



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Faculdade de Engenharia

Curso de Licenciatura em Engenharia Civil

Trabalho de Licenciatura

Um Estudo de Pressões Intersticiais da Barragem de Corumana

Mateus Gabriel Cambaza

Supervisores:

Prof. Dr. Eng.º Carlos Quadros (Professor Auxiliar)

Eng.º Sidney de Abreu (TÉCNICA - Engenheiros Consultores, Lda.)

Maputo, Abril de 2025

Mateus Gabriel Cambaza

Um Estudo de Pressões Intersticiais da Barragem de Corumana

Trabalho de Licenciatura submetido ao
Departamento de Engenharia Civil para
a obtenção do Grau de Licenciatura em
Engenharia Civil

Supervisores:

Prof. Dr. Eng.º Carlos Quadros (Professor Auxiliar)

Eng.º Sidney de Abreu (TÉCNICA - Engenheiros Consultores, Lda.)

Maputo, Abril de 2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais pelo apoio incondicional em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é o reflexo de toda a minha jornada académica, a qual só foi possível graças ao apoio incondicional de inúmeras pessoas e instituições, às quais sou profundamente grato. Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento:

A Deus, em primeiro lugar, pela vida, pela saúde e pela força que me concedeu para enfrentar cada desafio ao longo desta jornada.

Aos meus pais, pelo amor, sacrifício e apoio incansável. Tudo o que sou e conquistei é reflexo do exemplo de força e determinação que sempre me proporcionaram.

Ao supervisor, Carlos Quadros, pela sua disponibilidade, paciência e constante incentivo ao longo da elaboração deste trabalho. A sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste estudo e para garantir os resultados alcançados.

Ao co-supervisor, Sidney de Abreu, pela orientação e apoio, tanto neste estudo quanto no âmbito do estágio, sendo um exemplo de profissionalismo e tendo um impacto significativo na realização deste trabalho.

À Universidade Eduardo Mondlane, em especial ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia, pela formação sólida e pelo conhecimento transmitido ao longo da minha formação como engenheiro civil.

Aos docentes, pela dedicação, paciência e pelo empenho em transmitir conhecimento, cujas orientações e lições valiosas foram fundamentais para o meu crescimento académico e profissional.

À TÉCNICA, pela oportunidade de estágio e pelo apoio prestado. Em especial à Cleide Santos, Hans Dete, Olga Honchar e Vasco Cossa, pelo apoio constante, pela partilha de informações valiosas e pelos esclarecimentos de dúvidas.

À ARA-Sul, em especial ao Oscar Sibia e Roberto Chaúque, pela colaboração e pelo fornecimento de informações essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos meus amigos e colegas de turma, em especial ao Alberto Razul, Bento Rosário, Castigo Macie, Elsídio Jonasse, Fernando Zunguze, Málik Boane e Onésimo Sambo, pelo apoio mútuo, pela troca de conhecimento e pelo companheirismo ao longo desta jornada académica.

À minha família, amigos e a todos que contribuíram directa ou indirectamente, para a realização deste trabalho.

RESUMO

As pressões intersticiais são fundamentais para a estabilidade das barragens de terra, estando intrinsecamente associadas a fenómenos críticos como erosão interna, *piping* e instabilidade de taludes. A ausência de um monitoramento eficaz limita severamente a capacidade de detecção precoce de mecanismos de rotura, comprometendo a implementação de medidas preventivas.

Dada a importância estratégica da Barragem de Corumana na gestão dos recursos hídricos em Moçambique, este estudo foi conduzido para aprofundar o conhecimento dos riscos associados as pressões intersticiais e propor medidas para reforçar a segurança e funcionalidade da barragem.

Para alcançar este objectivo, foram recolhidos e analisados dados piezométricos, visando investigar as condições de percolação subterrânea, os gradientes hidráulicos na fundação da barragem, a influência de factores como o nível da albufeira nas pressões intersticiais ao longo do comprimento da barragem, bem como a verificação da estabilidade dos taludes em diferentes cenários operacionais.

Os resultados demonstraram que 70% dos piezómetros apresentaram uma forte correlação com o nível da albufeira, sendo registadas pressões acima do esperado no PTA 18. Os gradientes hidráulicos máximos permaneceram dentro dos limites de segurança, não foram detectadas anomalias nos caudais de percolação, e os factores de segurança dos taludes excederam os valores mínimos recomendados. Contudo, as limitações do sistema de monitoramento actual, caracterizado por baixa frequência de leituras e ausência de automatização, dificultam a detecção antecipada de indícios de rotura.

Palavras-chave:

Barragem de Corumana, Erosão interna e *piping*, Monitoramento de barragens, Piezómetros, Pressões intersticiais.

ABSTRACT

Pore pressures are fundamental to the stability of earth dams, being intrinsically linked to critical phenomena such as internal erosion, piping, and slope instability. The absence of effective monitoring severely limits the ability to detect early-stage failure mechanisms, thereby compromising the implementation of preventive measures.

Given the strategic importance of the Corumana Dam in water resource management in Mozambique, this study was conducted to deepen the understanding of risks associated with pore pressures and propose measures to enhance the structural safety and functionality of the dam.

To achieve this objective, piezometric data were collected and analyzed to investigate underground seepage conditions, hydraulic gradients in the dam's foundation, the influence of factors such as reservoir levels on pore pressures along the dam, and slope stability under different operational scenarios.

The results showed that 70% of the piezometers exhibited a strong correlation with reservoir levels, with pressures exceeding expectations recorded at PTA 18. The maximum hydraulic gradients remained within safe limits, no anomalies were detected in seepage flow rates, and the slope stability factors exceeded the minimum recommended values. However, the current monitoring system, characterized by low reading frequency and lack of automation, hinders the early detection of potential failure indicators.

Keywords: Corumana Dam, Internal erosion and piping, Dam monitoring, Piezometers, Pore pressures.

ÍNDICE GERAL

DEDICATÓRIA	I
AGRADECIMENTOS	II
RESUMO	III
ABSTRACT	IV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	1
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.3. OBJECTIVOS.....	2
1.3.1. Geral.....	2
1.3.2. Específicos	2
1.4. METODOLOGIA.....	2
1.4.1. Revisão Bibliográfica	2
1.4.2. Estudo Documental	3
1.4.3. Análise Estatística	3
1.4.4. Mapeamento dos gradientes hidráulicos	3
1.4.5. Modelação numérica	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. LIÇÕES DO PASSADO: BARRAGEM DE SARDOBA.....	4
2.2. PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA.....	5
2.2.1. Permeabilidade.....	6
2.2.2. Gradiente Hidráulico	6
2.2.3. Tensões no Solo.....	8
2.2.4. Determinação da Percolação.....	9
2.3. ESTABILIDADE DE TALUDES	10
2.4. EROSÃO INTERNA E <i>PIPING</i>	11
2.4.1. Visão Geral.....	11

2.4.2. Iniciação.....	11
2.4.3. Continuidade.....	13
2.4.4. Progressão	13
2.4.5. Rotura.....	14
2.4.6. Detecção da erosão interna e <i>piping</i> em barragens de terra.....	14
2.4.7. Métodos de Mitigação.....	15
2.5. MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA... 16	
2.5.1. Instrumentação em Barragens de Terra	17
2.5.1.1. Piezómetros.....	17
2.5.1.2. Medidores de Nível de Água	18
2.5.1.3. Medidores de Caudal.....	18
2.5.1.4. Inclínómetros	19
2.5.1.5. Extensómetros.....	19
2.5.2. Metodologia de Inspeção e Monitoramento	19
2.5.3. Análise dos Dados de Monitoramento de Percolação	20
2.5.3.1. Objectivos da Análise de Dados de Percolação	20
2.5.3.2. Níveis de Alarme no Monitoramento de Percolação e Acções Subsequentes.....	21
2.5.3.3. Mudanças Gradativas e Abruptas na Percolação.....	21
3. ESTUDO DE CASO	22
3.1. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM EM ESTUDO.....	22
3.1.1. Introdução.....	22
3.1.2. Localização Geográfica e Função	22
3.1.3. Composição Estrutural da Barragem.....	23
3.1.4. Caracterização Geotécnica dos Materiais	23
3.1.5. Dados Hidrológicos.....	27
3.1.6. Sistema de Monitoramento da Barragem	27

3.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO DOS PIEZÓMETROS	28
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS PIEZOMÉTRICOS	31
3.4. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM.....	33
3.4.1. Análise da Distribuição de Energias Piezométricas.....	33
3.4.2. Análise dos Gradientes Hidráulicos.....	35
3.5. CONFIGURAÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DA BARRAGEM.....	36
3.6. COMPORTAMENTO DO CAUDAL DE PERCOLAÇÃO NA BARRAGEM.....	40
3.6.1. Dados do Monitoramento.....	40
3.6.2. Identificação de Tendências nos Medidores de Caudal	40
3.7. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DA BARRAGEM	41
3.8. MEDIDAS DE APRIMORAMENTO DO MONITORAMENTO	43
3.8.1. Frequência do Monitoramento	43
3.8.2. Implementação de um Sistema Automático de Aquisição de Dados (ADAS).....	44
3.8.3. Análise e Validação dos Dados	45
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	46
4.1. CONCLUSÕES	46
4.2. RECOMENDAÇÕES	47
5. BIBLIOGRAFIA	48
5.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
6. ANEXOS	49

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Acrónimos e Siglas

ADAS	Sistema automático de aquisição de dados
ANCOLD	<i>Australian National Committee on Large Dams</i>
FS	Factor de segurança
ICODS	<i>International Committee on Dams Safety</i>
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
NMC	Nível de máxima cheia
NME	Nível mínimo de exploração
NPA	Nível de pleno armazenamento
PCV	Piezómetro de corda vibrante
PTA	Piezómetro de ponta aberta
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USBR	<i>United States Bureau of Reclamation</i>
USCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

Símbolos

a	Coeficiente angular da equação de regressão linear
b	Coeficiente linear da equação de regressão linear
c'	Coesão efectiva do solo
cm/s	Centímetros por segundo
i_{cr}	Gradiente hidráulico crítico
i_e	Gradiente hidráulico medido ou previsto
i_{kd}	Gradiente hidráulico máximo permissível
K	Coeficiente de permeabilidade
KN/m ³	Quilonewtons por metro cúbico
KPa	Quilopascais

m.a.n.m.	Metros acima do nível do mar
ϕ'	Ângulo de atrito interno efectivo do solo
Q	Caudal
R^2	Coeficiente de determinação
U	Pressão intersticial
V	Velocidade do fluxo
Δ	Desvio padrão
γ_d	Peso específico seco do solo
γ_{sat}	Peso específico saturado do solo
γ_w	Peso específico da água

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Inundações provocadas pela rotura da Barragem de Sardoba.	4
Figura 2.2- Barragem de Sardoba após a rotura.	5
Figura 2.3- Percolação através de uma barragem de terra zonada.	5
Figura 2.4- Fluxo de água em amostra de solo.	7
Figura 2.5 - Tensões em um solo sob Percolação Ascendente.	9
Figura 2.6 - Modos de desenvolvimento do colapso por erosão interna.	12
Figura 2.7 - Esquema de um Piezómetro de Ponta Aberta e um Piezómetro de Corda Vibrante.	18
Figura 2.8- Descarregador em V-notch na Barragem de Corumana.	18
Figura 3.1 - Barragem de Corumana	22
Figura 3.2- Localização da Barragem de Corumana.	23
Figura 3.3 - Amostras extraídas durante a instalação dos piezómetros.	24
Figura 3.4 – Perfil Transversal Tipo da Barragem de Corumana	25
Figura 3.5 – Disposição dos piezómetros no Perfil 12.	25
Figura 3.6 - Mapa de Instrumentação da Barragem de Corumana	26
Figura 3.7 - Execução dos furos para instalação dos piezómetros.	27
Figura 3.8 - Instalação dos Piezómetros nos furos.	27
Figura 3.9 - Distribuição das energias hidráulicas	34

Figura 3.10 - Distribuição dos gradientes hidráulicos	34
Figura 3.11 – Representação dos cortes longitudinais em planta	37
Figura 3.12 - Corte longitudinal 1	38
Figura 3.13 - Corte longitudinal 2	39

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Gradientes hidráulicos máximos permissíveis (i_{kd}) em barragens de terra.	8
Tabela 2.2- Factores de Segurança Mínimos para Barragens de Terra e Enrocamento.	10
Tabela 2.3 - Estatísticas de colapsos e acidentes em barragens de aterro até 1986....	16
Tabela 3.1- Resumo das características geotécnicas da Barragem de Corumana	24
Tabela 3.2- Tabela resumo das leituras dos níveis de água e das pressões nos piezómetros.....	29
Tabela 3.3 – Resumo da correlação entre os níveis da albufeira e as leituras dos piezómetros.....	31
Tabela 3.4 – Leituras do Caudal de Percolação	40
Tabela 3.5 - Resumo dos factores de segurança nos taludes da Barragem de Corumana.....	42
Tabela 3.6 - Frequência Típica de Leitura dos Instrumentos de Monitoramento.....	44
Tabela 3.7 - Níveis de atenção e alerta em função do desvio aos modelos.....	45

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A gestão eficiente dos recursos hídricos é crucial para o desenvolvimento sustentável, especialmente em países em desenvolvimento como Moçambique, onde as barragens desempenham um papel fundamental no abastecimento de água, irrigação e controlo de cheias. A Barragem de Corumana, situada na Província de Maputo, é uma infraestrutura estratégica para a região, inicialmente projectada para fins de irrigação, produção de energia hidroelétrica e regulação dos caudais do rio Sabié, tendo posteriormente expandido a sua funcionalidade para também fornecer abastecimento de água à Área Metropolitana do Grande Maputo.

No entanto, barragens de terra, como a de Corumana, apresentam riscos inerentes à sua segurança, particularmente devido a influência das pressões intersticiais na sua estabilidade. De acordo com um estudo do National Research Council (1983), citado por Fell et al. (2015), a grande parte das roturas registadas em barragens ocorreu em barragens de aterro, com uma parte significativa dessas falhas associada a fenómenos como *piping* e percolação, frequentemente agravados pela falta de monitoramento adequado.

Dada a importância da Barragem de Corumana e sua exposição a tais vulnerabilidades, é essencial avaliar e monitorar continuamente as pressões intersticiais, garantindo a sua operação segura e minimizando os riscos de uma eventual rotura. Este estudo, ao analisar a influência das pressões intersticiais na estabilidade da barragem, visa contribuir para a gestão desta barragem e fornecer recomendações técnicas para aprimorar o monitoramento, servindo como referência para outras barragens com características semelhantes.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

As barragens de terra desempenham um papel fulcral na gestão de recursos hídricos, sendo a estabilidade destas estruturas fortemente condicionada pelas pressões intersticiais. Com a recente instalação de um sistema de instrumentação piezométrica na Barragem de Corumana, surge a necessidade de consolidar os dados obtidos com métodos para caracterizar e antecipar os processos que possam colocar em risco a estabilidade da estrutura. Pelo que se coloca a seguinte pergunta de pesquisa:

Como as pressões intersticiais actualmente influenciam a estabilidade da Barragem de Corumana face aos fenómenos de risco, como a erosão interna e o deslizamento de taludes?

1.3. OBJECTIVOS

1.3.1. Geral

- Analisar a influência das pressões intersticiais na estabilidade e segurança da Barragem de Corumana e propor medidas para o monitoramento dessas pressões.

1.3.2. Específicos

- Avaliar as variações das pressões intersticiais na Barragem de Corumana, identificar os factores que influenciam essas variações e desenvolver um modelo estatístico adequado para estimar o comportamento das pressões ao longo do tempo;
- Investigar sobre as condições em que a percolação se desenvolve na fundação da barragem;
- Estudar a segurança da Barragem de Corumana em relação ao fenómeno de erosão interna e deslizamento de taludes;
- Propor protocolos para o monitoramento contínuo das pressões intersticiais.

1.4. METODOLOGIA

Com vista a alcançar os objectivos ora traçados, adoptou-se a seguinte metodologia.

1.4.1. Revisão Bibliográfica

Como etapa inicial do trabalho, foi conduzido um estudo bibliográfico abrangente com o objectivo de fundamentar teoricamente a investigação, abordando temas como barragens de aterro, pressões intersticiais, fenómenos como *piping* e estabilidade de taludes, bem como os métodos empregues no monitoramento destas estruturas.

1.4.2. Estudo Documental

Procedeu-se à consulta do projecto executivo da barragem, o qual inclui plantas, cortes transversais e especificações técnicas, bem como relatórios e registos de sondagens geotécnicas efectuadas tanto durante a fase de construção da barragem como no decurso dos trabalhos de reposição do seu funcionamento normal em 2024.

1.4.3. Análise Estatística

Os dados piezométricos foram submetidos a análises estatísticas com o objectivo de identificar padrões de variação e possíveis correlações com o nível da albufeira. Para cada piezómetro, aplicou-se uma regressão linear simples, considerando-se como variável independente o nível da albufeira e como variável dependente as leituras piezométricas. O ajuste das rectas de regressão foi realizado pelo método dos mínimos quadrados, tendo sido determinados os coeficientes angular e linear, o coeficiente de determinação e o erro padrão. A análise foi realizada com recurso ao Microsoft Excel.

1.4.4. Mapeamento dos gradientes hidráulicos

O mapeamento dos gradientes hidráulicos foi efectuado com o objectivo de estimar o regime do fluxo subterrâneo na fundação da barragem. Para tal, com base nos níveis piezométricos registados em cada piezómetro, recorreu-se ao método de interpolação Triangular Irregular Network (TIN) no software QGIS, a fim de gerar superfícies equipotenciais bidimensionais da energia hidráulica ao longo da fundação. A partir dessas superfícies, calcularam-se os gradientes hidráulicos entre os piezómetros, o que permitiu a elaboração de um mapa representativo dos gradientes na fundação e da possível direcção preferencial do escoamento subterrâneo. Com os gradientes hidráulicos determinados, verificou-se se os seus valores estavam dentro dos limites considerados seguros pela literatura.

1.4.5. Modelação numérica

Para avaliar a segurança dos taludes da Barragem de Corumana sob diferentes condições operacionais, recorreu-se ao software PLAXIS LE 2D, o qual permitiu a elaboração de modelos numéricos de algumas secções da barragem, com base nos cortes transversais disponíveis e em parâmetros geotécnicos estimados para os solos que a compõem. A análise de estabilidade foi realizada com recurso aos métodos de equilíbrio limite de Bishop modificado e de Spencer.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. LIÇÕES DO PASSADO: BARRAGEM DE SARDOBA

Aprender com os erros do passado é fundamental para evitar a repetição de falhas no futuro. A História oferece exemplos valiosos de como a negligência pode levar a consequências catastróficas, e o colapso da Barragem de Sardoba, Uzbequistão, em 2020, é um desses casos emblemáticos.

A Barragem de Sardoba, concluída em 2017, possui uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 920 Mm³ e uma área de albufeira superior a 50 km² no nível de pleno armazenamento. Projectada para fins de irrigação, a barragem é composta por aterros de terra e enrocamento. Tendo o seu colapso causado a morte de seis pessoas e forçou o deslocamento de mais de 100.000 habitantes nos territórios do Uzbequistão e do Cazaquistão.



Figura 2.1 – Inundações provocadas pela rotura da Barragem de Sardoba.

Fonte: USAID (2020).

Um estudo de retroanálise conduzido por Xiao et al. (2022), identificou por meio de monitoramento geoespacial e técnicas de radar, deformações na estrutura antes do evento catastrófico. Esses dados levaram os pesquisadores a concluir que a principal causa do colapso foi a erosão interna no corpo da barragem, fenómeno evidenciado por assentamentos diferenciais de aproximadamente 60 mm na seção afectada.

As deformações observadas poderiam ter sido detectadas com antecedência se a estrutura estivesse devidamente instrumentada, extensómetros e inclinómetros teriam registado os deslocamentos e inclinações associados à deformação progressiva,

enquanto a erosão interna em desenvolvimento teria produzido variações nas leituras dos piezómetros.



Figura 2.2- Barragem de Sardoba após a rotura.

Fonte: ACCA (2022).

O colapso da Barragem de Sardoba é um exemplo na história de que o monitoramento adequado poderia ter permitido a identificação precoce dos sinais de rotura, possivelmente evitando o desastre. A instrumentação apropriada teria possibilitado a observação de deformações na estrutura da barragem e a detecção de anomalias nas pressões intersticiais antes do evento catastrófico.

2.2. PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA

As barragens de terra, devido à permeabilidade natural dos solos que as compõem, permitem a passagem de água através do seu corpo quando armazenam água. Este fenómeno, designado por percolação, está intrinsecamente ligado a diversos factores que influenciam a segurança e a estabilidade da estrutura.

