



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



NELSON LUIZ ZUCHERATTO JÚNIOR

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SEGURANÇA EM BARRAGENS
DE TERRA POR MEIO DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2021

NELSON LUIZ ZUCHERATTO JÚNIOR

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE SEGURANÇA EM BARRAGENS
DE TERRA POR MEIO DE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Diógenes Viegas Mendes Ferreira, Me.

Co-orientador: Prof. Agnaldo José da Rocha Reis, Dr.

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Dezembro/2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

Z94r Zucheratto Junior, Nelson Luiz.
Revisão bibliográfica sobre segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica. [manuscrito] / Nelson Luiz Zucheratto Junior. - 2021.
46 f.: il.: color., tab..

Orientador: Me. Diógenes Viegas Mendes Ferreira.
Coorientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Engenharia geotécnica - Instrumentação geotécnica. 2. Barragens e açudes - Mineração. 3. Barragens e açudes - Segurança - Monitoramento de barragens. I. Mendes Ferreira, Diógenes Viegas. II. da Rocha Reis, Agnaldo José. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Nelson Luiz Zucheratto Júnior

Revisão Bibliográfica sobre segurança em Barragens de Terra por meio de Instrumentação Geotécnica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 6 de janeiro de 2022

Membros da banca

Me. Diógenes Viegas Mendes Ferreira - Orientador
Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Coorientador
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima- Professor Convidado
Filipe Guarnieri Xavier - Engenheiro Convidado

Diógenes Viegas Mendes Ferreira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/01/2022



Documento assinado eletronicamente por **Diogenes Viegas Mendes Ferreira, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 06/01/2022, às 08:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0259652** e o código CRC **5D47F284**.

Dedico este trabalho à minha família, principalmente aos meus pais Nelson e Waldyra, ao meu irmão Otávio e à Deus, por tornar tudo possível.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço à Deus por sempre me acompanhar e me guiar por todo o caminho.

Ao meu pai, Nelson, por ser meu exemplo diário. À minha mãe, Waldyra, por todo amor incondicional. Ao meu irmão, Otávio, pela amizade acima de tudo. À toda minha família, avós, avôs, tios, tias, primos e primas.

À República Reino de Baco, família que escolhi, onde vivi os melhores anos e experiências da minha vida. Ao Gabriel (Vogal), irmão para toda vida. Ao Daniel (Corda), pela primeira oportunidade de estágio na Lux Energia e por todos os ensinamentos.

A todos os ex-alunos da Reino de Baco, pela confiança e ensinamentos. A todos os moradores da Reino de Baco que tive o prazer de conviver e aprender.

As áreas de Instrumentação e Automação da Samarco, por toda confiança e ensinamentos. A CSN Mineração por todos ensinamentos.

A tradição da vida republicana que todos deveriam ter a oportunidade de viver e aprender. A Escola de Minas e Universidade Federal de Ouro Preto, pelo ensino gratuito e de qualidade.

Aos meus amigos e irmãos de Ouro Preto, pela amizade e momentos vividos.

Ao meu orientador Diógenes Viegas Mendes Ferreira e Co-orientador Agnaldo José da Rocha Reis, por me proporcionarem todo suporte para realização deste projeto.

“O analfabeto do século XXI não será aquele que não consegue ler e escrever, mas aquele que não consegue aprender, desaprender e reaprender” (Alvin Toffler)

RESUMO

A instrumentação geotécnica, bem como o sistema de monitoramento, são componentes essenciais para a segurança e operação das barragens de mineração. O mau funcionamento dessas estruturas, pode causar ou contribuir para a perda de vidas e graves danos à propriedade e ao meio ambiente. A Instrumentação de Monitoramento de Barragens tornou-se necessária, por fornecer informações sobre o desempenho da barragem, ao mesmo tempo em que dá um aviso antecipado em caso de qualquer problema que possa surgir. O escopo da instrumentação não depende inteiramente da complexidade ou do tamanho do reservatório, mas também da possibilidade de perda de pessoas e de propriedade a jusante. Neste estudo, relatou-se a importância da segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica, e de como as falhas estruturais de barragens de terra podem causar danos irreparáveis. Para tanto, foram analisados os tipos de instrumentação para o efetivo monitoramento de barragens, bem como seu funcionamento, propriedades e segurança para o projeto. O objetivo geral desta pesquisa é apresentar um estudo teórico onde se avalia o papel da instrumentação geotécnica na estabilidade de barragens. Uma ampla pesquisa bibliográfica foi feita referente ao tema. Como resultado, foram apresentados diferentes tipos de instrumentação e várias questões relacionadas à instrumentação, monitoramento e vigilância no programa de segurança de barragens de terra.

Palavras-chaves: Instrumentação geotécnica. Barragem de mineração. Monitoramento de barragens.

ABSTRACT

The geotechnical instrumentation, as well as the monitoring system, are essential components for the safety and operation of mining dams. The malfunction of these structures can cause or contribute to loss of life and serious damage to property and the environment. Dam Monitoring Instrumentation has become necessary, as it provides information on the performance of the dam, while giving early warning in case of any problems that may arise. The scope of instrumentation does not entirely depend on the complexity or size of the reservoir, but also on the possibility of loss of people and property downstream. In this study, the importance of safety in earth dams through geotechnical instrumentation was reported, as the structural failures of earth dams can cause irreparable damage. Therefore, the types of instrumentation for the effective monitoring of dams were analyzed, as well as their functioning, properties and safety for the project. The general objective of this research is to present a theoretical study where the role of geotechnical instrumentation in the stability of dams is evaluated. An extensive bibliographic research was carried out regarding the topic. As a result, different types of instrumentation and various issues related to instrumentation, monitoring and surveillance were demonstrated in the earth dam safety program.

Key-words: Geotechnical instrumentation. Mining dam. Dam monitoring.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Barragens de rejeito.....	16
Figura 2 – Rompimento de barragem em Brumadinho.....	17
Figura 3 – Institucional de Regulação de Segurança de Barragens.....	18
Figura 4 – Gerenciamento de riscos.....	19
Figura 5 – Métodos construtivos de barragens de rejeito.....	22
Figura 6 – Piezômetro pneumático.....	25
Figura 7 – Esquema de piezômetro hidráulico.....	26
Figura 8 – Esquema de piezômetro elétrico.....	27
Figura 9 – Esquema de piezômetro standpipe.....	28
Figura 10 – Piezômetro Casagrande.....	29
Figura 11 – Piezômetro de corda vibrante.....	30
Figura 12 – Instalação de marcos superficiais.....	31
Figura 13 – Instalação de inclinômetros.....	32
Figura 14 – Esquema de medidas de nível de água.....	33
Figura 15 – Acidentes em barragens Mariana e Brumadinho.....	36
Figura 16 – Vários tipos de instrumentação usadas em barragens de mineração.....	37

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1: Rupturas de barragens no estado de Minas Gerais – Brasil.....	35
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
ANM	AGÊNCIA NACIONAL DE MINAS
CIGB	COMISSÃO INTERNACIONAL DE GRANDES BARRAGENS
CBDB	COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
IBEAS	INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTUDOS AMBIENTAIS
LNEC	LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL
PNSB	POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS
PFM	PLANO DE FECHAMENTO DE MINAS
PUC	PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
SNISB	SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS
UFOP	UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
UFU	UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Estado da arte.....	12
1.2	Objetivos gerais e específicos.....	13
1.3	Justificativa do trabalho.....	13
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Conceito e breve histórico de barragens no Brasil	15
2.1.1	Sobre a Lei de segurança de barragens.....	17
2.1.2	A importância do monitoramento de barragens	18
2.1.3	Tipos de barragens de rejeitos	21
2.1.3.1	Barragem de alteamento a jusante	21
2.1.3.2	Barragem por alteamento a montante.....	21
2.1.3.3	Barragem de linha de centro.....	21
2.2	Instrumentação de barragens de mineração.....	23
2.3	Tipos de instrumentação	23
2.3.1	Piezômetros	24
2.3.1.1	Piezômetros pneumáticos	24
2.3.1.2	Piezômetros hidráulicos.....	25
2.3.1.3	Piezômetros elétricos	26
2.3.1.3	Piezômetros Standpipe ou de tubo aberto.....	27
2.3.1.4	Piezômetros de Casagrande	28
2.3.1.5	Piezômetros de corda vibrante.....	29
2.3.2	Marcos superficiais.....	30
2.3.3	Inclinômetros	31
2.3.4	Medidores de níveis de água e vazão	32
2.4	Investigação, Monitoramento e Vigilância de barragens	33
2.4.1	Ajuste e resposta de alarmes.....	34
2.4.2	Plano de ação de emergência.....	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas e barragens se tornou um componente essencial para as empresas de mineração e outros setores, pois são vitais para a investigação do local, verificação e segurança do projeto e solidez a longo prazo. Para entender o comportamento estrutural pré-construção e durante a operação, o monitoramento de barragens possui um papel importante.

Dessa forma, ao projetar barragens, vários fatores e parâmetros são assumidos e o engenheiro deve saber como eles se comportam com a ajuda de vários instrumentos embutidos no corpo dessa barragem.

Esses instrumentos fornecem informações sobre o desempenho da barragem, ao mesmo tempo em que dá um aviso prévio em caso de qualquer problema que possa surgir. O escopo da instrumentação não depende inteiramente da complexidade ou do tamanho do reservatório, mas também do dano potencial da barragem.

Portanto, a detecção precoce de defeitos e anormalidades é uma etapa crítica para a avaliação da integridade das barragens, monitoramento da estrutura e gerenciamento de risco geral. Para simular o comportamento de uma barragem durante o tempo de construção, é necessário medir com precisão diversos parâmetros como deslocamentos, níveis d'água, poro-pressão, vazões, etc. Para isso, múltiplos equipamentos instrumentais são utilizados (TAYLOR, 1985).

Dessa forma, faz-se importante a segurança em barragens de terra através de instrumentação geotécnica, e de como as falhas estruturais podem causar danos irreparáveis. Para tanto, quando se trata de instrumentação de monitoramento de barragens, é importante observar que cada tipo de barragem tem seu próprio conjunto personalizado de requisitos de monitoramento, incluindo o tipo de instrumentação usado.

