

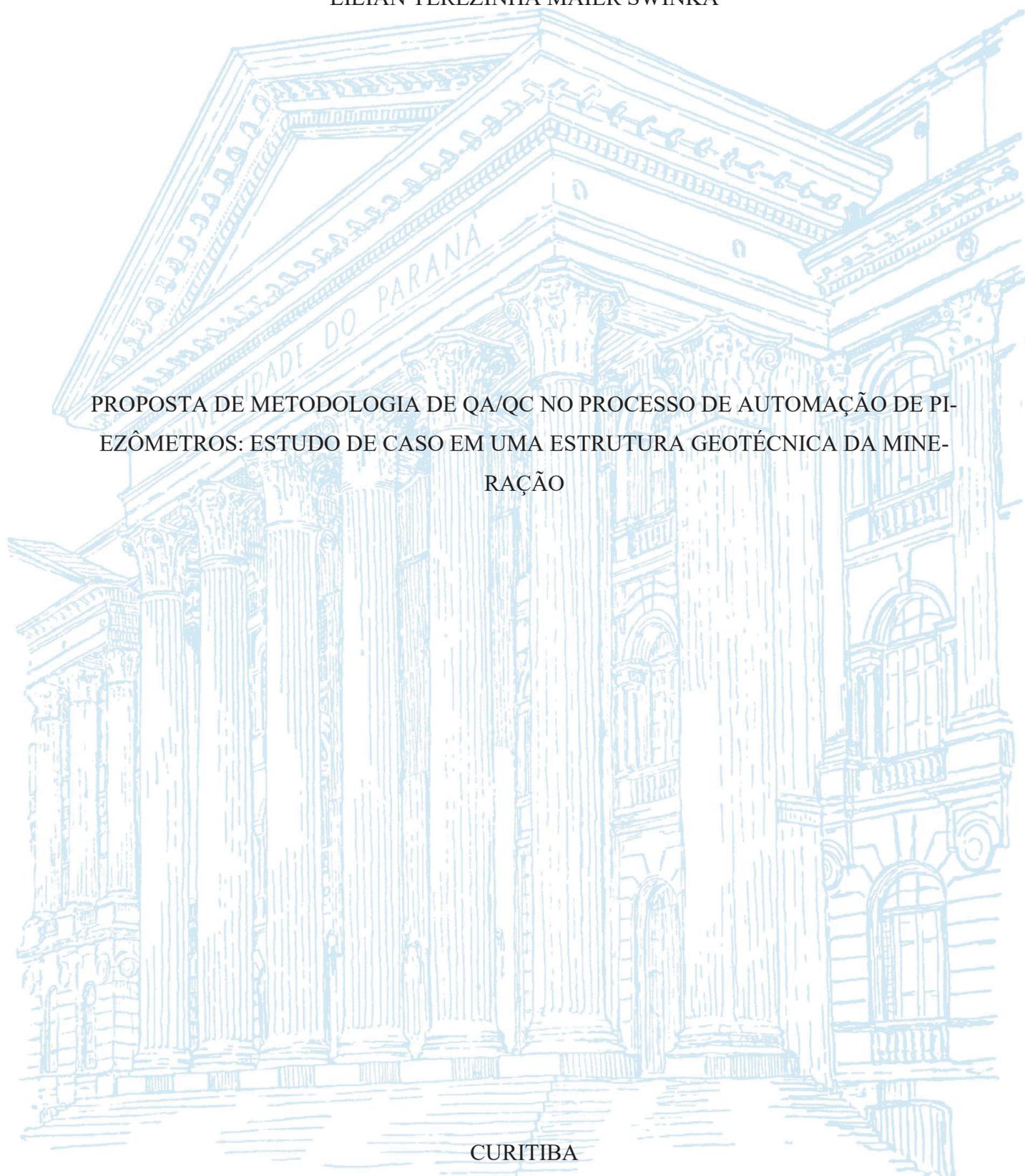
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LILIAN TEREZINHA MAIER SWINKA

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE QA/QC NO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO DE PI-
EZÔMETROS: ESTUDO DE CASO EM UMA ESTRUTURA GEOTÉCNICA DA MINE-
RAÇÃO

CURITIBA

2023



LILIAN TEREZINHA MAIER SWINKA

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE QA/QC NO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO DE PI-
EZÔMETROS: ESTUDO DE CASO EM UMA ESTRUTURA GEOTÉCNICA DA MINE-
RAÇÃO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração de Geotecnia, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Pereira Faro

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Swinka, Lilian Terezinha Maier

Proposta de metodologia de QA/QC no processo de automação de
piezômetros: estudo de caso em uma estrutura geotécnica da mineração /
Lilian Terezinha Maier Swinka. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Vitor Pereira Faro

1. Mineração. 2. Piezômetro - Automação. 3. Garantia de qualidade. 4.
Controle de Qualidade. 5. Engenharia geotécnica. I. Universidade Federal do
Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Faro, Vitor
Pereira. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **LILIAN TEREZINHA MAIER SWINKA** intitulada: **PROPOSTA DE METODOLOGIA DE QA/QC NO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO DE PIEZÔMETROS: ESTUDO DE CASO EM UMA ESTRUTURA GEOTÉCNICA DA MINERAÇÃO**, sob orientação do Prof. Dr. VITOR PEREIRA FARO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 11 de Maio de 2023.

Assinatura Eletrônica
11/05/2023 12:44:58.0
VITOR PEREIRA FARO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
11/05/2023 12:51:20.0
SIDNEI HELDER CARDOSO TEIXEIRA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
11/05/2023 13:50:45.0
MARCIO FERNANDES LEÃO
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA)

Assinatura Eletrônica
29/05/2023 11:11:02.0
FERNANDO SCHNAID
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

DEDICATÓRIA

A minha avó Lola, fonte de sabedoria e alegria. Aos meus pais, Walter e Elisete, meu porto-seguro, pilares da minha formação. Aos meus filhos, Lorenzo e Gabriela, meus amores e minha inspiração e ao meu marido Rodrigo pelo carinho e apoio em todos os momentos durante este processo. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me proporcionado saúde e por sempre atender as minhas preces e me dar força e determinação para alcançar meus objetivos.

Agradeço ao meu professor e orientador Vitor Pereira Faro, por aceitar a tarefa de orientar esta pesquisa e ter me dado a liberdade total na escolha do tema e confiado totalmente a mim o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à instituição e a todos os professores que participaram diretamente desta minha trajetória e que muito contribuíram para meu aprendizado.

