

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS OTONI CORRÊA

APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE DE DADOS DE PIEZÔMETROS
EM BARRAGENS DE TERRA

BELO HORIZONTE

2026

LUCAS OTONI CORRÊA

**APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE DE DADOS DE PIEZÔMETROS
EM BARRAGENS DE TERRA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio

BELO HORIZONTE

2026

C824a Corrêa, Lucas Otoni
Aplicações computacionais na análise de dados de piezômetros em barragens
de terra / Lucas Otoni Corrêa. – 2026.
46 f. : il., fotos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de graduação do
Programa de Graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio.

Bibliografia: f. 44-46.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Geotecnia – Instrumentos – Teses. 2. Engenharia geotécnica – Teses.
3. Piezômetro– Teses. 4. Barragem de terra – Teses. 5. Inteligência artificial –
Teses. I. Simplicio, Ana Carolina da Cruz Reis. II. Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD 624.151



FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC N° 7/2026 - DEC (11.56.07)

N° do Protocolo: 23062.034537/2026-91

Belo Horizonte-MG, 03 de julho de 2026.

LUCAS OTONI CORRÊA

**APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE DE DADOS DE PEIZÔMETROS EM
BARRAGENS DE TERRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, do Campus Nova Gameleira, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 16 de junho de 2026

Banca Examinadora:

Prof. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis Simplício - Orientador
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Chan Kou Wha
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Thiago Paim de Almeida Lana
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. MSc. Lucas Thadeu da Silva Ramos
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

BELO HORIZONTE

2026

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 16:11)
ANA CAROLINA DA CRUZ REIS SIMPLICIO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: ###267#7

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 23:03)
CHAN KOU WHA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DET (11.55.11)
Matrícula: ###960#2

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 08:05)
LUCAS THADEU DA SILVA RAMOS
PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO
DEC (11.56.07)
Matrícula: ##971#2

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 17:24)
LUCAS OTONI CORRÊA
DISCENTE
Matrícula: 2019#####5

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 18:14)
THIAGO PAIM DE ALMEIDA LANA
DISCENTE
Matrícula: 2024#####5

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: 7, ano: 2026, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: 03/07/2026 e o código de verificação: **a067801ed0**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Av. Amazonas, 7675 – Bairro Nova Gameleira – Belo Horizonte - MG
Departamento de Engenharia Civil - Prédio 12 - Telefone: (31) 3319-6810 – secretaria@civil.cefetmg.br

TERMO DE ACEITE FINAL - ORIENTADOR

Titulo do TCC:	Aplicações Computacionais na Análise de Dados de Piezômetros em Barragens De Terra
Data defesa:	16/06/2026
Discente:	Lucas Otoni Corrêa
Orientador:	Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio

Eu, Lucas Otoni Corrêa declaro que todas as sugestões de correção e melhoria indicadas pela banca de avaliação de meu Trabalho de Conclusão de Curso e acordadas com meu Prof. Orientador foram implementadas no texto e entregues ao mesmo, Prof(a). Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio para validação final.

De acordo: Belo Horizonte, 30 de junho de 2026 ,

Assinatura do Discente

Declaro ter recebido e conferido a versão final do texto e que as sugestões de correção e melhorias indicadas pela banca e acatadas por mim foram implementadas.

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA CAROLINA DA CRUZ REIS SIMPLICIO
Data: 30/06/2026 16:39:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

De acordo: Belo Horizonte, 30 de junho de 2026 ,

Assinatura do Orientador

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, Leonardo e Beatriz, e à minha irmã, Maria Clara, pelo apoio, incentivo e presença ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Dedico também a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse até aqui, especialmente nos momentos em que conciliar estudo, trabalho e vida pessoal pareceu impossível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus e à minha família — em especial, meu pai, Leonardo, minha mãe, Beatriz, e minha irmã, Maria Clara — pelo amor, paciência e apoio incondicional, que tornaram possível minha trajetória acadêmica e a conclusão deste trabalho.

À Profa. MSc. Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio, agradeço pela orientação competente, pela confiança depositada e pelas sugestões sempre precisas que elevaram a qualidade desta pesquisa.

Ao CEFET-MG, pelo ambiente de aprendizado e pela infraestrutura disponibilizada. Agradeço aos professores das disciplinas cursadas, em especial das relacionadas à área de Mecânica dos Solos, pelos conhecimentos transmitidos e pelos debates que contribuíram para a construção deste trabalho.

À Knight Piésold e à sua equipe de geotecnia, agradeço pela convivência profissional, pelo compartilhamento de experiências e pela oportunidade de aplicar e testar parte das rotinas aqui propostas. Em particular, agradeço a Juan Carlos de Oliveira pelas discussões técnicas sobre instrumentação geotécnica e segurança de estruturas, que foram essenciais para amadurecer as ideias apresentadas.

À banca examinadora, agradeço pela disponibilidade em avaliar este trabalho e pelas contribuições, observações e sugestões apresentadas, que certamente enriquecerão esta pesquisa e contribuirão para seu aprimoramento.

Por fim, registro minha gratidão a todos(as) que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Todos os modelos estão errados, mas alguns são úteis.”

George E. P. Box.

APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE DE DADOS DE PIEZÔMETROS EM BARRAGENS DE TERRA

Lucas Otoni Corrêa

Ana Carolina da Cruz Reis Simplicio

RESUMO

O monitoramento sistemático das poropressões por meio de piezômetros de corda vibrante é fundamental para a análise da segurança e do desempenho de estruturas geotécnicas, como barragens, pilhas de estéreis/rejeitos e taludes. Este trabalho apresenta uma metodologia em Python para o tratamento de dados piezométricos, contemplando rotinas de organização, processamento automatizado, análise de tendências das leituras desses instrumentos e visualização em gráficos. O fluxo proposto abrange etapas de importação padronizada (Excel), verificação automatizada de consistência com dados históricos, bem como detecção de falhas e/ou variações discrepantes. A abordagem reduz a suscetibilidade a erros associados ao tratamento manual e, por meio da geração de gráficos e painéis interativos, fornece uma visualização mais intuitiva das séries temporais dos piezômetros, subsidiando a interpretação do comportamento da estrutura monitorada. Por utilizar o ecossistema científico do Python (pandas, NumPy, Matplotlib/Plotly), o método é reproduzível, escalável e passível de integração a rotinas de trabalho, contribuindo para decisões mais ágeis e rastreáveis na gestão de risco e na operação/manutenção de estruturas geotécnicas.

Palavras-chave: geotecnia; instrumentação geotécnica; piezômetro; barragens; inteligência artificial.

APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE DE DADOS DE PIEZÔMETROS EM BARRAGENS DE TERRA

Lucas Otoni Corrêa

Ana Carolina Da Cruz Reis Simplicio

ABSTRACT

Systematic monitoring of pore pressures using vibrating-wire piezometers is essential for assessing the safety and performance of geotechnical structures such as dams, waste-rock/tailings piles, and slopes. This work presents a Python-based methodology for handling piezometric data, encompassing routines for organization, automated processing, trend analysis of instrument readings, and visualization through charts. The proposed workflow includes standardized data import (Excel), automated consistency checks against historical records, and detection of failures and/or anomalous variations. The approach reduces susceptibility to errors associated with manual processing and, by generating plots and interactive dashboards, provides a more intuitive view of piezometer time series, supporting interpretation of the monitored structure's behavior. By leveraging Python's scientific ecosystem (pandas, NumPy, Matplotlib/Plotly), the method is easily reproducible, scalable, and amenable to integration into routine workflows, contributing to more agile and traceable decision-making in the risk management and operation/maintenance of geotechnical structures.

Keywords: geotechnics; geotechnical instrumentation; piezometer; dam; artificial intelligence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vista aérea da Barragem Casa de Pedra, Congonhas (MG).....	19
Figura 2 – Seção esquemática de uma barragem de terra e seus principais elementos.....	21
Figura 3 – Leitura do Piezômetro de Tubo Aberto com Pio Elétrico.....	23
Figura 4 – Comparação esquemática entre o perfil construtivo de um piezômetro (PZ) e um indicador de nível d'água (INA).	24
Figura 5 – Esquema dos componentes internos de um piezômetro de corda vibrante.....	26
Figura 6 – Exemplo de planilha de leituras piezométricas fornecida pelo CMG.....	29
Figura 7 – Tela inicial do programa	31
Figura 8 – Cadastro de piezômetros	32
Figura 9 – Edição simultânea dos metadados de múltiplos piezômetros	33
Figura 10 – Importação de leituras (1/2)	34
Figura 11 – Importação de leituras (2/2)	34
Figura 12 – Visão geral da Summary Table	35
Figura 13 – Detecção automática de novos instrumentos	36
Figura 14 – Visão geral da Trend Review	38
Figura 15 – Estatísticas por material da Trend Review.....	39
Figura 16 – Seletor de gráficos por material	40
Figura 17 – Criação de gráficos personalizados (1/3)	41
Figura 18 – Criação de gráficos personalizados (2/3)	41
Figura 19 – Criação de gráficos personalizados (3/3)	42
Figura 20 – Picos observados em um piezômetro	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CMG	Centro de Monitoramento Geotécnico
INA	Indicador de Nível D'Água
JSON	JavaScript Object Notation
ML	Machine Learning
PZ	Piezômetro de Tubo Aberto
PZE	Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Breve histórico da geotecnia de barragens	18
2.2 Monitoramento geotécnico	20
2.3 Monitoramento geotécnico de barragens de terra	20
2.4 Instrumentação geotécnica de barragens	21
2.5 Poropressão e sua influência no comportamento de barragens	22
2.6 Instrumentos para medição de poropressão e nível d'água	22
2.7 Síntese da literatura	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Dados de entrada	28
3.2 Cadastro dos instrumentos e importação das leituras.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1 Visão geral do programa desenvolvido	31
4.2 Cadastro e gerenciamento dos instrumentos	32
4.3 Importação e padronização das leituras mensais.....	33
4.4 <i>Summary Table</i>	35
4.5 <i>Trend Review</i>	37
4.6 Gráficos de séries temporais.....	40
4.7 Discussão dos ganhos obtidos	43
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	45
5.1 Conclusões.....	45
5.2 Trabalhos futuros.....	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento e a instrumentação geotécnica constituem componentes fundamentais da gestão da segurança de barragens, pois permitem acompanhar, ao longo do tempo, grandezas relacionadas ao comportamento das estruturas, como poropressões, deslocamentos, recalques e vazões. A importância desse acompanhamento tornou-se ainda mais evidente no Brasil após os rompimentos da Barragem de Fundão, em Mariana, em 5 de novembro de 2015, e da Barragem I da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, em 25 de janeiro de 2019. Esses eventos provocaram perdas humanas e impactos sociais, ambientais e econômicos de grande magnitude, reforçando a necessidade de sistemas robustos de monitoramento contínuo e interpretação técnica dos dados obtidos em campo (CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS, 2017; MINAS GERAIS, 2024).

Entre as grandezas acompanhadas no monitoramento geotécnico de barragens de terra, destacam-se as poropressões no maciço e na fundação. Instrumentos como piezômetros de corda vibrante registram as variações hidráulicas ao longo do tempo e permitem relacioná-las a fatores como precipitação, variações dos níveis d'água e dos rejeitos do reservatório e intervenções construtivas, como etapas de alteamento. Análises de campo de longo prazo indicam que a interpretação integrada de chuva e poropressão, por exemplo, contribui para compreender o comportamento de obras geotécnicas monitoradas e é essencial para avaliar seu desempenho e segurança (DOMINGUES; FARO; MAZZUTTI, 2024).

Apesar dessa relevância, a instrumentação moderna produz grandes volumes de dados, frequentemente devido à alta frequência de aquisição e/ou ao elevado volume de instrumentos instalados nas estruturas. Em empreendimentos que utilizam piezômetros com leitura automatizada, são comuns registros a cada 4 horas, resultando em múltiplas leituras diárias por instrumento e, frequentemente, milhares de leituras por mês. Esse cenário amplia a chance de falhas de aquisição, incluindo ausência de registros, duplicidades e valores discrepantes. Somado a isso, ainda é comum que equipes de engenharia processem os registros manualmente, com etapas pouco padronizadas (fluxo altamente variável a depender do profissional) e baixa rastreabilidade, o que dificulta auditorias, o acompanhamento de tendências ao longo do tempo e pode comprometer a própria confiabilidade dos resultados.

