



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BARRAGENS E  
GESTÃO AMBIENTAL**

**ABNER CESAR SANTOS BEZERRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE HARDWARE E SOFTWARE LIVRES  
PARA MONITORAMENTO REMOTO E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS**

Tucuruí  
2019

ABNER CESAR SANTOS BEZERRA

**MONITORAMENTO REMOTO E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS ATRAVÉS DA  
UTILIZAÇÃO DE PLATAFORMA DE HARDWARE E SOFTWARE LIVRES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Heleno Fülber  
Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Fernanda P. Gouveia

Tucuruí  
2019

ABNER CESAR SANTOS BEZERRA

**MONITORAMENTO REMOTO E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS ATRAVÉS  
DA UTILIZAÇÃO DE PLATAFORMA DE HARDWARE E SOFTWARE LIVRES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragens e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Heleno Fülber  
Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Fernanda P. Gouveia

Aprovada em 09 de agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. Dr. Heleno Fülber – Orientador  
Universidade Federal do Pará – UFPA/NDAE/PEBGA

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Pereira Gouveia – Co-Orientadora  
Universidade Federal do Pará – UFPA/NDAE/PEBGA

---

Prof. Dr. – Aarão Ferreira Lima  
Universidade Federal do Pará – UFPA/NDAE/PEBGA



---

Prof. Dr. – Walter Barra Junior  
Universidade Federal do Pará – UFPA/PPGEE

Tucuruí  
2019

*Toda glória e toda honra sejam dadas ao nosso Senhor e Salvador Jesus Cristo, que sempre esteve ao nosso lado em todos os momentos.*

*Dedico também à minha linda e amada esposa Rayana, que foi e continua sendo uma grande companheira nessa jornada, tendo que suportar os momentos de saudade, mas sempre me apoiando ao longo desse curso; e ao meu filho, que pela sua existência me fez enxergar um amor incondicional que não sentira antes.*

*Dedico também aos meus pais, César e Olirde, que sempre confiaram em mim e me apoiaram; e aos meus irmãos Abiel e Ábda, que com grande alegria me ensinaram a essência da fraternidade*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus, pela oportunidade alcançada e pela força em transpor as barreiras na condução do mestrado profissional, conferindo-me saúde e inspiração intelectual para a conclusão deste objetivo.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Heleno Fülber por ter acreditado no meu trabalho, e acima de tudo, ter acreditado em mim. Contribuiu de forma muito significativa não somente na questão acadêmica, mas também nos ensinamentos de vida, admiro-o por seu afincamento e valorização da família e sua visão de mundo.

Agradeço à minha Co-orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Gouvea, sendo a pessoa que ajudou a tornar real este grande sonho e conquista.

Agradeço também ao Prof. Dr. Denilson Sodré, que mesmo com as dificuldades, não contou esforços para apoiar este trabalho, contribuindo de forma ímpar no que diz respeito ao seu amplo conhecimento em geotecnia.

Agradeço também ao Prof. Dr. Aarão pela iniciação na instrumentação de barragens de terra e enrocamento através de um estudo dirigido, proporcionando-me assim boas contribuições.

À Faculdade Metropolitana de Marabá, na pessoa do Diretor executivo Prof. Dr. Paulo, que ao longo do curso me apoiou no desenvolvimento acadêmico e científico, podendo citar também as Coordenadoras Ana Paula Viera e Andrea Barata, ao qual tenho grande amizade e estima.

À minha linda e amada esposa Rayana, presente de Deus para a minha vida, a quem tanto amo, por suportar minhas ausências para a execução de meu desenvolvimento técnico-científico, me apoiando e me dando forças. Igualmente ao meu filho Benjamin e minha filha Ana Clara, joias que Deus nos entregou para cuidar, que, pelas suas existências, nos fizeram sentir um amor nunca antes compreendido.

A todos os meus familiares, especialmente meus pais que neste momento de grandes dificuldades em que passo têm dado todo apoio, deixando-me muitas vezes constrangido pois não digo nada a eles, mas mesmo assim vêm à minha casa para saber do que estou precisando. Gratidão por tudo. Meus irmãos Abiel e Ábda também me apoiando. Eles são os principais responsáveis por me apoiar em todas as lutas proporcionando-me conquistas em minha vida, ensinando-me que o mais importante é andar na vontade de Deus e seguir os Seus caminhos.

Agradeço também ao professor Dr. Junior Hishihara que, de forma honrada sempre se dispôs a contribuir com meu desenvolvimento acadêmico. Reconhecido como professor que

contribui de forma significativa em todos os trabalhos aos quais é solicitado trazendo contribuições valiosíssimas.

Agradeço à Eletronorte, na pessoa dos Engenheiros Eden Carlos e Marke, que contribuíram de forma grandiosa para a conclusão deste trabalho, não esquecendo também de toda a equipe da Eletronorte que possibilitou os ensaios e testes para calibração dos sensores aqui utilizados.

A todos os membros do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia da Universidade Federal do Pará, não somente os professores, mas também aos colegas que estiveram juntos nesta batalha, onde pude me aproximar bastante do meu colega de turma Lucas, e de meu colega Rambo.

Ao amigo Rambo que juntos levamos muitas broncas, porém juntos conseguimos avançar nos apoiando um no outro, tendo em vista em que quando um percebia que o outro estava desanimado sempre dávamos forças um ao outro, o que criou um sadio vínculo de amizade que espero poder manter sempre.

Ao amigo Lucas, que ao final da jornada, de forma incansável ajudou-me bastante nas implementações práticas de laboratório em algumas análises.

Agradeço também ao colega Pedro que sempre nos salvava no último momento, para imprimir os trabalhos, as qualificações, as defesas. Sempre muito solícito. Gratidão meu amigo por tudo.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um projeto piloto de um Sistema de Monitoramento *online* para implantação em instrumentação de barragens, utilizando-se de uma plataforma e *softwares* livres. A metodologia da pesquisa foi realizada em 6 etapas, sendo estas: a revisão da literatura; a seleção da placa de desenvolvimento; o desenvolvimento de um Data Logger; o desenvolvimento de um aplicativo para a leitura de sensor analógico; a implementação do Sistema de Monitoramento em um ambiente controlado e a implementação do Sistema de Monitoramento em campo. Por fim, as conclusões obtidas com a elaboração da presente pesquisa foram: a placa de desenvolvimento escolhida, a ESP8266, teve um desempenho satisfatório, podendo ser programada pelo ambiente de desenvolvimento Arduino, além de possuir conexão *wifi*, o que possibilitou a construção de um *Data Logger* que utiliza uma rede sem fio, com endereçamento IP para apresentação dos dados. O aplicativo criado, desenvolvido na IDE *Android Studio*, teve resposta satisfatória, podendo *logar* no endereço IP do *Data Logger*, e apresentar ao usuário, em tempo real, os resultados em tela. Foram realizados ensaios em ambiente controlado, para a verificação da resposta de um sensor de pressão, e em campo, onde foi possível a obtenção de curvas de tendência em cada um desses ambiente com grande precisão porém, ao se comparar as curvas obtidas com a curva padronizada de calibração, foi observado somente a convergência dos valores das leituras até o valor da altura manométrica igual a 3 m.c.a., enquanto que valores de alturas manométricas de 3 a 6 m.c.a. demonstraram uma dispersão de aproximadamente 1% em relação à curva padronizada e, leituras acima de 6 m.c.a. apresentaram dispersão maiores que 5%. Fato este que só foi possível identificar pois o aplicativo tem um período de amostragem de 800 milissegundos, garantindo assim uma leitura praticamente em tempo real.

**Palavras-chave:** Sistema de monitoramento de barragens, instrumentação de barragens, sistema de aquisição de dados remoto, aplicativo de monitoramento de barragens.

## ABSTRACT

This work aims to develop a pilot project of an online Monitoring System for implementation in dam instrumentation, using a platform and free software. The research methodology was carried out in 6 stages, as follows: the literature review; the selection of the development board; the development of a data logger; the development of an application for analog sensor reading; the implementation of the Monitoring System in a controlled environment and the implementation of the Monitoring System in the field. Finally, the conclusions obtained with the elaboration of this research were: the chosen development board, the ESP8266, had a satisfactory performance, being able to be programmed by the Arduino development environment, besides having wifi connection, which allowed the construction of a Data Logger that uses a wireless network, with IP addressing for data presentation. The application created, developed in IDE Android Studio, had satisfactory answer, being able to log in the IP address of the Data Logger, and present the user, in real time, the results on screen. Controlled environment tests were performed to verify the response of a pressure sensor, and in the field, where it was possible to obtain trend curves in each of these environments with great precision, however, by comparing the curves obtained with the curve. standardized calibration, only the convergence of the readings values up to the value of the head height equal to 3 mca was observed, whereas values of head height of 3 to 6 m.c.a. demonstrated approximately 1% dispersion from the standard curve and readings above 6 m.c.a. presented dispersion greater than 5%. This was only possible to identify because the application has a sampling period of 800 milliseconds, thus ensuring a reading in practically real time.

**Keywords:** Dam monitoring system, dam instrumentation, remote data acquisition system, dam monitoring application.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Identificação de deterioração de uma estrutura de concreto. ....	8
Figura 2 - Barragem de aterro típica com anomalias. ....	11
Figura 3 - Sensor de turbidez de ampla gama. ....	11
Figura 4 - Sensores de qualidade da água ....	12
Figura 5 – Instrumentos de barragens de concreto. ....	13
Figura 6 - Instrumentação de Barragem de terra e de enrocamento. ....	13
Figura 7 - Barragem Santo Antônio do Grama MG. ....	17
Figura 8 - Barragem do Marrecas, em Caxias do Sul, RS. ....	17
Figura 9 - Métodos construtivos mais comuns de barragens de rejeito. ....	18
Figura 10 – Exemplos de erosões no maciço. ....	20
Figura 11 – Esquemático da falha da represa Iwiny na Polônia em 1967. ....	21
Figura 12 - Ruptura da barragem de rejeitos de Merriespruit. ....	22
Figura 13 - Diagrama de intensidade de subpressão com vários coeficientes. ....	24
Figura 14 - Representação da percolação no solo. ....	25
Figura 15 – Representação das forças verticais e horizontais impressas numa barragem. ....	25
Figura 16 – Representação da analogia de Terzaghi à distribuição da carga no solo saturado. ....	25
Figura 17 - Surgências naturais – nascentes. ....	26
Figura 18 - Surgência projetada em barragem de terra e de enrocamento em Belo Monte – Pa. ....	26
Figura 19 - Surgências patológicas não controladas. ....	27
Figura 20 - Mecanismos de formação de Colmatação. ....	27
Figura 21 - Seção transversal de uma barragem de terra homogênea. ....	29
Figura 22 - Representação de galgamento através de ondas em um reservatório. .	30
Figura 23 – alto nível de chuvas provoca galgamento em barragem de açude no Piauí. ....	30
Figura 24 - Usina hidroelétrica de Armando Sales de Oliveira após o galgamento. .	30
Figura 25 - Representação da ação erosiva do galgamento ou "overtopping". ....	30
Figura 26 - Representação dos tipos de níveis em uma barragem de geração. ....	31

Figura 27 – UHE Itaipú, vista aérea, com vertedores em operação para controle do nível do lago.....	32
Figura 28 - Representação de vertedor retangular, triangular e trapeizodal.....	32
Figura 29 - Vertedouro de soleira livre ou descarga livre.....	33
Figura 30 – Maquete demonstrando Vertedouro de soleira livre ou descarga livre..	33
Figura 31 – Maquete demonstrativa Vertedouro de soleira afogada ou descarga afogada (vazia).....	34
Figura 32 – Maquete demonstrativa de Vertedouro de descarga afogada (em operação).....	34
Figura 33 - Representação de lâminas assando pela soleira: a) lâmina livre; b) lâmina deprimida; c) lâmina aderente e d) lâmina afogada.....	35
Figura 34 – Vertedouro vertical em Barragem.....	35
Figura 35 – Vertedouro inclinado para controle de nível do lago (descarga).....	36
Figura 36 – Formas de vertedouro retilíneo retangular.....	36
Figura 37 – formas de vertedouro triangular.....	37
Figura 38 – Formas de cristas de vertedouros: a) retangular; b) tulipa; c) e d) labirinto; .....	37
Figura 39 – Representação do canal extravasor.....	38
Figura 40 – Canal extravasor lateral com declividade moderada construído fora do aterro.....	38
Figura 41 - Canal extravasor na lateral da barragem de terra e enrocamento.....	39
Figura 42 - Representação esquemática de um LVDT e seus enrolamentos.....	41
Figura 43 - Sensor de pressão capacitivo do fabricante SMAR.....	42
Figura 44 - Composição física do sensor de pressão capacitivo.....	42
Figura 45 - Representação de aquisição de dados em um sensor capacitivo.....	43
Figura 46 - Sensor de pressão óptico.....	44
Figura 47 - Representação de sensor potenciométrico de pressão.....	44
Figura 48 - Representação de sensores potenciométricos de posição.....	45
Figura 49 – modelo de sensor potenciométrico de rotação limitada.....	45
Figura 50 – modelos de sensores potenciométricos de posição linear.....	45
Figura 51 - Modelo de um extensometro.....	46
Figura 52 - Modelos de extensometros Série LY-HBM.....	46
Figura 53 - Modelos de extensometros.....	47
Figura 54 - Modelos de extensometros.....	47

Figura 55 - Modelos de extensômetros.....	47
Figura 56 – Formas de extensômetros. ....	48
Figura 57 - Representação de sensor piezoelétrico;.....	48
Figura 58 - Transdutores de força piezoelétrico.....	48
Figura 59 – Esquemático de Sensor magnético do tipo Reed Switch de uma e duas saídas.....	49
Figura 60 - Sensor magnético do tipo Reed Switch: (a) um contato NO; (b) dois contatos – NO e NC. ....	49
Figura 61 – Esquemático de funcionamento do Sensor de efeito hall. ....	50
Figura 62 - Esquema de funcionamento do Sensor Hall em um posicionador de válvulas (sensor de posição sem contato). ....	50
Figura 63 – Sensor de corrente por efeito hall. ....	51
Figura 64 - Medição de distância ultrassônica: (a) arranjo básico; (b) característica de impedância de um transdutor piezoelétrico.....	51
Figura 65 - Transdutor ultrassônico para ar (a); diagrama direcional (b).....	52
Figura 66 - Diagrama de blocos de um radar ultrassônico (a) e gráfico de resposta no tempo (b). ....	52
Figura 67 – Sensor ultrassônico HC-SR04. ....	52
Figura 68 – Termômetro líquido simples tipo clínico com mercúrio. ....	53
Figura 69 – Termômetro bimetálico. ....	53
Figura 70 – Sensor termoresistivo. ....	54
Figura 71 – Termopares.....	54
Figura 72 - Aparelho de leitura de nível d'água em piezômetros stand pipe. ....	55
Figura 73 - Esquema de funcionamento de piezômetro hidráulico do tipo inglês.....	55
Figura 74 - Piezômetro pneumático. ....	56
Figura 75 - Célula de pressão total hidráulico-pneumática. ....	56
Figura 76 - Esquema de piezômetro pneumático. ....	57
Figura 77 - Conexão de Tubos duplos ao Transdutor Pneumático.....	57
Figura 78 - Placa terminal do piezômetro pneumático.....	58
Figura 79 - Princípio de Operação do Transdutor Pneumático.....	58
Figura 80 - Detalhamento das conexões de um piezômetro de corda vibrante.....	59
Figura 81 - Piezômetro de corda vibrante com data logger. ....	59
Figura 82 - esquemático de um piezômetro de corda vibrante.....	60
Figura 83 - Modelo de um piezômetro de corda vibrante.....	60

Figura 84 - Arduino Uno.....	61
Figura 85 - Arduino Mega.....	61
Figura 86 – Placas de desenvolvimento ESP8266 – NodeMCU. ....	62
Figura 87 – Placas de desenvolvimento – Microcomputadores acadêmicos Raspberry Pi. ....	62
Figura 88 – Placas de desenvolvimento Asus Tinker Board.....	62
Figura 89 – Janela de desenvolvimento (Sketch) do <i>Software Arduino</i> ;.....	63
Figura 90 – Janela de apresentação dos modelos pré-existentes;.....	64
Figura 91 – Janela contendo a escolha da opção “02.Digital - Button”;.....	64
Figura 92 – Placa Tinker Board.....	70
Figura 93 – Placa Tinker Board.....	70
Figura 94 – NodeMCU ESP8266 ESP-12E. ....	71
Figura 95 – NodeMCU ESP8266 ESP-32E. ....	71
Figura 96 –ESP8266 WeMos.....	71
Figura 97 –Placa de desenvolvimento PIC18F4520 ou PIC8F4550.....	72
Figura 98 – $\mu$ Start for PIC - Placa de desenvolvimento para PIC.....	72
Figura 99 – Scanner a laser 3D Leica RTC360. ....	73
Figura 100 – Sistema de monitoramento vinculado ao Scanner a laser 3D Leica RTC360.....	74
Figura 101 –Scanner de imagens a laser Leica BLK360.....	74
Figura 102 – Sistema de monitoramento vinculado ao Scanner de imagens a laser Leica BLK360.....	74
Figura 103 – Método de monitoramento de deformação por equipamento Estação Total. ....	75
Figura 104 – Leitura manual em Estação Total. ....	75
Figura 105 – O equipamento desenvolvido em Itajubá já está sendo testado em uma mineradora. ....	75
Figura 106 – Posicionado em frente à barragem, o aparelho faz a leitura de múltiplos pontos na estrutura, informando a situação da barragem.....	76
Figura 107 – Sistema de Monitoramento de Barragens SYSDAM. ....	76
Figura 108 – Fluxograma de processo.....	77
Figura 109 - Fluxo de dados do Sistema .....	79
Figura 110 – Partes componentes do sistema controlado para ensaios de curva de calibração.....	80

Figura 111 – Controle e visualização de nível de coluna d'água montado. ....	81
Figura 112 – Montagem do sistema de aquisição de dados. ....	82
Figura 113 – Ensaio de campo – piezômetros escolhidos para a medição. ....	83
Figura 114 – Ensaio de campo – piezômetros escolhidos para a medição. ....	83
Figura 115 – Ensaio de campo – medição de pressão em fundação – inserção do sensor tipo pio. ....	84
Figura 116 – Ensaio de campo – verificação do nível de água com sensor de pressão. ....	84
Figura 117 – Placas de desenvolvimento ESP8266. ....	85
Figura 118 – Data Logger desenvolvido para a aquisição de dados. ....	86
Figura 119 – Data Logger aberto mostrando a simplicidade do circuito. ....	87
Figura 120 – Placa de desenvolvimento ESP8266 em conjunto com resistor de 150 Ohms. ....	87
Figura 121 – Circuito de aquisição de dados. ....	88
Figura 122 – Sensor utilizado para o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento. ....	89
Figura 124 – Sensor utilizado para o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento. ....	89
Figura 125 – Parte eletrônica do sensor. ....	90
Figura 126 – Plataforma de desenvolvimento Arduino – Sketch de comandos. ....	90
Figura 127 – Plataforma de desenvolvimento Android Studio. ....	91
Figura 128 – Plataforma de desenvolvimento Android Studio. ....	91
Figura 129 – Gráfico de altura manométrica <i>versus</i> valor em <i>bits</i> . ....	93
Figura 130 – Gráfico da pressão observada <i>versus</i> valor em <i>bits</i> . ....	93
Figura 131 – Gráfico apresentando os valores de pressão observada, altura manométrica e valor em <i>bits</i> . ....	94
Figura 132 – Gráfico de altura manométrica observada <i>versus</i> valor em <i>bits</i> . ....	95
Figura 133 – Gráfico de pressão observada <i>versus</i> valor em <i>bits</i> . ....	95
Figura 134 – Gráfico de altura manométrica <i>versus</i> valor em <i>bits</i> . ....	96
Figura 135 – Gráfico de altura manométrica <i>versus</i> valor em <i>bits</i> (CAMPO). ....	96
Figura 136 – Gráfico de altura manométrica <i>versus</i> valor em <i>bits</i> (CAMPO). ....	97
Figura 137 – Gráfico de comparação entre ensaio controlado <i>versus</i> ensaio de campo. ....	98
Figura 138 – Gráfico de altura manométrica observada <i>versus</i> valor em <i>bits</i> . ....	98

Figura 139 – Gráfico de comparação entre a altura manométrica padronizada e as leituras obtidas no ambiente controlado e em campo.....	99
Figura 140 – Gráfico contendo a comparação entre a linha de tendência gerada pela análise de dispersão de todos os dados obtidos <i>versus</i> a curva padronizada. ....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grandezas a serem monitoradas em Barragens de Concreto. Fonte: (ELETROBRAS, 2003).....	7
Tabela 2 - Grandezas a serem monitoradas em Barragens de Aterro. Fonte: (ELETROBRAS, 2003).....	7
Tabela 3 - Frequência de leituras - Barragens de terra-enrocamento. Fonte: (ELETROBRAS, 2003).....	14
Tabela 4 - Frequência de leituras - Barragens concreto. Fonte: (ELETROBRAS, 2003). .....	15
Tabela 5 - Evidências de problemas de percolação (GOULD & LACY, 1973) .....	16
Tabela 6 - Classificação de aberturas comuns em patologias (SILVA A. d., 2011)..	19
Tabela 7 - Classificação de colmatção e seus agentes (SCHÄFER, WAITE, & FANE, 2004) .....	28
Tabela 8 - Comparativo entre plataformas do tipo Arduíno. Fonte: (THOMSEN, FilipeFlop, 2014).....	65
Tabela 9 – Tipos de placas Arduíno (parte 1).....	65
Tabela 10 – Tipos de placas Arduíno (parte 2) .....	66
Tabela 11 – Tipos de placas Arduino (parte 3) .....	67
Tabela 12 – Tipos de placas Arduíno (parte 4).....	68
Tabela 13 – Tipos de plataforma Raspberry .....	69
Tabela 14 – Relação entre pressão corrente e tensão (curva parametrizada em <i>bits</i> ). .....	89
Tabela 15 – Leituras de comparação entre altura manométrica e <i>bits</i> . .....	92
Tabela 16 – Leituras de comparação entre altura manométrica e <i>bits</i> . .....	94
Tabela 17 – Valores adquiridos nas leituras de comparação entre altura manométrica e <i>bits</i> (CAMPO) .....	97
Tabela 18 – Comparação de curvas para valores abaixo de 10 m.c.a. ....	98

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	3
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1. MONITORAMENTO DE BARRAGENS .....	4
2.1.1. GRANDEZAS MONITORADAS EM BARRAGENS.....	5
2.1.1.1. MONITORAMENTOS RELACIONADOS À INFILTRAÇÕES.....	8
2.1.2. SELEÇÃO DE INSTRUMENTOS .....	12
2.1.3. FREQUÊNCIA DE LEITURA DOS INSTRUMENTOS .....	14
2.2. PROBLEMAS ASSOCIADOS À SEGURANÇA BARRAGENS DE TERRA.....	15
2.2.1. CONTROLE DE PERCOLAÇÃO.....	16
2.2.2. RECALQUES, FISSURAS E TRINCAS .....	19
2.2.3. EROÇÃO .....	19
2.2.4. LIQUEFAÇÃO.....	21
2.2.5. SUBPRESSÃO .....	23
2.2.6. SURGÊNCIA .....	26
2.2.7. COLMATAÇÃO DE DRENOS .....	27
2.2.8. RESTRIÇÃO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO .....	28
2.3. VISÃO GERAL DO MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO .....	39
2.3.1. TRANSDUTORES, TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES.....	40
2.3.1.1. INDUTIVOS: .....	40
2.3.1.2. CAPACITIVOS:.....	41
2.3.1.3. FOTOELÉTRICO:.....	43
2.3.1.4. POTENCIOMÉTRICO: .....	44
2.3.1.5. EXTENSOMETRIA: .....	46
2.3.1.6. PIEZOELETRICIDADE:.....	48
2.3.1.7. MAGNÉTICO: .....	49
2.3.1.8. ULTRASSON:.....	51
2.3.1.9. TERMOMEDIÇÃO: .....	53
2.3.1.10. LEITURAS DE NÍVEL .....	54
2.3.1.11. LEITURA DE PRESSÃO .....	55
2.3.2. PLACAS DE DESENVOLVIMENTO.....	60
2.3.2.1. PLATAFORMA ARDUINO.....	63
2.3.2.2. PLATAFORMA RASPBERRY .....	68

2.3.2.3. PLATAFORMA ASUS.....	70
2.3.2.4. PLATAFORMA ESP .....	70
2.3.2.5. PLATAFORMA PIC .....	72
2.4. SOFTWARES LIVRES .....	72
2.5. SISTEMAS DE MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS EXISTENTES.....	73
<b>3. METODOLOGIAS DA PESQUISA.....</b>	<b>77</b>
3.1. REVISÃO DA LITERATURA.....	77
3.2. SELEÇÃO DE PLACA DE DESENVOLVIMENTO.....	77
3.3. DESENVOLVIMENTO DO DATA LOGGER.....	78
3.4. DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO TESTE .....	78
3.4.1. FLUXO DE DADOS DO PROJETO.....	78
3.4.2. VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO .....	79
3.5. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM AMBIENTE CONTROLADO .....	80
3.6. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM CAMPO .....	82
<b>4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....</b>	<b>85</b>
4.1. PLACA DE DESENVOLVIMENTO SELECIONADA.....	85
4.2. DATA LOGGER DESENVOLVIDO.....	86
4.3. DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO TESTE .....	91
4.3.1. VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO .....	92
4.4. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM AMBIENTE CONTROLADO .....	92
4.5. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM CAMPO .....	94
4.6. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ENSAIO CONTROLADO E ENSAIO DE CAMPO	96
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>101</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, do Ministério de Integração Nacional, (2002), segurança de barragem é a competência necessária para que a estrutura satisfaça as condições técnicas de comportamento imprescindíveis para dirimir incidentes e acidentes no contexto de aspectos estruturais, econômicos, ambientais e sociais. Na última década, no Brasil têm estado em voga o assunto de segurança de barragens. Neste contexto, surge a 1ª lei para segurança de barragens, que segundo Medeiros (2012), os motivos que levaram a união de esforços para o desenvolvimento e aprovação desta (12.334/2010), foram os altos níveis de dificuldades de caráter organizacional, responsáveis pelas condições de abandono de inúmeras barragens brasileiras, com discrepâncias técnicas latentes em projetos, construção e operação de estruturas existentes.

Observa-se que a criação da lei supracitada teve a finalidade de regulamentar, trazer parâmetros, resguardando assim a sociedade, além de dar suporte técnico aos empreendedores responsáveis por estas estruturas, não sendo meramente um artifício legal para tirar o Brasil do contexto de atraso dentre outros países do mundo, no que concerne a legislação. A Segurança de Barragens toma uma relevância perante a sociedade civil, acadêmica e profissional, tornando-se fator de preocupação pelo poder público. Os recentes acontecimentos em Mariana/MG (2015), os ocorridos em Paragominas/Pa (2018), e com repercussão internacional, na cidade de Brumadinho/MG (2019), além de informações dadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM), que no corrente ano (2019), existe a iminência de rompimento do talude do complexo da Mina de Gongo Soco, da Vale, no município de Barão de Cocais (MG), demonstram a importância de estudos sobre a Segurança de Barragens.

Existem ações efetivas que contribuem para a mitigação desses eventos, e mesmo que não haja condições de conter incidentes ou acidentes, são capazes de informar a situação antecipadamente para que a Defesa Civil tome providências. Fusaro (2007) afirma que uma dessas ações é o monitoramento das barragens. O Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, do Ministério de Integração Nacional, (2002), também mostra a importância de que todas estas estruturas sejam instrumentadas, levando em consideração as peculiaridades de riscos associados de cada uma delas, com análises periódicas e instrumentos calibrados.

A falta de instrumentação em pequenas barragens é situação comum, com justificativas de que um barramento menor do que 30 metros de altura não representa um risco para a sociedade, fato este refutado por ICOLD (1987), afirmando que incidentes ou acidentes catastróficos (com perdas de vidas), são muito comuns em barragens com altura inferior a 30 metros. Para os pequenos empreendedores, muitas vezes, a falta do conhecimento técnico e complexidade dos sistemas de monitoramento, aliado aos altos

custos referentes aos *softwares* proprietários e pessoal especializado para fazer a análise, direciona-os para a diminuição de investimentos nesse quesito.

Apesar dos grandes empreendimentos possuírem instrumentação em suas estruturas, em sua maioria, talvez pelo motivo de sofrerem maiores fiscalizações, terem equipes especializadas, possuírem sistemas ou meios de monitoramento, muitas vezes esse monitoramento não é efetivo. As leituras dos sensores nas estruturas do lago são realizadas em intervalos de 15 dias em loco para adquirir os dados. Em caso de algum evento transitório nesse intervalo nada seria medido, expondo os operadores à riscos se a estrutura já estivesse comprometida.

Em vista deste contexto, vale ressaltar que um efetivo monitoramento ininterrupto ou com intervalos de medições menores permitiriam a previsão de potenciais danos às estruturas. Aplicações baseadas em *softwares* e plataformas livres tornariam viáveis o acesso a visualização dessas informações, bem como obtenção de alertas, tanto para os operadores, que podem interpor ações de manutenção preventivas nas barragens quanto para os órgãos de Defesa Civil, que poderiam se adiantar com ações efetivas de evacuação de lugares potencialmente afetados, evitando catástrofes (perda de vidas).

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema de monitoramento *online* para implantação em instrumentação de barragens, utilizando plataforma e *softwares* livres.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivo específico desta pesquisa, apresentam-se os seguintes:

- Selecionar uma placa de desenvolvimento para aquisição dados;
- Desenvolvimento de um data logger para leitura de sensores analógicos;
- Desenvolvimento de “Aplicativo de Teste” para monitoramento de instrumentação de barragens;
- Validação do funcionamento do aplicativo através de utilização de um sensor de pressão em ambiente prático.

### 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, iniciando-se por esta introdução, que apresenta justificativa da pesquisa, objetivos e estrutura do conteúdo.

O capítulo 2, Referencial Teórico, apresenta uma revisão da literatura referente ao monitoramento de barragens e a instrumentação dessas estruturas, a segurança de barragens no que se refere às problemáticas, os sistemas embarcados e os *softwares* livres.

No Capítulo 3, Metodologias da Pesquisa, são apresentadas as principais etapas para a elaboração desta dissertação e do protótipo.

No capítulo 4, Apresentação e Discussão de Resultados, apresenta-se os resultados do desenvolvimento do sistema de monitoramento, bem como a leitura dos sensores, configuração de parâmetros de medição de acordo com a grandeza medida, etc.

No capítulo 5, Conclusões, apresenta-se as considerações obtidas através de resultados apresentados pela simulação de variação de sinal dos sensores, confirmando o alcance das metas estabelecidas e o cumprimento dos objetivos propostos nesta dissertação, sugerindo-se também a continuidade deste trabalho para o aprimoramento da ferramenta com desenvolvimento em *softwares* e plataformas livres.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Higgins, *et al.* (2011) consideram que só é justificável, técnica ou economicamente, iniciar qualquer monitoramento quando houver metas claramente definidas, com ações direcionadas e parâmetros de correlação embasados. A análise de pressões intersticiais em barragens de terra ou em fundações de barragens de concreto é um dos parâmetros de grande importância, apresentado por ELETROBRAS (2003), que define estas pressões como aquelas que surgem por consequência da percolação da água nas estruturas, sejam elas nas fundações, nas barragens de terra, de concreto ou de rocha, que podem ser determinadas pela rede de fluxo.

Saré (2003) afirma existirem três períodos cruciais de monitoramento das barragens. O primeiro é em sua etapa construtiva, onde serão averiguados se os parâmetros de projeto foram alcançados; o segundo é no período considerado mais crítico de uma barragem, no seu enchimento. Esta é uma etapa bastante preocupante pois, é o fator determinante para averiguação prática da eficiência, eficácia e confiabilidade dessas estruturas. E, finalmente, a terceira etapa é o que se denomina regime permanente, ou seja, a operação da barragem após o seu enchimento, quando alcançar sua estabilidade.

Segundo Coelho (2017), há inúmeros equipamentos empregados na instrumentação de obras de terra, de diversos fabricantes. Cruz (2004), afirma que os instrumentos utilizados podem ser classificados em três categorias, tendo em vista o emprego da proposta de utilização, tais como: o local onde será instalado, ou seja, se solo, concreto ou maciço rochoso; pelo funcionamento do transdutor, se mecânico, ótico, pneumático ou hidráulico; e pela grandeza medida, ou seja, o nível d'água, pressão neutra, tensão total, deslocamento, vazão, aceleração, etc.

Affonso (2004) faz uma análise histórica das primeiras instrumentações das grandes obras geotécnicas que aconteceram no período compreendido entre os anos de 1930 a 1940. Com a evolução das tecnologias os sistemas de aquisição de dados se tornaram mais sofisticados e, com a integração desses sistemas à *softwares* avançados, tem-se realizado monitoramento remoto a milhares de quilômetros de distância.

### 2.1.1. GRANDEZAS MONITORADAS EM BARRAGENS

Confirmando as preocupações de Cruz (2004), a legislação brasileira, através da Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010, em seu artigo 4º, inciso I, diz que:

*“...a segurança de uma barragem deve ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento, primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros...”.*

Muitos estudos, como os de Cruz (2004), Guler *et al.* (2006), Machado (2007), Bayrak (2008), Gikas & Sakellariou (2008), Higgins, *et al.* (2011), Ehiorobo & Irughe-Ehigiator (2011), Kalkan (2012), Vipulanandan (2018), Sultanov *et al.* (2019) e outros, têm sido realizados sobre monitoramento de barragens de terra. Enquanto outras pesquisas como as de Chaves (2001), Perez (2002), Fazan *et al.* (2003), Larocca (2004), Soares, *et al.* (2004), Pytharouli & Stiros (2005), De Sortis & Paoliani (2007), Ribeiro (2008), Bukenya (2014), e outros, focam no monitoramento de barragens de concreto; sendo todas elas com bases nos métodos geodésicos e geotécnicos.

Como aconselhou Higgins, *et al.* (2011), parte-se da premissa de que, para se ter metas, são necessários objetivos claros. Não basta apenas dizer que se quer implantar um sistema de monitoramento para a Segurança de Barragens, são necessárias definições de vários aspectos, visto que se envolvem diversos fatores que, direta ou indiretamente irão influenciar no objetivo fim.

Boyes (2002), é uma referência na área de sistemas de monitoramento e aquisição de dados, com amplo e exaustivo trabalho para compilar conhecimento de diversos autores, recomenda que para monitorar é necessário saber qual o problema associado àquela grandeza e quais os parâmetros de referências associados a elas. Machado (2007) confirma essas premissas assegurando que os dados de instrumentação devam ser inseridos, para garantir a segurança, sendo alimentados com parâmetros e critérios limites, que indiquem as fronteiras ou condições de contorno de cada situação envolvida.

Segundo *Arm Corps of Engineers* (2004), como cada uma barragem é única e tem suas características peculiares e individuais, a escolha dos tipos de sensores, das quantidades, das localizações às quais serão instalados irá depender de uma combinação de experiência, bom senso, intuição e disponibilidade de investimentos do empreendedor, como mencionado por Saré (2003) e Machado (2007), que elucidam, com base no II Simpósio de Instrumentação de Barragens de 1996, o objetivo básico da instrumentação nas barragens, que iniciam-se no período construtivo e perpassam a entrega da obra, na operação das estruturas.

Machado (2007), fala sobre a primeira etapa da instalação da instrumentação, que vem a ser no período construtivo. A importância da implementação desses dispositivos neste momento é que eles podem alertar possíveis anormalidades no comportamento da barragem, por isso foi dito anteriormente sobre os parâmetros de condições de contorno; podem proporcionar soluções mais eficientes, trazendo economia para a obra, todavia, sem mitigar os aspectos da segurança; podem também possibilitar a adequação dos projetos, tendo em vista que é uma obra dinâmica e, nem todos os aspectos, por mais detalhados que tenham sido as informações preliminares, pois todas as obras realizadas, naturalmente, sofrem modificações para a adequação em loco.

Já na segunda etapa, Veiga Pinto (1983), Andriolo (1993), Matos (2002), Saré (2003), Machado (2007), Zuculin (2012) e Yigit (2016), afirmam ser momento crucial de acompanhamento dessas estruturas, que é o momento do enchimento dos reservatórios. Este é o momento em que a pressão da água aumenta nos poros, podendo trazer a chamada fratura hidráulica. A instrumentação, neste caso, irá informar sobre as possíveis anomalias que poderão ocorrer nesse processo; avaliar se os modelos experimentais e teóricos condizem com a realidade e verificar se as simplificações feitas no projeto se adequam ao sistema na prática.

Segundo Eletrobras (2003), as grandezas a serem medidas nas barragens de terra são as subpressões nas fundações e o deslocamento delas; o deslocamento da barragem; as tensões internas e vazões de percolação. Já para as barragens de concreto, é importante monitorar as faixas de temperaturas máximas do concreto, em virtude do calor de hidratação do cimento e da probabilidade de ocorrerem fissuras térmicas, lembrando que, a fundação das estruturas de concreto, também devem ser monitoradas, pois podem haver deslocamentos.

Não se pode esquecer das medições do nível do reservatório, tendo em vista que são eles que proporcionam o diferencial de pressão que provocam a percolação nas barragens.

Eletrobras (2003) apresenta duas Tabelas para a identificação, dependendo da estrutura, de grandezas medidas para serem tomadas como referencial de escolha de sensores e locais a serem aplicados, como mostra as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Grandezas a serem monitoradas em Barragens de Concreto. Fonte: (ELETROBRAS, 2003)

GRANDEZA	TIPOS DE ESTRUTURA			
	Gravidade Maciça	Gravidade de Alvenarias ou contrafortes	ARCO	CCR
Vazões de infiltração	X	X	X	X
Subpressões na fundação	X	X	X	X
Recalques na fundação dos “blocos-chave”	X	X	X	X
Tensões		X	X	X
Comportamento térmico do concreto	X	X	X	X
Deslocamentos horizontais e verticais da crista	X	X	X	X
Deslocamentos diferenciais entre blocos	X	X	X	X
Deslocamentos diferenciais entre monólitos		X		
Abertura de Juntas entre blocos		X	X	
Pressão intersticial entre camadas de concretagem		X		X

Tabela 2 - Grandezas a serem monitoradas em Barragens de Aterro. Fonte: (ELETROBRAS, 2003)

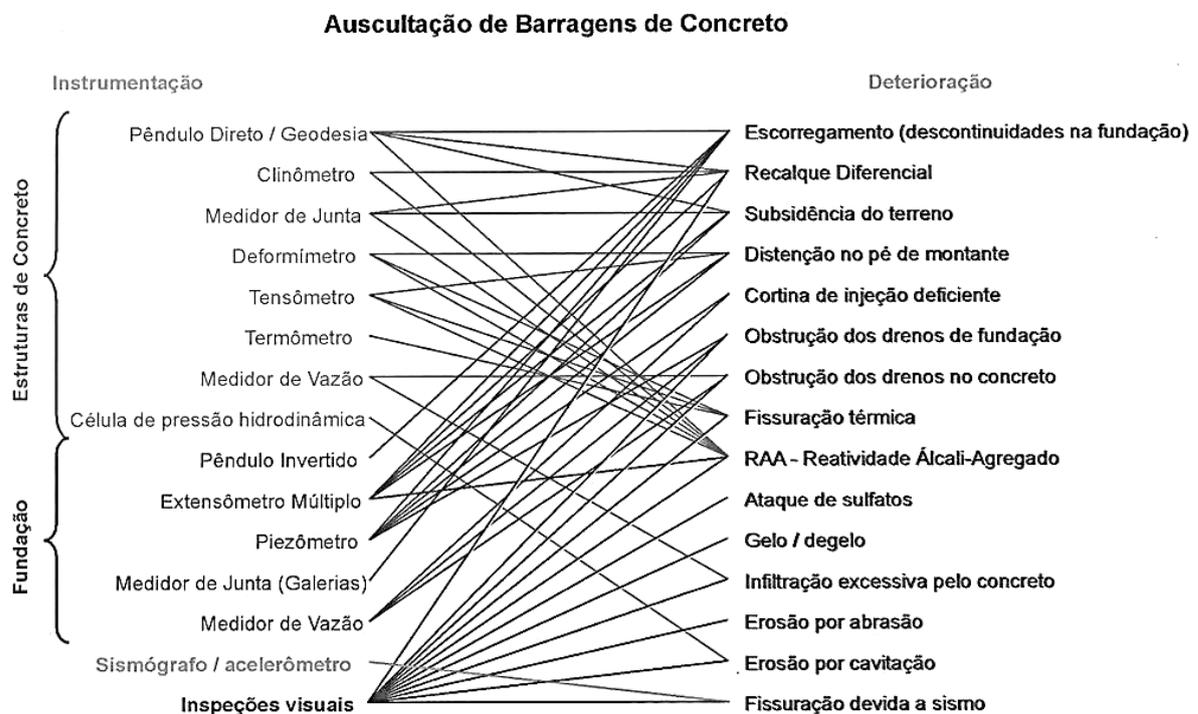
GRANDEZA	TIPO DE ESTRUTURA		
	Terra – Enrocamento	Enrocamento com face de concreto	Terra com galeria enterrada
Pressões neutras no aterro (poropressões)	X	X	X
Recalques do aterro	X	X	X
Deslocamentos superficiais (planialtimétricos)	X	X	X
Subpressões na fundação	X		X
Vazões de Percolação	X	X	X
Materiais sólidos carreados pelas águas de percolação	X		X
Pressões totais e poropressões nas interfaces		X	
Deslocamentos entre lajes na região das ombreiras		X	
Tensões internas no concreto		X	
Deflexão da laje de montante		X	
Tensões na interface solo-concreto da galeria			X
, Recalques ao longo da galeria			X

Como foi visto nas Tabelas, as grandezas que deverão ser monitoradas estão bem organizadas de acordo com o tipo de empreendimento, o que facilita a escolha dos instrumentos de medição.

Segundo Fazan (2010), as estruturas são projetadas para suportar um certo limite de deslocamento, tensões, deformações e vibrações. A fim de evitar a degradação que poderiam levar ao colapso de uma estrutura, é importante monitorá-las, verificando se as condições de carga real estão em conformidade com as fornecidas pelo projeto.

A vida útil de uma determinada estrutura pode ser estendida através de testes e monitoramentos que garantam sua capacidade e segurança. Os custos operacionais de um sistema de monitoramento de saúde estrutural para a vida útil da estrutura são inferiores a 1% das despesas da estrutura (Thomson, 2013). Quanto maior a estrutura ou sua importância, maior a preocupação com sua estabilidade, comportamento e segurança. Segue abaixo, na Figura 1, técnicas e instrumentos para a identificação de deterioração de estruturas de concreto em barragens.

Figura 1 – Identificação de deterioração de uma estrutura de concreto.



Fonte: (SILVEIRA J. , 2003).

#### 2.1.1.1. MONITORAMENTOS RELACIONADOS À INFILTRAÇÕES

De acordo com Coba S.A. (2014), a barragem terá sua integridade estrutural garantida se houver uma seleção adequada para seu material e sua perfeita compactação, para que haja infiltração direcionada, pois as que estiverem fora do padrão constituirão focos potenciais

de erosão do corpo da barragem. Por isso a importância de monitorar as infiltrações no corpo do talude, levando em consideração alguns fatores, tais como:

a) Identificação dos locais:

De acordo com Silveira J. (2018), a maior parte das vezes a escolha dos locais de instalação dos instrumentos de medição é de forma inadequada, talvez por falta de experiência prática dos projetistas ou por não se atentarem para as necessidades de manutenção. Com essa premissa, é importante a localização das infiltrações para se estabelecerem de forma assertiva alguns parâmetros em decorrência da curva de percolação no maciço.

b) Medição da vazão e turbidez

Como afirmou Lima, Lessa & Franklin (2010), a medição da vazão de percolação em barragens é até bem presente, porém a medição de turbidez é realizada esporadicamente, ou apenas por inspeções visuais, o que causa grande preocupação, tendo em vista que, como as barragens de terra são estruturas que dão sinais antes de seu colapso, por conta de parte delas possuírem solo saturado, propositadamente, antes do colapso há o carreamento de partículas, porém muitas vezes não se observa pois 99,99% dos projetos de monitoramento de barragens não preveem sensores de turbidez, apenas de vazão.

c) Medição de temperatura da água

Contreras & Hernández (2016), afirmam que a temperatura da água é um marcador natural na investigação de anomalias em percolação em barragens e reservatórios. Isto porque a maioria dos reservatórios, considerando profundidades maiores que 10 m, desenvolvem o que se denomina de estratificação térmica, que é o resultado da troca de calor entre a superfície do reservatório e a atmosfera.

