

AVALIAÇÕES FÍSICO-QUÍMICOS DA ÁGUA COMO SUBSÍDIO À AVALIAÇÃO DE PATOLOGIAS NA ESTRUTURA DE CONCRETO DE UMA BARRAGEM

Luanna Valéria Sousa Fonseca (Centro Universitário Maria Milza) E-mail: contato.lfonseca@gmail.com
Gabriel Garcia Bastos de Almeida (Universidade Federal da Bahia) E-mail: g.bastos@ufba.br

Resumo: Com a evolução da construção civil, houve a necessidade da realização de análises acerca do comportamento dos materiais e estruturas de concreto devido aos processos de deterioração que causam riscos para os usuários. As barragens de concreto são obras de grande porte que por estarem em contato com a agressividade da água do rio, podem vir a apresentar manifestações patológicas por conta dos processos físico-químicos e biológicos no ambiente aquático. Sendo assim, o presente artigo tem como objetivo a realização da avaliação da água de um rio, o qual se encontra a barragem Rio da Dona, situada no município de Santo Antônio de Jesus, na Bahia, buscando identificar patologias existentes no concreto com base na avaliação de índices físico-químicos. Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foram utilizados relatórios de ensaios realizados pela concessionária responsável pela operação da barragem de abastecimento, a partir da avaliação de dados de séries históricas referente às coletas e ensaios das amostras de água captadas no reservatório entre os anos de 2009 até 2020. Os resultados demonstraram que a temperatura superficial média apresentada durante o período analisado em todos os pontos foi de 27,07° C, a presença de Cloreto, N. Amônia e Sódio, apresentaram valores inferiores ao estabelecido como de alta taxa de agressividade, girando em média de todos os pontos analisados de 38,72 mg/L, 0,19 mg/L e 37,09 mg/L, respectivamente. A presença de sólidos totais dissolvidos, apresentaram-se elevadas em certos períodos, acima do permitido, mais que houve uma redução nos últimos anos, ficando em média dos pontos analisados de 143,71 mg/L. Outros parâmetros relevantes como pH, condutividade elétrica, presença de cálcio, entre outros, não foi possível realizar análises por falta de dados históricos da concessionária responsável pela barragem. Essa pesquisa teve o intuito de verificar se houve uma possível relação entre alterações de parâmetros físico-químicos presentes na água do rio que poderiam indicar deterioração no concreto, com consequente risco à segurança da barragem. Pode-se concluir que a barragem atualmente não sofre de nenhuma patologia aparente, nenhum tipo de degradação ou fissuras, mas deve-se estender todos os parâmetros de análises da água para uma maior salvaguarda da estrutura.

Palavras-chave: Química da água, concreto, barragem.

PHYSICOCHEMICAL ASSESSMENTS OF WATER AS A SUPPORT FOR THE ASSESSMENT OF PATHOLOGIES IN THE CONCRETE STRUCTURE OF A DAM

Abstract: With the evolution of civil construction, there was a need to carry out analyzes of the behavior of concrete materials and structures due to deterioration processes that cause risks for users. Concrete dams are large-scale works that, because they are in contact with the aggressiveness of river water, can present pathological manifestations due to the physical-chemical and biological processes in the aquatic environment. Therefore, this article aims to evaluate the water of a river, which is located in the Rio da Dona dam, located in the municipality of Santo Antônio de Jesus, in Bahia, seeking to identify existing pathologies in the concrete based on the evaluation of physicochemical indices. To develop this research, test reports carried out by the concessionaire responsible for operating the supply dam were used, based on the evaluation of data from historical series regarding the collection and testing of water samples captured in the reservoir between the years 2009 and 2020. The results demonstrated that the average surface temperature presented during the period analyzed at all points was 27.07° C, the presence of Chloride, N. Ammonia and Sodium, presented values lower than those established as a high rate of aggressiveness, turning into average of all analyzed points of 38.72 mg/L, 0.19 mg/L and 37.09 mg/L, respectively. The presence of total dissolved solids was high in certain periods, above the permitted level, but there was a reduction in recent years, with an average of 143.71 mg/L for the analyzed points. Other relevant parameters such as pH, electrical conductivity, presence of calcium, among others, were not possible to analyze due to lack of historical data from the concessionaire responsible for the dam. This

research aimed to verify whether there was a possible relationship between changes in physical-chemical parameters present in the river water that could indicate deterioration in the concrete, with a consequent risk to the safety of the dam. It can be concluded that the dam currently does not suffer from any apparent pathology, any type of degradation or cracks, but all water analysis parameters must be extended to further safeguard the structure.

Keywords: Water chemistry, concrete, dam

1. Introdução

As barragens são elementos muito importantes para a sociedade por apresentarem diversas finalidades, desde o abastecimento de água, geração de energia pelas hidrelétricas, o armazenamento de rejeitos, etc. Porém, por estarem expostas a agressividade da água e, em muitos casos por possuírem sua estrutura de concreto, algumas manifestações patológicas podem ocorrer com o passar do tempo, que em casos mais graves podem vir a comprometer a segurança da barragem (REN et al., 2020).