As colegas Laisa Benetti, Renathielly Brunetta, Marcela Tainã, Rafaela Baldi Fernandes, Elisangela Mazzutti, pelas contribuições, revisões e apoio. Ressalto aqui a minha admiração a essas profissionais competentes e mulheres incríveis.

Agradeço aos meus amigos e colegas que me incentivaram e me apoiaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial a equipe Fugro do Geomonitoramento que atua com seriedade e brilhantismo em todos os nossos projetos de instrumentação e monitoramento geotécnico.

Agradeço a equipe de Geotecnia da Anglo American, em especial aos Engenheiros Geotécnicos Leonardo Leopoldo, Fernando Miranda e Luiz Felipe Rocha pelo incentivo, apoio a pesquisa e disponibilização de dados e informações relevantes para esse estudo.

A minha família e aos amigos, pelo constante incentivo e compreensão pelo tempo que deixamos de passar juntos.

Ao meu marido, Rodrigo, pelo amor, pelos chocolates, cafés, mimos e todo o apoio em manter nosso lar operacional enquanto eu investia tempo nesta pesquisa.

Aos meus filhos, Lorenzo e Gabriela pelas cobranças em largar o computador para ficarmos juntos, pelos beijos e abraços apertados quando eu mais precisei.

Obrigada a todos que diretamente ou indiretamente foram mencionados e aqueles que não foram, mas que de alguma forma contribuíram para que esta pesquisa fosse possível, pois, em um trabalho desta magnitude, todo tipo de ajuda recebida é imprescindível.

Lilian T. Maier Swinka, 2023.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

Cora Coralina

RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados atualmente pelo setor mineral é a iniciativa de toda a indústria em implementar os métodos mais eficazes e eficientes para monitorar estruturas geotécnicas. A aplicação de metodologias de Garantia e Controle de Qualidade (QA/QC) surge como um pilar fundamental para atingir esse objetivo, assegurando a confiabilidade dos dados de instrumentação e, por conseguinte, a eficácia no controle de estruturas geotécnicas críticas. Contudo, para alcançar o pleno potencial do QA/QC, é essencial enfrentar desafios organizacionais e operacionais, abrindo caminho para uma indústria de mineração mais segura, confiável e responsável. O objetivo principal deste estudo foi mapear as principais fontes de incertezas que podem comprometer a qualidade dos processos que envolvem a instrumentação e automação de piezômetros. Além disso, foi proposto diretrizes para a implementação do QA/QC que reside em estabelecer padrões, processos e etapas de verificação que visam garantir a confiabilidade dos dados de instrumentação para embasar decisões no controle de estruturas geotécnicas. A pesquisa também incluiu uma análise comparativa da diferença entre leituras manuais e automatizadas de piezômetros permitindo avaliar a consistência das leituras de um dique de contenção de sedimentos, denominado como Dique 2. Adicionalmente, foram estabelecidos limites de precisão do processo com base em dados históricos de leituras manuais, bem como uma faixa de controle para abordar a variabilidade dos dados por meio de métodos estatísticos e gráficos de controle. Os resultados obtidos permitiram a identificação de quando a leitura dos dados automatizados está sob controle ou fora da faixa de controle destacando possíveis anormalidades na instrumentação. Nessa avaliação, o conhecimento técnico e a análise crítica dos dados foram as diretrizes principais na avaliação do desempenho da automação da instrumentação geotécnica da estrutura avaliada. Dessa forma, foi observado que a aplicação da metodologia de QA/QC resultou em uma notável melhoria na qualidade e confiabilidade dos dados coletados e que a variabilidade das leituras, seja relacionada à calibração, operação ou ao próprio projeto, requer verificação constante.

Palavras-chave: Instrumentação. Piezômetros. Automação. QA/QC. Mineração.

ABSTRACT

One key challenge facing the mining sector arises from the industry-wide initiative to implement the most effective and efficient methods to monitor geotechnical structures. This application of quality assurance and quality control (QA/QC) methodologies emerges as a fundamental pillar to achieve this objective, ensuring the reliability of instrumentation data and, consequently, the effectiveness in controlling critical geotechnical structures. However, to fully realize the potential of QA/QC, it is essential to address organizational and operational challenges, paving the way for a mining industry that is safer, more reliable, and responsible. The foremost aim of this study was to identify the main sources of uncertainties that can affect the quality of instrumentation and automation processes of piezometers. Additionally, guidelines were proposed for the implementation of QA/QC, which revolves around establishing standards, protocols, and verification steps aimed at ensuring the reliability of instrumentation data to inform decisions related to geotechnical structure control. The research also encompassed a comparative analysis of the difference between manual and automated readings of piezometers, allowing for an assessment of the consistency of readings of a sediment containment dike, known as Dique 2. Furthermore, precision limits for the process were established based on historical data from manual readings, along with a control range to address data variability using statistical methods and control graphs. The obtained results facilitated the identification of when automated data readings are within control limits or deviate from them, thereby highlighting potential anomalies in the instrumentation. In this evaluation, technical expertise and critical analysis of data were the primary guidelines in assessing the performance of the geotechnical instrumentation automation of the evaluated structure. As a result, it was observed that the implementation of the QA/QC methodology resulted in a notable improvement in the quality and reliability of the collected data, and that the variability in readings, whether related to calibration, operation, or project aspects, necessitates continuous verification.

