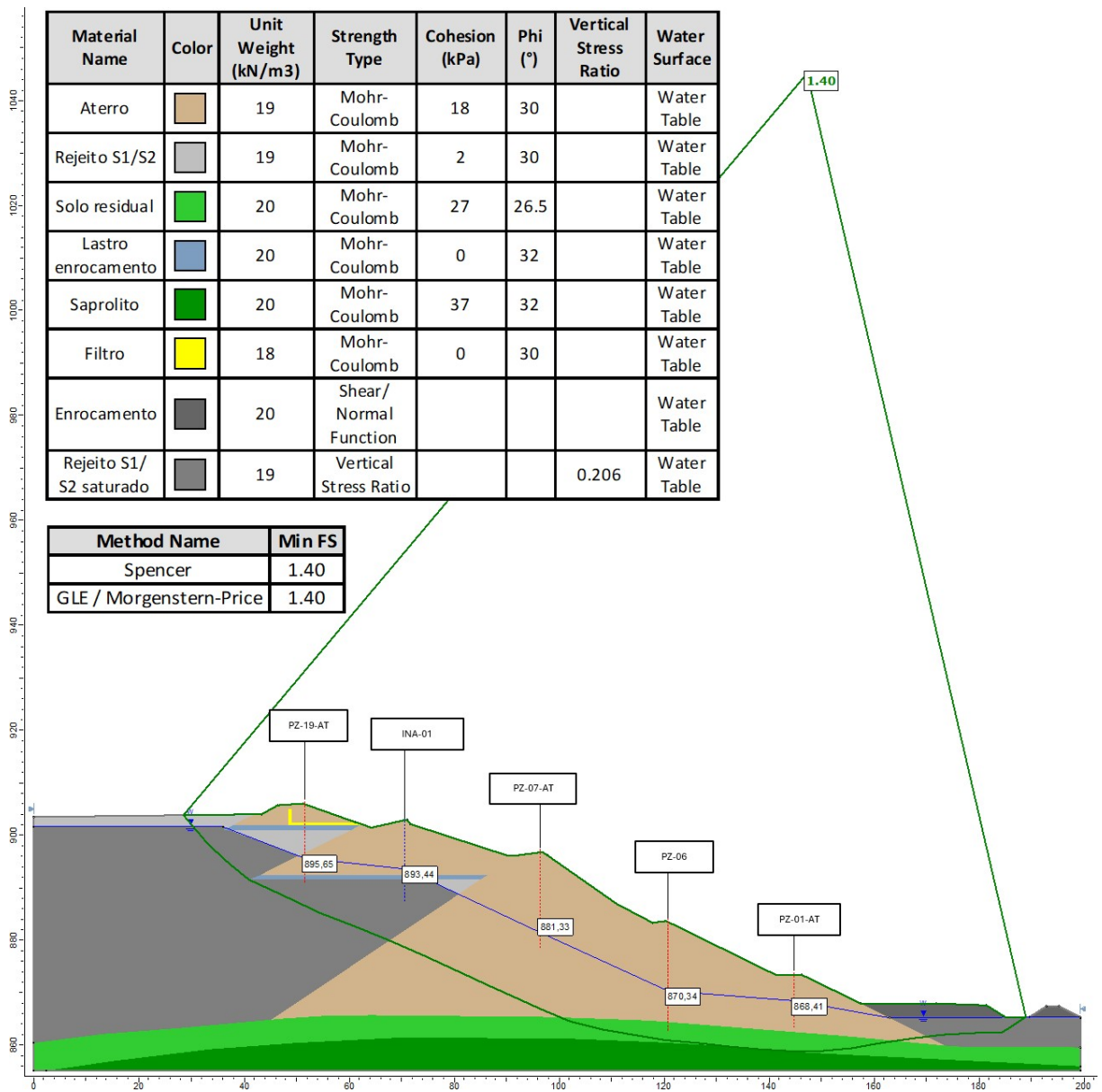
Figura 25 – Nível d’água máximo do ano 2024 – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor

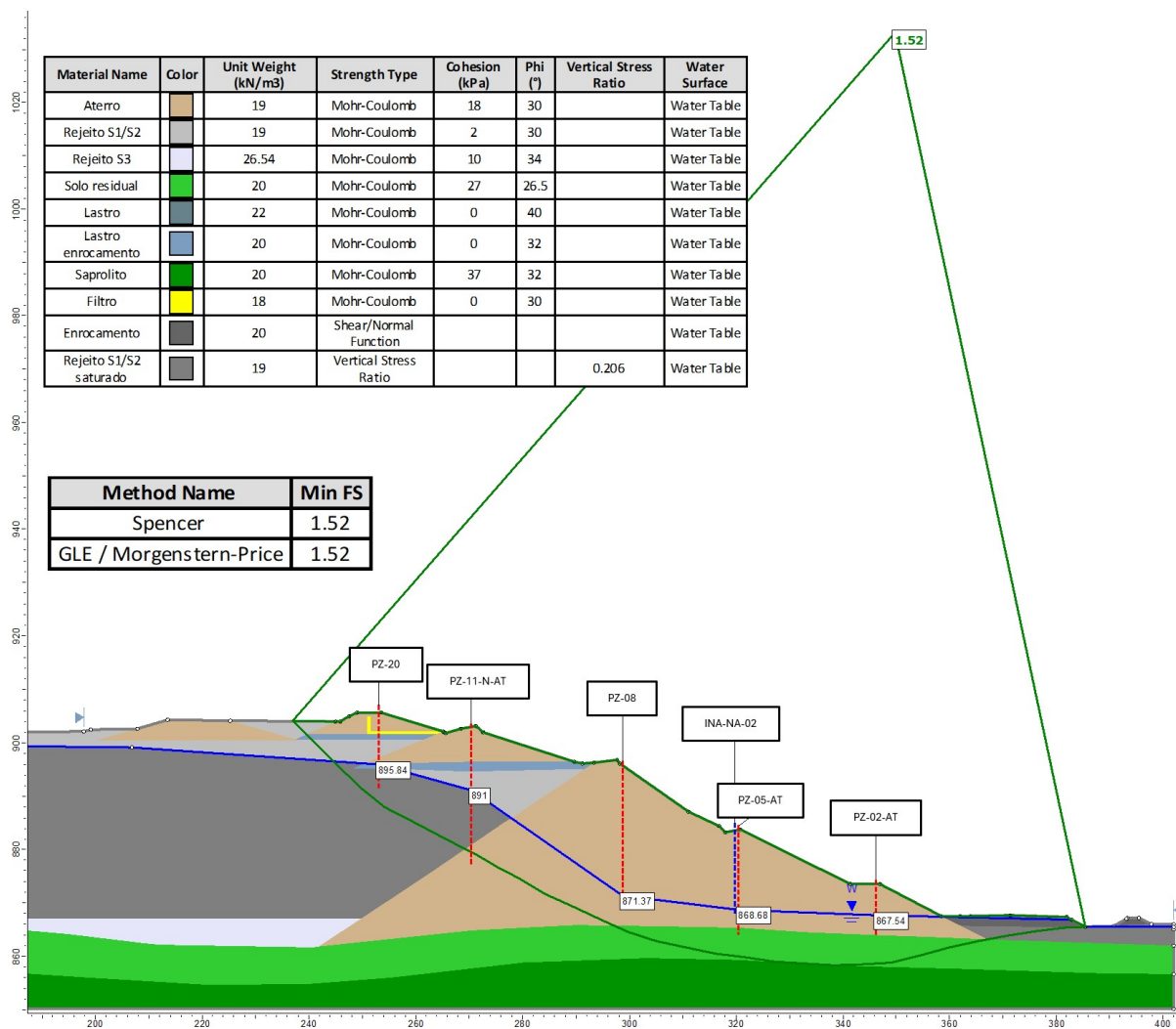
Tanto a Seção 1 quanto a Seção 2, representadas, respectivamente, nas Figura 24 e Figura 26, atendem aos critérios estabelecidos pela norma vigente. De acordo com a NBR 13028:2024, o fator de segurança mínimo recomendado para condições não drenadas deve ser igual ou superior a 1,30, sendo esse requisito plenamente satisfeito em ambas as seções analisadas.