Contreras & Hernández (2016) também citam que em locais em que se tem climas bem determinados, no período frio essa estratificação térmica quase não ocorre, por entenderem que o perfil térmico da água nesse período é mais uniforme. No Brasil, por outro lado, principalmente que tem clima tropical, possivelmente será mais perceptível essa estratificação térmica, logo temos uma grandeza favorável a mais para análise de segurança de barragens.

d) Medição de nível de reservatório

De acordo com Mizuno & Hirose (2006), a Instrumentação e monitoramento de represas e reservatórios são preocupações importantes em barragens. Em cada estágio de investigação, planejamento, projeto, construção e operação de engenharia de barragens, a

instrumentação e monitoramento são necessários para definir o perfil de comportamento das estruturas. Seu desempenho durante a construção e operação destinam-se à segurança das barragens e à aquisição de informações a serem implementadas em futuras barragens. A instrumentação e monitoramento são necessários tanto para o reservatório quanto para a bacia do rio, tendo em vista a operação normal e segurança.

Silveira (2006) e Higgins, *et al.* (2011), concordam com Mizuno & Hirose (2006) afirmando que para a Segurança de uma barragem, são necessárias informações precisas de instrumentação e monitoramento do corpo da barragem, das fundações circundantes, do reservatório e a bacia do rio. Seu comportamento durante cada estágio de investigação, projeto, construção e operação são informações muito importantes para decisões de engenharia.

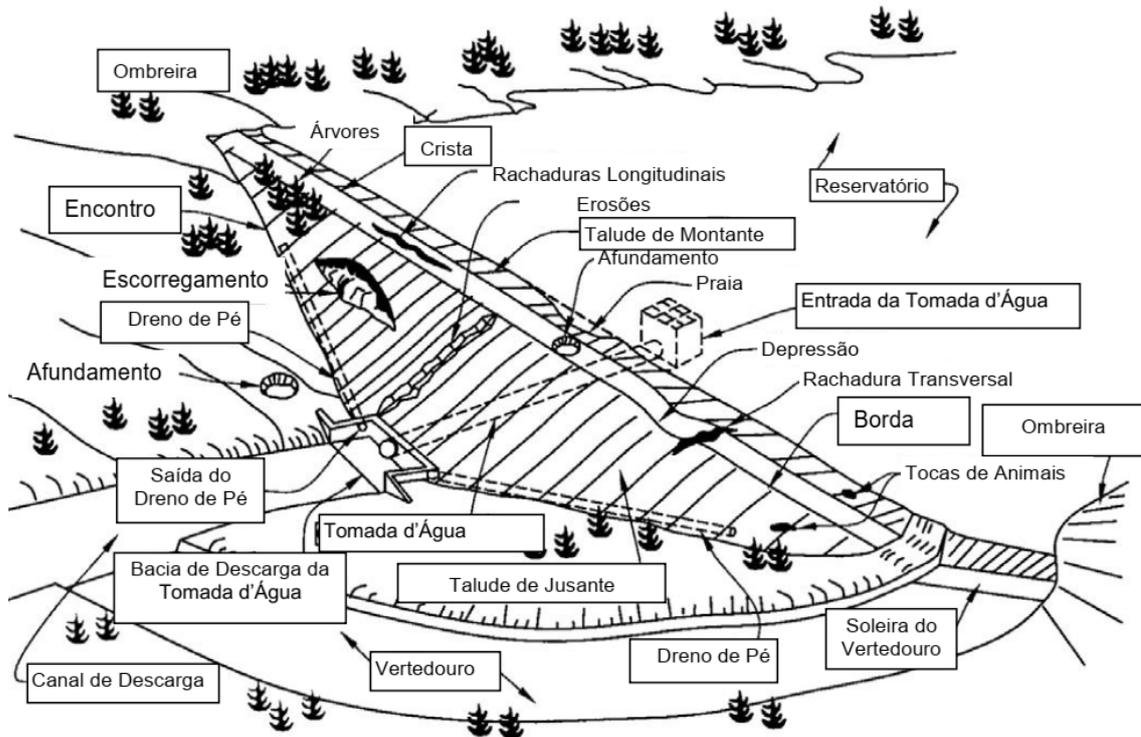
Higgins, *et al.* (2011) complementa que diferentes tipos de instrumentação e monitoramento são necessários para os diferentes tipos de barragem, reservatório e bacia hidrográfica. Após sua construção, instrumentação e monitoramento de barragens se dividem em duas amplas categorias: instrumentação e monitoramento do corpo da barragem, e do reservatório e área de captação.

Em contraste com a medição e monitoramento de corpos de barragens, os reservatórios e áreas de captação são conduzidos para fins de operação apropriada e gestão de barragens. Itens para observação e levantamento incluem nível de reservatório, sedimentação, precipitação, qualidade da água e ecologia. Sendo que estes fatores influenciarão principalmente no nível de percolação da água no solo. (MIZUNO & HIROSE, 2006).

#### e) Medição de poropressões no maciço

Segundo FERC (2016), a pressão hidrostática do reservatório influencia diretamente na pressão de elevação, também conhecida como pressão neutra ou poropressão. Essa pressão tem ligação direta com o que chamamos de linha freática de percolação nas barragens de terra e, essas linhas, podem ser determinantes para a identificação do carreamento de partículas no maciço, denominado piping, o que ocasiona a maior parte das rupturas em barragens de terra, como foi o caso das barragens de Mariana e de Brumadinho.

Figura 2 - Barragem de aterro típica com anomalias.



Fonte: (MIRANDA, 2016).

f) Medição de turbidez da água

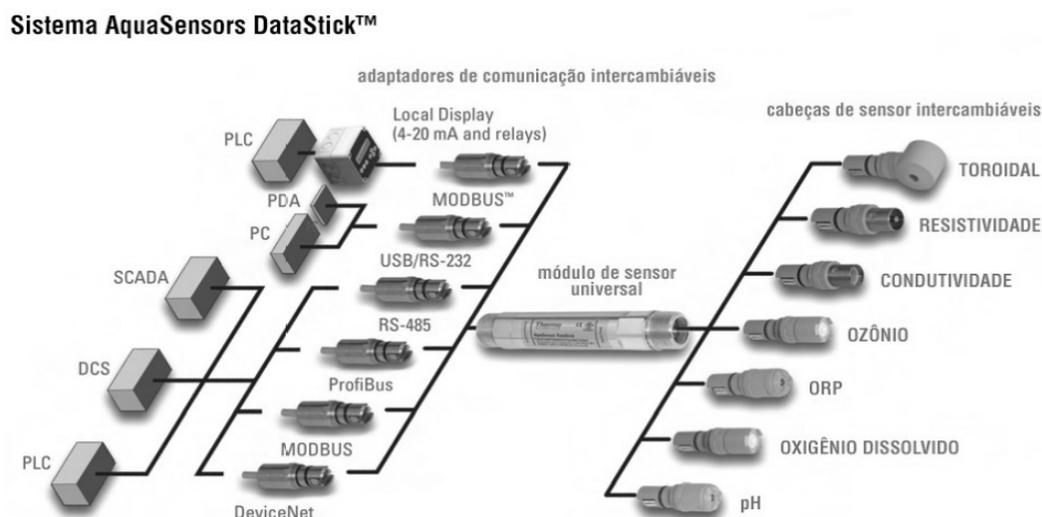
A medição da turbidez da água tem grande importância na Segurança de Barragens e é fator preponderante para identificação de carreamento, indícios de futuro piping. Sabe-se, porém, que mesmo com a não identificação visual da turbidez da água é possível ocorrer o piping, tendo em vista o aumento da percolação na fundação, o que requer uma análise de qualidade da água. Porém até isto ser identificado pode ser tarde. Fato este determinante para a instalação de sistemas de monitoramento online de turbidez da água, encontrado no mercado, como apresentado nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Sensor de turbidez de ampla gama.



Fonte: (NIVITEC, 2019).

Figura 4 - Sensores de qualidade da água



Fonte: (NIVITEC, 2019).

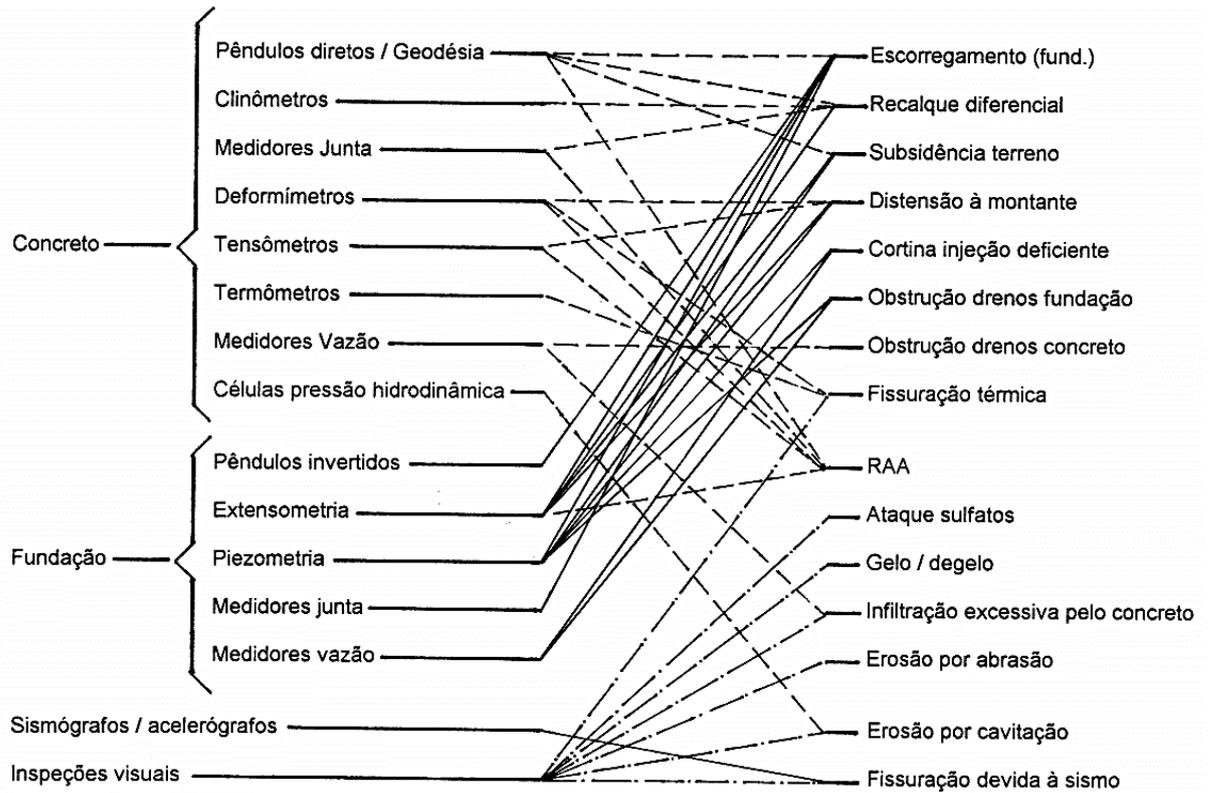
### 2.1.2. SELEÇÃO DE INSTRUMENTOS

Os instrumentos de medição deverão ser escolhidos de acordo com a necessidade e o tipo de grandeza a ser mensurada, tendo sempre o cuidado de realizar-se a calibração dos elementos sensores para que valores não sejam apresentados de forma equivocada. Fread (1988) e Eletrobras (2003) afirmam que também devem ser avaliadas as características de compatibilidade entre a ordem de grandeza do parâmetro e a precisão do instrumento a ser escolhido. Acrescenta também sobre a robustez dos equipamentos, tendo em vista que normalmente trabalharão em ambientes úmidos, devendo sempre, os equipamentos serem testados previamente.

Eletrobras (2003) parte da premissa de que os elementos sensores deverão ter durabilidade de no mínimo 40 anos, já que as barragens são projetadas para operar ao longo de aproximadamente 50 anos. Por isso é muito importante conhecer os detalhes de cada instrumento. (ZUCULIN, 2012).

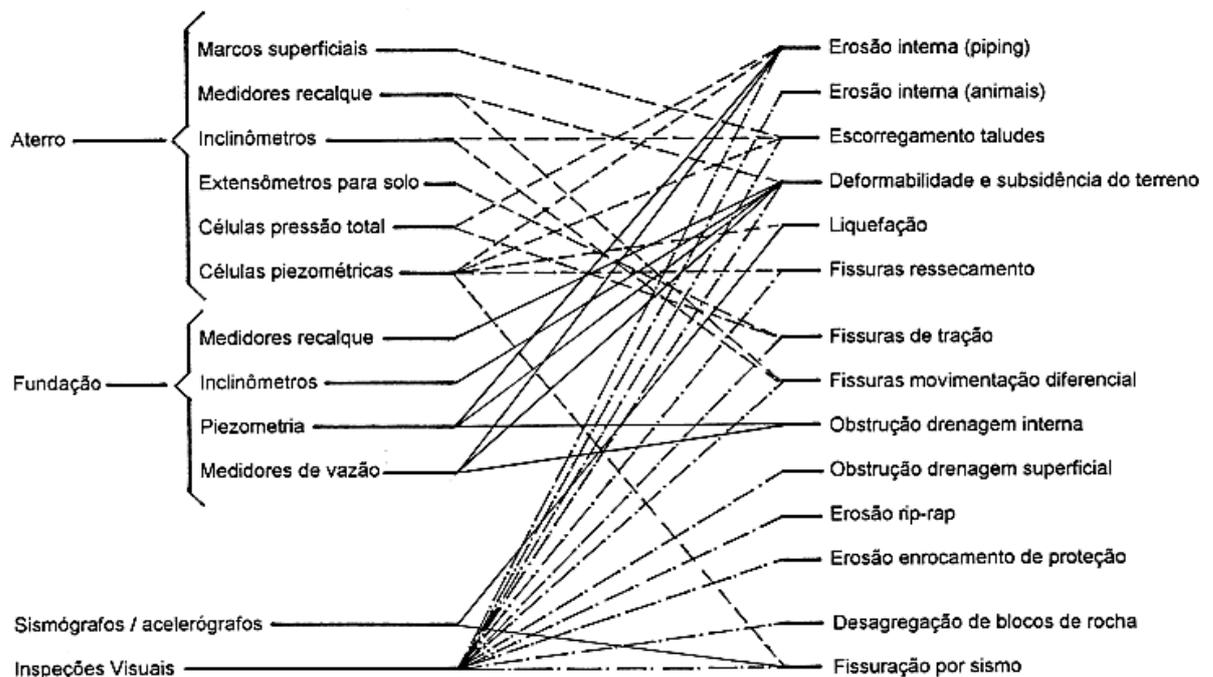
As Figuras 5 e 6 mostram os instrumentos e suas funções ou finalidades, para instalação em barragens de concreto e de terra.

Figura 5 – Instrumentos de barragens de concreto.



Fonte: (ELETROBRAS, 2003).

Figura 6 - Instrumentação de Barragem de terra e de enrocamento.



Fonte: (ELETROBRAS, 2003).

De acordo com Zuculin (2012), o projeto de monitoramento deve conter desde o arranjo da instrumentação, ou seja, onde instalar, quais grandezas medir, as leituras são de grandezas diretas ou indiretas, etc., até os procedimentos de instalação; Estas devem ser desenvolvidas em toda a etapa da obra, seguindo os critérios mínimos exigidos pelo Manual de Segurança de Barragens.

### 2.1.3. FREQUÊNCIA DE LEITURA DOS INSTRUMENTOS

Eletrobras (2003) e ANA (2016), afirmam que a frequência de leitura dos instrumentos tem relação com as grandezas envolvidas e a importância no quesito segurança da operação da barragem nas diversas fases de operação, onde esse fator é primordial para a Segurança das Barragens, sejam elas de concreto, de terra ou de enrocamento. Eletrobras (2003) mostra, na Tabela 3 as frequências mínimas de leituras dos instrumentos em barragens de terra e enrocamento.

Tabela 3 - Frequência de leituras - Barragens de terra-enrocamento. Fonte: (ELETROBRAS, 2003).

GRANDEZA MEDIDA	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO			
	Construtivo	Primeiro enchimento	Início de operação (1 a 5 anos após o enchimento)	Operação normal
Deslocamentos superficiais	Mensal	Semanal	Mensal	Semestral
Deslocamentos internos	Semanal	Semanal	Quinzenal	Mensal
Deformação	Semanal	Semanal	Quinzenal	Mensal
Pressão total / efetiva	Semanal	2 semanais	Semanal	Mensal
Porosidade	Semanal	2 semanais	Semanal	Quinzenal
Subpressão	Semanal	3 semanais	2 semanais	Quinzenal
Nível d'água	Semanal	3 semanais	2 semanais	Quinzenal
Vazão de infiltração	-	Diárias	3 semanais	Semanal

A Tabela 4 já apresenta as frequências mínimas de leitura recomendada por Eletrobras (2003) para barragens de concreto.

Tabela 4 - Frequência de leituras - Barragens concreto. Fonte: (ELETROBRAS, 2003).

GRANDEZA MEDIDA	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO			
	Construtivo	Primeiro enchimento	Início de operação (1 a 5 anos após o enchimento)	Operação normal
Deslocamento absoluto (geodésia)	Ao final da construção	mensal	trimestral	Semestral
Deslocamento angular (pêndulo)	Quinzenal	semanal	mensal	Mensal
Deslocamento relativo (medidores de junta)	Semanal	2 semanais	Quinzenal	Mensal
Deformação interna	Semanal	2 semanais	Semanal	Mensal
Tensão	Semanal	2 semanais	Semanal	Mensal
Temperatura do concreto	Semanal	Semanal	Quinzenal	Mensal
Pressão intersticial no concreto	Semanal	2 semanais	Quinzenal	Mensal
Carga (cabos de protensão)	Diárias durante a protensão	2 semanais	Semanal	Mensal
Subpressão na fundação	Semanal	3 semanais	2 semanais	Quinzenal*
Vazão de infiltração	-	Diárias	3 semanais	Semanal

\* para casos particulares, manter a frequência semanal.

## 2.2. PROBLEMAS ASSOCIADOS À SEGURANÇA BARRAGENS DE TERRA

De acordo com Gold & Lacy (1973) o momento mais crítico de uma barragem é em seu enchimento, logo o primeiro problema de percolação pode acontecer nesse momento crítico. Complementando essas informações, também relacionadas à percolação, temos um estudo bastante relevante onde Middlebrooks & Jervis (1947), através de levantamento de aproximadamente 200 barragens constataram que a segunda maior causa de acidentes é a percolação, com cerca de 25% do total desses acidentes, podendo ser identificadas, segundo Gold & Lacy (1973), em diversas regiões da barragem, como a Tabela 5.

Tabela 5 - Evidências de problemas de percolação (GOULD &amp; LACY, 1973)

LOCAL DA PERCOLAÇÃO	EVIDÊNCIA DE CAMPO
ATERRO, OMBREIRAS E CONTATO COM A FUNDAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surgências e umedecimento no talude de jusante;</li> <li>- Elevação dos níveis piezométricos na face de jusante;</li> <li>- Arqueamento e fissuras transversais na crista;</li> <li>- Aumento do fluxo no pé de jusante com carreamento de materiais;</li> <li>- Diminuição do nível do reservatório;</li> </ul>
ATRAVÉS DA FUNDAÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surgências no talude de jusante ou no pé do aterro;</li> <li>- Elevação dos níveis piezométricos da fundação à jusante do núcleo;</li> <li>- Aumento do fluxo no pé de jusante com carreamento de materiais;</li> <li>- Aumento do fluxo no rio e perda de nível do reservatório.</li> </ul>
ATRAVÉS DAS OMBREIRAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surgências no talude de jusante e crescimento localizado de vegetação;</li> <li>- Grandes perdas de água desproporcionais ao aumento do nível do reservatório;</li> <li>- Aumento do fluxo fora do perímetro do reservatório.</li> </ul>

É importante destacar que as inconsistências relacionadas à percolação devem sempre ser analisadas de forma conservativa pelas incertezas envolvidas como a variedade de componentes dos solos, ou seja, solos heterogêneos; a resistência ao fluxo de água através dos meios, ou seja, a permeabilidade; as falhas ou descontinuidades dos maciços de fundação, entre outras.

De acordo com Ley (1973) existe um nível de percolação considerada segura, que é aquela que mantém a vazão da água no solo em níveis seguros. A força de percolação pode provocar um aumento da pressão nos vazios, chamada de poropressão, que por sua vez deverá ser menor do que a tensão total do peso do solo, pois caso a poropressão chegar ao limiar do valor que se iguala a tensão total, provocada pelo peso do solo, o barramento tenderá ao limite de estabilidade, onde sua tensão efetiva tenderá a zero, o que é preocupante, podendo trazer instabilidade.

### 2.2.1. CONTROLE DE PERCOLAÇÃO

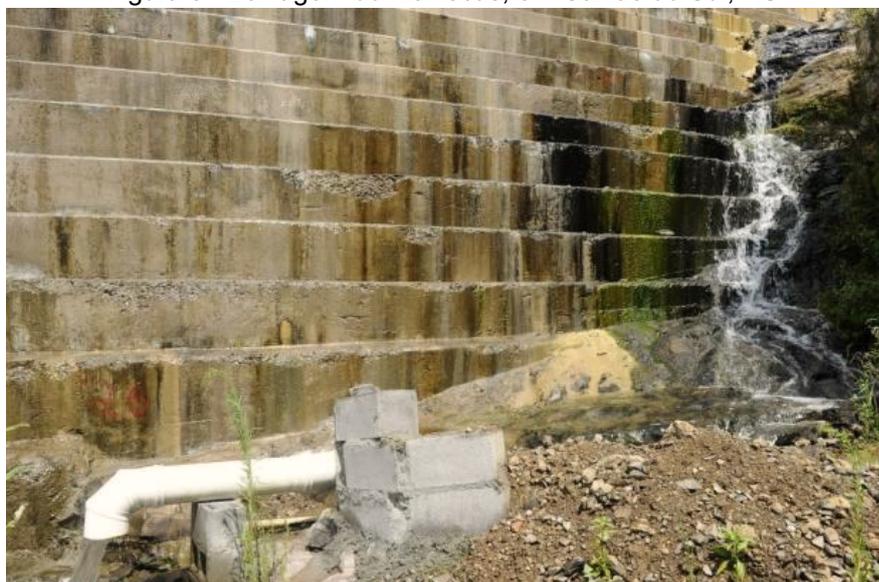
A percolação no maciço é fator preponderante para a estabilidade do talude, logo, o controle de percolação é de extrema importância para a segurança de uma barragem, que independente de ser de terra, enrocamento ou de concreto, de alguma maneira podem sofrer consequências da não observância da percolação adequada nessas estruturas como mostram as Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Barragem Santo Antônio do Gramma MG.



Fonte: (PEREIRA C. d., 2019).

Figura 8 - Barragem do Marrecas, em Caxias do Sul, RS.



Fonte: (DUARTE A. , 2019).

O controle de percolação é determinante para a segurança das barragens em geral. Nas estruturas de concreto, percolação significa patologia, tendo em vista que a estrutura deverá ser impermeável à passagem de água, devendo somente a percolação ser observada em sua fundação e de forma que a pressão neutra não seja superior a pressão exercida pela estrutura de concreto.

A percolação em barragens de terra, como exaustivamente foi apresentado anteriormente, é fator de grande impacto no projeto desse tipo de estrutura, levando em consideração reportagem de Mattoso (2019), em que o Delegado da Polícia Federal, o senhor Luiz Augusto Pessoa Nogueira, afirma não haver barragens de mineração seguras,

justificando sua tese com a afirmativa de que as mineradoras trabalham com algo que não conhecem, se referindo ao fenômeno da liquefação, apresentado anteriormente. O delegado também fez a seguinte afirmativa:

*“Por ser pouco conhecido, o fenômeno de liquefação, você tinha que dizer o seguinte: ‘Eu não sei lidar com isso, mas tem uma população ali que pode ser atingida. Então eu vou tirar essa população dali.’” (MATTOSO, 2019).*

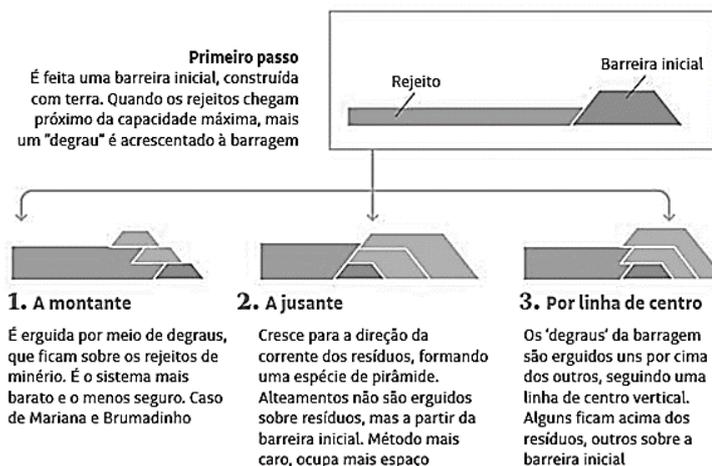
As afirmativas presentes na matéria de Mattoso (2019), questionam o fato de existir um enorme barramento e apenas medições pontuais nessa estrutura. Nota-se, sobretudo que, comumente, em momentos de incidentes que provocam desastres, aparecem diversos especialistas no assunto, que desenvolveram seus conhecimentos em alguns poucos dias de observação. Pode-se afirmar que a perícia na engenharia se dá através de investigações visuais, medições com alguns instrumentos que podem verificar e apresentar algumas características que dão ao engenheiro embasamento para assinar um laudo técnico. Logicamente, não existe nenhum sistema 100% seguro, porém a inserção de diversos sensores através de “pré-furos” diminuiria a resistência da barragem ao cisalhamento além de diversos outros problemas. Existem outras técnicas geofísicas não invasivas que serão tema de futuras implementações e possível tese de doutorado para complementação desta dissertação, no quesito de instrumentação de barragens.

Com exceção de alguns equívocos, as suposições feitas sobre os tipos de barragens quanto à segurança e ao custo de implantação são bastante coerentes e motivadores de questionamentos do Poder Público brasileiro. A Figura 9 apresenta as formas construtivas de algumas barragens de rejeito.

Figura 9 - Métodos construtivos mais comuns de barragens de rejeito.

**Maioria das barragens no país é feita pelo método mais simples e inseguro**

As três formas de montar uma barragem



Fonte: (MATTOSO, 2019).

### 2.2.2. RECALQUES, FISSURAS E TRINCAS

De acordo com Pinto (2006), um dos grandes interesses da engenharia geotécnica é a estabilidade do solo ao receber carregamentos verticais de fundações superficiais, tais como sapatas, radier ou de aterros construídos sob o terreno. Esses recalques acontecem de forma rápida com solos arenosos ou argilosos não saturados e de forma lenta em solos argilosos saturados, onde é necessário o deslocamento da água dos vazios do solo.

De acordo com Oliveira (2012), fissuras, trincas e rachaduras são resultado de esforços e tensões acima do limiar crítico que o material pode suportar. E essas patologias também podem ser provocados pela dilatação térmica dos materiais que também podem provocar esforços internos nos materiais. Silva (2011) classifica através de suas dimensões os tipos de patologias. O recalque é resultado do adensamento do solo, ao receber uma determinada carga, ou seja, o processo de consolidação ou estabilização do mesmo que, dependendo das condições da obra ou estrutura, pode se dar de forma diferencial ou desproporcional fazendo com que surjam patologias iniciando-se com fissuras como classificação apresentada na Tabela 12.

Tabela 6 - Classificação de aberturas comuns em patologias (SILVA A. d., 2011)

<b>ANOMALIAS</b>	<b>ABERTURAS (mm)</b>
Fissuras	até 0,5
Trincas	de 0,5 a 1,5
Rachaduras	de 1,5 a 5,0
Fendas	de 5,0 a 10
Brechas	acima de 10

### 2.2.3. EROSÃO

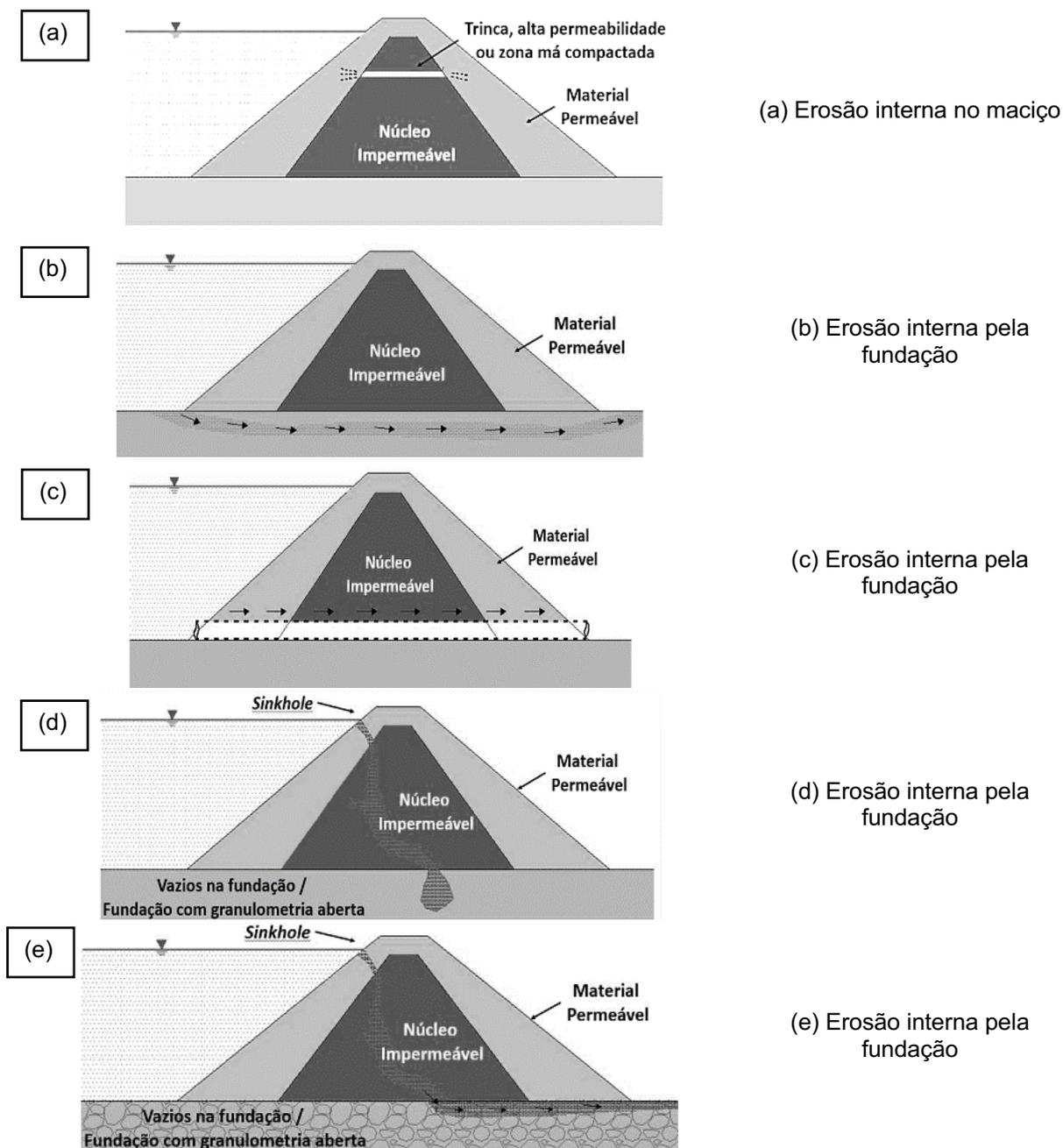
Segundo Ferreira (2004), erosão é o processo de deterioração, condução e deposição do solo, dos subsolos e das rochas. Sendo que a erosão natural é provocada pelo intemperismo e a erosão em barramentos e taludes, além da ação do tempo pode ser provocado pela atuação da água que percorre o talude, a percolação fora do controle, gerando um fenômeno conhecido como carreamento do solo pelo maciço. Como nesse processo ocorre o deslocamento de partículas pelo barramento, conseqüentemente este fenômeno diminuirá a interação entre as partículas do solo, trazendo um desequilíbrio de tensões, e de forma progressiva vai aumentando até provocar a formação de brechas e colapso da estrutura (LADEIRA, 2007).

De acordo com Terzaghi e Peck (1948), quando a água flui com pressão elevada através da barragem ou de sua fundação, a força de percolação pode provocar o rompimento do barramento através do carreamento dos grãos, o que é denominado como “*piping*”, que é a erosão interna regressiva, podendo ocorrer de forma contínua e progressiva. Saré (2003)

acrescenta que o pé da barragem é o ponto mais crítico pois os níveis de tensão são baixos e o gradiente hidráulico é alto, ou seja, como o desenvolvimento do processo de erosão se dá de montante para a jusante, a diferença de pressão entre esses dois pontos é altíssima.

Existem algumas formas já bastante estudadas de erosão no solo apresentadas por Ávila & Fusaro (2017) como demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Exemplos de erosões no maciço.

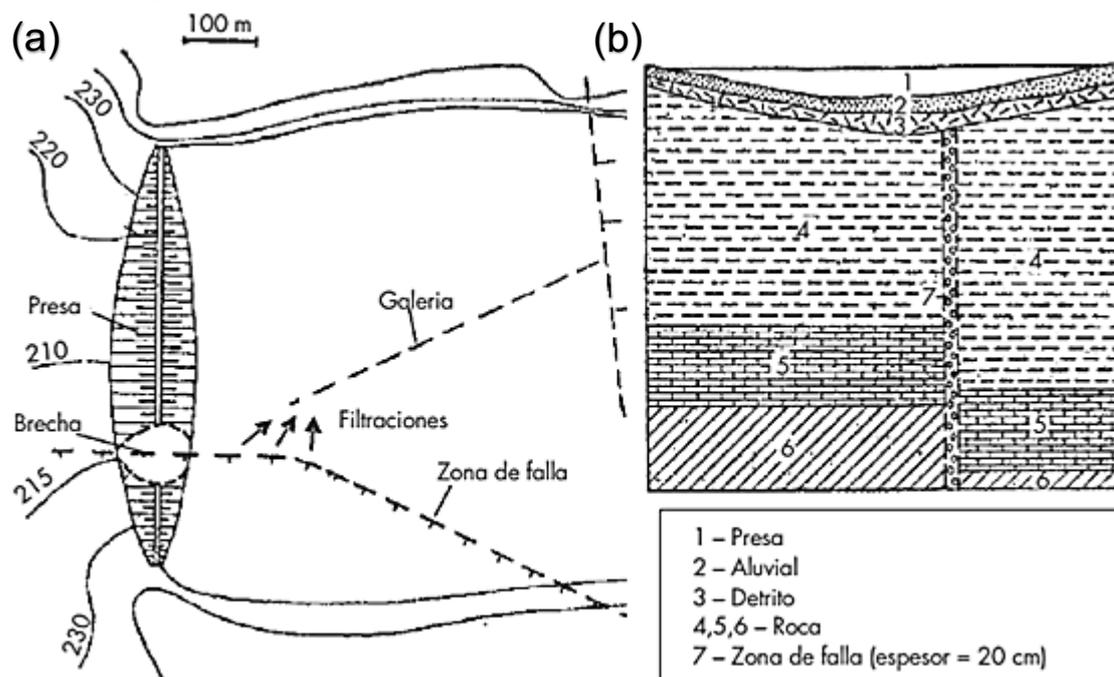


De acordo com Ávila & Fusaro (2017) o processo de erosão interna se inicia por um gatilho, como por exemplo a elevação do nível do reservatório. Por isso o momento mais crítico de um barramento é seu enchimento, fazendo-se necessário aguardar um período de

saturação do solo para verificar se não há o carreamento de solo; caso haja esse carreamento, essa é o segundo nível da patologia e, se não for sanada a contento, pode levar ao que se denomina “*piping*”, sendo o último estágio de ruptura do barramento.

Pode-se apresentar um exemplo de caso com erosão interna, apresentado por Chacinski *et al.* (1994) da barragem de Iwiny na Polônia (Figura 11).

Figura 11 – Esquemático da falha da represa Iwiny na Polônia em 1967.



Fonte: (OLDECOP & RODRÍGUEZ, 2007).

Onde (a) mostra a planta da disposição da barragem, o reservatório de água, as galerias subterrâneas da operação de mineração, o traçado da zona de falha que atravessa o reservatório e a fundação da barragem e (b) apresenta o corte vertical pelo eixo da barragem e sua fundação.

#### 2.2.4. LIQUEFAÇÃO

A liquefação em barragens de terra tem sido alvo de investigações ao redor do mundo devido às consequências devastadoras de suas ocorrências, trazendo perdas ambientais, sociais, econômicas e inclusive perdas de vidas (MATURANO RAFAEL, 2012). Só no Brasil, em menos de três anos houveram dois incidentes relevantes, com barragens de terra, como as de Mariana e a de Brumadinho, todas as duas no Estado de Minas Gerais.

Como mencionado anteriormente, a liquefação tem relação direta com o fluxo de água, onde a poropressão pode crescer ao ponto de anular a tensão efetiva. Mas para que isso ocorra as forças de percolação devem se opor a ação do peso dos grãos do solo, o que provocaria a não interação entre as forças das partículas.

É importante lembrar também que a coesão do solo tem grande influência na resistência do material, como por exemplo a argila apresenta coesão entre as partículas mesmo quando a tensão efetiva é nula, caso que não ocorre com as areias.

Maturano Rafael (2012), classifica a liquefação em dois tipos, a estática e a dinâmica, de acordo com a natureza do gatilho do processo. A liquefação estática é ocasionada por ação de cargas que, sob solicitação não-drenada, causam excessos de pressões neutras, que por seguinte induzem a liquefação do material. A dimensão dos diques e sua inclinação interferem diretamente no cisalhamento estático de suas estruturas (FREIRE NETO, 2009).

Existem alguns processos que podem levar numa barragem de terra seu solo se liquefazer, tais processos são chamados de gatilhos, que devem ser evitados a qualquer custo, evitando assim perdas ambientais, sociais, econômicas e de vidas. Esses gatilhos são: aumento da poropressão ocasionados pela subida do lençol freático; aumento da poropressão nas barragens provocados pelos alteamentos nas barragens de rejeitos; quanto mais íngreme a barragem mais eleva a força cisalhante; remoção de suportes do pé da barragem aumentando as tensões atuantes; movimento da fundação, provocando um carreamento suscetível ao colapso instantâneo (DAVIES, MCROBERTS, & MARTIN, 2002).

A liquefação dinâmica está diretamente ligada aos abalos sísmicos, onde o movimento harmônico, ou vibrações, provocados pelo deslocamento das placas tectônicas rearranjam a estrutura das partículas fazendo com que as forças estáticas de água de um barramento percolem com maior facilidade e, se não dimensionado corretamente, pode levar a barragem a um estado crítico, como mostra a Figura 12 com a ruptura de uma barragem de rejeitos em Merriespruit nos Estados Unidos.

Figura 12 - Ruptura da barragem de rejeitos de Merriespruit.



Fonte: (DAVIES, MCROBERTS, & MARTIN, 2002).

De acordo com Cedergren (1977) o gradiente hidráulico crítico que causa a liquefação em solos arenosos é calculado através da lei de Darcy, igualando-se a tensão efetiva a zero, como mostra a Equação (2.1).

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (2.1)$$

Onde  $i_{crit}$  representa o gradiente hidráulico crítico,  $\gamma_{sub}$  é o peso específico submerso, e  $\gamma_w$  é o peso específico da água.

Além do gradiente hidráulico, vários autores têm utilizado o conceito de resistência liquefeita para avaliar a resistência dos solos suscetíveis ao fenômeno da liquefação, afirmações estas fundamentadas através de vários casos históricos de rupturas ocorridos relacionados.

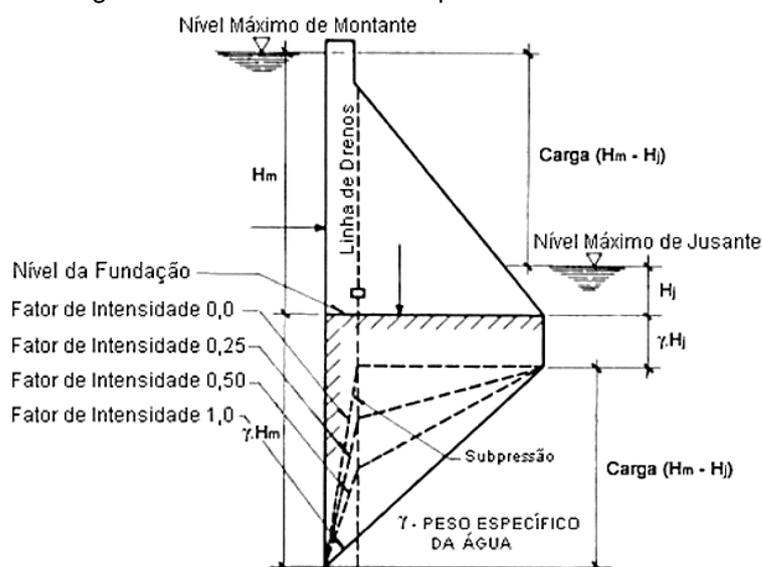
#### 2.2.5. SUBPRESSÃO

De acordo com Saré (2003), as estruturas de concreto são projetadas para suportar as subpressões de forma segura. Uma análise consistente do solo no local do empreendimento é de crucial importância, tendo em vista que, por mais que a estrutura seja construída sob solo argiloso, em que seu nível de coesão proporciona uma certa resistência, mesmo com a tensão efetiva igual a zero, o peso da argila e sua coesão podem ser insuficientes para atender uma eventual força de água, ocorrendo o chamado levantamento de fundo.

De acordo com Andrade (1981) a Sociedade Americana de Engenharia Civil publicou um periódico que apresentou a variação da subpressão, que é de forma linear de montante para jusante e depende do fator de área, porcentagem da área de atuação da subpressão, fator de intensidade e porcentagem de carga máxima a montante.

Em resumo, de acordo com Gil (2014), a subpressão, também conhecida como pressão negativa ou pressão neutra é o conjunto de pressões verticais da poropressão, ocasionada pela percolação, que atua de baixo para cima nas juntas de concretagem, interações entre concreto e rocha e fraturas, como apresentado na Figura 13. De acordo com o tipo de projeto e local de instalação é feito o dimensionamento de estruturas para a redução desta subpressão, tais como filtros e sistemas de drenagem.

Figura 13 - Diagrama de intensidade de subpressão com vários coeficientes.

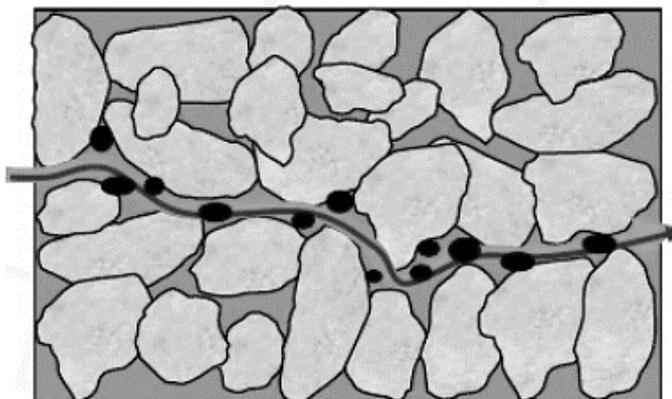


Fonte: (ANDRADE, 1981)

De acordo com Levis (2006) a subpressão é a força impressa na estrutura no sentido vertical ascendente, ou seja, de baixo para cima, provocada pela percolação de água através do maciço. Observe que as subpressões estão intimamente ligadas à estabilidade das estruturas, sejam elas de concreto (referindo-se às fundações) ou barramentos de terra; observe que há a ocorrência de várias forças na análise desse evento.

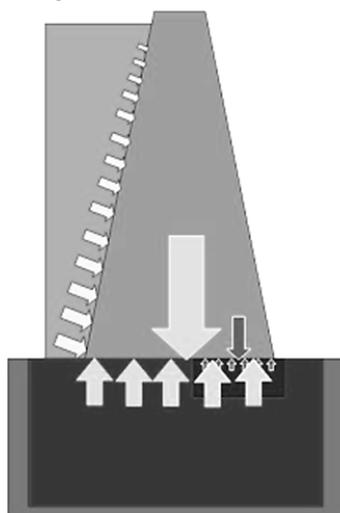
O caminho percorrido pela água (Figura 14), através dos poros presentes nos solos, preenche os vazios criando uma pressão denominada poropressão ou pressão neutra. Esta pressão, causada pelo atrito da água nas partículas de solo (que geram as perdas de carga), tende a impulsionar as partículas sólidas do solo para cima. Sabe-se que em um barramento a pressão estática da água gera um diferencial de pressão, produzindo assim um fluxo contínuo pelo solo, logo, dependendo do nível do reservatório, da compactação e consequente permeabilidade do solo, pode-se estimar a força de percolação. Esta força aplicada nos vazios dos solos provocará uma pressão ascendente, contrapondo-se à força peso que a barragem imprime na fundação. E, dependendo da análise, o peso próprio do solo mais o carregamento imposto sobre ele provoca uma tensão na fundação (Figura 15), que, considerando o solo saturado, as forças do carregamento serão, inicialmente, absorvidas pela água e passadas gradativamente aos grãos ou partículas sólidas do solo, como apresentado pela analogia de Terzaghi na Figura 16. Isso só se adequa a situações em que o solo está saturado e recebe cargas externas, se acomodando na proporção em que a dissipação das forças aplicadas na água passe para os sólidos do solo.