A literatura recente aponta o potencial de técnicas estatísticas e de *machine learning* (ML) para identificar padrões e desvios em dados de monitoramento. No contexto brasileiro, há aplicações de métodos estatísticos em piezômetros como auxílio ao monitoramento e à identificação de comportamentos fora do esperado (SILVA; CAETANO; PIEROZAN, 2024). Também existem propostas voltadas à detecção de *outliers* em dados piezométricos com técnicas de ML (BRANDÃO et al., 2023).

Diante desse contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta uma metodologia, implementada em linguagem Python, para tratamento e análise de dados piezométricos de barragens de terra, com foco em padronização e automatização. O sistema proposto possui interface gráfica (PyQt5) e utiliza bibliotecas do ecossistema científico do Python para processamento e visualização de dados. Os dados operacionais — cadastro de instrumentos e leituras importadas — são mantidos em arquivo único no formato JSON, buscando assegurar rastreabilidade entre entradas e saídas. Os dados de entrada foram fornecidos mensalmente em Excel ao longo do ano de 2025 por um Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG) real, constituinte de uma mina de ouro localizada no estado de Minas Gerais.

A finalidade do trabalho é explicitar os ganhos de agilidade, redução da suscetibilidade a erros, sinalização de variações discrepantes e maior clareza na interpretação de dados de piezômetros de corda vibrante, contribuindo para decisões mais ágeis e rastreáveis na gestão de risco e na operação e manutenção de estruturas geotécnicas. Ao explicitar regras de processamento, o método reduz ambiguidades inerentes ao processamento manual de leituras, produzindo saídas padronizadas e diretamente utilizáveis na rotina de monitoramento de equipes de engenharia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho se caracteriza por demonstrar as aplicações práticas de um programa desenvolvido pelo autor em linguagem Python no processamento e na interpretação de leituras de piezômetros em barragens de terra, reduzindo a suscetibilidade a

erros decorrentes de procedimentos manuais e facilitando a identificação de variações discrepantes e anomalias.

1.1.2 Objetivos específicos

- Contextualizar o monitoramento geotécnico de barragens de terra, destacando a influência da poropressão no comportamento dessas estruturas e os principais instrumentos utilizados para o acompanhamento de poropressões e níveis d'água;
- Demonstrar os detalhes e as capacidades de um programa desenvolvido na linguagem Python no tratamento e análise de leituras de piezômetros em barragens de terra, como: cadastro de instrumentos; importação padronizada de leituras; sinalização automática de variações discrepantes; cálculo de variações mensais por instrumento; e geração automatizada de painéis e gráficos interativos para análise de tendências;
- Discutir os ganhos de agilidade (tempo) proporcionados pela automatização do processamento e a redução da suscetibilidade a erros associados à manipulação manual de grandes volumes de dados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Breve histórico da geotecnia de barragens

A construção de barragens de terra está entre as aplicações mais antigas da engenharia civil. Durante muito tempo, essas estruturas foram projetadas principalmente com base na experiência acumulada e em regras empíricas. Ao recordar o início do século XX, Terzaghi (1961, p. 111) afirmou que “o projeto de obras de terra com base nessas regras exigia praticamente nenhum esforço mental, mas os resultados eram frequentemente decepcionantes”. Embora diversas barragens antigas tenham permanecido em operação por longos períodos, a ausência de critérios sistemáticos para caracterização dos solos, controle de percolação e avaliação da estabilidade também resultou em rupturas e problemas de desempenho.

A partir do final do século XIX e, principalmente, no início do século XX, o desenvolvimento da Mecânica dos Solos possibilitou uma abordagem mais científica para o projeto de barragens. Os estudos relacionados às tensões efetivas, à resistência ao cisalhamento, à consolidação e ao fluxo através de meios porosos permitiram compreender de maneira mais adequada o comportamento dos maciços de terra e de suas fundações. Nesse contexto, os trabalhos de Karl Terzaghi tiveram papel fundamental na consolidação da Mecânica dos Solos como disciplina da engenharia, fornecendo bases teóricas para a análise de estabilidade, deformações e percolação em estruturas geotécnicas (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Ao longo do século XX, o projeto de barragens de terra passou a incorporar de forma mais sistemática a investigação geológico-geotécnica, a realização de ensaios de campo e laboratório, o zoneamento dos materiais, a compactação controlada e a implantação de sistemas internos de drenagem e filtragem. Wilson (1969, p. 1) descreveu o projeto e a construção de barragens de terra e enrocamento como uma área já baseada em um “estado da arte”, refletindo a consolidação de métodos técnicos próprios. A compreensão dos mecanismos de erosão interna e de instabilidade associados às poropressões também levou ao desenvolvimento de critérios mais rigorosos para filtros e drenos. Nesse sentido, Sánchez-Martín et al. (2020, p. 2) destacam que filtros granulares devem “impedir a migração das partículas do solo-base e permitir a drenagem da água de percolação”.

Paralelamente ao avanço dos métodos de projeto e construção, consolidou-se o uso da instrumentação geotécnica para acompanhar o comportamento das barragens durante a construção, o primeiro enchimento e a operação. Conforme Santos (2019, p. 14), “a instrumentação de barragens é um dos recursos utilizados para avaliar a segurança da obra ao longo de sua vida útil”. Assim, instrumentos destinados à medição de deslocamentos, vazões, recalques e poropressões passaram a fornecer dados para verificar as hipóteses adotadas em projeto e identificar alterações no comportamento das estruturas. Entre esses instrumentos, os piezômetros adquiriram importância particular por permitirem avaliar as condições hidráulicas no maciço e na fundação.

Essa evolução consolidou a geotecnia de barragens como uma área fundamentada em princípios da Mecânica dos Solos, investigações de campo e laboratório, controle construtivo e acompanhamento do desempenho das estruturas. Como sintetizam Segalini, Carri e Savi (2017, p. 1), “as observações de campo e, em particular, as medições quantitativas [...] são o único antídoto” para as incertezas inerentes ao comportamento das estruturas geotécnicas. A Figura 1 apresenta uma vista geral da Barragem Casa de Pedra, permitindo visualizar a escala e a configuração de uma estrutura geotécnica desse tipo.

Figura 1 – Vista aérea da Barragem Casa de Pedra, Congonhas (MG).



Fonte: DAM Projetos de Engenharia (2017).

2.2 Monitoramento geotécnico

O monitoramento geotécnico tem como objetivo acompanhar, de forma sistemática, o comportamento de obras e estruturas geotécnicas — como estruturas de contenção, túneis, barragens e obras de estabilização de encostas — ao longo do tempo. Segundo Yang et al. (2024, p. 2), o monitoramento de segurança é “crucial para compreender o estado operacional e as tendências da barragem”. Assim, o monitoramento permite identificar tendências, mudanças de regime e indícios de anomalias que possam comprometer o desempenho e a segurança da estrutura.

A confiabilidade do monitoramento depende tanto da seleção e instalação adequada dos instrumentos quanto da qualidade dos procedimentos de aquisição, tratamento e interpretação dos dados. Além disso, Chen et al. (2024, p. 1) destacam que “dados de monitoramento precisos são um pré-requisito importante e uma garantia fundamental para o monitoramento eficaz da segurança de barragens”. Portanto, falhas em qualquer uma dessas etapas podem gerar leituras errôneas ou conclusões inadequadas sobre o comportamento da estrutura.

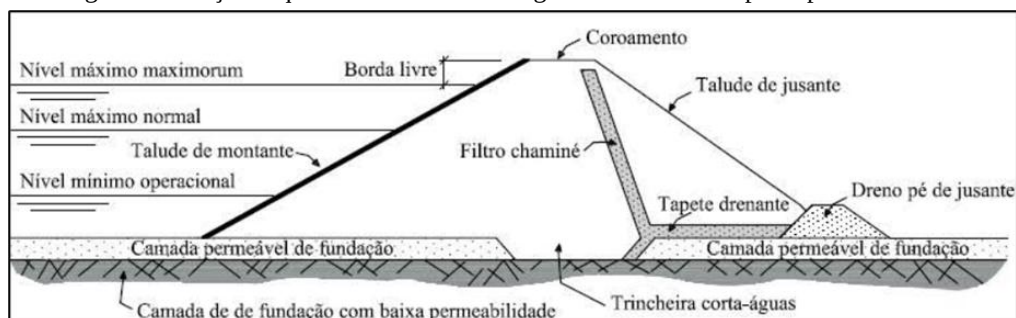
2.3 Monitoramento geotécnico de barragens de terra

Em barragens de terra, o monitoramento geotécnico tem a função de acompanhar a resposta do barramento durante diferentes fases da sua vida útil, como construção, operação (caracterizada pelo período em que há disposição de rejeitos no reservatório) e descaracterização. Segundo Yang et al. (2024, p. 2), o monitoramento constitui um meio de “verificar os resultados de projeto, inspecionar a qualidade da construção e compreender as variações dos parâmetros da barragem”.

As leituras dos instrumentos utilizados no monitoramento precisam ser interpretadas dentro do contexto da estrutura. A posição e a profundidade de instalação, o material no qual o instrumento foi instalado, a geometria da seção e as condições operacionais influenciam diretamente os valores medidos. Yang et al. (2024, p. 3) ressaltam que a análise de dados de monitoramento deve também considerar “dados meteorológicos como temperatura, precipitação e nível do reservatório”. Portanto, eventos de precipitações, variações dos níveis de água e rejeitos do reservatório, alteamentos ou modificações nos sistemas de drenagem interna podem produzir respostas distintas em instrumentos próximos. A Figura 2 apresenta

uma seção esquemática de uma barragem de terra e identifica alguns dos seus elementos que devem ser considerados no monitoramento.

Figura 2 – Seção esquemática de uma barragem de terra e seus principais elementos



Fonte: ANA (2012).

Embora o presente trabalho esteja concentrado em dados piezométricos, Freitas e Santos (2024, p. 9) concluíram que “o monitoramento geofísico mostrou-se importante e pode fornecer informações adicionais para estruturas geotécnicas”, mostrando que a interpretação do comportamento de uma barragem tende a ser mais robusta quando diferentes fontes de informação são avaliadas em conjunto.

2.4 Instrumentação geotécnica de barragens

A instrumentação geotécnica permite acompanhar o comportamento de uma estrutura ao longo do tempo por meio da medição de parâmetros relacionados ao seu desempenho e à sua segurança. Segalini, Carri e Savi (2017, p. 4) observam que “todos os instrumentos de monitoramento são projetados com o objetivo de medir, direta ou indiretamente, grandezas físicas”. Entre os instrumentos usualmente empregados estão os marcos superficiais e os prismas topográficos atrelados a estações totais robóticas, que são utilizados no acompanhamento de deslocamentos superficiais; os inclinômetros, voltados à avaliação de movimentações internas; as calhas *Parshall*, para medição de vazões do sistema de drenagem interna; e os instrumentos destinados ao acompanhamento de níveis d’água e poropressões, como os indicadores de nível d’água e os piezômetros.

A adoção de sistemas de instrumentação automatizados aumenta a frequência de aquisição dos dados disponíveis, permitindo acompanhar o comportamento da estrutura de

forma mais detalhada; por outro lado, também torna mais importante a adoção de procedimentos padronizados para organização, tratamento, validação e visualização dos dados.

2.5 Poropressão e sua influência no comportamento de barragens

A poropressão, também denominada pressão neutra, corresponde à pressão exercida pela água presente nos vazios do solo. Bressani et al. (2019, p. 1) destacam que essa grandeza está diretamente relacionada à tensão efetiva e, consequentemente, à resistência ao cisalhamento e à rigidez dos maciços.

Segundo o princípio das tensões efetivas, o aumento da poropressão reduz a parcela da tensão total efetivamente transmitida entre as partículas do solo. Como consequência, elevações acima das condições previstas podem reduzir a estabilidade da estrutura (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996). A distribuição das poropressões depende da geometria da barragem, das características de permeabilidade dos materiais, das condições da fundação, do nível de água e de rejeitos do reservatório e do funcionamento dos sistemas de drenagem interna. Drenos internos verticais e horizontais são frequentemente empregados para reduzir a elevação da linha freática na porção de jusante do barramento.

Variações de poropressão em uma barragem podem ocorrer devido a alterações do nível de água do reservatório, eventos de precipitação, etapas de alteamento, modificações construtivas ou mudanças nas condições de drenagem. Domingues, Faro e Mazzutti (2024) analisaram a relação entre precipitação e poropressão em um período prolongado, demonstrando como foi possível identificar variações associadas a eventos meteorológicos.

