

RONALDO DA SILVA LEITE

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PIEZOMÉTRICO DA BARRAGEM
DE SANTA HELENA PÓS RECONSTRUÇÃO**

Artigo Científico apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos técnicos e legais (CESB); Escola Politécnica; Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques
Co-orientadora: Prof^a. Me. Camila de Souza Dahm Smiderle

Salvador
2024

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO PIEZOMÉTRICO DA BARRAGEM DE SANTA HELENA PÓS RECONSTRUÇÃO

Ronaldo da Silva Leite

Resumo

A Barragem de Santa Helena, na Região Metropolitana de Salvador, desempenha um papel crucial no abastecimento de água. Após um acidente em 1985 e reconstrução em 2000, foram instalados piezômetros para monitorar a estrutura. Este artigo analisa o comportamento das medições de alguns piezométricos da barragem. Estes dados posteriormente serão utilizados para verificar a segurança da barragem e determinar valores de referência para definição de situações normais, de atenção, alerta e de emergência, conforme exigido pela Política Nacional de Segurança de Barragens. Foram utilizados piezômetros Casagrande e pneumáticos para medir pressões no aterro e na fundação da barragem. Os resultados mostram variações significativas nas cargas piezométricas durante o enchimento inicial do reservatório, como era de se esperar e posteriormente se estabilizando. Além dos valores encontrados para a estabilização, são apresentadas recomendações que incluem a manutenção regular dos piezômetros, a periodicidade das leituras e análises mais frequentes do que as que vêm sendo realizadas, visando garantir a detecção precoce de eventuais anomalias. Este estudo destaca a importância do monitoramento contínuo para garantir a segurança de longo prazo das barragens.

Palavras-chave: Barragem de Santa Helena, piezômetros, segurança de barragens, instrumentação, monitoramento.

Abstract

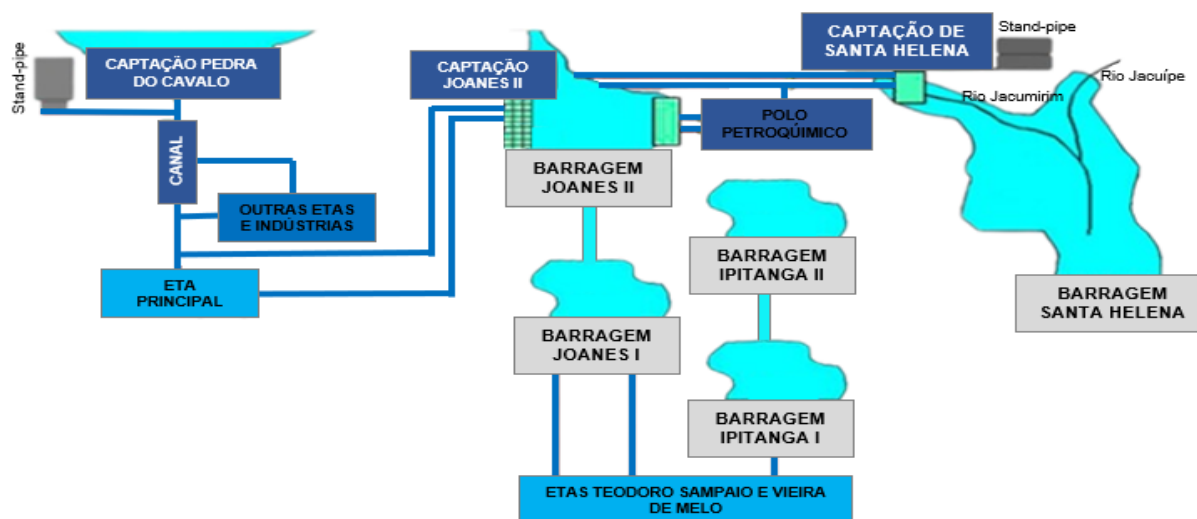
The Santa Helena Dam, in the Metropolitan Region of Salvador, plays a crucial role in water supply. Following an accident in 1985 and reconstruction in 2000, piezometers were installed to monitor the structure. This article analyzes the behavior of measurements from some piezometers of the dam. These data will subsequently be used to verify the dam's safety and determine reference values for defining normal, attention, alert, and emergency situations, as required by the National Dam Safety Policy. Casagrande and pneumatic piezometers were used to measure pressures in the dam's embankment and foundation. The results show significant variations in piezometric loads during the initial reservoir filling, as expected, and subsequently stabilizing. In addition to the values found for stabilization, recommendations are presented, including regular maintenance of the piezometers, the frequency of readings, and more frequent analyses than those currently being performed, aiming to ensure early detection of any anomalies. This study highlights the importance of continuous monitoring to ensure the long-term safety of dams.

Keywords: Santa Helena Dam, piezometers, dam safety, instrumentation, monitoring.

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Integrado de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador (SIAA/RMS) é composto por seis barragens: Pedra do Cavalo, Santa Helena, Joanes I, Joanes II, Ipitanga I e Ipitanga II. Algumas dessas estruturas são diretamente interligadas, conforme Figura 1.

Figura 1. Representação do SIAA/RMS e a transposição das águas do reservatório da barragem de Santa Helena para o reservatório da barragem Joanes II.



Fonte: Adaptado de EMBASA (2012).

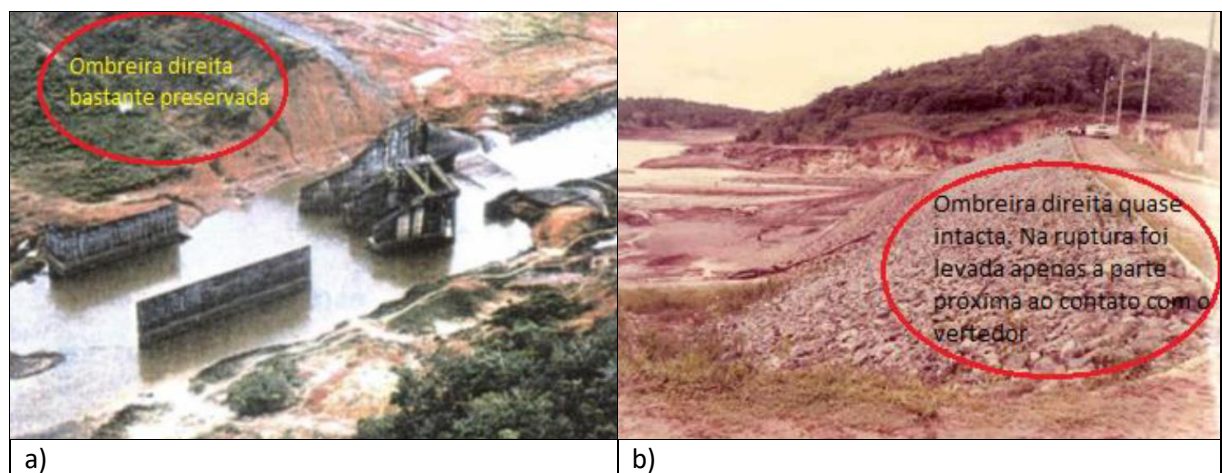
A Barragem de Santa Helena, operada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (EMBASA), desempenha um papel vital para o abastecimento de água da Região Metropolitana de Salvador (RMS), que é composta por treze municípios, sendo a terceira maior aglomeração urbana do Nordeste brasileiro, abrigando quase 4 milhões de habitantes (IBGE, 2022). Trata-se de uma área importante para o estado da Bahia, que concentra grande parte da atividade econômica e demanda uma gestão integrada para garantir a disponibilidade de água e a segurança das estruturas hídricas.

