

Visão Geral das Principais Instrumentações Utilizadas no Acionamento Automático de Sirenes de Barragens de Mineração

Pamela Lisboa Ferreira
Engenheira Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, pamelalisboa19@yahoo.com.br

Beatriz Mapa Clemente
Engenheira Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, beatriz.clemente@vale.com

Diego Lage Goncalves
Engenheiro Pleno, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, diego.lage.goncalves@vale.com

João Miquilino
Analista Operacional Sênior, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, joao.miquilino@vale.com

RESUMO: O acionamento automático de sirenes (AAS) em barragens de mineração é essencial para alertar a comunidade em caso de emergência. Para isso, diversas instrumentações são utilizadas, incluindo sensores de monitoramento de nível de água, sensores de inclinação e deslocamento, sistemas de detecção de vibração e dispositivos de comunicação em tempo real. Esses instrumentos garantem a detecção de possíveis falhas na estrutura da barragem de forma reativa, permitindo a ativação imediata das sirenes para evacuação. A integração dessas instrumentações em um sistema de acionamento automático de sirenes contribui significativamente para a segurança das comunidades vizinhas às barragens de mineração. O presente artigo oferece uma visão geral dos principais instrumentos utilizados, além de conceitos fundamentais para a elaboração de árvores de falhas. A análise inclui uma explicação geral das metodologias e técnicas aplicadas, fornecendo uma base para a compreensão e aplicação desses instrumentos em diversas áreas de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Instrumentação, Sirenes, Acionamento Automático, Monitoramento

ABSTRACT: The automatic activation of sirens in mining dams is essential to alert the community in the event of an emergency. To achieve this, various instrumentations are used, including water level monitoring sensors, orientation and positioning sensors, vibration detection systems and real-time communication devices. These instruments guarantee the detection of possible failures in the dam structure reactively, allowing the immediate activation of sirens for evacuation. The integration of these instrumentations into an automatic siren activation system significantly contributes to the safety of communities neighboring mining dams. This article offers an overview of the main instruments used, as well as fundamental concepts for creating fault trees. The analysis includes a general explanation of the methodologies and techniques applied, providing a basis for understanding and applying these instruments in various areas of study.

KEYWORDS: Instrumentation, Sirens, Automatic Activation, Monitoring

1 INTRODUÇÃO

O cenário de ruptura de barragens tem sido frequente nos últimos anos, mesmo com a implantação de novas medidas reguladoras e fiscalizadoras. As principais causas estão associadas à dimensionamentos hidrológicos ineficientes, deficiência de investigações geológico-geotécnicas e sistemas de gestão simplificados ou inexistentes, causando perdas humanas, socioeconômicas e devastações ambientais. Nesse sentido, as regulamentações e fiscalizações são parte do processo, porém, não garantem a segurança, sendo fundamental a gestão das rotinas na operação e manutenção (Fernandes, 2020).

Conforme decretado pela ANM (Agência Nacional de Mineração), o empreendedor deve aplicar sistemas automatizados de acionamento de sirenes instaladas fora da mancha de inundação e dotados de modo contra falhas em caso de rompimento da estrutura, complementando os sistemas de acionamento manual no empreendimento e o remoto. Essa condição é aplicável para estruturas com dano potencial associado (DPA) alto ou médio quando o item “existência de população a jusante” atingir 10 pontos. Além disso, “os sistemas de alerta de acionamento automático e manual, deverão ser projetados e implementados em consonância com as características da barragem e com os critérios de acionamento relacionados a parâmetros de deformação e deslocamentos, cujos limites deverão ser definidos pelo projetista da barragem” (ANM, 2023).

O acionamento automático de sirenes (AAS) em barragens é uma medida essencial para fortalecer a segurança dessas estruturas, sendo vital para agilizar o processo de evacuação, caso necessário, das comunidades a jusante das estruturas geotécnicas. Esse sistema é projetado para detectar anomalias ou condições adversas nas barragens, como vazamentos, níveis elevados de água, deslocamentos acelerados ou rupturas iminentes e desencadeando automaticamente um alerta sonoro para alertar as comunidades a jusante.

As sirenes automáticas agilizam o processo de evacuação e aumentam a confiabilidade, através de um sistema automatizado que minimiza a possibilidade de falha humana. Ao alertar antecipadamente, o sistema pode contribuir para a redução de danos materiais e, o mais importante, para a preservação de vidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O acionamento automático de sirenes em barragens envolve a utilização de uma variedade de instrumentação e metodologia de controle, além de tecnologias para monitorar condições críticas e tomar decisões de forma automatizada. Várias empresas vêm implantando uma série de instrumentação para a detecção de possíveis rupturas, as principais instrumentações e uma das metodologias de controle, árvore de falhas, utilizadas atualmente serão descritas nos Itens 2.1 e 2.2.