Figura 26 – Nível d'água máximo para o tempo de retorno de 10.000 anos – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27 – Nível d'água máximo para o tempo de retorno de 10.000 anos – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor

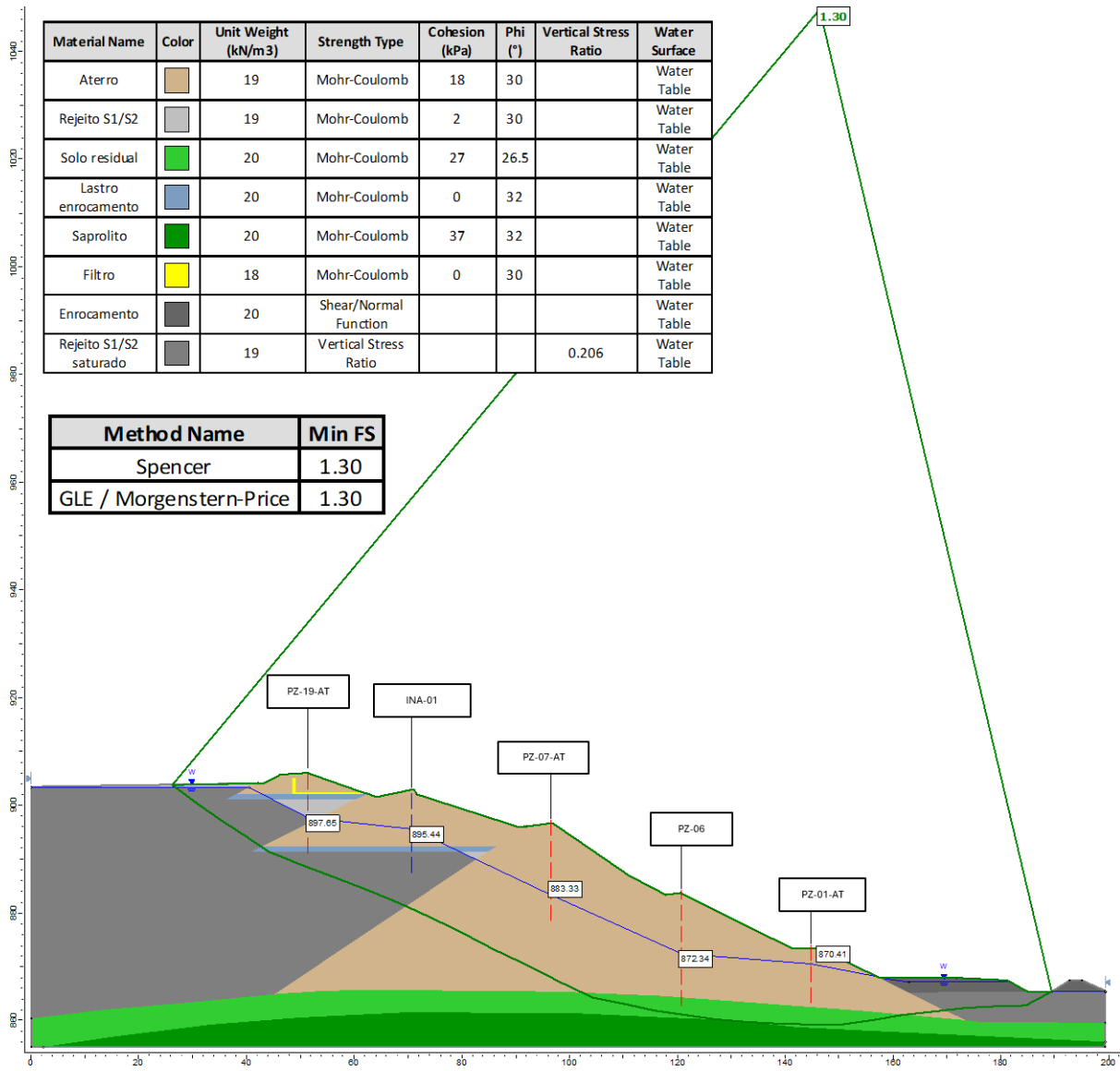
Na análise de estabilidade considerando o nível d'água correspondente a um tempo de retorno de 10.000 anos, verificou-se que ambas as seções atendem aos critérios normativos estabelecidos. Para a Seção 1, obteve-se um fator de segurança igual a 1,40, conforme ilustrado na Figura 26. Já na Seção 2, o fator de segurança encontrado foi de 1,52, conforme representado na Figura 27.

