

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/25

# APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS EM PIEZÔMETROS COMO AUXÍLIO AO MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Augusto Barbosa Silva, Msc.

Professor, Instituto Federal de Rondônia, Porto Velho, Brasil, [augusto.silva@ifro.edu.br](mailto:augusto.silva@ifro.edu.br)

Mateus Ribeiro Caetano, Msc.

Doutorando do Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, [mateusribeirocaetano@gmail.com](mailto:mateusribeirocaetano@gmail.com)

Rodrigo César Pierozan, Dsc.

Professor, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, [rodrigopierozan@utfpr.edu.br](mailto:rodrigopierozan@utfpr.edu.br)

**RESUMO:** As estruturas de barragens são essenciais à gestão de recursos hídricos, e possuem múltiplas finalidades, como abastecimento de água e geração de energia. No entanto, as falhas em barragens representam um risco significativo, podendo levar a grandes danos ambientais e, ainda mais grave, perdas humanas, como ocorreu em desastres recentes no Brasil. A integridade destas infraestruturas é essencial para evitar desastres, e a avaliação contínua de sua segurança é um desafio que requer métodos eficientes e confiáveis. A instrumentação e o monitoramento contínuo são, portanto, essenciais à garantia de segurança e operacionalidade destas estruturas. Nesse contexto, este estudo foca na análise das subpressões ao longo de uma seção da barragem da Usina Hidrelétrica Salto, em Goiás, utilizando piezômetros para o monitoramento. Os dados coletados são analisados aplicando-se métodos estatísticos avançados, cuja metodologia consistiu em identificar correlações lineares significativas entre as leituras de piezômetros ao longo da seção escolhida e aplicar regressões lineares para obter um modelo de ajuste que representasse, com confiabilidade, o comportamento de determinados instrumentos através de seus correlatos. Verificou-se que um grupo de piezômetros tinha uma dependência muito forte entre si, fato que permitiu um modelo de ajuste cuja estimativa de leitura representou, de forma fidedigna, o seu comportamento em campo, com baixíssima variação. Através da metodologia estatística proposta, também foi possível identificar falhas na leitura de determinados piezômetros, apenas com a leitura de seus correlatos. Os resultados demonstraram a precisão dos modelos de ajuste para estimativas de leituras de piezômetros, desde que constatada uma correlação muito forte entre os dados analisados, auxiliando as tomadas de decisões em obras geotécnicas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Barragens, segurança de barragens, monitoramento de barragens, análise estatística, subpressões.

**ABSTRACT:** Dam structures are essential for water resources management and serve multiple purposes such as water supply and energy generation. However, failures in dams pose significant risks, leading to extensive environmental damages and, more critically, human losses, as seen in recent disasters in Brazil. The integrity of these infrastructures is crucial to prevent disasters, and continuous evaluation of their safety is a challenging task that requires efficient and reliable methods. Instrumentation and continuous monitoring are therefore essential to ensure the safety and operability of these structures. In this context, this study focuses on the analysis of subpressures along a section of the Salto Hydroelectric Power Plant dam in Goiás, using piezometers for monitoring. The collected data are analyzed using advanced statistical methods, which involve identifying significant linear correlations between piezometer readings along the selected section and applying linear regressions to obtain a fitting model that reliably represents the behavior of specific instruments through their correlates. It was found that a group of piezometers had a very strong dependence on each other, allowing for a fitting model whose reading estimate accurately represented their behavior in the field, with minimal variation. Through the proposed statistical methodology, it was also possible to identify failures in reading certain piezometers, solely based on the reading of their correlates. The results demonstrated the accuracy of

fitting models for piezometer reading estimates, provided a very strong correlation was observed among the analyzed data, thus aiding decision-making in geotechnical projects.

**KEYWORDS:** Dams, dam safety, dam monitoring, statistical analysis, subpressures.

## 1 INTRODUÇÃO

De modo geral, uma barragem é uma estrutura construída para represar ou desviar uma corrente de água natural, possuindo diversas finalidades, tais como fornecimento de água potável, controle do regime hidrológico (especialmente crucial em regiões semiáridas), criação de áreas para piscicultura, geração de energia hidrelétrica, suporte para sistemas de irrigação e até mesmo em atividades de mineração (Cruz, 2004).

De acordo com Lima (2014), essas estruturas podem apresentar falhas associadas a eventos de natureza hidráulica, de tal modo que comprometam sua operacionalidade e segurança, sendo mais comuns neste tipo de estrutura os modos de falha por galgamento, e por piping, quando em barragens de terra.