Keywords: Instrumentation. Piezometers. Automation. QA/QC. Mining.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1- Método construtivo de alteamento a jusante	26
FIGURA 2.2 - Método construtivo de alteamento de linha de centro.....	26
FIGURA 2.3 - Método construtivo de alteamento a montante	26
FIGURA 2.4 – Organograma das atividades de controle de segurança	30
FIGURA 2.5 – Determinações da PNSB quanto aos órgãos fiscalizadores e ao PSB	33
FIGURA 2.6 - Perfil típico de um piezômetro Casagrande	43
FIGURA 2.7 – Leitura do nível d’água com pio elétrico	45
FIGURA 2.8 - Perfil típico de um piezômetro de corda vibrante	47
FIGURA 2.9 - Perfil típico de um piezômetro Casagrande automatizado	48
FIGURA 2.10 – Exemplo de modelo da <i>datalogger</i> sem fio.....	49
FIGURA 2.11 – Exemplo de modelo de <i>gateway</i>	50
FIGURA 2.12 - Exemplo de arquitetura para automatização do monitoramento	51
FIGURA 2.13 - Plano ideal de monitoramento	54
FIGURA 2.14 - Análise da precisão e exatidão	64
FIGURA 2.15 - Fontes de incerteza dos parâmetros.....	66
FIGURA 2.16 – Principais fontes de variação do período de resposta (time lag)	72
FIGURA 2.17 – Principais fontes de erros em piezômetros de tubo aberto (standpipe)	73
FIGURA 2.18 - Principais fontes de erros causados por fluídos e bolhas	73
FIGURA 2.19 - Fontes de erros causados pela alteração do time lag hidrodinâmico.....	74
FIGURA 2.20 – Outras fontes de erros causados pela alteração do time lag.....	74
FIGURA 2.21– Bases do controle.....	85
FIGURA 2.22– As quatro fases do controle	86
FIGURA 2.23- O Ciclo PDCA.....	88
FIGURA 2.24 - Etapas do controle de processos.....	89
FIGURA 2.25 Valores de controle para piezômetros – Barragem de Emborcação	92
FIGURA 2.26 Valores de referência para piezômetro – Barragem do Piau	93
FIGURA 2.27 Etapas na operacionalização do controle estatístico de processos.....	97
FIGURA 2.28 Probabilidades associadas com uma distribuição normal.....	100
FIGURA 2.29 Exemplo de uma carta de controle.....	103
FIGURA 3.1 Exemplo de uma matriz RASCI	110
FIGURA 3.2 Principais etapas do processo de automação de piezômetros Casagrande	111
FIGURA 3.3 Ensaio de rebaixamento	113

FIGURA 3.4	Verificações em campo dos piezômetros	115
FIGURA 3.5	Crosscheck em campo dos piezômetros	116
FIGURA 3.6	Exemplo de teste de bancada.....	118
FIGURA 3.7	Exemplo de equipamento utilizado para aquisição manual dos dados.....	118
FIGURA 3.8	Exemplo de barômetro.....	119
FIGURA 3.9	Exemplo de certificado de calibração.....	119
FIGURA 3.10	Exemplo de equipamento utilizado para aquisição manual dos dados.....	120
FIGURA 3.11	Marcação do comprimento do instrumento no cabo do sensor	121
FIGURA 3.12	Marcação do comprimento do instrumento no cabo do sensor	122
FIGURA 3.13	<i>Datalogger</i> local <i>wireless</i>	123
FIGURA 3.14	Instalação do concentrador de dados (<i>gateway</i>)	124
FIGURA 3.15	Ficha de Instalação	133
FIGURA 4.1	Localização do Dique de Contenção de Sedimentos 2.....	135
FIGURA 4.2	Mapa Geológico regional com indicação da área de interesse	136
FIGURA 4.3	Detalhe do Dique de Contenção de Sedimentos 2.....	137
FIGURA 4.4	Seção típica do Dique 2	137
FIGURA 4.5	Curva cota-volume disponível para o trânsito de cheias no reservatório	139
FIGURA 4.6	Seção A-A' do Dique 2.....	140
FIGURA 4.7	Seção B-B' do Dique 2.....	141
FIGURA 4.8	Seção C-C' do Dique 2	141
FIGURA 4.9	Seção D-D' do Dique 2.....	141
FIGURA 4.10	Planta da instrumentação do Dique 2	142
FIGURA 4.11	Localização dos piezômetros localizados no Dique 2.....	142
FIGURA 4.12	Detalhe do projeto as built do piezômetro Casagrande	143
FIGURA 4.13	Modelo do Piezômetro de Corda Vibrante utilizado	144
FIGURA 4.14	Série histórica manual e automatizada dos piezômetros	145
FIGURA 4.15	Monitoramento da pluviometria	145
FIGURA 4.16	Monitoramento do Nível de Água do reservatório	146
FIGURA 4.17	Sala do Centro de monitoramento geotécnico (CMG)	148
FIGURA 4.18	Gráfico de dispersão entre leituras manuais e automatizadas	150
FIGURA 4.19	Gráfico da comparação entre leituras manuais (M) e automatizadas (A)	150
FIGURA 4.20	Exemplo da estruturação de banco de dados para o cálculo da diferença absoluta.....	151
FIGURA 4.21	Carta da diferença do histórico das leituras manuais.....	153

FIGURA 4.22 Histograma da diferença entre leituras manuais e automatizadas	154
FIGURA 4.23 Carta de controle referente ao piezômetro 1	155
FIGURA 4.24 Carta de controle referente ao piezômetro 2.....	156
FIGURA 4.25 Carta de controle referente ao piezômetro 3.....	156
FIGURA 4.26 Carta de controle referente ao piezômetro 4.....	157
FIGURA 4.27 Carta de controle referente ao piezômetro 5.....	157
FIGURA 4.28 Carta de controle referente ao piezômetro 6.....	158
FIGURA 4.29 Exemplo do banco de dados para o cálculo do RMSE do Piezômetro 1.....	159
FIGURA 4.30 Diagrama de Ishikawa	160

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Principais legislações vigentes aplicadas a segurança de barragens.....	34
TABELA 2.2 - Exemplo de atribuição de tarefas para um programa de monitoramento.....	59
TABELA 2.3 – Resumo das incertezas das medições.....	68
TABELA 2.4 – Causas e medidas corretivas para os erros de medição	70
TABELA 3.1 – Classificação dos ensaios de teste de vida	113
TABELA 4.1 Características geométricas do Dique 2.....	138
TABELA 4.2 Informações da instrumentação instalada	140
TABELA 4.3 Resultado do parâmetro estatístico de desempenho do modelo	150
TABELA 4.4 Resumo da estatística descritiva correspondente às variáveis	152

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Automatizada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANOVA	Analysis of Variance
ANM	Agência Nacional de Mineração
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CEP	Controle Estatístico do Processo
CMG	Centro de Monitoramento Geotécnico
CRI	Categoria de Risco
σ	Desvio padrão
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral (extinto)
DPA	Dano Potencial Associado
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FTP	File Transfer Protocol
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICOLD	International Commission on Large Dams
ISO	International Organization for Standardization
LoRa	Long Range wireless communication
LIC	Limite Inferior de Controle
LIE	Limite Inferior de Especificação
LC	Limite Central
LSC	Limite Superior de Controle
LSE	Limite Superior de Especificação
M	Manual
MA	Mean Absolute
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras

