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

LETÍCIA SIQUEIRA GARZEDIN

SENSOR À BASE DE ACELERÔMETROS MEMS PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Ouro Preto, 2022

LETÍCIA SIQUEIRA GARZEDIN

SENSOR À BASE DE ACELERÔMETROS MEMS PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO

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. Agnaldo José da Rocha Reis, Dr.

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Junho/2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G245s Garzedin, Leticia Siqueira.
Sensor à base de acelerômetros mems para monitoramento de barragens [manuscrito]: estudo de caso. / Leticia Siqueira Garzedin. - 2022.
40 f.: il.: color., tab..

Orientador: 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. Barragens e açudes - Monitoramento. 2. Instrumentação. 3. Equipamentos - Acelerômetros-MEMS. I. Reis, Agnaldo José da Rocha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

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

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Letícia Siqueira Garzedin

Sensor à Base de Acelerômetros MEMS para Monitoramento de Barragens: Estudo de Caso

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

Aprovada em 13 de junho de 2022

Membros da banca

Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Filipe Xavier - (Golder)
Eng. Nelson Luiz Zucheratto Junior - (Traxys)
Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Agnaldo José da Rocha Reis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/06/2022.

Documento assinado eletronicamente por **Agnaldo Jose da Rocha Reis**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/06/2022, às 14:14, 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 **0347205** e o código CRC **32860628**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Aos meus pais e irmãos por todo amor e suporte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por guiar meus passos. Confiar em Seus caminhos sempre me levou aos melhores lugares. À sintonia perfeita do universo, que me permite os encontros certos.

Aos meus pais Omar e Edirlene, por acreditarem em mim e não medirem esforços para que meus sonhos se tornem realidade. Aos meus irmão Isabela e Caio pela cumplicidade e amor sincero. Às famílias Siqueira e Garzedin, especialmente minhas avós Geralda e Solange e meus avôs - anjos até o fim da minha vida - Geraldo e Evandro.

À República Volúpia, lugar que deu sentido a tudo. Moradoras e ex-alunas pelos laços criados e histórias inesquecíveis vividas. Ao Ivan pelo companheirismo ao longo de tantos anos e a todos os amigos que de alguma forma fizeram parte dessa jornada.

À Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pelo ensino gratuito e de qualidade.

À TecWise, Centro Acadêmico de Engenharia de Controle e Automação (CAECA) e Rodetas pelos aprendizados.

Por fim, agradeço a Ouro Preto, cidade palco dos melhores momentos da minha vida.

RESUMO

As barragens de rejeitos são amplamente utilizadas na mineração para reter todo o material que não será utilizado após o beneficiamento. Ao passo que essa indústria cresce, o monitoramento dessas estruturas se torna imprescindível para assegurar que nenhuma catástrofe ocorra com esse material, causando danos permanentes à sociedade e ao meio ambiente. Neste trabalho, relatou-se a importância de uma instrumentação automatizada e adequada, reduzindo a exposição de pessoas e viabilizando alertas e tomadas de decisões em tempo hábil. Foram explicitados alguns instrumentos utilizados atualmente no Brasil para monitorar deslocamentos horizontais, podendo ser aplicados no monitoramento de barragens, solo e outras estruturas. O objetivo geral deste estudo é apresentar uma tecnologia à base de acelerômetros MEMS promissora para a área da geotecnia, com potencial de se tornar uma alternativa para os inclinômetros convencionais e *in-place*. Para o desenvolvimento do trabalho, uma intensa pesquisa bibliográfica referente à temática foi realizada, expondo as principais vantagens dessa nova tecnologia como sua fácil instalação, maior resistência ao cisalhamento e fornecimento de leituras automatizadas em tempo real. É também apresentado um estudo de caso referente à uma aplicação, que confirma a eficiência e funcionalidade do instrumento em questão.

Palavras-chaves: Monitoramento de barragens. Instrumentação. Acelerômetros MEMS

ABSTRACT

Tailings dams are widely used in mining to retain all the material that will not be used after beneficiation. As this industry grows, monitoring these structures becomes essential to ensure that no catastrophe occurs with this material, causing permanent damage to society and the environment. In this work, the importance of an automated and adequate instrumentation was reported, reducing the exposure of people and enabling alerts and decision-making in a timely manner. Some instruments currently used in Brazil to monitor horizontal displacements were explained, which can be applied in the monitoring of dams, soil and other structures. The general objective of this study is to present a promising technology based on MEMS accelerometers for the field of geotechnics, with the potential to become an alternative to conventional and in-place inclinometers. For the development of the work, an intense bibliographic research on the subject was carried out, exposing the main advantages of this new technology such as its easy installation, greater shear strength and provision of automated readings in real time. A case study related to an application is also presented, which confirms the efficiency and functionality of the instrument.

Keywords: Dam monitoring. Instrumentation. MEMS Accelerometers

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Barragem de rejeitos 15
Figura 2 - Métodos construtivos 17
Figura 3 - Resquícios em Brumadinho após o rompimento do córrego do feijão 18
Figura 4 - Resquícios do trecho do alto do Rio Doce após a tragédia da Samarco (Fundão) .. 19
Figura 5 - Marcos superficiais 21
Figura 6 - Inclinômetro In-Place 22
Figura 7 - ShapeArray armazenado em carretel 22
Figura 8 - Componentes da tecnologia MEMS 23
Figura 9 - Acelerômetro MEMS Sistema massa-mola 24
Figura 10 - Cabo de par trançado. Padrão RS-485 - modificado pelo autor. 24
Figura 11 - Instalação cíclica e eixo médio 25
Figura 12 - Inserindo o SAA em um tubo pré-existente 25
Figura 13 - Verificação do azimute 26
Figura 14 - Desenho dos segmentos e juntas que compõe o SAA 27
Figura 15 - Arquitetura típica do sistema de monitoramento 28
Figura 16 - Comparação inclinômetros convencionais, IPI e SAA 29
Figura 17 - Perfil transversal da barragem relatada no estudo de caso 31
Figura 18 - Fixação do *compression clamp* no topo do SAA 32
Figura 19 - Verificação de instalação do SAA 33
Figura 20 - Painel de aquisição de dados com datalogger 35
Figura 21 - Visualização das primeiras leituras recolhidas 35

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1- Comparação características técnicas 28
Tabela 2 - Comparação características operacionais 29
Tabela 3 - Detalhes da instalação do SAA 32
Tabela 4 - Detalhes dos tubos inclinométricos pré-existentes 32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR
CBDB	COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS
CNRH	CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS
DPA	DANO POTENCIAL ASSOCIADO
IBAMA	INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
MEMS	*MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEM*
PNSB	POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS
SAA	SHAPE ACCEL ARRAY
SNISB	SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS
UFOP	UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
UFPR	UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

1.1 ESTADO DA ARTE 13

1.2 OBJETIVO GERAL 13

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 13

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 14

2 REVISÃO DA LITERATURA 15

2.1 BREVE CONCEITO DE BARRAGENS 15

2.1.1 Métodos Construtivos 16

2.1.1.1 Método da Jusante 16

2.1.1.2 Método de Montante 16

2.1.1.3 Método da Linha de Centro 17

2.2 PRINCIPAIS MOTIVOS DE ROMPIMENTOS DE BARRAGENS DE REJEITOS 17

2.2.1 Impactos do rompimento de uma barragem de rejeitos 17

2.2.2 Legislação para monitoramento 19

2.3 INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS 20

2.3.1 Tipos de Instrumentação 20

2.3.1.1 Marcos superficiais 20

2.3.1.2 Inclinômetros 21

2.3.1.2.1 Inclinômetros convencionais 21

2.3.1.2.2 Inclinômetro In-Place (IIP) 21

2.3.1.3 Shape Accel Array 22

2.3.1.3.1 Princípio de funcionamento 23

2.3.1.3.2 Como o Shape Accel Array trabalha 25

2.3.1.3.3 Transmissão de dados automatizada 27

2.4 ANÁLISE COMPARATIVA: INCLINÔMETROS X SHAPEARRAY 28

3 ESTUDO DE CASO 31

3.1 INSTALAÇÃO 31

3.2 TESTES DIAGNÓSTICOS 33

3.2.1 Installation Verification 33

3.2.2 Complete Diagnostics Check Report 33

3.2.2.1 Leitura inicial 34

3.2.2.2 Leitura um ano após a instalação 36

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 37

5 REFERÊNCIAS 38

1 INTRODUÇÃO

As barragens de rejeitos da mineração são grandes estruturas que servem para armazenar tudo aquilo que não será utilizado após o beneficiamento (WERNECK, 2019). Nos últimos anos, houve um aumento no número de acidentes graves envolvendo essas barragens.

