

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS E EVENTOS RELEVANTES PARA A PIEZOMETRIADA BARRAGEM DA HIDRELÉTRICA SANTO ANTÔNIO

Statistical analysis of data and relevant events for the piezometry of Santo Antônio hydroelectric dam

Katia de Oliveira Vieira^a, Marcos Barreto de Mendonça^b,
Maria do Carmo Reis Cavalcanti^b

^a Programa de Engenharia Civil/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

^b Departamento de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO – Este trabalho apresenta a validação prática de alguns princípios da geotecnia de barragens, por meio da análise geotécnica e estatística dos dados de monitoramento da piezometria no contato entre fundação e estrutura do vertedouro complementar da barragem da Hidrelétrica Santo Antônio, situada na região amazônica do Brasil. Por meio de análises estatísticas aplicadas às séries históricas, foi possível identificar tendências e aderências às curvas de correlação, destacando a importância da individualização dos dados e a exclusão de *outliers* com justificativas técnicas. A partir da análise de um piezômetro específico evidenciou-se a influência de intervenções de manutenções sobre o desempenho do instrumento, como o procedimento de limpeza da cortina de drenagem e da variação da queda bruta na operação da barragem. O estudo também reforça a importância do mapeamento geológico da fundação e áreas adjacentes e do monitoramento contínuo por profissionais qualificados, assegurando a confiabilidade dos dados e a segurança da barragem.

ABSTRACT – This study presents the practical validation of key principles in dam geotechnics through geotechnical and statistical analyses of piezometric monitoring data at the interface between the foundation and the structure of the auxiliary spillway of the Santo Antônio Hydropower Plant, located in the Amazon region of Brazil. Statistical analyses applied to historical data series enabled the identification of trends and adherence to correlation curves, highlighting the importance of data individualization and the exclusion of outliers based on technical justifications. The analysis of a specific piezometer demonstrated the influence of maintenance interventions on instrument performance, such as drainage curtain cleaning procedures and variations in gross head during dam operation. The study also underscores the relevance of geological mapping of the foundation and surrounding areas, as well as the need for continuous monitoring by qualified professionals, ensuring data reliability and dam safety.

Palavras Chave – instrumentação geotécnica, análise estatística, segurança de barragens.

Keywords – geotechnical instrumentation, statistical analysis, dam safety.

E-mails: katia.vieira@engenharia.ufjf.br (K. Vieira), mbm@poli.ufjf.br (M. Mendonça), carminhacavalcanti@poli.ufjf.br (M. Cavalcanti)

ORCID: orcid.org/0009-0007-2500-1033 (K. Vieira), orcid.org/0000-0002-0708-9728 (M. Mendonça), orcid.org/0000-0001-8860-4607 (M. Cavalcanti)

1 – INTRODUÇÃO

Cada projeto de barragem é único e possui particularidades, como geologia local e regime hídrico da região. Acidentes relacionados à ruptura de barragens podem afetar drasticamente o ecossistema em seu entorno. Sendo assim, cada barragem se constitui em um desafio de engenharia para garantir estruturas seguras, sustentáveis e economicamente viáveis. Entretanto esse desafio não se encerra nas fases de projeto e construção, mas segue com o monitoramento e manutenção no período de operação do empreendimento.

O monitoramento deve ser um exercício contínuo e indispensável para a segurança de uma barragem, observando, através de criteriosa inspeção visual, e quantificando, com auxílio da instrumentação de auscultação geotécnica, o real estado da obra. Isto é necessário pois além do carregamento imposto à estrutura ser dinâmico, USBR (1976) comenta que os critérios adotados em projeto, consideram simplificações como a barragem estar integralmente ligada à rocha de fundação ao longo de todo o contato; ser o concreto da barragem isotrópico, homogêneo e elástico-linear; serem as juntas de contração perfeitamente instaladas e solidárias ao concreto; e que tensões horizontais e verticais variam de forma linear da face de montante para face de jusante da barragem; entre outras considerações e simplificações.

Boa parte das anomalias que levam a incidentes e até mesmo acidentes em barragens, podem ser identificadas em inspeções visuais. Entretanto, neste caso, o diagnóstico, muitas vezes, somente pode ser realizado quando a patologia já se encontra em estágio avançado, manifestando-se ao olho nu. Um instrumento de auscultação, instalado em posição estratégica, pode monitorar e detectar uma anomalia antes que sua manifestação seja visível. Assim, a instalação e correta análise dos dados da instrumentação geotécnica das barragens é um meio eficaz de prever e minimizar a ocorrência de acidentes e incidentes em barragens (Silveira, 2003).

O monitoramento de uma barragem não se limita, portanto, a obter registros da auscultação, devendo incluir sua análise para que, posteriormente, sejam tomadas as decisões que garantam sua segurança. Diante da complexidade da estrutura de uma barragem, a adequada interpretação dos registros dos instrumentos geotécnicos instalados visando extrair ao máximo os benefícios da instrumentação é um desafio.

A análise estatística dos dados de instrumentação é um meio simples e eficaz para traçar correlações e compreender o real comportamento da estrutura e sua fundação, indo além da simples observação de limites de controle estabelecidos pela projetista por meios determinísticos.

Este artigo tem o objetivo de apresentar as análises geotécnica e estatística dos valores de subpressão através dos dados de piezometria na fundação da estrutura do vertedouro complementar da barragem da Hidrelétrica Santo Antônio, situada na região norte do Brasil. Embora a referida barragem seja majoritariamente de concreto, os procedimentos de análise geotécnica e estatística abordados aqui são também aplicáveis a outros tipos de barragem.

2 – INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA: PIEZÔMETROS E MEDIDORES DE VAZÃO

2.1 – Análise de dados da instrumentação geotécnica

Um dos métodos clássicos de analisar os dados de instrumentação é construir uma tabela de data e os respectivos valores obtidos nas leituras dos instrumentos e dados de carregamentos atuantes na barragem, tais como níveis de água à montante e jusante, temperatura ambiente, precipitação, ou outros parâmetros que tenham relação com as características ambientais da região, com a estrutura e com a grandeza a ser medida. Em regiões com grandes oscilações térmicas, é recomendada a correlação da temperatura ambiente com as leituras de subpressão, pois tais oscilações influenciam na geometria das descontinuidades da fundação, o que afeta a magnitude da subpressão, conforme Andrade (1988, *apud* LOPES, 2020).

É usual também, relacionar as grandezas medidas pelos instrumentos geotécnicos com os valores de referência previstos pela projetista ou valores de referência revisados estatisticamente com base no banco de dados.

As leituras devem ser analisadas quanto à evolução na linha temporal, buscando observar comportamento cíclico, tendências, como exemplo, aumento de percolação e sua relação com a rede de fluxo prevista, evolução de recalques, deslocamentos horizontais ou de poropressões.

Fusaro (2007) pontua que os dados precisam ser analisados também individualmente quanto à discrepância em relação ao previsto e ao histórico, pois erros de preenchimento de planilhas, erros sistêmicos e randômicos podem ocorrer, gerando os comumente denominados *outliers* que em geral podem ser facilmente identificados quando o dado é plotado em gráfico com sua série histórica. Também é necessária atenção à aferição dos equipamentos de leitura e condições de instalação dos instrumentos. Outro aspecto importante é a experiência do profissional responsável pela análise de dados, quando se trata da avaliação do comportamento de barragens. Dessa forma o programa de auscultação geotécnica depende diretamente da atuação efetiva e consistente de cada um dos profissionais envolvidos, desde a coleta até a análise dos dados.

2.2 – Monitoramento da vazão percolada

As barragens são estruturas artificiais construídas para represar o fluxo natural e armazenar volumes, entretanto, não são estruturas estanques. Por isso, toda barragem apresenta percolações através do próprio corpo e das fundações, sendo essas medições de alta importância para o controle do desempenho da barragem (Silveira, 2003).

A análise da vazão percolada deve procurar observar tendências e correlações com os níveis d'água de montante e de jusante, qualidade da água, temperatura do ar e carreamento de sólidos, além da observação da tendência à colmatção por deposição de sólidos carreados pelas descontinuidades do maciço rochoso da fundação. O comportamento da estrutura dependerá da capacidade drenante dos drenos de fundação e da formação geológica da micro região em análise e de condicionantes ambientais que podem tornar o local susceptível à colmatção – por exemplo colonização de bactérias que interagem com elementos químicos abundantes no fluido percolante, tais como ferrobactérias (ocre) e mangano bactérias (Mendonça, 2000).

Através da observação da evolução da vazão percolada pela fundação, é possível compreender o comportamento da barragem e da própria fundação. Os medidores de vazão, instalados em pontos estratégicos, são os instrumentos utilizados para monitorar quantitativamente os fluidos percolados pelas estruturas e fundação de barragens. Geralmente medidores de vazão são identificados pela sigla MV.

2.3 – Monitoramento piezométrico

Um dos instrumentos amplamente utilizados para a medida de carga hidráulica em obras geotécnicas são os piezômetros, comumente identificados pelas siglas PZ, PA ou PE, podendo ser piezômetros elétricos, pneumáticos ou de tubo aberto.

O conhecimento da magnitude e da evolução das poropressões que se desenvolvem no corpo e fundação das barragens, interface barragem - fundação e na fundação, durante as fases construtiva, enchimento do reservatório, operação, períodos de dragagem para desassoreamento ou mesmo no caso de um rebaixamento dos níveis de água à montante e jusante para manutenções especiais do reservatório, é essencial para avaliação das condições de segurança de barragens. Com o monitoramento piezométrico, é possível verificar o desenvolvimento das poropressões e compará-las aos valores esperados pela projetista da barragem, comumente denominados de “valores de controle” ou “valores limites”, assegurando a eficiência dos elementos de alívio de subpressão ou de redução de gradiente hidráulico, como a cortina de drenagem e consequentemente, os fatores de segurança da barragem.

Além disso, é possível inferir pelas variações e tendências, problemas que podem comprometer a estabilidade da barragem, tal como a perda da eficiência da cortina de drenagem pela colmatção dos drenos de fundação.

3 – BARRAGEM DA HIDRELÉTRICA SANTO ANTÔNIO

A barragem da usina hidrelétrica (UHE) Santo Antônio está situada na região amazônica, cidade de Porto Velho, capital do estado de Rondônia, no Rio Madeira. Nesta região, as variações térmicas são de baixa amplitude, com temperaturas mínimas médias de 21°C e máximas de 33°C (*Weather Spark, 2024*) e o rio apresenta vazão média anual de 31.200 m³/s. Uma imagem aérea da barragem com identificação das principais estruturas que compõe a barragem é apresentada na Figura 1.