P	População
PAE	Plano de Ação Emergencial de Barragens
PAEBM	Plano de Ação Emergencial de Barragens de Mineração
PIMS	Plant Information Management System
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
PZ	Piezômetro
QA	Quality Assurance
QC	Quality Control
R ²	Coefficiente de determinação
RMSE	Root Mean Square Error
Σ	Somatório de números
SNISB	Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
USB	Universal Serial Bus
X	Média

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	24
2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS.....	27
2.2.1 Controle de segurança de barragens	29
2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE LEGISLAÇÃO DE BARRAGENS	31
2.3.1 Aspectos sobre legislações de alguns países	31
2.3.2 Legislação e normas brasileiras.....	32
2.4 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO GEOTÉCNICO	35
2.4.1 Generalidades	35
2.4.2 Objetivos da instrumentação em barragens.....	38
2.4.3 Piezômetros	39
2.4.4 Plano de instrumentação e monitoramento geotécnico	53
2.5 FATORES QUE INTERFEREM NO PROCESSO DE MEDIÇÃO	60
2.5.1 Definições da metrologia.....	60
2.5.2 Fontes de erros da instrumentação.....	69
2.5.3 Limitações da instrumentação	74
2.6 GARANTIA DA QUALIDADE E CONTROLE DE QUALIDADE (QA/QC).....	76
2.6.1 Definição de QA/QC	76
2.6.2 Implantação de um Programa de QA/QC.....	77
2.6.3 As ferramentas da gestão da qualidade	81
2.6.4 Variabilidade dos processos	89
2.6.5 Tipos de causas de variabilidade no processo	90
2.6.6 Análise estatística dos dados	91
2.6.7 RMSE	94
2.6.8 Controle estatístico de processo (CEP)	95

2.6.9 Análise qualitativa, validação e correção de dados	106
3 PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE QA/QC PARA INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS AUTOMATIZADOS	107
3.1 QA PARA A ETAPA DE INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS AUTOMATIZADOS	107
3.1.1 Projeto detalhado e especificações técnicas da instrumentação	111
3.1.2 Teste de vida (Ensaio de Permeabilidade in situ).....	112
3.1.3 Site survey e crosscheck em campo	114
3.1.4 Seleção e aquisição de sensores e <i>dataloggers</i>	116
3.1.5 Teste de bancada.....	117
3.1.6 Instalação do piezômetro de corda vibrante	120
3.1.7 Instalação do <i>datalogger</i>	122
3.1.8 Instalação do <i>gateway</i>	123
3.1.9 Configuração do sistema de aquisição de dados	124
3.1.10 Coleta dos dados e leitura de verificação em campo.....	125
3.1.11 Operação assistida	126
3.1.12 Monitoramento e análise dos dados	126
3.1.13 Emissão de relatório técnico.....	128
3.1.14 Manutenção dos instrumentos de monitoramento	128
3.2 QC PARA A ETAPA DE INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS AUTOMATIZADOS	129
4 APLICAÇÃO DE QA/QC PROPOSTO À AUTOMAÇÃO DE PIEZOMETROS CASAGRANDE	134
4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	134
4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO	135
4.2.1 Investigações geotécnicas.....	136
4.2.2 Fundação.....	136
4.3 CARACTERÍSTICA DA ESTRUTURA.....	137
4.4 INSTRUMENTAÇÃO EXISTENTE	140
4.4.1 Piezômetro Casagrande	142
4.4.2 Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante.....	143
4.4.3 Monitoramento geotécnico	144
4.4.4 Arquitetura do Sistema de Automação do Dique 2	147
4.5 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO DOS PIEZÔMETROS.....	149
4.6 DIFERENÇA ENTRE LEITURAS MANUAIS E AUTOMATIZADAS.....	158

4.7 IDENTIFICAÇÃO DAS POSSÍVEIS CAUSAS DE VARIAÇÃO DAS LEITURAS ...	159
4.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA.....	161
4.9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	162
4.10 CONCLUSÕES.....	162
4.11 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	164
REFERÊNCIAS	166

1 INTRODUÇÃO

A maior parte da disposição de rejeitos da mineração mundial se faz por barragens de rejeitos, cujo propósito principal é a contenção desses resíduos, com um objetivo secundário de reservar água para uso posterior na mina e/ou no processo de beneficiamento. A falha dessas estruturas pode se apresentar de muitas formas diferentes e causar danos e impactos sociais, ambientais e riscos econômicos significativos que estão ligados à existência dessas estruturas e podem perdurar por longo tempo (IBRAM, 2016).

O setor de mineração enfrenta atualmente um período de grandes desafios, principalmente no que se refere ao desenvolvimento e à adoção de novas tecnologias para redução dos impactos socioambientais causados pela mineração. Esse conjunto de desafios oferece oportunidades para as empresas desse setor a desenvolver operações cada vez mais eficientes. Nesse contexto, há uma tendência para a elevação do conteúdo tecnológico nesse setor, reconhecido, tradicionalmente, como de baixa intensidade tecnológica (BNDES, 2017).

A área da geotecnia está constantemente evoluindo e, com isso, as práticas de Garantia de Qualidade (QA) e Controle de Qualidade (QC) também estão se adaptando para atender às demandas crescentes por dados geotécnicos mais precisos, confiáveis e eficientes. O monitoramento geotécnico faz parte dos procedimentos operacionais das instalações de disposição de rejeitos que auxilia o proprietário a melhorar a gestão de riscos visando uma operação mais segura.

Diante deste panorama, busca-se evoluir e aprimorar os métodos de instrumentação e monitoramento, para garantir uma melhor gestão de segurança para as estruturas geotécnicas, em especial a longo prazo, quando normalmente os problemas são agravados, podendo assim oferecer um melhor cenário de credibilidade e comprometimento com a sociedade e o meio ambiente (GUIMARÃES FILHO, 2021). Fernandes (2022) destaca que o monitoramento geotécnico através da instrumentação desempenha um papel importante nos protocolos de avaliação de risco e falhas, permitindo compreender o comportamento ao longo dos anos dos elementos de fundação, maciço, drenagem e demais componentes proporcionando resultados indispensáveis para a análise da segurança de estruturas geotécnicas e com acurácia suficiente para permitir a tomada de decisões.

A capacidade da instrumentação e monitoramento para prever a deterioração de estruturas geotécnicas está se tornando mais disponível com a melhoria das tecnologias. O projeto de instrumentação piezométrica, em geral, é parte integrante de projetos de implantação ou

construção de uma estrutura geotécnica, e visa dimensionar os diversos elementos constituintes dos instrumentos, orientar sua instalação, calibração e operação, e visa também especificar tecnicamente os materiais e equipamentos que serão empregados na aquisição de dados e leituras de campo (CERQUEIRA, 2017).