2.1 Equipamentos de Monitoramento de Deslocamento Superficial

O monitoramento de deslocamento superficial desempenha um papel crucial no acionamento automático de sirenes. Sensores especializados, são empregados para detectar até mesmo pequenos movimentos de terra ou mudanças na inclinação da barragem. Esses sensores podem identificar sinais de instabilidade na estrutura da barragem, possibilitando a ativação rápida e precisa das sirenes em caso de emergência. Ao integrar esses dados de deslocamento superficial a sistemas de acionamento automático de sirenes, é possível garantir uma resposta imediata diante de potenciais riscos, protegendo as comunidades que vivem nas proximidades das barragens.

2.1.1 Radar Doppler

O Radar Doppler é uma ferramenta de alerta e monitoramento reativo de deslocamentos superficiais, de alta precisão, rápida varredura e longo alcance, proporcionando uma alta confiança aos alertas e alarmes no caso da ocorrência de rupturas (Ground Probe, 2024).

Esse equipamento utiliza o efeito Doppler para medir a velocidade e direção de objetos em movimento. Esse equipamento emite ondas de rádio em direção à uma área a ser monitorada. Caso algum objeto (com um tamanho mínimo a depender da distância do radar) se movimente nessa área o radar será capaz de detectar a variação da frequência da onda refletida pelo objeto com base nesse desvio de frequência, pode-se calcular, então, a velocidade do objeto ao longo da linha de visada, a partir da seguinte equação:

$$f_0 = f_f \frac{V \pm V_0}{V \pm V_f} \quad (1)$$

Onde:

f_0 = Frequência calculada pelo radar para um objeto em movimento.

f_f = Frequência que a fonte emite

V = Velocidade da onda no meio

V_0 = Velocidade do observador

V_f = Velocidade da fonte

A principal função desse Radar é a detecção de deslocamento de massa, sendo uma ferramenta de uso reativo e não para monitoramento de deslocamentos lentos, sua capacidade de detecção avalia velocidade de deslocamento e área do alvo a ser monitorada. Sendo assim, é amplamente utilizado em várias aplicações, incluindo meteorologia, controle de tráfego, detecção e direção de movimento e monitoramento de velocidade (Ground Probe, 2024). A Figura 1 apresenta o modelo de Radar Doppler RGR-Velox.



Figura 1. Radar RGR-Velox. (Ground Probe, 2024).

2.1.2 Tiltímetros

Os Tiltímetros são sensores que detectam deslocamento entre os eixos X, Y e Z através de um acelerômetro triaxial embutido em cada sensor. Esses instrumentos são dispostos na estrutura conforme orientação e análise do responsável técnico e/ou projetista da Barragem.

Existem dois tipos de sensores, os sensores de integridade devem ser instalados no material *in situ*, fora da estrutura em local estável, e os sensores de sacrifício devem ser instalados no local onde se deseja monitorar. O sensor de sacrifício é aquele que sofrerá a alteração angular, o algoritmo definido pelo projetista é responsável pelo arranjo de quantos sensores devem variar e qual o grau de inclinação para que seja acionado um alarme, enquanto o sensor de integridade, é aquele que deve permanecer imóvel. Ao atingir os parâmetros definidos, o alarme é acionado e então, aciona-se as sirenes automaticamente. Esse tipo de tecnologia são utilizadas com o objetivo de monitorar deslocamentos superficiais, uma vez que são instalados na superfície do maciço de cada estrutura. A Figura 2 apresenta um exemplo desse instrumento.



Figura 2. Tiltímetro. (Geomin, 2024).

2.1.3 Radar Terrestre

O Radar Terrestre de abertura sintética (SAR) mapeia a evolução de deslocamentos, para obter um melhor conhecimento do comportamento do maciço monitorado, é utilizado para o monitoramento de deslocamento superficial do maciço da barragem. É um equipamento que interage com um alvo, com registro

de potência, variação temporal e o tempo de retorno. Assim como o InSAR (Radar de Abertura Sintética por Interferometria), funciona pela emissão e captação de ondas eletromagnéticas, utilizando a técnica de interferometria, onde variações milimétricas na superfície monitorada entre duas aquisições consecutivas são apresentadas como deslocamento (Ground Probe, 2024). A Figura 3 apresenta um exemplo de funcionamento do Radar de Abertura Sintética.