A hidrelétrica possui 50 turbinas do tipo Bulbo para geração de energia elétrica com potência de cerca de 71,36 MW cada uma, totalizando 3.568 MW de potência instalada. Começou a ser construída em setembro de 2008 e as suas duas primeiras turbinas entraram em operação em 30 de março de 2012.

A hidrelétrica é a quarta maior em geração do Brasil e uma das maiores do mundo. As características físicas da estrutura da barragem e características operativas são apresentadas no Quadro 1.



Fig. 1 – Barragem da UHE Santo Antônio e sua localização no Brasil (Acervo próprio).

Quadro 1 – Características da barragem, vertedouros e níveis operacionais.

Características	Valores
Extensão total	3102 m
Estruturas de Concreto – Altura máxima	55 m
Número de vãos (Vertedouro Principal + Complementar)	15 + 3
Largura dos Vãos	20,0 m
Altura dos Vãos	30,0 m
Capacidade de Descarga no NA máximo maximorum	84000 m ³ /s
NA do reservatório máximo normal	71,30 m
NA do reservatório mínimo normal	70,50 m
NA do reservatório máximo maximorum	72,50 m
NA normal a jusante	56,32 m
NA máximo normal a jusante (84000 m ³ /s)	65,59 m

A barragem é monitorada por 635 instrumentos geotécnicos, listados no Quadro 2, onde é indicada a quantidade instalada e grandeza física monitorada pelo respectivo instrumento. A Figura 2 apresenta o projeto da barragem da usina hidrelétrica Santo Antônio como arranjo geral, vista em planta, onde é destacada a estrutura do vertedouro complementar, em verde.

Quadro 2 – Instrumentos instalados na barragem da UHE Santo Antônio (Adaptado de Vieira *et al.*, 2023).

Instrumento	Grandeza física monitorada	Quantidade
Extensômetro de hastes (ES)	Deslocamentos e deformações na rocha da fundação	149
Medidor Triortogonal de Junta (MT)	Deslocamentos em três eixos ortogonais entre si	118
Piezômetro de Casagrande (PZ) e Elétrico (PE)	Pressão d'água	131
Marco e prisma geodésicos/superficial (MG/MS)	Deslocamentos verticais e horizontais	146
Medidor de vazão (MV)	Vazão de água que passa por um ponto ou região	16
Sensor de deslocamento (SD)	Deslocamentos na rocha da fundação	20
Acelerógrafo (AC)	Aceleração no ponto medido quanto à sismos induzidos e naturais	1
Tiltmeter (TI)	Monitora deslocamentos angulares de rotação	4
Termômetro (TE)	Temperatura no concreto	26
Medidor de nível d'água (MN/PA)	Nível da linha freática	22
Deformímetro de Concreto	Deformação no concreto	3

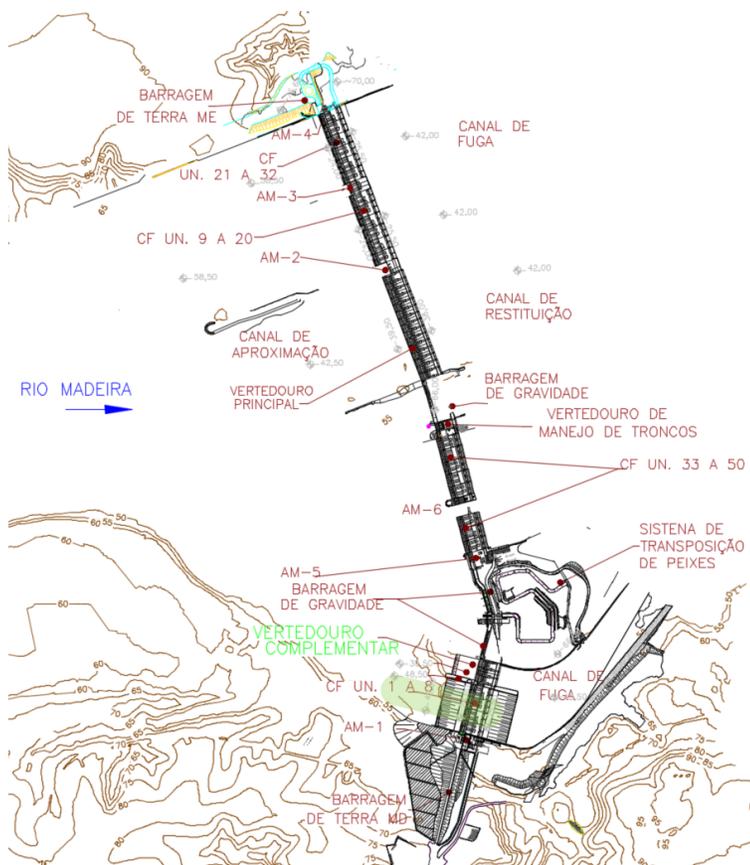


Fig. 2 – Arranjo geral da barragem da UHE Santo Antônio (adaptado de PCE, 2010).

3.1 – O Vertedouro Complementar – VTC

3.1.1 – Características do vertedouro e da geologia da fundação

O VTC, Vertedor Complementar ou Vertedouro Auxiliar, é uma das estruturas que compõem a barragem da hidrelétrica Santo Antônio, tendo sido construído na margem direita do Rio Madeira, entre a Casa de Força ou Grupo Gerador 1 (GG1) e uma barragem de gravidade (BGMD). O vertedouro complementar possui capacidade de vertimento de 14000 m³/s e é composto por 3 vãos, apresentando 20 m de largura e 30 m de altura cada.

A estrutura do VTC foi construída em dois blocos de concreto, denominados Blocos V15 e V16. A fundação do vertedouro complementar está apoiada em rocha na El. 32,20 m e ambos os blocos são dotados de galeria de drenagem. A altura máxima do Vertedouro Complementar é de 43,40 m. Na Figura 3 é possível observar o trecho da fundação do vertedouro complementar, região do bloco V15, ao fundo da foto, ou seja, à direita hidráulica do vertedouro complementar, pode-se observar parte de uma turbina tipo bulbo do Grupo Gerador 1.

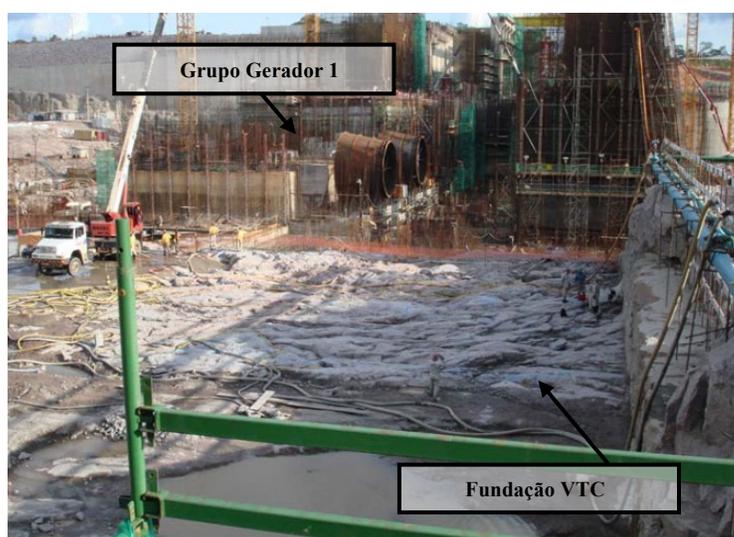


Fig. 3 – Vista parcial da fundação do VTC – El. 32,20 m (adaptado de PCE, 2012).

A fundação do Vertedouro Complementar possui tipo litológico predominante um granito róseo de granulação variável entre média e grossa, textura equigranular e estrutura maciça, tendo como principais minerais: feldspato potássico, plagioclásio, quartzo e biotita. As investigações realizadas na fase de estudos e implantação conduziram ao mapeamento geológico da fundação desta estrutura, com 6695 m², que pode ser subdividido em três regiões de características geológico-geotécnicas distintas, conforme ilustrado na Figura 4. Os parâmetros geomecânicos do maciço rochoso foram estimados com base no *Rock Mass Rating* (RMR), um sistema de classificação de maciços rochosos. O maciço rochoso do local mostrou-se compartimentado pelos sistemas de descontinuidades, que se caracterizam pela presença de dois sistemas verticalizados, com direções aproximadamente ortogonais entre si, e por outro sistema com mergulhos baixos (subhorizontais). As descontinuidades mapeadas podem ser observadas na Figura 5, de onde depreende-se que elas se propagam pela rocha a jusante da fundação do vertedouro complementar, ou seja, pela bacia de dissipação. O mapeamento geológico somente foi realizado na fundação da estrutura e não se estendeu pela bacia de dissipação que, apesar de ter sido analisada por geólogo, não foi mapeada e tratada pois as juntas mostravam-se seladas.

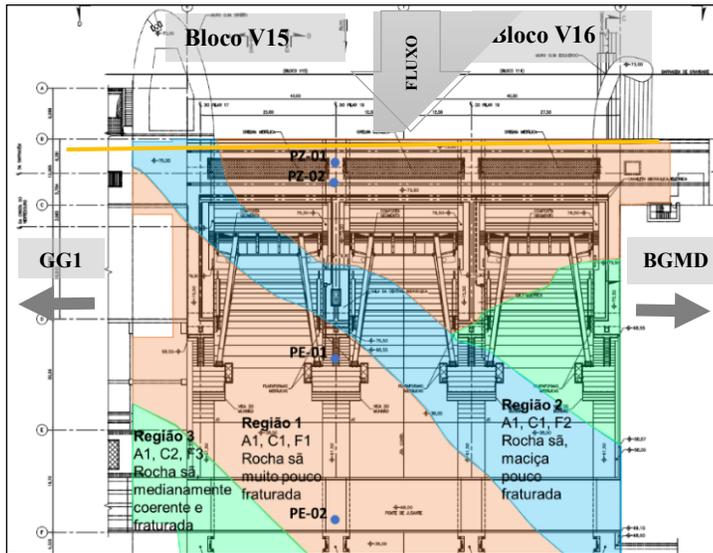


Fig. 4 – Vista em planta do VTC sobreposta ao mapeamento geológico (adaptado de PCE, 2010).