Figura 14 - Representação da percolação no solo.



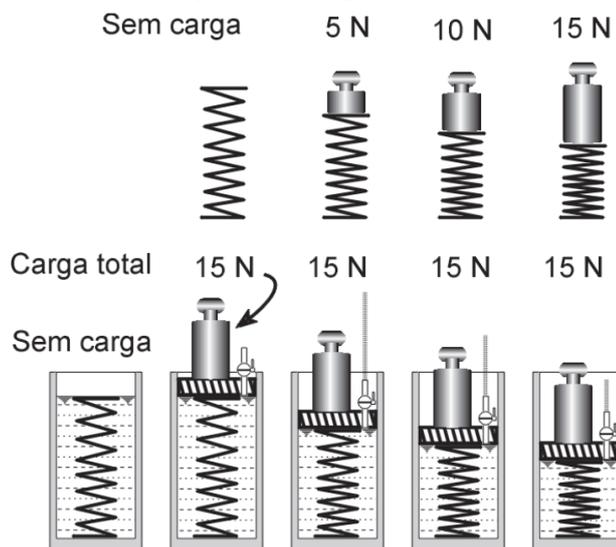
Fonte: (WATANABE, 2019).

Figura 15 – Representação das forças verticais e horizontais impressas numa barragem.



Fonte: (WATANABE, 2019).

Figura 16 – Representação da analogia de Terzaghi à distribuição da carga no solo saturado.



Fonte: (PINTO C. d., 2006).

### 2.2.6. SURGÊNCIA

As surgências podem ser naturais, quando se tratam de nascentes, por exemplo; surgências projetadas, quando no caso de filtros, drenos e solos drenantes em barragens, direcionando o fluxo de água controladamente da montante até a jusante; ou surgências patológicas, ocasionadas por diversos tipos de fatores, como apresentado nas Figuras 17 a 19.

Figura 17 - Surgências naturais – nascentes.



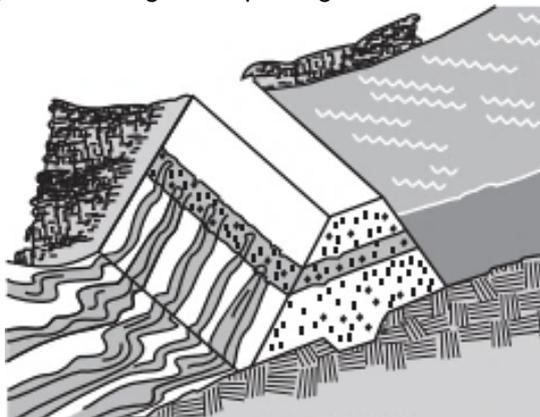
Fonte: (SANTOS, TEIXEIRA, JUNQUEIRA, VIANA, & MALDANER, 2007).

Figura 18 - Surgência projetada em barragem de terra e de enrocamento em Belo Monte – Pa.



Fonte: Próprio autor.

Figura 19 - Surgências patológicas não controladas.



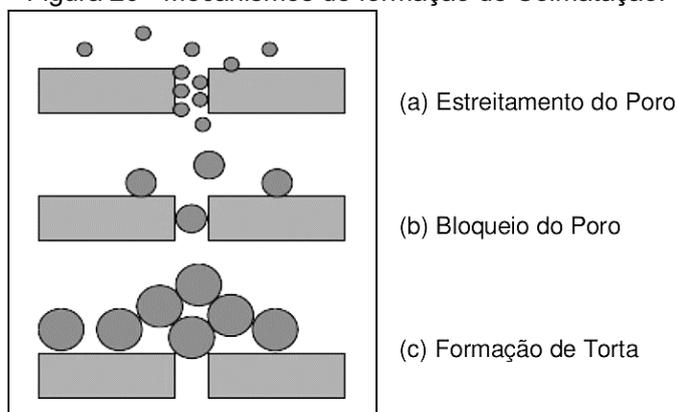
Fonte: (GOVERNO FEDERAL, 2002).

As surgências também podem ocorrer nos casos em que o empreendedor, de forma inadequada, execute a construção de barramentos sob uma nascente ou sobre um pequeno córrego, fazendo com que ao longo do tempo aconteça surgência no barramento e, dependendo do caso, comprometer a estrutura da barragem. O surgimento de água não dimensionado sempre será uma preocupação, ainda mais quando acontece um fenômeno associado denominado carreamento.

### 2.2.7. COLMATAÇÃO DE DRENOS

Segundo Silva (2012) A termos gerais, a colmatação não é meramente o entupimento dos drenos, sendo possível vários estágios, como apresentado simbolicamente na Figura 20, que representa nas dimensões das partículas as formas de colmatação.

Figura 20 - Mecanismos de formação de Colmatação.



Fonte: (SCHÄFER, WAITE, & FANE, 2004).

A colmatação pode provocar uma série de efeitos tais como, em caso de grande volume pluviométrico reservado no lago da barragem, pela falta desta drenagem, pode ocasionar um fenômeno chamado de transbordo, aumento da poropressão, dentre outros.

Com essa premissa a instrumentação de uma barragem é ferramenta de crucial importância para a detecção da colmatação dos filtros e drenos (NOGUEIRA JUNIOR, 1988).

Schäfer, *et al* (2004) classificou os tipos de colmatações e seus agentes causadores, de forma bem prática e didática como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação de colmatação e seus agentes (SCHÄFER, WAITE, & FANE, 2004)

TIPO DE COLMATAÇÃO		AGENTES COLMATANTES
Inorgânica	Coloidal ( <i>Colloidal</i> )	Argilominerais, sílica coloidal, hidróxidos de ferro e alumínio
	Particulada	Óxidos metálicos de ferro, alumínio, magnésio
	Incrustação ( <i>Scaling</i> )	Sais dissolvidos de baixa solubilidade (sulfato, carbonato e fluoreto de cálcio)
Orgânica	Coloidal ( <i>Colloidal</i> )	Proteínas, taninos, ácidos húmicos e fúlvicos
	Não-Coloidal	Polissacarídeos, óleos, polímeros
Microbiológica	Bicolmatação ( <i>Biofouling</i> )	Microrganismos (bactérias, fungos, algas)

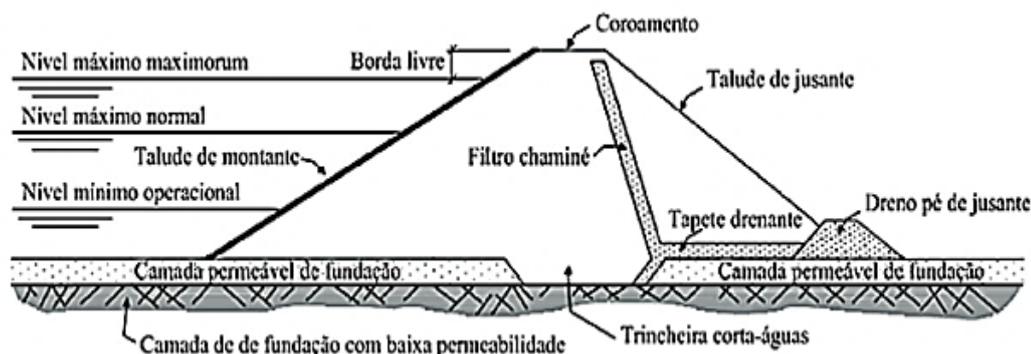
Utilizando a classificação de Schäfer, *et al* (2004), pode-se discorrer sobre as mesmas, onde a colmatação coloidal relaciona-se com as partículas coloidais e orgânico-coloidais presentes na água com tamanhos variando entre  $0,3 - 10\mu m$  e tem característica de colmatação do tipo formação de lâmina de torta, como apresentado na Figura 20(c). Já a colmatação orgânica é causada por compostos orgânicos naturais em solução ou particulados. E para compostos orgânicos carregados as forças de atração ou repulsão eletrostáticas influenciam no grau de colmatação (VAN DER BRUGGEN, MANTTARI, & NYSTROM, 2008).

A Bicolmatação, embora sejam organismos orgânicos, recebem uma consideração especial. Estes são as bactérias, algas e fungos, que mais causam problemas com a formação de biofilmes. Quando as bactérias ficam expostas a um ambiente que as é favorável se multiplicam rapidamente agravando o problema de obstrução dos filtros. Outra obstrução que é causada por compostos inorgânicos denomina-se incrustações ou entupimentos, causados por elementos de baixa solubilidade, que entram como partículas sólidas e dentro do sistema e precipitam por conta da percolação.

#### 2.2.8. RESTRIÇÃO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

A restrição do nível do reservatório é, em consequência, a Borda Livre da barragem, que compreende o nível máximo do reservatório até a crista ou coroamento, conforme representado na Figura 21.

Figura 21 - Seção transversal de uma barragem de terra homogênea.



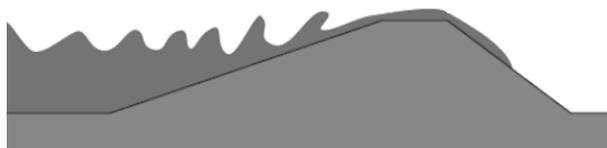
Fonte: (ANA, Volume VIII, 2016).

Deve-se considerar, antes do início, dependendo das características do projeto, as bacias hidrográficas e hidráulicas, sendo a primeira relacionada ao caudal do rio, córrego, igarapé, etc., caso a barragem tenha a finalidade dessa contenção; já a bacia hidráulica refere-se ao quanto a barragem irá impactar, no volume dessa reservação, ou seja, é o volume que conterá a água represada, lembrando de sempre considerar as piores situações históricas possíveis, nos períodos de cheias.

Para se alcançar tal objetivo com mais eficiência, faz-se necessário um acompanhamento histórico do caudal do rio, porém através de um levantamento planialtimétrico, se realizado num período de pelo menos um ano, pode-se ter uma noção inicial dos impactos do reservatório no local. Hoje também existem diversas ferramentas e *softwares* que facilitam a visualização destas situações, todavia tais programas são alimentados por informações obtidas em campo.

De acordo com Meer, *et al.* (2009), a restrição do nível do reservatório, conseqüente borda livre, tem relação direta com a segurança da barragem, tendo em vista, na não observância adequada pode trazer conseqüências como o galgamento ou “*overtopping*”, podendo assim trazer condições de colapso à estrutura de uma barragem. Esse galgamento pode acontecer de duas formas, a primeira é o galgamento através de ondas, como Vischer & Hager (1997) afirmam que as grandes quantidades de água podem criar ondas de fluxo máximo à montante do reservatório e causar sérios danos, como mostrado na Figura 22, e a segunda é através de cheia do reservatório, como apresentado nas Figuras 23 e 24.

Figura 22 - Representação de galgamento através de ondas em um reservatório.



Fonte: adapt. (MEER, BERNARDINI, STEENDAM, AKKERMAN, & HOFFMANS, 2009).

Figura 23 – alto nível de chuvas provoca galgamento em barragem de açude no Piauí.



Fonte: (FEITOSA, 2019).

Figura 24 - Usina hidroelétrica de Armando Sales de Oliveira após o galgamento.



Fonte: (CARVALHO & PENNA NETO, 2007)

Ponce e Tsvoglou (1981) afirmam que a ruptura das barragens por galgamento não se dá de maneira abrupta, levando em consideração a registros históricos disponíveis na época, ela se dá de forma gradual com formação de brechas, de acordo com a ação erosiva do galgamento (frequência e intensidade), como representa a ação erosiva do “*overtopping*” na Figura 25.

Figura 25 - Representação da ação erosiva do galgamento ou "overtopping".



Fonte: (CAMARGO, 2014).

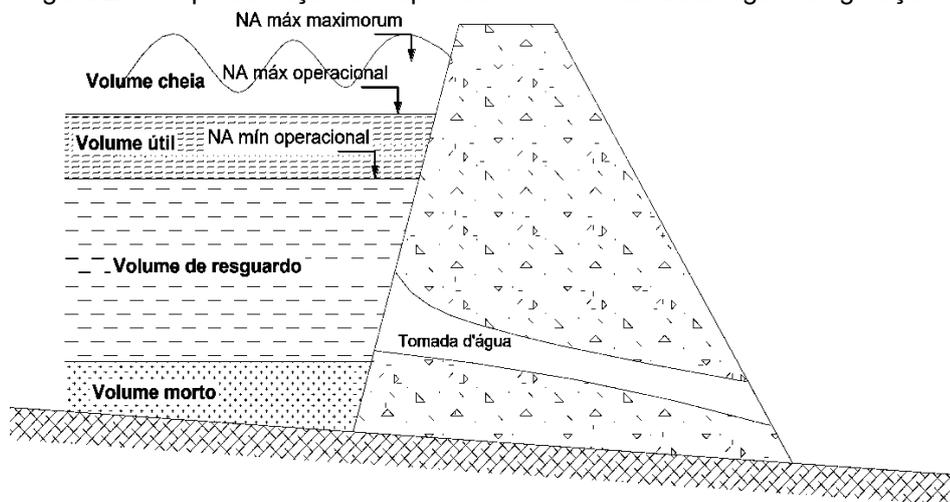
Mesmo apresentando os problemas, o objetivo deste tópico é apresentar as soluções encontradas para restringir o nível do reservatório e, por consequência, evitar o galgamento ou “*overtopping*”, em que, segundo Perini (2009) entre os anos de 2000 a 2008 foram responsáveis por 61% dos acidentes com barragens no Brasil.

Para o controle e restrição do nível do reservatório deve ser dimensionado um canal denominado extravasor ou vertedores na estrutura da própria barragem, fazendo com que, caso haja uma cheia, o excesso de água flua, por gravidade, através do canal extravasor ou pelos vertedores, mantendo assim a “Borda livre” em nível de projeto. (ANA, Volume VII, 2016).

Porto (2006) mostra que os vertedores, ou também chamados descarregadores, são dispositivos utilizados para medir e/ou controlar vazão em escoamento por um canal, sendo estruturas relativamente simples, porém de grande importância. Pinto (1987) ressalta que os vertedouros têm a função de fazer a barragem passar por enchentes com segurança. Dettmer (2013) complementa que eles também têm função de controlar o nível do reservatório.

Em caso de barragens para geração, existem várias classificações níveis de volume, tais como nível morto, que corresponde ao nível abaixo da tomada d’água; o volume de resguardo, onde seu valor máximo é o mínimo operacional do volume útil; o volume máximo operacional está compreendido no nível de cheias, que dependendo da localização e da característica do corpo d’água deverá ser controlado pelos vertedouros. Níveis estes apresentados na Figura 26, enquanto a Figura 27 mostra uma estrutura de geração com vertedores em operação.

Figura 26 - Representação dos tipos de níveis em uma barragem de geração.



Fonte: (ANA, DAEE, 2016).

Figura 27 – UHE Itaipú, vista aérea, com vertedores em operação para controle do nível do lago.

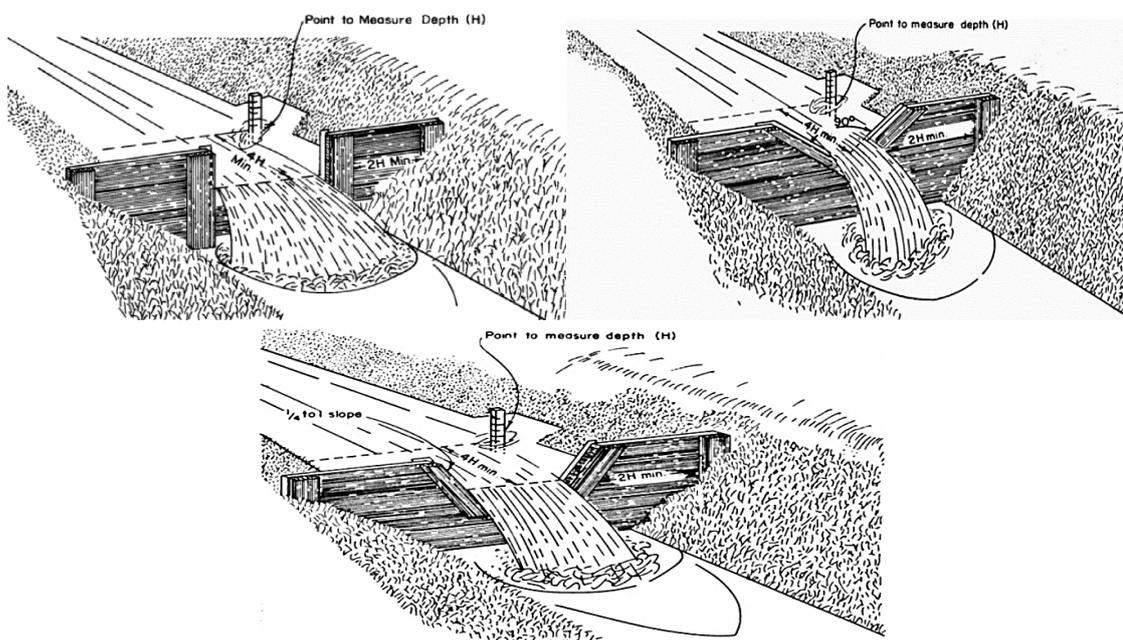


Fonte: (ANA, DAEE, 2016)

De acordo com Raimundo (2007), Dettmer (2013) e ANA, DAEE (2016), os vertedores dependem de vários fatores para sua determinação e opção construtiva em uma barragem. A vazão de projeto, o arranjo geométrico e os custos envolvidos são fatores preponderantes para a escolha e construção dessas estruturas. Porto (1998) classificou esses vertedouros através da forma geométrica de abertura; da altura relativa da soleira; da natureza da parede; do comprimento relativo da soleira; da natureza da lâmina; da inclinação do paramento; e da forma geométrica da crista.

A Figura 28 ilustra alguns exemplos de forma geométrica de vertedouros.

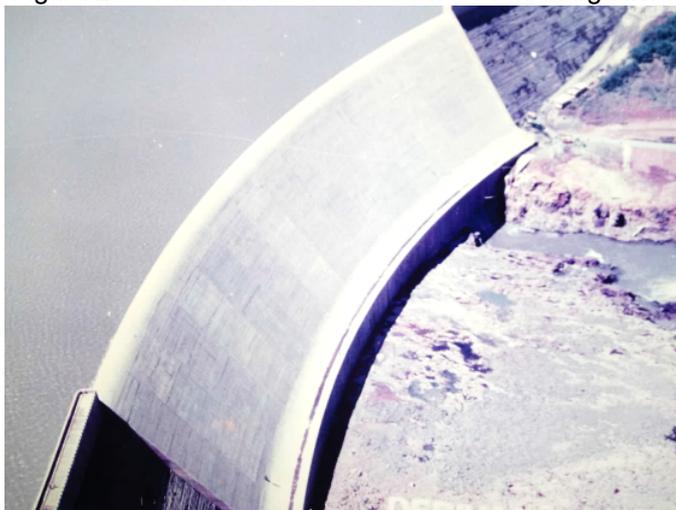
Figura 28 - Representação de vertedor retangular, triangular e trapezoidal.



Fonte: (UFERSA, 2011).

De acordo com a altura relativa da soleira classificadas por Porto (1998), os vertedouros ou vertedores podem ser de descarga livre, quando a altura da soleira é maior do que o nível d'água de jusante, ou seja, quando a água que passa pelo vertedouro, saindo da montante, passa para jusante como um lançamento oblíquo (Figuras 29 e 30); ou podem ter descarga afogada, quando a soleira é menor do que o nível da água, ou seja, o lançamento da água é diretamente no nível de jusante (Figuras 31 e 32).

Figura 29 - Vertedouro de soleira livre ou descarga livre.



Fonte: (DETTMER, 2013).

Figura 30 – Maquete demonstrando Vertedouro de soleira livre ou descarga livre.



Fonte: (ANA, DAEE, 2016).

Figura 31 – Maquete demonstrativa Vertedouro de soleira afogada ou descarga afogada (vazia).



Fonte: (ANA, DAEE, 2016)

Figura 32 – Maquete demonstrativa de Vertedouro de descarga afogada (em operação)

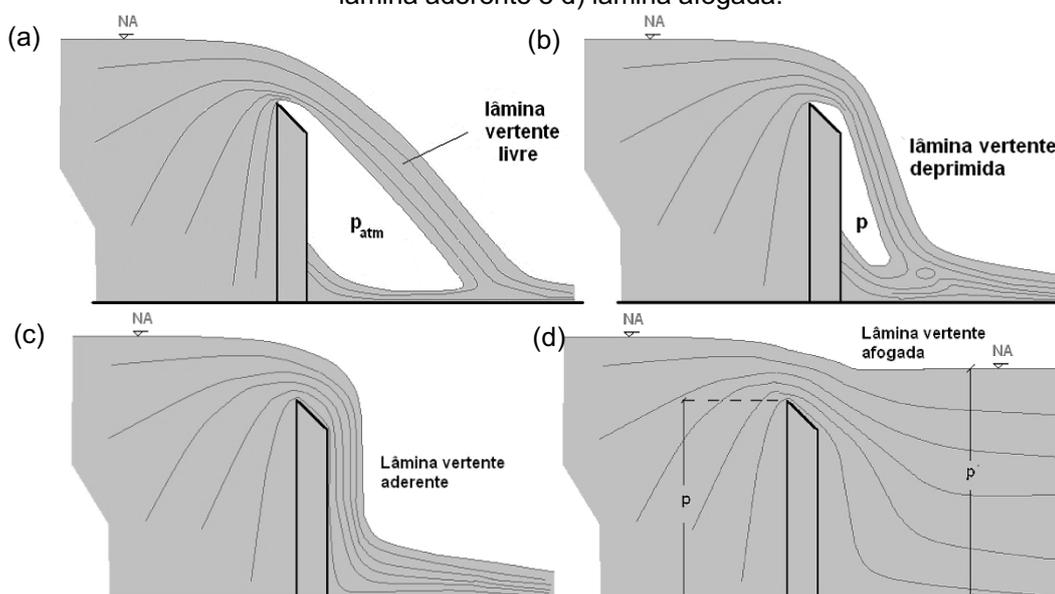


Fonte: (ANA, DAEE, 2016)

Porto (1998), também classifica os vertedouros de acordo com a natureza da lâmina d'água, como por exemplo, as lâminas livres, que são a situação onde a lâmina de água escoava com a pressão atmosférica, tendo sua parte inferior arejada; as lâminas deprimidas, que acontecem quando a pressão abaixo da lâmina d'água é menor do que a pressão atmosférica,

trazendo o escoamento laminar para mais próxima da soleira; as lâminas aderentes, onde o ar é totalmente arrastado pela água, fazendo com que a lâmina d'água “cole” na soleira; e a lâmina afogada, onde o nível de água a jusante é superior à altura da soleira, por isso o termo afogada (Figura 33).

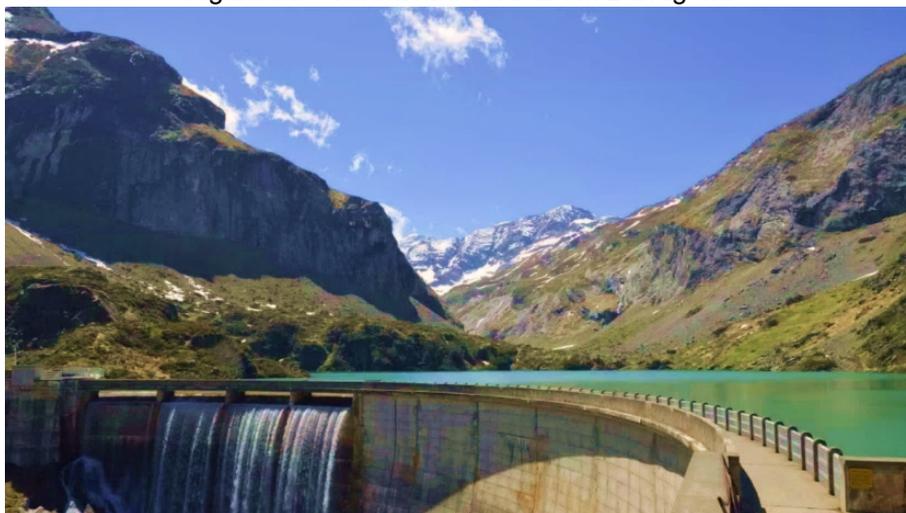
Figura 33 - Representação de lâminas assando pela soleira: a) lâmina livre; b) lâmina deprimida; c) lâmina aderente e d) lâmina afogada.



Fonte: (DECIV, 2016).

Porto (1998), também classifica os vertedouros quanto à sua inclinação, ou inclinação do paramento, sendo estes verticais, mais comuns para medições de vazão, porém não exclusivos, apresentados nas Figuras 35 a 38, mas como mostram as Figuras 34 e 35 com a utilização com finalidade de verter volume de cheia; também existem os vertedouros de paramento inclinados, boleados e mistos, mais utilizados para verter o volume de cheias.

Figura 34 – Vertedouro vertical em Barragem.



Fonte: (LUSA, 2018).

Figura 35 – Vertedouro inclinado para controle de nível do lago (descarga).



Fonte: (ES, 2018).

E por último, Porto (1998), classifica os vertedouros de acordo com a forma geométrica da crista, apresentando as formas retilíneas, poligonais, labirintos, triangulares e circulares, como apresentado nas Figuras 36 a 38.

Figura 36 – Formas de vertedouro retilíneo retangular.



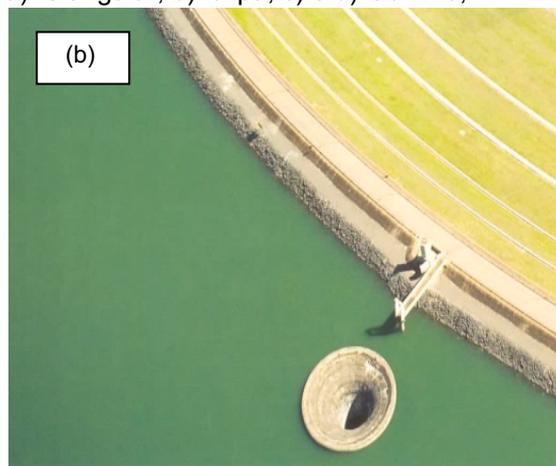
Fonte: (COSTA, BACELLAR, & SILVA, 2007).

Figura 37 – formas de vertedouro triangular.



Fonte: (UFERSA, 2011).

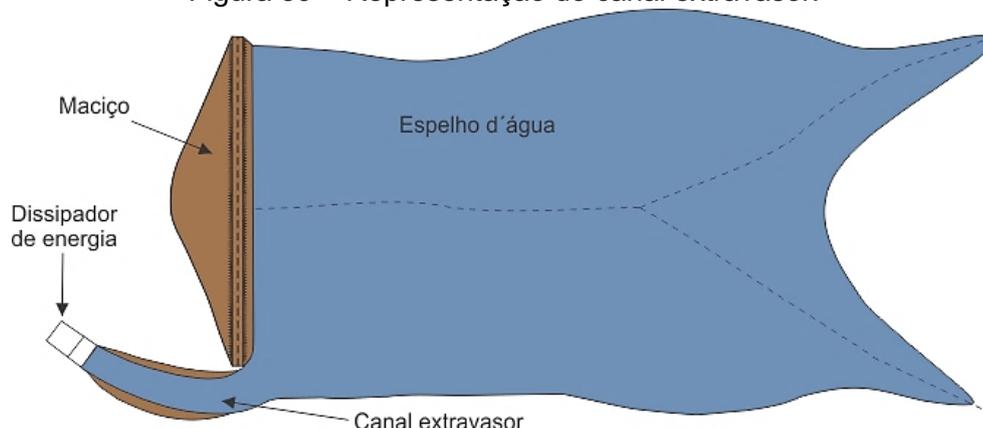
Figura 38 – Formas de cristas de vertedouros: a) retangular; b) tulipa; c) e d) labirinto;



Fonte: (ANA, DAEE, 2016).

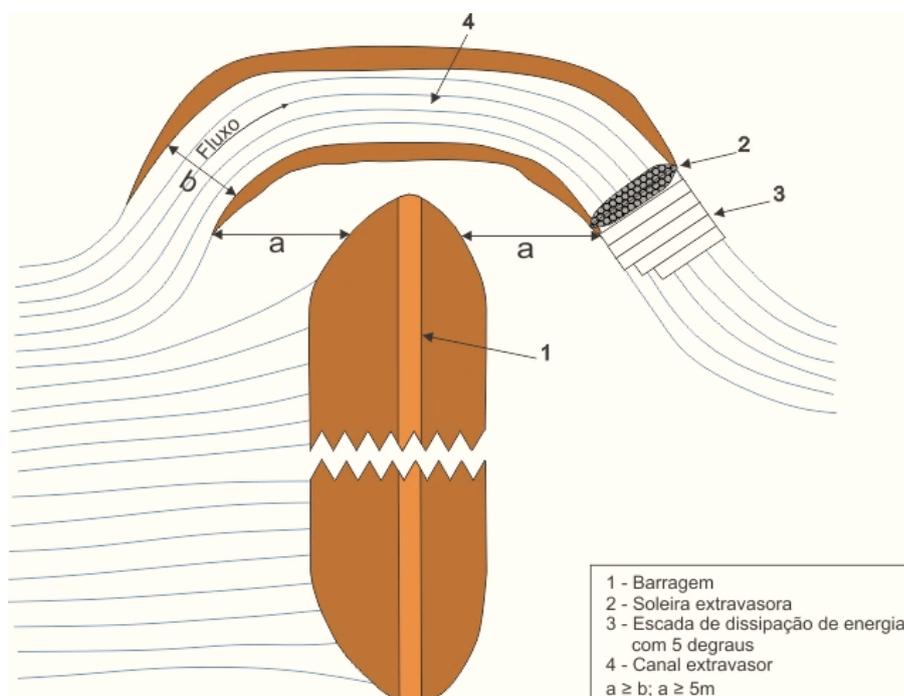
Além desta classificação de vertedouros apresentados até aqui, ferramentas estas que auxiliam na restrição do nível do reservatório, existe outro tipo de vertedor, que pode compreender as características citadas anteriormente, porém localiza-se, não no corpo da barragem, mas na lateral do reservatório e, é comumente chamado de Canal extravasor, como apresentado nas Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Representação do canal extravasor.



Fonte: (UFV, 2009).

Figura 40 – Canal extravasor lateral com declividade moderada construído fora do aterro.



Fonte: (UFV, 2009).

UFV (2009), recomenda a utilização desse canal extravasor principalmente quando há barragens de terra, para o controle natural do nível d'água, mesmo em períodos de cheias dos rios. Esses canais possuem soleiras extravasoras e escadas de dissipação de energia para minimizar os riscos com erosões na saída dessas estruturas e restringir o nível do lago, como mostrado na Figura 41.

Figura 41 - Canal extravasor na lateral da barragem de terra e enrocamento.



Fonte: (COSTA W. D., 2012).

### 2.3. VISÃO GERAL DO MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO

O termo monitoramento é muito utilizado na atualidade em virtude do desenvolvimento da área da tecnologia da informação, porém não é algo simplório, envolvendo diversas tecnologias e várias etapas de processo, dependendo de suas aplicação, com vários níveis de abstração. Boyes (2002), é uma referência na área de sistemas de monitoramento e aquisição de dados, com amplo e exaustivo trabalho para compilar conhecimento de diversos autores e dados de fabricantes, onde recomenda que para monitorar é necessário saber qual o problema associado e sua grandeza e, quais os parâmetros de referências vinculados a elas. Machado (2007) confirma essas premissas assegurando que os dados de instrumentação devam ser inseridos, para garantir a segurança, sendo alimentados com parâmetros e critérios limites, que indiquem as fronteiras ou condições de contorno de cada situação envolvida.

Serão apresentados a seguir os conceitos e partes componentes de um sistema de monitoramento.

### 2.3.1. TRANSDUTORES, TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES

A primeira parte componente de um Sistema de Monitoramento é a parte sensorial, ou seja, os transdutores. São eles os responsáveis em fazer a interação entre o mundo físico e os sistemas de aquisição de dados, denominados “*data loggers*”. Os sensores são uma especificidade dos transdutores que, de acordo com Dias (2012), transdutor é um instrumento que recebe informações na forma de uma variável física e a modifica, fornecendo um sinal de saída resultante em outra forma física, como por exemplo os manômetros, que convertem a grandeza física pressão em movimento mecânico de um ponteiro, graduado para representar a grandeza primária. Já os sensores são transdutores que têm como variável física específica de saída os sinais elétricos. E estes, por sua vez, são amplamente utilizados na indústria por terem grande precisão e exatidão. Como reforça Aguirre (2007), os sensores têm a finalidade de medição e, devem prover informações com o máximo de qualidade possível, gerando em suas saídas sinais úteis para determinar quantitativamente ou qualitativamente uma grandeza de interesse, de acordo com os requisitos de aplicação.

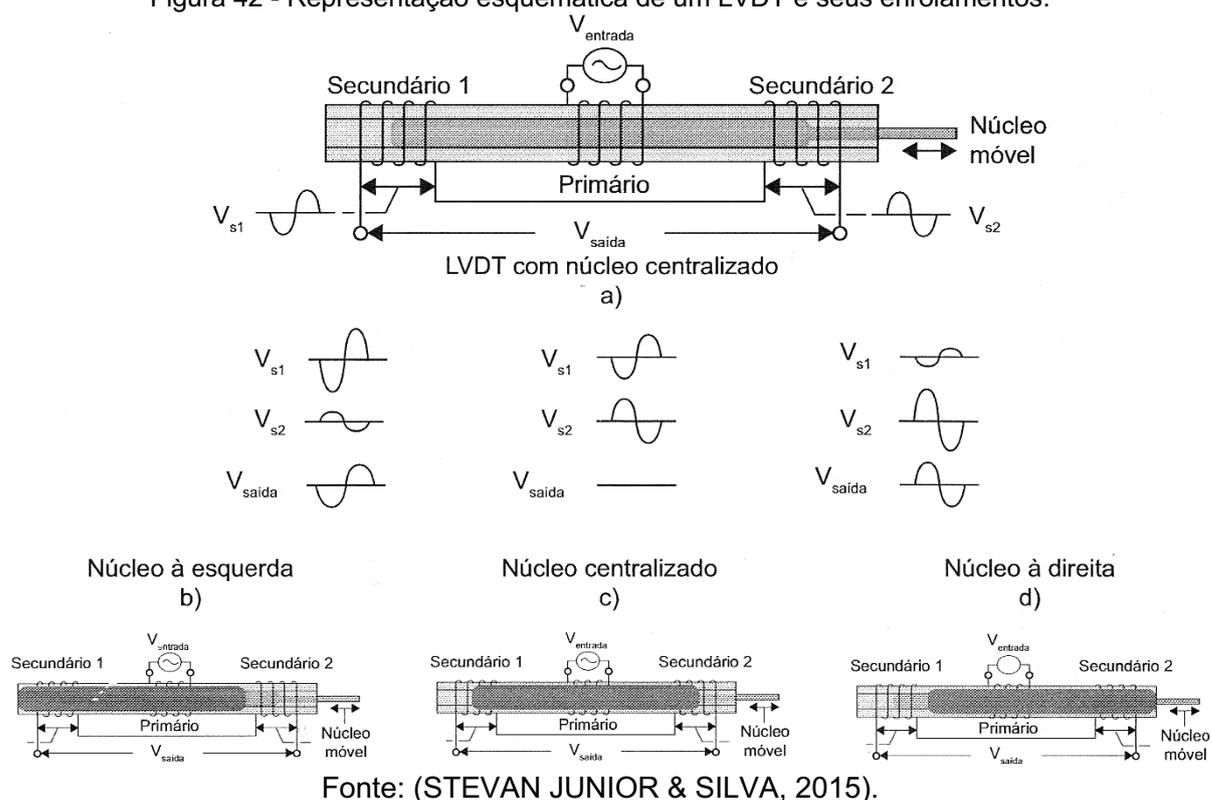
Stevan Junior & Silva (2015) classificam os sensores quanto as tecnologias e quanto as aplicações. Sabe-se, porém, que, há uma infinidade de transdutores, diversas tecnologias e aplicações, no entanto, como este trabalho não tem o objetivo de esgotar o assunto, serão apresentados alguns destes, direcionados à utilização em barragens.

As tecnologias empregadas nos transdutores têm relação com a forma de transformação de energia com a qual estes se propõem a converter e os componentes construtivos com os quais eles se utilizam para realizar esta transformação.

#### 2.3.1.1. INDUTIVOS:

Os transdutores indutivos, se utilizam da variação do campo magnético gerado pelo deslocamento de um êmbolo, que no caso é um núcleo móvel que, através da concentração do campo magnético, varia a tensão de saída nos terminais de leitura, de acordo com sua posição, como mostra a Figura 47. Esses dispositivos são muito conhecidos como LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) e podem trabalhar em ambientes severos e situações corrosivas em virtude de suas partes componentes poderem ser revestidas com materiais inertes que não afetarão os campos magnéticos. Um esquemático do transdutor é apresentado abaixo.

Figura 42 - Representação esquemática de um LVDT e seus enrolamentos.

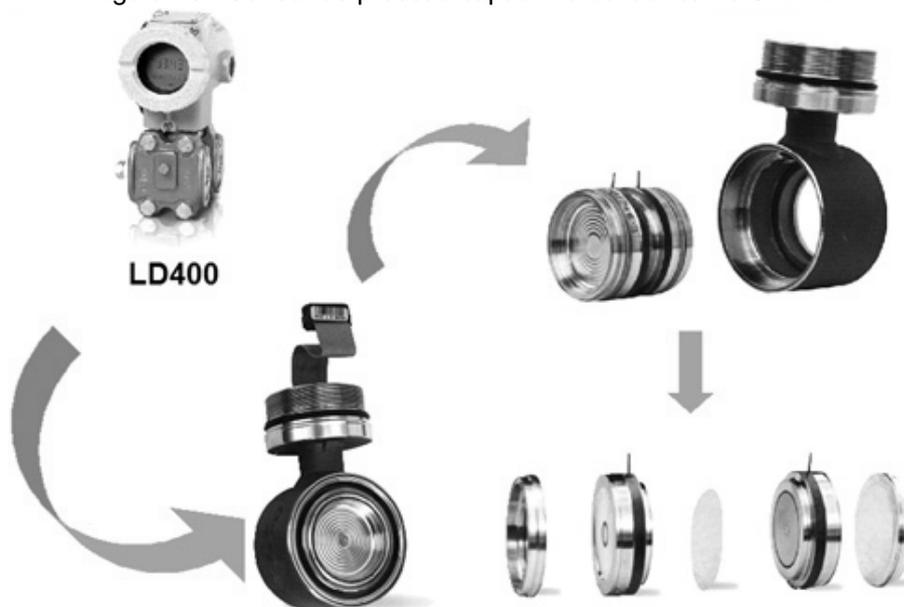


De acordo com Fraden (2010), existem inúmeras vantagens na utilização do LVDT, por ser um dispositivo sem contato, com pouca ou nenhuma resistência à fricção, com pequenas forças resistivas; com histereses (magnéticas e mecânicas) insignificantes; com impedância de saída muito baixa; tem baixa suscetibilidade a ruídos e interferências; tem construção sólida e robusta, além de ser possível obter uma resolução infinitesimal.

### 2.3.1.2. CAPACITIVOS:

De acordo com Cassiolato (2018), os sensores capacitivos são um dos sensores mais confiáveis utilizados em milhões de aplicações na indústria. São sensores elétricos baseados no princípio dos diafragmas capacitivos. Os circuitos elétricos compostos por capacitores que podem variar alguma grandeza estão relacionados aos filtros de frequência ou geradores de frequências, este último é denominado oscilador. Este oscilador é utilizado na medição em virtude de relacionar a frequência de oscilação com a força impressa no diafragma. Logo, a variação de frequência pode ser medida por um controlador ou computador e convertida em pressão. A Figura 48 apresenta um instrumento de medição de pressão capacitivo do fabricante SMAR.

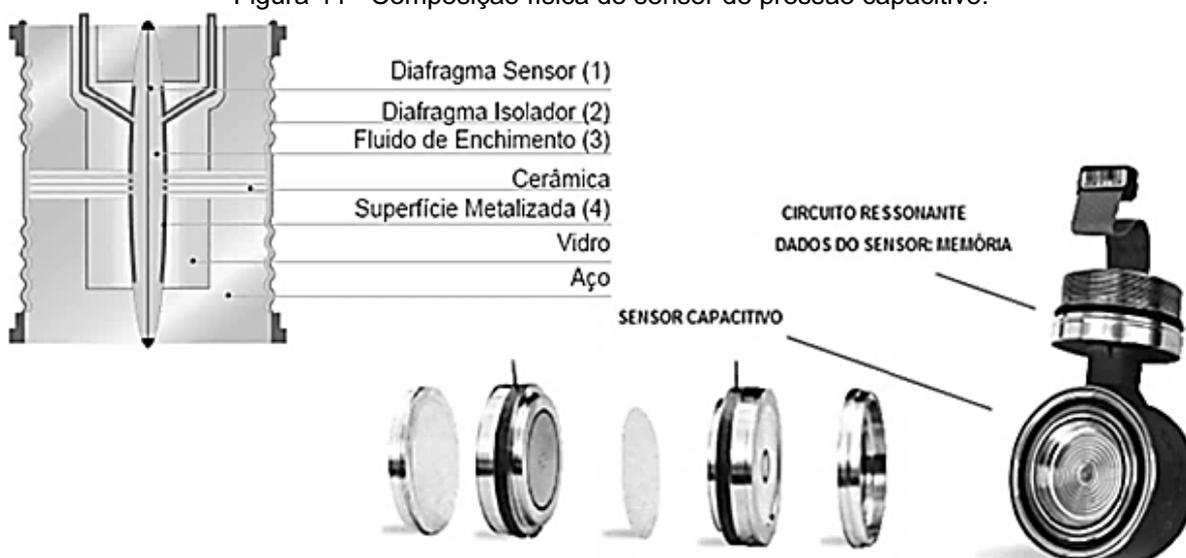
Figura 43 - Sensor de pressão capacitivo do fabricante SMAR.



Fonte: (CASSIOLATO, 2012).

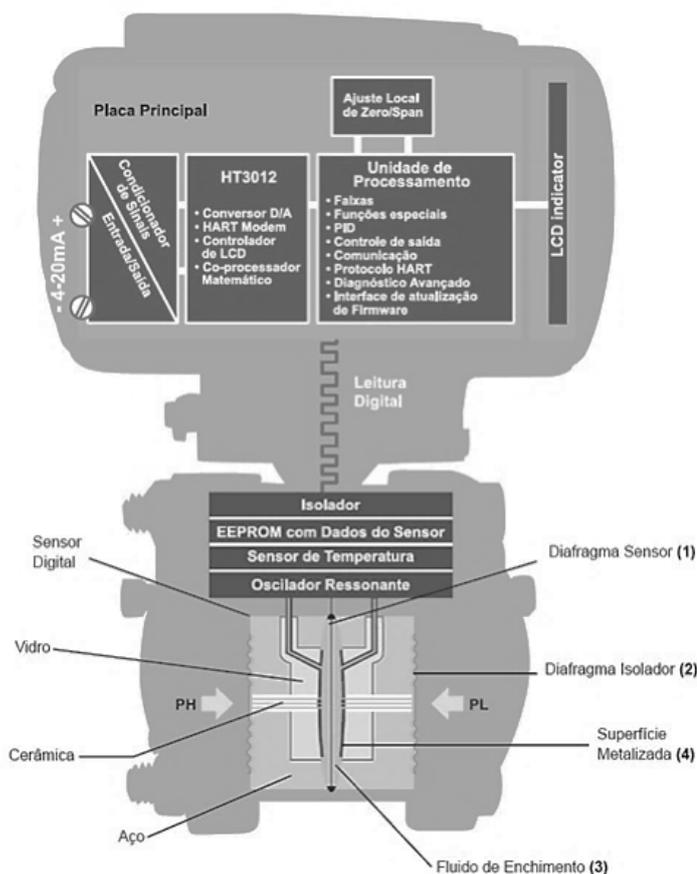
A resposta linear dos sensores capacitivos, insensíveis às variações de temperatura trazem uma excelente performance, estabilidade e robustez à aplicação dos mesmos em quaisquer processos, podendo garantir boas condições de trabalho e monitoramento desde baixas até as altas pressões, com faixas de erros extremamente baixas obtém uma precisão admirável. Ele é composto por uma parte mecânica que é a chamada célula capacitiva e uma parte eletrônica que é basicamente um circuito ressonante, como apresentado na Figura 44. A Figura 45 mostra o diagrama de blocos de leitura física e digital.

Figura 44 - Composição física do sensor de pressão capacitivo.



