

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
FATEC SP

NOME: ERICK FELIX DIONIZIO MATRÍCULA:15105027

NOME: HENRIQUE HIDEAKI TAKEDA MATRÍCULA:15204508

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS À MONTANTE
UTILIZANDO SENSORES DE PROXIMIDADE E STRAIN GAUGE.**

NOME: Erick Felix Dionizio

Matrícula:15105027

NOME: Henrique Hideaki Takeda

Matrícula:15204508

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS À MONTANTE
UTILIZANDO SENSORES DE PROXIMIDADE E STRAIN GAUGE.**

Trabalho de graduação, apresentado ao Curso de Tecnologia em Instalações Elétrica da FATEC SP, como parte das exigências para a obtenção do título de Tecnólogo em Instalações Elétricas.

São Paulo, 24 de junho de 2019.

NOME: ERICK FELIX DIONIZIO

MATRÍCULA:15105027

NOME: HENRIQUE HIDEAKI TAKEDA

MATRÍCULA:15204508

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITOS À MONTANTE
UTILIZANDO SENSORES DE PROXIMIDADE E STRAIN GAUGE.**

Trabalho de graduação, apresentado ao
Curso de Tecnologia em Instalações
Elétrica da FATEC SP, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Tecnólogo em Instalações Elétricas.

Orientador: Prof. Nelson Massao Kanashiro

SÃO PAULO

2019

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por tudo que nos proporcionou ao longo da vida e pelo conhecimento que nos permitiu adquirir.

A todos os Professores pelo suporte oferecido e pela tutoria concedida nesse período de curso. Cada matéria realizada nesses anos foi de fundamental importância para a conclusão do nosso projeto.

Aos nossos pais e irmãos por todo incentivo dado, desde a nossa infância até aqui. Seus ensinamentos nos mostraram o valor da educação, e nos fizeram entender isso com carinho e amor.

Por fim à Faculdade de Tecnologia de São Paulo por oferecer este fantástico curso, onde adquirimos muito mais conhecimento e sabedoria.

RESUMO

O presente trabalho de graduação propõe a aplicação de sensores de proximidade e sensor mecânico para um sistema de monitoramento de barragens de rejeitos construídas pelo método à montante. Além de propor a implantação, o trabalho também aborda a importância histórica e econômica da mineração no Brasil, os impactos ambientais e sociais causados pelas rupturas das barragens e a importância da manutenção de grandes obras. O intuito desse trabalho é cooperar para a criação de um sistema de monitoramento de barragens o mais seguro possível.

Palavras-Chave: Sensores de proximidade. Sensor Mecânico. Sistema de monitoramento. Barragem. Método à Montante. Manutenção.

ABSTRACT

The present undergraduate work proposes the application of proximity sensors and mechanical sensors for a system of monitoring tailings dams built by the upstream method. In addition to proposing the implantation, the work also addresses the historical and importance of mining in Brazil, The environmental and social impacts caused by ruptures of dams and the importance of maintaining large works. The purpose of this work is to cooperate in the creation of a dams monitoring system as safe as possible.

Keywords: Proximity sensors. Mechanical Sensor. Monitoring System. Dam. Upstream Method. Maintenance.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Coleta da aluvião nas margens do rio.	14
Figura 2: Ouro registrado pela coroa nas casas de fundição.	15
Figura 3: Notícia declarando a fundação da CIA. Siderúrgica Nacional.	16
Figura 4: Manifestação contra a privatização da Vale do Rio Doce.	18
Figura 5: Divisão das barragens por potencial de danos ambientais.	19
Figura 6: Represa da casa de pedra em município de Congonhas.	20
Figura 7: Estrutura inicial.	21
Figura 8: Método à montante.	22
Figura 9: Método à jusante.	23
Figura 10: Método da linha de centro.	24
Figura 11: Lama vermelha que tomou conta das cidades de Kolontar e Devescer...26	
Figura 12: Estátua que foi erguido em homenagem às vítimas em Stava.	26
Figura 13: Bento Rodrigues encoberto pela lama após o desastre.	27
Figura 14: Município de Brumadinho devastado pelo rejeito.	28
Figura 15: A foto mostra a sirene intacta, que não funcionou na tragédia.	29
Figura 16: Antes e depois do Rio Doce, atingido pelos rejeitos.	30
Figura 17: Vários peixes foram mortos no Rio Doce.	31
Figura 18: Vegetação completamente destruída na bacia do rio.	32
Figura 19: Aldeia indígena prejudicada pelo desastre.	33
Figura 20: A estrutura de um piezômetro.	35
Figura 21: Funcionamento da tecnologia TrueLine	37
Figura 22: Diversos tipos de sensores	38
Figura 23: Sensor indutivo.	39
Figura 24: Componentes eletrônicos do sensor indutivo.	40
Figura 25: Ligações dos sensores de três e quatro terminais.	41
Figura 26: Especificações do sensor com suas devidas legendas.	42
Figura 27: Sensor de proximidade atuando como contador de garrafas.	43
Figura 28: Sensores capacitivos de proximidade.	44
Figura 29: Sensores capacitivos no controle de nível de líquidos.	45

Figura 30:Componentes internos do sensor capacitivo.....	46
Figura 31: Sensor capacitivo vedado.	47
Figura 32: Tabela com a constante dielétrica dos materiais.	47
Figura 33: Fita elétrica.....	49
Figura 34:Extensômetro.	52
Figura 35: Extensômetro típico.....	53
Figura 36:Padrões de extensômetro.	55
Figura 37: Ponte de Wheatstone.....	56
Figura 38: Exemplo de aplicação de Ponte de Wheatstone.....	56
Figura 39: Aplicação de extensômetro Ponte de Wheatstone.....	57
Figura 40: Aplicação de dois extensômetros na Ponte de Wheatstone.	58
Figura 41: Módulo conversor HX711.....	59
Figura 42: Módulo Wi-Fi ESP32.....	60
Figura 43:Diagrama de funcionamento do sistema de monitoramento e alerta.	62
Figura 44:Sistema de alerta de terremoto via mensagem utilizado no Japão	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 PROBLEMA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	13
2. HISTÓRIA DA MINERAÇÃO NO BRASIL.....	14
2.1 INÍCIO DAS ATIVIDADES DE MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS	16
2.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA.....	17
2.3 ESTATIZAÇÃO E PRIVATIZAÇÃO	18
2.4 BARRAGENS EXISTENTES EM MINAS GERAIS	19
2.5 ESTRUTURA DAS BARRAGENS DE REJEITOS.....	20
2.5.1 Métodos construtivos de barragem de rejeitos	21
2.5.2 Método à montante.....	22
2.5.3 Método à jusante	23
2.5.4 Método da linha de centro	24
2.6 RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS.....	25
2.6.1 A lama vermelha em Ajka.....	25
2.6.2 Rompimento de barragem em Val di Stava	26
2.6.3 Rompimento de barragem em Mariana	27
2.6.4 Rompimento de barragem de Brumadinho	28
2.7 IMPACTO AMBIENTAL	30
3. SISTEMAS DE MONITORAMENTO E ALERTA	34
3.1 TÉCNICAS DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES UTILIZADA PELA MINERADORA BRASILEIRA	34
3.2 TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA MONITORAMENTOS.....	36
3.2.1 Sistema óptico com laser de alta precisão	36
4. SOLUÇÕES PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS VIA SENSORES .	38
4.1 SENSORES DE PROXIMIDADE	39
4.1.1 Sensor Indutivo.....	39
4.1.2 Principais características dos sensores indutivos.....	42
4.1.3 Principais aplicações	43
4.1.4 Vantagens e desvantagens do sensor indutivo	43
4.2 SENSOR DE PROXIMIDADE CAPACITIVO	44
4.2.1 Princípio de funcionamento	46
4.2.2 Tipos de alvo do sensor de proximidade capacitivo.	46
4.2.3 Aplicações	48

4.2.4	Vantagens e desvantagens do sensor capacitivo	48
4.3	APLICAÇÃO DE SENSOR DE PROXIMIDADE NO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS	49
4.3.1	Custo Aproximado do sistema	51
4.4	SENSORES MECÂNICOS	52
4.4.1	Extensômetro.....	52
4.4.2	Princípio de funcionamento	52
4.4.3	Vantagem e desvantagem de extensômetro	55
4.4.4	Ponte de Wheatstone	56
4.4.5	Dispositivo de Interface	58
4.4.6	Módulo Conversor HX711	59
4.4.7	Especificações/características:.....	60
4.4.8	Módulo Wi-Fi ESP32	60
4.4.9	Especificações/características.....	61
4.5	APLICAÇÃO E CUSTO DO SISTEMA COM O EXTENSÔMETRO ...	61
4.6	MÉTODO DE INSTALAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA ...	62
CONCLUSÃO		64
Referências Bibliográficas.		66

1. INTRODUÇÃO

A última década tem sido marcada por muitos acidentes e tragédias envolvendo grandes estruturas como, desabamento de prédios, rupturas de pontes e rompimentos de barragens, por conta desses acontecimentos bens privados foram perdidos, ecossistemas foram abalados, espécies de animais foram ameaçadas e vidas humanas foram ceifadas. A negligência com a manutenção dessas grandes obras é o principal motivo delas terem colapsado, neste trabalho de graduação iremos propor a aplicação de sensores de proximidade e sensor mecânico em um sistema de monitoramento de barragens de rejeitos construídas pelo método à montante, que é o mesmo método utilizado nas duas barragens que romperam, esse trabalho será dividido em quatro capítulos.

O capítulo 1 põe em evidência o problema existente com a falta de manutenção das barragens e pontua os objetivos dessa pesquisa.

No capítulo 2 é abordada a história da mineração no Brasil, a importância histórica e econômica, os tipos de barragens de rejeitos e as rupturas de barragens no Brasil e no mundo. Destacando como a mineração sempre foi uma atividade lucrativa, mas perigosa, por conta dos métodos utilizados para explorar minérios, das guerras e por fim da negligência.

Sistemas de monitoramento já utilizados nas barragens da Vale do rio doce é tema abordado no capítulo 3, e também nesse capítulo mostraremos um novo sistema em fase de teste que tem um grande potencial.

Por fim no capítulo 4 apresentaremos os sensores de proximidade indutivo e capacitivo, e o sensor mecânico, analisaremos qual deles é a melhor escolha, e desenvolveremos a nossa ideia de sistema de monitoramento. Por fim elaboraremos um orçamento para chegar à conclusão final, expondo se é viável a implementação e se é a melhor opção.

1.1 PROBLEMA

No início de 2019, aconteceu uma tragédia de grande escala em Minas Gerais, o rompimento da barragem de brumadinho que deixou 246 mortos e 24 desaparecidos chocou o país mais uma vez e convidou as pessoas a refletirem no que a negligência em diversos tipos de obras pode causar. A falta de manutenção e monitoramento da barragem é apontado como a causa desses eventos, que infelizmente não foi o primeiro. Em 2015 já havia acontecido um rompimento de barragem de rejeitos, formados por resíduos de extração de ferro, que também era propriedade da empresa Vale. Vítimas da avalanche de rejeitos tóxicos 18 pessoas perderam a vida, os rejeitos danificaram a infraestrutura do município, e trouxeram danos aos ecossistemas do rio doce e marinho.

Atualmente a empresa Vale do Rio Doce apresentou um estudo ao governo que indica mais um possível rompimento em breve, de acordo com o relato no próprio site, a empresa já está promovendo simulados de emergência com a população na “Zona de Segurança Secundária” por conta do possível rompimento da barragem “Sul Superior da mina Gongo Soco” que fica em Barão de Cocais em Minas Gerais.

Os habitantes da “Zona de Auto Salvamento” já estão sendo realocados para hotéis, ou casa de familiares. A “Zona de Auto Salvamento” diz respeito às pessoas em um raio de distância de 10 quilômetros da barragem, ou a uma distância de 30 minutos em relação ao impacto dos rejeitos, essas pessoas no caso do rompimento da barragem precisam chegar aos pontos seguros por conta própria, pois, o tempo de atuação das forças de salvamento como no caso do corpo de bombeiros não é suficientemente rápido para auxiliar no deslocamento para os pontos seguros.

Já a “Zona de Segurança Secundária” diz respeito às pessoas que estão a uma distância acima de 10 quilômetros, ou que podem ser alcançadas pelos rejeitos em um tempo superior a 30 minutos, tempo em que já é possível haver o auxílio das forças de salvamento, esses moradores da Zona de Segurança Secundária estão participando dos simulados de risco de rompimento da barragem, pois, mesmo estando a uma distância maior do rompimento ainda sim podem ser impactadas.