4.2. Nível de atenção

Para se determinar o nível d'água que colocaria a estabilidade da estrutura em nível de atenção, utilizou-se o fator de segurança de 1,30 recomendado em norma e o cenário

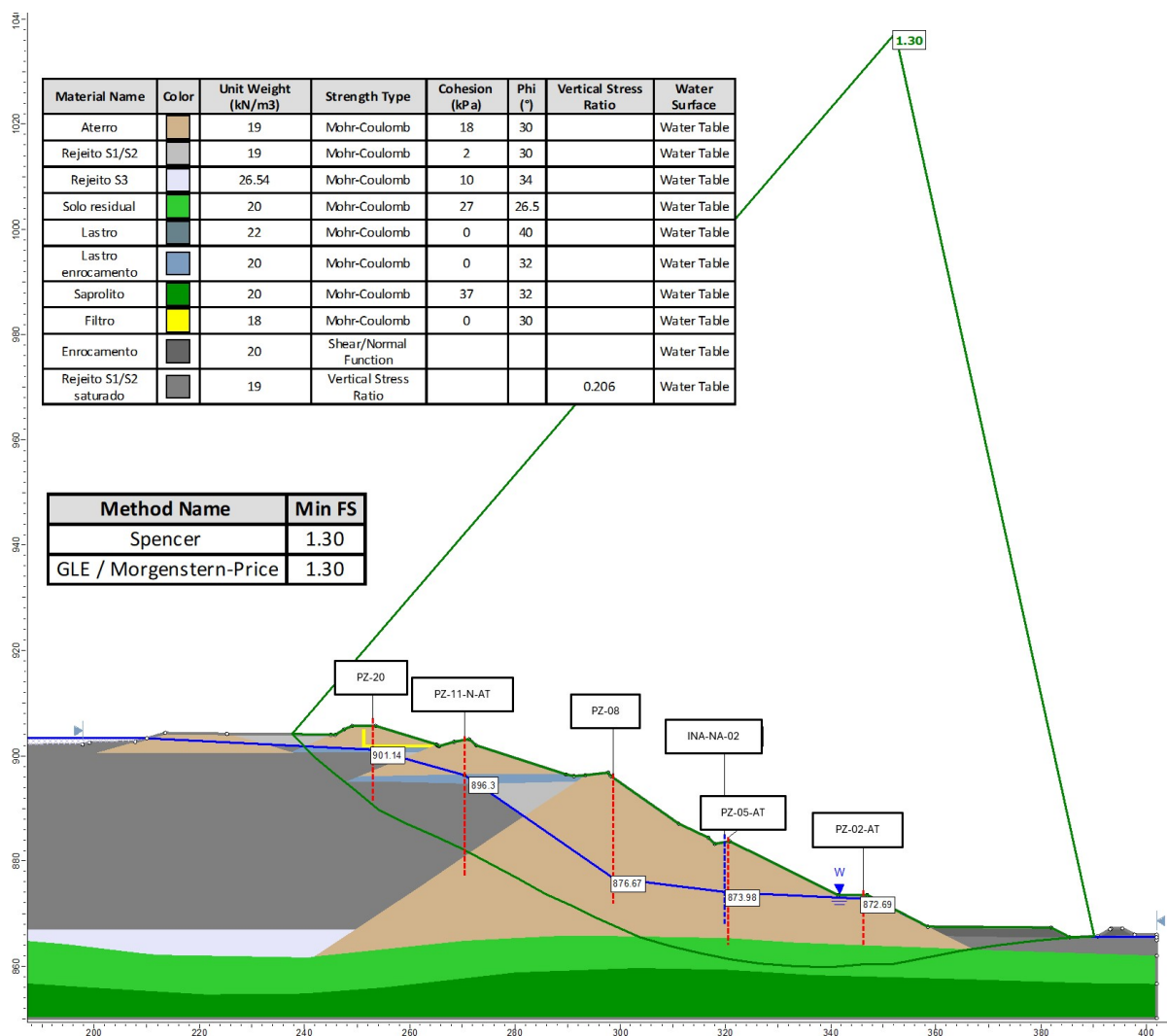
hidrológico de tempo de retorno de 10.000 anos.A Figura 28 e a Figura 29 mostram respectivamente os níveis d’água da seção 1 e 2 com essas premissas.

Figura 28 – Nível de atenção – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Nível de atenção – Seção 2