Fonte: (CASSIOLATO, 2012).

Figura 45 - Representação de aquisição de dados em um sensor capacitivo.

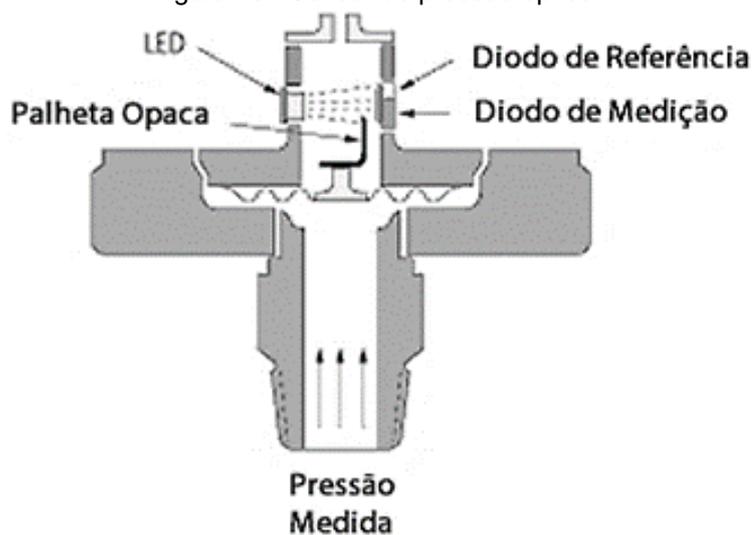


Fonte: (CASSIOLATO, 2012).

### 2.3.1.3. FOTOELÉTRICO:

De acordo com Stevan Junior & Silva (2015), os sensores fotoelétricos são utilizados para identificar presença, proximidade ou deslocamento, baseado em um conjunto emissor-receptor, podendo identificar sinal emissor ou a ausência dele. Uma representação deste sistema é apresentada por Silveira (2017), através dos sensores de pressão ópticos. Estes podem detectar a variação da pressão de uma forma indireta devido o movimento de uma palheta opaca que muda a quantidade de pacote de luz, de acordo com as mudanças na pressão do processo gerada por uma membrana. Assim a recepção da quantidade de luz gera um sinal correspondente de saída elétrica, como apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Sensor de pressão óptico.

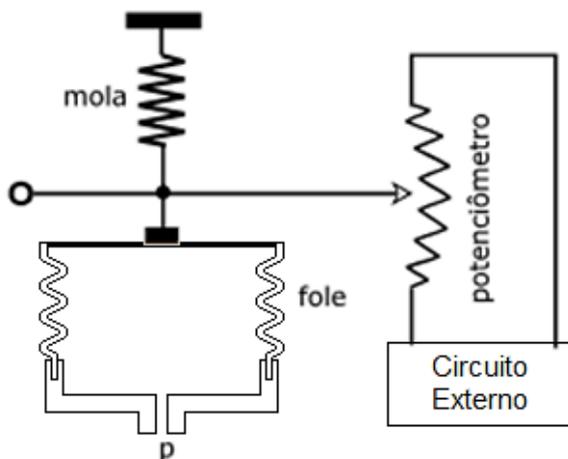


Fonte: (SILVEIRA C. , 2017).

#### 2.3.1.4. POTENCIOMÉTRICO:

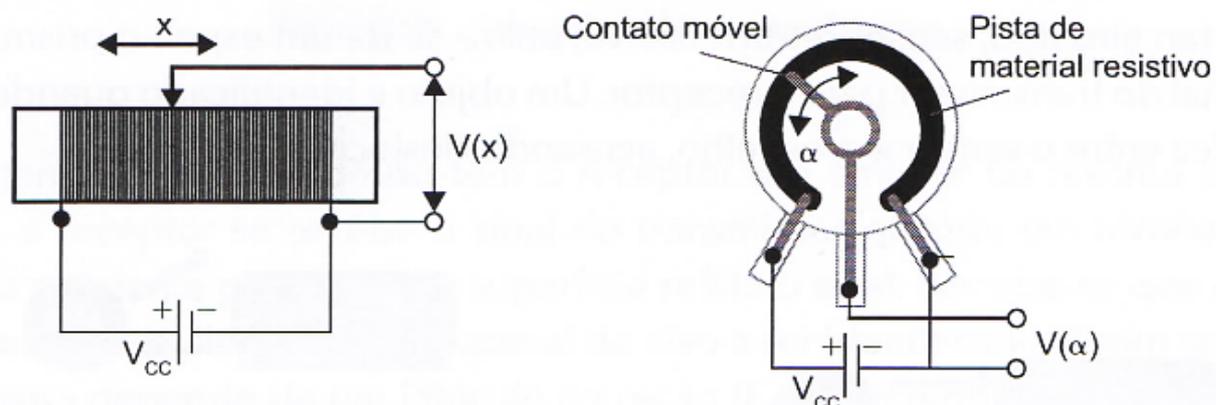
De acordo com Araújo (2012), os sensores potenciométricos são de baixo custo e trabalham com intensidade de sinais boas, dispensando assim amplificação, porém podem variar de resistência de acordo com a umidade e temperatura ambiente, fato este que lhe impute uma precisão de aproximadamente 1%, e dependendo da característica do sistema, esses valores de erros não são tolerados. As Figuras 47 a 50 representam o esquemático e dois modelos do que seria esse tipo de sensor.

Figura 47 - Representação de sensor potenciométrico de pressão.



Fonte: (ARAUJO, 2012).

Figura 48 - Representação de sensores potenciométricos de posição.



Fonte: (STEVAN JUNIOR & SILVA, 2015).

Figura 49 – modelo de sensor potenciométrico de rotação limitada.



Fonte: (MRA - GRUPO ÁLAVA, 2019).

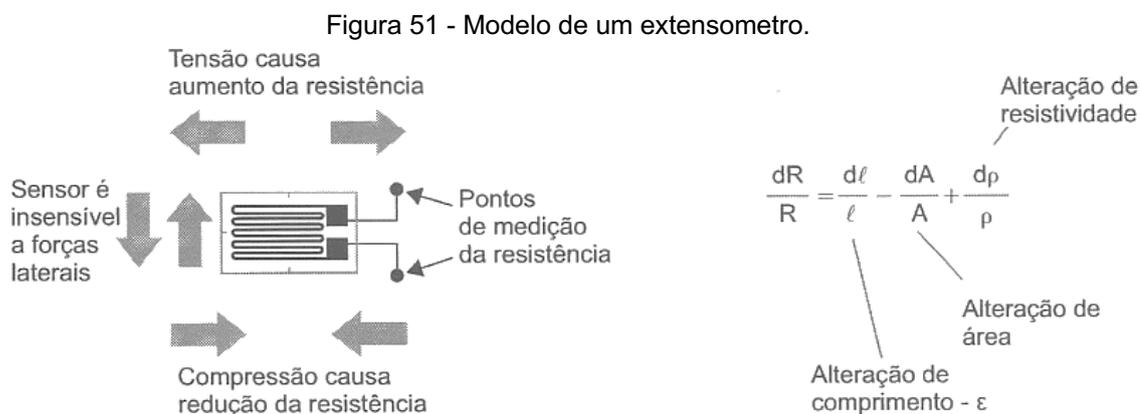
Figura 50 – modelos de sensores potenciométricos de posição linear.



Fonte: (MRA - GRUPO ÁLAVA, 2019).

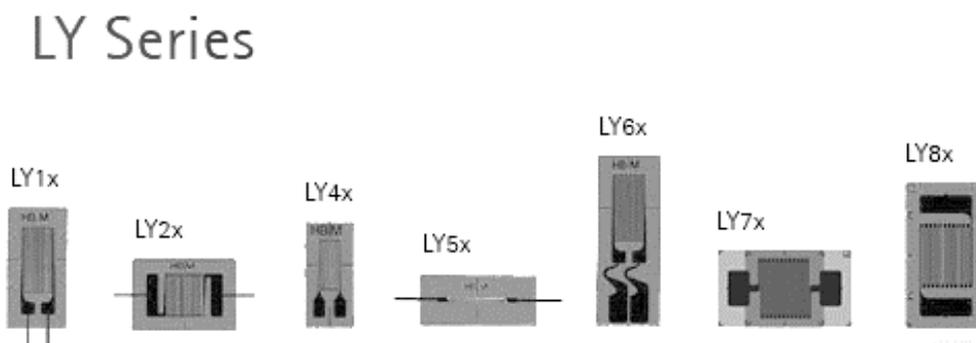
### 2.3.1.5. EXTENSOMETRIA:

Stevan Junior & Silva (2015) afirmam que os extensômetros são dispositivos capazes de medir deformações mecânicas aplicadas, tais como trações e compressões, sob a forma de variação de resistência. Strain gauges são extensômetros muito utilizados para monitoramentos destas grandezas mecânicas, como apresentado na Figura 51. São fabricados comumente de materiais metálicos, podendo ser analisadas quatro variáveis físicas, sendo que a última, dependendo do meio em que está submetido tal sensor, tem pouca ou baixa relevância. As variáveis são: comprimento, área, resistividade e temperatura. Existem inúmeros tipos de extensômetros, construídos de acordo com a direção de leitura e especificações de cada fabricante, como mostra as Figuras 51 a 55.



Fonte: (STEVAN JUNIOR & SILVA, 2015).

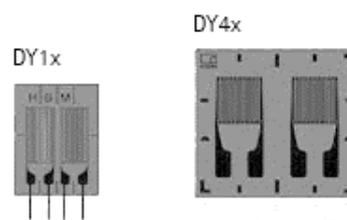
Figura 52 - Modelos de extensômetros Série LY-HBM.



Fonte: ( HBM Test and Measurement, 2019).

Figura 53 - Modelos de extensômetros.

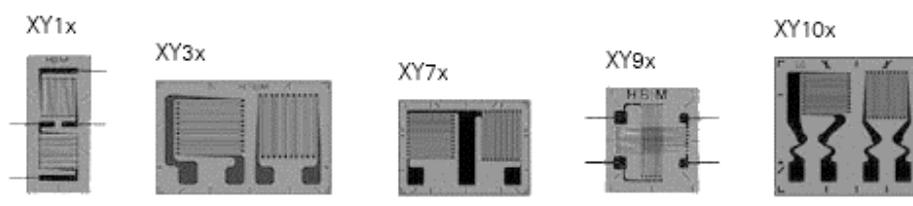
## DY Series



Fonte: ( HBM Test and Measurement, 2019).

Figura 54 - Modelos de extensômetros

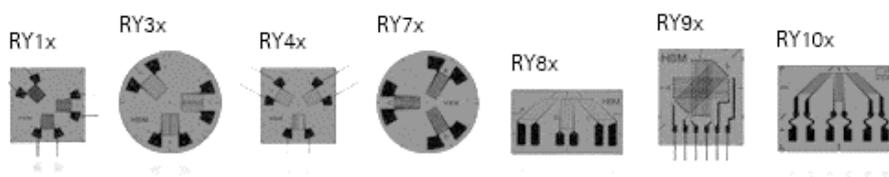
## XY Series



Fonte: ( HBM Test and Measurement, 2019).

Figura 55 - Modelos de extensômetros.

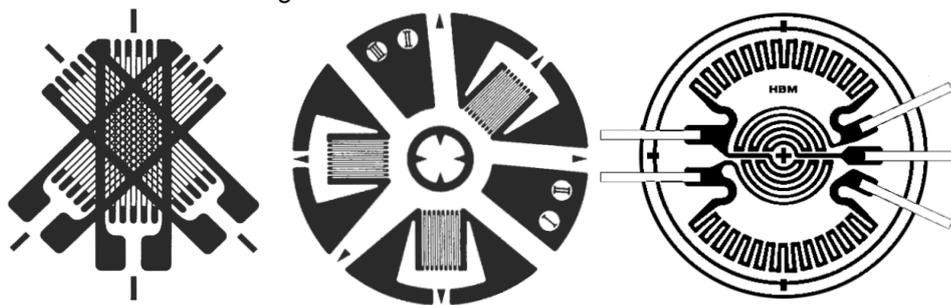
## Ry Series



Fonte: ( HBM Test and Measurement, 2019).

Esses tipos de sensores são muito utilizados para a fabricação de inúmeros dispositivos transdutores disponíveis no mercado por sua simplicidade, podendo ser disposto através da composição de formato padrão ou diferenciado, como mostra a Figura 56.

Figura 56 – Formas de extensômetros.

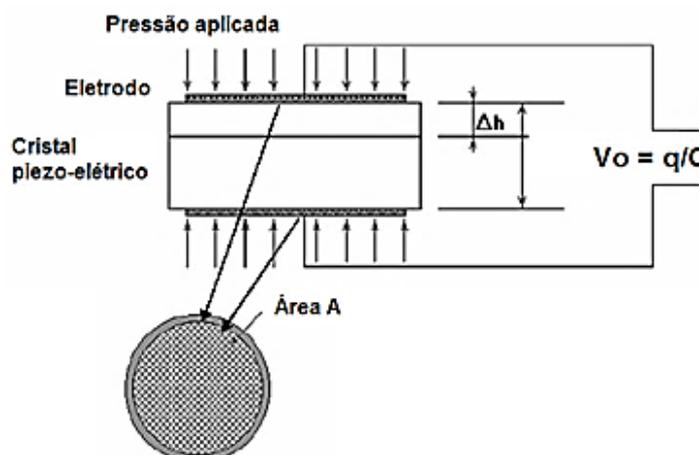


Fonte: ( HBM Test and Measurement, 2019).

### 2.3.1.6. PIEZOELETRICIDADE:

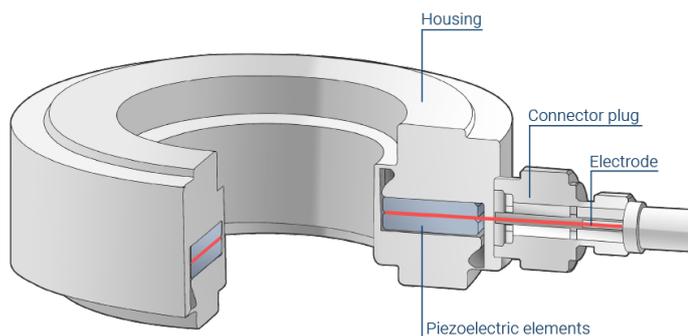
De acordo com Boyes (2002), uma força aplicada em certas substâncias cristalinas, como o quartzo, produz entre duas superfícies de um cristal uma carga elétrica proporcional à força. Esta carga está intrinsecamente ligada à capacitância elétrica interna formada por um material altamente dielétrico e duas superfícies condutoras depositadas, como mostram as Figuras 57 e 58.

Figura 57 - Representação de sensor piezoelétrico;



Fonte: (CASSIOLATO, 2010).

Figura 58 - Transdutores de força piezoelétrico.



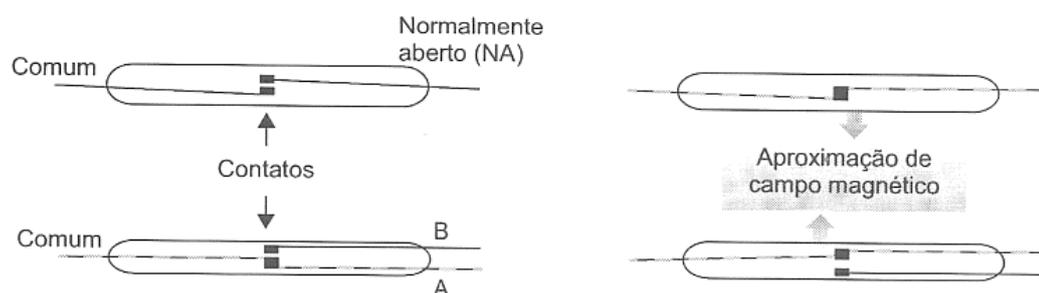
Fonte: ( HBM Test and Measurement, 2019).

### 2.3.1.7. MAGNÉTICO:

Os transdutores magnéticos se diferenciam dos indutivos em virtude de não utilizarem a indução para gerarem leituras e sim detectarem a presença de campo magnético, podendo ser classificados, segundo Stevan Junior & Silva (2015), como chaves magnéticas (switch) ou sensores de efeito hall.

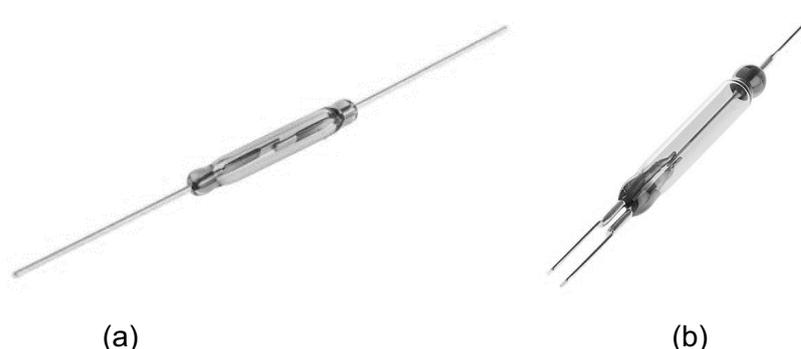
Os sensores switch são normalmente constituídos por um invólucro de vidro contendo um ou mais contatos que, na presença de campo magnético podem fechar, caso sejam normalmente abertos (NO – normal open) ou abrir, caso sejam normalmente fechados (NC – normal closed). Leva-se em consideração também a intensidade do campo ao qual são configurados pelo fabricante, para atuarem, como apresentados nas Figuras 59 e 60.

Figura 59 – Esquemático de Sensor magnético do tipo Reed Switch de uma e duas saídas



Fonte: (STEVAN JUNIOR & SILVA, 2015).

Figura 60 - Sensor magnético do tipo Reed Switch: (a) um contato NO; (b) dois contatos – NO e NC.



Fonte: (RS Solutions for Stores, 2019).

Segundo Stevan Junior & Silva (2015), transdutores de efeito hall são dispositivos sensores magnéticos de estado sólido usados tanto para verificar a presença de campos magnéticos como para medir intensidade de tais campos. Atualmente, os sensores Hall são usados para detectar campos magnéticos, posição e deslocamento de objetos (FRADEN, 2010). Na Figura 61 é apresentado um esquemático do funcionamento de um sensor de efeito

hall. Já na Figura 62 é apresentada a utilização do sensor de efeito hall em um posicionador de válvulas e na Figura 63 um sensor de corrente por efeito hall.

Figura 61 – Esquemático de funcionamento do Sensor de efeito hall.

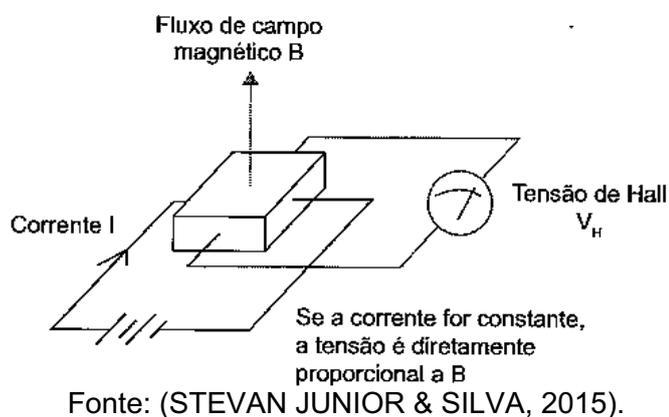
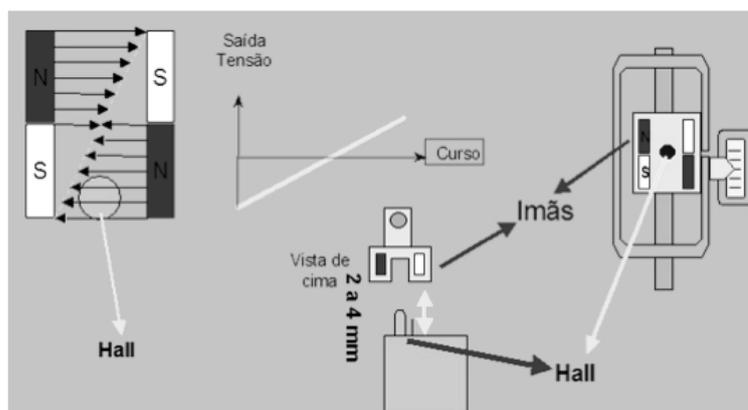
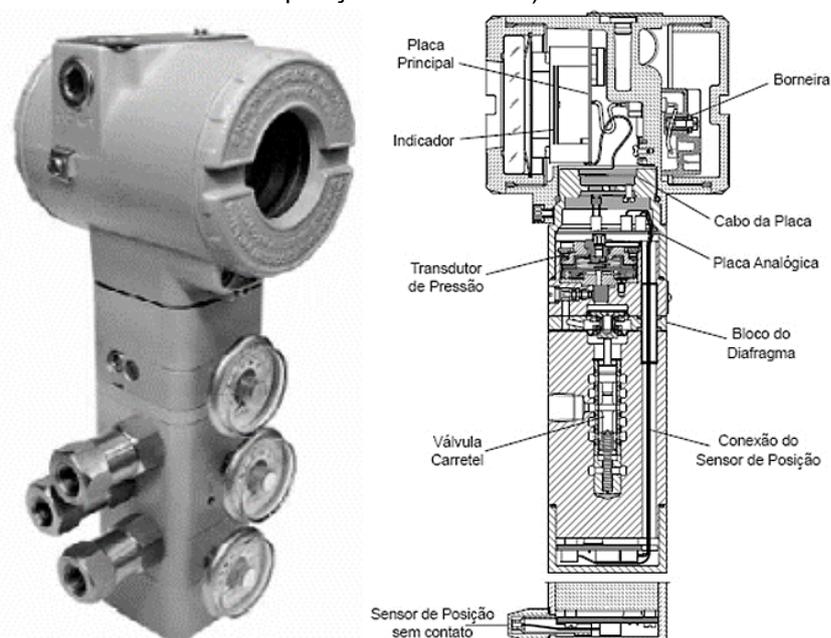


Figura 62 - Esquema de funcionamento do Sensor Hall em um posicionador de válvulas (sensor de posição sem contato).



Fonte: (SMAR, 2019).

Figura 63 – Sensor de corrente por efeito hall.

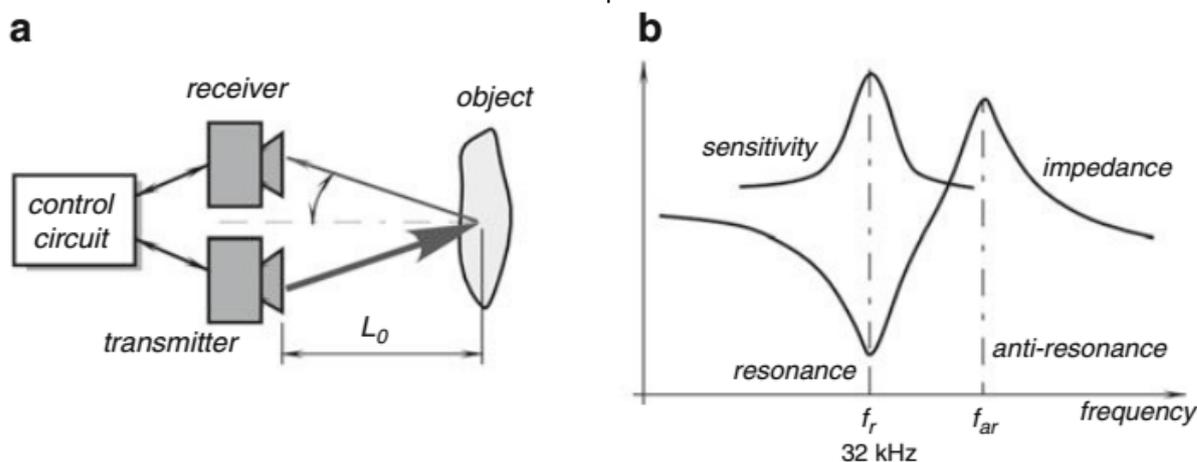


Fonte: (Direct Industry, 2019).

#### 2.3.1.8. ULTRASSON:

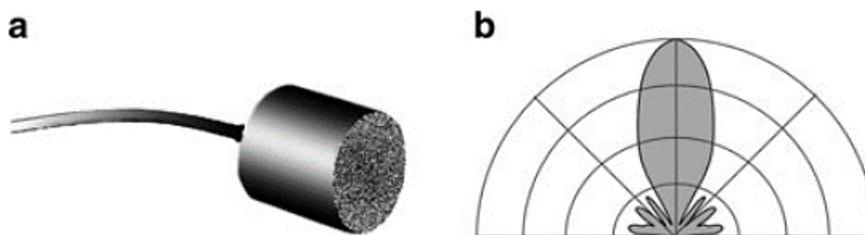
De acordo com Fraden (2010), a tecnologia com o uso de ultrassom emite ondas ultrassônicas, que são ondas mecânicas acústicas, cobrindo a faixa de frequência acima de 20 kHz. Quando as ondas são incidentes em um objeto, parte de sua energia é refletida. Em muitos casos práticos, a energia ultrassônica é refletida de maneira difusa, isto é, independentemente da direção, ela se reflete quase uniformemente dentro de um amplo ângulo sólido, que pode se aproximar de 180°. Se um objeto se move, a frequência do comprimento de onda refletido será diferente das ondas transmitidas, isto é chamado de efeito Doppler. As Figuras 64 a 66 apresentam esquemáticos, representações de sinais e equipamentos ultrassônicos.

Figura 64 - Medição de distância ultrassônica: (a) arranjo básico; (b) característica de impedância de um transdutor piezoelétrico.



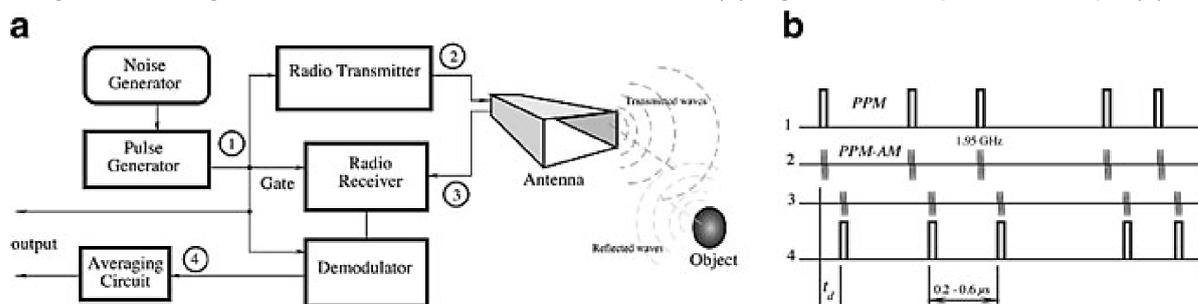
Fonte: (FRADEN, 2010).

Figura 65 - Transdutor ultrassônico para ar (a); diagrama direcional (b).



Fonte: (FRADEN, 2010).

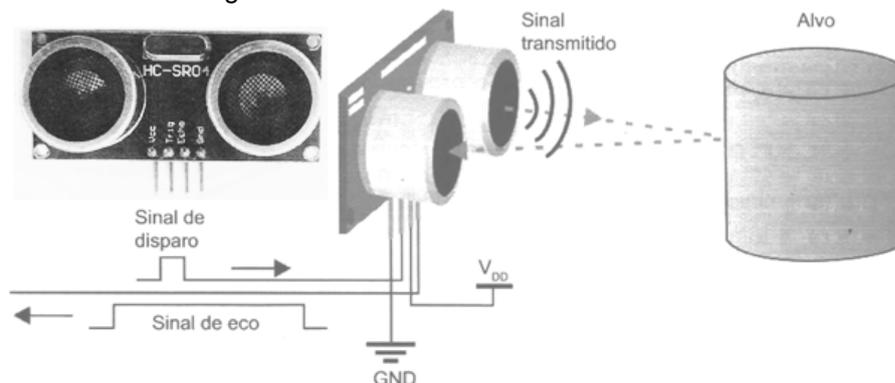
Figura 66 - Diagrama de blocos de um radar ultrassônico (a) e gráfico de resposta no tempo (b).



Fonte: (FRADEN, 2010).

A Figura 66 apresenta, em seu gráfico de resposta no tempo, pulsos com uma duração fixa curta, enquanto a repetição desses pulsos é aleatória, de acordo com o acionamento pelo gerador de ruído. Neste gráfico, os pulsos de onda quadrada (1) causam a modulação de amplitude, ou seja, ondas AM (2) de um transmissor de rádio, enquanto recebe onda refletida do sinal AM (3) e transforma em pulso digital, onde se pode calcular o tempo de resposta para identificar a distância do objeto em que a onda foi refletida. Na Figura 67 é apresentado um modelo de sensor ultrassônico muito comum no mercado de eletrônica.

Figura 67 – Sensor ultrassônico HC-SR04.

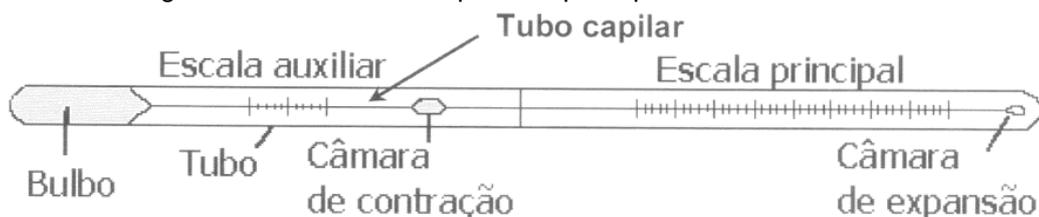


Fonte: (STEVAN JUNIOR & SILVA, 2015).

### 2.3.1.9. TERMOMEDIDAÇÃO:

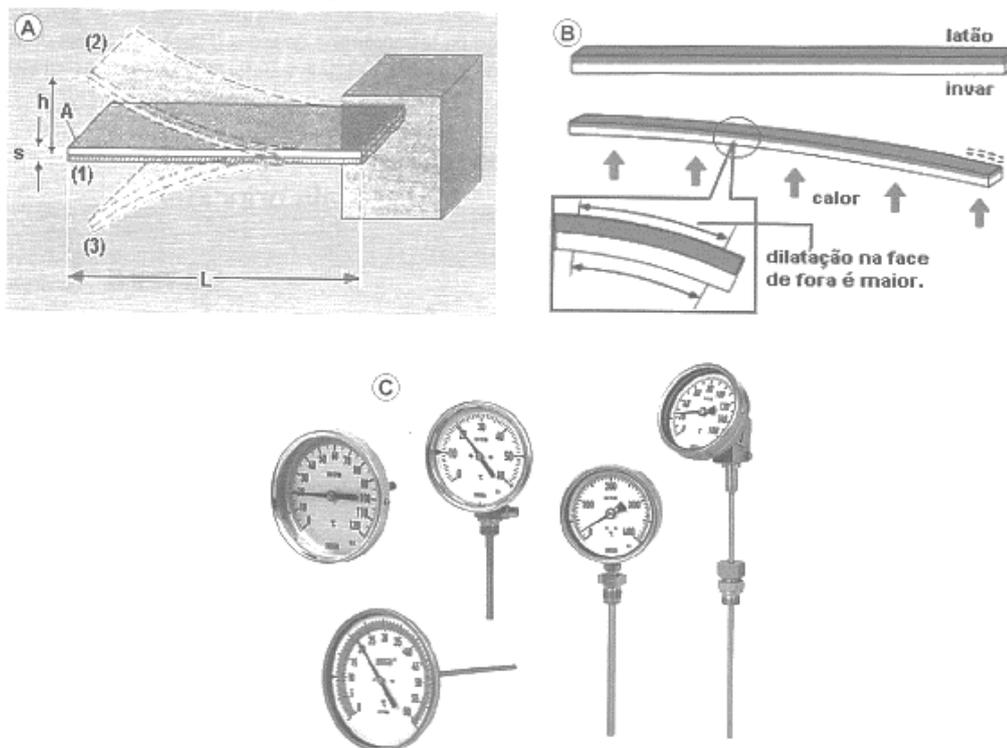
As tecnologias de sensoriamento de temperatura são diversas, dentre elas estão os termômetros líquidos, (Figura 68), os termômetros bimetálicos (Figura 69), os termoresistivos (Figura 70), os termopares (Figura 71). Todos estes ligados a alguma variação do material em função da variação da temperatura, ocasionando em um sinal de saída, onde alguns necessitam de uma amplificação, outros são apenas através de leituras visuais e outros por medição direta.

Figura 68 – Termômetro líquido simples tipo clínico com mercúrio.



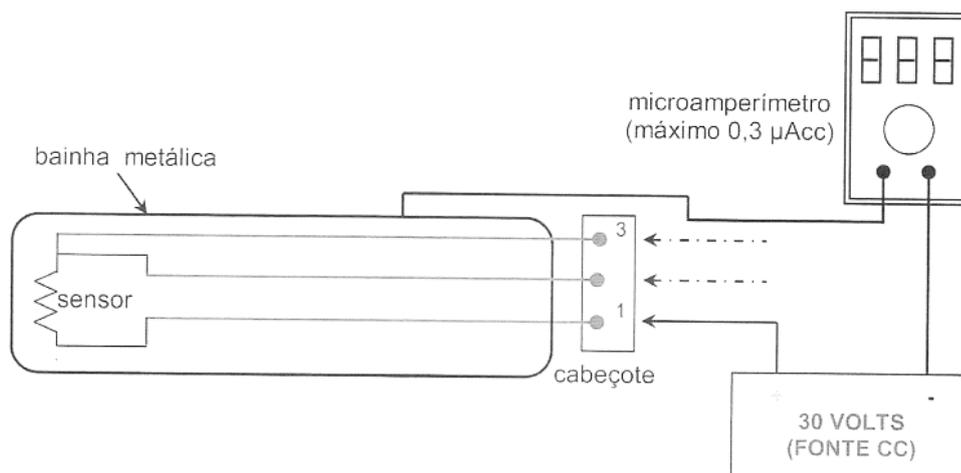
Fonte: (DIAS C. , 2012).

Figura 69 – Termômetro bimetálico.



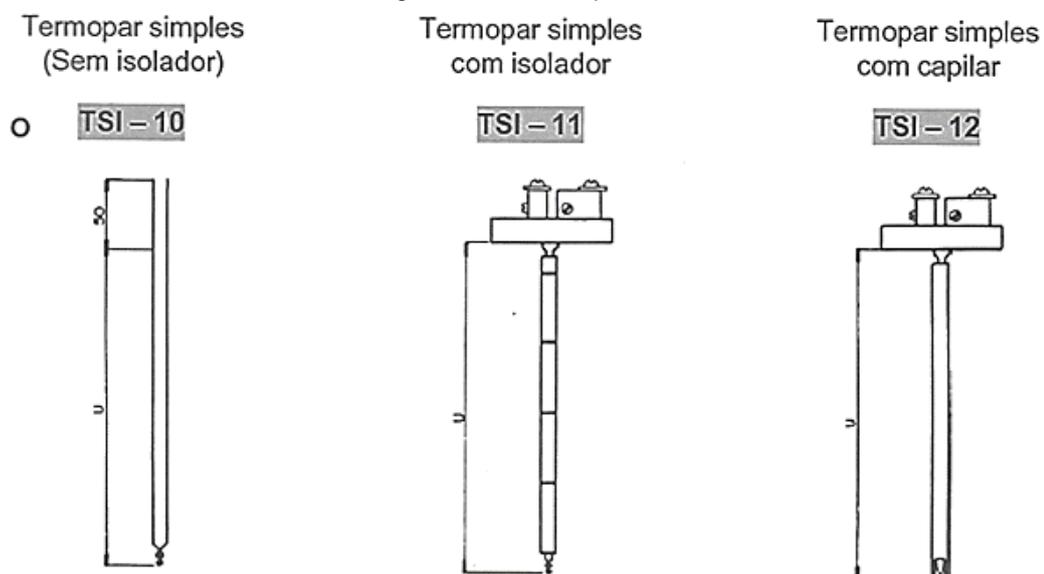
Fonte: (DIAS C. , 2012).

Figura 70 – Sensor termoresistivo.



Fonte: (DIAS C. , 2012).

Figura 71 – Termopares.



Fonte: (DIAS C. , 2012).

### 2.3.1.10. LEITURAS DE NÍVEL

As leituras de nível também são diversas e podem estar associadas à algumas tecnologias citadas anteriormente, porém é importante apresentar algumas não citadas, como por exemplo a utilização de sensores de nível do tipo para leituras em piezômetros stand pipe (Figura 72).

Figura 72 - Aparelho de leitura de nível d'água em piezômetros stand pipe.

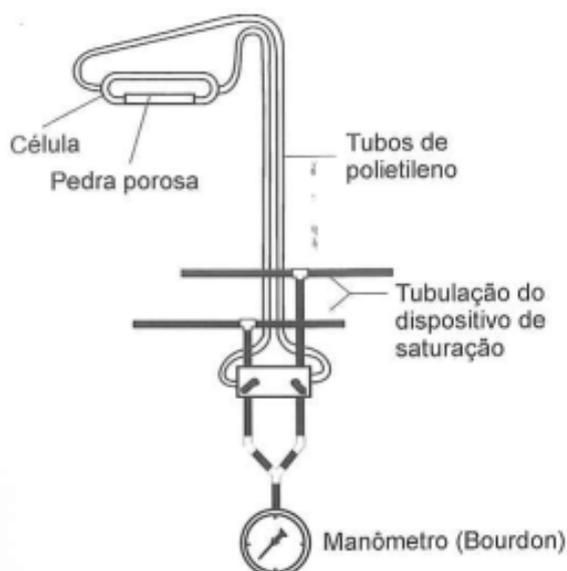


Fonte: (SILVEIRA J. F., 2006).

### 2.3.1.11. LEITURA DE PRESSÃO

Como mencionado anteriormente, muitas das tecnologias citadas acima são base para a constituição de sensores e transdutores de pressão, porém é importante ressaltar a utilização de alguns transdutores para esta finalidade, como os transdutores do tipo piezômetros hidráulicos (Figura 73) e os piezômetros pneumáticos.

Figura 73 - Esquema de funcionamento de piezômetro hidráulico do tipo inglês.



Fonte: (SILVEIRA J. F., 2006).

Segundo Instruments (2019), o piezômetro pneumático é mecanicamente simples, de baixo custo, confiável e robusto. Evita muitos dos problemas associados à instrumentação elétrica. O piezômetro pneumático, mostrado na Figura 74, é projetado para medir com precisão as pressões de água porosa em solos e rochas totalmente ou parcialmente saturados. A ponta do piezômetro pneumático compreende um elemento poroso integral com um transdutor de diafragma de alta qualidade, instalado em um furo, enterrando-se em aterro ou empurrando em profundidades rasas em solos moles. Ele evita muitos dos problemas

associados à instrumentação elétrica. Diferenças de elevação entre a ponta instalada e a o ponto de leitura não tem significado direto.

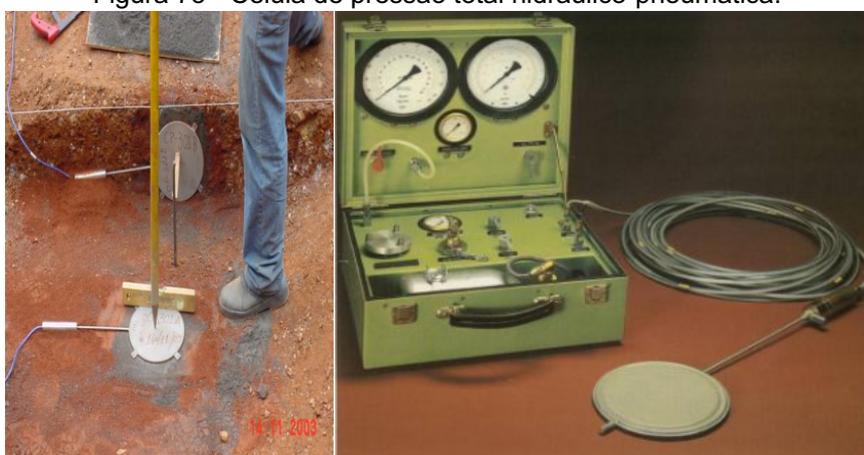
Figura 74 - Piezômetro pneumático.



Fonte: (INSTRUMENTS, 2019).

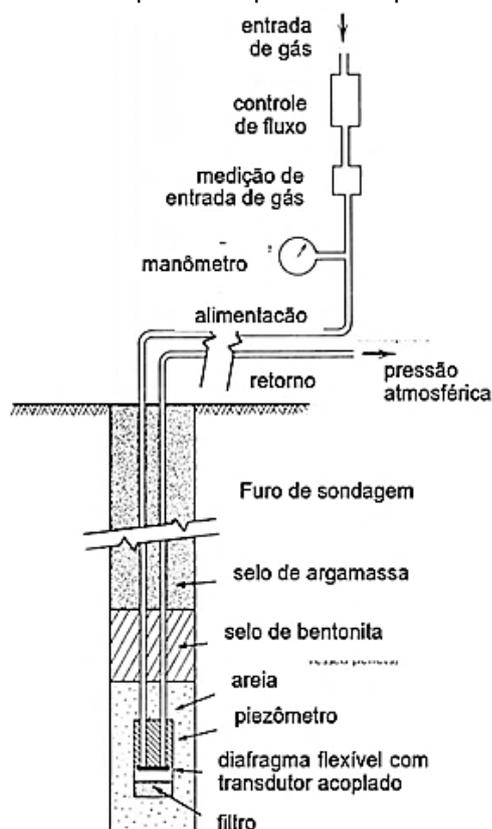
O transdutor consiste essencialmente em dois compartimentos independentes dentro de uma carcaça separada por uma válvula de diafragma flexível. No compartimento do “sensor”, a poropressão é transmitida através dos poros do filtro e atua no diafragma divisor, que é suportado no lado de “leitura” por um anteparo plano que faz parte da seção pneumática do instrumento, (Figuras 75 e 76). Dois pequenos tubos estendem-se da face posterior do diafragma para os acoplamentos associados e daí através do plástico tubulação para o ponto de leitura. (INSTRUMENTS, 2019).

Figura 75 - Célula de pressão total hidráulico-pneumática.



Fonte: (ROMANINI, 2016).

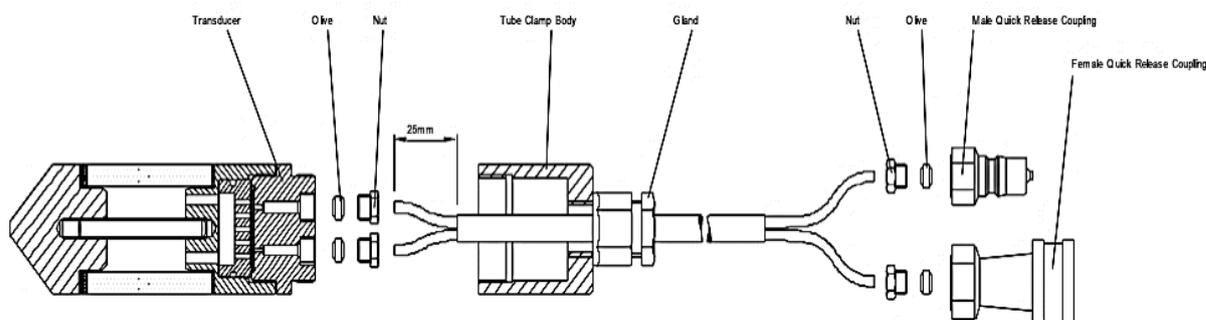
Figura 76 - Esquema de piezômetro pneumático.



Fonte: (SARÉ, 2003).

