

Retroanálise do fluxo de água pela fundação da barragem do Anel Dom Marco – ajuste de parâmetros

Luigi Nascimento Pelizzoli, Mestrando

Eng. Geotécnico, PPGCI/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, luigipelizzoli@gmail.com

Luiz Antônio Bressani, PhD

Eng. Geotécnico, BSE Engenharia Geotécnica e Ambiental, Porto Alegre, Brasil, labressani@gmail.com

RESUMO: O estudo apresentado descreve a retroanálise do fluxo pela fundação de uma barragem de concreto, barragem do Anel Dom Marco, situada em Rio Pardo / RS, destacando os ajustes de parâmetros como permeabilidade, incluindo a anisotropia, das rochas da fundação. A pesquisa teve como foco principal a necessidade de entender o comportamento hidrogeológico da fundação após a recuperação realizada seguindo um incidente de retroerosão (*piping*) ocorrido na década de 1970. A análise descrita aqui utilizou um modelo computacional do entorno do Pilar 5 da barragem, desenvolvido a partir de dados coletados por meio de piezômetros e observações dos drenos instalados na fundação da barragem. Os resultados indicam que os drenos instalados foram (e são) cruciais para reduzir as subpressões da região, mostrando uma eficiência de redução das poropressões entre 60 e 70%, quando operando plenamente. A modelagem e os ajustes dos parâmetros permitiram calibrar o modelo numérico com bastante precisão aos dados de campo, permitindo uma compreensão mais abrangente da permeabilidade e das anisotropias da fundação da barragem, essenciais para o controle e verificação da segurança a longo prazo da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Percolação, Rochas Brandas, Anisotropia, *Piping*, Fundação de Barragem.

ABSTRACT: The study presented in the file examines the back-analysis of flow through the foundation of a concrete dam, highlighting parameter adjustments such as permeability and the anisotropy of the foundation rock. The research was motivated by the need to better understand the hydrogeological behavior of the dam after a piping incident that occurred in the 1970s. The analysis involved the use of a computational model of Pillar 5 of the Anel Dom Marco Dam, located in Rio Pardo / RS, developed from data collected through piezometers and observations of the drains installed in the dam's foundation. The results indicate that the drains are crucial for reducing subpressures, with an effectiveness of reduction between 60 and 70% when fully operational. The modeling and parameter adjustments allowed for precise calibration of the model to the observed reality, providing insight into the permeability and anisotropy of the dam's foundation, essential for the long-term safety of the structure.

KEYWORDS: Percolation, Soft Rocks, Anisotropy, Piping, Dams Foundation.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a segurança e o monitoramento de barragens são preocupações constantes devido ao histórico de acidentes tanto nacionais quanto internacionais. Este artigo apresenta o estudo de uma barragem de regularização da navegação, localizada no rio Jacuí no município de Rio Pardo, a aproximadamente 167 km de Porto Alegre, no centro-leste do Estado do Rio Grande do Sul (barragem do Anel de Dom Marco). A estrutura de gravidade é de concreto e possui 04 vãos móveis superiores centrais e 02 vertedouros fixos em suas extremidades.

A estrutura possui 220 metros de comprimento e tem uma altura máxima de 13,25 metros. Uma galeria de inspeção se estende ao longo de toda a barragem, acessível através de poços localizados nos três principais pilares. A fundação da barragem está apoiada no nível basal da Formação Estrada Nova, constituída por uma camada de folhelhos que varia de cinza esverdeado a cinza chumbo, com horizontes locais de material siltico e arenoso que, em alguns pontos, transicionam para siltitos e arenitos argilosos de cor avermelhada.

Após um incidente de *piping* da fundação log a jusante da barragem, em 1973, um sistema de monitoramento foi implementado, incluindo 16 piezômetros, sendo 5 deles mais profundos. Além disso, um

sistema de drenagem da fundação foi estabelecido, consistindo de 67 drenos subverticais e inclinados que penetram de 3 a 4 metros na rocha, a partir da parede de jusante da galeria.

É bem estabelecido que a heterogeneidade dos maciços rochosos afeta a distribuição das pressões hidrostáticas e das forças de percolação, com as linhas equipotenciais concentrando-se nas áreas menos permeáveis. Os maciços rochosos sedimentares apresentam características naturais de heterogeneidade (geralmente vertical), anisotropia de permeabilidade e descontinuidades, com ou sem preenchimentos. Isto é mais muito salientado nas rochas brandas, pelo nível de alteração, e a escala dos problemas pode determinar o grau de heterogeneidade e anisotropia percebido/avaliado. Estratificação (processo de formação) e diaclasamento (tectônica) são as principais características geológicas que impactam na avaliação do fluxo e na segurança das barragens sentido.