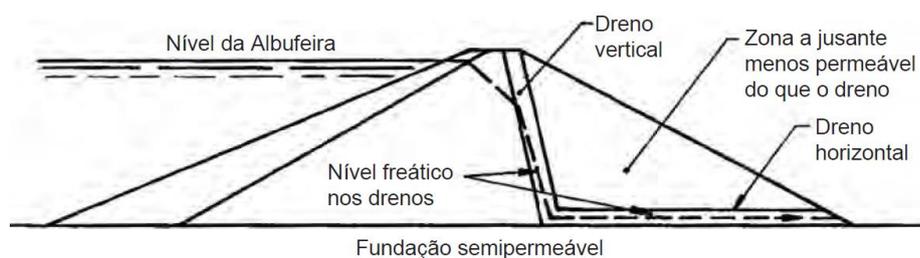


Figura 2.3- Percolação através de uma barragem de terra zonada.

Fonte: Fell et al. (2015).

A percolação em barragens de terra envolve uma série de factores que condicionam o seu comportamento. A seguir, serão abordados alguns desses aspectos.

2.2.1. Permeabilidade

Conforme afirma Das (2015), os solos são permeáveis devido à existência de espaços vazios interconectados, através dos quais a água consegue fluir de pontos de alta energia para pontos de baixa energia. A permeabilidade de um solo é expressa pelo coeficiente de permeabilidade (K), que quantifica a taxa de fluxo de um fluido através de uma unidade de área por unidade de tempo.

Segundo Das (2015), a permeabilidade de um solo, depende de vários factores, como a viscosidade do fluido, a distribuição e o tamanho dos poros, a granulometria, o índice de vazios, a rugosidade das partículas minerais, o grau de saturação e a estrutura do solo (principalmente em solos argilosos).

O fluxo de água pelos poros de um solo pode ser expresso pela Lei de Darcy, que descreve a velocidade do fluxo em função do coeficiente de permeabilidade e do gradiente hidráulico. A equação é dada por:

$$v = K \times i \quad (\text{Equação 2-1})$$

Onde:

v – velocidade do fluxo

K – coeficiente de permeabilidade

i – Gradiente hidráulico

A equação acima pode ser reescrita de forma a ter em conta o caudal através de uma área transversal:

$$Q = K \times i \times A \quad (\text{Equação 2-2})$$

Onde:

Q – caudal

A – área transversal

2.2.2. Gradiente Hidráulico

Quando a água flui através de uma massa de solo saturado, há uma certa resistência ao fluxo devido à presença de matéria sólida. As leis da mecânica dos fluidos aplicáveis ao fluxo de fluidos através de tubulações também são aplicáveis ao fluxo de água através de solos (Murthy, 2002).

O teorema de Bernoulli pode ser aplicado para determinar a energia do fluxo de água. Considera-se que devido à pequena velocidade do fluxo de água no solo, a energia cinética é desconsiderada, assim segue-se que:

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (\text{Equação 2-3})$$

Onde:

H – energia total

u – pressão intersticial

γ_w – peso volumétrico da água

z – elevação acima de um plano escolhido

Este princípio pode ser compreendido em relação ao fluxo de água através de uma amostra de solo de comprimento (L) e área transversal (A), como mostrado na Figura 2.4.

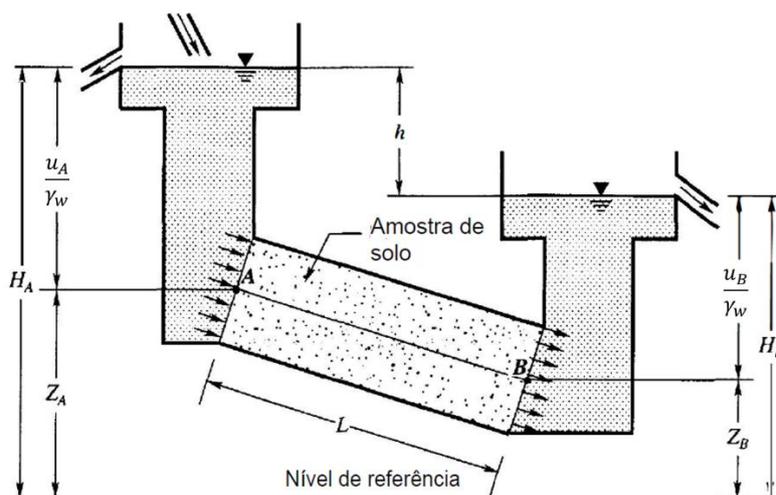


Figura 2.4- Fluxo de água em amostra de solo.

Fonte: Murthy (2002).

A medida que a água flui de A para B, ocorre uma perda de energia, que é representada pela diferença nas energias totais H_A e H_B . A perda de energia por unidade de comprimento de fluxo (gradiente hidráulico) pode ser expressa como:

$$i = \frac{h}{L} \quad (\text{Equação 2-4})$$

Onde:

i – gradiente hidráulico

h – diferença de energia hidráulica entre dois pontos

L – distância entre dois pontos ao longo da linha de fluxo

Os gradientes hidráulicos numa barragem de terra indicam o comportamento do fluxo de água através da estrutura, sendo sua determinação essencial para identificar riscos de erosão interna, colapso estrutural e percolação excessiva. Nesse contexto, Chugaev (1985, citado em Tanchev, 2014), estabelece intervalos admissíveis de gradiente hidráulico, obtidos por meio do processamento estatístico de dados de barragens já construídas, para diferentes tipos de solos.

Esses valores são definidos para prevenir instabilidades estruturais na barragem e são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Gradientes hidráulicos máximos permissíveis (i_{kd}) em barragens de terra.

Fundação da Barragem		Corpo da Barragem	
Tipo de solo	i_{kd}	Tipo de solo	i_{kd}
Argila	0.70-1.08	Argila compactada	1.50-1.95
Solo franco	0.35-0.54	Solo franco	1.05-1.35
Areia grossa	0.32-0.48	Areia média	0.70-1.00
Areia média-grossa	0.22-0.34	Areia argilosa	0.55-0.85
Areia fina	0.18-0.26	Areia fina	0.45-0.75

Fonte: adoptado de Tanchev (2014).

2.2.3. Tensões no Solo

Murthy (2002) afirma que a pressão transmitida de grão para grão através de uma massa de solo é denominada pressão efectiva, pois é responsável pela diminuição do índice de vazios e pelo aumento da resistência ao atrito de uma massa de solo.

Se os poros de uma massa de solo estiverem preenchidos com água e se uma pressão induzida na água do poro tentar separar os grãos, essa pressão é chamada de pressão intersticial ou pressão neutra. O efeito dessa pressão é aumentar o volume e diminuir a resistência ao atrito da massa de solo (Murthy, 2002).

A seguir, apresenta-se a Figura 2.5 com o esquema que ilustra as tensões em solos saturados durante a percolação ascendente.

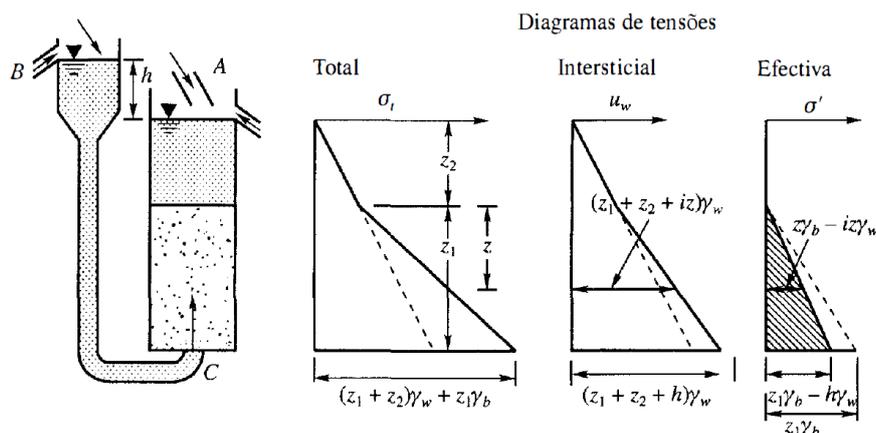


Figura 2.5 - Tensões em um solo sob Percolação Ascendente.

Fonte: Murthy (2002).

O aumento da pressão intersticial reduz a tensão efectiva, enfraquecendo a resistência ao cisalhamento entre as partículas do solo, o que pode levar a rotura da barragem, por erosão interna ou colapso do talude. Esse efeito é especialmente relevante em solos saturados, como nas fundações ou camadas baixas da barragem. Sistemas de drenagem eficazes ajudam a controlar a pressão intersticial, permitindo a eliminação do excesso de água e evitando variações que comprometam a tensão efectiva.

2.2.4. Determinação da Percolação

Cedergren (1989) aponta que o fluxo de água através do solo é uma das várias formas de fluxo que obedecem a relações fundamentais semelhantes e podem ser representadas pela equação de Laplace. No presente estudo, considera-se a formulação bidimensional para simplificação da análise.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Equação 2-5})$$

Onde:

k_x – coeficiente de permeabilidade na direcção horizontal

k_z – coeficiente de permeabilidade na direcção vertical

h – energia hidráulica total

Segundo Cedergren (1989), a equação acima pode ser representada por duas famílias de curvas (linhas de fluxo e linhas equipotenciais) que se intersectam em ângulos rectos para formar um padrão de figuras "quadradas" conhecido como: rede de fluxo.

As redes de fluxo são uma ferramenta prática e útil para resolver diversos problemas de percolação e drenagem. No entanto, tornam-se um método menos prático em casos

complexos de percolação, como os encontrados na maioria das barragens de terra, onde as condições variáveis e a geometria irregular dificultam a aplicação direta dessa técnica.

Em casos complexos, a equação de Laplace é integrada por métodos numéricos avançados, frequentemente implementados em softwares especializados, que resolvem de forma eficiente os problemas de fluxo em barragens de terra.

No projecto de todas as barragens de terra, as seguintes condições são muito importantes:

- A linha de percolação não deve cortar o talude de jusante;
- A perda de água por percolação através da barragem deve ser a mínima possível.

2.3. ESTABILIDADE DE TALUDES

Segundo Tanchev (2014), para barragens de aterro, é fundamental avaliar a estabilidade tanto do talude de montante quanto de jusante, considerando as condições mais adversas de carregamento.

A análise de estabilidade por Métodos de Equilíbrio Limite (MEL), como destaca Fell et al. (2015), enfrenta o desafio de ter menos equações de equilíbrio do que incógnitas, exigindo suposições para tornar o problema determinável. Dentre os disponíveis, Método Bishop Modificado é amplamente utilizado para superfícies circulares, devido à sua precisão e eficiência computacional. Para superfícies não circulares, os Métodos de Morgenstern e Price e Spencer são frequentemente empregues.

A Tabela 2.2 resume os factores de segurança para cada talude e condição de análise, exigidos pelo USACE, aplicáveis a barragens de aterro.

Tabela 2.2- Factores de Segurança Mínimos para Barragens de Terra e Enrocamento.

Condição de análise	FS mínimo requerido	Talude
Final da construção	1.3	Montante e jusante
Longo prazo (NPA)	1.5	Jusante
Nível de máxima cheia	1.4	Jusante
Rebaixamento rápido	1.1-1.3¹	Montante

¹ - FS = 1.1 aplica-se ao rebaixamento rápido a partir do nível de máxima cheia; FS = 1.3 aplica-se ao rebaixamento rápido a partir do nível de pleno armazenamento.

2.4. EROSÃO INTERNA E *PIPING*

2.4.1. Visão Geral

A erosão interna é um modo de rotura significativo para grandes e pequenas barragens, sendo responsável por metade das roturas registadas nessas estruturas. O ICODS (2015) define erosão interna como a erosão/desprendimento de partículas de solo abaixo da superfície do solo devido ao fluxo de água subterrânea. Conforme afirma o ICODS (2015), o termo *piping* também é utilizado como um termo geral para descrever a remoção de solo de estruturas de aterro, assim como a erosão interna.

Os acidentes e colapsos causados pela erosão interna em barragens de aterro e suas fundações são categorizados em três modos gerais de rotura, que são (Fell et al., 2015):

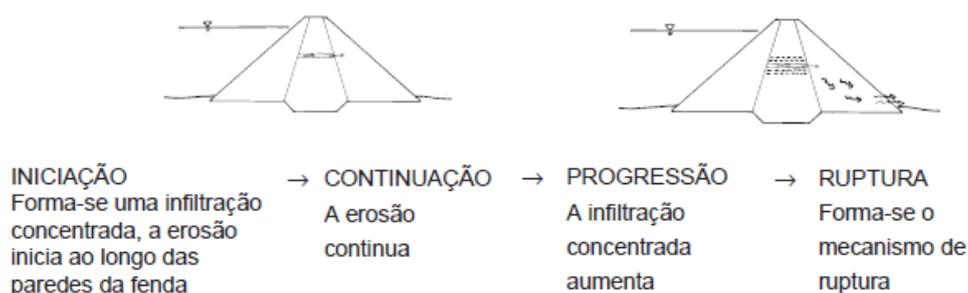
- Erosão interna através do aterro;
- Erosão interna através da fundação;
- Erosão interna do aterro para ou na fundação.

Foster et al. (1998 e 2000, citados por Fell et al., 2015), afirmam que quase todos os colapsos e acidentes causados pela erosão interna no aterro ocorreram quando o nível da albufeira estava no nível mais alto de sempre, ou a menos de 1 metro desse nível. No que refere-se à erosão interna na fundação, o nível da albufeira não apresenta a mesma relevância.

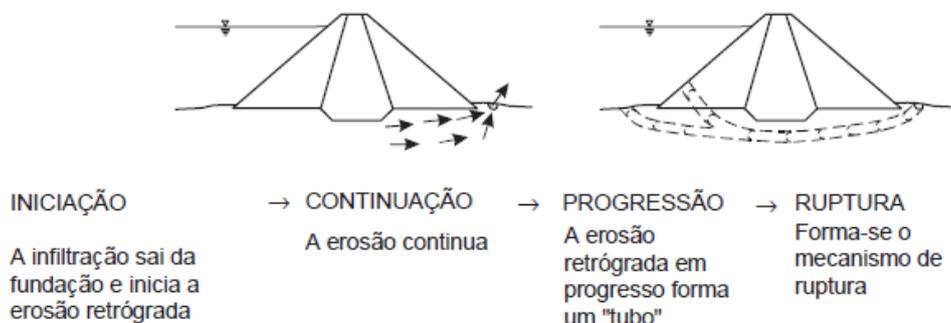
O processo de erosão interna e *piping* pode ser amplamente dividido em quatro fases (ICODS, 2015): Iniciação, continuação, progressão e rotura. Alguns exemplos dos modos de desenvolvimento do colapso por erosão interna são ilustrados na Figura 2.6.

2.4.2. Iniciação

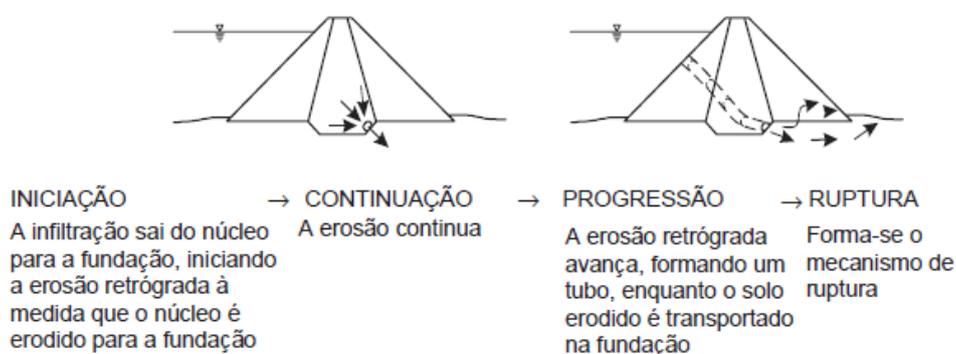
O ICODS (2015) explica que a iniciação da erosão interna ocorre quando a energia da água que percola através da barragem ou da sua fundação é suficiente para soltar partículas de solos. A iniciação e a progressão da erosão interna podem ocorrer por quatro mecanismos: Infiltração concentrada, erosão retrógrada, sufusão e erosão de contacto.



a) Erosão interna no maciço iniciada por erosão numa infiltração concentrada



b) Erosão interna na fundação iniciada por *piping* devido à erosão retrógrada



c) Erosão interna do maciço para a fundação iniciada por *piping* devido à erosão retrógrada

Figura 2.6 - Modos de desenvolvimento do colapso por erosão interna.

Fonte: adaptado de Fell et al. (2015).

Fell et al. (2015) afirma que a natureza do solo na barragem ou fundação determina o mecanismo de erosão interna:

- Solos não plásticos, como siltes, areias, areias siliciosas e misturas de silte, areia e cascalho, estão sujeitos à erosão retrógrada, erosão de contacto ou sufusão, dependendo da distribuição granulométrica;
- Solos plásticos, como argilas, areias argilosas e cascalhos argilosos, estão sujeitos à erosão por infiltrações concentradas e erosão de contacto. A erosão retrógrada e a sufusão não ocorrem nestes solos sob os gradientes hidráulicos

normalmente observados em barragens e suas fundações, mas podem surgir quando os gradientes locais forem elevados;

- Nos solos plásticos dispersivos, devido à mineralogia da argila e à química da água, a erosão inicia-se em fissuras ou infiltrações concentradas, sob tensões e gradientes hidráulicos muito baixos.

Uma vez iniciada, a erosão pode desenvolver-se rapidamente em uma rotura da barragem dentro de alguns dias ou até horas. Também é possível que a erosão ocorra apenas de forma episódica, levando talvez várias décadas para manifestar-se como um problema. Pode ocorrer que a erosão aconteça apenas quando o reservatório atinge uma elevação limite, que pode existir apenas por um curto período anual, ou talvez só seja atingida durante eventos de cheia (ICODS, 2015).

2.4.3. Continuidade

Esta fase é caracterizada pela continuação da erosão, na ausência de um filtro ou barreira eficaz ao longo do percurso de percolação que a possa conter.

Segundo Fell et al. (2015), dependendo da granulometria do solo e do filtro, a erosão pode apresentar diferentes comportamentos:

- Sem continuidade: a erosão não ocorre, devido à combinação do solo e do filtro, que impedem o movimento das partículas.
- Interrupção após uma erosão mínima: a erosão inicia-se, mas é rapidamente controlada, resultando em danos limitados, graças à resistência do solo e à acção do filtro, que impede a progressão do fenómeno.
- Interrupção após uma erosão significativa: a erosão ocorre de forma mais acentuada, provocando danos consideráveis, mas eventualmente é detida, antes de comprometer gravemente a estabilidade da estrutura.
- Continuidade da erosão: a erosão não é controlada, prosseguindo ao longo do tempo e causando danos progressivos, o que pode ameaçar a integridade da barragem.

2.4.4. Progressão

A progressão (Fell et al., 2015) é a fase da erosão interna onde:

- a) Para a erosão por infiltração concentrada, a erosão leva ao desenvolvimento de um "tubo".

- b) Para a erosão retrógrada, o processo de erosão estende-se para montante a partir do ponto de início, formando uma rede de pequenos canais de erosão abaixo do nível do solo ou da barragem. Se esses pequenos canais de erosão atingirem o reservatório ou o rio, um "tubo" é formado.
- c) Para a sufusão, parte da fracção mais fina é erodida, deixando a matriz grosseira do solo. Não forma-se um "tubo", mas a permeabilidade do solo pode aumentar significativamente.
- d) Na erosão de contacto, há erosão do solo mais fino para o solo mais grosso ou para fendas abertas numa massa rochosa continua. Isso pode, em casos específicos, levar ao desenvolvimento de um "tubo" no solo mais fino.

2.4.5. Rotura

Se não forem realizadas intervenções ou caso estas falhem, uma barragem pode sofrer rotura por diversos mecanismos distintos. Fell et al. (2015) aponta os seguintes:

- a) Alargamento significativo do tubo;
- b) Desagregação do pé da barragem;
- c) Assentamento do coroamento ou formação de cavidades no coroamento, levando ao galgamento;
- d) Deslizamento do talude de jusante.

2.4.6. Detecção da erosão interna e *piping* em barragens de terra

Segundo Fell et al. (2015), a detecção pode ocorrer na fase de continuidade ou progressão inicial, sendo mais provável nas fases avançadas de progressão e formação da rotura. Os principais meios de detecção incluem:

- a) Medição de pressões intersticiais mais elevadas na fundação e/ou no corpo da barragem.
- b) Observação de aumento da percolação na face jusante do talude ou na fundação, que pode ser feita por inspecção visual, medições de caudal de percolação ou métodos mais avançados.
- c) Assentamentos, deformações e fissuras no corpo da barragem ou na área a jusante.