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) define que o responsável legal pela segurança da barragem é o empreendedor, cabendo a ele desenvolver medidas que evitem acidentes, como uma eventual ruptura.

A Lei 12.334/2010[1], em seu Artigo 7º, define que a classificação por categoria de Dano Potencial Associado (DPA) à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos ambientais decorrentes da ruptura da barragem (BRASIL, 2010).

A partir dessa classificação, pode-se tornar obrigatória a instalação de sistemas de monitoramento da estrutura. Esse monitoramento consiste em um conjunto de técnicas aplicadas para análise da barragem em questão, levando em consideração alguns parâmetros como por exemplo, os deslocamentos verticais e horizontais ao longo do tempo.

A análise deve ser feita de forma rotineira, inspecionando sua estrutura e possíveis problemas internos, no intuito de mitigar incidentes futuros. Nesse contexto é possível entender que uma instrumentação eficaz é essencial para trazer maior confiabilidade ao processo.

Alguns métodos e instrumentos como marcos superficiais, inclinômetros convencionais e inclinômetros *in-place* são utilizados para essa finalidade. Porém, hoje já é possível monitorar esses deslocamentos através de um instrumento com instalação mais fácil e que oferece uma coleta de dados confiável, automatizada e sem interrupções: o *Shape Accel Array* (SAA).

O SAA é um instrumento semelhante a uma corda de sensores e microprocessadores constituída por acelerômetros *Micro Electro Mechanical System (*MEMS), que mede a inclinação em relação à gravidade a fim de traçar uma forma 3D e monitorar qualquer mudança estrutural (MEASURAND, s.d).

[1] Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.

1.1 ESTADO DA ARTE

Para a elaboração deste trabalho foram selecionados artigos em periódicos que tratam assuntos relevantes ao tema abordado: barragens de rejeitos, consequências do rompimento de uma barragem, instrumentação geotécnica, inclinômetros convencionais, inclinômetros *in-place* e monitoramento geotécnico, além de manuais de funcionamento e instalação do *Shape Accel Array*, instrumento utilizado como base de pesquisa.

Os artigos escolhidos foram filtrados de acordo com o tema proposto e com ano em que foram publicados – a partir de 2010 - uma vez que o mercado de tecnologia está em constante evolução e alguns instrumentos com o passar do tempo podem se tornar obsoletos.

Os manuais foram retirados do site da empresa que produz o instrumento em estudo e foram essenciais para o desenvolvimento do tema, visto que ainda não existem muitos trabalhos a respeito do mesmo. Já os artigos foram retirados dos seguintes repositórios: Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso e Monografias da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Plataforma Scielo.

Os conteúdos explorados neste trabalho são: Breve conceito de barragens; Métodos construtivos; Principais motivos para rompimentos de barragens de rejeitos; Impactos de um rompimento de barragem de rejeitos; Legislação para monitoramento; Instrumentação para monitoramento de barragens; Tipos de instrumentação; Marcos superficiais; Piezômetro de corda vibrante; Inclinômetro In-Place; Shape Accel Array; e o Estudo de caso do Shape Accel Array como instrumento para monitorar barragens de rejeito.

1.2 OBJETIVO GERAL

Objetiva-se com este trabalho apresentar um estudo teórico contrastando tecnologias tradicionais e novas utilizadas para monitorar deslocamentos verticais e horizontais no monitoramento de barragens.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Para além da sociedade e meio ambiente, o rompimento de uma barragem pode trazer diversos problemas ao empreendimento. “A prevenção envolve menor dispêndio de recursos

que a vivência de uma crise, cujas consequências financeiras estão diretamente relacionadas às perdas reputacionais” (SOARES, 2010).

O monitoramento busca trazer maior segurança para a população, empresa e meio ambiente. A automação tem papel fundamental, pois pode trazer maior confiabilidade - considerando o risco associado a esse empreendimento - e praticidade para o processo, podendo prever eventos e possibilitar que as medidas cabíveis sejam tomadas antecipadamente.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em uma breve introdução sobre barragens - conceito e principais métodos construtivos; Monitoramento - motivos e impactos do rompimento de uma barragem de rejeitos; Legislação; Principais instrumentos utilizados no Brasil; Estudo de caso apresentando o Shape Accel Array, um instrumento eficaz para monitoramento barragens; Considerações finais e; Referências consultadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BREVE CONCEITO DE BARRAGENS

Segundo o Comitê Brasileiro De Barragens (CBDB), o termo barragem é oriundo da palavra francesa *barrage,* derivada das palavras barre, do francês, e barra, do latim, que significam ‘travessa, tranca de fechar porta’.

A Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 define barragem como:

> Qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

De acordo com Araujo (2006), “diferente de barragens convencionais, que normalmente barram água, barragens de rejeito armazenam rejeitos dos processos minerais que podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas).” (apud CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016, p.79).

A segurança da barragem se torna essencial visto que o material nela contido já passou por diversos processos de beneficiamento, podendo ter sofrido alterações químicas e se tornado nocivas ao homem e meio ambiente. Com isso, é ainda possível notar que o funcionamento das barragens de mineração possui caráter multidisciplinar, demandando sinergia entre diferentes áreas para garantir sua funcionalidade e segurança.

Figura 1- Barragem de rejeitos
Fonte: Minera Jr. (2021)

2.1.1 Métodos Construtivos

Segundo Cardozo, Pimenta e Zingano (2016), existem basicamente três metodologias construtivas para barragens de rejeito: método da jusante, método de montante e método da linha de centro. É importante ressaltar que o método de montante é proibido no Brasil desde 2010 pela Lei 12334/10, art. 2º- A[2].

2.1.1.1 Método da Jusante

No método da jusante, a etapa inicial consiste na construção de um dique de partida, onde os rejeitos e fração de areia são lançados para jusante nas etapas subsequentes.

De acordo com ARAÚJO (2006), esse processo apresenta vantagens no controle do lançamento e da compactação. O alteamento da barragem não é construído sobre o rejeito depositado previamente, além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser prolongados durante o alteamento da barragem, possibilitando o controle da linha de saturação na estrutura da barragem e aumentando sua estabilidade.

2.1.1.2 Método de Montante

Nesse método são construídos degraus com o próprio rejeito. Sendo assim, à medida em que a barragem se eleva, o volume de rejeitos também aumenta. Segundo Araújo (2006, p.14), "embora este seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo tornando-se crítico principalmente em relação à segurança".