2.6 Instrumentos para medição de poropressão e nível d'água

A água presente no interior de uma barragem exerce pressão sobre o solo e também define uma superfície abaixo da qual os vazios do material estão preenchidos por água. Nos itens 2.6.1 a 2.6.3, serão apresentados três instrumentos comumente utilizados para o monitoramento da água no interior de barragens de terra: o piezômetro de tubo aberto (PZ), o indicador de nível d'água (INA) e o piezômetro elétrico de corda vibrante (PZE). Os piezômetros são utilizados para medir a pressão exercida pela água no solo em uma

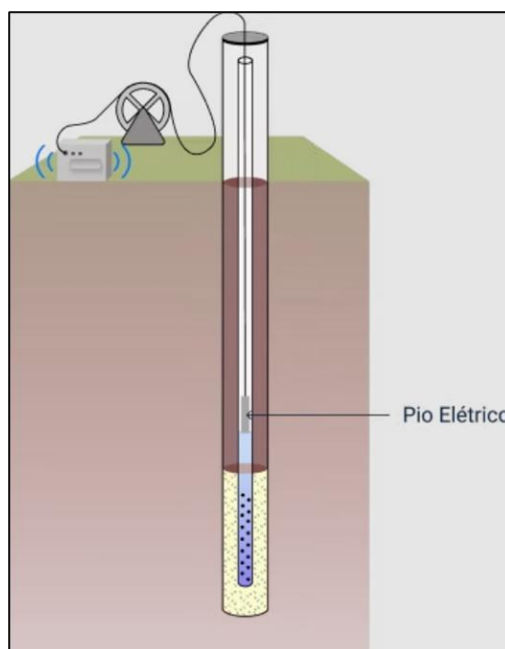
profundidade de interesse; O INA, por sua vez, é empregado para medir a coluna de água existente no local em que foi instalado.

2.6.1 Piezômetro de tubo aberto

O piezômetro de tubo aberto, também denominado piezômetro Casagrande ou *standpipe*, é formado por um tubo, geralmente de PVC, instalado no interior de um furo. Sua parte inferior é perfurada de forma a permitir a entrada de água apenas na profundidade que se deseja monitorar. Ao longo do tempo, a água do solo adjacente progressivamente infiltra no tubo, subindo até atingir uma coluna de água compatível com a pressão existente na profundidade de interesse.

A leitura é realizada manualmente pelo topo do instrumento, geralmente com um equipamento de medição popularmente conhecido como “pio elétrico”. Esse equipamento é composto por uma fita graduada com uma sonda em sua extremidade, que emite um sinal sonoro ao entrar em contato com a água, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Leitura do Piezômetro de Tubo Aberto com Pio Elétrico



Fonte: SENTNEL (2025).

Dessa forma, determina-se a distância entre o topo do tubo e o nível de água em seu interior. Conhecendo-se a cota de referência do topo do instrumento e a profundidade medida

até o nível de água, é possível calcular a cota piezométrica. A partir da diferença entre a cota do nível de água e a cota inferior do instrumento, pode-se determinar a coluna de água e calcular a pressão exercida por ela no ponto de interesse através na Equação 1.

$$u = h \times \gamma_w \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

u , poropressão em kPa;

h , a coluna d'água em metros;

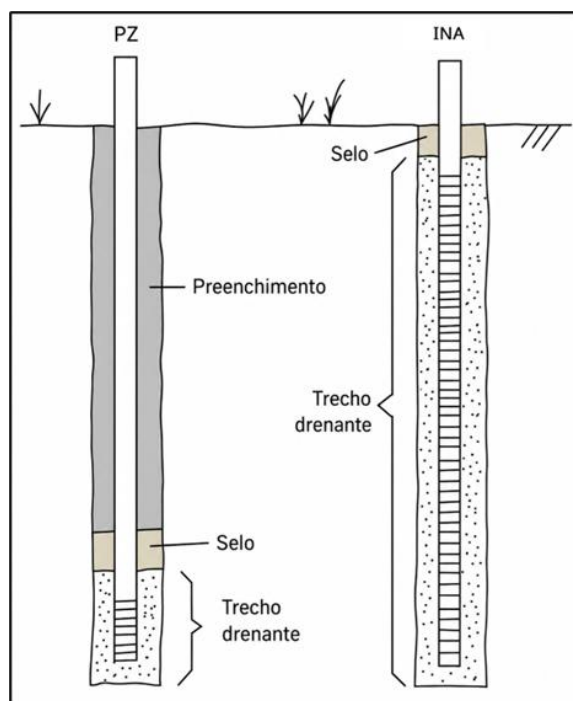
γ_w , o peso específico da água em kN/m³.

2.6.2 Indicador de nível d'água

O INA também é constituído, geralmente, por um tubo de PVC perfurado. Apesar de possuir configuração semelhante à do PZ, diferencia-se principalmente pela extensão do trecho perfurado. No PZ, a entrada de água ocorre em uma zona curta e localizada; portanto, a coluna de água medida deve ser utilizada para calcular a pressão existente na profundidade específica em que o tubo foi perfurado. No INA, o trecho drenante costuma abranger uma extensão maior, permitindo a entrada de água ao longo de diferentes profundidades. Assim, a coluna de água que se estabelece no interior do tubo não deve ser utilizada para calcular a pressão em uma profundidade específica, mas sim para indicar a cota do nível de água no local de instalação.

A leitura dos dois instrumentos é semelhante, sendo geralmente realizada de forma manual também através do pio elétrico. A Figura 4 apresenta uma comparação esquemática entre o perfil construtivo de um PZ e o de um INA.

Figura 4 – Comparação esquemática entre o perfil construtivo de um piezômetro (PZ) e um indicador de nível d'água (INA).



Fonte: Talamini Neto (2023).

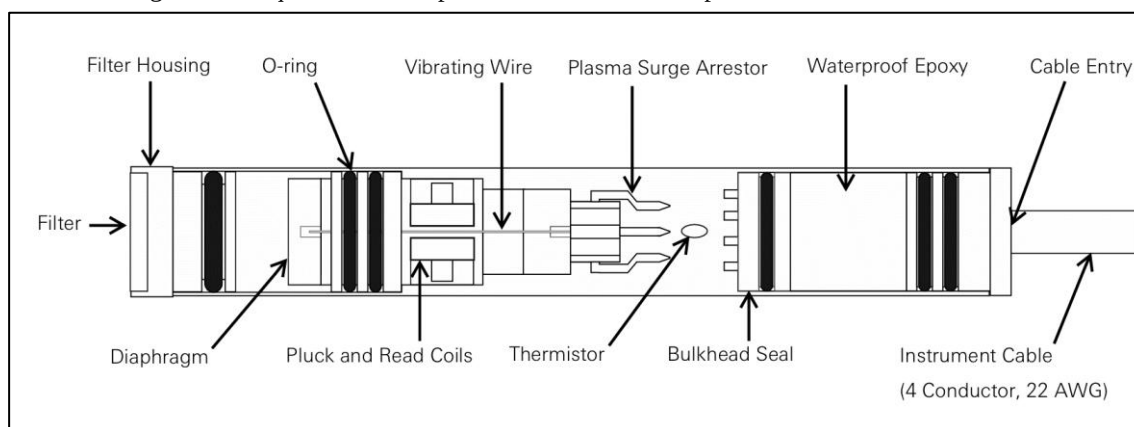
2.6.3 Piezômetros de corda vibrante

Piezômetros de corda vibrante são amplamente empregados em obras geotécnicas, especialmente em situações que exigem acompanhamento contínuo e prolongado das poropressões. Entre suas principais vantagens estão a rápida resposta do sensor e a possibilidade de integração a sistemas automatizados de aquisição de dados. Segalini, Carri e Savi (2017, p. 5) afirmam que os PZEs apresentam “resposta mais rápida e permitem leitura automatizada”, enquanto Savioli et al. (1999, p. 1) destacam a adequação dos sensores de corda vibrante a aplicações “onde se espera monitoramento de longo prazo”.

Seu princípio de funcionamento se baseia na variação de frequência natural de um fio tensionado (corda vibrante) associada à deformação provocada por pressão no elemento sensor. Conforme a Geokon (2026, p. 1), “durante o uso, as variações de pressão sobre o diafragma provocam sua deflexão. Essa deflexão é medida como uma alteração na tensão e na frequência de vibração do elemento de corda vibrante”. A frequência medida é convertida, por meio do fator de calibração, em pressão e pode ser posteriormente convertida em carga piezométrica — que nada mais é que a altura da coluna de água acima do instrumento que resultaria na pressão registrada em seu ponto de instalação, dada em metros de coluna d’água —, permitindo comparação direta com cotas e níveis de atenção, alerta e emergência. A Figura 5 apresenta um

esquema dos componentes internos de um piezômetro de corda vibrante.

Figura 5 – Esquema dos componentes internos de um piezômetro de corda vibrante.



Fonte: Geokon (2026).

A qualidade da medição desses instrumentos pode ser influenciada pelo seu método de instalação. Martens (2025) discute a acurácia de medições de poropressão com piezômetros de corda vibrante sob diferentes métodos de preenchimento/selagem do furo (por exemplo, totalmente grauteado vs. selagem com chips de bentonita), reforçando que parte do “comportamento do dado” pode ter influência na engenharia de instalação, e não apenas no estado hidráulico do maciço.

2.7 Síntese da literatura

A literatura consultada aponta um cenário coerente: as poropressões são variáveis críticas no monitoramento de barragens, e sua interpretação se beneficia da análise de séries históricas e da integração com variáveis externas. As leituras piezométricas não devem ser avaliadas isoladamente, pois fazem parte do comportamento geotécnico global da estrutura e podem estar relacionadas às condições de drenagem, às variações do nível do reservatório, aos eventos de precipitação e às intervenções realizadas na barragem.

Independentemente da técnica utilizada, a confiabilidade das análises depende da consistência dos dados e da adoção de procedimentos padronizados para sua organização, processamento e apresentação. Nesse sentido, o presente trabalho enfatiza a demonstração de uma ferramenta de processamento e visualização de leituras, com regras explícitas de entrada e

saída, estabelecendo uma base para análises mensais e para possíveis extensões futuras.

Em síntese, a literatura indica a relevância de métodos automatizados para apoiar a interpretação de séries piezométricas e a triagem de comportamentos discrepantes. Neste trabalho, entretanto, a contribuição se concentra no nível de dados e processo — padronização, consistência, rastreabilidade e saídas de análise —, estabelecendo uma base robusta para análises recorrentes e para eventuais evoluções futuras, incluindo métodos estatísticos mais avançados ou modelos de ML.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, com abordagem predominantemente quantitativa, voltada à aplicação de uma ferramenta computacional para o tratamento e a análise de dados piezométricos fornecidos pelo CMG de uma mineradora. A metodologia foi organizada em etapas que compreenderam a caracterização dos dados de entrada, o cadastro dos instrumentos, a importação e a padronização das leituras, o processamento dos dados e a geração das saídas de análise.

A ferramenta foi desenvolvida pelo autor em linguagem Python, com interface gráfica construída por meio da biblioteca PyQt5. Para o tratamento dos dados, foram utilizadas as bibliotecas pandas e NumPy; para a leitura das planilhas em formato Excel, a biblioteca openpyxl; para o tratamento de datas, a biblioteca python-dateutil; e, para a geração dos gráficos, a biblioteca Matplotlib. Os dados operacionais, incluindo o cadastro de instrumentos e as leituras importadas, foram armazenados em um único arquivo no formato JavaScript Object Notation (JSON).

A linguagem Python foi escolhida por apresentar sintaxe simples, ampla difusão e disponibilidade de bibliotecas voltadas à leitura de arquivos Excel, ao tratamento de dados e à geração de gráficos. Além disso, a linguagem permite o desenvolvimento de interfaces gráficas de forma relativamente direta. Essas características tornaram o Python mais adequado que outras linguagens para atender aos objetivos do trabalho.

Para o desenvolvimento deste trabalho, também foi utilizada a ferramenta de inteligência artificial generativa ChatGPT, como apoio à redação, à revisão textual e ao desenvolvimento do programa apresentado. Todas as sugestões geradas foram analisadas e adaptadas pelo autor.

3.1 Dados de entrada

Os dados de entrada utilizados neste trabalho correspondem às leituras de piezômetros fornecidas pelo CMG de uma mineradora. As informações foram disponibilizadas em planilhas no formato Excel, com periodicidade mensal. No caso específico dessa mineradora, a maior parte dos piezômetros de corda vibrante possui leitura automatizada em intervalos de 4 horas.

