

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SANTA LUZIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Glênia Cristiane Garcias Alves

**ANÁLISE CRÍTICA DO PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO DA UHE RISOLETA
NEVES ANTES E APÓS O ACIDENTE COM A BARRAGEM DE FUNDÃO EM
MARIANA, MG**

SANTA LUZIA

2026

GLÊNIA CRISTIANE GARCIAS ALVES

**ANÁLISE CRÍTICA DO PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO DA UHE RISOLETA
NEVES ANTES E APÓS O ACIDENTE COM A BARRAGEM DE FUNDÃO EM
MARIANA, MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado na disciplina de TCC 2, do curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Santa Luzia, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Augusto de
Miranda

SANTA LUZIA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A474a Alves, Glênia Cristiane Garcias.

Análise crítica do plano de instrumentação da UHE Risoleta
Neves antes e após o acidente com a barragem de fundão em Mariana, MG.
/ Glênia Cristiane Garcias Alves. - 2026.

65f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em
Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais - Campus Santa Luzia, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda.

1. barragens — medidas de segurança. 2. monitoramento
estrutural. 3. usinas hidrelétricas. I. Miranda, Daniel Augusto de (orient.).
II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais –
Campus Santa Luzia, MG. III. Título.

CDU: 627.8:624.042

Elaborada pela Biblioteca do IFMG campus Santa Luzia



INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS

Campus Santa Luzia - Código INEP: 31358150

Rua Érico Veríssimo, nº. 317, Bairro Londrina, CEP: 33115-390, Santa Luzia/MG

CNPJ: 10.626.896/0015-78 - Telefone: (31) 3268-5600

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Análise crítica do plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves antes e após o acidente com a Barragem de Fundão em Mariana, MG**, apresentada pela estudante **Glênia Cristiane Garcias Alves** do Curso Bacharelado em Engenharia Civil (*Campus Santa Luzia*). Os trabalhos foram iniciados às 16h02min do dia 06/02/2026 pelo professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- Nome do orientador: Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda
- Nome da Examinadora Interna: Prof.^a Ma. Isabela Ferreira Batista
- Nome da Examinadora Interna: Profa.^a Dr.^a Verônica Bernardes de Souza Léo

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição da candidata. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pela aluna, tendo sido atribuído o seguinte resultado: **Aprovada** com nota **83,3**.

A estudante terá o prazo de 30 (trinta) dias para realizar as correções sugeridas pela banca e enviar a versão final ao orientador, sendo a verificação das modificações de responsabilidade do orientador. O não envio implicará na impossibilidade de solicitação do diploma.

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu Daniel Augusto de Miranda, lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Santa Luzia – MG, 06 de fevereiro de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIEL AUGUSTO DE MIRANDA
Data: 06/02/2026 17:21:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda

Documento assinado digitalmente
gov.br ISABELA FERREIRA BATISTA
Data: 06/02/2026 17:36:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Ma. Isabela Ferreira Batista

Documento assinado digitalmente
gov.br VERONICA BERNARDES DE SOUZA LEO
Data: 06/02/2026 17:27:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Verônica Bernardes de Souza Léo

AGRADECIMENTOS

À minha família, meu alicerce e minha maior fonte de apoio, pelo amor incondicional, pela paciência nos momentos mais desafiadores e pelo incentivo constante ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Cada conquista só é possível graças à confiança, ao cuidado e à presença de vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda, pela orientação dedicada, pela paciência, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições técnicas e amizade construída ao longo dos anos que enriqueceram significativamente este trabalho. Agradeço também pelo apoio, pelos ensinamentos e pela confiança depositada em mim ao longo deste processo.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais e aos professores do curso de Engenharia Civil, pela formação sólida, pelo conhecimento compartilhado e pelo comprometimento com a excelência acadêmica e profissional, fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos colegas e amigos, pelo companheirismo, pelas trocas de experiências, pelas palavras de incentivo e por tornarem essa caminhada mais leve, humana e significativa.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para a conclusão desta etapa tão importante da minha vida, deixo o meu mais sincero e profundo agradecimento.

**“Para quem não sabe aonde ir,
qualquer caminho serve.”**

(Lewis Carroll - Alice no País das Maravilhas)

RESUMO

A segurança de barragens tornou-se um tema de elevada repercussão no Brasil, impulsionado por desastres recentes de grande magnitude, como os rompimentos de Fundão (2015) e Brumadinho (2019), ambos no estado de Minas Gerais. Este trabalho aborda a importância da instrumentação de auscultação civil na prevenção de riscos, focando em um estudo de caso de alta complexidade técnica: a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves. Após o rompimento da Barragem de Fundão, a UHE Risoleta Neves foi diretamente atingida pela onda de rejeitos, o que impôs condições operacionais e estruturais não previstas em projeto. Diante da lacuna na literatura sobre a avaliação de estruturas hidrelétricas impactadas de forma indireta, o objetivo geral deste trabalho foi realizar uma análise crítica do plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves utilizando dados secundários, comparando os cenários anterior e posterior ao desastre de 2015. A metodologia adotada consistiu em um estudo de caso aplicado, de abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, baseado exclusivamente em análise documental de dados secundários obtidos em relatórios técnicos, artigos científicos (como Carvalho *et al.*, 2023), Planos de Segurança da Barragem (PSB) e normativas de órgãos reguladores. Ressalta-se que os dados de instrumentação analisados, referentes a piezômetros e extensômetros, foram integralmente extraídos dessas fontes documentais, não sendo oriundos de medições diretas realizadas pela autora. Esses dados foram organizados em quatro fases operacionais distintas: Fase I (Estabilização Inicial, 2004–2005), Fase II (Operação Comercial Estável, 2005–2015), Fase III (Impacto do Rompimento, 2015) e Fase IV (Período de Assoreamento, 2015–2022). Os resultados demonstraram que o sistema de instrumentação original era robusto, capturando o comportamento esperado nas Fases I e II. Na Fase III, por sua vez, os instrumentos mostraram notável sensibilidade, registrando uma inversão da tendência cinemática e uma resposta piezométrica imediata ao rebaixamento abrupto do reservatório, validando a funcionalidade do sistema em um evento extremo. Já na Fase IV, o monitoramento foi essencial para garantir a segurança da estrutura sob o novo carregamento de sedimento, mantendo as leituras abaixo dos níveis de alerta mesmo durante cheias. O estudo mapeou a significativa complementação da instrumentação e concluiu que essas mudanças foram tecnicamente justificadas e eficazes, permitindo a gestão segura de um cenário inédito e o eventual reenchimento do reservatório. Este trabalho demonstra que a instrumentação de auscultação foi a ferramenta primordial que permitiu a gestão segura da barragem, constituindo um caso de aprendizado fundamental para a engenharia de barragens no Brasil.

Palavras-chave: Segurança de Barragens, Instrumentação de Auscultação, UHE Risoleta Neves, Rompimento de Fundão, Monitoramento de Estruturas

ABSTRACT

Dam safety has become a critically relevant issue in Brazil, driven by recent large-scale disasters such as the failures of the Fundão (2015) and Brumadinho (2019) dams. This study examines the importance of civil structural monitoring instrumentation in risk prevention, focusing on a unique and technically complex case study: the Risoleta Neves Hydropower Plant. Following the collapse of the Fundão Dam, the Candonga HPP was directly impacted by the wave of tailings. Given the gap in the literature regarding the assessment of hydropower structures indirectly affected by mining dam failures, the main objective of this work was to conduct a critical analysis of the instrumentation plan of the Risoleta Neves HPP, comparing pre- and post-disaster scenarios. The adopted methodology consisted of an applied case study, with a qualitative, exploratory, and descriptive approach, based exclusively on documentary analysis of secondary data obtained from technical reports, scientific articles (such as Carvalho et al., 2023), Dam Safety Plans (DSP), and regulatory agency standards. It is emphasized that the instrumentation data analyzed, referring to piezometers and extensometers, were entirely extracted from these documentary sources and were not derived from direct measurements performed by the author. These data were organized into four distinct operational phases: Phase I (Initial Stabilization, 2004–2005), Phase II (Stable Commercial Operation, 2005–2015), Phase III (Failure Impact, 2015), and Phase IV (Sedimentation Period, 2015–2022). The results show that the original instrumentation system was robust, capturing the expected structural behavior during Phases I and II. In Phase III, the instruments demonstrated remarkable sensitivity, recording a reversal in kinematic trends and an immediate piezometric response to the abrupt reservoir drawdown, thereby validating the system's functionality under an extreme loading event. In Phase IV, continuous monitoring proved essential for ensuring structural safety under the new sediment-induced loading regime, with readings consistently remaining below alert thresholds even during flood events. The study also mapped the significant expansion of the instrumentation system and concluded that these changes were technically justified and effective, enabling the safe management of an unprecedented scenario and the eventual refilling of the reservoir. This research demonstrates that structural monitoring instrumentation was the primary tool enabling the safe management of the dam, constituting a valuable learning case for dam engineering practice in Brazil.

Keywords: Dam Safety; Structural Monitoring Instrumentation; Risoleta Neves HPP; Fundão Failure; Structural Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista aérea do distrito de Bento Rodrigues após a passagem da onda de rejeitos.	15
Figura 2 - Rompimento da Barragem Euclides da Cunha em 1977.	16
Figura 3 -Exemplo de inspeção visual realizada pela autora em fevereiro de 2025.	20
Figura 4 – Exemplo de uma leitura da profundidade de um piezômetro sendo realizada...	21
Figura 5 - Esquema ilustrativo de um piezômetro de tubo aberto.	23
Figura 6 – Esquema de um inclinômetro da Geokon.	24
Figura 7 – Exemplo de três medidores de vazão triangulares com destaque para o medidor central atualmente em operação.	26
Figura 8 - Esquema ilustrativo de um medidor de nível d’água.	27
Figura 9 - Extensômetro de haste	28
Figura 10 - Medidor triortogonal de junta	29
Figura 11 - Esquema ilustrativo de marcos topográficos.	30
Figura 12 – Mapa com a localização da UHE Risoleta Neves e a Barragem de Fundão	35
Figura 13 - Vista de jusante da UHE Risoleta Neves antes do reforço estrutural.	38
Figura 14 - UHE Risoleta Neves após o reforço estrutural.	39
Figura 15 - (a) Depósito de sedimentos no reservatório. (b) Reservatório deplecionado e com sedimentos do rejeito de mineração.	41
Figura 16 - Imagem de satélite da barragem UHE Risoleta Neves em 01/08/2016.	41
Figura 17 - Chegada do rejeito da Barragem de Fundão, Mariana (MG) na Foz do rio Doce em Espírito Santo.	43
Figura 18 - Posição das seções instrumentadas e dos marcos topográficos (MTs) ao longo da crista do barramento.	44
Figura 19: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Piezômetro.	50
Figura 20: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Piezômetro.	52
Figura 21: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Extensômetro.	53
Figura 22: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Extensômetro.	55

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Principais referências consultadas neste trabalho 36

Tabela 1 - Auscultação instalada em Risoleta Neves durante sua construção e após o rompimento da Barragem de Fundão em novembro de 2015 47

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVOS	13
2.1.	Objetivo geral	13
2.2.	Objetivos específicos	13
3.	JUSTIFICATIVA	14
4.	REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1.	Legislação aplicada à segurança de barragens	15
4.2.	Fundamentos da instrumentação	20
4.3.	Tipos de instrumentos e finalidades	22
4.3.2.	<i>Inclinômetros</i>	24
4.3.3.	<i>Medidor de Vazão</i>	25
4.3.4.	<i>Medidor de Nível d'Água</i>	27
4.3.5.	<i>Extensômetro de Hastes</i>	28
4.3.6.	<i>Medidor de Junta Triortogonal</i>	29
4.3.7.	<i>Marco de Superfície Topográfico</i>	29
4.4.	Limitações e boas práticas	30
5.	METODOLOGIA	35
5.1.	Caracterização do estudo de caso	38
5.2.	O rompimento da Barragem de Fundão e seus impactos na UHE Risoleta Neves	39
5.3.	O Plano de Instrumentação: Cenários Pré e Pós-Evento	43
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.1.	Caracterização e análise das alterações implementadas no plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves após o rompimento da Barragem de Fundão.	47
6.2.	Análise técnica das poropressões monitoradas por meio da piezometria nas etapas de enchimento e operação comercial antes e após a ruptura da Barragem de Fundão	49
6.3.	Análise técnica das deformações monitoradas por meio da extensometria nas etapas de enchimento e operação comercial antes e após a ruptura da Barragem de Fundão	52
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57

REFERÊNCIAS	60
GLOSSÁRIO	63
APÊNDICE A	65

1. INTRODUÇÃO

A segurança de barragens é um campo técnico essencial e de crescente relevância no Brasil, tendo ganhado maior destaque após desastres envolvendo grandes estruturas hidráulicas nas últimas décadas. A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e atualizada pela Lei nº 14.066/2020, estabelece diretrizes para garantir a integridade estrutural, o funcionamento seguro e a mitigação de riscos sociais, ambientais e econômicos associados a barragens. Essa legislação define obrigações quanto à elaboração de Planos de Segurança da Barragem (PSB), Planos de Ação de Emergência (PAE) e à implantação de sistemas de monitoramento adequados, contemplando parâmetros como risco, dano potencial associado e categoria da barragem (Brasil, 2010; Brasil, 2020).

No caso de barragens, a instrumentação de auscultação é uma ferramenta imprescindível para o acompanhamento contínuo do comportamento estrutural da barragem ao longo de sua vida útil. O uso de piezômetros, marcos topográficos, inclinômetros e medidores de vazão, por exemplo, possibilitam a detecção precoce de anomalias técnicas, hidráulicas ou estruturais. A leitura e interpretação desses dados subsidiam ações corretivas e preventivas, podendo inclusive antecipar falhas potenciais quando os sistemas estão integrados a centros de controle com análise em tempo real (Silveira, 2006).

O rompimento da Barragem de Fundão, em 5 de novembro de 2015, em Mariana/MG, é considerado um dos maiores desastres ambientais da história do Brasil (OPOVO, 2024). Estima-se que mais de 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração tenham sido lançados na bacia do Rio Doce, impactando diretamente o meio ambiente, comunidades locais e diversas estruturas a jusante, entre elas a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE Candonga). Localizada no município de Santa Cruz do Escalvado/MG, a UHE passou a cumprir também a função, desde então, de estrutura de contenção dos sedimentos carregados pelo rompimento. Essa nova circunstância imposta à barragem alterou significativamente suas condições operacionais e estruturais, exigindo reforço na instrumentação e nas rotinas de inspeção (Carvalho *et al.*, 2023).

Com a intensificação das atividades de monitoramento, a UHE Risoleta Neves passou a ser acompanhada por diversas entidades técnicas, incluindo a Fundação Renova, criada em 2016 como entidade gestora das ações de reparação e compensação ambiental e socioeconômica do desastre. A complexidade da nova condição estrutural da barragem tem exigido uma abordagem analítica crítica sobre a eficácia dos instrumentos instalados.

Embora existam estudos relevantes sobre os aspectos legais, ambientais e socioeconômicos do rompimento de Fundão (Botelho *et al.*, 2021), ainda são escassas as análises voltadas à avaliação crítica da instrumentação de estruturas afetadas de forma indireta, como é o caso da barragem da UHE Risoleta Neves. A compreensão do comportamento estrutural de uma barragem submetida a condições tão atípicas é fundamental para o avanço das práticas de engenharia e para o fortalecimento da cultura de prevenção no setor.

