



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MAYARA ALMEIDA RAIOL DA SILVA

**A INSTRUMENTAÇÃO PARA A GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS
APLICADO À EMPREENDIMENTOS DA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado por:

MAYARA ALMEIDA RAIOL DA SILVA

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Aline Maria Meiguins de Lima (IG/UFPA)

Coorientador: Me. Carlos Rangel Ferreira da Cruz

BELÉM - PA

DEZEMBRO/2022



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA
FACULDADE DE GEOLOGIA**

MAYARA ALMEIDA RAIOL DA SILVA

**A INSTRUMENTAÇÃO PARA A GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS
APLICADO ÀS EMPREENDIMENTOS DA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado por:

MAYARA ALMEIDA RAIOL DA SILVA

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Aline Maria Meiguins de Lima (IG/UFPA)

Coorientador: Me. Carlos Rangel Ferreira da Cruz

BELÉM - PA

DEZEMBRO/2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBDSistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586i Silva, Mayara Almeida Raiol da.
A instrumentação para a gestão de segurança de barragens aplicado à empreendimentos da Amazônia oriental / Mayara Almeida Raiol da Silva. — 2022.
ix, 29, f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima
Coorientador(a): Prof. Me. Carlos Rangel Ferreira da Cruz Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2022.

1. Barragens. 2. Instrumentação geotécnica. 3. Monitoramento. I. Título.

CDD 624.151



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIA
FACULDADE DE GEOLOGIA**

**A INSTRUMENTAÇÃO PARA A GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS
APLICADO ÀS EMPREENDIMENTOS DA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:

MAYARA ALMEIDA RAIOL DA SILVA

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Geologia, Linha de
pesquisa: Geologia de Engenharia.**

Data de Aprovação: 21/12/2022

Banca Examinadora:

Aline Maria Meiguins de Lima

Prof^ª. Aline Maria Meiguins de Lima - Orientadora
Doutora em Desenvolvimento Socioambiental. Universidade Federal
do Pará – UFPA

Fabio Domingos

Prof. Fabio Henrique Garcia Domingos -Examinador Interno (UFPA)
Faculdade de Geologia. Universidade Federal do Pará – UFPA

Prof. Me. Carlos Alex Alves Lima - Examinador Externo
Geólogo Geotécnico na empresa VALE S.A.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer a Deus por todas as oportunidades e conquistas que estou tendo em minha vida e pela força e resiliência durante os desafios enfrentados.

Agradeço à minha família pelo amor e apoio incondicional em todas as minhas escolhas. Agradeço a minha mãe Francisca, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço, sempre confiou e me deu todo suporte na vida. Agradeço ao meu pai, Manoel, por sempre ser um exemplo de pai e homem, pelo cuidado, e por ter nos proporcionado o melhor sempre. Agradeço a minha irmã, Manuella, por ser um modelo de filha, de estudante e profissional, no qual incessantemente me espelho.

Ao amor da minha vida, Giovanna, por ser meu ponto de paz e tranquilidade, sempre me incentivou e apoiou durante a graduação e agora em minha vida profissional. Obrigada, por todo o amor, sem você ao meu lado a vida seria mais difícil.

Aos meus queridos amigos, Ruan, Marco, Larissa, Maria Antônia, Adriane, Maria Laura, Carol, entre outros, quero agradecer pelo apoio, força, amor e assistência inabalável. Em especial a minha amiga e dupla em toda graduação, Sara, por todo suporte durante o curso e a vida, as viagens, festas e risadas, ela desempenhou um papel significativo no meu crescimento. Agradeço aos meus amigos e companheiros de trabalho na área de Bacia de rejeitos, Gilberto, Jorge, Junior, Dennis, Samoel e Alex por terem sido os principais incentivadores deste trabalho e no ramo da Mineração.

À Universidade Federal do Pará pelo ambiente criativo e amigável que proporciona. À minha orientadora e exemplo a ser seguido, Prof^{ra}. Dr^a. Aline Meiguins por aceitar me orientar em um período tão complicado, pelas suas correções e incentivos. Ao meu Coorientador e amigo, Carlos Rangel, o qual com muita admiração e carinho gostaria de expressar meu agradecimento por tudo que você fez por mim e pela dedicação que deposita em me orientar.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

As barragens são estruturas destinadas a armazenar resíduos e é necessária para evitar danos ambientais. No entanto, qualquer falha traz prejuízos imensuráveis à população, à economia e ao meio ambiente. É indispensável que se mantenha a integridade estrutural e operacional das barragens e para isso é necessário o conhecimento das características construtivas, planos de instrumentação, e assim a identificação de eventos e tratativas; que se tenha a boa prática de inspeções visuais para manter as condições de segurança da estrutura. Estes pontos resumem-se em gestão de segurança de barragens, no qual é imprescindível um programa de monitoramento geotécnico contínuo, inspeção visual feita por engenheiro qualificado, e uma auditoria externa feita por uma empresa especializada em segurança de barragens. Convencionalmente, o monitoramento no Brasil é realizado por instrumentos de leituras manuais, sendo bastante susceptíveis ao erro humano ou proporcionam uma interpretação atrasada das condições reais do comportamento e estabilidade da estrutura. Este trabalho visa comparar os principais instrumentos geotécnicos e suas relações com uma maior eficiência no monitoramento e controle de dados. Como resultado, obteve-se relações diretas entre variáveis bem como recomendações para um monitoramento mais eficaz utilizando tecnologias, uma alternativa de automação na gestão de segurança e na tomada de decisão.

Palavras-chave: barragens; instrumentação geotécnica; monitoramento.

ABSTRACT

Dams are structures designed to store water and it is necessary to prevent environmental damage. However, any failure brings immeasurable damage to the population, the economy and the environment. It is indispensable to maintain the structural and operational integrity of the dams and for that it is necessary to know the constructive characteristics, instrumentation plans, and thus the identification of events and dealings; that there is a good practice of visual inspections to maintain the safety conditions of the structure. These points are summarized in dam safety management, in which a continuous geotechnical monitoring program is essential, visual inspection by a qualified engineer, and an external audit by a company specialized in dam safety. Conventionally, monitoring in Brazil is carried out by manual reading instruments, which is very susceptible to human error or providing a delayed interpretation of the real conditions of behavior and stability of the structure. This work aims to compare the main geotechnical instruments and their relationships with greater efficiency in monitoring and data control. As a result, direct relationships between variables were obtained, as well as recommendations for more effective monitoring using technologies, an alternative for automation in security management and decision making.

Keywords: dams; geotechnical instrumentation; monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição da precipitação no estado do Pará.....	3
Figura 2 – Distribuição sazonal das chuvas (a) dezembro a fevereiro (DJF) e (b) março a maio (MAM).....	4
Quadro 1 – Proposta de listagem de verificação a ser conduzida.....	8
Quadro 2 – Distribuição da pesquisa por eixo temático adotado.....	9
Figura 3 – Esquema do Piezômetro de Tubo Aberto ou Casagrande.....	14
Figura 4 – Esquema e Detalhamento do Piezômetro Pneumático.....	15
Figura 5 – Esquema e Detalhamento do Piezômetro Hidráulico.....	16
Figura 6 – Esquema e Detalhamento do Piezômetro Elétrico.....	17
Figura 7 – Esquema e Detalhamento do Piezômetro de Corda Vibrante.....	18
Figura 8 – Esquema construtivo de piezômetros para monitoramento.....	19
Figura 9 – Medidor de Nível Água.....	20
Figura 10 – Perfil típico de um instrumento de medição de nível d'água.....	21
Figura 11 – Perfil de instalação dos instrumentos.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do banco de dados da pesquisa realizada.....	6
Tabela 2 – Dados do banco de dados após filtro realizado.....	6

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
LISTA DE TABELAS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 Objetivo Geral	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
2 MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS.....	5
2.2 CRITÉRIOS UTILIZADOS NA PESQUISA.....	5
2.3 AVALIAÇÃO DOS TIPOS DE INSTRUMENTOS E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO.....	7
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
3.1 BARRAGENS E MONITORAMENTO.....	10
3.2 INSTRUMENTAÇÃO APLICADA À BARRAGENS.....	11
3.3 PIEZOMETRIA.....	13
3.3.1 Processo construtivo e Gerenciamento operacional	17
3.3.2 Indicadores de nível d'água (INA)	19
3.4 IMPORTÂNCIA DO ACOMPANHAMENTO NO CONTEXTO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS: MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DOS INSTRUMENTOS GEOTÉCNICOS EM UMA BACIA DE REJEITO: ESTUDO DE CASO EM BARCARENA.....	21
4 CONCLUSÕES	26
REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

A instrumentação geotécnica consiste em técnicas utilizadas para medir e estimar o comportamento dos materiais naturais em interação com as estruturas em todas as fases do empreendimento. As barragens são classificadas como estruturas destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos (Santos 2019). A instrumentação geotécnica é utilizada durante a fase de construção para assegurar a segurança, minimizar os custos, controlar procedimentos e cronograma de obra. Após a obra finalizada a instrumentação traz benefícios como o monitoramento de infiltrações, de poropressão e deformações superficiais e de subsuperfície (Souza 2012).