Dessa forma, as planilhas apresentam, em média, 6 registros diários por instrumento.

As planilhas enviadas pela mineradora contêm diversas colunas, cada uma contendo um parâmetro de leitura diferente. O programa foco desse trabalho, contudo, utiliza apenas três parâmetros: “Instrumento” (contém os nomes dos piezômetros lidos); “Resultado (m)” (Elevações Piezométricas calculadas); e “Data” (contém as datas das leituras). A Figura 6 apresenta um exemplo da estrutura das planilhas fornecidas pelo CMG, com destaque para as colunas utilizadas como dados de entrada pelo programa.

Figura 6 – Exemplo de planilha de leituras piezométricas fornecida pelo CMG

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Instrumento	Data da Leitura	Hora	Leitura	Temperatura (°C)	Pressão	Resultado (m)	Seco	Automatizada
1	Piezômetro 1	01/04/2025	00:00	8875,39	25,47	-4,20	733,19	TRUE	TRUE
2	Piezômetro 1	01/04/2025	08:00	8875,55	25,40	-4,22	733,19	TRUE	TRUE
3	Piezômetro 1	01/04/2025	12:00	8875,41	25,45	-4,20	733,19	TRUE	TRUE
4	Piezômetro 1	01/04/2025	16:00	8875,57	25,13	-4,20	733,19	TRUE	TRUE
5	Piezômetro 1	01/04/2025	20:00	8875,87	14,97	-3,41	733,27	TRUE	TRUE
6	Piezômetro 1	02/04/2025	00:00	8875,71	12,94	-3,22	733,29	TRUE	TRUE
7	Piezômetro 1	02/04/2025	04:00	8875,55	26,02	-4,27	733,18	TRUE	TRUE
8	Piezômetro 1	02/04/2025	08:00	8875,59	24,85	-4,18	733,19	TRUE	TRUE
9	Piezômetro 1	02/04/2025	12:00	8875,68	25,23	-4,22	733,19	TRUE	TRUE
10	Piezômetro 1	02/04/2025	16:00	8875,55	25,11	-4,19	733,19	TRUE	TRUE
11	Piezômetro 1	02/04/2025	20:00	8875,87	25,96	-4,30	733,18	TRUE	TRUE
12	Piezômetro 1	03/04/2025	00:00	8875,43	25,94	-4,25	733,19	TRUE	TRUE
13	Piezômetro 1	03/04/2025	04:00	8875,57	25,92	-4,26	733,18	TRUE	TRUE
14	Piezômetro 1	03/04/2025	08:00	8875,75	5,56	-2,63	733,35	TRUE	TRUE
15	Piezômetro 1	03/04/2025	16:00	8875,75	23,25	-4,07	733,20	TRUE	TRUE
16	Piezômetro 1	03/04/2025	20:00	8875,60	25,89	-4,26	733,18	TRUE	TRUE
17	Piezômetro 1	04/04/2025	00:00	8875,87	25,88	-4,30	733,18	TRUE	TRUE
18	Piezômetro 1	04/04/2025	04:00	8875,69	25,83	-4,27	733,18	TRUE	TRUE
19	Piezômetro 1	04/04/2025	08:00	8875,68	20,60	-3,84	733,23	TRUE	TRUE
20	Piezômetro 1	04/04/2025	12:00	8875,41	25,82	-4,23	733,19	TRUE	TRUE
21	Piezômetro 1	04/04/2025	16:00	8875,46	25,79	-4,24	733,19	TRUE	TRUE
22	Piezômetro 1	04/04/2025	20:00	8876,01	25,98	-4,32	733,18	TRUE	TRUE
23	Piezômetro 1	05/04/2025	00:00	8875,52	25,98	-4,26	733,18	TRUE	TRUE
24	Piezômetro 1	05/04/2025	08:00	8875,64	25,83	-4,26	733,18	TRUE	TRUE
25	Piezômetro 1	05/04/2025	12:00	8875,94	21,41	-3,94	733,22	TRUE	TRUE
26	Piezômetro 1	05/04/2025	20:00	8875,66	25,84	-4,27	733,18	TRUE	TRUE

Fonte: próprio.

3.2 Cadastro dos instrumentos e importação das leituras

Antes do processamento das leituras, os instrumentos foram cadastrados e associados às respectivas estruturas monitoradas. Para cada piezômetro, foram registrados os seguintes metadados: nome ou código do instrumento; material ou região de instalação; estaca ou seção de referência; cota de instalação do sensor; e data de instalação. Esses dados foram utilizados para atribuir cada leitura da planilha ao instrumento correspondente, organizar os piezômetros em grupos geotecnicaamente coerentes e verificar inconsistências durante a importação das planilhas. O material ou a região de instalação foi utilizado para agrupar instrumentos localizados em porções semelhantes da estrutura, como fundação, aterro compactado, aterro argiloso, filtro vertical, tapete drenante ou rejeitos. A estaca ou seção, por sua vez, foi utilizada

para ordenar os instrumentos dentro de cada grupo.

Para cada mês analisado, foi criada uma nova análise no programa identificada pelo mês e ano em que as leituras foram realizadas, por exemplo “May 2025”. Posteriormente, as planilhas com as leituras foram importadas e um mapeamento automático de colunas foi realizado para encontrar as colunas de “Instrumento”, “Data” e “Resultado (m)” (etapa necessária, visto que a ordem das colunas pode variar de mês para mês ou de estrutura para estrutura), com subsequente pedido de confirmação para o usuário.

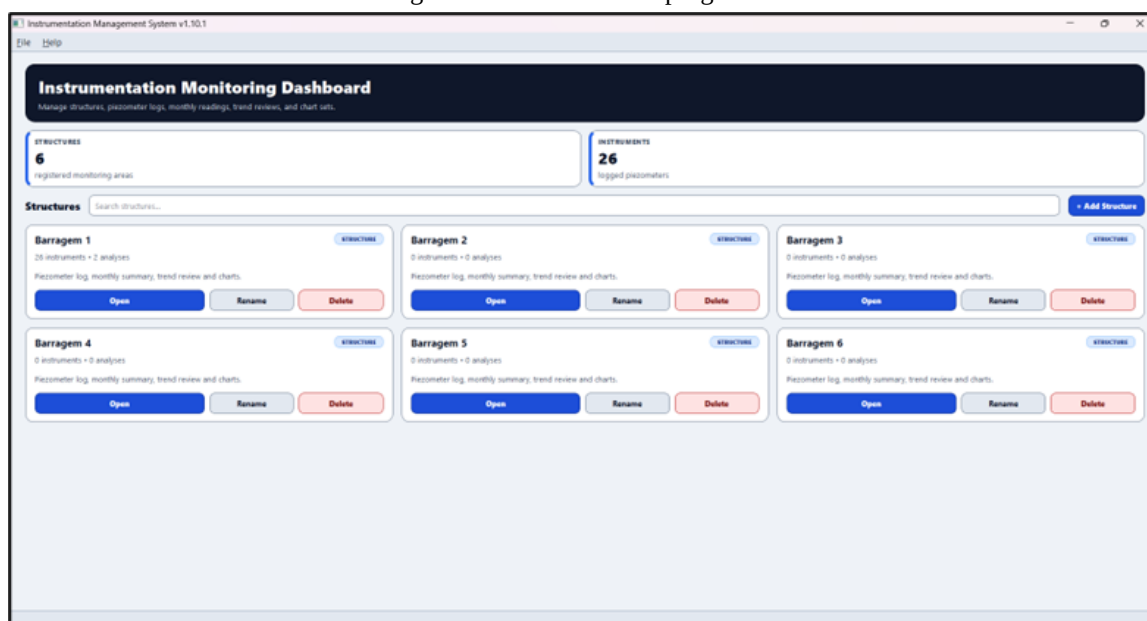
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Visão geral do programa desenvolvido

Como resultado do desenvolvimento proposto, foi obtido um sistema computacional com interface gráfica voltado ao gerenciamento, tratamento e análise de leituras piezométricas. A interface foi organizada em módulos funcionais, permitindo separar as abas de cadastro dos instrumentos, de importação das leituras mensais, de geração das tabelas resumo, de geração das tabelas de revisão de tendências e de visualização gráfica das séries históricas.

A Figura 7 apresenta a tela inicial do sistema, denominada *Instrumentation Monitoring Dashboard*. Na parte superior da interface, são exibidos dois indicadores gerais: o número de estruturas cadastradas e a quantidade total de instrumentos registrados no sistema. Abaixo desses indicadores, encontra-se um campo de pesquisa que permite localizar uma estrutura específica pelo nome, além do botão destinado à criação de novas estruturas. Cada estrutura é apresentada em um cartão individual, no qual são exibidos seu nome, a quantidade de piezômetros cadastrados e o número de análises já geradas. Por meio dos botões nos cartões, o usuário pode abrir a estrutura, alterar seu nome ou excluí-la do sistema.

Figura 7 – Tela inicial do programa

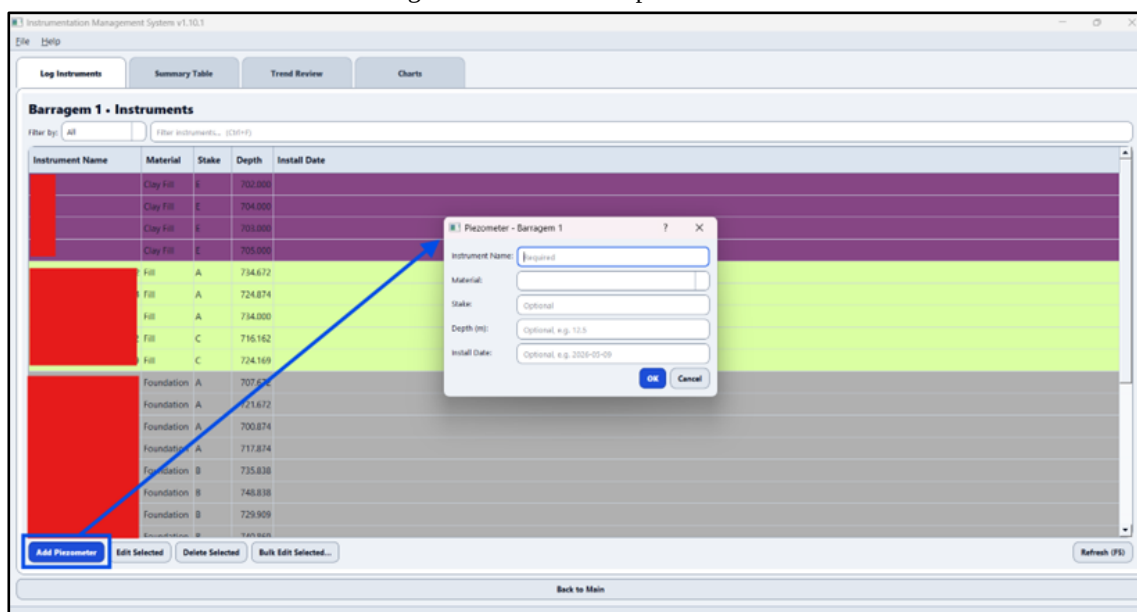


Fonte: próprio.

4.2 Cadastro e gerenciamento dos instrumentos

O primeiro módulo desenvolvido foi o de cadastro dos instrumentos. Essa etapa foi fundamental, pois forneceu a base de dados utilizada pelas rotinas posteriores do programa. Após a criação das estruturas na tela inicial, cada piezômetro pôde ser associado a uma estrutura e cadastrado com informações específicas, incluindo o nome do instrumento, o material ou a região de instalação, a estaca ou seção, a profundidade e a data de instalação. Conforme apresentado na Figura 8 (devido a questões de confidencialidade, os nomes dos instrumentos foram censurados), esses dados são inseridos por meio de uma janela própria de cadastro, acessada pelo botão *Add Piezometer*. As informações registradas foram utilizadas nas verificações automáticas e cálculos realizados durante a importação das leituras e a geração das tabelas de análise.