A probabilidade de detecção depende de (Fell et al., 2015):

- a) A velocidade com que ocorre a erosão interna, *piping* e processos associados, como a instabilidade do talude de jusante.
- b) A frequência das inspeções e das medições dos equipamentos de monitoramento.
- c) A configuração da barragem, a localização da fuga concentrada e a possibilidade de esta ser visível durante as inspeções.

A inspeção visual desempenha um papel crucial na detecção de erosão interna e *piping*. No entanto, a sua eficácia depende não apenas dos factores mencionados acima, mas também de questões práticas, como (Fell et al., 2015):

- a) Inspeções visuais são raramente realizadas à noite, o que resulta em 30% a 50% do tempo em que a detecção não será eficaz. Além de que, muitas barragens não são inspeccionadas aos fins-de-semana, reduzindo ainda mais a probabilidade de detecção.
- b) A presença de vegetação densa ou escoamento superficial causado por chuvas pode ocultar fugas concentradas.
- c) Em barragens muito extensas, inspeções a pé tornam-se impraticáveis, o que diminui a probabilidade de identificar pequenas fugas.

2.4.7. Métodos de Mitigação

Segundo Fell et al. (2015), a intervenção e o reparo para prevenir a progressão da erosão interna, *piping* e o respectivo rompimento podem assumir diferentes técnicas, incluindo:

- a) Reduzir o nível do reservatório usando comportas de vertedouro ou a descarga de fundo;
- b) Construir filtros sobre as áreas onde material erodido surge;
- c) Construir um aterro de contrapeso para reduzir a probabilidade de levantamento e instabilidade do talude;
- d) Despejar material granular no talude de montante, directamente sobre os buracos ou cavidades, com o objectivo de bloqueá-los e limitar o fluxo de água através dessas aberturas.

De acordo com Tanchev (2014), para reduzir os efeitos prejudiciais da percolação e garantir a segurança da barragem, é essencial adotar medidas que consistem em alongar o percurso da percolação, o que reduz o gradiente hidráulico, e subsequentemente, o risco de erosão. Ao estender o percurso da percolação, a maior parte da energia hidráulica será gasta a superar a resistência friccional do fluxo através dos solos entre o talude de montante e jusante da barragem.

2.5. MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA

Durante o processo de construção e o período de operação, é necessário realizar um monitoramento contínuo, ou seja, observação e vigilância da barragem de aterro, a fim de ter uma visão sobre a condição e comportamento da estrutura, permitindo a antecipação de qualquer possível ameaça à sua segurança (Tanchev, 2014).

A Tabela 2.3 apresenta as estatísticas de colapsos e acidentes em barragens de aterro, detalhando os modos de rotura.

Tabela 2.3 - Estatísticas de colapsos e acidentes em barragens de aterro até 1986.

Modo de Falha	Probabilidade Média (10^{-3})		Período da Ocorrência (%)								
			Colapso				Acidente				
	Colapso	Acidente	DC	PE	< 5 a	> 5 a	DC	PE	< 5 a	> 5 a	
Erosão interna e piping											
Aterro	3.5	6.7	2	48	14	36	0	26	13	61	
Fundação	1.7	6.2	5	20	50	25	0	30	24	46	
Entre Aterro e fundação	0.2	2.1	0	50	50	0	0	20	27	53	
Deslizamento de Taludes											
Montante	0.5	5.3	18	18	0	64	15	11	25	49	
Jusante	0.1	4.2	0	0	100	0	22	2	26	50	

Nota: DC - durante a construção; PE - primeiro enchimento; <5a - primeiros 5 anos de operação; >5a - após 5 anos de operação.

Fonte: Adaptado de Fell et al. (2015).

Verifica-se que a erosão interna e o *piping* nos aterros são as causas mais prováveis de colapso e acidentes. Por outro lado, embora o deslizamento de taludes tenha uma probabilidade significativamente menor de causar colapso, apresenta uma probabilidade considerável de estar relacionado a acidentes, tanto a montante quanto a jusante. Além disso, observa-se que os colapsos e acidentes podem ocorrer de forma significativa tanto antes do início da operação quanto após esse período, destacando a necessidade de monitorar continuamente o comportamento dessas estruturas ao longo de toda a sua vida útil.

2.5.1. Instrumentação em Barragens de Terra

A Central Water Commission (2018) define a instrumentação como o uso de dispositivos especializados para realizar medições científicas essenciais do comportamento das estruturas de engenharia. Esses instrumentos podem operar mecanicamente, opticamente, electricamente ou com base em princípios pneumáticos ou hidráulicos. Alguns são lidos remotamente, enquanto outros são lidos no local ou nas proximidades dos seus sensores.

2.5.1.1. Piezómetros

Os piezómetros são responsáveis por medir a pressão intersticial no corpo da barragem, nos seus encontros e na fundação. Alguns dos principais tipos de piezómetros são descritos a seguir:

- a) Piezómetro de Ponta Aberta: Também conhecido como Piezómetro de Casagrande, consiste numa secção de tubo perfurada ligada a um tubo de subida, instalado num furo preenchido com areia com a adição de seladores subsuperficiais para que o instrumento responda apenas à pressão da água subterrânea em torno do elemento de filtro e não às pressões da água subterrânea em outras elevações, (USACE, 1995). Dunicliff e Green (1988) afirmam que os piezómetros de ponta aberta são geralmente considerados mais confiáveis do que outros tipos.
- b) Piezómetro de Corda Vibrante: frequentemente utilizados no monitoramento a longo prazo de barragens de aterro, baseiam-se no uso de um transdutor eletromagnético que induz corrente e responde às mudanças de pressão, conforme afirma o ICODS (2015). Estes piezómetros possuem alta resolução e precisão e são compatíveis com a maioria dos sistemas de aquisição de dados automatizados.

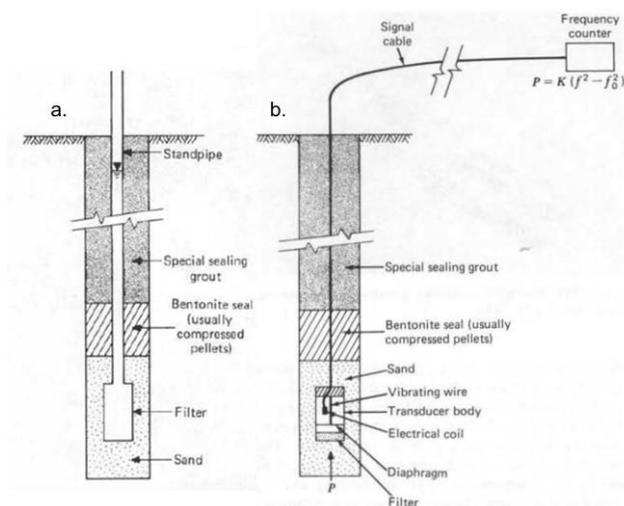


Figura 2.7 - Esquema de um Piezômetro de Ponta Aberta^a e um Piezômetro de Corda Vibrante^b.

Fonte: Dunnycliff e Green (1988).

Além dos tipos de piezômetros mencionados, existem também outras variações, como os piezômetros hidráulicos, piezômetros de resistência elétrica, piezômetros pneumáticos, entre outros.

2.5.1.2. Medidores de Nível de Água

A diferença na energia total entre as superfícies da albufeira e de jusante fornece a energia potencial que impulsiona o desenvolvimento da percolação. O ICODS (2015) afirma que os níveis de água podem ser medidos por meio de réguas de nível simples, por escalas graduadas pintadas em estruturas fixas permanentes na albufeira ou por dispositivos eletrônicos de detecção do nível de água

2.5.1.3. Medidores de Caudal

Segundo o USACE (1995), os caudais que percolam pela barragem são frequentemente medidos através de descarregadores que possuem aberturas de transbordamento de formas regulares, como notch-V, retangulares, trapezoidais, etc.

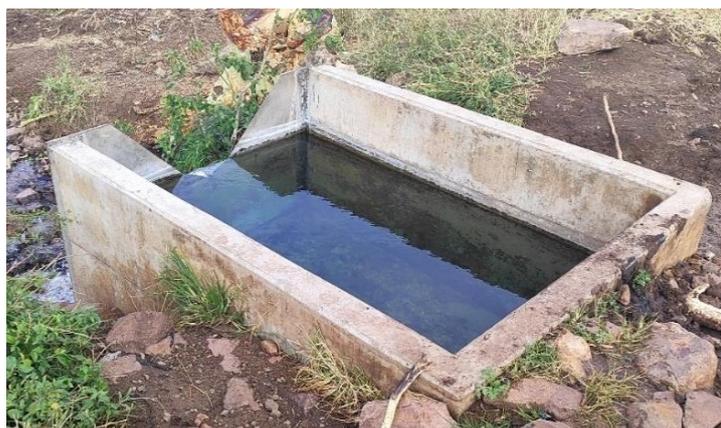


Figura 2.8- Descarregador em V-notch na Barragem de Corumana.

2.5.1.4. Inclínómetros

De acordo com o USACE (1995), os inclinómetros são os instrumentos responsáveis por monitorar a inclinação e os movimentos horizontais e verticais nas barragens de terra. Estes instrumentos monitoram as deformações paralelas e normais ao eixo de um tubo flexível por meio de uma sonda que passa ao longo do tubo. A sonda contém dois transdutores sensíveis à gravidade, projectados para medir a inclinação em relação à vertical.

2.5.1.5. Extensómetros

Os extensómetros são dispositivos utilizados para monitorar a variação da distância entre dois pontos na superfície do solo ou de uma estrutura (Dunnicliff e Green, 1988). Nas barragens de terra, são frequentemente aplicados para medir o movimento ou a deformação da superfície da barragem, permitindo a detecção de alterações no perfil da estrutura ao longo do tempo.

2.5.2. Metodologia de Inspeção e Monitoramento

Segundo a ICOLD (1989) e a ANCOLD (2003), citadas em Fell et al. (2015), a inspeção e o monitoramento adequados de uma barragem dependem de vários factores, como as consequências da rotura, o tipo de barragem e a sua fundação, deficiências ou deterioração conhecidas, potenciais modos de rotura identificados, a idade da estrutura e o nível da albufeira.

De acordo com Tanchev (2014), as observações da barragem podem ser divididas em dois tipos gerais:

- a) Observações de controlo: obrigatórias e devem ser detalhadas no projeto, conforme os padrões vigentes. Estas têm a tarefa de fornecer controlo sistemático do comportamento e das condições da barragem desde o início da construção e ao longo de sua vida útil.
- b) Observações especiais: permitem verificar certas suposições e métodos aplicados para os quais, no momento, não há uma base teórica ou experimental segura. Dessa forma, é possível examinar a precisão dos métodos numéricos aproximados utilizados para determinar o estado de tensões e deformações no corpo da barragem e sua fundação, confirmar a eficiência de novos tipos e construções de elementos vedantes e drenantes, avaliar o desempenho e a eficácia de diversos instrumentos, além de resolver uma série de outras questões que só podem ser investigadas eficientemente em condições naturais.

Segundo Heigerth et al. (1994, citado em Tanchev, 2014), paralelamente ao monitoramento por instrumentos, é necessário realizar a inspecção visual. Assim, pode-se detectar rapidamente defeitos e anomalias particularmente perigosas na barragem, como assentamentos ou deslocamentos significativos, deslizamentos, rachaduras, grande caudal de infiltração, etc.

O ICODS (2015) explica que a observação de caudal transparente nos descarregadores, que captam a água que percola pela barragem, não implica necessariamente que não haja risco de erosão interna. O transporte de sedimentos pode ocorrer, mas não ser visível se os materiais estiverem erodindo-se de forma lenta, ou se a observação ocorrer num momento em que não há erosão activa.

2.5.3. Análise dos Dados de Monitoramento de Percolação

2.5.3.1. Objectivos da Análise de Dados de Percolação

A avaliação e análise dos dados de monitoramento de percolação têm como principais objectivos:

- a) Comparar o desempenho real com o desempenho previsto ou esperado;
- b) Identificar tendências relacionadas ao tempo, nível da albufeira e outras variáveis.

O ICODS (2015) explica que todos os dados resultantes da colheita, medição e monitoramento de percolação seguirão tendências, como flutuações sazonais, variação com os níveis da albufeira ou de precipitação, variações no histórico do tempo ou combinações dessas variáveis. A análise estatística pode ser útil para detectar tendências ocultadas pela dispersão dos dados. No entanto, tais análises não substituem o bom senso e a experiência técnica.

Para garantir a precisão dos dados, é essencial comparar os novos dados com os antecedentes a fim de detectar padrões inconsistentes ou possíveis erros. Leituras de instrumentos que desviem-se das tendências estabelecidas devem ser verificadas por meio de leituras actualizadas em intervalos mais frequentes, garantindo maior confiabilidade nas medições (ICODS, 2015).

Além disso, os dados dos piezómetros são úteis para delinear os contornos da elevação da água subterrânea. Mapas de contorno dessa elevação podem ser utilizados para determinar a direcção e o padrão de fluxo em planta, além de identificar áreas com altos gradientes, concentrações de fluxo e possíveis áreas problemáticas (ICODS, 2015).

2.5.3.2. Níveis de Alarme no Monitoramento de Percolação e Acções Subsequentes

O ICODS (2015) recomenda que seja estabelecido um nível de alarme para medições de monitoramento de percolação. Quando esse nível é atingido ou ultrapassado, deve-se tomar uma acção subsequente. Essa acção pode incluir a verificação da leitura inicial, a realização de uma inspecção imediata no local, o abaixamento da albufeira ou a implementação do Plano de Acção de Emergência.

Segundo ICODS (2015), os níveis de alarme podem ser definidos com base em análises anteriores ou com comparações das respostas piezométricas da operação normal e da albufeira cheia, historicamente medidas. Para identificar anomalias nos dados, as medições devem ser comparadas aos níveis piezométricos esperados, e quaisquer desvios em relação ao nível previsto precisam ser investigados. A análise estatística pode ser usada para desenvolver relações empíricas entre as leituras dos piezómetros, os dados de precipitação e os níveis da albufeira, ajudando a identificar problemas como erosão por percolação ou *piping*.

2.5.3.3. Mudanças Gradativas e Abruptas na Percolação

O ICODS (2015) afirma que as mudanças graduais nas condições de percolação podem indicar alterações significativas, como aumento ou diminuição da permeabilidade do sistema ou até mesmo erosão interna activa. Essas mudanças requerem uma vigilância constante para garantir que a estabilidade da barragem seja mantida.

O ICODS (2015) acrescenta que as mudanças abruptas na percolação são mais graves e exigem uma acção imediata, dado o facto de que podem estar associadas a problemas mais sérios, como erosão interna e *piping*. A erosão interna e o *piping*, quando detectados tardiamente, podem levar a roturas em questão de horas, principalmente em condições adversas com solo altamente erosivo.

3. ESTUDO DE CASO

3.1. DESCRIÇÃO DA BARRAGEM EM ESTUDO

3.1.1. Introdução

A presente secção descreve a Barragem de Corumana, abordando sua localização, função, composição, propriedades dos solos e a instrumentação implementada. A informação apresentada baseia-se no projecto original e nos dados colhidos durante os trabalhos de manutenção aos quais o autor teve acesso.



Figura 3.1 - Barragem de Corumana

Fonte: ARA-Sul.

3.1.2. Localização Geográfica e Função

A Barragem de Corumana está situada no Distrito de Moamba, Província de Maputo, sobre o rio Sabié, o principal afluente da margem esquerda do rio Incomáti, a aproximadamente 93 km a nordeste da cidade de Maputo.

Originalmente projectada para fins de irrigação e produção de energia hidroeléctrica, a barragem expandiu a sua funcionalidade, passando também a fornecer abastecimento de água à Área Metropolitana do Grande Maputo.



Figura 3.2- Localização da Barragem de Corumana.

Fonte: adoptado do Google Earth.

3.1.3. Composição Estrutural da Barragem

A Barragem de Corumana possui uma altura máxima de 46 metros e um comprimento de coroamento de 3.050 metros. A estrutura é composta por dois trechos de aterro localizados nas zonas laterais com um perfil transversal zonado e um descarregador de cheias em betão nas proximidades do encontro da margem direita. O esquema ilustrativo do perfil transversal da barragem é apresentado na Figura 3.4.

3.1.4. Caracterização Geotécnica dos Materiais

A caracterização geotécnica dos solos e do substrato rochoso da Barragem de Corumana foi realizada com base em dados obtidos durante a fase de projecto e construção da barragem, complementados por estudos recentes que envolveram a amostragem de solos removidos durante a instalação de novos piezómetros. Os parâmetros geotécnicos em falta foram adoptados considerando o bom senso e os valores típicos sugeridos pelo USBR. Para mais detalhes, consulte-se o Anexo 1.



Figura 3.3 - Amostras extraídas durante a instalação dos piezômetros.

A seguir, na Tabela 3.1 é apresentado o resumo das características geotécnicas dos materiais da Barragem de Corumana.

Tabela 3.1- Resumo das características geotécnicas da Barragem de Corumana

Região da Barragem	Classificação (USCS)	K[cm/s]	C'[KPa]	ϕ' [°]	Y_d [KN/m ³]	Y_{sat} [KN/m ³]
Maciços	SC, SM, SP e MH	3.31E-07 (V) 5.24E-4 (H)	0	34	18.5	20.5
Fundação	SP, SM e MH	8.05E-07 (V) 2.24E-3 (H)	0	34	19	20.5
Núcleo	CH e CL	4.83E-08	100	19	17.5	20.5
Filtro	SW e SC	2.00E-03	0	38	20	22
Dreno	SP, GP e GW	5.00E-03	0	36.5	19	21
Enrocamento	-	6.00E-02	0	38	20	21.5
Substrato Rochoso	Dolerito, Riolito	1.26E-06	300	45	23	23.5
Parede Moldada	-	1.00E-10	100	0	24	24.0

CH – Argila de alta plasticidade

CL – Argila de baixa plasticidade

GP – Cascalho mal graduado

GW – Cascalho bem graduado

MH – Silte de alta plasticidade

SC – Areia com argila

SM – Areia com silte

SP – Areia mal graduada

SW – Areia bem graduada

H – Horizontal

V – Vertical

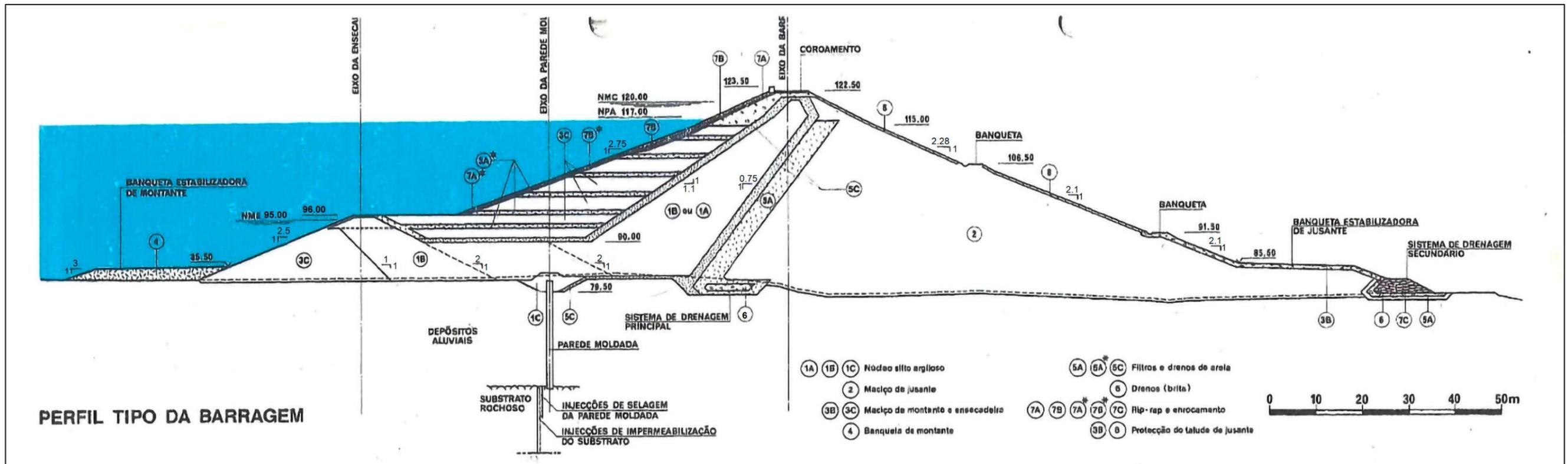


Figura 3.4 – Perfil Transversal Tipo da Barragem de Corumana

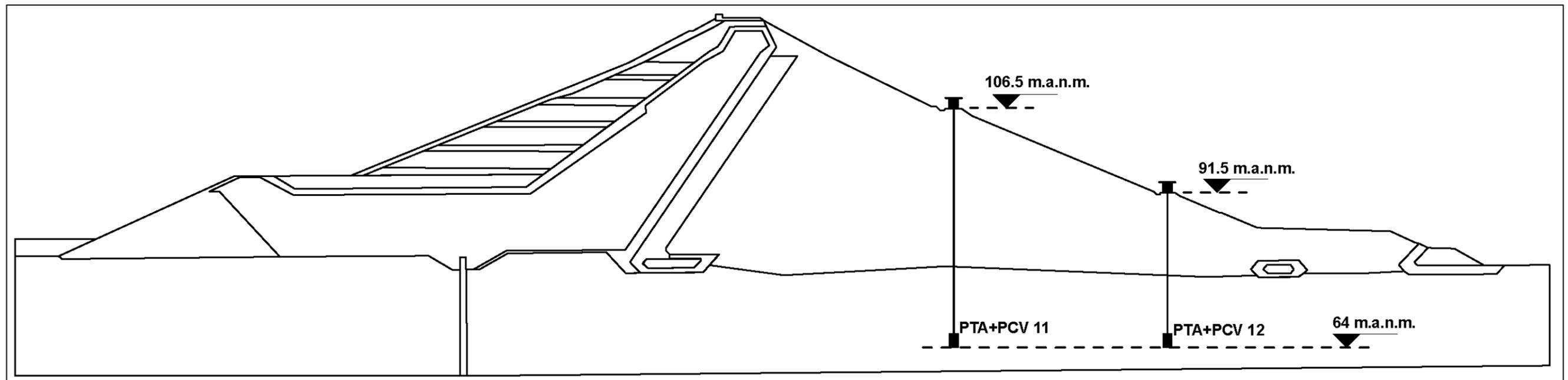


Figura 3.5 – Disposição dos piezômetros no Perfil 12.