As rupturas de barragens podem danificar e destruir habitações, trazer grandes impactos ambientais, provocar prejuízos nas atividades socioeconômicas de determinado local e, principalmente, causar mortes. No Brasil, por exemplo, há o destaque para grandes casos problemáticos de ruptura de barragens, como o rompimento da barragem de Fundão, em 2015, e da barragem Mina do Córrego Feijão, em 2019, cuja catástrofe resultou no despejo de 12 milhões de metros cúbicos de lama de rejeito e ceifou a vida de mais de 250 pessoas (BRASIL, 2019).

Nesse contexto, é de fundamental importância garantir a manutenção das condições de segurança de barragens, que pode ser realizada com auxílio da instrumentação, um mecanismo de monitoramento que fornece dados que permitem diagnosticar o desempenho da estrutura e embasam as tomadas de decisão (Costa, 2018).

Dentre as muitas características de desempenho de barragens a serem analisadas, pode ser citado o estudo das subpressões, as quais são monitoradas através de instrumentos denominados piezômetros. As leituras destes instrumentos contribuem com o constante monitoramento da barragem que, quando associadas à aplicação de métodos estatísticos, subsidiam parâmetros de avaliação de suas condições de segurança (Pierozan et al., 2014).

Tendo isso em vista, este trabalho tem como principal objetivo identificar correlações significativas entre as leituras de piezômetros ao longo de uma seção da barragem da Usina Hidrelétrica Salto, em Goiás, e aplicar regressões lineares no sentido de obter um modelo de ajuste que represente, com confiabilidade, o comportamento de determinados instrumentos através de seus correlatos.

## 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A Usina Hidrelétrica Salto está localizada, de acordo com o CTG Brasil (2023), entre os municípios de Itarumã e Caçu, no estado de Goiás, distante aproximadamente 380 km de Goiânia, implantada sob o Rio Verde, nas coordenadas UTM 482000 m E e 7920360 m S. Este empreendimento tem contribuído com a matriz energética do sistema elétrico brasileiro, fornecendo energia limpa para a região Centro-Oeste, por meio de seu reservatório de 60,2 quilômetros quadrados.

No estudo em questão, serão analisadas as leituras de piezômetros instalados em uma seção específica, consistindo-a na margem direita da barragem, por ela representar a maior seção do barramento, conter grande quantidade de instrumentos instalados e ainda possuir geometria mais uniforme. Os dados apresentados neste estudo foram extraídos do trabalho de Pierozan (2014), que apresentou um método de avaliação do desempenho de barragens por meio de agrupamento de instrumentos.

### 2.2 Piezômetros analisados

Ao longo da seção escolhida para a análise das leituras da instrumentação da referida barragem, foram constatados 37 piezômetros instalados em aproximadamente 1,6 km de extensão da seção e identificados pela sigla PSP. O tipo de instrumento aqui analisado foi o piezômetro casagrande (standpipe), de “tubo aberto”,

contudo, ressalta-se que a barragem possui outros instrumentos para monitoração, como marcos superficiais e medidores de vazão. Para o conjunto de dados a serem analisados neste trabalho, foi considerado o total de 282 leituras aferidas, realizadas com frequência diária até cerca de metade deste conjunto, enquanto a outra metade das leituras se deu, em média, a cada dois dias.

Tendo em vista o conjunto de 37 piezômetros instalados na seção analisada, foram desprezadas as leituras de 14 deles, uma vez que elas não apresentavam nenhum valor por não possuir fluxo d'água, devido ao seu local de instalação. Desta forma, o conjunto de dados analisados contou com um total de 23 piezômetros standpipe, assim identificados: PSP-2, PSP-4, PSP-6, PSP-8, PSP-10, PSP-12, PSP-13, PSP-14, PSP-15, PSP-16, PSP-17, PSP-18, PSP-20, PSP-22, PSP-23, PSP-24, PSP-25, PSP-26, PSP-28, PSP-30, PSP-31, PSP-33 e PSP-36.

A partir dos resultados dos ensaios de granulometria e limites de Atterberg, foi possível classificar o solo de acordo com a classificação HRB, em um material argiloso, pertencente ao grupo A-6 e com Índice de grupo igual a 10.

### 2.3 Métodos estatísticos empregados

Para a obtenção de parâmetros geotécnicos utilizados em projetos de engenharia, Assis et al. (2018) destaca o interesse em se determinar uma grandeza a partir do valor de outra grandeza, possível graças ao uso do campo da estatística. Nessa circunstância, o presente estudo verificará se existe ou não uma relação entre os piezômetros escolhidos, assim como determinará o grau de associação entre eles.

Para o desenvolvimento proposto, será observada a dependência e a relação matemática entre variáveis, por meio de regressões e correlações lineares. Enquanto a técnica de regressão consiste no ajuste de um modelo matemático a um conjunto de dados de variáveis, a correlação corresponde à verificação da existência e o grau de relação entre elas.