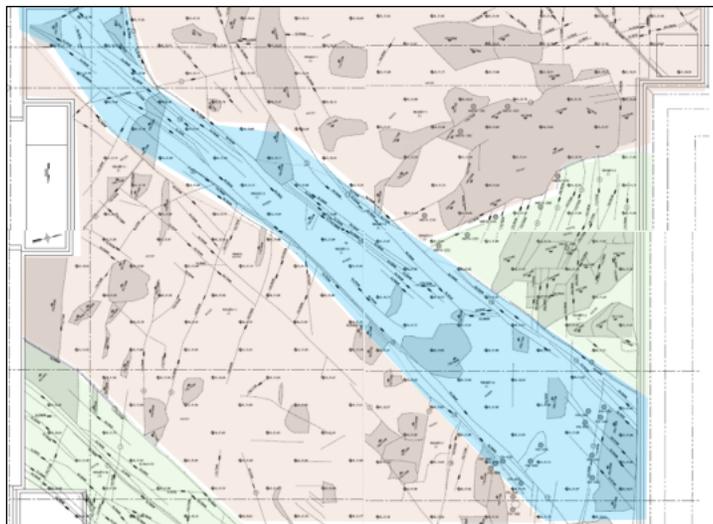


Fig. 5 – Mapeamento geológico do vertedouro complementar com destaque para descontinuidades inclinadas em relação ao eixo da barragem, sendo a região destacada em verde, a região com maior grau de descontinuidades (adaptado de PCE, 2010).

3.1.2 – Tratamento da fundação

Foram realizados os seguintes tratamentos superficiais convencionais da fundação: bate-choco com utilização de alavancas e ocasionalmente rompedores para remoção de blocos soltos ou instáveis; remoção dos materiais muito alterados e de baixa coerência, com posterior preenchimento com concreto; execução de furos para injeção de cimento (injeção de consolidação e contato). Os resultados das injeções de consolidação e contato indicaram baixa permeabilidade da rocha, onde

dos 37 furos (profundidade de 3,5 a 4,5 m), apenas 3 furos apresentaram absorção de calda de cimento.

Quanto aos tratamentos profundos da fundação, foram executadas cortinas de injeção de calda de cimento, com profundidade média de 18 metros, e drenagem, com profundidade média de 26 m, executadas a partir do piso da galeria drenagem dos blocos 15 e 16, em furos espaçados de 3 m, conforme Figura 6. Os 37 furos a montante compreendem a cortina de injeção, inclinados a 30° com a vertical e os 32 furos destacados em amarelo, a cortina de drenagem.

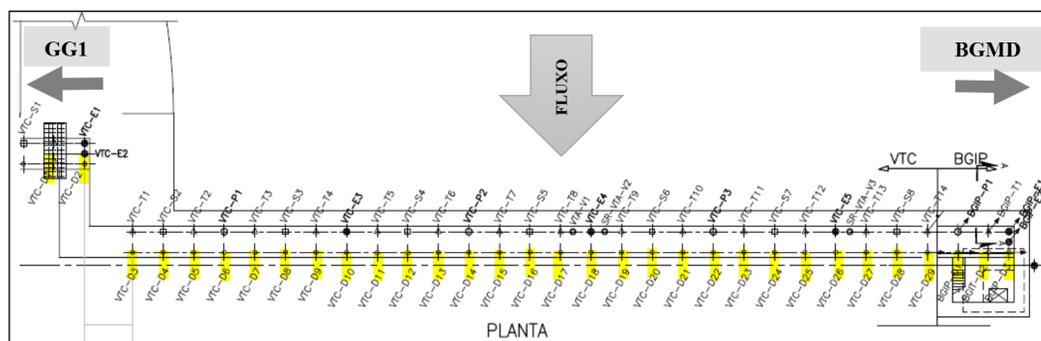


Fig. 6 – Vista em planta dos furos das cortinas de injeção e de drenagem (destacados em amarelo) na galeria de drenagem do vertedouro complementar (adaptado de PCE, 2012).

Ensaio de perda d'água (EPA) foram executados em trechos de três metros em todos os furos de injeção exploratórios (E). Nos furos primários (P) foram executados testes de perda d'água em dois trechos, sendo o primeiro englobando o contato concreto – rocha e o segundo em todo trecho inferior. Os testes de perda d'água objetivaram programar a continuidade dos trabalhos, com injeção dos furos que acusassem perda de água e simplesmente preenchimento com calda dos furos que tiveram perda de água nula. As injeções mostraram que o maciço rochoso em subsuperfície é praticamente estanque, comprovado pelos resultados dos ensaios de perda d'água e absorção de calda de cimento, praticamente nulas.

A cortina de drenagem executada também passou pela realização de ensaios de perda d'água em seus furos, todos com perda d'água nula. Todos os furos tiveram instalado em seu topo um dispositivo de proteção contra entrada de detritos e para facilitar a coleta de água. A Figura 7 é uma foto atual da galeria de drenagem do vertedouro complementar.



Fig. 7 – Foto atual da galeria com detalhe dos dispositivos de saída dos drenos que compõem a cortina de drenagem.

3.1.3 – Instrumentação Geotécnica do vertedouro complementar

O bloco 15 do VTC foi instrumentado com dois piezômetros elétricos, do tipo corda vibrante (PE) e dois piezômetros de tubo aberto (PZ), um medidor de vazão (MV) que recebe a vazão percolada por drenos de alívio da fundação em um trecho de 80 m de galeria de drenagem, quatro extensômetros de hastes (ES), dois sensores de deformação (SD), um deformímetro de concreto (DC) e três medidores triortogonais de junta (MT). A Figura 8 ilustra a seção transversal do VTC com a localização dos piezômetros destacados em vermelho.

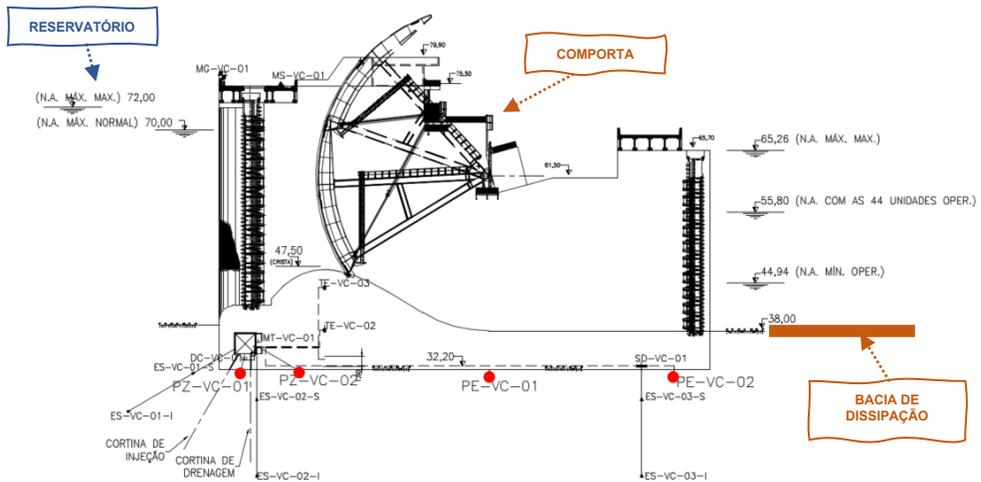


Fig. 8 – Seção transversal do Vertedouro Complementar e instrumentos piezométricos (adaptado de PCE, 2012).

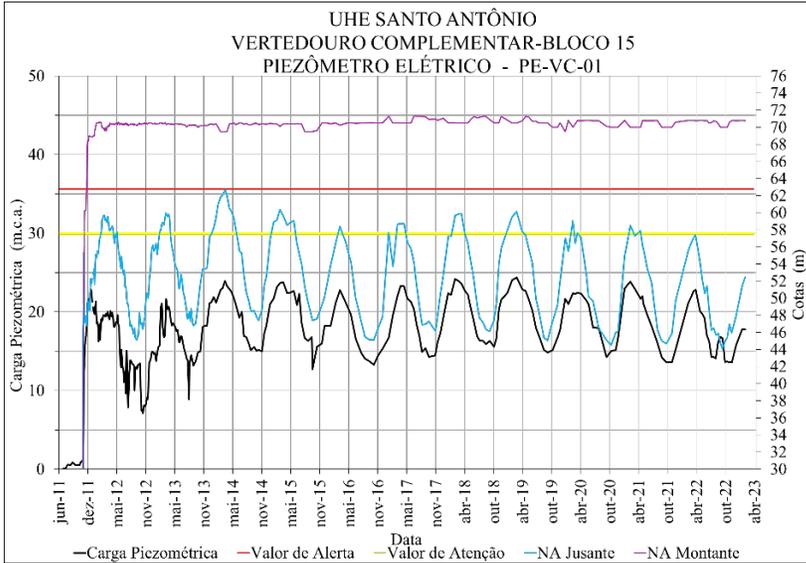
Os piezômetros de corda vibrante são sensores elétricos, instalados para observação das subpressões na fundação no contato concreto-rocha na região de jusante inacessível à leitura.

Os piezômetros de tubo estão instalados na região à montante do eixo da barragem, à jusante da cortina de injeções (PZ-VC-01) e da cortina de drenagem (PZ-VC-02), com o objetivo de permitir a determinação da eficiência destes dispositivos de impermeabilização e drenagem, bem como inferir a subpressão atuante no contato estrutura – fundação. Os bulbos dos piezômetros de tubo aberto estão localizados no contato concreto – rocha. O Quadro 3 apresenta informações dos quatro piezômetros que monitoram a estrutura do VTC.

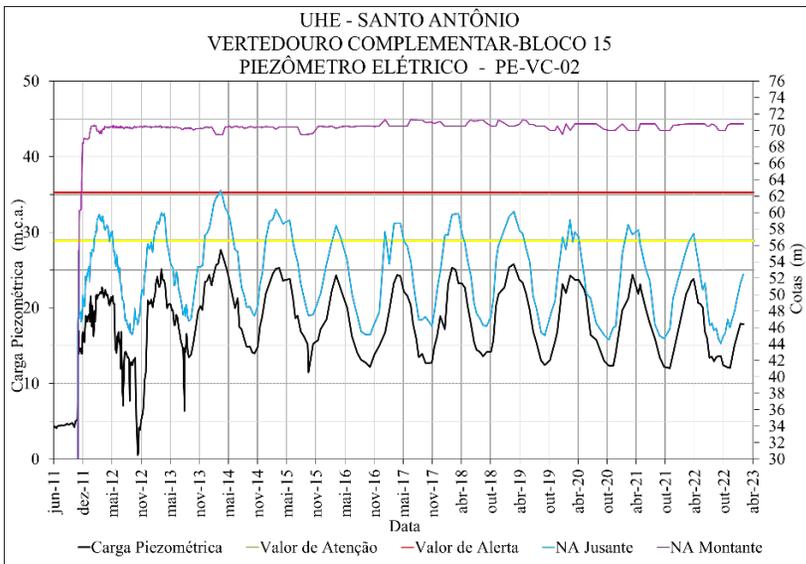
Quadro 3 – Informações técnicas dos piezômetros instalados no vertedouro complementar.