1.2 OBJETIVOS

As barragens de rejeitos já possuem sistemas de monitoramento, no site da empresa a Vale garante que a barragem que está em nível de risco está sendo monitorada 24 horas por dia, os sistemas de monitoramento de barragens geralmente são compostos por sensores enterrados próximos a barragem, que tem como objetivos principais detectar vibrações fora do comum e também perceber prováveis diferenças na umidade.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre a possibilidade da implementação de outro tipo de sistema de monitoramento e alerta de barragens de rejeitos, utilizando sensores já consolidados na indústria, que são grandes personagens na automatização de muitas funções, como por exemplo monitorar níveis de tanques, fazer a contagem de peças, e detectar possíveis deformações de certos objetos, em conjunto com aplicação de um método mais moderno no acionamento de sistema de alertas, utilizando a comunicação via Wi-Fi.

Os sensores estudados neste trabalho serão: Sensores de proximidade indutivos; sensores de proximidade capacitivos; Strain Gauge que é o componente que detecta deformações existente geralmente dentro das células de carga; também faremos uma breve menção ao potencial dos sistemas utilizando a tecnologia Laser que vem sendo utilizado em diversas funções. Com os avanços da eletrônica esse dispositivo pode ser um instrumento que monitore barragens com muita precisão. Também serão abordados tópicos de componentes de interfaces como o Módulo conversor HX711 e o Módulo Wi-Fi ESP32, que são tecnologias modernas que podem ser inovadoras nessa área.

2. HISTÓRIA DA MINERAÇÃO NO BRASIL

Nas grandes navegações de Portugal os itens mais procurados eram, metais preciosos e especiarias, no Brasil a procura começa em 1500, aparentemente a Terra não possuía essas riquezas, mas inspirados pelas descobertas Espanholas em suas colônias encontrando principalmente prata, os portugueses continuaram a sua busca. No final do século XVII os bandeirantes encontraram ouro em Sabará e em Vila Rica, a atual Minas Gerais. A descoberta do ouro veio em um momento de crise econômica para Portugal, então a exploração de ouro se tornou muito importante. Pelo fato de a exploração do ouro não precisar de equipamentos de alto custo, muitos se lançaram nesse novo negócio, com isso os bandeirantes incomodados com essa exploração desenfreada pediram a exclusividade para Portugal que não a concedeu, isso culminou na guerra dos “Emboabas” que era o termo usado pelos bandeirantes referindo-se aos estrangeiros. A guerra terminou com a vitória dos portugueses que dividiram as capitanias, dando origem as províncias de São Paulo, Rio de Janeiro e de Minas Gerais.



Figura 1: Coleta da aluvião nas margens do rio.

Fonte: <https://blogdoenem.com.br/wp-content/uploads/2016/01/O-ciclo-do-Ouro.jpg>

Com uma grande dívida com a Inglaterra e com muitas pessoas atrás do ouro no Brasil, a coroa portuguesa impõe impostos sobre a descoberta do ouro e

implanta as casas de fundição para evitar a sonegação de impostos e o contrabando de ouro, isso causou muitas revoltas contra a coroa, mas, sem sucesso. Outra descoberta importante foram os diamantes, encontrados por volta do ano de 1727.



Figura 2: Ouro registrado pela coroa nas casas de fundição.

Fonte: <https://historiaprimeiroanoalasallesp.files.wordpress.com/2016/11/senza-titulo-1.jpg?w=397&h=359>

Após a independência e a proclamação da república, mudanças nas leis abriram o caminho para grandes projetos na mineração, mas, as mineradoras brasileiras encontraram dificuldades para competir com as grandes do ramo no mundo. Isso veio a mudar por conta das guerras e o aumento da demanda de matéria prima para as armas bélicas, com isso o negócio começou a deslancar. Em 1941 a Companhia Siderúrgica Nacional foi criada para impulsionar a produção de aço no Brasil, em 1942 uma negociação entre Brasil, Estados Unidos e Grã-Bretanha deu origem a Companhia Vale do Rio Doce, que foi criada para abastecer essas duas grandes potências com o minério de ferro brasileiro, e em menos de

uma década a empresa se tonou responsável por mais de 80% das exportações de minério de ferro do país.



Figura 3: Notícia declarando a fundação da CIA. Siderúrgica Nacional.

Fonte: <https://brasil.estadao.com.br/blogs/arquivo/wp-content/uploads/sites/75/2011/04>

A companhia Vale do Rio Doce investiu na busca de novas fontes de ouro, algumas foram encontradas, e em alguns casos houve conflito entre os garimpeiros e os moradores das regiões exploradas. No final da década de 90 a companhia foi privatizada, a então companhia estatal foi vendida por 3,3 bilhões de dólares. A mineração sempre rendeu muito lucro, e atualmente é cerca de 5% do PIB, e também é uma atividade que emprega mais de 180 mil pessoas diretamente, mas, é sempre foi uma área polêmica, e no início do século XXI tragédias aconteceram com os rompimento das barragens de rejeitos, que deixou muitos mortos e prejudicou o ecossistema do rio doce.

2.1 INÍCIO DAS ATIVIDADES DE MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS

O início das atividades de mineração em Minas Gerais é o mesmo do Brasil, pois as primeiras jazidas de ouro foram descobertas em seu território pelos bandeirantes nas suas expedições. Além da descoberta do ouro, em 1727 também foi descoberto o diamante. Após o período do Brasil colônia, e do Brasil império a atividade de exploração de minérios foi estatizada, até o fim da década de 90.

2.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

A atividade de extração de minérios da terra tem um peso grande para a economia do país, tem-se o exemplo disso no recorde de superávit no segundo semestre de 2017, em que a exportação desses minérios teve um grande peso na conta final. A matéria prima retirada do processo é muito utilizada no dia a dia das pessoas, as lascas de ferro em seu estado bruto passam por processos que as transformam no aço por exemplo, material amplamente utilizado nas indústrias como carcaça de eletroeletrônicos, eletrodomésticos, estruturas de sustentação e em outros fins. A mineração também atrai investimento e é uma área muito lucrativa, desde a descoberta do ouro sempre foi uma área bem visada, tanto foi que há relatos de muitas pessoas deixando trabalho, casa e até o país em busca do ouro aqui do Brasil em busca do sucesso financeiro. Historicamente influenciou em grandes mudanças no mundo, como por exemplo na revolução industrial, no Brasil colônia o ouro que Portugal explorava era praticamente repassado para a Inglaterra por conta das grandes dívidas feitas com tratados e acordos como por exemplo o tratado dos panos e vinhos, acredita-se que esse ouro foi responsável por financiar a revolução industrial.

No Brasil a mineração é responsável por quase 5% do PIB nacional, o produto resultante desse negócio pode ser utilizado em vários tipos de indústrias como siderúrgicas, fertilizantes, petroquímicas e metalúrgicas, com essa demanda vinda de vários lados a essa área se destaca e traz retornos para o país. Outro ponto positivo é a geração de empregos diretos e indiretos, torno de 180 mil pessoas estão empregadas diretamente exercendo atividade na extração de matéria prima, e muitos estão empregados indiretamente nas indústrias que dependem da existência da matéria prima para formar o seu produto final.

2.3 ESTATIZAÇÃO E PRIVATIZAÇÃO

O empresário americano Percival Farquhar compra em 1911 a empresa Brazilian Hermatite Syndicate, que logo depois de tornou a Itabira Iron, esse empresário possuía investimentos na Rússia e nos Estados Unidos em borracha a ferroviária, e decide apoiado pelo presidente da época Epitácio Pessoa investir nessa nova empreitada. O presidente fez uma concessão para que Percival pudesse explorar a área de Itabira, que pode explorar livremente até a eleição de Getúlio Vargas como novo presidente. Getúlio coloca como presidente da Comissão Executiva do Plano Siderúrgico Nacional Guilherme Guinle, um antigo rival de negócios de Percival, os dois competiram por muitos anos o domínio de vários negócios, como o domínio do fornecimento de energia no Rio de Janeiro. Guinle convence o presidente de que a área de Itabira e a exploração dos minérios do local deviam ser dos brasileiros, e como Getúlio tinha vontade de estatizar ele reivindica a empresa em 1942 para o estado e cria a estatal Vale do rio Doce. Um ano antes em 1941 outra medida importante foi tomada pelo presidente que Criou a Companhia Siderúrgica Nacional, a CSN.

A privatização da empresa Vale que foi responsável por mais de 80% das exportações de minérios para a indústria bélica durante a segunda guerra mundial foi no ano de 1997 durante o governo do presidente Fernando Henrique Cardoso com o objetivo de pagar dívidas externas e internas da Vale, essa decisão foi bem vista por parte da população que acreditava que a empresa estava sendo subutilizada pela administração do estado. A Vale foi vendida por aproximadamente 3,3 bilhões de dólares.



Figura 4: Manifestação contra a privatização da Vale do Rio Doce.

Fonte: https://farm5.staticflickr.com/4157/33654256014_cc50364eaf_z.jpg

2.4 BARRAGENS EXISTENTES EM MINAS GERAIS

Em Minas gerais existem 698 barragens cadastradas no banco de Declaração Ambiental do estado, e segundo o relatório da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) 22 dessas barragens estão sem estabilidade, no relatório de 2017 que foi apresentado em fevereiro de 2018 as barragens em condições satisfatórias foram 96,7% do total, uma das barragens que estava incluída nesse percentual positivo era a de Brumadinho. Dentre essas 22 barragens não estáveis, os auditores usaram como critério para inseri-las nesse grupo irregularidades na estrutura ou até a falta de documentos.

A FEAM citada anteriormente é fundação responsável por fazer os relatórios indicando as possíveis irregularidades nas barragens que fazem parte do programa de Gestão de Rejeitos e Resíduos, esses relatórios ficam a poder da SEMAD (Secretaria de Estado e Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável).

As barragens são classificadas em três categorias levando em conta o potencial de dano ao meio ambiente que elas apresentam, são elas: Classe 1, de baixo potencial de dano ambiental, Classe 2, de médio potencial de dano ambiental e a Classe 3, de alto potencial de dano ao meio ambiente. Dentre as barragens registradas, 190 se enquadram na Classe 1, 303 de Classe 2 e 205 de Classe 3.

A barragem de brumadinho era registrada como estrutura com baixo risco pelos auditores e Classe 3 com auto potencial de danos ao ambiente, era declarada estável e não recebia rejeitos desde 2015.



Figura 5: Divisão das barragens por potencial de danos ambientais.

Fonte: <https://img.r7.com/images/brumadinho-26012019111816401?dimensions>

2.5 ESTRUTURA DAS BARRAGENS DE REJEITOS

Barragem de rejeitos é uma estrutura construída com terra, enrocamento, concreto, e o próprio rejeito para depósito dos resíduos resultante do processo de mineração, sendo este, o tipo de barragem que acabou rompendo nos acidentes em Brumadinho e Mariana.

O rejeito depositado na barragem é um material que é a sobra do processo de separação do produto bruto em concentrado (material rico, com valor econômico) e rejeito (material sem demanda de mercado). O rejeito é depositado em forma de polpa, ou seja, uma fração líquida com sólidos em suspensão.

Segundo a Samarco, mineradora responsável pela barragem rompida em Mariana, os rejeitos vão sendo depositados na barragem, que funciona como uma barreira, e conforme o rejeito é depositado, a parte sólida se acomoda no fundo da barragem, e a água decantada na parte superior é drenada e tratada, sendo reutilizado no processo de mineração. E com passar do tempo, a barragem seca, até que deixa de receber rejeitos.



Figura 6: Represa da casa de pedra em município de Congonhas.

Fonte: <https://www.falagm.com/uploads/images/2019/05.jpg>

2.5.1 Métodos construtivos de barragem de rejeitos

Basicamente são utilizados três tipos de métodos de construção para barragens de rejeitos. Para todos métodos é feito uma estrutura inicial, chamado de dique de partida, para segurar o resíduo proveniente do processo de beneficiamento do minério. À medida que o reservatório vai enchendo, novas camadas são construídas, conhecido como alteamento.

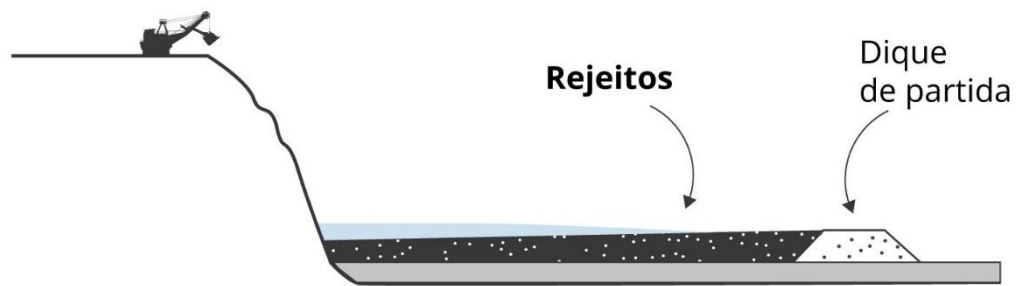


Figura 7: Estrutura inicial.