As primeiras aplicações de instrumentação em obras geotécnicas ocorreram entre 1930 e 1940, porém é considerado que a instrumentação de barragens de terra no Brasil passou a existir de maneira efetiva, somente a partir do final da década de 50 e início de 60 (Machado 2007). A instrumentação utilizada neste período consistia basicamente da instalação de medidores de recalque de placa (única) na superfície da fundação, medidores de vazão do sistema de drenagem e piezômetros instalados no maciço e na parte mais superficial da fundação, refletindo desta forma a preocupação básica da época, que era com as poropressões durante o período construtivo (Affonso 2004).

Na década de 70 verificou-se uma grande dificuldade para importação de instrumentos, o que resultou em grande incentivo ao desenvolvimento de instrumentos de procedência nacional. Com o avanço tecnológico, surgiram instrumentos mais sofisticados, como transdutores pneumáticos e elétricos. Ao final do século XX, registrou-se o aparecimento de sistemas automatizados de aquisição de dados (Affonso 2004). Verificam-se diversos instrumentos geotécnicos que têm funções correlacionadas, e são frequentemente utilizados. Destacam-se os piezômetros, marcos superficiais, inclinômetros, medidores de vazão e Indicadores de nível d'água.

O objetivo é detectar problemas com suficiente antecedência, permitindo a intervenção com medidas corretivas. A necessidade de fortalecer tal discussão é associada ao elemento forte de estudo da estabilidade de taludes em barragens e dos efeitos da percolação da água com potencial de comprometer a sua estrutura.

O monitoramento da estabilidade de taludes visa evitar qualquer forma de movimentação de solo/rocha que comprometa a infraestrutura local. Com isso, o controle do efeito da

percolação é essencial, devendo ser evitadas as condições de (Fonseca *et al.* 2021): galgamento, erosão interna (*piping*) pelo maciço ou pela fundação; e instabilidade com liquefação (particularmente dos rejeitos, que são decisivos nestas estruturas quando construídas para montante). A liquefação é o que pode ocorrer em solos granulares, quando as poropressões se elevam a ponto de anular as tensões efetivas, fazendo com que o material se comporte como um líquido. O processo pode ser dinâmico (por efeito de vibrações e terremotos) ou estático (carregamentos rápidos, subida do nível de água e elevada precipitação pluviométrica). De forma geral, sedimentos granulares finos e uniformes saturados, têm maior potencial de liquefação, dependendo do estado de compactação.

Brasil (2020) apresenta que o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração (CNBM) por meio do Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), em 2020 contava com 871 barragens cadastradas, das quais 435 (50%) estavam na Plano Nacional de Segurança de Barragens. Destas, quanto à Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA), tinha-se: CRI - Alto (12%), Médio (13 %) e Baixo (75 %); e DPA - Alto (59 %), Médio (32 %) e Baixo (9 %). Tais números reforçam a necessidade de se focar nas medidas de monitoramento preventivo como forma de gestão de segurança, adotando-se a melhor e de maior potencial de continuidade de acompanhamento e metodologia de instrumentação associada.

1.1 JUSTIFICATIVA

As estruturas geotécnicas são parte integrante de um projeto minerário, e sem elas os processos de extração, beneficiamento e transporte do minério não seriam viáveis (Cerqueira 2017), com isso é de extrema importância ser realizado o monitoramento geotécnico para monitorar o desempenho e segurança das estruturas como barragens, pilhas de estéril, taludes da cava, etc. O monitoramento é, de forma geral, o acompanhamento do desempenho do instrumento ao longo do tempo, de forma a possibilitar a identificação de possíveis problemas antes que eles se concretizem, registrando regularmente as métricas estabelecidas para aquela estrutura.

O trabalho proposto visa caracterizar os principais instrumentos geotécnicos utilizados em empreendimentos mineiros destacando dois tipos de instrumentação geotécnica específica: o monitoramento piezométrico e o monitoramento do indicador do nível de água. Com o intuito de melhor representar o monitoramento realizado por estes instrumentos são utilizados dados

hipotéticos de leituras piezométricas e do Indicador do nível de água instalados em uma Bacia de sedimentação de uma empresa de mineração.

O foco na Amazônia Oriental justifica-se pelas questões climáticas, de forma mais específica o volume de precipitação pluviométrica na região, que caracteriza um elemento de risco à estabilidade das barragens, dependendo dos eventos associados e sua intensidade.

A Figura 1 simplifica esta questão. Os totais anuais entre 2400 e 3330 mm correspondem a aproximadamente 10% da área do estado do Pará (faixa litorânea paraense, com penetrações para o continente, no eixo Belém-Tailândia, e também a nordeste da Ilha do Marajó); e cerca de 50% da área total do estado apresenta precipitação anual compreendida entre 1900 e 2400 mm (Sul e a Sudoeste do Pará incluindo uma porção ao norte e nordeste), com apenas 40% do estado em uma área de menor precipitação anual, entre 1350 e 1900 mm (Moraes *et al.*, 2005).

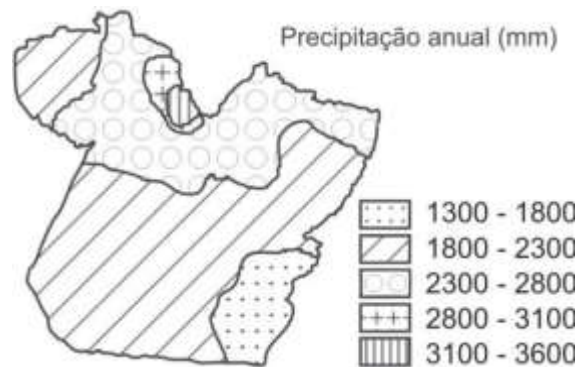


Figura 1 - Distribuição da precipitação no estado do Pará.
Fonte: Moraes *et al.* (2005).

Em se tratando do período chuvoso com o ciclo dezembro a fevereiro (DJF) e março a maio (MAM), tem-se um máximo pluviométrico, com valores sazonais de 700 a 900 mm em DJF, englobando os setores oeste e sudoeste do Pará (Figura 2); e com valores acima de 1000 mm na faixa litorânea do Amapá e Pará, incluindo a ilha de Marajó. Enquanto que em MAM ocorre uma diminuição da precipitação na parte sul/sudeste da Amazônia oriental, e a intensificação na porção setentrional da Amazônia, ocorrendo o máximo entre 900 e 1000 mm no oeste do Pará (região de Santarém) e máximos entre 1000 e 1400 mm na maior parte do Amapá e nordeste do Pará (Souza *et al.* 2009).

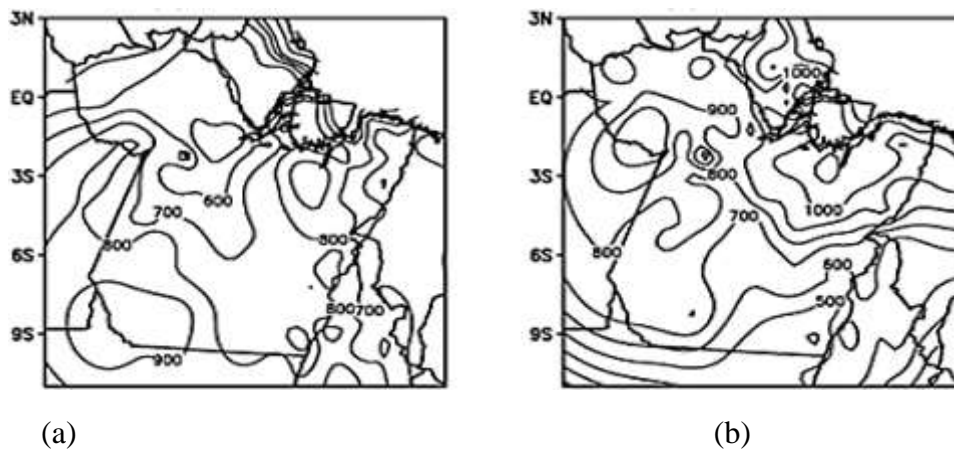


Figura 2 - Distribuição sazonal das chuvas (a) dezembro a fevereiro (DJF) e (b) março a maio (MAM).
Fonte: Souza *et al.* (2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar as principais técnicas de instrumentação de barragens, focando na descrição dos tipos de instrumentação, suas vantagens e desvantagens, metodologia, leituras, desenvolvimento ao longo dos anos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para excursão de tal objetivo, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- (i) Realizar um levantamento bibliográfico sobre instrumentação de barragens;
- (ii) Individualizar os tipos de instrumentos e suas principais características de funcionamento;
- (iii) Discutir a importância do acompanhamento de suas medições no contexto da segurança de barragens.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS

Esta etapa consiste no levantamento de dados acerca dos tipos de instrumentação geotécnica desenvolvidas para barragens/bacias de rejeito. A pesquisa segue a proposta de Brereton *et al.* (2007), o qual propõem que o processo de revisão sistemática de literatura seja realizada em duas fases: a primeira com o planejamento da revisão, onde é especificado as questões que serão pesquisadas; e a segunda fase é a seleção dos principais trabalhos, um filtro para extração dos dados necessários.