Nesse contexto, a presente pesquisa propõe-se a realizar uma análise crítica do plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves antes e após o rompimento da Barragem de Fundão, examinando a eficiência e a abrangência dos instrumentos de monitoramento e avaliando sua contribuição para a estabilidade estrutural e a prevenção de riscos. Espera-se, assim, que este estudo contribua para o aprimoramento das práticas de auscultação em barragens brasileiras e para o fortalecimento das políticas públicas de segurança e gestão de riscos no país.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Analisar de forma crítica do plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves antes e após o acidente com a barragem de Fundão em Mariana, (MG) em 2015, com base em estudos anteriores e em dados de piezômetros e extensômetros.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar e analisar as alterações implementadas no plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves após o rompimento da Barragem de Fundão, discutindo sua contribuição para a redução de incertezas e para o monitoramento da estabilidade da barragem;
- Analisar tecnicamente se as poropressões monitoradas por meio da piezometria nas etapas de enchimento e operação comercial antes e após a ruptura da Barragem de Fundão indicam possíveis anomalias que possam afetar a estabilidade da barragem;
- Analisar tecnicamente se as deformações monitoradas por meio da extensometria nas etapas de enchimento e operação comercial antes e após a ruptura da Barragem de Fundão indicam possíveis anomalias que possam afetar a estabilidade da barragem.

3. JUSTIFICATIVA

A segurança de barragens no Brasil ganhou maior notoriedade após os rompimentos catastróficos das barragens de Fundão (2015), em Mariana/MG, e da Mina Córrego do Feijão (2019), em Brumadinho/MG. Esses eventos expuseram falhas críticas nos sistemas de monitoramento e na gestão de riscos, especialmente no que se refere à insuficiência de instrumentação, à leitura inadequada de dados de auscultação geotécnica e sua análise e tomada de decisões em tempo hábil quando da ocorrência de uma situação anômala. No caso específico do rompimento de Fundão, além dos impactos ambientais e sociais sem precedentes, a onda de rejeitos atingiu diretamente o reservatório da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves (UHE Candonga), transformando essa estrutura em um ponto estratégico de contenção de sedimentos, o que alterou profundamente seu regime hidrossedimentológico e suas condições geotécnicas (IBAMA, 2016).

Nesse novo cenário operacional, tornou-se imprescindível a reavaliação da segurança estrutural da UHE Risoleta Neves, inclusive a confiabilidade dos sistemas de instrumentação instalados. A instrumentação de auscultação, que inclui piezômetros, inclinômetros, medidores de vazão e marcos topográficos juntamente com a inspeção visual de campo, constituem o principal conjunto de ferramentas técnicas para a detecção de anomalias estruturais em tempo hábil, subsidiando decisões de manutenção corretiva e preventiva (Silva, 2022). Sua análise sistemática é fundamental para garantir a integridade estrutural da barragem e a segurança das populações a jusante.

O presente trabalho justifica-se, portanto, por abordar um estudo de caso tecnicamente relevante: a análise crítica do plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves antes e após o desastre de Fundão. Embora a literatura técnica aborde aspectos legais, ambientais e sociais desses eventos, há uma lacuna quanto à avaliação da instrumentação em estruturas impactadas de forma indireta, mas crítica. Esta pesquisa busca, nesse sentido, contribuir para o avanço do conhecimento técnico e da prática profissional na engenharia de barragens utilizando uma linguagem simples e objetiva, ao mesmo tempo em que oferece subsídios para a formulação de estratégias mais robustas de gestão de risco e políticas públicas voltadas à segurança de estruturas hidráulicas no Brasil.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Legislação aplicada à segurança de barragens

O histórico de acidentes com barragens no Brasil revela fragilidades recorrentes na gestão da segurança, especialmente no setor de mineração. Embora existam diversos registros anteriores, foi a partir dos rompimentos de grandes estruturas nas duas últimas décadas que o tema ganhou relevância nacional e internacional, evidenciando a necessidade urgente de reforço nas políticas públicas, fiscalização e cultura de prevenção (Botelho *et al.*, 2021).

O acidente da barragem de rejeitos da Samarco, em Mariana (MG), em 2015, conhecido como rompimento da Barragem de Fundão, representou um divisor de águas na percepção sobre os riscos associados a esses empreendimentos. A estrutura, do tipo alteamento a montante, colapsou liberando cerca de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos, resultando na morte de 19 pessoas, na destruição de comunidades como Bento Rodrigues e em sérios impactos ao ecossistema da Bacia do Rio Doce (IBAMA, 2016). As consequências do desastre ainda reverberam, sobretudo no campo jurídico, ambiental e regulatório. A Figura 1 mostra o distrito de Bento Rodrigues, localizado imediatamente a jusante da barragem rompida, após a onda de rejeitos.

Figura 1: Vista aérea do distrito de Bento Rodrigues após a passagem da onda de rejeitos.



Fonte: Victor, Dayana. 2020.

Pouco mais de três anos depois, o rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão, da Vale S.A., em Brumadinho (MG), em 2019, também construída e alteada para montante, repetiu o padrão de falhas e intensificou o debate público. O colapso ocorreu de forma abrupta, sem sinais visíveis prévios de instabilidade, liberando 12 milhões de m³ de rejeitos que resultaram em 272 mortes confirmadas (Mansur, 2023). Este episódio evidenciou lacunas críticas em monitoramento, transparência e resposta emergencial.

Historicamente, o cenário brasileiro já era marcado por desafios hidrológicos severos que antecedem os grandes desastres da mineração. Um exemplo relevante de risco ambiental extremo é a "Grande Enchente" de janeiro de 1977 em São José do Rio Pardo, que atingiu níveis catastróficos e causou destruição em larga escala na infraestrutura urbana. Episódios históricos como esse servem como um importante referencial para a engenharia, demonstrando que a segurança de barragens e o controle de jusante dependem de sistemas de monitoramento robustos, capazes de subsidiar tomadas de decisão rápidas diante de cheias que podem comprometer a estabilidade global das estruturas. A Figura 2 mostra o rompimento de Euclides da Cunha 1977 devido um evento de cheia extrema na região que em 20 minutos, levou também ao rompimento da barragem de Limoeiro, 12 km mais abaixo.

Figura 2 - Rompimento da Barragem Euclides da Cunha em 1977.



Fonte: Gazeta do Rio Pardo, 2023.

Além desses casos mais emblemáticos, o Relatório de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (ANA, 2023) aponta que, entre 2010 e 2021, ocorreram 389 incidentes e acidentes em barragens cadastradas no Sistema Nacional de

Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Entre as principais causas identificadas estão:

- Erosão interna e *piping*;
- Infiltrações não controladas;
- Ausência ou deficiência de instrumentação;
- Falhas de projeto, execução ou manutenção;
- Gestão ineficaz dos riscos e planos de emergência inoperantes.

O perfil predominante das barragens acidentadas indica que a maioria era de rejeitos de mineração e com alteamento do tipo montante, uma técnica mais econômica, porém, muito mais vulnerável à instabilidade, sobretudo em regiões de alta pluviosidade. A partir da Lei nº 14.066/2020, foi proibida a construção de novas barragens com alteamento para montante, e determinado o descomissionamento progressivo das existentes (ANA, 2023).

As tragédias de Mariana e Brumadinho impulsionaram mudanças normativas significativas, incluindo:

- Ampliação das exigências legais sobre planos de segurança e emergência;
- Aumento da responsabilidade civil, penal e administrativa das mineradoras;
- Fortalecimento das competências de órgãos fiscalizadores como ANA, Agência Nacional de Mineração (ANM), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e os órgãos ambientais estaduais;
- Implantação de sistemas de monitoramento em tempo real com sensores e telemetria.

A Lei nº 12.334/2010, também conhecida como PNSB, estabelece diretrizes para a segurança de barragens destinadas ao armazenamento de água, rejeitos e resíduos industriais. Além disso, a lei cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), que visa coletar, tratar, armazenar e recuperar informações sobre barragens em diversas fases.

A Lei nº 14.066/2020 incluiu novas exigências e aprimorou a segurança de barragens no país, que proibiu a construção de barragens com alteamento para montante, tipo este correspondente às barragens de Fundão e de Brumadinho.

A Política Nacional de Segurança de Barragens, instituída pela Lei nº 12.334/2010, representa um marco regulatório essencial para a estruturação de diretrizes técnicas e administrativas voltadas à proteção de vidas humanas, do meio ambiente e do patrimônio público e privado. Essa política aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição de resíduos industriais e ao armazenamento de rejeitos da mineração (BRASIL, 2010).

A lei estabelece que toda barragem abrangida por seus dispositivos deve ser classificada de acordo com três parâmetros principais:

- Categoria de Risco (CRI): considera características técnicas da barragem, estado de conservação e plano de segurança implantado;
- Dano Potencial Associado (DPA): avalia os impactos potenciais a jusante em caso de falha ou rompimento, como perdas humanas, econômicas e ambientais;
- Categoria da Barragem: definida com base na combinação de risco e dano potencial, para priorizar ações fiscalizatórias.

Aos empreendedores, é imposta a obrigatoriedade de elaborar e manter atualizado o Plano de Segurança da Barragem (PSB), que inclui o Plano de Ação de Emergência (PAE), o Plano de Inspeções de Segurança Regular, o Plano de Inspeções Especiais, o Plano de Revisão Periódica de Segurança e os registros de dados da instrumentação de auscultação (BRASIL, 2010).

Em resposta aos desastres ocorridos em Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, a legislação brasileira sobre segurança de barragens passou por importantes atualizações. A promulgação da Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, representou um avanço substancial ao alterar diversos dispositivos da PNSB, originalmente instituída pela Lei nº 12.334/2010. As mudanças visaram reforçar os mecanismos de prevenção, fiscalização e responsabilização dos empreendedores (BRASIL, 2020).

Entre os principais aprimoramentos introduzidos, destaca-se a proibição definitiva da utilização do método de alteamento para montante para barragens de rejeitos, devido à sua reconhecida instabilidade estrutural, uma vez que se baseia na sobreposição de camadas de rejeito não compactado como fundação para novos diques. Além disso, a nova legislação tornou obrigatório o descomissionamento das estruturas existentes construídas com esse método, conforme prazos estabelecidos pela ANM (Guidicini *et al.*, 2021).

A lei também ampliou significativamente a responsabilização do empreendedor, que passou a responder civil, administrativa e penalmente por incidentes resultantes de negligência ou falhas na gestão das barragens. Outra importante medida foi a exigência de comunicação em tempo real às autoridades competentes e à população potencialmente afetada sempre que for identificada qualquer anomalia crítica nas estruturas, promovendo assim maior transparência e acesso público às informações técnicas.

A execução dessa política legal conta com a atuação articulada de órgãos reguladores específicos, de acordo com a finalidade da barragem. A ANA é responsável pelas barragens destinadas ao uso múltiplo da água, como abastecimento, irrigação ou controle de cheias. A ANM atua na fiscalização de barragens de rejeitos de mineração, enquanto a ANEEL fiscaliza as barragens associadas a usinas hidrelétricas (Guidicini *et al.*, 2021).

Além da fiscalização, essas instituições publicam normativas técnicas que regulam aspectos operacionais e estruturais das barragens. Dentre os regulamentos mais relevantes estão a Resolução ANA nº 236/2017, que define os critérios mínimos para a elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB), Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPS) e do Plano de Ação de Emergência (PAE); a Portaria ANM nº 70.389/2017, atualizada pela Portaria nº 155/2022, que estabelece diretrizes para inspeções regulares, instrumentação mínima obrigatória e análises técnicas periódicas; e a Resolução Normativa ANEEL nº 696/2015, que trata dos procedimentos de segurança voltados a empreendimentos hidrelétricos (Guidicini *et al.*, 2021).

Essas normativas também reforçam a obrigatoriedade da implantação de sistemas de auscultação, especialmente em barragens classificadas como de alto risco ou com alto dano potencial associado. Tais sistemas incluem o uso de instrumentos como piezômetros, inclinômetros, marcos topográficos, medidores triortogonal de junta e extensômetros, essenciais para o monitoramento contínuo do comportamento das estruturas (Brasil, 2020).

Apesar dos avanços trazidos pela atualização legislativa, ainda persistem desafios significativos quanto à sua efetiva aplicação. A falta de fiscalizações sistemáticas, a carência de profissionais qualificados e o descumprimento de obrigações legais por parte de alguns empreendedores continuam comprometendo a segurança de diversas estruturas no país. Nesse contexto, a integração entre órgãos reguladores, operadores e sociedade civil se mostra essencial para o fortalecimento da governança e da cultura de segurança de barragens no Brasil (Guidicini *et al.*, 2021).

4.2. Fundamentos da instrumentação

Segundo Cruz *et al.* (2004), os principais meios que o engenheiro possui para avaliar a segurança de um empreendimento ao longo de sua vida útil são: inspeções visuais, auscultação de deslocamentos verticais e/ou horizontais, levantamentos batimétricos, e instrumentação de auscultação.

A segurança de barragens depende de um conjunto de ações contínuas de vigilância, manutenção e avaliação técnica ao longo de toda a vida útil do empreendimento. Entre os principais meios disponíveis para que os engenheiros possam monitorar e avaliar a segurança estrutural das barragens estão: inspeções visuais sistemáticas, auscultação de deslocamentos verticais e/ou horizontais, levantamentos batimétricos e instrumentação de auscultação (Cruz *et al.*, 2004).

As inspeções visuais consistem na observação direta da barragem e seus componentes com o objetivo de identificar sinais de anomalias, tais como trincas, erosões, surgência de água, vegetação indesejada e infiltrações. São fundamentais por funcionarem como uma primeira linha de alerta para possíveis falhas (Cruz *et al.*, 2004). A Figura 3 mostra uma inspeção visual realizada pela autora.

Figura 3 -Exemplo de inspeção visual realizada pela autora em fevereiro de 2025.



Fonte: Autora, 2026

A auscultação geodésica é realizada por meio de técnicas topográficas, como nivelamentos de precisão e uso de estações totais, permitindo o monitoramento de

deslocamentos da estrutura ao longo do tempo. A detecção de recalques verticais ou movimentações horizontais pode indicar problemas de estabilidade no maciço ou fundações (Cruz *et al.*, 2004).

Os levantamentos batimétricos, por sua vez, são utilizados para avaliar o fundo do reservatório, detectando assoreamento, erosões submersas e alterações morfológicas que podem comprometer a operação segura da barragem (Cruz *et al.*, 2004).

Já a instrumentação de auscultação refere-se ao uso de equipamentos instalados no corpo da barragem e/ou fundação para monitoramento contínuo de variáveis como pressão, deformação e vazão. Entre os instrumentos mais comuns estão os piezômetros, inclinômetros, extensômetros, células de carga e medidores de vazão em drenos, todos fundamentais para antecipar comportamentos anômalos e subsidiar decisões de engenharia (Cruz *et al.*, 2004). A Figura 4 mostra um exemplo de auscultação em um piezômetro.

Figura 4 – Exemplo de uma leitura da profundidade de um piezômetro sendo realizada.



Fonte: Autora, 2026.

Essas práticas são consolidadas em diretrizes técnicas e legais no Brasil, especialmente após os desastres ocorridos com as barragens de Fundão (2015) e Brumadinho (2019), que impulsionaram mudanças significativas na legislação e na abordagem da segurança de barragens (BRASIL, 2020).

A instrumentação de barragens é um dos pilares da segurança estrutural desses empreendimentos. Ela permite o monitoramento contínuo do comportamento físico e mecânico da estrutura e da fundação, fornecendo dados essenciais para a prevenção de acidentes, detecção precoce de anomalias e tomada de decisão técnica baseada em evidências (Cruz *et al.*, 2004).

A depender do tipo, porte e risco associado à barragem, os sistemas de instrumentação podem ser mais simples ou altamente complexos, mas devem sempre ser compatíveis com o nível de exigência de monitoramento determinado pela sua categoria de risco e dano potencial associado, conforme define a Lei nº 12.334/2010 e as diretrizes da ANEEL e da ANA (BRASIL, 2010).

