

## Retroanálise do fluxo transiente do Dique Estaca 2 durante o enchimento do reservatório

Pablo Henrique Moreira

Engenheiro Geotécnico, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, [pablo.moreira@coc.ufrj.br](mailto:pablo.moreira@coc.ufrj.br)

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Professor Adjunto, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, [carminhacavalcanti@poli.ufrj.br](mailto:carminhacavalcanti@poli.ufrj.br)

Marcos Barreto de Mendonça

Professor Associado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, [mbm@poli.ufrj.br](mailto:mbm@poli.ufrj.br)

**RESUMO:** Este trabalho apresenta os resultados de retroanálises de percolação desenvolvidas para o Dique Estaca 2, com altura de 72 m, integrante do Complexo Hidrelétrico de Simplício, de propriedade de Furnas Centrais Elétricas, no rio Paraíba do Sul, entre os estados de RJ e MG. As retroanálises tiveram como objetivo ajustar parâmetros geotécnicos de permeabilidade e anisotropia, a partir da comparação dos resultados das análises transientes de fluxo em meios parcialmente saturados por elementos finitos, utilizando o módulo SEEP da Geoslope, com os valores registrados pela instrumentação durante e após o enchimento do reservatório. Foram identificadas discrepâncias entre os resultados das análises com parâmetros do projeto e os valores observados na instrumentação de campo. Destaca-se a mais rápida saturação da fundação e do núcleo da barragem, este último muito influenciado pela anisotropia gerada pelo processo de compactação do aterro que resultou em um coeficiente de permeabilidade horizontal dez vezes superior ao coeficiente de permeabilidade vertical. Ajustes nos parâmetros de permeabilidade permitiram simulações que melhor refletissem o comportamento da estrutura de barramento em estudo durante o avanço da frente de saturação, contribuindo para uma melhor compreensão do fluxo transiente. Desta forma, viabilizam-se projeções e verificações futuras mais realistas para nortear a tomada de decisões quanto a ações preventivas / corretivas com vistas à segurança da barragem e do vale a jusante a partir da instrumentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens, análises numéricas, percolação, instrumentação, retroanálise, permeabilidade.

**ABSTRACT:** This work aims to present the results of retro-percolation analysis developed for Dique Estaca 2, with a height of seventy-two meters, part of the Simplício Hydroelectric Complex, owned by Furnas Centrais Elétricas, on the Paraíba do Sul River between the states of RJ and MG. The retro analysis aimed to adjust the geotechnical parameters of permeability and anisotropy, based on the comparison of the results of transient flow analyses in media partially saturated media by finite elements, using Geoslope's SEEP module, with the values recorded registered by the instrumentation during and after the reservoir impounding. Some discrepancies between the results of the analyses with project parameters and the values observed in the field instrumentation were identified, such as the faster saturation of the foundation and dam's core, the latter greatly influenced by the anisotropy induced by the landfill compaction process, which resulted in a horizontal permeability ten times higher than the vertical permeability. Adjustments on the permeability parameters allowed simulations that better reflected the behavior of the structure under study during the advance of the saturation front, contributing to a better understanding of the transient flow and allowing for more realistic future projections and verifications to guide the decision-making processes regarding preventive/corrective actions to guarantee the dams and the downstream valley safety based on the instrumentation.

**KEYWORDS:** Dams, numerical analyses, Percolation, instrumentation, retro analysis, permeability.

## 1 INTRODUÇÃO

Redlinger (1999) e Gen et al (2024) observaram que a maioria das anomalias detectadas em estruturas de barramento envolvem problemas com a percolação de água. Dessa forma, dentre os parâmetros necessários ao projeto de barragens de terra, os coeficientes de permeabilidade dos materiais afiguram-se como um dos mais importantes, pois serão determinantes do comportamento do fluxo de água através do maciço e fundação.

