

## Estudo de Caso: Avaliação do Monitoramento Piezométrico de Uma Barragem de Contenção de Sedimentos Minerários

Fabiana Aparecida Blanco

Engenheira Civil, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte - MG, Brasil,  
fabiana.blanco@pimentadeavila.com.br

Guilherme Henrique da Silva Pinto

Engenheiro Civil, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte - MG, Brasil,  
guilherme.henrique@pimentadeavila.com.br

Eduardo Souza Cândido

Professor – Escola de Engenharia, UFLA, Lavras - MG, Brasil,  
eduardo.candido@ufla.br

Vitor Ferreira Junqueira

Engenheiro Civil, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte, Brasil,  
vitor.ferreira@pimentadeavila.com.br

**RESUMO:** Os acidentes envolvendo barragens representam desastres que causam impactos socioeconômicos e ambientais significativos e irreparáveis. A avaliação de estruturas através do monitoramento geotécnico é de suma importância para sua segurança e o seu monitoramento é crucial para avaliar as reais condições de segurança dos barramentos. Dessa forma, este trabalho avaliou o comportamento piezométrico de uma barragem de contenção de sedimentos. É apresentada a interpretação do perfil de poropressão obtido a partir da linha freática estimada por meio do histórico de leituras. Foram avaliadas 3 seções geológicas com 19 instrumentos de medição de poropressão, sendo eles 8 piezômetros Casagrande e 11 piezômetros elétricos de corda vibrante. Além disso, a seção possui uma régua linimétrica para avaliação do nível de água de montante do reservatório. Por meio da análise da instrumentação existente foi possível avaliar o perfil da linha freática obtida para cada uma das seções, sendo observado a influência da pluviometria na variação do nível de água da fundação. Por final, também foi possível avaliar o impacto do sistema extravasor da estrutura bem como do sistema de drenagem interno no comportamento piezométrico e foi comparado a linha freática para cada uma das seções.

**PALAVRAS-CHAVE:** Engenharia Geotécnica, Monitoramento de Barragens, Instrumentação, Piezometria.

**ABSTRACT:** Accidents involving dams represent disasters that cause significant and irreparable socio-economic and environmental impacts. The assessment of structures through geotechnical monitoring is of paramount importance for their safety, and monitoring is crucial to evaluate the actual safety conditions of the dams. Thus, this work evaluated the piezometric behavior of a sediment containment dam. The interpretation of the pore pressure profile obtained from the water table estimated through the historical readings is presented. Three geological sections with 19 pore pressure measurement instruments were evaluated, including 8 Casagrande piezometers and 11 vibrating wire piezometers. Additionally, the section has a limnimetric ruler for assessing the upstream water level. Through the analysis of the existing instrumentation, it was possible to evaluate the water table profile obtained for each of the sections, observing the influence of rainfall on the variation of the foundation water level. Finally, it was also possible to assess the impact of the overflow system of the structure as well as the internal drainage system on the piezometric behavior and to compare the water table for each of the sections.

**KEYWORDS:** Geotechnical Engineering, Dam Monitoring, Instrumentation, Piezometry.

## 1 INTRODUÇÃO

Os acidentes com barragens, exemplificados pelos casos de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019 causaram danos socioeconômicos e ambientais significativos e irreparáveis. Dessa maneira, salienta-se a importância da avaliação precisa e constante da segurança dessas estruturas, ressaltando medidas preventivas como adoção de normas e padrões técnicos mais rigorosos e monitoramento geotécnico.

A área de monitoramento geotécnico tem sido objeto de estudo por diversos pesquisadores renomados há mais de dois séculos. Dunnclif (1988), destaca que ainda no início do século foram fomentados os primeiros instrumentos geotécnicos. A partir de 1920 os instrumentos foram evoluindo e passando a se tornar cada vez mais empregados no monitoramento de estruturas geotécnicas. Em âmbito nacional, Silveira (2006) menciona que o crescimento se deu a partir da década de 70, impulsionado pelo crescimento das hidrelétricas brasileiras.

Um dos principais parâmetros a serem avaliados para a gestão da estabilidade das barragens são as variações das poropressões. Tal parâmetro é definido como as pressões de água presentes no arcaço do solo, conforme detalhado por Pinto (2006). Nessa perspectiva, os piezômetros são instrumentos comumente empregados para esse fim. Tais instrumentos podem ser do tipo aberto ou fechado, a depender do tipo de equipamento utilizado.