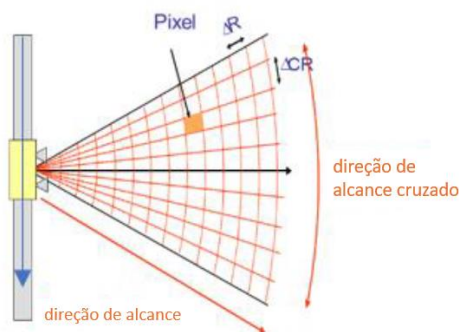


Figura 3. Radar de Abertura Sintética. (Costa, 2022).

2.1.4 Estação Total Robótica (ETR)

A Estação Total Robótica (ETR) é utilizada para monitorar os deslocamentos superficiais da estrutura, com capacidade de mapear a evolução de deslocamentos a curto e longo prazo. É um equipamento de alta precisão para realização do monitoramento de deslocamentos horizontal e vertical a partir de uma base georreferenciada e de pontos fixos instalados na estrutura, como marcos superficiais e prismas. Com esta metodologia, obtém-se a movimentação real nos três eixos de coordenadas (x, y e z), e o deslocamento do ponto nas variáveis: direção, grandeza e sentido do movimento. Sendo assim, é possível verificar se a estrutura está apresentando movimentação e calibrar níveis de segurança. (Ferreira, 2022). A Figura 4 apresenta a ETR e a cabine de proteção desse equipamento.



Figura 4. Estação Total Robótica. (Leica Geosystem, 2021).

2.2 Árvores de Falhas

A Árvore de Falhas (FTA) é uma poderosa ferramenta de análise usada em diversas áreas, como na engenharia e em gerenciamento de riscos e segurança, para entender e visualizar os possíveis cenários de falha em sistemas complexos. Esse método é usado para identificar as causas subjacentes de um evento indesejado, como um acidente, uma falha de equipamento ou um mau funcionamento em um processo. Uma árvore de falhas é uma representação gráfica que descreve as relações entre eventos e falhas em um sistema.

A FTA é um método de análise de sistemas pelo qual condições e fatores que podem contribuir para um evento indesejado específico são identificados de maneira dedutível, organizados de forma lógica e representados graficamente. É uma construção gráfica, que apresenta as interações lógicas entre os elementos

de um sistema que falhe por inteiro, parcialmente ou em combinação e que pode contribuir para uma ocorrência indesejada (Melo; Fusaro, 2015). A Figura 5 apresenta um exemplo de sistema de segurança contra incêndio baseado na análise da FTA. P1, P2, e P3 são probabilidades diferentes para cada caminho.

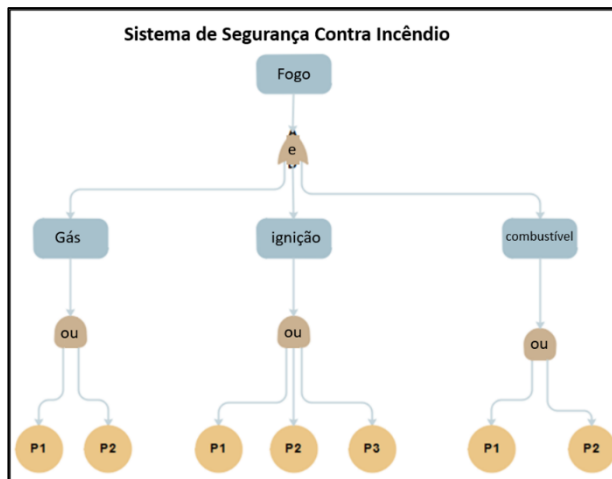


Figura 5. Exemplo de um sistema de segurança contra incêndio (Edrawsoft, 2024).

3 ASPECTOS PERTINENTES PARA UTILIZAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO PARA O ACIONAMENTO DE SIRENES

O estudo se baseia no entendimento de cada tecnologia utilizada para a detecção de ruptura de uma estrutura e o acionamento automático de sirenes, correlacionando com seus diversos objetivos, seja monitoramento de reservatório, deslocamentos superficiais lentos e rápidos, respostas a ondas sísmicas, assim como vantagens, benefícios e desvantagens. Essas considerações são apresentadas nos itens 3.1 à 3.4.