Segundo Cruz (1996), assegurar o controle do fluxo através dos elementos que compõem a barragem é um princípio indispensável para garantir a sua segurança. Portanto, compreender o comportamento do fluxo que se estabelecerá no interior do maciço torna-se crucial (Casagrande, 1961), uma vez que as principais forças atuantes na barragem residem nas poropressões geradas dentro do maciço durante o processo de enchimento do reservatório. Essas poropressões desempenham papel significativo na redução da tensão efetiva, resultando, por conseguinte, na diminuição da resistência ao cisalhamento do solo.

A determinação da distribuição das poropressões pode ser efetuada através de análise de percolação utilizando elementos finitos. Os métodos numéricos são amplamente difundidos e utilizados para a determinação de redes de fluxo e, conseqüentemente, das poropressões, possibilitando a obtenção de bons resultados, sujeito à qualidade dos parâmetros adotados.

Retroanálises são comumente utilizadas para verificar os parâmetros dos materiais (Deschamps e Yankey, 2006), assim como para investigar falhas nas estruturas geotécnicas (Leonards, 1982). A associação de Retroanálise aos dados da instrumentação de monitoramento de uma barragem permite uma melhor compreensão do comportamento da barragem e avaliar possíveis comportamentos não previstos, conforme Oliveira et al (2022) e Ribeiro et al (2022). Diante de um comportamento anômalo, com base nos dados da instrumentação, é possível reavaliar a segurança da estrutura através de análises de percolação e de tensão x deformação, verificando os parâmetros utilizados na concepção da barragem (Fusaro, 2007).

O objetivo deste trabalho é, tomando como base o comportamento dos piezômetros durante o enchimento do reservatório, efetuar retroanálises para verificar se os parâmetros de projeto representam adequadamente o comportamento do fluxo no interior do maciço e, se necessário, efetuar ajustes nos mesmos, o que permitirá avaliar o desempenho da barragem baseado em características mais próximas das encontradas no campo.

## 2 ESTUDO DE CASO

### 2.1 Descrição geral do Dique Estaca 2.

O aproveitamento hidrelétrico de Simplício, implantado no rio Paraíba do Sul, na fronteira entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, engloba diversos canais, túneis, reservatórios e diques. O Dique Estaca 2, objeto de estudo do presente trabalho, tendo como função o fechamento de uma sela topográfica, consiste em uma estrutura de barramento de terra zoneada e enrocamento, apresentando comprimento de crista de 255 m e altura máxima de 75 m. A fundação do dique, no leito do córrego, numa faixa de aproximadamente 75m, é em topo rochoso. As ombreiras esquerda e direita têm fundação do núcleo central e espaldares de montante e jusante em colúvio/solo residual maduro e solo residual jovem. As figuras 1 apresenta, uma visão aérea do barramento já com o reservatório cheio.



Figura 1 – Vista aérea do Dique Estaca 2 (reservatório ao funfo). Fonte: Google Earth

## 2.2 Instrumentação do Dique Estaca 2

O projeto de instrumentação do Dique Estaca 2 foi composto de piezômetros de tubo aberto, medidores de nível d'água (MNA) e marcos superficiais (MS). Os MS foram instalados ao longo da crista e das bermas da barragem para acompanhar os deslocamentos pós construtivos e os MNA foram instalados nas ombreiras visando avaliar a alteração do nível frático no terreno natural. Os piezômetros de tubo aberto receberam a nomenclatura de PZA, quando instalados no corpo da barragem e PZFM, quando instalados na fundação. Os PZA, na sua maioria, foram instalados imediatamente acima do tapete drenante para acompanhar a efetividade da drenagem interna ao verificar o desenvolvimento de poropressões nesta região.

O plano de monitoramento da estrutura preconizava, para os piezômetros de medidores de NA, leituras diárias nos 3 primeiros meses após o início do enchimento do reservatório e, a partir de então, leituras semanais até o primeiro ano de operação, após o que as leituras passariam a mensais. Para os MS, após o primeiro ano de operação, as leituras passaram a ser anuais.