Os ecossistemas de água doce de um rio sofrem de grandes poluições, sendo resultado do desenvolvimento das atividades humanas em decorrência do crescimento socioeconômico que são agravados pelos impactos das mudanças climáticas. Na composição dessas água do rio ocorrem muitos processos físico-químicos e biológicos que em contato com a estrutura de concreto podem promover deteriorações como fissuras, trincas, lixiviação, deslocamentos, infiltrações, cavitação, erosão e abrasão (WEI et al., 2021).

Existem diversas classificações de poluição, podendo ser consideradas como crônica quando liberam pequenas concentrações de forma constante, como a disposição de esgoto em rios e lagos, outro tipo de poluição é a aguda que é quando ocorre uma emissão grande de uma só vez. Dentre os tipos de elementos que podem causar poluição, pode-se citar os resíduos minerais, orgânicos, atômicos, tóxicos e mistos (WANG et al, 2020).

Em ambiente rural, é bastante comum a poluição de rios e mananciais pela utilização de agroquímicos bem como pelos resíduos produzidos pelos animais. As atividades agropecuárias também causam contaminações em mananciais, eis que o uso de agroquímicos, nutrientes, sedimentos e dejetos de animais são provocadores de poluição resultante do deflúvio superficial (GU et al., 2021). O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), através da resolução 357 de 17 de março de 2005, estabelece a classificação das condições de qualidade dos corpos d'água, seja ela doce, salobra ou salina e esses parâmetros de qualidade são determinados a partir de características físico-químicas e biológicas.

Dentre esses parâmetros, pode ser citado a turbidez, pH, temperatura, oxigênio dissolvido (OD), demanda química de oxigênio (DQO), nutrientes, cloreto, coliformes fecais e termotolerantes, sólidos totais dissolvidos (STD), nitrogênio, fósforo, ferro, manganês, alumínio, entre outros componentes (ZHANG et al, 2021). O oxigênio dissolvido (OD) é muito importante para avaliação da água, possuindo um padrão de relevância de alta significância. O pH representa a intensidade no que se refere às condições ácidas ou alcalinas, sendo mensurado através da presença de íons hidrogênio (H⁺). O nitrogênio na água pode ser encontrado como orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato. Este, é um elemento base para produção de fertilizantes agrícolas, que

em caso de plantações próximas às margens de um rio, esse elemento pode entrar em contato com a água. O fósforo pode ser encontrado de várias formas na água, geralmente de procedência da dissolução dos solos ou por decomposição de matérias orgânicas. O ferro e o manganês possuem comportamentos químicos parecidos. O alumínio encontrado na água pode ser originado por erosão e geralmente está ligado às variações de pH, presença de fluoretos, sulfatos e matérias orgânicas. A aparição do cloreto em águas naturais se dá pela existência de jazidas naturais e alteração das rochas ou pela poluição de esgotos sanitários e dejetos industriais (WANG et al, 2020).

Com tantos parâmetros que podem influenciar na estrutura de uma barragem, além, da presença de fissuras e elas podem estar associadas à percolação de água, desse modo, é fundamental o monitoramento para que, no início do surgimento de alguma manifestação patológica na estrutura da barragem, o emprego de medidas e intervenções sejam realizadas no intuito de minimizar ou anular essas ocorrências. São muito comuns a ocorrência manifestações patológicas em estruturas em contato com água, podemos citar, por exemplo as manchas e a eflorescência. As manchas são oriundas do processo de retenção de umidade e apresentam cor escura, em virtude da presença de fungos e mofos. A eflorescência é o processo de depósito de sais na superfície da estrutura e geralmente ocorre nos locais de fácil acesso para percolação de água, como em juntas e fissuras (ARAUJO et al., 2008).

A presença de elementos químicos na água de um rio pode influenciar no surgimento ou acelerar o desenvolvimento de manifestações patológicas. O cloreto presente na água pode causar degradação da pasta de cimento endurecida, ocasionando o processo de lixiviação. A concentração de nitrato tende a degradar o concreto formando novos compostos solúveis através da troca iônica. O oxigênio dissolvido em solução, provoca um aumento nas taxas de oxidação dos sulfetos em agregados do concreto. Quando a solução possui alta alcalinidade, ou seja, pH elevado, a velocidade da oxidação é elevada (ALDEMIR et al., 2015).

Em relação ao alumínio, este pode ser causador da formação de etringita tardia no concreto, que quando é formada após o endurecimento do concreto, torna-se uma condição desfavorável causando patologias. Quanto a presença de ferro, pesquisas apontam que soluções ricas em íons de cálcio, ferro e sulfatos podem se movimentar por capilaridade através de fissuras e fraturas no maciço e caso esteja em condições de alta temperatura e baixa pressão, podem formar cristais secundárias pulverulento de cor branca. O ataque por sulfato de sódio é causado por fonte externa ao concreto, sendo um causador de degradação e ocorrendo através de águas subterrâneas, superficiais, solos, rejeitos industriais e pela atmosfera (FIGUEIREDO et al., 2020).