Instrumento	Cota da instalação (m)	Descrição
PE-VC-01	30,70	É um piezômetro elétrico, instalado no contato estrutura – fundação, com objetivo de quantificar a subpressão no ponto médio entre a jusante e a extrema montante.
PE-VC-02	30,17	É um piezômetro elétrico, instalado no contato estrutura – fundação, na extrema jusante, através do qual é possível verificar a perda de carga entre a montante e a jusante.
PZ-VC-01	31,20	É um piezômetro de tubo aberto, comprimento de 4,37 m, instalado no contato estrutura-fundação, à jusante da cortina de injeção e à montante da cortina de drenagem.
PZ-VC-02	31,20	É um piezômetro de tubo aberto, comprimento de 4,20 m, instalado à jusante da cortina de drenagem e monitora a subpressão no contato fundação-estrutura, tem como uma das principais funções a de avaliar a eficiência da cortina de drenagem, indicando a redução de carga piezométrica pelos drenos.

As Figuras 9 e 10 apresentam os gráficos da série histórica de dados obtidos através dos quatro piezômetros, correlacionados com as elevações de carga hidráulica a montante e jusante da barragem. Para cada instrumento, são indicados em amarelo e vermelho os “valores de referência” identificados como “Atenção” e “Alerta”, respectivamente. São valores indicados pela projetista através de métodos determinísticos, onde “Atenção” está associado aos valores máximos em carregamento normal para a estrutura e “Alerta” à pior situação de carregamento excepcional ou limite para a estrutura (Eletrbrás, 2003). A Figura 11 apresenta a cota piezométrica dos quatro pontos de monitoramento e as cotas do reservatório e do nível de água a jusante da barragem ao longo do histórico de auscultação do vertedouro complementar.

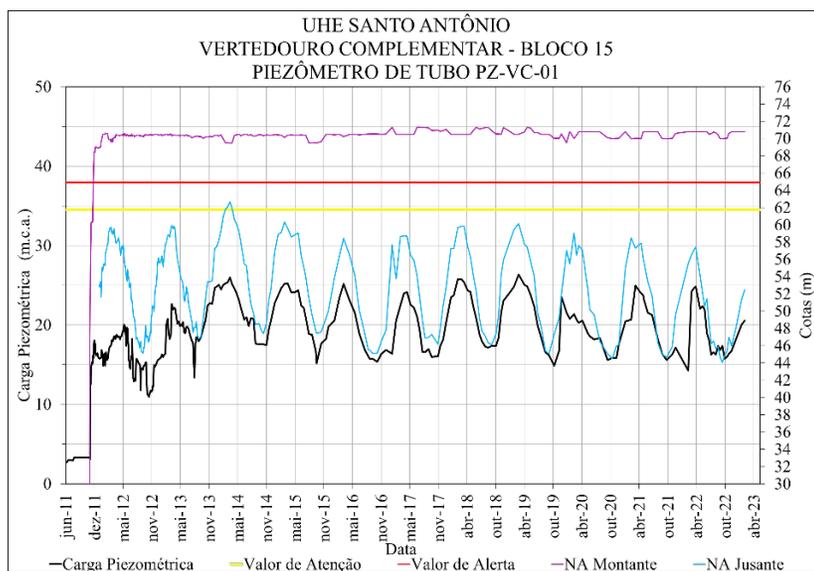


(a)

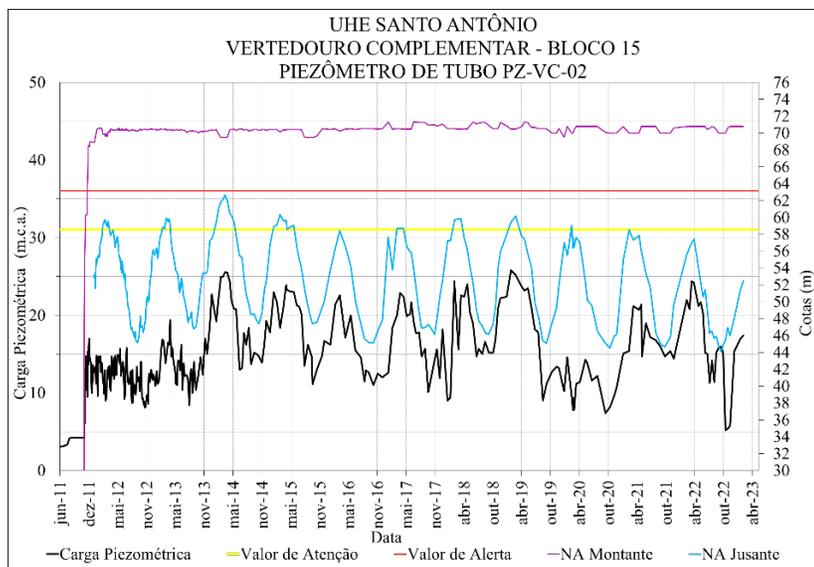


(b)

Fig. 9 – Gráfico da série histórica: (a) PE-VC-01; (b) PE-VC-02.



(a)



(b)

Fig. 10 – Gráfico da série histórica: (a) PZ-VC-01; (b) PZ-VC-02.

4 – FATOS RELEVANTES NO HISTÓRICO DE OPERAÇÃO E OS REFLEXOS NO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DA ESTRUTURA

A Regra de Operação da Hidrelétrica Santo Antônio limita a manobra dos níveis de água (NA) do reservatório entre as elevações 70,50 m e 71,30 m (referenciadas em relação ao nível do mar), ou seja, 0,80 m. Já o NA jusante varia conforme o regime natural do Rio Madeira, que em um único

ciclo hidrológico pode variar entre as elevações 45 e 62 m, portanto, 17 m de variação ao longo do período de um ano.

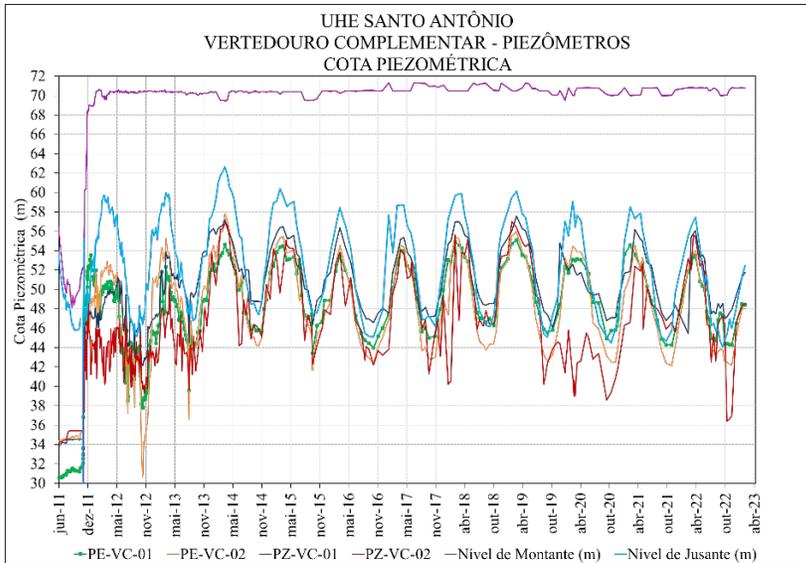


Fig. 11 – Gráfico da série histórica das cotas piezométricas e níveis de água a montante e jusante.

A estrutura do vertedouro complementar, que compõe a barragem da usina hidrelétrica, teve seu comissionamento no ano 2011, quando se inicia a série histórica de dados dos instrumentos geotécnicos que a monitoram. Em ordem cronológica, na Figura 12 são citados os eventos relevantes que ocorreram na operação da hidrelétrica, com reflexos na estrutura e que podem ser evidenciados no monitoramento geotécnico do vertedouro complementar, que compõe a barragem da hidrelétrica Santo Antônio.

-
- ⊕ Outubro/2011 – Enchimento do recinto de jusante – Comissionamento
 - ⊕ Novembro/2011 – Enchimento do recinto de montante – Comissionamento
 - ⊕ Janeiro a agosto/2012 – Operação do VTC (além dos 10 vãos do Vertedouro principal), devido à vazão afluyente no Rio Madeira com pico de 32700 m³/s
 - ⊕ Outubro a Dezembro/2012 – Ensecamento à jusante para obra de recomposição da bacia de dissipação do VTC
 - ⊕ Dezembro/2012 – Enchimento pós obra de recomposição – Recinto de jusante
 - ⊕ Abril/2014 – Cheia histórica do Rio Madeira (Vazão afluyente de 59000 m³/s)
 - ⊕ Abril/2015 – Realizado ensaio de dissipação no PZ-VC-02
 - ⊕ Junho/2016 – Limpeza de drenos de alívio da fundação (cortina de drenagem)
 - ⊕ Setembro/2019 – Limpeza de drenos de alívio da fundação (cortina de drenagem)
 - ⊕ Março/2022 – Limpeza de drenos de alívio da fundação (cortina de drenagem)

Fig. 12 – Eventos relevantes que ocorreram na operação da hidrelétrica em ordem cronológica.

No ciclo hidrológico de 2012, com o aumento das vazões do Rio Madeira, os piezômetros elétricos, PE-VC-01 e PE-VC-02, instalados mais a jusante e que deveriam registrar maiores valores em resposta ao aumento da carga devido à elevação do NA de jusante, apresentavam leituras

indicando tendência de redução de carga. Analogamente, o medidor de vazão que monitora a percolação pela fundação registava picos acima do limite de atenção, indicado pela projetista, 1,0 l/s. Ambos os instrumentos contrariaram as expectativas. Frente ao indicado pela instrumentação, procedeu-se a uma campanha de topobatimetria onde foi identificada uma erosão de 14 m de profundidade, 8 m de largura e 75 m de comprimento.

A Figura 13 destaca esse período do histórico de dados. Neste gráfico fica evidente a importância da instrumentação e da análise dos seus registros por profissionais qualificados para garantia da segurança da barragem. Ainda na Figura 13, pode-se notar o comportamento coerente dos piezômetros e do medidor de vazão, com a redução das cargas piezométricas e redução à menos da metade da vazão registrada pelo MV, como reflexo da redução do nível de água de jusante, devido ao ensecamento e obra de recomposição que consistiu no tratamento e preenchimento da falha geológica por concreto ciclópico e concreto armado, e chumbadores.