Os dois objetivos da instrumentação de barragens são (Cruz *et al.*, 2004):

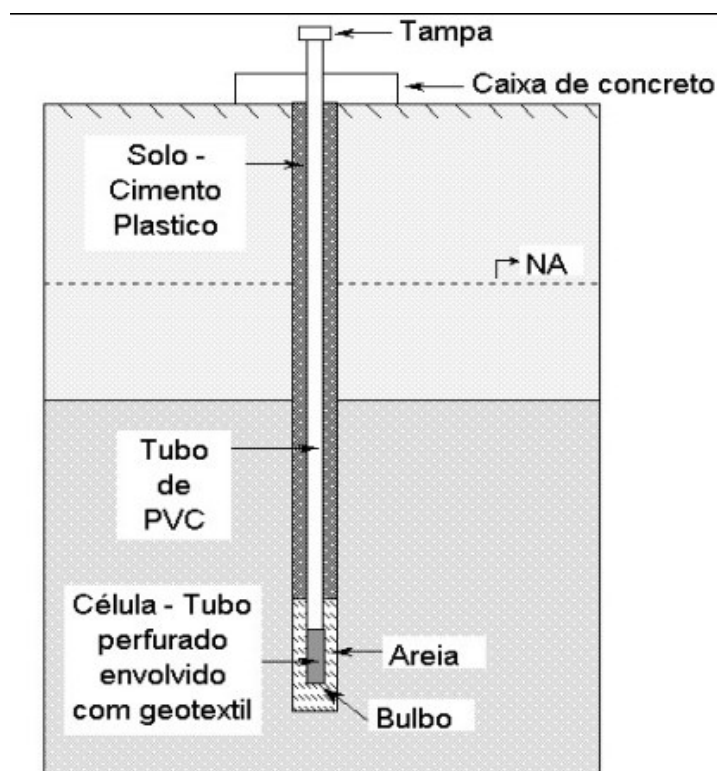
- (i) Verificar hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados em projeto, de modo a permitir o aprimoramento do projeto da própria obra em estudo. Ou de futuras barragens, visando a condição mais econômica e/ou mais segura.
- (ii) Verificar a adequação de métodos construtivos e por fim, verificar as condições de segurança das obras, de modo a serem adotadas medidas corretivas em tempo hábil, se necessárias.

4.3. Tipos de instrumentos e finalidades

4.3.1. Piezômetro de tubo aberto ou Casagrande:

Segundo Silveira (2006), o piezômetro de tubo aberto (Figura 5) é um tubo vertical, aberto na parte superior e conectado na parte inferior a um ponto específico dentro do meio onde se deseja medir a pressão da água, normalmente em um solo saturado, em uma estrutura hidráulica, ou em uma barragem. Ele funciona pelo princípio de equilíbrio hidrostático. A pressão da água no ponto de conexão no solo ou estrutura fará com que a água suba dentro do tubo até uma altura correspondente à pressão exercida naquele ponto.

Figura 5 - Esquema ilustrativo de um piezômetro de tubo aberto.



Fonte: Fonseca, 2023.

Tubo vertical aberto na parte superior: Permite que a água suba livremente e que a pressão atmosférica esteja atuando diretamente na superfície da coluna de água.

Ponto de entrada inferior: Está conectado ao meio onde a pressão da água será medida. Pode ser um ponto dentro do solo, fundação, barragem ou qualquer outra estrutura.

Nível de água dentro do tubo: Indicador direto da pressão da água naquele ponto.

Como ocorre a medição?

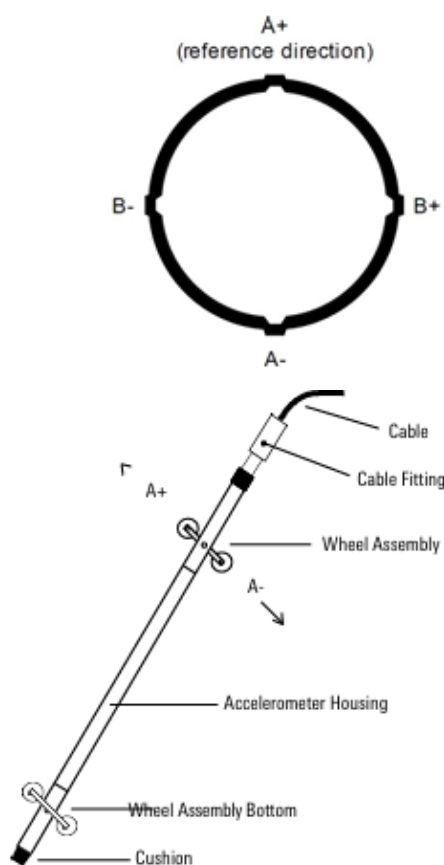
- O tubo está em contato com a água do meio na parte inferior;
- A água do meio exerce pressão hidrostática sobre a água dentro do tubo;
- Essa pressão faz com que a água suba dentro do tubo até um nível que equilibra essa pressão;
- Como o topo do tubo está aberto, a pressão no topo da coluna de água é igual à pressão atmosférica;
- A diferença de altura da coluna de água dentro do tubo em relação a um nível de referência (normalmente a superfície da água livre externa) reflete a pressão da água no ponto de medição;

A interpretação dos dados de piezômetros de tubo aberto baseia-se na leitura da altura da coluna d'água no tubo. Essa altura é diretamente relacionada à pressão neutra (poropressão) exercida pela água no ponto de instalação do elemento poroso. A medição permite determinar a carga hidráulica em diferentes zonas do maciço da barragem e da fundação, auxiliando na identificação de possíveis elevações anormais na pressão intersticial, que podem indicar condições de instabilidade ou problemas de drenagem. Leituras sistemáticas e comparativas permitem observar tendências de variação sazonal ou progressiva.

4.3.2. *Inclinômetros*

O inclinômetro é um instrumento utilizado para medir variações angulares ou deslocamentos inclinados em solos, estruturas e taludes, detectando movimentos horizontais que podem indicar instabilidade ou deformação. A Figura 6 apresenta um esquema de um inclinômetro.

Figura 6 – Esquema de um inclinômetro da Geokon.



Fonte: Instruction Manual, Geokon, 2025.

O princípio do inclinômetro baseia-se na medição do ângulo de inclinação em relação à vertical em diferentes profundidades, geralmente dentro de um tubo guia instalado no solo ou na estrutura. Com essas medidas, é possível determinar deslocamentos horizontais acumulados e identificar zonas de movimentação (Silveira, 2006).

Como ocorre a medição?

- O tubo guia é instalado em um furo vertical previamente perfurado no solo;
- A sonda inclinométrica é inserida dentro do tubo guia, descendo em intervalos regulares de profundidade (ex.: a cada 50 cm);
- Em cada posição, a sonda mede a inclinação em dois eixos ortogonais, ou seja, o quanto o tubo (e o solo ao redor) está inclinado em relação à vertical;
- A partir desses ângulos, são calculados os deslocamentos horizontais acumulados ao longo da profundidade;
- As medições periódicas permitem acompanhar a evolução dos deslocamentos, identificando zonas de instabilidade e velocidade dos movimentos.

Os dados do inclinômetros são utilizados para determinar deslocamentos horizontais ao longo da profundidade de instalação do tubo guia. As leituras sucessivas de inclinação em intervalos regulares (geralmente a cada 50 cm) permitem a elaboração de perfis de deslocamento, nos quais é possível identificar zonas de cisalhamento ou movimentações progressivas. Com o acúmulo de dados, pode-se avaliar a taxa de movimentação e a direção predominante, fornecendo subsídios para medidas corretivas em estruturas potencialmente instáveis (Silveira, 2006).

4.3.3. Medidor de Vazão

O medidor de vazão é um dispositivo utilizado para medir a quantidade de água que passa por uma seção transversal em um determinado tempo, fundamental para controle e monitoramento hidráulico (Silveira, 2006). A Figura 7 mostra três medidores de vazão sendo que o do meio está em funcionamento.

Figura 7 – Exemplo de três medidores de vazão triangulares com destaque para o medidor central atualmente em operação.



Fonte: Autora, 2026.

O princípio varia conforme o tipo, mas em geral o medidor converte a velocidade do fluxo ou a altura do nível em uma medida volumétrica de vazão (m^3/s ou L/s).

Como ocorre a medição?

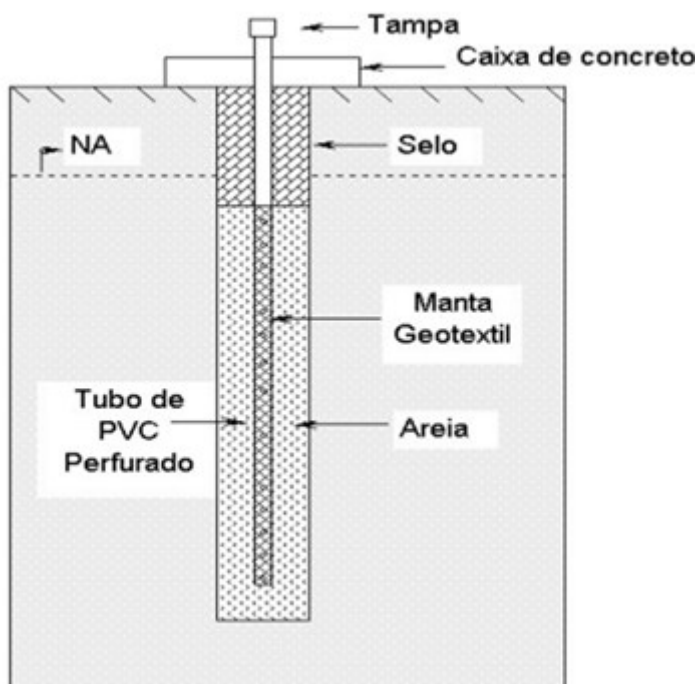
- O fluido passa pelo medidor, que detecta um parâmetro relacionado à vazão (velocidade, altura do nível, pressão diferencial);
- Esse parâmetro é convertido, por meio de calibração, em volume de fluido que atravessa o ponto por unidade de tempo;
- Os dados são registrados e exibidos para análise.

A interpretação dos dados de vazão é essencial para avaliar o funcionamento do sistema de drenagem interna da barragem ou de galerias. Vazões anormalmente elevadas, variações bruscas ou presença de sólidos em suspensão nos drenos podem indicar alterações no regime de percolação, entupimentos, surgimento de caminhos preferenciais ou erosão interna (*piping*). A tendência histórica dos dados auxilia na avaliação da eficiência do sistema drenante e no planejamento de intervenções (Silveira, 2006).

4.3.4. Medidor de Nível d'Água

Instrumento para medir a altura do nível da água em reservatórios, rios, poços ou barragens. Baseia-se na medição da distância entre uma referência fixa e a superfície da água (Silveira, 2006). A Figura 8 ilustra um esquema representativo desse instrumento.

Figura 8 - Esquema ilustrativo de um medidor de nível d'água.



Fonte: Fonseca, 2023.

Como ocorre a medição?

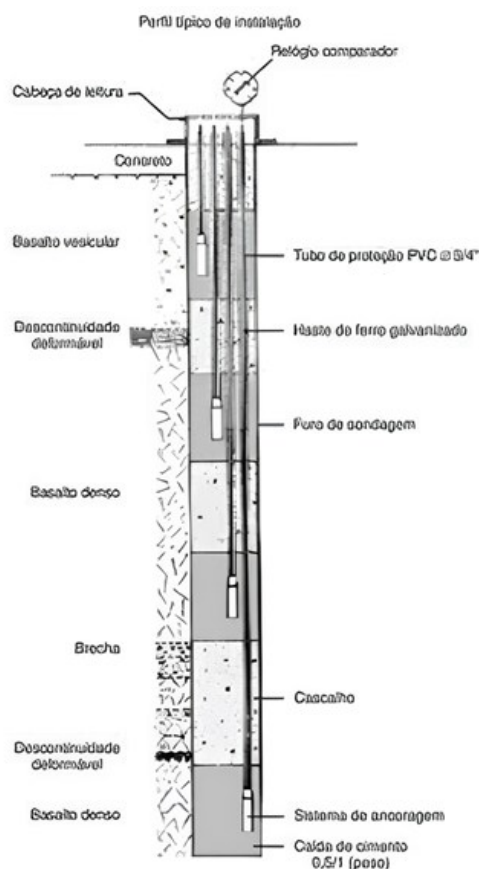
- O sensor detecta a posição da superfície da água;
- Mede-se a distância ou pressão correspondente;
- Transforma-se essa medida em altura do nível.

A análise dos dados de nível d'água permite o acompanhamento da variação do espelho d'água do reservatório, fundamental para o controle da carga hidráulica atuante sobre a estrutura da barragem. Oscilações abruptas ou incompatíveis com os registros pluviométricos ou operacionais podem sinalizar falhas no controle do reservatório ou eventos não previstos. Esses dados são frequentemente correlacionados com os registros de pressão nos piezômetros e com os deslocamentos observados (Silveira, 2006).

4.3.5. Extensômetro de Hastes

Instrumento para medir deslocamentos relativos em solos ou estruturas, especialmente movimentos verticais e horizontais em profundidade. Utiliza hastes rígidas que acompanham o movimento do terreno ou estrutura; a variação relativa entre as hastes indica o deslocamento (Silveira, 2006).

Figura 9 - Extensômetro de haste



Fonte: Neto, Marco A. S., 2010.

Como ocorre a medição?

- As hastes são fixadas em pontos específicos e conectadas ao sistema de leitura;
- Quando o solo ou estrutura se move, as hastes se deslocam;
- O equipamento registra essa movimentação em relação a um ponto fixo.

Os extensômetros de hastes fornecem medidas de deslocamentos verticais ou horizontais ao longo da profundidade da fundação ou do corpo da barragem. A análise dos dados permite identificar recalques diferenciais, movimentos relativos entre camadas e possíveis reativações de fraturas. Os dados devem ser interpretados em conjunto com os registros de

piezometria e inclinometria para formar um diagnóstico integrado da estabilidade da estrutura (Silveira, 2006).

4.3.6. Medidor de Junta Triortogonal

Instrumento para medir deslocamentos em três direções ortogonais (x, y e z), utilizado para monitorar movimentos em juntas estruturais ou fissuras (Silveira, 2006).

Figura 10 - Medidor triortogonal de junta



Fonte: Solotest, 2025.

Utiliza sensores que detectam movimentos lineares ou angulares em três eixos perpendiculares para captar deslocamentos tridimensionais.

Como ocorre a medição?

- Os sensores detectam o movimento relativo entre as partes da junta;
- Os dados dos três eixos são registrados simultaneamente;
- É possível determinar deslocamentos totais e direções.

Este instrumento fornece medições tridimensionais (x, y e z) de deslocamentos em juntas estruturais, sendo essencial em barragens de concreto ou em estruturas de contenção segmentadas. A interpretação envolve o monitoramento da abertura, fechamento ou deslizamento relativo entre blocos estruturais, permitindo avaliar a integridade da junta e a resposta da estrutura a variações térmicas, sísmicas ou hidráulicas (Silveira, 2006).

4.3.7. Marco de Superfície Topográfico

Ponto fixo instalado na superfície do terreno usado como referência para monitoramento topográfico e levantamento geodésico (Silveira, 2006).

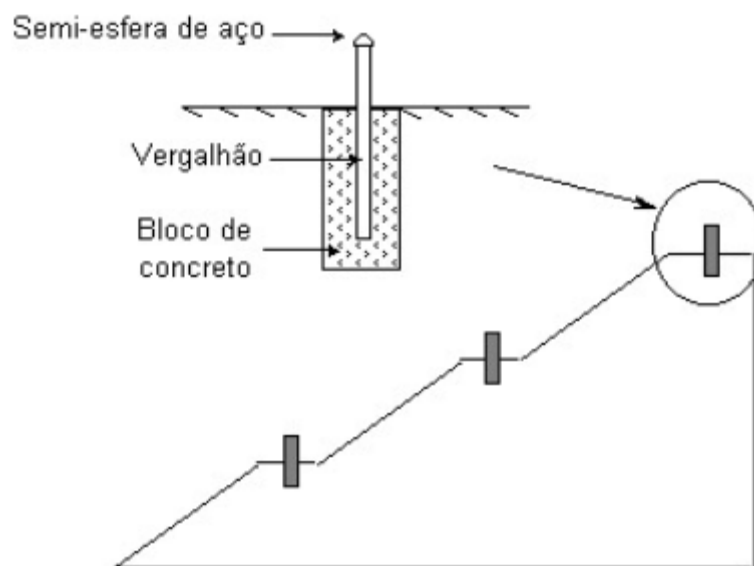
Serve como base estável para medições repetidas de posição, altitude e deslocamentos do terreno com instrumentos topográficos.