1.1 Estado da arte

Um total de 20 artigos em periódicos foram selecionados e que tratam especificamente sobre o tema abordado, considerando a importância da instituição divulgadora, bem como sua circulação.

Dos 20 artigos analisados, 6 foram escolhidos por abordar o tema proposto – segurança em barragens de terra e instrumentação geotécnica – e pelo ano de publicação - entre 2015 a 2021. Portanto, 6 artigos foram selecionados para esse presente estudo, que faz uma abordagem sobre o estudo de segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica, pelos

seguintes descritores: Segurança em barragens. Instrumentação geotécnica. Barragens de mineração.

A metodologia do trabalho é pesquisa bibliográfica, em que os artigos foram encontrados nos seguintes repositórios: Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso e Monografias UFOP, Revista Ciência e Engenharia UFU, PUC-Rio, IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, Revista Científica Núcleo do Conhecimento e Plataforma Scielo.

Os temas mais enfatizados nos periódicos foram: Automação da instrumentação geotécnica; Marcos superficiais; Segurança e Instrumentação de Barragens; Análise de dados; Barragens de rejeitos e terra; Barragens de mineração; Indicadores de níveis de água e Piezômetros e Programas por meio de instrumentação.

Os conteúdos incluídos no tema Segurança em Barragens de Terra por meio de Instrumentação Geotécnica, que serão analisados nessa pesquisa são: Conceito e breve histórico de barragens no Brasil; Lei de segurança de barragens; A importância do monitoramento de barragens; Tipos de barragens de rejeitos; Tipos de instrumentação; Técnicas e instrumentos de medição de deslocamento; Indicadores de inclinação; Dispositivos de medição de assentamento/levantamento; Piezômetros; Marcos superficiais; Medidores de níveis de água e vazão; Investigação, monitoramento e vigilância de barragens; Ajuste de alarmes e resposta e Plano de ação de emergência.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral desta pesquisa é apresentar um estudo teórico onde se avalia o papel da instrumentação geotécnica na estabilidade de barragens.

Como objetivos específicos:

- Demonstrar os diversos instrumentos utilizados no monitoramento de barragens;
- Identificar os problemas mais significativos que ocorrem na infraestrutura principal, associados à falta de procedimentos de manutenção adequados.

1.3 Justificativa do trabalho

A proteção, manutenção e operação adequada das barragens no Brasil não só levam a uma longa vida útil da estrutura, na esfera da engenharia geotécnica, mas também são importantes para os aspectos de saúde, segurança – frente aos acidentes ocorridos – e meio ambiente. Os problemas mais significativos que ocorrem na infraestrutura principal são aqueles

associados à falta de procedimentos de manutenção adequados. O alto custo e a longa duração da construção de barragens impõem a necessidade de um plano de instrumentação, desde a avaliação da integridade das barragens, até o gerenciamento do risco geral.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em um breve histórico sobre barragens no Brasil, a importância do monitoramento de barragens, tipos de rejeitos e barragens, e rejeitos e os tipos de instrumentação mais usados em barragens de mineração.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceito e breve histórico de barragens no Brasil

De acordo com o Artigo 2, Parágrafo I da Lei Federal Brasileira 12334/10¹, barragem define-se como sendo “qualquer estrutura em curso d'água permanente ou temporário com a finalidade de conter ou acumular substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, compreendendo a barragem e estruturas associadas ” (BRASIL, 2010).

Os principais tipos de barragens são aquelas construídas com concreto, chamadas barragens de gravidade, em arco ou contrafortes e barragens de aterro que são construídas a partir de terra ou uma combinação de terra e rochas (enrocamento). As barragens, desde o início da evolução humana, têm sido fundamentais para o desenvolvimento da humanidade. Segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), as barragens foram construídas por meio de procedimentos experimentais voltados para o armazenamento de água (CBDB, 2011).

De acordo com Kutzner (1997), as barragens mais antigas foram construídas desde o terceiro milênio (AC) a partir de solos e rochas, sendo posteriormente denominadas “barragens de terra e enrocamento”.

No livro, “A História das Barragens no Brasil - Séculos XIX, XX e XXI”, discute a história da implantação de barragens no Brasil e a Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), em funcionamento desde a década de 1920 e sua representação no Brasil. Destaca-se o surgimento do CBDB, fundado em 1961. O livro descreve a história das principais concessionárias de energia elétrica do final do século XIX até os dias atuais, a evolução da legislação ambiental e de segurança de barragens além dos avanços na implantação de barragens para contenção de resíduos de mineração (CBDB, 2011).

Para Costa (2012), as barragens convencionais são classificadas em: Barragens de Terra (homogêneas e zoneadas); Barragens de enrocamento (com núcleo impermeável e com face impermeável); Barragens de concreto (gravidade, gravidade aliviada, contraforte; concreto laminado ou compactado e arco) e Barragens Mistas (concreto e terra).

As primeiras barragens de rejeitos foram construídas há dois séculos e agora existem estudos em andamento tentando estimar quantas delas existem no mundo. A maioria das pessoas só ouve falar delas quando apresentam problemas e, mesmo assim, as manchetes entram e saem das notícias convencionais com bastante rapidez. Quem quiser saber mais sobre

¹ Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens que destina o acúmulo de água para qualquer tipo de uso e cria o Sist. Nac. de Inform. Sobre Seg. de barragens alterando o teor do art. 35 da lei 9.433/97 e do art. 4º. Da lei 9.984/00.

mineração deve conhecê-las, pois são parte integrante da indústria. Conforme Adorno (2019), O Brasil possui 204 barragens de rejeitos de minério com alto potencial de danos. A título de exemplo, na Fig. 1 vê-se uma barragem de rejeito.



Figura 1: Barragem de rejeito
Fonte: Geoscan (2020)

Um dos desastres de resíduos de mineração mais mortais foi registrado em 25 de janeiro de 2019, em Brumadinho, no estado de Minas Gerais – Brasil (Figura 2), matando 270 pessoas pela onda massiva de lama, das quais 9 ainda estão desaparecidas. Propriedade da mineradora brasileira Vale (SANTOS, 2019).



Figura 2: Rompimento de barragem em Brumadinho
Fonte: UOL (2019)

2.1.1 Sobre a Lei de segurança de barragens

A Lei Brasileira de Segurança de Barragens, Lei Federal nº 12.334 / 2010², é um marco em Segurança de barragens no Brasil. Ela estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, define quais barragens devem ser regulamentadas, atribui responsabilidade legal ao proprietário da barragem após os requisitos de segurança, cria o Sistema Nacional de Informação de Segurança de Barragens (SNISB) e atribui autoridade regulatória a instituições específicas, conforme demonstrado na Figura 3 (BRASIL, 2010).

A Lei de Segurança de Barragens atribuiu à Agência Nacional de Águas (ANA) a responsabilidade pela implementação e manutenção do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), além de muitos outros deveres importantes. De forma a cumprir os requisitos da legislação, a ANA apoiou um programa de assistência técnica estabelecido com o Banco Mundial, e está implementando da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) incluindo o desenho do SNISB, contando com a expertise do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), de Portugal (BRASIL, 2012).

² Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433/97, e art. 4º da Lei nº 9.984/00.

O programa conta com os seguintes módulos principais: Inventário de Barragens e Entidades, Classificação, Plano de Segurança de Barragem, Relatório de Segurança de Barragem, Eventos Adversos, Regulador, Gerente de Documentos, Relatórios e Publicação e Administrador.

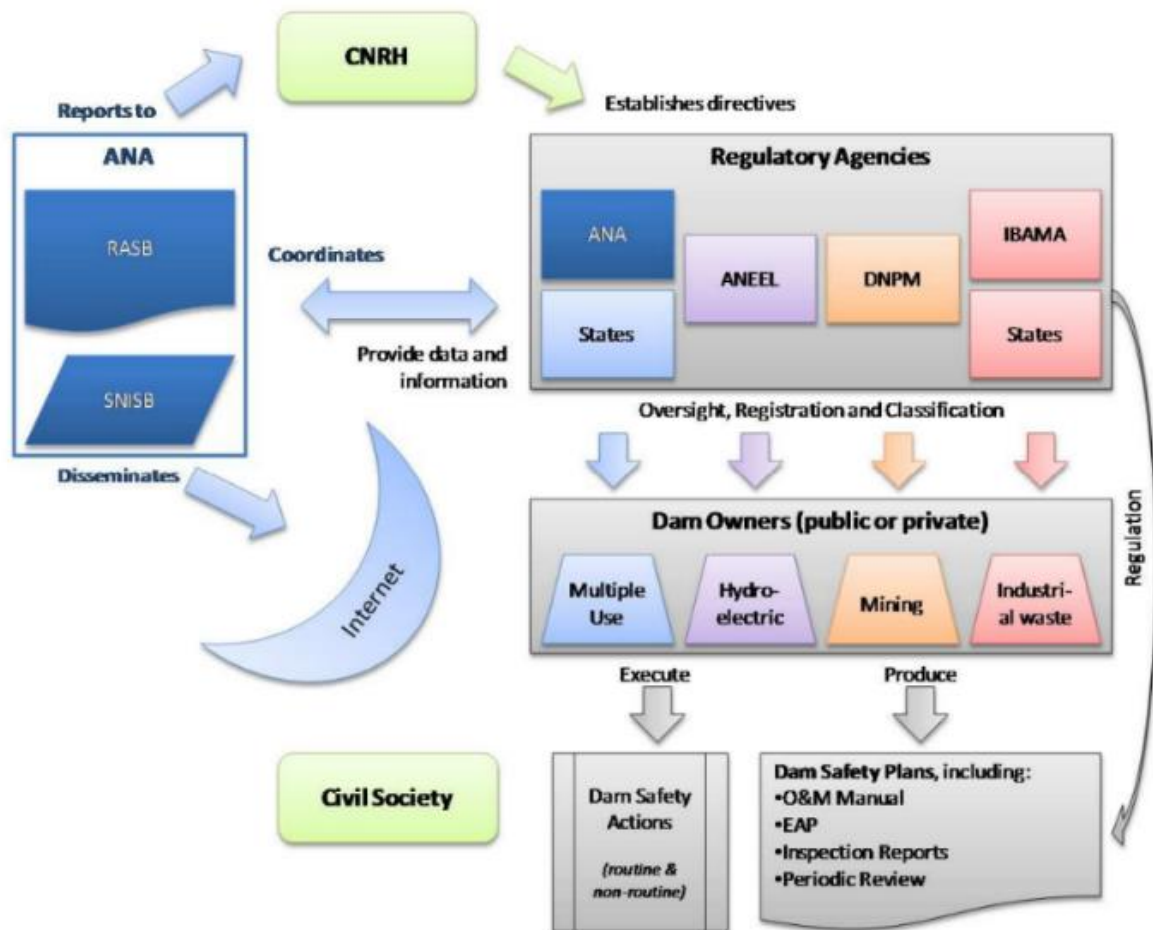


Figura 3: Institucional de Regulação de Segurança de Barragens
Fonte: Agência Nacional de Águas (2013).