Na primeira fase serão utilizadas as seguintes palavras: Piezômetros, INA'S, bem como o manuseio dos instrumentos e monitoramento de barragens. Como ferramenta de pesquisa será usada a plataforma SciELO, Google acadêmico e o google comum, BDTD, além do Portal de Periódicos da CAPES.

No segundo momento, os artigos serão categorizados em Tipo (artigo científico, dissertação, tese, relatório técnico, livro), o foco do trabalho (Piezômetros, INA's, Monitoramento de barragens, estudo de caso, etc). A revisão é dividida na visão geral das estruturas geotécnicas e suas funções, a definição dos principais parâmetros de medição, os tipos de instrumentos piezométricos e suas vantagens e desvantagens.

2.2 CRITÉRIOS UTILIZADOS NA PESQUISA

Após a realização das pesquisas com o uso das palavras-chaves, foram encontrados 1934 artigos, dissertações, livros e TCC's sendo, 1739 da plataforma do Google acadêmico, 5 da base de dados do Scielo, 18 na plataforma da Capes e 172 da Biblioteca digital BDTD. Diante dos trabalhos encontrados foram realizados filtros, como título, para inclusão ou exclusão dos que não abordavam o tema proposto pelo trabalho.

Com isso, dos 1934 trabalhos (artigos, dissertações, livros e TCCs), foram selecionados apenas 49 para próxima fase (Tabela 1), a redução foi devido aos textos estarem aplicados a barragens específicas, ou por não conter no título realmente algo vinculado a instrumentação geotécnicas. Em seguida, ocorreu a seleção por resumos e conteúdo dos trabalhos, onde dos 49 trabalhos analisados, passaram para a próxima etapa de seleção 28 artigos (Tabela 2).

Tabela 1 – Dados do banco de dados da pesquisa realizada.

Base de dados	Títulos		Artigos		Dissertações		Livros		TCC's	
	Total	Aceitos	Total	Aceitos	Total	Aceitos	Total	Aceitos	Total	Aceitos
Google acadêmico	1739	26	1720	15	3	1	8	3	8	7
Scielo	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0
Capes	18	6	11	1	7	5	0	0	0	0
BDTD	172	17	1	1	169	15	0	0	2	1
Total	1934	49	1737	17	179	21	8	3	10	8

Fonte: Dados resultantes da pesquisa.

Tabela 2 – Dados do banco de dados após filtro realizado.

Base de dados	Total	Aceitos
Artigos	17	6
Dissertações	21	14
Livros	3	2
TCC's	8	6
Total	49	28

Fonte: Dados resultantes do filtro.

Por fim, foi realizada a leitura do artigo na íntegra, sendo escolhido 6 artigos, 14 dissertações, 2 livros e 6 trabalhos de conclusão de curso (Tabela 2). Dentre esses 28 trabalhos selecionados, a plataforma do google acadêmico foi a que apresentou maior quantidade de trabalhos que serão utilizados neste projeto, representando 64% de todos os trabalhos de

pesquisas selecionados.

2.3 AVALIAÇÃO DOS TIPOS DE INSTRUMENTOS E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO

A pesquisa centra-se em um estudo de caso, onde as informações são obtidas a partir de dados secundários de uma bacia de rejeito do processo de beneficiamento de Caulim. Neste contexto, será realizado o levantamento de documentação sobre a instalação, os aspectos técnicos, legais e ambientais relacionados aos instrumentos geotécnicos instalados em uma bacia de rejeito de mineração, e desta forma apontar seus principais aspectos na forma de Listas de Verificação, utilizada como condutora da pesquisa.

Em relação aos aspectos técnicos da bacia de rejeito, a pesquisa objetiva o estudo de sua construção, operação e monitoramento baseados na instrumentação geotécnicas disposta. Já em relação aos aspectos legais e ambientais, o foco deste trabalho será levantar os principais órgãos brasileiros relacionados à gestão de barragens de rejeito de mineração, a Política Nacional de Segurança de Barragens e seus instrumentos, baseada na Lei 12.334 20/09/2010 e na Resolução 13/2019.

O Quadro 1 demonstra a estrutura das Listas de Verificação obtidas a partir de tais levantamentos.

O Quadro 2 apresenta a distribuição da pesquisa conforme a proposta do Quadro 1. O horizonte temporal é pós ano 2000, até 2021. É reconhecida a importância da temática, porém, a pesquisa indica que falta maior sistematização desta abordagem mais voltada à investigação operacional de barragens, ficando esta ainda concentrada em trabalhos acadêmicos.

Lista de verificação	Informações
Aspectos construtivos e operacionais dos instrumentos geotécnicos em uma bacia de rejeito.	Definições
	Operações
	Classificação
	Processo construtivo
	Gerenciamento Operacional
Monitoramento e inspeção dos instrumentos geotécnicos em uma bacia de rejeito.	Componente da Bacia de rejeito
	Instrumentação geotécnica

Quadro 1 – Proposta de listagem de verificação a ser conduzida.

Critérios de análise		Autor, Ano
Aspectos construtivos e operacionais dos instrumentos geotécnicos	Barragens e Monitoramento	Castro 2008
		Martins 2016
		Cerqueira 2017
		Dias 2015
		Dias 2017
		Souza 2018
	Instrumentação aplicada às barragens	Cruz 2004
		Machado 2007
		Duarte 2008

		Silveira 2015
		Martins 2016
	Piezometria	Fonseca 2003
		Cruz 2004
		Silveira 2006
		Machado 2007
		Castro 2008
		Cerqueira 2017
		Azevedo 2019
		Santos 2019
	Indicadores de nível d'água (INA)	Fonseca 2003
		Cerqueira 2017
		Santos 2019
		Oliveira & Silva 2020
Monitoramento e inspeção dos instrumentos geotécnicos		Castro 2008
		Guimarães 2021
		Mello <i>et al.</i> 2021

Quadro 2 – Distribuição da pesquisa por eixo temático adotado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 BARRAGENS E MONITORAMENTO

Barragens são definidas como barreiras construídas para armazenamento de água ou contenção de rejeitos do processo de beneficiamento de minério, as barragens de rejeitos de mineração surgiram com a finalidade de reduzir o impacto ambiental oriundo do descarte direto de resíduos na natureza (Martins 2016). Para o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), barragem é “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”. As barragens de contenção de rejeitos, especificamente, consistem em uma contenção dos rejeitos realizada através da implantação de barragens construídas com o próprio rejeito, podendo ser empregado também materiais de decapeamento, bota-fora e estéreis (Castro 2008).

No Brasil, a elaboração de projetos de barragens de mineração é normatizada pela NBR 13.028 de 2006, e a lei N° 12.334 de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), esta mesma lei ainda estabelece limites para caracterização de barramento. Esta Lei aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

- (i) altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);
- (ii) capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- (iii) reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- (iv) categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6°.

O monitoramento das barragens é uma atividade de gestão sobre a performance e a segurança de estruturas geotécnicas. É, de maneira geral, um controle da variação dos níveis, vazões e pressões da água represada e percolada através dos maciços e o controle das variações em tensões vs. deformação às quais estas estruturas estão submetidas ao longo do tempo (Cerqueira 2017). Para Martins (2016), o monitoramento deve incluir: inspeções visuais das

barragens e instalações, inspeção de todos os registros de medição, registro e notificação de irregularidades, organização de ações corretivas e relação de proximidade com os projetistas e autoridades de controle.

Atualmente são utilizadas várias ferramentas para o controle e monitoramento de barragens, como ferramentas usuais, o monitoramento por meio de instrumentação e inspeções de campo, além de projetos realizados para construção ou para adequação, contendo todos os critérios e parâmetros adequados (Dias 2015, 2017). O mais novo sistema de monitoramento foi estabelecido em 2017 pela ANM, onde a mesma aprovou a portaria de N° 70.389, no qual estabeleceu para todas as barragens de mineração, que o empreendedor deve implementar um sistema de monitoramento de segurança de barragem, com acompanhamento em tempo integral através de videomonitoramento 24 horas por dia (com armazenamento de pelo menos 90 dias) para barragens classificadas com DPA alto e as informações devem estar disponíveis para as equipes e sistemas da Defesa Civil e da ANM.