A correlação linear pode ser representada a partir do cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson, “r”, que pode ser obtido a partir Equação 1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (1)$$

onde: r se refere ao coeficiente de correlação linear;

$x_i$  e  $y_i$  correspondem às variáveis analisadas;

$\bar{x}$  e  $\bar{y}$  correspondem às médias das respectivas variáveis.

O valor deste coeficiente varia r [-1; +1], correspondendo r = 1 a uma correlação positiva perfeita, e r = -1 a uma correlação negativa perfeita. Quanto mais próximo do valor de 1, mais forte é a correlação entre as variáveis analisadas, enquanto um valor mais próximo de 0 indica a ausência de correlação. Quando há uma correlação positiva, uma variável aumenta à medida que a outra também aumenta, com relação diretamente proporcional, enquanto na correlação negativa uma variável diminui à medida que a outra aumenta, uma relação inversamente proporcional.

Para comprovar se o coeficiente de correlação é significativo, recorre-se à significância estatística de tal coeficiente com a aplicação do teste t-Student, conforme a Equação 2:

$$t_{n-2} = r \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2)$$

onde:  $t_{n-2}$  corresponde à estatística com n-2 graus de liberdade na tabela t de Student;

n se refere à quantidade de valores usados no cálculo da estatística;

r representa o coeficiente de correlação linear calculado.

A significância estatística corresponde a um valor que expressa a confiabilidade estatística, sendo comumente utilizados níveis de confiança da ordem de 95%. Nesse teste, são consideradas as hipóteses em que  $H_0: \rho = 0$  e  $H1: \rho \neq 0$ , em que, caso o valor de  $t_{n-2}$  seja superior ao valor crítico de  $t$ , rejeita-se a hipótese nula. Caso a hipótese nula for rejeitada, ao nível de significância  $\alpha$ , pode-se concluir que existe relação significativa entre as variáveis.

Em suma:  $t_{n-2} > t_{crit}$ , o cálculo é estatisticamente significativo;  $t_{n-2} < t_{crit}$ , o cálculo não é estatisticamente significativo.

Nesta pesquisa, além da correlação linear, serão aplicados os conceitos da regressão linear como técnica de ajuste do modelo matemático ao conjunto de dados. Por meio dessa técnica de ajuste de curvas, conforme Assis et al. (2018) esclarece, é possível estabelecer uma equação que irá ajustar os dados das variáveis independentes e dependente.

No modelo de regressão linear múltipla, se considera apenas uma variável dependente (Y), que é determinada por mais de uma variável independente (X), tendo o uso de mais variáveis uma força maior referente aos testes de significância, cuja representação pode ser dada pela Equação 3:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} \quad (3)$$

onde:  $\alpha$  corresponde ao intercepto do eixo y, sendo o valor esperado de Y quando as variáveis independentes forem nulas;  $\beta_1$  corresponde à variação esperada em Y, dado um incremento unitário em  $X_1$ , mantendo-se constantes todas as demais variáveis independentes;  $\beta_k$  corresponde à variação esperada em Y, dado um incremento unitário em  $X_k$ , mantendo-se constantes todas as demais variáveis independentes.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a análise dos dados da instrumentação, a correlação estatística foi calculada pelas séries de leituras piezométricas realizadas ao longo do tempo, considerando o coeficiente de correlação linear para cada par de instrumentos analisados. O resultado dos cálculos de valores para os coeficientes de correlação entre todos os piezômetros foi expresso em porcentagem, tendo sido adotado nível de significância de 0,05 no teste de hipóteses, cujo resultado foi sintetizado em uma matriz de correlação linear, representada pela Figura 1.