Segundo Cerqueira (2017), na atualidade é observado que os instrumentos de monitoramento geotécnico se destacam pelo avanço tecnológico notável, conferindo maior precisão e eficiência na coleta de dados, tais como piezômetros elétricos (PZE). A integração de sensores avançados e sistemas de comunicação em tempo real possibilita respostas rápidas diante de alterações nas condições geotécnicas. Além disso, como destacado pelo autor, a interface simplificada desses instrumentos facilita a execução de tarefas de monitoramento, tornando o processo mais acessível e eficaz para profissionais da área, visto a possibilidade de automatização das leituras e armazenamento em nuvem com transmissão em tempo quase real dos dados.

Segundo Cerqueira (2017), o Piezômetro Casagrande (PZC) consiste num dispositivo de medição de pressão da água em solos e rochas do tipo aberto. Ele é composto por um tubo, que pode ser feito de PVC, metal ou material geomecânico, com ranhuras ou perfurações em trechos de cerca de 1 metro. No ponto de medida de pressão é realizado o preenchimento de areia (material drenante), denominado célula de pressão. Acima de tal ponto, até a superfície, um selo de bentonita ou solo cimento é utilizado para evitar interferências de camadas de água superiores. A água subterrânea flui pelas ranhuras do tubo na região da célula de areia, sendo o nível de água mensurado pela pressão no ponto. Como instrumento mede tais pressões ao longo do tempo é possível mensurar o nível da água ao longo do tempo de vida da estrutura possibilitando mensurar as variações das condições de fluxo. Por fim, destaca-se que a célula de areia está conectada à superfície por meio da tubulação sendo as medidas relativas à pressão atmosféricas.

O piezômetro elétrico de corda vibrante (PZE), consiste em um sensor piezométrico de corda vibrante, inserido dentro de um furo de sondagem em profundidade. Em linhas gerais, seu funcionamento é simples, onde mede-se a frequência da tensão de um arame fixo a um diafragma e submetido às variações da poropressão da camada alvo. As mudanças de pressão no diafragma fazem com que ele se esvazie ou infle alterando a tensão no arame, mudando também a tensão e frequência de vibração do elemento de arame vibrante (Silveira, 2006). Por meio de tais variações, obtém-se a poropressão no ponto de medida do instrumento. Devido a propriedade do instrumento, uma de suas grandes vantagens é a resposta rápida às variações do nível de água, proporcionando uma tomada de decisão ágil por parte dos operadores.

Segundo Hvorslev (1951), dentre os fatores que podem influenciar nas leituras dos piezômetros, pode-se destacar: (i) tempo necessário à água percolar para dentro ou para fora do tubo (tempo de resposta); (ii) presença de bolhas de ar ou gás no solo, as quais provocam o aumento no tempo de resposta; e (iii) erosão interna do solo adjacente à célula de areia que provoca a diminuição inicial do tempo de resposta e subsequente sedimentação do instrumento até sua completa inutilização. Além disso, pode ocorrer erros na medição do nível da água no interior do tubo, especialmente os instrumentos manuais, e erros na construção do instrumento, no caso dos PZCs, ou na calibração de sensores no caso dos PZEs.

Mediante ao exposto, objetivo principal deste trabalho é avaliar o monitoramento piezométrico de uma barragem de contenção de sedimentos, analisando a influência da pluviometria na resposta dos instrumentos, bem como entender o comportamento da linha freática desenvolvida e sua relação com o sistema de drenagem da estrutura. Para tal, foram avaliadas três seções geológico-geotécnicas as quais contêm no total 19 instrumentos de medição de poropressão, sendo eles 8 PZCs e 11 PZEs. Além disso, a estrutura possui 1 régua

linimétrica para avaliação do nível de água de montante e um pluviômetro para monitoramento do regime de chuvas na região.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Dados da Estrutura

A barragem presente no estudo de caso foi construída com a finalidade de reter sedimentos provenientes da exploração do minério de bauxita, recebendo água do processo minerário, incluindo a limpeza industrial e a drenagem dos pátios de estocagem. A água passa por bacias de sedimentação antes de ser direcionada para barragem e, posteriormente, para outra barragem a jusante. Após a segunda estrutura, ao final do processo de clarificação o efluente é finalmente direcionado para o rio próximo à cidade minerária.