Os instrumentos de monitoramento, quando instalados, devem ser avaliados em função de sua eficiência no monitoramento da segurança estrutural da barragem e devem possuir confiabilidade nos dados de leitura emitidos. Estas informações devem ter as seguintes características: exatidão, sensibilidade, precisão, linearidade, histerese, robustez e durabilidade (Machado 2007). É recomendado que o empreendedor possua também mapas georreferenciados da área, com a localização de todos os instrumentos de medições e monitoramento das barragens, indicando os status (funcionais, ativos ou inativos, situação – normal, alerta ou emergência), visando uma melhor compreensão dos relatórios de auditoria (Souza 2018).

A norma mais atualizada sobre monitoramento foi disponibilizada pela Agência Nacional de Mineração (ANM) com a resolução 13/2019, publicada no Diário Oficial da União em caráter emergencial, logo após o desastre de Brumadinho. Dentre as principais mudanças, estão as prorrogações dos prazos para descaracterização de barragens a montante e a obrigatoriedade do monitoramento automático em tempo real e integral.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO APLICADA À BARRAGENS

Segundo Silveira (2015), a instrumentação é “conjunto de dispositivos instalados nas estruturas e em suas fundações objetivando monitorar seu desempenho através de medições de parâmetros, cujos resultados servirão para avaliar suas condições de segurança”.

O processo de instrumentação inclui a execução de várias atividades como a seleção dos tipos de instrumentos que serão utilizados, sua instalação, controle de seu funcionamento e a documentação ou transmissão dos dados analisados, sendo exigidas as seguintes informações: identificação e localização do instrumento, posição pesquisada, profundidade do furo de teste, elevação do topo do buraco, detalhes do aterro, tipo do instrumento, profundidade, data da coleta e validação dos procedimentos, frequência de monitoramento, dados de interpretação, calibrações e dados de manejo e armazenamento (Martins 2016).

A determinação do número de instrumentos necessários depende do comprimento da barragem, da altura máxima, de características geológicas da fundação, de características dos materiais utilizados no corpo da barragem e das etapas construtivas (Dunnicliff 1988 apud Machado 2007). A instrumentação de barragens é um dos recursos utilizados para avaliar a segurança da obra ao longo de sua vida útil. De acordo com Cruz (2004), são três os objetivos da instrumentação: verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados em projeto; verificar a adequação de métodos construtivos; e verificar as condições de segurança das obras.

Quanto aos tipos de instrumentos, entre os principais utilizados estão os medidores de nível de água, os piezômetros, a célula de tensão total, os medidores de deslocamento e medidores de vazão. Machado (2007) cita a classificação dos instrumentos de medida em duas categorias, dependendo da finalidade:

(i) Instrumentos usados para determinar as propriedades de solos e rochas *in situ*: medem parâmetros geotécnicos como resistência, compressibilidade e permeabilidade, sendo usados normalmente durante a fase de projeto das obras (ex. piezocone, palheta, pressiómetro).

(ii) Instrumentos usados para monitorar o comportamento da obra durante construção/operação: podem envolver medidas de pressão da água subterrânea, tensão total, deformação e/ou carregamento aplicado (ex. piezômetros, células de carga, extensômetros, inclinômetros).

Um dos principais controles de segurança para monitoramento é o controle do nível (Piezométrico e Ina's), os quais são utilizados como ferramentas auxiliares para identificação inicial de possíveis anomalias nos padrões de leitura dos instrumentos da barragem (Duarte 2008). O monitoramento piezométrico, por exemplo, trata da aquisição de dados e leituras de campo, e do controle e da avaliação das variações dos níveis, vazões e pressões da água percolada através dos poros, buscando relacionar estas variações com os modelos e as análises de

percolação e de estabilidade física das estruturas geotécnicas, acompanhando a performance de elementos drenantes dimensionados (Cerqueira 2017).

3.3 PIEZOMETRIA

A instrumentação piezométrica proposta contempla apenas o uso de piezômetros tradicionais, como o piezômetro do tipo Casagrande e medidores simples do nível estático da água. A definição sobre piezômetros varia de autor para autor, Azevedo (2019) define o piezômetro como um instrumento para medição da pressão da água intersticial em maciços rochosos e de terra.

Castro (2008), cita que, na seleção de um piezômetro é essencial que a permeabilidade do solo seja considerada se as poropressões daquele solo estão sendo registradas com um mínimo intervalo de tempo de resposta (time lag). A instalação de qualquer sistema de piezometria e do tipo de piezômetro, basicamente requer: (i) O registro da poropressão no terreno; (ii) Que não aconteça erro na leitura; (iii) Adoção de um tipo de piezômetro que cause o mínimo de interferência no solo natural a ser instalado; (iv) Que o piezômetro deva responder rapidamente a mudanças nas condições da água subterrânea; (v) Que o piezômetro seja resistente e confiável quanto à interferência no meio ambiente e permaneça estável por longo período de tempo; (vi) Que ele tenha capacidade de medição contínua ou intermitente, se requerido; (vii) Confiabilidade quanto ao sistema completo; (viii) Avaliação do experimento para gerar uma correta calibração, instalação e manutenção; e (ix) Um piezômetro mais confiável possível e que possa ser calibrado in situ, em intervalos de tempo regulares.

Os piezômetros então entre os instrumentos mais importantes para a segurança de barragens, de forma que apresentam inúmeros tipos, para que o mais adequado para cada circunstância seja escolhido. Entre os principais modelos, estão (Fonseca 2003, Cruz 2004, Silveira 2006):

(i) Piezômetro de tubo aberto: Os piezômetros de tubo aberto são também conhecidos como piezômetros de Casagrande ou piezômetros standpipe (Figura 3). Cruz (2004) difere este instrumento do medidor de nível d'água, em termos construtivos, no comprimento do trecho perfurado e na extensão do trecho do furo preenchido com material drenante, limitados usualmente a poucos metros. Podem ser instalados dois ou mais instrumentos em um mesmo furo de sondagem em função do diâmetro do furo de sondagem. Neste caso, os piezômetros são instalados em diferentes alturas.

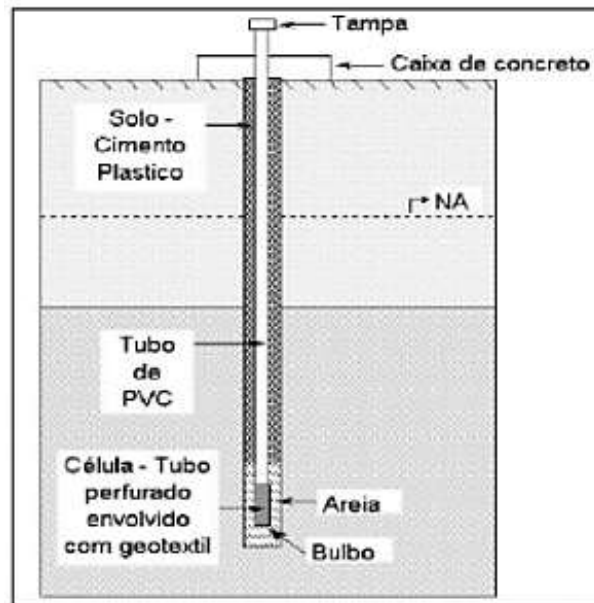


Figura 3 - Esquema do Piezômetro de Tubo Aberto ou Casagrande.
Fonte: Fonseca (2003).

(ii) Piezômetro pneumático: Cruz (2004) descreve o funcionamento dos piezômetros pneumáticos como o equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível, em que de um lado atua a água cuja pressão se deseja medir e do outro lado atua um gás cuja pressão é variável e conhecida (Figura 4).