Fonte: [https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc\(\)/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png](https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png)

2.5.2 Método à montante

Consiste na construção e alteamento da barragem sempre à montante sobre o rejeito já consolidado, ou seja, degraus feitos com próprio rejeito sobre o dique inicial.

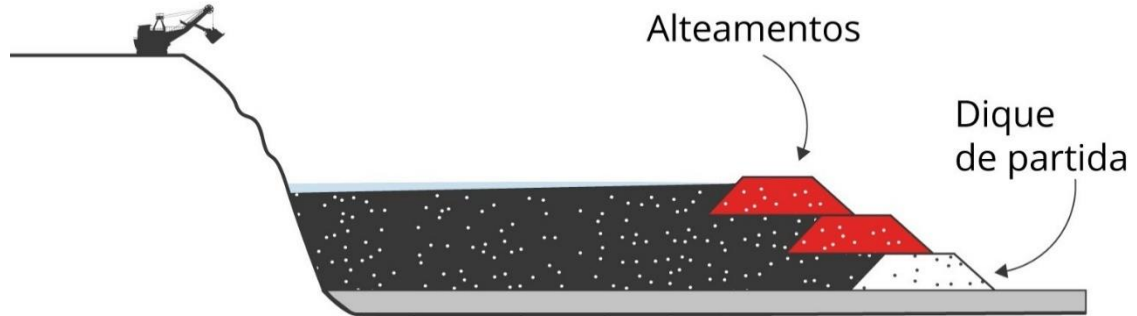


Figura 8: Método à montante.

Fonte: [https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc\(\)/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png](https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png)

Este é o método mais utilizado pela maioria das mineradoras, por ser a opção mais barata, inclusive as barragens que romperam em Brumadinho e Mariana foram construídas desta maneira.

Embora este seja o método mais utilizado, é o modelo de construção menos seguro, pois esta barragem é construída em cima de rejeitos que foram depositados, não oferecendo uma estabilidade maior.

2.5.3 Método à jusante

Consiste na construção e alteamento da barragem sempre à jusante, na direção da corrente dos resíduos, o que melhora a estabilidade da estrutura em comparação ao método à montante.

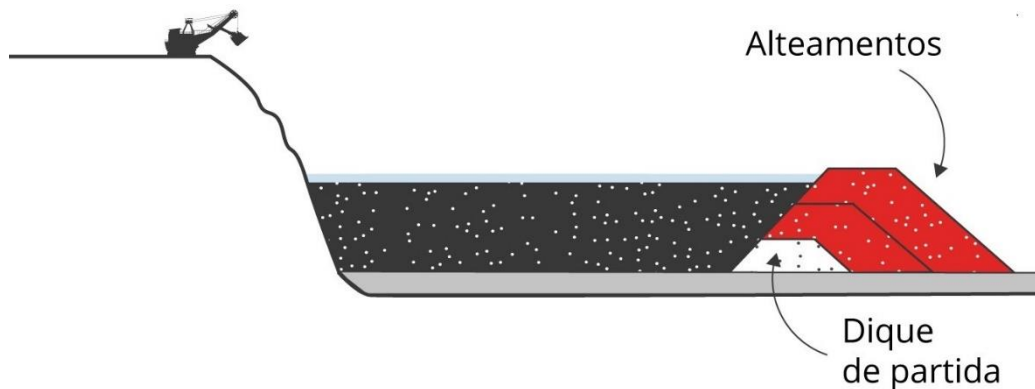


Figura 9: Método à jusante.

Fonte: [https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc\(\)/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png](https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png)

Este método tende a apresentar menor risco entre todos os métodos construtivos utilizado entre as mineradoras, devido ao fato de a geometria da barragem apresentar maior constância.

2.5.4 Método da linha de centro

Consiste na construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, mantendo assim, o eixo vertical do sistema chamado de linha de centro, sobre o rejeito depositado à montante e sobre o próprio barramento à jusante.

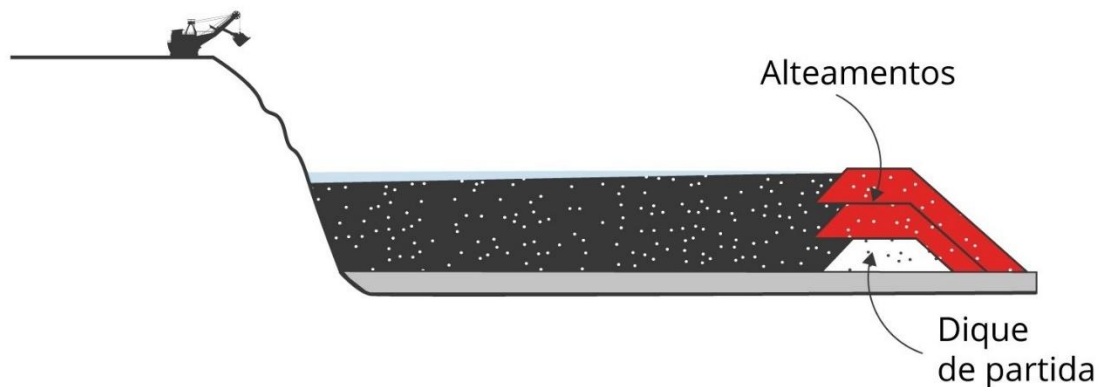


Figura 10: Método da linha de centro.

Fonte: [https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc\(\)/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png](https://s2.glbimg.com/GuVcal8HTXeGX3_2R8yseLSnuuE=/0x0:1600x5034/1600x0/smart/filters:strip_icc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2019/L/g/8rLTnFQGipm9LWz5eBng/como-funciona-a-barragem.png)

Este método é considerado um método intermediário entre os métodos apresentados anteriormente, com mais riscos que o método de jusante e menos que o de montante.

As informações citadas acima, tem como respaldo o estudo de Rico, Benito, Salgueiro, Díez-Herrero e Pereira (2008), neste estudo é apresentado a relação de falhas em barragens dependendo do método construtivo utilizado. Dados apontaram que o método à montante corresponde a 76% das falhas em barragem, sendo o restante proveniente dos métodos jusante e de linha de centro.

No Brasil, depois do desastre em Mariana, o então governador de Minas Gerais, Fernando Pimentel, assinou o decreto nº 46.993 (2 de maio de 2016), suspendendo a formalização de novos processos de licenciamento ambiental de ampliação de barragens já existentes que tenham utilizado o método à montante e de construção de novos depósitos projetados pelo mesmo método.

Conforme o decreto, a aplicação da suspensão é válida até a definição de “critérios e procedimentos adicionais a serem adotados nos empreendimentos minerários após a apresentação, pelas empresas, da Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade”, uma etapa subsequente à realização de uma auditoria externa para atestar a segurança da barragem por especialistas em segurança de barragens.

2.6 RUPTURA DE BARRAGENS DE REJEITOS

Nos últimos 50 anos, foram registrados mais de 50 desastres com barragens ao redor do mundo. Sendo os piores acidentes, o rompimento de barragem de Fundão, mais conhecido como Mariana em 2015 e o rompimento de barragem de Brumadinho em 2019. O que chama atenção é o fato de em tão curto espaço de tempo duas barragens sobre supervisão da mesma empresa, no mesmo estado se romperem de formas semelhantes.

O que fica claro pelo estudo é que além de o advento de um fenômeno natural intenso que pode abalar a estrutura da barragem, na maioria dos casos de desastres industriais envolvendo barragem de rejeitos, há a negligência, falha humana, falta de fiscalização e a incapacidade da regulamentação por parte do estado, isso não só no Brasil, mas também em outros países.

2.6.1 A lama vermelha em Ajka

Em 4 de outubro de 2010 ocorreu um desastre industrial conhecido como o desastre ambiental de Ajka, no condado de Veszprém na Hungria. A ruptura da barragem da mineradora MAL liberou um milhão de metros cúbicos de resíduo tóxico inundando as localidades mais próximas em especial as cidades de Kolontar e Devescer. O lodo que alcançou entre um e dois metros de altura, provocou a morte de 10 pessoas e deixou mais de 150 feridos.

O resíduo tóxico que tomou conta das cidades ao redor ficou conhecido como barro vermelho, mistura vertida pelo processo Bayer para purificar o mineral bauxite em alumina. Este barro que é altamente alcalino provocou uma queimadura química em mais de 80 pessoas. O primeiro ministro da Hungria declarou que o

desastre foi provocado por um erro humano, os diretores da mineradora MAL foram presos e a empresa foi estatizada.



Figura 11: Lama vermelha que tomou conta das cidades de Kolontar e Devescer.

Fonte: <http://cdn.nwmgroups.hu/s/img/i/1210/20121004-vorosiszapkatasztrofa.jpg>

2.6.2 Rompimento de barragem em Val di Stava

Segundo a ONU, o evento mais trágico envolvendo uma barragem de minério nas últimas três décadas, o rompimento das duas barragens controladas pela mineradora Prealpi resultou em um dos piores desastres na história da Itália, 180 mil metros cúbicos de rejeitos provocaram a morte de 268 pessoas e destruíram vários prédios e pontes. O desastre ambiental ocorreu em 19 de julho de 1985, as barragens ficavam situadas acima do vilarejo de Stava, no norte da Itália. Mais uma vez foi uma falha humana, os dutos de drenagem estavam entupidos por sedimentos resultando na infiltração de água no solo da represa Val di Stava.



Figura 12: Estátua que foi erguido em homenagem às vítimas em Stava.

Fonte: https://www.researchgate.net/profile/Lucia_Simeoni/publication/322436744/figure.png

2.6.3 Rompimento de barragem em Mariana

Dia 5 de novembro de 2015, houve o rompimento da barragem Fundão, controlado pela Samarco, um empreendimento conjunto das maiores empresas de mineração no mundo, a Vale e BHB Billiton. O rompimento da barragem causou uma grande enxurrada de lama, que devastou o distrito de Bento Rodrigues, no município de Mariana em Minas Gerais.

O rompimento da barragem causou o vazamento total de 43 milhões de metros cúbicos de lama de rejeitos, destruindo casas e ocasionando a morte de 18 pessoas, incluindo habitantes de uma cidade próxima e funcionários da própria mineradora.

Considerado o desastre industrial que causou o maior impacto ambiental da história no Brasil e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeitos, a quantidade de lama que vazou nesta tragédia representa mais do dobro da quantidade vazada no segundo pior acidente do gênero, ocorrido em 4 de agosto de 2014 na mina canadense Mount Polley na Colúmbia Britânica. Mais de 20 pessoas e 4 empresas respondem na justiça pelo desastre provocado pelo rompimento, para o Ministério Público Federal, faltaram medidas de prevenção de acidente.



Figura 13: Bento Rodrigues encoberto pela lama após o desastre.

Fonte: http://agenciabrasil.ebc.com.br/sites/default/files/atoms/image/983941-07112015-_wdo6873.jpg

2.6.4 Rompimento de barragem de Brumadinho

Rompimento da barragem em Brumadinho, controlada pela mineradora multinacional brasileira Vale ocorreu na região metropolitana de Belo Horizonte em Minas Gerais no dia 25 de janeiro de 2019. Considerado como um dos maiores desastres deste gênero, esta tragédia pode superar o número de mortes do pior acidente de rompimento de barragem, ocorrido na Stava em 1985.

O desabamento da barragem 1 da mina Córrego do Feijão, causou um Tsunami de rejeitos de minério de ferro que resultou na morte de mais de 200 pessoas, dentre elas funcionários da mineradora e habitantes do município de Brumadinho, gerando uma calamidade pública.



Figura 14: Município de Brumadinho devastado pelo rejeito.

Fonte: https://www.acritica.com/uploads/news/image/757954/show_brumadinho_3BC9F5EE-9B4F-451B-8A2A-8767D3D51199.JPG

Esta barragem foi construída em 1976 pela Ferteco Mineração, sendo ampliada ao longo do ano por diversos projetistas e empreiteiros. A barragem foi alteada sucessivamente utilizando o método à montante, sendo este o método que apresenta maior número de falhas. Esta barragem era considerada uma estrutura de pequeno porte e de baixo risco, no cadastro da Agência Nacional de Mineração e de acordo com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Porém esta estrutura era

classificada com alto dano potencial, sendo a maior classificação da legislação, com grande potencial poluidor, com dano potencial associado alto, oferecendo risco de perdas de vidas humanas.

No momento do acidente as sirenes de alerta que deveriam ter sido acionadas não funcionaram, o que acabou contribuindo para grande número de mortes nesta tragédia. O presidente da Vale na época, Fabio Schvartsman declarou que a sirene de alerta não tocou, pois, o rompimento da barragem foi muito rápido e a sirene foi engolfada pela queda da barragem antes que ela pudesse tocar. Ao contrário do discurso da empresa, ao menos duas sirenes que ficam próximas a áreas devastadas estão intactas, inclusive soaram dois dias depois da tragédia quando a empresa suspeitou o rompimento de barragem de água próximo ao local do acidente.