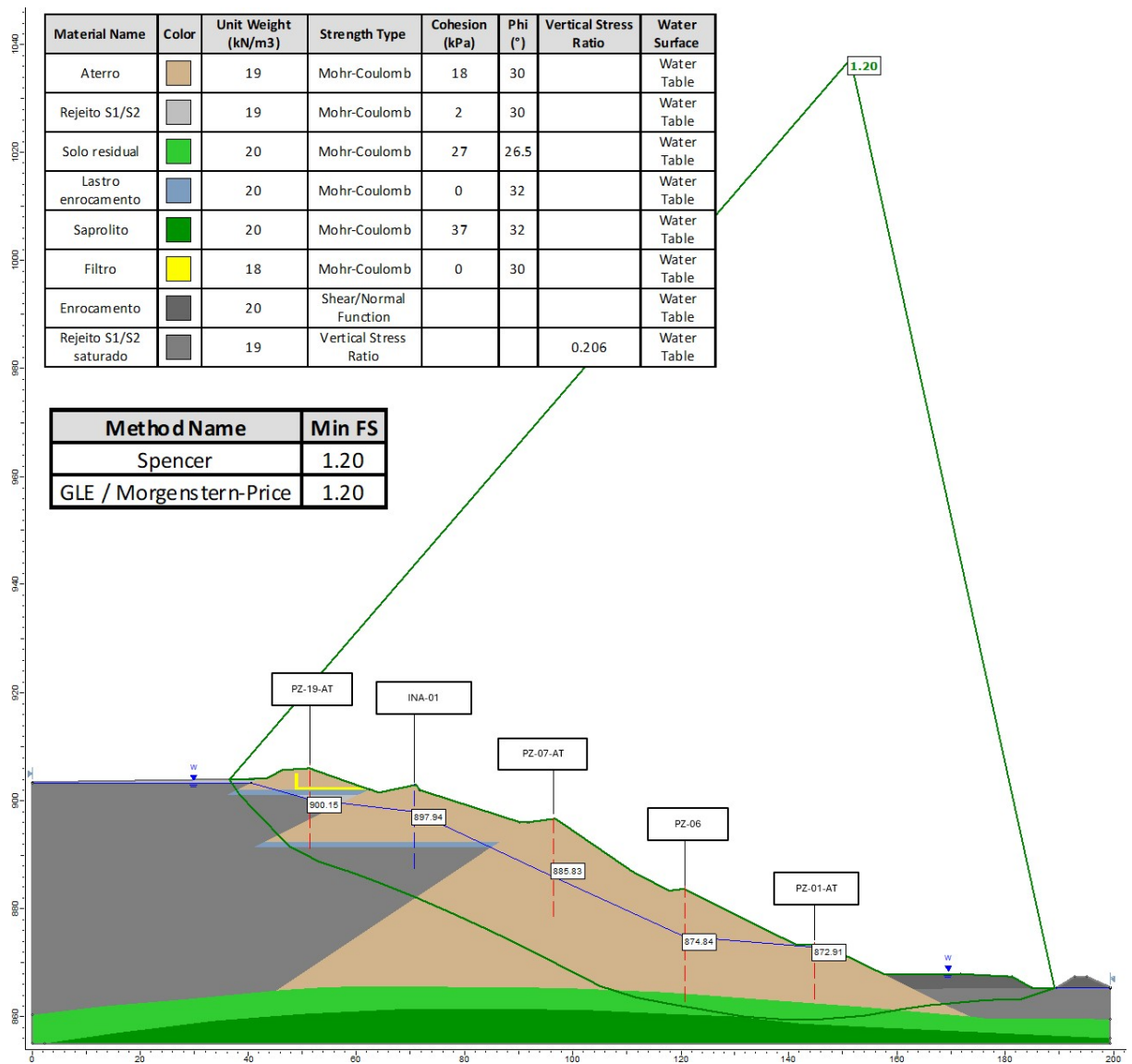


Fonte: Elaborado pelo autor

4.3. Nível de alerta

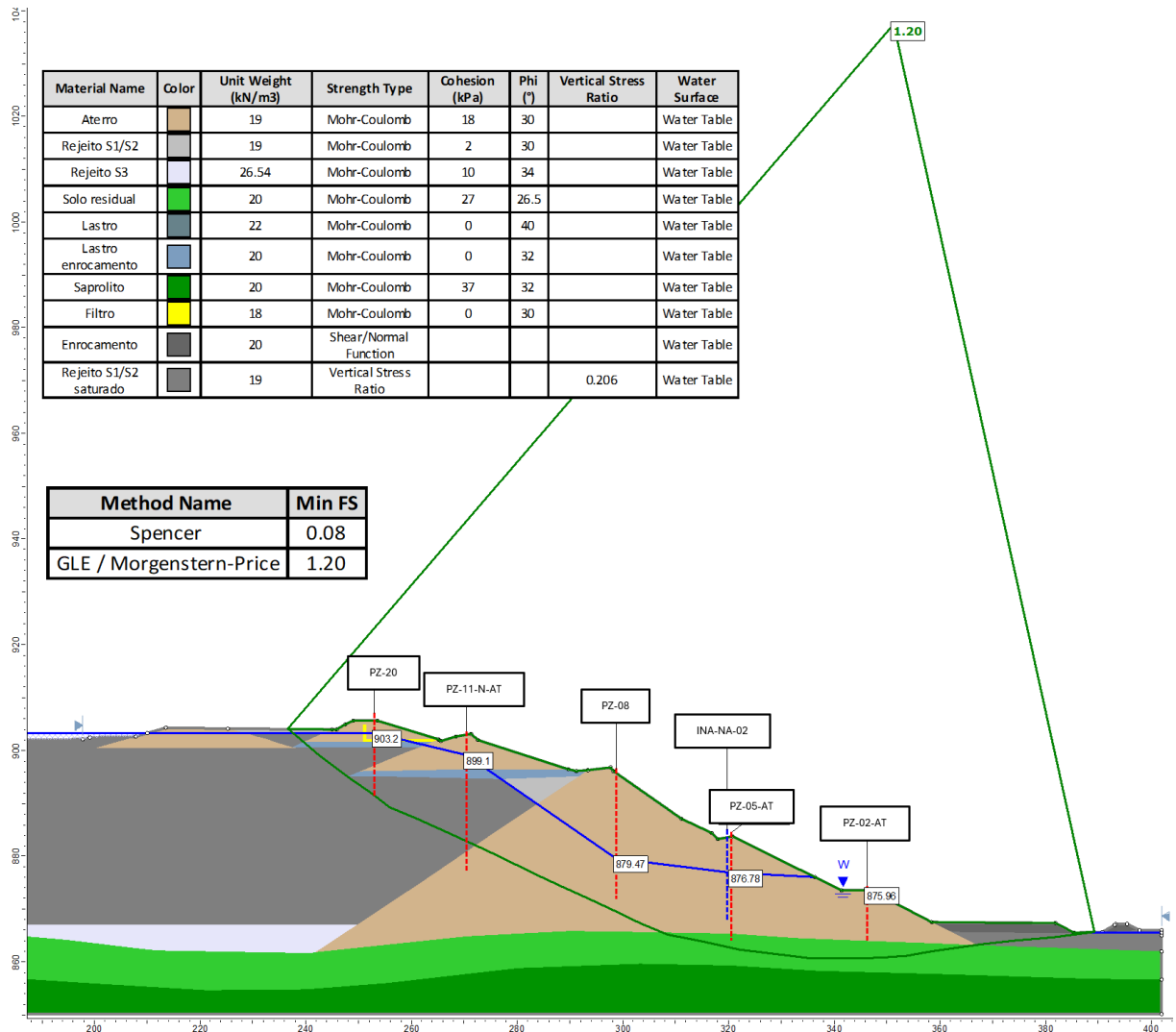
Para se determinar o nível d'água correspondente ao estado de alerta aplicou-se o critério normativo de $FS = 1,20$. A Figura 30 e a Figura 31 mostram respectivamente os níveis d'água das seções 1 e 2 que atendem a esse critério.