2.1.2 A importância do monitoramento de barragens

A proteção, manutenção e operação adequada de barragens não só levam a uma longa vida útil da estrutura, mas também são significativos para os aspectos de saúde, segurança e meio ambiente (BRASIL, 2017).

A maioria dos problemas significativos que ocorrem na infraestrutura principal são aqueles associados à falta de procedimentos de manutenção. O alto custo e a longa duração da construção de barragens ditam a necessidade para um programa abrangente de manutenção e proteção online. Detecção precoce de defeitos e anormalidades é uma etapa crítica para a

avaliação da integridade das barragens, monitoramento da saúde e em geral, gerenciamento de riscos (SOARES, 2010).

Para simular o comportamento de uma barragem durante o tempo de construção, é necessário medir com precisão vários parâmetros, como deslocamento, pressão da água dos poros, vazamento, etc. Para isso, múltiplos equipamentos instrumentais são usados. O monitoramento da barragem é crucial para a gestão de risco do projeto e pode reduzir significativamente a exposição ao risco do projeto e as consequências futuras (SOARES, 2010). Um círculo geral de gerenciamento de risco inclui cinco etapas, conforme figura 4:



Figura 4: Gerenciamento de riscos
Fonte: GP4US (2015)

- Identificar: Estabelecer os componentes de risco.
- Analisar: avalie a probabilidade de cada elemento de risco e as consequências associadas.
- Planejar: determinar as estratégias gerais para minimizar a probabilidade de risco.
- Monitorar: Medir e atualizar continuamente todas as variáveis que podem indicar risco.
- Controlar: tomar várias ações de redução de risco.

O procedimento de monitoramento de saúde é frequentemente usado no contexto da análise de risco para identificar os modos de falha potencial. Os modos de falha identificados juntamente com o monitoramento de integridade são métricas chave para compreender as condições estruturais, hidráulicas e geotécnicas. O pós-processamento de dados de monitoramento de barragens irão identificar os Planos de Fechamento de Minas (PFMs), conforme dispõem na Resolução ANM nº 68/2021³ (DUNNICLIFF, 1993).

Muitos pesquisadores forneceram recomendações para monitorar e analisar barragens de terra e diques. A instrumentação é usada para um amplo espectro de medições para identificar as variações das quantidades físicas e mecânicas que são implementadas na área de engenharia geotécnica e construção de projetos (CASTRO, 2008).

Segundo Junior et al. (2018), as variações de quantidades, como deslocamento e pressão da água são medidas usando dados instrumentados. A colocação desses instrumentos em locais sensíveis na estrutura da barragem, juntamente com dispositivos de medição adequados e, finalmente, o registro de dados online, leva a uma avaliação abrangente da segurança de barragens.

Falhas estruturais de barragens de terra e enrocamento podem causar danos irreparáveis às instalações a jusante. O desempenho da barragem deve ser avaliado a partir de diferentes aspectos comportamentais durante o período de monitoramento, por exemplo, pressões de água dos poros, tensões, deslocamentos e outros parâmetro. Os resultados dessas avaliações e suas interpretações correspondentes devem ser regularmente relatados de maneira adequada. Além disso, consideração especial em caso de emergência, por exemplo, inundação ou terremoto, deve ser abordado (SOARES, 2010).

Ao comparar o comportamento atual e passado, a estabilidade da barragem é avaliada. A avaliação de risco de barragem pode ser utilizada em várias escalas, de diferentes perspectivas, e também sujeita a riscos múltiplos. Pode-se focar em estudos em macro escala, como portfólio de barragens em uma região, ou realizar uma série de simulações numéricas avançadas, testes experimentais, ou investigações de campo em uma barragem particular (FARIAS e CORDÃO NETO, 2010).

Diante do contexto, para evitar rupturas e colapso nas barragens, o ideal é que a empresa faça um monitoramento de barragens preventivo. Ele pode ser realizado por tecnologias que

³ Dispõe sobre as regras referentes ao Plano de Fechamento de Mina - PFM e revoga as Normas Reguladoras da Mineração nº 20.4 e nº 20.5, aprovadas pela Portaria DNPM nº 237, de 18 de outubro de 2001.

juntas vão promover ações preventivas e adquirir diversos dados para garantir que aquela determinada estrutura esteja completamente monitorada.

Barragens são alteadas, a partir de um dique de partida, que é de terra ou enrocamento. Barragens são alteadas a montante pelo lançamento de rejeito (fração areia) a montante do dique de partida ou do dique alteado anteriormente. Trata-se de um método de alteamento tradicional e bastante conhecido do ponto de vista de engenharia. Tem como vantagem o custo, quando comparado aos outros métodos, entretanto, do ponto de vista geotécnico é considerado o menos seguro, visto que cada novo alteamento encontra-se apoiado sobre material “inconsolidado”.

2.1.3 Tipos de barragens de rejeitos

Conforme Araújo (2006), os tipos de barragens de rejeitos dividem-se, basicamente, em três, como se vê na figura 5.

2.1.3.1 Barragem de alteamento a jusante

No alteamento a jusante, rejeitos e fração areia, são lançados a jusante do dique de partida. Este método tem como desvantagem o custo, em função da grande quantidade de material necessário para cada novo alteamento. Entretanto, o alteamento se dá sobre o material consolidado garantindo uma maior estabilidade do barramento e melhor controle da drenagem interna.

2.1.3.2 Barragem por alteamento a montante

Nesse método de barragem, com o próprio rejeito, é construído degraus, ou seja, a medida que a barragem se eleva - no formato de degraus - o volume de rejeitos também vai aumentando. Esse procedimento, embora seja simples, é também o menos seguro.

2.1.3.3 Barragem de linha de centro

O alteamento de linha de centro, em suma, é uma variante dos dois métodos. O alteamento ocorre seguindo uma linha de centro a partir do dique de partida. Tem as vantagens dos métodos anteriores e apresenta um custo intermediário.

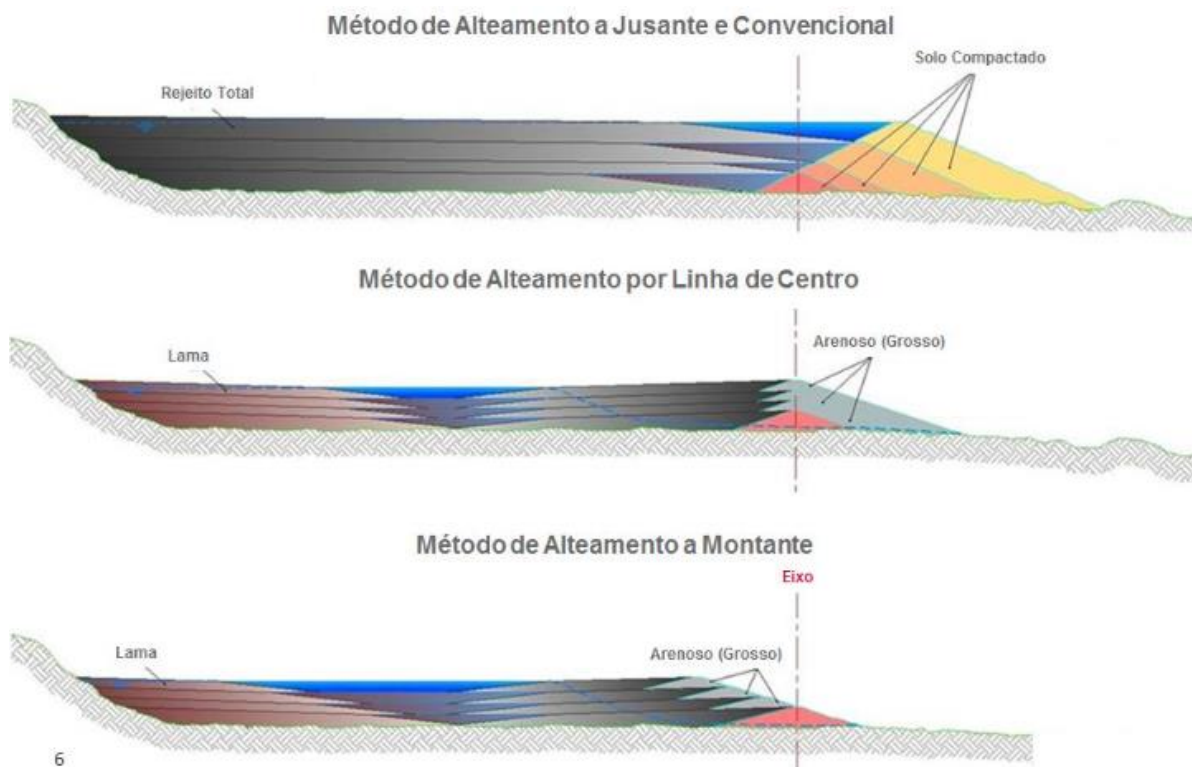


Figura 5: Métodos construtivos de barragens de rejeito
 Fonte: Vale (2016)

Ainda conforme Araújo (2006), há dois motivos principais para que uma barragem de rejeitos se rompa. O primeiro motivo é pelos fenômenos da natureza como, tsunamis, terremotos, e diversos outros eventos catastróficos que podem ocorrer nas regiões ou estrutura próximas, podendo afetar a barragem.