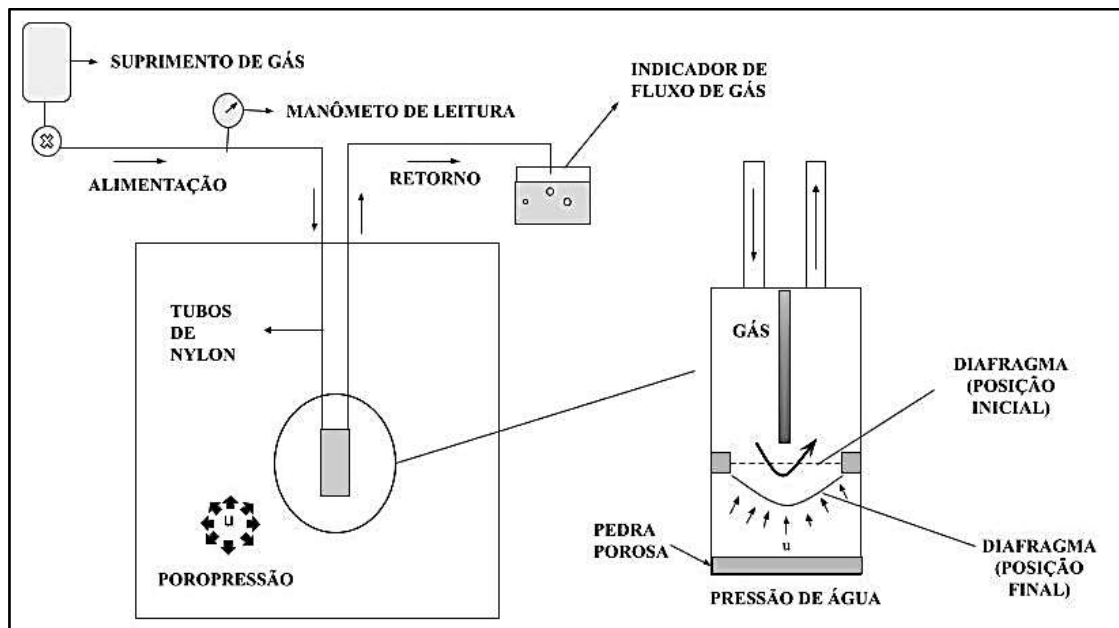


Figura 4 - Esquema e Detalhamento do Piezômetro Pneumático.
Fonte: Modificado de Fonseca (2003).

A leitura da pressão, de acordo com Silveira (2006), é feita da seguinte forma: aplica-se uma pressão crescente, através da tubulação de alimentação e mede-se a intensidade de pressão na tubulação de retorno, momento em que a pressão se iguala à pressão intersticial do solo. Quando a pressão na tubulação de retorno atinge zero, é possível determinar exatamente a pressão exercida pela água que passa através da pedra porosa, em equilíbrio com a água intersticial.

(iii) Piezômetro hidráulico: Os piezômetros hidráulicos são conhecidos também como piezômetros do tipo inglês ou piezômetro hidráulico fechado (Santos 2019). Eles foram desenvolvidos para instalação na fundação e no aterro de barragens de terra durante a construção. De acordo com Cruz (2004), estes piezômetros são considerados por vários engenheiros como sendo o mais indicado para medidas de poro-pressão, tanto na fase construtiva quanto na de enchimento e de operação do reservatório (Figura 5).

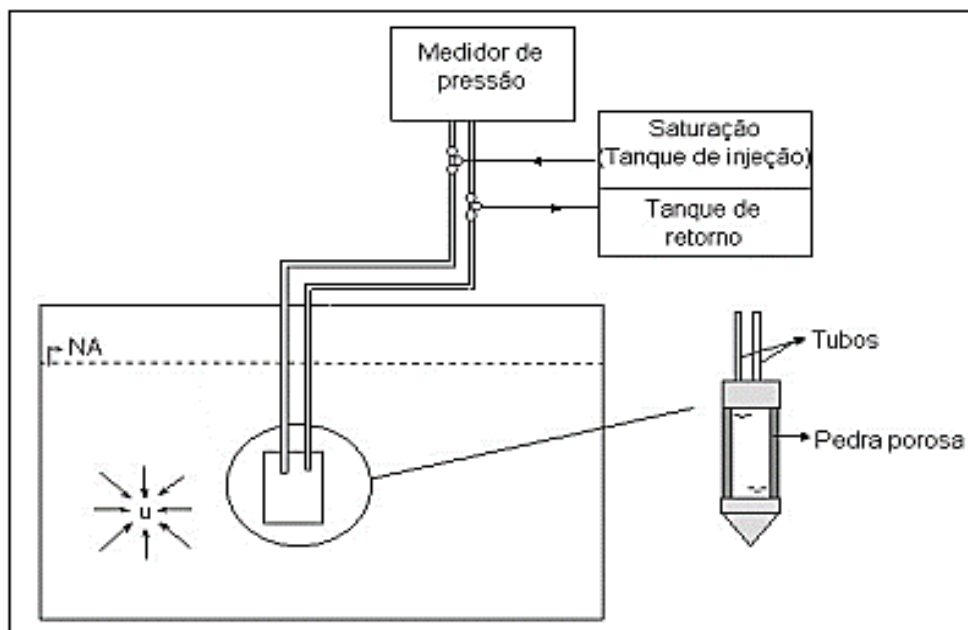


Figura 5 - Esquema e Detalhamento do Piezômetro Hidráulico.

Fonte: Fonseca (2003).

(iv) Piezômetro elétrico de resistência: São piezômetros constituídos por um diafragma de aço inoxidável no qual são fixados extensômetros elétricos de resistência (Figura 6), oferecendo os mais baixos tempos de resposta entre os piezômetros de membrana (Fonseca 2003). As deflexões do diafragma são acompanhadas por variações imediatas da resistência dos

extensômetros fixados na sua superfície e uma consequente resposta diferenciada do sinal elétrico de saída (de magnitude proporcional à poropressão medida) é captada em um medidor externo.

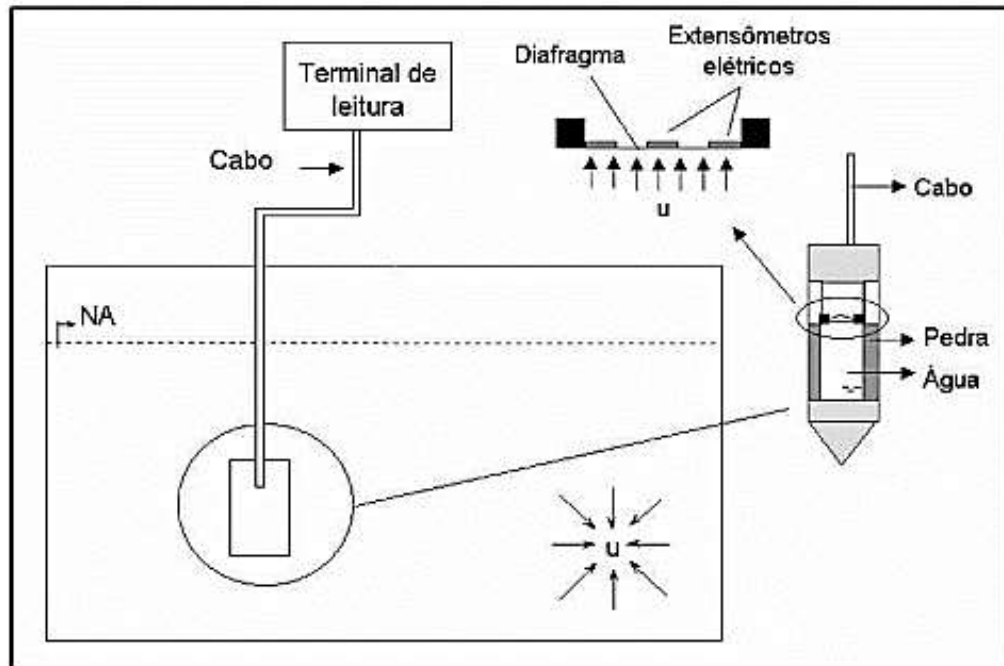


Figura 6 - Esquema e Detalhamento do Piezômetro Elétrico.

Fonte: Fonseca (2003).

(v) Piezômetro de Corda Vibrante: Os piezômetros de corda vibrante são instrumentos constituídos por um corpo cilíndrico de aço inox, alojando internamente uma pedra porosa e uma membrana de aço inox, em cuja face é fixado um fio de aço (corda) tensionado e passando através de um eletro-ímã (Figura 7). A blindagem dos cabos elétricos de conexão entre a célula piezométrica e o medidor externo constitui procedimento fundamental para garantir a integridade do instrumento contra efeitos de sobretensões e/ou descargas elétricas (Fonseca 2003).