Infelizmente os dados disponíveis de projeto, relativos à permeabilidade da rocha de fundação, são escassos, em parte porque que a estrutura já tem mais de 50 anos e sua propriedade foi alterada ao longo dos anos. Assim, os autores realizaram uma coleta dos materiais disponíveis (relatórios de obra, fotos de recuperação, dados da instrumentação, etc.) para desenvolver um modelo computacional de fluxo. Baseando-se nas leituras dos instrumentos e nas vazões observadas nos drenos, este artigo apresenta o modelo do Pilar 5, em que foi ajustado o comportamento hidrogeológico para determinar valores representativos de permeabilidade e anisotropia da fundação do entorno.

2 BREVE HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DA BARRAGEM DO ANEL DOM MARCO

A Barragem do Anel Dom Marco está situada em Rio Pardo, a 167 km de Porto Alegre, no centro-leste do Rio Grande do Sul, conforme ilustrado na Figura 1. Esta barragem é parte da hidrovia do Rio Jacuí, criando um remanso até a barragem de Fandango em Cachoeira do Sul. Foi concluída em 1972 pelas entidades DNPVN e Portobrás, com o propósito de regularizar a vazão do rio, especialmente em períodos de seca, para garantir o funcionamento da eclusa do sistema do Anel Dom Marco. Atualmente, é operada pela Administração das Hidrovias do Sul (AHSUL).

A estrutura de concreto tem 220 metros de comprimento, 13,25 metros de altura, e é composta por 04 vãos móveis centrais e dois vertedouros fixos. Uma galeria de visita acessível por poços nos três pilares maiores percorre toda a extensão da barragem, que cria um desnível de 7,50 metros, superado por uma eclusa em um canal dragado, facilitando a navegação e evitando um meandro de aproximadamente 8 km. A barragem é segmentada em 14 blocos, incluindo pilares principais e intermediários, além de trechos variados, conforme descrito nas figuras correspondentes. A Figura 1 ilustra a localização e o esquema construtivo da Barragem do Anel Dom Marco.

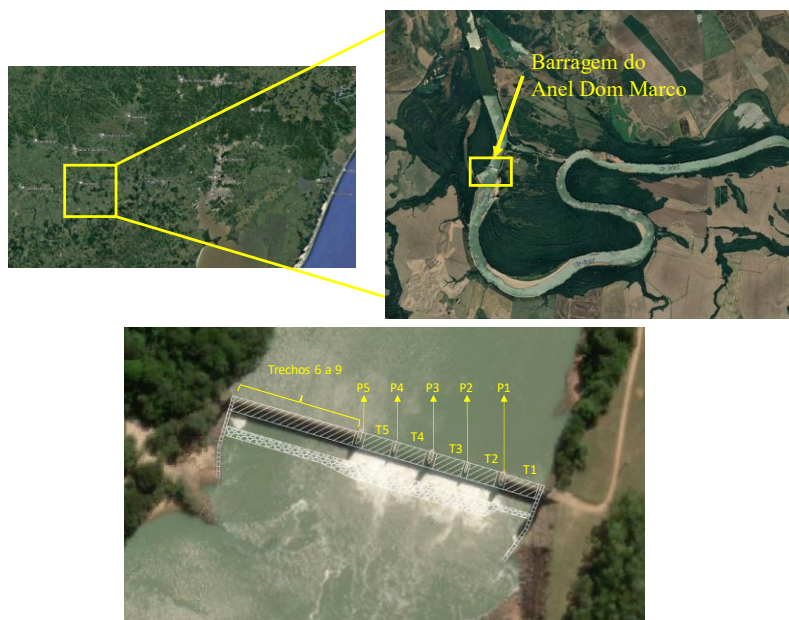


Figura 1. Localização e esquema construtivo da barragem do Anel Dom Marco.