Figura 8 – Cadastro de piezômetros



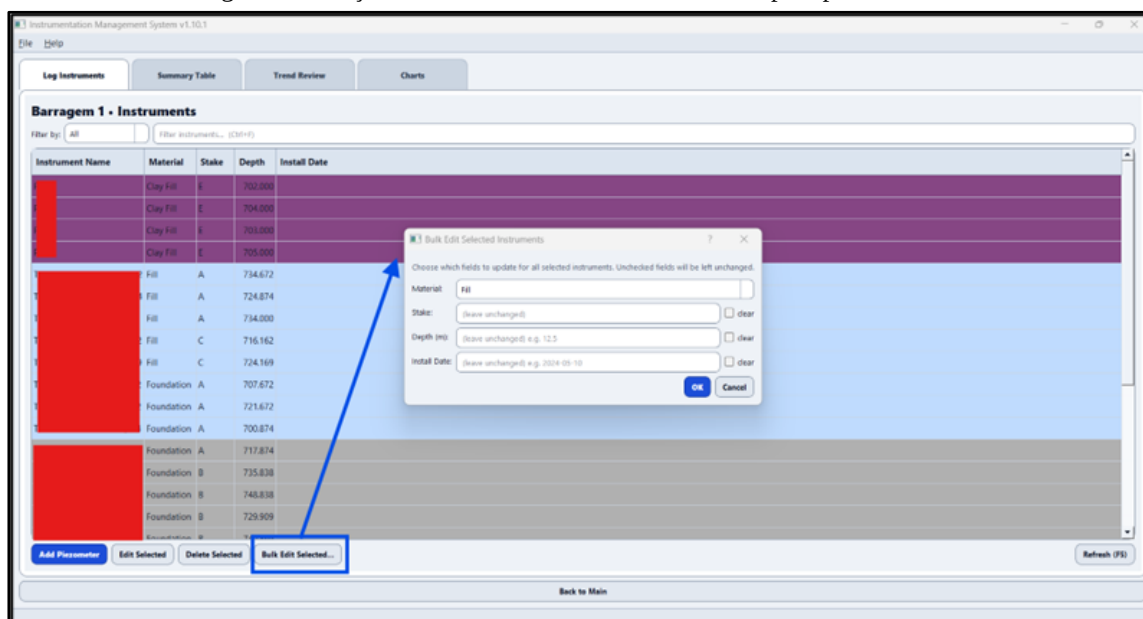
Fonte: próprio.

A organização dos instrumentos por material e por estaca foi essencial para possibilitar a interpretação dos resultados em grupos geotecnicamente coerentes, uma vez que piezômetros instalados em uma mesma região tendem a apresentar comportamentos mais comparáveis entre si do que instrumentos localizados em materiais ou seções distintas.

O módulo desenvolvido também permite a edição simultânea de múltiplos instrumentos. Essa funcionalidade reduziu o tempo necessário para o preenchimento de metadados

repetitivos, principalmente nos casos em que vários piezômetros pertencem ao mesmo material ou à mesma região de instalação, ou apresentam informações comuns de cadastro. Conforme apresentado na Figura 9, o usuário pode selecionar vários instrumentos e, ao selecionar o botão *Bulk Edit Selected*, alterar campos como material, estaca, profundidade e data de instalação para todos os instrumentos que foram selecionados.

Figura 9 – Edição simultânea dos metadados de múltiplos piezômetros



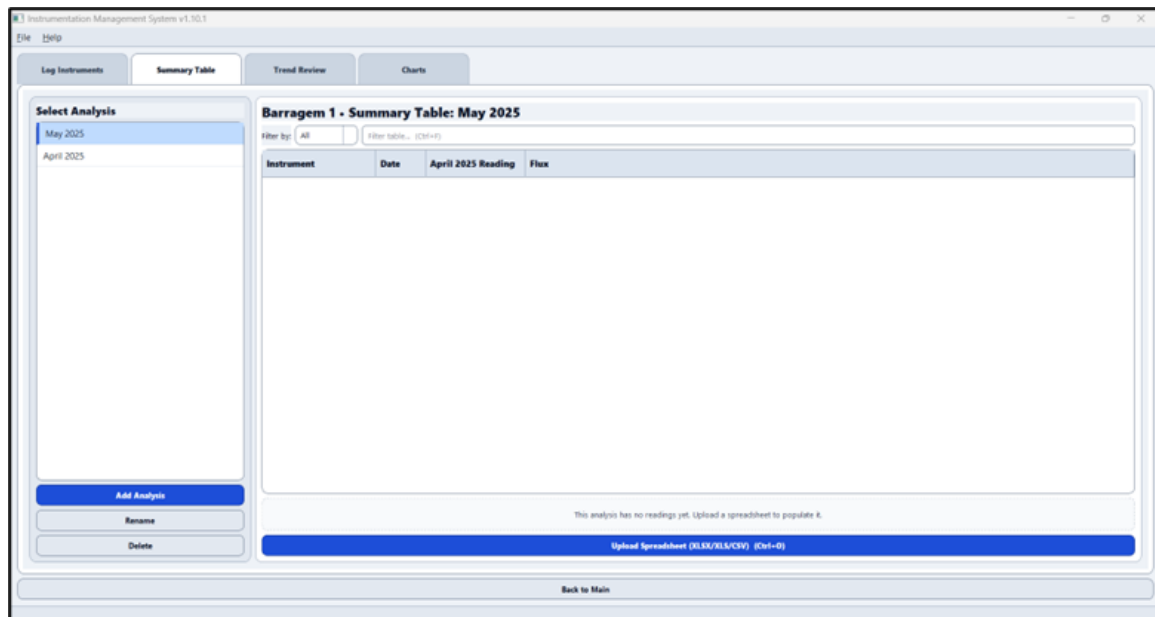
Fonte: próprio.

Por fim, a interface também utilizou cores diferentes para cada material cadastrado. Esse recurso teve função prática na interpretação visual, pois permitiu identificar rapidamente em quais materiais cada instrumento estava instalado.

4.3 Importação e padronização das leituras mensais

Após o cadastro dos instrumentos, foi desenvolvido o módulo de importação das leituras mensais, localizado na aba *Summary Table*. Inicialmente, uma nova análise mensal é criada por meio do botão *Add Analysis*, localizado no canto inferior esquerdo da tela. A análise é identificada pelo mês e pelo ano de referência e passa a ser exibida na lista lateral, conforme apresentado na Figura 10. Nessa mesma área, também é possível renomear ou excluir análises já cadastradas pelos botões *Rename* e *Delete*.

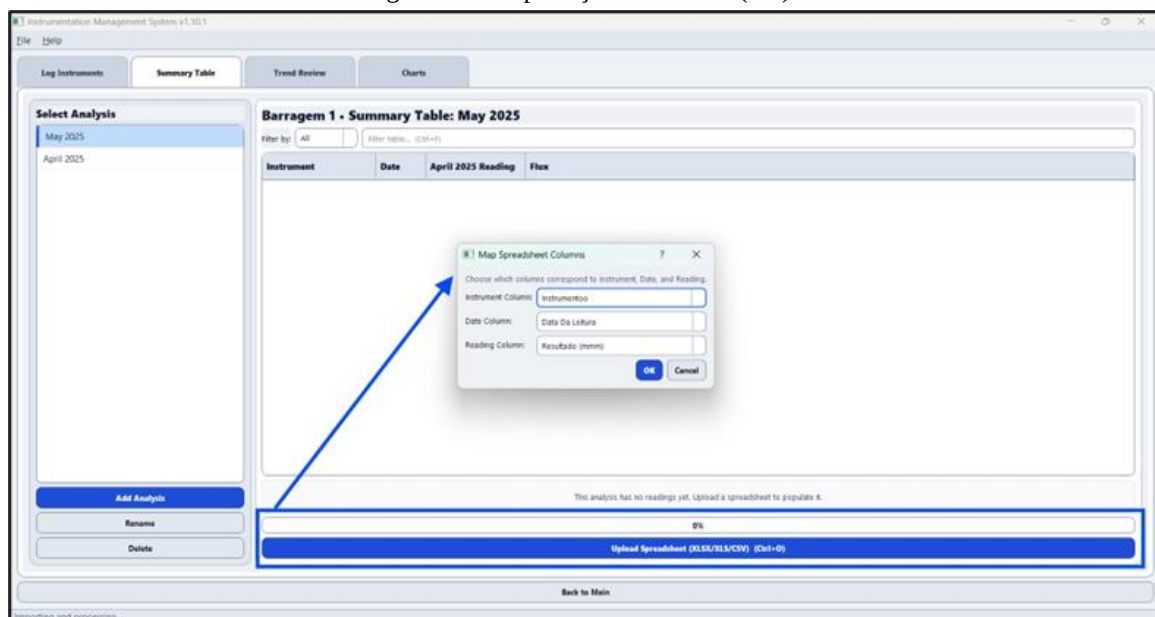
Figura 10 – Importação de leituras (1/2)



Fonte: próprio.

Após a seleção da análise correspondente, a planilha com as leituras do período foi carregada por meio do botão *Upload Spreadsheet (XLSX/XLS/CSV)*, localizado na parte inferior da interface. Após a seleção do arquivo, foi aberta a janela de mapeamento das colunas, apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Importação de leituras (2/2)



Fonte: próprio.

Nessa etapa, o programa mapeou automaticamente as colunas da planilha que continham os nomes dos instrumentos, as datas das leituras e as elevações piezométricas, solicitando a confirmação ou a edição do usuário. Ao pressionar o botão *OK*, a importação das leituras foi realizada, com padronização dos formatos de data e valores numéricos para permitir que as análises mensais fossem comparadas entre si de maneira consistente e sem erros.

4.4 Summary Table

A aba Tabela Resumo (*Summary Table*) foi desenvolvida como a principal saída mensal do programa. Para cada análise selecionada, o sistema processou as leituras importadas e apresentou, em uma única tabela, os resultados correspondentes a cada instrumento. Foram exibidos o nome do piezômetro, a data da última leitura válida do mês, a elevação piezométrica informada e a variação em relação ao mês anterior. A Figura 12 apresenta a visão geral da aba *Summary Table* e as informações exibidas para cada instrumento.

Figura 12 – Visão geral da Summary Table

Barragem 1 - Summary Table: May 2025

Instrument	Date	May 2025 Reading	Flux	April 2025
[Redacted]	2025-05-31	734.87	0.06	734.82
	2025-05-31	Dry	---	Dry
	2025-05-30	Dry	---	---
[Redacted]	2025-05-31	Dry	---	Dry
	2025-05-30	Dry	---	Dry
[Redacted]	2025-05-31	719.50	0.01	719.49
	2025-05-31	721.74	0.05	721.68
	2025-05-31	714.12	0.04	714.09
[Redacted]	2025-05-31	Dry	---	Dry
	2025-05-30	752.66	-0.07	752.74
[Redacted]	2025-05-30	761.73	-0.11	761.84
	2025-05-31	736.80	-0.34	737.14
[Redacted]	2025-05-30	750.52	0.12	750.40
	2025-05-23	706.27	-0.05	706.33
[Redacted]	2025-05-31	Dry	---	Dry

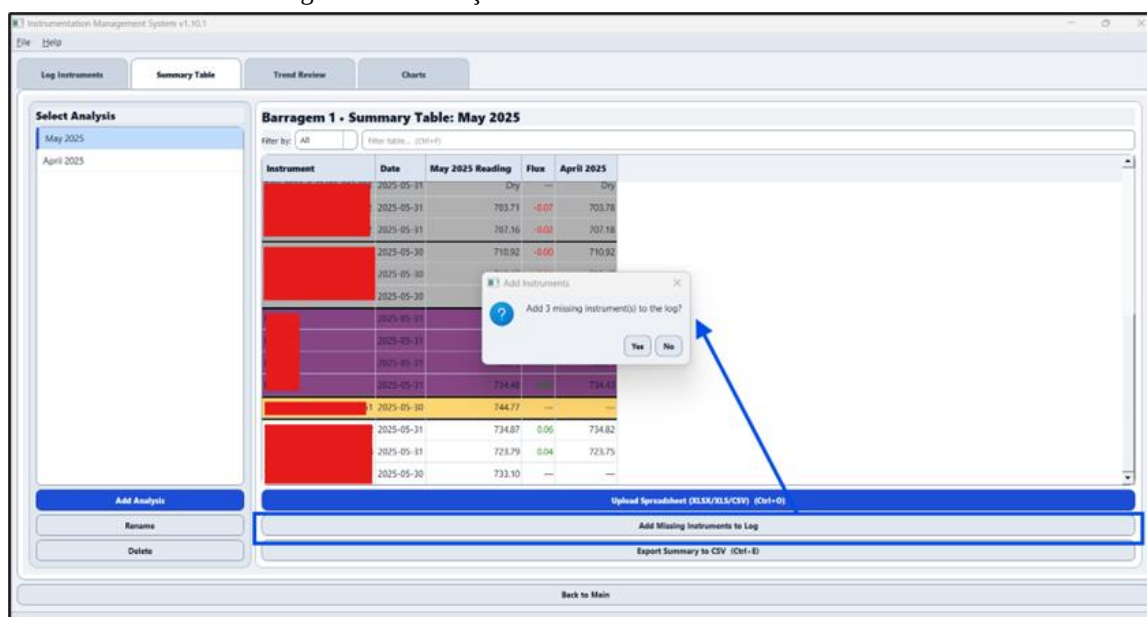
Fonte: próprio.