Figura 30 – Nível de alerta – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 – Nível de alerta – Seção 2

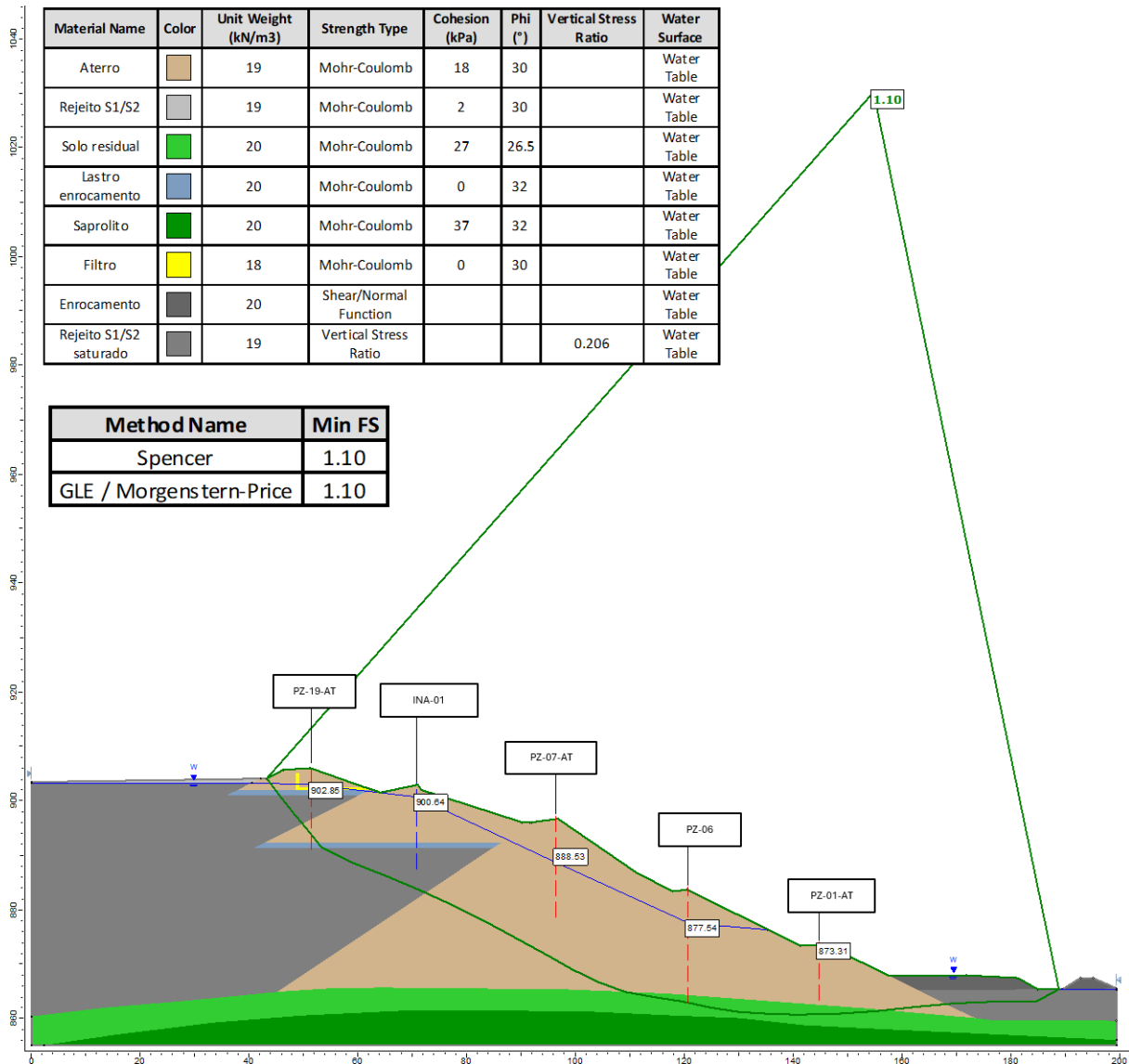


Fonte: Elaborado pelo autor

4.4. Nível de emergência

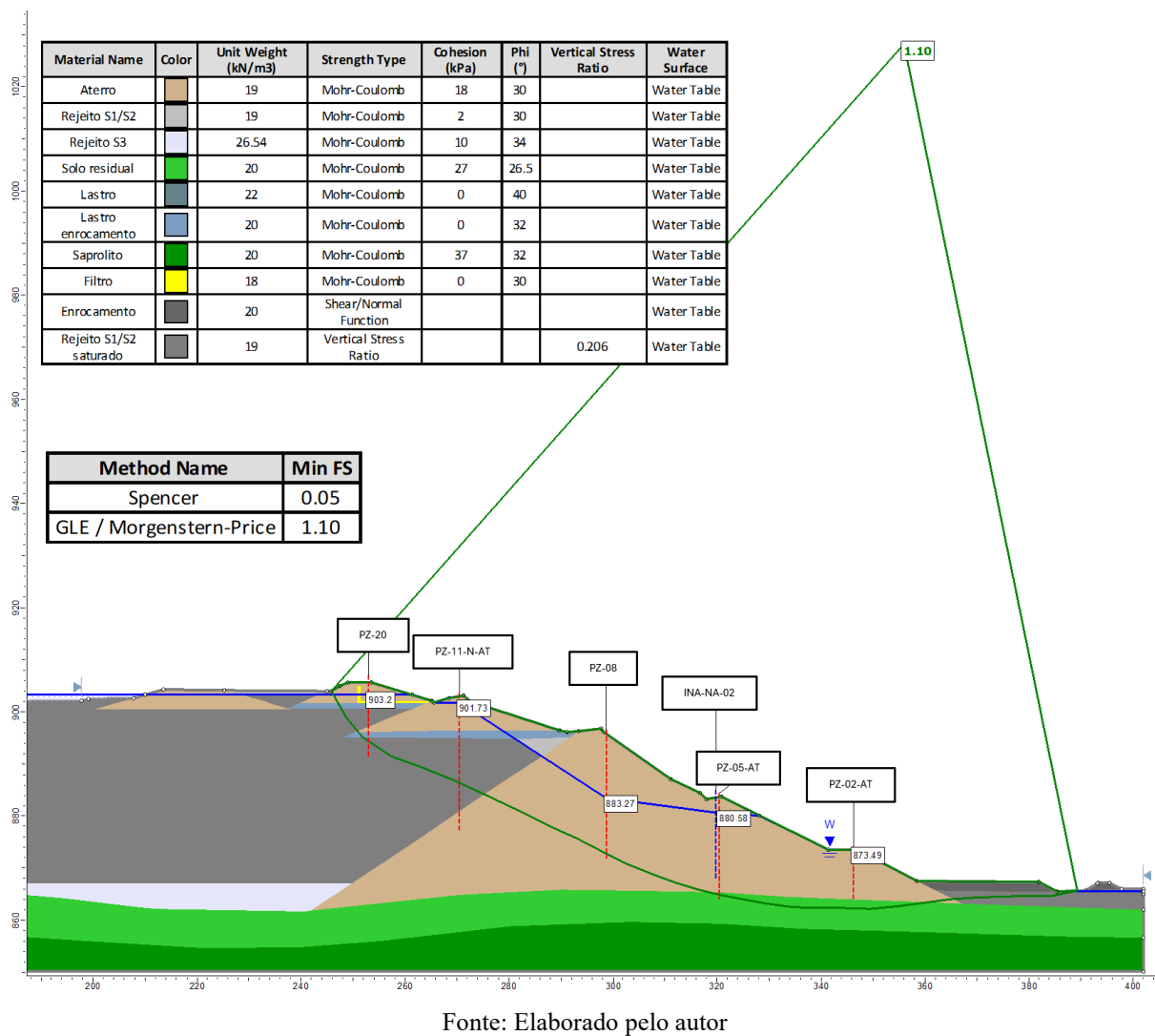
Considera-se um nível de emergência quando o fator de segurança para estabilidade estrutural atinge valores iguais ou menores que 1,10. A Figura 32 e a Figura 33 mostram os níveis d'água em que essa condição seria alcançada.