O outro motivo está na falha humana, que poderá acontecer no local da barragem, ou seja, quando da sua implantação e no momento de sua operação – uma das principais causas de rompimento entre as barragens, inclusive as brasileiras.

Os motivos podem ser tanto por falta ou falha durante a fiscalização, em relação à segurança e estabilidade da estrutura, quanto pela inobservância durante a inspeção, podendo causar grandes desastres no futuro (ARAÚJO, 2006).

Vale salientar que durante uma inspeção de barragem, todos os problemas devem ser relatados, cabendo sugestões, no relatório de segurança, de medidas preventivas, estipulando tempo para execução, pois, as barragens demandam algum tempo para se romperem, e não de um dia para o outro. Anteriormente aparecem sinais como falhas, rachaduras, diversas danificações e problemas estruturais (ESPÓSITO, 2000).

Dessa forma, é fundamental medidas como fiscalização, plano de ação emergencial, emissão de relatórios e revisões constantes a fim de garantir uma maior segurança das barragens e conseqüentemente do meio ambiente. A Agência Nacional de Mineração (ANM) tem monitorado com rigidez as barragens brasileiras, com o intuito de cobrar uma maior segurança dessas barragens aos seus empreendedores (BRASIL, 2020).

2.2 Instrumentação de barragens de mineração

A frequência com que os dados de instrumentação são obtidos deve ser adaptada ao propósito de monitoramento, período de construção, investigação ou outro interesse e condições de funcionamento do projeto. Em todos os casos, calibração suficiente deve ser executada e os dados de fundo devem ser obtidos para garantir que um banco de dados válido e confiável seja desenvolvido, mantido e disponível para facilitar comparações (SILVEIRA, 2006).

Depois que uma linha de base de desempenho é estabelecida, a subsequente leitura dos instrumentos durante as condições de construção e operação devem ser baseadas em uma taxa antecipada de carregamento ou mudanças nos níveis do reservatório. A redução oportuna e interpretação da instrumentação dos dados são essenciais para uma avaliação de segurança responsiva (VIEIRA, 2017).

As informações relativas aos sistemas de instrumentação são um recurso inestimável que é necessário para avaliar o instrumento e desempenho do sistema, bem como influenciar a avaliação do desempenho da barragem e deve ser preservada e facilmente acessível. Essas informações incluem – embora não limitadas - relatórios de instalação, resultados de teste, modificação aos sensores ou componentes do sistema, registros de manutenção, especificações de desempenho dos fabricantes, garantias e outras informações (FONSECA, 2003).

2.3 Tipos de instrumentação

A instrumentação geotécnica é de grande importância para a obtenção de uma assertiva avaliação quanto à segurança de barragens, sobretudo para fornecer informações confiáveis sobre seu comportamento durante as etapas de construção, operação e pós-operação, ou diante de qualquer evento extraordinário (VIEIRA, 2017).

Através de vários tipos de instrumentação, pode-se fazer uma avaliação da segurança de uma barragem em seu período útil de vida, além de identificar locais críticos ao longo do projeto.

2.3.1 Piezômetros

O piezômetro é usado para medir a pressão do líquido em um sistema, medindo a altura até a qual uma coluna do líquido se eleva contra a gravidade, ou um dispositivo que mede a pressão - mais precisamente, a altura piezométrica - da água subterrânea em um ponto específico. Um piezômetro é projetado para medir pressões estáticas e, portanto, difere de um tubo pitot por não ser apontado para o fluxo de fluido (VIEIRA NETTO *apud* MACHADO, 2007).

O piezômetro é um importante instrumento que avalia a segurança de barragens, e tem como foco principal, definir as subpressões em maciços de rocha ou terra. Também ajuda avaliar o padrão de infiltração, zonas de tubulação potencial e a eficácia do controle de infiltração realizadas (MACHADO, 2007).

Os primeiros piezômetros em engenharia geotécnica foram poços abertos ou fontanários (às vezes chamados de piezômetros de Casagrande) instalados em um aquífero. Um piezômetro de Casagrande normalmente terá um revestimento sólido até a profundidade de interesse e um revestimento com fenda ou tela dentro da zona onde a pressão da água está sendo medida (FONSECA, 2003).

Conforme Soares (2010), existem, no mercado, diversos tipos de piezômetros, embora os mais usados são:

2.3.1.1 Piezômetros pneumáticos

O piezômetro pneumático opera por pressão de gás. Ele pode ser instalado em um furo de poço, enchimento embutido ou suspenso em um tubo vertical de grande diâmetro. As leituras são obtidas com um indicador pneumático (DUNNICLIFF, 1988).



Figura 6: Piezômetro pneumático
 Fonte: Dunncliff (1988)

2.3.1.2 Piezômetros hidráulicos

Os piezômetros hidráulicos consistem em um filtro poroso que envolve um reservatório de água, que é separado de um manômetro por tubos flexíveis cheios de água. Utilizam-se os tubos com o objetivo de fazer circular a água pelo sistema, retirando o ar e garantindo que o reservatório fique cheio de água. Os piezômetros laváveis são instalados em poços totalmente argamassados e a argamassa atua como um filtro secundário, ajudando a manter sua saturação, sob a influência da sucção. Se o ar se formar no piezômetro, ele pode ser removido circulando água através dos tubos hidráulicos (FONSECA, 2003).

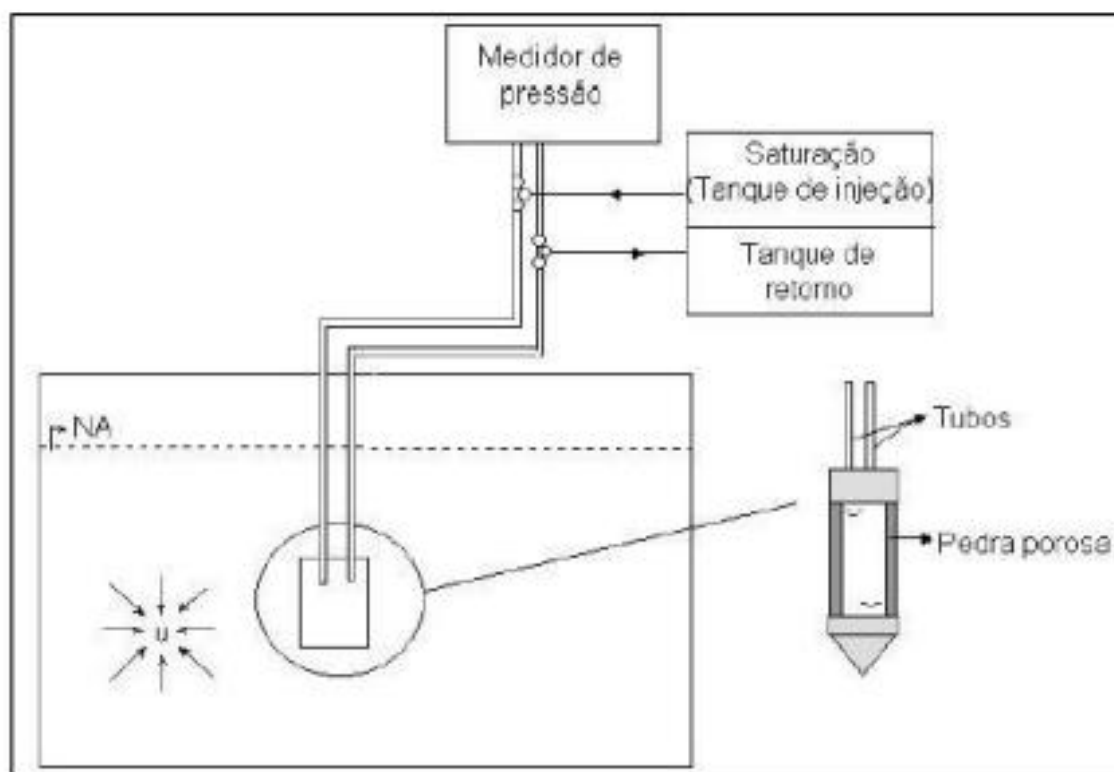


Figura 7: Modelo de piezômetro hidráulico
 Fonte: Fonseca (2003)

2.3.1.3 Piezômetros elétricos

Estes consistem em um diafragma defletor e um filtro poroso separado por um pequeno reservatório de água, sendo que as deflexões do diafragma são detectadas usando um fio vibratório ou um extensômetro e são convertidas em uma pressão equivalente e usando uma calibração adequada (FONSECA, 2003).

O piezômetro é inserido em um poço e o anel entre o filtro poroso e o poço é preenchido com argamassa de cimento/bentonita ou areia. A água do solo força seu caminho para o reservatório, fazendo com que o diafragma se desvie até que, dentro do reservatório, a pressão continue sendo a mesma da água dos poros no solo, na elevação do filtro poroso (SILVEIRA, 2006).

Se um piezômetro for instalado acima do lençol freático predominante, a pressão dos poros no solo pode ser negativa e a água no piezômetro tenderá a ser retirada do reservatório. Se isso acontecer, o ar pode eventualmente se formar dentro do piezômetro e ele não funcionará de forma confiável (FONSECA, 2003).