A escolha de utilizar apenas a última leitura de cada mês teve como objetivo facilitar a comparação entre os períodos. A maior parte dos piezômetros era automatizada e realizava até seis leituras por dia. Caso todos esses registros fossem apresentados na *Summary Table*, a tabela

ficaria excessivamente extensa e dificultaria a visualização dos resultados. Por esse motivo, foi selecionado um único valor mensal por instrumento. As demais leituras do mês não foram, contudo, descartadas. Apesar de não terem sido utilizadas na aba *Summary Table*, todas as leituras permaneceram visíveis na aba de visualização gráfica — como será mostrado no item 4.6 —, na qual foi possível analisar o comportamento dos instrumentos por completo ao longo do tempo.

Após a importação de cada planilha mensal, o programa realizou uma comparação dos nomes dos instrumentos existentes nas planilhas com os nomes dos instrumentos já cadastrados. Portanto, quando foram identificados instrumentos presentes na planilha importada, mas ainda inexistentes no cadastro (o que pode acontecer quando novos instrumentos são instalados nas estruturas), o sistema sinalizou ao usuário e disponibilizou a opção de adicioná-los automaticamente à aba de cadastro dos instrumentos, conforme apresentado na Figura 13, na qual 3 instrumentos novos foram identificados na planilha de leituras.

Figura 13 – Detecção automática de novos instrumentos



Fonte: próprio.

Nesses casos, os instrumentos foram incluídos inicialmente apenas com o nome, permanecendo os demais metadados — como material, estaca, profundidade e data de instalação — para preenchimento posterior pelo usuário. Essa rotina reduziu o risco de que instrumentos novos fossem ignorados durante a análise mensal e tornou o cadastro mais fácil de manter atualizado. Outro aspecto relevante da tabela foi a classificação automática da

condição hidráulica do instrumento. O status seco foi calculado a partir da comparação entre a elevação piezométrica informada na planilha e a cota/profundidade de instalação informada no cadastro do instrumento pelo usuário. Quando a diferença entre a leitura piezométrica e a cota de instalação resultou em valor negativo, o instrumento foi classificado como *Dry*. Esse cálculo depende diretamente do cadastro da profundidade / cota de instalação pelo usuário.

A variação mensal foi calculada como a diferença entre a leitura do mês corrente e a leitura do mês imediatamente anterior, considerando sempre a última leitura válida de cada mês para o mesmo instrumento. Assim, valores positivos indicaram aumento da pressão de água no instrumento em relação ao mês anterior, enquanto valores negativos indicaram redução. O programa, entretanto, não calculou variação quando o instrumento estava seco no mês corrente ou quando a leitura do mês anterior também havia sido classificada como seca. A variação somente foi calculada quando tanto a leitura atual quanto a leitura anterior representavam condições saturadas e numericamente comparáveis.

A *Summary Table* também apresentou as leituras históricas dos meses anteriores em colunas adicionais. Esse recurso permitiu comparar rapidamente a leitura do mês atual com os valores já registrados, configurando a tabela também como uma ferramenta de revisão histórica.

Para melhorar a interpretação visual, os instrumentos foram ordenados por material/região de instalação e, dentro de cada material, por estaca. Essa organização foi mais adequada do que uma ordenação puramente alfabética, pois agrupou instrumentos com maior relação geotécnica entre si.

Por fim, a *Summary Table* pôde ser exportada em formato CSV, permitindo que os resultados consolidados fossem utilizados em relatórios, verificações externas ou análises complementares. Dessa forma, a tabela resumo representou uma saída intermediária entre os dados brutos importados e a interpretação técnica final, reunindo em um único ambiente a leitura mensal, a condição hidráulica, a variação, o histórico e as inconsistências de cadastro.

4.5 Trend Review

A aba Revisão de Tendências (*Trend Review*) foi desenvolvida para apresentar os resultados mensais de forma mais voltada à interpretação do comportamento conjunto dos

instrumentos. Enquanto a *Summary Table* exibiu uma linha para cada piezômetro, mantendo a organização por material e estaca, a Trend Review reorganizou esses mesmos resultados em grupos definidos pelo material de instalação e pela condição hidráulica de cada instrumento.

Inicialmente, os piezômetros foram separados de acordo com o material cadastrado, como fundação, aterro argiloso ou rejeitos. Dentro de cada material, os instrumentos foram novamente divididos entre aqueles classificados como saturados (*Wet*) e aqueles classificados como secos (*Dry*). Dessa forma, foram formados grupos como *Wet Foundation*, *Dry Foundation*, *Wet Clay Fill* e *Wet Tailings* conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Visão geral da Trend Review

Quantity	Status / Material	Instrument	Material	Stake	Depth	April 2025	Current Month Reading	Flux	Comments
12	Wet / Foundation		Foundation C		690.162	703.78	703.71	-0.07	
			Foundation C		695.293	706.33	706.27	-0.05	
			Foundation C		705.162	707.18	707.16	-0.02	
			Foundation D		701.314	710.47	710.47	-0.01	
			Foundation D		706.760	710.92	710.92	-0.00	
			Foundation A		707.672	719.49	719.50	0.01	
			Foundation A		700.874	714.09	714.12	0.04	
			Foundation A		721.672	721.68	721.74	0.05	
3	Dry / Foundation		Foundation B		740.869	750.40	750.52	0.12	
			Foundation A		717.874	717.81	717.86	—	
			Foundation C		712.293	711.78	711.82	—	
4	Wet / Clay Fill		Foundation D		713.594	712.50	712.34	—	
			Clay Fill E		702.000	733.18	733.18	0.00	
			Clay Fill E		703.000	732.74	732.76	0.03	
			Clay Fill E		704.000	732.83	732.88	0.04	
1	Wet / Tailings		Clay Fill E		705.000	734.43	734.48	0.05	
			Tailings A		742.151	—	744.77	—	

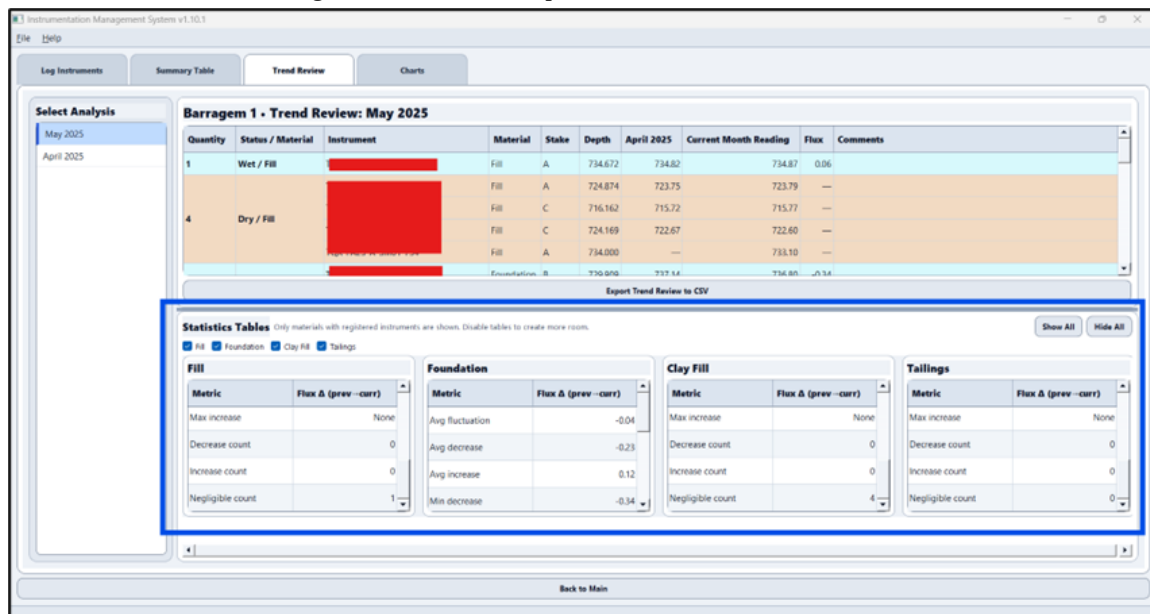
Fonte: próprio.

A primeira coluna da tabela indicou a quantidade de instrumentos pertencentes a cada grupo. Em seguida, foram apresentados o nome do instrumento, o material, a estaca, a cota ou profundidade de instalação, a leitura do mês anterior, a leitura do mês analisado e a variação calculada entre os dois períodos. Também foi incluída uma coluna destinada ao registro de comentários durante a análise do usuário. Dentro de cada grupo, os instrumentos foram ordenados de acordo com a variação mensal, do maior decréscimo para o maior acréscimo. Essa organização permitiu identificar com agilidade quais instrumentos apresentaram as variações mais significativas dentro de cada material.

A principal diferença em relação à *Summary Table*, portanto, não esteve nos dados utilizados, mas na forma de apresentação. A *Summary Table* forneceu um resumo individual e histórico de cada instrumento, enquanto a *Trend Review* agrupou os resultados segundo características geotécnicas comuns, permitindo avaliar se aumentos, reduções ou condições secas estavam concentrados em determinada região ou material da estrutura.

Além da tabela principal, a *Trend Review* gerou estatísticas por material, conforme apresentado na Figura 15, na qual é possível observar estatísticas para os piezômetros instalados no aterro compactado, na fundação, no núcleo argiloso e nos rejeitos. As tabelas apresentaram indicadores como flutuação média, acréscimos médios, decréscimos médios, maior acréscimo, maior decréscimo e contagem de variações consideradas não desprezíveis — utilizando o limiar de $\pm 0,10$ m, de modo que pequenas oscilações dentro desse intervalo fossem classificadas como pouco significativas. Esses indicadores tiveram a função de resumir o comportamento mensal dos instrumentos por material, permitindo identificar rapidamente grupos com maior tendência de acréscimo, decréscimo ou estabilidade nas leituras piezométricas.

Figura 15 – Estatísticas por material da Trend Review

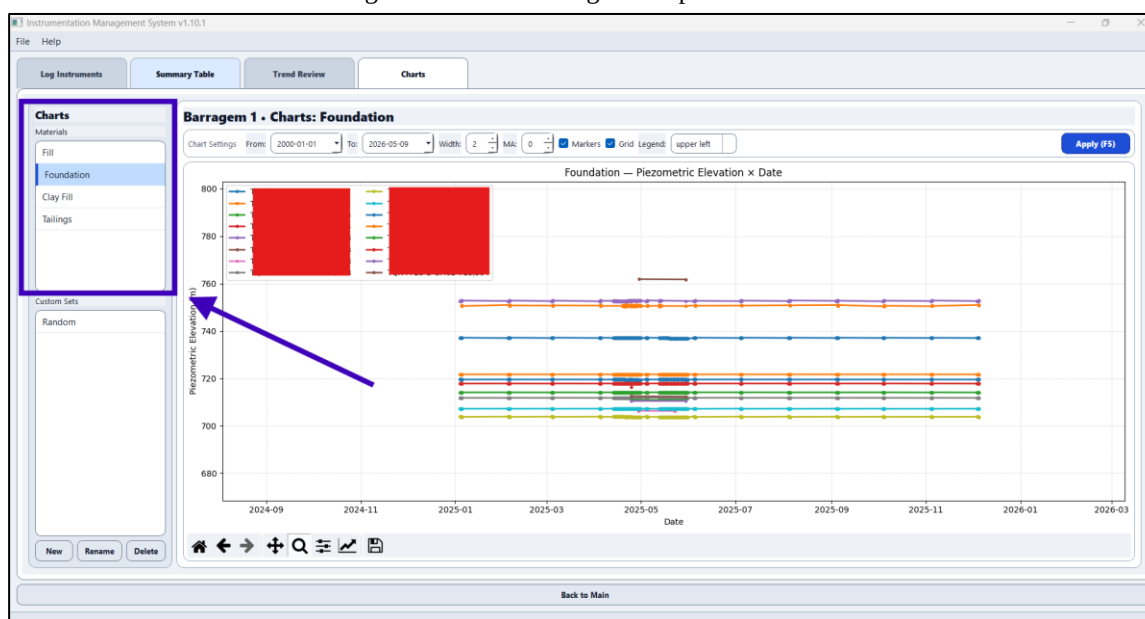


Fonte: próprio.