A Figura 14 apresenta a composição do mapeamento geológico da fundação do vertedouro complementar com o resultado da topobatimetria realizada na bacia de dissipação após vertimentos em 2012. Ao lado, a projeção da estrutura do vertedouro e fotos dos taludes de rocha dos septos com a rocha erodida na linha d'água, coincidente com o prolongamento das linhas de falhas identificadas no mapeamento da fundação do VTC.

Essa erosão ocorreu devido à ação da hidrodinâmica no período as altas vazões do Rio Madeira, comumente conhecido como inverno amazônico. Portanto, em outubro de 2012, foi realizado o ensecamento do recinto de jusante deste trecho da barragem, concernente à estrutura do vertedouro complementar, visando realizar obra de reconstituição da bacia de dissipação.

As Figuras 14 e 15 evidenciam a falha geológica erodida imediatamente a jusante da estrutura do vertedouro complementar, que foi diagnosticada inicialmente pelo comportamento da instrumentação. Durante a construção, as descontinuidades dessa caixa de falhas mostravam-se seladas, motivo pelo qual não foi projetado e executado nenhum reforço estrutural para tal região. As fotos 1 e 2 da Figura 14 foram obtidas em áreas que estavam abaixo do nível de água antes do ensecamento da bacia de dissipação.

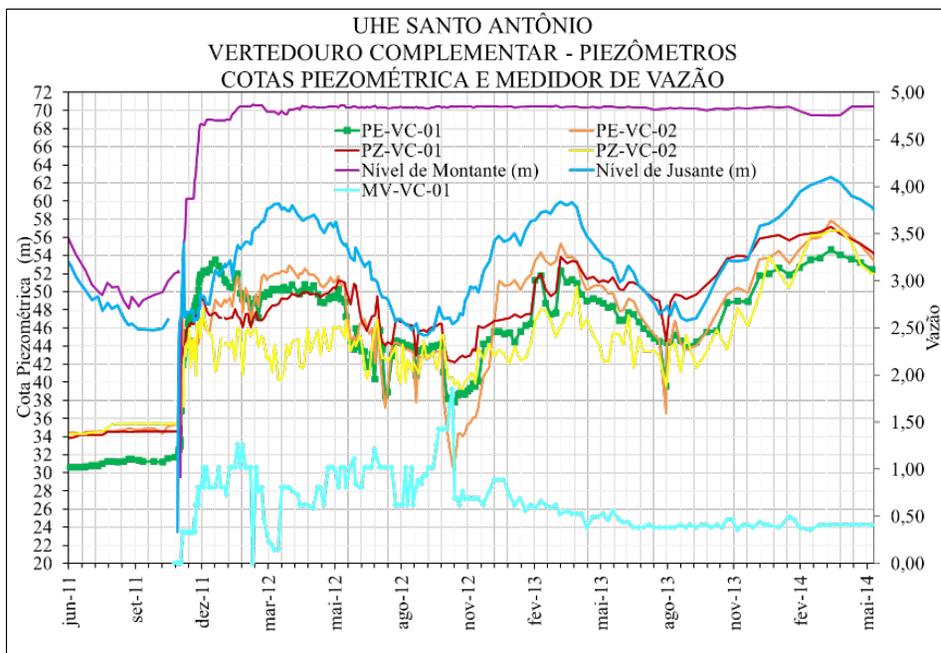


Fig. 13 – Detalhe gráfico no período do ano 2012 da série histórica dos PZs e MV do VTC.

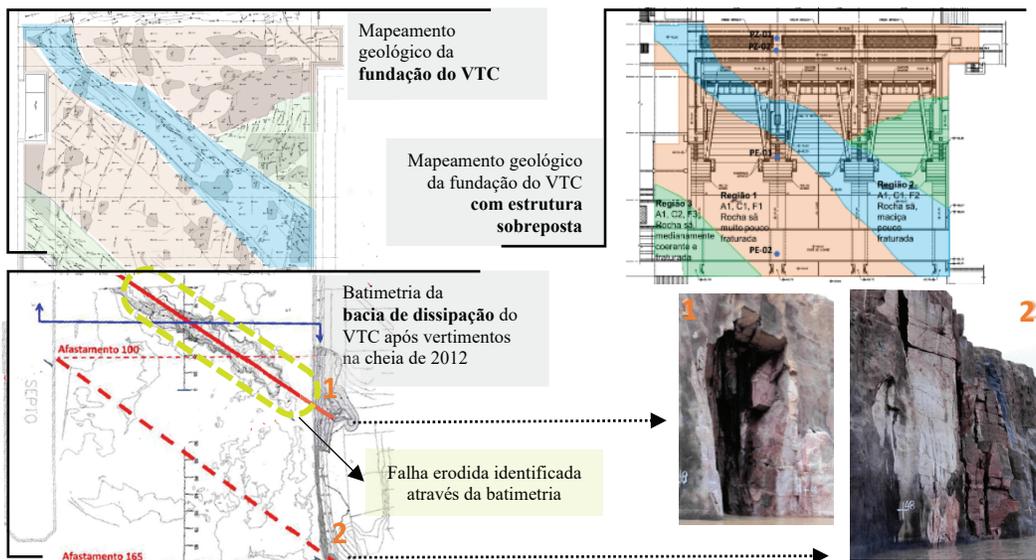


Fig. 14 – Composição do mapeamento geológico, topobatimetria da bacia de dissipação e imagens (1 e 2) da parede do septo lado esquerdo hidráulico pós período de vertimentos de 2012, destacando a falha geológica erodida (adaptado de Eletrobrás Furnas, 2013).

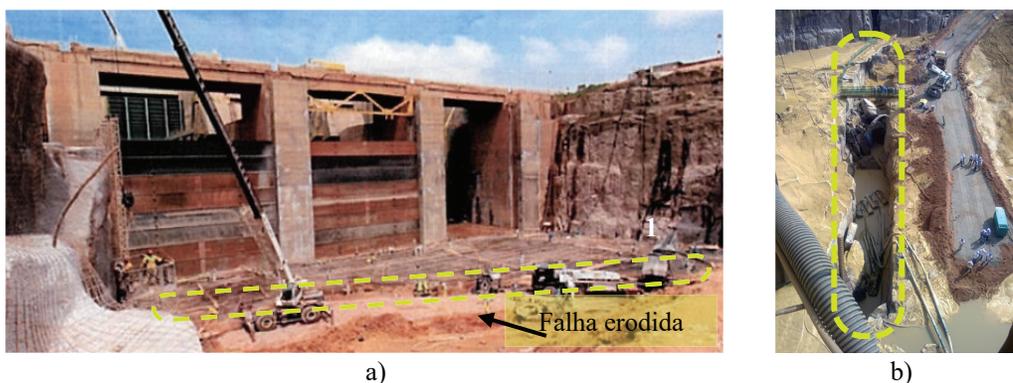


Fig. 15 – a) Foto com vista de jusante para montante com detalhe da falha geológica erodida em bacia de dissipação já ensecada para execução da obra de recuperação; b) Foto de vista superior com destaque para dimensões da caixa de falha com profundidade média de 14 metros e 8 metros de profundidade (Eletrobrás Furnas, 2013).

Caso não houvesse sido realizado o monitoramento geotécnico e pronta ação de ensecamento e obra de reconstituição, esta erosão na rocha da bacia de dissipação poderia ter avançado sob a estrutura da casa de força 1, seguindo o caminhamento da caixa de falhas, o que comprometeria a estabilidade das estruturas deste trecho da barragem.

Após o ensecamento, toda a bacia de dissipação foi primeiramente limpa com água pressurizada para retirada de blocos soltos. A falha erodida foi preenchida com concreto ciclópico, seguidos de 4 m de concreto massa de fck 9 MPa e alto slump. No último 0,50 m foi executada laje de concreto armado, com malha de aço de 20 mm com espaçamento de 20 cm, fck de 30 MPa, onde também ficaram ancoradas as cabeças dos chumbadores, como apresentado no Figura 16. Nesta laje, o

cobrimento mínimo adotado foi de 10 cm. Os septos nas direita e esquerda hidráulica da bacia de dissipação foram reforçados com chumbadores de aço de seção transversal de 32 mm e comprimento de 4 e 5 m, intercalados em uma malha de espaçamento 2,25 m por 2,25 m. Na região próximo aos septos, foi utilizado chumbador de 10 m de comprimento, com a cabeça também ancorada na laje executada nesta região da bacia de dissipação. Todos os chumbadores foram executados em furos de 75 mm, preenchido com calda de cimento.

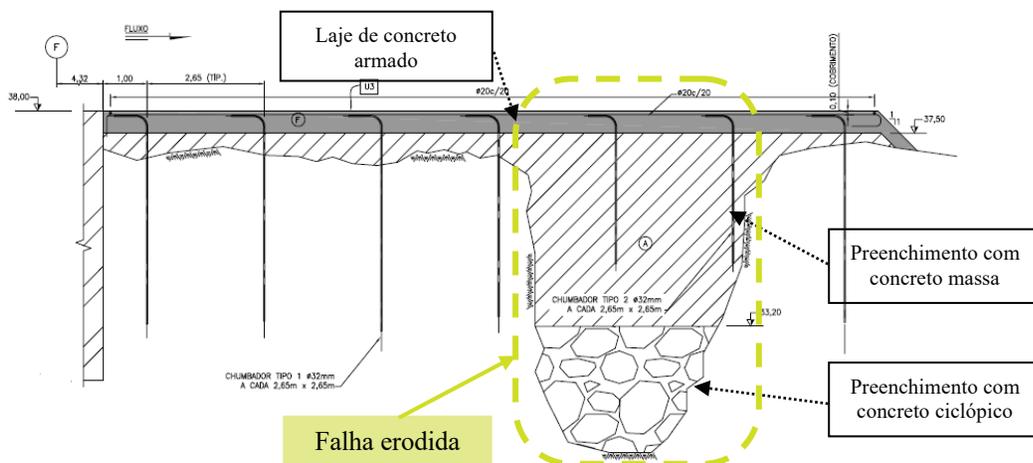


Fig. 16 – Seção transversal do projeto de recomposição da falha geológica erodida e reforço da bacia de dissipação do VTC (PCE, 2012).

Como medida de monitoramento da eficácia da obra realizada na bacia de dissipação no ano 2012, além da auscultação por instrumentação geotécnica, é realizado a cada 2 anos, o imageamento subaquático por empresa especializada. As imagens subaquáticas multifrequenciais foram obtidas através de varredura em diversos transectos longitudinais e transversais. A Figura 17 apresenta a imagem obtida na última campanha realizada em 2023 (à esquerda) e o projeto de recomposição executado (à direita). O monitoramento tem demonstrado a integridade do concreto da laje executada e da rocha remanescente na bacia de dissipação.