	PSP - 02	PSP - 04	PSP - 06	PSP - 08	PSP - 10	PSP - 12	PSP - 13	PSP - 14	PSP - 15	PSP - 16	PSP - 17	PSP - 18	PSP - 20	PSP - 22	PSP - 23	PSP - 24	PSP - 25	PSP - 26	PSP - 28	PSP - 30	PSP - 31	PSP - 33	PSP - 36
PSP - 02	100,00%	99,19%	70,50%	80,66%	59,80%	56,18%	-33,63%	87,11%	-6,22%	81,14%	82,70%	82,72%	92,18%	50,04%	25,63%	-26,43%	90,99%	58,30%	86,07%	-37,08%	-4,06%	-9,83%	-33,30%
PSP - 04	99,19%	100,00%	64,22%	76,32%	52,88%	51,53%	-31,75%	90,23%	-2,10%	82,70%	80,99%	78,03%	89,25%	43,61%	17,97%	-32,49%	89,50%	51,12%	83,19%	-41,74%	-4,95%	-15,17%	-37,61%
PSP - 06	70,50%	64,22%	100,00%	95,16%	97,13%	87,75%	-41,19%	42,84%	-50,90%	32,60%	67,30%	91,04%	86,25%	56,49%	69,23%	28,09%	69,96%	96,74%	88,38%	9,93%	3,83%	43,14%	2,38%
PSP - 08	80,66%	76,32%	95,16%	100,00%	91,14%	90,12%	-43,62%	62,05%	-43,33%	41,48%	78,72%	88,52%	91,12%	44,42%	48,72%	2,92%	81,37%	88,96%	93,79%	-14,86%	0,83%	25,77%	-21,02%
PSP - 10	59,80%	52,88%	97,13%	91,14%	100,00%	91,15%	-42,06%	30,12%	-54,27%	20,04%	62,10%	83,90%	78,10%	51,24%	66,06%	29,81%	62,84%	96,63%	79,35%	11,02%	5,26%	41,78%	1,16%
PSP - 12	56,18%	51,53%	87,75%	90,12%	91,15%	100,00%	-35,96%	36,09%	-48,14%	9,27%	60,34%	67,27%	68,78%	25,94%	38,50%	7,96%	59,28%	82,53%	73,35%	-10,00%	3,69%	25,20%	-20,44%
PSP - 13	-33,63%	-31,75%	-41,19%	-43,62%	-42,06%	-35,96%	100,00%	-27,60%	38,81%	-15,97%	-49,86%	-44,96%	-46,26%	-14,34%	-17,15%	5,19%	-46,73%	-50,62%	-45,33%	15,54%	-1,29%	-2,32%	21,60%
PSP - 14	87,11%	90,23%	42,84%	62,05%	30,12%	36,09%	-27,60%	100,00%	4,27%	79,07%	75,07%	61,51%	76,66%	12,45%	-10,10%	-55,32%	80,17%	29,19%	74,56%	-60,28%	-8,95%	-26,88%	-54,26%
PSP - 15	-6,22%	-2,10%	-50,90%	-43,33%	-54,27%	-48,14%	38,81%	4,27%	100,00%	29,08%	-13,00%	-42,03%	-29,69%	-5,95%	-45,21%	-42,02%	-10,96%	-59,99%	-41,95%	-25,09%	-4,54%	-53,69%	-32,67%
PSP - 16	81,14%	82,70%	32,60%	41,48%	20,04%	9,27%	-15,97%	79,07%	29,08%	100,00%	65,01%	57,75%	68,63%	43,97%	7,98%	-38,62%	72,89%	21,80%	54,74%	-37,56%	-2,26%	-30,02%	-32,67%
PSP - 17	82,70%	80,99%	67,30%	78,72%	62,10%	60,34%	-49,86%	75,07%	-13,00%	65,01%	100,00%	71,47%	85,73%	43,34%	18,88%	-37,77%	96,39%	63,33%	79,24%	-44,17%	-2,26%	-17,60%	-54,05%
PSP - 18	82,72%	78,03%	91,04%	88,52%	83,90%	67,27%	-44,96%	61,51%	-42,03%	57,75%	71,47%	100,00%	94,92%	60,63%	66,46%	19,17%	77,30%	87,53%	94,11%	3,06%	0,05%	37,56%	2,79%
PSP - 20	92,18%	89,25%	86,25%	91,12%	78,10%	68,78%	-46,26%	76,66%	-29,69%	68,63%	85,73%	94,92%	100,00%	54,95%	47,77%	-6,44%	91,08%	79,76%	95,77%	-18,98%	-2,13%	14,62%	-22,29%
PSP - 22	50,04%	43,61%	56,49%	44,42%	51,24%	25,94%	-14,34%	12,45%	-5,95%	43,97%	43,34%	60,63%	54,95%	100,00%	74,51%	38,11%	50,12%	57,47%	45,55%	31,99%	7,15%	25,81%	27,05%
PSP - 23	25,63%	17,97%	69,23%	48,72%	66,06%	38,50%	-17,15%	-10,10%	45,21%	7,98%	18,88%	66,46%	47,77%	74,51%	100,00%	78,89%	22,69%	74,86%	49,91%	69,24%	9,30%	74,89%	60,15%
PSP - 24	26,43%	-32,49%	28,09%	2,92%	29,81%	7,96%	5,19%	-55,32%	-42,02%	-38,62%	-37,77%	19,17%	-6,44%	38,11%	78,89%	100,00%	-34,93%	37,08%	1,75%	87,19%	9,93%	81,17%	84,50%
PSP - 25	90,99%	89,50%	69,96%	81,37%	62,84%	59,28%	-46,73%	80,17%	-10,96%	72,89%	96,39%	77,30%	91,08%	50,12%	22,69%	-34,93%	100,00%	63,99%	83,34%	-42,75%	-2,31%	-16,50%	-50,88%
PSP - 26	58,30%	51,12%	96,74%	88,96%	96,63%	82,53%	-50,62%	29,19%	-59,99%	21,80%	63,33%	87,53%	79,76%	57,47%	74,86%	37,08%	63,99%	100,00%	82,49%	18,24%	5,56%	50,26%	8,73%
PSP - 28	86,07%	83,19%	88,38%	93,79%	79,35%	73,35%	-45,33%	74,56%	-41,95%	54,74%	79,24%	94,11%	95,77%	45,55%	49,91%	1,75%	83,34%	82,49%	100,00%	-14,28%	-1,40%	29,74%	-14,79%
PSP - 30	-37,08%	-41,74%	9,93%	-14,86%	11,02%	-10,00%	15,54%	-60,28%	-25,09%	-37,56%	-44,17%	3,06%	-18,98%	31,99%	69,24%	87,19%	-42,75%	18,24%	-14,28%	100,00%	25,81%	69,86%	79,69%
PSP - 31	-4,06%	-4,95%	3,83%	0,83%	5,26%	3,69%	-1,29%	-8,95%	-4,54%	-7,56%	-2,26%	0,05%	-2,13%	7,15%	9,30%	9,93%	-2,31%	5,56%	-1,40%	25,81%	100,00%	8,22%	7,53%
PSP - 33	-9,83%	-15,17%	43,14%	25,77%	41,78%	25,20%	-2,32%	-26,88%	-53,69%	-30,02%	-17,60%	37,56%	14,62%	25,81%	74,89%	81,17%	-16,50%	50,26%	29,74%	69,86%	8,22%	100,00%	70,88%
PSP - 36	-33,30%	-37,61%	2,38%	-21,02%	1,16%	-20,44%	21,60%	-54,26%	-23,67%	-32,67%	-54,05%	2,79%	-22,29%	27,05%	60,15%	84,50%	-50,88%	8,73%	-14,79%	79,69%	7,53%	70,88%	100,00%