Segundo a empresa o alerta sonoro era acionado manualmente, por uma central situada fora da mina e que funciona 24 horas por dia, chamado de Centro de Controle de Emergência e Comunicação (CECOM) e o plano de emergência (PAEBM) previa que, uma vez constada a ruptura, o coordenador do PAEBM deveria avisar o CECOM, que por fim iria acionar a sirene.



Figura 15: A foto mostra a sirene intacta, que não funcionou na tragédia.

Fonte: https://f.i.uol.com.br/fotografia/2019/02/06/15494615515c5ae82f64d4d_1549461551_3x2_xl.jpg

2.7 IMPACTO AMBIENTAL

Os rompimentos das barragens resultaram em grandes consequências, as tragédias ocorridas no passado tiraram inúmeras vidas e causaram grandes devastações. Além da perda de vida humana, este tipo de desastre, causa um enorme impacto ambiental. Por conta do grande volume de lama de rejeitos vazados nos acidentes, as consequências são catastróficas, quantificar um desastre com as proporções de Mariana ou de Brumadinho é uma tarefa muito complexa. Em ambos os casos os impactos ambientais ainda não são devidamente conhecidos.

O rompimento de barragem de Fundão, da mineradora Samarco, foi considerado o maior desastre ambiental da história brasileira. Os 43 milhões de metros cúbicos de rejeitos que foram despejados, segundo a Samarco são compostos por óxido de ferro, água e muita lama, que segundo a empresa não era tóxica, porém, capaz de provocar grandes danos. No entanto, segundo o levantamento ambiental da marinha do Brasil, constatou a presença de metais pesados (arsênio, manganês, chumbo e selênio) na foz do Rio Doce que foi atingido pela lama, metais que podem sim causar prejuízos potenciais ao meio ambiente.



Figura 16: Antes e depois do Rio Doce, atingido pelos rejeitos.

Fonte: <https://pbs.twimg.com/media/CTjjXrYWIAAbkhP.jpg>

O tsunami de resíduos atingiu primeiramente o córrego de Santarém, em seguida atingindo o Rio Gualaxo do Norte, e percorreu até o seu afluente, o Rio do Carmo. Continuou percorrendo até encontrar o Rio Doce, e pelo curso da bacia

hidrográfica do rio, as lamas foram carregadas até sua foz, atingindo o oceano atlântico. O resíduo percorreu por 663,2 quilômetros de recursos hídricos do estado de Minas Gerais e de Espírito Santo.

Apenas um mês após o desastre, 11 toneladas de peixes mortos foram retiradas, 8 toneladas em Minas Gerais e 3 toneladas no Espírito Santo. Os peixes foram engolfados pela lama, pois, mesmo os resíduos liberados não sendo tóxicos, os rejeitos de minério acabam reduzindo a quantidade disponível de oxigênio na água, matando, portanto, a maioria da vida aquática atingida pela lama por asfixia. Segundo o IBAMA, existem 80 espécies de peixes no Rio Doce, e 11 delas estão ameaçadas de extinção e 12 delas são endêmicas, existindo apenas nesta bacia hidrográfica e assim, podendo ter sido extintas. Além da morte de peixes, micro-organismos e outros seres foram afetados, destruindo uma cadeia alimentar.



Figura 17: Vários peixes foram mortos no Rio Doce.

Fonte: http://s2.glbimg.com/wpF0204sbfHTuy5zLrFatrb7Vcw=/620x465/s.glbimg.com/jo/g1/f/original/2015/11/10/peixe_2.jpg

Além de causar muitas mortes no interior dos rios, a vegetação próxima à região também sofreu grandes consequências. Uma grande quantidade da mata ciliar foi completamente destruída, as matas ciliares são extremamente importantes para a manutenção da qualidade física, química e biológica da água em uma bacia hidrográfica. O estudo feito pelos pesquisadores do laboratório de ecologia e restauração florestal da Esalq/USP mostra que o desastre causou a devastação das

matas ciliares e soterrou meios de regeneração de florestas, comprometendo assim sua resiliência. O solo da região também foi afetado, o resíduo da mineração causou uma desestruturação química afetando o PH da terra, resultando na dificuldade de desenvolvimento de espécies que viviam ali, modificando completamente a vegetação local.



Figura 18: Vegetação completamente destruída na bacia do rio.

Fonte: <https://storage.googleapis.com/planet4-brasil-stateless/2018/07/lama-rio.jpg>

Vale ressaltar que o rejeito despejado provocou a pavimentação de uma grande área, depois da lama secar e solidificar como cimento, nada vai crescer naquele local, sendo infértil. Porém em razão a grande quantidade de resíduos, a secagem completa poderá demorar muitos anos.

Apesar da quantidade menor de rejeitos despejados em relação ao desastre de Mariana, o desastre ocorrido em Brumadinho também pode desencadear grandes problemas ambientais. Os rejeitos que foram liberados destruíram grande parte da vegetação local e causaram a morte de diversas espécies de animais. A região que foi atingida abrigava uma grande área remanescente da Mata Atlântica, um bioma com grande biodiversidade. A empresa tomou uma multa de 250 milhões de reais com base na Lei de Crimes Ambientais.

O rejeito que vazou nesta tragédia seguiu descendo o Rio Paraopeba e chegou à aldeia indígena Nao Xohã, em São Joaquim de Bicas, a 22 quilômetros de Brumadinho. Vivem 18 famílias nesta aldeia, e eles dependem do rio para pesca, banho e para lavar roupa. “O nosso rio está morto, estamos com o coração ferido porque agora não tem como sobreviver” disse o cacique Hayó, de 28 anos.



Figura 19: Aldeia indígena prejudicada pelo desastre.

Fonte: https://conteudo.imguol.com.br/c/noticias/e2/2019/01/30/indios-observam-rio-paraopeba-contaminado-pela-lama-que-vazou-da-barragem-da-vale-em-brumadinho-1548885953075_v2_1280x960.jpg

3. SISTEMAS DE MONITORAMENTO E ALERTA

3.1 TÉCNICAS DE PREVENÇÃO DE ACIDENTES UTILIZADA PELA MINERADORA BRASILEIRA

Segundo a Samarco, do grupo Vale, responsável pelas tragédias envolvendo barragens de rejeitos nos últimos anos, as barragens contam com um centro de monitoramento e inspeção, que foi incrementado com base nos aprendizados obtidos após o rompimento de barragem de fundão, em 5 de novembro de 2015.

Ainda segundo a empresa, o sistema de monitoramento conta com equipamentos de última geração e com transmissão de dados em tempo real. Os dados são transmitidos em tempo real e apresentados em telas de alta qualidade. Este monitoramento é realizado pela gerência de geotécnica, composta por técnicos e engenheiros especialistas. São os seguintes equipamentos e tecnologias divulgadas pela Samarco que fazem o monitoramento:

- **Acelerômetros:** São utilizados para detectar e monitorar as vibrações no solo;
- **Estação Meteorológica:** É composta por equipamentos que medem índices pluviométricos, temperatura do ar, umidade, pressão, velocidade e direção do vento;
- **Estação Robótica:** É composta por equipamentos que fazem, com precisão, o monitoramento de deslocamentos horizontais e verticais, através das análises de dados inspecionados;
- **Inclinômetros:** Instrumento de medição de ângulos de inclinação e elevação, são utilizados para medir as deformações e deslocamentos horizontais abaixo da superfície do solo;
- **Inspeções visuais:** Detalham as condições de segurança, utilizando o sistema Geo Inspector para registrar as informações;
- **Medidores de vazão:** Instrumentos que medem o volume de água na saída da barragem;
- **Piezômetros:** Equipamento utilizado para medição de pressão estática ou a compressibilidade dos líquidos. Monitoram o nível de pressão interna no interior das barragens.

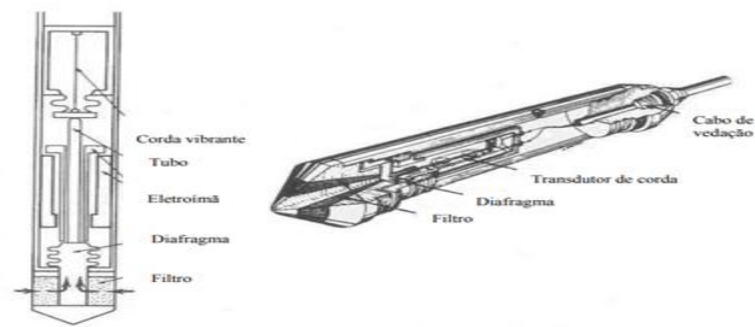


Figura 20: A estrutura de um piezômetro.

Fonte: <http://www.llk.com.br/wp-content/uploads/2018/04/corda-vibrante.png>

Ao longo da barragem, são instalados vários piezômetros, é muito comum a aplicação de piezômetro de corda vibrante, que é um sistema que contém um fio de aço tracionado com uma das pontas presa a um diafragma, que deforma em função do aumento de pressão externa. Este fio é eletricamente excitado, consequentemente gerando vibrações, de forma que a frequência de ressonância das vibrações é proporcional a tensão no fio.

Este equipamento apresenta algumas desvantagens, uma delas, é o fato de no caso de deslocamento do sensor, a tensão do cabo muda, causando a mudança na frequência de ressonância, causando a alteração nos resultados. Além disso, não é possível calibrar o sensor no local instalado, sendo preciso que seja removido e levado até o laboratório de testes para que seja calibrado;

- **Radars:** São utilizados alguns radares de monitoramentos que identificam variações de deslocamentos nas superfícies das barragens. Esta tecnologia consiste na medição através da interferometria. É a primeira vez que estes radares são utilizados em larga escala para monitoramento de barragens no Brasil, os radares foram desenvolvidos durante a Segunda Guerra Mundial, para uso militar. Posteriormente, esses equipamentos foram adaptados para uso geotécnico e são capazes de medir, através da interferometria, deformações ou movimentações submilimétricas nos maciços das barragens.
- **Satélites (InSAR):** Monitoram deslocamentos por meio de radares instalados em satélites;

- **Sistema de alerta de emergência:** Após a tragédia ocorrida em Mariana ocorreu o processo de revisão do plano e implementação dos novos equipamentos, foram instaladas sirenes interconectadas via redes sem fio.

Com as seguidas tragédias nos últimos anos, ficou claro que é preciso rever alguns conceitos de monitoramento e sistema de alerta para caso de emergência. É questionável a confiabilidade dos equipamentos de monitoramento que foram utilizados nos acidentes e que ainda estão sendo utilizados em outras barragens existentes. E mesmo sendo equipamentos eficientes de monitoramento, muitas vezes é preciso a coleta de dados manuais e manutenção dos equipamentos de monitoramento instalados em campo. Outro ponto importante a se destacar, é oferecer a possibilidade da população que reside nas áreas em risco de rompimento de barragens receber algum sinal de alerta sobre o risco de rompimento em tempo real, ao invés de mandar os dados de monitoramento somente para a estação robótica da empresa.

3.2 TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA MONITORAMENTOS

Conforme realizamos a pesquisa sobre o sistema de monitoramento de barragem de rejeitos, descobrimos algumas ideias e tecnologias inovadoras que estão sendo desenvolvidos para futura aplicação.

3.2.1 Sistema óptico com laser de alta precisão

Empresa incubada na universidade federal de Itajubá (Unifei) chamada Solver, que atua no ramo de desenvolvimento de tecnologia para monitoramento, controle e operação de estruturas dos segmentos de mineração, energia e siderurgia, desenvolveu um Sistema óptico utilizando laser de alta precisão para monitoramento de barragens e hidrelétricas. Além do sócio Geraldo Tiago, compõem a empresa Daniel Carlos Ribeiro Trautwein e Luiz Esper, respectivamente mestrando em Engenharia de Energia e graduando em Engenharia de Computação da Unifei.

Esta tecnologia se chama TrueLine e promete monitorar as barragens através de lasers de alta precisão, que ficam posicionados em frente à barragem,

fora da estrutura do barramento, em um terreno inerte, e faz a leitura em diversos pontos da estrutura, funcionando como um escâner desses alvos, informando a situação da barragem com precisão milimétrica. Os ciclos de leitura são repetidos de 30 a 60 minutos, gerando de 24 a 48 ciclos ao dia. Vale destacar que o monitoramento da barragem é feito 24 horas, qualquer tipo de anomalia é detectado pelo sistema e possibilita a alerta antecipada para evitar novos desastres.