Construída no início dos anos 2000, a barragem analisada passou por etapas como escavação, limpeza da fundação, construção do sistema de drenagem interno e construção do maciço em aterro compactado. A estrutura possui dados do projeto *As Built*, bem como uma ampla gama de campanhas de investigações contendo sondagens à percussão, ensaios de piezocone, ensaios de palheta, bem como retiradas de amostras do tipo bloco e amostras deformadas. Para o monitoramento geotécnico foram instalados instrumentos para medição de poropressão do tipo piezômetro Casagrande (PZC), piezômetro elétrico de corda vibrante (PZE), réguas linimétricas e um pluviômetro próximo a estrutura, incluindo informações de investigações de campo e laboratório, instalação de instrumentos e caracterização geotécnica do subsolo.

A Figura 1 demonstra perfil longitudinal da estrutura estudada, no qual é possível observar a disposição dos materiais, sua elevação e as espessuras de suas camadas. Vale salientar, que o perfil transversal para as seções escolhidas para análise é apresentado em detalhes no item de resultados e discussões.

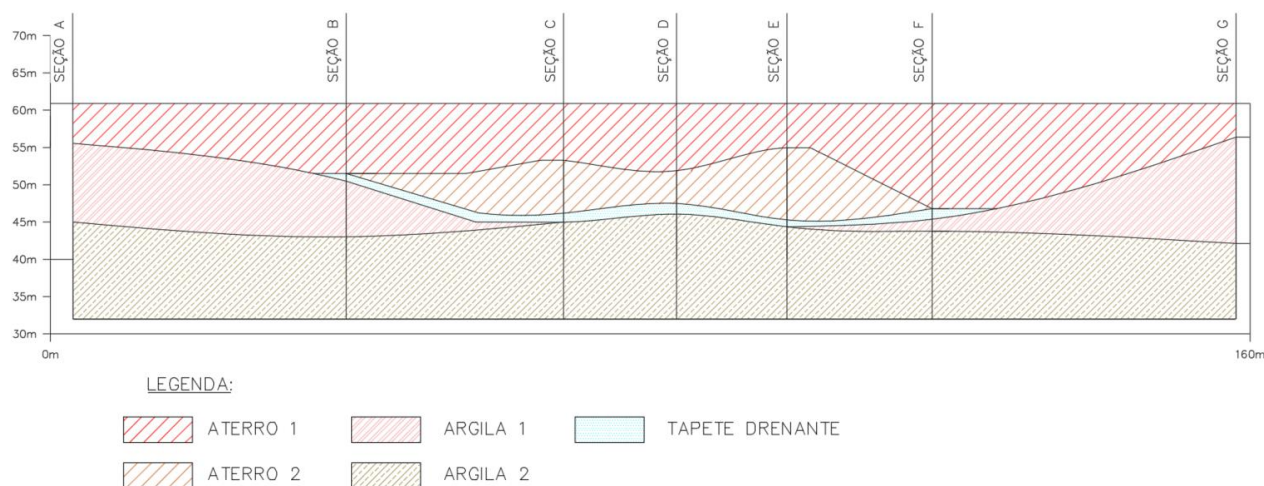


Figura 1. Seção longitudinal da Barragem analisada

### 2.2 Seções Analisadas

Para o desenvolvimento deste artigo, foram analisadas três seções instrumentadas, sendo elas:

- i. Seção B que contém 3 instrumentos do tipo Piezômetro Casagrande e 4 (quatro) instrumentos do tipo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante (PZE);
- ii. Seção C que contém 5 instrumentos do tipo Piezômetro Casagrande; e
- iii. Seção D que contém 6 instrumentos do tipo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante.

O histórico de monitoramento dos instrumentos é composto de leituras correspondentes a um período de 3 ciclos hidrológicos (aproximadamente 3 anos de dados). Foi avaliado a sazonalidade e a pluviometria local, através dos dados de pluviometria e da régua linimétrica presente no reservatório. A partir dos dados obtidos, foi realizada a interpretação do comportamento da rede de fluxo estabelecida, sendo filtrados os

possíveis dados inconsistentes ocasionados por erros no funcionamento da instrumentação ou no registro das leituras pelo responsável em campo.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Seções transversais e gráficos de monitoramento

A seguir estão ilustradas as seções geológico-geotécnicas contendo os instrumentos analisados em cada uma das seções. Além disso, também é possível observar os gráficos de carga piezométrica para as seções analisadas os gráficos de cota piezométrica (carga total).