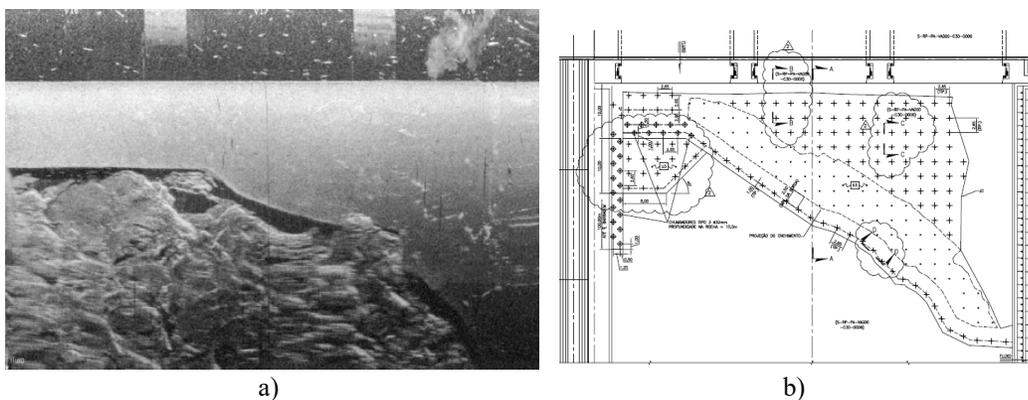


Fig. 17 – a) Imagem subaquática; b) Projeto em planta executado na recomposição da bacia de dissipação do VTC (Venturo, 2023; PCE, 2012).

Outro fato relevante é a alta concentração de sedimentos na água do Rio Madeira e a suscetibilidade à colmatção dos drens de fundação, somada à presença de ferrobactérias e manganobactérias, identificadas por análise bioquímica das águas coletadas nas canaletas de drenagem. Assim, visando manter a eficiência da cortina de drenagem, foram realizadas campanhas de limpeza para desobstrução dos drens, atividade ilustrada na Figura 18.



Fig. 18 – Registros de atividade de limpeza de drens da cortina de drenagem.

A primeira campanha de limpeza da cortina de drenagem foi realizada em junho de 2016. O procedimento de limpeza aplicado, em termos simples, consiste da aplicação de água pressurizada com uso de mangueira, em cada um dos drens de fundação, com auxílio de hidrojato industrial. É realizada a leitura de vazão e tomada a medida de comprimento do furo em cada um dos drens, antes e após a realização do procedimento de limpeza. Após 2016, o procedimento foi realizado novamente em setembro de 2019 e em março de 2022, o que se reflete mais explicitamente, nas leituras do medidor de vazão e no piezômetro a jusante da cortina de drens, PZ-VC-02, conforme mostrado no gráfico da Figura 19.

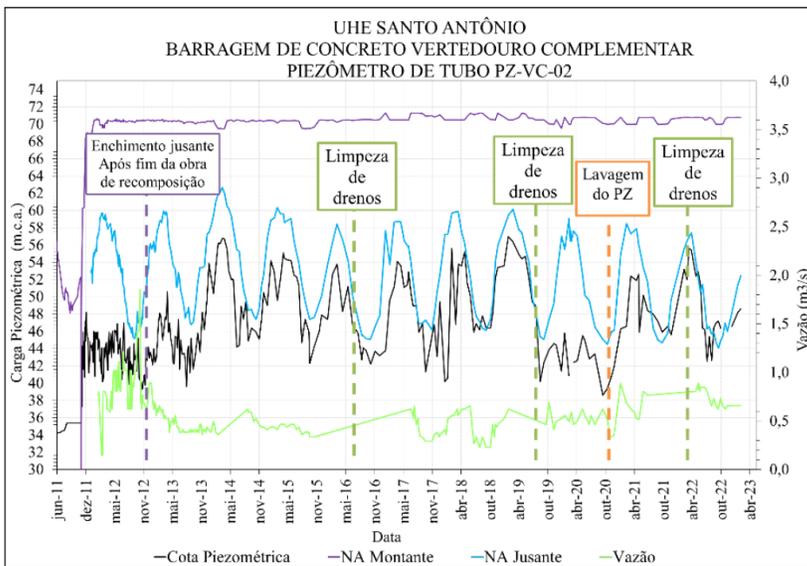


Fig. 19 – Relação gráfica dos eventos de limpeza de drens da cortina de drenagem, dados de vazão e de piezometria a jusante da cortina, PZ-VC-02.

5 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO

5.1 – Metodologia

Neste artigo, a análise estatística concentrou-se nos dados dos piezômetros. Inicialmente foram observadas as séries históricas e identificados os períodos de dados discrepantes do histórico dos instrumentos em estudo.

Por exemplo, o incidente da erosão da falha geológica teve reflexo direto sobre a percolação e gradiente hidráulico na fundação, consequentemente, com gradiente hidráulico menor houve aumento de vazão pelos drenos da cortina de drenagem e na subpressão atuante na estrutura do vertedouro complementar. O MV-VC-01 registrou em outubro de 2012 os maiores valores da série histórica, com máximo registro de 1,8 l/s, 80% acima do valor limite normal indicado pela projetista da barragem.

Este período inicial, entre o comissionamento e a obra de recuperação da bacia de dissipação, compreende aproximadamente um ano e não conduz à valores de leitura desejáveis para os piezômetros dessa estrutura, posto que os carregamentos deste período divergiam das faixas de valores esperados pela projetista da barragem.

Assim, a metodologia desse trabalho baseia-se em três macro etapas:

1. análise estatística da série histórica da poropressão monitorada por cada instrumento. Nesta etapa, traçou-se a correlação entre a grandeza monitorada e a queda bruta, ou seja, o valor resultante da diferença entre o nível de água (NA) de montante e o NA de jusante da barragem, que denominaremos de DNA;
2. identificação e subtração do histórico de períodos atípicos para a estrutura, com as justificativas técnicas e evidências com base estatística;
3. análise da sensibilidade do diagrama de subpressão atuante na estrutura do vertedouro complementar.

5.2 – Resultados e discussão

5.2.1 – Análise estatística por instrumento

A série de dados foi segregada inicialmente em 3 períodos de análise: período completo (2013-2023), ano de 2012 e ano de 2014, com as justificativas:

- 2012 - Neste ano houve uma série de eventos atípicos: entrada em operação, período de operação do vertedouro em altas vazões, erosão da falha geológica próximo à fundação do vertedouro complementar, período de ensecamento para obra de recomposição do trecho erodido da fundação e novo comissionamento da estrutura. Os valores mínimos de carga piezométrica estão associados ao período quando o NA de jusante chegou a zero, ou seja, o ensecamento para a obra de recuperação. Após a obra de recuperação, houve o novo comissionamento, onde os instrumentos geotécnicos, de acordo com o tempo de resposta individual, assumem carga até a estabilização das leituras.
- 2014 - Visto a máxima histórica no monitoramento das vazões do Rio Madeira ter sido registada no ano 2014, destacou-se esse ano em relação ao restante da série histórica de subpressão da estrutura que compõe a barragem para verificação da aderência ao comportamento típico da série histórica.

Foi utilizado o recurso de plotagem dos dados em gráfico por diagrama de dispersão, correlacionando a carga piezométrica com a queda bruta ou DNA, a saber, NA de montante – NA de jusante. Foi possível visualizar a discrepância nos dados obtidos para piezometria no período do ano 2012 como resposta do instrumento à uma redução da carga hidráulica de jusante, devido ao ensecamento.

Nos gráficos foi empregado o recurso de linha de tendência, sendo essa linha a representação da equação de regressão linear entre as duas variáveis: a carga piezométrica e o DNA. Foram calculados valores de média e desvio padrão de amostras de dados das leituras piezométricas. Como o banco de dados contém mais de 400 leituras, a utilização de distribuição normal é adequada. Para amostras com menos de 30 leituras, é interessante o uso de outros métodos para cálculo do desvio padrão (Ramirez e Reis, 2016). O processamento estatístico dos dados do histórico dos piezômetros resultou nos valores de média e desvio padrão indicados no Quadro 4. A seguir são analisados separadamente os resultados de cada piezômetro.

Quadro 4 – Valores de média e desvio padrão da relação carga piezométrica / DNA.

		Relação Piezometria (Subpressão) / DNA				
		DNA (m)	PE-VC-01	PE-VC-02	PZ-VC-01	PZ-VC-02
Histórico Completo (Sem Expurgos)	Média	17,67	1,12	1,18	1,18	0,97
	Desvio padrão	4,95	0,58	0,67	0,59	0,55
Ano 2012 (Início operação Ensecamento e Obra)	Média	17,68	0,98	1,03	1,00	0,74
	Desvio padrão	4,24	4,86	0,62	0,40	0,27
Ano 2014 (Cheia Histórica)	Média	14,74	1,64	1,78	1,82	1,64
	Desvio padrão	5,65	0,92	1,08	0,97	1,01
Anos 2013 a 2023	Média	17,66	1,19	1,26	1,29	1,09
	Desvio padrão	4,17	5,01	0,68	0,65	0,61

PE-VC-01: A Figura 20 apresenta a correlação dos dados deste piezômetro com a queda bruta. Com a análise gráfica também é possível notar como que, mesmo com a cheia histórica do ano 2014, este piezômetro não registrou valores de carga piezométrica acima dos limites de projeto, tampouco acima das médias dos mesmos períodos dos outros anos do histórico. Os dados mais discrepantes do histórico, plotados em vermelho são os registros do ano 2012, durante a obra de recuperação da bacia de dissipação. Essa observação estatística indica sobre a relação direta do PE-VC-01 com a variação do NA de jusante da barragem.