---

[2] Na íntegra, o Art. 2º-A estabelece que: Fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante. (Incluído pela Lei nº 14.066, de 2020)
§ 1º Entende-se por alteamento a montante a metodologia construtiva de barragem em que os diques de contenção se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado. (Incluído pela Lei nº 14.066, de 2020)
§ 2º O empreendedor deve concluir a descaracterização da barragem construída ou alteada pelo método a montante até 25 de fevereiro de 2022, considerada a solução técnica exigida pela entidade que regula e fiscaliza a atividade minerária e pela autoridade licenciadora do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama). (Incluído pela Lei nº 14.066, de 2020)
§ 3º A entidade que regula e fiscaliza a atividade minerária pode prorrogar o prazo previsto no § 2º deste artigo em razão da inviabilidade técnica para a execução da descaracterização da barragem no período previsto, desde que a decisão, para cada estrutura, seja referendada pela autoridade licenciadora do Sisnama. (Incluído pela Lei nº 14.066, de 2020)

2.1.1.3 Método da Linha de Centro

Barragens alteadas pelo método da linha de centro reúnem características de ambos os métodos apresentados, buscando diminuir as desvantagens de cada um e possuem um custo intermediário.

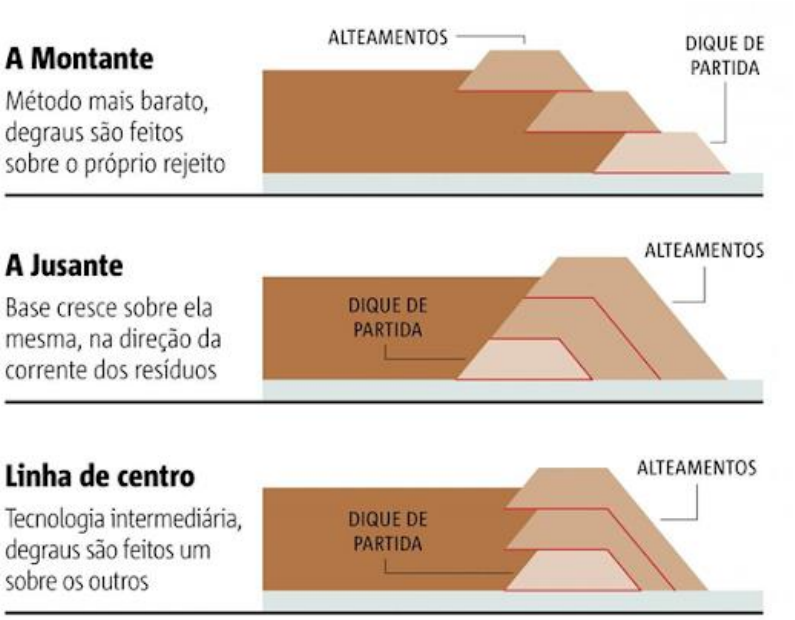

Figura 2 - Métodos construtivos
Fonte: Pet Engenharia Civil UFPR (2020)

2.2 PRINCIPAIS MOTIVOS DE ROMPIMENTOS DE BARRAGENS DE REJEITOS

Segundo Araújo (2006), existem dois motivos principais para que uma barragem de rejeitos se rompa. O primeiro são os fenômenos da natureza, como por exemplo, tremores (terremotos), tsunamis e outros eventos adversos que podem ocorrer em regiões próximas à estrutura podendo afetá-la.

O outro motivo está na própria falha humana, que pode acontecer desde a construção e implantação da barragem até o momento de sua operação e monitoramento.

2.2.1 Impactos do rompimento de uma barragem de rejeitos

O rompimento de uma barragem de rejeitos expõe a sociedade e o meio ambiente a sequelas por vezes irreparáveis. O Centro de Sensoriamento Remoto do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) concluiu que a tragédia de Mariana

foi responsável pela destruição de “1.469 hectares ao longo de 77 km de cursos d’água, incluindo Áreas de Preservação Permanente” (IBAMA, 2015, p. 10). Já em relação ao impacto na qualidade da água, o IBAMA (2015, p. 34) tem o seguinte parecer:

> [...]além da suspensão do abastecimento nos municípios afetados, a presença de metais e a alteração de outros parâmetros indica a necessidade de monitoramento contínuo do ambiente afetado, bem como da remediação ou recuperação a ser indicada com base nos resultados do comportamento dos parâmetros alterados no ambiente hídrico.

De acordo com Polignano e Lemos (2020), os impactos sociais passam por linhas diferentes de discussão, devendo ser considerado a alteração do cotidiano das comunidades residentes nos arredores da barragem, destruição de estruturas públicas e privadas (figura 3), perda de patrimônio imaterial, danos à saúde dos atingidos - tanto física, quando se pensa na alta proliferação de vetores, quanto psicológica, devido ao trauma. Ocorre também perdas econômicas por parte dessa população: restrição no uso de águas contaminadas (figura 4), perda da capacidade produtiva de pequenos agricultores, impossibilidade de atividades como pesca e, particularmente prejudica a economia dos municípios, com a paralisação da atividade mineradora, por vezes a principal atividade econômica de região.

Segundo Silva et. al (2020), é esperada diminuição das receitas municipais, havendo, no período, elevação das despesas do município por conta dos problemas decorrentes do rompimento, tanto pela demanda do sistema público de saúde, quanto pela destruição da infraestrutura municipal.

Figura 3 - Resquícios em Brumadinho após o rompimento do córrego do feijão
Fonte: Venaglia (2021)

Figura 4 - Resquícios do trecho do alto do Rio Doce após a tragédia da Samarco (Fundão)
Fonte: BBC (2017)

2.2.2 Legislação para monitoramento

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), a PNSB alega que o responsável pela segurança das barragens é a pessoa física ou jurídica que possui direito sobre as terras onde a barragem estiver localizada ou que faça a exploração da barragem para benefício próprio ou coletivo (BRASIL, 2010). Cabe a ele o desenvolvimento de ações para garantir a segurança, dentre elas, inspeções e a elaboração de um Plano de Segurança de Barragens.

A PNSB, estabelecida pela Lei nº 12.334/2010 e modificada pela Lei nº 14.066/2020 tem como objetivo estabelecer padrões de segurança a serem obedecidos por essas estruturas, de forma a mitigar eventuais acidentes e suas consequências.

Ainda de acordo com a Lei nº 14.066, são fundamentos da PNSB "regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros de barragens" (BRASIL, 2020).

Já conforme o Art. 7º, "as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)" (BRASIL, 2010).

Por fim, segundo o Art. 8º, o Plano de Segurança da Barragem deve compreender, dentre outras informações: relatórios das inspeções de segurança regular e especial, revisões periódicas

de segurança e identificação e dados técnicos das estruturas, das instalações e dos equipamentos de monitoramento da barragem (BRASIL, 2010).

2.3 INSTRUMENTAÇÃO PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Vieira (2017) alega que a instrumentação geotécnica é de suma importância para a obtenção de uma assertiva avaliação quanto à segurança de barragens, sobretudo porque é capaz de fornecer informações confiáveis sobre seu comportamento ao longo as etapas de construção, operação e pós-operação, ou ainda no caso de qualquer evento extraordinário.

De acordo com Duarte (2008), é possível comparar os valores fornecidos pelos instrumentos (deslocamentos, tensões e vazões, pressão) com os valores previstos experimentalmente pelo projeto, ou estimados para que a barragem possa operar de forma segura durante sua vida útil.

2.3.1 Tipos de Instrumentação

Segundo Kanji e Figueira (1990 apud AFFONSO, 2004), dada a grande diversidade das situações locais e de tipos de soluções, os projetos de instrumentação variam muito, não sendo aplicável uma receita única.

Deve-se definir e dimensionar a instrumentação a ser utilizada de acordo com cada projeto levando em consideração todos os fatores necessários e os objetivos que se deseja atingir. Assim, a etapa de planejamento é feita de forma mais assertiva, podendo ser colocada em prática em um segundo momento atendendo as necessidades do empreendimento e estrutura de forma satisfatória.

2.3.1.1 Marcos superficiais

Segundo Fonseca (2003), os marcos superficiais são utilizados para identificar um deslocamento vertical ou horizontal através de levantamento topográfico por periodicidade, realizados com base nos marcos de referências fixados em pontos fora da região de influência da barragem.