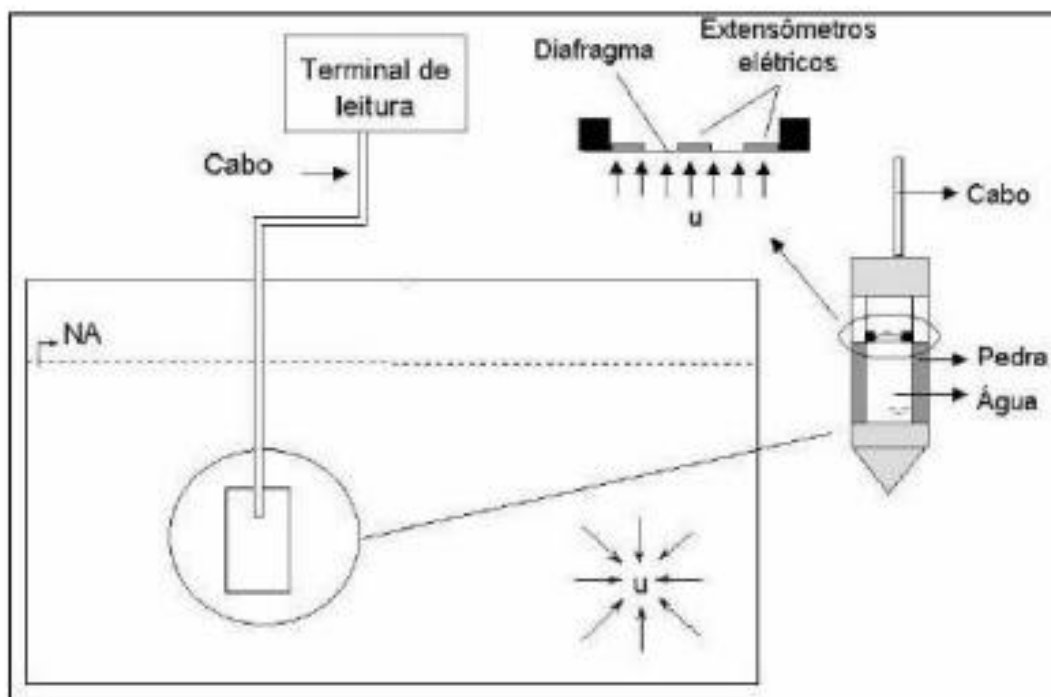


Figura 8: Esquema de piezômetro elétrico
 Fonte: Fonseca (2003)

2.3.1.3 Piezômetros Standpipe ou de tubo aberto

Este tipo de dispositivo consiste em um tubo aberto no qual o nível de fluido é medido por sondagem, ou abaixando uma fita no tubo para medir o nível de água. O tubo vertical aberto é o instrumento mais simples para medir as pressões da água dos poros no solo. Este é um tubo de plástico pequeno, geralmente 19 mm de diâmetro, com uma seção porosa na parte inferior. O tubo é instalado dentro de um poço e a seção porosa é posicionada na profundidade onde a pressão da água dos poros deve ser medida (RIZZO, 2007).

O anel é preenchido com areia, entre o furo e o filtro poroso, as superfícies superior e inferior da areia são seladas com bentonita e o resto do furo é preenchido com uma argamassa de cimento/bentonita. A pressão da água subterrânea empurra a água para dentro e para cima do tubo vertical, até que o nível de água dentro do tubo vertical seja equivalente à pressão da água dos poros no solo, na elevação do filtro poroso (SILVEIRA, 2006).

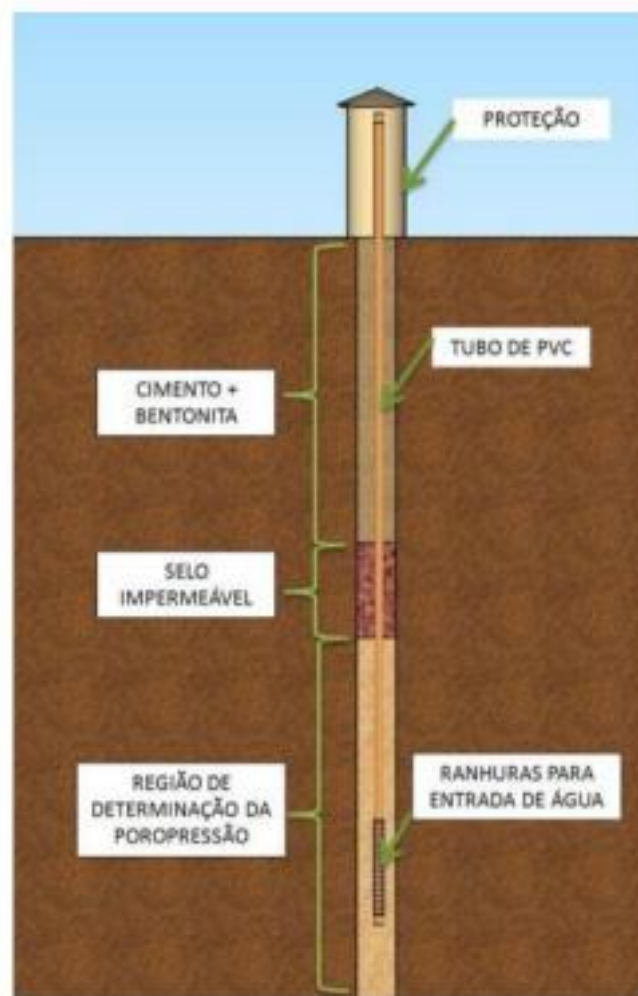


Figura 9: Piezômetro standpipe
 Fonte: Sestrem (2012)

2.3.1.4 Piezômetros de Casagrande

Este piezômetro é um tubo em PVC, tubo geomecânico ou metálico, ranhurado ou perfurado em um ou mais trechos, de geralmente 1 metro cada, inserido em um furo de sondagem. O fluxo da água subterrânea, através das ranhuras do tubo submetida à uma determinada carga piezométrica, provoca a subida ou descida do nível de água - no interior da tubulação - conforme a variação das condições deste fluxo (MACHADO, 2007).

O nível da água no interior dessa tubulação representa a carga piezométrica na posição da célula de areia. Um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. Esta célula de areia fica conectada à superfície do terreno por meio da tubulação e, portanto, tem suas variações medidas sujeitas às condições barométricas (FONSECA, 2003).

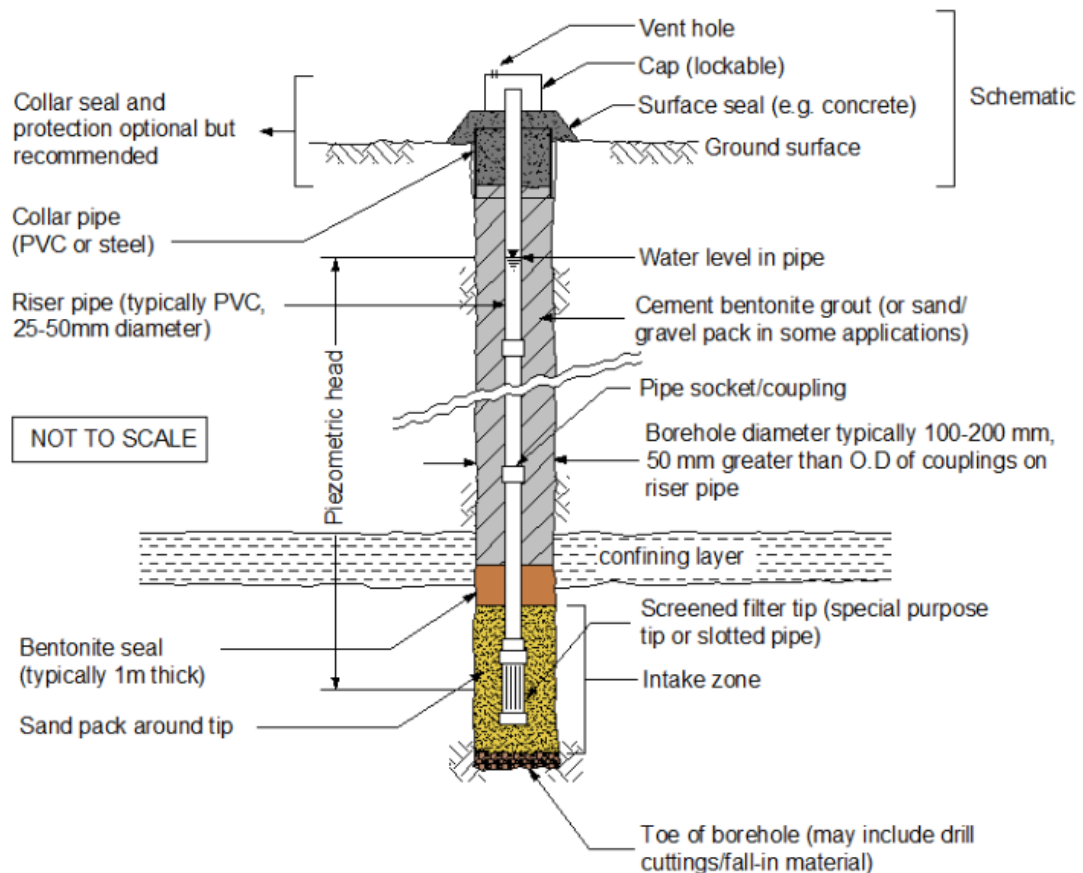


Figura 10: Piezômetro Casagrande
 Fonte: Vale (2016)

2.3.1.5 Piezômetros de corda vibrante

Conforme Dunniclif (1988), os Piezômetros *Vibrating Wire* medem a pressão da água dos poros em solo e rocha total ou parcialmente saturado. Um piezômetro de fio vibratório consiste basicamente em:

- Um diafragma de aço inoxidável sensível;
- Um fio magnético de alta resistência à tração, uma extremidade do qual é ancorada e a outra extremidade é fixada a um diafragma;
- Filtro de ar baixo de cerâmica (filtros de alta entrada de ar de latão também são usados, dependendo dos requisitos do local);
- Termistor para leituras de temperatura;
- Vedação de vidro para metal com quatro terminais para conexão de cabo;

- Corpo de aço inoxidável com resistência à ferrugem ou corrosão contra diversos tipos de impurezas dissolvidas encontradas na água em condições de campo. Para aplicação de água salina, um sensor especial com proteção adicional é fornecido.