O presente estudo, por tratar-se de análise de fluxo, aborda apenas o comportamento dos piezômetros. A Figura 2 apresenta a localização dos instrumentos instalados nas seções B e E.

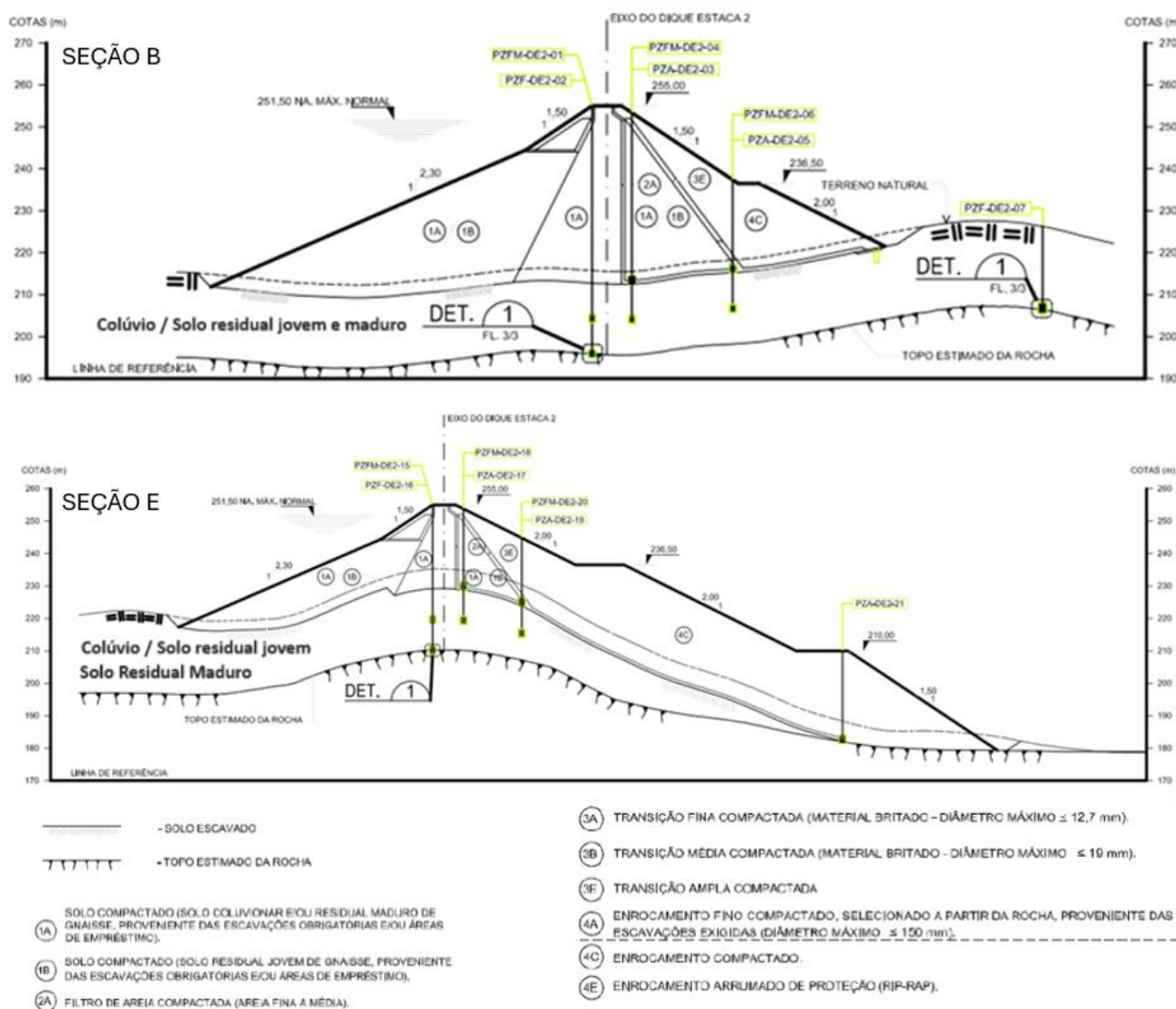


Figura 2 – Seções transversais B e E do Dique Estaca 2, respectivamente

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Malha de Elementos Finitos

Para a modelagem numérica por elementos finitos, foram utilizadas malhas com elementos triangulares e quadrados. A malha no paramento de montante, no núcleo e no filtro possui um tamanho global de 1,25m, no parâmetro de jusante 2,5m e para a rocha utilizou-se uma menor discretização com elemento do tamanho de 5 m. Desta maneira foi possível otimizar a composição sem prejudicar a convergência com elementos menores em áreas de maior interesse, conforme a Figura 3.

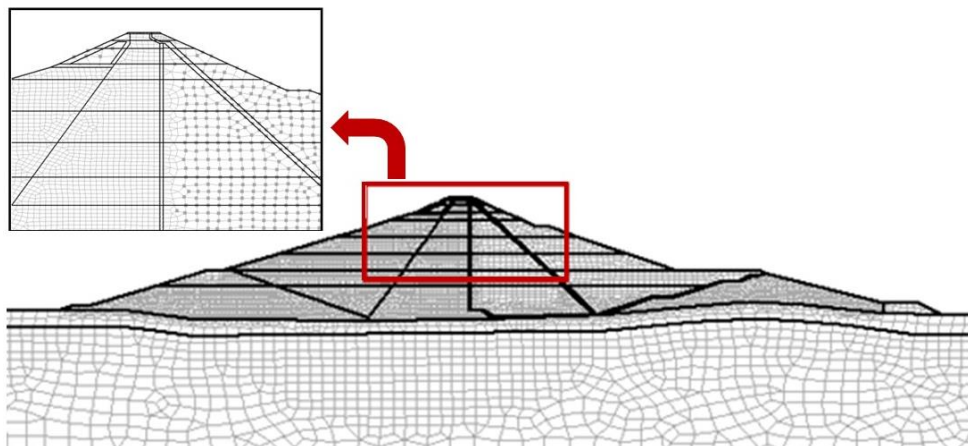


Figura 3- Malhas de elementos finitos utilizada no modelo numérico

#### 3.2 Parâmetros de permeabilidade e condições de contorno

Os parâmetros de condutividade hidráulica saturada adotados inicialmente foram os considerados nas análises de percolação do projeto, assim como as relações de anisotropia do aterro compactado, conforme Tabela 1. As curvas relativas à umidade volumétrica versus condutividade hidráulica não saturada, essenciais para as análises transientes, foram estabelecidas com base em padrões típicos conforme o tipo de material. Essa