Além de regularizar diretamente o nível da barragem Joanes II e indiretamente o nível da barragem Joanes I, fornece água bruta para o Polo Petroquímico de Camaçari. Embora apenas parte das águas seja aproveitada nos sistemas de produção de água do SIAA/RMS através de uma Estação Elevatória (EE) na cota mínima operacional 17,0 m, há viabilidade para aumentar o aproveitamento até a cota 10,00 m, o que ampliará o volume útil reservado.

Em 9 de maio de 1985 a barragem de Santa Helena sofreu um acidente, durante uma cheia excepcional. Com base na série histórica de 1962 a 2023 da estação pluviométrica nº 1238000, localizada em Camaçari/BA, a cerca de 11 quilômetros da barragem de Santa Helena, destacam-se os registros de chuva em abril e maio de 1985, totalizando 732,7 mm e 314,8 mm, respectivamente. Para esses eventos, o tempo de retorno estimado foi de 31,50 anos, considerando o período analisado.

O escoamento que ocorreu no extravasor provocou um processo erosivo que removeu parte da camada drenante da laje do rápido (calha) do extravasor, que integrava o projeto do vertedouro e era projetada para auxiliar na drenagem e eliminar subpressões. Conforme Mello et al. (2021), “o acidente teve início na base da laje do vertedouro (...) em função da remoção, por erosão, de uma camada drenante de areia, propagando-se, em seguida, para as demais estruturas da barragem”. Em decorrência da ruptura, a ombreira esquerda foi destruída e na ombreira direita restaram 160 metros totalmente preservados (Villanova, 1997), onde apenas o trecho adjacente ao contato com o vertedor foi removido (Amorim, 2008).

Figura 2. Barragem de Santa Helena após a ruptura em 1985: a) Vista aérea; b) Ombreira direita.



Fonte: Amorim (2008).

Em 2000, a barragem de Santa Helena foi reconstruída e, praticamente, todo o aterro original da ombreira direita foi aproveitado. Entretanto, algumas alterações foram realizadas em relação a estrutura original do barramento construído em 1979: O coroamento passou a ter 290 metros de extensão, incluindo a estrutura extravasora; o vertedouro em concreto passou a ter 26,0 metros de extensão e três comportas tipo segmento com dimensões de 9,00 x 12,15 m, projetado para uma vazão máxima de 1.776,30 m³/s; o canal do extravasor foi ampliado para coincidir com a dimensão da bacia de dissipação; o vertedouro teve sua fundação modificada, sendo preenchida com concreto compactado com rolo (CCR) após escavação até a rocha

(VILLANOVA, 1997; AMORIM, 2008). Anteriormente, a base da fundação era formada por aterro argiloso compactado e colchão de areia e arenito.

A Figura 3 apresenta a vista de jusante para montante da Barragem de Santa Helena, destacando a bacia de dissipação e os maciços de terra das ombreiras direita e esquerda.

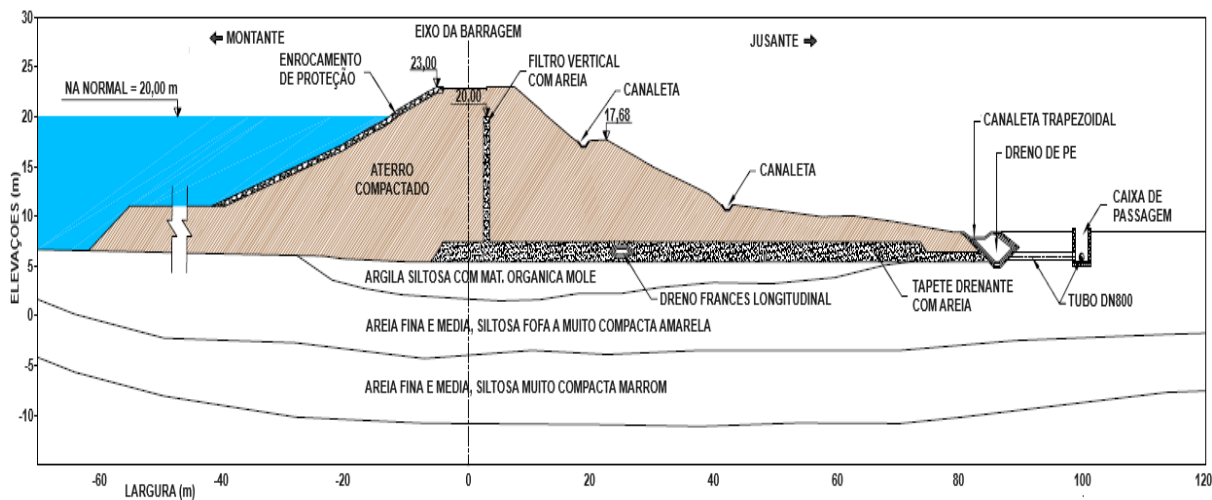
Figura 3. Vista geral da atual Barragem de Santa Helena, indicando o reaproveitamento da ombreira direita (maciço remanescente) e o maciço novo (reconstruído).



Fonte: Google Earth (2024).

A barragem foi construída em terra homogênea com solo argiloso da ombreira direita e possui o sistema de drenagem interna formado por um dreno em chaminé vertical, com espessura de 1,0 m, localizado a cerca de três metros à jusante do eixo da barragem, conectado a um tapete de areia com espessura aproximada de 1,30 m e 126,0 m de extensão, que controlam as infiltrações do maciço e da fundação. A Figura 4 apresenta a seção típica do maciço.

Figura 4. Seção típica do maciço de terra da Barragem de Santa Helena.



Fonte: EMBASA (2017).

Dentro do programa de instrumentação da fundação e do maciço, inicialmente foram instalados 10 piezômetros Casagrande e 22 piezômetros pneumáticos distribuídos em seções transversais ao eixo do barramento. Apesar de terem sido feitas leituras dos piezômetros, nestes 23 anos não foram feitas análises sobre o comportamento desses instrumentos. Segundo Cruz (1996), essa condição pode criar uma falsa sensação de segurança em relação à estrutura.

A avaliação do desempenho dos instrumentos de monitoramento representa uma etapa importante relacionada à segurança do barramento, em conformidade com a legislação vigente (Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010, atualizada através da Lei 14.066 de 30 de setembro de 2020) estabelece as responsabilidades do órgão de fiscalização e do empreendedor do barramento, bem como as diretrizes voltadas para a segurança de barragens, visando prevenir acidentes e minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais.

Os parâmetros a serem observados abrangem uma série de finalidades, desde a pressão da água nos poros e na rocha de fundação, bem como as pressões totais, os recalques, os deslocamentos horizontais, as cargas, tensões nos componentes estruturais, como temperatura, vazões de drenagem, o transporte de materiais sólidos, entre outros (SILVEIRA, 2006), visando permitir que se conheça o comportamento da barragem, prever anomalias e permitir ações para manter a integridade e segurança da barragem. Sendo a leitura dos piezômetros uns dos mais simples de medir e que fornecem uma análise rápida sobre a segurança se os dados tiverem sido analisados e consistidos para determinação dos níveis de referência para situações normais, de atenção, de alerta e de emergência. Portanto é crucial estabelecer parâmetros de segurança a longo prazo, especialmente considerando a indisponibilidade dos valores de referência previstos pelas hipóteses de projeto para as leituras piezométricas da barragem. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo apresentar um breve estudo de caso baseado no comportamento dos piezômetros existentes na Barragem de Santa Helena em duas seções piezométricas e não pretende de maneira nenhuma esgotar o assunto. Apresentando informações sobre o desempenho e as condições de segurança da estrutura e estratégias para definir parâmetros preliminares, enquanto se efetua novos estudos de estabilidade para determinara os níveis de referência que possam indicar que a estrutura está ou não segura.

2 ESTADO DA ARTE

A seguir é apresentado um breve resumo do estado da arte sobre a instrumentação de barragens, com foco específico no comportamento dos piezômetros instalados na área de estudo.