Como ocorre a medição?

- O marco é utilizado como ponto fixo no terreno;
- Equipamentos topográficos medem sua posição e altitude em relação a outros pontos;
- Monitoramentos periódicos permitem detectar movimentos ou deformações da superfície.

Os dados obtidos por meio de marcos de superfície topográficos são utilizados para detectar movimentações globais do corpo da barragem ou da fundação ao longo do tempo. Por meio de levantamentos geodésicos periódicos (nível de precisão ou Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)), é possível identificar deslocamentos acumulados, recalques ou levantamentos em diferentes setores da estrutura. A interpretação depende da comparação com marcos de referência externos estáveis e da consistência dos dados ao longo do tempo (Silveira, 2006). A Figura 11 apresenta um esquema representativo desse instrumento.

Figura 11 - Esquema ilustrativo de marcos topográficos.



Fonte: Fonseca, 2023.

4.4. Limitações e boas práticas

Um instrumento apresenta comportamento não esperado, se o risco de assumir o erroneamente como defeituoso e de descartar as informações por ele fornecidas com eventuais consequências negativas. Por outro lado, existe o risco de assumir erradamente o

comportamento adequado do maciço da estrutura. Na realidade, o instrumento está apresentando uma falsa indicação de situação normal quanto à segurança, pelo fato de estar danificado ou não ser adequado a finalidade pretendida (Cruz *et al.*, 2004).

Um plano de instrumentação sem a correspondente análise periódica, interpretação sistemática dos resultados é inútil ou mesmo nocivo, na medida em que pode causar uma falsa sensação de segurança em relação ao empreendimento. Um programa de auscultação pressupõe a determinação de valores previstos para as grandezas de interesse, com base nos critérios de cálculos adotados no projeto. Portanto, pressupõe a existência de modelos mentais e a quantificação dos fenômenos envolvidos e sempre que possível deve estar associada a valores no nível de projeto e ou críticos para a confrontação do com os observados (Cruz *et al.*, 2004).

Questões fundamentais: o engenheiro que elaborar o programa de instrumentação de determinado empreendimento deve estar perfeitamente por dentro das respostas a essas perguntas fundamentais.

Por que instrumentar? O que é instrumentar? Onde instrumentar como instrumentar? Quais os níveis previstos em projetos, e os críticos? Que providências adotar se os níveis estabelecidos forem ultrapassados.

A instrumentação de auscultação é um dos principais meios que o engenheiro possui para avaliar a segurança de um empreendimento ao longo de sua vida útil. De acordo com Cruz *et al.*, (2004), a aplicação de instrumentos como piezômetros, inclinômetros, marcos topográficos e medidores de vazão permite monitorar o comportamento geotécnico e estrutural da barragem de forma contínua e precisa, sendo essencial para a detecção precoce de anomalias e para a validação de modelos de projeto.

O livro 100 Barragens Brasileiras, organizado por Cruz (2004), destaca que o sucesso operacional e estrutural de grandes empreendimentos hidrelétricos no Brasil está fortemente vinculado à qualidade e abrangência dos sistemas de auscultação. Em diversas obras analisadas, como as barragens de Foz do Areia e Tucuruí, os dados obtidos pelos instrumentos foram fundamentais para orientar decisões de engenharia, evitar acidentes e validar o desempenho esperado dos materiais utilizados.

A obra também evidencia que a simples presença de instrumentos não garante a segurança da estrutura: é necessário que os dados coletados sejam interpretados por equipes

técnicas capacitadas e que as leituras sejam realizadas com regularidade, alimentando um histórico confiável de comportamento da barragem (Cruz *et al.*, 2004).

Além disso, a instrumentação serve como base para a elaboração dos Planos de Segurança de Barragens (PSB) e dos Planos de Ação de Emergência (PAE), conforme estabelecido pela Lei nº 12.334/2010 e atualizado pela Lei nº 14.066/2020. Segundo Cruz *et al.* (2004), “a auscultação, quando bem projetada e mantida, é a ferramenta mais eficiente para acompanhar a evolução de recalques, pressões neutras, deslocamentos e percolações”.

No contexto da UHE Risoleta Neves, a relevância da instrumentação tornou-se ainda mais evidente após o rompimento da Barragem de Fundão, em 2015. A barragem passou a desempenhar papel crucial no processo de contenção de rejeitos e controle de riscos subsequentes, exigindo monitoramento intensivo para garantir sua estabilidade e segurança a jusante. Assim, a análise crítica da instrumentação instalada antes e após o acidente se faz indispensável para compreender a eficácia das ações tomadas e para propor melhorias na gestão de risco em empreendimentos hidrelétricos de médio porte.

A instrumentação representa um dos pilares da segurança de barragens, oferecendo subsídios para avaliação do desempenho estrutural ao longo do tempo. No entanto, como qualquer técnica de monitoramento, os instrumentos utilizados possuem limitações que devem ser compreendidas, bem como boas práticas que garantem a confiabilidade e a utilidade dos dados obtidos (Silveira, 2006).

O piezômetro de tubo aberto, também conhecido como piezômetro Casagrande, é amplamente utilizado para a medição da pressão intersticial da água nos maciços. Sua principal limitação está na resposta lenta em solos de baixa permeabilidade, como argilas, o que pode comprometer a sensibilidade a variações rápidas de pressão. Além disso, é suscetível à colmatação por partículas finas, exigindo cuidados durante a instalação e manutenção. Como boas práticas, recomenda-se a instalação em zonas representativas com vedação adequada, uso de elementos filtrantes de qualidade, proteção contra intempéries e padronização nos horários e métodos de leitura (Silveira, 2006).

Os inclinômetros, por sua vez, são essenciais para o monitoramento de deslocamentos horizontais ao longo da profundidade do maciço. Sua aplicação exige a instalação de tubos guia com alinhamento vertical preciso, pois qualquer desgaste ou obstrução pode comprometer a leitura. A operação do equipamento requer capacitação técnica e cuidados na interpretação dos dados. Entre as boas práticas, destacam-se a realização de leituras em intervalos regulares, o

uso de leituras de ida e volta para controle de qualidade e o registro sistemático das leituras para análise histórica (Silveira, 2006).

Os medidores de vazão desempenham papel fundamental no controle de infiltrações e no entendimento do regime hidráulico da estrutura. No entanto, podem apresentar dificuldades de leitura em regimes de escoamento turbulento, presença de sólidos em suspensão ou formação de bolhas de ar. Para garantir precisão, é recomendada a instalação em locais acessíveis, com manutenção periódica, calibração regular e correlação dos dados com outros instrumentos, como piezômetros e medidores de nível (Silveira, 2006).

O medidor de nível d'água também é de ampla aplicação em barragens e reservatórios. Suas limitações incluem a suscetibilidade a variações superficiais, como ondas ou presença de detritos, e a necessidade de calibração constante. A boa prática envolve a instalação em locais protegidos da corrente principal, verificação constante do sensor, e validação com escalas linimétricas manuais (Silveira, 2006).

O extensômetro de hastes é utilizado para detectar deslocamentos verticais ou horizontais em profundidade, e pode apresentar dificuldades na detecção de movimentações pequenas. Além disso, desalinhamentos ou falhas nas conexões das hastes podem gerar dados inconsistentes. Para maior confiabilidade, recomenda-se instalação em locais estratégicos com base em investigações geotécnicas, manutenção preventiva das conexões e leitura frequente com correlação com os dados de inclinômetros (Silveira, 2006).

Os medidores de junta triortogonais permitem a detecção de deslocamentos em três direções ortogonais (x , y , z), sendo eficazes no monitoramento de juntas estruturais e fissuras. Contudo, são sensíveis a variações térmicas e demandam fixação precisa em elementos rígidos da estrutura. Entre as boas práticas estão a verificação periódica da estabilidade dos pontos de fixação, instalação em áreas críticas da barragem e registro sistemático das leituras para avaliação da cinemática da junta (Silveira, 2006).

Por fim, os marcos de superfície topográficos são pontos de referência utilizados para levantamento geodésico e detecção de recalques ou movimentos superficiais. Apesar de sua importância, podem ser influenciados por movimentações superficiais temporárias ou fatores climáticos, exigindo o uso de instrumentos precisos como níveis digitais, estações totais ou GNSS de alta acurácia. A instalação deve ocorrer em locais estáveis e protegidos, com criação de redes redundantes e registros periódicos para avaliação de tendências (Silveira, 2006).

Em suma, o uso eficaz da instrumentação em barragens requer não apenas a escolha correta dos dispositivos, mas também um planejamento adequado de instalação, operação e análise. A integração dos dados obtidos por diferentes instrumentos é fundamental para uma avaliação abrangente e segura do comportamento da estrutura ao longo do tempo (Silveira, 2006).

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consiste em uma pesquisa aplicada, com abordagem qualitativa e natureza exploratória e descritiva, centrada na análise de um estudo de caso: a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, localizada no município de Santa Cruz do Escalvado/MG. O mapa a seguir mostra a localização da UHE Risoleta Neves e a Barragem de Fundão.

Figura 12 – Mapa com a localização da UHE Risoleta Neves e a Barragem de Fundão



Fonte: Google Earth, 2026.

A escolha desse caso justifica-se pela relevância do empreendimento diante dos impactos indiretos do rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 2015, e pela ampla disponibilidade de dados técnicos públicos que permitem uma análise aprofundada. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, pois busca interpretar a realidade a partir da descrição e análise crítica da instrumentação da barragem, compreendendo sua função para segurança e monitoramento. Ao mesmo tempo, é exploratória por investigar um tema pouco abordado na literatura, a avaliação do sistema de instrumentação de uma barragem hidrelétrica afetada por um desastre externo, e descritiva, por apresentar detalhadamente as características técnicas e operacionais do sistema antes e após as alterações provocadas pelo evento.

O levantamento de dados foi realizado por meio da identificação e reunião de todas as fontes de informação relevantes, contemplando relatórios técnicos e institucionais, como os

Relatórios e Planos de Segurança de Barragens, relatórios de monitoramento da Fundação Renova entre 2016 e 2023, e documentos emitidos por órgãos reguladores como ANA, ANEEL e IBAMA.

Também foram utilizadas bases de dados públicas, como o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), além de registros do Ministério Público e relatórios do Comitê Brasileiro de Barragens. Complementarmente, foram consultadas fontes acadêmicas e técnicas, incluindo artigos científicos indexados nas bases SciELO, Google Scholar e CAPES Periódicos, livros técnicos, com destaque para *100 Barragens Brasileiras*, de Paulo Teixeira da Cruz (2004). As principais referências utilizadas são apresentadas no Quadro 1:

Quadro 1 - Principais referências consultadas neste trabalho

Autor/Fonte	Título da Obra / Documento
ANA - Agência Nacional de Águas (2023)	<i>Relatório de Segurança de Barragens 2022</i>
Brasil (Leis 12.334/10 e 14.066/20)	<i>Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)</i>
Carvalho, Cleber et al. (2023)	<i>Avaliação da instrumentação do barramento da UHE Candonga - influência do rompimento da barragem Fundão</i>
Cruz, Paulo Teixeira da (2004)	<i>100 Barragens Brasileiras</i>
Guidicini, Guido et al. (2021)	<i>Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil</i>
Marcelino, Ana Paula B. et al. (2023)	<i>Ações para restabelecer a estabilidade do barramento da UHE Candonga após o rompimento de Fundão</i>
PAE – Risoleta Neves	<i>Plano de ação de Emergências da UHE Risoleta Neves</i>
Silveira, João Francisco Alves (2006)	<i>Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento</i>

Fonte: Autora, 2026.

O recorte temporal da pesquisa compreende o intervalo entre o enchimento inicial do reservatório, em julho de 2004, e o período pós-reenchimento, ocorrido em dezembro de 2022. A base de dados foi consolidada a partir da extração e compilação de informações técnicas

contidas em relatórios institucionais e séries gráficas presentes na literatura especializada, com destaque para os registros históricos de Carvalho *et al.* (2023).

A interpretação técnica dos resultados foi feita com base em conceitos de mecânica dos solos, hidráulica e segurança de barragens, buscando relacionar as variações registradas com fatores geotécnicos, hidráulicos e operacionais. Para isso, as respostas instrumentais foram divididas em quatro fases operacionais da UHE Risoleta Neves: o período pós-enchimento inicial (I), a fase de operação comercial (II), o impacto direto da onda de rejeitos (III) e o período de operação com reservatório assoreado (IV).

A apresentação dos resultados foi feita por meio de tabelas, quadros síntese e gráficos de séries, de modo a oferecer uma visão clara e detalhada do desempenho do sistema de auscultação. A discussão integra os aspectos técnicos ao contexto normativo e operacional, identificando pontos fortes, fragilidades e oportunidades de aprimoramento.

Para analisar a resposta da instrumentação imediatamente após a ruptura da Barragem de Fundão, o foco foi o tratamento das séries históricas dos instrumentos no período crítico de novembro de 2015. Foram escolhidas seções principais da piezometria e extensometria que representassem o comportamento devido à ação externa ocorrida em 2015. A análise buscou identificar variações abruptas nos dados que se correlacionassem com a chegada da onda de rejeitos e com as manobras operacionais de emergência, como o rebaixamento do nível do reservatório. Foram utilizados os gráficos de instrumentação (piezômetros e extensômetros), conforme publicado por Carvalho *et al.* (2023), dados estes que estão públicos. O produto deste item consistiu em um diagnóstico da capacidade dos instrumentos existentes na época de registrar um evento extremo e não previsto.

A eficácia do sistema de auscultação foi aferida a partir de critérios técnicos rigorosos, iniciando-se pela verificação da correlação entre as leituras de piezometria e as oscilações do nível d'água do reservatório. Essa abordagem integrada possibilitou uma avaliação fundamentada sobre a sensibilidade e a confiabilidade do plano de monitoramento original em garantir a estabilidade global da barragem sob condições normais e críticas.

O mapeamento das alterações implementadas no plano de instrumentação após o acidente foi conduzido por meio de uma análise documental comparativa. Nesta etapa, as informações foram sistematicamente organizadas e adaptadas para detalhar o incremento no quantitativo de instrumentos de cada tipologia, a instalação de novos pontos estratégicos de monitoramento, como os medidores de nível de sedimento, e a intensificação na frequência das

leituras, que passaram a ter periodicidade diária. O resultado dessa sistematização consolidou-se em um diagnóstico descritivo do cenário de monitoramento da UHE Risoleta Neves antes e depois do evento.

5.1. Caracterização do estudo de caso

A Usina Hidrelétrica Risoleta Neves está instalada no alto curso do Rio Doce, no limite entre os municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, no estado de Minas Gerais, distante, aproximadamente, 40 km de Ponte Nova. Encontra-se em operação desde 2004, opera por meio de captação a fio d'água e possui potência instalada de 140MW, provenientes de três unidades geradoras do tipo Kaplan de eixo vertical, que aproveita uma queda de 48,60 m disposta em uma casa de força do tipo abrigada (PAE, 2024).