##### 3.1.1 Seção B

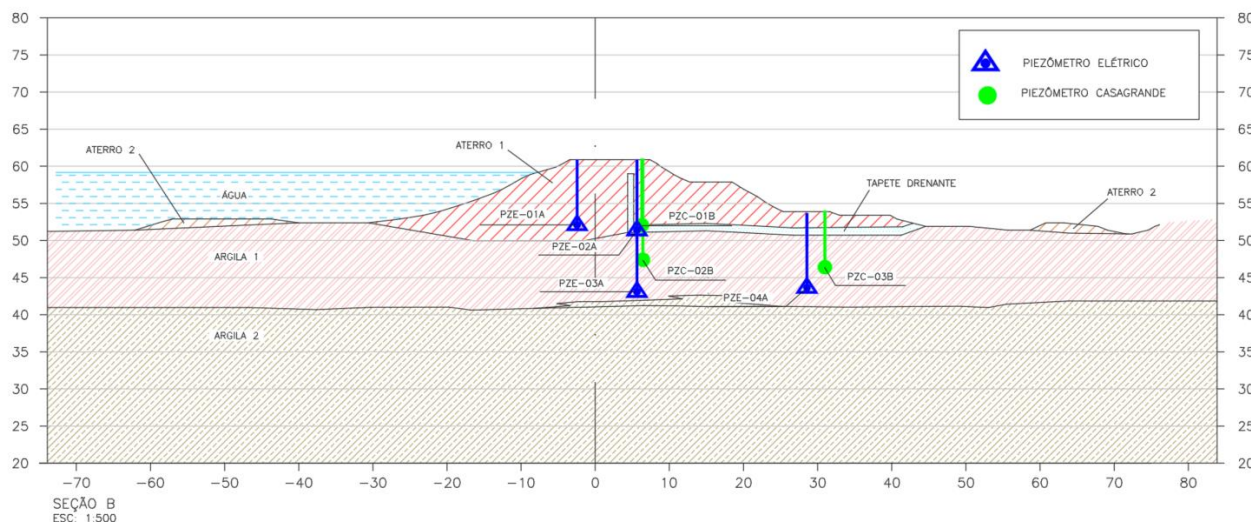


Figura 2. Seção B – Seção Geológica-Geotécnicas

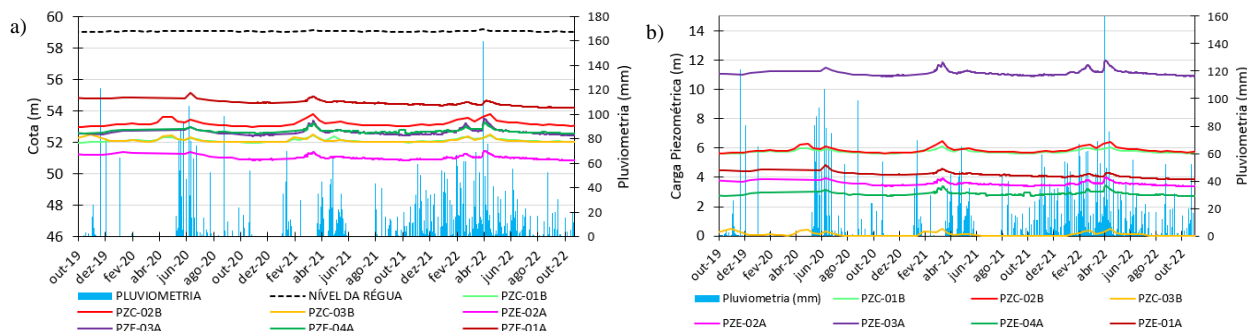


Figura 3. Seção A – Gráficos de a) Cota Piezométrica e b) Carga Piezométrica

É possível concluir que as leituras dos piezômetros instalados são influenciadas pela pluviosidade local, uma vez que, nos períodos de estiagem, as leituras de cota e carga piezométricas atingem seus valores mínimos e nos períodos de cheia as leituras atingem seus valores máximos. Além disso, nota-se que o nível do reservatório não oscila significativamente entre os períodos de cheia e estiagem. Possivelmente, atrelado ao fato de que o sistema extravasor em pleno funcionamento, o qual mantém um nível de água praticamente constante ao longo do ano hidrológico. Dessa forma, a leitura dos instrumentos seria majoritariamente influenciada por um aumento das propensões na fundação.