A instrumentação de auscultação consiste em aparelhos instalados no corpo da barragem ou em sua fundação para avaliar o comportamento da estrutura durante a construção, enchimento e operação, para identificar e mitigar a ocorrência de comportamentos anômalos na estrutura, assegurando as condições do projeto e a segurança estrutural. A implementação de vigilância e monitoramento podem fornecer evidências sobre o comportamento do barramento através de indicadores de movimentos, percolação e alteração de pressão nos poros (CBDB, 2006).

Fusaro (1983) define os piezômetros como dispositivos cuja finalidade é avaliar a pressão da água intersticial do solo no ponto de instalação, visando fornecer subsídios para a análise do comportamento geotécnico. Os piezômetros desempenham um papel crucial na avaliação das linhas de fluxo e das pressões atuantes no interior do maciço da barragem, permitindo o acompanhamento da evolução do nível freático no aterro e em sua fundação, verificando se as subpressões medidas e teóricas estimadas no projeto, possibilitando a avaliação das condicionantes de projeto, a confirmação dos fatores de segurança e, potencialmente, a identificação da necessidade de implementação de medidas corretivas (SILVEIRA, 2006).

Conforme Silveira (2006), a pressão neutra registrada no aterro da barragem é chamada de poropressão, já a leitura na fundação é denominada de subpressão ou *uplift pressure* (em inglês), devido à sua atuação ascendente, ou seja, de baixo para cima; a cota piezométrica é determinada através da diferença entre a cota de topo do equipamento e a leitura de campo realizada do topo até o nível d'água; a carga piezométrica é calculada pela diferença entre a cota piezométrica e a cota de instalação do aparelho.

Após o enchimento do reservatório, com a tendência de estabilização das leituras, os valores de referência da instrumentação devem ser reavaliados e aferidos considerando o próprio histórico das medições e as características dos materiais utilizados durante a execução da fundação e do barramento (ELETROBRAS, 2003).

Segundo Fusaro (2007), variações nas leituras dos piezômetros podem indicar alguns problemas, como por exemplo, caso a permeabilidade aumente a jusante de um piezômetro, a carga piezométrica lida diminuirá; por outro lado, um aumento da permeabilidade a montante desse piezômetro resultará na leitura de uma carga piezométrica maior.

Lindquist e Bonzegno (1981) estudaram a elevação das cotas piezométricas próximas ao sistema de drenagem em nove barragens de terra, com intuito de evidenciar a colmatagem dos filtros, que pode ocorrer através da elevação da vazão percolada (saturação do maciço e/ou da fundação); do aumento do nível d'água de montante e/ou de jusante; do aumento ou da redução da permeabilidade dos materiais a montante ou a jusante, respectivamente.

A análise dos dados da instrumentação deve considerar os valores de controle de cada instrumento, indicativos de possíveis anomalias na estrutura. Conforme Smiderle et al. (2015), o banco de dados deve conter informações completas desde a construção da barragem até o registro de todas as leituras ao longo do tempo. Segundo Marinaro (2022), o simples registro e acumulação de dados não garantem a segurança da barragem nem das comunidades a jusante. Além disso, a avaliação dos resultados da instrumentação de uma barragem é determinada pela qualidade da instalação e manutenção, pelo monitoramento durante o enchimento inicial do reservatório e pela interpretação precisa dos dados ao longo da vida útil do projeto (SMIDERLE et al., 2015).

Kuperman et al. (2003) afirmam que a falta ou número reduzido de instrumentação em determinadas barragens não implica, em regra, na necessidade de instalação ou majoração de um sistema de monitoramento. No entanto, os autores ressaltam a importância da implementação adequada de instrumentos específicos para avaliação da segurança, os quais devem ser regularmente monitorados e interpretados de maneira adequada, permitindo conhecer o desempenho da estrutura e seu potencial de ruptura.

O acompanhamento das subpressões e dos níveis freáticos atuantes nas barragens é reforçado pela exigência de elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB), que conforme Brasil (2020), deve incluir, entre outras informações mínimas, a identificação e os detalhes técnicos das estruturas, das instalações e dos equipamentos de monitoramento.

Para compreender e interpretar os resultados das leituras da instrumentação de uma barragem, é necessário conhecer o tipo e o funcionamento dos aparelhos instalados. No plano de instrumentação da barragem de Santa Helena, foram incluídos os piezômetros Casagrande e pneumáticos, embora estes não sejam os únicos disponíveis no mercado.

2.1 PIEZÔMETRO CASAGRANDE

Os piezômetros de sistema aberto, também conhecidos como Casagrande, consistem em um tubo vertical com um bulbo poroso na extremidade inferior. Trata-se de um aparelho relativamente simples e de baixo custo, que proporciona bons resultados em termos de monitoramento e desempenho a longo prazo.

Segundo Bressani et al. (2019), a pressão da água na entrada do instrumento é equilibrada pela coluna de água presente no tubo de medição, resultando em um período de tempo necessário para o equilíbrio entre as pressões internas e externas ao tubo. A medição do nível de água é realizada descendo-se um sensor com uma escala métrica, que emite um sinal sonoro ao entrar

em contato com a superfície da água. A cota do nível d'água é determinada pela diferença entre a cota do topo do instrumento e a distância até o nível d'água.

Normalmente, os piezômetros Casagrande possuem vida útil equivalente à da barragem, sendo possível avaliar sua eficácia por meio do ensaio de recuperação do nível d'água (MACHADO, 2007). No entanto, Fonseca (2003) aponta algumas desvantagens desse equipamento, como o tempo de resposta (*time-lag*) prolongado, que pode ser influenciado por alguns fatores, como as dimensões do equipamento e o diâmetro do tubo, podendo chegar a semanas, especialmente quando instalado em aterros compactados de baixa permeabilidade (BRESSANI et al., 2019; KUPERMAN et al., 2003; CRUZ, 1996). Já em solos altamente permeáveis, a poropressão pode variar rapidamente.

2.2 PIEZÔMETRO PNEUMÁTICO

Os piezômetros pneumáticos, pertencentes à categoria dos piezômetros fechados, caracterizam-se por uma célula dotada de diafragma impermeável protegido por uma pedra porosa, que permite o acesso da água e/ou ar ao diafragma. A pressão no diafragma é exercida por meio de um sensor piezométrico pneumático desenvolvido para medir a poropressão local através da equalização entre a pressão de um gás injetado no sistema, geralmente o gás nitrogênio, e a pressão da água intersticial presente no solo ou na rocha.

Nesses dispositivos, dois tubos conectados à estação de observação são inseridos em aberturas no corpo da célula, onde a pressão exercida na célula determina a abertura ou fechamento do diafragma. De acordo com Fusaro (1983), a medição da pressão ocorre ao se introduzir o gás comprimido em um dos tubos (alimentação) até que a pressão em ambos os lados do diafragma se iguale, permitindo o retorno do ar à estação de observação através do segundo tubo (retorno). Entre as vantagens desse instrumento, destaca-se a resposta relativamente rápida as variações piezométricas, principalmente quando comparado aos piezômetros Casagrande, e a possibilidade de instalação em qualquer local da barragem (Machado, 2007). No entanto, é importante considerar suas limitações, como possibilidade de colmatção da célula, a necessidade de calibrar os manômetros, recarregar os cilindros de gás comprimido e há também casos de perda, inclusive antes da instalação devido a deficiências no projeto, fabricação ou danos da tubulação durante a execução da compactação do aterro (CRUZ, 1996; CERQUEIRA, 2017).