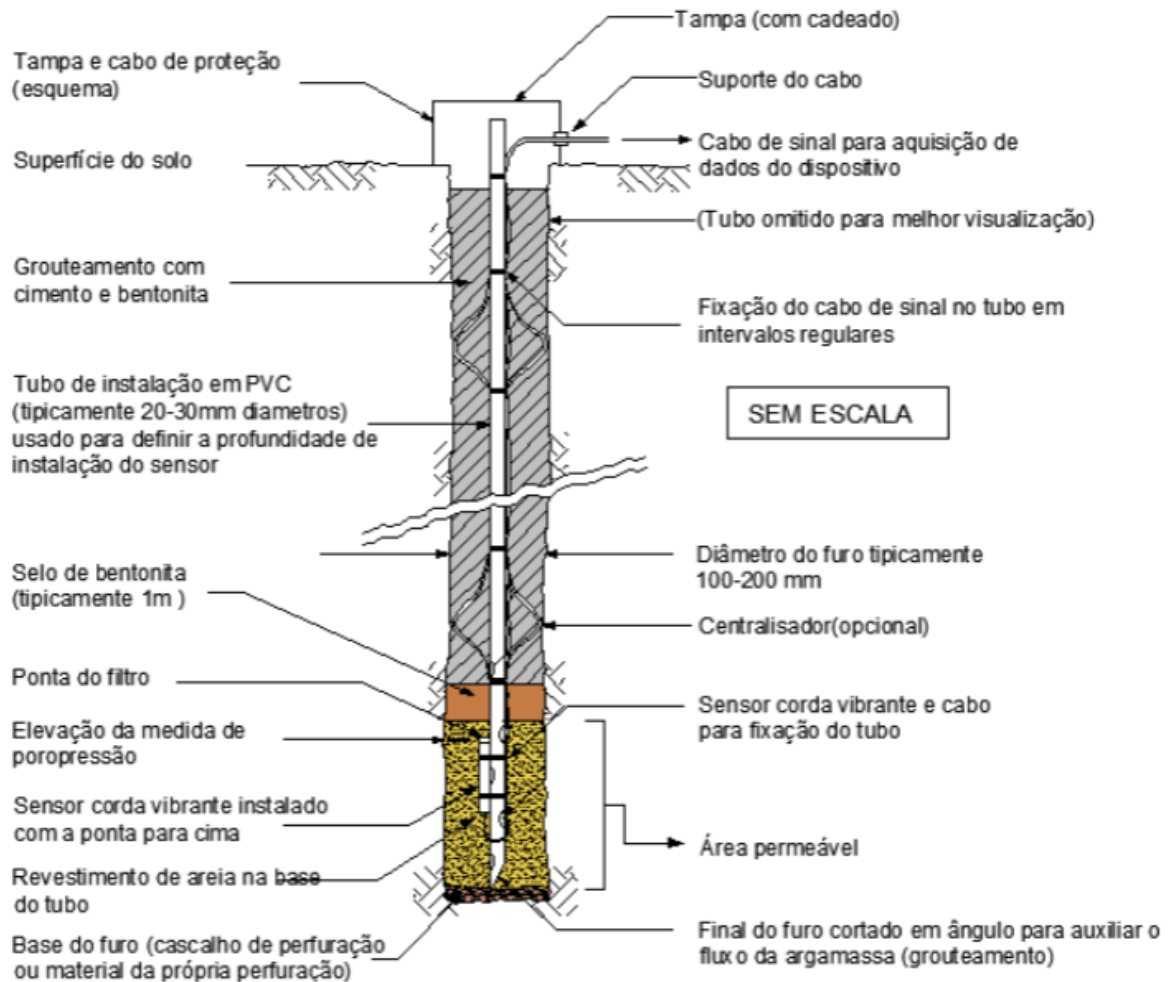


Figura 11: Piezômetro de Corda Vibrante
Fonte: Geokon (2019)

2.3.2 Marcos superficiais

Conforme Fonseca (2003), utiliza-se os marcos superficiais para identificar um deslocamento vertical ou horizontal. Esses tipos de deslocamentos são medidos através de levantamento topográfico, por periodicidade, e realizados com base nos marcos de referências afixados fora da região de influência das barragens.

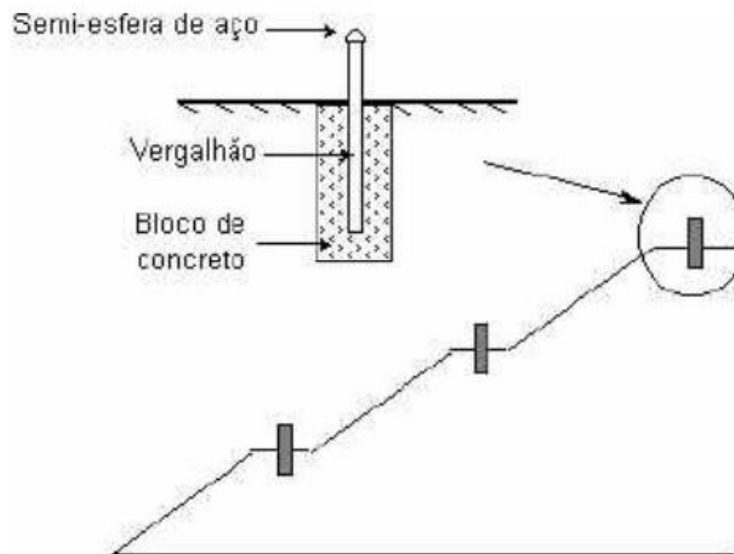


Figura 12: Instalação de marcos superficiais
 Fonte: Fonseca (2003)

2.3.3 Inclinômetros

Os inclinômetros medem os movimentos horizontais e controlam a estabilidade de taludes. Sua composição é feita basicamente de um sensor de inclinação por uma haste cilíndrica, em seu interior. Ele compara as atuais leituras com as que foram realizadas pós instalação e verifica se houve algum tipo de alteração (KANJI e FIGUEIRA, 1990 *apud* AFFONSO, 2004).

Como afirma Fonseca (2003), os indicadores de inclinação são usados, principalmente, para monitorar os movimentos do solo em massas de solo não perturbadas, bem como aterros compactados detectando mudanças na inclinação da estrutura do solo. Um invólucro de plástico ou alumínio, especialmente projetado com uma ranhura de alinhamento ao longo de uma borda, pode ser projetada em um buraco de até 900 pés de profundidade.

Instrumentos indicadores de inclinação são baixados para as carcaças em rolos com mola que montam nas ranhuras para manter o alinhamento. O desvio do vertical é detectado monitorando um sinal eletrônico de um circuito de ponte de Wheatstone ou cristais piezoelétricos, dentro do sensor, que é gerado por uma mudança no estresse em um sistema mecânico, como um pêndulo ou braço (FONSECA, 2003).

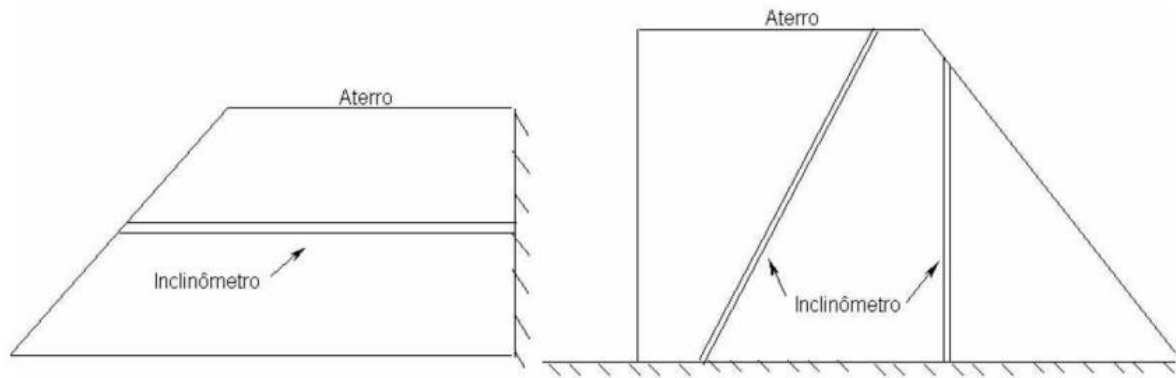


Figura 13: Instalação de inclinômetros
 Fonte: Fonseca (2003)

2.3.4 Medidores de níveis de água e vazão

Segundo Castro (2008), os medidores são instrumentos simples, com a função de identificar a variação e vazão do nível da água. Possuem correlação com a análise de desempenho de barragens de mineração. Por isso, faz-se importante a medição de infiltração e vazão nas barragens, pela segurança das estruturas dessas barragens, e devem, portanto, passar por análises prioritariamente, para verificação.

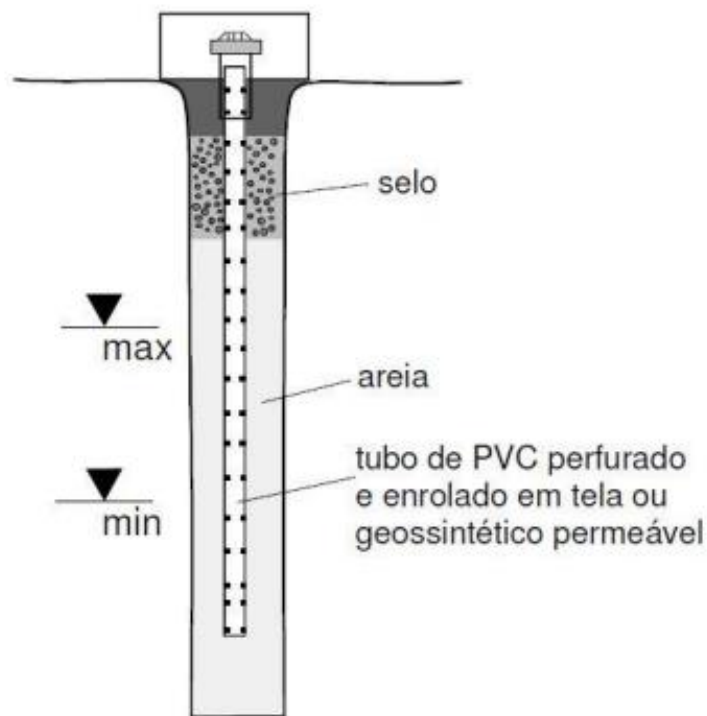


Figura 14: Esquema de medidor de nível de água
 Fonte: Georio (2000)

2.4 Investigação, Monitoramento e Vigilância de barragens

O monitoramento é definido como a medição e registro de parâmetros físicos, como vazão e níveis de água. Vigilância é definida como a observação da barragem, bem como suas estruturas associadas. Embora a vigilância seja menos visual, rigorosa e quantitativa do que o monitoramento, não é menos importante. O tipo, sofisticação e extensão do monitoramento depende do tamanho, tipo e categoria de perigo da estrutura, porém, a vigilância e o monitoramento são realizados em todas as fases da vida de uma barragem.