Figura 32 – Nível de emergência – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33 – Nível de emergência – Seção 2



4.5. Análise dos resultados

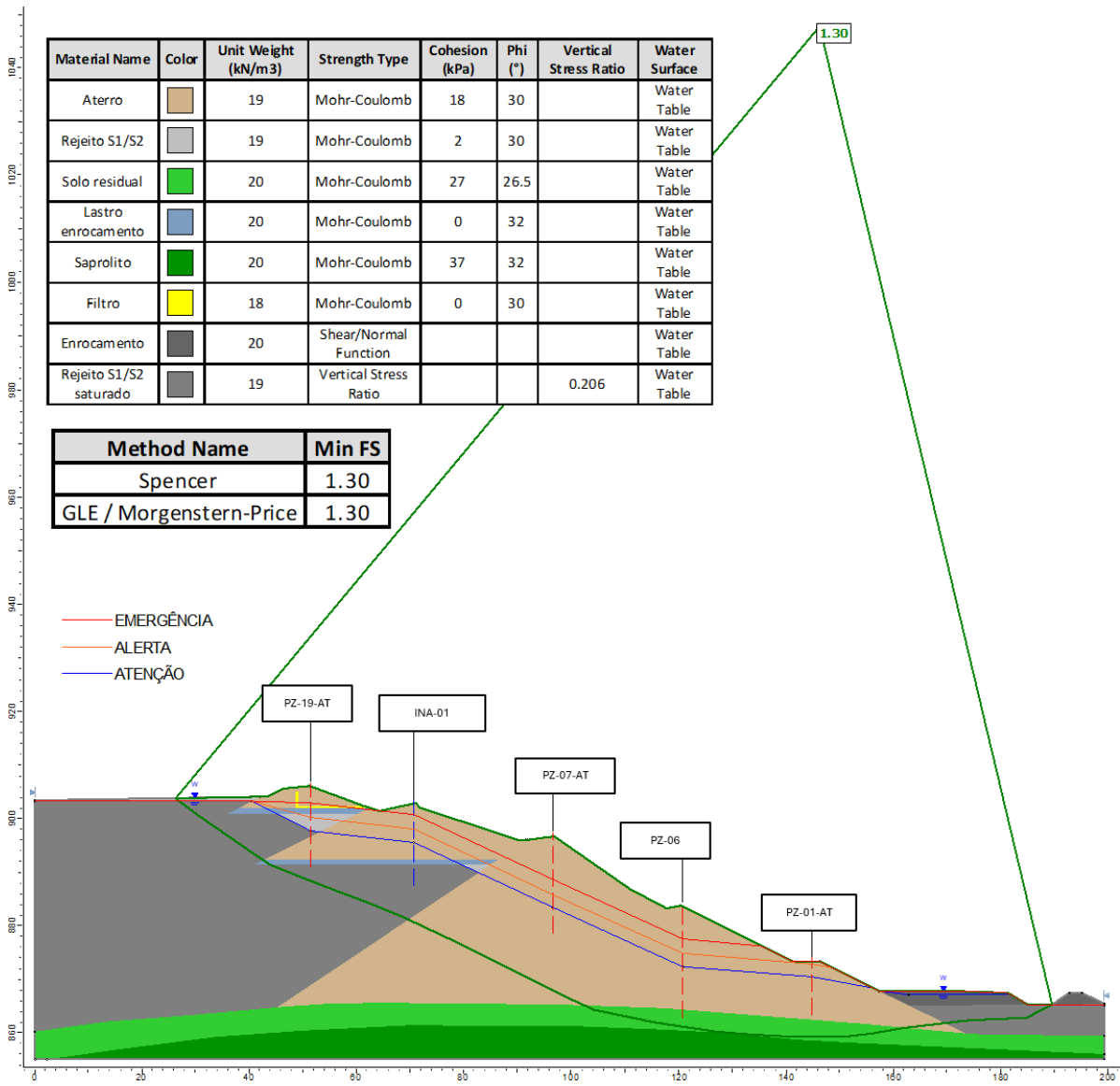
A Figura 34 e Figura 35 agrega as linhas freáticas correspondentes aos níveis de atenção, alerta e emergência para as duas seções em estudo.