Diante dos recentes acontecimentos envolvendo o rompimento de barragens, cada vez mais se busca o aperfeiçoamento para compressão do comportamento dessas grandes estruturas, visto que por serem obras de grande porte e alto dano potencial, em caso de falhas podem gerar grandes impactos ambientais, sociais e econômicos.

Nesse contexto, o presente estudo teve intuito de verificar se a influência da composição da água do rio e seus processos naturais associados podem influenciar no surgimento de manifestações patológicas no maciço de concreto de uma barragem. Dessa forma, foi analisado o banco de dados de coletas de água realizadas pela concessionária operante da Barragem do Rio da Dona, situada no município de Santo Antônio de Jesus-BA,

buscando identificar patologias existentes no concreto com base na avaliação de índices físico-químicos.

2. Barragem Rio da Dona

A primeira barragem na Bahia a utilizar a técnica de barragens de Concreto Compactado com Rolo (CCR), foi na construção das barragens Rio da Dona no município de Santo Antônio de Jesus e Malhadas de Pedras, sendo a finalidade de ambas para o abastecimento (FACCHINETTI, 200-]), conforme figura 1. Para a construção desse tipo de barragem, primeiro são necessário a fabricação do concreto compactado com rolo, que é realizada a partir de uma metodologia adequada para barragens e pavimentos, sendo utilizada devido a fatores econômicos, bem como por fatores construtivos já que satisfazem as especificações de projetos (SANTI, 2008).

Durante a execução do CCR, o material deve ter uma consistência em que possa utilizar rolos vibratórios para realizar a compactação e suportar todos os equipamentos essenciais para a sua confecção. A pasta de concreto tem que propiciar a distribuição uniforme durante o lançamento e adensamento. Já em seu estado endurecido, o concreto tem de fornecer uma alta resistência com baixa permeabilidade, a fim de aumentar a durabilidade do material (PRAKASH et al., 2022).

Figura 1 - Barragem do Rio da Dona



Figura 1 - Barragem do Rio da Dona

Segundo Facchinetti (200-]), a barragem do Rio da Dona possui 12 metros de altura, volume de maciço de 15.018 m³, o pico de concretagem foi de 50 m³/h, uso de caminhões basculantes simples, compactado com rolo liso vibratório CA-25, consumo entre 75 kg a 100 kg de cimento por cada m³ de CCR, densidade específica de 2.450 kg/m³, resistência de 18,8 MPa aos 90 dias e altura das camadas de 30 cm.

A barragem referenciada sofreu com a supressão das matas ciliares para as atividades agropecuárias, como pastos e plantações, bem como ocupações irregulares. Desse modo, houve ocorrência de diversos impactos ambientais como poluição da água, extinção de nascentes e diminuição da calha dos rios pelo assoreamento. Desde o ano de 2007 a concessionária vem realizando um projeto de recuperação de mata ciliar ao entorno do reservatório e, até 2011 havia recuperado 37 hectares. A segunda etapa do projeto se iniciou em 2011, com expectativa de recuperar mais 30 hectares da vegetação. O projeto visa mitigar os efeitos dos impactos decorrentes ao meio onde está situada a barragem, bem como melhorar a qualidade da água que é destinada ao abastecimento. Esse feito, também pode contribuir para diminuir a agressividade da água e consequentemente regredir os impactos no barramento de concreto (EMBASA, 2011).

3. Materiais e Método

O presente estudo foi desenvolvido em uma abordagem quali-quantitativo, pois, requer utilização de técnicas estatísticas para obtenção dos resultados, bem como, descrever e classificar os resultados encontrados (PRODANOV; FREITAS, 2013). Para alcançar os objetivos propostos, a estrutura metodológica foi estruturada em cinco etapas.

A primeira etapa trata-se da revisão de literatura, que foi fundamental para abordagem dos principais aspectos e relevantes para pesquisa, como recursos hídricos, poluição hídrica, manifestações patológicas em concreto, barragens de concreto compactado a rolo, entre outros.

Na segunda etapa foi a caracterização da área de estudo, que foi a barragem do Rio da Dona, situada no município de Santo Antônio de Jesus/BA. A barragem encontra-se em ambiente rural, cercada de atividades agropecuárias, o que pode acarretar em mudanças nas reações físico-químicas e biológicas da água.

A terceira etapa consistiu na coleta de dados de séries históricas das amostras de água, a partir de ensaios realizados pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A (EMBASA) nos últimos dez anos, entre 2009 e 2020. Foram fornecidas informações de diversos parâmetros, como cloreto, N. amônia e sódio, temperatura e sólidos totais dissolvidos, porém, outros que poderiam ser relevantes como pH, turbidez, condutividade elétrica, presença de cálcio; demanda bioquímica não foram apresentados. No entanto, os parâmetros fornecidos foram quantificados e analisados pelo software estatístico R, para a realização dos resultados na base dos anos apresentados.