No pico de leituras pluviométricas, registrado entre os meses de fevereiro e abril de 2022, é possível constatar que as leituras dos instrumentos elétricos PZE 03A e PZE-04A respondem imediatamente ao evento. Em contrapartida, as leituras dos instrumentos analógicos PZC-02B e PZC-03B respondem ao evento de chuva em uma data posterior, demonstrando de forma prática o impacto do tempo de resposta dos instrumentos. Tal diferença é provocada pelo princípio de funcionamento dos instrumentos, como citado anteriormente. Cabe

destacar que tais instrumentos encontram-se no mesmo material, sendo eliminado a influência da permeabilidade do litotipo como variável no tempo de resposta dos instrumentos.

Com relação ao comportamento da linha freática na seção, é possível constatar a influência do filtro de drenagem. Quando as leituras históricas do instrumento PZE-01A (à montante do filtro) são comparadas com o PZC-01B (à jusante do filtro), constata-se que as leituras do primeiro possuem valores constantes maiores do que o segundo. Tal comportamento indica a eficiência do dispositivo de drenagem que reduz as poropressões à jusante se comparado à região de montante da estrutura.

### 3.1.2 Seção C

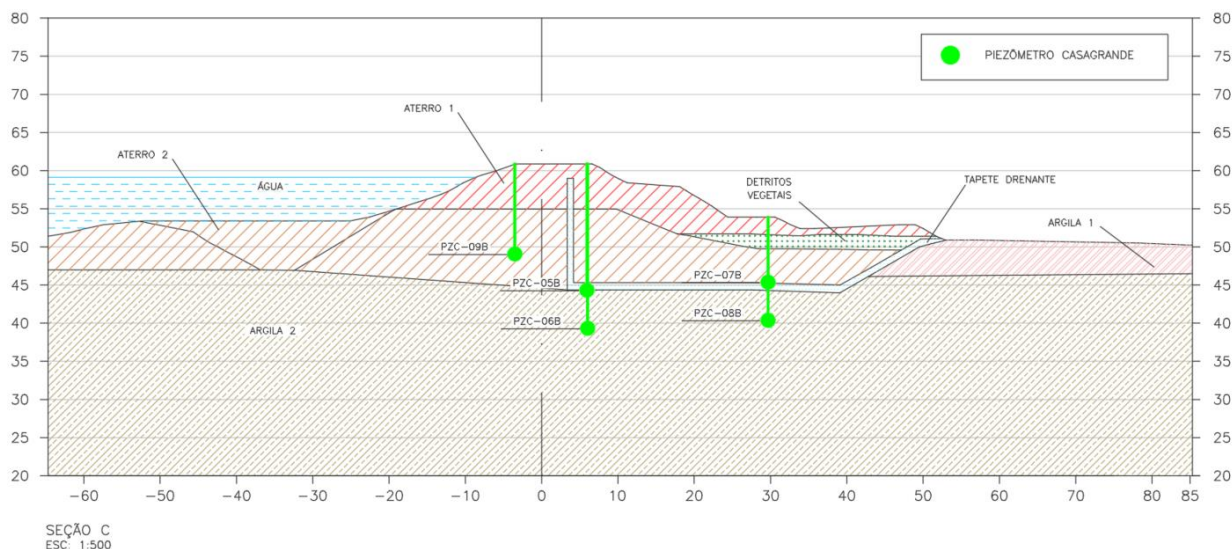