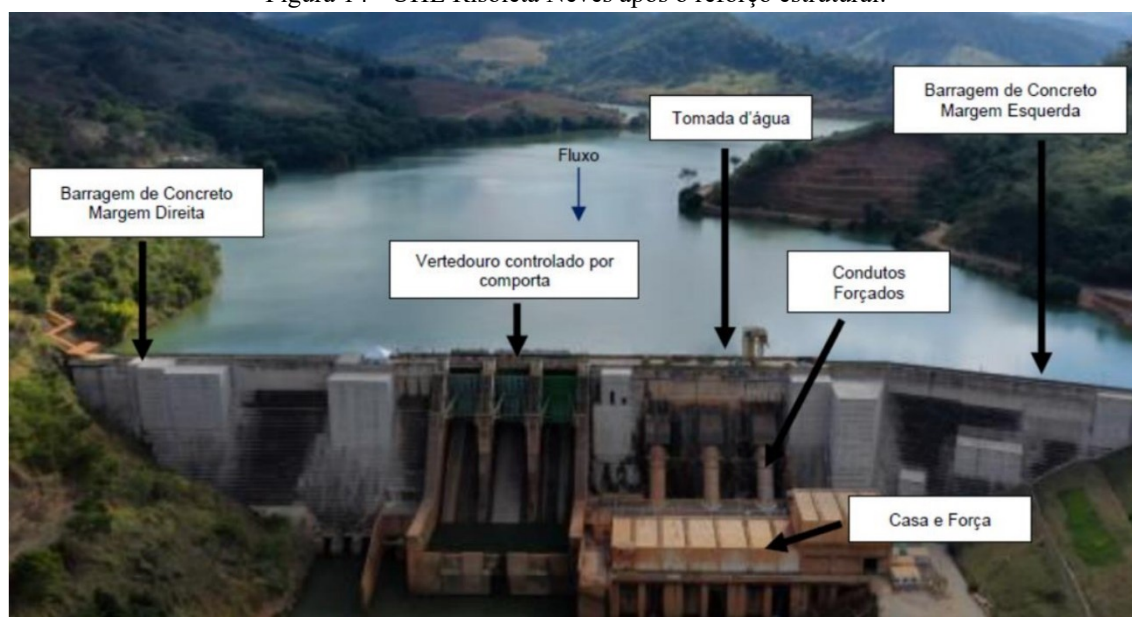
A barragem é em concreto compactado com rolo (CCR) com um vertedouro posicionado na calha central do rio em concreto rolado (CCR) na parte inferior e em concreto convencional na parte superior (soleira, pilares, vigas do munhão e ponte) dotado de três comportas de segmento. Inicialmente, o reservatório atendia um volume total de $54,44 \times 10^6 \text{ m}^3$, NA. máximo normal na El. 327,50m e área de contribuição de 8.900 km². A Figura 13 mostra o barramento principal antes do reforço estrutural e a Figura 14 depois do reforço estrutural devido ao acidente de Fundão (MG) (PAE, 2024).

Figura 13 - Vista de jusante da UHE Risoleta Neves antes do reforço estrutural.



Fonte: Candonga, 2025.

Figura 14 - UHE Risoleta Neves após o reforço estrutural.



Fonte: PAE Risoleta Neves, 2024.

A auscultação da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves é realizada por meio de instrumentos instalados em pontos estratégicos, definidos conforme critérios técnicos e premissas estabelecidas no projeto executivo da usina. O principal objetivo desse sistema de instrumentação é monitorar as condições de estabilidade e segurança da estrutura, permitindo a detecção precoce de anomalias que possam comprometer o desempenho da barragem ao longo de sua vida útil (Carvalho *et al.*, 2023).

5.2. O rompimento da Barragem de Fundão e seus impactos na UHE Risoleta Neves

No dia 5 de novembro de 2015, o Brasil testemunhou o início de um dos maiores desastres socioambientais de sua história: o colapso da Barragem de Fundão, de propriedade da mineradora Samarco, no município de Mariana, Minas Gerais. A estrutura, que continha um vasto volume de rejeitos provenientes do beneficiamento de minério de ferro, sofreu uma ruptura catastrófica, liberando uma onda de lama que se propagou com velocidade e força devastadoras pelo vale do Rio Doce. A torrente de rejeitos percorreu centenas de quilômetros, destruindo comunidades, suprimindo a biodiversidade e alterando permanentemente a geografia e a ecologia da bacia hidrográfica, deixando um rastro de danos sociais, ambientais e econômicos de proporções incalculáveis, conforme ressaltam Marcelino *et al.* (2023).

Situada a aproximadamente 100 km a jusante do ponto de ruptura, a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, no município de Santa Cruz do Escalvado/MG, encontrava-se diretamente na rota da onda de detritos. Cerca de 14 horas após o rompimento, os operadores da usina

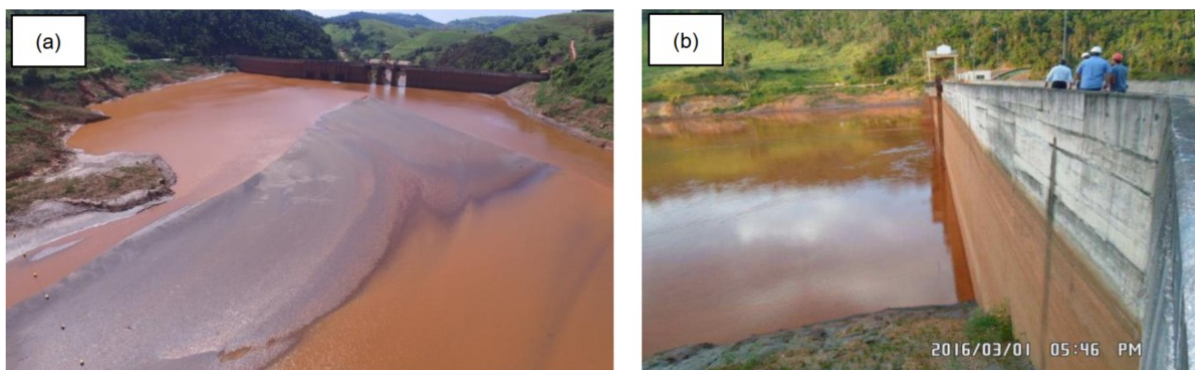
perceberam os primeiros sinais da chegada da pluma de rejeitos, um evento que colocava a integridade do barramento sob risco iminente. Em uma ação preventiva crucial, as operações de geração de energia foram imediatamente interrompidas, uma vez que o sistema de alimentação de água industrial foi obstruído pela grande quantidade de lama, tornando a operação inviável (Marcelino *et al.*, 2023).

Simultaneamente, foi tomada a decisão de abrir totalmente as comportas do vertedouro, uma manobra de segurança essencial com o objetivo de promover o rebaixamento do nível do reservatório para proteger a estrutura e diminuir a possibilidade de galgamento — situação em que a onda de cheia ultrapassa o coroamento da barragem, podendo comprometer sua estabilidade global. O cenário, no entanto, tornou-se ainda mais crítico, pois o excesso de madeiras e rejeitos carregados pela enxurrada acarretou o travamento das comportas 2 e 3 do vertedouro. Diante do risco iminente de que a última comporta também ficasse inoperante, a operação para deplecionar o reservatório foi intensificada, resultando em um rebaixamento rápido e abrupto do nível d'água em aproximadamente 15 metros (Marcelino *et al.*, 2023).

A passagem da onda de rejeitos pela UHE Risoleta Neves alterou drasticamente as condições do reservatório e da própria barragem. Houve uma deposição significativa de sedimentos em todo o sistema: parte do material acumulou-se ao longo da calha do rio, outra parte assoreou o próprio reservatório, depositando-se junto às estruturas hidráulicas até a cota da soleira do vertedouro, e o restante do material ultrapassou as comportas abertas, seguindo o curso do Rio Doce até sua foz no Oceano Atlântico. Este evento impôs ao barramento "carregamentos excepcionais não previstos" em projeto, segundo Marcelino *et al.* (2023)

A nova realidade operacional e estrutural exigiu a adoção imediata de medidas emergenciais. Ainda em novembro de 2015, foi realizada uma Inspeção de Segurança Especial que, diante do acúmulo de sedimento junto ao paramento de montante, alterou o nível de segurança da barragem para a condição de "Atenção". A situação demandou um reforço significativo nos sistemas de monitoramento e instrumentação para acompanhar o comportamento da estrutura sob as novas e desafiadoras condições, garantindo a segurança do empreendimento e das comunidades a jusante. A Figura 15 ilustra a condição do reservatório com a massiva presença de sedimentos, enquanto a Figura 16 retrata uma imagem de satélite da usina em agosto de 2016, evidenciando a magnitude do impacto ambiental.

Figura 15 - (a) Depósito de sedimentos no reservatório. (b) Reservatório deplecionado e com sedimentos do rejeito de mineração.



Fonte: Carvalho *et al.*, (2023).

Figura 16 - Imagem de satélite da barragem UHE Risoleta Neves em 01/08/2016.



Fonte: Guidicini *et al.*, 2021.

Além do impacto físico e do assoreamento massivo, que exigiu a dragagem de 500.000 m³ de sedimentos e o reforço estrutural com 19.612 m³ de concreto, a qualidade química da água sofreu uma degradação severa e persistente. Estudos apontam que a pluma de rejeitos elevou as concentrações de metais como ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn) a níveis muito superiores aos limites estabelecidos pelo CONAMA. Essa alteração química não se limitou ao momento do desastre; a ressuspensão de sedimentos depositados no leito do rio durante períodos de chuva continua a degradar a qualidade da água, mantendo os níveis de metais em patamares críticos mesmo anos após o evento (Matos *et al.*, 2020).

A avaliação do Índice de Qualidade de Água (IQA) ao longo da calha do Rio Doce revelou que, embora tenha havido uma tendência de recuperação gradual em alguns parâmetros, elementos como chumbo (Pb) e arsênio (As) apresentaram violações pontuais em diversos trechos monitorados. O monitoramento conduzido pelo IGAM ao longo de sete anos indica que a bacia ainda apresenta desafios para o restabelecimento dos usos múltiplos da água, com a turbidez e a presença de sólidos em suspensão sendo os indicadores mais sensíveis às variações climáticas e à movimentação do rejeito remanescente no sistema (IGAM, 2023).

O monitoramento contínuo indica que a bacia ainda não atingiu sua integridade original, mantendo alertas rigorosos para o consumo de pescado e restrições de uso em diversas atividades humanas e produtivas. Dez anos depois, a bacia ainda demanda vigilância constante para restabelecer suas funções vitais e garantir a segurança das populações ribeirinhas (G1, 2025).

Este cenário de impactos duradouros fundamentou a assinatura do novo acordo de repactuação em outubro de 2024, prevendo investimentos de R\$ 132 bilhões em novas ações de restauração ambiental, saúde e indenizações. Para a engenharia de barragens e gestão de recursos hídricos, o caso Mariana reforça que o monitoramento deve ser um compromisso institucional de longo prazo. A experiência na UHE Risoleta Neves demonstra que a instrumentação de auscultação atua como uma sentinela vital na gestão de um passivo ambiental que perdura por décadas, garantindo a estabilidade estrutural frente a um ambiente em lenta recuperação (G1, 2025). A Figura 17 mostra a chegada do rejeito da Barragem de Fundão, Minas Gerais na Foz do rio Doce em Espírito Santo.

Figura 17 - Chegada do rejeito da Barragem de Fundão, Mariana (MG) na Foz do rio Doce em Espírito Santo.



Fonte: El País Brasil, 2016.

5.3. O Plano de Instrumentação: Cenários Pré e Pós-Evento

O Plano de Instrumentação de projeto implementado contemplava um total de 81 instrumentos, distribuídos de forma a cobrir os principais pontos de interesse estrutural e geotécnico da usina. Esses instrumentos possibilitam o acompanhamento de diferentes parâmetros, como destaca Silveira (2006):

- Deslocamentos relativos entre a estrutura civil e a fundação;
- Deslocamentos entre blocos da estrutura civil;
- Carga piezométrica na fundação e na interface entre fundação e estrutura;
- Vazão no sistema de drenagem interna da barragem;
- Nível da água nas ombreiras.

A escolha dessas seções instrumentadas foi fundamentada em dados geológicos da fundação, obtidos durante a fase de construção da usina. A distribuição dos instrumentos foi planejada de forma a permitir o monitoramento eficiente e setorial da estrutura, abrangendo diferentes comportamentos geotécnicos e hidráulicos ao longo do barramento.

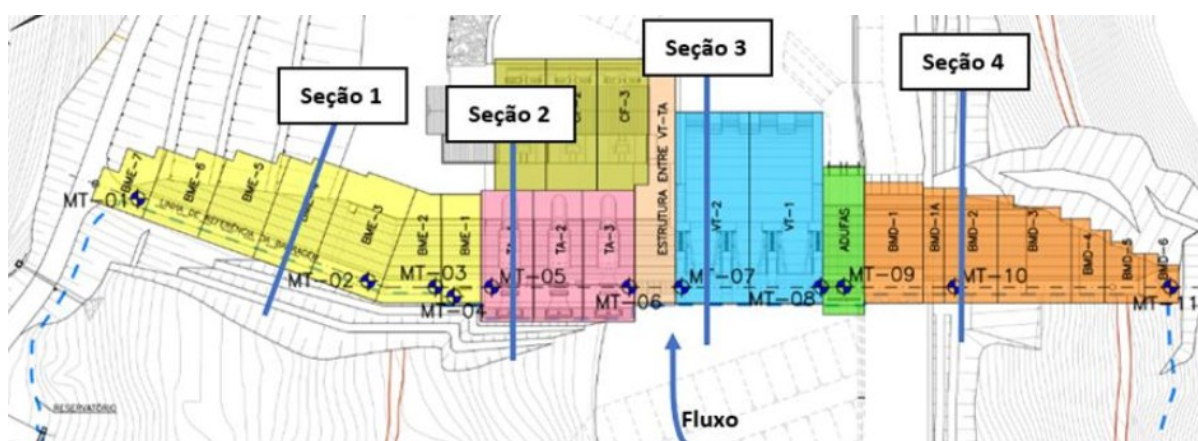
Os medidores de junta triortogonais foram instalados no interior da Galeria de Inspeção e Drenagem, onde monitoram deslocamentos tridimensionais nas juntas estruturais. Já os marcos topográficos foram posicionados ao longo da crista da barragem, servindo como

referência para levantamentos geodésicos periódicos que detectam possíveis movimentações da estrutura (Carvalho *et al.*, 2023).

Os medidores de vazão foram distribuídos em pontos estratégicos do sistema de drenagem da fundação, permitindo o monitoramento setorizado das vazões internas. Além disso, os medidores de nível d'água foram instalados para acompanhar as variações do nível freático em áreas críticas, como a sela topográfica e as regiões a jusante do barramento, tanto na margem esquerda quanto na margem direita (Carvalho *et al.*, 2023).

A Figura 18 ilustra a disposição dos instrumentos ao longo dessas quatro seções, destacando sua posição exata e a função de cada conjunto no sistema de auscultação da barragem.

Figura 18 - Posição das seções instrumentadas e dos marcos topográficos (MTs) ao longo da crista do barramento.



Fonte: Carvalho *et al.*, 2023.

A rotina de aquisição de leituras dos instrumentos de auscultação foi iniciada ainda na fase prévia ao enchimento do reservatório, e que se intensificou após o rompimento da Barragem de Fundão, em 2015. Durante esse período inicial, a coleta de dados seguiu os critérios usuais de frequência e periodicidade definidos no projeto executivo da UHE Risoleta Neves (Carvalho *et al.*, 2023).

Contudo, após o evento de rompimento e o conseqüente acúmulo de sedimentos no reservatório e junto ao barramento, somado à operação prolongada das comportas do vertedouro, houve a necessidade de alteração do protocolo de monitoramento. A partir desse momento, as leituras passaram a ser realizadas com frequência diária, acompanhadas por análises semanais e avaliações mensais do comportamento da estrutura, visando garantir maior

controle e resposta rápida face às possíveis alterações nas condições de estabilidade (Carvalho *et al.*, 2023).

Diante da preocupação com a segurança estrutural dos blocos da barragem, uma vez que o acúmulo de sedimentos não havia sido previsto nas condições originais de projeto, foram também implantados pontos específicos de medição do nível de sedimentos junto ao paramento de montante da estrutura. Esses pontos adicionais permitiram o acompanhamento da espessura e da distribuição do material depositado, complementando a análise integrada da segurança da barragem (Carvalho *et al.*, 2023).