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

A metodologia empregada neste estudo compreendeu a caracterização da área de estudo, o levantamento e o tratamento dos dados de instrumentação relativos às leituras dos piezômetros, a representação gráfica da seção piezométrica mais representativa para a análise e a correlação desses resultados com o nível do reservatório. Por fim, foram verificados os valores obtidos para as leituras piezométricas, uma vez que não há um parâmetro definido segundo os critérios de projeto, para interpretar as leituras observadas em campo para cada instrumento, especialmente no que diz respeito à interpretação desses resultados, não sendo indicados limites de leitura que sinalizem alguma anomalia na estrutura.

A leitura da instrumentação na barragem de Santa Helena após a reconstrução teve início em 3 de janeiro de 2001. Até 2003, a leitura dos instrumentos era realizada mensalmente. A partir de 2004, a frequência variou, sendo efetuada em intervalos mensais ou trimestrais. A partir de 2013, a leitura dos piezômetros passou a ser realizada semestralmente. Em relação aos piezômetros pneumáticos, as leituras foram interrompidas em 2021 e retomadas em janeiro de 2024. A leitura do nível do reservatório, à montante da barragem, é realizado diariamente.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Barragem de Santa Helena, situada na Região Hidrográfica do Atlântico Leste entre os municípios de Camaçari/BA e Dias D'ávil/BA, foi construída em 1979 no curso do rio Jacuípe, nas coordenadas geográficas 12°33'43.55"S e 38° 9'36.86"O (Latitude Sul e Longitude Oeste), distante aproximadamente 40 km da foz (Figura 5).

A região faz parte do sul da Bacia Sedimentar do Recôncavo Baiano, que conforme Pedreira et al. (1976), é constituída por arenitos grosseiros a finos, amarelo-avermelhados, friáveis, fedspáticos, intercalados com argilas sílticas variegadas da Formação São Sebastião.

O Quadro 1 apresenta as características atuais da barragem após o processo de reconstrução parcial, concluído em 2000.

Os dados utilizados neste estudo consistem nas informações da barragem e nos resultados das leituras dos piezômetros, os quais foram fornecidos pela EMBASA. Com o levantamento e organização das informações, foi realizada a elaboração e análise do gráfico da cota piezométrica relacionada ao tempo, associado às leituras diárias do nível do reservatório.

Figura 5. Municípios da RMS e a localização da Barragem de Santa Helena/BA.



Quadro 1. Principais características da barragem de Santa Helena reconstruída em 2000.

Reservatório	
Nível d'água <i>maximum maximorum</i>	20,0 m
Nível d'água mínimo operacional (vertedouro)	8,0 m
Volume acumulado na cota 20,0 m	241.000.000 m ³
Área alagada na cota 20,0 m	40.300.000,00 m ²
Volume morto	133.000.000 m ³
Maciço de terra homogênea	
Cota do coroamento	23,0 m
Extensão do coroamento	290,0 m
Largura do coroamento	6,0 m (original) e 5,0 m (reconstruído)
Altura máxima	20,50 m
Estrutura extravasora em concreto armado	
Tipo de estrutura	Perfil <i>Creager</i> , com comportas
Comportas tipo segmento (9,0 x 12,15 m)	3,0 unidades
Cota da soleira do vertedouro	8,0 m
Largura do extravasor	26,0 m
Vazão de projeto	1.776,30 m ³ /s (Tr = 10.000 anos)

Fonte: Adaptado de EMBASA, 2013.

3.2 COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Após a reconstrução, a leitura do desempenho da barragem passou a ser realizada através dos seguintes instrumentos: 22 piezômetros pneumáticos na fundação e no aterro; 10 piezômetros Casagrande na fundação e no aterro, no talude de jusante; 7 marcos topográficos de superfície distribuídos entre a crista e o talude de jusante e 1 medidor de vazão no pé do talude de jusante. Em 2021, com o avanço dos projetos de manutenção da estrutura e a elaboração do PSB, foram instalados nove piezômetros Casagrande no talude de jusante da barragem, no aterro da ombreira direita. Isso ocorreu em virtude da necessidade de monitorar a recuperação do sistema de drenagem interna e também para iniciar campanha de investigação do comportamento do maciço dessa área, pois nessa região do barramento não havia o monitoramento através desses instrumentos.

Os 19 piezômetros Casagrande, identificados como PC1 a PC7 e de PCA a PCI, juntamente com os 22 piezômetros Pneumático, designados de PP1 a PP22, estão detalhados no Quadros 2 e 3.

Quadro 2. Localização dos Piezômetros Casagrande.

	Estaca (m)	Posição*	Cota (m) de			Estaca (m)	Posição*	Cota (m) de	
			topo	inst.				topo	inst.
PC 1	E1+11,00	48,88 m	12,25	2,23 (b)	PC D**	E5+7,00	65,00 m	5,00	-1,70 (b)
PC 2	E1+1,20	33,90 m	14,01	1,00 (b)	PC E**	E6+10,00	65,00 m	9,80	6,00 (b)
PC 3	E0+11,90	29,48 m	14,89	-1,00 (f)	PC F1**	E8+16,10	21,10 m	17,80	3,40 (b)
PC 4	E5+7,00	23,14 m	14,08	-3,40 (f)	PC F2**	E8+16,10	21,10 m	17,80	-0,60 (f)
PC 5	E6+12,50	23,12 m	14,23	-0,60 (f)	PC G**	E8+16,10	65,00 m	9,64	5,24 (b)
PC 6	E8+15,80	38,65 m	12,93	6,00 (b)	PC H1**	E9+18,10	21,00 m	17,39	5,39 (b)
PC 7	E8+16,10	45,00 m	12,15	6,00 (b)	PC H2**	E9+18,10	21,00 m	17,39	0,39 (f)
PC A	E2+8,90	52,46 m	6,62	2,75 (b)	PC I1**	E9+18,10	39,00 m	12,19	5,39 (b)
PC B	E2+8,89	59,24 m	6,86	2,75 (b)	PC I2**	E9+18,10	39,00 m	12,19	0,19 (f)
PC C	E2+8,89	68,93 m	7,03	2,75 (b)					

*A jusante do eixo. ** Instrumentos instalados em 2021, com primeiras leituras realizadas em 28/12/2021.

(f) Fundação; (b) Barragem.

Quadro 3. Localização dos Piezômetros pneumáticos.

	Estaca (m)	Posição	Cota (m) de instalação		Estaca (m)	Posição	Cota (m) de instalação
PP 1	E2+10,00	20,0 m**	6,00 (b)	PP 12	E5+5,00	12,5 m**	-3,09 (f)