3.1 AAS - Radar Doppler

O acionamento automático de sirenes via Radar Doppler envolve a detecção de movimento através do princípio do efeito Doppler. O radar emite ondas de rádio em direção a uma área de interesse, como a superfície de uma barragem de mineração, e monitora o retorno dessas ondas refletidas. Quando ocorre movimento na superfície, como deslizamentos de terra ou deslocamentos acelerados, as ondas refletidas sofrem um desvio na frequência devido ao efeito Doppler. Esse desvio na frequência é detectado pelo radar, que interpreta a mudança como movimento na área monitorada. Quando um limiar pré-definido de movimento é alcançado, o sistema de acionamento automático de sirenes é ativado, emitindo um alerta sonoro para alertar as pessoas nas proximidades sobre a potencial emergência, aumentando assim a segurança das áreas afetadas.

A definição da localização e tamanho das áreas monitoradas e os alertas de velocidade de deslocamento são variáveis definidas pelo empreendedor de acordo com o objetivo empregado. Esse equipamento pode ser muito indicado, por exemplo, para estruturas que possuem como um dos modos de falha principal a instabilização, permitindo uma detecção rápida e eficaz de movimentos na superfície, considerando a direção e velocidade esperada. É importante analisar geotecnicamente a estrutura monitorada e definir os gatilhos de alerta de acordo com os modos de falha esperados, de modo a aumentar a confiabilidade e evitar falsos positivos.

A definição da área mínima de acionamento pode ser muito importante, por exemplo, para evitar falsos acionamentos por passagem de veículos, helicópteros e pássaros, seguindo o mesmo trajeto definido no alarme. A Figura 6 apresenta um exemplo de definição de área monitorada, área mínima de acionamento e gatilho definido. Nessa situação hipotética, por exemplo, deve ser detectado uma área de 30 m², com uma velocidade mínima de 5m/s, deslocando entre as áreas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 respectivamente, no sentido montante jusante da estrutura. Pode ser indicado a definição de uma área menor localizada a jusante, com o objetivo de aumentar a confiabilidade de um acionamento real.

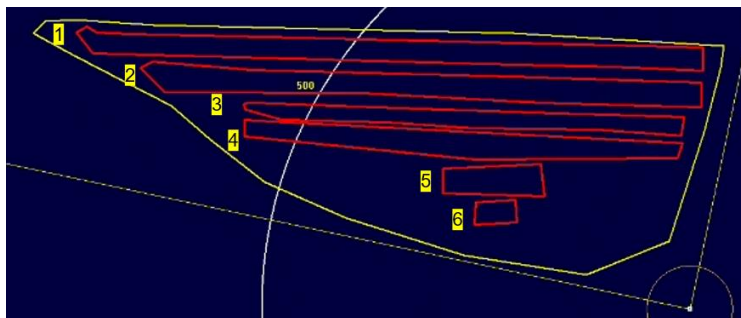


Figura 6. Exemplo de instalação de AAS em Barragem – Doppler (Monitor IQ, 2024)

3.2 AAS - Tiltimeter

O acionamento automático de sirenes via Tiltimeter envolve a detecção da inclinação de vários sensores instalados no maciço. Esses instrumentos são dispostos na estrutura conforme orientação e análise do responsável técnico e/ou projetista da Barragem, podendo ser distribuídos pela estrutura ou instalados em área críticas, por exemplo, na seção principal da estrutura. Esse tipo de tecnologia são indicadas com o objetivo de monitorar inclinações e deslocamentos superficiais, uma vez que são instalados na superfície do maciço de cada estrutura. Para que o acionamento automático de sirenes ocorra, é necessário a definição de um gatilho, que envolve uma definição de uma alteração angular e da quantidade de sensores de sacrifício que devam sofrer essa alteração. A Figura 7 apresenta um exemplo de instalação, em cubos verdes estão representados os sensores de integridade e em cubos vermelhos, os sensores de sacrifício. Em uma eventual ruptura, os sensores de sacrifício se movimentariam e os de integridade, devem continuar imóveis.