Conforme Day (1998), existem sete fases principais de investigação, monitoramento e vigilância de barragens, bem como suas estruturas associadas, ou seja:

- a) Investigação do desenvolvimento: avalia a viabilidade do esquema;
- b) Monitoramento da construção: garante a construção;
- c) Monitoramento de comissionamento: para fins de segurança;
- d) Monitoramento de desempenho: garante a expectativa de segurança e desempenho do projetista e do proprietário de barragem;
- e) Monitoramento de eventos: aumenta a capacidade que a barragem possui para lidar com eventos extremos;
- f) Monitoramento de conformidade: garantia de que o esquema opere dentro do permitido definido pelas várias condições dadas no conteúdo do recurso para o esquema;
- g) Monitoramento operacional: garante o nível necessário da atuação da operação.

Já, os principais parâmetros considerados para o monitoramento, por razões de segurança são:

- a) Níveis de água subterrânea;
- b) Assentamento e movimento;
- c) Vazamento ou vazamento de vazões;
- d) Dados hidrológicos;
- e) Efeitos ecológicos/ambientais;
- f) Vigilância da condição de barragem, armazenamento e vigilância geral.

2.4.1 Ajuste e resposta de alarmes

Os alarmes podem ser configurados em diferentes níveis, o que também geralmente mudam durante a vida útil de diversas barragens, conforme os dados sobre o desempenho histórico se acumula.

Segundo Dunnicliff (1993), três conjuntos de níveis de alarme são geralmente usados, ou seja, nível de aviso, nível de alerta e verificação de dados. Os níveis de alarme não são necessariamente definidos em todos instrumentos, embora os instrumentos principais podem ser selecionados para um ou mais níveis de alarme com base em sua significância e avaliação de confiabilidade.

Os restantes instrumentos sem alarme, as configurações fornecerão um certo grau de backup. A resposta depende do nível do alarme disparado (aviso ou alerta) e o significado predefinido do alarme. Um conjunto predefinido de diretrizes devem estar em vigor para que os alarmes, quando acionados, possam ser respondidos o mais rápido possível (DUNNICLIFF, 1993).

2.4.2 Plano de ação de emergência

O objetivo principal do plano de ação de emergência é reduzir o risco de perda de pessoas e bens. O plano de ação de emergência precisa prescrever um conjunto de ações que precisam ser realizadas em caso de incidente.

Segundo Day (1998), as informações chave que precisam estar no plano de ação de emergência incluem:

- a) Sequência e detalhes da ação a ser tomada;
- b) Cadeia de responsabilidade por barragens;
- c) Planos de layout da barragem, rede de monitoramento e área a jusante que deve estar em risco;
- d) Pessoas e agências a serem notificadas, incluindo pessoal e detalhes de contato;
- e) Correlação entre o plano de ação de emergência, regional e central;
- f) Backups e Sistema de Comunicação;
- g) Fornecedores de energia de backup, sistemas de equipamentos e monitoramento;
- h) Lista de empreiteiros, especialistas, entre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo demonstra vários tipos de instrumentação e questões relacionadas à instrumentação, monitoramento e vigilância no programa de segurança de barragens de terra.

Segundo a Lei 12.334, Artigo 4, Inciso I: “A segurança de uma barragem deve considerar suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento, primeiro vazamento, operação, desativação e uso futuro”. A Lei nº 12.334, no art. 7, classifica as barragens por categoria de risco, danos relacionados e por seu volume de reservatório (BRASIL, 2010).

No Brasil, a quantidade de rompimentos de barragens é considerável, principalmente na região de Minas, onde houve rompimento de sete barragens de rejeitos. Alves (2015), juntamente com Almeida et al 2019, apresentam essas informações na Tab. 1.

Tabela 1: Rupturas de barragens em Minas Gerais – Brasil

Ano	Barragem	Localização	Detalhes
2001	Macacos	Nova Lima	5 mortes
2003	Cataguases	Cataguases	Contaminação do Rio Paraíba do Sul, morte de animais e peixes e interrupção do abastecimento de água para 600 mil pessoas
2007	Rio Pomba	Miraí	Mais de 4000 pessoas desabrigadas ou deslocadas.
2014	Herculano	Itabirito	3 mortes
2015	Fundão, Santarém	Mariana	19 mortes, 8 desaparecidos, 600 desabrigados, interrupção do abastecimento de água a milhares de pessoas e poluição do Rio São Francisco e do mar do Espírito Santo.
2019	Brumadinho	Brumadinho	300 vítimas (identificadas e desaparecidas), impactos imensuráveis no patrimônio histórico e cultural no meio ambiente e na economia local.

Fonte: Alves (2015) e Almeida et al. (2019).

Vários acidentes relacionados a rompimento de barragens no mundo foram documentados por Brown et al. (2012), envolvendo situações passadas, como as barragens de St. Francis e Teton, e atuais, como as britânicas, europeias, chinesas e americanas (Rico et al., 2008).

Alves (2015) apresenta um importante relato de importantes acidentes em barragens no mundo e no Brasil, apresentando danos e causas primárias. Mariana em 2015, e Brumadinho em 2019, são exemplos de grandes acidentes recentes em barragens no Brasil, ambos no estado de Minas Gerais, como mostra a figura 15:



Figura 15: Acidentes em barragens Mariana e Brumadinho
Fonte: BBC News (2019)

A auscultação de uma barragem envolve um grupo de procedimentos de monitorização baseados em métodos geotécnicos, geodésicos e instrumentação, visando a fiscalização, monitorização e verificação de medidas corretivas das suas condições de segurança.

A literatura de barragens apresenta a auscultação de barragens, desde a década de 1950 até o século 21, caracterizando a evolução tecnológica dos procedimentos de monitoramento e instrumentação. É importante destacar os métodos de instrumentação e auscultação, a par da informática e automatização dos programas de transmissão, aquisição, análise de dados e processamento (FONSECA, 2003).

Fonseca (2003), demonstra em suas teorias uma discussão geral dos métodos de instrumentação geotécnica em barragens. Enquanto Silveira (2006), aborda de forma abrangente diferentes categorias de barragens, envolvendo aspectos de métodos geotécnicos em barragens e de instrumentação.

A figura 16 demonstra diversos tipos de instrumentação usados em um sistema de monitoramento de barragens. O tipo, número e localização, depende do layout do projeto e de técnicas de construção empregadas.

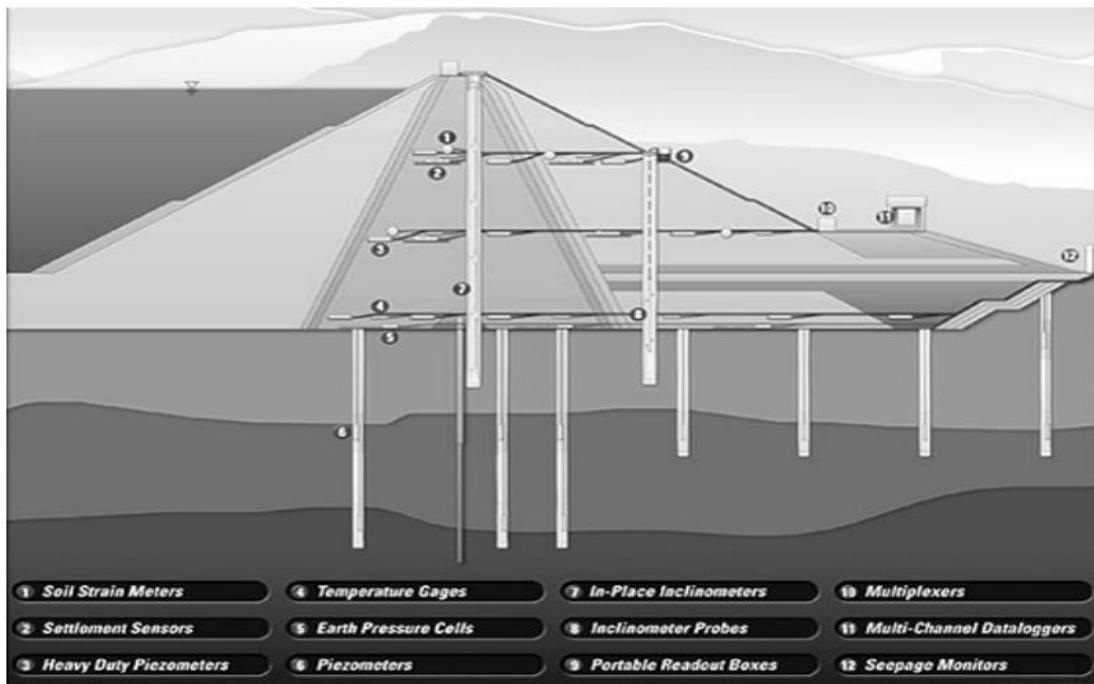


Figura 16: Vários tipos de instrumentação usadas em barragens de mineração
 Fonte: Geokon (2019)

Segundo Dunicliff (1993), nota-se que a instrumentação não é um substituto para um projeto inadequado. É uma ferramenta para monitorar e verificar o desempenho do design conforme construído. Portanto, uma instrumentação adequada, definir alarmes e plano de ação de emergência é fundamental para todas as estruturas e instalações pertinentes, cujas falhas ou mau funcionamento podem causar ou contribuir para a perda de vida, graves danos à propriedade ou perda de função.