Sobre os níveis de segurança da carta de risco, a partir das leituras máximas dos instrumentos no ano de 2024, foi necessária uma variação positiva de 3,5 metros no nível d’água para se obter um nível de atenção para a seção 1. Para a seção 2, essa variação foi de 6,80 metros.

Trata-se de variações hipotéticas do nível d’água, visto que seriam necessárias precipitações inimagináveis para se estabelecer aumentos da magnitude de 3,5 e 6,8 metros. Contudo, a rápida elevação do nível d’água pode atuar como gatilhos para diversos mecanismos

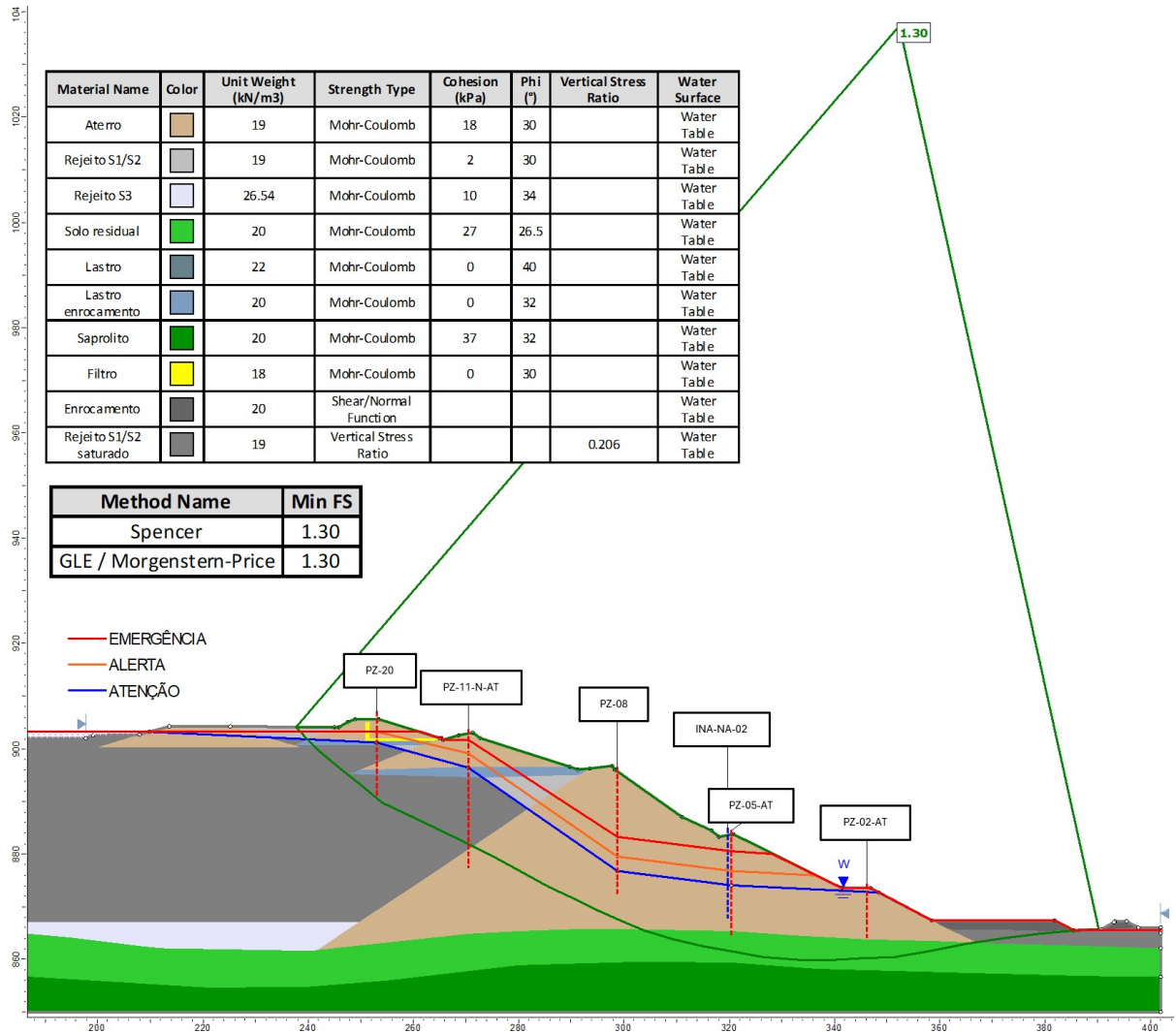
de ruptura do maciço. Esses mecanismos de falha foram abordados na revisão de literatura e serão retomados na conclusão.

Figura 34 – Resumo dos níveis de emergência – Seção 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 35 – Resumo dos níveis de emergência – Seção 2



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 9 apresenta um resumo das leituras de referência, indicando os valores esperados dos instrumentos para cada nível de controle. Dessa forma, a tabela auxilia na identificação dos limites que caracterizam os diferentes níveis de controle.

É importante ressaltar que se considerou que todo o fluxo interno de água do reservatório seria direcionado para o extravasor, o qual, por sua vez, possuiria capacidade suficiente para drenar o excesso de água. Dessa forma, o nível d'água dentro do reservatório não poderia assumir cota superior a cota da soleira do extravasor. Portanto, em nenhum dos cenários analisados, o nível de água do reservatório excedeu a elevação 903,20m.

Tabela 9: Níveis de controle da instrumentação da barragem.

Seção	Instrumento	N.A. Máximo	Leitura de referência (cota)			
			TR 10.000 anos	Atenção	Alerta	Emergência
1	PZ-19-AT	894,15	895,65	≤897,65	≤900,15	≤902,85
	INA-01	891,94	893,44	≤895,44	≤897,94	≤900,64
	PZ-07-N- AT	879,83	881,33	≤883,33	≤885,83	≤888,53
	PZ-06	868,84	870,34	≤872,34	≤874,84	≤877,54
	PZ-01-AT	866,91	868,41	≤870,41	≤872,91	≤873,31
2	PZ-20	894,34	895,84	≤901,14	≤903,2	≤903,2
	PZ-11-N	889,5	891	≤896,3	≤899,1	≤901,73
	PZ-08	871,96	871,37	≤876,67	≤879,47	≤803,27
	INA-NA- 02	867,95	-	-	-	-
	PZ-05-AT	867,18	868,68	≤873,98	≤876,78	≤880,58
	PZ-02-AT	866,04	867,54	≤872,69	≤875,96	≤873,49

Fonte: Elaborado pelo autor

5. CONCLUSÃO

O presente estudo analisou as leituras dos instrumentos de uma barragem de rejeitos real no decorrer do ano de 2024. A partir do tratamento desses dados e da avaliação de dados meteorológicos de uma estação próxima, foram estabelecidos níveis d'água máximos para diferentes estados de risco da referida estrutura.