A quarta etapa consistiu na análise dos resultados obtidos a partir da etapa anterior, para verificar se os parâmetros encontrados nas análises do software estatístico R das águas dos reservatórios, podem subsidiar a avaliação de manifestações patológicas que possam vir a ocorrer no maciço de concreto da barragem.

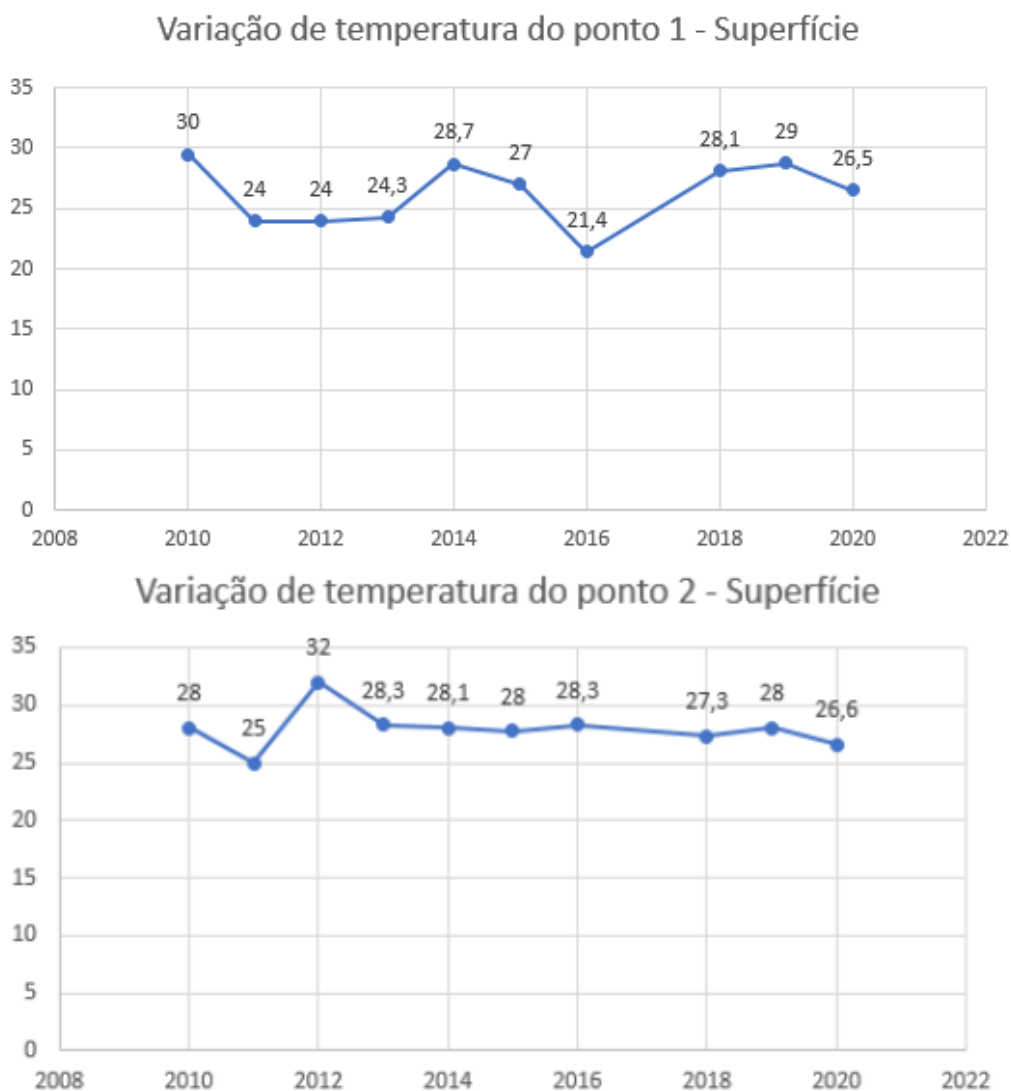
Por último, na quinta etapa, foi realizada a discussão dos resultados obtidos nas etapas anteriores.

4. Resultados e Discussão

Em posse dos resultados de dois pontos de coleta de superfície da barragem do Rio da Dona, foi possível organizar os parâmetros gradualmente por sequência de ano para

análise de variação. Os parâmetros de temperatura da superfície da água são apresentados na figura 1, ao longo dos anos em que foi medido.

Figura 2 - Gráfico da variação de temperatura das amostras no ponto 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Nos anos coletados, a temperatura média apresentada na água no ponto 1, ficou em torno de $26,23^{\circ}\text{C}$, enquanto no ponto 2, é de $27,91^{\circ}\text{C}$, com uma temperatura média dos dois pontos de $27,07^{\circ}\text{C}$. Na literatura não foram encontrados valores de temperatura que demonstrem ações diretas de problemas físico-químicos na barragem de concreto.