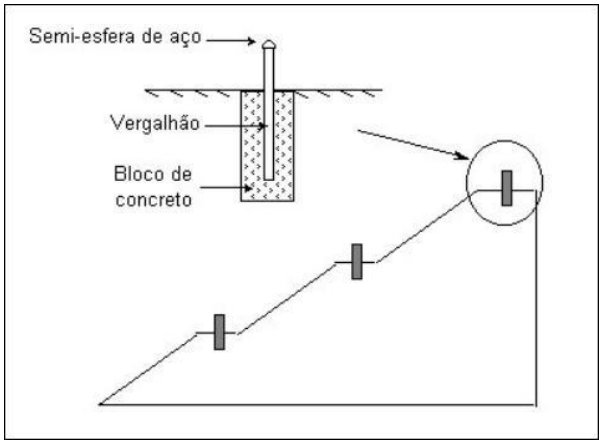

Figura 5 - Marcos superficiais
Fonte: Fonseca (2003)

2.3.1.2 Inclinômetros

Segundo Silva (2017), os inclinômetros são instrumentos utilizados para medir os movimentos laterais de solos e rochas, podendo ser usados também no monitoramento de estruturas como diques, aterros, estabilidade de encostas e escavações.

“Este instrumento é constituído por um tubo de alumínio, PVC, ABS ou até fibra de vidro com cerca de 65 a 85mm de diâmetro com ranhuras internas dispostas ortogonalmente, que servem de guia para a descida do equipamento de leitura.” (SILVA, 2017, p. 2)

A extremidade inferior do tubo é fixada com cimento em solo rochoso - para que o ponto fixo que serve de parâmetro não se altere - e o espaço entre o furo e o tubo é preenchido com areia compactada.

2.3.1.2.1 Inclinômetros convencionais

Nos inclinômetros convencionais a leitura é realizada de forma manual através de inclinômetros torpedos que são inseridos no tubo inclinométrico até sua base e à medida que sobem, coletam os dados de inclinação a cada metro. Posteriormente os dados são processados e convertidos em deslocamento horizontal.

2.3.1.2.2 Inclinômetro In-Place (IIP)

De acordo com a empresa RST (2021), o inclinômetro in-place é composto por uma sequência de sensores de acelerômetros MEMS instalados em um tubo de aço à prova d’água. Essa sequência de sensores coleta a inclinação em intervalos de um metro.

Nos inclinômetros in-place a leitura pode ser feita de forma automatizada, não sendo necessária a presença de um operador local.

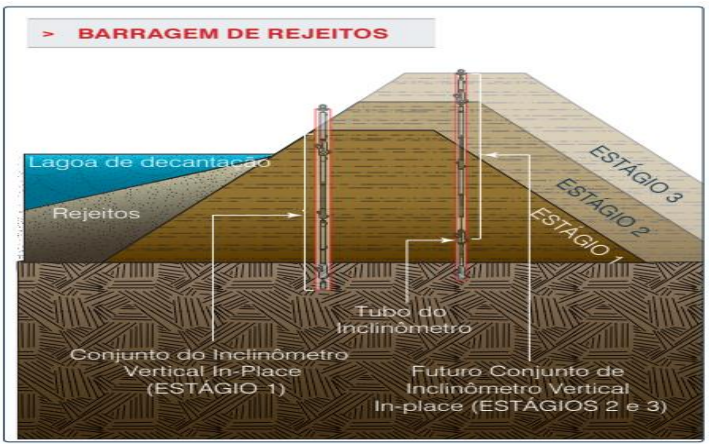

Figura 6 - Inclinômetro In-Place
Fonte: RST *instruments* (2021)

2.3.1.3 Shape Accel Array

O Shape Accel Array (SAA) é um instrumento relativamente novo, de tecnologia exclusiva fabricado pela empresa canadense Measurand, que pode ser utilizado para monitorar deformação no solo e outras estruturas como por exemplo barragens, edifícios e túneis, de acordo com a forma em que for instalado (verticalmente ou horizontalmente) e das configurações pré-definidas.

Figura 7 - ShapeArray armazenado em carretel
Fonte: Measurand (s.d)

2.3.1.3.1 Princípio de funcionamento

O SAA é um sistema formado por uma sequência de segmentos rígidos interligados por juntas de articulação que possibilitam o movimento em qualquer direção de forma que não haja torção. De acordo com Lipscombe et al. (2012 apud Silva, 2017, p.3), "cada segmento tem três sensores de inclinação MEMS ortogonais, ligados a um conversor de sinal analógico para digital, um microprocessador e um sensor de temperatura a cada oito segmentos".

Segundo Silva (2017), os três acelerômetros contidos em cada segmento possuem calibração de fábrica de 360ºx360º, que possibilita leituras tridimensionais. Portanto, o equipamento pode ser montado verticalmente, horizontalmente ou até mesmo em arco para medição de convergências.

A tecnologia MEMS é considerada um processo de natureza multidisciplinar que combina conceito de diversas áreas com o intuito de gerar dispositivos capazes de desempenhar funções de sensoriamento, controle e atuação (TORRES, 2014).

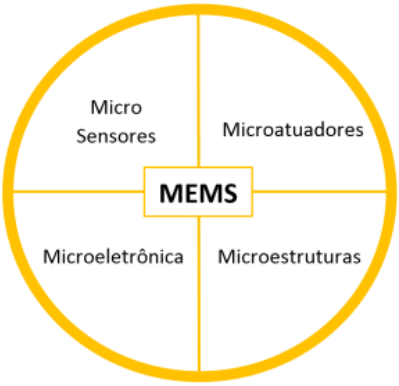

Figura 8 - Componentes da tecnologia MEMS
Fonte: Embarcados (2014)

Os acelerômetros MEMS são um sistema massa, mola e amortecedor em escala reduzida. De acordo com Calache (2013), o princípio de operação desses acelerômetros se constitui em uma massa de prova ligada a uma referência por meio de uma mola com coeficiente elástico k e um amortecedor com coeficiente de amortecimento ɣ e, devido a inércia, que faz com que o movimento da massa de prova m não seja o mesmo do que o valor de referência, é possível calcular a diferença de posição da massa (x=xf - xm) para medir a aceleração.

A figura 10 representa o MEMS que, ao ser inclinado, faz com que a massa presa a mola se mova, então, o chip MEMS detecta através do sensor a posição da massa.

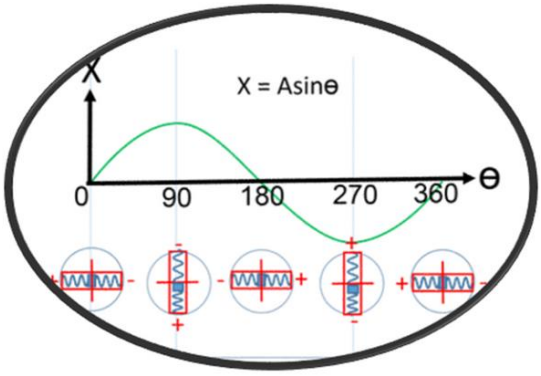

Figura 9 - Acelerômetro MEMS Sistema massa-mola
Fonte: Measurand (s.d)

Segundo a empresa responsável (MEASURAND, s.d) “Cada microprocessador possui um endereço digital exclusivo e está conectado a um barramento RS485 comum de dois fios que pode ser consultado para dados digitais.”.

O padrão RS-485 (*Recommendad Standart-485*), aprovado em 1983 pela Electronics Industries Association (EIA) é um meio de transmissão de dados através de cabeamento – mais especificamente um par de fios trançados - amplamente utilizado no setor industrial. Além de permitir a conexão de até 32 dispositivos em uma mesma rede, ele possibilita o uso de lances de cabo mais compridos (de até 1200 m) pois o sinal diferencial faz com que ocorra uma filtragem eficiente de ruídos captados ao longo do comprimento do cabo, tornando esse padrão robusto a inferências (FREITAS, 2017).