Segundo Hui, Charlebois e Sun (2017) a maioria das barragens de rejeitos passam por uma rotina de inspeção visual e monitoramento de instrumentação limitada, manual, pouco frequente e conduzida por profissionais relativamente menos experientes, limitados pelo risco de leitura manual de instrumentos em más condições meteorológicas e sujeitos ao erro humano.

Com o avanço da tecnologia, é importante entender como aplicá-la de forma eficaz e eficiente no ambiente da mineração (CLARKSON et al, 2020). Dessa forma, faz-se importante, além da aplicação das melhores tecnologias disponíveis para instrumentação e o monitoramento geotécnico, o estabelecimento de um sistema de gestão da qualidade que suporte que os elementos fundamentais de projeto, princípios operacionais, controles críticos e processos de avaliação e gestão de riscos sejam devidamente implementados.

A motivação para o uso da metodologia de QA/QC vem da necessidade de verificar e controlar atividades de instrumentação e monitoramento geotécnico para garantir que o resultado dos dados coletados em campo forneça uma avaliação representativa das condições das estruturas geotécnicas, que são então usadas para avaliação do desempenho e da segurança das estruturas. O uso dessas ferramentas da gestão da qualidade tem o objetivo de regular e controlar etapas de um processo para evitar, identificar e principalmente corrigir os erros em um processo, viabilizando ações corretivas e/ou mitigadores para manter os processos confiáveis.

Nesse sentido, para que a instrumentação assuma um papel importante na manutenção da segurança, é de fundamental importância que sejam aplicados procedimentos de QA/QC, para conhecer a melhor forma de realizar a atividade e de reconhecer e reduzir a magnitude dos erros nos projetos, especificações, instalação, obtenção, análise e tratamento dos dados coletados. A identificação precoce de problemas, a padronização de procedimentos e a documentação adequada podem melhorar a qualidade dos dados e a confiabilidade das informações geotécnicas.

A correta obtenção e interpretação desses dados permite atuar em estágios iniciais do desenvolvimento de anomalias e, conseqüentemente, reduzir custos de intervenções à medida que são implantados programas de gestão efetivos de segurança de barragens. Além disso, o exame contínuo e compilado de tais dados, em bases históricas, permite a revisão de registros de operação e manutenção, sendo uma ferramenta direta para mensurar riscos relacionados a rupturas de barragens (FERNANDES, 2022).

O objetivo desta pesquisa foi identificar as principais fontes de incerteza no processo de automação de piezômetros que podem afetar a variabilidade dos dados e demonstrar como a metodologia de QA/QC pode contribuir para aprimorar esse processo. Um estudo de caso foi conduzido para comparar a variabilidade das leituras automatizadas tomando-se como referência os dados piezométricos obtidos manualmente de seis piezômetros Casagrande utilizando um banco de dados com 809 leituras coletadas entre os anos de 2017 e 2022 instalados no Dique 2.

Os critérios de aceitação da variabilidade dos dados dos piezômetros automatizados foram avaliados por meio da aplicação do controle estatístico do processo utilizando gráficos de controle que ajudam a identificar quando um processo está fora de controle e requer medidas corretivas adequadas. O limite do processo foi definido através dos dados da série histórica de leituras manuais aplicando o gráfico de controle para determinar o valor padrão para o processo e na sequência esse valor foi utilizado para identificar a variabilidade em relação as diferenças absolutas entre as leituras manuais e automatizadas dos piezômetros. Além disso, a precisão do modelo foi avaliada usando a métrica da Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) para quantificar a magnitude dos erros.

A implementação da metodologia proposta representa uma ferramenta de grande utilidade na identificação de possíveis erros nas leituras de poropressão durante o processo de instalação e automação dos piezômetros Casagrande, contribuindo para a melhoria da qualidade dos dados monitorados.

1.1 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

Os riscos associados à eventual ruptura das barragens de contenção dos rejeitos de mineração representam uma grande preocupação dos órgãos governamentais e privados, pelos graves prejuízos econômicos, ambientais e humanos relacionados a estas possíveis ocorrências (ALBUQUERQUE FILHO, 2004). Por esse motivo há um interesse crescente pela segurança de barragens e na implementação de um sistema de gestão eficiente para se alcançar os melhores níveis de segurança.

A segurança e a eficiência de custos das operações de mineração podem ser substancialmente aumentadas pela implementação de uma política de garantia de qualidade visando a redução de riscos e os impactos socioambientais. Um sistema de gestão eficiente ajuda a garantir que as prioridades financeiras ou operacionais de curto prazo não se sobreponham às melhores práticas de projeto e operacionais das estruturas de disposição de rejeito (IBRAM, 2019).

Barragens são estruturas de extrema importância na sociedade atual, entretanto, apesar da evolução alcançada pelos estudos de segurança de barragens, a possibilidade de falha nunca é nula. No caso de uma ruptura, os efeitos ocasionados no vale de jusante são, na grande maioria, catastróficos (SILVA et al., 2019). As consequências e a percepção pública destes rompimentos nas barragens de contenção de rejeitos cresceram, consideravelmente, tornando os proprietários e os gerenciadores mais conscientes dos riscos envolvidos nas construções dos reservatórios (DUARTE, 2008).

Muitas vezes, os instrumentos mais comumente instalados no monitoramento geotécnico, os piezômetros, podem gerar uma gestão de monitoramento inapropriada, pois estão suscetíveis a uma gama de erros que podem impedir a avaliação do desempenho da estrutura: erros de especificação e projeto, de calibração, humanos na instalação, interpretações defasadas das leituras, erros de processamento de dados, entre outros. Além disso, a gestão de monitoramento pode ser afetada por condições adversas como meteorológicas e físicas que dificultam o acesso ao instrumento, no caso de leituras manuais. Riscos e outras incertezas podem causar perdas que levam ao aumento de custos, atrasos e falta de qualidade durante a progressão dos projetos e no seu final. Em projetos, os objetivos são mais frequentemente relacionados a tempo, custo, qualidade e satisfação do cliente.

Segundo Carvalho e Paladini (2005), a gestão da qualidade é fundamental para a sobrevivência das organizações. É necessário para realizar a gestão da qualidade, aplicar o monitoramento e controle de todos os processos, averiguando se os procedimentos e recursos utilizados foram eficazes e atenderam às exigências da operação, como também questões de segurança, legais e éticas. O controle da qualidade, sobretudo como caráter preventivo, é essencial para manter as barragens e estruturas geotécnicas fisicamente estáveis e seguras ao longo de todo o ciclo de vida, incluindo construção, operação, descomissionamento, fechamento e pós-fechamento.