Para as amostras de cloreto presentes na água do reservatório, tem-se os seguintes resultados apresentados na figura 3.

Figura 3 - Gráfico da variação de cloreto das amostras no ponto 1 e 2

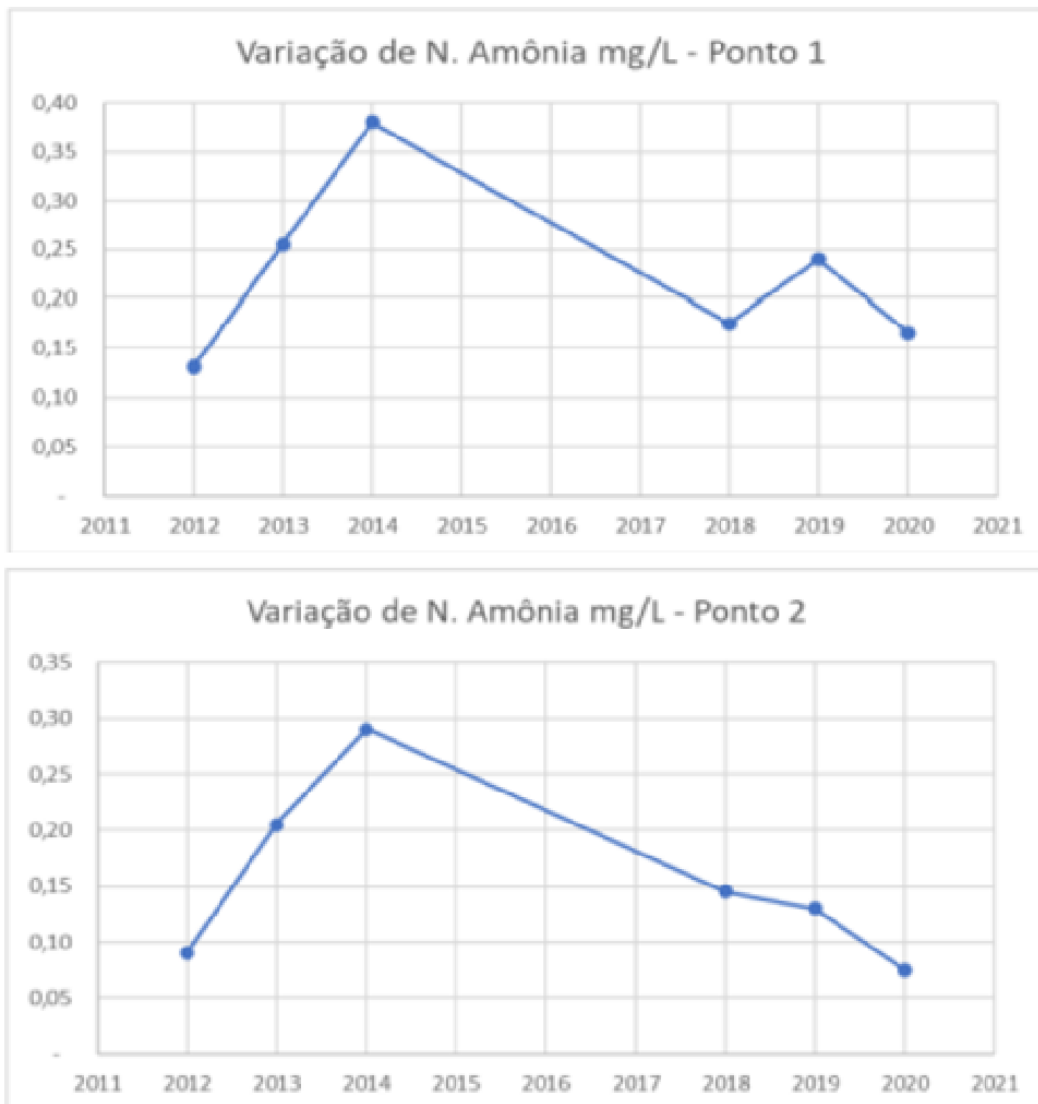


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

De acordo com Helene (1993), a classe de agressividade para ambiente rural é classificada como I e o índice de cloretos aceitáveis devem ser menores que 200 mg/L. De acordo com os dados obtidos para os pontos 1 e 2, esse índice encontra-se abaixo do permitido, com tendência de queda. Nos anos coletados, a média da presença de cloreto na água no ponto 1 girou em torno de 37,80 mg/L e no ponto 2 de 39,65 mg/L. Com uma média de dois pontos de 38,72 mg/L.

Para os resultados do N. Amônia, tem-se os seguintes valores, conforme apresentado na figura 4.