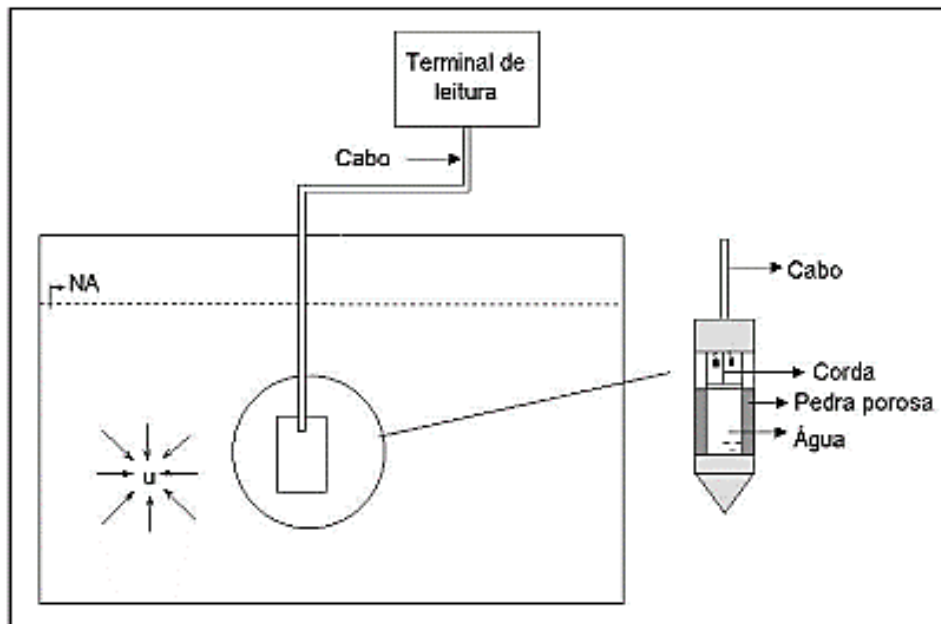


Figura 7 - Esquema e Detalhamento do Piezômetro de Corda Vibrante.
Fonte: Fonseca (2003).

3.3.1 Processo construtivo e Gerenciamento operacional

Conforme Machado (2007) os piezômetros podem ser instalados em diferentes profundidades a jusante da barragem, mas não devem ser instalados em locais onde o maciço rochoso seja pouco fraturado, ou onde o ensaio de perda d'água sob pressão não indique perda d'água. Para as regiões rochosas recomenda-se a instalação de piezômetros em cotas diferentes.

Por se tratar de um instrumento que oferece a medida da carga piezométrica atuante na camada alvo, e conseqüentemente, precisa de uma célula de areia local para equalizar as variações de subida e descida da carga piezométrica, o método de instalação mais adequado é o emprego da coluna de tubulação (Cerqueira 2017) (Figura 8). A seqüência de instalação de um piezômetro Casagrande é muito parecida com o procedimento de instalação do indicador de nível d'água (INA), seguem abaixo algumas ressalvas específicas do procedimento de instalação do piezômetro do tipo Casagrande:

- (i) Perfuração da tubulação: No caso do piezômetro Casagrande, o trecho perfurado do tubo é bem menor que o trecho perfurado do INA. Geralmente adota-se 1 metro de comprimento para cada célula de areia.
- (ii) Selagem/preenchimento do furo de sondagem: Para a confecção do selo, a bentonita

pode ser simplesmente lançada à partir do início do furo em forma de lascas ou pelotas (se o furo for raso), ou diluída em água e conduzidos por meio de mangotes (no caso de furos profundos) até o nível correto do selo (logo acima da célula de areia) (Figura 8). A espessura do selo deve seguir a especificada no projeto da barragem. Preencher todo trecho restante acima da cota superior do selo de bentonita utilizando o solo disponível nos arredores da praça de sondagem, ou utilizando uma mistura de água, cimento e bentonita também especificada em projeto.

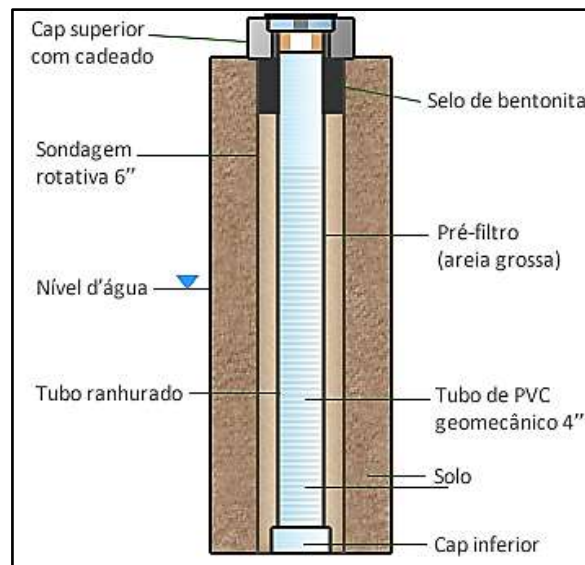


Figura 8 - Esquema construtivo de piezômetros para monitoramento.
Fonte: Bisol (2022).

O nível de água dentro do tubo varia conforme a variação da carga piezométrica da camada saturada em que a célula de areia foi posicionada. A profundidade, ou a elevação, do nível d'água em relação a uma referência (boca do furo, por exemplo), pode ser determinada por meio de um equipamento chamado medidor de nível d'água, também chamado de Pio, o qual também pode ser empregado nos INAs (Figura 9).



Figura 9 - Medidor de Nível Água
 Fonte: MLB-1272229179 (2022).

No funcionamento do piezômetro pode-se observar que a água dos poros passa através do filtro do bulbo drenante do instrumento até atingir o equilíbrio dentro do tubo com a poropressão na fundação. A altura da água acima do bulbo menos a cota de topo do instrumento, temos a cota piezométrica, já a carga piezométrica é obtida através da subtração da cota piezométrica menos a cota de instalação (Silveira 2006). Para uma correta medição, evitando intercorrências, devemos isolar o ambiente de qualquer possibilidade de contato, seja com a pressão atmosférica, quanto com qualquer outra camada de terreno que seja diferente daquela usada para fazer a medição. Também deve ser instalado algum tipo de proteção contra vandalismo, evitando que materiais sejam jogados dentro do tubo (Castro 2008).

3.3.2 Indicadores de nível d'água (INA)

Os Indicadores de nível d'água (INA) são instrumentos desenvolvidos para identificar a cota na qual o solo se encontra saturado, definindo assim o nível freático naquele ponto. O princípio geral dos instrumentos para a medição do nível d'água em maciços de solo ou rocha consiste basicamente em se acessar diretamente a água em profundidade (por meio da simples execução de furos de trado ou sondagem, por exemplo) e medir a cota da sua superfície por meio de um dispositivo qualquer (usualmente por cabo graduado dotado de um sensor elétrico na extremidade inferior e um emissor sonoro ou luminoso na superfície) (Figura 9).

Os medidores podem ser instalados aproveitando uma sondagem pré-existente, no caso de furos feitos para os piezômetros ou através de uma sondagem à percussão com o trépano de lavagem (Fonseca 2003). O medidor pode ser constituído por um tubo de PVC perfurado que é instalado no furo de sondagem, envolvido por material filtrante (geotêxtil) e drenante (areia),

neste caso visando garantir a completa integridade do furo (Santos 2019). Uma camada selante é utilizada para vedar o espaço anular superior entre o tubo e o furo e uma estrutura de concreto é feita em superfície para proteção do instrumento contra atos de vandalismo (Figura 10).