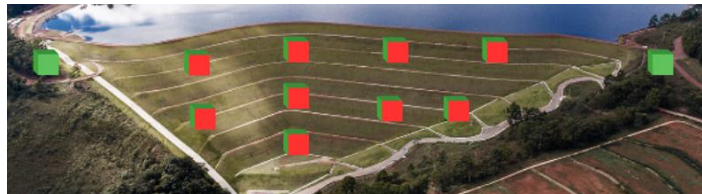


Figura 7. Exemplo de instalação de AAS em Barragem – Tiltimeters (Autor, 2024)

Importante reforçar, que para o acionamento do alerta, os sensores de integridade devem permanecer imóvel, por isso, é extremamente necessário que estejam instalados em terrenos naturais e estáveis. Além disso, ambos sensores, de integridade e sacrifício, são instrumentos muito sensíveis, sendo necessário uma correta indicação em campo com o objetivo de evitar movimentações ocorridas por motivos externos, como contato direto por pessoas, equipamentos ou veículos, além da necessidade de proteção contra vandalismo. Ressalta-se que movimentações por motivos externos podem contribuir para um falso acionamento de sirenes. A Figura 8 apresenta um situação que deve ser evitada, em que tiltimeters estavam instalados em região de passagem de maquinário.



Figura 8. Exemplo de Tiltimeter danificado por maquinário em campo (Autor, 2022)

3.3 AAS – Radar Terrestre ou Estação Total Robótica

O acionamento automático de sirenes via monitoramento de deslocamento superficial pode utilizar Radar Terrestre ou ETR, processando dados em tempo real para detectar movimentos na área monitorada. Esse sistema identifica padrões de movimento que indicam riscos, como deslizamentos ou instabilidade na barragem, e aciona as sirenes com base em critérios predefinidos. Limites de deslocamento ou velocidade acionam o sistema automaticamente. O conhecimento geotécnico é crucial para definir alarmes confiáveis, considerando áreas críticas e velocidades de deslocamento anormais para a estrutura.

Deve-se ter atenção ao utilizar esses equipamentos para o acionamento automático de sirenes, principalmente no que tange à possíveis outliers causados por motivos externos, como variações atmosféricas, chuva, nível de ruído e no caso dos prismas, contato direto em campo por pessoas ou equipamentos. Um salto em um prisma de referência, por exemplo, poderia ocasionar saltos em todos os prismas de monitoramento da estrutura. Além disso, para o caso da ETR, é importante levar em consideração o tempo de ciclo do equipamento, que depende da malha de prismas e da sua configuração, podendo variar de minutos à horas. No caso de rupturas rápidas ocorridas dentro do intervalo de ciclo de leitura, por exemplo, a movimentação do prisma pode ser maior que a janela de busca do equipamento, não atingindo os alarmes definidos mas sim, alarmes de ausência de prisma. Nesse sentido, é importante levar em conta possíveis influências de fatores externos e variáveis envolvidas no monitoramento para evitar tanto falsos positivos, quanto falsos negativos.

3.4 AAS – Árvore de Falhas

As Árvores de Falhas podem ser usadas para implementar sistemas de monitoramento com sensores (nível de água, movimento de solo, etc.) e integrar esses sistemas aos de acionamento automático de sirenes em barragens. Assim, quando critérios críticos são atendidos, as sirenes alertam a comunidade sobre a emergência. Essa abordagem permite uma análise abrangente dos cenários de falha e uma resposta rápida. Para falhas como o galgamento, dados de régua de reservatório, bombeamento, nível pluviométrico e medidor de vazão do extravasor podem servir como gatilhos de acionamento, junto com a análise de deslocamento exigida pela legislação.

Ressalta-se a necessidade de uma análise geotécnica dos principais modos de falha da estrutura e também, uma análise da confiabilidade dos alarmes definidos em cada instrumentação envolvida em uma árvore de falhas. Uma vez que pode existir muitos instrumentos envolvidos, é importante ter confiabilidade nos alarmes individuais para evitar falsos acionamentos, como também, e mais importante, a não ocorrência de alarmes em situações reais.

O acionamento automático de sirenes via Árvores de Falhas é baseada em análise da instrumentação presente na estrutura e no entendimento do objetivo de cada instrumentação, considerando potenciais perdas ou alarmes. Por meio do objetivo de cada monitoramento, a criação da FTA pode ser dividida em duas partes: instrumentação para monitoramento de percolações e poropressões e instrumentação para monitoramento de deslocamentos superficiais e subsuperficiais. A Figura 9 apresenta um exemplo de eventos de topo de uma FTA para uma estrutura geotécnica de barragem.