4.6 Gráficos de séries temporais

A aba Gráficos (*Charts*) foi desenvolvida para permitir a visualização gráfica das séries temporais dos piezômetros. Essa etapa foi necessária porque a interpretação de leituras não depende apenas dos últimos valores mensais isolados, mas também da forma como os valores variaram ao longo do tempo. O programa gerou gráficos automaticamente por material, agrupando em uma mesma figura os instrumentos associados à mesma região da estrutura, conforme apresentado na Figura 16. Essa visualização facilitou a comparação entre piezômetros próximos ou instalados em materiais semelhantes, permitindo observar se determinado comportamento era individual ou se ocorria de maneira mais ampla em um grupo de instrumentos.

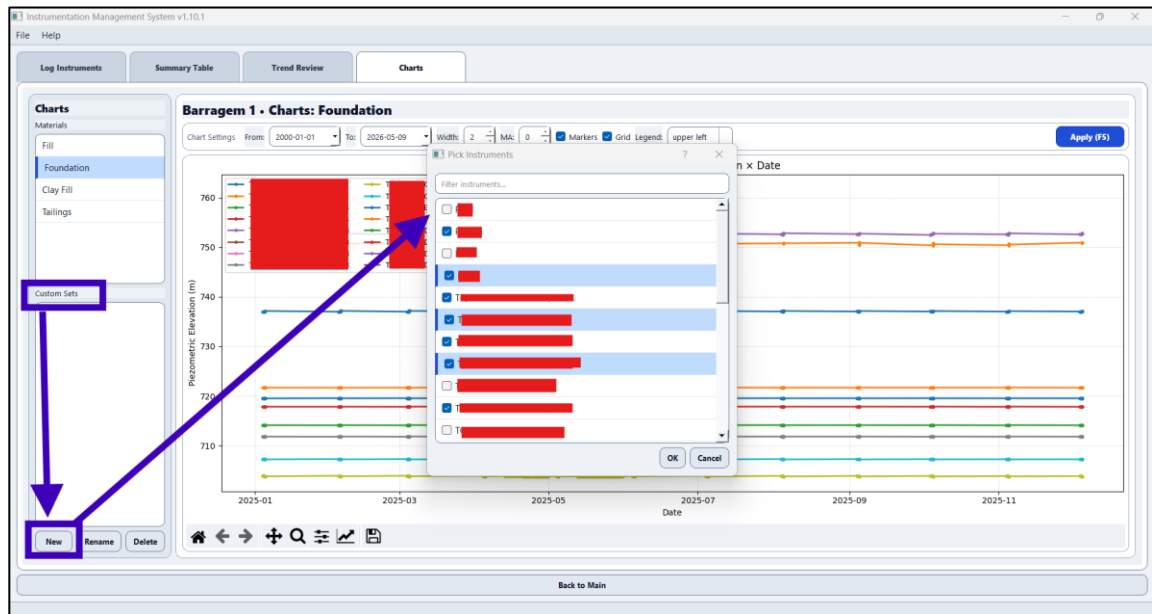
Figura 16 – Seletor de gráficos por material



Fonte: próprio.

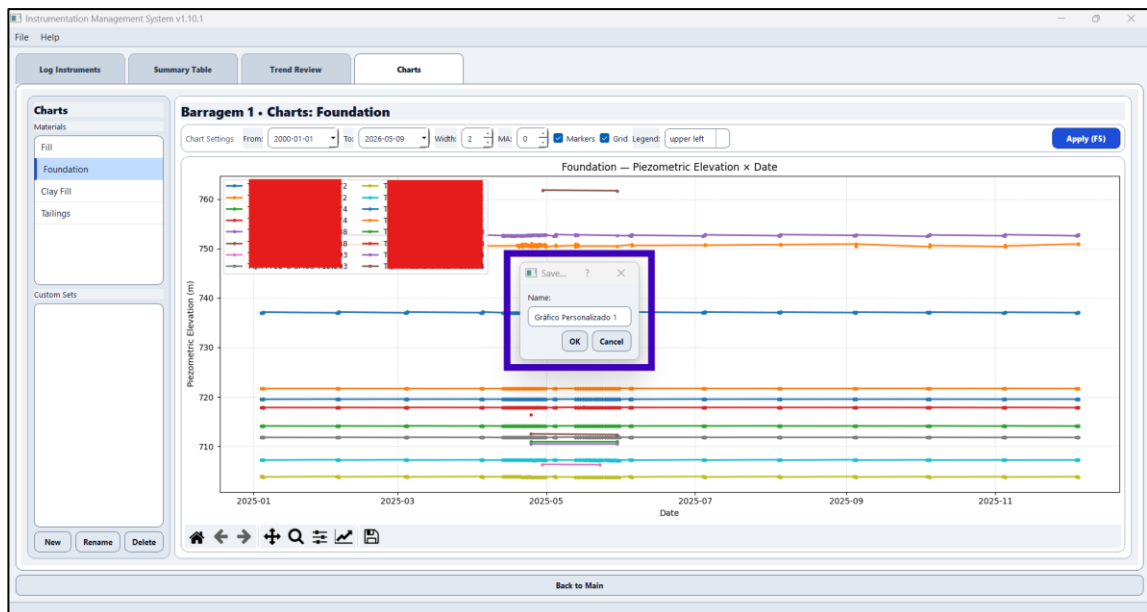
Além dos gráficos automáticos por material, o sistema também permitiu a criação de gráficos customizados, como apresentado nas Figuras 17, 18 e 19. Esse recurso foi importante porque nem toda análise técnica segue apenas a divisão por material. Em determinados casos, o usuário poderia desejar comparar instrumentos de uma mesma seção, instrumentos próximos a uma região específica da barragem ou piezômetros com comportamento semelhante observado previamente.

Figura 17 – Criação de gráficos personalizados (1/3)



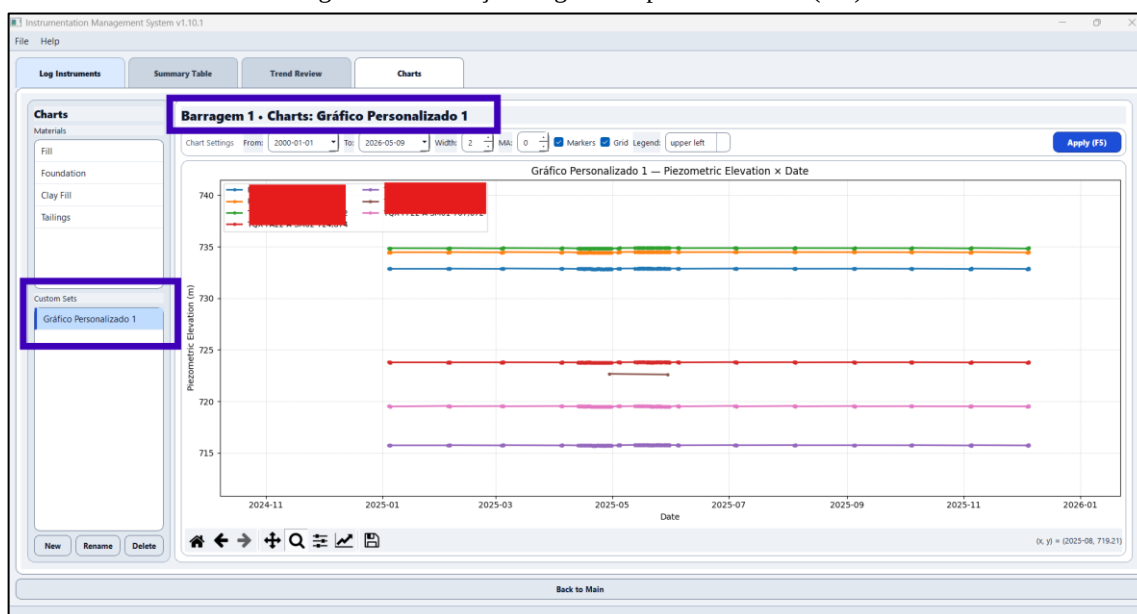
Fonte: próprio.

Figura 18 – Criação de gráficos personalizados (2/3)



Fonte: próprio.

Figura 19 – Criação de gráficos personalizados (3/3)



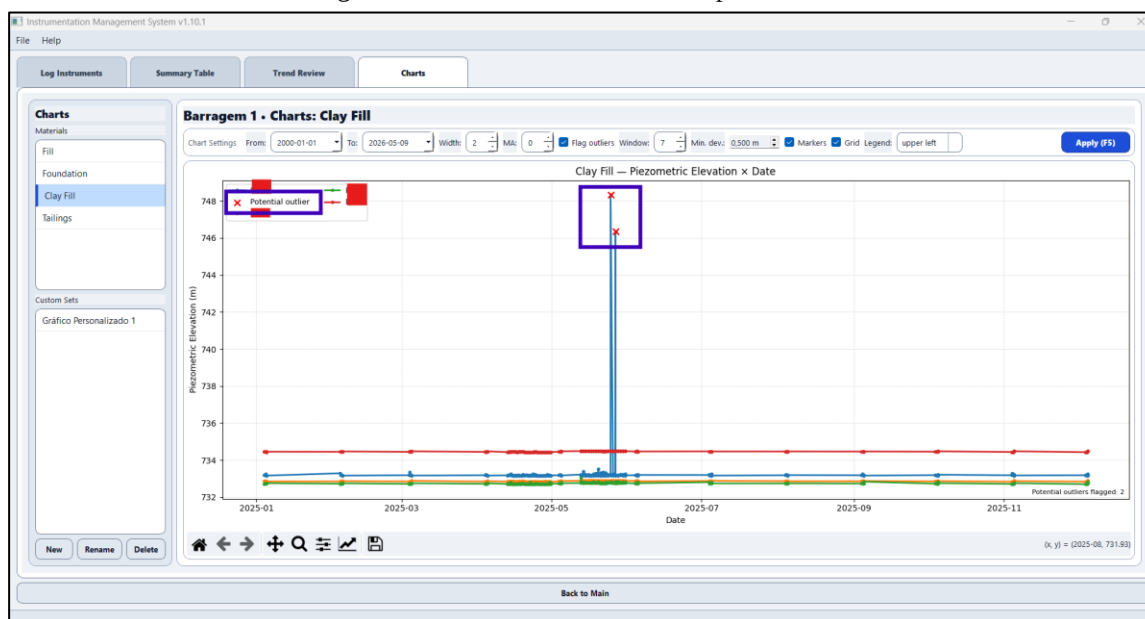
Fonte: próprio.

Os gráficos apresentaram a data no eixo x e a elevação piezométrica no eixo y. Além disso, o usuário pôde definir os intervalos desejados nos dois eixos, ajustar a formatação das linhas, ativar ou desativar marcadores, exibir ou ocultar grade e alterar a posição da legenda. Esses controles permitiram adaptar a visualização conforme o objetivo da análise, seja para observar a tendência geral dos piezômetros, seja para investigar oscilações pontuais.

A visualização gráfica possibilitou identificar padrões que seriam menos evidentes em tabelas, como tendências graduais de acréscimo ou decréscimo, mudanças abruptas de tendência e picos isolados. Também foi implementado um método automático de sinalização de variações discrepantes, baseado na comparação entre leituras consecutivas e no limite definido pelo usuário, inicialmente definido, por padrão, como 0,50 m. Esse valor não representa um critério estatístico universal, devendo ser ajustado conforme a sensibilidade desejada, as características da estrutura e o comportamento histórico dos instrumentos. As leituras sinalizadas não foram removidas, permanecendo disponíveis para avaliação técnica.

Na situação apresentada na Figura 20, o método automático de sinalização de variações discrepantes identificou e destacou os picos observados nas leituras de um dos piezômetros. Após discussões com o cliente, esses picos foram associados a falhas pontuais no sistema de transmissão automática das leituras ao CMG.

Figura 20 – Picos observados em um piezômetro



Fonte: próprio.