Figura 21: Funcionamento da tecnologia TrueLine

Fonte: <https://unifei.edu.br/processosseletivos/wpcontent/uploads/sites/63/2019/02/barragem.jpg>

“Nosso sistema monitora ininterruptamente e informa em tempo real o início de alguma deformação na barragem, proporcionando tempo hábil para ações preventivas e corretivas a serem tomadas para não haver colapso estrutural e, no pior dos casos, uma evacuação do vale de jusante, evitando perdas de vidas e reduzindo de impactos ambientais e materiais”, explicou Daniel Trautwein que é o criador do sistema, que foi idealizado há 7 anos. Porém, somente em maio de 2016, ele fez o pedido de patente no Instituto nacional de Propriedade Industrial (Inpi). A tecnologia já está em fase de teste em uma mineradora do Brasil, cujo nome não pôde ser divulgado pela Solver.

4. SOLUÇÕES PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS VIA SENSORES

Sensores são dispositivos eletrônicos que convertem sinais externos de energia em sinais elétricos, esses sinais elétricos mudam o estado do circuito em que o sensor está. Existem vários tipos de sensores, e o que os difere é o tipo de energia a que eles são sensíveis, e em que funções são empregados. Exemplo de sensor muito utilizado é o de presença empregado em circuitos de iluminação para ligar lâmpadas ou luminárias quando há alguém presente no ambiente, e após certo tempo sem perceber movimentação no ambiente automaticamente a lâmpada é desligada. Esses dispositivos são muito importantes para a indústria, responsáveis por automatizar muitas funções ajudam a aumentar a produção e tem grande participação no controle de linhas de montagem auxiliando na contagem de peças.

Existem várias possibilidades de aplicação para esses dispositivos dentro das linhas de produção, mas essa tecnologia pode ser aplicada fora dessa área também, como em instalações residenciais.

Neste capítulo serão apresentados três grupos de sensores, o grupo dos indutivos e o dos capacitivos e o grupo mecânico, dispositivos com funções parecidas, porém com métodos de construção diferentes. Levantaremos pontos que mostrará qual dos grupos é a melhor escolha para integrar um sistema de monitoramento de deslocamento de uma barragem de rejeitos.



Figura 22: Diversos tipos de sensores

Fonte: <https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/5000310%20v1a%20-%20manual%20sensor%20indutivo.pdf>

4.1 SENSORES DE PROXIMIDADE

4.1.1 Sensor Indutivo

Esse tipo de sensor de proximidade não possui contato físico com o objeto monitorado, ele emite um campo eletromagnético que ao ser alterado pela aproximação de um objeto metálico aciona o circuito eletrônico do sensor que detecta o deslocamento do objeto em direção a face do sensor.



Figura 23: Sensor indutivo.

Fonte: <https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/5000310%20v1a%20-%20manual%20sensor%20indutivo.pdf>

Esse dispositivo é composto por: Face do sensor, oscilador, um Trigger que é o comparador de sinais, e uma saída amplificadora. A bobina existente no sensor é submetida a uma corrente, que gera um campo eletromagnético, esse campo é emitido pela face do sensor, o oscilador é responsável por produzir um sinal eletrônico repetitivo, nesse caso são ondas senoidais. A aproximação de objetos metálicos da face do sensor causa interferências no campo e induzem as correntes de Foucault, as perdas resultantes desses processos acabam tirando parte da energia do oscilador do sensor, assim o comparador de sinais faz a conversão dessa energia perdida em um sinal bem definido, após isso o amplificador aumenta a potência da oscilação para que a informação chegue no dispositivo que vai ser acionado com a atuação do sensor, desse modo é detectado a aproximação ou afastamento do objeto monitorado com melhor exatidão.

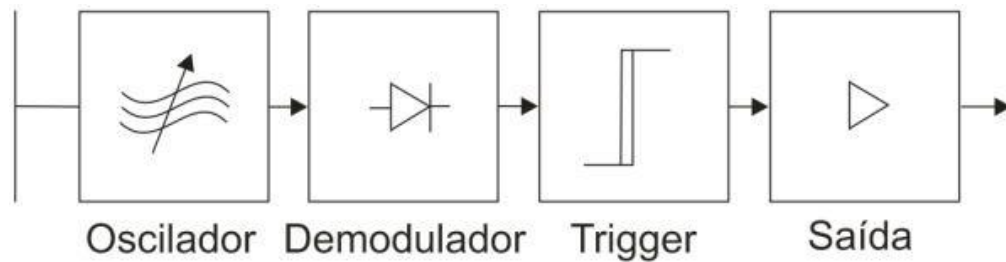


Figura 24: Componentes eletrônicos do sensor indutivo.

Fonte: http://www.sensorbras.com.br/sensores_indutivos.php

Esse tipo de sensor é utilizado em funções em que se é necessário ter mais precisão como em: detecção de níveis, controle de máquinas, segurança, e nesse estudo iremos aplicá-lo no monitoramento de barragens de rejeitos, auxiliando a detectar possíveis avanços da estrutura da barragem, e também para detectar os níveis dos rejeitos.

Existem sensores indutivos para corrente contínua e para alternada, a diferença está no amplificador, que em corrente contínua é constituído por um transistor que pode ser do tipo PNP ou também do tipo NPN, o mais utilizado no Brasil é o do tipo PNP, ele possui três condutores, sendo dois destinados a alimentação e um para o sinal. A diferença entre PNP e NPN está na forma em que eles são conectados à carga, quando temos um PNP o condutor de sinal está ligado com o condutor de alimentação positivo através de um contato NA ou NF assim nesse tipo de ligação a carga recebe uma corrente vinda do sensor, e quando temos um NPN o condutor de sinal está ligado com o condutor negativo através de um contato NA ou NF assim a corrente existente no circuito vem do lado da carga para o sensor. Outra característica importante do sensor é o tipo de contato interno que ele possui podendo ser normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF). O sensor para corrente alternada tem como seu amplificador um tiristor que pode ser ligado diretamente a um relé, uma chave magnética ou a um contator. O sensor em corrente alternada possui uma chave de aproximação de dois condutores que é ligada ao circuito como uma chave de fim de curso.

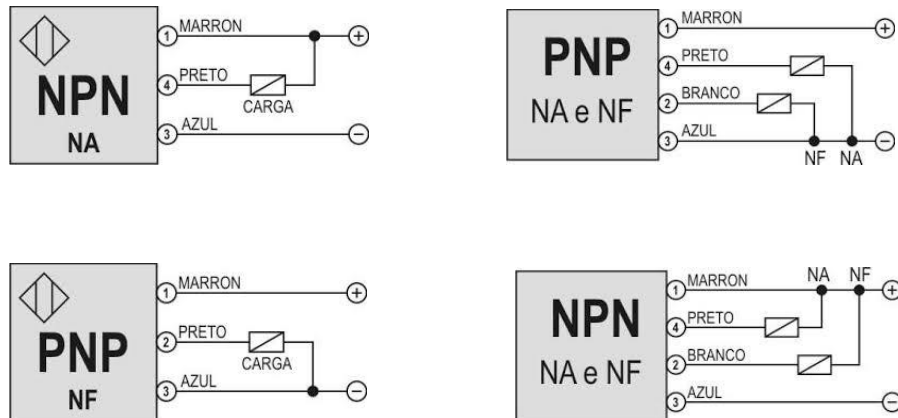


Figura 25: Ligações dos sensores de três e quatro terminais.

Fonte: <https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/5000310%20v1a%20-%20manual%20sensor%20indutivo.pdf>

A distância nominal em que o sensor de proximidade indutivo atua é conhecida através das tabelas dos fabricantes, porém, ele não é um dispositivo ideal, por conta de alguns fatores externos como temperatura do ambiente ou por conta do tipo de material que está sendo monitorado existe uma diferença na distância real e a nominal, essa diferença pode ser até 10% da distância nominal, o que em algumas aplicações pode ser uma grande diferença, por conta disso é essencial se conhecer as características do ambiente em que o sensor será instalado, o material monitorado, e realizar os devidos testes para confirmar o acionamento do dispositivo. Como esses tipos de sensores são acionados por conta da aproximação de materiais metálicos da face do sensor, na instalação deles é necessário se respeitar algumas distâncias mínimas de outros objetos metálicos que não estejam sendo monitorados, como exemplo uma base que esteja servindo para fixar o sensor ou até mesmo um outro sensor.

4.1.2 Principais características dos sensores indutivos

Os sensores indutivos de proximidade podem ser aplicados em diversas funções, mas, eles possuem algumas características em comum como:

- São dispositivos vedados, podendo ser instalados em lugares úmidos, com pó ou ainda em situações em que haja contato com óleo, ou outros tipos de líquidos;
- São dispositivos sem peças móveis, e também não precisam de contato físico com o material monitorado;
- A sua precisão é alta, mesmo em alta velocidade;
- Podem substituir muito bem as antigas chaves de fim de curso e as micro chaves, oferecendo uma vida útil maior do que as suas concorrentes pelo fato de ser um dispositivo que dispensa o contato físico com o objeto monitorados.

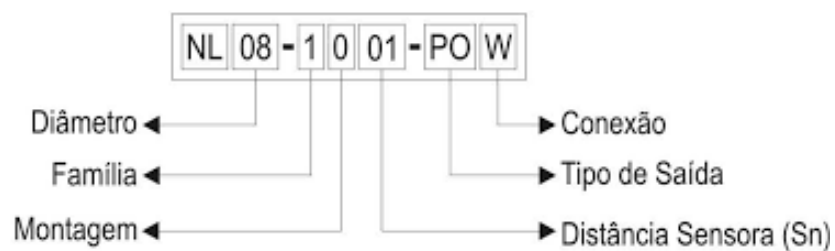


Figura 26: Especificações do sensor com suas devidas legendas.

Fonte: <https://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/5000310%20v1a%20-%20manual%20sensor%20indutivo.pdf>

4.1.3 Principais aplicações

- Contagem de peças na linha de produção;
- Detectar a passagem ou posição de um objeto;
- E pode fazer a função de uma chave fim de curso;
- Esse tipo de sensor é mais utilizado quando a velocidade do processo é mais rápida como no caso de máquinas de armazenagem, de embalagem, máquinas operatrizes. Também é eficiente em ambientes com condições mais severas por conta da vedação do dispositivo, tornando o sensor mais resistente a danos externos principalmente de líquidos.

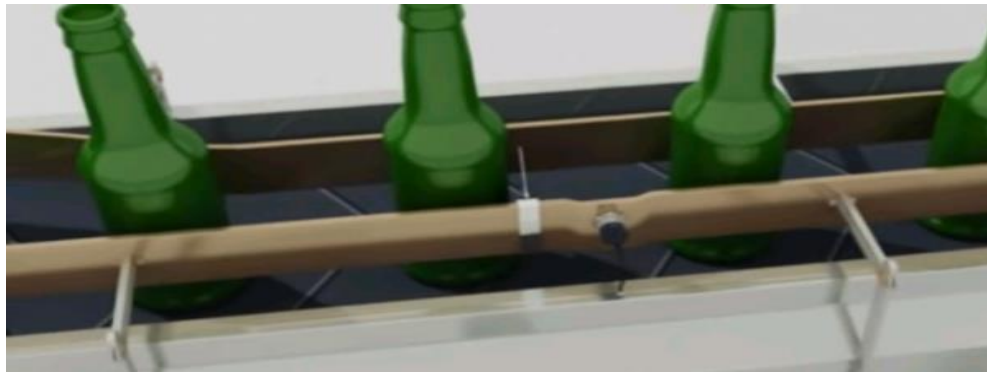


Figura 27: Sensor de proximidade atuando como contador de garrafas.

Fonte: <http://www.tecniar.com.br/noticias/sensores-indutivos-caracteristicas-e-aplicacoes/>

4.1.4 Vantagens e desvantagens do sensor indutivo

Vantagens:

- Funciona em várias condições climáticas no ambiente por conta da construção bem vedada e resistente do seu conjunto eletrônico;
- Acionamento sem contato físico;
- Baixa necessidade de manutenção;
- Alta velocidade de comutação;

Desvantagens:

- Detecta apenas dispositivos metálicos (o que na verdade em alguns casos pode ser uma vantagem);
- Não possui distancia sensora muito alongada (o que tem sido aprimorado por algumas empresas chegando a uma distância de aproximadamente 65 mm);
- Pode sofrer muito com interferências magnéticas muito fortes;

4.2 SENSOR DE PROXIMIDADE CAPACITIVO

Esses sensores atuam semelhantemente aos sensores de proximidade indutivos, mas a sua construção é diferente, através da mudança da capacitância causada pela aproximação de um objeto da face do sensor há uma mudança na frequência do oscilador do componente que faz com que a comutação seja possível. Outra característica que os difere é o alvo monitorado, no sensor indutivo o objeto monitorado deve ser metálico, já no capacitivo quase todos os materiais podem ser monitorados, não com a mesma precisão, pois possuem características diferentes. Esse sensor é constituído por uma ponta capacitiva, um oscilador, um retificador de sinal, um circuito de filtragem e por fim um circuito de saída.