As obras de recuperação da barragem foram organizadas em duas fases principais. Na primeira etapa, como medida emergencial para prevenir o rompimento, foram reforçadas as estruturas por atirantamento, a partir da galeria de visita, com tirantes de barra com profundidades de ancoragem entre 16,5m e 19,5m abaixo do piso da galeria e inclinações de 10° a 15°. Paralelamente, um sistema de drenagem foi instalado, incluindo 67 drenos que penetraram de 3 a 4m na rocha de fundação a partir da parede de jusante da galeria. Adicionalmente, foi estabelecido um sistema de monitoramento utilizando piezômetros e pêndulos invertidos, compreendendo 16 piezômetros no contato entre o concreto e a rocha, sendo 5 profundos e 11 rasos.

Para restaurar a barragem estruturalmente, foram instalados 135 tirantes de cabo, tanto verticais quanto inclinados para montante, com um comprimento médio de 20 metros, ancorados abaixo do plano de movimentação e ao longo da parede montante da galeria. Foram também realizadas sondagens de amostragem completa na área do radier de concreto e um mapeamento geológico detalhado das principais fendas longitudinais da fundação. Durante as observações, identificou-se o contato entre dois litotipos distintos na El. 2,0 m (cota absoluta), sendo um siltito micáceo arenoso de cor avermelhada, com intercalações de lentes de arenito calcífero, sobreposto por um folhelho verde argiloso, com camadas arenosas e conglomeráticas. Também foram observadas estrias de fricção e pequenos deslocamentos entre blocos ao longo de falhas. As estruturas danificadas foram reparadas e a barragem retomou sua operação em 1974.

A partir da descrição do ocorrido a Tabela 1 apresenta os tipos de análises de fluxo realizadas para este estudo. Embora os instrumentos ainda estejam presentes na estrutura, as leituras foram interrompidas desde a estabilização satisfatória da barragem, conforme recomendação dos consultores naquela época. Com os dados fornecidos foi possível calibrar o modelo com certa acurácia, e após, extrapolar-lo para os dias atuais, buscando analisar o comportamento de fluxo do Pilar 5.

Tabela 1. Tipos de análises executadas neste trabalho.

Bloco	Piezômetro	Dreno	Tipo	Data
Pilar 5	PZ12	1, 2, 3	Leitura de Campo	1975, 1978
			Modelo c/ dreno	1975, 1978, 2001 a 2019
	PZ13		Leitura de Campo	1975, 1978
			Modelo c/ dreno	1975, 1978, 2001 a 2019

Nota-se, primeiramente, que as análises das sondagens e piezômetros sugerem a possível existência de canais de drenagem ou zonas de fraturas na rocha, que podem estar contribuindo para as surgências de água observadas na estrutura. Em particular, foi observado um aumento na infiltração de água numa zona localizada imediatamente abaixo da galeria de visita. Além disso, a presença de fragmentos de rocha e lama observados dentro da barragem (logo após o incidente) sugere uma potencial comunicação entre a galeria da barragem e a rocha de fundação, bem como a existência de falhas ou juntas que poderiam estar facilitando o caminho da água. A Figura mostra algumas das situações descritas nos relatórios de recuperação pós-incidente de 1973. Neste artigo não será feita uma descrição mais detalhada da fundação (ver Pelizzoli, 2024).

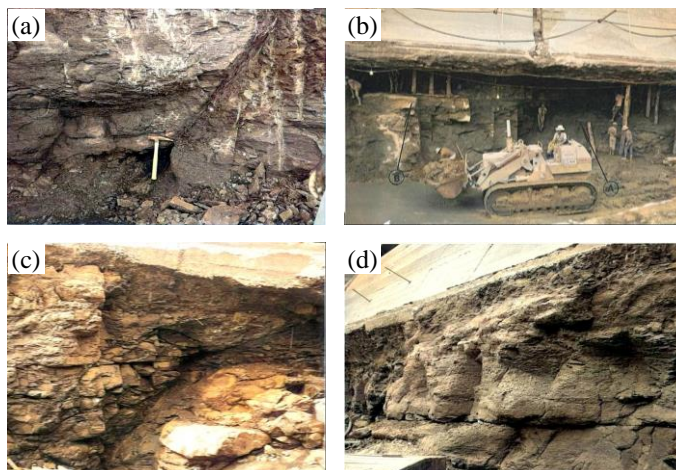


Figura 2. (a) Cavidade formada por percolação de água através da rocha de fundação da barragem; (b) Avanço da erosão segundo uma zona falhada sob a fundação de um dos trechos; (c) Erosão em um dos locais

em que a fratura horizontal intercepta uma das falhas inclinadas; (d) Plano com intenso fraturamento da rocha, por secagem, ao longo das superfícies expostas.