Figura 10 - Cabo de par trançado. Padrão RS-485
Fonte: Citisystems (2016) - modificado pelo autor.

Segundo a fabricante, os dados são basicamente “contagens” que representam a saída senoidal com inclinação dos sensores MEMS. Os microprocessadores acumulam a soma de amostras de dados de forma rápida, ao longo de todo o instrumento através do comando de um computador ou coletor de dados.

2.3.1.3.2 Como o Shape Accel Array trabalha

Os seguimentos do SAA geralmente possuem 0,50 m de comprimento incluindo as articulações, podendo chegar a 0,25 m em casos específicos. Conhecendo as inclinações estáticas, o comprimento de cada segmento e a distância entre as articulações e o meio do segmento – local onde ficam os acelerômetros – é possível determinar a forma do instrumento em um plano (MEASURAND, s.d).

A instalação do SAA é feita de forma cíclica em tubos de diâmetro maior que 26mm (figura 11), podendo ser feita em tubos de inclinômetros pré-existentes (figura 12). Um algoritmo matemático usa os dados resultantes da posição de cada segmento para encontrar o eixo médio e a partir disso, qualquer deformação que mova o revestimento pode ser medida com precisão.

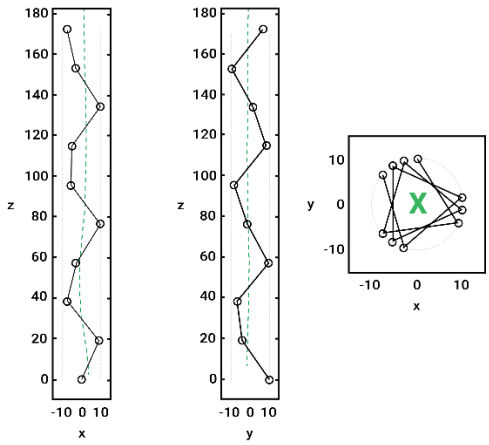

Figura 11 - Instalação cíclica e eixo médio
Fonte: Measurand (s.d)

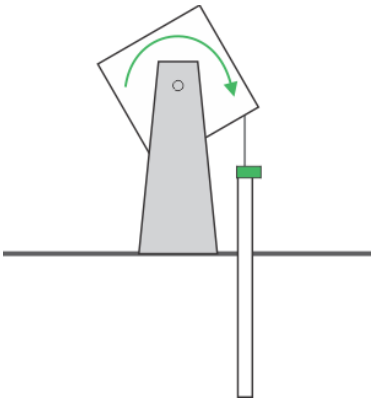

Figura 12 - Inserindo o SAA em um tubo pré-existente
Fonte: Measurand (s.d)

Como o instrumento não é capaz de saber sua localização no mundo real, é necessário o uso de um método para orientá-lo. Para isso, durante a instalação do equipamento "[...] um ângulo de deslocamento de azimute deve ser medido de uma direção ou marcador conhecido no local até a marca X física no instrumento, que representa a direção positiva do eixo X nos dados coletado." (MEASURAND, s.d)

Figura 13 - Verificação do azimute
Fonte: Measurand (s.d)

O valor da defasagem é aferido em graus depois, é computado no software, que faz a correção necessária no gráfico. As saídas do ShapeArray são convertidas através de softwares em unidades cartesianas de engenharia, em milímetros (mm) - convertendo as inclinações em uma forma 3D quando instalado verticalmente ou 2D se instalado horizontalmente. Essa forma pode ser mapeada em um desenho quase instantaneamente (figura 14). Os dados de saída são calculados usando como parâmetro um ponto de partida que seja considerado um terreno estável (MEASURAND, s.d).

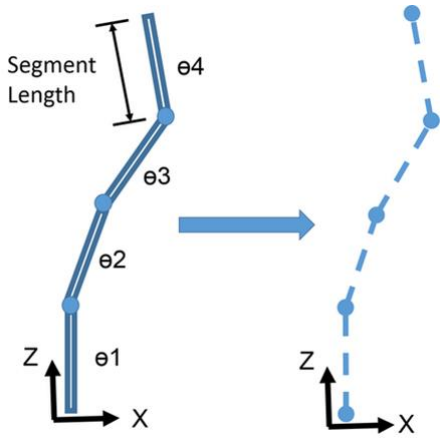

Figura 14 - Desenho dos segmentos e juntas que compõe o SAA
Fonte: Measurand (s.d)

A aquisição dos dados pode ser feita através de dataloggers ou até mesmo diretamente de computadores que possuam cabo de interface e software adequados.

2.3.1.3.3 Transmissão de dados automatizada

A maioria das instalações do SAA utiliza *data loggers* (registradores de dados) para coletar os dados e transmiti-los de forma automatizada.

O Shape Accel Array é ligado a um datalogger local através do cabeamento de padrão RS-485 fornecendo os dados coletados na região em questão. Esses dados são transmitidos via rádio 900 MHz, para uma RTU (*Remote Terminal Unit*) ligada a um datalogger central, que é capaz de armazená-los e repassá-los via rede Ethernet a um computador que contenha o software de gestão do cliente, permitindo a leitura e análise dos dados.

Muitas vezes, por estar localizado em lugares de difícil acesso ou locais expostos a certo nível de risco, o registrador local geralmente é alimentado por uma célula de lítio que fornece anos de vida para a bateria, reduzindo a necessidade de manutenção.

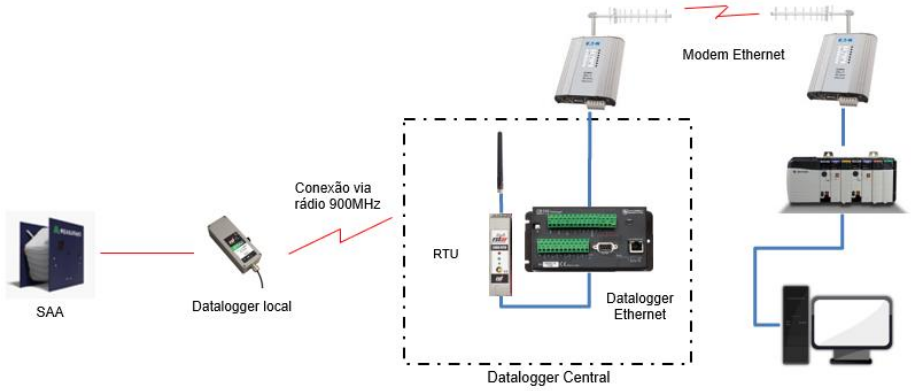

Figura 15 - Arquitetura típica do sistema de monitoramento
Fonte: TecWise (s.d), modificado pelo autor.

2.4 ANÁLISE COMPARATIVA: INCLINÔMETROS X SHAPEARRAY

A tabela abaixo mostra uma comparação técnica feita entre os três instrumentos (inclinômetro convencional, inclinômetro in-place e ShapeArray):

Tabela 1- Comparação características técnicas
Fonte: Silva (2017)

Características	Inc. convencional	Inc. In-Place	SAA
Precisão	±2,5mm/32m	0,8mm a 1mm	±0,5mm (G) até 1,5mm (NG)/ 32m
Range	±30°	±15°	±60°
Repetibilidade	±0,002°	±0,006°	±0,0005°
Sensor de inclinação	MEMS Biaxial	MEMS uniaxial ou biaxial	MEMS biaxial
Temperatura (°C)	-40 até 70	-40 até 70	-35 até 60
Espaçamento de leituras	50 cm	definição prévia em projeto sempre superior a 1m	30 a 50 cm
Medição de temperatura	Não	Não	Sim
Medição de vibração	Não	Não	Sim

É possível perceber que o SAA fornece uma maior precisão e permite uma maior variação em suas medições, podendo alcançar até ±60º. Além disso, oferece medições de temperatura e quando necessário, em situações específicas, os sensores podem ser fabricados com o distanciamento de 30 centímetros.