Figura 28: Sensores capacitivos de proximidade.

Fonte: <https://www.bhseletronica.com.br/sensores-capacitivo.php>

Quando o objeto monitorado está a uma distância em que o campo não é alterado o estado do sensor permanece estável no circuito, mas, quando o objeto se aproxima alterando o campo eletrostático há um aumento da capacitância no circuito

que quando chega a um valor predefinido a comutação no sensor que altera o circuito (o estado pode ir de NA para NF ou de NF para NA). São três os principais fatores que influenciam no funcionamento desse sensor, são eles: o tamanho do objeto monitorado, a distância entre o a face do sensor e o alvo, e a constante dielétrica do mesmo, dependendo dessa constante o sensor pode ser acionado a uma distância maior ou menor, isso ocorre, por exemplo, em uma das aplicações dos sensores que é a de identificar a presença de líquidos em recipientes de vidro, desde que a constante dielétrica do liquido seja maior que a do vidro, esse tipo de utilidade também se aplica em caixas de leite por exemplo. O tamanho do objeto e a constante dielétrica tem uma relação diretamente proporcional a capacitância, ou seja, se o tamanho do alvo aumenta a capacitância também aumenta, se a constante dielétrica do objeto é grande a capacitância aumenta também, porém a distância do sensor em relação ao alvo é inversamente proporcional, ou seja, com a aproximação do alvo a capacitância aumenta.

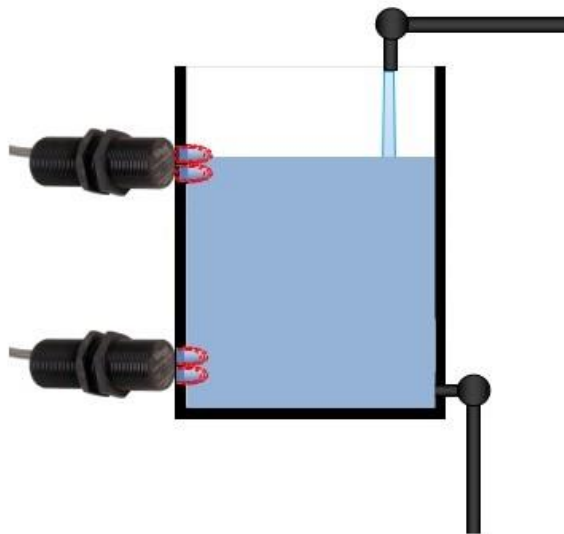


Figura 29: Sensores capacitivos no controle de nível de líquidos.

Fonte: <http://www.blog.sense.com.br/2019/01/sensores-capacitivos-o-que-e-e-como.html>

4.2.1 Princípio de funcionamento

A aproximação de um objeto da face do sensor capacitivo aumenta a capacitância, ocasionando assim em uma mudança de frequência de oscilação do circuito ressonante do dispositivo, essa mudança é enviada ao circuito detector que transforma essa variação em um sinal de tensão, esse sinal vai para o circuito trigger que o transforma em onda quadrada, o que basicamente resume o sinal em ALTO ou BAIXO, ligado ou desligado, quando o circuito de comutação recebe esse sinal ele aciona os circuitos externos.

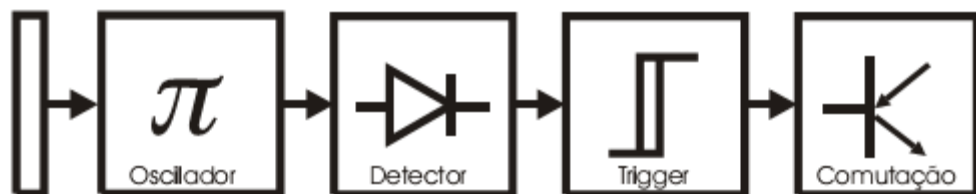


Figura 30:Componentes internos do sensor capacitivo.

Fonte: http://www.sensorbras.com.br/sensores_capacitivos.php

4.2.2 Tipos de alvo do sensor de proximidade capacitivo.

O alvo padrão desse tipo de sensor como no caso do sensor indutivo são materiais metálicos, porém, ele também é sensível a outros tipos de materiais. O alvo deve ser aterrado, para que assim a instalação dos sensores seja aprovada pelo padrão definido pela IEC.

O sensor é montado em uma forma muito compacta tendo todos esses dispositivos organizados dentro dele utilizando técnicas muito avançadas como o alojamento em invólucros de plástico ou metálico, eles também são encapsulados com uma resina de alta densidade os tornando a prova d'água, resistentes a vibrações. A alimentação elétrica deles pode ser em corrente alternada (AC) ou em corrente contínua (DC), assim como os sensores indutivos pode ter saídas normalmente abertas (NA) ou normalmente fechadas. Eles podem ser ligados a transistores e ser integrados aos CLPs.



Figura 31: Sensor capacitivo vedado.

Fonte: <https://www.eletopecas.com/Produto/sensor-capacitivo-tubular-sense-cs10-30gi70-a2-jpg>

Materiais Secos	ϵ	σ (mS/m)	Materiais Saturados	ϵ	σ (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia e Cascalho	2 – 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e Siltito	5	1	Areia	20 – 30	0,1 – 1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 – 10
Solo arenoso	2,6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	2,4	0,27	Solo arenoso	25	6,9
Sal	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso	15	50
Granito	5	0,01	Arenito	20 – 30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário	8	2
Aço	1	10^9	Granito	7	1
PVC	3 – 5	0	Basalto	8	10
Asfalto	3 – 5	0	Diabásio	8	100
Concreto	5,5	0	Concreto	12,5	0

Figura 32: Tabela com a constante dielétrica dos materiais.

Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Constante-dieletrica-er-e-condutividade-eletrica-s0-observadas-em-materiais_fig1_309764669

4.2.3 Aplicações

Esse dispositivo já é aplicado em muitas funções como medição de nível de líquidos, contagem de peças em linhas de produção, medição de força e velocidade de corpos e na detecção de presença de objetos em esteiras.

Nesse trabalho o objetivo é atribuir a essa ferramenta a aplicação em um sistema de monitoramento de barragens, e esse sensor tem sido utilizado como um coringa em várias aplicações como nessas abaixo:

- Análise de óleo mineral, de soja, entre outros;
- Controle de nível;
- Contagem de garrafas, cheias ou vazias, em linha de produção;
- Monitorar a concentração de pó;
- Detectar o conteúdo das embalagens em linha de produção;
- Contadores em linhas de produção;
- Substituem chaves de fim de curso;
- É um dispositivo flexível para realizar outras funções.

4.2.4 Vantagens e desvantagens do sensor capacitivo

Vantagens:

- Fácil montagem;
- Acionamento sem contato físico;
- Vários materiais podem acioná-lo;
- Por conta da constante dielétrica dos materiais ele pode detectar um material através do outro;
- Detecta alvos pequenos;
- Alta resolução;
- Precisão na diferenciação de materiais;
- Alta velocidade de resposta.

Desvantagens:

- É um dispositivo muito sensível a fatores ambientais, como a temperatura e umidade, isso pode afetar a precisão de detecção;

Detecta somente em distancias pequenas.

4.3 APLICAÇÃO DE SENSOR DE PROXIMIDADE NO SISTEMA DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Os dois sensores de proximidade fazem basicamente as mesmas funções, mas há uma diferença que definiu o sensor indutivo como o escolhido, a detecção de apenas materiais metálicos que também pode ser considerada uma desvantagem nesse caso é o que se necessita, pois, a instalação será feita em um ambiente aberto sujeito a chuva, umidade, calor, e outras condições que não favorecem o sensor capacitivo que é muito sensível a esses estímulos. Para tornar possível o monitoramento deve-se aplicar um material metálico a estrutura da barragem, ele deve ser o mais leve possível para não ser mais um peso considerável na barragem, e também é vantajoso que a sua instalação não cause danos físicos na barragem, levando em conta esses fatores a fita elétrica é uma ótima alternativa, apenas seria necessário remover o protetor isolante dela para garantir a atuação do sensor, e cola-la na estrutura da barragem.



Figura 33: Fita elétrica.

https://images-americanas.b2w.io/produtos/01/00/sku/25305/1/25305143_1GG.jpg

O sensor escolhido foi o indutivo analógico que pode medir mais de uma posição do objeto monitorado, tornando assim possível a inserção de dois níveis de alerta para o sistema, sendo o nível 1 destinado a equipe de manutenção da barragem, que terá a missão de analisar a estrutura, e em caso de risco aplicar as ações corretivas ou informar os superiores para que as pessoas da zona de

autossalvamento sejam realocadas , e o nível 2 de alerta do sistema será acionado no caso de que o colapso na estrutura seja só uma questão de tempo, nesse segundo nível os notificados serão as pessoas na área de impacto e as autoridades através de sirenes e sinalizadores, esses níveis serão acionados no caso da estrutura da barragem avançar uma distância "X nível 1" para o acionamento do alerta 1, e também avançar uma distância "X nível 2" acionando o alerta 2.

Os sensores serão colocados em pontos estratégicos da estrutura indicados pela equipe de engenharia civil com base em estudos de resistência de materiais, analisando a composição de cada barragem.

Para a instalação da estrutura de suporte dos sensores deve se utilizar materiais não metálicos, evitando assim interferências no monitoramento. Na barragem deve ser aplicada uma fita metálica para que o sensor sofra a interferência no caso de aproximação, a fita que se enquadra nesse perfil já existe no mercado e é utilizada como condutor elétrico externo. O sensor será do tipo faceado em que o campo magnético emitido por ele é mais concentrado frontalmente, assim ele diminui a interferência. Também será obedecida a distância mínima entre os sensores como visto anteriormente no trabalho.

Os dispositivos de monitoramento serão ligados ao ESP32, microcontrolador com sistema de Wi-fi embutido que tem a função de transmitir sinal de saída do sistema, e acionar os alarmes de cada nível.

A utilização desse sistema não é a opção mais moderna, nem a mais simples de se implementar, mas é uma forma de se fornecer dados mais exatos para as equipes responsáveis pela manutenção das barragens, contado com a execução de instalação feita da maneira mais correta, e da calibragem dos equipamentos. No mês de maio outra barragem estava no nível três de emergência, e esse nível foi atribuído a ela segundo a análise de dois sistemas de monitoramento em ação conjunta, a diferença dos diagnósticos dos dois foi o motivo principal para a decisão, como o sensor de proximidade indutivo percebe apenas a aproximação de materiais metálicos esse erro poderia diminuir muito.

4.3.1 Custo Aproximado do sistema

Pelo fato de haver muitas barragens com dimensões diferentes o cálculo do custo será feito considerando a instalação de 2000 sensores, quantidade baseada no número de equipamentos utilizados na barragem de Itaipu, a quantidade real é maior, mas está sendo considerado que Itaipu tem uma das maiores barragens do mundo. Outro ponto considerado é a variação do valor unitário do sensor que pode atender as necessidades do sistema, esse preço varia de R\$109,00 até R\$205,00 então o orçamento será elaborado nos dois extremos. A lista de itens é:

- 2000 sensores indutivos. (custo de R\$109,00 até R\$205,00);
- 4000 metros de fita elétrica (considerando que a instalação seja feita em uma estrutura de 1Km e que os sensores sejam instalados em quatro alturas diferentes) (custo de R\$13,00 por metro total de R\$52000,00);
- Estrutura de acrílico para suporte dos sensores (R\$80000,00);
- 2000 ESP32 mais o adaptador para ligar o sensor (R\$80,00 valor unitário) (R\$160000,00);
- 2000 fontes de 24V (R\$30,00 valor unitário) (valor total R\$60000,00);
- Mão de obra 80% do valor total do material.

O resultado do orçamento é mostrado na tabela abaixo:

Sensores	Valor (R\$)	Soma dos materiais	Mão de Obra Profissional	Custo Total Do projeto
Sensor 1	R\$218.000,00	R\$352.000,00	R\$456.000,00	R\$1.026.000,00
Sensor 2	R\$410.000,00	R\$352.000,00	R\$609.600,00	R\$1.371.600,00

A implantação desse sistema aparenta ser inviável, mas se trata de um grande projeto. Em entrevista dada ao jornal G1 os representantes da empresa Vale do rio Doce declararam um prejuízo de mais de 6 bilhões de reais pós desastre da barragem de brumadinho. O valor da instalação do conjunto fica muito pequeno perto do prejuízo, com essa quantia seria possível aderi-lo não só em uma barragem, mas em todas as 698 barragens existentes em Minas Gerais e o valor seria de R\$957.376.800 milhões de reais, e comparando os valores chegamos a conclusão que é viável.