Neste estudo a estratigrafia foi revisada com base nas sondagens realizadas em cada bloco da estrutura durante o período de reforços necessários após o incidente. Um total de 43 sondagens foi analisado, abrangendo a maior parte da fundação do barramento, que é o foco principal deste trabalho. A Figura 3 mostra uma seção estratigráfica simplificada obtida a partir dessas sondagens (este estudo), com uma vista frontal da estrutura. A seção do Pilar 5 é indicada na figura.

Apesar do número significativo de sondagens, persistem alguns desafios na interpretação, especialmente no que se refere à anisotropia da fundação. Essas sondagens foram avaliadas em conjunto com as escavações realizadas a jusante. Foram encontradas poucas discontinuidades nas sondagens, e não foram obtidas imagens dos testemunhos coletados, o que prejudicou a análise dos materiais e uma interpretação mais precisa da fundação atual. A análise conjunta das fotografias das escavações na base da estrutura a jusante (como aquelas da Figura 2) possibilitou uma compreensão melhor da anisotropia da fundação e de como isso influenciou no incidente, destacando também os locais de *piping* observados.

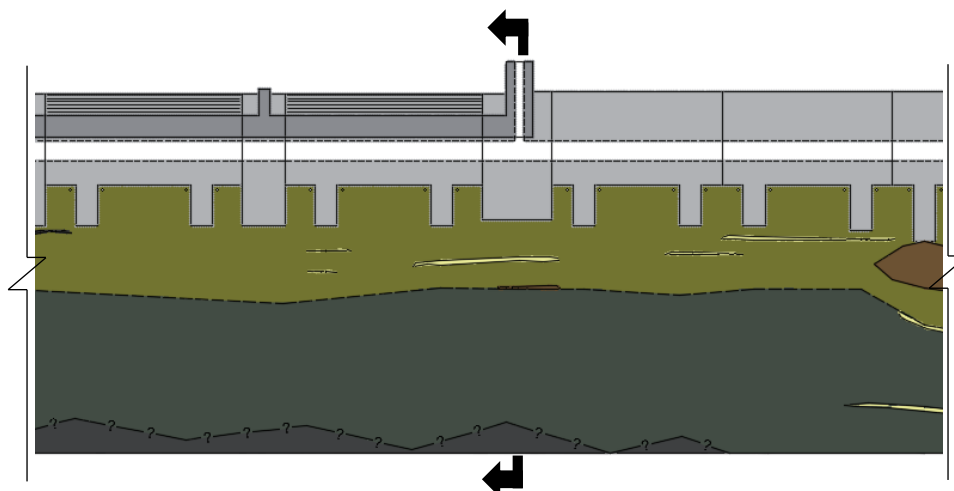


Figura 3. Vista frontal de montante para jusante com indicação da seção do Pilar 5.

Para a determinação da vazão específica dos drenos, utilizou-se a média dos valores medidos nos drenos instalados no Pilar 5, buscando refletir as condições reais de drenagem. Considerou-se, igualmente, os níveis médios de água a montante e a jusante, que são críticos para a análise do fluxo de água através da fundação da barragem e para avaliar o impacto potencial sobre a estabilidade da estrutura. As dimensões e as cotas de instalação dos drenos foram definidas com base nos desenhos dos projetos. A Tabela 2 mostra os valores máximos, mínimos, médios e desvio padrão das leituras dos piezômetros para os anos de 1975 e 1978, enquanto a Tabela 3 mostra os valores de vazões médias, desvio padrão e vazão específica para o Pilar 5.

Tabela 2. Cargas máximas, médias e mínimas para o Pilar 5.

1975		1978					Dif. méd.			
Carga média (m.c.a.)	Cota local (m)	Carga máx.	Carga mín.	Desv. Pad.	Carga média (m.c.a.)	Cota local (m)		Carga máx.	Carga mín.	Desv. Pad.
8,68	2,68	10,59	7,33	0,72	8,60	2,60	11,08	7,39	0,89	60,5%

Tabela 3. Médias e desvios padrão das vazões dos drenos do Pilar 5.