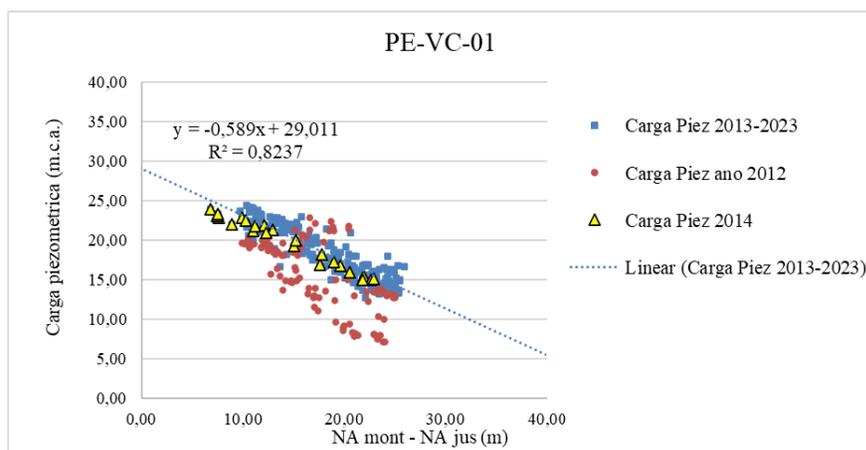


Fig. 20 – Correlação Subpressão e DNA para PE-VC-01.

PE-VC-02: Com a representação gráfica da Figura 21, que apresenta a correlação da carga piezométrica com a queda bruta, DNA, evidencia-se a disparidade dos dados do ano 2012 com o restante do histórico de monitoramento. Similarmente ao PZ-VC-01, verifica-se que o ano da cheia histórica, 2014, ajusta-se bem à curva dos dados do histórico, quando expurgado o ano 2012. Além disso, visto o ano 2012 ter sido marcado pelo ensecamento, ou seja, menores níveis de jusante da estrutura, também é possível observar a relação direta do PE-VC-02 com a variação do NA de jusante da barragem.

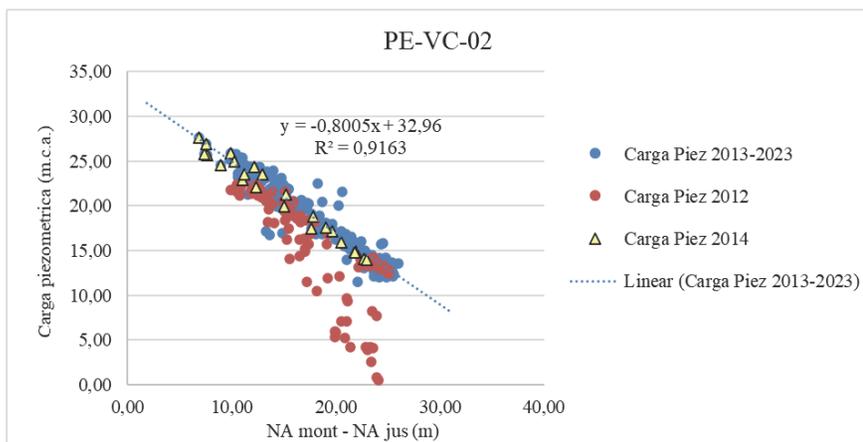


Fig. 21 – Correlação Subpressão e DNA para PE-VC-02.

PZ-VC-01: A representação gráfica da Figura 22 apresenta a correlação da carga piezométrica com a diferença de nível entre a montante e jusante para os dados do período de 2013 a 2023. Para essa série histórica, a correlação ficou fragilizada por alguns pontos distantes da curva de ajuste, com R^2 0,6187. Observando o banco de dados, foi possível identificar que nos primeiros meses após o enchimento do recinto de jusante, pós obra de 2012, este piezômetro registrou valores de subpressão baixos, com tendência crescente, com taxa média de 1 mca/mês, até o mês de julho de 2013 quando a relação carga piezométrica *versus* queda bruta volta a se ajustar melhor à curva. Tal observação parece indicar um *delay* nessa célula piezométrica do tipo Casagrande.

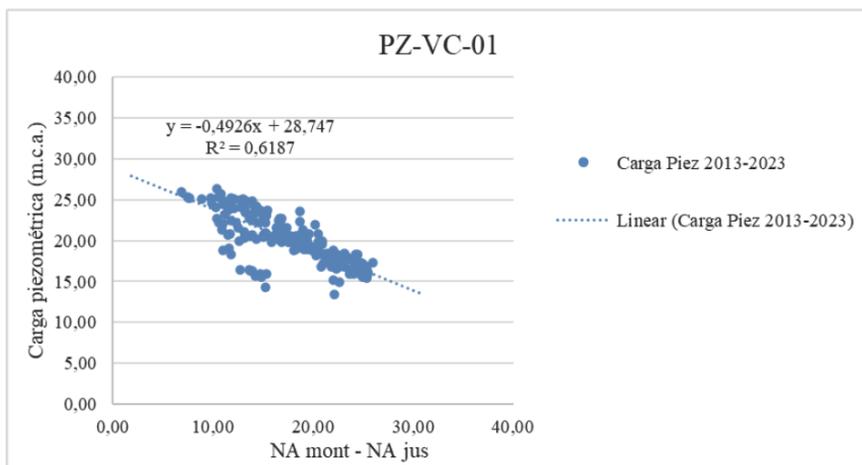


Fig. 22 – Gráfico da Correlação Subpressão e DNA para PZ-VC-01, período entre 2013 e 2023.

A Figura 23, apresenta a correlação gráfica com o expurgo dos dados do período dos seis meses iniciais de 2013, os quais são considerados *outliers*, lidos após o enchimento do recinto de jusante da estrutura. É possível notar a melhor correlação obtida, resultando um R^2 de 0,8711.

Ainda na Figura 23, ratifica-se a discrepância entre os dados do período do ano 2012 comparado ao restante da série de dados. É possível observar que os dados do ano 2014 ajustam-se bem à curva dos dados do histórico, após o expurgo dos dados do ano de 2012.

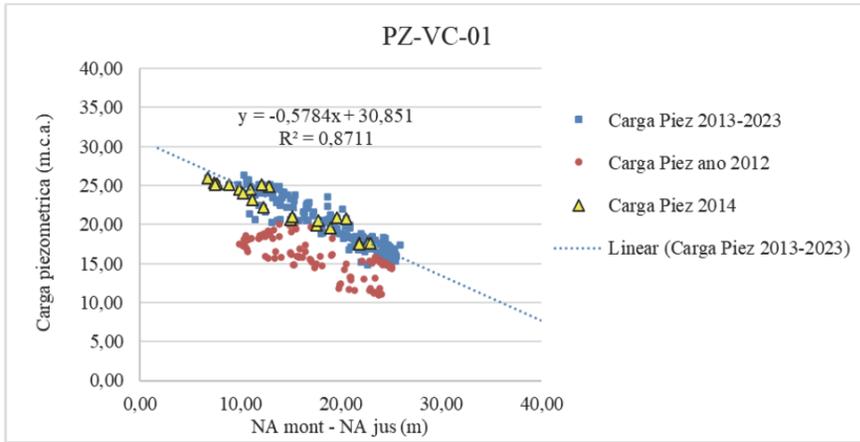


Fig. 23 – Correlação carga piezométrica e DNA para PZ-VC-01, excluídos *outliers*.

PZ-VC-02: Este piezômetro apresenta grande amplitude nas leituras, mas com tendência média semelhante aos demais piezômetros desta seção instrumentada. O gráfico da Figura 24 apresenta a correlação da carga piezométrica do PZ-VC-02 com a diferença de nível entre a montante e a jusante, DNA.

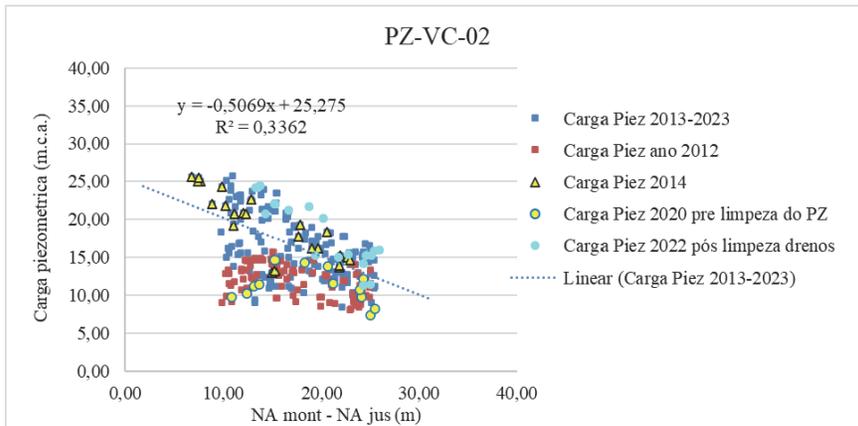


Fig. 24 – Correlação carga piezométrica e DNA para PZ-VC-02 destacando alguns eventos relevantes para este instrumento.

Como um dos exemplos de performance inadequada deste instrumento, no ano de 2020 as leituras do PZ registravam tendência decrescente, com valores de carga baixos, mesmo com o aumento do nível d'água de jusante no período de altas vazões do Rio Madeira. Visando investigar

se havia alguma obstrução na célula ou bulbo piezométrico, foi realizado um procedimento de lavagem do piezômetro, aplicando água corrente por inserção de mangueira não pressurizada no tubo. Após o procedimento, as leituras retomaram as médias da série histórica. A Figura 19, na seção 4, destaca alguns eventos relevantes para essa célula piezométrica e o comportamento do instrumento.

Similarmente aos demais piezômetros, os dados do ano 2012 afastam-se da série histórica e os dados do ano 2014 ajustam-se bem à série histórica. Entretanto, a correlação melhorou quando procedeu-se ao expurgo dos dados do primeiro semestre de 2013, *outliers*, o que indica *delay* da célula piezométrica em registrar a pressão do ponto, saindo de um R^2 de 0,3362 para 0,4706. O gráfico é apresentado na Figura 25. O Quadro 5 apresenta alguns dados estatísticos da relação carga piezométrica / DNA para este instrumento.

Através da plotagem gráfica, apresentado na Figura 26, da correlação entre DNA e as cotas piezométricas entre 2013 e 2016, quando se iniciou a rotina bial de limpeza dos drenos, com valores de leitura neste instrumento bem ajustados à curva de regressão linear, depreende-se que esse piezômetro tem tido desempenho afetado, muito provavelmente pelos detritos desprendidos na limpeza da cortina de drenagem e que seguindo as redes de fluxo, interceptam e colmatam a célula piezométrica do PZ-VC-02.