definição foi realizada utilizando a biblioteca de dados do software SEEP/W, o qual disponibiliza essas curvas consoante os tipos de solo e suas características levando em consideração a umidade residual e a umidade saturada.

As condições de contorno consideradas em ambas as análises incluíram o potencial associado ao nível d'água (NA) do reservatório (variável ao longo do tempo) e pressão zero na extremidade do tapete horizontal a jusante da barragem, onde o fluxo é livre. Além disso, foi considerado o nível freático na extremidade de jusante do modelo, juntamente com uma condição de contorno variável no dreno (poropressão > 0) / impermeável (poropressão < 0) em parte do talude a jusante da barragem.

Tabela 1 – Coeficientes de permeabilidade saturada de projeto ( $k_x$ : permeabilidade horizontal;  $k_y$ : permeabilidade vertical)

| Material da Barragem | $K_x$ (cm/s) | $K_y$ (cm/s) |
|----------------------|--------------|--------------|
| Aterro (1A)          | 4,00E-06     | 1,00E-06     |
| Aterro (1B)          | 4,00E-05     | 1,00E-05     |
| Enrocamento (3F)     | 10           | 10           |
| Transição (3A)       | 1            | 1            |
| Areia (2A)           | 1,00E-02     | 1,00E-02     |
| Colúvio              | 1,00E-04     | 1,00E-04     |
| Solo Residual Jovem  | 1,00E-03     | 1,00E-03     |
| Rocha Superficial    | 1,00E-04     | 1,00E-04     |
| Rocha Profunda       | 1,00E-05     | 1,00E-05     |