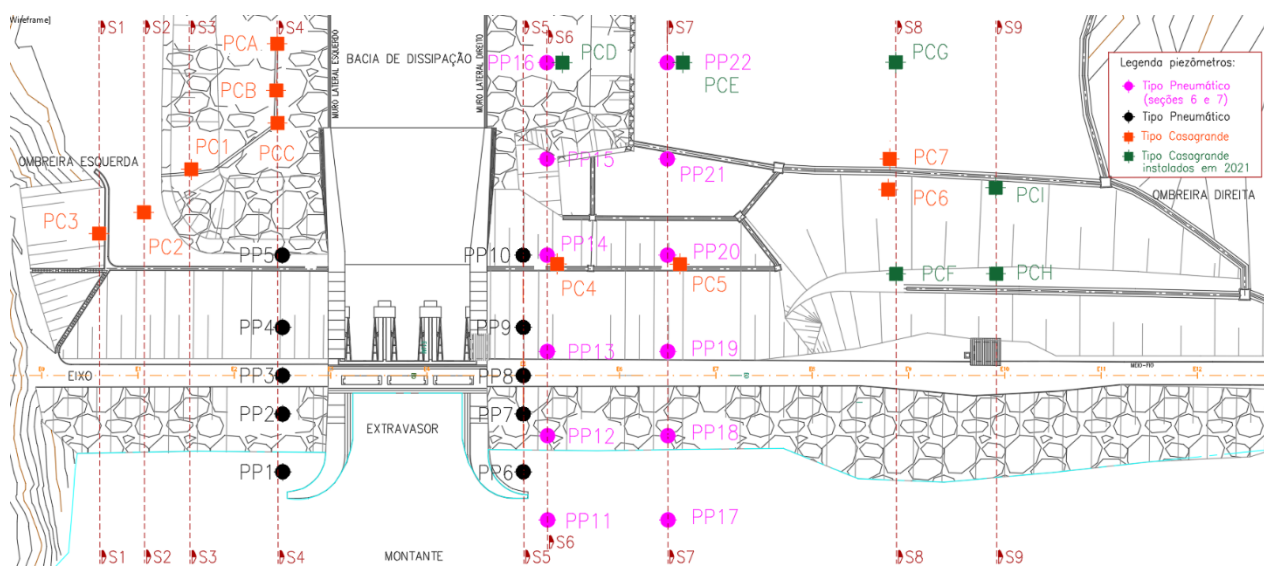
	Estaca (m)	Posição	Cota (m) de instalação		Estaca (m)	Posição	Cota (m) de instalação
PP 2	E2+10,00	8,0 m**	6,00 (b)	PP 13	E5+5,00	5,0 m*	-3,34 (f)
PP 3	E2+10,00	Eixo	6,00 (b)	PP 14	E5+5,00	25,0 m*	-3,45 (f)
PP 4	E2+10,00	10,0 m*	6,00 (b)	PP 15	E5+5,00	45,0 m*	-3,31 (f)
PP 5	E2+10,00	25,0 m*	6,00 (b)	PP 16	E5+5,00	65,0 m*	-3,04 (f)
PP 6	E5+0,00	20,0 m**	6,00 (b)	PP 17	E6+10,00	30,0 m**	-1,74 (f)
PP 7	E5+0,00	8,0 m**	6,00 (b)	PP 18	E6+10,00	12,5 m**	-0,78 (f)
PP 8	E5+0,00	Eixo	6,00 (b)	PP 19	E6+10,00	5,0 m*	-0,21 (f)
PP 9	E5+0,00	10,0 m*	6,00 (b)	PP 20	E6+10,00	25,0 m*	-0,69 (f)
PP 10	E5+0,00	25,0 m*	6,00 (b)	PP 21	E6+10,00	45,0 m*	-0,18 (f)
PP 11	E5+5,00	30,0 m**	-2,34 (f)	PP 22	E6+10,00	65,0 m*	1,15 (f)

* A jusante do eixo; ** A montante do eixo.

(f) Fundação; (b) Barragem.

Os piezômetros PP5, PP6, PP7, PP9, PP20 e PP22 estão danificados, não apresentando carga hidráulica nas leituras. Essa falha pode ser atribuída à obstrução da célula porosa ou à estrutura desses instrumentos, o que resulta na impossibilidade de realização das leituras. As posições individuais de cada equipamento e as suas respectivas seções foram registradas em planta utilizando o *software* AutoCAD, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6. Localização em planta e as seções dos piezômetros instalados, com destaque na cor magenta para os instrumentos objeto deste estudo.



Fonte: Adaptado de EMBASA (2017).

Através do Quadro 3 e da Figura 6, observa-se que os piezômetros da seção 6 estão posicionados paralelamente aos piezômetros da seção 7, a uma distância de 25,0 m longitudinal ao barramento. No entanto, há variações nas cotas de instalação, que vão de 0,60 m entre os piezômetros PP 11 e PP 17 (-2,34 m e -1,74 m, respectivamente) até 3,13 m entre os piezômetros PP 15 e PP 21 (-3,31 m e - 0,18 m, respectivamente).

Com o intuito de aprofundar a análise da interpretação de leituras piezométricas, objetivo deste artigo, foram selecionadas as seções 6 e 7 para estudo de caso. Estas seções foram escolhidas por possuírem linhas de piezômetros do mesmo tipo (pneumático) a montante e a jusante, permitindo a análise e comparação dos dados, tanto em relação ao eixo da barragem quanto ao posicionamento longitudinal desses instrumentos. Isto porque piezômetros de diferentes tipos possuem tempos de resposta distintos, tornando necessário analisá-los de forma individualizada. Nos piezômetros Casagrande, a adaptação à variação de pressão requer um intervalo de tempo para que a coluna d'água se estabilize, sendo mais prolongado em solos de baixa permeabilidade; nos piezômetros pneumáticos, o tempo de resposta é consideravelmente curto (CRUZ, 1996).

As análises realizadas neste estudo futuramente devem ser ampliadas para as demais seções piezométricas da barragem.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira leitura dos instrumentos na barragem de Santa Helena foi realizada em 03 de janeiro de 2001, com o nível do reservatório na cota de 10,90 m. O período de enchimento estendeu-se por pouco mais de dois anos, até atingir a cota máxima operacional (*maximum maximorum*) de 20,00 m em 25 de fevereiro de 2003.

O acompanhamento das pressões na estrutura, a partir do enchimento do reservatório, foi observado através das leituras dos piezômetros inicialmente instalados, que tiveram suas leituras interrompidas em 30 de julho de 2021 e foram reiniciadas em 03 de janeiro de 2024.

A figura 7 mostra o desenvolvimento cronológico das subpressões dos piezômetros pneumáticos instalados na seção 6 (PP11, PP12, PP13, PP14, PP15, PP16). Nessa mesma figura, também é apresentado no perfil da barragem com a posição desses instrumentos.

A figura 8 apresenta o desenvolvimento dos níveis piezométricos da seção 7 e o perfil com a posição dos instrumentos, que abrange os piezômetros pneumáticos PP 17, PP 18, PP 19, PP 20 (fora de operação), PP 21 e PP 22 (fora de operação).

A partir das Figuras 7 e 8, nota-se que as leituras dos piezômetros pneumáticos instalados indicam aumentos na carga hidráulica proporcionais a elevação do nível do reservatório durante o período de enchimento, conforme padrão de normalidade esperado. Durante esse período inicial até o momento atual de operação, foram observadas variações consideráveis nas cotas piezométricas registradas. Na seção 6, o piezômetro PP 14 apresentou uma variação de 9,70 m, indo de 0,55 m a 10,25 m, enquanto na seção 7, o piezômetro PP 19 registrou uma variação de 10,70 m, com valores de 1,09 m a 11,79 m.

A série histórica revela variações significativas ao longo do tempo, evidenciando eventos de queda em abril de 2009 e março de 2015, bem como picos em setembro de 2005, novembro de 2006 e julho de 2020 (Figuras 7 e 8). Segundo Silveira (2006), variações nas leituras podem ocorrer devido a vários fatores, como as condições ambientais e a alternância de leituristas. Cruz (1996) indica que o alívio de pressão a jusante também pode reduzir as pressões piezométricas. Essa última possibilidade é reforçada pois o barramento passou por intervenção em 2005 para corrigir uma surgência d'água devido à obstrução do dreno de pé (EMBASA, 2017). Em 2021, houveram intervenções adicionais no sistema de drenagem e instrumentação.

Figura 7. Evolução dos níveis piezométricos da seção 6.