Vazão Média (cm ³ /s)	Vazão Média (l/s)	Desvio Padrão (l/s)	Vazão Esp. (l/s/m)
3,14	3,14E-03	3,39E-03	4,81E-04

3 MODELAGEM E AJUSTE DOS PARÂMETROS

Na fase inicial, o trabalho foi conduzido com a aplicação de modelagem de fluxo permanente, utilizando dados coletados no ano de 1975. Esta modelagem foi enriquecida pela adoção de uma série de valores específicos para permeabilidade e anisotropia, detalhados adiante, que são fundamentais para entender o comportamento hidrogeológico da estrutura sob estudo.

O processo incluiu a elaboração de seções geológico-geotécnicas detalhadas, que foram derivadas a partir de análises cuidadosas das sondagens disponíveis e das inspeções de campo realizadas durante o período em que a estrutura foi reforçada, englobando a análise da estrutura de concreto em si. Isso permitiu uma compreensão mais profunda das características hidrogeotécnicas, essenciais para a modelagem.

Além disso, estabeleceram-se valores fixos de permeabilidade para os materiais que, embora não estejam diretamente ligados à camada de fundação principal em estudo, influenciam o comportamento geral do sistema de fluxo na área analisada. Na modelagem da barragem do Anel Dom Marco, a definição da geometria e estratigrafia da fundação foi baseada nos desenhos do projeto e na coleta de documentos "*as built*". As sondagens feitas durante o reforço da estrutura foram revisadas e as seções geológico-geotécnicas recriadas usando o *software* AutoCad 2D.

Os dados de anisotropia da fundação foram adquiridos com o auxílio do *software* Seep/w, ajustando-se conforme as condições de contorno em relação ao Pilar 5 com base nas variações históricas dos níveis de água do reservatório a montante e jusante, e o ajuste da curva foi calibrado nos pontos de leitura dos níveis das séries através do *software* mencionado. A Tabela 4 apresenta os valores de permeabilidade utilizados no modelo.

Tabela 4. Valores de permeabilidade utilizados para calibração dos modelos.

Material	Permeabilidade (m/s)	Relação k_y/k_x	Fonte
Concreto Convencional (CCV)	1×10^{-14}	1	Filho (2005)
Concreto Compactado a Rolo (CCR)	1×10^{-10}	1	Filho (2005)
Enrocamento	1×10^{-3}	1	Nieble (2021)
Areia grossa	1×10^{-4}	1	Nieble (2021)
Areia fina	1×10^{-5}	1	Nieble (2021)
Arenito calcáreo	1×10^{-5}	1	Meyer (2002)
Siltito	1×10^{-8}	1	Clavaud <i>et al.</i> (2008)
Folhelho	1×10^{-8}	Var.	Clavaud <i>et al.</i> (2008)

A Tabela 5 apresenta os valores aplicados no modelo para as análises transientes feitas posteriormente e o comparativo entre os valores medidos e simulados. Para a anisotropia da camada de folhelho obteve-se o valor k_y/k_x de 0,6. Já para o ajuste da curva obteve-se o valor de 100%, indicando que, para este bloco, o instrumento calibrado apresentou uma resposta condizente com os desníveis de NA de montante e jusante da estrutura.

Tabela 5. Valores utilizados para calibração dos modelos para o *software* Seep/w.

Instrumento de Referência	NA Montante [m]	NA Jusante [m]	Valores de referência (1975)			Valores simulados			
			Valor de fluxo aplicado no dreno [m ³ /s/m ²]	Valor medido máx. [m]	Valor medido mín. [m]	Valor medido méd. [m]	Carga da Pressão de Água [m]	Relação k_y/k_x	Valor de ajuste da curva
PZ12 - P5	13,86	9,75	$2,01 \times 10^{-4}$	10,59	7,33	8,68	8,64	0,6	100%

4 RESULTADOS OBTIDOS

As Figuras 4 a 7 apresentam os resultados obtidos a partir das análises de fluxo bidimensional transiente com a aplicação dos valores adotados na calibração do modelo. Analisou-se o Pilar 5 nos moldes citados anteriormente, procurando-se aproximar os valores simulados aos valores medidos. A Figura 4 ilustra a seção

de análise e as linhas equipotenciais, as Figuras 5 e 6 os valores medidos *versus* simulados, e a Figura 7 o r^2 obtido da análise do PZ12 e do PZ3 no ano de 1975, de acordo com dados fornecidos.