Como as variações discrepantes ocorreram aproximadamente na metade do mês, não teriam sido identificados apenas pela *Summary Table* e pela *Trend Review*, que utilizam apenas a última leitura mensal de cada instrumento. Dessa forma, os gráficos funcionaram como uma etapa de validação visual dos resultados gerados nas tabelas *Summary Table* e *Trend Review*. As tabelas indicaram numericamente quais instrumentos apresentaram variações relevantes, enquanto os gráficos permitiram verificar se essas variações faziam parte de uma tendência persistente, de um evento pontual ou de uma inconsistência isolada.

4.7 Discussão dos ganhos obtidos

A integração entre cadastro de instrumentos, importação de leituras e a geração de tabelas e gráficos resultou em um fluxo mais padronizado de análise mensal. Em procedimentos manuais, a interpretação depende de múltiplas etapas executadas em planilhas separadas, incluindo filtragem de dados, identificação da última leitura mensal, comparação com meses anteriores, cálculo de variações e montagem de gráficos. No sistema desenvolvido, essas etapas foram concentradas em uma sequência única e reproduzível.

O principal ganho observado foi a redução da dependência de manipulações manuais. Embora não tenha sido realizada uma comparação quantitativa formal entre o tempo de processamento manual e o tempo de processamento pelo programa, os ganhos de agilidade puderam ser discutidos de forma qualitativa a partir da redução das etapas manuais de organização, filtragem, padronização, cálculo de variações e geração de saídas.

Outro ganho relevante foi a melhoria da identificação de inconsistências e/ou variações discrepantes. Instrumentos ausentes no cadastro, instrumentos novos, leituras secas e variações mensais relevantes também foram destacados com maior clareza. Isso permitiu que o usuário concentrasse sua revisão técnica nos casos que realmente exigiam atenção.

Ressalta-se que o programa não teve como objetivo substituir a interpretação técnica, mas sim atuar como ferramenta de apoio à análise das leituras piezométricas. A identificação automatizada de uma variação elevada, de um pico ou de um comportamento discrepante não significou, por si só, a existência de uma anomalia geotécnica. Esses resultados indicaram pontos de atenção que deveriam ser avaliados pelo engenheiro responsável, considerando o contexto da estrutura, histórico de operação, eventos de chuva, alteamentos, inspeções de campo e demais informações disponíveis.

A contribuição deste trabalho consistiu na apresentação de um processo sistematizado para o tratamento e a análise de leituras piezométricas em larga escala. A ferramenta desenvolvida integrou etapas que normalmente seriam realizadas de forma manual e fragmentada, como a importação de planilhas, a padronização dos dados de entrada, a verificação de inconsistências, o cálculo de variações mensais e a geração de saídas tabulares e gráficas.

Um aspecto central do trabalho esteve na explicitação das regras de processamento aplicadas às leituras. Em vez de depender exclusivamente da interpretação manual do analista em planilhas isoladas, o sistema utilizou critérios determinísticos para mapear colunas, consolidar leituras mensais, identificar instrumentos novos, classificar instrumentos em condição saturada ou seca, calcular variações entre meses consecutivos e identificar variações discrepantes. Essa padronização reduziu ambiguidades no tratamento dos dados e permitiu que os resultados obtidos fossem rastreáveis e comparáveis ao longo do tempo.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou as aplicações de um sistema computacional voltado ao tratamento, organização e análise de leituras piezométricas em barragens de terra. O programa foi estruturado para integrar, em um único ambiente, o cadastro dos instrumentos, a importação padronizada das leituras mensais, a geração de tabelas resumo, a revisão de tendências e a visualização gráfica das séries históricas.

A ferramenta permitiu consolidar dados provenientes de planilhas mensais fornecidas pelo CMG, reduzindo a dependência de manipulações manuais e tornando o processo de análise mais padronizado e rastreável. O sistema permitiu identificar automaticamente instrumentos ainda não cadastrados, organizar os piezômetros por material e estaca, classificar instrumentos em condição saturada ou seca, calcular variações mensais entre leituras consecutivas e gerar saídas tabulares e gráficas voltadas à interpretação técnica.

A *Summary Table* possibilitou a consolidação mensal das leituras por instrumento, apresentando a última leitura válida do mês, o histórico de meses anteriores e a variação em relação ao mês precedente. A Trend Review, por sua vez, organizou as variações por material e condição hidráulica, permitindo uma triagem mais rápida de aumentos, reduções e variações desprezíveis. Já os gráficos permitiram avaliar visualmente o comportamento histórico dos instrumentos, contribuindo para a identificação de tendências e picos.

Os resultados indicaram que o uso do sistema contribuiu para a redução de tarefas repetitivas, diminuição de erros associados ao processamento manual e maior clareza na interpretação preliminar dos dados piezométricos. Entretanto, a ferramenta não substituiu a análise técnica do engenheiro. As variações e comportamentos destacados pelo programa devem ser interpretados considerando o contexto geotécnico da estrutura, o histórico operacional, eventos de chuva, intervenções construtivas, inspeções de campo e demais informações disponíveis.

Dessa forma, concluiu-se que o programa desenvolvido atingiu o objetivo de apoiar o processamento e a interpretação de leituras piezométricas em larga escala, fornecendo um fluxo

mais reproduzível e organizado para a rotina de monitoramento geotécnico.

5.2 Trabalhos futuros

Como proposta de continuidade, recomenda-se o aprimoramento do sistema por meio da integração de modelos de inteligência artificial e ML capazes de aprender o comportamento esperado para cada piezômetro com base nos contextos em que estão inseridos, a partir da integração no sistema de variáveis externas, como precipitação, nível do reservatório, etapas de alteamento, registros de obras, inspeções de campo e eventos operacionais relevantes. Essa integração permitiria análises mais completas, nas quais a elevação piezométrica não seria avaliada de forma isolada, mas em conjunto com fatores que influenciam diretamente o comportamento da barragem.

Além da inteligência artificial, futuras versões do sistema poderiam incluir armazenamento em banco de dados em nuvem, controle de usuários, histórico de alterações, registro de comentários técnicos por instrumento e geração automática de relatórios mensais. Essas melhorias ampliariam a rastreabilidade do processo e facilitariam o uso do programa em ambientes corporativos com múltiplos analistas.

Por fim, destaca-se que qualquer integração com inteligência artificial deve ser utilizada como ferramenta de apoio à decisão, e não como substituta da interpretação geotécnica. Modelos automatizados podem auxiliar na identificação preliminar de comportamentos anômalos, mas a avaliação final deve continuar dependendo do julgamento técnico do engenheiro responsável.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de segurança de pequenas barragens**. Brasília, DF: ANA, 2012. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/snisb/Entenda_Mais/publicacoes/. Acesso em: 7 jun. 2026.
- BRANDÃO, Hugo A.; SANTOS, Tatiana B.; OLIVEIRA, Christiane S. de; COSTA, Ana P. F. **Application of machine learning techniques on outlier detection of piezometer data**. Nova Lima: Pimenta de Ávila Consultoria, 17 out. 2023. Disponível em: <https://www.pimentadeavila.com.br/application-of-machine-learning-techniques-on-outlier-detection-of-piezometer-data/>. Acesso em: 06 nov. 2025.
- BRESSANI, Luiz Antônio; FAVERO, Deise Elise Guerra; SIMÕES, Eduardo Bonow; SMIRDELE, Camila Dahm. Influência da permeabilidade no tempo de resposta de diferentes tipos de piezômetros na UHE Dona Francisca. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICAS DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 12., 2019, Joinville. Anais [...]. Joinville: ABMS, 2019. p. 1-10.
- CHEN, Liqiu; GU, Chongshi; ZHENG, Sen; WANG, Yanbo. A method for identifying gross errors in dam monitoring data. **Water**, v. 16, n. 7, art. 978, 2024. DOI: 10.3390/w16070978.
- CONSELHO NACIONAL DOS DIREITOS HUMANOS (CNDH). **Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o Vale do Rio Doce**. Brasília, DF: CNDH, maio 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mdh/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/old/cndh/relatorios/RelatriodaBarragemdoRioDoce_FINAL_APROVADO.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.
- DAM PROJETOS DE ENGENHARIA. Barragem da Mina de Casa de Pedra, em Congonhas. In: VIEIRA, Ana Cláudia. Moradores de Congonhas rejeitam alteamento de barragem da CSN. **Revista Mineração**, 4 out. 2017. Disponível em: <https://revistamineracao.com.br/2017/10/04/moradores-de-congonhas-rejeitam-alteamento-de-barragem-da-csn/>. Acesso em: 8 jun. 2026.
- DOMINGUES, Giancarlo; FARO, Vítor Pereira; MAZZUTTI, Elisangela Aparecida. Analysis of field monitoring of precipitation and pore pressure over seven years at Morro do Boi of Serra do Mar/Brazil. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 47, n. 4, e2024011823, 2024. DOI: 10.28927/SR.2024.011823.
- FREITAS, Isabela Vasconcelos Leite de; SANTOS, Hersília de Andrade e. The relationship between geophysical and geotechnical data: a temporal analysis of an iron ore tailings dam. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 47, n. 4, e2024011923, 2024. DOI: 10.28927/SR.2024.011923.
- GEOKON. **Model 4500 Series Vibrating Wire Piezometers and Pressure Transducers: instruction manual**. Lebanon, NH: Geokon, 2026. rev. RR.8. Disponível em: https://www.geokon.com/content/manuals/4500_Piezometer.pdf. Acesso em: 8 jun. 2026.
- MARTENS, Scott N. Accuracy of pore water pressure measurements using vibrating wire

piezometers with fully grouted and bentonite chip seal borehole backfill methods. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 62, p. 1–22, 2025. DOI: 10.1139/cgj-2025-0144.

MINAS GERAIS. **Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão**. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 3 maio 2024. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>. Acesso em: 8 jun. 2026.

SÁNCHEZ-MARTÍN, Jesús; GALINDO, Ruth; MENÉNDEZ-PIDAL, Ignacio; ALONSO, Elena. Optimized design of earth dams: analysis of zoning and heterogeneous material in its core. **Sustainability**, v. 12, n. 16, art. 6667, 2020. DOI: 10.3390/su12166667.

SANTOS, Verlei Oliveira dos; BRESSANI, Luiz Antônio; SMIRDELE, Camila de Souza Dahm. Geotechnical behavior of gravity dams built on sedimentary rocks: pore pressures and deformations analysis of Dona Francisca HPP foundation. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 46, n. 2, e2023013622, 2023. DOI: 10.28927/SR.2023.013622.

SANTOS, Laryssa Cortes. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos**. 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SAVIOLI, M.; BERTETTO, A. M.; MAZZA, L. Reliability, long-term stability and gage performance of vibrating wire sensors with reference to case histories. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 5., 1999. Proceedings [...], 1999.

SENTNEL. **Piezômetros**. [S. l.], 10 jun. 2025. Disponível em: <https://www.sentnel.com.br/post/piez%C3%B4metros>. Acesso em: 8 jun. 2026.

SILVA, Augusto Barbosa; CAETANO, Mateus Ribeiro; PIEROZAN, Rodrigo César. Aplicação de métodos estatísticos em piezômetros como auxílio ao monitoramento de barragens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2024, Balneário Camboriú. **Anais eletrônicos...** Balneário Camboriú: ABMS, 2024. Disponível em: <https://2024.cobramseg.com.br/upload/trabalhos/t1arquivo/3RYLx0hw01rT0Ldo01lnUTvZwmt4.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2025.

TALAMINI NETO, Edmundo. **Porque indicadores de nível d'água nem sempre permitem medir a linha freática?**. LinkedIn, 25 set. 2023. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/porque-indicadores-de-n%C3%ADvel-d%C3%A1gua-nem-sempre-medem-talamini-neto>>. Acesso em: 7 jun. 2026.

SEGALINI, Andrea; CARRI, Andrea; SAVI, Roberto. Role of geotechnical monitoring: state of the art and new perspectives. In: GEO-EXPO 2017, Sarajevo, 2017. **Proceedings [...]**. Sarajevo: Geotechnical Society of Bosnia and Herzegovina, 2017.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

TERZAGHI, Karl. Past and future of applied soil mechanics. **Journal of the Boston Society of Civil Engineers**, v. 48, n. 2, p. 110-133, 1961.

WILSON, Stanley D. Design and construction of earth and rockfill dams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7., 1969, Mexico City. **Proceedings [...]**. v. 3, 1969.

YANG, Xiaodong; et al. A dam safety state prediction and analysis method based on EMD-SSA-LSTM. **Water**, v. 16, n. 3, art. 395, 2024. DOI: 10.3390/w16030395.