Na avaliação do fluxo transiente, o tempo constitui uma variável crucial, tornando essencial a determinação do intervalo abrangido pela análise, o número de fases e o espaçamento temporal entre elas. Conduziu-se uma análise transiente com uma duração de 722 dias, visando assegurar que, ao término da análise, o regime de fluxo tenha atingido a condição de estado estacionário ou permanente. A discretização temporal dos passos da análise foi estabelecida de forma exponencial, proporcionando uma análise mais minuciosa do processo no início, refletindo o procedimento de monitoramento da estrutura, totalizando 72 etapas.

### 3.3 COMPARATIVO DA ANÁLISE NÚMERICA COM A INSTRUMENTAÇÃO

As análises foram realizadas em duas seções da barragem (B e E), situadas nas ombreiras e com fundação no colúvio e no solo residual. Para comparação entre o modelo numérico e a instrumentação foi utilizado o banco de dados fornecido por Furnas com todos os instrumentos operacionais nas seções em análise.

A princípio foi avaliada a compatibilidade entre a instrumentação e o modelo, adotando-se os parâmetros de projeto, focando-se na formação da região de saturação, nas poropressões geradas e nas velocidades de geração da poropressão. Após esta análise avaliou-se outros dois cenários possíveis, considerando-se, no primeiro, redução da permeabilidade do colúvio e, no segundo, aumento da anisotropia dos materiais do aterro devido ao processo de compactação. Os parâmetros utilizados para as retroanálises são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de permeabilidade e anisotropia utilizado nas retroanálises de fluxo transiente ( $k_x$ : permeabilidade horizontal;  $k_y$ : permeabilidade vertical)

| Material da Barragem | Retroanálise 1 |           | Retroanálise 2 |           | Retroanálise 3 |           |
|----------------------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|
|                      | $K_y$ (cm/s)   | $K_x/K_y$ | $K_y$ (cm/s)   | $K_x/K_y$ | $K_y$ (cm/s)   | $K_x/K_y$ |
| Aterro (1A)          | 4,00E-06       | 4         | 4,00E-06       | 4         | 4,00E-06       | 10        |
| Aterro (1B)          | 4,00E-05       | 4         | 4,00E-05       | 4         | 4,00E-05       | 10        |
| Enrocamento (3F)     | 10             | 1         | 10             | 1         | 10             | 1         |
| Transição (3A)       | 1              | 1         | 1              | 1         | 1              | 1         |
| Areia (2A)           | 1,00E-02       | 1         | 1,00E-02       | 1         | 1,00E-02       | 1         |
| Colúvio              | 1,00E-04       | 1         | 1,00E-03       | 1         | 1,00E-04       | 1         |
| Solo Residual Jovem  | 1,00E-03       | 1         | 1,00E-03       | 1         | 1,00E-03       | 1         |
| Rocha Superficial    | 1,00E-04       | 1         | 1,00E-04       | 1         | 1,00E-04       | 1         |
| Rocha Profunda       | 1,00E-05       | 1         | 1,00E-05       | 1         | 1,00E-05       | 1         |

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados referentes à seção B

Na seção B, conforme indicado no plano de instrumentação, havia sete piezômetros destinados ao monitoramento dessa região (Figura 2). Contudo, os dois piezômetros planejados para a região central do núcleo não foram efetivamente instalados. Os instrumentos PZA-DE2-03 e PZA-DE-05, instalados no tapete drenante, com o propósito de verificar o adequado funcionamento do sistema de drenagem interna, conforme esperado, permaneceram secos ao longo de todo o período analisado. O PZFM-DE2-07, apesar de instalado na fundação a jusante do barramento, não registrou qualquer alteração nas leituras, mantendo-se seco, indicando que essa região da fundação não foi saturada durante o enchimento do reservatório ou que o instrumento pode ter apresentado alguma anomalia, impedindo a detecção de possíveis variações no nível d'água.