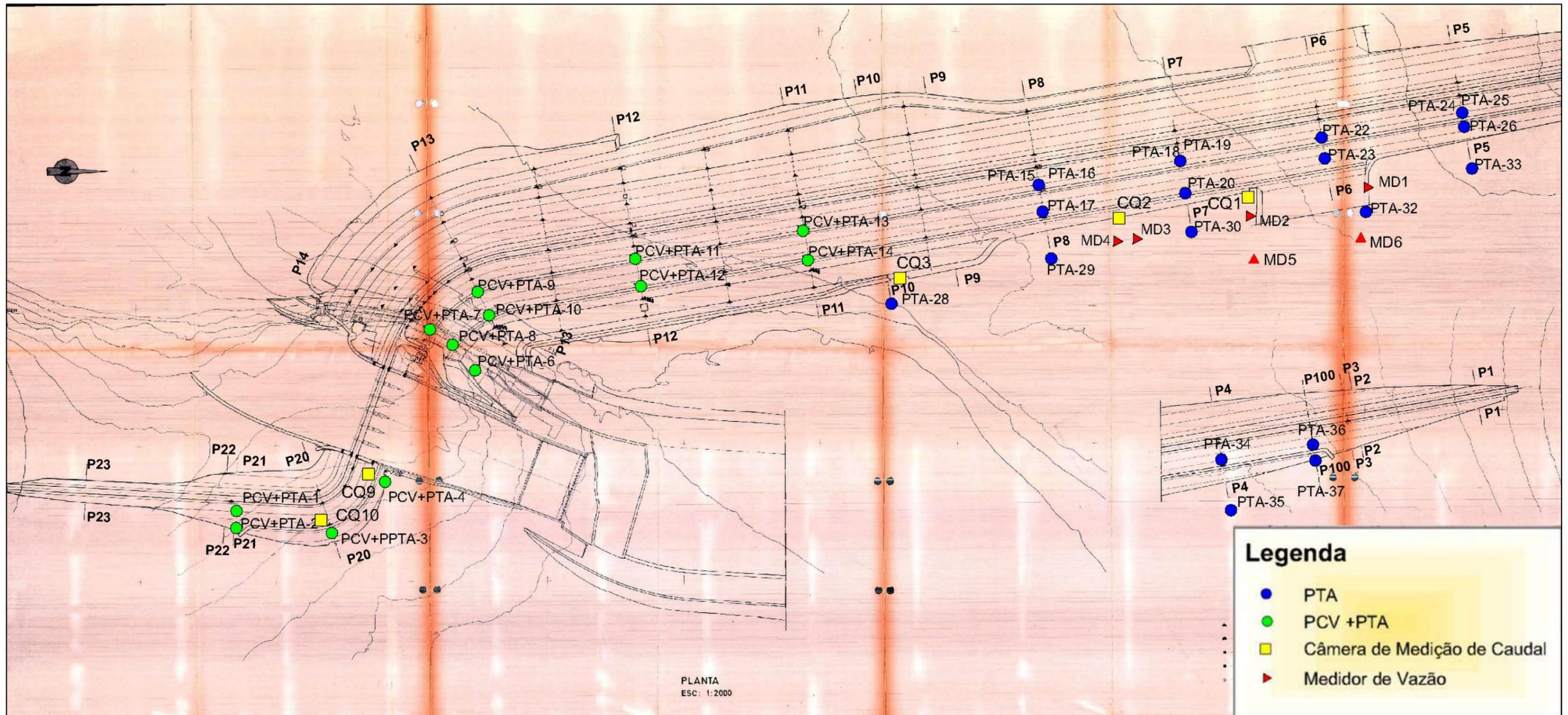


Figura 3.6 - Mapa de Instrumentação da Barragem de Corumana

3.1.5. Dados Hidrológicos

A barragem apresenta um escoamento médio anual de 630,0 Mm³, com uma área inundada ao nível de pleno armazenamento de 90,0 km² e um volume útil de 1.230 Mm³. O nível de máxima cheia atinge 120,0 m.a.n.m., enquanto o nível de pleno armazenamento e o nível mínimo de exploração são de 117,0 e 95,0 m.a.n.m., respectivamente. A cota do coroamento é de 122,5 m.a.n.m.

A descarga de fundo, com um diâmetro de 7,5 m, tem capacidade para 620,0 m³/s, e o descarregador de cheias pode escoar até 6.300,0 m³/s. A cheia correspondente a um período de retorno de 1.000 anos é estimada em 16.200 m³/s.

3.1.6. Sistema de Monitoramento da Barragem

A barragem possui 11 perfis instrumentados. No entanto, a maioria dos instrumentos instalados durante a construção avariou devido a falhas nos dispositivos de medição. Esta ocorrência levou à implementação de um novo plano de instrumentação, que envolveu, em 2024, a instalação de 14 piezómetros compostos por piezómetros elétricos e piezómetros de tubo aberto (PCV+PTA) e a instalação de 20 piezómetros de tubo aberto (PTA).



Figura 3.7 - Execução dos furos para instalação dos piezómetros.



Figura 3.8 - Instalação dos Piezómetros nos furos.

Além da instalação dos piezômetros, os trabalhos de manutenção incluíram também a requalificação dos medidores de caudal, responsáveis por monitorar o fluxo de percolação através do corpo da barragem, captado pelos drenos.

Observe-se a posição dos piezômetros no corpo da Barragem na Figura 3.5. O mapa de instrumentação da Barragem de Corumana pode ser consultado na Figura 3.6.

3.2. APRESENTAÇÃO DOS DADOS DE MONITORAMENTO DOS PIEZÓMETROS

As leituras das cotas da coluna de água nos piezômetros, realizadas entre Maio e Novembro de 2024, foram obtidas após a requalificação da barragem, que incluiu a instalação de novos piezômetros. Estes dados foram medidos pela ARA-Sul, entidade responsável pelo monitoramento da Barragem de Corumana. A instalação dos piezômetros foi acompanhada pela TÉCNICA – Engenheiros Consultores, empresa fiscal dos trabalhos, cuja equipa incluía o autor deste estudo, o que permitiu a validação técnica dos dados colhidos.

Na Tabela 3.2 são apresentados os valores das cotas da coluna de água registados em cada piezómetro durante o período de estudo.

Adicionalmente, os Gráficos 3.1 a 3.6 ilustram a evolução das leituras piezométricas ao longo do tempo, facilitando a análise da variação das pressões intersticiais em função do período considerado.

Tabela 3.2- Tabela resumo das leituras dos níveis de água e das pressões nos piezômetros.

Data		14-05-24	29-05-24	14-06-24	18-06-24	02-07-24	10-07-24	17-07-24	24-07-24	08-08-24	22-08-24	28-08-24	26-09-24	02-10-24	14-10-24	04-11-24	
Cota [m.a.n.m.]	Albufeira	110.26	109.87	109.39	109.26	108.81	108.59	108.34	108.04	107.49	106.89	106.55	105.39	105.15	104.60	103.70	
	Jusante	74.1	74.1	74.2	74.2	74.2	74.41	74.48	74.41	74.39	74.39	74.39	74.39	74.39	74.39	74.39	
	PCV+PTA 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96.88	96.82	96.64	96.39
	PCV+PTA 2	-	-	-	-	-	-	-	98.17	98.09	97.97	97.81	97.79	97.46	97.38	97.21	97.02
	PCV+PTA 3	-	-	-	-	-	-	-	95.87	95.83	95.76	95.66	95.62	95.39	95.35	95.23	95.05
	PCV+PTA 4	-	-	-	-	-	-	-	96.89	96.82	96.76	96.72	96.70	96.54	96.50	96.38	96.26
	PCV+PTA 6	-	-	-	-	-	-	83.51	83.52	83.51	83.45	83.41	83.42	83.32	83.25	83.26	83.14
	PCV+PTA 9	-	-	-	-	-	74.44	74.41	74.58	74.72	74.69	74.68	74.68	74.55	74.53	74.52	74.24
	PCV+PTA 10	-	-	-	-	-	-	-	75.49	75.63	75.61	75.59	75.60	75.47	75.45	75.46	75.14
	PCV+PTA 11	-	-	-	-	-	75.81	75.46	75.29	75.18	75.03	74.92	74.89	74.66	74.64	74.63	74.55
	PCV+PTA 12	-	-	-	-	-	75.12	74.84	74.95	75.12	75.07	75.08	75.07	-	-	-	-
	PCV+PTA 13	-	-	-	-	-	78.77	78.75	78.82	78.90	78.84	78.77	78.77	78.62	78.57	78.58	78.58
	PCV+PTA 14	-	-	-	-	-	79.92	79.43	79.13	78.93	78.68	78.53	78.49	78.36	78.34	78.30	78.22
	PTA 16	87.85	87.79	87.70	87.40	87.33	87.28	87.25	87.12	87.05	87.05	86.99	86.96	86.76	86.69	86.63	86.36
	PTA 17	85.00	85.02	84.98	84.97	84.92	84.88	84.88	84.89	84.85	84.85	84.68	84.78	84.67	84.62	84.59	84.45
	PTA 18	96.80	96.72	96.67	96.65	96.56	96.53	96.50	96.46	96.39	96.39	96.33	96.31	96.21	96.20	96.16	96.10
	PTA 19	94.42	94.24	94.04	94.00	93.80	93.69	93.60	93.49	93.25	93.00	93.00	92.92	92.51	92.43	92.28	92.04
	PTA 20	87.11	87.04	87.04	87.05	87.04	87.02	87.03	87.02	87.02	87.00	86.98	86.98	86.91	86.87	86.85	86.74
	PTA 22A	-	-	92.01	92.04	92.03	91.99	91.97	91.95	91.86	91.86	91.68	91.72	91.48	91.33	91.31	91.10
	PTA 22B	-	86.77	86.75	86.72	86.74	86.72	86.72	86.72	86.72	86.70	86.65	86.65	86.62	86.60	86.59	86.55
	PTA 23	87.26	87.26	87.27	87.26	87.24	87.26	87.27	87.27	87.23	87.22	87.21	87.19	87.15	87.15	87.15	87.11
	PTA 24	98.50	98.46	98.42	98.41	98.38	98.37	98.33	98.33	98.29	98.29	98.26	98.25	98.19	98.17	98.07	98.10
	PTA 25	98.45	98.40	98.26	98.23	98.13	98.08	98.08	97.97	97.89	97.72	97.56	97.54	97.20	97.12	96.91	96.55
	PTA 26	-	89.03	88.94	88.92	88.87	88.85	88.84	88.81	88.81	88.79	88.75	88.73	88.61	88.58	88.51	88.40
	PTA 28	-	-	75.31	75.31	75.30	75.29	75.30	75.30	75.29	75.31	75.31	75.31	75.31	75.31	75.31	75.30
	PTA 29	-	-	81.42	81.41	81.40	81.33	81.36	81.41	81.40	81.40	81.35	81.34	81.29	81.24	81.21	81.11
	PTA 30	-	-	85.27	85.26	85.24	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.25	85.23	85.23	85.22
	PTA 32	-	-	87.03	87.00	86.96	86.95	86.94	86.94	87.07	87.04	87.05	87.06	87.01	87.00	86.97	86.87
PTA 33	-	-	85.86	85.84	85.81	85.77	85.77	85.77	85.94	85.90	85.91	85.91	85.86	85.82	85.80	85.70	
PTA 35	-	-	98.08	98.03	97.90	97.81	97.75	97.75	97.85	97.69	97.52	97.45	97.08	96.97	96.74	96.32	
PTA 36	-	103.46	103.05	102.97	102.73	102.58	102.45	102.45	102.51	102.22	101.89	101.77	101.06	100.92	100.58	99.96	
PTA 37	-	102.58	102.78	102.33	102.10	102.09	101.84	101.84	101.91	101.63	101.33	101.21	100.54	100.40	100.08	99.46	

Fonte: ARA-Sul.

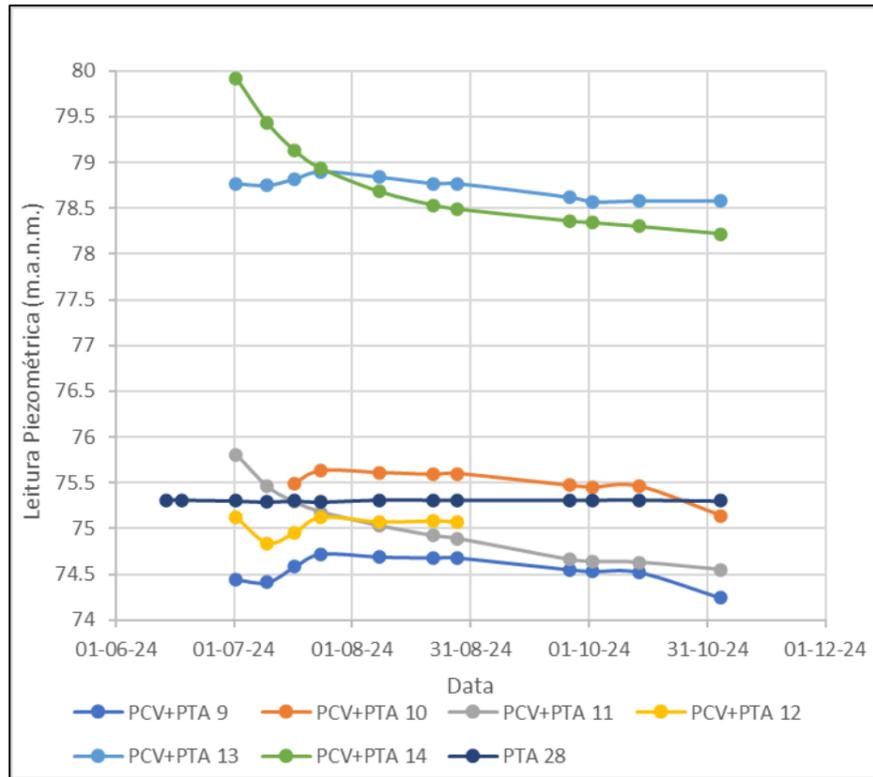


Gráfico 3.1 - Variação das Leituras Piezométricas ao Longo do Tempo – Leituras entre 74 e 80 m.a.n.m.

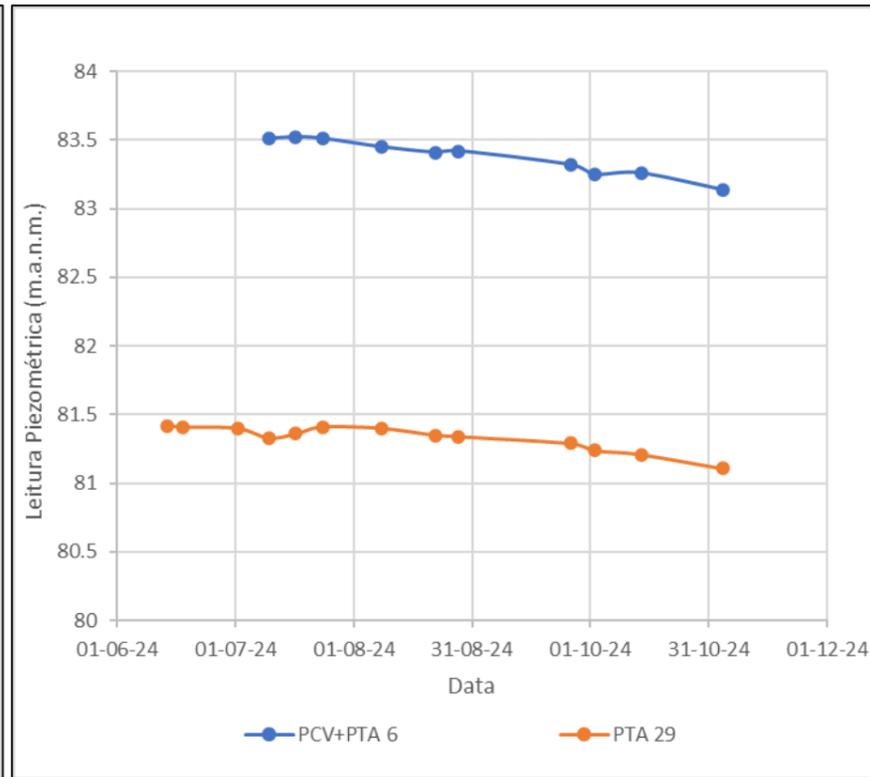


Gráfico 3.2 - Variação das Leituras Piezométricas ao Longo do Tempo – Leituras entre 80 e 84 m.a.n.m.

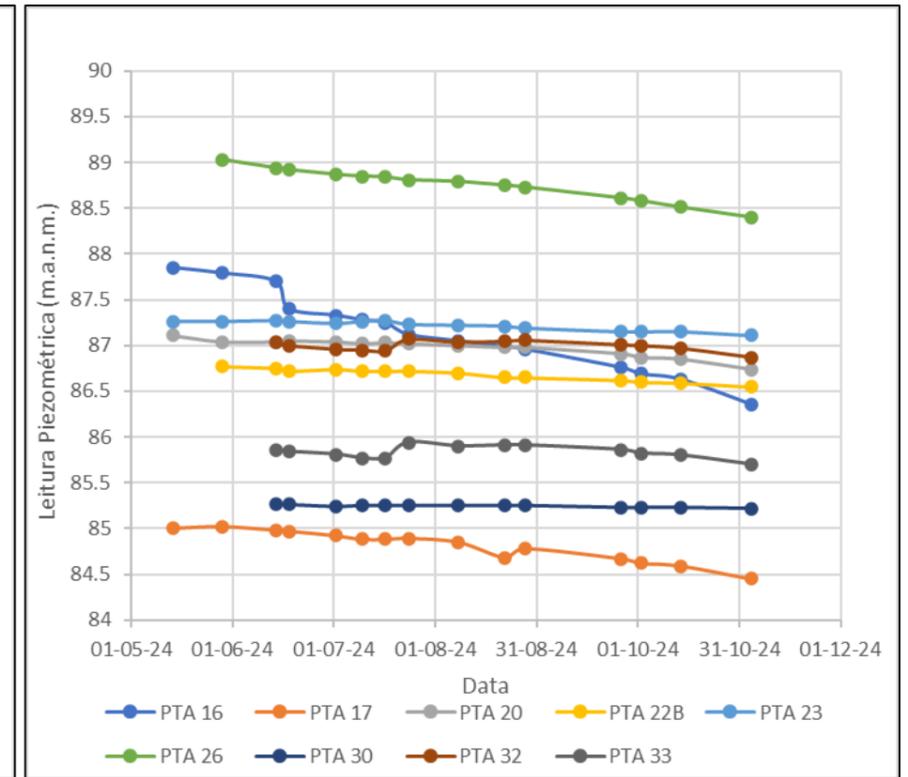


Gráfico 3.3 - Variação das Leituras Piezométricas ao Longo do Tempo – Leituras entre 84 e 90 m.a.n.m.