Figura 4 - Gráfico da variação de N. amônia das amostras no ponto 1 e 2

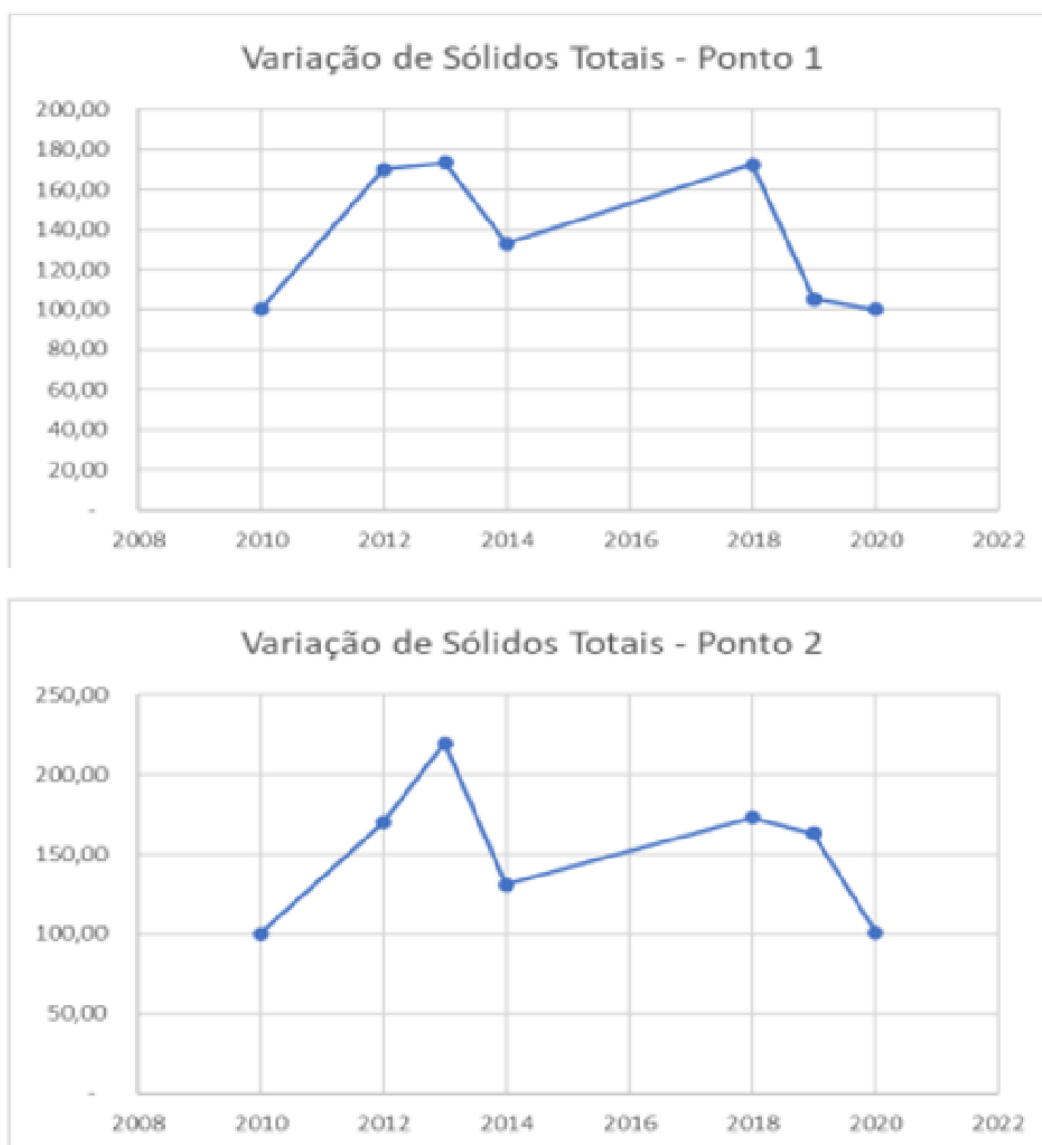


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Segundo Silva Filho (1994), diversas normas afirmam que a concentração na faixa de 500 mg/L já são consideradas como agressivas. De acordo com o levantamento de dados acerca desse parâmetro, o mesmo encontra-se abaixo do valor estimado como agressivo e também apresenta tendência de queda. Na coletânea dos dados, a média da presença de N. A amônia encontrada na água no ponto 1 foi em torno de 0,22 mg/L, enquanto no ponto 2 é de 0,15 mg/L. Com uma média de dois pontos de 0,19 mg/L.

Já para os Sólidos Totais, tem-se os seguintes resultados apresentados na figura 5.