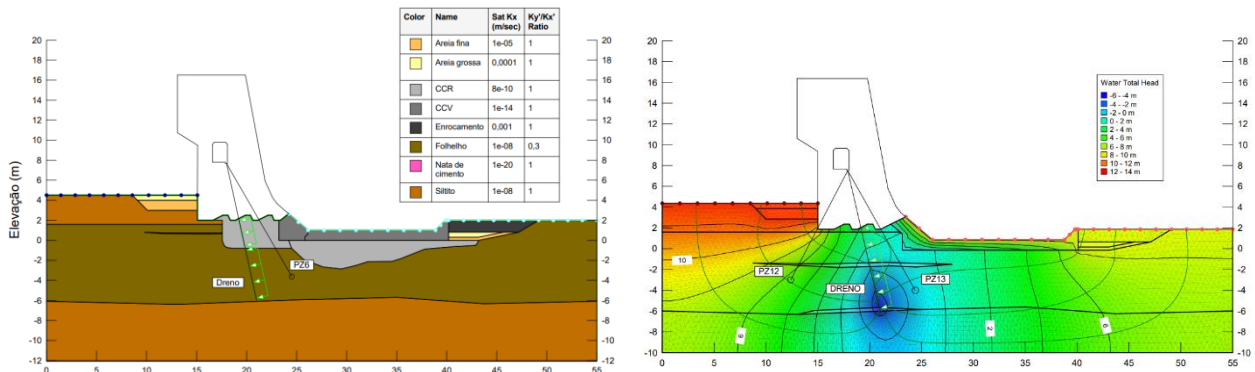


Figura 4. Seção modal no Seep/w e resultado do regime das linhas equipotenciais.

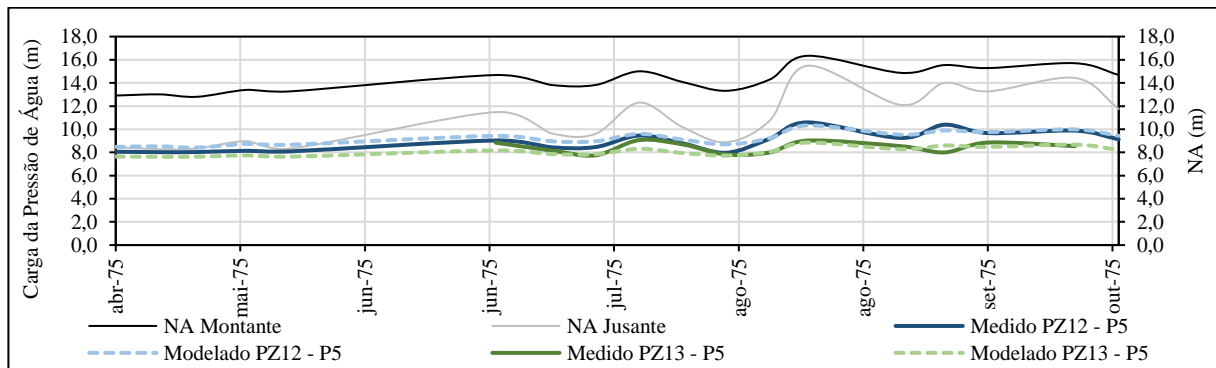


Figura 5. Leituras medidas x simuladas para o ano de 1975.

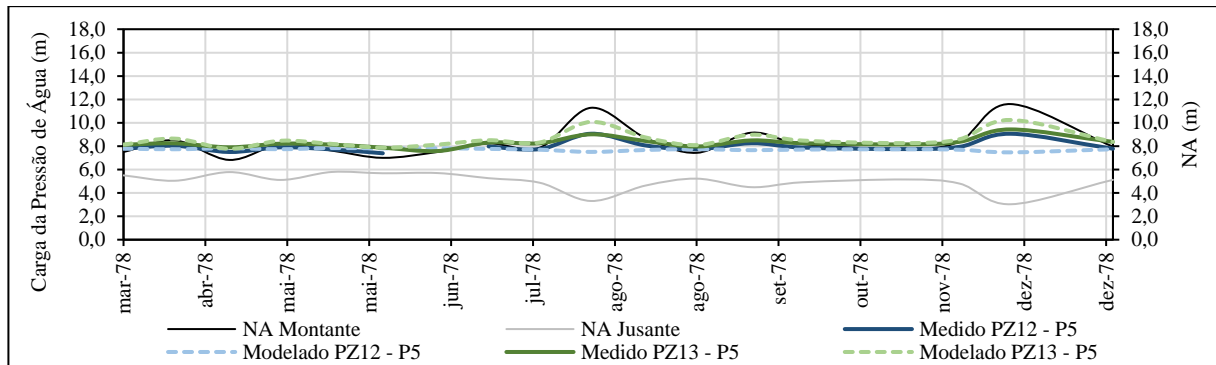


Figura 6. Leituras medidas x simuladas para o ano de 1978.