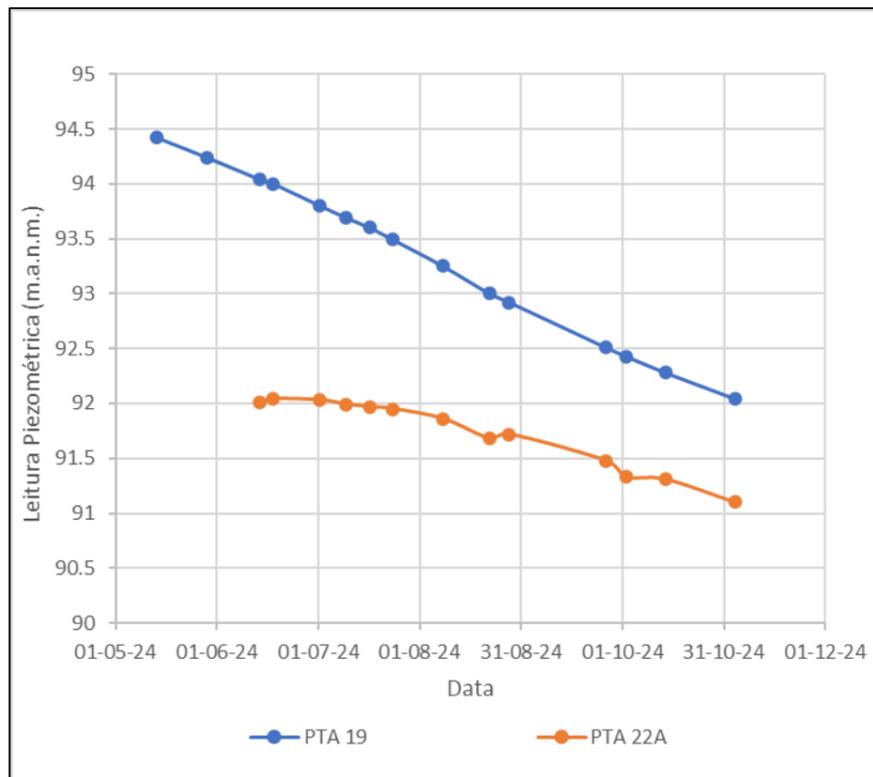


Gráfico 3.4 - Variação das Leituras Piezométricas ao Longo do Tempo – Leituras entre 90 e 95 m.a.n.m.

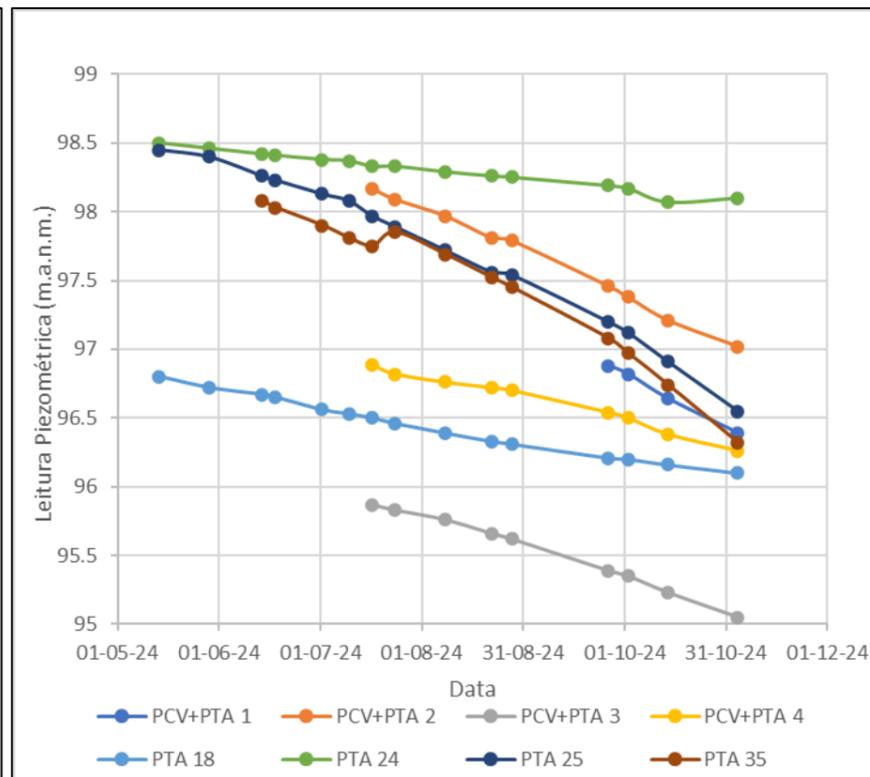


Gráfico 3.5 - Variação das Leituras Piezométricas ao Longo do Tempo – Leituras entre 95 e 99 m.a.n.m.

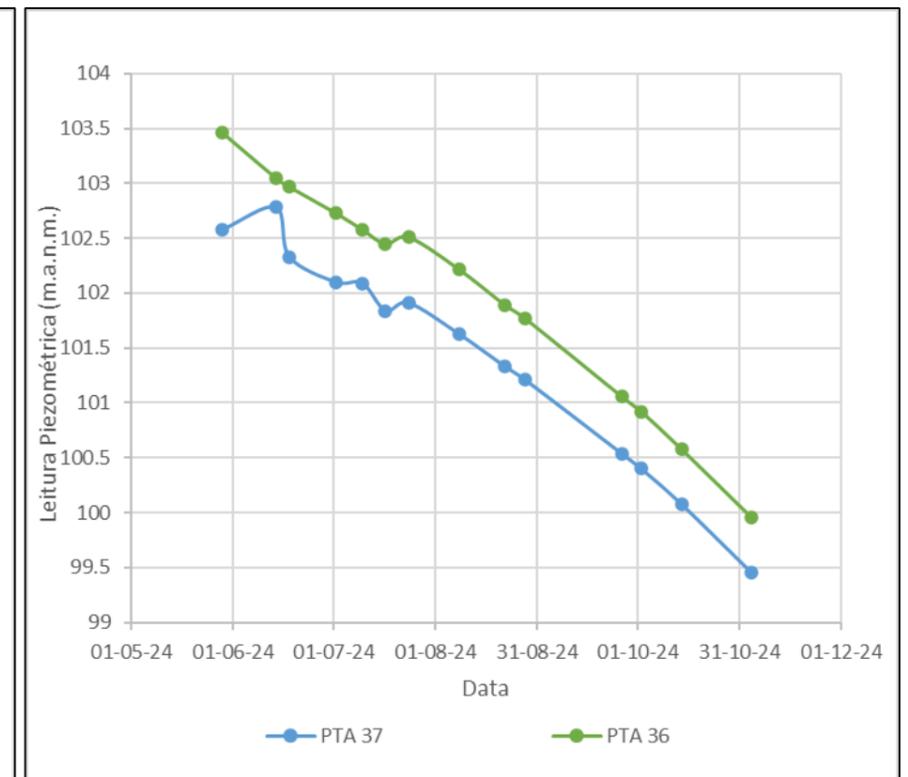


Gráfico 3.6 - Variação das Leituras Piezométricas ao Longo do Tempo – Leituras entre 99 e 104 m.a.n.m.

3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS PIEZOMÉTRICOS

Nesta secção são identificadas e analisadas as tendências nos dados piezométricos colhidos entre Maio e Novembro de 2024. Através de métodos estatísticos, como a regressão linear, procuraremos identificar padrões e desvios que possam indicar comportamentos anormais.

Para a análise da tendência dos dados piezométricos, utilizou-se o método dos mínimos quadrados, uma técnica estatística que permite ajustar um modelo matemático aos dados observados, minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre os valores reais e os valores estimados. Em adição, foi calculado o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão (Δ), com o intuito de avaliar a precisão do modelo ajustado e a correlação entre as variáveis. Esta análise foi conduzida com o auxílio do software MS Excel, que possibilitou uma aplicação prática e eficiente do método.

A Tabela 3.3 apresenta os resultados das análises de correlação entre os níveis da albufeira e as leituras dos piezómetros.

Tabela 3.3 – Resumo da correlação entre os níveis da albufeira e as leituras dos piezómetros.

Piezómetro	a	b	R^2	$\Delta(m)$	Comentários
PCV+PTA 1	0.289	66.43	0.998	0.01	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PCV+PTA 2	0.250	71.06	0.996	0.02	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PCV+PTA 3	0.177	76.77	0.995	0.02	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PCV+PTA 4	0.132	82.55	0.983	0.03	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PCV+PTA 6	0.076	75.31	0.967	0.05	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PCV+PTA 9	0.031	71.29	0.132	0.16	Correlação baixa ($R^2 < 0.5$)
PCV+PTA 10	0.072	67.83	0.597	0.09	Correlação moderada ($0.5 \leq R^2 < 0.8$)
PCV+PTA 11	0.210	52.62	0.853	0.20	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PCV+PTA 12	-0.042	79.59	0.124	0.09	Correlação baixa ($R^2 < 0.5$)
PCV+PTA 13	0.057	72.67	0.724	0.08	Correlação moderada ($0.5 \leq R^2 < 0.8$)
PCV+PTA 14	0.268	50.17	0.753	0.35	Correlação moderada ($0.5 \leq R^2 < 0.8$)
PTA 16	0.210	64.58	0.958	0.09	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 17	0.083	75.90	0.958	0.03	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 18	0.106	85.08	0.970	0.04	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 19	0.369	53.61	0.994	0.06	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)

Piezômetro	a	b	R ²	Δ(m)	Comentários
PTA 20	0.045	82.12	0.910	0.03	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 22A	0.169	73.64	0.968	0.09	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 22B	0.034	83.00	0.973	0.01	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 23	0.025	84.52	0.928	0.01	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 24	0.062	91.60	0.974	0.02	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 25	0.282	67.39	0.993	0.05	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 26	0.090	79.12	0.981	0.14	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 28	-0.001	75.42	0.065	0.01	Fraca resposta ($a \leq 0.02$)
PTA 29	0.045	76.49	0.831	0.04	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 30	0.007	84.55	0.766	0.01	Fraca resposta ($a \leq 0.02$)
PTA 32	0.009	86.02	0.018	0.05	Fraca resposta ($a \leq 0.02$)
PTA 33	0.011	84.71	0.084	0.06	Fraca resposta ($a \leq 0.02$)
PTA 35	0.283	67.20	0.966	0.10	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 36	0.525	45.64	0.991	0.10	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)
PTA 37	0.505	47.27	0.983	0.13	Correlação alta ($0.8 \leq R^2 \leq 1$)

a – Coeficiente angular da equação de regressão linear R² – coeficiente de determinação

b – Coeficiente linear da equação de regressão linear Δ – desvio padrão

Os gráficos individuais que ilustram o nível de correlação entre o nível da albufeira e as leituras de cada piezômetro podem ser consultados no Anexo 2.

Abaixo é apresentado o Gráfico 3.7 com a percentagem dos piezômetros enquadrados em cada classificação de correlação. Este gráfico foi elaborado a partir dos dados da Tabela 3.3.



Gráfico 3.7 - Percentagem de piezômetros por tipo de correlação

A partir das percentagens apresentadas no Gráfico 3.7, pode-se concluir que a maioria dos piezômetros (70%) mostrou uma correlação muito alta com o nível da albufeira,

indicando uma relação forte e consistente entre as variações no nível da albufeira e as pressões intersticiais registadas pelos piezómetros.

No entanto, 13% dos piezómetros apresentam uma resposta fraca à variação do nível da albufeira, pois as pressões nestes piezómetros permaneceram praticamente constantes. Isso sugere que outros factores, possivelmente a dinâmica do lençol freático a jusante, estão a influenciar as leituras, uma vez que estes piezómetros estão localizados precisamente nesta área e o lençol freático de jusante variou pouco durante o período de estudo. Para confirmar esta hipótese, sugere-se o monitoramento desses piezómetros em um período em que o nível freático de jusante sofra variações mais significativas, a fim de estudar melhor essa correlação.

Já os 7% e 10% dos piezómetros, localizados na zona correspondente ao antigo leito do rio, apresentam uma correlação moderada ou nenhuma correlação com o nível da albufeira, respectivamente. Isso pode ser explicado pela dinâmica do fluxo de água na fundação da barragem, onde o fluxo ocorre na direcção longitudinal da barragem, conforme estudado através da distribuição de energias em 3.4.1. Esse padrão de fluxo sugere que as pressões intersticiais nessas áreas são mais influenciadas por factores como as infiltrações laterais em vez de variarem directamente com o nível da albufeira.

3.4. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM

3.4.1. Análise da Distribuição de Energias Piezométricas

Neste subcapítulo, realiza-se a análise da distribuição das energias piezométricas na fundação da Barragem de Corumana, com o objectivo de compreender o comportamento do fluxo de água sub-superficial da barragem. A análise foi realizada no trecho de aterro localizado na margem esquerda da barragem, entre os perfis 100 e 13, especificamente na área de fundação abaixo da estrutura de aterro.

Com base nos dados obtidos dos piezómetros instalados na fundação, foram gerados mapas representativos das linhas equipotenciais, que ilustram as variações de energia piezométrica em diferentes localizações. Estes mapas permitem identificar padrões de fluxo e zonas de maior ou menor energia hidráulica. Para a elaboração dos mapas, recorreu-se ao software Quantum GIS (QGIS). Optou-se pelos dados dos piezómetros de 04/11/24, por serem os mais recentes disponíveis no momento da análise. Na Figura 3.9, apresenta-se o mapa com as respectivas linhas de energia piezométrica.

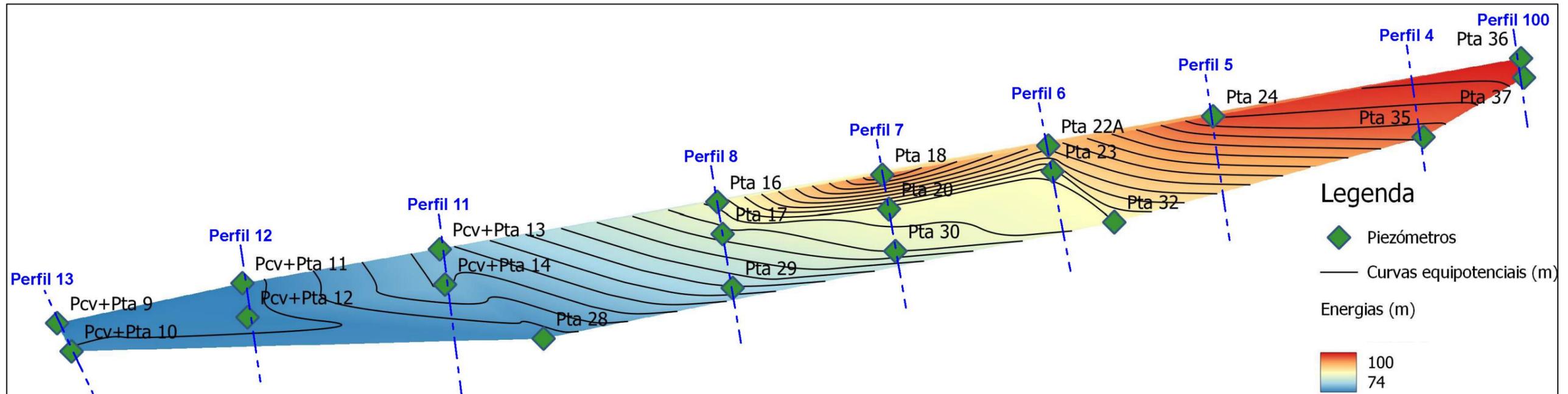


Figura 3.9 - Distribuição das energias hidráulicas

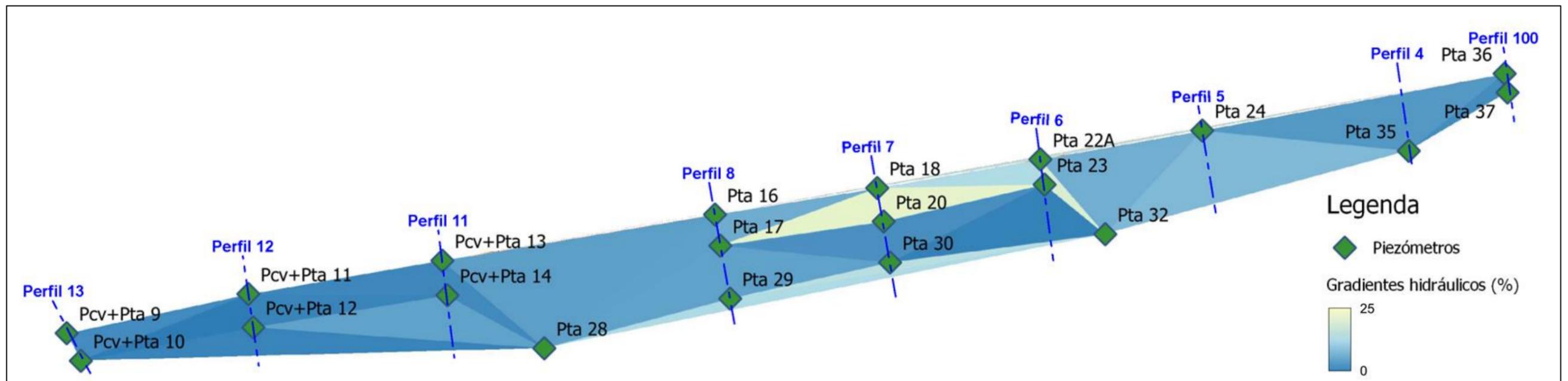


Figura 3.10 - Distribuição dos gradientes hidráulicos

A análise do mapa revela que as alturas piezométricas são mais elevadas na margem esquerda da barragem. Este fenómeno ocorre porque a fundação nesta área está situada a uma cota mais alta, o que eleva a base do dreno, que acompanha a interface entre a barragem e a fundação. O dreno, com permeabilidade muito maior comparativamente ao núcleo da barragem, tende a rebaixar o nível freático até à sua base, desde que não esteja obstruído, resultando em leituras piezométricas mais altas nesta região. Na margem direita, onde a barragem é mais alta, a base do dreno localiza-se a uma cota inferior, o que provoca um maior rebaixamento do nível freático e, conseqüentemente, energias piezométricas mais baixas.

O fluxo de água segue predominantemente uma direção perpendicular às linhas equipotenciais. Observou-se que o fluxo dirige-se principalmente para jusante, com um desvio notável em direção à margem direita. Esse comportamento pode ser atribuído à maior permeabilidade estimada da margem direita, que corresponde ao leito do rio, tornando-a uma rota preferencial para o fluxo de água.

Adicionalmente, verifica-se que, na margem direita, o maior espaçamento entre as linhas equipotenciais reflecte uma menor resistência ao fluxo, atribuída à maior permeabilidade estimada no antigo leito do rio. Em contraste, na margem esquerda onde a permeabilidade é inferior, as linhas encontram-se mais próximas, indicando maior resistência ao fluxo e, conseqüentemente, uma maior perda de energia.

3.4.2. Análise dos Gradientes Hidráulicos

Para a análise dos gradientes hidráulicos na fundação da Barragem de Corumana, foi adoptado o método de Rede Triangular Irregular (TIN), com o auxílio do software Quantum GIS (QGIS). Esse método de interpolação permite calcular os gradientes hidráulicos num plano bidimensional, levando em consideração as variações de energia piezométrica ao longo da fundação. A partir dos dados dos piezómetros, foi gerado o mapa dos gradientes hidráulicos na fundação da barragem, apresentado na Figura 3.10.

Os gradientes hidráulicos na fundação da Barragem de Corumana apresentam variações entre 0 e 0,23 m/m. As regiões mais críticas, caracterizadas pelos maiores gradientes, localizam-se entre os PTA's 18 e 20 e entre os PTA's 22A e 32.

A fundação da barragem é composta predominantemente por solos arenosos com peso volumétrico saturado (γ_{sat}) estimado em 20.5 KN/m³. Para avaliar a segurança da barragem em relação à erosão por levantamento, procedeu-se ao cálculo do gradiente hidráulico crítico, determinado pela expressão:

$$i_{\text{cr}} = \frac{\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{20.5 - 9.8}{9.8} = 1.09 \text{ m/m} \quad (\text{Equação 3-1})$$

Segundo o ICODS (2015), no caso de solos não coesivos, o factor de segurança em relação a erosão por levantamento é geralmente definido como a razão entre o gradiente hidráulico crítico (i_{cr}) e o gradiente hidráulico previsto ou medido (i_e). Em análises de segurança, factores entre 3.0 e 4.0 são frequentemente considerados aceitáveis por várias agências reguladoras.