Conforme a tabela 2, operacionalmente falando, o SAA necessita de menores diâmetros para sua instalação, gerando menor custo na perfuração. Ele pode ser instalado em tubos de PVC comum, não sendo necessário tubos específicos, o que implica em menor investimento

em material. Sua instalação, por se tratar de uma “corda metálica inteiriça” é feita de forma rápida, diferentemente do inclinômetro, que necessita ter seus segmentos conectados no momento da instalação.

Tabela 2 - Comparação características operacionais
Fonte: Silva (2017)

Características	Inc. convencional	Inc. In-Place	SAA
Diâmetro de instalação (min)	4"	4"	2"
Material de tubos de instalação	Aluminio/ABS	Aluminio/ABS	PVC
Diâmetro de instalação	85mm	85mm	27mm
Tempo de leitura (min)	45min	instantâneo	instantâneo
Coleta e transmissão de dados	Presencial	Presencial/Autônoma	Autônoma
Coleta de dados com tubo sujeito a grandes deformações	Não	Não	Sim
Coleta de dados em condições meteorológicas adversas	Não	Sim	Sim

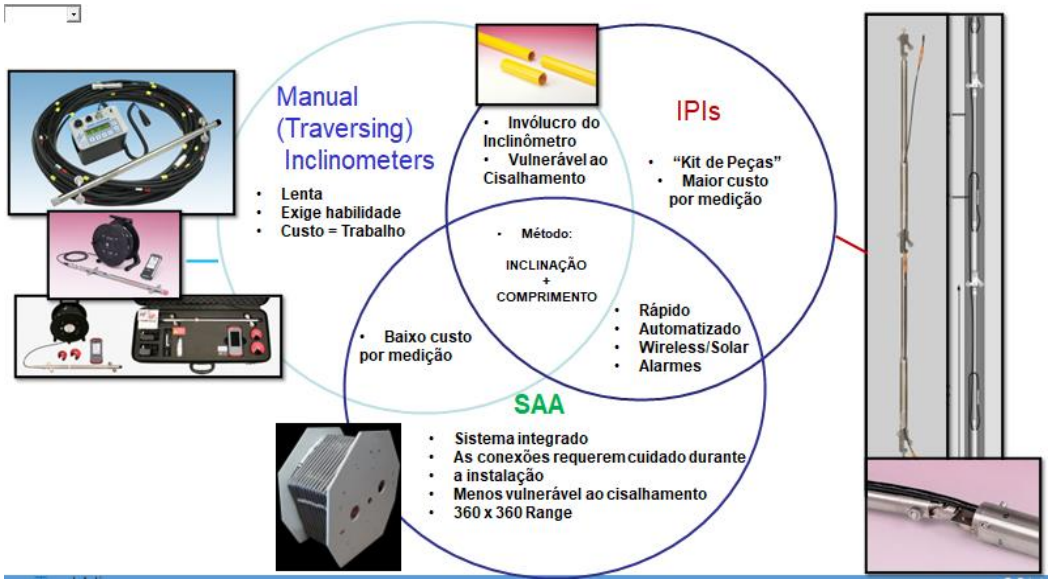

Figura 16 - Comparação inclinômetros convencionais, IPI e SAA
Fonte: TecWise (s.d), modificado pelo autor

A partir da figura 16, é possível perceber que os três instrumentos (inclinômetros convencionais, inclinômetros in-place e SAA) possuem pontos em comuns entre si, sendo

necessário avaliar as condições e necessidades do empreendimento para se definir a melhor solução.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso em questão apresenta a instalação de um SAA feita pela empresa PY em uma mineradora localizada no Brasil. Essa mineradora possuía uma de suas barragens em fase de alteamento, dessa forma, o monitoramento de deslocamento se tornou de extrema importância assegurando que tudo estava ocorrendo conforme o planejado.

Tal mineradora possuía três inclinômetros não automatizados (de leitura manual) instalados nesta barragem e optou por automatizar um deles.

Para coleta das leituras manuais eram utilizados inclinômetros torpedos, que foram inseridos ao longo do tubo inclinométrico, percorrendo todo o tubo e parando a cada 1 metro para registrar os dados coletado.

Este processo exige muito trabalho manual, longo tempo em campo exposto ao risco, baixa quantidade de amostragem de coleta e está sujeito ao erro humano, sendo assim a mineradora optou por automatizar um deles, instalando um Shape Array.

Foi realizada a instalação do tipo *cyclical* no tubo de inclinômetro já existente com 47,00 metros de profundidade.

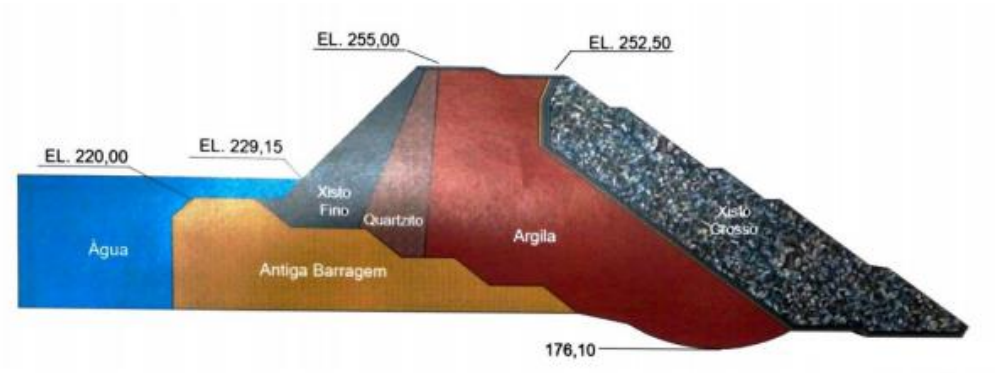

Figura 17 - Perfil transversal da barragem relatada no estudo de caso
Fonte: Empresa PY (2022)

3.1 INSTALAÇÃO

As tabelas a seguir mostram detalhes da instalação do ShapeArray e do tubo inclinométrico existente que foi utilizado.

Tabela 3 - Detalhes da instalação do SAA
Fonte: Empresa PY (2022)

Inclinômetro	Data de instalação	Tipo	Comprimento do SAA (m)	Comprimento do furo (m)	Extensão PEX utilizada (m)	Azimute SAA (Graus)
INC-01	13/nov/19	Vertical	47,00	47,00	1,00	1

Tabela 4 - Detalhes dos tubos inclinométricos pré-existentes
Fonte: Empresa PY (2022)

Inclinômetro	Diâmetro externo tubo (mm)	Diâmetro interno tubo (mm)	Comprimento do tubo acima da superfície (m)	Azimute do tubo inclinométrico (Graus)	Método de fixação de SAA
NC-01	74	64	0,60	0	Braçadeira de compressão

Fez-se o processo de instalação padrão:

- Introdução do SAA no tubo inclinométrico existente
- Execução do *pumping*, pressão feita no instrumento após a inserção no tubo para acomodá-lo na posição correta (com suas juntas rentes às paredes do tubo)
- Fixação no topo do SAA com a braçadeira de compressão (*compression clamp*) para mantê-lo na posição correta.
- Verificação do azimute
- Conexão do cabo do SAA no datalogger para transmissão dos dados via rádio

Figura 18 - Fixação do *compression clamp* no topo do SAA
Fonte: Empresa PY (2022)

3.2 TESTES DIAGNÓSTICOS

Após a instalação do SAA foram feitos os testes diagnósticos para conferência do correto funcionamento do sistema.