Basicamente como demandam as boas práticas de gerenciamento de qualquer obra geotécnica, a correta instrumentação da obra em suas várias etapas executivas e de operação; é fator fundamental para a boa confiabilidade quanto a mesma, sua estabilidade ou predição de falha (de modo a minimizar danos e perdas) (CARDOZO, 2019). Segundo Bressani, (2009) considera-se que a eficiente medição dos parâmetros desejados está relacionada com as etapas de: (i) planejamento da instrumentação, (ii) definição da posição e tipo de instrumentação, (iii) definição do pessoal responsável e (iv) análise crítica dos dados, sendo qualquer uma destas etapas possíveis fontes de erros e falhas.

Falhando-se nos procedimentos de instrumentação, etapas posteriores, assim, serão abastecidas com dados inverídicos, ou com variabilidade considerável, afetando-as (CARDOZO, 2019). Hu e Liu (2011), apontam que a utilização dos dados de monitoramento de forma automatizada, inteligente e conectada; constituem forma adequada de estruturação de um sistema de monitoramento de segurança de barragens de rejeitos.

Assim, a relevância do presente estudo é apresentar uma proposta de metodologia de QA/QC no processo de automação de piezômetros dada a necessidade de melhoria nos processos de instrumentação desde a fase de projetos até a etapa de monitoramento dos dados visando padrões de qualidade que proporcionem resultados precisos e confiáveis e garantam a segurança das estruturas geotécnicas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa teve como objetivo geral propor uma metodologia de garantia e controle da qualidade (QA/QC) aplicada ao processo de automatização de instrumentação piezométrica em estruturas geotécnicas da mineração tais como diques, barragens e pilhas de rejeito e estéril.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo principal, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Elencar as principais fontes de incertezas na automação de piezômetros.
- Propor requisitos mínimos com base na metodologia de QA/QC para um programa de instrumentação e automação de piezômetros confiável.
- Verificar estatisticamente a variabilidade dos dados e a aceitabilidade do processo de instrumentação e automação dos piezômetros.
- Comparar as séries de leituras históricas manuais e automatizadas de piezômetros instalados no Dique 2, objeto de estudo.
- Propor uma ficha de verificação das leituras de piezômetros automatizados para uso em campo como uma ferramenta de controle parte do processo de QC.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação apresenta-se dividida em cinco capítulos, sendo:

- Capítulo 1 introduz o tema, justifica a necessidade da pesquisa, propõe objetivo geral e objetivos específicos a serem atingidos pelo trabalho.
- Capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica necessária para o embasamento teórico do leitor, abrangendo contexto sobre a mineração, legislação e segurança de barragem, instrumentação geotécnica com ênfase na automação de piezômetros Casagrande com suas aplicabilidades e limitações. Traz os conceitos relevantes ao entendimento do estudo, principalmente relacionadas as principais fontes de incertezas que podem causar variabilidade nas leituras obtidas em campo e apresentados conceitos para implantação do programa QA/QC e modelo estatístico para análise comparativa da qualidade dos dados.
- Capítulo 3 são relatados os materiais e métodos utilizados no estudo, em que é apresentada uma proposta da aplicação da metodologia de QA/QC para a automação de piezômetros.
- Capítulo 4 apresenta o estudo de caso da aplicação de ferramentas de QA/QC em uma estrutura da mineração, denominada Dique 2 e os resultados obtidos com base na análise estatística da variabilidade dos dados, apresentação dos gráficos da série histórica temporal dos piezômetros e o método de controle estatístico do processo com gráfico de controle.
- Capítulo 5 consta os apontamentos conclusivos do estudo, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, será apresentada uma revisão bibliográfica evidenciando uma visão geral sobre disposição de rejeitos, segurança e legislação de barragens. Na sequência, está a conceitualização da instrumentação e monitoramento geotécnico com foco nos principais erros e incertezas durante o processo de automação de piezômetros. O foco principal do trabalho envolveu os conceitos da metodologia de QA/QC relacionando com as melhores práticas para instalação e coleta sistemática de dados geotécnicos de piezometria.

2.1 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Atualmente, existem várias tecnologias de disposição de rejeitos de mineração em uso ou em desenvolvimento, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e melhorar a segurança em comparação com as práticas tradicionais de barragens de rejeitos. De forma geral, estes podem ser dispostos: em minas subterrâneas; em cavas exauridas de minas; por empilhamento drenado; por filtragem a seco; por empilhamento a seco (dry stacking); por disposição de rejeitos espessados ou em pasta; em barragens de contenção de rejeitos (do tipo a montante, a jusante, misto e em linha de centro); por codisposição de rejeitos e estéreis; e por disposição compartilhada de rejeitos e estéreis. A seleção do método de disposição irá depender: da natureza do processo de mineração; das condições geológicas e topográficas da região; das propriedades mecânicas dos materiais; do poder de impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos e das condições climáticas da região (IBRAM, 2016).

Geralmente, o custo é um fator essencial na escolha do método de disposição de rejeitos. Entretanto, outros fatores também devem ser considerados de modo a evitar problemas com estabilidade, controle de nível hídrico e armazenamento de água, quais sejam: tipo dos rejeitos; características geotécnicas dos rejeitos; volumes de produção; necessidade de reservação de água; necessidade de controle de água percolada; sismicidade local; geomorfologia e topografia local; hidrologia local; hidrogeologia e geologia local; exigências e restrições legais, ambientais e sociais (SILVA NETO, 2010).

A maior parte da disposição de rejeitos da mineração mundial se faz por barragens de rejeitos, cuja função principal é a contenção dos mesmos, tendo por objetivo secundário a reservação de água para o reuso na mina e/ou no beneficiamento (IBRAM, 2016).

No contexto brasileiro, é importante destacar que as práticas e regulamentações estão passando por transformações significativas após as rupturas de Brumadinho em 2019 e Mariana em 2015. Essas mudanças são motivadas pela crescente preocupação com a segurança ambiental e a segurança pública.

O setor de mineração passou por revisões regulatórias e esforços para melhorar as práticas de gestão de rejeitos, e algumas empresas estão adotando alternativas às barragens convencionais, como filtragem e empilhamento a seco, para reduzir os riscos associados a essas estruturas.