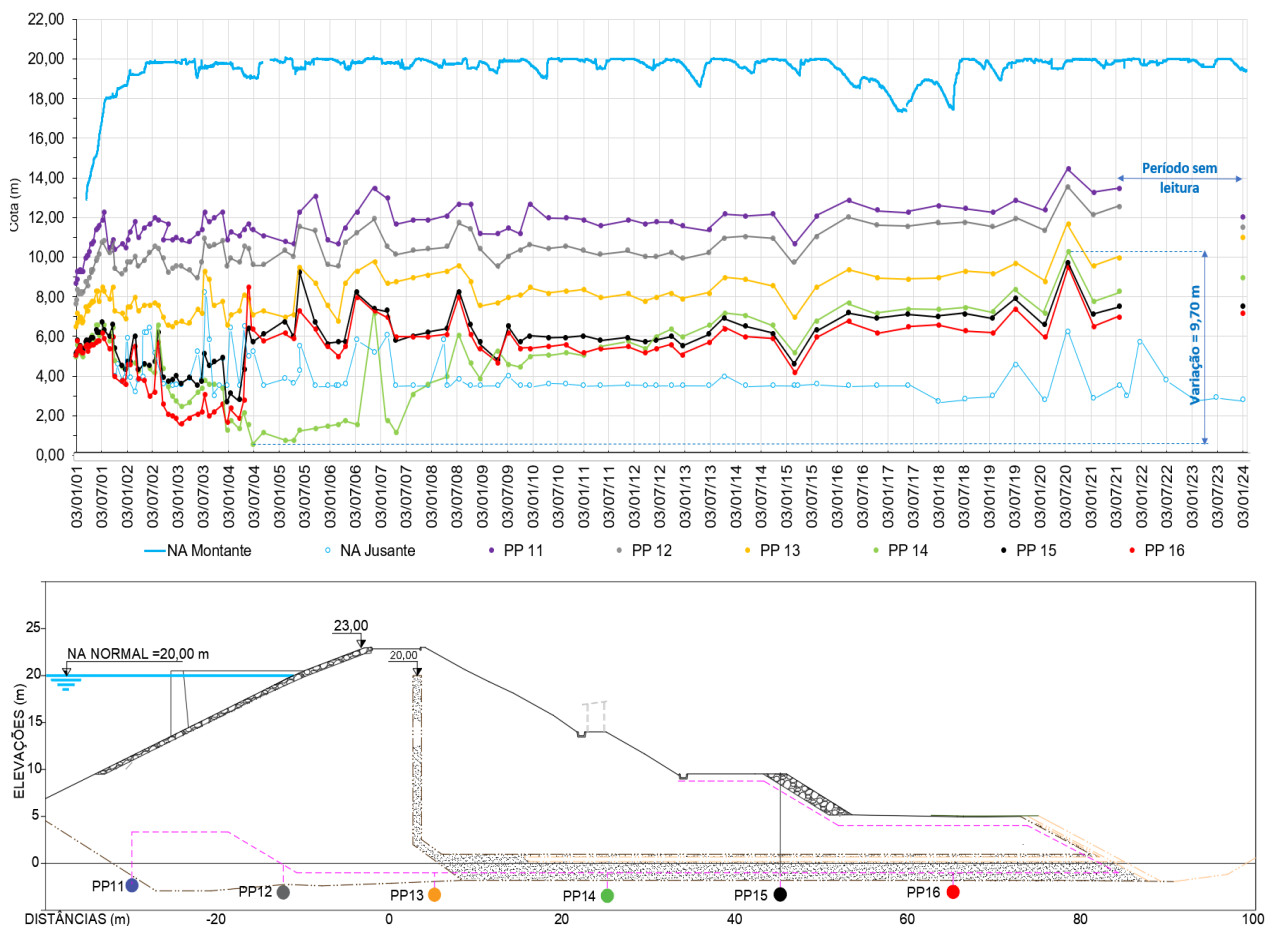


Figura 8. Evolução dos níveis piezométricos da seção 7.



Até 2009, as leituras apresentam resultados que variam consideravelmente e depois com tendência a estabilizar, pois a partir desse período, o reservatório operou a maior parte do tempo com nível próximo à cota máxima. A partir de 2015, observa-se uma redução gradual no nível do reservatório, atingindo o ponto mais baixo em 2017, e com acompanhamento das leituras piezométricas.

Os valores das subpressões registradas nas medições mantêm-se dentro do contexto histórico. Entretanto, observa-se um aumento lento e gradual nas leituras mais recentes, não sendo observadas áreas encharcadas ou surgências de água no talude de jusante, o que indica uma boa condição de segurança. Contudo, é importante continuar monitorando o talude periodicamente em relação a possíveis anomalias, até que seja possível estabelecer valores de referência para normalidade, atenção, alerta e emergência, com base na análise do comportamento dos piezômetros e nos estudos de estabilidade. Essas inspeções, juntamente com a análise dos dados da instrumentação constituem um método eficaz para avaliar o comportamento das estruturas da barragem.

As Figuras 9 e 10 apresentam o perfil da barragem de Santa Helena, com o nível operacional máximo normal a montante na cota 20,00 m, e os valores máximos já registrados nas linhas piezométricas das seções 6 e 7, respectivamente. Observou-se que as pressões piezométricas mais altas foram encontradas nos piezômetros da seção 7 (PP 17 = 17,76 m, PP 18 = 17,02 m e PP 19 = 11,79 m), apesar de estarem instalados em cotas mais elevadas do que os piezômetros da seção 6, que registraram valores menores (PP 11 = 14,46 m, PP 12 = 13,51 m e PP 13 = 11,66 m).

Conforme a Tabela 1, observa-se que as diferenças entre as pressões não são proporcionais às diferenças de cotas de instalação entre os piezômetros, dispostos paralelamente nas seções 6 e 7. Esta discrepância pode ser atribuída, em parte, à dissipação diferencial de pressão nos equipamentos localizados em cotas de instalação mais baixas, além da existência de drenos verticais de areia em proximidade dos instrumentos na seção 7.

Considerando os piezômetros PP 11 e PP 17, a diferença de cota é de 0,60 m e a diferença entre as pressões é de 5,01 m; entre PP 12 e PP 18, a diferença é de 2,31 m, enquanto as pressões diferem em 2,10 m; entre PP 13 e PP 19, a diferença é de 3,12 m, já as pressões variam em 1,17 m; e entre PP 15 e PP 21, a cota de instalação e as pressões diferem em 3,13 m e 0,91 m, respectivamente (Tabela 1). Essas observações sugerem também uma permeabilidade maior no trecho à montante onde os piezômetros da seção 7 foram instalados, em comparação com os da seção 6, apesar da homogeneidade do solo utilizado no maciço da barragem.

Tabela 1. Diferença entre as cotas de instalação e as leituras piezométricas registradas em janeiro de 2024.

Piezômetro / Seção	Cota (m)	Dif. inst. (m)	Subpressão (m)*	Dif. subp (m)	Comentários
PP 11 / S06	-2,34	0,60	12,01	5,01	Cotas inferiores apresentam maior dissipação da pressão, além disso, devido à proximidade dos instrumentos da seção 7 com os drenos de areia, esses piezômetros apresentam menores valores de subpressão em comparação à seção 6, posicionados em cotas mais elevadas e próximos ao aterro e ao filtro vertical.
PP 17 / S07	-1,74		17,02		
PP 12 / S06	-3,09	2,31	11,46	2,10	
PP 18 / S07	-0,78		13,56		
PP 13 / S06	-3,34	3,13	10,96	1,17	
PP 19 / S07	-0,21		9,79		
PP 15 / S06	-3,31	3,13	7,49	0,91	
PP 21 / S07	-0,18		6,58		

* Pressão piezométrica registrada em 05/01/2024 (NA de montante: 19,43 m; NA de jusante: 2,78 m).

A análise das medições ao longo do tempo mostrou a influência das pressões piezométricas associadas à rede de fluxo, onde as variações mais significativas foram registradas nas cotas

piezométricas dos instrumentos da seção 7 localizados na face de montante; no PP 17 (17,76 m – 8,46 m = 8,30 m) e no PP 18 (17,02 m – 7,22 m = 9,80 m), e ocorreram durante o enchimento inicial do reservatório até a fase de operação atual (Figuras 9 e 10). Essa tendência já era esperada devido a posição à montante desses piezômetros e ao fluxo d'água através da fundação, do contato entre as camadas e pelo maciço compactado.