A Figura 4 exibe os dados referentes às cotas piezométricas do PZFM-DE2-04 para cada retroanálise realizada. Observa-se que as taxas de variação das poropressões durante o enchimento das três retroanálises são próximas às indicadas pelas leituras do instrumento, embora haja variação na magnitude das leituras e nas datas de saturação. No presente caso, a retroanálise 1, com os parâmetros de projeto, revelou-se a mais próxima dos resultados desejados. No entanto, é importante observar que todas as análises representam de forma aproximada as leituras da instrumentação.

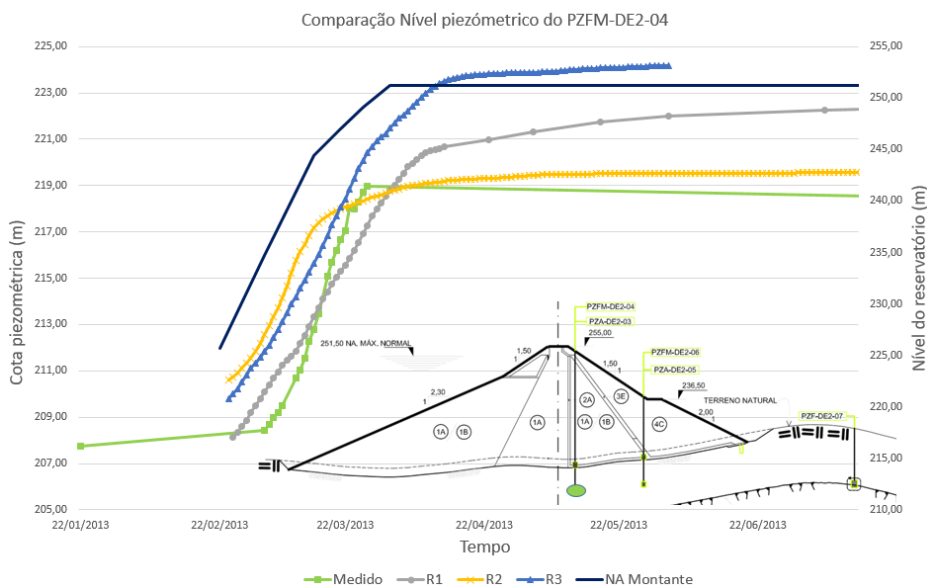


Figura 4- Comparação das cotas piezométricas medidas e das retroanálises realizadas do PZFM-DE2-04 com posição do ponto de medição em verde (seção B)

No que diz respeito ao PZFM-DE2-06, as análises demonstram comportamentos consideravelmente discrepantes, como evidenciado pela Figura 5. A retroanálise 2, na qual a permeabilidade do colúvio é considerada mais elevada, apresenta desempenho melhor em termos da velocidade de avanço da frente de saturação, entretanto, não gerou poropressões condizentes com as medidas. Observa-se a ocorrência de um problema com o piezômetro que levou à paralisação de suas medições durante o enchimento. Apesar da interrupção na medição das poropressões pelo piezômetro, os resultados indicam que a retroanálise 3 foi a que apresentou melhor concordância com o campo.