	Não há correlação estatística (não satisfaz o nível de significância adotado)
	Dependência fraca (coeficiente de correlação linear menor que 50%)
	Dependência forte (coeficiente de correlação linear entre 50% e 90%)
	Dependência muito forte (coeficiente de correlação linear entre 90% e 100%)

Figura 1 - Matriz de correlação linear.

A partir da matriz de correlação linear apresentada, é possível identificar os instrumentos que trabalham com sintonia. Nesse contexto, verifica-se que a maior parte dos piezômetros tem certa dependência uns dos outros, com graus variados de dependência.

Neste trabalho, optou-se por destacar um maior número de piezômetros que contêm dependência entre si, sobressaindo os seguintes grupos de instrumentos:

- Grupo 1 - Maior número de piezômetros que se correlacionam, considerando uma dependência muito forte (coeficiente de correlação linear entre 90% e 100%): PSP-2, PSP-20 e PSP-25 e os piezômetros PSP-6, PSP-8 e PSP-10;
- Grupo 2 - Maior número de piezômetros que se correlacionam, considerando uma dependência forte (coeficiente de correlação linear entre 50% e 90%): PSP-23, PSP-24, PSP-30, PSP-33 e PSP-36;
- Grupo 3 - Maior número de piezômetros que se correlacionam, considerando uma dependência fraca (coeficiente de correlação linear menor que 50%): PSP-13, PSP-14 e PSP-22.

A partir da correlação linear aferida, validada pelos testes de hipóteses, nota-se que no Grupo 1 há piezômetros cuja dependência é fortíssima, sendo eles ideais para a aplicação da regressão linear, a fim de se obter a equação que seja capaz de aferir o valor da subpressão. Considerando que neste grupo o conjunto de piezômetros que se correlacionam contém mais de dois instrumentos (variáveis), recorreu-se à regressão linear múltipla para a previsão de leituras de determinados piezômetros.

Optou-se por realizar a previsão de leituras de piezômetros considerando casos com instrumentos distintos. Dessa maneira, foram considerados os seguintes estudos de caso:

- Estudo de caso 1: sendo escolhido o piezômetro PSP-8, que se correlaciona aos piezômetros PSP-6 e PSP-10, para estimativa de leitura;
- Estudo de caso 2: sendo escolhido o piezômetro PSP-20, que se correlaciona aos piezômetros PSP-2 e PSP-25, para estimativa de leitura.