Segundo Carvalho *et al.* (2023), a análise dos dados obtidos por meio do sistema de instrumentação da UHE Risoleta Neves foi realizada com base na série histórica de leituras compreendida entre julho de 2004, quando ocorreu o enchimento inicial do reservatório e o início da operação da usina, até dezembro de 2022, quando foi concluído o processo de reenchimento do reservatório após as intervenções de dragagem e manutenção estrutural.

Esse intervalo de tempo foi dividido em quatro fases distintas, conforme os marcos operacionais e os eventos que impactaram o comportamento estrutural da barragem (Carvalho *et al.*, 2023):

Fase I – Estabilização Inicial (agosto de 2004 a agosto de 2005)

Corresponde ao primeiro ano após o enchimento do reservatório. Nesta fase, observou-se o processo de equilíbrio hidromecânico entre as estruturas civis da usina e o carregamento gerado pela lâmina d'água. As leituras instrumentais são fundamentais para detectar eventuais ajustes estruturais esperados após o início da operação.

Fase II – Operação Comercial Estável (agosto de 2005 a novembro de 2015)

Período de operação regular da usina, no qual as estruturas estiveram submetidas às solicitações associadas às variações hidrológicas, fluviométricas e à rotina operacional do empreendimento. As leituras dos instrumentos nesta fase serviram como base de referência para o comportamento considerado estável da estrutura.

Fase III – Evento: Onda de Cheia dos Rejeitos (em novembro de 2015)

Esta fase contempla o impacto imediato do rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015. Cerca de 14 horas após o evento, a onda de rejeitos atingiu o reservatório da UHE Risoleta Neves, alterando abruptamente as condições de carregamento da estrutura. As solicitações excepcionais dessa fase exigiram ações emergenciais e

intensificação da frequência de monitoramento. Essa fase, por ser de curto tempo comparado às outras fases, não foi aprofundada neste trabalho.

Fase IV – Período de Assoreamento e Operação Reduzida (dezembro de 2015 a dezembro de 2022)

Caracteriza-se pelo assoreamento significativo do reservatório, manutenção das comportas da tomada de água fechadas e das comportas do vertedouro abertas, a fim de manter o nível do reservatório deplecionado. Durante este período, foram executadas ações de dragagem dos sedimentos, em preparação para o reenchimento e retorno à operação comercial. Esta fase exigiu acompanhamento contínuo e reforçado da instrumentação, devido ao novo estado de carregamento imposto pela presença dos rejeitos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Caracterização e análise das alterações implementadas no plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves após o rompimento da Barragem de Fundão.

A complementação do plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves após o rompimento da Barragem de Fundão representa um elemento fundamental para a redução de incertezas técnicas associadas à estabilidade da estrutura. A partir de 2015, a barragem passou a operar sob um regime de carregamento excepcional e não previsto em projeto, decorrente do acúmulo de sedimentos e da alteração significativa das condições hidráulicas e geotécnicas do reservatório. Esse novo contexto introduziu dúvidas relevantes quanto ao comportamento estrutural da barragem, exigindo um aumento na densidade, na diversidade e na precisão dos instrumentos de monitoramento, as leituras passaram a ser realizadas com frequência diária, acompanhadas por análises semanais e avaliações mensais do comportamento da estrutura, visando subsidiar também o projeto de reforços. A Tabela 1 apresenta a tipologia dos instrumentos utilizados na auscultação da UHE Risoleta Neves antes e após o acidente:

Tabela 1 - Auscultação instalada em Risoleta Neves durante sua construção e após o rompimento da Barragem de Fundão em novembro de 2015

Instrumento	nº instalado durante a construção	nº total instalado após o acidente
Marco Topográfico	15	23
Extensômetro de hastes	15	21
Medidor Triortogonal de Junta	12	16
Piezômetro	24	40
Medidor de Vazão	6	11
Medidor de Nível d'água	9	9
Drenos de Alívio	-	4

Fonte: Adaptado de: PAE Risoleta Neves (2024); adaptado de Carvalho *et al.* (2023).

A ampliação do número de piezômetros, extensômetros, marcos topográficos, medidores de vazão e medidores de junta permitiu um acompanhamento mais detalhado dos principais parâmetros associados à estabilidade global, incluindo pressões intersticiais, deformações estruturais, deslocamentos relativos entre blocos e vazões de drenagem. Ao aumentar a capilaridade do sistema de auscultação, tornou-se possível monitorar regiões críticas da fundação e da estrutura com maior resolução espacial, reduzindo lacunas de informação e fortalecendo a confiabilidade das interpretações técnicas.

Em um cenário marcado por solicitações inéditas e por elevados níveis de incerteza, a instrumentação complementada passou a desempenhar papel estratégico na validação das análises de estabilidade e das intervenções estruturais executadas. A obtenção de séries históricas mais completas e representativas permite comparar tendências, identificar anomalias precocemente e diferenciar variações naturais de possíveis indícios de comportamento adverso. Dessa forma, o monitoramento deixa de ser apenas uma ferramenta de observação passiva e passa a atuar como um mecanismo ativo de suporte à tomada de decisão e à gestão de risco.

Além disso, a redundância instrumental introduzida com a complementação do sistema contribui para aumentar a robustez do monitoramento, permitindo a verificação cruzada de dados e reduzindo a dependência de instrumentos isolados. Essa redundância é especialmente relevante em estruturas críticas, nas quais falhas de medição ou lacunas de dados podem comprometer a interpretação do comportamento estrutural.

Portanto, a complementação da instrumentação na UHE Risoleta Neves foi essencial para cercar incertezas e mitigar dúvidas relacionadas à estabilidade da barragem em um contexto pós-desastre. Ao ampliar a capacidade de observação e interpretação do comportamento estrutural e hidráulico, o sistema de auscultação passou a oferecer maior segurança técnica, maior confiabilidade nas avaliações de risco e melhores condições para o gerenciamento seguro da barragem em longo prazo.

A excepcionalidade da situação trouxe um grande desafio técnico: não havia nos critérios de projeto brasileiros uma diretriz para dimensionar uma barragem hidráulica para o empuxo de um líquido de maior densidade, como o rejeito. As análises de estabilidade realizadas em 2016 pela projetista Geoprojetos indicaram que, embora estável, a barragem apresentava coeficientes de segurança próximos ao limite.

Em 2020, uma determinação da ANEEL exigiu uma nova Inspeção de Segurança Especial, dividida em duas etapas (RISE 1 e RISE 2), para avaliar a segurança tanto na condição assoreada quanto para o retorno operacional. O relatório RISE 1 concluiu que, embora segura na condição rebaixada, os blocos na margem esquerda não atendiam aos critérios para o reenchimento. Uma recomendação crucial deste relatório foi a complementação da instrumentação, dada a característica inusitada do ocorrido, com a instalação de 16 piezômetros, 6 extensômetros de haste e 4 medidores triortogonais de juntas.

A solução para viabilizar o retorno da operação foi a proposta de escavação de uma "fossa" na região de 400 metros a montante do barramento, utilizando um equipamento mais

eficiente chamado *clamshell*. Após a remoção, o reenchimento do reservatório finalmente começou em dezembro de 2022 (Marcelino *et al.*, 2023).

A ampliação do sistema de instrumentação pode ser interpretada como uma decisão prudente, necessária e alinhada às melhores práticas da engenharia moderna. Na avaliação profissional, em cenários de incerteza elevada e carregamentos não previstos em projeto, a instrumentação deixa de ser apenas um complemento e passa a representar a principal base para a tomada de decisão responsável. A experiência da UHE Risoleta Neves reforça que investir em monitoramento qualificado não apenas aumenta a segurança estrutural, mas também fortalece a credibilidade técnica das soluções adotadas e a proteção das populações e dos ambientes a jusante.

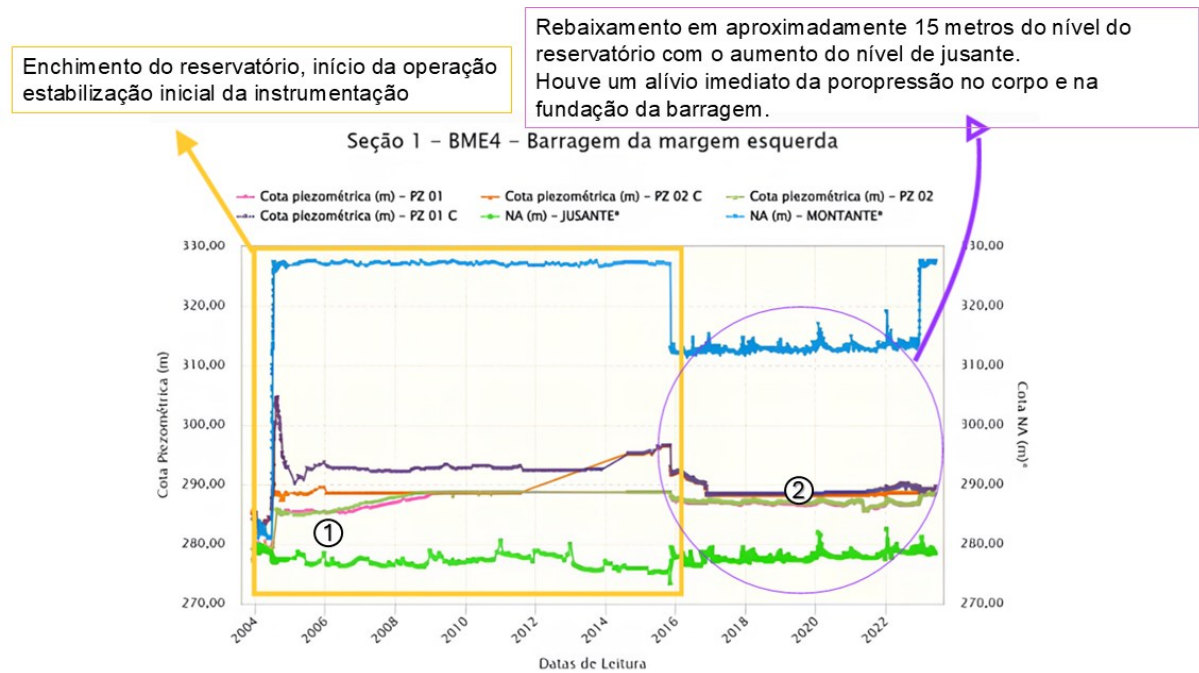
6.2. Análise técnica das poropressões monitoradas por meio da piezometria nas etapas de enchimento e operação comercial antes e após a ruptura da Barragem de Fundão

Os gráficos de séries históricas apresentados foram extraídos do artigo do Carvalho *et al.* (2023) e adaptados de forma a ajudar na identificação de alterações temporais. Apresenta-se um gráfico da piezometria e outro da extensometria como forma de exemplificar o comportamento desses instrumentos em todas as seções instrumentadas. Para facilitar a interpretação e finalizar a análise textual, o apêndice sintetiza os principais eventos e os comportamentos de instrumentação observados nas quatro fases operacionais.

Fase I –Enchimento do Reservatório (agosto de 2004 a agosto de 2005):

O primeiro ano de vida de uma barragem de concreto, marcado pelo enchimento inaugural do reservatório, é um período crítico em que a estrutura e sua fundação rochosa se ajustam a um novo estado de tensões e deformações. Na UHE Risoleta Neves, a instrumentação capturou com precisão essa resposta inicial ao carregamento, como mostra a Figura 19 abaixo.

Figura 19: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Piezômetro.



- 1- Tendência geral de aumento da carga para estabilização neste bloco.
2- Estado de estabilização durante o rebaixamento.

Fonte: Autora (2026), adaptado de Carvalho *et al.* (2023).

A análise piezométrica durante a Fase I forneceu um diagnóstico fundamental sobre o comportamento hidromecânico da fundação e da interface concreto-rocha. Todos os piezômetros registraram valores de subpressão abaixo dos limites de controle estabelecidos em projeto, um indicativo claro da integridade da fundação e da eficácia do sistema de drenagem. A drenagem em uma barragem tem a função primordial de aliviar a pressão da água que percola pela fundação, reduzindo as forças de subpressão que atuam na base da estrutura e que poderiam comprometer sua estabilidade ao deslizamento.

A interpretação dos dados dos piezômetros instalados em diferentes posições relativas à linha de drenos confirmou essa funcionalidade. Por exemplo, os piezômetros no contato concreto-rocha, localizados a montante dos drenos, registraram níveis piezométricos mais elevados do que aqueles na fundação, a jusante dos drenos. Esta queda de potencial hidráulico através da cortina de drenagem é a prova inequívoca de seu bom funcionamento. Mesmo em blocos como o VT2, onde os piezômetros de contato registraram níveis ligeiramente inferiores aos da fundação, a comparação entre os instrumentos a montante e a jusante da linha de drenagem mostrou uma diminuição do nível piezométrico. Esta observação, foi essencial para atestar que o sistema de drenagem estava operando conforme o projetado, dissipando as subpressões e garantindo a estabilidade da barragem desde o início de sua vida útil.

Fase II – Operação Comercial (agosto de 2005 a novembro de 2015):

Nos blocos centrais, os piezômetros mostraram uma leve tendência de alívio de carga ao longo do tempo, enquanto nos blocos das margens foi registrada uma tendência geral de aumento de carga (1). Este comportamento pode estar associado a uma lenta saturação do maciço rochoso das ombreiras ou a outras características geológicas locais, mas sempre dentro dos limites de segurança. A análise contínua da eficiência da drenagem, comparando os piezômetros a montante e a jusante, seguiu confirmando o bom desempenho do sistema. Em suma, a década de operação comercial demonstrou, através de dados instrumentais, um comportamento estrutural e hidráulico estável e seguro, alinhado com as melhores práticas da engenharia.

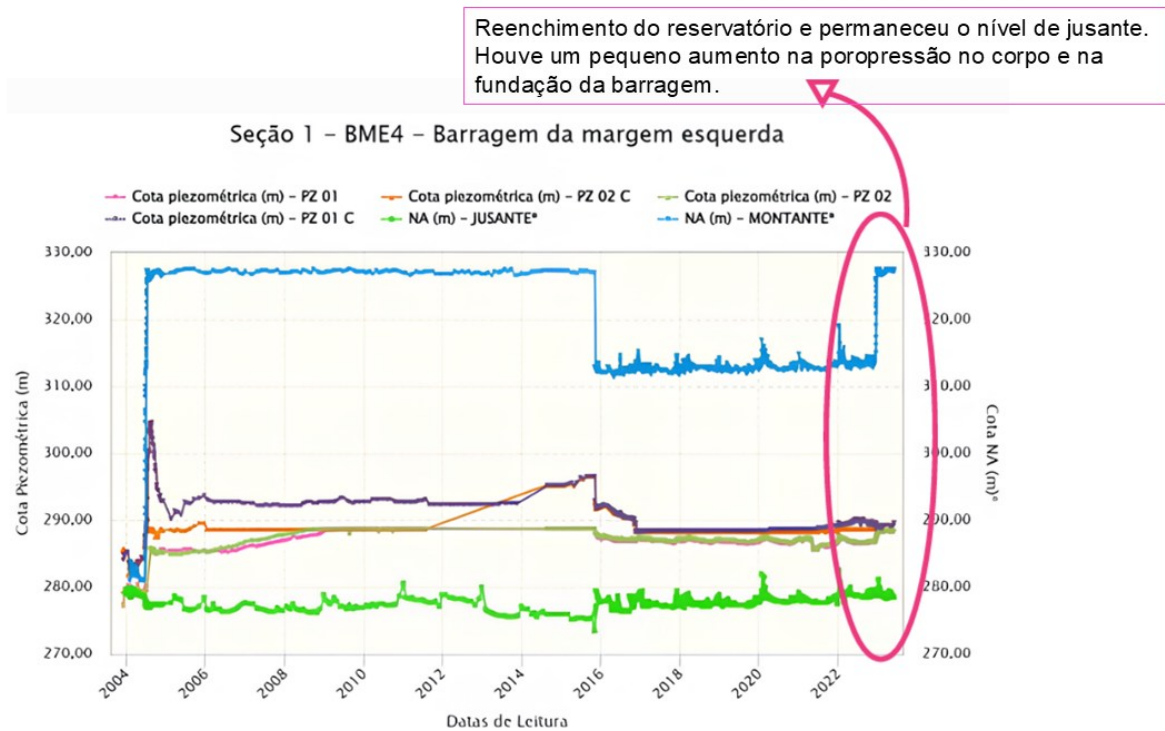
Fase IV – Operação em Novo Cenário (dezembro de 2015 a dezembro de 2022):

O período que se seguiu ao impacto inicial foi o mais longo e desafiador, caracterizado por um estado de carregamento completamente novo: a presença de uma espessa camada de sedimento e rejeito depositada contra a face de montante da barragem. Com o reservatório mantido em baixo nível (deplecionado), a barragem passou a ser submetida a um empuxo de sedimento. A análise dos dados de instrumentação nesta fase foi vital para monitorar a segurança da estrutura sob esta nova condição e subsidiar o projeto de reforços.