Figura 5 - Gráfico da variação de sólidos totais das amostras no ponto 1 e 2



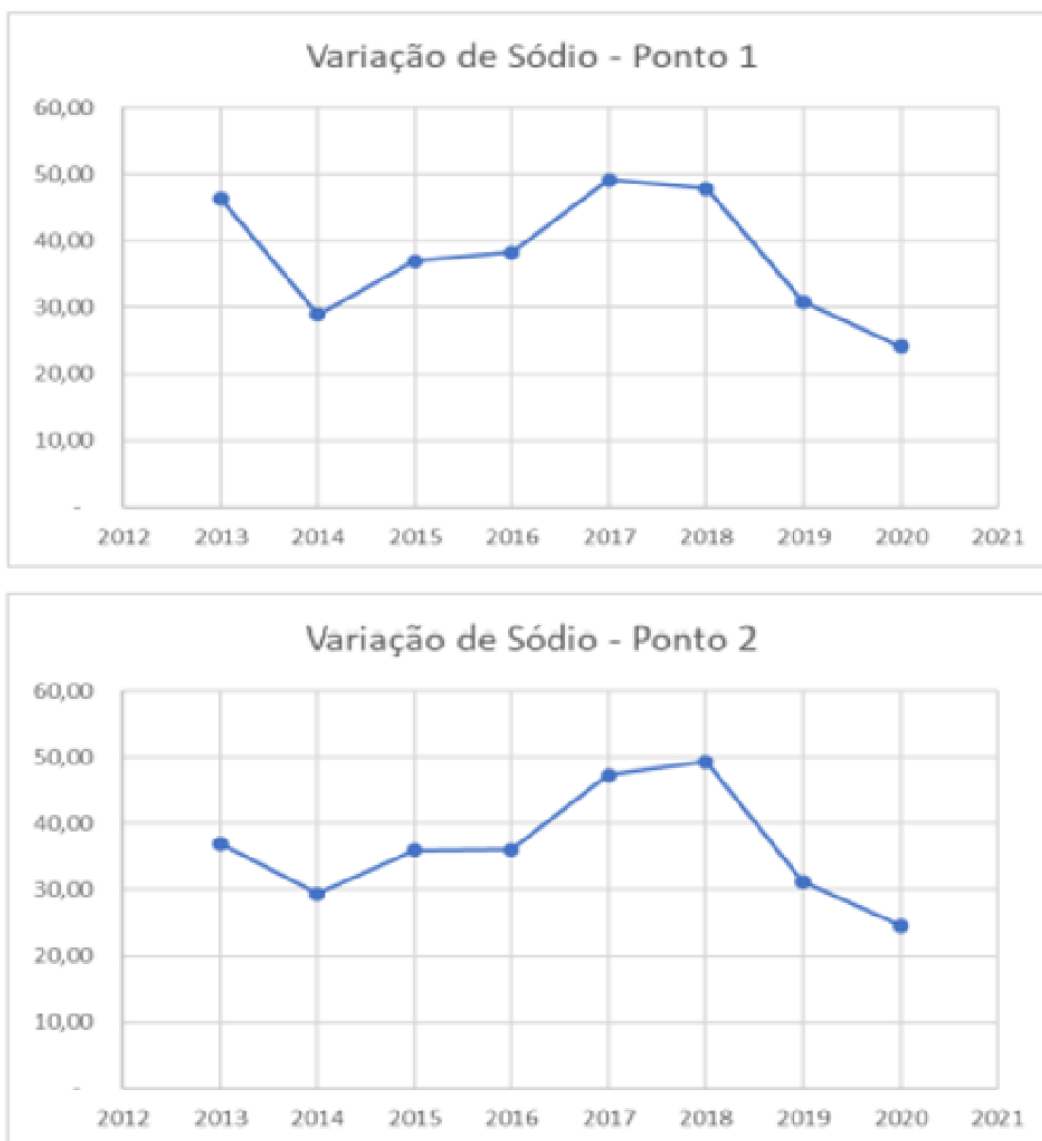
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

A ocorrência da presença de sólidos dissolvidos totais deve ser limitada abaixo de 150 mg/L; acima desse valor já se considera como agressivo ao concreto, pois a influência dessas partículas tendem a fechar os poros capilares do cimento endurecido, contribuindo para o aumento da compactidade da massa e podendo não afetar propriedades mecânicas, mas sim, algumas propriedades físicas (ROMANO, 2004).

Com a coleta dos dados, percebe-se que os valores encontram-se em alguns anos muito acima dos valores estimados como ideal, contudo, a partir do ano de 2019 esses valores foram reduzidos, ficando abaixo do limite estabelecido. Em uma média de todos os anos de dados coletados presentes de sólidos totais dissolvidos na água no ponto 1 ficou em torno de 136,35 mg/L, já no ponto 2 é de 151,07 mg/L. Com uma média de dois pontos de 143,71 mg/L.

Abaixo, seguem os dados coletados acerca da presença de sódio na água, conforme figura 6.

Figura 6 - Gráfico da variação de sódio das amostras no ponto 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

De acordo com Metha e Monteiro (2008), a classe de agressividade da presença de sódio na água é acima de 1.500 mg/L, sendo considerada como severa. Em posse dos dados de coleta, percebe-se que a presença de sódio na água do reservatório é pequena em relação ao indicado a causar quaisquer danos por corrosão. Nos anos coletados, a média da presença de sódio na água no ponto 1 girou em torno de 37,83 mg/L, já no ponto 2 é de 36,36. Com uma média de dois pontos de 37,09 mg/L.