4.4 SENSORES MECÂNICOS

4.4.1 Extensômetro

O extensômetro ou strain gauge é um sensor capaz de medir deformações mecânicas em determinado corpo de prova quando submetidos a uma força ou pressão. Pode ser utilizado por exemplo, para conhecer a extensão de deformação de uma determinada estrutura que apresenta deformação sob carregamento ou sob efeito da temperatura.

Na prática, são largamente utilizadas para medir deformações em estruturas como ponte, máquinas, locomotivas navios, e ainda pode ser associado a transdutores para medir pressão, tensão, força e aceleração.

4.4.2 Princípio de funcionamento

O extensômetro é um bipolo de resistência nominal que, quando fixado sobre o corpo de interesse, sofre a mesma deformação, e então sua resistência elétrica varia proporcionalmente com o valor de deformação deste corpo.



Figura 34:Extensômetro.

Fonte: <https://cdn.awsli.com.br/600x700/78/78150/produto/16307142/3d0e1668ad.jpg>

Um extensômetro típico é formado por um fio ou folhas metálicas dispostas em padrão de grade, como mostrado na figura 34.

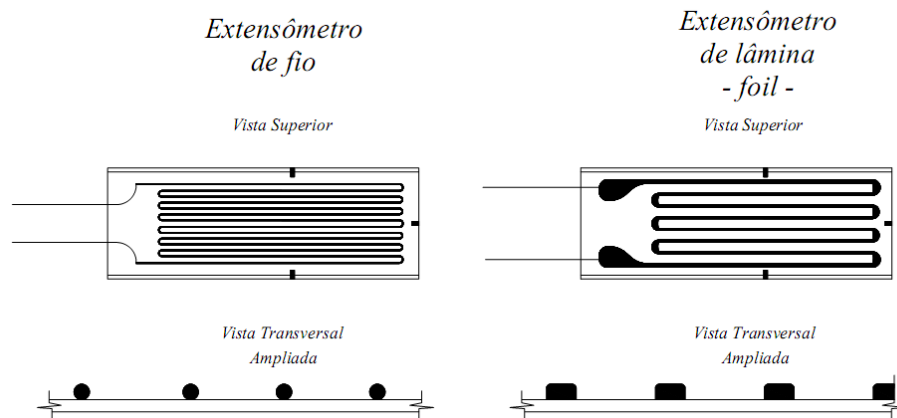


Figura 35: Extensômetro típico.

Fonte: <https://cdn.awsli.com.br/600x700/78/78150/produto/16307142/3d0e1668ad.jpg>

O princípio de funcionamento do extensômetro é baseada na propriedade física da dependência da resistência elétrica em relação a geometria do condutor (Segunda lei de Ohm). Quando um condutor é esticado dentro dos limites da sua elasticidade, o diâmetro do mesmo se torna mais estreito, provocando o aumento da resistência elétrica. Em contrapartida, quando o condutor é comprimido, sua resistência diminui. Como mostrado anteriormente na figura 34, um extensômetro possui uma longa faixa de condutores finos, ou folhas metálicas em padrão de ziguezague de linhas paralelas, de tal forma que um pequeno esforço no sentido da orientação das linhas paralelas resulta em uma variação aplicada da resistência, sendo mais sensível que um único fio em linha reta.

A relação entre a deformação mecânica e a variação na resistência do extensômetro é conhecida como Gauge Factor (GF).

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon}$$

Onde: ΔR é a variação na resistência causada pela deformação

R é a resistência do extensômetro sem deformação

ϵ é o coeficiente de deformação

As características do extensômetro elétrico de resistência podem ser resumidas no seguinte:

- Alta precisão de medida;
- Baixo custo;
- Excelente resposta dinâmica;
- Excelente linearidade;
- Facilidade na instalação;
- Pode ser utilizado imerso em água ou atmosfera de gás corrosivo, desde que faça tratamento adequado;
- Possibilidade de efetuar medidas a distância.

Devido a todas estas vantagens, atualmente o extensômetro elétrico de resistência é indispensável a qualquer área que necessitam de estudo experimental de medições.

Os extensômetros fabricados pelo processo de impressão consistem em uma camada muito fina de folha de metal (3 a 8 micrômetros de espessura), parte da qual é removida por corrosão química, tal que somente o padrão do desenho em formato de grade é obtido. Então essa grade metálica é fixada a um material isolante também muito fino que serve de suporte para o extensômetro.

Os metais utilizados para a fabricação de extensômetro são ligas de resistividade elevada como Constantan (45% Ni, 55% Cu) ou Nicromo (80% Ni, 20% Cr), que permitem obter resistências padronizadas de 60, 120, 240, 350, 500 e 1 k Ω .

Existem dois padrões de extensômetro para essa tecnologia:

- Normal (Figura 36 a): mais longo no sentido do eixo para reduzir os efeitos da deformação transversal;
- Alargado (Figura 36 b): usado quando as deformações transversais são desprezíveis, permite maiores tensões de excitação, devido a sua largura maior.

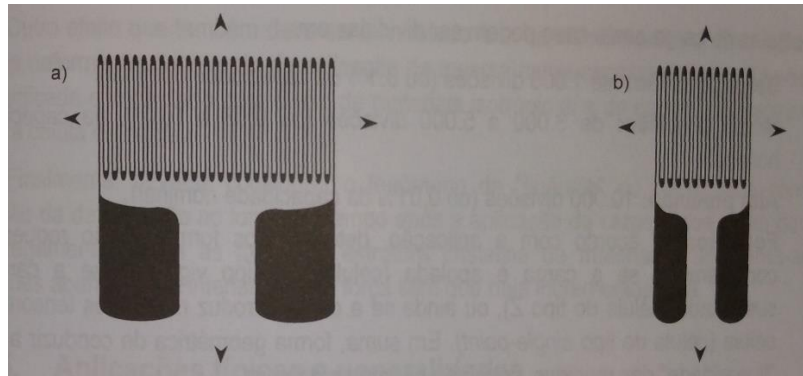


Figura 36: Padrões de extensômetro.

Fonte: Livro-sensores e sistemas de controle na indústria

4.4.3 Vantagem e desvantagem de extensômetro

Vantagens:

- Alta sensibilidade;
- Resposta rápida;
- Alta linearidade;
- Baixo custo;
- Sistema compacto.

Desvantagem:

- Deformação devido a variação da temperatura;

Este problema, porém, pode ser corrigido com um circuito corretor, como por exemplo, ligando os extensômetro em ponte de Wheatstone, ou também pode-se aplicar o método de submersão em óleo.

4.4.4 Ponte de Wheatstone

Ponte de Wheatstone é um esquema de montagem de elementos elétricos que permite a medição do valor de uma resistência elétrica desconhecida.

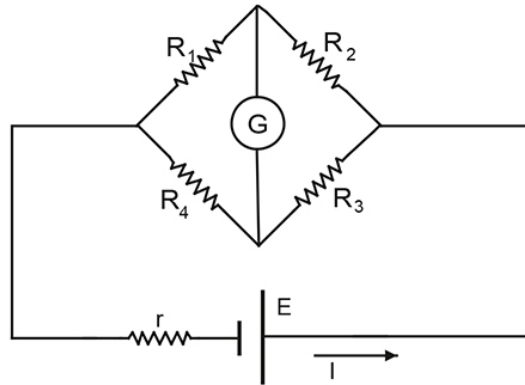


Figura 37: Ponte de Wheatstone.

Fonte: <https://www.sistemanovi.com.br/basenovi/image/ConteudosDisciplinas/33/63/2542/3293/044>

A ponte é considerada equilibrada quando as resistências dos resistores estão ajustadas de maneira que a corrente medida pelo galvanômetro seja zero. Desta maneira, é possível descobrir a resistência desconhecida de um resistor através do produto e quociente das resistências conhecidas, tudo o que é necessário é saber o valor de outros 3 resistores para que se descubra a resistência desconhecida.

A ponte de Wheatstone pode ser aplicado da seguinte maneira:

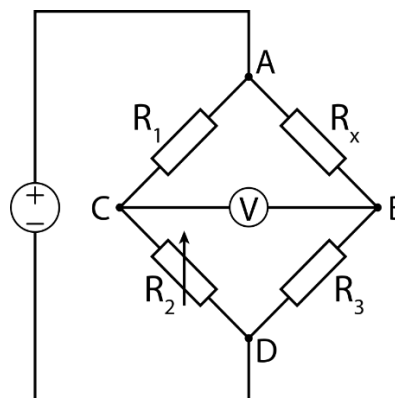


Figura 38: Exemplo de aplicação de Ponte de Wheatstone.

Fonte: https://www.google.com/search?q=ponte+de+wheatstone&rlz=1C1EJFC_enBR817BR817

Na figura 38, supondo que o valor da resistência do resistor R_x seja desconhecida, A resistência do resistor R_1 e R_3 são conhecidos e R_2 um potenciômetro.

Se a razão no ramo conhecido R_2/R_1 é igual a razão entre as resistências no outro ramo R_3/R_x , então a tensão entre os dois pontos centrais será nula e nenhuma corrente fluirá entre estes pontos.

Neste caso o Galvanômetro deverá mostrar o valor zero e podemos dizer que o circuito está balanceado. O uso comum da ponte é na medição de resistência com precisão. Em uma ponte desequilibrada podemos fazer a estabilização quando um dos resistores é variável e, assim, podemos alterar sua resistência até que não passe corrente pelo medidor. A ponte pode ser usada manualmente ou em versões automatizadas.

Este tipo de circuito pode ser usado para se determinar a tensão mecânica, sendo R_x um resistor sensível a compressão e os outros três resistores de valores conhecidos, a força aplicada ao resistor variável será proporcional ao valor da resistência desse resistor.

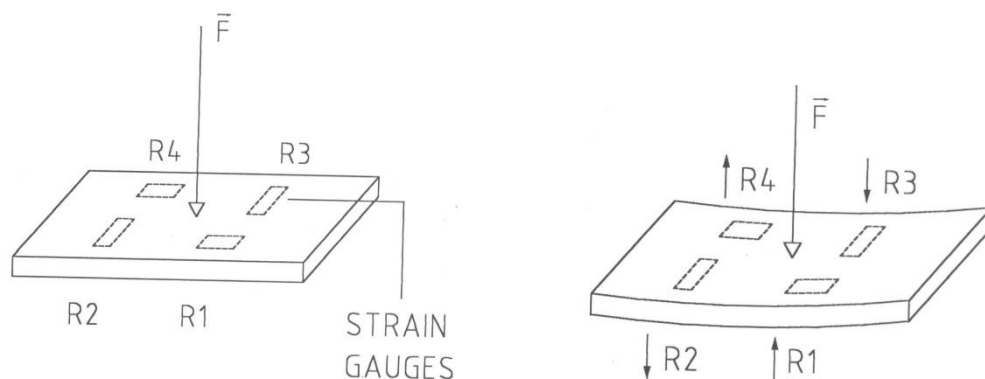


Figura 39: Aplicação de extensômetro Ponte de Wheatstone.

Fonte: https://www.researchgate.net/profile/T_Meydan/publication/283259446/figure/fig1

Para a aplicação, no exemplo da figura acima, os extensômetros estão ligados com configuração de ponte de Wheatstone, os extensômetros podem ser considerados como resistências elétricas de valor definido, até o momento em que houver a deformação da chapa de aço.

Nesta aplicação, a ponte de Wheatstone será então um comparador de resistores que serve para medir variações relativas de resistência elétrica.

Num estado inicial do circuito, a ponte deve estar calibrada em equilíbrio (tensão de saída $V=0$), o valor de variação de tensão medido pelo galvanômetro será proporcional à força que provoca a deformação.

Para este tipo de aplicação, é comum usar dois ou mais extensômetros como as resistências da ponte de Wheatstone.

Estando dois extensômetros do mesmo tipo no mesmo braço da ponte, permite que a variação da temperatura seja sentida pelos ambos, assim permitindo o cálculo da força aplicada sem precisar considerar esta variação de temperatura.

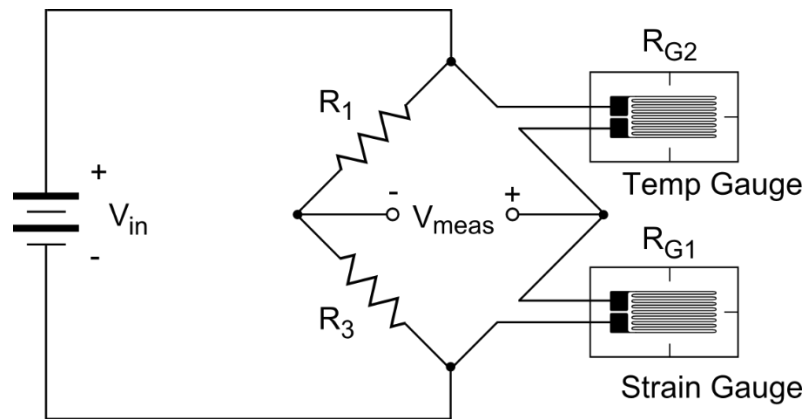


Figura 40: Aplicação de dois extensômetros na Ponte de Wheatstone.