Na fundação da Barragem de Corumana, o factor de segurança calculado é:

$$F_s = \frac{i_{\text{cr}}}{i_e} = \frac{1.09}{0.23} = 4.75 \quad (\text{Equação 3-2})$$

Este valor demonstra que o factor de segurança contra erosão por levantamento na fundação da barragem encontra-se dentro dos padrões considerados seguros, garantindo a estabilidade face aos gradientes hidráulicos observados.

A Tabela 2.1 apresenta os gradientes hidráulicos máximos admissíveis consoante o tipo de solo na fundação de barragens. Considerando que os solos da fundação da Barragem de Corumana são predominantemente areias com presença de finos, o gradiente máximo observado, de 0,23, enquadra-se dentro dos limites recomendados para a maioria dos tipos de solos referenciados.

3.5. CONFIGURAÇÃO DO PERFIL LONGITUDINAL DA BARRAGEM

O estudo do perfil longitudinal da barragem oferece uma visão detalhada do comportamento interno da estrutura, permitindo analisar a interação entre o lençol freático e as camadas constituintes. Esta interação é fundamental para compreender o comportamento hidráulico e geotécnico da barragem.

No caso específico da Barragem de Corumana, foram realizados dois cortes longitudinais com o objectivo de proporcionar uma visão detalhada da sua constituição e funcionamento interno. As informações sobre a configuração da fundação e do substrato rochoso foram obtidas a partir dos furos executados para a instalação dos piezómetros e processadas em software de desenho técnico. A Figura 3.11 apresenta o mapa com a

localização dos cortes na barragem, enquanto os respectivos perfis longitudinais podem ser consultados nas Figuras 3.12 e 3.13.

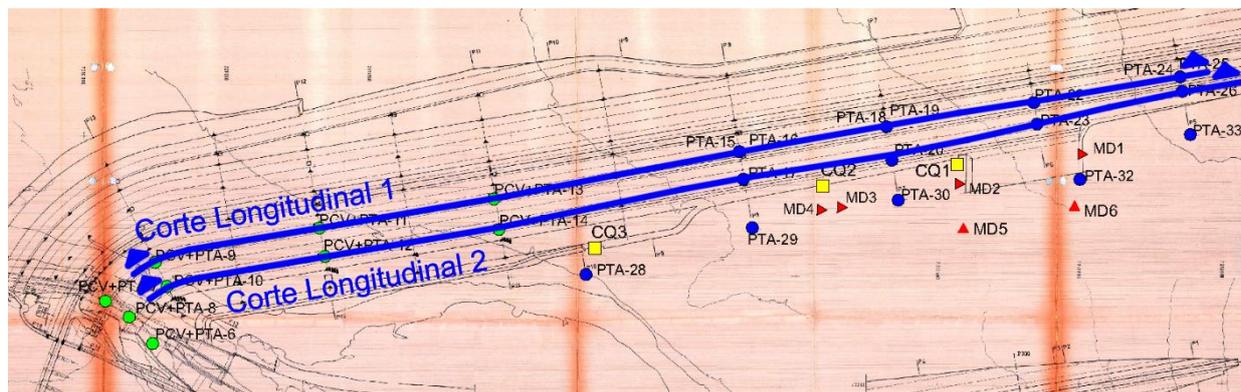
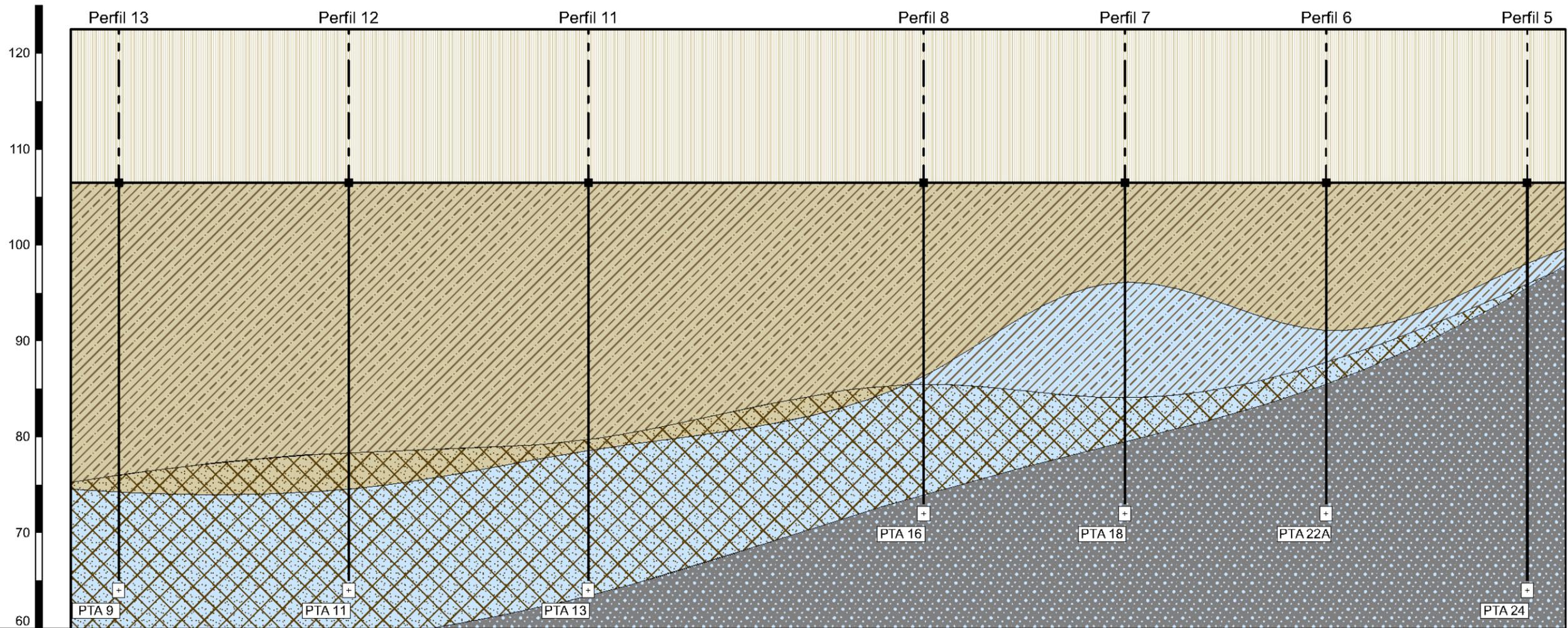


Figura 3.11 – Representação dos cortes longitudinais em planta

Os perfis longitudinais evidenciaram variações significativas nas condições da fundação da barragem. Nos perfis 11 e 13, os piezómetros foram instalados em solos, em virtude da maior profundidade do substrato rochoso. Por outro lado, entre os perfis 5 e 8, onde o substrato rochoso apresenta-se a uma cota mais elevada, os piezómetros foram implantados directamente na rocha.

No Corte 1, verifica-se que o Perfil 7 apresenta uma energia piezométrica elevada, possivelmente associada à colmatação do dreno localizado imediatamente após o núcleo, fenómeno que pode contribuir para o aumento das pressões intersticiais. Outra hipótese é a ocorrência de erosão interna, que também poderia explicar as maiores pressões observadas. Em contrapartida, a energia piezométrica reduzida no Perfil 6 pode ser atribuída à elevada permeabilidade da região, confirmada durante as escavações, que revelaram uma significativa perda de água. Adicionalmente, não pode-se descartar a hipótese de erros de leitura nos piezómetros como causa para as discrepâncias registadas em ambos os casos. Assim, recomenda-se uma investigação mais aprofundada para identificar as causas reais das variações de energia piezométrica observadas.

Observa-se também que, ao longo de grande parte do comprimento da barragem, conforme observado nos cortes longitudinais, o nível piezométrico tende a aproximar-se da interface barragem-fundação. Esse comportamento justifica-se pelo facto de a base do dreno, posicionado logo após o núcleo, localizar-se precisamente nesta cota, conforme explicado em 3.4.1.



Legenda	Substrato Rochoso		Fundação		Corpo da Barragem		Zona abaixo da linha de energia	
Cota do Coroamento [m]	122.50	122.50	122.50	122.50	122.50	122.50	122.50	122.50
Nível da Superfície [m]	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50
Cota da Interface Barragem/Fundação [m]	76.00	78.41	79.73	85.50	84.07	87.75	95.93	
Substrato Rochoso [m]	-	-	63.40	74.00	79.5	85.5	95.50	
Leitura Piezométrica [m]	74.24	74.55	78.58	86.36	96.10	91.40	98.10	
Cota de Instalação do Piezômetro [m]	64.00	64.00	64.00	72.00	72.00	72.00	64.00	
Distância [m]	240	250	350	210	210	210		

Figura 3.12 - Corte longitudinal 1

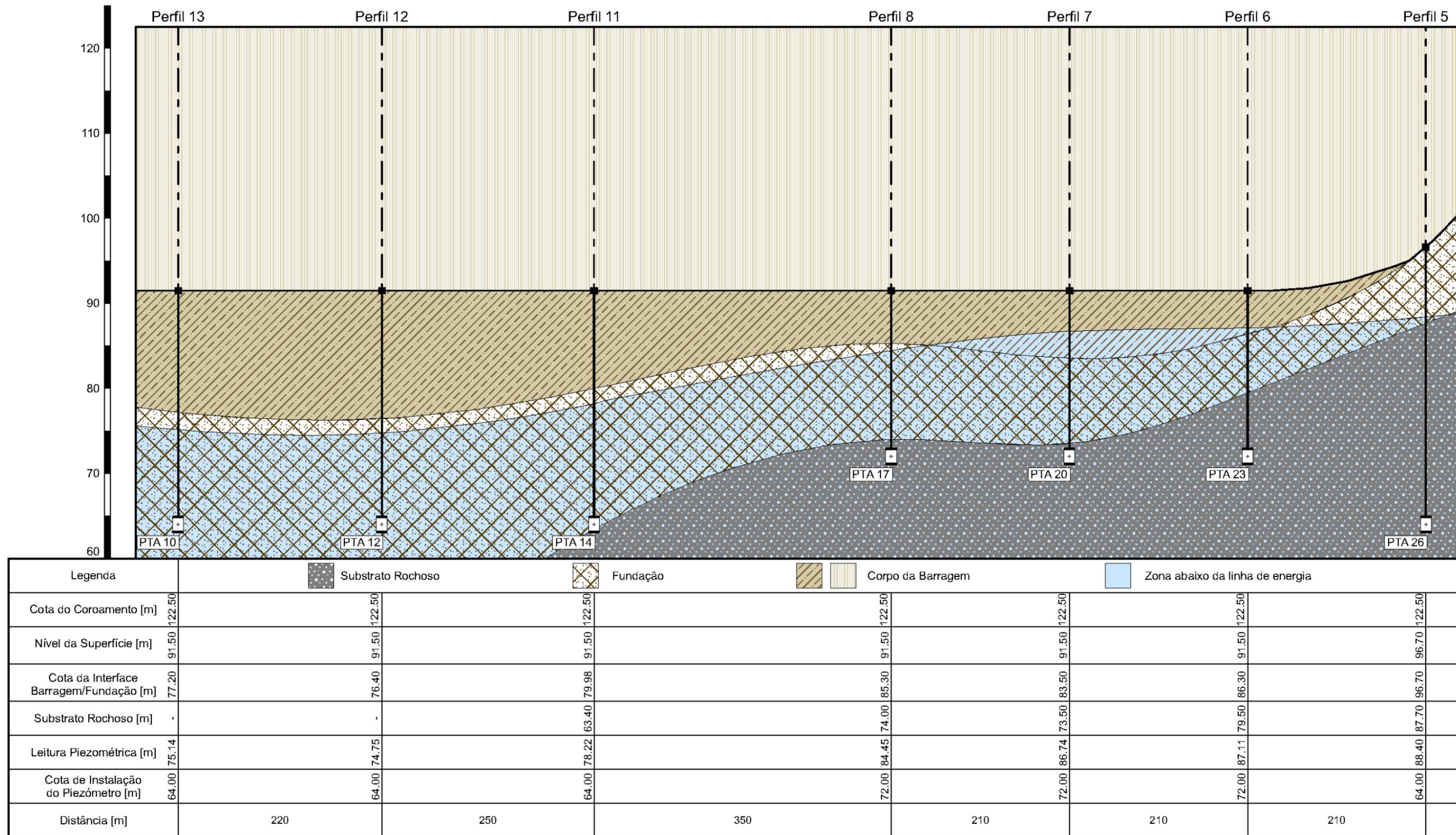


Figura 3.13 - Corte longitudinal 2

3.6. COMPORTAMENTO DO CAUDAL DE PERCOLAÇÃO NA BARRAGEM

3.6.1. Dados do Monitoramento

Adicionalmente às pressões intersticiais, é essencial monitorar o caudal que percola através da barragem e é captado pelos drenos, uma vez que este valor constitui um indicador importante de potenciais problemas relacionados com a percolação.

A Tabela 3.4 apresenta as leituras do caudal de percolação ao longo do período de monitoramento.

Tabela 3.4 – Leituras do Caudal de Percolação

Data	Caudal [l/s]
14-Jun	2.58
18-Jun	2.57
2-Jul	2.53
10-Jul	2.51
17-Jul	2.49
24-Jul	2.46
8-Aug	2.41
22-Aug	2.34
28-Aug	2.31
26-Sep	2.16
2-Oct	2.12
14-Oct	2.04
4-Nov	1.86

3.6.2. Identificação de Tendências nos Medidores de Caudal

Procede-se a uma análise similar à realizada para os piezómetros, agora aplicada aos medidores de caudal instalados na Barragem de Corumana. Esta análise tem como objectivo investigar a relação entre as variações nos caudais e os níveis da albufeira, avaliando a intensidade dessa correlação e identificando potenciais padrões ou anomalias.

Segue-se a análise gráfica da correlação entre os níveis da albufeira e os caudais registados pelos medidores instalados na Barragem de Corumana. O Gráfico 3.8 apresenta a correlação entre os níveis da albufeira e os caudais registados pelos medidores instalados na Barragem de Corumana.

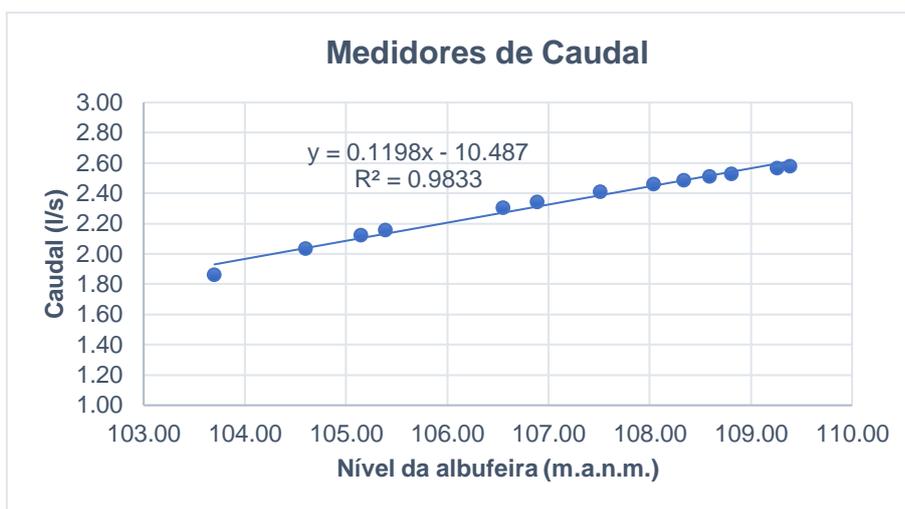


Gráfico 3.8 - Correlação entre os dados dos medidores de caudal e o nível da albufeira.

O Gráfico 3.8 evidencia uma correlação significativa entre os valores registados pelos medidores de caudal e o nível da albufeira, com um coeficiente de determinação (R^2) compreendido entre 0.8 e 1, o que indica uma relação consistente e previsível entre estas variáveis. Além disso, o desvio padrão entre os valores medidos e os estimados pela equação de regressão linear é de 0.04 l/s, o que reflecte uma baixa dispersão dos valores de caudal em relação à recta de regressão, sugerindo uma elevada precisão e estabilidade nas medições.

3.7. VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DA BARRAGEM

A análise da estabilidade dos taludes da barragem foi realizada através do software PLAXIS LE 2D, que permite modelar e simular o comportamento dos taludes sob diferentes condições de carregamento e parâmetros geotécnicos. Para esta análise, foram aplicados os métodos de Bishop e Spencer, amplamente reconhecidos pela sua eficácia na avaliação da estabilidade de taludes em projectos de barragens.

Considerou-se que o nível da coluna de água nos piezómetros corresponde ao nível freático na barragem, adoptando assim uma abordagem conservadora. Ao considerar um nível freático superior ao real, obtém-se um factor de segurança menor do que o real, o que, na prática, assegura maior estabilidade da barragem. Contudo, recomenda-se a instalação de múltiplos piezómetros por camada ou o uso do CPTu (mais adequado em solos finos) para determinar com maior precisão o nível freático real.

Foram seleccionados dois perfis transversais para a análise: o Perfil 7 e o Perfil 12. O Perfil 7 foi escolhido devido à observação de energias mais altas em relação à superfície, o que indica uma maior influência das pressões intersticiais nesse local, tornando-o um

ponto crítico para a análise. O Perfil 12 foi selecionado por representar a região mais alta da barragem, onde o maior peso da estrutura pode representar um risco aumentado de instabilidade.

A análise foi realizada com base nas leituras de 04/11/24, que representam as mais recentes obtidas, e no nível de máxima cheia da barragem. Para uma avaliação abrangente, também foi considerada a situação de esvaziamento rápido, com o objectivo de observar o comportamento da barragem sob diferentes condições de operação. No caso do esvaziamento rápido, considerou-se a variação do nível da água desde o nível de máxima cheia até o nível mínimo de exploração. As pressões intersticiais para o nível de máxima cheia foram extrapoladas utilizando os dados obtidos através da regressão linear.

A Tabela 3.5 apresenta um resumo dos factores de segurança calculados para os diferentes cenários analisados. A representação das superfícies de corte obtidas nesta análise pode ser consultada no Anexo 3.

Tabela 3.5 - Resumo dos factores de segurança nos taludes da Barragem de Corumana

Condição	Bishop Modificado		Spencer	
	Perfil 7	Perfil 12	Perfil 7	Perfil 12
Operação (04-11-24)	1.88	1.74	1.88	1.75
Nível de máxima cheia	1.73	1.74	1.74	1.74
Esvaziamento rápido	1.84	1.76	1.86	1.84

Os factores de segurança obtidos para as condições de operação normal (04/11/24), nível de máxima cheia e esvaziamento rápido da albufeira superam os valores mínimos recomendados de 1.5, 1.4 e 1.1, respectivamente. Estes resultados indicam que a barragem apresenta factores de segurança que atendem aos critérios estabelecidos.

3.8. MEDIDAS DE APRIMORAMENTO DO MONITORAMENTO

A segurança e a estabilidade das barragens de terra dependem de um monitoramento contínuo e eficaz, capaz de detectar precocemente eventuais anomalias e permitir a implementação de medidas correctivas a tempo. A Barragem de Corumana, como qualquer estrutura importante de armazenamento de água, requer um acompanhamento constante para garantir a sua integridade e operação segura. Com a recente manutenção e instalação dos piezómetros, surgiram novas oportunidades para fortalecer e otimizar o processo de monitoramento.

A seguir, são apresentadas medidas que podem ser aplicadas para melhorar ainda mais a eficácia do monitoramento, contribuindo para um ambiente de operação mais seguro e eficiente.

3.8.1. Frequência do Monitoramento

Estabelecer uma frequência adequada para o monitoramento é essencial para garantir a segurança da barragem. Fenómenos como erosão interna e *piping* podem surgir de forma súbita, e leituras esporádicas podem atrasar a detecção de problemas, aumentando os riscos.

Durante o período de estudo na Barragem de Corumana, observou-se que a frequência de leituras não seguiu os padrões recomendados, com intervalos variando de semanais a mensais, possivelmente devido aos trabalhos de manutenção em andamento. Para garantir um monitoramento eficaz e a detecção precoce de anomalias, recomenda-se que a barragem adote uma frequência de monitoramento alinhada com as boas práticas internacionais, conforme estabelecido pelo Banco Mundial (2021). A Tabela 3.6 apresenta as directrizes sugeridas para a frequência de leitura dos instrumentos de monitoramento, sendo crucial que estas sejam seguidas para permitir a implementação de ações correctivas imediatas, mitigando os riscos à segurança da barragem e às comunidades a jusante.

Tabela 3.6 - Frequência Típica de Leitura dos Instrumentos de Monitoramento.