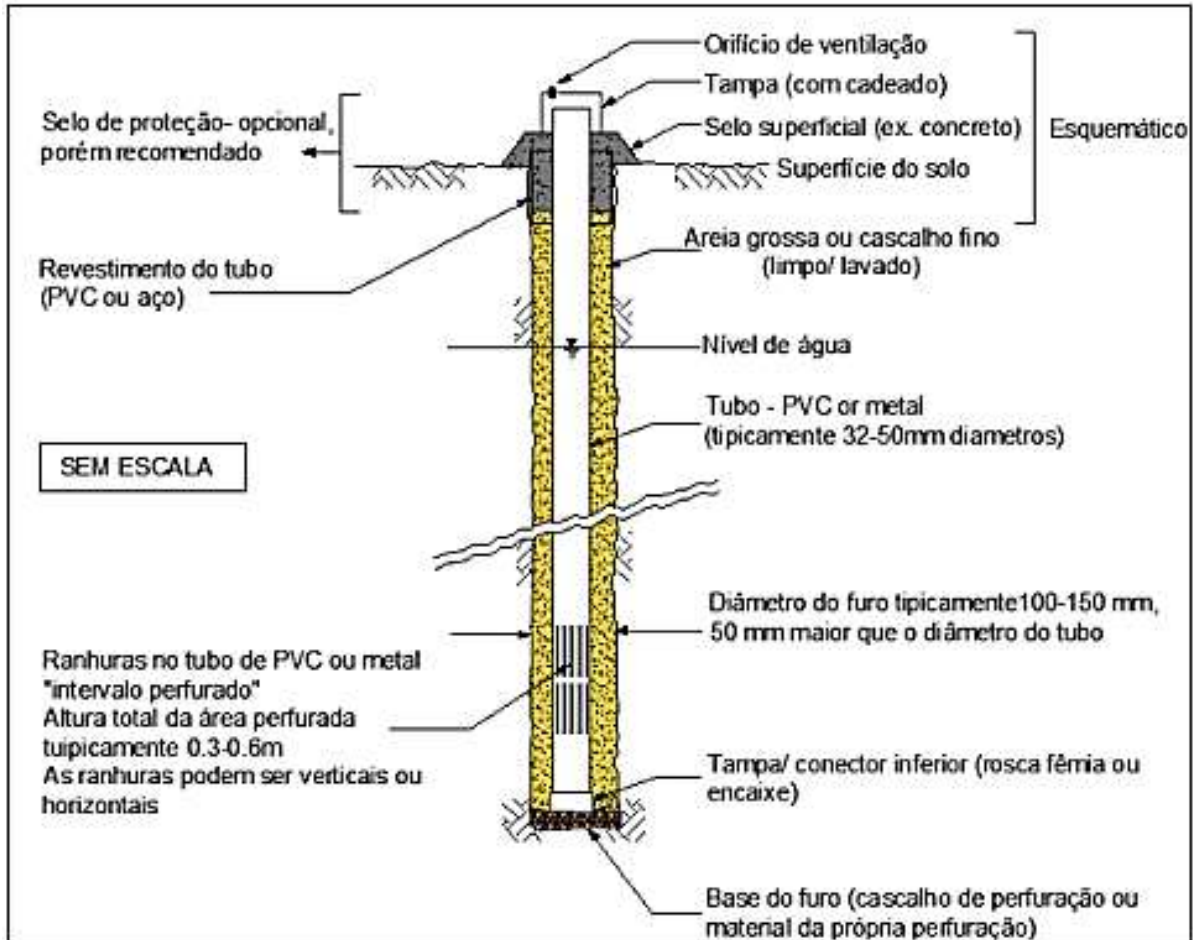


Figura 10 - Perfil típico de um instrumento de medição de nível d'água.
Fontes: Modificado de VALE/Coffey (2016) apud Cerqueira (2017).

A leitura dos INAs é feita com um medidor de nível de água elétrico e deve ser realizada periodicamente, levando em consideração o afluxo de água decorrente da pluviosidade ou da quantidade de rejeito (Geocoring 2020).

Por se tratar de um instrumento que oferece somente uma média do nível do lençol freático, e conseqüentemente, precisa de uma célula de areia extensa para comportar as variações de subida e descida do nível de água (Cerqueira 2017), o método de instalação mais adequado é o emprego da coluna de tubulação. Segue abaixo a sequência de instalação de um Indicador de Nível D'água: (i) Pré-Furo com a perfuração a partir do ponto na superfície do terreno; (ii) Implantação da coluna do tubo, que deve ser inserida no furo de sondagem,

realizando a conexão dos tubos com o uso do adesivo especificado pelo fabricante; (iii) Perfuração da tubulação; (iv) Proteção do trecho perfurado; (v) Selagem/preenchimento do fundo do furo de sondagem; (vi) Posicionamento da coluna da tubulação no furo de sondagem; (vii) Lançamento da areia; (viii) Selagem/preenchimento do topo do furo de sondagem; e (ix) Acabamento e proteção.

O nível de água dentro do tubo varia conforme a variação média do nível de água das camadas saturadas em que o furo de sondagem interceptou. A profundidade, ou a elevação, do nível d'água em relação a uma referência (boca do furo, por exemplo), pode ser determinada por meio de um equipamento chamado medidor de nível d'água. O medidor de nível d'água consiste em uma trena graduada acoplada em um apito (pio) (Figura 9) ou em uma sonda elétrica que emite sinais sonoros em contato com a água (Oliveira & Silva 2020).

3.4 IMPORTÂNCIA DO ACOMPANHAMENTO NO CONTEXTO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS: MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DOS INSTRUMENTOS GEOTÉCNICOS EM UMA BACIA DE REJEITO: ESTUDO DE CASO EM BARCARENA.

A Bacia de rejeito do estudo tem como objetivo acumular rejeito do processo de beneficiamento de caulim. Atualmente, encontra-se fora de operação de lançamento de rejeitos, onde seu reservatório foi integralmente recoberto por uma lona plástica e a água da chuva é acumulada e captada por uma bomba flutuante para abastecimento do processo. A estrutura possui formato retangular, seu reservatório foi escavado em terreno natural.

Esta bacia compartilha os taludes a Oeste e Sul com outras bacias que fazem parte do mesmo complexo. Em análise da documentação disponibilizada, constatou-se a construção da estrutura ocorreu em aterro compactado de seção homogênea, com volume do reservatório de 278.404 m³, talude interno com inclinação 1V:2H e talude externo com inclinação 1V:2H, elevação da crista de 24,0 m e 14,0 m de largura. A altura máxima do maciço é de 10,0 m considerando a seção externa. O reservatório da bacia foi escavado até a El. 10,5 m e revestido com geomembrana de PEAD de 1,5 mm de espessura.

A bacia é composta por componentes de segurança como: Sistema de captação e recirculação, neste caso, do tipo flauta, é composta também por um sistema extravasor, através de bombas flutuantes e tubulações. No caso da bacia de rejeito em estudo não é necessário drenagem interna, visto que o reservatório é impermeabilizado com geomembrana de PEAD.

O sistema de instrumentação das Bacias é constituído por 42 instrumentos entre piezômetros tipo Casagrande (PZ's), indicadores de nível d'água (INA's). Os furos foram construídos por sonda elétrica rotativa, acoplada com uma broca de trado manual. Não foi utilizado nenhum fluido de perfuração para evitar contaminação.

Os poços foram perfurados com diâmetro de $4\frac{3}{8}$ " e profundidade variando de 15,40m até 17,40m (Figura 11). Os revestimentos e filtros são em tubo de PVC hidráulico de 2", fechados no topo e no fundo por cap, também de PVC, do mesmo diâmetro.

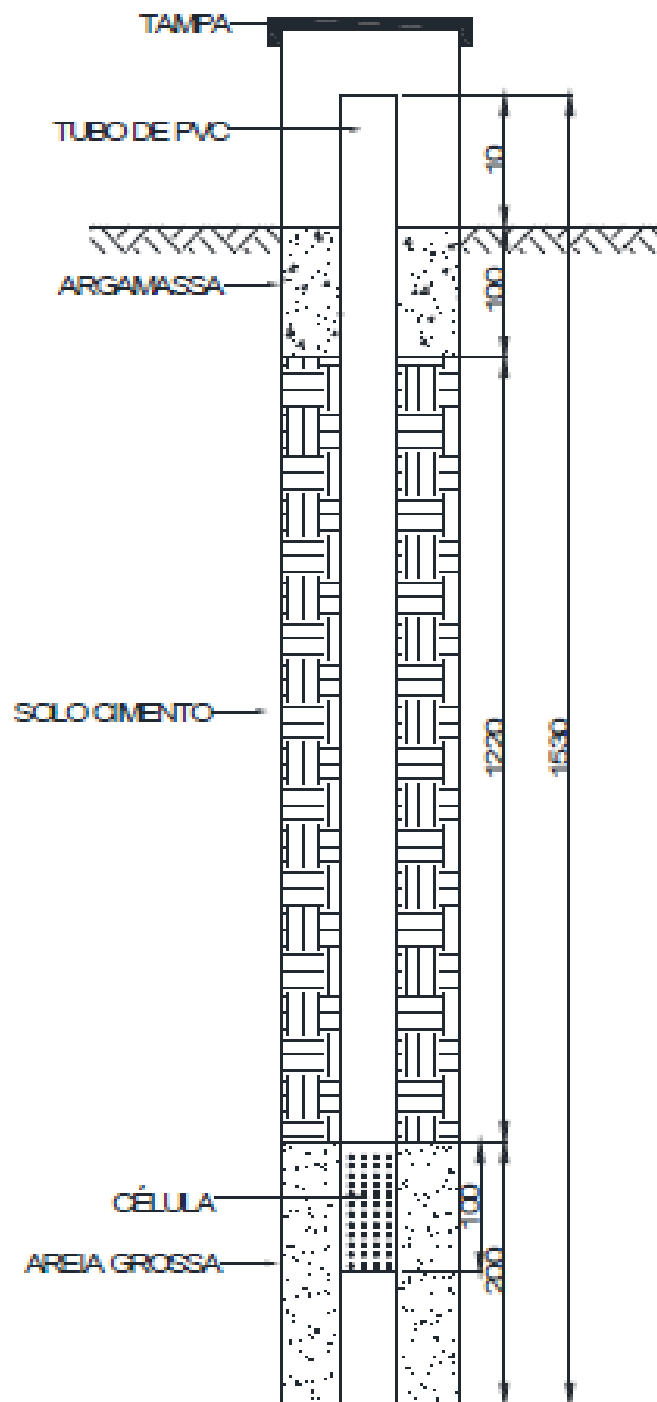


Figura 11 - Perfil de instalação dos instrumentos.
Fonte: Modificado do documento relatório técnico da Bacia.

Os filtros, com abertura de 0,75 mm, foram envolvidos por uma manta de Bidim RT-10 para impedir a entrada de grãos de areia. Em todos os poços, o primeiro revestimento ficou 50 centímetros acima da superfície.