Figura 4. Seção C – Seção Geológico-Geotécnicas

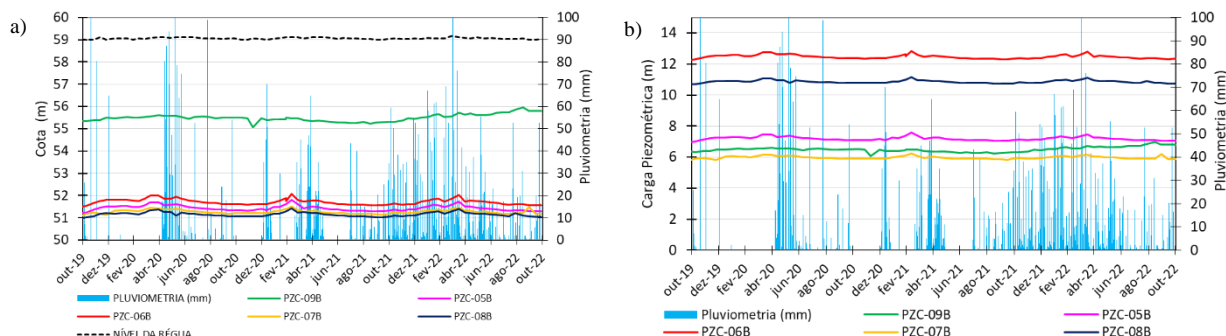


Figura 5. Seção C – Gráficos de a) Cota Piezométrica e b) Carga Piezométrica.

De forma similar a Seção B, é possível concluir que as leituras dos piezômetros instalados na Seção C também são influenciadas pela pluviosimetria local. Além disso, também é possível observar que o nível do reservatório não oscila significativamente entre os períodos de cheia e estiagem. Tal constatação, pode ser atribuída ao sistema extravasor, assim como mencionado para a Seção B. Dessa forma, atribui-se a variação das poropressões dos instrumentos possíveis variações do nível de água na fundação e não do reservatório.

Com relação ao comportamento da linha freática na seção, é possível também observar a influência do sistema de drenagem interno. Quando as leituras históricas do instrumento PZC-09B (à montante do filtro) são comparadas com o PZC-05B (à jusante do filtro), constata-se que as do primeiro possuem, constantemente valores superiores em relação ao segundo, indicando que o dispositivo de drenagem reduz as poropressões à jusante.

### 3.1.3 Seção D

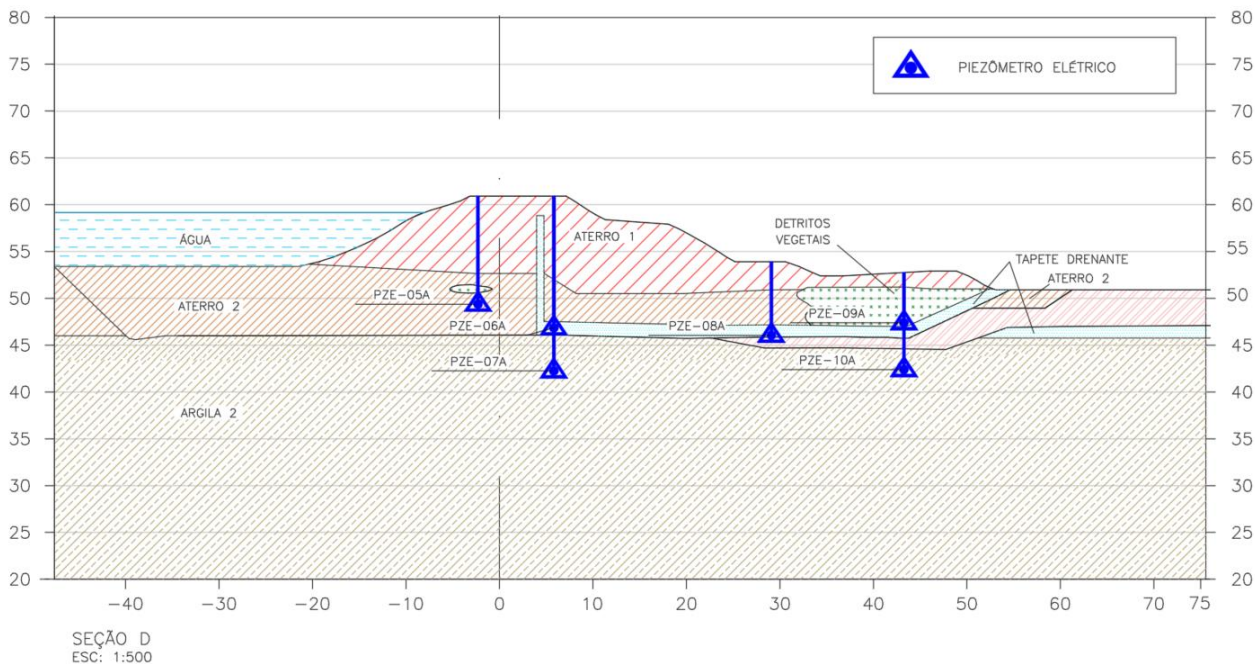


Figura 6. Seção D – Seção Geológico-Geotécnicas.