Para a aplicação da regressão linear múltipla, foi necessário definir, em cada caso, quais seriam as variáveis dependentes, que consistiam naqueles piezômetros cuja leitura se desejava conhecer, e quais eram as variáveis independentes, que correspondiam àqueles piezômetros responsáveis por assumir valores que subsidiariam o cálculo de leitura das variáveis dependentes.

O conjunto de dados utilizados para os estudos de caso propostos neste trabalho, contém a indicação das variáveis dependentes, representadas pela letra Y, que correspondem às leituras a serem estimadas e das variáveis independentes, representadas pela letra X, que correspondem aos piezômetros correlatos. Além destes dados, foram apresentados os valores de correlação entre a variável dependente e as variáveis independentes, cuja sistematizações encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estudo de caso 1 – definição de variáveis.

Estudo de caso 1			Estudo de caso 2		
Variável dependente (leitura a ser estimada)	Variável independente (piezômetros correlatos)	Correlação linear	Variável dependente (leitura a ser estimada)	Variável independente (piezômetros correlatos)	Correlação linear
Piezômetro PSP-8 (Y <sub>1</sub> )	Piezômetro PSP-6 (X <sub>11</sub> )	+95,16%	Piezômetro PSP-20 (Y <sub>2</sub> )	Piezômetro PSP-2 (Y <sub>21</sub> )	+92,18%
	Piezômetro PSP-10 (X <sub>12</sub> )	+91,14%		Piezômetro PSP-25 (Y <sub>22</sub> )	+91,08%

A partir da tabela apresentada anteriormente, as equações deduzidas para os estudos de caso foram obtidas de acordo com o modelo de regressão linear múltipla apresentado, o que permitiu a estimativa de leituras dos piezômetros de acordo com as seguintes expressões matemáticas:

$$Y_1 = 134,897 + 0,848 * X_{11} - 0,158 * X_{12} \quad (4)$$

$$Y_2 = 150,614 + 0,532 * X_{21} + 0,114 * X_{22} \quad (5)$$

Dessa maneira, utilizando as Equações 4 e 5 apresentadas, foi possível aferir as leituras para os piezômetros PSP-8 (Y<sub>1</sub>) e PSP-20 (Y<sub>2</sub>), respectivamente, sendo elas consideradas leituras sintéticas, haja vista que foram geradas por meio da leitura de outros piezômetros correlatos.

A partir desse desenvolvimento foi possível estabelecer uma previsão do comportamento das leituras ao longo do tempo. Para essa demonstração, foram gerados os gráficos 1 e 2, que demonstram a trajetória das leituras realizadas ao longo do tempo em todos os piezômetros do grupo analisado, assim como inclui a trajetória das leituras estimadas, obtidas pelas equações anteriormente citadas.

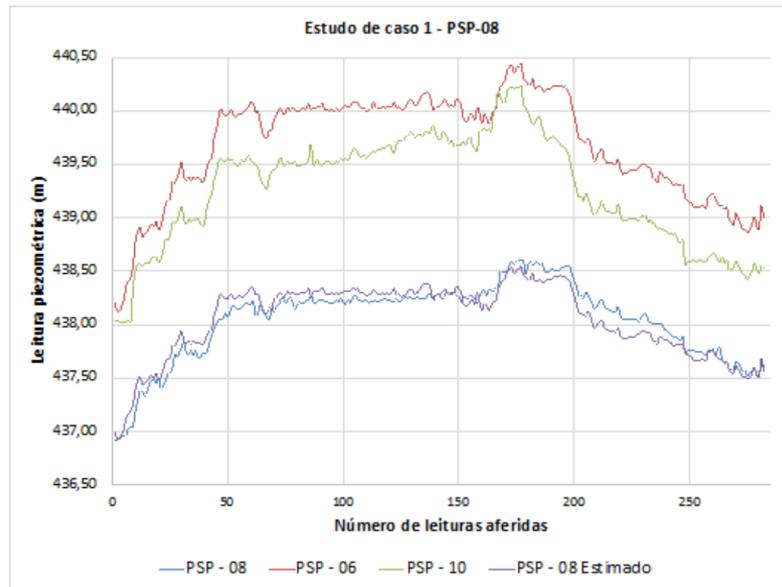


Gráfico 1 – Leitura dos piezômetros – Estudo de caso 1.