Actividade de monitoramento	Classificação do risco		
	Baixo	Médio	Alto
Inspeção de rotina	Mensalmente	Semanalmente	Diário - semanal
Nível da albufeira	Durante a inspeção de rotina	Contínuo	Contínuo/ telemétrico
Caudal de percolação	Durante a inspeção de rotina	Mensal - diário	Diariamente
Pressões intersticiais	Durante a inspeção de rotina	Mensal - diário	Diariamente
Deformações	No máximo a cada 10 anos	A cada 5 anos	Anualmente
Precipitação	Tipicamente não necessário no local	Diariamente	Diário - horário
Movimento sísmico	Tipicamente não necessário no local	Conforme necessário	Conforme necessário
Turbidez do caudal de percolação	Conforme necessário	Semestralmente - anualmente	Mensalmente

Fonte: Banco Mundial (2021).

3.8.2. Implementação de um Sistema Automático de Aquisição de Dados (ADAS)

A instalação de Sistemas Automáticos de Aquisição de Dados (ADAS) é altamente indicada, especialmente em grandes barragens, para otimizar o monitoramento e garantir a segurança das estruturas. A automação do sistema de aquisição de dados oferece uma série de benefícios, incluindo a redução da carga de trabalho manual, diminuição do tempo entre medição e interpretação dos dados e a possibilidade de realizar leituras mais frequentes sem custos adicionais, conforme destacado pela Central Water Commission (2018). A automação permite a emissão de alertas automáticos em caso de ultrapassagem de limites, aumentando a segurança e a detecção precoce de problemas.

O ADAS proporciona também maior precisão e confiabilidade, permitindo a aquisição contínua de dados e a transmissão remota para análise. Com esses recursos, é possível tomar decisões mais rápidas e fundamentadas, resultando em uma gestão mais eficiente da segurança da barragem. A integração dos dados directamente em bancos de dados computacionais facilita ainda mais a interpretação e análise dos resultados, além de reduzir erros no processo de aquisição e interpretação (Central Water Commission, 2018).

Na Barragem de Corumana, será implementado um sistema ADAS com o objectivo de melhorar a eficiência e precisão na aquisição e transmissão de dados. Com a implementação deste sistema, será possível monitorar a barragem de forma mais eficaz e detectar possíveis anomalias de maneira rápida, fornecendo um suporte crucial para a gestão da segurança da barragem.

3.8.3. Análise e Validação dos Dados

Após a aquisição dos dados dos piezómetros, é essencial realizar uma comparação com os valores esperados para validar a precisão dos resultados. Estes valores esperados podem ser obtidos a partir das equações de regressão linear da Tabela 3.3, onde correlacionam-se as pressões intersticiais com o nível da albufeira.

A comparação entre os dados colhidos e os valores esperados deve considerar os critérios definidos por Candeias et al. (2012), que estabeleceram níveis de alerta baseados em múltiplos do erro padrão e acções a serem tomados em cada caso, conforme apresentado na Tabela 3.7. Este procedimento de validação ajuda a identificar anomalias e assegurar que os resultados se mantêm dentro dos limites de segurança da barragem.

Tabela 3.7 - Níveis de atenção e alerta em função do desvio aos modelos.

Nível	Definição	Descrição	Acção recomendada
Verde	$E \leq 2\sigma$	Comportamento normal: as leituras estão de acordo com o modelo estatístico baseado nas leituras anteriores. Cerca de 95% das leituras anteriores enquadram-se neste intervalo.	Nenhuma
Amarelo	$2\sigma \leq E \leq 5\sigma$	Há uma discrepância relevante entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	a) verificar boletins de registo b) repetir leituras c) verificar historial d) verificar necessidade de recalibração do modelo
Vermelho	$E > 5\sigma$	Há uma discrepância grosseira entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	a) verificar boletins de registo b) repetir leituras c) verificar historial d) verificar ocorrências noutros aparelhos e) notificar responsável pela análise de segurança

Fonte: Candeias et al. (2012).

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho de licenciatura consistiu numa investigação sobre a influência das pressões intersticiais na estabilidade e segurança da Barragem de Corumana, com enfoque na avaliação das condições de percolação e na proposta de medidas para o seu monitoramento, das quais resultaram as seguintes conclusões:

- A avaliação das variações das pressões intersticiais na Barragem de Corumana permitiu identificar uma forte correlação entre os níveis da albufeira e as leituras piezométricas em cerca de 70% dos instrumentos analisados. Este resultado evidencia que o nível da albufeira é o principal factor de influência nas pressões intersticiais desenvolvidas ao longo da barragem, confirmando, simultaneamente, a aplicabilidade de métodos estatísticos na previsão dessas variações.
- Com base nas leituras piezométricas e na aplicação do método de interpolação espacial, foi possível mapear os gradientes hidráulicos ao longo da fundação da barragem. Os resultados indicaram que o escoamento subterrâneo ocorre predominantemente no sentido montante-jusante, com um desvio em direcção à margem direita, registando-se um gradiente hidráulico máximo de 0,23 m/m. O piezómetro PTA 18 destacou-se por apresentar pressões superiores às esperadas, sugerindo a necessidade de atenção específica nesse ponto.
- A segurança da Barragem de Corumana face à erosão interna e ao deslizamento de taludes foi avaliada com base nos gradientes hidráulicos, no caudal de percolação e na análise da estabilidade dos taludes. Os gradientes medidos na fundação mantiveram-se dentro dos limites seguros estabelecidos na literatura, e o caudal percolado mostrou-se estável, sem variações abruptas nem indícios de transporte de finos, não evidenciando riscos de erosão interna. Relativamente à estabilidade dos taludes, obtiveram-se factores de segurança superiores aos mínimos recomendados, tanto em montante como em jusante, em todos os cenários analisados.
- Foram propostos protocolos para o monitoramento das pressões intersticiais, que envolvem o aumento da frequência de leituras, a automatização da aquisição de dados e a análise estatística regular dos resultados, com o objectivo de garantir a detecção precoce de anomalias e preservar a segurança da barragem.

4.2. RECOMENDAÇÕES

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foram identificadas medidas relevantes para reforçar a segurança e a eficiência do sistema de monitoramento da Barragem de Corumana. Assim, apresentam-se as seguintes recomendações:

- Garantir a manutenção e a calibração regular de todos os instrumentos de monitoramento instalados;
- Intensificar o monitoramento da barragem durante condições operacionais adversas, como períodos de cheia, esvaziamentos rápidos da albufeira ou operação em níveis extremos.
- Adoptar as medidas propostas na Secção 3.8 deste trabalho, as quais incluem a definição de frequências de leitura mais adequadas, a automatização da aquisição de dados e a validação estatística das pressões intersticiais.

5. BIBLIOGRAFIA

5.1. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cedergren, H.R. 1989 - *Seepage, Drainage, and Flow Nets*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Nova Iorque.
2. Central Water Commission. 2018 - *Guidelines for Instrumentation of Large Dams*, 1st ed., Central Dam Safety Organization, Nova Delhi.
3. Das, B. M. e Sobhan, K. 2014 - *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 8th ed., Cengage Learning, São Paulo.
4. Dunnicliff, J. e Green, G. E. 1988 - *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, 1st ed., John Wiley & Sons, Nova Iorque.
5. Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. e Foster, M. 2015 - *Geotechnical Engineering of Dams*, 2nd ed., CRC Press, Londres.
6. Interagency Committee on Dam Safety(ICODS). 2015 - *Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion*, 1st ed., Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
7. Murthy, V. N. S. 2002 - *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1st ed., Marcel Dekker Inc., Nova Iorque.
8. Tanchev, L. 2014 - *Dams and Appurtenant Hydraulic Structures*, 2nd ed., CRC Press, Londres.
9. United States Bureau of Reclamation (USBR). 1973 – *Design of Small Dams*, 2nd ed., United States Government Printing Office, Washington, DC.
10. Banco Mundial. 2021. *Good Practice Note on Dam Safety – Appendix 2: Instrumentation Plan*. Washington, DC, p. 4.
11. Candeias, J., Silva, J. M., Sousa, O., e Capange, A. 2012 - *Modelação do comportamento observado da Barragem da Corumana*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Lisboa; Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul), Maputo, p. 19.
12. United States Army Corps of Engineers (USACE). 1995 - *Engineering and Design: Instrumentation of Embankment Dams and Levees*, EM 1110-2-1908, Department of the Army, Washington, D.C., p. 4.5-4.22.
13. United States Army Corps of Engineers (USACE). 2003 - *Engineering and Design: Slope Stability*, EM 1110-2-1902, Department of the Army, Washington, DC, p. 3.2.

14. Xiao, R., Jiang, M., Li, Z. e He, X. 2022 - *New insights into the 2020 Sardoba dam failure in Uzbekistan from Earth observation*, International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, Vol. 107, n. 102705, p. 1-12.

6. ANEXOS

Anexo 1 - Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

Anexo 2 - Relação entre as Leituras Piezométricas e o Nível Da Albufeira.

Anexo 3 - Análise de Estabilidade dos Taludes - Plaxis 2D LE.

ANEXOS

Anexo 1 - Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Das diferentes classificações dos solos, o Sistema Unificado de Classificação de Solos proposto por Casagrande é amplamente utilizado devido a este sistema de classificação ajudar a estimar a faixa das propriedades e da permeabilidade dos solos, sendo assim, uma ferramenta poderosa nas mãos dos engenheiros geotécnicos (Tanchev, 2014). Esta classificação dos solos baseia-se na granulometria, no limite de liquidez (LL) e no índice de plasticidade (IP), como indica a Tabela A3-1.

Tabela A1-1- Sistema unificado de classificação de solo.

Critérios para atribuir símbolos aos grupos				Símbolo de grupo
Solos grossos Mais de 50% de material retido na peneira nº 200	Pedregulhos Mais de 50% da fração grossa retida na peneira nº 4	Pedregulhos puros	$C_u \geq 4$ e $1 \leq C_c \leq 3^e$	GW
		Menos de 5% de finos ^a	$C_u < 4$ e/ou $C_c < 1$ ou $C_c > 3^e$	GP
		Pedregulhos com finos	$IP < 4$ ou representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3)	GM
		Mais de 12% de finos ^{a,d}	$IP > 7$ e representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3)	GC
	Areias 50% ou mais da fração grossa passa pela peneira nº 4	Areias puras	$C_u \geq 6$ e $1 \leq C_c \leq 3^e$	SW
		Menos de 5% de finos ^b	$C_u < 6$ e/ou $C_c < 1$ ou $C_c > 3^e$	SP
		Areia com finos	$IP < 4$ ou representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3)	SM
		Mais de 12% de finos ^{b,d}	$IP > 7$ e representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3)	SC
Solos finos 50% ou mais do material passa pela peneira nº 200	Siltes e argilas Limite de liquidez menor que 50	Inorgânicos	$IP > 7$ e representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3) ^f	CL
		Orgânicos	$IP < 4$ ou representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3) ^f	ML
	Siltes e argilas Limite de liquidez de 50 ou mais	Inorgânicos	Limite de liquidez – seco em estufa $< 0,75$; veja a Figura 5.3; zona OL	OL
			Limite de liquidez – sem secagem	OL
		Orgânicos	IP representado acima ou na linha "A" (Figura 5.3)	CH
			IP representado abaixo da linha "A" (Figura 5.3)	MH
Solos altamente orgânicos	Matéria essencialmente orgânica, de cor escura e odor orgânico	Limite de liquidez – seco em estufa $< 0,75$; veja a Figura 5.3; zona OH	OH	
		Limite de liquidez – sem secagem	OH	

Nota: G – cascalho; S – areia; M – silte; C – argila; O – orgânico; P – turfa; W – bem graduado;

P – mal graduado; L – baixa plasticidade; H – alta plasticidade.

Fonte: Das (2015).

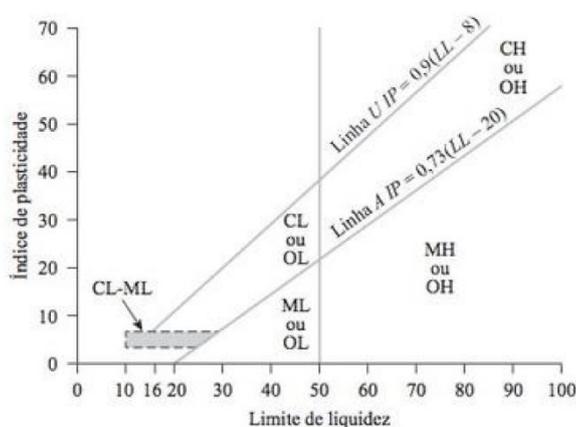


Gráfico A1-1 - Gráfico de plasticidade (referido como figura 5.3 na Tabela A3.1).

Fonte: Das (2015).

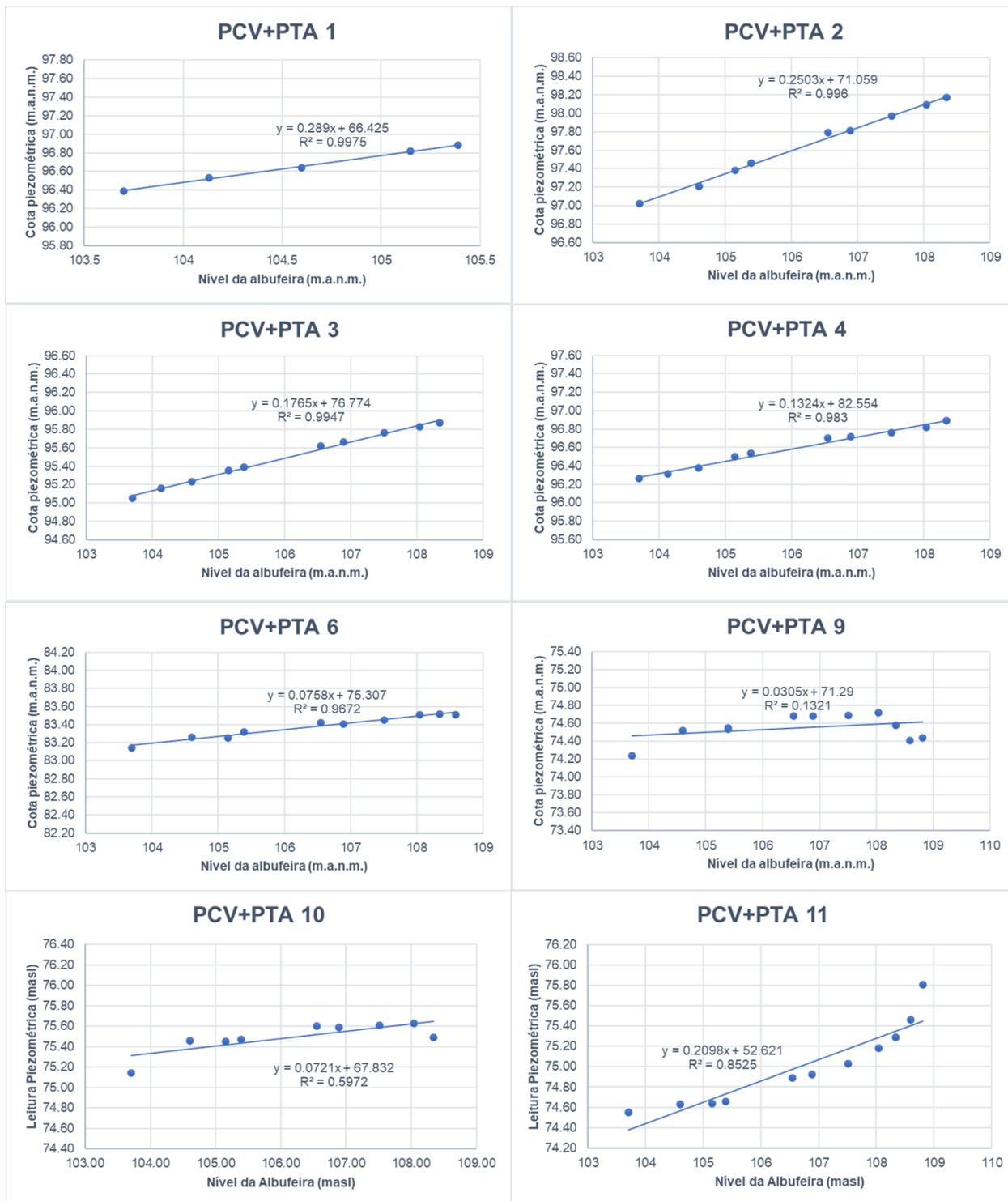
Tabela A3-2 apresenta as propriedades típicas dos solos, de acordo com a classificação USCS.

Tabela A1-2 - Propriedades Típicas dos Solos.

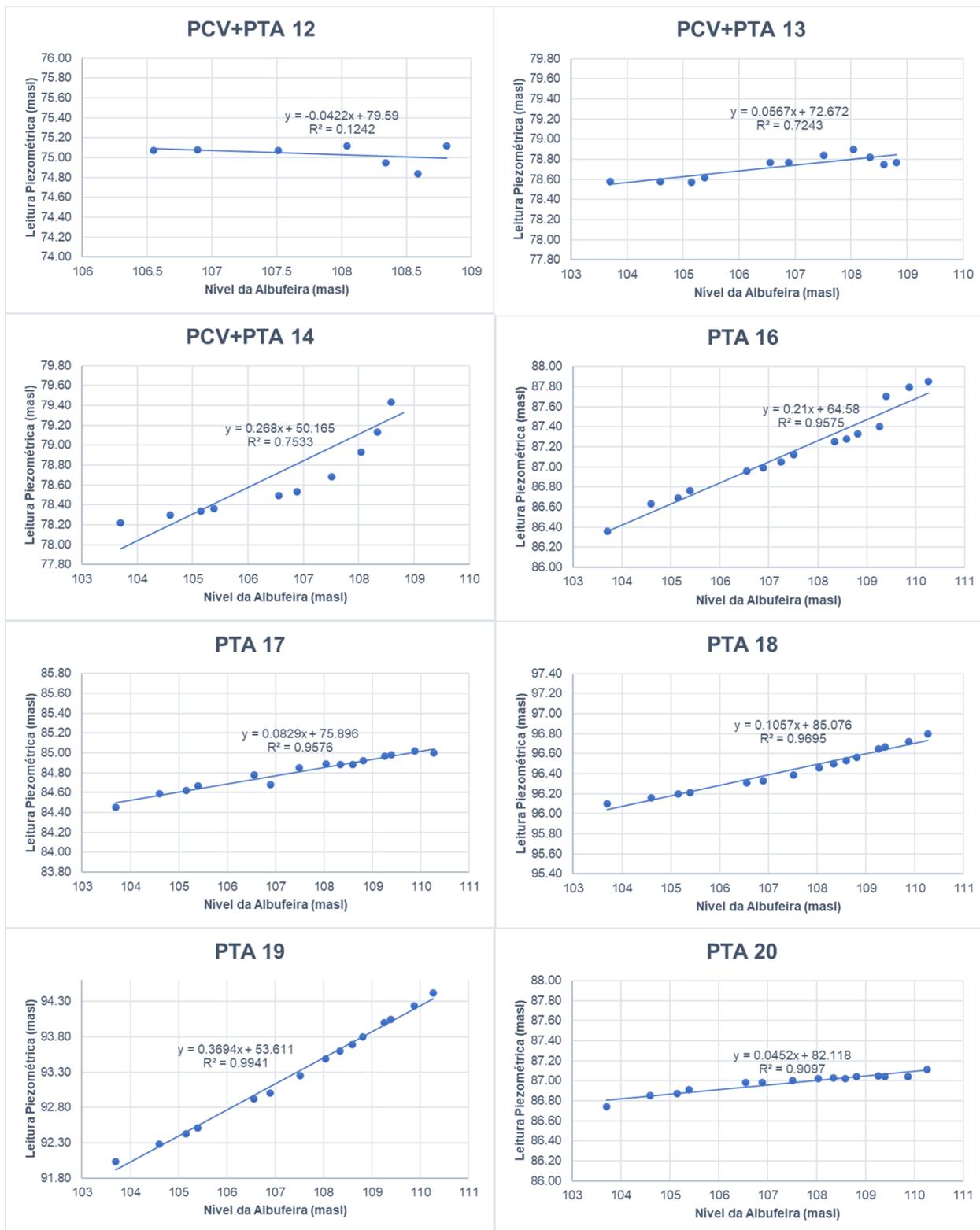
Solo	Índice de vazios (e_0)	Permeabilidade (cm/s)	Resistência ao Cisalhamento	
			C (kpa)	tg (ϕ)
GW	*	3E-02	*	>0.79
GP	*	6E-02	*	>0.74
GM	*	3E-07	*	>0.67
GC	*	3E-07	*	>0.60
SW	0.37	*	39	0.79
SP	0.50	1E-05	23	0.74
SM	0.48	7E-06	51	0.67
SM-SC	0.41	8E-07	50	0.66
SC	0.48	3E-07	75	0.6
ML	0.63	6E-07	67	0.62
ML-CL	0.54	1E-07	63	0.62
CL	0.56	8E-08	87	0.54
OL	*	*	*	*
MH	1.15	2E-07	72	0.47
CH	0.80	5E-08	103	0.35
OH	*	*	*	*

Fonte: USBR (1973).