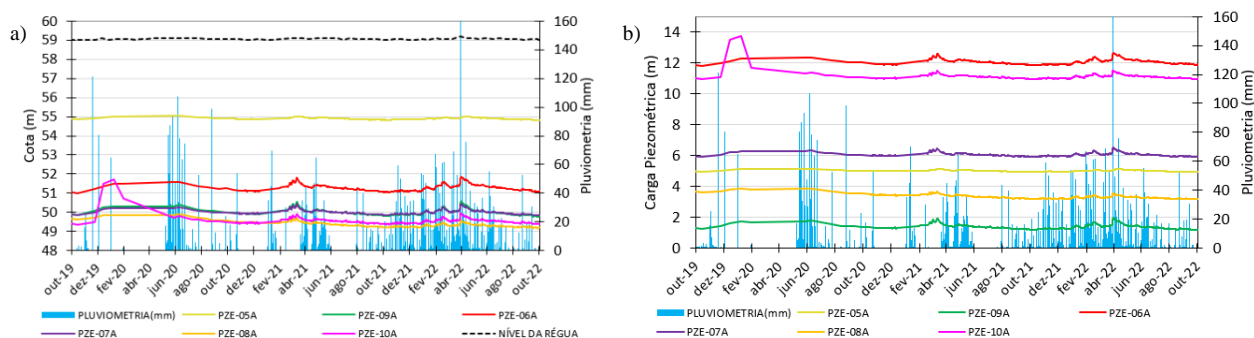


Figura 7. Seção D – Gráficos de Cota Piezométrica e Carga Piezométrica.

A partir das informações apresentadas, de forma similar as Seções B e C é possível concluir que as leituras dos piezômetros instalados na Seção D são influenciadas unicamente pela pluviosidade local, e pelo fluxo na fundação, visto que o nível de água não apresenta variações significativas.

No que tange ao comportamento da instrumentação, é possível notar que no período de dezembro de 2019 a abril de 2020, o instrumento PZE-10A apresenta comportamento anômalo se comparado aos demais instrumentos localizados na seção. Tal observação advém de um aumento expressivo de leituras (aproximadamente 2,5 m.c.a.) e posterior redução, diferentemente dos demais instrumentos localizados na seção. Como esse comportamento não se repete em outros períodos dos ciclos hidrológicos em estudo, assumiu-se que as leituras foram causadas por alguma possível inconsistência como as mencionadas no item anterior. Possivelmente, tal anomalia pode ter sido causada por alguma obra na estrutura como construção de berma, regularização de crista, coleta de amostras, dentre outras intervenções.

Já no pico de leituras pluviométricas, registrado entre os meses de fevereiro e abril de 2022, é possível constatar que as leituras dos instrumentos elétricos PZE-05A, PZE-06A, PZE-07A, PZE-08A, PZE-09A e PZE-10A respondem de forma praticamente imediata ao evento de chuvas, demonstrando o curto tempo de resposta desse tipo de instrumento independente do litotipo no qual os instrumentos estão instalados.

Com relação ao comportamento da linha freática na seção, é possível constatar a influência do filtro de drenagem, de forma similar às demais seções, visto que as leituras históricas do instrumento PZE-05A (à montante do filtro) são superiores se comparadas com o PZE-07A (à jusante do filtro). Dessa forma, o sistema

de drenagem interno provoca uma perda de carga e redução das poropressões reduzindo o nível freático à jusante da seção.

### 3.2 Resultado das Análises

Nas quatro seções transversais, as leituras dos instrumentos instalados respondem ao período de chuvas entre os meses de novembro e junho, e ao período de estiagem entre os meses de julho e outubro. Tal comportamento se repete no histórico dos três ciclos hidrológicos analisados.