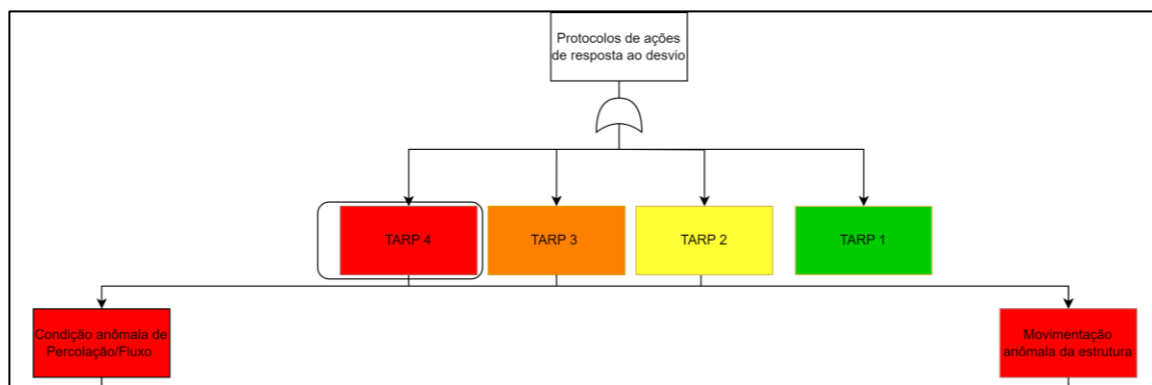


Figura 9. Exemplo de eventos topos de uma FTA para acionamento automático de barragens.

5 CONCLUSÕES

O acionamento automático de sirenes em barragens é uma medida essencial para fortalecer a segurança dessas estruturas, sendo vital para agilizar o processo de evacuação, caso necessário, das comunidades a jusante das estruturas geotécnicas. O constante aprimoramento tecnológico e a conformidade com regulamentações são essenciais para garantir a eficácia contínua desses sistemas.

Os equipamentos utilizados e os parâmetros definidos para acionamento são essenciais e devem ser recorrentemente avaliados durante a vida do ativo, principalmente no caso de alteração na estrutura, como obras de reforço ou retaludamento, modificação dos modos de falha principal da estrutura e/ou seção crítica. Ressalta-se a importância do conhecimento geotécnico acerca da estrutura durante a definição dos alarmes, com o objetivo de definir melhores equipamentos para esse acionamento, além de alarmes confiáveis, considerando áreas críticas e velocidades de deslocamento consideradas anormais para a estrutura em estudo.

Além disso, é de suma importância a existência de protocolos e fluxos a serem seguidos no caso de acionamento automático das sirenes, uma vez que, uma célere e correta comunicação com os órgãos reguladores é necessária, tanto para acionamentos reais quanto para acionamentos indevidos, que podem ocorrer devido a diversos motivos, como alarmes ineficientes ou falhas de tecnologia.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a VALE S.A, ao Centro de Monitoramento Geotécnico do Corredor Sul – VALE pelo apoio para a publicação deste artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANM (2023). Agência Nacional de Mineração (Brasil). Resolução ANM nº 130 de 24 de fevereiro de 2023. Altera a Resolução ANM nº 95, de 7 de fevereiro de 2022, e dá outras providências.
- Costa, F.; Carvalho, N. (2022). “Definição de parâmetros para análise temporal do monitoramento de deslocamento para barragens por tecnologia InSAR.” COBRAMSEG 2022. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.
- Edrawsoft (2024). Diferença Entre a Análise da Árvore de Falhas e a Análise da Árvore de Eventos. Disponível em: <https://www.edrawsoft.com/pt/difference-faulttree-eventtree.html>. Acesso em: 11 de mar. 2024.
- Fernandes, R. B. (2020). Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro. 241 f.
- Ferreira, P.L.; Clemente, B. M.; Miranda, T.M.; Lima, V. B. O.; Gonçalves, D.L. (2022) Monitoramento de Barragem de Rejeito a Montante em Obras de Descaracterização. COBRAE, Porto de Galinhas, Recife, Brasil. 7p.
- Geomin (2024). Tiltmeter. Disponível em: <https://www.geomin.com.br/produtos/tiltmeter>. Acesso em: 12 de mar. 2024.
- Ground Probe (2024). All products. Disponível em: <https://www.groundprobe.com/#>. Acesso em: 01 de mar. 2024.
- Ground Probe (2024). All products. Disponível em: <https://www.groundprobe.com/pt-pt/product/rgr-velox-2/>. Acesso em: 11 de mar. 2024.
- Melo, A. V.; Fusaro, T. C. (2015) Avaliação de métodos de análise de riscos aplicados a barragens, XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, Foz do Iguaçu – PR, 12-14 de maio de 2015.
- Rutschmann, M (2016). Leica GeoMoS Monitoring Solution From any data to final information; Leica Geosystem, part of Hexagon.