Não foi observado nenhum comportamento dos instrumentos que demonstrasse erro durante a coleta dos dados. Portanto, o trabalho direcionou a atenção as questões que tangem o fator de segurança e os possíveis mecanismos de ruptura da estrutura, principalmente discutindo-se os altos valores de poropressões encontrados nas superfícies de ruptura.

Através das análises de estabilidades foi possível afirmar que, avaliando-se somente o fator de segurança determinado por norma, a barragem suportaria uma precipitação com um tempo de retorno de 10.000 anos – estimada em aproximadamente 1500 mm ao longo de 30 dias -, uma vez que ambas as seções apresentaram $FS > 1,30$ sob a condição não drenada. Ressalta-se, contudo, que esta avaliação não contempla a verificação da capacidade de escoamento do sistema extravasor, nem da drenagem interna e drenagem superficial da estrutura.

Para que os níveis de segurança da carta de risco (atenção, alerta e normal) pudessem ser atingidos foi necessária uma variação muito elevada no nível d'água, maior que a chuva máxima determinada para o tempo de retorno de 10.000 anos.

É importante destacar que há diversas metodologias disponíveis para a elaboração da carta de risco, tais como a avaliação do gradiente hidráulico, o tratamento estatístico dos dados de monitoramento e a identificação de surgência na face da estrutura. Diante disso, sugere-se, para estudos futuros, o desenvolvimento de uma abordagem alternativa à variação do nível d'água, com foco na aplicação de técnicas estatísticas aos dados disponíveis. Tal proposta contribuiria para a consolidação dos resultados obtidos nesse trabalho, ampliando a compreensão dos fatores que influenciam a estabilidade da barragem.

REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022*. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília: ANM, 2022. (Com alterações das Resoluções ANM nº 130/2023 e 175/2024).

ALVES FILHO, A. *Elementos finitos – a base da tecnologia CAE*. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 13028:2024 – Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água – Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

AUBERTIN, M.; MBONIMPA, M.; BUSSIÈRE, B. & CHAPUIS, R.P. (2003). *A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties*. Canadian Geotechnical Journal, 40(6), 1104 1102.

BARTHOLOMEW, Charles L.; MURRAY, Bruce C.; GOINS, Dan L. *Embankment Dam Instrumentation Manual*. Denver: Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, 1987.

BERISAVLJEVIĆ, Zoran; RAKIĆ, Dragoslav; ŠUŠIĆ, Nenad; BERISAVLJEVIĆ, Dušan. *Definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de massa rochosa heterogênea de flysch – Parte I: características geológico-geotécnicas*. In: 6º Simpósio Científico-Técnico SGIS – Aspectos Geotécnicos da Engenharia Civil, 2015, Sérvia. Anais [...]. Sérvia: SGIS, 2015.

FELL, R.; FOSTER, M.; CYGANIEWICZ, J.; SILLS, G.; VROMAN, N.; DAVIDSON, R. *A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. Draft Guidance Document. aug. 2008.

FONSECA, Alessandra da Rocha. *Ausculação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica: estudo de caso das barragens da UHE São Simão*. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003

GERSCOVICH, Danilo Marcelino Seiti. *Geotecnia ambiental: princípios e aplicações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

GERSCOVICH, Danilo Marcelino Seiti. *Mecânica dos solos aplicada: volume 1 – conceitos básicos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Reservoirs and seismology*. Bulletin 82. Paris: ICOLD, 1992.

ISRM – INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Oxford, v. 15, n. 6, p. 319–368, 1978.

MARTIN, T.E. (1999). *Characterization of pore pressure conditions in upstream tailings dams, Proceedings, Tailings & Mine Waste '99*, Fort Collins, Colorado, pp. 303-313.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. *The analysis of the stability of general slip surfaces*. Géotechnique, London, v. 15, n. 1, p. 79–93, 1965.

PEREIRA, Tonismar dos Santos. *Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra*. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

PONCE, V. M.; TSIVOGLU, A. J. Modeling gradual dam breaches. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 107, n. HY7, p. 829–838, 1981.

POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIĆ, L. *Finite element analysis in geotechnical engineering: theory*. London: Thomas Telford, 1999.

ROCSCIENCE INC. *Slide2 – Documentação do tipo de força: Define Material Properties*. Toronto, Canadá: Rocscience Inc., 2025. Disponível em: <https://www.rocscience.com>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SALIBA, Aloysio Portugal Maia. *Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado*. 2009. 193 f. Tese (Doutorado em

Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2009.

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F.; CLEVINGER, W. A. *Earth and earth-rock dams: engineering problems of design and construction*. New York: Wiley, 1963.

SILVA, João Paulo Moreira da. *Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Geotecnia) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

SILVEIRA, João Francisco Alves. *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. ISBN 978-85-86238-61-1.

SINGH, V. P. *Dam breaching modeling technology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

SOARES, José Paulo Rocha; MALVEIRA, Vanda Tereza Costa. Segurança contra o risco de piping em barragens de terra através da distribuição Weibull. *Essentia – Revista de Cultura, Ciência e Tecnologia*, Sobral, v. 21, n. 2, p. 70–78, 2020. DOI: [10.36977/ercct.v21i2.373](https://doi.org/10.36977/ercct.v21i2.373).

SPENCER, E. *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces*. *Géotechnique*, London, v. 17, n. 1, p. 11–26, 1967.

THOMAZ, Edivaldo M. *Barragens de terra e enrocamento*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 1984.

WAHL, T. L. *The uncertainty of embankment dam breach parameter predictions based on dam failure case studies*. In: USDA/FEMA WORKSHOP ON ISSUES – RESOLUTIONS AND RESEARCH NEEDS RELATED TO DAM FAILURE ANALYSIS, 2001, Oklahoma City. Anais [...]. Oklahoma City: USDA/FEMA, 2001.