2.1.1.1 Aspectos construtivos de barragens de rejeito

Os aspectos construtivos de barragens de rejeito são fundamentais para garantir a segurança e a estabilidade dessas estruturas. São utilizados diferentes materiais e processos construtivos, dependendo do projeto específico e das condições locais com base na viabilidade técnica, econômica e ambiental.

O talude de montante refere-se à parte do barramento que estará em contato com a água ou resíduos, podendo ser de inclinação única ou escalonado. Os taludes a jusante, preferencialmente, são escalonados e cada platô do escalonamento é chamado de berma, a qual auxilia na estabilidade da barragem (FERNANDES, 2022).

À medida que a extração do minério progride, as barragens são abastecidas com os resíduos que sobram da atividade e ampliadas de modo a abrir espaço para que novos rejeitos sejam depositados. Esse processo pode durar várias décadas.

Quanto aos métodos construtivos, do ponto de vista convencional existem três:

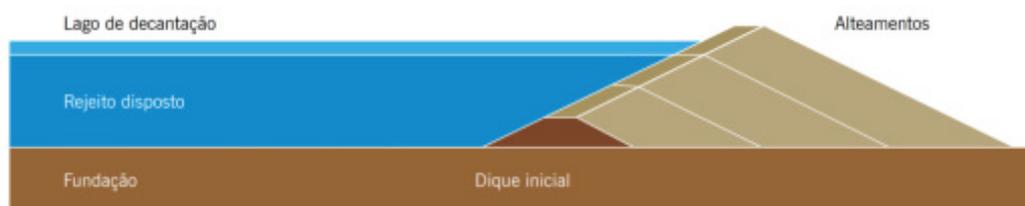
- a) Método de Montante;
- b) Método de Linha de Centro e
- c) Método de Jusante.

Existem muitas fontes na literatura que explicam estes métodos: Lucia (1981); Vick, (1990); U. S Environmental Protection (1994); IBM (1995); Hallman e Dorey (1995); Ribeiro (2000); Mular, Halbe e Barratt (2002); Hernandez (2002); Gaioto (2003); Araújo (2006); Soares (2010); Bhanbhro (2014); Alsharedah (2016); Tanchev (2012); Lazarim (2015); Fell et al. (2015).

A barragem passa por alteamentos ao longo de sua vida útil, alguns dos aspectos que utilizam métodos construtivos são:

- Etapa única, quando a barragem inteira consiste em um único dique, construído de uma só vez;
- Alteada a jusante (FIGURA 2.1), quando a barragem é ampliada em etapas, ao longo de sua vida útil, em direção à sua parte externa;
- Alteada por linha de centro (FIGURA 2.2), quando a barragem é ampliada em etapas, ao longo de sua vida útil, com diques que se sobrepõem;
- Alteada por montante (FIGURA 2.3), quando a barragem é ampliada em etapas, ao longo de sua vida útil, com diques novos que se assentam sobre a borda do reservatório.

FIGURA 2.1- Método construtivo de alteamento a jusante



Fonte: IBRAM (2016).

FIGURA 2.2 - Método construtivo de alteamento de linha de centro



Fonte: IBRAM (2016).

FIGURA 2.3 - Método construtivo de alteamento a montante



Fonte: IBRAM (2016).

Embora seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método por montante apresenta um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação à segurança (IBRAM, 2016). O agravante neste caso está ligado ao fato de os alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de compactação fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos (ARAUJO, 2006). Nesse método construtivo ainda existe uma dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura (DUARTE, 2008).

As barragens são estruturas complexas e sensíveis a erros, por isso é necessária atenção especial no desenvolvimento de um projeto, um planejamento detalhado e que envolve muitas áreas de estudo, desde os fatores de projeto, operação e ao longo de toda a sua vida útil.

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITOS

Segurança de barragem é uma condição que visa a manter a sua integridade estrutural e operacional, de modo a minimizar o risco de incidentes ou acidentes, para que cumpra sua finalidade e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente.

Ao todo, no Brasil há 22.654 barragens cadastradas por 33 órgãos fiscalizadores no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (ANA, 2022). Uma barragem segura é uma barragem bem cuidada, na qual esforços, energia, atenção, recursos e profissionais capacitados são direcionados para uma boa concepção, um bom projeto, uma construção que siga as boas práticas da engenharia e para as etapas posteriores à construção: primeiro enchimento, manutenção, operação e desativação, se for o caso (ANA, 2021). A Segurança de Barragens é uma área de estudos multidisciplinar. Os fatores de projeto de uma barragem são fundamentais para o sucesso da estrutura, e serão definidos em função da finalidade da barragem. Alguns parâmetros prévios são definidos para um bom planejamento e execução de uma obra de barragem (RUSSO, 2007). Dentre os mais importantes, podem ser citados:

Estudos geológicos: definição da geologia local, das características geológicas, os tipos de estruturas que ali se encontram, desde a gênese até os eventos que ocasionam as falhas, levantamento de falhas e orientações das descontinuidades das estruturas geológicas.

Estudos geotécnicos: para um conhecimento aprofundado sobre as características geotécnicas daqueles materiais, como resistência uniaxial, ao cisalhamento, entre outros. As

barragens são sensíveis a problemas de fundação, então erros nestes estudos podem implicar em danos severos a estrutura posteriormente. Para o material que irá compor o barramento, essas propriedades auxiliam a determinar os módulos de falha que a barragem estará sujeita.

Estudos hidrológicos: para a definição dos volumes em casos de cheias, para dimensionar bacias de amortecimento e vertedouros. Um mau dimensionamento pode causar um transbordo que leva a estrutura a se romper por galgamento. Além disso, um estudo hidrológico fornece regularização de cheia da região, de forma a definir o volume de água disponível no sistema para atender a usina. A definição desses dados são fator de risco para a operação de barragens.

Estudos hidrogeológicos: pois nas barragens a percolação (envolve a condutividade hídrica do material) é fator de alto risco. O modelamento hidrogeológico define parâmetros adequados para correção de problemas de fluxo pela fundação e pelo talude.

Estudos topográficos: para a definição e locação da barragem. Uma distância maior da barragem em relação a usina pode ocasionar em maiores gastos com bombas e manutenções dos dutos. É importante também uma análise da cota da locação da barragem, onde as áreas de maior risco são definidas a jusante da estrutura. É interessante que seja estrategicamente posicionada a fim de reduzir os possíveis danos de uma eventual ruptura.