A EMBASA também forneceu dados acerca da presença de elementos na água como Ferro, Manganês, Zinco, Oxigênio Dissolvido, Arsênio, Bário e Alumínio, porém na literatura não foi encontrado parâmetros que pudessem dar subsídio a avaliação destes dados para essa pesquisa.

4. Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos, foi possível perceber que mesmo com a falta de alguns dados relevantes para essa pesquisa, como: pH, condutividade elétrica, presença de cálcio, entre outros, foi possível realizar uma breve análise das características da água encontrada no reservatório da barragem por um período de dez anos.

A temperatura superficial média nos dois pontos analisados ficou em torno de 27,07° C e a presença de Cloreto, N. Amônia e Sódio se apresentaram com valores inferiores ao estabelecido como de alta taxa de agressividade, girando em média dos dois pontos analisados de 38,72 mg/L, 0,19 mg/L e 37,09 mg/L, respectivamente. No entanto, o contato do barramento do concreto com a água ao longo do tempo sofre com degradações que devem ser monitoradas regularmente para garantia da integridade da estrutura.

A presença de sólidos totais dissolvidos, apresentaram-se elevadas em certos períodos, acima do permitido, que era de 150 mg/L, embora houve uma redução nos últimos anos, contudo, teve uma média entre os dois pontos em torno de 143,71 mg/L, ainda assim, deve ser também monitorada e realizada além das análises de água, as inspeções no corpo da barragem.

Em relação à redução da presença desses elementos na água durante esse período, pode estar atrelada ao fato da recuperação de mata ciliar que vem sendo, desde 2007 ao entorno do reservatório, o que diminui o arraste de partículas do solo contendo rejeitos de animais, bem como presença de agroquímicos dos plantios próximos ao reservatório, tornando a água menos agressiva, sendo benéfico tanto para o abastecimento da população, quanto para a integridade do barramento de concreto.

Pode-se concluir que as analisados da água do rio encontram-se dentro dos parâmetros estabelecidos, trazendo uma segurança maior a barragem Rio da Dona, contudo, deve-se ampliar as análises de outros parâmetros da água, como pH, condutividade elétrica, presença de cálcio etc. para garantir uma segurança ainda maior. A barragem não apresentou visualmente nenhuma patologia aparente, nenhum tipo de degradação ou fissuras em sua estrutura.

Referências

ALDEMIR, A. et al. *Analysis methods for the investigation of the seismic response of concrete dams*. IMO Teknik Dergi, v. 26, p. 6943-6968, 2015.

ARAUJO, G. S., et al. *Evaluation of the behavior of concrete gravity dams suffering from internal sulfate attack*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 1, p. 84-112, 2008.

EMBASA. *Empresa Baiana de Águas e Saneamento. Jornal da Embasa*. 2011. Disponível: em http://www.embasa.ba.gov.br/images/documents/1154/edicao_193_jan2011.pdf. Acesso em: 24 de novembro de 2022.

FACCHINETTI, R. *Construção das barragens em CCR e os benefícios socioeconômicos: cenário Bahia*. IBRACON. 200-.

FIGUEIREDO, M. D. et al. *Tailings from Fundão tragedy: physical-chemical properties of the material that remains by Candonga dam*. Integrated environmental assessment and management, v. 16, n. 5, p. 636-642, 2020

GU, H. et al. *A factor mining model with optimized random forest for concrete dam deformation monitoring*. Water Science and Engineering, v. 14, n. 4, p. 330-336, 2021.

HELENE, P. R. L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. 1993. 271f. Tese (Livre Docência em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. São Paulo, Brasil: IBRACON. 2008

PRAKASH, G. et al. *Recent advancement of concrete dam health monitoring technology: A systematic literature review*. In: Structures. Elsevier, p. 766-784. 2022.

PRODANOY, C. C.; FREITAS, E. C. *Metodologia do trabalho científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico*. 2a edição. Editora Universidade Feevale. Rio Grande do Sul. 2013.

REN, Q. et al. *An optimized combination prediction model for concrete dam deformation considering quantitative evaluation and hysteresis correction*. Advanced Engineering Informatics, v. 46, p. 101154, 2020.

ROMANO, C. A. *Apostila de tecnologia de concreto*. Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná. 2004.

SANTI, M. R. A. *Metodologia para avaliação da perda de massa em barragem de concreto compactado com rolo (ccr)*. Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba - PR. 2018.

SILVA FILHO, L. C. P. *Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de micros sílica*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1994.

WANG, J. et al. *Research on recurrent neural network based crack opening prediction of concrete dam*. Journal of Internet Technology, v. 21, n. 4, p. 1161-1169, 2020

WEI, B. et al. *Spatiotemporal hybrid model for concrete arch dam deformation monitoring considering chaotic effect of residual series*. Engineering Structures, v. 228, p. 111488, 2021.

ZHANG, Y. et al. *Simulation of thermal stress and control measures for rock-filled concrete dam in high-altitude and cold regions*. Engineering Structures, v. 230, p. 111721, 2021.