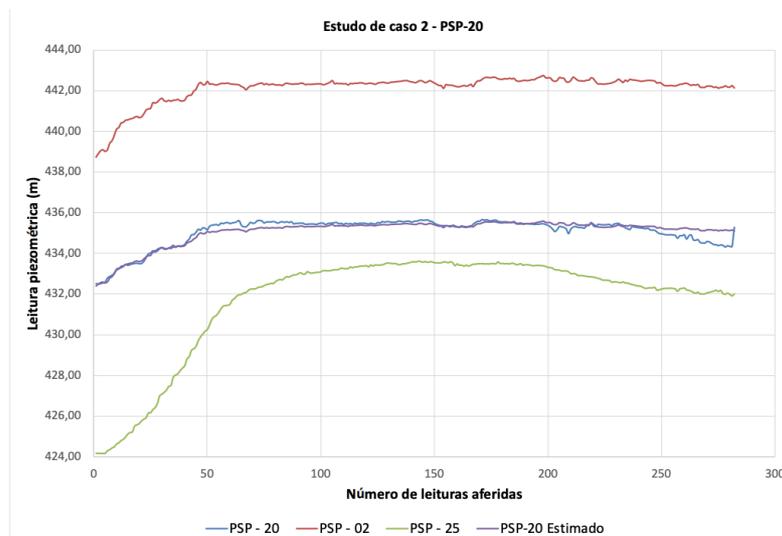


Gráfico 2 – Leitura dos piezômetros – Estudo de caso 2.

Observa-se por meio dos gráficos apresentados que, em ambos os casos de estudo, é notória a tendência de acompanhamento entre as trajetórias das leituras dos piezômetros, ou seja, quando a leitura de um piezômetro qualquer possui acréscimo de valor, as leituras dos piezômetros correlatos também aumentam, assim como decaem, caso a leitura tenha sido menor. Isso se deve pelo fato de a dependência entre as variáveis ser muito forte e possuir valor de coeficiente de correlação positivo, que influi uma grandeza diretamente proporcional.

Nota-se pelos gráficos, também, que em ambos os estudos de caso houve convergência entre os modelos ajustados para leitura estimada e as leituras feitas em campo. Percebe-se, portanto, que a utilização da estatística providenciou uma leitura estimada confiável para os piezômetros PSP-8 e PSP-20.

No primeiro estudo de caso, a variação máxima entre a leitura feita em campo e a leitura estimada, considerando o dia em que a leitura mais variou, foi da ordem de 0,23 metros em apenas uma das leituras, o

que corresponde a um percentual máximo de variação menor que 3%, que denota uma precisão muito forte do ajuste feito para a estimativa de leitura com uso de piezômetros correlatos.

No segundo estudo de caso obteve-se valor de 0,84 metros, em uma determinada leitura, para a variação máxima entre aquela feita em campo e a leitura estimada, correspondendo a um percentual máximo de variação pouco maior que 4% em determinado dia, que converge com a forte precisão do ajuste realizado para a estimativa.

A existência dessas correlações estatísticas pode estar relacionada aos aspectos de linearidade dos dados coletados pelas leituras dos piezômetros, uma vez que as variáveis demonstraram comportamento similar na distribuição geométrica dos dados ao longo do período analisado. Em campo, esse aspecto pode estar relacionado à posição de locação dos piezômetros no corpo da barragem, que pode sofrer interferência direta pelas propriedades da camada na qual os instrumentos estejam instalados.

Como demonstração da influência da instalação do instrumento em sua correlação, tem-se o exemplo dos piezômetros PSP-6, PSP-8 e PSP-10, que estavam todos alocados na mesma camada da fundação e expressaram uma correlação fortíssima, o que contribui com a hipótese de convergência do comportamento das leituras devido a alocação dos instrumentos. Isso pode estar diretamente relacionado à permeabilidade homogênea na camada, pois mesmo estando instalados em diferentes cotas e contendo diferentes leituras, essa condição levou a um comportamento similar entre as medições.

Além dos piezômetros destacados nos grupos apresentados, o piezômetro PSP-31 se sobressaiu como o único a possuir somente uma fraca dependência com o piezômetro PSP-30 e nenhuma correlação com os demais piezômetros.

Essa ausência de correlação esteve relacionada a uma lacuna de leitura notada nos registros analisados, que influenciou diretamente nos valores de correlação aferidos. Aplicando a técnica de correlação linear, foi possível notar um comportamento atípico com relação aos demais, que motivou a necessidade de uma análise mais aprofundada, o que culminou na identificação do erro de leitura do piezômetro PSP-31.

Constata-se esta falha em uma das leituras, para fins de observação, foi realizada uma interpolação linear entre as leituras do dia anterior e do dia seguinte à lacuna, para o teste de uma nova correlação. Desta maneira, foram calculados novos e assertivos valores de correlação, apresentados na Figura 2, em comparação aos valores anteriormente calculados.