Através da retroanálise das pressões piezométricas, é possível identificar as relações de permeabilidade e estimar uma rede de fluxo real estabelecida na fundação, contribuindo para as verificações de estabilidade da barragem nos estudos futuros.

Figura 9. Perfil típico da barragem de Santa Helena, linha piezométrica máxima e cota de instalação (Ci) dos instrumentos da seção 6.

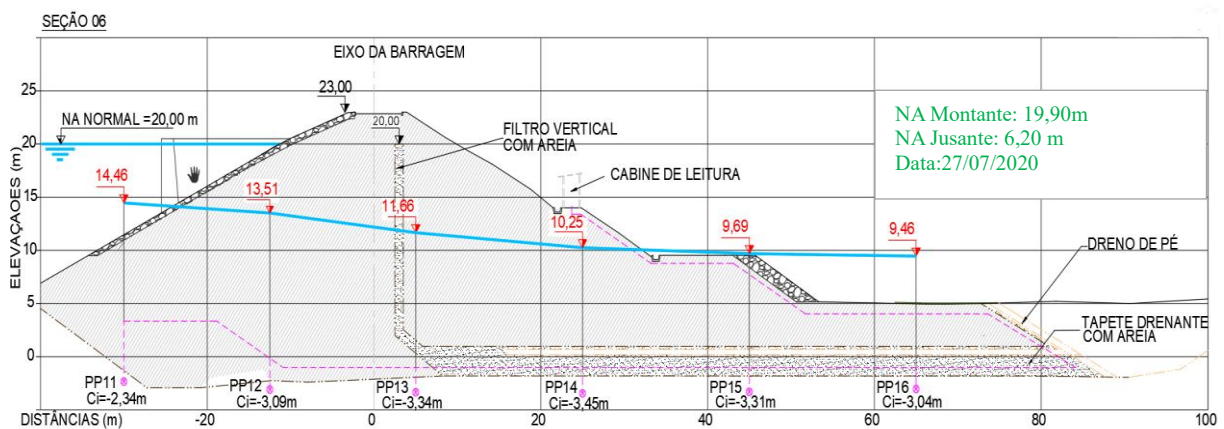
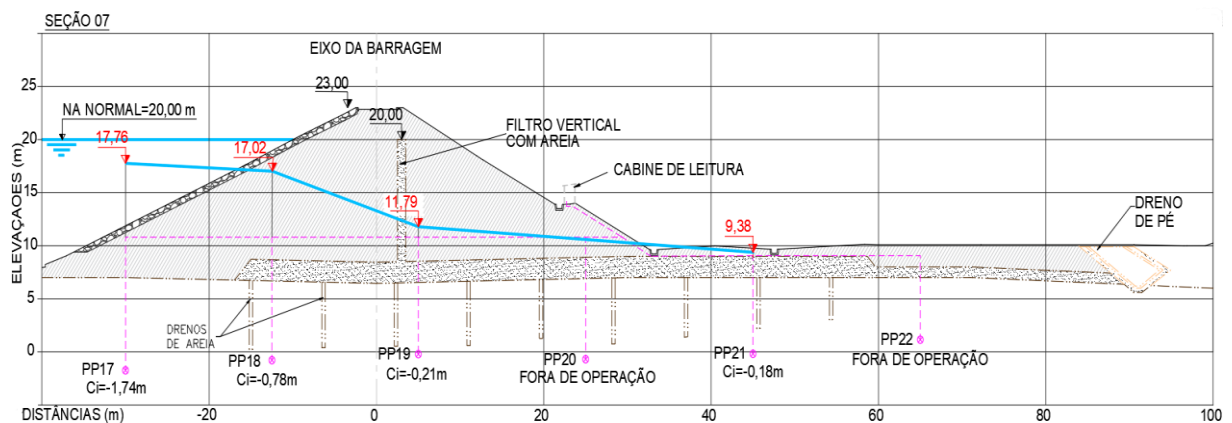


Figura 10. Perfil típico da barragem de Santa Helena, linha piezométrica máxima e cota de instalação (Ci) dos instrumentos da seção 7.



As medições piezométricas no maciço, em seções próximas dos filtros de areia vertical e horizontal permitem verificar a eficiência dos dispositivos de drenagem. O filtro vertical é projetado para minimizar a percolação interna a jusante da sua implantação e o dreno horizontal permite controlar o fluxo d'água pela fundação, o que contribui significativamente para

melhorar a estabilidade da barragem (CRUZ, 1996; SILVEIRA, 2006). Ao examinar os dispositivos das seções estudadas, nota-se que os mesmos estão implantados na fundação, não permitindo inferir considerações sobre o funcionamento do filtro vertical, apenas sobre o filtro horizontal.

Na seção 7, os piezômetros PP19 e PP21, próximos ao filtro horizontal, têm valores de subpressão adequados e condizentes com as suas respectivas posições. Além disso, nessa seção, é evidenciada a queda constante nos valores de subpressão ao longo da fundação, no trecho de montante para jusante (Figura 10).

Os piezômetros PP 12, PP 13, PP 14, PP 15 e PP 16, situados na seção 6, distam entre si aproximadamente 20,0 m e estão implantados no contato estrutura-fundação praticamente na mesma cota, com pequenas variações de até 0,41 m (Figuras 7 e 9), sendo importantes para a análise da estabilidade do maciço. Com exceção do piezômetro PP 12, os demais estão localizados a jusante do filtro vertical, sendo esperada uma redução da pressão nos mesmos. As leituras indicam estabilidade, especialmente a partir do ano de 2009, com pequenos desvios nas cotas piezométricas.

Os piezômetros PP 14, PP 15 e PP 16 (Figuras 7 e 9) estão localizados a jusante do filtro vertical de areia e registram variações piezométricas que são influenciadas pelo nível de água a jusante da barragem, resultando também no “afogamento” do dreno de pé e consequentemente, do filtro horizontal. Outra possibilidade com menor chance de ocorrência, mas que poderia aumentar a pressão piezométrica na estrutura, seria uma provável colmatagem do dreno de pé. Em períodos de cheias, a área adjacente ao muro lateral direito, onde estão situados os piezômetros PP 15 e PP 16, fica inundada devido à conexão com a bacia de dissipação. A medida em que o nível de água aumenta a jusante, as pressões na estrutura também aumentam. Um melhor direcionamento do fluxo d’água nessa região, de modo a evitar o seu retorno pela estrutura extravasora e muros laterais até o dreno de pé pode mitigar esse fenômeno, reduzindo a pressão na estrutura.

4 CONCLUSÃO OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o período de análise, os gráficos mostram que, após o enchimento do reservatório, que alcançou o nível *maximum maximorum* em 25/02/2023, ocorreram variações consideráveis nas cargas piezométricas registradas pelos instrumentos das seções 6 e 7. As leituras mostram oscilações condizentes com as variações do nível d’água do reservatório, que apesar da atual

frequência semestral de leitura, só foi possível essa identificação após análise diária do nível do reservatório. No entanto, algumas oscilações que não são condizentes com essa variação e podem ser atribuídas a mudança do aparelho de medição ou do instrumentista; ao alívio de pressão a jusante ou ainda às condições locais do maciço no entorno de cada instrumento, como, por exemplo, o aumento da permeabilidade a montante do piezômetro.

Na seção 6, destacam-se alguns valores nos piezômetros localizados a jusante, que indicam a elevação do nível d'água de jusante e consequente afogamento do dreno de pé e do filtro horizontal. Por outro lado, a leitura dos piezômetros da seção 7 confirmam o bom desempenho do sistema de drenagem interna da barragem, em especial, do filtro horizontal. No entanto, embora tenham sido realizadas leituras durante o período de operação da barragem, não foram conduzidas análises sistemáticas sobre o comportamento desses instrumentos durante o mesmo período. O simples fato de a barragem ser instrumentada não é suficiente para identificar as condições da estrutura e garantir ações de segurança em tempo hábil. É fundamental que as leituras sejam feitas com a frequência adequada para cada instrumento e que os resultados sejam devidamente analisados.