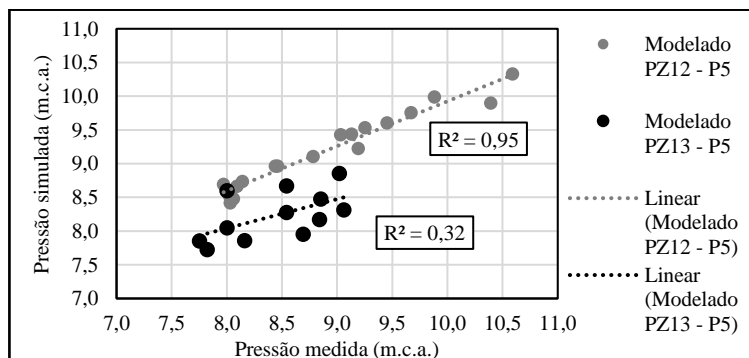


Figura 7. Correlação entre cotas piezométricas medidas e simuladas.

As análises mostram uma diminuição nas subpressões, especialmente ao analisar o desempenho dos drenos antes e após as obras de recuperação. Esses drenos são reconhecidos como instrumentos vitais para a extensão da vida útil da estrutura, devido à sua capacidade de reduzir as pressões de forma geral, abrangendo tanto as subpressões quanto as reduções nos fluxos críticos.

A verificação de aproximação dos valores simulados aos medidos deu-se a partir do método estatístico da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - *Root Mean Squared Error*), conforme ilustrado na equação 1, a qual representa uma evolução do cálculo do Erro Quadrático Médio (MSE), incorporando a mesma fundamentação de penalizar disparidades significativas entre os valores previstos e os valores reais observados (BRUCE, 2019).

$$RMSE(y, \hat{y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

Assim, a interpretação do RMSE é similar à do MAE: um RMSE de 1,0 m sugere que, em média, as estimativas do modelo podem divergir do valor real em até 1,0 m, para mais ou para menos. Esta análise se aplica a cada seção e em cada situação observada, considerando os períodos relevantes. A Tabela 5 mostra os valores obtidos de r^2 , r e RMSE para os piezômetros modelados.

Tabela 5. Valores dos erros obtidos para os resultados das calibrações dos modelos.

Bloco	r^2	r	RMSE
Pilar 5 - PZ12 (1975)	95%	0,97	0,09 m
Pilar 5 - PZ13 (1975)	32%	0,57	0,13 m

A extrapolação do modelo foi realizada após a obtenção de valores estatisticamente representativos e adequados, comparados aos valores observados. Para alimentar o modelo, foram utilizados os níveis de água a montante e a jusante durante o período mencionado, resultando na obtenção dos níveis de poropressão como saída do modelo.

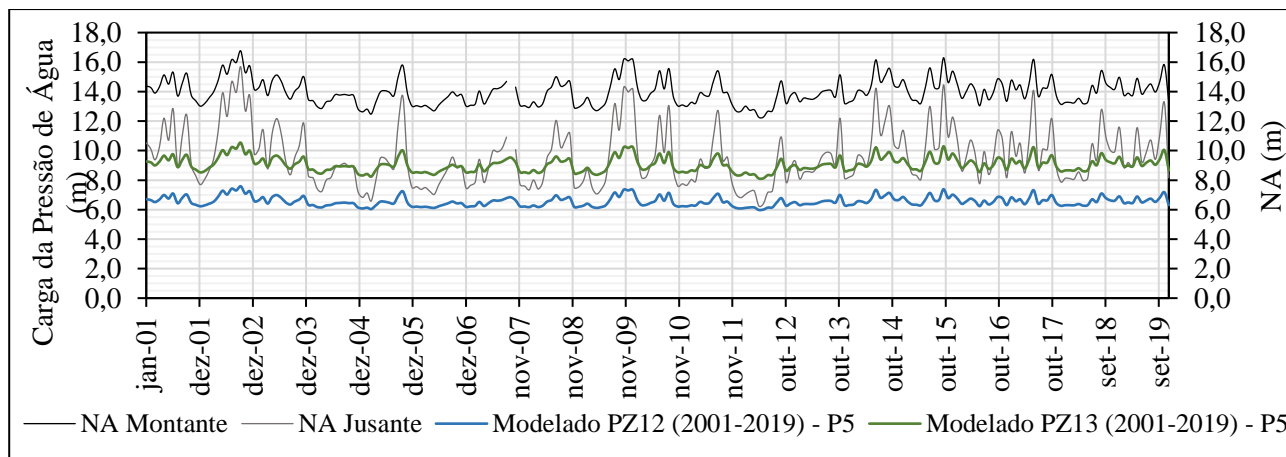


Figura 8. Resultado dos dados modelados para os anos entre 2001 e 2019.