- *Installation Verification*
- *Complete Diagnostics Check Report*

3.2.1 Installation Verification

Essa ferramenta tem como função medir a inclinação média de cada sensor e, com isso, aferir se o SAA se encontra devidamente comprimido no interior do tubo inclinométrico.

O cálculo da inclinação média está diretamente associado ao diâmetro interno do tubo inclinométrico, que neste caso em específico é 64 mm.

Caso a inclinação média (*average tilt*) seja superior à inclinação média esperada (*expected average tilt*), uma luz verde é ativada no sistema de verificação conforme demonstrado na figura a seguir.

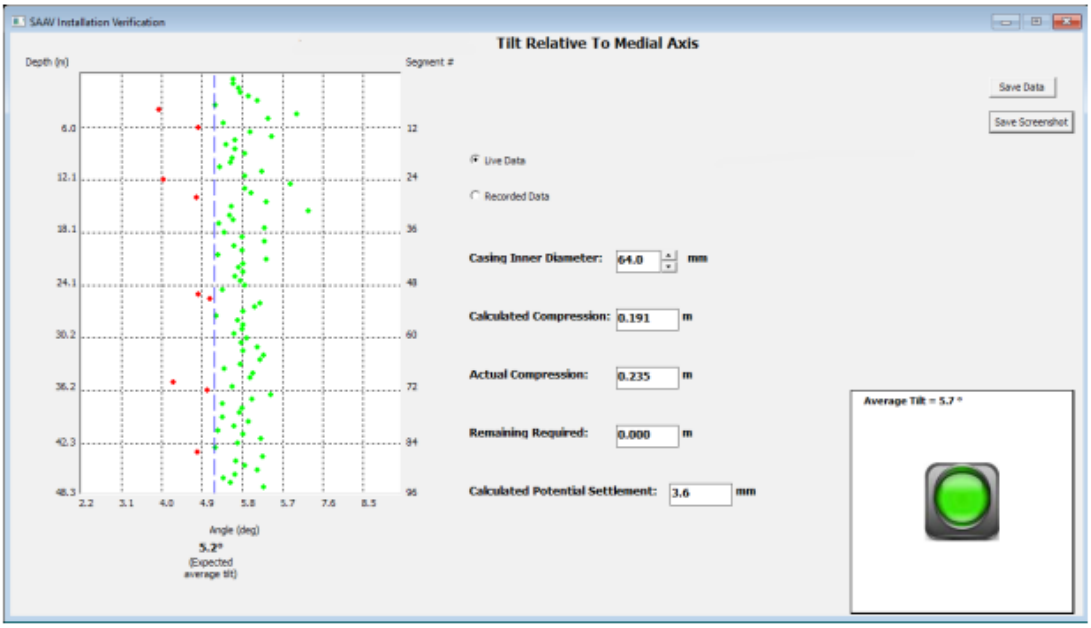

Figura 19 - Verificação de instalação do SAA
Fonte: Empresa PY (2022)

3.2.2 Complete Diagnostics Check Report

Esse teste diagnóstico verifica a saúde dos sensores MEMS: velocidade que o sensor se comunica com a interface que coleta os dados, se estão recebendo voltagem e qual a corrente elétrica que passa por eles.

Os resultados do teste são apresentados a seguir:

SAARecorder version: 7.86

Date: 2019-11-13

Time: 16:14:49

ShapeArray Serial Number: XXXXX

ShapeArray Name: SAAV_XXXXX

Reference: FAR

Mode: Vertical

Temperature at top of ShapeArray: 29.63 deg C

Slaved Segments:

Turned Off Segments:

NOTE: All segment numbers are presented relative to the near (cable) end, i.e. segment #1 corresponds to the near end of the ShapeArray.

Diagnostic Test……..Result

Voltage/Current …….....Passed

Data Diagnostics (baud rate = 38400 bps)…….Passed

Total Acceleration……..Passed

Communications Check (@38400 bps)……Passed

Communications Check (@57600 bps)……Passed

Communications Check (@115200 bps)……...Passed

Communications Check (@230400 bps)……...Passed

Communications Check……Passed

Complete Diagnostics Check Report File

3.2.2.1 Leitura inicial

O SAA se encontra conectado a um datalogger da estação de coleta de dados implantada na proximidade do ponto, com transmissão via rádio.

Figura 20 - Painel de aquisição de dados com datalogger
Fonte: Empresa PY (2022)

A imagem abaixo mostra uma captura da tela do software de apresentação dos dados do SAA, SAA Suite.

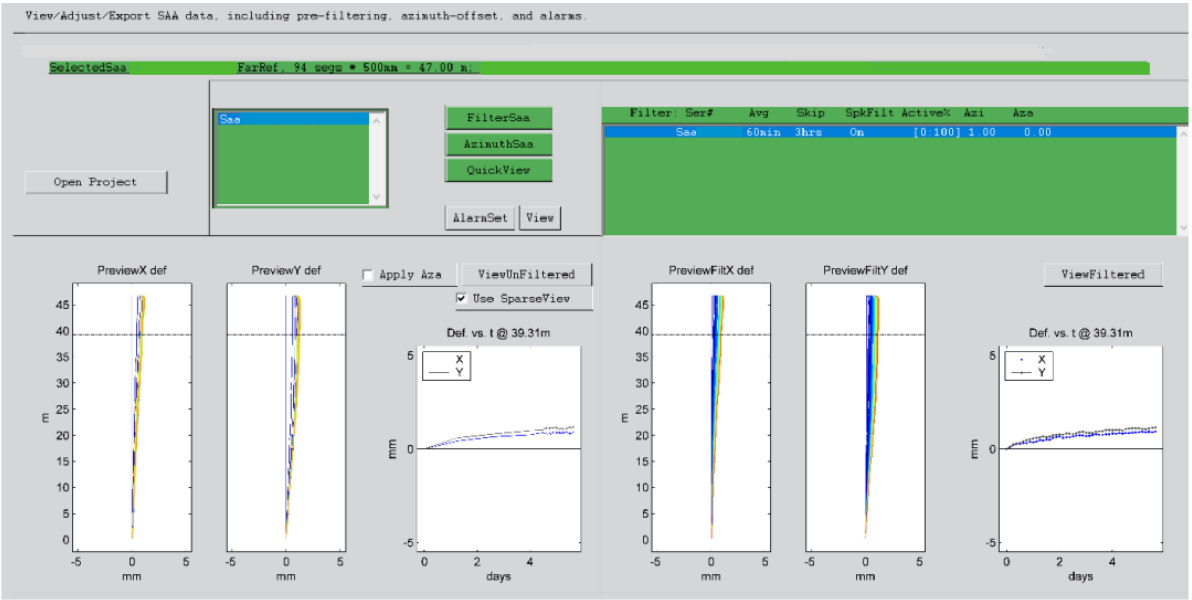

Figura 21 - Visualização das primeiras leituras recolhidas
Fonte: Empresa PY (2022)

A tela apresentada na figura 21 fornece informações como a data da primeira leitura, número de série do instrumento, número de leituras feitas no intervalo desde a primeira leitura até a data em questão, a distância do ponto fixo (solo rochoso) até a superfície, além de apresentar gráficos referentes ao eixo x (jusante), y e deslocamento ao longo do tempo.

As leituras estão programadas para uma frequência de três horas, a mesma aplicada ao sistema de piezômetros já existente. Caso seja preciso, essa frequência pode ser reajustada conforme as necessidades da obra.

3.2.2.2 Leitura um ano após a instalação

Após um ano de instalação do SAA, um engenheiro geotécnico da Measurand, realizou um procedimento padrão de análise dos dados entregues pelo instrumento. Nesse conjunto de leituras foi possível verificar que os dados de corrente e tensão estavam coerentes com os valores previstos de fábrica.