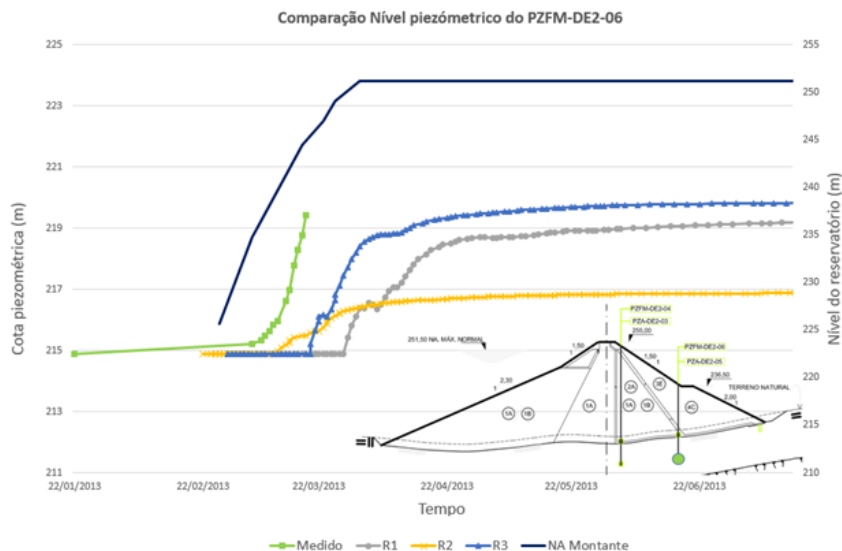


Figura 5- Comparação das cotas piezométricas medidas e das retroanálises realizadas do PZFM-DE2-06 com posição do ponto de medição em verde (seção B).

## 4.2 Resultados referentes à seção E

A Seção E possui três piezômetros, sendo o PZA-DE2-17 e o PZA-DE2-21 localizados no sistema de drenagem interna, enquanto o PZFM-DE2-18 está instalado na camada de colúvio subjacente à fundação da barragem. Os demais instrumentos previstos para a seção não foram instalados conforme evidenciado na Figura 2. Os piezômetros alocados no sistema de drenagem, PZA-DE2-17 e PZA-DE2-21, permaneceram secos durante todo o período de enchimento e operação, conforme esperado para a região, o que também foi observado nas análises numéricas.

O PZFM-DE2-18 apresentou variações que permitiram a comparação do seu comportamento e velocidade de saturação com os resultados provenientes da modelagem numérica do fluxo transiente. Os resultados das cotas piezométricas medidas e geradas no modelo nas três análises são apresentados no Figura 6, juntamente com a variação do NA do reservatório.

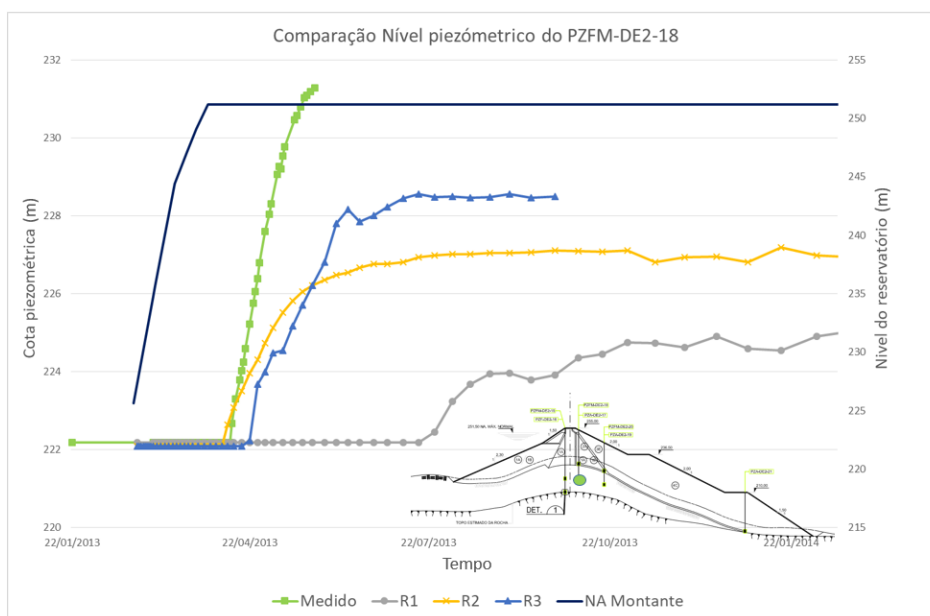


Figura 6- Comparação das cotas piezométricas medidas e das retroanálises realizadas do PZFM-DE2-18 (indicação da posição do ponto de medição em verde).