Piezômetros	Correlações	
	Com lacuna em leitura	Sem lacuna em leitura
	PSP - 31	PSP - 31
PSP - 02	-4,06%	-26,85%
PSP - 04	-4,95%	-33,84%
PSP - 06	3,83%	34,39%
PSP - 08	0,83%	12,85%
PSP - 10	5,26%	39,77%
PSP - 12	3,69%	23,82%
PSP - 13	-1,29%	-6,74%
PSP - 14	-8,95%	-53,27%
PSP - 15	-4,54%	-47,59%
PSP - 16	-7,56%	-51,08%
PSP - 17	-2,26%	-26,00%
PSP - 18	0,05%	18,23%
PSP - 20	-2,13%	-3,69%
PSP - 22	7,15%	33,57%
PSP - 23	9,30%	72,27%
PSP - 24	9,93%	86,03%
PSP - 25	-2,31%	-26,94%
PSP - 26	5,56%	44,99%
PSP - 28	-1,40%	6,54%
PSP - 30	25,81%	81,31%
PSP - 31	100,00%	100,00%
PSP - 33	8,22%	77,09%
PSP - 36	7,53%	67,25%

\* Para referência das cores quanto ao seu grau de dependência, consulte a Figura 1

Figura 2 – Comparativo de correlações do piezômetro PSP-31.

Nota-se que houve grande divergência entre os valores de correlação causados pela ausência de uma única leitura e aquela leitura interpolada. Estabelecidos os novos valores, depreende-se que o piezômetro PSP-31 detém correlações fortes com os piezômetros PSP-24 e PSP-30, que poderiam ser utilizados para uma

estimativa de leitura no caso de eventuais lacunas nas falhas de registro. Contudo, ressalta-se que iria consistir em uma estimativa menos precisa, considerando que a dependência aferida entre as variáveis não detinha o grau muito forte (acima de 90%), como nos estudos de caso apresentados.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sendo extremamente importante o constante monitoramento de uma barragem, considerando seu potencial de destruição, o estudo de aplicação de métodos estatísticos visa contribuir com maior segurança e prevenção de colapsos. Neste sentido, o estudo aqui destacado demonstra a precisão dos modelos de ajuste para estimativas de leituras de piezômetros, desde que constatada uma correlação muito forte, tendo destacado o resultado com baixíssimas variações das leituras estimadas àquelas medidas em campo.

Por meio deste trabalho, evidencia-se também que o uso de correlação e regressão lineares pode contribuir, por exemplo, para a identificação de comportamentos (leituras) fora dos padrões, que poderiam indicar uma situação atípica e auxiliar nas tomadas de decisão, como a necessidade ou não de verificação em campo. Essas técnicas podem, por exemplo, ajudar a inferir possíveis erros de leitura ou mesmo constatar defeito em instrumentos, ao mesmo tempo que permitem estimar as leituras corretas nestes casos.

Nos estudos de casos apresentados aqui, foi considerado um grupo em que três piezômetros eram correlatos entre si, cuja análise demonstrou precisão quanto à previsão de leituras obtidas. Ademais, cabe ressaltar que, no caso de grupos com maior quantidade de piezômetros correlatos, havendo um coeficiente de correlação muito forte, o comportamento do ajuste de estimativa se torna ainda mais preciso, haja vista a inclusão de mais variáveis independentes.

As leituras estimadas dos piezômetros PSP-8 e PSP-20 descreveram com grande confiabilidade o comportamento constatado em campo, enquanto a falha de leitura no piezômetro PSP-31 foi percebida graças à aplicação das técnicas descritas até aqui, o que presume o uso de estatística na geotecnia se tratar de mais uma ferramenta considerável para o acompanhamento das condições do barramento.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assis, A. P., Hernandez, H. M., Colmanetti, J. P. (2018). Métodos Estatísticos e Probabilísticos Aplicados à Geotecnia. Brasília: Publicação G.AP-AA002/2018, PPGG-UnB.
- Brasil. (2019). Congresso Nacional - Relatório de Comissão Parlamentar de Inquérito: Rompimento da barragem de Brumadinho. Brasília, Câmara dos Deputados.
- Costa, W. D. (2018). Geologia de Barragens. São Paulo: Oficina de Textos.
- Cruz, P. T. da. (2004). 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo: Oficina de Textos.
- CTG Brasil. (2023). Hidrelétrica Salto completa 8 anos. Disponível em: <https://www.ctgbr.com.br/hidreletrica-salto-completa-8-anos/>.
- Lima, F. N. (2014). Avaliação das probabilidades de falhas em barragens associadas a eventos de naturezas hidráulicas hidrológicas: estudo de caso da PCH Cajuru (Master's thesis). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG).
- Pierozan, R. C., Teixeira, S. H. C., Dyminski, A. S., Romanel, C. (2014). Método de avaliação de desempenho de barragens por meio de agrupamento de instrumentos – Aplicação em ITAIPU. Geotecnia, 132, 131 – 150.