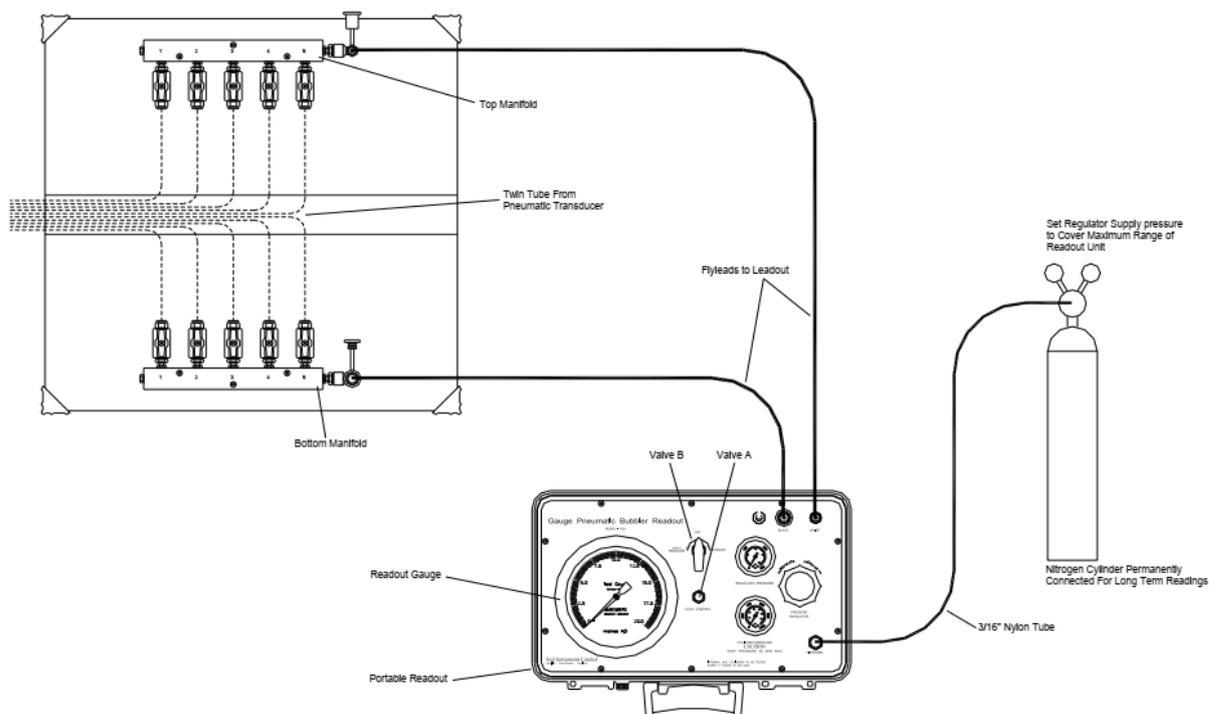
As leituras são feitas usando uma unidade de leitura pneumática. O gás de alta pressão é fornecido pela unidade através da tubulação plástica para a válvula de diafragma dentro do transdutor de célula. Quando a pressão de alimentação é suficiente para equilibrar a pressão do líquido no lado reverso do diafragma, o diafragma desvia e abre para permitir o fluxo através do tubo de retorno para um detector dentro da unidade de leitura, onde o diferencial de pressão é lido diretamente (Bourdon Gauge ou transdutor elétrico digital). A ponta do piezômetro pode ser equipada com dois tipos de filtro porosos: de baixa resistência a entrada de ar ou de alta resistência a entrada de ar, como mostra as Figuras 77 a 78.

Figura 77 - Conexão de Tubos duplos ao Transdutor Pneumático



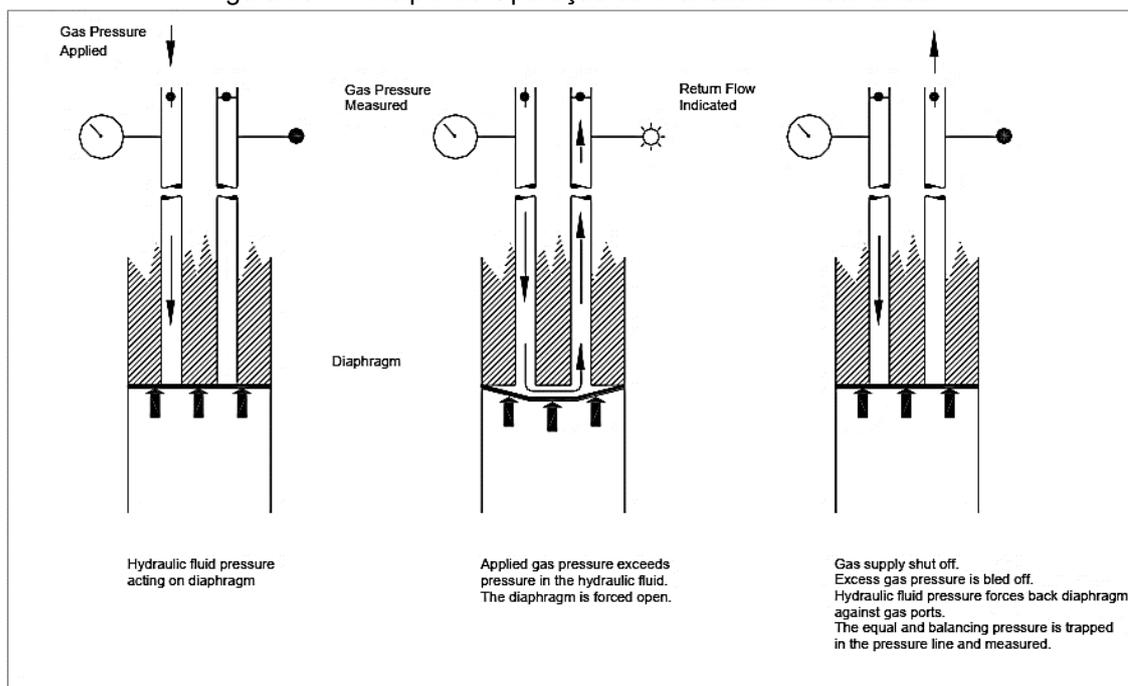
Fonte: (INSTRUMENTS, 2019)

Figura 78 - Placa terminal do piezômetro pneumático.



Fonte: (INSTRUMENTS, 2019).

Figura 79 - Princípio de Operação do Transdutor Pneumático.

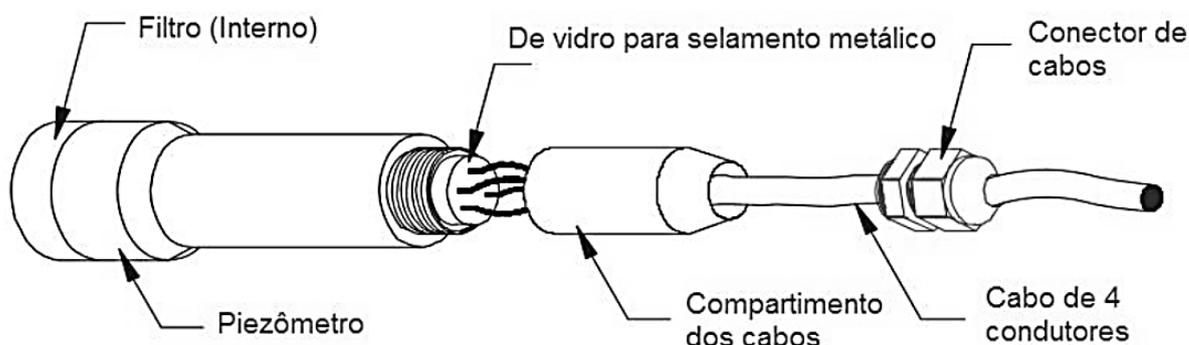


Fonte: (INSTRUMENTS, 2019).

Também, relacionado à leitura de pressão, temos os sensores piezômetros de corda vibrante, que segundo Silveira (2006), este tipo de equipamento é constituído por uma célula

de diafragma impermeável que é protegida do contato com o solo por meio de uma pedra porosa que permite o acesso da água e/ou ar ao diafragma, podendo ser do tipo pneumáticos ou elétricos, dependendo do meio para determinar a pressão no diafragma. O detalhamento de suas conexões é apresentado na Figuras 80 e 81.

Figura 80 - Detalhamento das conexões de um piezômetro de corda vibrante.



Fonte: (RITE, 2019).

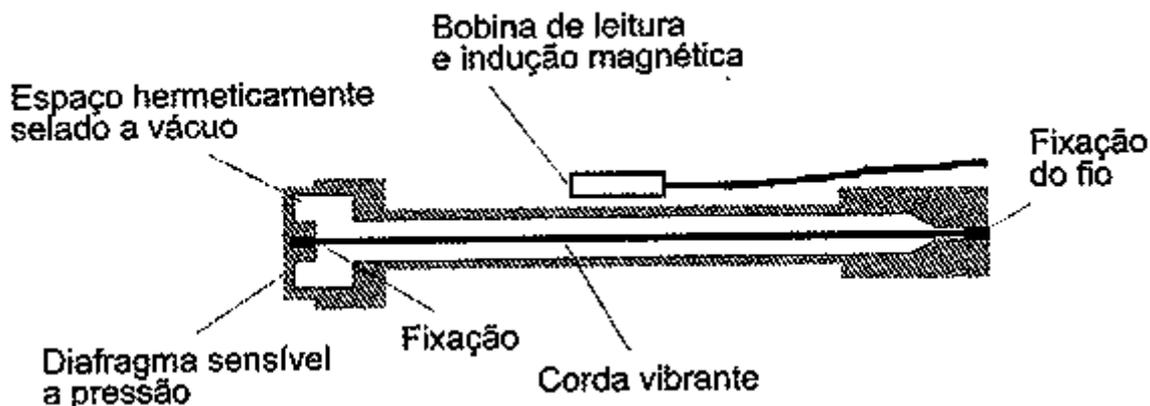
Figura 81 - Piezômetro de corda vibrante com data logger.



Fonte: (RITE, 2019).

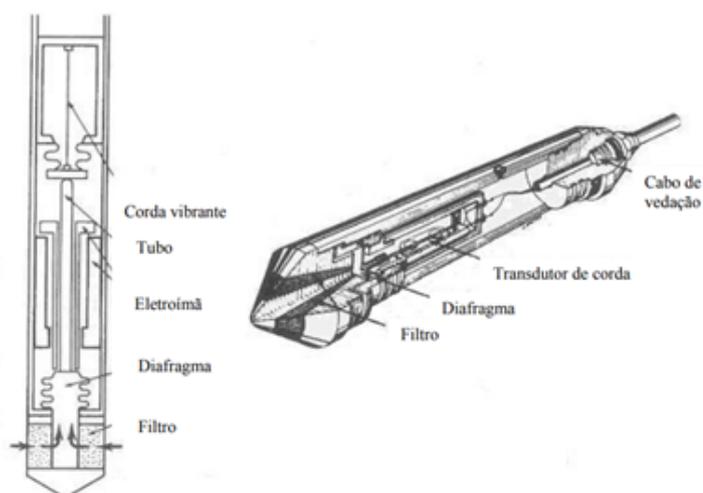
De acordo com Rite (2019), os sinais de medição devem iniciar, em seu fundo de escala, diferente de zero, tendo em vista que no caso de uma falha o sistema de monitoramento detecte, ou até mesmo o operador identifique falha no processo de aquisição de dados em caso de rompimento do meio de comunicação. Os dispositivos de corda vibrante normalmente se utilizam-se o para transmissão o ar comprimido, sendo utilizado também, em alguns casos, gás natural ou nitrogênio. As Figuras 82 e 83 apresentam um esquemático do funcionamento e um modelo, respectivamente, dos piezômetros de corda vibrante.

Figura 82 - esquemático de um piezômetro de corda vibrante.



Fonte: (THA, 2007).

Figura 83 - Modelo de um piezômetro de corda vibrante.



Fonte: (LKK, 2018).

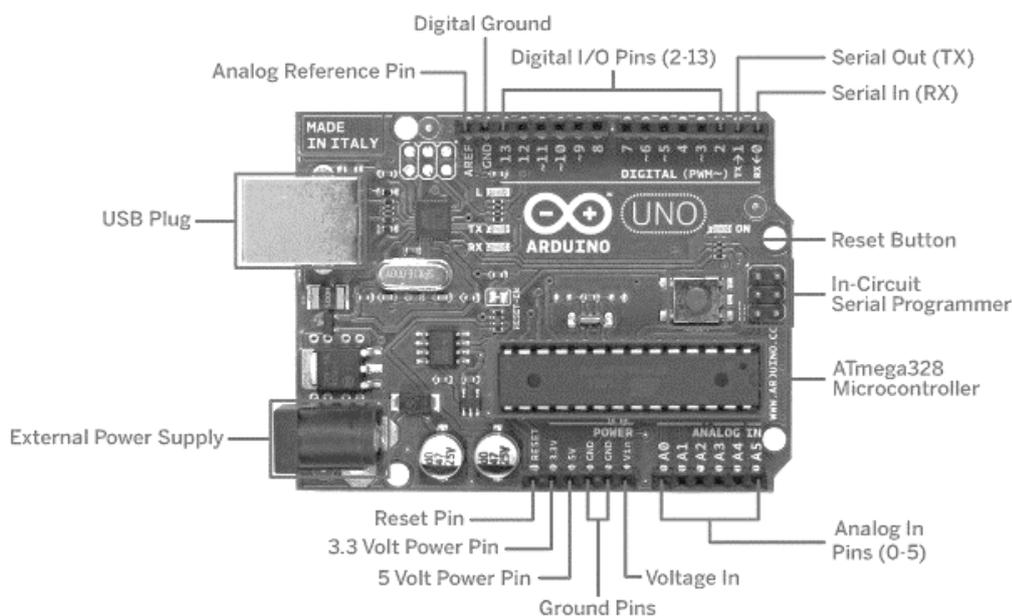
### 2.3.2. PLACAS DE DESENVOLVIMENTO

Existem diversas opções de plataformas de eletrônica embarcada, baseadas em sistemas microcontrolados para projetos de monitoramento, onde algumas delas são livres e outras são protegidas por patentes.

Neste trabalho focou-se nas opções livres diversas opções, da mais simples como as placas *Arduido Uno* (Figura 84), ou *Mega* (Figura 85), que são placas de desenvolvimento com diversas entradas e/ou saídas analógicas e digitais, também as placas *ESP8266* (Figura 86), um pouco mais avançadas que as *Arduino* com maior capacidade de memória e conecta à rede *Wifi*, até as mais sofisticadas como o microcomputador *Raspberry Pi*, que é uma série popular de computadores de placa única. Um computador inteiro não muito maior do que um

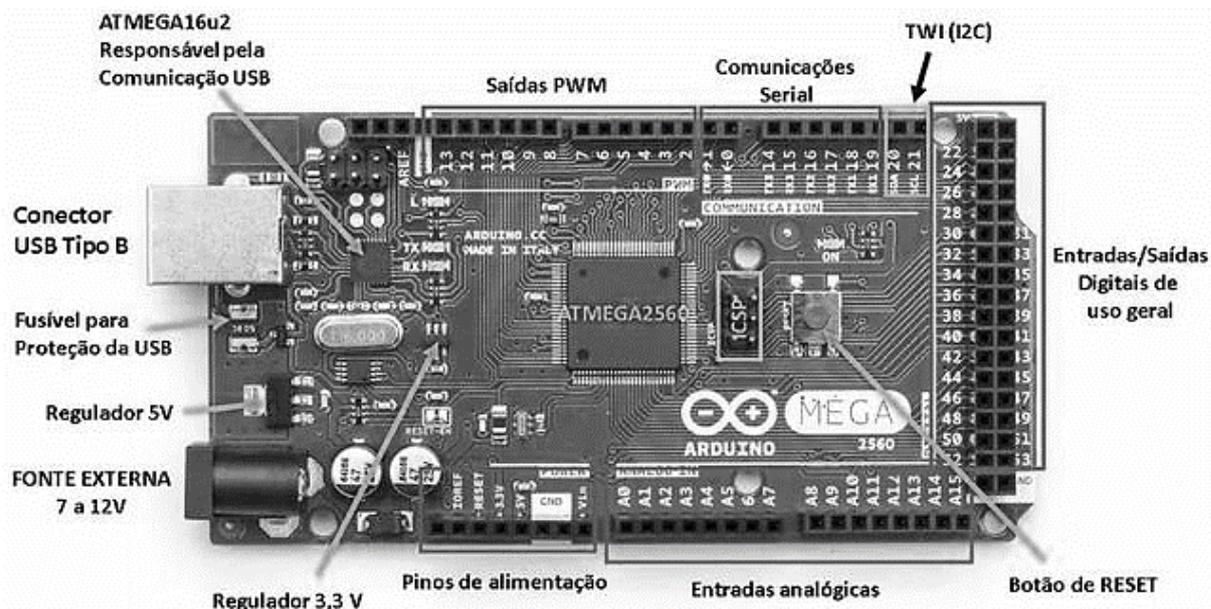
cartão de crédito, como apresentado na Figura 87. Também é importante citar a placa da Asus Tinker Board (Figura 88), tendo o dobro de velocidade de processamento do que as Raspberry Pi e ainda possuindo memória dedicada, sendo muito mais avançada que as anteriores. Estes dispositivos foram desenvolvidos como ferramentas educacionais para que mais pessoas aprendessem sobre informática básica e computação física.

Figura 84 - Arduino Uno.



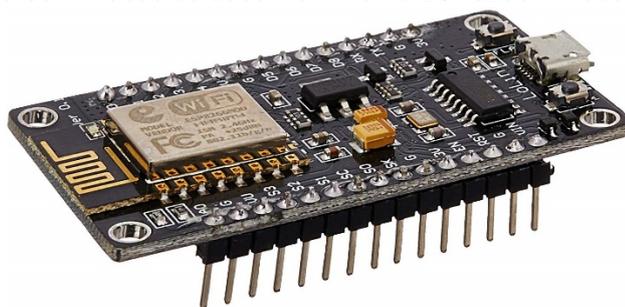
Fonte: (CONTROL VOLTAGE, 2019).

Figura 85 - Arduino Mega.



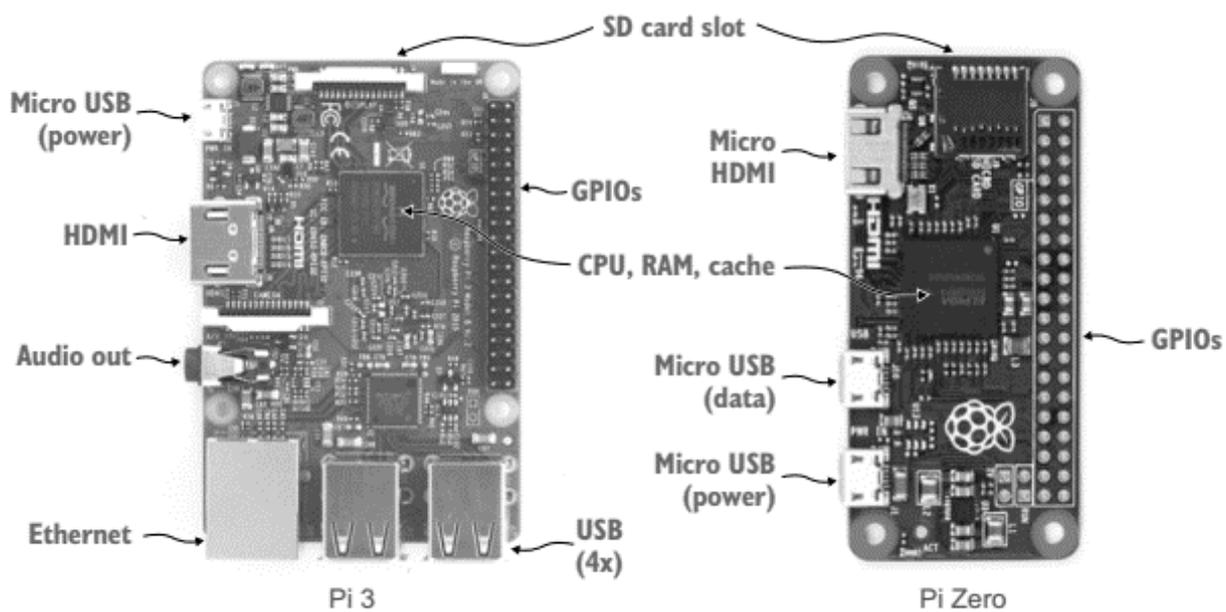
Fonte: (INDIAMART, 2019).

Figura 86 – Placas de desenvolvimento ESP8266 – NodeMCU.



Fonte: (Amazon, 2019).

Figura 87 – Placas de desenvolvimento – Microcomputadores acadêmicos Raspberry Pi.



Fonte: (GUINARD & TRIFA, 2016).

Figura 88 – Placas de desenvolvimento Asus Tinker Board.



Fonte: (DIGITEC, 2019).

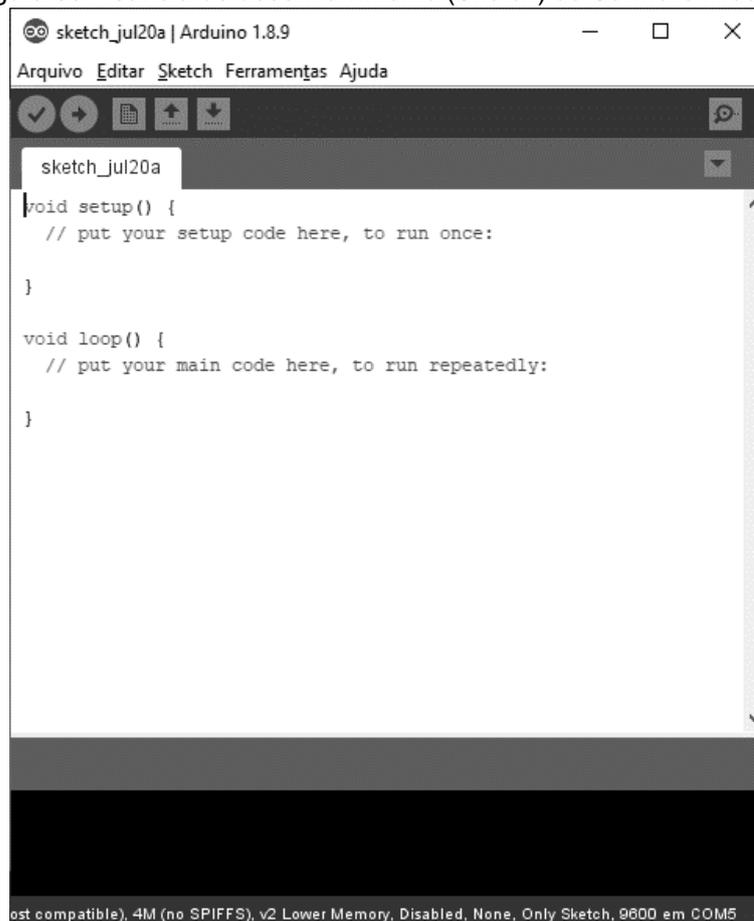
### 2.3.2.1. PLATAFORMA ARDUINO

A plataforma de desenvolvimento Arduino desenvolvida com o objetivo de ensino de programação foi criada em meados de 2005 pelo professor italiano Massimo Banzí, onde seu principal objetivo era ensinar programação de computadores e eletrônica aos seus alunos. É uma plataforma de prototipagem, ou seja, facilita o desenvolvimento de protótipos, possuindo um microcontrolador dedicado e alguns hardwares necessários para fazer a interação entre o *software*, também desenvolvido para interação com a placa, utilizando a linguagem C/C++.

De maneira geral, a plataforma Arduino é composta de um hardware livre, ou seja, foi disponibilizado pelo autor os projetos para quem quiser implementar, utilizar ou melhorá-lo, além de uma plataforma de *software* para a programação deste hardware, com algumas peculiaridades, tais como configurações de portas de entradas e saídas, dentre outros, presentes em modelos de programação já pré-existentes dentro da plataforma de programação.

As figuras 89 a 91 ilustram as janelas da Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) da plataforma Arduino.

Figura 89 – Janela de desenvolvimento (Sketch) do *Software Arduino*;



```
sketch_jul20a | Arduino 1.8.9
Arquivo  Editar  Sketch  Ferramentas  Ajuda

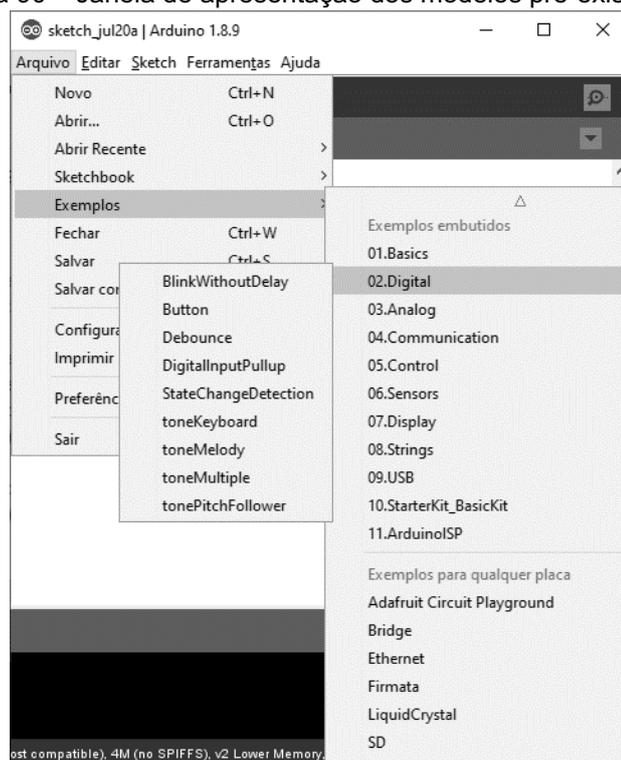
sketch_jul20a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}

ost compatible). 4M (no SPIFFS), v2 Lower Memory, Disabled, None, Only Sketch, 9600 em COM5
```

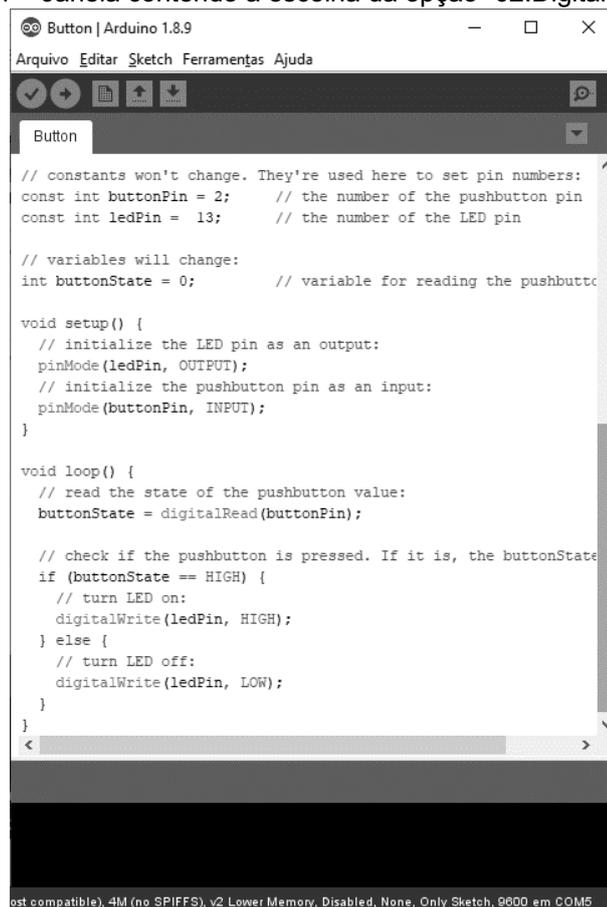
Fonte: próprio autor

Figura 90 – Janela de apresentação dos modelos pré-existent;



Fonte: próprio autor

Figura 91 – Janela contendo a escolha da opção “02.Digital - Button”;



Fonte: Próprio autor.

Esta plataforma não se limita a apenas um tipo de placa, mas diversos modelos, de diversas capacidades e tamanhos, como apresenta Thomsen (2014) na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparativo entre plataformas do tipo Arduino. Fonte: (THOMSEN, FilipeFlop, 2014).

	UNO	MEGA 2560	LEONARDO	DUE	ADK	NANO	PRO MINI	ESPLORA
<b>Microcontrolador</b>	ATmega328	ATmega2560	ATmega32v4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 ATmega328	ATmega168	ATmega32v4
<b>Portas digitais</b>	14	54	20	54	54	14	14	-
<b>Portas PWM</b>	6	15	7	12	15	6	6	-
<b>Portas analógicas</b>	6	16	12	12	16	8	8	-
<b>Memória</b>	32K	256K	32K	512K	256K	16K 32K	16K	32K
<b>Clock</b>	16Mhz	16Mhz	16Mhz	84Mhz	16Mhz	16Mhz	8Mhz 16Mhz	16Mhz
<b>Conexão</b>	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial/ Módulo USB Externo	Micro USB
<b>Conector para alimentação externa</b>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
<b>Tensão de operação</b>	5V	5V	5V	3,3V	5V	5V	3,3V ou 5V	5V
<b>Corrente máxima portas E/S</b>	40mA	40mA	40mA	130mA	40mA	40mA	40mA	-
<b>Alimentação</b>	7V - 12VDC	7V - 12VDC	7V - 12VDC	7V - 12VDC	7V - 12VDC	7V - 12VDC	3,35 - 12VDC	5V

Sabe-se, porém, que existem mais modelos de placas Arduino e, para demonstrar o quanto essa plataforma aberta foi melhorada, sendo desenvolvida diversas outras plataformas baseadas no padrão Arduino, apresenta-se alguns dos modelos encontrados no mercado, conforme as Tabelas 9 a 12.

Tabela 9 – Tipos de placas Arduino (parte 1)

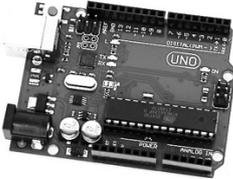
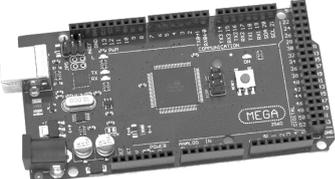
TIPO DE PLACA	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE I/O	IMAGEM
<b>Arduino UNO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 portas digitais</li> <li>- 6 portas PWM</li> <li>- 6 portas analógicas</li> <li>- Memória de 32Kb</li> </ul>	
<b>Arduino MEGA 2560</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 54 portas digitais</li> <li>- 15 portas PWM</li> <li>- 16 portas analógicas</li> <li>- Memória de 256Kb</li> </ul>	

Tabela 10 – Tipos de placas Arduino (parte 2)

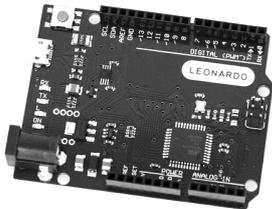
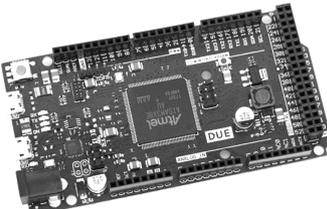
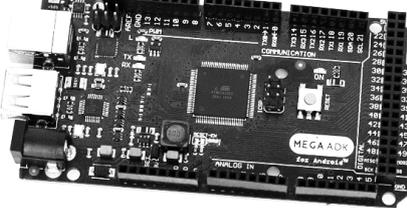
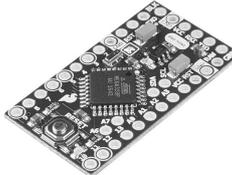
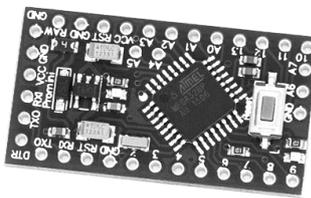
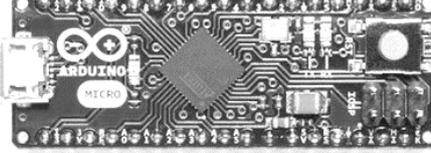
TIPO DE PLACA	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE I/O	IMAGEM
<b>Arduino LEONARDO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 20 portas digitais</li> <li>- 7 portas PWM</li> <li>- 12 portas analógicas</li> <li>- Memória de 32Kb</li> </ul>	
<b>Arduino DUE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 54 portas digitais</li> <li>- 12 portas PWM</li> <li>- 12 portas analógicas</li> <li>- Memória de 512Kb</li> </ul>	
<b>Arduino Mega ADK</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 54 portas digitais</li> <li>- 15 portas PWM</li> <li>- 16 portas analógicas</li> <li>- Memória de 256Kb</li> </ul>	
<b>Arduino NANO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 portas digitais</li> <li>- 6 portas PWM</li> <li>- 8 portas analógicas</li> <li>- Memória de 16Kb ou 32kb</li> </ul>	
<b>Arduino Pro-MINI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 portas digitais</li> <li>- 6 portas PWM</li> <li>- 8 portas analógicas</li> <li>- Memória de 16Kb ou 32kb</li> </ul>	
<b>Arduino MICRO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 20 portas digitais</li> <li>- 7 portas PWM</li> <li>- 12 portas analógicas</li> <li>- Memória de 32kb</li> </ul>	

Tabela 11 – Tipos de placas Arduino (parte 3)

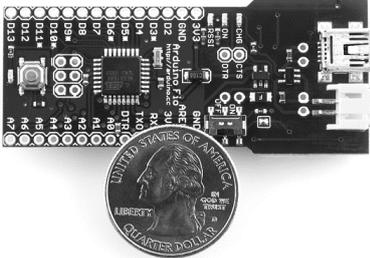
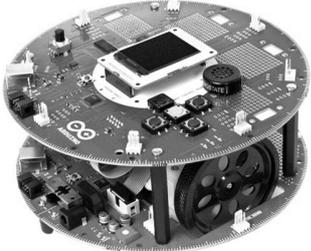
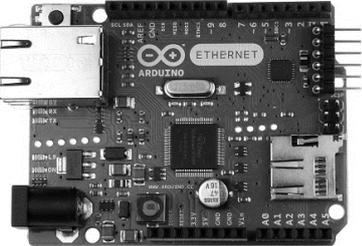
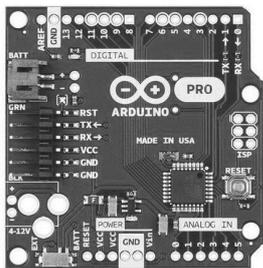
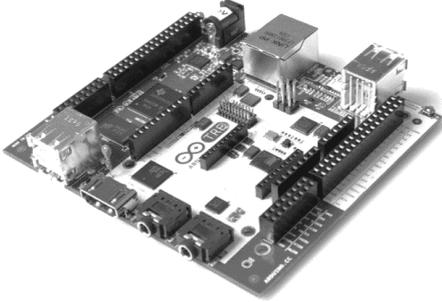
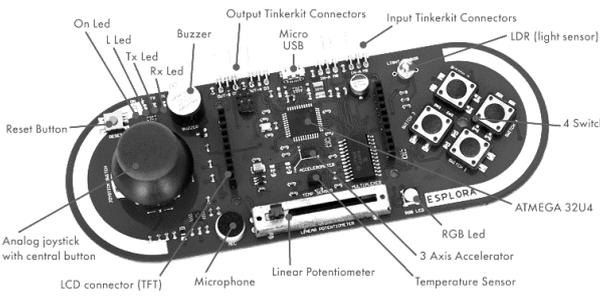
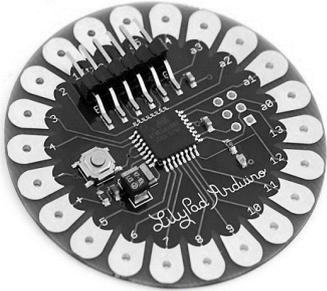
TIPO DE PLACA	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE I/O	IMAGEM
<b>Arduino FIO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 portas digitais</li> <li>- 6 portas PWM</li> <li>- 8 portas analógicas</li> <li>- Memória de 32Kb</li> </ul>	
<b>Arduino YUN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 20 portas digitais</li> <li>- 7 portas PWM</li> <li>- 12 portas analógicas</li> <li>- Memória de 32Kb</li> <li>- Acesso a Rede LAN</li> <li>- Acesso a rede Wifi</li> <li>- Memória Flash 16MB</li> </ul>	
<b>Arduino Robot</b>	<p>Plataforma dedicada com entradas e saídas pré-definidas à utilização de sensores e atuadores</p>	
<b>Arduino Ethernet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 20 portas digitais</li> <li>- 7 portas PWM</li> <li>- 12 portas analógicas</li> <li>- Memória de 32Kb</li> <li>- Acesso a Rede LAN</li> </ul>	
<b>Arduino PRO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 portas digitais</li> <li>- 6 portas PWM</li> <li>- 12 portas analógicas</li> <li>- Memória de 32Kb</li> </ul>	

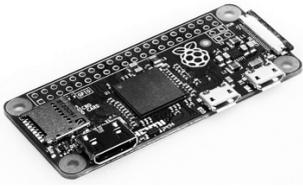
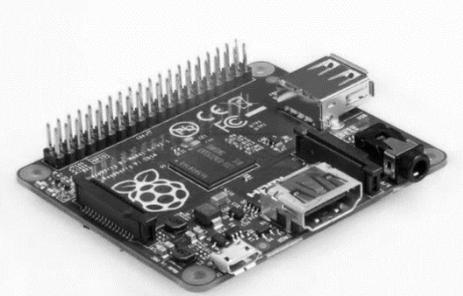
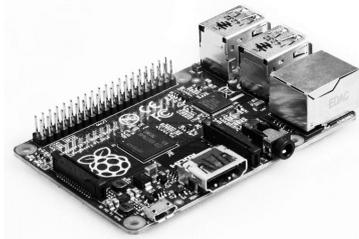
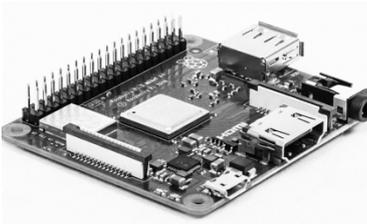
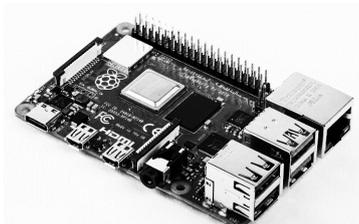
Tabela 12 – Tipos de placas Arduino (parte 4)

TIPO DE PLACA	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE I/O	IMAGEM
<b>Arduino TER</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 26 portas digitais</li> <li>- 11 portas PWM</li> <li>- 6 portas analógicas</li> <li>- Memória de 512MB</li> <li>- Acesso a Rede LAN</li> <li>- Porta HDMI</li> <li>- Entrada e saída de áudio</li> </ul>	
<b>Arduino ESPLORA</b>	<p>Placa com:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensor de temperatura</li> <li>- Led RGB</li> <li>- Acelerômetro</li> <li>- 4 push-buttons</li> <li>- LDR (sensor de luz)</li> <li>- Buzzer</li> <li>- Joystick analógico</li> <li>- Microfone</li> <li>- Potenciômetro</li> </ul>	
<b>Arduino LilyPad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 portas digitais</li> <li>- 6 portas PWM</li> <li>- 6 portas analógicas</li> <li>- Memória de 16Kb</li> </ul>	

### 2.3.2.2. PLATAFORMA RASPBERRY

Desenvolvida pela Fundação Raspberry, esta plataforma teve o objetivo de uma inovação de conceito tecnológico, agregando valor e utilidade a uma pequena placa equivalente ao tamanho de um cartão de crédito. Seu conceito é simples e se utiliza de entradas e saídas como quaisquer placas de desenvolvimento, além de portas USB e HDMI, além de entradas e saídas de áudio e conexão de rede. Esta se tornou uma placa considerada como um dos menores computadores do mundo. Também disponível em diversos modelos, como apresentado na Tabela 13.

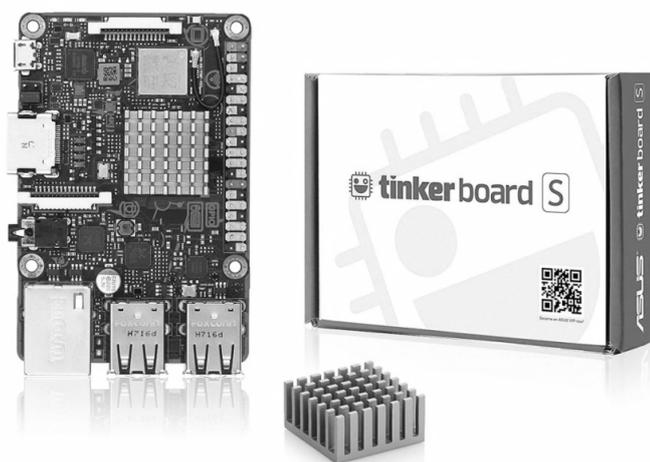
Tabela 13 – Tipos de plataforma Raspberry

TIPO DE PLACA	IMAGEM
<b>Raspberry Pi Zero.</b>	
<b>Raspberry Pi Zero W.</b>	
<b>Raspberry Pi 1 Model A+</b>	
<b>Raspberry Pi 1 Model B+</b>	
<b>Raspberry Pi 3 Model A+</b>	
<b>Raspberry Pi 4 Model B.</b>	

### 2.3.2.3. PLATAFORMA ASUS

A Asus também criou uma plataforma de desenvolvimento baseado nos princípios da plataforma Rapberry Pi, porém, o fabricante apresentou um conceito mais robusto em termos de processamento e capacidade de armazenamento interno. A plataforma Asus de desenvolvimento é chamada de “Tinker Board” e é uma plataforma única, sem outros modelos, como apresentado na Figura 92.

Figura 92 – Placa Tinker Board.



Fonte: (ASUS, 2019)

### 2.3.2.4. PLATAFORMA ESP

A plataforma ESP iniciou com os módulos ESP8266, apenas módulos Wifi para conexão e interrelação com placas de desenvolvimento através de redes sem fio. É apresentado abaixo, na Figura 93 as variações das placas ESP8266.

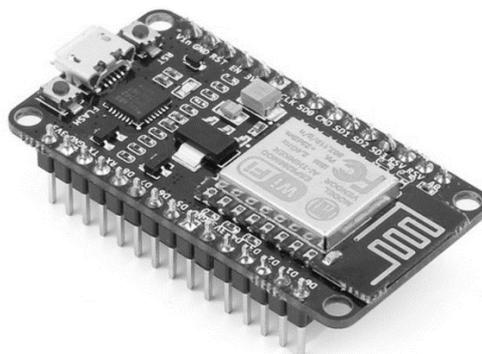
Figura 93 – Placa Tinker Board.



Fonte: (CURVELLO, 2015).

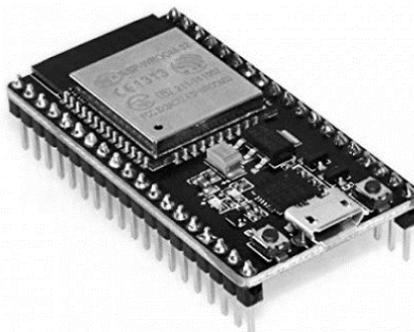
Além destes diversos modelos de ESP8266 ainda outras placas da mesma família ESP8266 NodeMCU e os ESP12 e ESP32, como apresentados nas Figuras 94 a 96.

Figura 94 – NodeMCU ESP8266 ESP-12E.



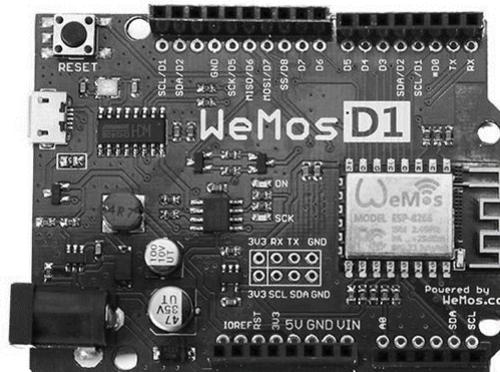
Fonte: (THOMSEN, 2016).

Figura 95 – NodeMCU ESP8266 ESP-32E.



Fonte: (THOMSEN, 2016).

Figura 96 –ESP8266 WeMos.

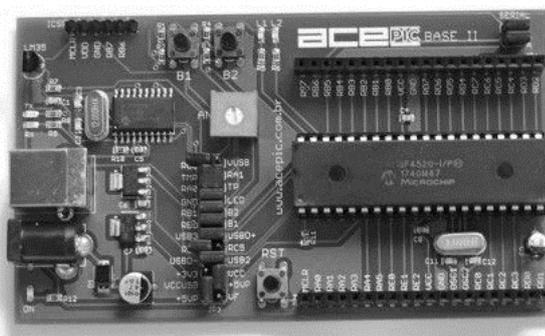


Fonte: (THOMSEN, 2016).

### 2.3.2.5. PLATAFORMA PIC

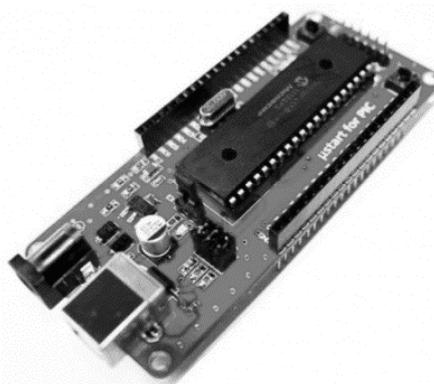
Existem algumas plataformas de desenvolvimento utilizando microcontroladores da família PIC e dsPIC, porém são pouco conhecidos, sendo, provavelmente, uma variação das plataformas Arduino, pois estes eram os microcontroladores bastante difundidos nas academias científicas, porém com uma certa dificuldade na programação, tendo em vista que necessitava de gravadores, muitas vezes, com custos elevados. Segue abaixo, nas Figuras 97 e 98 dois modelos de placa de desenvolvimento baseadas em Microcontrolador PIC e dsPIC com gravadora embutida na placa, similar as plataformas Arduino.

Figura 97 –Placa de desenvolvimento PIC18F4520 ou PIC8F4550.



Fonte: (ACEPIC, 2019).

Figura 98 –  $\mu$ Start for PIC - Placa de desenvolvimento para PIC.



Fonte: (SOUZA F. , 2015).