Observa-se que, os resultados da retroanálise 1, com os parâmetros de projeto, diferem significativamente do comportamento da instrumentação de campo, que indica uma demanda de aproximadamente 100 dias para iniciar a saturação na região do ponto de medição do instrumento. No caso da retroanálise 2, os resultados de velocidade de saturação são praticamente concordantes. No entanto, as poropressões do modelo numérico revelaram-se consideravelmente inferiores às leituras do instrumento, atingindo um valor máximo de 50 kPa. Quanto à retroanálise 3, esta apresentou uma data de saturação próxima à da instrumentação de campo, com um atraso de aproximadamente 3 dias, e as poropressões mostraram-se mais compatíveis, alcançando 65 kPa.

## 5 CONCLUSÃO

Mesmo com as três retroanálises realizadas não foi possível obter exatamente os mesmos resultados da instrumentação, o que em parte pode ser explicado pela consideração bidimensional de fluxo transversal, de montante para jusante, quando nas ombreiras existe também fluxo longitudinal; havendo ainda a possibilidade da presença de feições geológicas com permeabilidade mais elevada não identificadas durante o processo de investigação realizado. Não obstante, pode-se dizer que retroanálise que apresentou melhor compatibilidade levou em consideração uma maior anisotropia no aterro, o que pode acontecer devido ao processo de compactação durante a construção e explica o comportamento apresentado pela instrumentação.

As conclusões derivadas dos resultados da simulação numérica do enchimento do reservatório confirmaram a possibilidade de obtenção de parâmetros geotécnicos mais ajustados a realidade e uma melhor antecipação do comportamento da instrumentação, desempenhando um papel fundamental no monitoramento geotécnico da estrutura. Com os parâmetros otimizados, torna-se possível determinar com maior precisão os valores de controle para a instrumentação em análises de estabilidade, proporcionando assim uma maior confiabilidade na avaliação da segurança da estrutura e maior previsibilidade em eventuais intervenções de manutenção corretiva, quando necessárias.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Furnas pela disponibilização dos dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Redlinger, C. *NPDP Summary of Incidents*. ICODS Dam Safety Technical Seminar Proceedings, Federal Emergency Management Agency Emergency Management Institute, pp. 21-50, Feb. 17-19, 1999.
- Gee, N., Baker, M., Mauney, L., Hotchkiss, R.H., *Analysis of Dam Failure and Incident Investigations in the United States from 1960 through 2022: Framework for Improving Future Investigations*. Journal of Water Resources Planning and Management, Volume 150, Issue 3, <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6181>.
- Cruz, P. T. (1996) *100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção e Projeto*. Oficina de Textos, 1996.648p. São Paulo.
- Casagrande, A. (1961) *Control of seepage through foundations and abutments of dams*. Geotechnique, 11(3), 161–182
- Deschamps R, Yankey G (2006) Limitations in the back-analysis of strength from failures. ASCE J Geotech Geoenvironmental Eng 132(4):532–536.
- Leonards, G.A. (1982) *Investigation of failures*. ASCE J Geotech Eng Div 108(2):185–246
- Oliveira, F. W. A., Mendonça, M. B., Cavalcanti, M. do C.R., Gomes, R. C.(2022) *Análise de fluxo de uma barragem de terra com avaliação dos efeitos de colmatação do sistema de drenagem por ocre*. Revista brasileira de engenharia de barragens, Ed. 13 , Tema 7, Brasil.
- Ribeiro, D. R., Leal J. R.,(2022) *Calibração de modelos geológico-geotécnico por meio de interpretação de dados de instrumentos de auscultação*. Revista brasileira de engenharia de barragens, Ed. 13 , Tema 1, Brasil.
- Fusaro, T. C. (2007), *Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau*. Dissertação de Mestrado Profissional, Universidade Federal de Ouro Preto, 174 p.