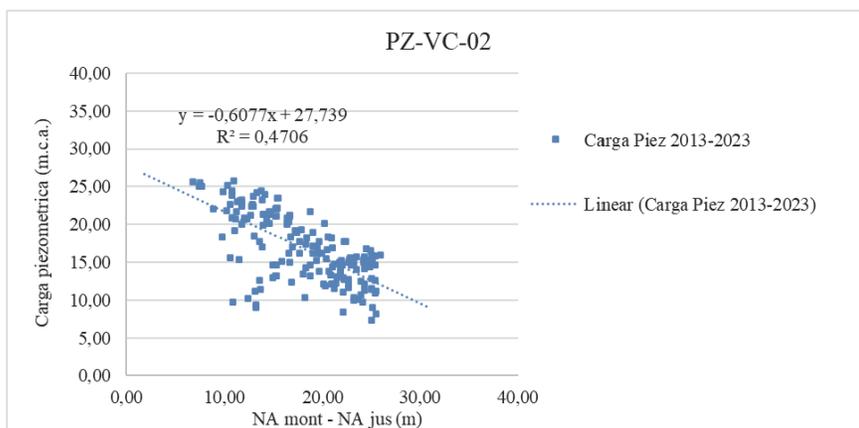


Fig. 25 – Correlação carga piezométrica e DNA para PZ-VC-02, excluídos *outliers* do primeiro semestre de 2013.

Quadro 5 – Média e Desvio padrão para PZ-VC-02.

Relação Subpressão / DNA		
Histórico Completo	Média	0,96
	Desvio padrão	0,55
Ano 2012	Média	0,74
	Desvio padrão	0,27
Ano 2014	Média	1,64
	Desvio padrão	1,01
Anos 2013 a 2023	Média	1,07
	Desvio padrão	0,62
Ano 2020	Média	0,64
	Desvio padrão	0,21
Anos 2013 (Segundo semestre) a 2023 Expurgado Ano 2020	Média	1,12
	Desvio padrão	0,62

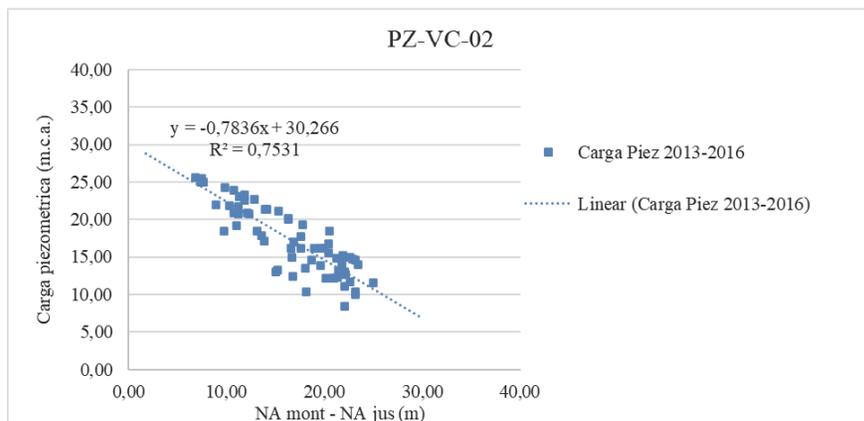


Fig. 26 – Correlação carga piezométrica e DNA para PZ-VC-02, antes da primeira limpeza da cortina de drenagem no ano 2016.

5.2.2 – Diagramas de Subpressão

Para o período inicial de construção, comissionamento, identificação da falha geológica, obra de recuperação e novo comissionamento, eventos ocorridos entre os anos 2010 e 2012, os dados da da série histórica foram expurgados, por serem valores de carregamento não regulares e portanto não representativos do período de operação normal da estrutura da barragem.

O Quadro 6 resume os valores de pressão nos pontos de monitoramento para o NA mínimo jusante (DNA máx = 25,93 m) e NA máximo registado a jusante (DNA min = 8,6 m) e as datas quando ocorreram. A cheia histórica do ano 2014 conduziu, naturalmente, ao registo do maior NA jusante observado para a estrutura.

Quadro 6 – Valores de piezometria para as quedas brutas máximas e mínimas da série histórica.

	Valores de pressão			
	PZ-VC-01	PZ-VC-02	PE-VC-01	PE-VC-02
DNA máx → NA jus min 44,07 m / Mont 70,00 m – 19/09/2022				
Carga (m.c.a.)	17,37	16,00	16,66	13,58
DNA min → NA jus max 62,66 m / Mont 69,46 m – 02/04/2014				
Carga (m.c.a.)	25,97	25,60	23,91	27,69

Os valores da série histórica de piezometria durante os períodos de máximo e mínimo registado para o nível de água à jusante da barragem permitem compor os diagramas de subpressão atuantes na estrutura do vertedouro apresentados na Figura 27.

É possível depreender na Figura 27 que mesmo no ano de 2014, período da cheia histórica do Rio Madeira com registo dos maiores valores de subpressão (curva na cor laranja), observaram-se valores de subpressão inferiores aos indicados pela projetista da barragem como valores de limite normal (curva na cor preta). Essa constatação é de grande importância, pois:

- é favorável aos fatores de segurança da barragem;
- indica êxito e um bom funcionamento da cortina de injeção realizada no tratamento da fundação;
- está diretamente relacionada ao bom funcionamento da cortina de drenagem da estrutura (composta pelos drenos de fundação).

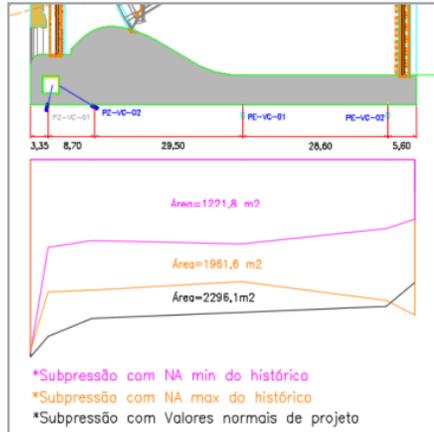


Fig. 27 – Diagrama de subpressão dos valores normais de projeto – limite normal de cada piezômetro (curva em preto) e dos valores observados pela instrumentação nos períodos de NA jusante mínimo (curva em rosa) e máximo (curva em laranja).

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente trabalho é possível verificar na prática a validação dos princípios da geotecnia de barragens, contribuindo para a formação e consolidação do conhecimento técnico na comunidade geotécnica. Os resultados obtidos e apresentados ao longo deste trabalho demonstram que, apesar da existência dos limites de monitoramento indicados pela projetista de uma barragem, tais como os limites “atenção” e “alerta”, é indicada a aplicação de métodos e análises estatísticas nos dados da série histórica, possibilitando a verificação de tendência nos dados e da aderência das leituras às curvas de correlação, como exemplo, correlação de DNA e piezometria, como foi apresentado neste trabalho.

Para dados de piezometria, o modelo de regressão linear mostrou-se adequado para análise estatística, metodologia simples e com que permite a realização de boas análises pela equipe técnica. E como evidenciado, é necessária a verificação individualizada da série histórica de cada um dos instrumentos. Os *outliers*, que podem ocorrer devido à fase de construção da barragem, falhas de leitura, limpeza dos piezômetros, ou qualquer outro fato que conduza a valores fora da operação regular da estrutura, devem ser analisados e, possivelmente, excluídos do histórico, dadas as justificativas técnicas e estatísticas.

Com a regressão linear e análise gráfica do PZ-VC-02 foi possível verificar a influência da limpeza da cortina de drenagem, com o incremento de detritos e carreamento dos drenos durante e após a limpeza, interceptando a célula piezométrica. Com esta constatação, recomendou-se à equipe técnica de campo a realização de lavagem da célula e execução de ensaio de recuperação de carga antes e após lavagens. Este ensaio consiste no esgotamento do piezômetro e observação do tempo, onde devem ser tomadas leituras espaçadas conforme a recuperação do NA, com pio elétrico, desde o esgotamento até a recuperação do NA anterior.

A ocorrência registrada na bacia de dissipação do vertedouro complementar da barragem, no ano 2012, ratifica a importância de se considerar o mapeamento geológico não apenas da fundação da estrutura, mas também da região circunvizinha afetada.

O trabalho avigora a importância de que, além de um bom projeto de instrumentação implantado para avaliação da segurança de uma barragem, é vital que os instrumentos sejam lidos e interpretados por profissionais tecnicamente habilitados e dentro de rotinas estabelecidas. Essa verificação é fundamental para identificação de algum erro de medição no campo e constatação da ocorrência de alguma anomalia do instrumento ou da estrutura.

Além de corroborar com a equipe técnica responsável pelas análises de dados, os valores obtidos no processamento estatístico podem ser utilizados como valores de referência para os leituristas.

7 – AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq – Processo no. 302835/2022-9) e à Hidrelétrica Santo Antônio do grupo Eletrobrás pelo compartilhamento de dados.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Eletrobrás (2003). *Crerios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. 279 p. <https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/Manuais%20para%20Estudos%20e%20Projetos%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia/Crit%C3%A9rios%20de%20Projetos.pdf>
- Eletrobrás Furnas (2013). *Nota Técnica. UHE Santo Antônio – Erosões nos canais de restituição das estruturas vertentes*.
- Fusaro, T. C. (2007). *Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto/MG. 155 p. <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/3400>
- Lopes, M. B. (2020). *Proposta de uma metodologia de tratamento de fundação de uma barragem de concreto e seus efeitos na análise de subpressão e deslocamentos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto/MG. 255 p. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/13148>
- Mendonça, M. B. (2000). *Avaliação da Formação do Ocre no Desempenho de Filtros Geotêxteis*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 320 p.
- PCE Engenharia (2010). *Projetos e Relatórios de Construção da UHE Santo Antônio*.
- Ramirez, R. G.; Reis, J. H. C. dos. (2016). *Segurança e confiabilidade em estruturas de contenção: Estudo de caso*. Geotecnia, (138), pp. 37-60. <https://doi.org/10.24849/j.geot.2016.138.02>
- Silveira, J. F. A (2003). *Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto*. 2ª edição, Oficina de Textos, São Paulo/SP. Brasil. 320 p.
- U.S. Bureau of Reclamation – USBR (1976). *Design of Gravity Dams*.
- Venturo Consultoria Ambiental (2023). *Relatório de Serviço de inspeção por imageamento subaquático das estruturas civis do vertedouro complementar e da bacia de dissipação da UHE Santo Antônio*. Venturo Consultoria Ambiental.
- Vieira, K. O.; Miranda, O. A.; Panasco, G. F.; Moreira, P. H. C. R.; Lanzarin, D.; David, S. M. G. R. (2023). *A automatização da instrumentação civil para segurança de barragens: o caso da hidrelétrica Santo Antônio*. Cigrè Brasil. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília/DF. Brasil.
- Weather Spark (2024.). *Clima característico em Porto Velho, Rondônia, Brasil durante o ano*. <https://pt.weatherspark.com/y/28383/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Porto-Velho-Rond%C3%B4nia-Brasil-durante-o-ano#Sections-Temperature>