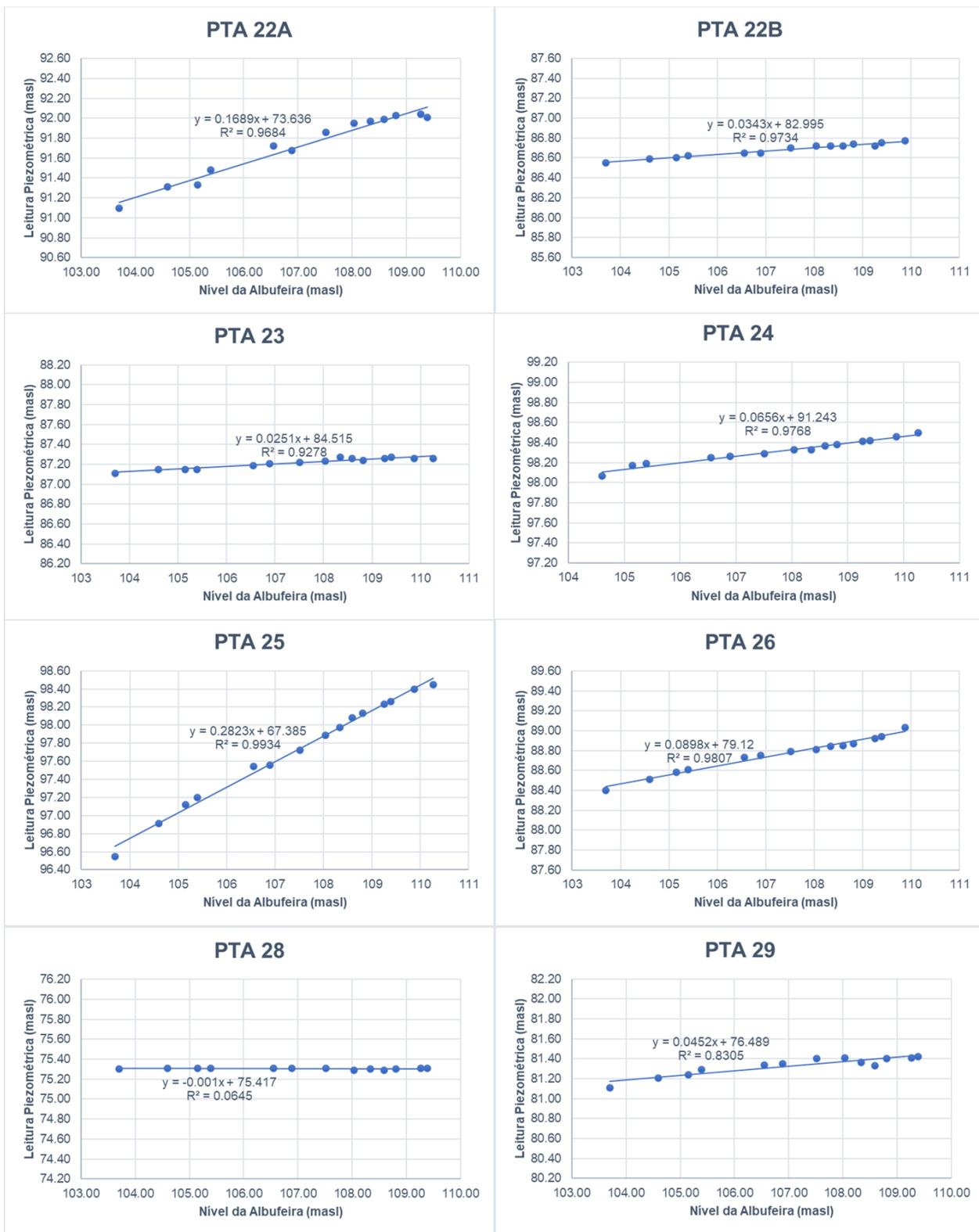
Anexo 2 - Relação entre as Leituras Piezométricas e o Nível Da Albufeira



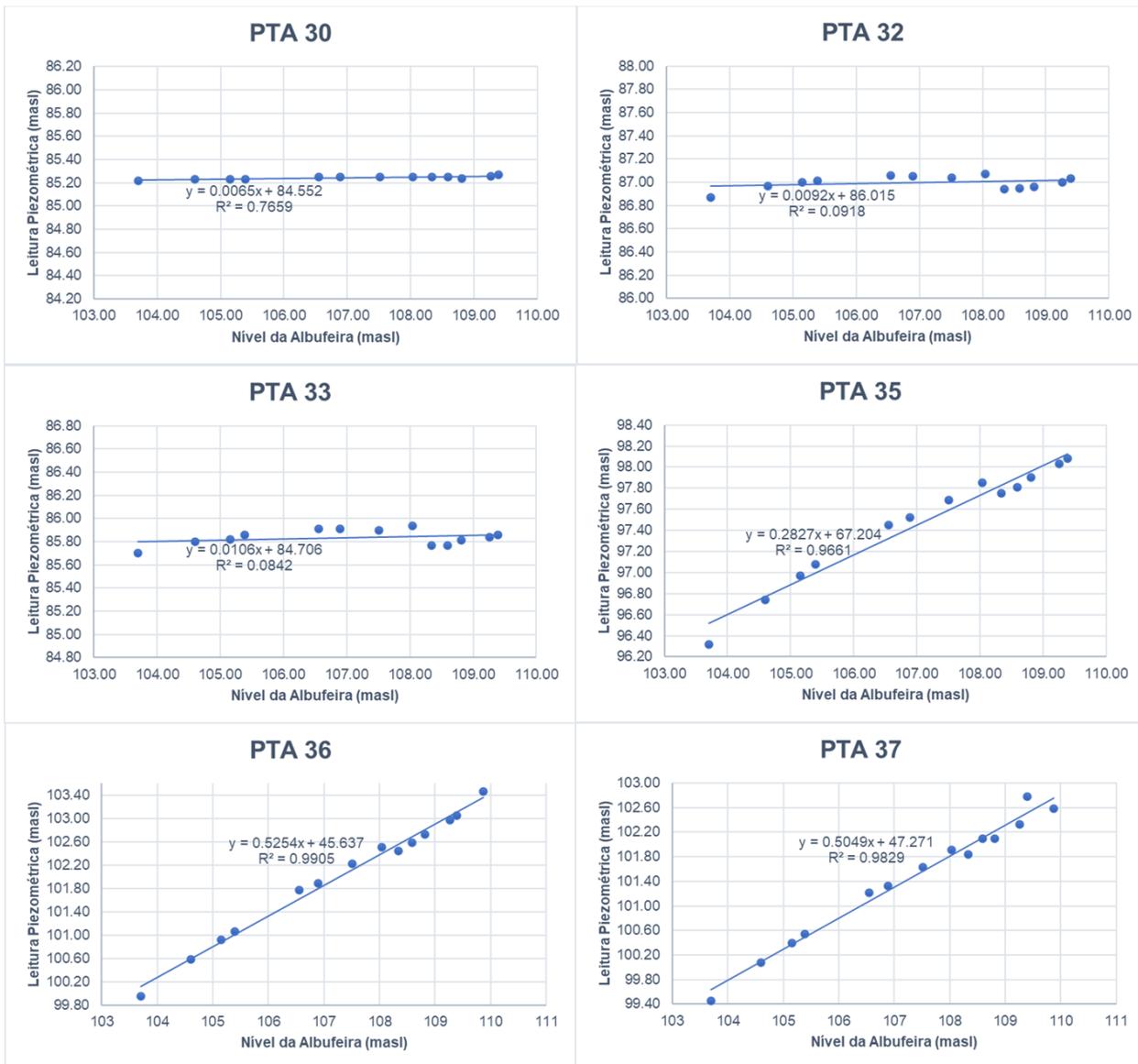
Gráficos A2-1 - PCV+PTA's 1 à 11



Gráficos A2-2 - PCV+PTA's 12 e 13 e PTA's 14 e 20



Gráficos A2-3 - PTA's 22A e 29



Gráficos A2-4 - PTA's 30 e 37

Anexo 3 - Análise de Estabilidade dos Taludes - Plaxis 2D LE

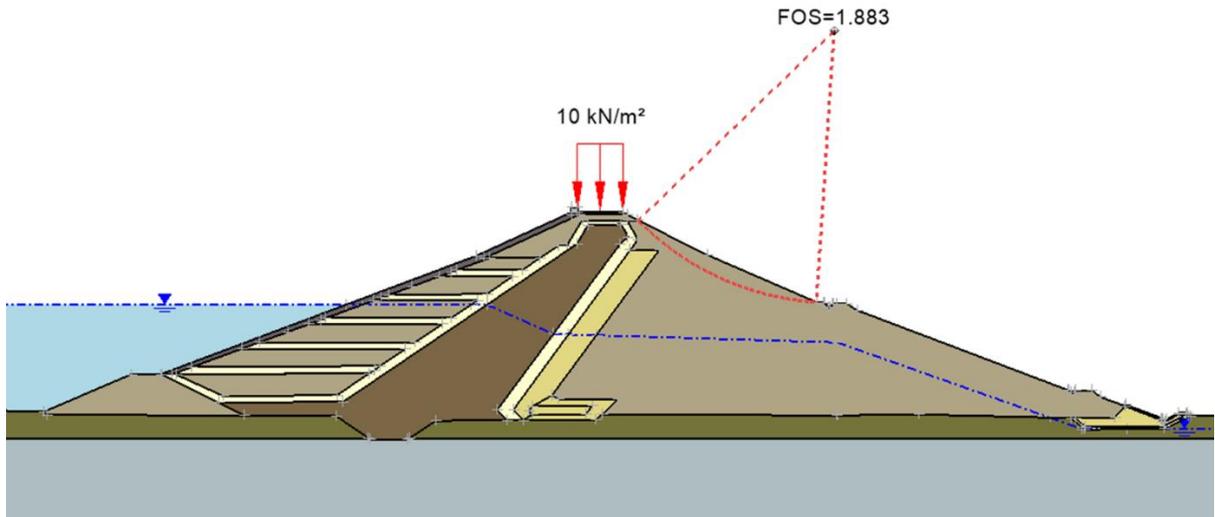


Figura A3-1 - Perfil 7 sob condições de operação normal (04/11/2024)

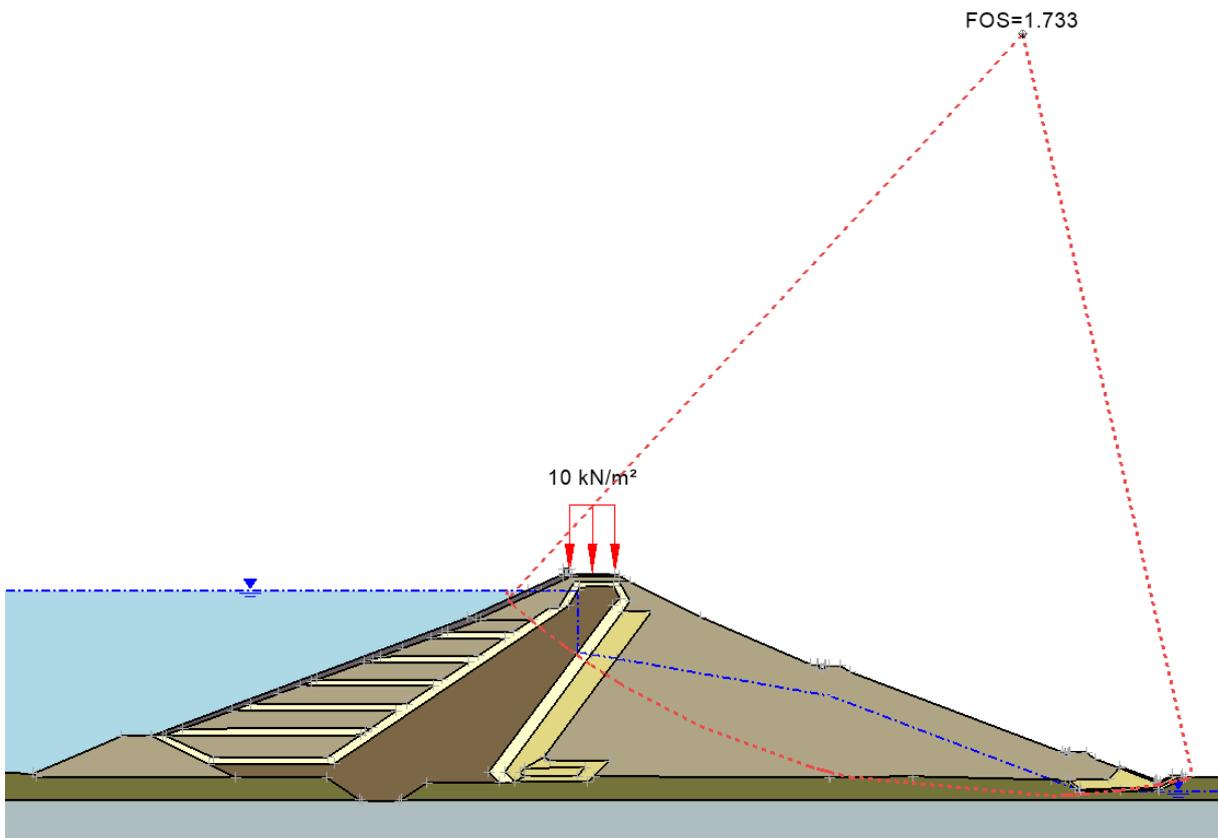


Figura A3-2 - Perfil 7 sob condições de máxima cheia

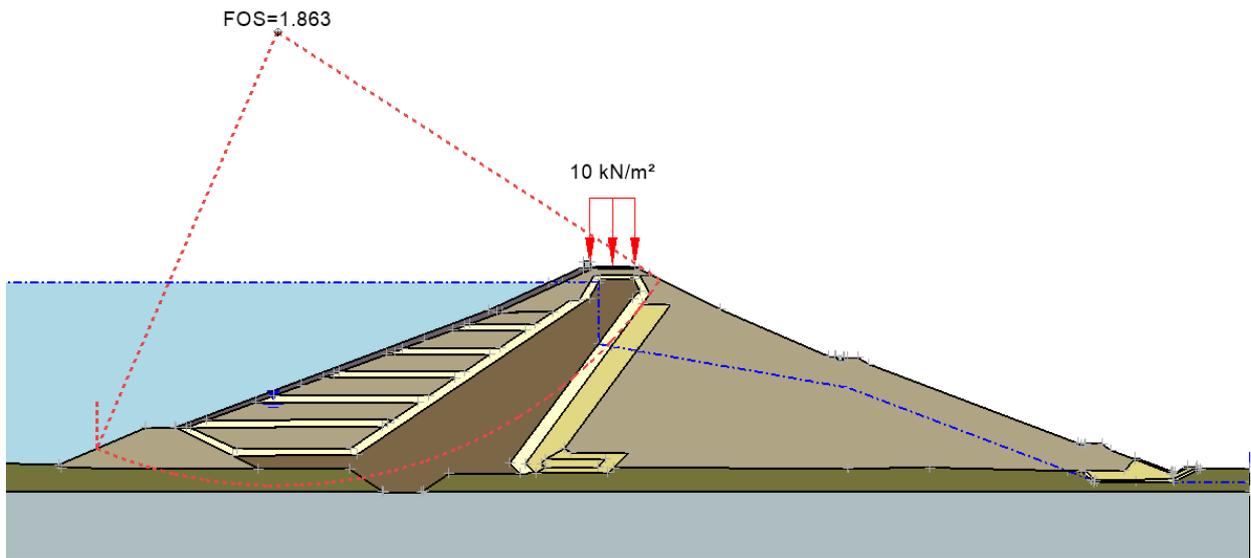


Figura A3-3 - Perfil 7 sob condições de esvaziamento rápido

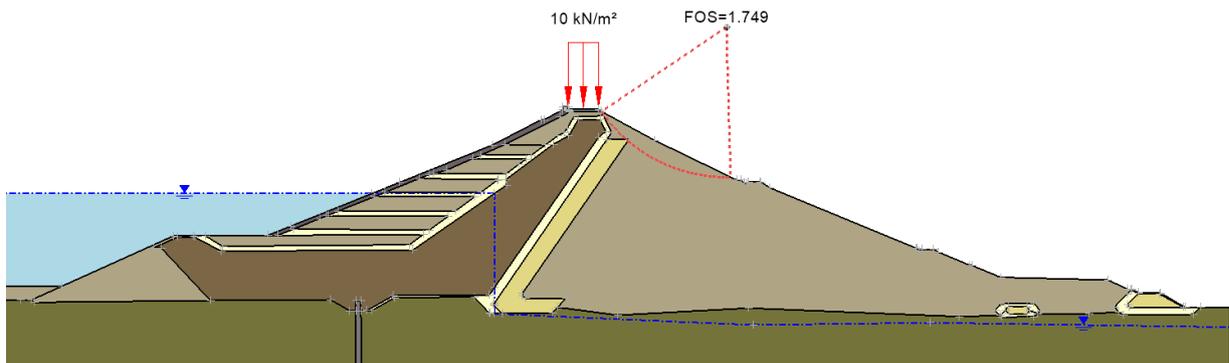


Figura A3-4 - Perfil 12 sob condições de operação normal (04/11/2024)

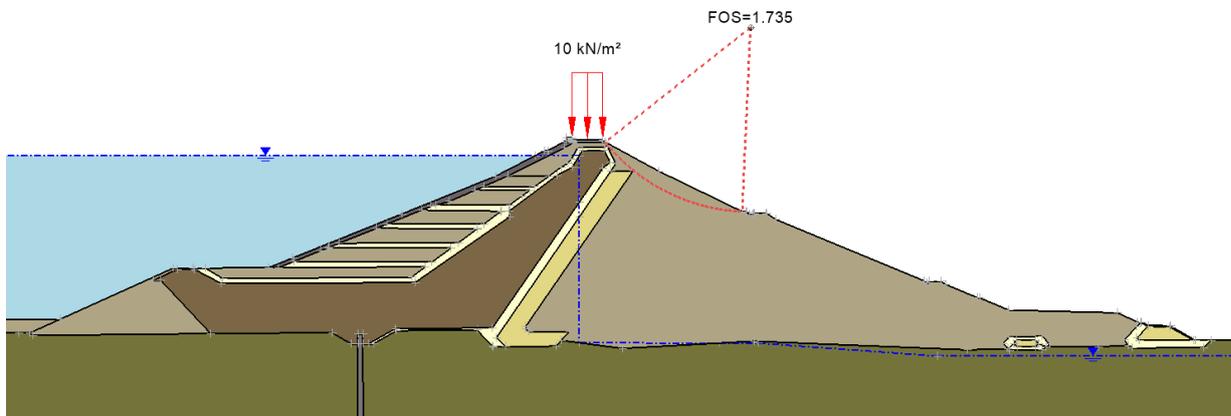


Figura A3-5 - Perfil 12 sob condições de máxima cheia

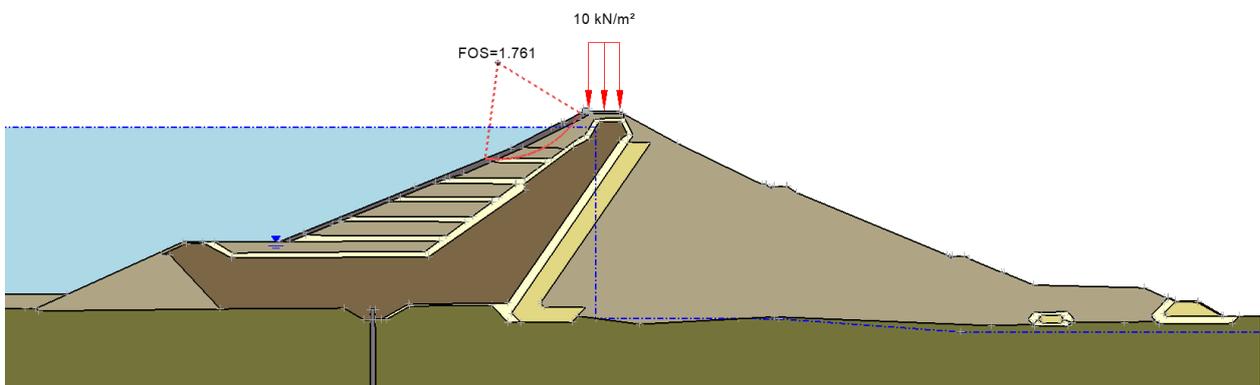


Figura A3-6 - Perfil 12 sob condições de esvaziamento rápido