Durante todo este longo período, como mostra a Figura 19, o comportamento da estrutura, monitorada pela instrumentação, voltou a um novo estado de estabilização (2). Os piezômetros continuaram a demonstrar boa correlação com as variações dos níveis de água e, mesmo durante a maior cheia do período em 2020, todos os valores medidos permaneceram abaixo dos níveis de Atenção e Alerta. O conjunto geral permaneceu funcional, provando ser uma ferramenta indispensável para a gestão segura de um cenário complexo e sem precedentes.

Como mostra a Figura 20 a seguir, o evento mais crítico desta fase ocorreu em dezembro de 2022, com o início do reenchimento do reservatório. Como observado nos registros da Seção 1 – BME4, houve uma elevação imediata e correspondente das cotas piezométricas em resposta ao aumento do Nível d'Água (NA) de montante. Este comportamento é tecnicamente justificado pela transmissão da carga hidrostática através do maciço e da fundação, elevando a poropressão no ponto de medição.

Figura 20: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Piezômetro.



Fonte: Autora (2026), adaptado de Carvalho et al. (2023).

6.3. Análise técnica das deformações monitoradas por meio da extensometria nas etapas de enchimento e operação comercial antes e após a ruptura da Barragem de Fundão

Fase I – Enchimento do Reservatório (agosto de 2004 a agosto de 2005):

Como observado na Figura 21, os dados dos extensômetros sugerem que a estrutura apresenta movimentação ao longo do tempo. Os extensômetros mais próximos da face da barragem em contato com a água, registraram deslocamentos no sentido da distensão (tração). Este fenômeno é uma consequência direta da flexão da estrutura: a pressão da água empurra o corpo da barragem para jusante, provocando um leve "esticamento" da face de montante, enquanto a face de jusante é comprimida. De forma análoga e consistente, os extensômetros localizados na galeria de jusante do vertedouro e na porção mais a jusante da tomada d'água registraram deslocamentos no sentido da contração (compressão), confirmando o modelo de flexão da estrutura como um todo.

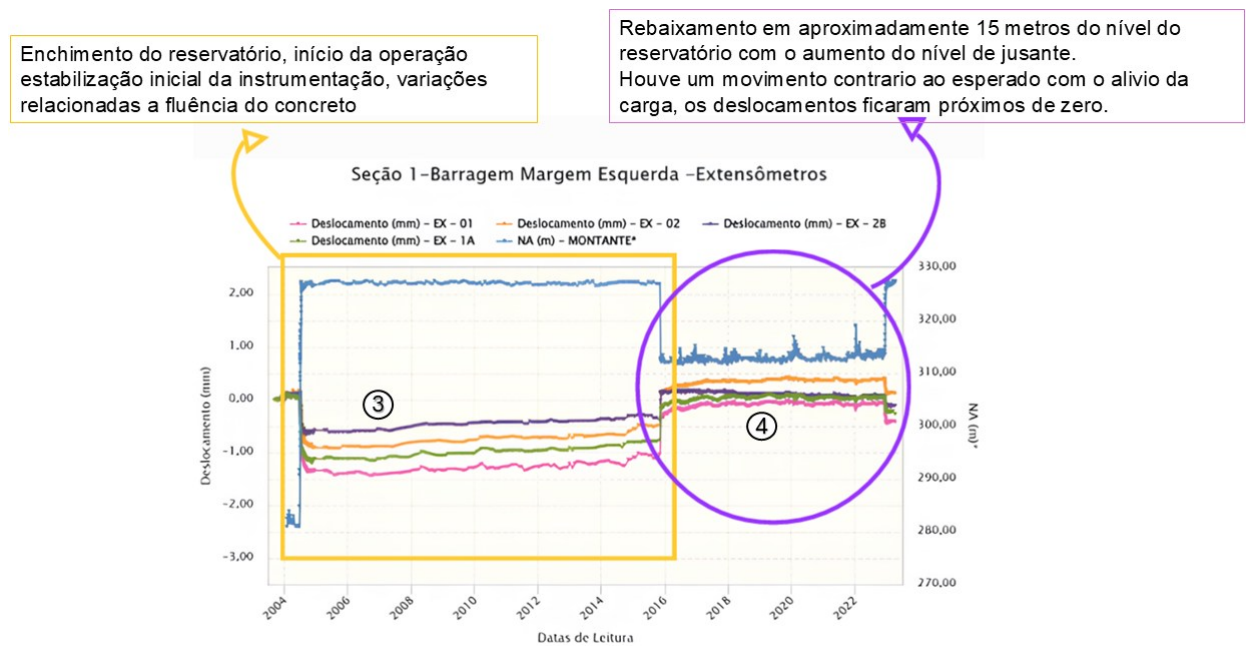
Um ponto de particular interesse destacado no estudo é a observação de que os maiores deslocamentos ocorreram nos blocos das ombreiras, especificamente o BMD2 na margem direita e o BME4 na margem esquerda. Os blocos centrais, que abrigam a tomada d'água e o

vertedouro, são estruturas mais maciças e, portanto, mais rígidas e com maior inércia. Os blocos das margens, por sua vez, possuem menor volume de concreto e estão encaixados no maciço rochoso das encostas, tendo uma resposta ligeiramente mais "flexível" ao carregamento. Essa observação é crucial, pois demonstra a capacidade da instrumentação de capturar o comportamento diferencial ao longo do eixo da barragem.

Fase II – Operação Comercial (agosto de 2005 a novembro de 2015):

Após o período de ajuste inicial, a barragem entrou em sua fase de operação comercial estável, que se estendeu por mais de uma década. Durante este tempo, a estrutura esteve submetida às variações cíclicas de carregamento associadas à operação do reservatório e aos ciclos sazonais de chuva e estiagem como mostra a Figura 21.

Figura 21: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Extensômetro.



3 - Lenta contração devido a retração e fluência do concreto.

4 - Período de inversão, começou a apresentar leve tração invés de contração como no ponto 3.

Fonte: Autora (2026), adaptado de Carvalho *et al.* (2023).

A tendência geral observada nos extensômetros durante esta fase foi de uma lenta e contínua contração (compressão) (3). Este comportamento é atribuído a fenômenos reológicos do concreto, como a retração por secagem e a fluência, que são deformações que ocorrem ao longo do tempo sob carga constante. As taxas de variação foram extremamente baixas, na ordem de centésimos de milímetro, indicando que a estrutura havia atingido alto grau de estabilização e que os processos de deformação lenta estavam ocorrendo de maneira controlada e previsível.

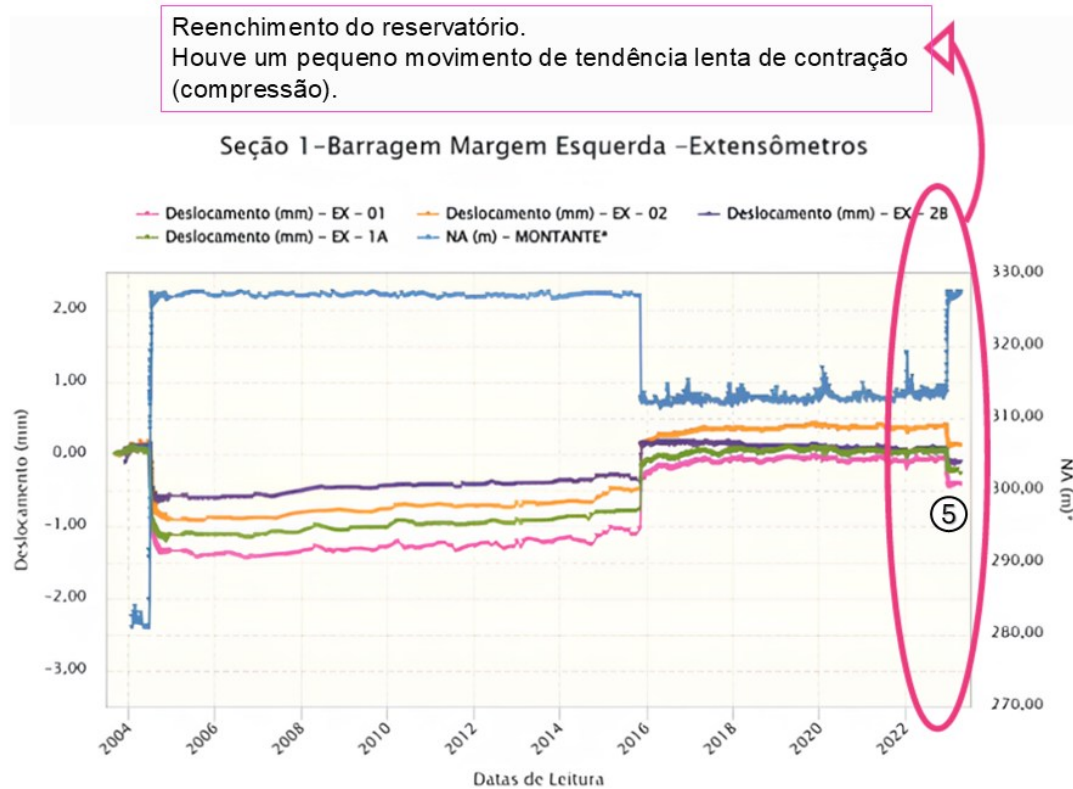
A "inversão da tendência cinemática", onde os extensômetros de montante, que antes registravam tração, passaram a registrar compressão, e os de jusante, o oposto, é um comportamento tecnicamente coerente (4). Este fenômeno demonstra a resposta elástica da estrutura à remoção abrupta do carregamento hidrostático, causada pelo rebaixamento de emergência de 15 metros do reservatório. Em um momento de crise operacional, com comportas travando devido a detritos, a estrutura foi submetida a um "solavanco" de tensões, e os extensômetros capturaram essa resposta. A magnitude das variações, de ordem milimétrica a centimétrica, muito superior às taxas lentas da Fase II, comprova a severidade do evento.

Paralelamente, a sensível redução no nível de carga piezométrica, registrada de forma generalizada, atestou que os piezômetros e o sistema de drenagem da fundação não estavam obstruídos e responderam imediatamente à variação da carga hidráulica. A discussão crítica aqui é que, em um momento de incerteza, os dados da instrumentação forneceram à equipe de engenharia a única evidência objetiva de que a barragem, apesar de submetida a um evento severo, estava se comportando de maneira elástica e previsível, sem indicar danos estruturais profundos ou o início de uma falha. A instrumentação, portanto, cumpriu seu papel principal: forneceu dados confiáveis em meio a um ambiente nebuloso.

Fase IV – Operação em Novo Cenário (dezembro de 2015 a dezembro de 2022):

As leituras dos extensômetros desempenharam papel fundamental no acompanhamento do comportamento deformacional da barragem após as intervenções estruturais realizadas no período pós-rompimento. A análise das séries históricas, conforme Figura 22, evidenciou que, após a fase de solicitações excepcionais associadas ao impacto da onda de rejeitos, os deslocamentos registrados pelos extensômetros apresentaram um retorno progressivo ao regime de contração (compressão), comportamento compatível com a retomada de um estado estrutural mais estável.

Figura 22: Barragem da margem esquerda no Bloco BME4 - Extensômetro.



5 - Período de contração devido o reenchimento do reservatório.

Fonte: Autora (2026), adaptado de Carvalho *et al.* (2023).

Esse retorno às deformações de contração (5) indica que os reforços estruturais executados contribuíram para o reestabelecimento do equilíbrio tensional da estrutura, promovendo maior rigidez, aumento de massa e melhoria da resistência aos mecanismos de deslizamento e tombamento.

Além disso, a instrumentação possibilitou identificar que os maiores deslocamentos permaneceram concentrados em blocos específicos, particularmente nas regiões das margens, coerente com as condições geométricas, geotécnicas e de carregamento local.

Os resultados obtidos ao longo das quatro fases analisadas demonstram que a instrumentação foi capaz de registrar, de maneira contínua e confiável, as respostas estruturais e hidráulicas da barragem frente às mudanças no estado de carregamento, às intervenções de engenharia e às condições operacionais impostas após 2015. Em especial, na Fase IV, a ampliação e o refinamento do sistema de instrumentação possibilitaram o acompanhamento detalhado do comportamento da barragem sob o novo regime de esforços, fornecendo subsídios técnicos essenciais para a tomada de decisão quanto à manutenção da segurança estrutural e ao reenchimento controlado do reservatório.

6.4. Análise crítica do plano de instrumentação

A situação imposta à UHE Risoleta Neves representou um desafio técnico sem precedentes para a engenharia brasileira, dada a ausência de diretrizes normativas para o dimensionamento de barragens sujeitas ao empuxo de fluidos de alta densidade, como o rejeito de mineração. Análises de estabilidade realizadas pela Geoprojetos em 2016 indicaram que, embora a estrutura permanecesse estável, os coeficientes de segurança encontravam-se próximos aos limites técnicos aceitáveis.

Diante desse cenário, uma determinação da ANEEL em 2020 exigiu a realização de uma Inspeção de Segurança Especial, dividida nas etapas RISE 1 e RISE 2, para avaliar a segurança tanto na condição assoreada quanto para o eventual retorno operacional. O relatório RISE 1 concluiu que, apesar de segura na condição rebaixada, os blocos da margem esquerda não atendiam aos critérios necessários para o reenchimento. Como medida crucial, recomendou-se a complementação da auscultação com a instalação de 16 piezômetros, 6 extensômetros de haste e 4 medidores triortogonais de juntas, visando monitorar a resposta estrutural diante das características inusitadas do evento.

A análise da resposta da piezometria e da extensometria evidencia que esses instrumentos não apenas cumpriram seu papel de monitoramento, mas se consolidaram como ferramentas centrais para a avaliação da estabilidade da barragem em um cenário inédito.

Os resultados obtidos confirmam que a instrumentação foi um dos principais pilares para a gestão segura da UHE Risoleta Neves no período pós-rompimento. Em contextos marcados por incertezas elevadas, carregamentos excepcionais e ausência de precedentes normativos claros, o monitoramento contínuo e tecnicamente confiável torna-se a base para decisões responsáveis.

A experiência da UHE Risoleta Neves demonstra que investimentos em monitoramento não representam apenas um aprimoramento tecnológico, mas uma medida estratégica de responsabilidade técnica e institucional. A capacidade de gerar evidências quantitativas sobre o comportamento estrutural fortalece a credibilidade dos laudos de estabilidade, reduz a subjetividade das avaliações e amplia a margem de segurança na gestão de estruturas críticas, constituindo um referencial relevante para futuros empreendimentos e para o avanço das práticas de engenharia de barragens no Brasil.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Trabalho de Conclusão de Curso propôs-se a realizar uma análise crítica e aprofundada do plano de instrumentação da Usina Hidrelétrica Risoleta Neves, avaliando seu comportamento e eficácia antes e depois de ser submetida a um evento extremo e sem precedentes na engenharia nacional: o impacto da onda de rejeitos proveniente do rompimento da Barragem de Fundão, em novembro de 2015. Nesse cenário, a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves emergiu como um caso singular, por ter sido impactada de forma indireta pela onda de rejeitos e submetida a condições operacionais e estruturais não previstas em seu projeto original. A pesquisa buscou, portanto, contribuir para a compreensão do papel da instrumentação de auscultação na gestão de riscos e na manutenção da estabilidade de estruturas submetidas a cenários excepcionais.