## 2.4. SOFTWARES LIVRES

Idealizado por Richard Stallman, em 1984, no MIT (Massachusetts Institute of Technology), surgiu um projeto de desenvolvimento de um sistema operacional completamente livre, o GNU e em 1991, na Finlândia, Linus Torvalds, criou o Linux, com as mesmas características para funcionar sob sistemas Unix, como GNU, o que possibilitou a associação entre os dois projetos, garantindo as quatro liberdades mencionadas anteriormente.

Fontenelle (2012) afirma que o termo *Software Livre* tem a premissa de respeitar a liberdade e senso comum dos usuários. O termo livre não quer dizer gratuito. O usuário tem a liberdade de copiar, executar, estudar, distribuir, modificar e melhorar o *software*.

A *Free Software Foundation* (Fundação para o Software Livre), tem a visão do *software* livre como a liberdade de expressão, logo, o usuário que desenvolve alguma modificação nos *softwares* desta modalidade tem a possibilidade de socializar as modificações, para que a comunidade possa se beneficiar destas mudanças. Isto, porém, não impede de o desenvolvedor cobrar pelo seu trabalho.

De acordo com Kretcheu (2012), um *software* livre é um *software* que respeita quatro liberdades: a liberdade do uso, ou seja, qualquer pessoa que desejar pode usar este aquele programa, se ele for um *software* livre; a liberdade de entender, ou seja, o que o programador fez através do código fonte, e modificar ao seu interesse; a liberdade de copiar o programa do jeito que você recebeu de quaisquer formas e para quaisquer locais; a liberdade de distribuir aquele *software* modificado ou não, para que toda comunidade possa desfrutar. Estas são as premissas para que um programa seja considerado *software* livre.

## 2.5. SISTEMAS DE MONITORAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS EXISTENTES

De acordo com Negrila & Onose (2016) é bem utilizado um sistema de monitoramento de barragens através de scanner de varreduras a laser que geram resultados em função da distância padronizada e com base nesses elementos, a posição 3D do ponto é determinada através de conversão de um sistema de coordenadas polares para um sistema cartesiano. As Figura 99 a 102 apresentam alguns equipamentos e *softwares* associados desta modalidade de monitoramento.

Figura 99 – Scanner a laser 3D Leica RTC360.



Fonte: (HEXAGON, 2019).

Figura 100 – Sistema de monitoramento vinculado ao Scanner a laser 3D Leica RTC360.



Fonte: (HEXAGON, 2019).

Figura 101 –Scanner de imagens a laser Leica BLK360.



Fonte: (HEXAGON, 2019).

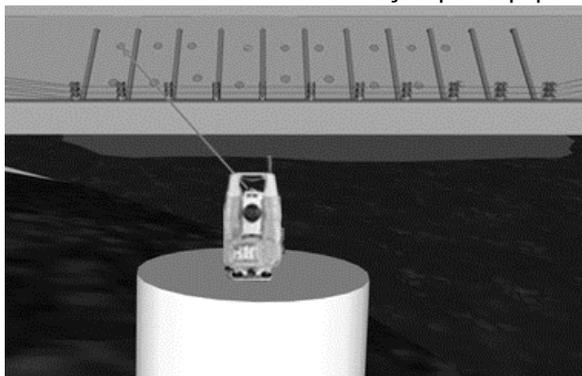
Figura 102 – Sistema de monitoramento vinculado ao Scanner de imagens a laser Leica BLK360.



Fonte: (HEXAGON, 2019).

Também há o monitoramento de deslocamento de barragens através da utilização de níveis e estações totais, medindo pontos específicos, onde quaisquer variações nos valores dos pontos podem trazer a informações de algum deslocamento, como apresentado nas Figuras 103 a 104.

Figura 103 – Método de monitoramento de deformação por equipamento Estação Total.



Fonte: (ROCTEC, 2016).

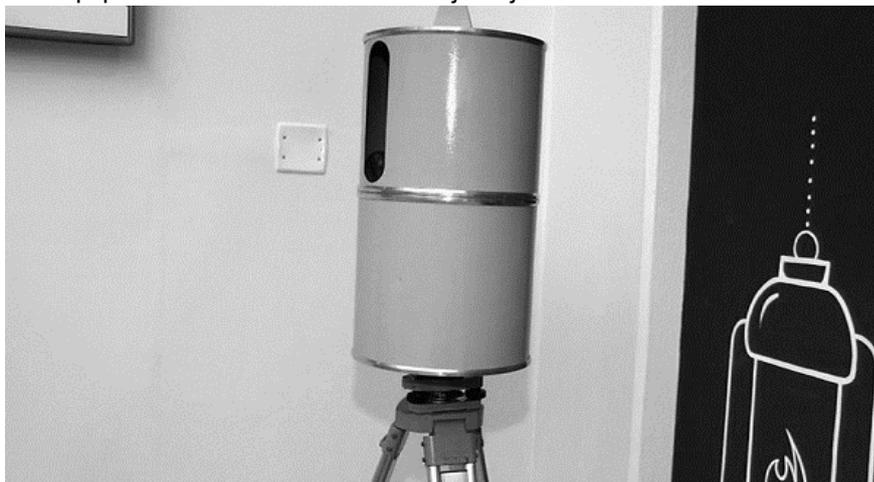
Figura 104 – Leitura manual em Estação Total.



Fonte: Próprio autor.

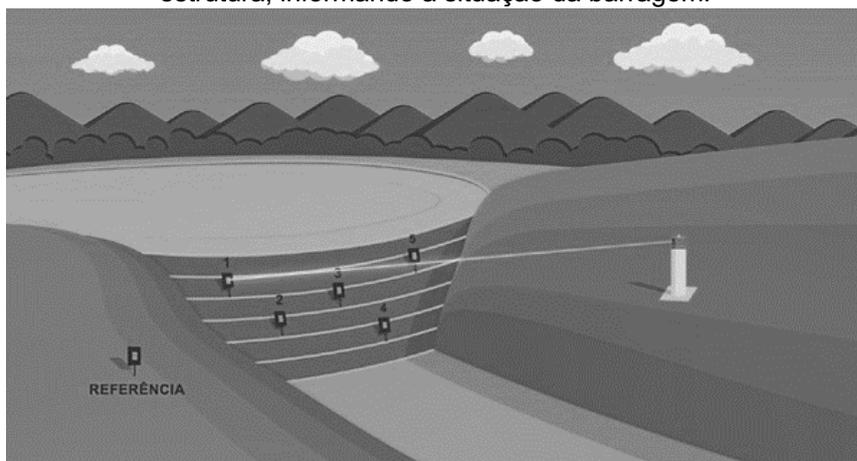
Há também o monitoramento automatizado através dessas estações totais, como apresentado na Figura 113, da empresa ROCTEC, também encontrado tecnologias nacionais, como a desenvolvida por alunos da Universidade Federal de Itajubá, como apresentado nas Figuras 105 e 106.

Figura 105 – O equipamento desenvolvido em Itajubá já está sendo testado em uma mineradora.



Fonte: (UNIFEI, 2019).

Figura 106 – Posicionado em frente à barragem, o aparelho faz a leitura de múltiplos pontos na estrutura, informando a situação da barragem.



Fonte: (UNIFEI, 2019).

Pimenta de Ávila Consultoria Ltda, também trabalha com um Sistemas de Gestão de Segurança de Barragens em plataforma WEB e utilização de diversos sistemas de aquisição de dados, integrados em uma plataforma online. A figura 107 ilustra a tela de apresentação do sistema de Pimenta d'Avila contendo as seguintes funcionalidades: dados das estruturas, plano de segurança de barragens, auditoria, inspeção de segurança regular, monitoramento, planos de ação, gestão de riscos, dentre outros.

Figura 107 – Sistema de Monitoramento de Barragens SYSDAM.



Fonte: (AVILA, 2019).

### 3. METODOLOGIAS DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa se baseou nas etapas explicitadas no fluxograma da Figura 108.

Figura 108 – Fluxograma de processo.



Fonte: Próprio autor.

#### 3.1. REVISÃO DA LITERATURA

A análise da literatura é fator primordial para o projeto de pesquisa, pois visa conhecer no meio científico, técnico e profissional, referências que possam dar subsídio à pesquisa. Isto pode trazer grande vantagem, em virtude de evitar repetições de temas ou assuntos já publicados em artigos, dissertações ou teses e, mesmo realizando pesquisa correlata, ter a oportunidade de identificar as limitações das pesquisas existentes com a finalidade de utilizar algum ou alguns trabalhos como base e dar prosseguimento ao desenvolvimento dessas pesquisas, tendo respaldo científico e auxílio de estudos embasados para tal, sendo muito importante também utilizar contribuições de profissionais com experiência na área, para diminuir os riscos de ocorrências desnecessárias e informações que não condizem com a realidade de campo nas indústrias.

#### 3.2. SELEÇÃO DE PLACA DE DESENVOLVIMENTO

A seleção da placa de desenvolvimento exige conhecimento prévio das características do microcontrolador, tendo em vista que a sua programação será baseada nas especificações físicas da estrutura do *hardware*, sendo esta etapa realizada por meio de pesquisa bibliográfica, em diversos sites da internet, manuais de fabricantes e consultas a profissionais com experiência em desenvolvimento de aplicações nestas plataformas.

Desta forma, a escolha desta placa de eletrônica embarcada baseou-se nos seguintes requisitos: pequena dimensão; facilidade de programação; capacidade de acesso à rede Wi-

*Fi* e baixo custo de aquisição. Esta etapa é determinante para a etapa seguinte da pesquisa, que trata-se do desenvolvimento do *Data Logger*.

### 3.3. DESENVOLVIMENTO DO DATA LOGGER

Esta etapa de desenvolvimento é importante destacar pois é uma parte da computação física, onde segundo O'Sullivan & Igoe (2004), se trata da interação entre o mundo físico (placa de desenvolvimento) e o mundo virtual do computador (*software*). O processo de transdução, ou a conversão de uma forma de energia em outra, é o que possibilita esse fluxo.

O desenvolvimento do Data Logger baseou-se na utilização de um sensor confiável, que atendesse as especificações de medição de pressão que variasse entre 0 a 10 Bar e que apresentasse sinais de saída na faixa de 4mA a 20mA, utilizado industrialmente; no desenvolvimento de um circuito para conversão de valores em corrente elétrica para tensão, para facilitar a medição; na programação da placa de desenvolvimento e na confecção de uma estrutura que garantisse a proteção dos dispositivos em ambiente industrial, denominando todo o conjunto de Data Logger.

Para que fosse possível a obtenção de dados de forma eficaz, a aquisição de um sensor de alta qualidade e confiabilidade foi necessária pois, o fato do sistema ser desenvolvido, em tese, a baixo custo, não se estende para os dispositivos sensores, tendo em vista os riscos envolvidos em leitura equivocadas. Por esta razão é necessário contar com sensores disponíveis no mercado, fabricado por empresas de credibilidade que realizam ensaios, calibrações e certificações de seus equipamentos.

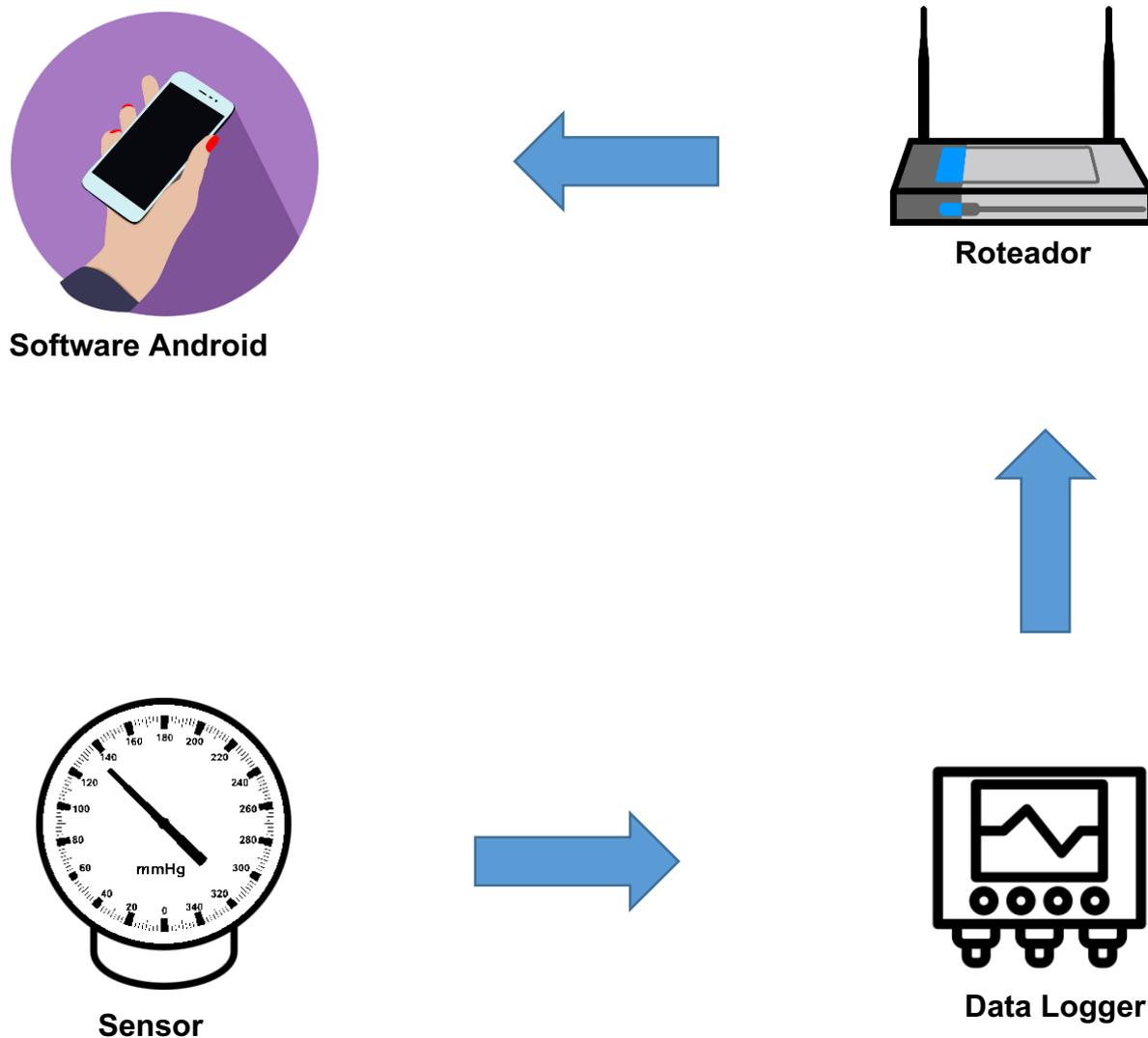
### 3.4. DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO TESTE

Para se desenvolver o aplicativo para testes pode-se utilizar *softwares* ou plataformas livres, além de aplicativos já prontos, pré-definidos, para garantir a acessibilidade e conectividade com o Data Logger, tomando cuidado de fazer o link da programação do aplicativo com a programação do Data Logger.

#### 3.4.1. FLUXO DE DADOS DO PROJETO

O sistema fará uso de um meio físico para a transferência de dados, a comunicação entre o Data Logger e roteador será cabeada, e entre roteador e smartphone utilizara o Wi-Fi permitindo ao usuário controle de qualquer ponto dentro do limite de alcance do roteador. A comunicação entre o aplicativo e os dispositivos ligado ao Data Logger será feita conforme fluxo abaixo:

Figura 109 - Fluxo de dados do Sistema



Fonte: Próprio autor.

### 3.4.2. VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO

Para a validação do sistema de Monitoramento são necessários dois procedimentos. O primeiro é a verificação em um ambiente controlado da resposta do aplicativo aos dados recebidos do sensor, bem como sua resposta, pois o sistema irá fornecer apenas informações em valores de corrente elétrica, eles precisam ser associados a valores correspondentes em outra grandeza, que será vista pelo usuário. No caso deste projeto piloto, o valor associado será o número em *bit*. O segundo deverá ser o teste através de ensaios de campo, pois estas informações darão base para a criação da curva de ensaio de campo em valores de *bits* para criação de uma curva de aferição e posterior comparação com a curva obtida nos ensaios em ambiente controlado.

### 3.5. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM AMBIENTE CONTROLADO

Antes das medições nos piezômetros em campo, em uma barragem, foram realizados ensaios para a parametrização do sensor através da criação de uma curva de calibração de referência, sob um sistema controlado, instalado nas mediações da Universidade Federal do Pará, obtendo-a com o sensor de nível, para que previamente houvesse algum parâmetro comparativo, que não fosse somente um equipamento. Esta etapa se deu através de um teste hidrostático, onde criou-se um sistema controlado visando averiguar os valores obtidos pelo sensor, no aplicativo.

Utilizou-se para tal dois tubos de 25mm, conectados, de 6 metros cada, totalizando uma coluna d'água de 12m. Em seu fundo foram utilizadas as conexões: 1 joelho simples soldável 25mm; 2 joelhos de 25mm para 1/2"; 1 Tê de 25mm; 2 torneiras e uma mangueira transparente para averiguação do nível da água dentro da tubulação, como apresentado nas Figuras 110 e 111. Foram feitas graduações na mangueira em diversos pontos para que se pudesse verificar a altura da coluna d'água e o valor apresentado no aplicativo. Com isso foram feitas aquisições instantâneas analisando através do preenchimento de uma Tabela, quatro valores em cada ponto graduado. Logo, através da média dos valores, obteve-se a curva de calibração. Para comparativo foi gerada uma relação entre *Bits* e valor de pressão encontrando-se os pontos de mínimo e máximo para o sensor, iguais a 0 m.c.a. (*bit 204*) e 100 m.c.a. (*bit 1023*), respectivamente.

Figura 110 – Partes componentes do sistema controlado para ensaios de curva de calibração.



Fonte: Próprio autor.

Figura 111 – Controle e visualização de nível de coluna d'água montado.



Fonte: Próprio autor

A mangueira transparente foi graduada a cada com alguns pontos conhecidos para realização dos ensaios de curva de calibração. Os pontos demarcados, foram: 0,1m; 1m; 2m; 4m; 6m; 8m; 10,5m; 11,5m e 11,96m, como apresentado na Figura 111. Logo após esta estruturação, foi realizado o enchimento do sistema e a inserção do sensor para instalar a coluna de forma vertical.

Realizado este procedimento, instalou-se a coluna de forma vertical e realizou-se a montagem da estrutura de aquisição de dados, como mostra a Figura 112.

Figura 112 – Montagem do sistema de aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

O ensaio controlado é extremamente necessário, tendo em vista que, como se objetiva desenvolver um sistema de monitoramento que opere em quaisquer piezômetros, os ensaios de campo não são suficientes para criar parâmetros pois, por não serem ambientes controlados, podem apresentar curvas fora do padrão, não se tendo nenhuma referência para confrontar, associados a falhas técnicas ou humanas, podendo trazer leituras precisas mas não exatas ou exatas e imprecisas. (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2010).

### 3.6. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM CAMPO

Esta etapa deve ser considerada pois, com valores parametrizados obtidos em laboratório, em condições controladas, cria-se uma curva de convergência ou reta de tendência de valores esperados que darão subsídio a quaisquer leituras externas.

Foram realizados testes em uma planta prática, para melhor validar as informações o resultado de resposta do aplicativo diante de um sensor na realidade industrial. Procedeu-se então a aquisição de um sensor de nível para poços profundos, oriundo do fabricante Velki Instrumentos Industriais. Em posse do equipamento agendou-se uma visita à barragem para a realização do teste de calibração deste sensor. Realizaram-se as medições em seis piezômetros com sensor do tipo pio e realizado a medição de calibração com a inserção da sonda de nível nos piezômetros.

Essas leituras comparativas entre os dispositivos utilizados pela equipe do empreendimento de barragem nas medições em piezômetros e as sondas de poço (sensores

de pressão) utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, foram o foco principal desta etapa, para validar e confrontar a curva de calibração obtida do sensor para atestar a confiabilidade dos valores apresentados. Sendo assim, foram realizadas as medições nos piezômetros com sensor do tipo pio elétrico para a obtenção de dados instantâneos e com o sensor de pressão utilizado no Sistema de Monitoramento proposto, como mostram as Figuras 113 a 116.

Figura 113 – Ensaio de campo – piezômetros escolhidos para a medição.



Fonte: Próprio autor.

Figura 114 – Ensaio de campo – piezômetros escolhidos para a medição.



Fonte: Próprio autor.

Figura 115 – Ensaio de campo – medição de pressão em fundação – inserção do sensor tipo pio.



Fonte: Próprio autor.

Figura 116 – Ensaio de campo – verificação do nível de água com sensor de pressão.



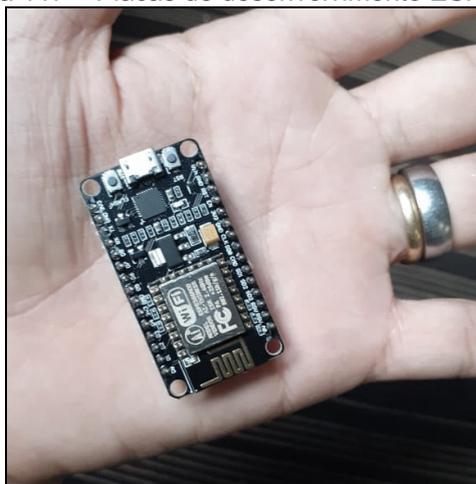
Fonte: Próprio autor.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1. PLACA DE DESENVOLVIMENTO SELECIONADA

A placa selecionada foi a ESP8266 NodeMCU 12-E com Wifi, tendo em vista que este projeto pretendia aplicar um sensor analógico e ter a facilidade da conectividade em rede, sendo compacto, atendendo a todos estes requisitos, tendo dimensões igual a (5,3 x 3) cm; possibilidade de programação em plataforma Arduino; contendo módulo wifi. A Figura 118 apresenta a placa de desenvolvimento ESP8266 selecionada para a aplicação no Sistema de Monitoramento.

Figura 117 – Placas de desenvolvimento ESP8266.



Fonte: Próprio autor.

Esta plataforma é composta basicamente por um chip controlador (ESP8266 ESP-12E), uma porta micro USB para alimentação e programação, conversor USB serial integrado e já possui WiFi nativo. Pode-se dizer que suas principais características são: possuir um processador ESP8266-12E com arquitetura RISC de 32 bits, que pode operar em 80MHz ou 160MHz, tendo capacidade de 4Mb de memória flash, sendo destes, 64Kb para instruções e 96Kb para dados. Possui WiFi nativo padrão 802.11b/g/n, operando em modo AP, Station ou AP + Station. Pode ser alimentada com 5VDC através do conector micro USB. Possui 11 pinos digitais e 1 pino analógico com resolução de 10 bits. Os pinos digitais, exceto o D0 possuem interrupção, PWM, I2C e one wire. A única restrição é que ele opera com pinos em nível lógico de 3.3V, não sendo compatíveis com 5V. Possui também conversor USB Serial integrado, podendo ser programável via USB ou WiFi (OTA). Compatível com a IDE e módulos e sensores utilizados no Arduino. Outro diferencial do NodeMCU é a possibilidade de fazer a programação da placa via OTA (Over The Air), ou seja, através do WiFi você pode enviar os códigos para a placa.

#### 4.2. DATA LOGGER DESENVOLVIDO

O Data Logger obtido atendeu aos requisitos pré-estabelecidos, contendo canal de entrada que viesse a suprir uma corrente de alimentação de até 1A para a inserção de sensor de pressão do tipo sonda de poço profundo; o *data logger* desenvolvimento, com uma estrutura padrão industrial, como é apresentado na Figura 118.

na que atendesse as especificações de medição de pressão que variasse entre 0 a 10 Bar e que apresentasse sinais de saída na faixa de 4mA a 20mA, utilizado industrialmente; no desenvolvimento de um circuito para conversão de valores em corrente elétrica para tensão, para facilitar a medição; na programação da placa de desenvolvimento e na confecção de uma estrutura que garantisse a proteção dos dispositivos em ambiente industrial, denominando todo o conjunto de Data Logger.

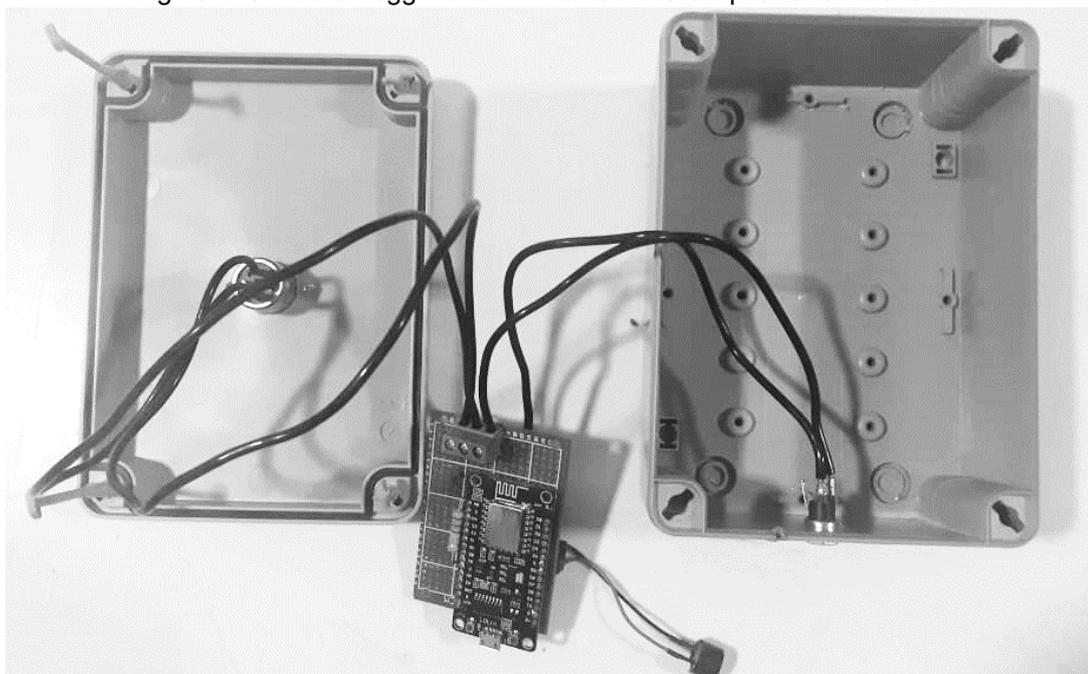
Figura 118 – Data Logger desenvolvido para a aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

Este Data Logger é constituído por uma placa de desenvolvimento do tipo ESP8266 NodeMCU 12-E, um circuito de aquisição de dados, conectores para os cabos e uma pequena placa pré-perfurada como mostra a Figura 119.

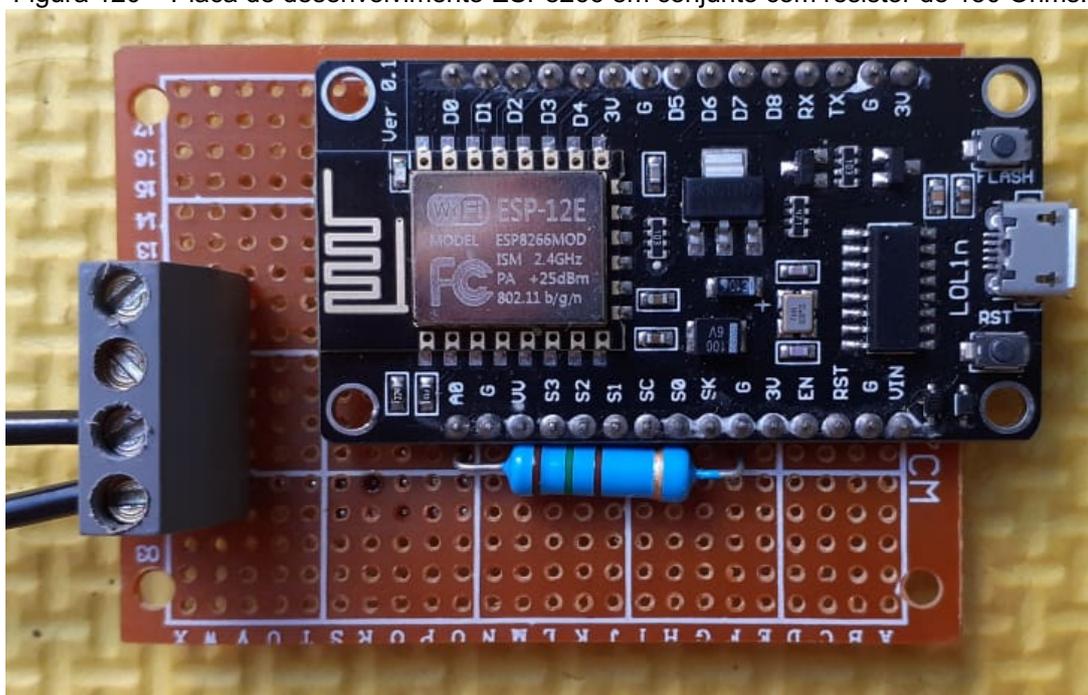
Figura 119 – Data Logger aberto mostrando a simplicidade do circuito



Fonte: Próprio autor.

O circuito de aquisição de dados, que será detalhado posteriormente, é constituído por apenas um resistor de 150 Ohms com a função de converter a grandeza de leitura de corrente para tensão, em uma placa de circuito impresso perfurada, como é apresentado na Figura 120.

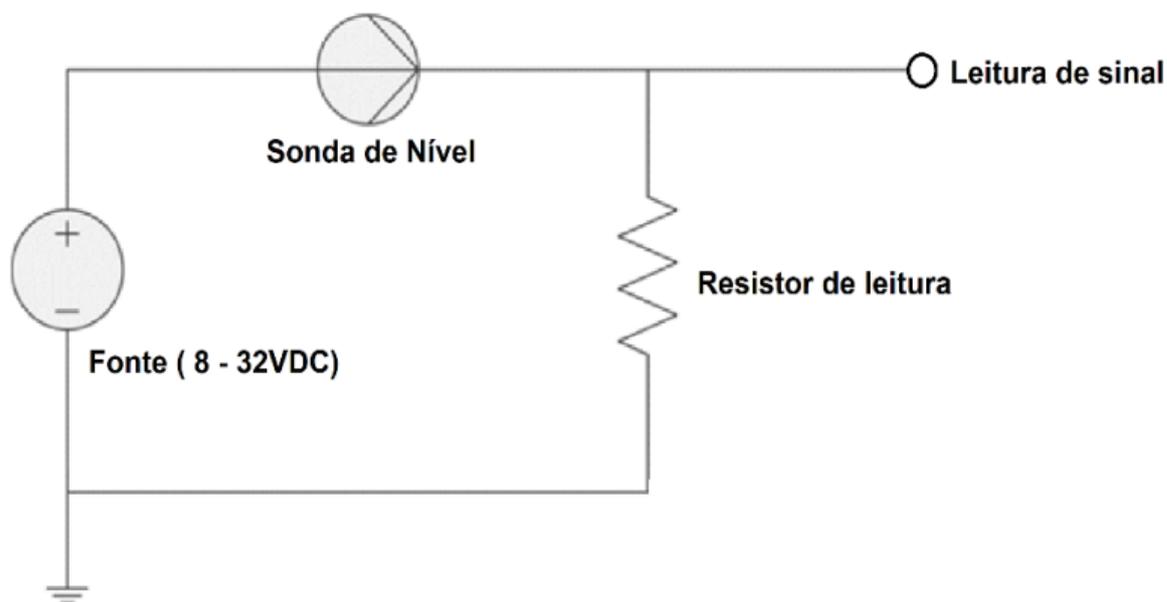
Figura 120 – Placa de desenvolvimento ESP8266 em conjunto com resistor de 150 Ohms.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com Bezerra (2014), e Rocha, Barra Junior, Bezerra & Barra (2017) o resistor existente na placa faz parte de um circuito básico em que dispõe-se o sensor de pressão em série com o resistor, para proporcionar um circuito divisor de tensão, uma vez que, a composição deste sensor constitui-se de um strain gauge, haverá então uma variação na resistência interna com a variação da grandeza medida. A Figura 121 mostra este circuito de aquisição de sinal.

Figura 121 – Circuito de aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

A leitura do sinal foi conectada diretamente à entrada A0 do ESP8266, que tem a função de um conversor analógico-digital operando em 1024 *bits*. Um exemplo prático desta aplicação é que o sensor tem faixa de leitura de 0 a 100 m.c.a. e a entrada A0 tem faixa de leitura com valores que vão de 0 a 1023. Logo, na teoria era para 0 m.c.a. corresponder ao *bit* 0 e 100 m.c.a. corresponder ao *bit* 1023, entretanto a relação não é tão direta desta forma.

Como a faixa de leitura dos sensores especificados variam de 4mA até 20mA, em que os valores correspondem a 0 m.c.a. e 100 m.c.a., respectivamente, não há a possibilidade de se obter o valor do *bit* 0 através da leitura. Como se utilizou do circuito divisor de tensão foi adotado um resistor de 150 Ohms, encontrando-se os seguintes valores de tensão sobre o resistor, aplicada a lei de Ohm:  $4mA \rightarrow 0,6V$ ;  $20mA \rightarrow 3,0V$ . Logo, a leitura de 0,6V corresponderá a 0 m.c.a. e 3V corresponderá a 100 m.c.a.

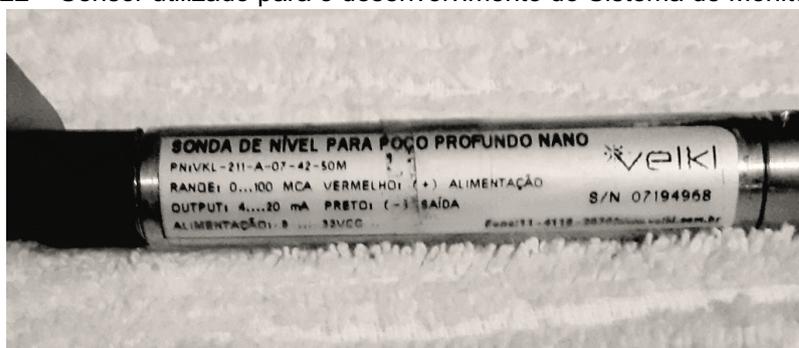
A Tabela 14 foi criada para criar uma curva de calibração padronizada, onde se relacionam os valores iniciais e finais para servirem como base para as leituras.

Tabela 14 – Relação entre pressão corrente e tensão (curva parametrizada em *bits*).

PRESSÃO (m.c.a.)	CORRENTE (mA)	TENSÃO (V)	VALOR EM BITS
0	4	0,60	204
25	8	1,19	409
50	12	1,80	613
75	16	2,40	818
100	20	3	1023

Para atender aos requisitos de alta confiabilidade na obtenção de dados, foi adquirido um sensor de grande sensibilidade, do fabricante Velki Instrumentos, modelo VLK-211-A-07-42-50M, sendo este uma sonda de nível para poço profundo do tipo nano, com range de medição de até 10 Bar, o equivalente a 100 m.c.a.; saída de 4mA a 20mA, alimentação de 8 a 32VDC, com 50 metros de cabo, como apresentado nas Figuras 122 a 124.

Figura 122 – Sensor utilizado para o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 123 – Sensor utilizado para o desenvolvimento do Sistema de Monitoramento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 124 – Parte eletrônica do sensor



Fonte: Próprio autor.

Para que o Data Logger tivesse uma funcionalidade, também fez parte desta etapa de desenvolvimento a programação da placa de desenvolvimento ESP8266 através da plataforma Arduino, que foi bastante trabalhosa, em função de ter que associar não somente as funções do sistema físico, mas também do link com a interface do aplicativo. Porém, por fim, a programação se mostrou satisfatória para a finalidade a qual se propôs, que é fazer a aquisição de dados em tempo real. A Figura 125 ilustra a imagem da tela de programação desse sistema, na plataforma Arduino.

Figura 125 – Plataforma de desenvolvimento Arduino – Sketch de comandos.

```

SISTEMA_DE_MONITORAMENTO | Arduino 1.8.9
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

SISTEMA_DE_MONITORAMENTO $
#include <ESP8266WiFi.h>

IPAddress ip(192, 168, 0, 30);
IPAddress gateway(192, 168, 0, 1);
IPAddress subnet(255, 255, 0);
IPAddress dns(192, 168, 0, 1);

#define sensor A0

const byte Buzzer = D7; //variavel de saída do buzzer
int sensorValue = 0; // variable to store the value coming from the sensor

const char* ssid = "IP-Link_ACS2";
const char* password = "78084414";

WiFiServer server(80);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(10);

  // preparando o modo dos pinos GPIO
  pinMode(sensor, INPUT);
  pinMode(Buzzer, OUTPUT);

  //Connect to Wifi network
  Serial.println();
  Serial.println();
}

Salvo.

NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module), 80 MHz, Flash, Disabled, All SSL cipheres (most compatible), 4M (no SPIFFS), v2 Lower Memory, Disabled, None, Only Sketch, 9600 em COM8

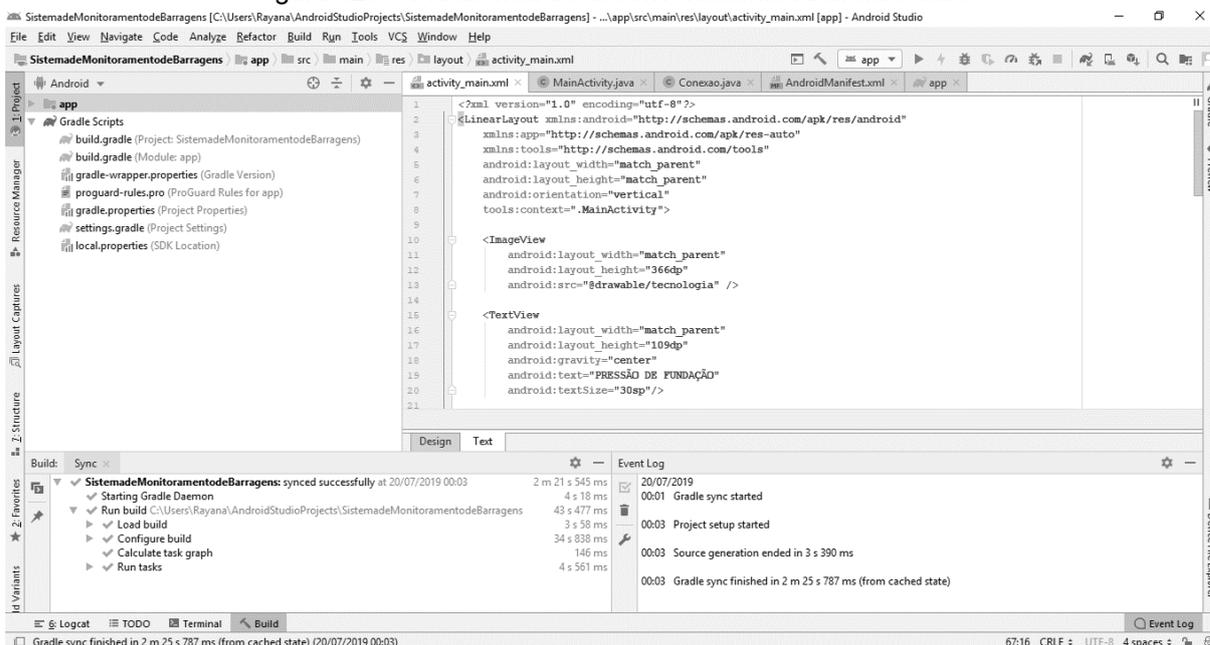
```

Fonte: Próprio autor.

### 4.3. DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO TESTE

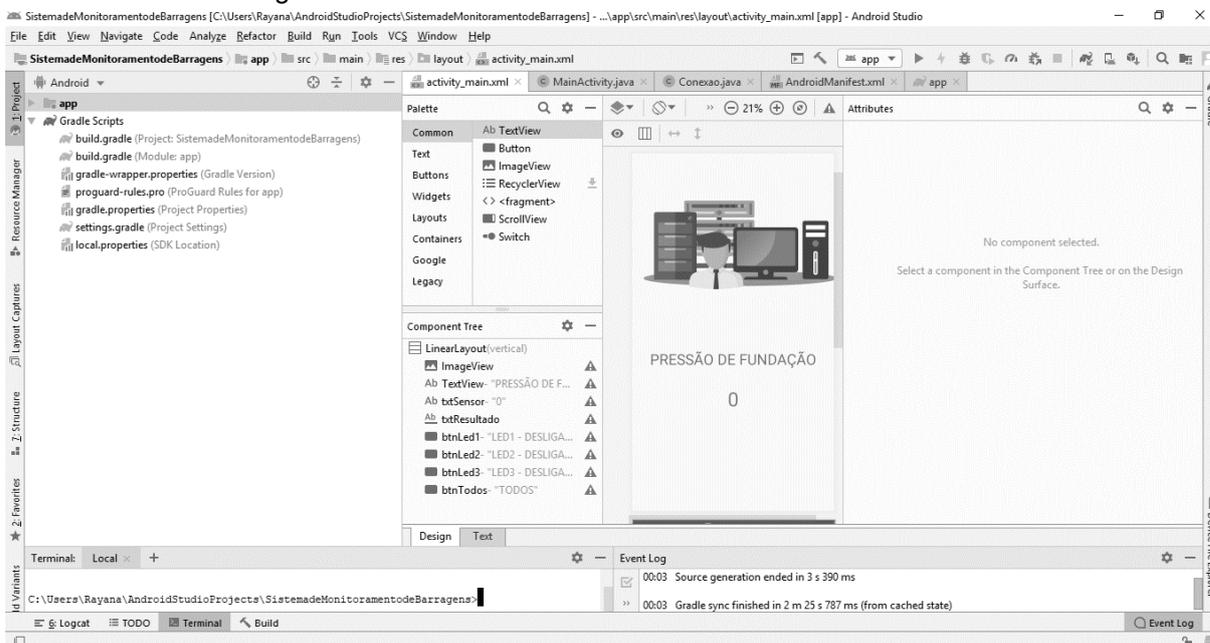
Posteriormente conseguiu-se resultados esperados através do desenvolvimento no *software* Android Studio, com o uso de programação na linguagem Java, onde se implementou o aplicativo definitivo. As telas de desenvolvimento são apresentadas nas Figuras 126 e 127.

Figura 126 – Plataforma de desenvolvimento Android Studio



Fonte: Próprio autor

Figura 127 – Plataforma de desenvolvimento Android Studio



Fonte: Próprio autor

#### 4.3.1. VALIDAÇÃO E APLICAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO

Esta etapa inicialmente iria ser realizada apenas com um potenciômetro variando o nível de tensão na porta analógica do ESP8266, para verificação da resposta do aplicativo, que foi programado para responder numa velocidade de 800ms. Este teste foi realizado e obtido resultados satisfatórios em relação ao tempo de resposta da placa e a visualização dos dados no aplicativo.

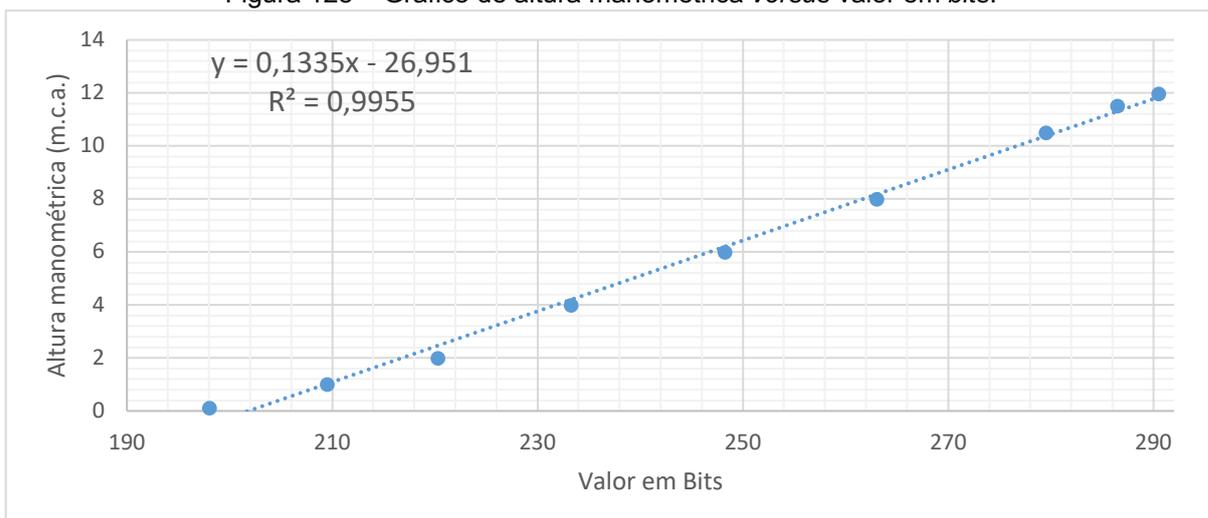
#### 4.4. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM AMBIENTE CONTROLADO

A Tabela 15 contém os pontos graduados e os valores em *bits* obtidos nas 4 leituras realizadas no ambiente controlado (bem como os valores médios) para a construção da curva de calibração.

Tabela 15 – Leituras de comparação entre altura manométrica e *bits*.