Fonte: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/3/8/2/00431.png

4.4.5 Dispositivo de Interface

Para o extensômetro, mesmo utilizando a ponte de Wheatstone para uma medição de resistência mais precisa, as micro deformações no metal, que serve como a base para célula de carga pode produzir pequenas variações na tensão de saída. Este fato prejudica uma medição com precisão, pois para uma leitura eficiente, é preciso que a ponte esteja em equilíbrio, sem tensão de saída como foi explicado anteriormente. Também devemos considerar o fato que, no caso de uma aplicação de força na célula de carga, a variação de tensão que será medida é bem sucinta. Para resolução destes problemas, podemos utilizar um módulo amplificador, para obter um ganho de tensão.

4.4.6 Módulo Conversor HX711

O módulo conversor HX711 é um dispositivo que foi desenvolvido baseado na tecnologia Avia Semiconductor's. É um conversor de sinal analógico/digital (ADC) com precisão dos dados de 24 bits que foi projetado especialmente para aplicações em projetos utilizando Extensômetro e controle industrial. Tem como princípio de funcionamento, a conversão de variações medidas em valor de resistência, através do circuito de conversão em potência elétrica.

Para aplicação de Extensômetro para o Mirocontrolador, é preciso converter o sinal analógico para digital. O módulo conversor HX711, além de converter sinal analógico em digital, também podem amplificar os sinais, resolvendo o problema citados anteriormente. O dispositivo conta com amplificador de ganho programável, podendo selecionar entre ganho de 32, 64 ou 128, possibilidade de comunicação com o computador por padrão TTL 232 e elevada sensibilidade e velocidade e medida.

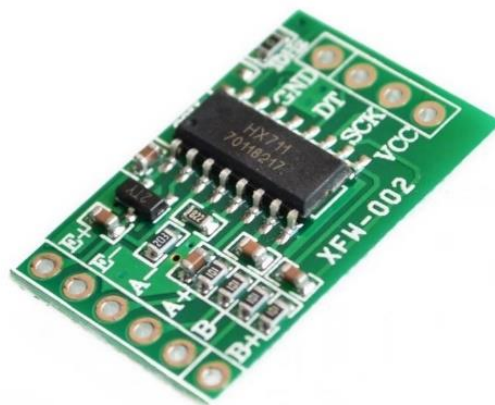


Figura 41: Módulo conversor HX711.

Fonte: https://www.makerlab-electronics.com/my_uploads/2016/12/hx711-load-cell-amplifier-1-510x478.jpg

4.4.7 Especificações/características:

- Tensão de funcionamento: 5VDC (recomendada);
- Corrente de funcionamento: <10 mA;
- Diferencial de tensão de entrada: $\pm 40\text{mV}$ (tensão de entrada diferencial em larga escala é $\pm 40\text{mV}$);
- Precisão dos dados: 24 bits;
- Frequência de atualização: 80 Hz;
- Dimensões: 24x15x2,7mm;
- Peso: 1,1g.

4.4.8 Módulo Wi-Fi ESP32

Para a opção de saída o ESP32, que é um system-on-a-chip com microcontrolador, Wi-Fi e Bluetooth integrado seria interessante. A série ESP32 conta com microprocessador Tensilica Xtensa LX6 com duas variações dual-core e single-core. inclui uma antena integrada, RF tipo balun, amplificador de potência, receptor de baixo ruído amplificado, filtros, gerenciamento de energia dos módulos.

A vantagem de aplicação do ESP32 no projeto é a possibilidade de comunicação via Wi-Fi e Bluetooth. Com estes recursos, é possível enviar os dados de monitoramento em tempo real e via sem cabo para os usuários, podendo enviar as informações de monitoramento via aplicativo de Smartphone.



Figura 42: Módulo Wi-Fi ESP32.

Fonte: https://uploads.filipeflop.com/2017/11/6WL55_1.jpg

4.4.9 Especificações/características

- Chip com WiFi embutido: padrão 802.11 B/G/N, operando na faixa de 2.4 a 2.5GHz;
- Modos de operação: Client, Access Point, Station + Access Point;
- Microprocessador: Tensilica Xtensa 32-bit LX6;
- Clock ajustável de 80MHz até 240MHz;
- Tensão de operação: 3.3 VDC;
- Possui SRAM de 512KB;
- Possui ROM de 448KB;
- Possui memória flash externa de 32Mb (4 megabytes);

Corrente máxima por pino é de 12mA (recomenda-se usar 6mA).

4.5 APLICAÇÃO E CUSTO DO SISTEMA COM O EXTENSÔMETRO

Os custos aproximados dos extensômetros não foram calculados, pois não foi possível achar um método ideal de aplicação para o mesmo. As superfícies das barragens não são totalmente planas como no caso de pontes e máquinas, o que dificulta a fixação do extensômetro que é um equipamento muito sensível. Porém, com resolução deste problema, o extensômetro poderia ser aplicável utilizando uma ponte de Wheatstone, ligado com o módulo conversor HX711 para amplificar e converter o sinal, e posteriormente ligado com o módulo Wi-Fi ESP32.

Os extensômetros também teria a ideia parecida com os sensores de distância, estes sensores mecânicos seriam instalados em local estratégico, onde tende a sofrer maiores deformações. Seria importante utilizar como base o histórico de dados de deformações na barragem utilizados pela empresa responsável, para estabelecer uma referência para comparar com o resultado medido pelo extensômetro instalado. Em caso de diferença muito grande no valor de referência com o valor obtido pela medição, os sistemas de alertas deveriam ser atuados.

4.6 MÉTODO DE INSTALAÇÃO E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Os dados de monitoramento obtidos pelos sensores instalados serão convertidos de sinal analógico para digital, pelo módulo amplificador e posteriormente enviado para módulo ESP 32 que por sua vez, vai ser responsável por envio de sinal via Wi-Fi para acionamento de sirene de alerta, ou comunicação de alerta para os habitantes da área de risco, o sinal enviado podem ser via mensagem de texto ou via aplicativo que devem ser desenvolvido.

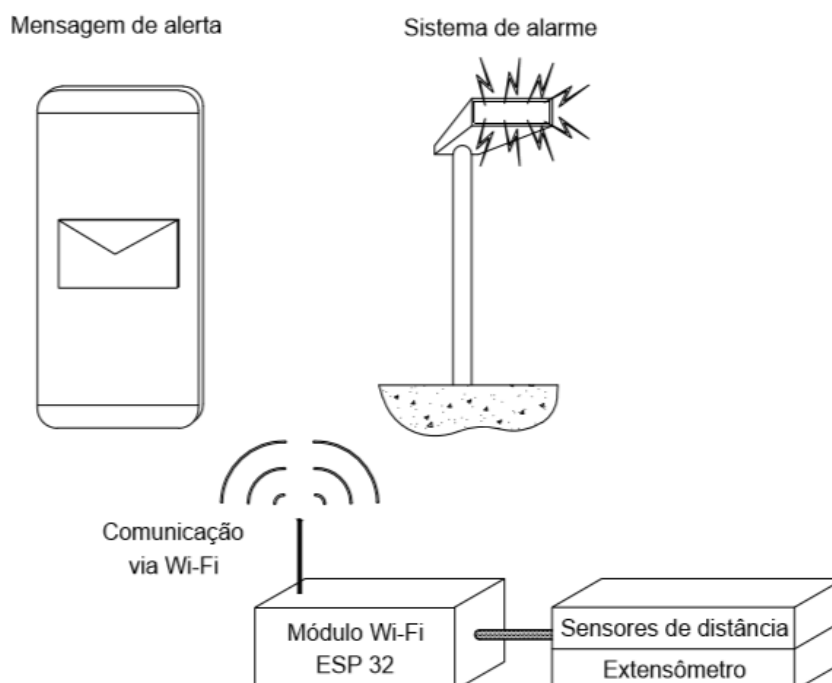


Figura 43: Diagrama de funcionamento do sistema de monitoramento e alerta.

Fonte: Imagem de autoria própria

Este método utilizado de envio de sinais de alerta diretamente para os interessados, elimina a burocracia citada anteriormente, de acionamento de alerta sonoro, que é feito manualmente, onde, no caso de constatação da ruptura da barragem, o plano de emergência (PAEBM) deveria avisar o Centro de Controle de Emergência e Comunicação (CECOM), que por fim iria acionar a sirene. Um método parecido é utilizado no Japão, para monitoramento e alerta de terremotos, no caso de detecção de risco de terremoto, automaticamente é enviado mensagem de alerta

para a população, em forma de mensagem de texto, aplicativo e também através de mensagem aparente na televisão, nas mensagens contêm o local onde precisa ter cuidado, magnitude do terremoto e se há preocupação com tsunamis.



Figura 44: Sistema de alerta de terremoto via mensagem utilizado no Japão

Fonte: https://smtgvs.weathernews.jp/s/topics/img/201810/201810040065_top_img_A.jpg?

CONCLUSÃO

A manutenção de grandes estruturas é indispensável, inúmeras tragédias foram ocasionadas pela negligência dos profissionais de manutenção, de fiscalização e principalmente dos administradores de grandes empresas. Muitas vezes o mundo precisou de tragédias para evoluir em tecnologia, pensamentos e atitudes, esse definitivamente é o momento de remediar e prevenir. Tragédias como a de Brumadinho e Mariana mostram o que se pode perder com a negligência, fauna, flora, estruturas históricas do país e principalmente vidas, sistemas de monitoramento auxiliam a evitar ou ao menos livrar o mundo de mais catástrofes. Ao redor do mundo e até no Brasil existem exemplos bons para serem seguidos no que se trata de segurança de barragens, e é o que tem acontecido depois desses episódios.

Os sistemas de monitoramento sugeridos nesse estudo não são os mais avançados em tecnologia, nem os mais fáceis de serem implantados, porém poderiam apresentar com mais exatidão os riscos da estrutura entrar em colapso, mas o sistema que consideramos potencialmente melhor é o de medição a laser, pois é um sistema mais fácil de ser implantado e utiliza recursos de tecnologia mais avançados, isso não exclui a presença de outros dispositivos para o auxílio do método escolhido assim como acontece na barragem da hidrelétrica binacional Itaipu, que de acordo com a nota postada no site da empresa possui mais de 2000 dispositivos auxiliando na monitoração da parte de concreto da estrutura. Além da implementação de tecnologia no controle de segurança da estrutura outro exemplo a ser seguido é a presença de especialistas como consultores para periodicamente analisarem a estrutura e apontarem os erros, possíveis danos e trazer ao conhecimento novos métodos que podem ser implantados para a melhoria da segurança da estrutura.

A empresa Vale do Rio Doce vem tomando boas decisões, investindo em ações corretivas nas barragens com risco, seguindo exemplos de sucesso, e mantendo a transparência com a população através do portal da empresa, no manual de informações sobre as barragens e também sobre as medidas tomadas a empresa afirma que investirá 1,9 bilhão de reais para o descomissionamento de 9 barragens de minério de ferro no Brasil, e em entrevista concedida pelo porta voz da

empresa foi dito que haveria o investimento em novos sistemas de monitoramento mais modernos. Concluímos com este estudo que os métodos sugeridos podem ser utilizados como linhas auxiliares para um sistema mais completo de monitoramento, e esperamos que essas sugestões aqui apresentadas possam ser uteis para excelência e preservação dessas grandes e importantes barragens.

Esperamos que esse trabalho sirva como material de apoio para a elaboração de novos sistemas de monitoramento de barragens, para os próximos estudantes de engenharia elétrica, civil ou de automação, e assim temos a esperança de contribuir com a segurança na área de exploração de minérios.

Referências Bibliográficas.

NILSON, James W.; RIEDEL, Susan A.. Circuitos elétricos. 10 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

ROSÁRIO, João Maurício; Princípios de mecatrônica. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

HALLIDAY, David.; Walker, Jearl.; Fundamentos de física: eletromagnetismo. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PAITER, Leandro.; Sensor para análise das características físico-químicas de óleo de soja por meio da constante dielétrica. Dissertação de Mestrado. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

RICO, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. G. Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. Journal of Hazardous Materials, 2008.

MINAS GERAIS, 2016. Decreto nº 46. 993, de 2 de maio de 2016. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=41216>.

TECNOLOGIAS UTILIZADAS PELA SAMARCO <https://www.samarco.com/>

TECNOLOGIA TRUELINE <https://www.solvertecnologias.com.br/>

SOLOMAN, Salie; Sensores e sistemas de controle na indústria.

MESGRAGIVIS Laima. História do Brasil Colonia.