O tubo de boca, em aço galvanizado, com 1,60 m de comprimento, ficou 60 centímetros acima da superfície, tendo no topo um cap roscável em aço galvanizado, para proteger o revestimento (Figura 11).

O espaço anelar compreendido entre a parede do poço e o filtro foi preenchido com pré-filtro, bem selecionado, recobrindo toda a camada filtrante. O espaço restante até a superfície e daí mais 40 centímetros dentro do tubo de boca, foram cimentados com uma argamassa de cimento e areia.

O conjunto apresentado mostra-se fundamental para o processo de segurança de barragens e bacias de rejeito. A Segurança de Barragens é uma área de extrema importância em um empreendimento mineiro.

No projeto no qual o trabalho é baseado, nas atividades de monitoramento são realizadas pelo Técnico de Meio Ambiente ou Operador de Meio Ambiente, onde as leituras dos PZ's e INA's são realizadas com frequência quinzenal. As medições dos Piezômetros são realizadas com medidores de nível de água (Pio), segue as sequências de atividades feitas para leitura dos instrumentos:

- Realizar inspeção visual no piezômetro, verificando suas condições físicas (tampa, estrutura intacta, etc.);
- Abrir o piezômetro e colocar o Pio lentamente;
- Ao ouvir o sinal sonoro, indicando o nível da água, registrar o nível da água;
- Posteriormente, descer o Pio até o fundo do piezômetro, registrando a profundidade do piezômetro no Relatório Piezômetro.

O Comitê Brasileiro de Grandes Barragens traz recomendações relevantes à segurança da barragem, onde a instrumentação está relacionada (Mello *et al.* 2021). A implementação dos instrumentos geotécnicos e de um programa de monitoramento dos mesmos dentro do sistema da bacia é indispensável para o controle e avaliação do comportamento da bacia durante toda sua vida útil, ou seja, desde a sua construção, operação e desativação (Fusaro 2007).

Quando bem dimensionados e localizados os mesmos proporcionam aquisição de dados importantes, possibilitando, detectar se o barramento está sendo submetido a interferências como, deslocamentos, variações de subpressões, aumento da vazão e o galgamento do material do reservatório (Castro 2008).

As principais são:

- Verificar a origem, suficiência e qualidade dos dados disponíveis, dada ênfase às marcas, avaliações e compatibilidade da periodicidade da mesma;
- Verificar a compatibilidade entre profundidade e extensão das investigações de campo, os ensaios de laboratório, o nível de análise dos dados, as características geológicas das fundações, as dimensões e a importância das estruturas, e o vulto e as características das escavações;
- Verificar se o projeto trata adequadamente dos sistemas de detecção, de condução, de medição e de descarga das percolações através do maciço e das fundações;
- Certificar-se de que o esquema de instrumentação abranja os itens essenciais e os locais mais significativos, para observar o comportamento e a operação segura da barragem;
- Certificar-se de que a leitura dos instrumentos essenciais para a segurança da barragem e o manuseio e processamento dos dados correspondentes sejam especificados como prioritários, em relação a quaisquer outros instrumentos de observação porventura instalados;
- Verificar a possibilidade de instruções detalhadas de instalação e operação, e certificar-se de que o de instrumentação e o programa de monitoramento sejam compatíveis com o grau de instrução, de capacidade e dos costumes do pessoal que operará o mesmo.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como finalidade avaliar e descrever os diferentes tipos de instrumentação para monitoramento de barragens de rejeito. Conclui-se que os fatores como: o projeto, a elaboração de planejamento, métodos construtivos, caracterização geológica e estrutural da fundação, monitoramento estrutural durante e após a construção são primordiais para o sucesso de um programa de Segurança de Barragem.

Após a revisão bibliográfica dos instrumentos mais utilizados e o método de leitura, foi possível pautar as principais recomendações para o monitoramento das barragens de rejeito. A principal recomendação é realizar o monitoramento de barragens de maneira automatizada, pois a ausência ou insuficiência de instrumentação geotécnica pode trazer uma avaliação errônea da real situação de estabilidade de uma barragem, com isto a importância de contemplar este método de monitoramento é disponibilizar os dados de maneira imediata e instantânea para tomada de decisões em uma situação atípica, além da construção de uma gestão eficiente de risco.

Regularmente, os instrumentos instalados no monitoramento geotécnico, por exemplo, piezômetros e INA's com leitura manual podem gerar um monitoramento inapropriado, pois estão frequentemente suscetíveis a erros: erros humanos, interpretação defasadas das leituras, erros de processamento de dados. Isso afeta a frequência e qualidade nas leituras, que é fator determinante para o bom acompanhamento do monitoramento da barragem.

REFERÊNCIAS

- Affonso H.M.M. 2004. *Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento*. Dissertation, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 94p.
- Azevedo A.G. 2019. *Análise estatística para identificação de leituras discrepantes de Piezometria: estudo de caso em barragem de terra*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 41p.
- Brasil. 2020. *II Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração*. Brasília,DF, Agência Nacional de Mineração (ANM), 50p.
- Brereton P., Kitchenham B.A., Budgen D., Turner M., Khalil M. 2007. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. *The Journal of Systems and Software*, **80** (4): 571-583. DOI: 10.1016/j.jss.2006.07.009.
- Castro L.V.P. 2008. *Avaliação do comportamento do Nível D'água em Barragem de contenção de rejeito alteada a Montante*. Dissertation, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 103p.
- Cerqueira H.M.L. 2017. *Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração*. Dissertation, Universidade de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia, Ouro Preto, 166p.
- Cruz P. T. da. 2004. *100 barragens brasileiras*. 2. ed. [S. l.], Oficina de textos.
- Dias J. E. C. 2015. *A percepção da comunidade do município de Mariana/MG em relação às ações sociais e ambientais das empresas mineradoras que atuam na região*. Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Minas Gerais, 108p.
- Dias M.V.L. 2017. *Avaliação da Segurança de barragens por meio de análise de instrumentação geotécnica*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 52p.
- Duarte A. P. 2008. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e resíduos industriais no Estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. Dissertation, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, viii, 117p.
- Fonseca A. R. 2003. *Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - estudo de caso das barragens da UHE São Simão*. Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 158p.
- Fonseca A.V., Fonseca A., Oliveira, S. 2021. Fatores de segurança determinísticos em avaliação de estabilidade de barragens de rejeitos: uma reflexão. *Geotecnia*, (151): 53-76. doi.org/10.24849/j.geot.2021.151.04.
- Fusaro T.C. 2007. *Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau*. Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 155p.
- Guimarães F. U. 2021. *A importância da Instrumentação automatizada para a gestão de segurança de barragens de rejeito*. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 49p.
- Louzada A. F. 2018. *Segurança de Barragens e Governança de risco em hidrelétricas na Amazônia*. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Machado, W.G.F. 2007. *Monitoramento de barragens de contenção de rejeito da mineração*. Dissertation - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo.
- Martins, L.F. 2016. *Barragens de Rejeito de Mineração no Brasil: Principais tipos de Barragens, Instrumentação e Monitoramento*. Monografia (Pós em Geologia de Minas e Técnica

- de Lavras a Céu Aberto) - Universidade Federal do Pará, Faculdade de Geologia, Belém.
- Mello F. M., Sandroni S.S., Guidicini G. 2021. Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil. Rio de Janeiro, Comitê Brasileiro de Barragens.
- Moraes B.C., Costa J.M.N., Costa A C.L., Costa M.H. 2005. Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. *Acta Amazônica*, 35 (2): 207-214.
- Oliveira D. M. A de. & Silva C.A. L.X. 2020. Estudo da arte de instrumentação geotécnica, modos de falha e recomendações para auscultação. In: 20º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; 9º Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas; 9º Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens; 6º Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens, Campinas, São Paulo. Anais[...]. <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/cobramseg.2022.0135.pdf>.
- Santos, L.C. 2019. Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia.
- Silveira, J. F. A. 2006. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. 1. ed. [S. l.]: Oficina de textos.
- Silveira, R. M. da. 2015. *Instrumentação e procedimentos visando a segurança de barragens*. Curitiba, Instituto de Engenharia do Paraná - IEP, Dez.
- Souza, D.O.O. 2018. *Interpretação e aplicação dos níveis de controle do Monitoramento geotécnico na avaliação de Segurança de Barragens de Mineração*. Dissertation - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental (PEBGA), Universidade Federal do Pará, Tucuruí.
- Souza, E.B., Lopes, M.N.G., Rocha, E.P. *et al.* 2009. Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [24], n. 2, p. 111-124 doi.org/10.1590/S0102-77862009000200001.
- Souza L. R. 2012. *Desenvolvimento de um sistema de instrumentação para medição do nível d'água com base na tecnologia de fibra óptica*. Dissertation, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Curitiba, 122p.