Kolbadi (2020), em seu estudo, relata os achados do monitoramento instrumental da saúde de barragem terrestre e a avaliação subsequente da estabilidade. Três tipos de instrumentos, ou seja, piezômetros comuns, piezômetros casagrande e células de pressão total, foram utilizados e seus dados foram coletados por cerca de 12 anos.

Os dados e análise indicaram uma queda considerável de pressão devido à presença de parede de corte no eixo da barragem. Os resultados dos piezômetros mostraram que a drenagem é eficiente, e o cano de água no corpo é adequado. No geral, a condição do estudo de caso da barragem foi avaliada como normal durante seus primeiros 15 anos de operação. Embora evidenciou uma drenagem limitada a jusante da parede do selo da represa, não pareceu ser uma ameaça imediata à segurança da barragem (KOBALDI, 2020).

Cruz (1996), descreve aspectos gerais e específicos relacionados à instrumentação geotécnica das décadas de 1950 a 1990, onde predominaram as inspeções visuais. Estudos mais recentes mostram a tendência de automação da inspeção visual em barragens.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem apresentada neste trabalho dá contexto técnico e científico ao segmento de segurança de barragens envolvendo os métodos de instrumentação, segurança e monitoramento. Dessa forma, foram apresentados diferentes tipos e várias questões relacionadas à instrumentação, monitoramento e vigilância no programa de segurança de barragens de terra.

Percebeu-se, através deste estudo, que as empresas de mineração sempre usaram algum tipo de instrumentação, embora, após a tragédia de Brumadinho e Mariana, diversas tecnologias têm sido usadas, ainda mais, para monitorar barragens. Isso caracteriza os esforços para garantir que eventos extremos possam ser identificados em tempo hábil e procedimentos de alerta possam ser iniciados para garantir a segurança das barragens.

Esses avanços na tecnologia, aliado à comunicação online, tem permitido a geração de pesquisas científicas em tempo real, por meio da automação de instrumentação geotécnica, voltadas ao monitoramento de barragens. A integração e automação desses processos é a tendência atual e moderna de monitoramento de barragens.

Verificou-se que a instrumentação não é um substituto para um projeto inadequado. É sobretudo, uma ferramenta para monitorar e verificar o desempenho do layout conforme construído. Os novos métodos e tecnologias auxiliam de forma mais célere, detectar os danos estruturais e desastres com o rompimento de barragens, aumentando a segurança operacional e ambiental.

Portanto, especificar uma instrumentação adequada, definir alarmes e plano de ação de emergência documentado, se fazem necessárias para todas as estruturas e instalações pertinentes, cujo mau funcionamento ou qualquer tipo de falha, podem causar ou contribuir para a perda de vida e graves danos à propriedade.

Os conhecimentos apresentados neste trabalho, com informações teóricas embasadas em bases científicas e tecnológicas na prática da engenharia de barragens, objetivam enriquecer os estudos de monitoramento de barragens. Espera-se que a abordagem apresentada possa agregar conhecimento e motivar a geração de novas publicações técnico-científicas na área de segurança de barragens no Brasil.

Como trabalhos futuros sugere-se a integração de softwares com a instrumentação utilizada em barragens, para uma análise geotécnica mais detalhada.

Acredita-se que para uma maior segurança no monitoramento de barragens, é necessário automatizar todos os instrumentos utilizados e também integrar todos eles a um mesmo software ou banco de dados para um melhor tratamento das informações, uma análise mais detalhada dos dados, diminuição do tempo de resposta a novas informações e aumento da confiabilidade nos dados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ADORNO, L. **Brasil tem 204 barragens de rejeitos de minério com alto potencial de danos**. UOL. Brasil. 2019. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2019/01/30/204-barragens-de-minerio-tem-potencial-de-dano-alto-no-brasil.htm>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- AFFONSO, H. M. M. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. 2004, 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PUC Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, 2004.
- AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**. 2013. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/projeto/index.html, Acesso em: 10 nov. 2021.
- ALVES, H. R. **O rompimento de barragens no Brasil e no mundo: desastres mistos ou tecnológicos?** Belo Horizonte: Faculdade Dom Helder Câmara, 2015.
- ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.
- BRASIL. Congresso. Senado. **Lei nº 12.334, de 2010**. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens. Coleção de Leis da República Federativa do Brasil. Brasília - DF, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em: 02 nov. 2021.
- _____. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012**. Brasília. 2012. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes/1922-resolucao-n-143-de-10-de-julho-de-2012/file>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- _____. Ministério de Minas e Energia. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Segurança de Barragens. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835. Acesso em: 01 nov. 2021.
- _____. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Medidas de prevenção de incidentes com barragens são tema de reuniões com ANA e órgãos fiscalizadores de barragens e agentes de proteção civil**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/medidas-de-prevencao-de-incidentes-com-barragens-sao-tema-de-reunioes-com-ana-e-orgaos-fiscalizadores-de-barragens-e-agentes-de-protecao-civil>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- BROWN, D. et al. **Desastres mais devastadores de todos os tempos**. 1. ed. São Paulo: Lafonte, 2012. 501p.
- CASTRO, L. V. P. **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante**. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia ambiental. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A História das Barragens no Brasil nos Séculos XIX, XX e XXI: 50 Anos do Comitê Brasileiro de Barragens.** Rio de Janeiro: Sindicato nacional dos editores de livros, 2011. 533p.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

CRUZ, P. T. da. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto.** São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648p.

DAY, R. W. (1998). **Forensic Geotechnical and Foundation Engineering.** McGraw Hill Publications.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance.** Wiley, 1988. 577p.

ESPÓSITO, T. J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico.** 2000. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.

FARIAS, M.M; CORDÃO NETO, M.P. **Simulação numérica avançada de barragens de terra colapsáveis.** Lata. Geotech. J. 2010, 47, 1351–1364.

FONSECA, A. R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica** – estudo de caso das barragens da UHE São Simão. Dissertação apresentada como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia civil. Ouro Preto: UFOP. 2003.

GEOKON. **Piezometers** – Standard Piezometers (VW). 2018. Disponível Em: <<https://www.geokon.com/4500-Series>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

GEORIO. **Manual Técnico de Encostas.** Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. 2ª Edição, Rio de Janeiro – RJ. 2000.

JANSEN, RB. **Engenharia Avançada de Barragens para Projeto, Construção e Reabilitação;** Springer Science & Business Media: Berlin / Heidelberg, Alemanha, 2012.

JUNIOR, T. F. S., MOREIRA, E.B., E HEINECK, K. S. **Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil.** HOLOS, Ano 34, Volume 05. 2018.

KANJI, M. A.; FIGUEIRA, P. C. S. **Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens.** In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO – SINGEO'90, Rio de Janeiro: ABMS, 1990. p. 119-128.

KOLBADI, S.M.S.; ARDEBILI, M. A. H.; MIRTAHERI, M. **Monitoramento de saúde instrumentado de uma barragem de terra.** Rev. Infraestr. Vol. 5. Ed. 3. 2020.

KUTZNER, C. **Earth and rockfill dams: principles of design and construction.** Rotterdam: A. A. Balkema, 1997. 333 p.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de segurança em barragens de terra, sob cenário de erosão tubular regressiva, por método probabilístico o caso UHE – São Simão.** 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2007.

LIMA, F. H. C.; GUIMARAES, M. M. **A importância da automação da instrumentação geotécnica de auscultação da barragem Irapé – MG.** IBEAS. 2019. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2019/XI-097.pdf>. Acesso em: 08 out. 2021.

MACHADO, G. de F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – MG, 2007.

MASOUMI, I; AHANGARI, K.; NOORZAD, A. **Abordagem de decisão difusa integrada para melhoria da confiabilidade da instrumentação e monitoramento de barragens.** J. Struct. Integr. Maint. 2018, 3, 114-125.

MEDEIROS, C. H. de A.C. **Segurança e Auscultação de Barragens.** In: XXV SEMINÁRIO DE GRANDES BARRAGENS, 2003, Anais, Salvador, 2003 p. 13-50.

MIZUNO, M.; HIROSE, T. **Instrumentação e monitoramento de barragens e reservatórios.** Water Storage Transp. Distrib. 2009, 1, 1–8.

PIERRE, L. F. **Avaliação da Segurança de Pequenas Barragens em Operação.** In: XXV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 2003, Anais, Salvador, 2003 p. 260-268.

RICO, M.; BENITO, G.; SALGUEIRO, A. R.; DÍEZ-HERRERO, A.; PEREIRA, H. G. **Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context.** Journal of Hazardous Materials, v. 152, p. 846-852, 2008.

RIZZO, S., M. **Monitoramento das escavações de uma área de rejeito de bauxita.** Dissertação submetida como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: UFRJ, 2007.

SANTOS, L. C. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos.** 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28051/4/EstudoSobreInstrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 08 out. 2021.

SANTOS, V. S. **Desastre ambiental em Brumadinho.** UOL. Brasil. 2019. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/desastre-ambiental-brumadinho.htm>. Acesso em: 02/11/2021.

SESTREM, L. P. **Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea.** Dissertação apresentada como requisito parcial da Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil. Curitiba: UFPR, 2012.

SILVA, M. F. S. **Sistema de monitoramento online de barragens de mineração.** Monografias UFOP. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1818/11/MONOGRAFIA_SistemaMonitoramentoOnline.pdf. Acesso em: 09 out. 2021.

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

SOARES, L. **Barragem de Rejeitos.** Colaboração técnica para o livro Tratamento de Minérios. Edição 5 - Capítulo 19 – pág. 831-896. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). 2010.

TAYLOR, PW. **Engenharia e Projeto:** Instrumentação para Avaliações de Segurança de Projetos de Obras Cíveis; Relatório técnico; USACE: Washington, DC, EUA, 1985.

VIEIRA, M. F., et al. **Influência do lago da UHE Tucuruí sobre a barragem de concreto:** um estudo sobre os MTJ's. Revista CIATEC-UPF.2017, Vol.9 Issue 1, p1-14. 14p.