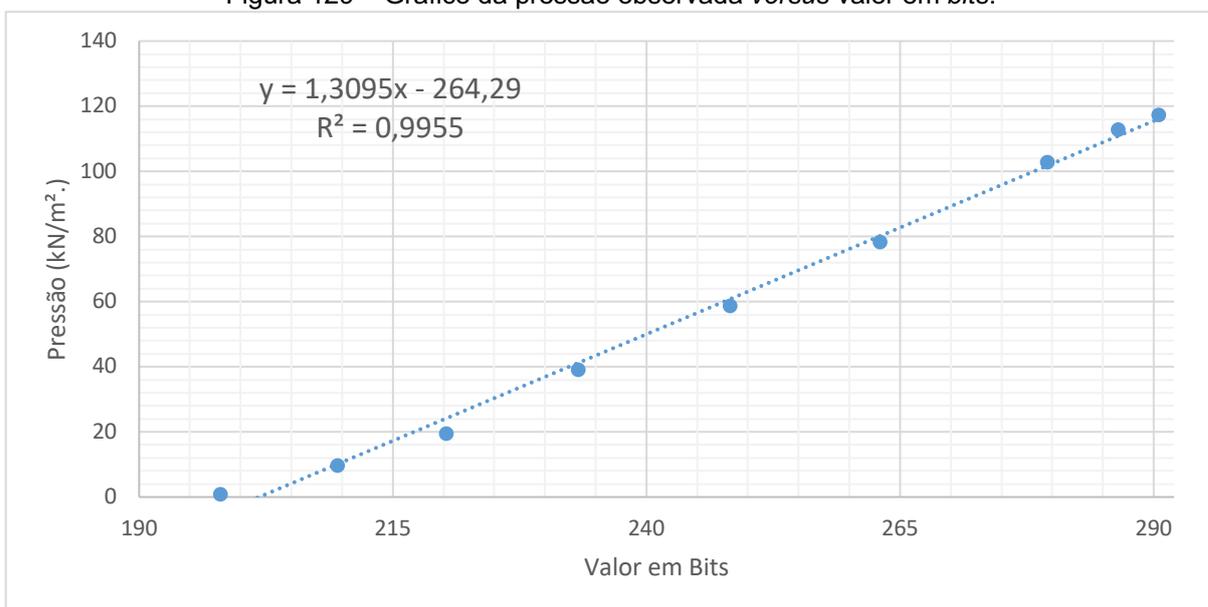
<b>Altura manométrica (m)</b>	<b>Valores em <i>Bits</i> (leituras)</b>				<b>Média</b>	<b>Pressão (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>0,1</b>	205	183	204	200	198	0,9806
<b>1</b>	209	210	209	210	209,5	9,806
<b>2</b>	218	219	223	221	220,25	19,612
<b>4</b>	233	234	233	233	233,25	39,225
<b>6</b>	248	249	247	249	248,25	58,838
<b>8</b>	262	264	264	262	263	78,451
<b>10,5</b>	280	279	280	279	279,5	102,966
<b>11,5</b>	288	286	286	286	286,5	112,773
<b>11,96</b>	291	318	262	291	290,5	117,284

Com os dados foi possível desenvolver o gráfico de dispersão com uma linha de tendência, encontrando uma função para a curva de calibração em que a variável independente “x” é o valor observado em *Bits* no aplicativo e a variável dependente “y” é o valor da altura manométrica observada, tal como verificado na Figura 128.

Figura 128 – Gráfico de altura manométrica *versus* valor em *bits*.

Fonte: Próprio autor.

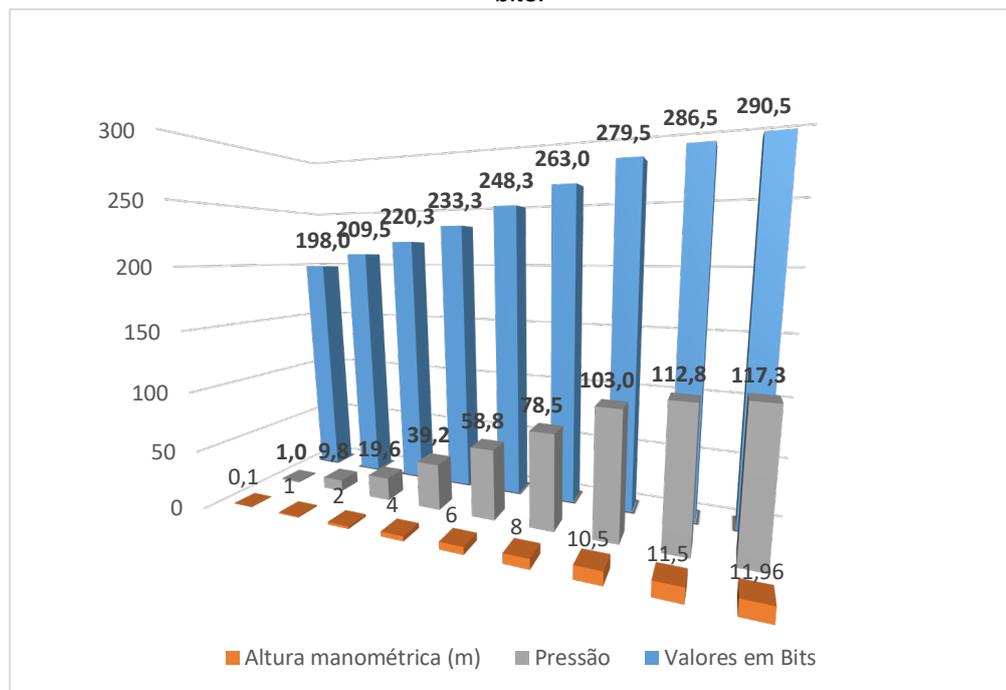
Através da relação entre altura manométrica em pressão, também foram estabelecidos valores para a construção do gráfico da Figura 129, com a criação de uma curva para valores de pressão.

Figura 129 – Gráfico da pressão observada *versus* valor em *bits*.

Fonte: Próprio autor.

Realizou-se também a comparação entre os valores de altura manométrica, pressão em kN/m² e valores em *bits*, como ilustra a Figura 130.

Figura 130 – Gráfico apresentando os valores de pressão observada, altura manométrica e valor em bits.



Fonte: Próprio autor

Estes foram os resultados obtidos através da curva de calibração realizados na Universidade Federal do Pará, em Tucuruí. Agora, com estes valores de referência, realizou-se ensaios em seis piezômetros em uma Barragem de uma Usina Hidrelétrica no Pará, como apresentado a seguir.

#### 4.5. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO EM CAMPO

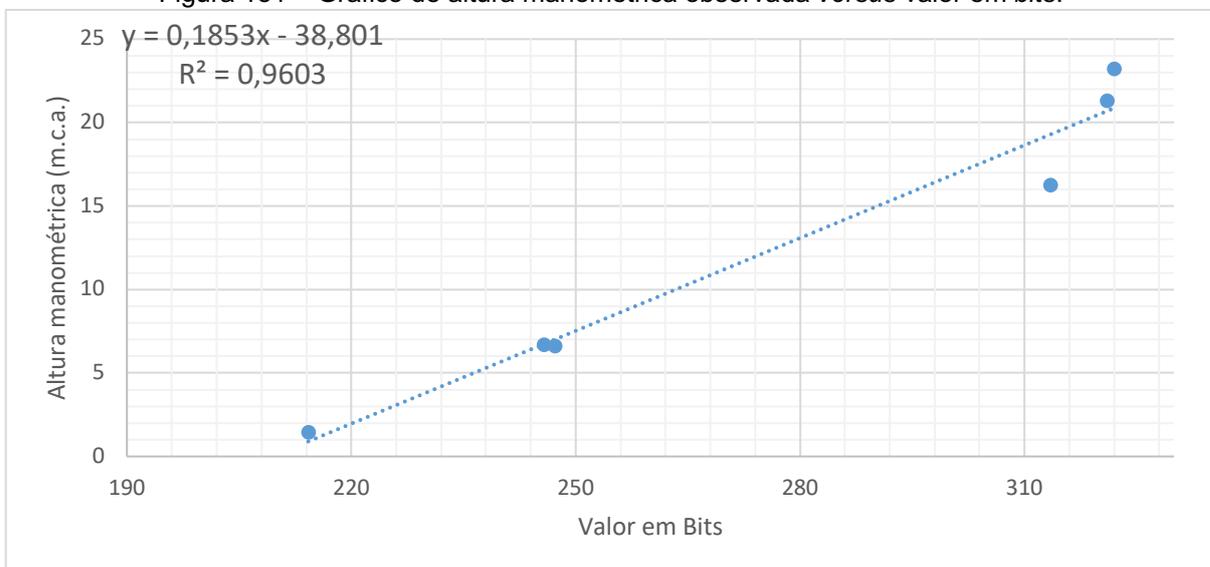
Os ensaios de campo, tal como o ensaio em ambiente controlado, geraram resultados, conforme dados registrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Leituras de comparação entre altura manométrica e bits.

PIEZÔMETRO	Altura manométrica (m)	Valores em Bits	Média	Pressão (kN/m²)
<b>PZ-04</b>	16,23	310 315 312 317	313,5	159,2163
<b>PZ-05</b>	21,29	320 321 322 321	321	208,8549
<b>PZ-06</b>	23,22	320 324 325 319	322	227,7882
<b>PZ-07</b>	6,61	247 246 247 249	247,25	64,8441
<b>PZ-08</b>	1,45	214 217 214 212	214,25	14,2245
<b>PZ-09</b>	6,69	245 246 247 245	245,75	65,6289

Através da anotação dos valores obtidos em campo foi possível desenvolver o gráfico de dispersão com uma linha de tendência, encontrando uma função para a curva de medição em que a variável independente “x” é o valor da altura manométrica observada e a variável dependente “y” é o valor observado em *Bits* no aplicativo, como mostra a Figura 131.

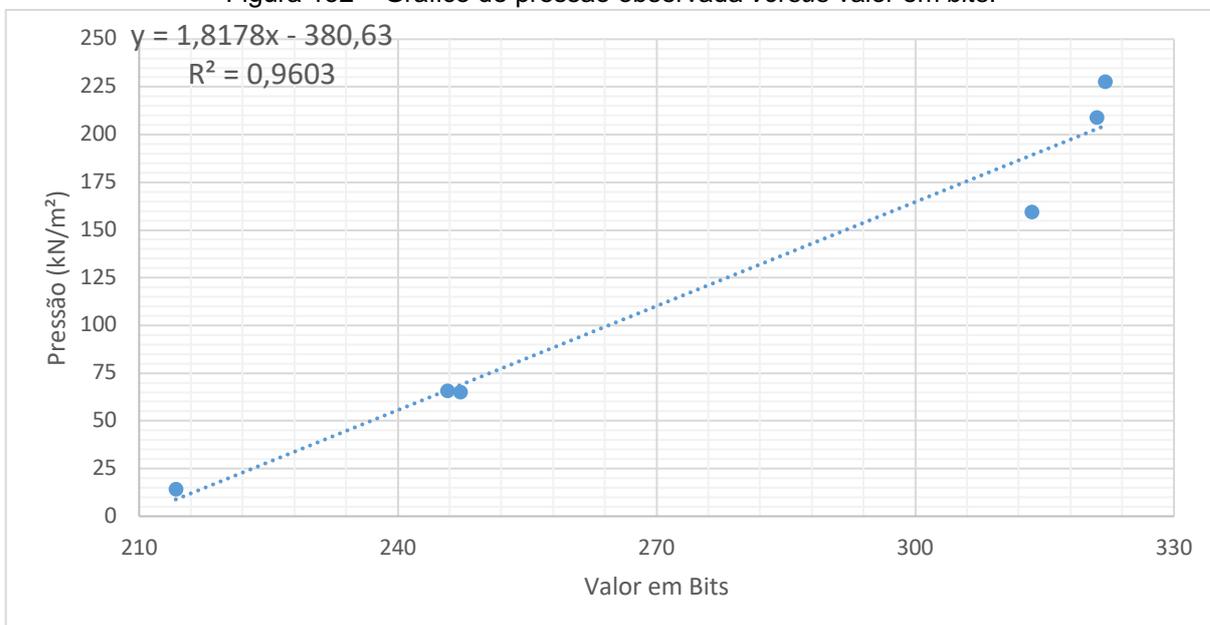
Figura 131 – Gráfico de altura manométrica observada *versus* valor em *bits*.



Fonte: Próprio autor.

O gráfico da Figura 132 mostra a relação entre pressão e os valores em *Bits*. Para o ensaio de campo, observou-se alguns pontos fora da linha de tendência. Iremos analisar a seguir as linhas de tendência da curva de calibração e da curva de ensaio de campo.

Figura 132 – Gráfico de pressão observada *versus* valor em *bits*.

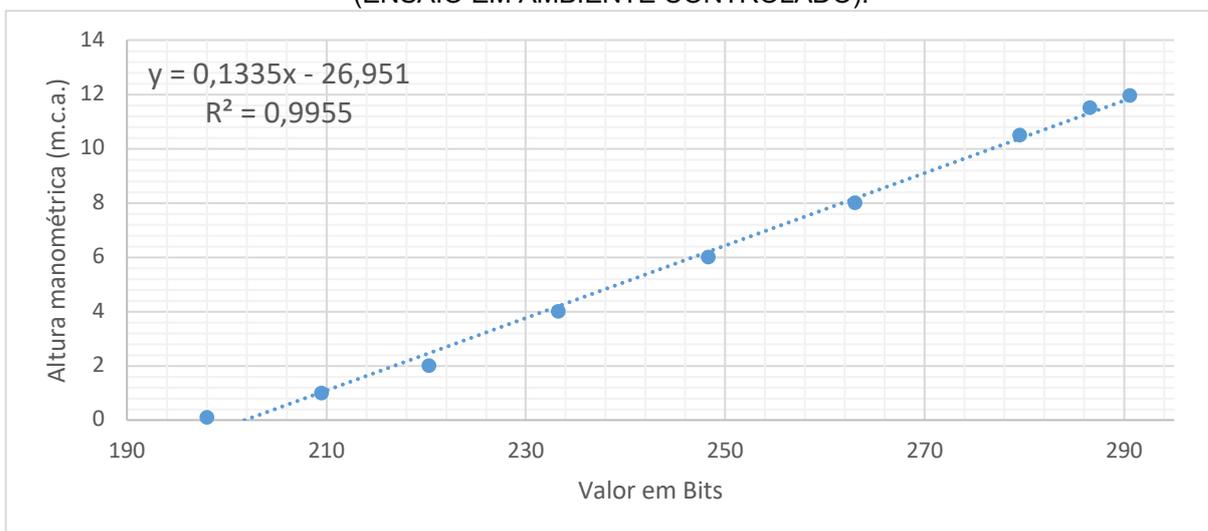


Fonte: Próprio autor

#### 4.6. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ENSAIO CONTROLADO E ENSAIO DE CAMPO

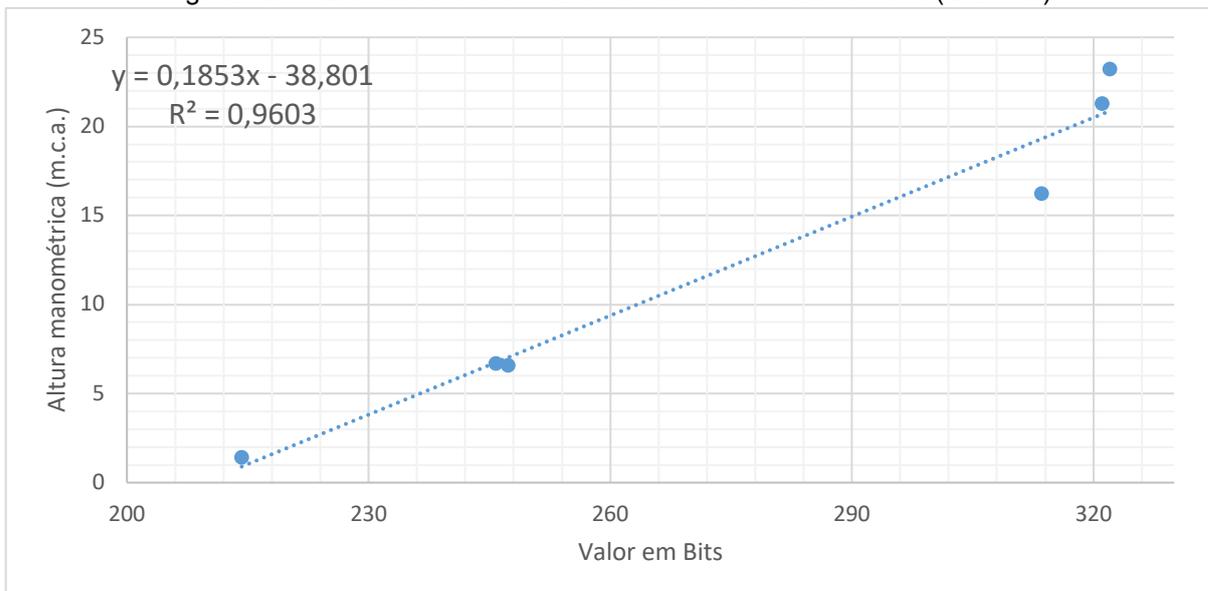
É de fundamental importância esta análise comparativa, pois estabelece alguns padrões paramétricos. Pode-se observar que no ensaio controlado houve menor dispersão entre os pontos, como indicado na Figura 133, enquanto que a dispersão dos pontos no ensaio de campo foi maior, como apresentado na Figura 134.

Figura 133 – Gráfico de altura manométrica *versus* valor em *bits*.  
(ENSAIO EM AMBIENTE CONTROLADO).



Fonte: Próprio autor.

Figura 134 – Gráfico de altura manométrica *versus* valor em *bits* (CAMPO).

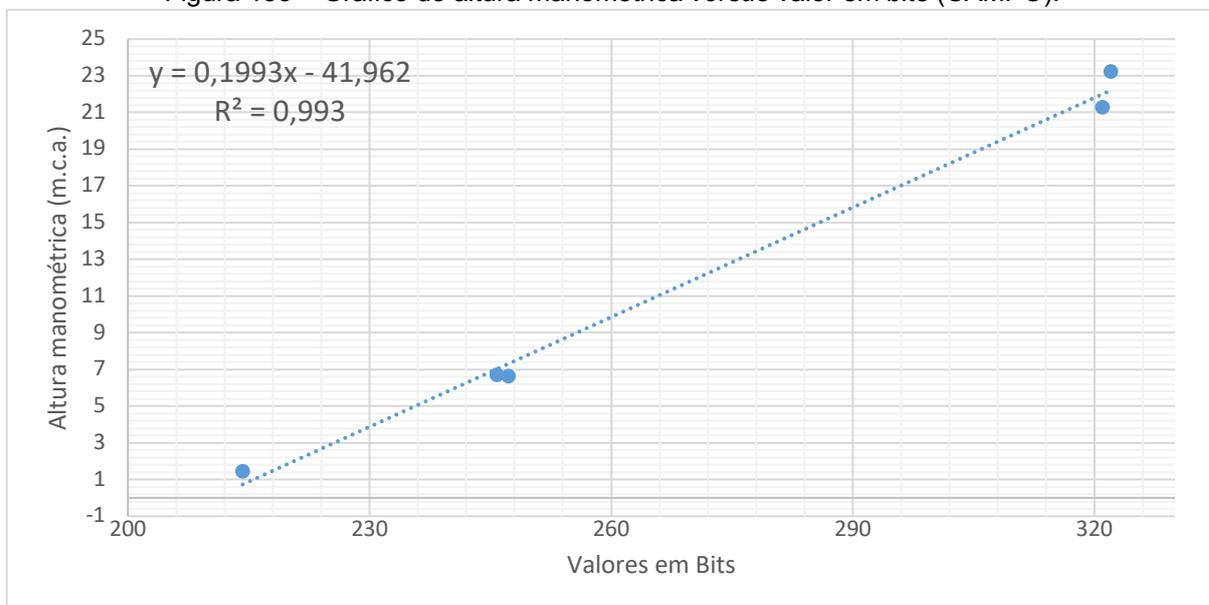


Fonte: Próprio autor.

Alguns fatores colaboraram para um ponto fora da curva no ensaio de campo, especificamente no ponto mais divergente. A forma geométrica do sensor de nível aliada ao pequeno peso inviabilizou a descida total do mesmo, fazendo com que o valor tivesse alteração considerável. Retirando-se o valor relacionado à problemática encontrada em

campo na instalação do sensor, observa-se uma convergência maior das funções do ensaio controlado e da medição em campo (Figura 135).

Figura 135 – Gráfico de altura manométrica *versus* valor em *bits* (CAMPO).



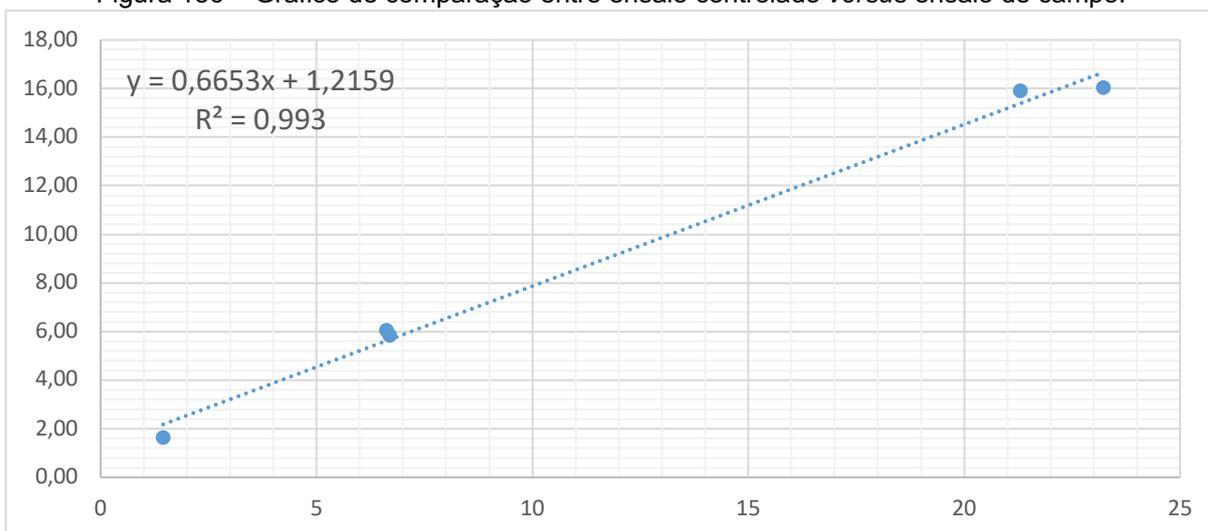
Fonte: Próprio autor

Utilizando-se a função da curva de calibração obtida em laboratório, em ambiente controlado, observou-se proximidade nos valores em *bits* relacionados às alturas manométricas do ensaio de campo para os valores abaixo de 10 m.c.a., como mostra a Tabela 17. Como não houve a possibilidade de realizar, em um ambiente controlado, leituras até 50 m.c.a. a curva de calibração teve suas restrições.

Tabela 17 – Valores adquiridos nas leituras de comparação entre altura manométrica e *bits* (CAMPO)

Valor médio medido ( <i>bits</i> )	Altura manométrica de campo (m.c.a.)	Altura manométrica estimada pela curva de calibração (m.c.a.)	Valor esperado pela relação entre <i>Bits</i> e altura manométrica (m.c.a.)
<b>214,25</b>	1,45	1,65	1,22
<b>245,75</b>	6,61	5,86	5,12
<b>247,25</b>	6,69	6,06	5,25
<b>313,50</b>	16,01	14,90	13,43
<b>321,00</b>	21,29	15,90	14,28
<b>322,00</b>	23,22	16,04	14,40

Logo a comparação de correlação entre o ensaio de campo e o ensaio controlado é apresentado abaixo na Figura 136 através da linha de tendência.

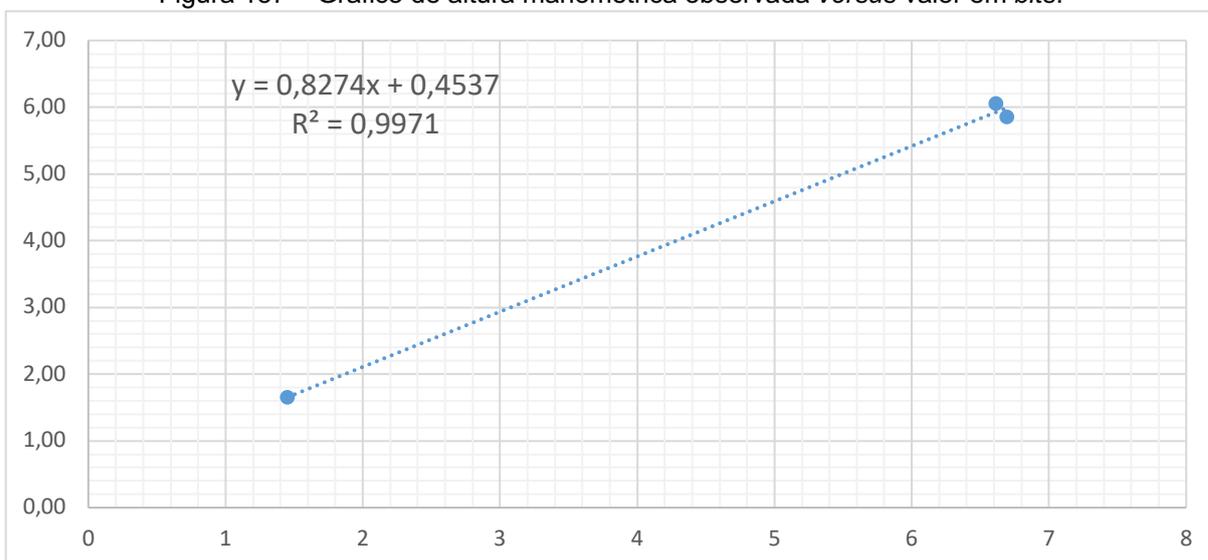
Figura 136 – Gráfico de comparação entre ensaio controlado *versus* ensaio de campo.

Fonte: Próprio autor

Se realizadas curvas de tendência na range de valores do ensaio controlado, como apresentado na Tabela 18, a curva de tendência do ensaio de campo tem maior convergência com os valores do ensaio controlado, como mostra a Figura 137.

Tabela 18 – Comparação de curvas para valores abaixo de 10 m.c.a.

Valor médio em <i>bits</i>	Altura manométrica de campo	Altura manométrica estimada pela curva de calibração
<b>245,75</b>	6,61	6,06
<b>214,25</b>	1,45	1,65
<b>247,25</b>	6,69	5,86

Figura 137 – Gráfico de altura manométrica observada *versus* valor em *bits*.

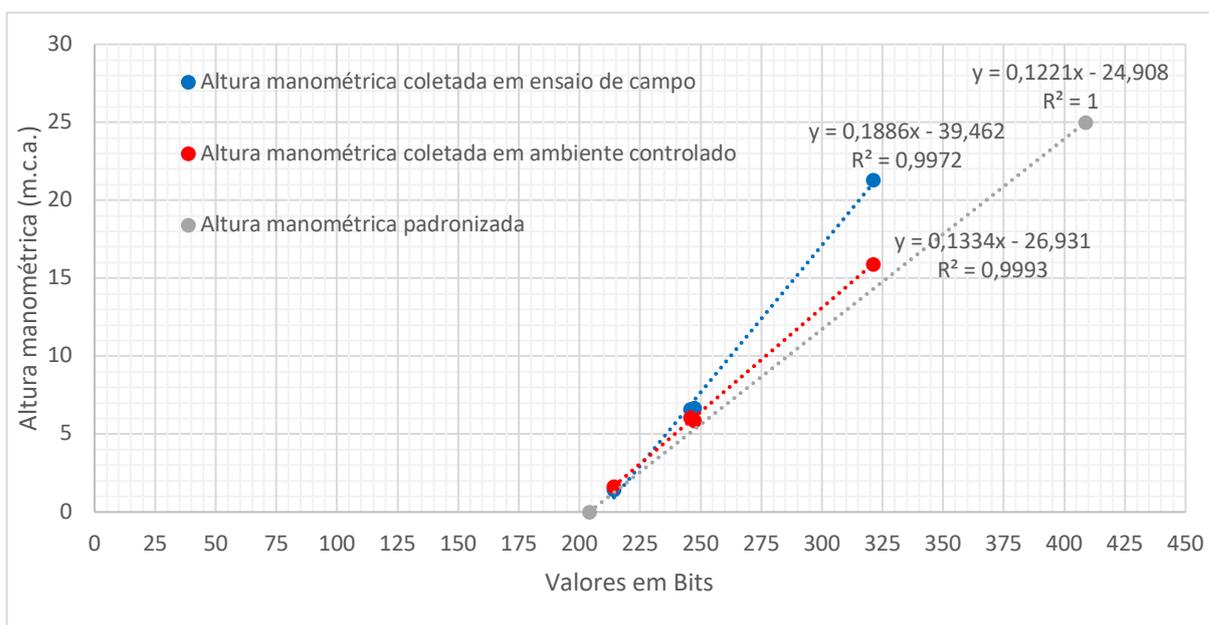
Fonte: Próprio autor.

Na análise geral, a maioria dos gráficos apresentados mostrou  $R^2=1$  em decorrência dos dados apresentados terem, ou serem considerados, relações diretas, como por exemplo: 4mA equivale a 0 m.c.a. e 20mA equivale a 100 m.c.a., logo a curva que relaciona estes valores não irá apresentar dispersão alguma, tendo como resultado uma reta que passa diretamente nos pontos. Na Tabela 18 é possível fazer uma análise coerente da dispersão dos dados em comparação dos resultados obtidos no ensaio controlado e no ensaio de campo.

A Figura 138 apresenta os dados referentes a: (a) curva da altura manométrica padronizada; (b) curva de leituras das alturas coletadas em ambiente controlado e (c) curva das leituras manométricas tomadas em campo. Analisando cada uma isoladamente, pode-se inferir que as leituras proporcionadas pelo sensor de pressão obtiveram valores com relação direta, alcançando  $R^2 = 1$  praticamente nas três situações. Já comparando as leituras tomadas no ambiente controlado e ambiente de campo com a curva padronizada, verificou-se que leituras manométricas de até aproximadamente 3 m.c.a, apresentaram boa convergência, enquanto que entre 3 m.c.a e 6 m.c.a houve certa dispersão entre as medições (1% aproximadamente). Leituras acima de 6 m.c.a. indicaram que tal dispersão já é considerável com valores médios superiores a 5%.

Para o monitoramento de pressões, valores até 10% não influenciam muito no quesito de segurança, como por exemplo, em uma altura manométrica de 10 m.c.a. equivale a uma pressão de 1 Bar, o que relacionado a uma altura manométrica de 100 m.c.a. ou 10 Bar seria 10% desse valor. Agora ultrapassando esse parâmetro já pode-se ter uma relevância neste diferencial.

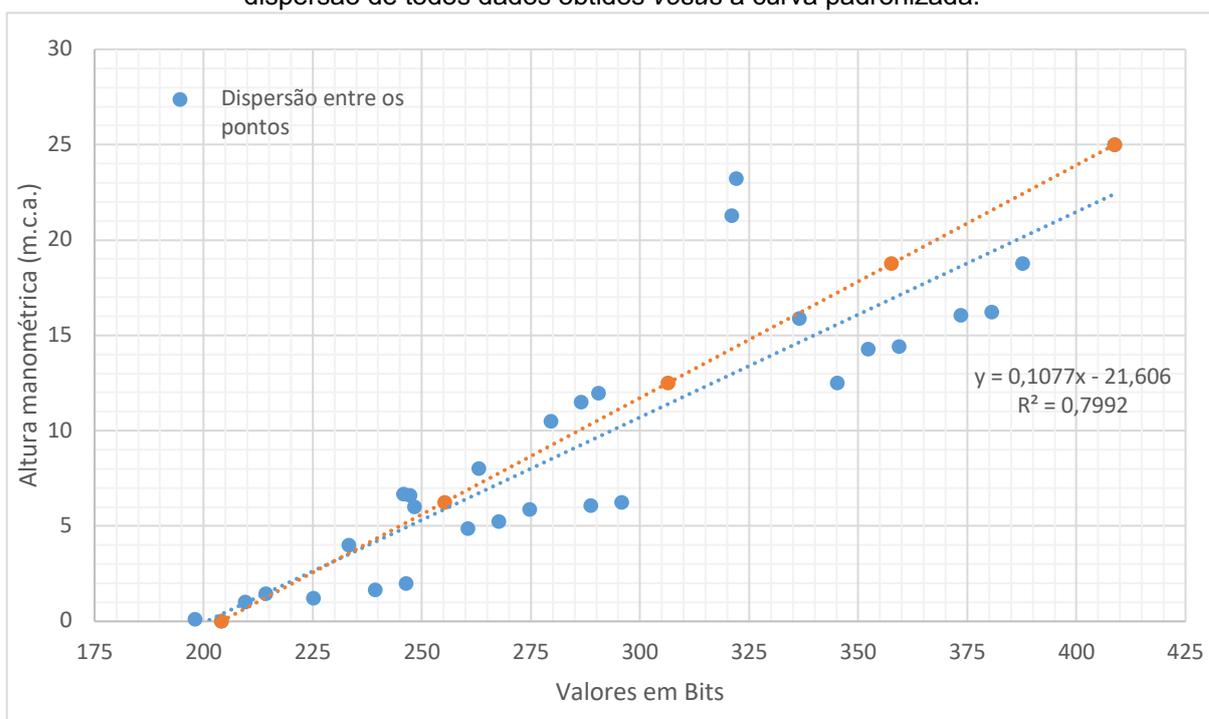
Figura 138 – Gráfico de comparação entre a altura manométrica padronizada e as leituras obtidas no ambiente controlado e em campo



Fonte: Próprio autor.

Partindo para uma análise de variabilidade entre as três situações (Figura 139), constatou-se um espalhamento entre os pontos, indicando considerável dispersão entre as leituras em ambiente controlado e em campo, com a curva padronizada, dado o  $R^2=0,7992$ . Desta forma entende-se que para que ocorra o ajuste nas leituras manométricas, deve-se atribuir um fator de correção, não sendo, porém, realizada esta etapa, devido a necessidade de coleta de repetidas leituras em campo, o que acabou sendo inviável devido às restrições de acesso à barragem para tal finalidade.

Figura 138 – Gráfico contendo a comparação entre a linha de tendência gerada pela análise de dispersão de todos dados obtidos *vesus* a curva padronizada.



Fonte: Próprio autor.

Conclui-se que o aplicativo proposto nesta pesquisa pode ser utilizado em casos de acompanhamento de leituras de instrumentos de barragem, demonstrado aqui pelas leituras das medições de pressão em um barramento existente. Chama-se a atenção para a necessidade de haver o ajuste das leituras de qualquer sensor utilizado, no que diz respeito à calibração do instrumento e consideração de fatores de correção, para que as leituras finais sejam coerentes com a realidade.

## 5. CONCLUSÕES

O aplicativo desenvolvido nesta pesquisa foi criado para monitorar remotamente um sensor, respondendo de forma eficaz, com tempo de resposta médio de 1 segundo. O acesso ao endereço IP foi estratégia assertiva no quesito acesso remoto. A rede utilizada nos testes foi uma rede exclusiva, para simular rede interna. Não foi implementado acesso via internet, tendo em vista os riscos de segurança da informação, porém o aplicativo tem todos os requisitos para a utilização de acesso *web* e está preparado para isso.

O *Data Logger* realizou, de forma efetiva, todos os comandos programados, referente ao envio dos dados para o aplicativo, respondendo rapidamente com tempo de amostragem de 800 milissegundos. O aplicativo “*logou*” perfeitamente no servidor, criado através da placa de desenvolvimento, o que possibilitou o link de forma direta do aplicativo com o Data Logger.

Como o aplicativo é um sistema piloto, os valores de referências utilizados foram obtidos através de uma curva padronizada. Verificou-se que leituras manométricas de até aproximadamente 3 m.c.a, apresentaram boa convergência, enquanto que entre 3 m.c.a. e 6 m.c.a. houve certa dispersão entre as medições (1% aproximadamente). Leituras acima de 6 m.c.a. indicaram que tal dispersão já é considerável com valores médios superiores a 5%. Valores até esta faixa de erro não representam grandes proporções. Se comparado com 100 m.c.a. por exemplo, 5 m.c.a. aparenta relevante, porém quando se utiliza as unidades de pressão, os valores são da ordem de 0.5 bar, 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> e 0.05 MPa.

O aplicativo se mostrou eficiente na identificação e apresentação dos dados em tempo real, tendo resposta rápida às mudanças de variações na coluna d’água, demonstrando sua eficácia no processo. E tendo em vista as dispersões dos dados, entende-se que para que ocorra o ajuste nas leituras manométricas, deve-se atribuir um fator de correção, não sendo, porém, realizado neste trabalho devido a necessidade de coleta de repetidas leituras em campo, o que acabou sendo inviável devido às restrições de acesso à barragem para tal fim.

### 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Ampliar a abrangência do sistema de monitoramento proposto, inserindo a implementação de alarmes de indicação dos limites de operação;
- Desenvolver data logger para de leituras de outros sensores;
- Utilização do sistema para acionamento de atuadores;
- criação de um banco de dados para armazenamento de informações relevantes aos processos aos quais forem implementados, possibilitando posterior consultas; geração de relatórios; ativação de alarme nos celulares especificados em caso de ocorrências.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HBM Test and Measurement. (16 de julho de 2019). *Sensores HBM*. Fonte: HBM Test and Measurement: <https://www.hbm.com/pt/3421/vishay-strain-gauge-comparativo/>
- ABMS, A. e. (2019). *PCH Apertadinho*. Fonte: ABMS: [www.abms.com.br](http://www.abms.com.br)
- ABNT. (1997). *NBR 13895 - Construção de poços de monitoramento e amostragem*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT, A. (1985). *NBR 9061/1985 - Segurança de instalação a céu aberto*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ACEPIC. (21 de julho de 2019). Fonte: ACEPIC Tecnologia: <https://www.acepic.com.br/microcontroladores-pic/plataforma-acepic-base-ii>
- AGUIRRE, L. (2007). *Enciclopédia de automática: controle e automação, volume II*. São Paulo: Blucher.
- AMARAL, C. (2012). *Notas de Aula de Instrumentação Industrial*. Curitiba: UFPR. Fonte: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/camaral/instrumentacao-industrial/9%20-%20Nivel.pdf/view>
- Amazon. (2019). *Amazon*. Fonte: [https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/81U4jvpGnYL.\\_SX522\\_.jpg](https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/81U4jvpGnYL._SX522_.jpg)
- AMORIM, E. (2010). *Acidente na Barragem Engº Armando Ribeiro Gonçalves, em Açú RN*. Fonte: <http://www.profiscientia.ifmt.edu.br/profiscientia/index.php/profiscientia/article/view/61/64>
- ANA, A. (2016). *Curso de Segurança de Barragens - Boas Práticas - Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE)*. São Paulo: ANA.
- ANA, A. (2016). *Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens - Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens - Volume VII*. Brasília: ANA.
- ANA, A. (2016). *Manual do Empreendedor Sobre Segurança de Barragens - Guia Prático de Pequenas Barragens - Volume VIII*. Brasília: ANA.
- ANDRADE, R. M. (1981). *Desempenho dos Sistemas Usuais de Alívio de Subpressões em Estruturas Hidráulicas de Concreto*. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Recife: CBGB.

- ANDRIOLO, F. (1993). *Inspeção e Controle de Qualidade do Concreto*. São Paulo: Editora Loyola.
- ARAUJO, G. A. (2012). *Notas de Aula de Instrumentação Eletrônica - Engenharia Elétrica*. Belém: UFPA.
- Ariasat. (27 de maio de 2019). Fonte: [http://www.ariasat.net.br/Produtos\\_Servicos/comunicador-via-satelite.aspx](http://www.ariasat.net.br/Produtos_Servicos/comunicador-via-satelite.aspx)
- ARMY CORPS OF ENGINEERS, U. (2004). *General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams - Manual No. 111 0-2-2300*. Washington, DC: US Army Corps of Engineers.
- ASUS. (28 de junho de 2019). *ASUS Tinker Board - um computador de placa única baseado em ARM*. Fonte: Asus: <https://www.asus.com/br/Single-Board-Computer/Tinker-Board/>
- ÁVILA, J. (2008). *Mesa Redonda Sobre Segurança de Barragens. VI SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS*. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens.
- ÁVILA, J. P., & FUSARO, T. C. (2017). *II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito*. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Barragens.
- AVILA, P. (2019). *Sistema de Monitoramento SYSDAM*. Fonte: <https://www.pimentadeavila.com.br>
- AZEVEDO NETTO, J. (1998). *Manual de Hidráulica*. São Paulo: Edgard Blücher.
- BALBI, D. (2008). *Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti – MG - Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte: UFMG.
- BALBI, D. (2008). *Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti – MG. Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte: UFMG.
- BALBINOT, A., & BRUSAMARELLO, V. J. (2010). *Instrumentação e Fundamentos de Medidas, Vol.01 - 2ª Ed.* São Paulo: LTC.
- BARROS, L. (19 de Abril de 2018). Fonte: Things Hacker Team: <https://medium.com/tht-things-hackers-team/tipos-de-arduino-3c3206c46bc>
- BAYRAK, T. (2008). Verifying Pressure of Water on Dams, a Case Study. *Sensors*. doi:10.3390/s8095376
- BENNETT, P. (1946). *The Effect of Blankets on Seepage Through Pervious Foundations. Transactions...* New York: ASCE.

- BERMEJO, J. (2019). *Inundaciones de Octubre de 1982: La Pantanada de Tous – Reportaje Fotográfico, Parte I*. Acesso em 22 de 04 de 2019, disponível em Tempo: <https://www.tiempo.com/ram/2723/inundaciones-de-octubre-de-1982-la-pantanada-de-tous/>
- BERRE, T., & BEJERRUM, L. (1973). Shear Strength of Normally Consolidated Clays. *8th ICSMFE - International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (pp. p. 39-49). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- BEZERRA, Á. C. (2014). *Controle de Pressão Aplicado em um Sistemas Hidráulicos de Bombeamento para a proteção contra o golpe de Aríete*. Belém: UFPA.
- BHATTI, M. A. (1994). Monitoring Experience at Tarbela Dam. in *INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS* (pp. p. 763-780). Durban: CIGB-ICOLD.
- BIEK, R. (1999). *The Geology of Quail Creek State Park. Public Information Series 63, Division of Department of Natural Resources*. Utah Geological Survey,.
- BIRD, R. B., STEWART, W. E., & LIGHTFOOT, E. N. (2002). *Transport Phenomena, Second Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- BORGES, C., & MASO, T. (2017). *O caso do rompimento da barragem no Rio Doce*. Sur - Revista Internacional de Direitos Humanos. São Paulo: SUR.
- BOYES, W. (2002). *Instrumentation Reference Book. With specialist contributions. Third Edition*. Burlington: Butterworth-Heinemann Publications.
- BRASIL, L. (2005). *Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem Rio de Pedras. Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte: UFMG.
- BUKENYA, P., MOYO, P., BEUSHAUSEN , H., & OOSTHUIZEN, C. (November de 2014). Health monitoring of concrete dams: a literature review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring. Vol 4. Number 4*. doi:10.1007/s13349-014-0079-2
- CALLISTER JR., W. (2008). *Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução*. Rio de Janeiro: LTC.
- CAMARGO, W. (2014). *Estudo de Acontecimentos Históricos de Ruptura de Barragens*. Campo Mourão: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.