Os dados de deformação também estavam condizentes com o esperado tanto em relação à direção (jusante) quanto ordem de grandeza, tendo uma taxa de evolução menor que 1 mm por mês e com tendência a diminuir de acordo com os dados fornecidos no gráfico “curva de deslocamento versus tempo” do software usado.

É importante ressaltar que, apesar dessa leitura, é necessária a análise de consultores ou técnicos da mineradora já que eles possuem maior conhecimento dos processos que ocorrem no cotidiano da barragem, podendo correlacionar qualquer deslocamento.

Por fim, pode-se dizer que a instalação ocorreu de acordo com os procedimentos e recomendações do fabricante. Os testes de verificação pós-instalação tiveram resultados satisfatórios, conforme apontado anteriormente. O instrumento instalado foi devidamente protegido, sinalizado e identificado a fim de se evitar danos ou interrupções nas suas leituras.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ressalta-se no presente trabalho que a instrumentação geotécnica é de fundamental importância para monitorar a saúde das estruturas, evitando que tragédias aconteçam visto que, um possível rompimento é capaz de causar danos irreversíveis para natureza e para a sociedade.

É possível perceber que a automatização desse processo fornece maior segurança pelo fato de possibilitar que o controle seja feito de forma remota, reduzindo a exposição de pessoas a riscos.

Com o avanço da tecnologia, novos instrumentos como o Shape Accel Array vêm sendo desenvolvidos, tornando-se uma alternativa eficiente à instrumentação tradicional baseada majoritariamente em inclinômetros. Apesar de se assemelhar em alguns aspectos ao aos inclinômetros in-place, o SAA consegue desempenhar diferentes funções de acordo com sua instalação (na vertical, horizontal ou em arco).

Além disso, o SAA possui uma precisão superior ao IPI e pode ser instalado em tubos convencionais de PVC, necessitando de menor custo na aquisição do material.

De qualquer modo, é necessário reforçar que a automatização não substitui um projeto adequado, sendo apenas uma ferramenta aliada no processo. Por isso, é imprescindível que a estrutura seja construída de forma correta, seguindo as normas e diretrizes estabelecidas.

Como trabalhos futuros, pode-se investigar outras tecnologias para serem aplicadas no monitoramento de barragens.

5 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Sistema Nacional de informações sobre a Segurança de Barragens. **Perguntas Frequentes**. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/perguntas-frequentes>. Acesso em: 08/06/2022.

ARAÚJO, Josymar, et al. Reutilização do rejeito de barragens. **Minera Jr**. 03 de março de 2021. Disponível em: <https://minerajr.ufop.br/blog.reutilizacao_rejeitos_barragens_mineracao.html>. Acesso em: 08/06/2022.

ARAÚJO, Cecília Bhering de. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de janeiro, 2006. Disponível em: <https://docplayer.com.br/3306129-Contribuicao-ao-estudo-do-comportamento-de-barragens-de-rejeito-de-mineracao-de-ferro-cecilia-bhering-de-araujo.html>. Acesso em: 08/06/2022.

APÓS DOIS ANOS, IMPACTO AMBIENTAL DO DESASTRE EM MARIANA AINDA NÃO É TOTALMENTE CONHECIDO. **BBC**, 05/11/2017. Fique por dentro. Disponível em: <https://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/apos-dois-anos-impacto-ambiental-do-desastre-em-mariana-ainda-nao-e-totalmente-conhecido.ghtml>. Acesso em: 08/06/2022.

BRASIL. **Lei** 12334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984. Brasília, 2010.

BRASIL. **Lei** 14066 de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração).

CALACHE, Danilo Carreiro. **Caracterização de um acelerômetro baseado em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. Projeto de Graduação. Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.lee.uerj.br/~jpaulo/PG/2013/PG-Acelerometro-MEMS-2013.pdf>. Acesso em: 08/06/2022.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração–uma revisão. **Holos**, v. 8, p. 77-85, 2016. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5367>. Acesso em: 08/06/2022.

CERQUEIRA, Helio. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**. Dissertação de mestrado. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017. Disponível em:

<https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/8044/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Crit%C3%A9riosProjetoInstrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 08/06/2022.

CHAGAS, Inara. Barragem de rejeitos e os casos Mariana e Brumadinho. **Politize**, 19/09/2019. Disponível em: <https://www.politize.com.br/barragem-de-rejeitos/>. Acesso em: 08/06/2022.

COMITE BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Ct-7- Barragem de rejeitos**. Notícias CT-7. Disponível em: <http://cbdb.org.br/comissao_tecnica/barragens-de-rejeitos>. Acesso em: 08/06/22.

COMITE BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Apresentação de barragens**. Disponível em: <http://cbdb.org.br/apresentacao-das-barragens>. Acesso em: 08/06/2022.

DUARTE, Anderson Pires. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Disponível em; <http://hdl.handle.net/1843/BUDB-8AUPNJ>. Acesso em: 08/06/2022.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2003. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6431>. Acesso em: 08/06/2022.

FREITAS, Carlos Márcio. **Redes de comunicação em RS-485**. Embarcados, 21/06/2017. Disponível em: https://www.embarcados.com.br/redes-de-comunicacao-em-rs-485/. Acesso em: 08/06/2022.

IBAMA. **Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais.** Laudo técnico preliminar. Novembro, 2015. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_Ibama.pdf>. Acesso em: 08/06/2022.

LIPSCOMBE, R.; CARTER BENG, C. et al. The use of Shape Accel Arrays (SAA) for measuring retaining wall deflection. Technical paper. **Ice Publishing**, 03/11/2014. Londres, 2014. Disponível em: <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/use-shape-accel-arrays-saa-measuring-retaining-wall-deflection/>. Acesso em: 08/06/2022.

MEASURAND. **Measurand Manuals**. http://saav.measurand.com/home

POLIGNANO, Marcus Vinicius; LEMOS, Rodrigo Silva. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba. **Cienc. Cult**., São Paulo, v. 72, n. 2, p. 37-43, 2020. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252020000200011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 08 June 2022.

RST INSTRUMENTS. **DataSheet**. Sistema de Inclinômetro In-Place MEMS Digital. Fevereiro de 2021. Disponível em: <https://rstinstruments.com/wp-content/uploads/Sistema-de-Inclinometro-In-Place-MEMS-Digital-ICB0083A_PORT-1.pdf>. Acesso em: 08/06/2022.
SAMARCO. Reparação. Disponível em: <https://www.samarco.com/reparacao/>. Acesso em: 08/06/2022.

SILVA, André. Nova tecnologia para Monitoramento Remoto de Encostas: Experiencias com Shape Accel Arrays (SAA). **XII Conferência Brasileira sobre a Estabilidade de Encostas**. Santa Catarina, 2017.

SOARES, Lindolfo. Barragem de Rejeitos. Comunicação Técnica. In: **Tratamento de Minérios**. Eds: LUZ, Adão B. da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina A. pp. 831–896. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>. Acesso em: 08/06/2022.

SWARBRICK, G. E; CLARKE, S.J. **Shape Accel Arrays: comparative performance mining application**. Australian Centre for Geomechanics. Perth, 2015.
.
TORRES, Henrique. MEMS – Sistemas Microeletromecânicos. **Embarcados**, 10/10/2024. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/mems/>. Acesso em: 08/06/2022.

VENAGLIA, Guilherme. Brumadinho: tragédia faz 2 anos sem barragens desativadas e com disputa jurídica. **CNN**. São Paulo, 25/01/2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/brumadinho-tragedia-faz-2-anos-sem-barragens-desativadas-e-com-disputa-juridica/>. Acesso em: 08/06/2022.

ZHU, Viviane. Barragens: finalidade, tipos, riscos e a nova lei. **PET- Engenharia Civil UFPR**. Postado em 23/10/20. Disponível em: <http://petcivil.blogspot.com/2020/10/barragens-finalidade-tipos-riscos-e.html>. Acesso em: 08/06/2022.