A segurança da barragem requer inspeções regulares e a implementação de um plano de monitoramento contínuo e confiável dos instrumentos. No caso dos piezômetros é vital adotar medidas específicas, como estabelecer um intervalo regular de leituras, realizar limpeza e lavagem dos piezômetros Casagrande, avaliar regularmente o estado e a recuperação dos instrumentos existentes e realizar a manutenção periódica das estruturas de proteção desses dispositivos. Através do ensaio de recuperação dos piezômetros também é possível se ter uma ideia do tempo de resposta desses instrumentos à variação das pressões. Sugere-se, além disso, a investigação da possível colmatção do dreno de pé próximo à seção 6 e, uma vez confirmada, recomenda-se a adoção de medidas corretivas e a manutenção regular para garantir o desempenho adequado do sistema de drenagem.

Visando melhorar a interpretação dos dados e facilitar a identificação do tempo de resposta dos aparelhos, resultando em maior confiabilidade e sensibilidade às variações de pressão em relação ao nível do reservatório, recomenda-se alterar a periodicidade das leituras dos instrumentos de monitoramento do maciço de terra e da fundação, conforme indicado no Quadro 4. Paralelo a isso, sugere-se também verificar as condições de funcionamento dos piezômetros Casagrande, determinando a permeabilidade equivalente do bulbo de cada instrumento.

Quadro 4. Sugestão de leitura dos aparelhos de instrumentação da barragem de Santa Helena.

Instrumento	Tipo de observação	Frequência de leitura
Marco superficial	Deslocamento horizontal e vertical	Semestral
Piezômetro	Poropressão e subpressão	Semanal
Medidor de vazão	Vazão de percolação	Semanal

Fonte: Adaptado de ELETROBRAS (2003) e Silveira (2006).

A análise das linhas piezométricas no interior do maciço é de extrema importância para compreender seu comportamento. Esses dados irão subsidiar estudos futuros de estabilidade do maciço, permitindo a obtenção de parâmetros de referência que alertem para leituras ou situações anômalas. Desse modo, sugere-se para trabalhos futuros analisar as demais seções piezométricas, estimar a rede de fluxo real, realizar de estudos de estabilidade e a determinação dos valores de referência para cada piezômetro instalado.

Os resultados das análises dos piezômetros devem ser utilizados para verificar as suposições feitas nos estudos de estabilidade e para estabelecer valores de referência de pressões para diferentes níveis de estabilidade (normal, atenção, alerta e emergência).

Enquanto a análise de estabilidade, baseada nas leituras dos piezômetros, não for realizada, sugere-se adotar os valores máximos de piezometria registrados até o momento como referência. Caso as novas leituras excederem esses valores máximos para cada piezômetro, isso deve ser considerado um sinal de atenção. Nesse cenário, é recomendável aumentar a frequência das leituras e das análises para monitorar o comportamento do maciço de forma mais cuidadosa e realizar inspeções para verificar se há surgência ou outras anomalias nos taludes da barragem. Por fim, este estudo transferiu os dados de instrumentação para planilhas eletrônicas e elaborou gráficos para todas as seções piezométricas, os quais foram armazenados em nuvem. Inicialmente, a análise concentrou-se nas seções 6 e 7, estabelecendo uma importante base para a preservação e análise da série histórica. A implementação dessas medidas representa um avanço na utilização dos dados para pesquisas e análises futuras, sendo crucial estender essas práticas para as demais seções e barragens sob a responsabilidade do operador. É preciso ressaltar a importância da análise das leituras dos instrumentos e a determinação da condição de segurança, que devem ser concluídas no prazo máximo de 48 horas após a sua realização. Como enfatizado por Cruz (1996), "um plano de instrumentação sem a correspondente análise periódica e interpretação sistemática dos resultados é inútil, ou mesmo nocivo, na medida em que pode causar uma falsa sensação de segurança em relação ao empreendimento".

REFERÊNCIAS

AMORIM, J. L. R. **Barragem de Santa Helena**. Salvador: Embasa. 2008. 73p.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 26 jan. 2024.

_____. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm. Acesso em: 26 jan. 2024.

BRESSANI, L. A. et al. Influência da Permeabilidade no Tempo de Resposta de Diferentes Tipos de Piezômetros na UHE Dona Francisca. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, GEOSUL 2019, Joinville, Santa Catarina, Brasil. Joinville: ABMS, 2019. p. 10.

Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - ELETROBRAS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas S.A., 2003.

CERQUEIRA, H. M. L. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas de mineração**. 2017. 166f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Orientado pelo Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar.

Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB. **Reabilitação de Barragens e de Estruturas Anexas**. Rio de Janeiro: CBDB, 2006.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. – EMBASA. Sistema de abastecimento de água de Salvador e RMS: Diretoria de Operação e Expansão. 2012. 23 p.

_____. Formulário técnico de barragem – Barragem de Santa Helena. 2013. 6 p.

_____. Diagnóstico, Análise da Segurança, Estudos Complementares e Projeto de Recuperação e Adequação da Barragem de Santa Helena. 2017. 211 p.

FONSECA, A. R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São**. Universidade

Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Orientado pelo Prof. Dr. Romero César Gomes.

FUSARO, T. C. **Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau.** 2007. 309f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Orientado pelo Prof. Dr. Romero César Gomes.

FUSARO, F. **Uma análise do comportamento das células de carga e dos piezômetros pneumáticos fabricados pela COPPE para utilização no metrô do Rio de Janeiro.** 1983. 230f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientado pelo Prof. Márcio Miranda Soares.

Google LLC. Google Earth. Acesso em: 2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **Prévia da População.** 2022. [Documento em formato eletrônico]. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2022/Previa_da_Populacao/BA_POP2022.pdf. Acesso em: 26 jan. 2024.

KUPERMAN, S. C.; MORETTI, M. R.; CIFU, S.; CELESTINO, T. B.; RE, G.; ZOELLNER, K.; PINFARI, J. C.; CARNEIRO, E.F.; ROSSETTO, S.L.G.; REIGADA, R. P. Critérios para fixação de valores limites da instrumentação civil de barragens de concreto e terra. In: XXV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2003, Salvador - BA. Anais... p.1-16.

LINDQUIST, L. N.; BONZEGNO, M. C. Análise de sistemas drenantes de nove barragens de terra da CESP, através da instrumentação instalada. In XIV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1981, Recife – PE, Anais... p. 267-290.

MACHADO, W. G. D. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração.** 2007. 156f. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Orientado pelo Prof. Dr. Lindolfo Soares.

MARINARO, R. A. **Proposta de metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação associados aos modos de falha: estudo de caso em uma barragem para disposição de rejeito de mineração.** 2022. 160f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Orientado pelo Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

MELLO, F. M.; SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. (orgs.). **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil.** Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021.

PEDREIRA, A. J. C. L.; et al. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo;** Folha Salvador (SD. 24). Brasília, 1976.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SMIDERLE, C. S. D.; BRESSANI, L. A.; MARQUES, M. G. Segurança de barragens: Uma análise histórica da instrumentação da barragem de Itaúba. In: XXX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2015, Foz do Iguaçu – PR, Anais... p.-.

SOUZA, R. J. B.; MAIA, R. A. A. Tratamento de subpressões elevadas no dique "A" UHE Sobradinho. In XXIII SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 1999, Belo Horizonte – MG, Anais... p. 67-76.

Villanova Engenharia e Construções Ltda. **Projeto alternativo de reconstrução da barragem de Santa Helena.** 1997.