Os dados apresentados destacam uma diminuição significativa das subpressões em análises que consideram a operação dos drenos, especialmente nos períodos antecedentes e subsequentes às intervenções de recuperação. É reconhecido que esses drenos desempenham um papel crucial na extensão da vida útil da estrutura devido à sua eficácia em reduzir as pressões de maneira ampla, abrangendo tanto as subpressões quanto a diminuição dos fluxos críticos. Conforme ilustrado na Figura 9, observa-se que os drenos da barragem são capazes de reduzir as subpressões em aproximadamente 60 a 70%, quando em pleno funcionamento.

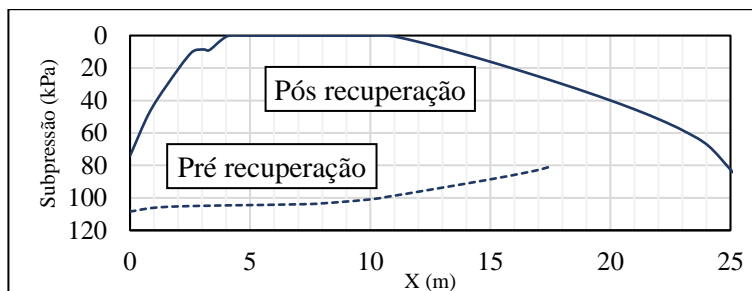


Figura 9. Resultados de subpressão na barragem e radier para diferentes condições de obra (dados de 1975).

5 CONCLUSÃO

As principais conclusões incluem a observação de que as variações nas pressões piezométricas são pequenas, indicando que a drenagem está sendo efetivamente realizada. Também foram identificados caminhos de drenagem ou descontinuidades na fundação da barragem, evidenciados por surgências de água em pontos específicos. Adicionalmente, algumas infiltrações estão possivelmente relacionadas à presença de calcita em fendas e cavidades, um mineral que se dissolve facilmente em água e pode estar contribuindo para estes eventos.

A análise dos dados revela uma tendência generalizada de diminuição na vazão dos drenos, o que sugere a possível colmatção desses elementos em quase todos os blocos monitorados. Esse fenômeno está documentado na literatura sobre elementos drenantes, especialmente no que se refere a rochas sedimentares fraturadas. Há também a possibilidade de que as próprias fraturas nas rochas estejam sendo colmatadas pelo material fino transportado.

A manutenção dos elementos drenantes é crucial para a extensão da vida útil da estrutura. Foi notória a diminuição das vazões devido à colmatção física ou à ação de ferrobactérias. Considerando a redução de cerca de 60% nas subpressões, ocasionada pelos elementos drenantes, estes se mostram essenciais para a estabilidade da barragem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UFRGS pelo ambiente proporcionado para o desenvolvimento dos estudos, e ao Eng. Cleber Floriano da SF Engenharia Diferenciada, juntamente à Magna Engenharia pelo auxílio na obtenção dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bruce, P.; Bruce, A. (2019) *Estatística prática para cientistas de dados: 50 conceitos essenciais*. 1ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Alta Books.
- CLAVAUD, J. B. *et al.* (2008) *Permeability anisotropy and its relations with porous medium structure*. Journal of Geophysics Research, v. 113.
- Marques Filho, J. (2005) *Maçãos experimentais de laboratório de concreto compactado com rolo aplicado às barragens*. 2005. 247p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- Meyer, R. (2002) *Anisotropy of sandstone permeability*. CREWES Research Report. v. 14.
- Nieble, C. M.; Guidicini, G.; De Mello, L. G. (2021) *Barragens em Arenitos Brandos no Brasil*. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- PELIZZOLI, L. N. *Barragem do Anel Dom Marco: Histórico, Obras de Recuperação e Análise de Fluxo Bidimensional*. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.