- CAMPANELA, R. G., & MICHELL, J. K. (1968). Influence of Temperature Variations on Soil Behavior. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, pp. 709-734.
- CAPUTO, H. P. (1996). *Mecânica dos Solos e suas Aplicações - Fundamentos - 6ª Edição - Reimpressão*. São Paulo: LTC.
- CARMO, M. S. (2015). *Notas de Aula - Propriedades do Solo*. Sergipe: UFSE.
- CARONE, M., & ELÍSIO, G. (25 de 01 de 2019). *Barragem da Vale se rompe em Brumadinho, na Grande BH; Corpo de Bombeiros confirma 200 desaparecidos;*. Fonte: Vi o Mundo: <https://www.viomundo.com.br/denuncias/barragem-da-vale-estoura-em-brumadinho-na-grande-bh-videos-mostram-o-inicio-e-a-destruicao-inicial-veja.html>
- CARVALHO, A., & PENNA NETO, F. (2007). *UHE TUCURUÍ - ETAPA DE EXPANSÃO ABERTURA DE BRECHA NA BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA PARA INUNDAÇÃO CONTROLADA DO RECINTO DE MONTANTE DA TOMADA D'ÁGUA*. Belém: Comitê Brasileiro de Barragens.
- CARVALHO, D., & PASCHOALIN FILHO, J. (2004). Estudo da estabilidade de pequenas barragens de terra compactadas em três teores de umidade. *EXACTA*, p.55-68.
- CARVALHO, Z. (2014). *Comportamento de Barreiras Minerais com solo compactado na faixa granulométrica ótima para a contenção de Líquidos Orgânicos*. Salvador: UFBA.
- CASAGRANDE, A., & CARRILLO, N. (1944). Shear Failure of Anisotropic Materials. *Journal of the Boston Society for Civil Engineers*, v31, p.122-135.
- CASSIOLATO, C. (2010). *MEDIÇÃO DE PRESSÃO: Características, Tecnologias e Tendências*. Acesso em 27 de 04 de 2019, disponível em Nova SMAR S/A: <http://www.smar.com/newsletter/marketing/index23.html>
- CASSIOLATO, C. (25 de 01 de 2012). *Transmissor de Pressão com sensor capacitivo: alta exatidão com leitura direta e totalmente digital*. Acesso em 27 de 04 de 2019, disponível em Instrumatic - Instrumentation Experts: <https://www.instrumatic.com.br/artigo/transmissor-de-pressao-com-sensor-capacitivo-alta-exatidao-com-leitura-direta-e-totalmente-digital>

- CASTILHO, B. (2017). *Análise de gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano*. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: UFOP.
- CASTILHO, B. (2017). *Análise dos Gatilhos de Liquefação Dinâmica e Modelagem Numérica da Barragem do Germano - Dissertação de Mestrado*. Ouro Preto: UFOP.
- CASTRO, F. (2001). *GUIA BÁSICO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS*. São Paulo: CBDB.
- CAVALCANTE, I., & REBOUÇAS, A. (1991). *Avaliação das obras de captação das águas subterrâneas na região de Atibaia, Estado de São Paulo*. São Paulo: USP.
- CBDB, C. (1982). *Main brazilian dams: design, construction and performance*. Brasil: ICOLD Publications.
- CEDERGREN, H. (1989). *Seepage, drainage and flow nets*. 3th. New York: Jonh Wiley & Sons.
- CEDERGREN, H. R. (1977). *Seepage, Drainage and Flow nets*. 2.ed. New York: John Wiley and Sons.
- CETEM, C. (14 de 01 de 2016). Rompimento de barragem de rejeitos de mineração de ferro em Itabirito (MG) provoca mortes. *Verbetes*. Fonte: <http://verbetes.cetem.gov.br/verbetes/ExibeVerbete.aspx?verid=209>
- CHACINSKI, Z., DLUZEWSKI, J., & FIEDLER, K. (1994). Analysis of Failure Mechanism for Raised Iwiny Dam by Finite Element Method. *INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS* (pp. p. 77-84). Durban: CIGB-ICOLD.
- CHANDY, K. T. (2010). Design of Earthen Tanks - Booklet No. 574 - Soil and Water Conservation. *Jornal of Soil And Water Conservation*.
- CHANDY, K. T. (2010). Design of Earthen Tanks - Booklet No. 574 - Soil and Water Conservation. *Jornal of Soil And Water Conservation*.
- CHAVES, J. (2001). *Uso de tecnologia GPS na monitoração de deformação: sistemas, etapas e experimentos*. Tese de Doutorado. São Carlos: USC.
- CHILDS, E. (1969). *An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomena*. London: John Wiley & Sons.
- CHILDS, E., & COLLIS-GEORGE, N. (1950). *The permeability of Porous Materials*. London: Proc. Roy Soc.
- CHRISTENSEN, K. (2002). *Percolation Theory*. London: Imperial College London.

- COBA S.A. (2014). *Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens*. Brasília: ANA.
- COELHO, A. (17 de janeiro de 2017). *Instrumentação Geotécnica em Barragens de Terra e Enrocamento*. Fonte: Linkdin: <https://www.linkedin.com/pulse/instrumenta%C3%A7%C3%A3o-geot%C3%A9cnica-em-barragens-de-terra-e-santos-coelho/>
- COHIDRO. (14 de 01 de 2019). *Governo do Estado pesquisa solução à crise hídrica de Tobias Barreto no subsolo sergipano*. Fonte: Companhia de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Irrigação de Sergipe: <https://cohidro.se.gov.br/?p=13528>
- COLEMAN, N., KAKTINS, U., & WOJNO, S. (2016). Dam-Breach hydrology of the Johnstown flood of 1889—challenging the findings of the 1891 investigation report. *Heliyon*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2016.e00120>
- COLLISCHONN, W. (1997). *Análise do Rompimento da Barragem de Ernestina - Dissertação de Mestrado*. Porto Alegre: UFRGS.
- CONTRERAS, I., & HERNÁNDEZ, S. (2016). TECHNIQUES FOR PREVENTION AND DETECTION OF LEAKAGE IN DAMS AND RESERVOIRS. *Collaborative Management of Integrated Watersheds*, p. 785-814.
- CONTROL VOLTAGE. (01 de junho de 2019). *Arduino Uno R3 Development Board*. Fonte: Control Voltage Music Electronic: <https://www.controlvoltage.net/arduino-arduino-uno-r3-development-board.html>
- COPPE. (2012). *Monitoramento das condições climáticas associadas às condições geológicas-geotécnicas da Rodovia BR-116/RJ e seu entorno - Relatório Final*. Rio de Janeiro: UFRJ.
- COSTA, F., BACELLAR, L., & SILVA, E. (2007). Vertedores portáteis em microbacias de drenagem. *Geociências*, 213-218.
- COSTA, W. D. (2012). *Geologia de Barragens*. São Paulo: Oficina de Textos. Fonte: Oficina de Textos: <https://www.ofitexto.com.br/comunitexto/conheca-todos-os-tipos-de-barragem/>
- CRUZ, P. T. (1996). *100 Barragens Brasileiras, Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto. 3ª Reimpressão 2017*. São Paulo: Oficina de Textos.
- CRUZ, P. T. (2004). *100 Barragens Brasileiras - Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos*. São Paulo: Oficina de Textos.

- CRUZ, P. T. (31 de 08 de 2017). Curso de Acidentes em Barragens - Material de apoio. São Paulo: Oficina de Textos.
- CURVELLO, A. (29 de Abril de 2015). *Embarcados*. Fonte: <https://www.embarcados.com.br/modulo-esp8266/>
- DARCY, H. (1856). *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon - Exposition et application - Des Principes a Suivre et des Formules a Employer*. Paris: Victor Dalmont Éditeur.
- DAS, B. M. (2007). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning.
- DAVIES, M., MCROBERTS, E., & MARTIN, T. (2002). *Static liquefaction of tailings – Fundamentals and case histories*. In *proceedings Tailings Dams*. Las Vegas: ASDSO/USCOLD.
- DAVIES, W., BAILEY, J., & KELLY, D. (1972). *West Virginia's Buffalo Creek Flood: A Study of the Hydrology and Engineering Geology*. Washington, DC: Geological Survey.
- DE CAMPOS, T. (1979). *Temperature Effects on the Engineering Properties of Saturated Clayey Soils*. London: Imperial College of Science and Technology .
- DE CEA, J. (2006). *Segurança de Barragens: Experiência Espanhola. Curso de Exploração e Segurança de Barragens*. . Lisboa: Instituto Nacional da Água.
- DE MELLO, V. F. (1977). *Reflections on Design of Practical Significance to Embankments Dams*. (Vols. 27, n.3). Géotechnique.
- DE SORTIS, A., & PAOLIANI, P. (2007). Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring. *Engineering Structures*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.04.022>
- DECIV, D. d. (2016). *Notas de Aula - Vertedores*. Ouro Preto: UFOP.
- DETTMER, P. (2013). *Estudo da Capacidade de Descarga de Vertedouros de Baixa Queda com Elevado Grau de Submersão*. Curitiba: UFPR.
- DIAS, C. (2012). *Técnicas Avançadas de Instrumentação e Controle de Processos: ênfase em petróleo e gás*. Rio de Janeiro.
- DIAS, F. (2015). *Filtros em barragens de aterro: caracterização da sua permeabilidade. Dissertação de Mestrado*. Lisboa: Universidade Nova Lisboa.
- DIGITEC. (01 de junho de 2019). *ASUS Tinker Board S (RK3288)*. Fonte: Digitec: <https://www.digitec.ch/en/s1/product/asus-tinker-board-s-rk3288-development-boards-kits-7950015>

- DIGITROL. (2019). Ebook - Aplicações de Saneamento. São Paulo.
- Direct Industry. (16 de julho de 2019). *Shenzhen Socan Technologies Co.,Ltd*. Fonte: Sensor Hall Effect: <http://www.directindustry.com/pt/prod/shenzhen-socan-technologies-co-ltd/product-132598-1696332.html>
- DUARTE, A. (2004). *Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica*. Rio de Janeiro: PUC/RJ.
- DUARTE, A. (17 de 04 de 2019). <http://pioneiro.clicrbs.com.br/rs/>. Fonte: Pioneiro: <http://pioneiro.clicrbs.com.br/rs/geral/cidades/noticia/2014/02/volume-de-agua-que-escorre-do-marrecas-em-caxias-do-sul-equivalaria-ao-consumo-medio-de-1-mil-familias-4407387.html>
- EHIOROBO, J., & IRUGUE-EHIGIATOR, R. (2011). Monitoring for Horizontal Movement in an Earth Dam Using Differential GPS. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, p. 908-913.
- ELETROBRAS, C. (2003). *Crerios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. Brasília: CBDB.
- ELETRÔNICA, I. (2018). *TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO 12MM*. Acesso em 27 de 04 de 2019, disponível em Imagine Eletrônica Robótica e Componentes: <https://imagineeletronica.lojavirtualnuvem.com.br/modulos/transdutor-piezoelétrico-12mm/>
- ELIAS. (23 de 06 de 2015). Fonte: BH Nostalgia - Imagens antigas de alta resolução de Belho Horizonte: <http://bhnostalgia.blogspot.com/2015/06/barragem-da-pampulha.html>
- ES, H. (02 de 10 de 2018). *Governo do Estado e Cesan assinam contrato para construção de barragem na Grande Vitória/ES*. Acesso em 21 de 04 de 2019, disponível em Portal Tratamento de Água: <https://www.tratamentodeagua.com.br/cesan-construcao-barragem-grande-vitoria-es/>
- FAZAN, J., CHAVES, J., BARBOSA, M., CERTARI JUNIOR, E., GOMES, A., OLIVAL, V., . . . HASEGAWA, J. (2003). *Análise de deslocamento em Barragens com GPS e levantamentos Geodésicos*. Belo Horizonte: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia.
- FEAM , F. (2007). *Relatório sobre a Ruptura da Barragem de São Francisco, da Mineração Rio Pomba Cataguases, Situada em Mirai, MG. FE-100-RL-11318-*

- 00, Março de 2007. [Relatório Técnico]. Miraí: Pimenta de Ávila Consultoria Ltda.
- FEITOSA, V. (26 de 02 de 2019). Chuvas fortes causam rompimento de barragem de açude no Sertão da PB. *Portal T5 - Paraíba*. Fonte: <https://www.portalt5.com.br/noticias/paraiba/2018/2/61257-chuvas-fortes-causam-rompimento-de-barragem-de-acude-no-sertao-da-pb>
- FEMA, F. (2001). *The National Dam Safety Program Research Needs Workshop on Embankment Dam Failure Analysis*. Oklahoma: FEMA.
- FERC, F. (2016). *Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects*.
- FERNANDO, P. (20 de 04 de 2019). *Notas de Aula - Prof. Fernando*. Fonte: Engenharia de Biosistemas - USP: [http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb472/Aula\\_12/Aula%2012%20-%20Vertedor%20circular.png](http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb472/Aula_12/Aula%2012%20-%20Vertedor%20circular.png)
- FERREIRA, A. B. (2004). *Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa - Versão Digital*. São Paulo: Positivo Informática LTDA.
- FONSECA, A. (2003). *Auscultação por instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento para Geração de Energia Elétrica - Estudo de caso das barragens da UHE São Simão*. Ouro Preto: UFOP.
- FONTENELLE, R. (19 de Abril de 2012). *O Sistema Operacional GNU*. Fonte: Free Software Foundation: <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.pt-br.html>
- FRADEN, J. (2010). *Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications - Fourth Edition*. New York: Springer.
- FREAD, D. (1988). The technique for implicit dynamic routing in rivers with tributaries. *Water Research Resources*. Vol. 9, n. 4, p. 918-926.
- FREIRE NETO, J. (2009). *Estudo da Liquefação Estática em Rejeitos e Aplicação de Metodologia de Análise de Estabilidade*. Ouro Preto: UFOP.
- FUSARO, F. (1983). *Uma Análise do comportamento das células de carga e dos piezômetros pneumáticos fabricados pela COPPE para utilização no metrô do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- FUSARO, T. C. (2007). *Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau*. Ouro Preto: UFOP.
- GAIOTO, N. (1998). *Barragens de terra e enrocamento. 1ª Edição*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos (USP).

- GAIOTO, N. (2003). *Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento*. São Carlos: EESC.
- GOKON. (2013). *Instruction Manual Model 4500MLP - Multi-level Vibrating Wire Piezometer*. Lebanon: GeoKon.
- GERMAN, R. (2014). Thermodynamic and Kinetic Treatments. Em *Sintering: from Empirical Observations to Scientific Principles*. New York: Elsevier.
- GIKAS, V., & SAKELLARIOU, M. (2008). Settlement analysis of the Mornos earth dam (Greece): Evidence from numerical modeling and geodetic monitoring. *Engineering Structures*. doi:10.1016/j.engstruct.2008.03.019
- GIL, E. J. (2014). *CURSO SEGURANÇA DE BARRAGENS - MÓDULO I – BARRAGENS: ASPECTOS LEGAIS, TÉCNICOS E SÓCIOAMBIENTAIS - UNIDADE 8: ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS*. Brasília: Agência Nacional de Aguas.
- GOULD, J. P., & LACY, H. S. (1973). *Seepage Control in Dam Rehabilitation. Geotechnical Practice in Dam Rehabilitation - Proceedings of the Specialty Conference Torun: American Society of Civil Engineers (ASCE)*. New York .
- GOVERNO FEDERAL, M. (2002). *Manual de Segurança e Inspeção de Barragens*. Brasília: Ministério da Integração Nacional.
- GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. (2009). *A Metalurgia do Pó*. São Paulo: Metallum.
- GUINARD, D. D., & TRIFA, V. M. (2016). *Building the Web of things - With Examples in Node.js and Raspberry Pi*. Shelter Island: MANNING.
- GULER, G., KILIC, H., HOSBAS, G., & OZAYDIN, K. (2006). Evaluation of the movements of the dam embankments by means of geodetic and geotechnical methods. *Journal of Surveying Engineering*, p. 31-39.
- HACHICH, W., FALCONI, F., SAES, J., FROTA, R., CARVALHO, C., & SUSSUMU, N. (1998). *Fundações Teoria e Prática*. São Paulo: PINI.
- HARRISON, S. (2016). St. Francis Dam collapse left a trail of death and destruction. *Los Angeles Times*. Fonte: <https://www.latimes.com/local/california/la-me-stfrancis-dam-retrospective-20160319-story.html>
- HEXAGON. (2019). *Hexagon Geosystems*. Fonte: Leica Geosystems: <https://hexagon.com/about/divisions/geosystems>
- HIGGINS, J., KONRAD, C., WARNER, A., & HICKEY, J. (February de 2011). A Framework for Monitoring, Reporting and Managing Dam Operations for

- Environmental Flows at Sustainable Rivers Project Sites . *Monitoring for Environmental Flows*, pp. 1-43.
- HRADILEK, P. (2002). *Avaliação de Pequenas Barragens*. Brasília: Bureau of Reclamation.
- HUMES, C. (1980). Critérios de Projetos de Filtros de Proteção. *Seminário apresentado à EPUSP*.
- HUMES, C. (1985). *Porosimetria de filtros de proteção: uma análise de critérios de filtros para materiais granulares*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: EPUSP.
- HUMES, C. (1995). *Consideração sobre a determinação da distribuição de vazios de filtros de proteção de obras geotécnicas*. Tese de Doutorado. São Paulo: EPUSP.
- IBGE. (2017). Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE*.
- ICOLD. (1987). *Dam Safety guidelines - International Commission on Large Dams. Bulletin 59*. Paris: ICOLD.
- ICOLD, I. (1974). *Lessons from dam incidents*. Paris: ICOLD.
- INDIAMART. (01 de junho de 2019). *Arduino Mega 2560 Board*. Fonte: Indiamart: <https://www.indiamart.com/proddetail/arduino-mega-2560-board-14007651533.html>
- INSTRUMENTS, S. (27 de 04 de 2019). *PNEUMATIC PIEZOMETER*. Fonte: Soil Instruments: <https://soil.co.uk/products/water-monitors-piezometers-meters/pneumatic-piezometer/>
- JAHA, Johnstown Area Heritage Association. (2019). *Gallery of South Fork Dam Images*. Fonte: JAHA - Johnstown Area Heritage Association: [https://www.jaha.org/edu/flood/why/img/dam\\_gallery/pages/F-P1\\_Spillway\\_drawing.html](https://www.jaha.org/edu/flood/why/img/dam_gallery/pages/F-P1_Spillway_drawing.html)
- JANSEN, R. B. (1980). *Dam and Public Safety. USA: Water Resources Technical Publication*. U. S. Department of the Interior.
- JM ECOSOLAR. (27 de maio de 2019). Fonte: [https://jm-ecosolar.lojaintegrada.com.br/kit-gerador-de-energia-solar-20wp-gera-ate-65whdia?rhWid=1&utm\\_source=roihero&utm\\_medium=roihero&utm\\_content=roihero](https://jm-ecosolar.lojaintegrada.com.br/kit-gerador-de-energia-solar-20wp-gera-ate-65whdia?rhWid=1&utm_source=roihero&utm_medium=roihero&utm_content=roihero)

- KALKAN, Y. (2012). Geodetic deformation monitoring of Ataturk Dam in Turkey. *Arab J. Geoci - Saudi Society for Geosciences*, p. 397-405. doi:DOI 10.1007/s12517-012-0765-5
- KLAR, A. E. (1984). *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo: Nobel.
- KOSOW, I. I. (1981). *Maquinas Elétricas e Transformadores*. Porto Alegre: Editora Globo.
- KRETCHOU, P. O. (2012). Curso de Redes. *Os Softwares Livres*.
- KRYNINE, D. (1941). *Soil Mechanics*. New York: Mc Graw-Hill.
- KULKARNI, D., & KULKARNI, M. (1994). Safety Improvement of Some Large Dams in Maharashtra, India. *INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS* (pp. p. 143-156). Durban: CIGB-ICOLD.
- KYOWA. (16 de julho de 2019). KYOWA. Fonte: KYOWA-EI: [https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain\\_gages/order/index.html](https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/strain_gages/order/index.html)
- LADEIRA, J. E. (2007). *AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA EM BARRAGEM DE TERRA, SOB O CENÁRIO DE EROSÃO TUBULAR REGRESSIVA, POR MÉTODOS PROBABILÍSTICOS O CASO UHE – SÃO SIMÃO*. Belo Horizonte: UFMG.
- LAMBE, T. W., & WHITMAN, R. V. (1969). *Soil Mechanics, SI version*. Singapura: John Willey and Sons.
- LANE, E. (1935). *Security from under-seepage masonry dams on earth foundations*. Transactions. American Society of Civil Engineers.
- LAROCCA, A. (2004). *O uso do GPS como instrumento de controle de deslocamento dinâmico de obras civis - Aplicação na área de transportes. Tese de Doutorado*. São Paulo: USP.
- LAVOIE, J. (march de 2017). *Who's Paying for the Clean Up of the Worst Mining Spill in Canadian History?* Fonte: The Tye: <https://thetyee.ca/News/2017/03/31/Who-Pays-for-Mount-Polley-Spill/>
- LEVIS, S. (2006). *Verificação da eficácia dos sistemas de Vedação e Drenagem em Fundações de Barragem de Concreto*. 186 p. *Dissertação (Mestrado)*. São Carlos: USP.
- LEY, J. E. (1973). *Foundations of Existing Dams: Seepage Control. Inspection, Maintenance and Rehabilitation of Old Dams. Proceedings of the Engineering Foundation Conference*. Torun: American Society of Civil Engineers (ASCE). New York: A.S.C.E.

- LIMA, G., LESSA, G., & FRANKLIN, T. (2010). Avaliação dos impactos da barragem de Santa Helena no trecho estuarino do rio Jacuípe, litoral norte da Bahia - Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, p. 40-54.
- LIMA, M. (1996). *Curso de Construção - Introdução ao Estudo das Barragens de Terra*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia.
- LKK, E. (28 de 04 de 2018). Acesso em 28 de 04 de 2019, disponível em LKK Engenharia para Inovação: <http://www.llk.com.br/vantagens-do-piezometro-llk/>
- LUSA. (20 de 07 de 2018). *Ambientalistas pedem ao Governo a remoção de barragens obsoletas*. Acesso em 21 de 04 de 2019, disponível em País ao Minuto: <https://www.noticiasaoiminuto.com/pais/1051969/ambientalistas-pedem-ao-governo-a-remocao-de-barragens-obsoletas>
- MACHADO, W. G. (2007). *Monitoramento de Barragens de contenção de rejeitos da Mineração*. São Paulo: EPUSP.
- MACIEL FILHO, C. L., & NUMMER, A. V. (2014). *Introdução à Geologia da Engenharia - 5ª Edição - Revista e Ampliada*. Santa Maria: UFSM.
- MARIANE, A. (Novembro de 2013). *Veja os detalhes de execução do ensaio CPT*. Fonte: Construção, Mercado - Negócios de Incorporação e Construção: <http://construcaomercado17.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/148/veja-os-detalhes-de-execucao-do-ensaio-cpt-300999-1.aspx>
- MARQUES, M. (1999). *Influência da Velocidade de Deformação e temperatura nos adensamentos de argilas naturais*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- MARTIGNONI, A. (1968). *Máquinas de Corrente Alternada*. Rio de Janeiro: Editora Globo.
- MARTIGNONI, A. (1970). *Construção Eletromecânica*. Rio de Janeiro: Editora Globo.
- MARTIGNONI, A. (1971). *Máquinas Elétricas de Corrente Contínua*. Rio de Janeiro: Editora Globo.
- MARTIGNONI, A. (1974). *Transformadores*. Rio de Janeiro: Editora Globo.
- MARTIGNONI, A. (1948). *Eletrotécnica Livro 1 - Biblioteca do Ensino Industrial - Série C - Vol. 1*. Rio de Janeiro: Ministério da Educação e Saúde - Comissão Brasileiro-Americana de Educação Industrial.
- MARTINS FILHO, M. V. (2013). *Hidrologia: Infiltração de Água no solo*. São Paulo: UNESP.
- MARTINS, I. (2003). *Notas de aula de adensamento*. Rio de Janeiro: UERJ.

- MASSAD, F. (2003). *Obras de Terra - Curso básico de geotecnia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- MATOS, S. (2002). *Avaliação de Instrumentos para Auscultação de Barragem de Concreto. Estudo de Caso: Deformímetros e Tensômetros para Concreto na Barragem de Itaipu. Dissertação de Mestrado*. Curitiba: UFPR.
- MATTOSO, C. (2019). Não há barragem segura, diz delegado da PF do caso Brumadinho. *Folha de São Paulo*, 28-36. Acesso em 18 de 04 de 2019, disponível em <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2019/02/nao-ha-barragem-segura-diz-delegado-da-pf-do-caso-brumadinho.shtml>
- MATURANO RAFAEL, H. (2012). *Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito*. Rio de Janeiro: PUC-RJ.
- MEDEIROS, C. (2012). *Curso de Segurança de Barragens - Módulo I - Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais - Unidade 1 - Diretrizes, Legislação e Regulamento*. Brasília: ANA.
- MEER, J., BERNARDINI, P., STEENDAM, G., AKKERMAN, G., & HOFFMANS, G. (2009). THE WAVE OVERTOPPING SIMULATOR IN ACTION. *Research Gate*. doi:DOI: 10.1142/9789814282024\_0057
- MEIRELLES, F. S. (2011). *Curso de Segurança de Barragens - Módulo I - Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais - UNIDADE 9: Barragens de Terra e Enrocamento*. Brasília: ANA.
- MELLO, V. (1966). Acidentes em Barragens. *III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações (COBRAMSEF)* (pp. p. V54-V56). Belo Horizonte: COBRAMSEF.
- MENESCAL, R. (2007). *Risco e Segurança em Engenharia – Problemas Enfrentados pelo Ministério da Integração com Obras de Infra-estrutura Hídrica. Debate: O Momento Atual da Engenharia Brasileira*. São Paulo: Instituto de Engenharia.
- MENESCAL, R., MIRANDA, N., PITOMBEIRA, S., & PERINI, D. (2005). *As barragens e as enchentes*. In: MENESCAL, R. A. (coord.) *A segurança de barragens e a gestão de recursos hídricos*. Brasília: Ministérios da Integração Nacional.
- MESQUITA, M. d., & MORAES, S. O. (mai-jun de 2004). A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, 34, p.963-969.
- MIDDLEBROOKS, T. A., & JERVIS, M. P. (1947). *Relief-Wells for Dams and Levees. Transactions*. New York: A.S.C.E.

- MINHA CASA SOLAR. (27 de maio de 2019). Fonte: <https://www.minhacasasolar.com.br/listacompra/gerador-solar-165-kwh-mes-para-uso-isolado-off-grid--54>
- MIRANDA, A. (2016). *Curso de Inspeção e Segurança de Barragens - Notas de Aula: Inspeção de Barragens de Aterro*.
- MITCHELL, J. K., & SOGA, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*. 3<sup>th</sup> ed. . Hoboken: John Wiley.
- MIZUNO, M., & HIROSE, T. (2006). Instrumentation and Monitoring of Dams and Reservoirs. *WATER STORAGE, TRANSPORT, AND DISTRIBUTION*.
- MORAIS, W., ARAUJO, N., OLIVEIRA, D., CAMARGO, P., FONSECA JUNIOR, J., & WINK, H. (august de 2018). AVALIAÇÃO DE SEDIMENTOS FLUVIAIS DOS MUNICÍPIOS DE MARIANA E BARRA LONGA (MG) NA REGIÃO DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA SAMARCO. *Reserach Gate*. Fonte: [https://www.researchgate.net/publication/326981393\\_AVALIACAO\\_DE\\_SEDIMENTOS\\_FLUVIAIS\\_DOS\\_MUNICIPIOS\\_DE\\_MARIANA\\_E\\_BARRA\\_LONGA\\_MG\\_NA\\_REGIAO\\_DO\\_ROMPIMENTO\\_DA\\_BARRAGEM\\_DA\\_SAMARCO](https://www.researchgate.net/publication/326981393_AVALIACAO_DE_SEDIMENTOS_FLUVIAIS_DOS_MUNICIPIOS_DE_MARIANA_E_BARRA_LONGA_MG_NA_REGIAO_DO_ROMPIMENTO_DA_BARRAGEM_DA_SAMARCO)
- MRA - GRUPO ÁLAVA. (16 de julho de 2019). *Soluções para medição*. Fonte: MRA: <http://www.mra.pt/industria/produtos/sensores-aquisicao-de-dados-e-calibracao/sensores-e-condicionadores-de-sinal/sensores-de-deslocamento/potenciometros/fotos/>
- NAKASE, A., & KAMEI, T. (1986). Influence of Strain Rate on Undrained Shear Characteristics of  $k_0$  - Consolidated Coesive Soils. *Soils and Foundations*, 26, p. 85-95.
- NEGRILA, A., & ONOSE, D. (16 de December de 2016). DAM MONITORING USING TERRESTRIAL LASER SCANNING. *Journal of Geodesy and Cadastre*, 15, pp. 149-158.
- NIVITEC. (2019). *Sensor de Turbidez de alta gama*. Fonte: Nivitec Instrumentação e Controle: <https://nivitec.com.br/produto/sensor-de-turbidez-de-ampla-gama-serie-datastick/>
- NOGUEIRA JUNIOR, J. (1988). *Possibilidades de Colmatação Química dos Filtros e Drenos da Barragem de Porto Primavera (SP) por compostos de Ferro - Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências*. São Paulo: USP.
- NOVA ELETRONICA. (20 de julho de 2019). *Nova Eletrônica*. Fonte: <http://blog.novaeletronica.com.br/conheca-todas-placas-arduino/>

- NUNES, S. (2016). *Cartografia de Risco de Ruptura de Barragens de Classe I - Identificação de Elementos em Risco*. Lisboa: FCSH - UNL.
- OLDECOP, L., & RODRÍGUEZ, R. (2007). Mecanismos de fallas de las presas de residuos mineros. *Ingeniería Civil*, 148, p.181-189.
- OLIVEIRA, A. M. (2012). *FISSURAS, TRINCAS E RACHADURAS CAUSADAS POR RECALQUE DIFERENCIAL DE FUNDAÇÕES*. Belo Horizonte: UFMG.
- OLIVEIRA, J. (2008). *Contribuição para a verificação e controle da Segurança de Pequenas Barragens*. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: UFOP.
- ORTIGÃO, J. A. (2007). *Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. 3 Ed. São Paulo: LTC.
- O'SULLIVAN, D., & IGOE, T. (2004). *Physical Computing - Sensing and Controlling the Physical World with Computers*. Boston: Thomson Course Technology.
- PASSWEL, R. E. (1967). Thermal Influence on Clay Soil Deformation. *Proc. 3rd. Panama Conference - SMFE, Vol. 1*, pp. 383-396.
- PECK, R. B., & TERZAGHI, K. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2nd Edition. New York: John Wiley.
- PEDINI, I. M. (25 de Fevereiro de 2019). *Sistema Open Source*. Fonte: <https://webinsider.com.br/sistema-open-source/>
- PEREIRA, C. d. (17 de 04 de 2019). <http://domtotal.com>. Fonte: Dom Total: <http://domtotal.com/noticia/1258409/2018/05/vazamento-da-barragem-de-santo-antonio-do-grama-um-reflexo-da-atividade-economica-sobre-a-dignidade-humana/>
- PEREIRA, G. (2015). *Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo*. São Paulo: Oficina de Textos.
- PEREIRA, J. (1996). *Numerical Analysis of the mechanical behavior of collapsing earth dams during first reservoir filling*. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 449p. Saskatoon: University of Saskatchewan.
- PEREZ, J. (2002). *Campo de velocidade para as estações da RBMC e IGs localizadas na placa Sul-Americana: Estimativa através de processamento de dados GPS*. São Paulo: FAPESP.
- PERINI, D. (2009). *Estudo dos Processos Envolvidos na análise de risco de barragens de terra*. Dissertação de Mestrado. Brasília: UNB.

- PIASENTIN, C. (2012). *Curso de Segurança de Barragens - Aspectos Gerais de Segurança de Barragens*. Brasília: ANA.
- PINTO, C. d. (2006). *Curso básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas - 3ª Edição*. São Paulo: Oficina de Textos.
- PINTO, N. (1987). *Hidráulica Aplicada*. Curitiba: CEHPAR.
- PIVA, C. (2014). Gerenciamento de Riscos à Atividade de Manutenção e Construção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica - Rede Energizada. Pato Branco, Paraná: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ.
- PLUM, L. R., & ESRIG, M. I. (1969). Some Temperature Effects on Soil Compressibility and Pore Water Pressure. *ICETHEBS, HRB*, pp. 231-242.
- PORTO, R. (1998). *Hidráulica Básica - 1ª Edição*. São Carlos: EESC/USP.
- PORTO, R. (2006). *Hidráulica Básica - 4ª Edição*. São Carlos: EESC-USP.
- POSSAN, E. (2012). *Curso de Segurança de Barragens - Módulo I - Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais - Unidade 10 - Barragens de Concreto*. Brasília: ANA.
- PUC, G. (2005). *Curso de Barragens de Terra*. Goiânia: PUC-GO.
- PYTHAROULI, S., & STIROS, S. (2005). Ladon dam (Greece) deformation and reservoir level fluctuations: evidence for a causative relationship from the spectral analysis of a geodetic monitoring record. *Engineering Structures*, p. 361–370. doi:10.1016/j.engstruct.2004.10.012
- RAIMUNDO, A. (2007). *Estruturas Hidráulicas Utilizadas em Reservatórios de Controle de Cheias*. São Paulo: EPUSP.
- RASPBARRY. (20 de julho de 2019). *Fundação Raspbarray*. Fonte: <https://www.raspberrypi.org>
- Raspberry Pi. (2019). *Raspberry Pi*. Fonte: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- RAYMOND, G. P., & AZZOUZ, M. M. (1970). *Permeability Determination for Predicting. Proceedings of Conference of In Situ Investigations*. Londres: ICE.
- REBELLO, Y. C. (2008). *Fundações - Guia prático de projeto, execução e dimensionamento*. São Paulo: Zigurate.
- REIS, R. M. (2004). *Comportamento Tensão-Deformação de dois horizontes de um solo residual de Gnaisse - Tese de Doutorado em Geotecnia*. São Carlos: USP.

- RENNER, J. (1994). Experiences in monitoring systems for dams with impervious core. *INTERNATIONAL CONGRESS ON LARGE DAMS* (pp. p. 29-48). Durban: CIGB - ICOLD.
- RIBEIRO, F. (2008). *Proposta de Metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para monitoramento geodésico de barragens - Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado*. São Paulo: EPUSP.
- RIBEIRO, V. (2015). *Proposta de Metodologia para Avaliação do Efeito de Rupturas de Estruturas de Contenção de Rejeitos*. Belo Horizonte: UFMG.
- RITE, E. (2019). Piezômetro de Corda Vibrante - Catalogo Técnico ENCARDIORITE.
- ROBERTSON, P. K., & MAYNE, P. W. (2010). *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*. Huntington Beach: CPT'10 Organizing Committee.
- ROCHA, D. d. (2007). *Análise hidro-mecânica de barragem de terra e enrocamento UHE Emborcação*. Brasília, DF.: UNB.
- ROCHA, E. M., BARRA JUNIOR, W., BEZERRA, A. C., & BARRA, H. M. (2017). Preventing Damage in Hydraulic Pumping Systems by using a Pressure Control Strategy. *IEEE Latin America Transactions*, 445-453.
- ROCTEC. (2016). *BEIJING EXCEPCIONAL ROCTEC TECHNOLOGY CO., LTD.*  
Fonte: ROCTEC TECHNOLOGY:  
[http://www.roctec.com.cn/en/index.php?optionid=837&auto\\_id=31](http://www.roctec.com.cn/en/index.php?optionid=837&auto_id=31)
- ROGER, J. (2006). Lessons learned from the St. Francis Dam Failure. Lesson learned from fantastic failures. *Geo-Strata*, v.6, n.2, march-april 2006, 14-17.
- ROLDÃO, J., & LOPES, N. (1989). *Potencialidades do Emprego de Traçadores na Solução de Problemas de Percolação - Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaios de Campo e Laboratório*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- ROMANINI, A. (2016). *GEOTECNIA III - Barragens – Elementos de projeto*. Sinop: FACET.
- ROWE, P. W. (1964). *The Calculations of Consolidation Rates of Laminated, Varied or Layered Clays, with Particular Reference to Sand Drains*. *Géotechnique*, v.14.
- RS Solutions for Stores. (2019 de julho de 2019). *RS*. Fonte: <https://uk.rs-online.com>
- SALIBA, A. (2009). *Uma Nova Abordagem Para Análise de Ruptura por Galgamento de Barragens Homogêneas de Solo Compactado. Dissertação de Mestrado*. Belo Horizonte: UFMG.

- SANTOS, D. G., TEIXEIRA, E. C., JUNQUEIRA, R. G., VIANA, T., & MALDANER, V. I. (2007). *Nascentes do Brasil - Estratégias para a Proteção de Cabeceiras em Bacias Hidrográficas*. Brasília: WWF- Brasil.
- SARÉ, A. R. (2003). *Análise das condições de fluxo na barragem de Curuá-Una, Pará*. Rio de Janeiro: PUC-RJ.
- SAYÃO, A. (2001). *Barragens de Terra e Enrocamentos - Notas de Aula*. Rio de : PUC-Rio.
- SAYÃO, A. (2017). *Acidentes Barragens no Brasil*. Rio de Janeiro: PUC-RIO.
- SCHÄFER, A., WAITE, T., & FANE, A. (2004). *Nanofiltration - Principles and Applications*. New York: Elsevier.
- SCHNAID, F., & ODEBRECHT, E. (2012). *Ensaio de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos.
- SENSOGEO. (2019). *Piezometro Casagrande*. Fonte: SensoGeo Instrumentación y Geotecnia: <http://www.sensogeo.com/piezometro-casagrande/>
- SILVA FILHO, F. (1991). *Tapetes Impermeabilizantes a Montante das Barragens sob Aluviões Permeáveis - Dissertação de Mestrado*. Rio de Janeiro: UFRJ.
- SILVA, A. d. (2011). *NOTAS DE AULA E OUTROS DOCUMENTOS RELATIVOS ÀS DISCIPLINAS DE PÓS-GRADUAÇÃO - Patologia das Construções*. Belo Horizonte: UFMG.
- SILVA, D. S. (2016). *Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens*. Ouro Preto: UFOP.
- SILVA, E. (2018). *Apostila da disciplina Sensores e Atuadores - Automação Industrial*. Cuiabá: CEFET-MT.
- SILVA, R. (2012). *Estudo dos Mecanismos de Formação e de Inibição de Incrustação por Sulfato de Cálcio em processos de Nanofiltração - Tese de Doutorado*. Rio de Janeiro: PUC-RJ.
- SILVA, W. (2010). *Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a Metodologia de Olson (2001)*. Ouro Preto: UFOP.
- SILVEIRA, A. (1964). *Algumas considerações sobre filtros de proteção: uma análise de carreamento. Tese de Doutorado*. São Paulo: EPUSP.
- SILVEIRA, C. (2017). *Sensor de Pressão: O que é e Como Especificar*. Acesso em 27 de 04 de 2019, disponível em Citi systems : <https://www.citisystems.com.br/sensor-de-pressao/>

- SILVEIRA, J. (2003). *Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto*. São Paulo: Oficina de Textos.
- SILVEIRA, J. (2018). *Reinstrumentação de Barragens - Aspectos Relevantes*.
- SILVEIRA, J. F. (2006). *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*. São Paulo: Oficina de Textos.
- SILVEIRA, J., CORDEL, R., & MORITA, L. (1987). Ocorrência de Artesianismo Natural na Fundação da Barragem de Três Irmãos e suas Implicações com o Projeto das Estruturas. *SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS* (pp. pp.117-128). CBGB.
- SILVEIRA, R. (2019). Barragens de Terra e Enrocamento - Controle de Qualidade e Execução das Barragens em Belo Monte. (Á. C. BEZERRA, Entrevistador)
- SINGH, V. (1996). *Dam Breach Modeling Technology*. Louisiana: Kluwer Academic Publishers.
- SINGH, V., & SCARLATOS, P. (1988). *Analysis of Gradual Earth-Dam Failure*. . Journal of Hydraulic Engineering.
- SISGEO. (2014). *PK45M - Multipoint Piezometer*. Masate (MI) - Italy: SISGEO.
- Sixfab. (2019). *Sixfab Worldwide Shipping*. Fonte: <https://sixfab.com/product/gsmgprs-shield/>
- SMAR. (16 de julho de 2019). Fonte: Smar Technology Company: <http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/sensor-hall-a-tecnologia-dos-posicionadores-inteligentes-de-ultima-geracao>
- SOARES, M., & et. al. (2004). Novas metodologias aplicadas ao monitoramento da barragem de salto Caxias Revista espaço energia. *BRAZILIAN OPEN JOURNAL OF ENERGY*.
- SOUZA, F. (05 de Março de 2015). Fonte: Embarcados: <https://www.embarcados.com.br/%CE%BCstart-for-pic-placa-de-desenvolvimento-para-pic/>
- SOUZA, M. (2013). *Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC*. Rio de Janeiro: UFRJ.
- SOUZA, Z. (2006). *Instrumentação para Sistemas Energéticos e Industriais*. Itajubá: O autor.
- STEGEMEIER, G. (1998). *A Calculation of the Permeability Required to Prevent Build-up of Pressure in In-Situ Thermal Conduction Process*. GLS Engineering Inc.

- STEVAN JUNIOR, S., & SILVA, R. (2015). *Automação e Instrumentação Industrial com Arduino - Teoria e Projetos*. São Paulo: Erica.
- SUJONO, J. (2012). Hydrological Analysis of the Situ Gintung Dam Failure. *Journal of Disaster Research Vol.7 No.5*, p. 590-594.
- SULTANOV, T., YULDOSHEV, B., TOSHMATOV, E., YARASHOV, J., ERGASHEV, R., & MIRSAIDOV, M. (2019). Strength assessment of earth dams. *MATEC Web of Conferences*. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201926504015>
- TAYLOR, D. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons.
- TEIXEIRA, S. (2017). *Curso de Capacitação em Estruturas de Barragens: Terra, Enrocamento e Rejeitos - Sistemas de vedação e de drenagem interna; Tratamento de Fundações de Barragens em Rocha e Solos*. Curitiba.
- TERZAGHI, K., & PECK, R. (1948). *Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons.
- TERZAGHI, K., & PECK, R. B. (1962). *Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia*. São Paulo: Ao Livro Técnico.
- THA, P. (2007). *Estudo das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu - Dissertação de Mestrado*. Rio de Janeiro: PUC-RJ.
- THOMSEN, A. (03 de fevereiro de 2014). *FilipeFlop*. Fonte: FilipeFlop: <https://www.filipeflop.com/blog/tipos-de-arduino-qual-comprar/>
- THOMSEN, A. (11 de Abril de 2016). *FilipeFlop*. Fonte: <https://www.filipeflop.com/blog/qual-modulo-esp8266-comprar/>
- TOWHATA, I., KUNTIWATTANAKU, P., SEKO, I., & OHISHI, K. (1993). Volume Change of Clays Induced by Heating as Observed in Consolidation. *Soils and Foundation, vol. 33*, pp. pp. 170-183.
- TRIESTE, D. (1992). Evaluation of Supercritical/Subcritical Flows in High-Gradient Streams. *Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118*( n.8, August 1992), p. 1107-1119.
- TURNBULL, W., & MANSUR, C. (1961). *Investigation of under seepage – Mississippi River and Levees. Transactions...* New York: ASCE.
- UFERSA, U.-Á. (2011). *Instrumentos para Medição de Vazão em Cursos D'água Naturais e em Canais Construídos*. Paraíba: UFERSA.
- UFV, U. (12 de 10 de 2009). *Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG*. Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas:

- [http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos\\_aplicativos/roteiro\\_dimensionamento\\_barragens.html](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html)
- UNIFEI. (13 de Fevereiro de 2019). *Universidade Federal de Itajubá*. Fonte: <https://unifei.edu.br/>
- VAN DER BRUGGEN, B., MANTTARI, M., & NYSTROM, M. (2008). Drawbacks of Applying NF and How to Avoid Them: A Review. *Separation and Purification Technology, Vol. 63*, p. 251-263.
- VARGAS, M., NUNES, A., LOPES, J., CONTINENTINO, L., & FEDERICO, D. (1955). *Ruptura da Barragem da Pampulha - Relatório Técnico*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).
- VEIGA PINTO, A. (1983). *Previsão Do Comportamento Estrutural de Barragens de Enrocamento*. Lisboa: LNEC.
- VIPULANANDAN, C., KULA, I., MAGILL, D., & AGUILAR, F. (2018). Developing Smart Grouted Sand Columns for Real Time Monitoring of Earth Dams. *Journal of Civil Engineering Materials, American Society of Civil Engineers*. doi:10.1061/9780784481615.023
- VIRTUAL GROUP EXPO. (maio de 2019). *TRADO HELICOIDAL / PARA ESCAVADEIRA / HIDRÁULICO* - . Fonte: DIRECT INDUSTRY: <http://www.directindustry.com/pt/prod/rabaud/product-41260-1319069.html>
- VISCHER, D., & HAGER, W. (1997). *Dam Hydraulics*. Zürich: John Wiley E Sons.
- WARD, S. (28 de 06 de 2010). The 1889 Johnstown, Pennsylvania Flood - A physics-based simulation - Institute of Geophysics and Planetary Physics University of California,. *"Tsunami, Research and Technologies"*, pp. 1-16. Fonte: <https://websites.pmc.ucsc.edu/~ward/papers/jtown.pdf>
- WATANABE, R. (2019). *Página pessoal de Roberto Massaru Watanabe*. Fonte: <http://www.ebanataw.com.br/roberto/index.php>
- WITTMAN, L. (1979). The process of soil filtration its Physis and the approach in engineering practice. *Design parameters in geotechnical engineer*. British Geotechnical Society.
- YIGIT, C., ALCAY, S., & CEYLAN, A. (2016). Displacement response of a concrete arch dam to seasonal temperature fluctuations and reservoir level rise during the first filling period: evidence from geodetic data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, Vol. 7, No. 4*, p. 1489-1505. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2015.1047902>

ZUCULIN, S. (2012). *Curso de Segurança de Barragens - Módulo II: Inspeção e auscultação de Barragens*. Brasília: ANA.