Os resultados obtidos ao longo da análise demonstram que o sistema de instrumentação desempenhou papel fundamental na interpretação do comportamento estrutural da barragem em todas as fases operacionais estudadas. No que se refere à análise da piezometria, verificou-se que as poropressões monitoradas durante as etapas de enchimento, operação comercial e período pós-rompimento permaneceram, de modo geral, foram compatíveis com os níveis de controle estabelecidos, sem indicar anomalias que comprometessem a estabilidade global da estrutura. As respostas piezométricas registradas após o rebaixamento abrupto do reservatório evidenciaram sensibilidade adequada do sistema, validando sua capacidade de ressaltar variações hidráulicas rápidas associadas a eventos extremos.

De forma complementar, a avaliação da extensometria permitiu analisar o comportamento deformacional da barragem ao longo das diferentes fases. As deformações medidas permaneceram dentro de limites coerentes com as análises de estabilidade, e os dados evidenciaram a resposta elástica da estrutura às mudanças no estado de carregamento. Após a execução dos reforços estruturais, observou-se o retorno gradual das deformações de contração, indicando um processo de acomodação e compatibilização entre o corpo original da barragem e os volumes adicionais de concreto. Esse comportamento reforça a confiabilidade do sistema extensométrico como ferramenta para monitorar a interação estrutural e identificar possíveis indícios de instabilidade.

O mapeamento das mudanças implementadas no plano de instrumentação após o acidente com a Barragem de Fundão revelou uma ampliação significativa na quantidade, na distribuição espacial e na diversidade dos instrumentos instalados. A complementação com

novos piezômetros, extensômetros e medidores triortogonais de junta representou uma resposta técnica direcionada à nova realidade da barragem, marcada por um regime de carregamento inédito associado ao acúmulo de sedimentos. Essa expansão aumentou a capilaridade do sistema de auscultação, reduziu incertezas técnicas e fortaleceu a confiabilidade das interpretações relacionadas à estabilidade estrutural.

A avaliação da eficiência e do funcionamento da instrumentação instalada indicou que o sistema de monitoramento mostrou-se robusto, sensível e adequado para subsidiar a tomada de decisão em um contexto de risco elevado. A redundância instrumental, a intensificação da frequência de leituras e a integração dos dados a análises de estabilidade permitem que a instrumentação passe a atuar como um elemento ativo na gestão da segurança da barragem.

De forma integrada, os resultados demonstram que a instrumentação foi essencial para validar as intervenções estruturais realizadas após o desastre, incluindo os reforços executados em blocos do barramento e as soluções adotadas para viabilizar o reenchimento do reservatório em 2022 como a instalação de 16 piezômetros, 6 extensômetros de haste e 4 medidores triortogonais de juntas e a "fossa" na região de 400 metros a montante do barramento sugeridos no Relatório de Segurança Especial. A capacidade de gerar dados confiáveis e contínuos conferiu mensurabilidade, credibilidade e respaldo técnico às decisões de engenharia, consolidando o sistema de auscultação como um dos pilares centrais da estratégia de segurança adotada.

Dessa maneira, ao revisitar os objetivos específicos deste trabalho, mapear as mudanças no plano de instrumentação e analisar a resposta da piezometria e da extensometria ao longo das diferentes fases operacionais, conclui-se que todos foram plenamente atendidos, com evidências técnicas que reforçam a relevância da instrumentação para a prevenção, a antecipação de riscos e a manutenção da estabilidade de barragens submetidas a condições excepcionais.

Assim, este estudo alcança seu objetivo geral de realizar uma análise crítica do plano de instrumentação da UHE Risoleta Neves antes e após o rompimento da Barragem de Fundão, demonstrando que a instrumentação de auscultação não apenas cumpriu sua função de monitoramento, mas se consolidou como uma ferramenta estratégica para a segurança estrutural, a gestão de riscos e o aprimoramento das práticas de engenharia de barragens no Brasil.

A contribuição deste trabalho, portanto, transcende a análise de um caso isolado. O estudo da UHE Risoleta Neves materializa, com dados reais, a importância da instrumentação de auscultação não apenas como uma ferramenta de verificação em tempos de normalidade, mas como um sistema de defesa ativo e indispensável durante eventos extremos. A gestão bem-sucedida dessa crise de longa duração, que culminou com o reenchimento seguro do reservatório em dezembro de 2022, só foi possível devido à existência, à correta interpretação e à expansão de um sistema de monitoramento confiável. O caso Risoleta Neves, conforme explorado neste TCC, fomenta debates essenciais sobre a necessidade de os critérios de projeto de usinas hidrelétricas incorporarem a possibilidade de ocorrências de eventos em cascata, constituindo uma fonte de aprendizado técnico para todo o setor. Neste trabalho, a análise só não foi mais aprofundada devido à falta de acesso a dados mais recentes da instrumentação e dos instrumentos instalados após o evento ocorrido.

Por isso, como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a realização de estudos específicos voltados à avaliação de longo prazo do desempenho da instrumentação instalada após os reforços estruturais executados na barragem da UHE Risoleta Neves. Investigações futuras podem concentrar-se na análise das séries históricas de dados geradas pelos novos piezômetros, extensômetros, medidores de junta e demais dispositivos, com o objetivo de verificar a estabilidade dos padrões de resposta estrutural e hidráulica ao longo do tempo, especialmente sob variações sazonais, eventos hidrológicos extremos e ciclos operacionais completos do reservatório.

Adicionalmente, recomenda-se o desenvolvimento de estudos comparativos entre o comportamento registrado antes e depois das intervenções estruturais, de modo a quantificar com maior precisão os efeitos dos reforços sobre a redistribuição de tensões, as deformações internas e as condições de subpressão na fundação. A aplicação de métodos estatísticos avançados, técnicas de modelagem numérica e ferramentas de análise preditiva também pode contribuir para a identificação precoce de tendências atípicas e para o aprimoramento dos critérios de alerta e de tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional De Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Relatório de segurança de barragens 2022** / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. -- Brasília: ANA, 2023.

BOTELHO, M. R. *et al.* **Rompimento das barragens de Fundão e da Mina do Córrego do Feijão em Minas Gerais, Brasil: decisões organizacionais não tomadas e lições não aprendidas.** Revista Brasileira de Saúde Ocupacional, v. 46, 2021. Acesso em: 05 mai. 2025

BRASIL, **L12334**, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em 11 mai. 2025.

BRASIL, **L14066**, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em 11 mai. 2025.

CARVALHO, Cleber *et al.* Comitê Brasileiro De Barragens, **Avaliação da instrumentação do barramento da UHE Candonga -influência do rompimento da Barragem Fundão.** Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/376643799_comite_brasileiro_de_barragens_xxxiv_seminario_nacional_de_grandes_barragens_tema_127_foz_do_iguacu_-pr_28_e_29_de_agosto_de_2023_avaliacao_da_instrumentacao_do_barramento_da_uhe_candonga_-_influencia. Acesso em: 11 de mai. 2025.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.** São Paulo: Oficina de Textos. Acesso em: 05 de maio de 2025. 2004.

El País Brasil, **Um ano do desastre de Mariana: o que foi e o que não foi feito para reparar os danos.** São Paulo, 05 nov. 2016. Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2016/11/04/politica/1478263172_422055.html. Acesso em: 27 fev. 2026.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

G1, **RIO DOCE ainda é 'paciente crônico' dez anos depois do desastre de Mariana.**, Espírito Santo, 05 nov. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/norte-noroeste-es/noticia/2025/11/05/rio-doce-ainda-e-paciente-cronico-dez-anos-depois-do-desastre-de-mariana.ghtml>. Acesso em: 27 fev. 2026.

GAZETA DO RIO PARDO. **Janeiro marca os 46 anos da grande enchente.** São José do Rio Pardo, 20 jan. 2023. Disponível em: <https://gazetadoriopardo.com.br/cidade/janeiro-marca-os-46-anos-da-grande-enchente/>. Acesso em: 27 fev. 2026.

GEOKON. **Model GK-604D: digital inclinometer system instruction manual.** Lebanon, NH, [2025]. 1 manual em PDF. Disponível em: https://www.geokon.com/content/manuals/GK-604D_Digital_Inclinometer_System.pdf. Acesso em: 29 jan. 2026.

GUIDICINI, Guido. *et al.* **Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil.** Disponível em: <https://www.abge.org.br/downloads/livro_acidentes_incidentes_barragens.pdf?form=MG0AV3>. Acesso em: 1 mar. 2025.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de Avaliação de Danos – Rompimento da Barragem de Fundão.** Brasília, 2016.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Encarte Rio Doce: 7 anos de monitoramento da qualidade da água após o rompimento da barragem de Fundão.** Belo Horizonte: IGAM, 2022. Disponível em: http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/bitstream/123456789/4388/1/Encarte_Rio_Doce_7anos_FINAL.pdf. Acesso em: 27 de fev. 2026.

MANSUR, Rafaela. **Quatro anos da tragédia em Brumadinho: 270 mortes, três desaparecidos e nenhuma punição.** Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2023/01/25/quatro-anos-da-tragedia-em-brumadinho-270-mortes-tres-desaparecidos-e-nenhuma-punicao.ghtml>. Acesso em: 20 de jun. 2025.

MARCELINO, Ana Paula Borges *et al.* **Ações para restabelecer a estabilidade do barramento da uhe candonga após o rompimento de fundão.** Disponível em: <https://cbdb-web-uploads.s3.amazonaws.com/system/uploads/ckeditor/attachments/1311/006_-_a%c3%87%c3%95es_para_restabelecer_a_estabilidade__rev.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2025.

NETO, Marco Aurélio Silva *et al.* **Técnicas de mineração visual de dados aplicadas aos dados de instrumentação da barragem de Itaipu.** Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Ilustracao-de-um-extensometro-multiplo-de-haste-MATOS-2002-instrumento_fig1_262508598. Acesso em 29 de jan. 2026.

OLIVEIRA, Rafael Marques de; MIRANDA, Marllon de Oliveira. **Qualidade da água do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana-MG).** Revista Multidisciplinar, Janaúba, v. 1, n. 2, p. 11-18, jun. 2020. Disponível em: <https://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2020/06/Rafael.pdf>. Acesso em: 27 de fev. 2026.

OPOVO. **Desastre natural: quais as maiores tragédias ambientais do Brasil.** Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/noticias/brasil/2024/05/08/desastre-natural-quais-as-maiores-tragedias-ambientais-do-brasil.html>>.

PAE – Plano de Ação de Emergência - Usina Hidrelétrica Risoleta Neves. Disponível em: <<https://candonga.com.br/pae/>>. Acesso em: 7 jun. 2025.

Projeto Candonga. Disponível em: <<https://www.samarco.com/projeto-candonga/>>.

SILVA, Armando Miguel Vieira da. **Observação e instrumentação de obras geotécnicas: acompanhamento de um caso prático na região do Porto.** Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/541042144.pdf>>. Acesso em: 2 jul. 2025.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. Oficina de Textos, 2006. Acesso em 4 de jun. 2025.

SOLOTEST, **Medidor Trigonal de Grietas S/Reoj**. Disponível em: <https://solotest.com.br/novo/produtos/medidor-triortogonal-de-trincas-s--relog-/4.515.001>. Acesso em 29 de jan. 2026

VICTOR, Dayana. **Tragédia da barragem do Fundão em Mariana completa 5 anos**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-11/tragedia-da-barragem-do-fundao-em-mariana-completa-5-anos>. Acesso em: 20 de jun. 2025.

GLOSSÁRIO

CONCEITOS TÉCNICOS SOBRE BARRAGENS HIDRELÉTRICAS

Anomalia: Valor fora do padrão esperado, que pode indicar falha ou mudança no comportamento da estrutura.

Assoreamento: Processo de deposição e acúmulo de sedimentos ou rejeitos no leito do reservatório

Barragem: Estrutura construída para represar cursos d'água ou armazenar substâncias, como água ou rejeitos.

Boletim de instrumentação: Relatório técnico periódico com dados de leitura, gráficos e análise da instrumentação.

Categoria de risco (CRI): Índice que avalia a probabilidade de falha de uma barragem com base em critérios técnicos.

Dano potencial associado (DPA): Classificação que avalia as consequências socioambientais e econômicas em caso de ruptura.

Deplecionamento: Rebaixamento do nível de água de um reservatório ou diminuição do volume de água armazenado em um reservatório.

Extensômetro de hastes: Instrumento utilizado para medir deslocamentos relativos, tanto verticais quanto horizontais, em profundidade no corpo da barragem ou na fundação.

Fluência do concreto: Fenômeno reológico que consiste na deformação lenta, contínua e progressiva do concreto quando submetido a uma carga constante ao longo do tempo.

Galgamento: Transposição de uma estrutura por uma massa de água, geralmente o mar ou um rio.

Inspeção de segurança regular/especial: Avaliações visuais e técnicas feitas periodicamente para verificar a integridade da barragem.

Instrumentação automatizada/manual: Forma de coleta de dados, pode ser contínua e digital, ou pontual por inspeção.

Lei nº 12.334/2010: Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

Marco topográfico: Ponto fixo usado para detectar deslocamentos superficiais da barragem.

Mecedor de vazão (ou dreno): Dispositivo que mede a quantidade de água que percola ou drena pela barragem.

Plano de Ação de Emergência (PAE): Documento que orienta procedimentos em situações de risco ou falha iminente.

Plano de Segurança da Barragem (PSB): Conjunto de documentos técnicos que orientam a operação segura da estrutura.

Piezômetro: Instrumento que mede a pressão da água nos poros do solo (cota piezométrica).

Rompimento de barragem: Falha total ou parcial da estrutura, com perda de contenção e liberação de material represado.

Segurança de barragens: Conjunto de ações e medidas para garantir a estabilidade estrutural e o funcionamento adequado da barragem.

Série histórica: Conjunto cronológico de dados obtidos ao longo do tempo por meio da instrumentação.

SNISB: Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.

Subpressão: Pressão hidrostática exercida pela água que percola pela fundação, atuando de baixo para cima na base da estrutura e podendo comprometer a estabilidade ao deslizamento.

Fase Operacional (Período)	Evento Principal	Comportamento da Estrutura (Extensômetros)	Comportamento Hidráulico (Piezômetros)
<p>Fase I - Enchimento do Reservatório (agosto de 2004 a agosto de 2005)</p>	<p>Enchimento do reservatório e ajuste da estrutura ao carregamento hidrostático.</p>	<p>Comportamento de flexão clássico: distensão (tração) a montante e contração (compressão) a jusante.</p>	<p>Níveis abaixo dos de controle, comprovando a eficácia inicial do sistema de drenagem.</p>
<p>Fase II - Operação Comercial (agosto de 2005 a novembro de 2015)</p>	<p>Operação normal e estável. Estabelecimento da linha de base do comportamento.</p>	<p>Lenta e contínua contração (compressão) com taxas mínimas, atribuídas à fluência do concreto.</p>	<p>Leituras estáveis e abaixo dos limites de controle, confirmando a eficiência contínua da drenagem.</p>
<p>Fase III – Impacto do Rompimento (novembro de 2015)</p>	<p>Chegada da onda de rejeitos e rebaixamento rápido e abrupto do reservatório.</p>	<p>Inversão da tendência cinemática: compressão a montante e distensão a jusante, com variações abruptas (mm a cm).</p>	<p>Resposta imediata com redução sensível e generalizada da carga piezométrica, devido ao alívio da carga d'água.</p>
<p>Fase IV – Operação em Novo Cenário (dezembro de 2015 a dezembro de 2022)</p>	<p>Novo estado de carregamento (empuxo de sedimento) com reservatório em nível baixo. Remoção de rejeitos e reforços estruturais.</p>	<p>Retorno a uma tendência lenta de contração (compressão), similar à Fase II, indicando nova estabilização.</p>	<p>Leituras correlacionadas com os baixos níveis de água e sempre abaixo dos níveis de alerta, mesmo em cheias.</p>