Na Seção B foi possível verificar a diferença no tempo de resposta das leituras dos diferentes tipos de instrumentos na ocorrência de um evento hidrológico, pois é a única seção dentre as analisadas que possui piezômetros Casagrande (PZC) e piezômetros elétricos de corda vibrante (PZE) instalados. Tal verificação foi realizada em instrumentos localizados no mesmo litotipo de forma a inibir efeitos da permeabilidade do material na comparação realizada.

Já, nas Seções B, C e D foi possível constatar a influência do sistema de drenagem interna, representada dreno chaminé e tapete drenante, no comportamento da linha freática. De forma geral, as leituras da instrumentação instalada a jusante do dispositivo de drenagem são menores em relação dos instrumentos à montante, indicando uma depreciação do nível freático em função da permeabilidade do dreno.

Em todas as seções foi possível constatar que o fator governante para o comportamento das leituras no histórico analisado é a pluviometria na região atuando nas poropressões da fundação, uma vez que a leitura da régua não varia significativamente no período. Dessa forma, torna-se essencial a presença, monitoramento e boa manutenção do pluviômetro na região. A correlação entre os dados de pluviometria e da piezometria permite o entendimento das causas de ocorrências de leituras críticas e permite uma melhor tomada de decisões a partir dos dados registrados.

Por se tratar de uma estrutura de aproximadamente 160 metros de crista da estrutura (de ombreira a ombreira), com os mesmos materiais na fundação, com parede construída com os materiais da mesma jazida, e submetida às mesmas condições de contorno espera-se que o comportamento da rede de fluxo nas seções seja similar. Ao comparar os dados de leituras das seções B, C e D, observa-se que essa hipótese é verdadeira, bem como é verificado a influência do sistema de drenagem no regime de poropressão.

## 4 CONCLUSÕES

Neste estudo sobre o monitoramento piezométrico de uma barragem de contenção de sedimentos resultantes do beneficiamento de bauxita, foram analisadas três seções instrumentadas da barragem usando dados de monitoramento, níveis de água e pluviometria local. A avaliação revelou a consistência operacional da maioria dos instrumentos, exceto durante um período de leituras anômalas do instrumento PZE-10A. Em geral, os instrumentos estão em bom estado de funcionamento, respondendo eficientemente às variações pluviométricas.

Observou-se que a pluviometria é o principal fator influenciador nas leituras dos instrumentos, uma vez que o nível de água permanece praticamente constante devido ao sistema extravasor. Além disso, foi destacada as diferenças nos tempos de resposta dos instrumentos PZE e PZC, instalados nos mesmos materiais, sendo os primeiros mais rápidos, ambos localizados na Seção B.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio e o incentivo da Pimenta de Ávila Consultoria e da Universidade Federal de Lavras na realização desta publicação.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burland, J.B. *The teaching of Soil Mechanics: a personal view. In: Proceedings of the 9th European conference on soil mechanics and foundation engineering*, Dublin, vol 3, pp 1427–1447. 1987.

Burland, J. B. *ICE Manual of Geotechnical Engineering: Geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation*. Institution Of Civil Engineers (Great Britain): Ice, 2012. 1537 p.

Cerqueira, M. L. H. Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas de mineração. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2017.

Dunnicliff, I. *Geotechnical Instrumentation for Measuring Field Performance*, New York, I. Wiley. Green, G.E. 2000. Geotechnical Field Instrumentation: What's New in 2000. *Geotechnical News*, VoL 18, No.4, Dec.: 26-30. 1988.

Hvorslev, M.J. 1971. *Time lag and soil permeability in ground-water observations*. Bull. No. 36, *Waterways Experiment Station*. Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, 50pp.

McKenna, G.T. *Grouted-in Installation of Piezometers in Boreholes*. *Geotechnical Journal*, Number 32, pp. 355-363.

Mikkelsen, P.E. *Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments*. *Geotechnical News* December 2002, pp. 38-42.

Morgenstern, N. R.; Vick, S. G.; Viotti, C. B.; WATTS, B. D. *Fundão Tailings Dam Review Panel, Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*. 2016

Peck, R.B. *Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. State-of-the-Art Report. Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, 1969, 225-290

Pinto, C. S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Robertson, P.K., L.D. Melo, D.J. Williams, and G.W. Wilson. *Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I*. 2019

Silveira, J. F. A. *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 416 p.