Controle tecnológico construtivo e “As Built” - como construído: o controle tecnológico é exigido pela complexidade e dimensão da obra, um controle de construção é necessário. O “as Built” é um documento (livro) que representa tudo o que ocorre na construção da barragem. Tudo que foi feito, relocação de estruturas, escolhas de material, desenhos topográficos, qualquer coisa que for alterada deve estar documentada neste livro, que é exigido pela PNSB.

Controle Operacional: como formação de praia, granulometria e saturação. Confecção do manual operacional da barragem, treinamento de toda a equipe envolvida, desde os operadores até a alta gerência da empresa, para que as operações unitárias sejam devidamente desempenhadas desde a construção da barragem até a sua operação ao longo de toda a sua vida útil, reduzindo chances de falha. Fatores operacionais mal desenvolvidos podem gerar problemas crônicos na estrutura.

Controle de Instrumentação: este é determinado em função de possíveis módulos de falha a qual a estrutura está sujeita. Os fatores que controlam a estabilidade estrutural, como poropressão, deformações sub-horizontais, condutibilidade hidráulica do material depositado e recalque definem quais instrumentos geotécnicos mínimos serão necessários para o sucesso do programa de monitoramento e sua adequada implementação. Uma maior frequência na coleta

e consequente leitura e interpretação de dados são importantes para a detecção de possíveis problemas estruturais. Um monitoramento geotécnico eficiente é indispensável em termos de Segurança de Barragens, visto que nenhuma estrutura está imune ao risco de falha. Segundo Silva et al. (2015) “Risco de falha” está relacionado a algum comportamento anômalo, “movimentos não admissíveis” que podem ocasionar falhas. As metodologias de monitoramento também devem ser abordadas no Plano de Segurança de Barragem, estabelecido pela Lei nº 12.334.

Além dos fatores de projeto, podem-se destacar os fatores operacionais, pois apenas seguindo o manual operacional é possível garantir a segurança atrelada a continuidade do funcionamento da estrutura ao longo de sua vida útil, e por isso treinamentos e auditorias de segurança são peças-chave para o seu bom funcionamento, mantendo elevado nível de qualificação de funcionários, operadores e responsável técnico, alta gerência da empresa, ou seja, toda a equipe envolvida.

Para Zatelli (2019), o reforço da segurança das barragens de rejeitos de mineração no Brasil poderia ser conseguido a partir da(o):

- Implementação de um diagnóstico emergencial das condições de segurança das barragens de rejeitos;
- Implantação de medidas de reforço estrutural em barragens com riscos elevados de ruptura;
- Revisão dos sistemas de monitoramento de riscos aplicáveis às barragens de rejeitos;
- Avaliação da viabilidade da implantação de novas tecnologias e sistemas de diagnóstico, monitoramento e alerta online;
- Ampliação do rigor nas avaliações de riscos nos projetos de barragens de rejeitos de mineração;
- Priorização da segurança em detrimento aos aspectos econômicos nos projetos minerários.

2.2.1 Controle de segurança de barragens

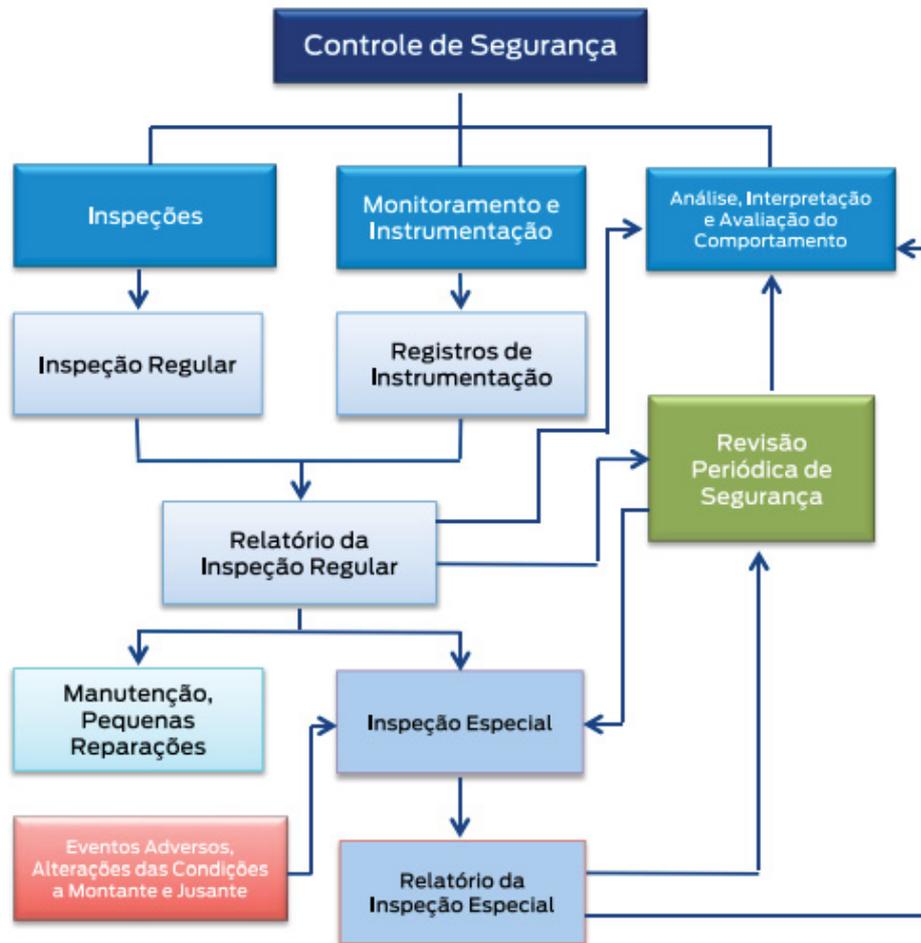
O controle de segurança de barragens, feito com base no seu monitoramento e inspeção, incluindo aspectos estruturais, hidráulicos e operacionais e mesmo aspectos ambientais, visa detectar em tempo útil qualquer anomalia que possa comprometer o desempenho do

empreendimento ou ameaçar a sua segurança e implementar as necessárias medidas corretivas (ANA, 2016).

Ainda segundo ANA (2016), a avaliação do comportamento da barragem é feita de uma forma rotineira com a realização das Inspeções de Segurança Regulares, em cujo relatório deverá constar o resultado da inspeção e a revisão dos registros de instrumentação disponíveis. Essas inspeções permitem detectar sinais ou evidências de deterioração, comportamentos anômalos ou sintomas de envelhecimento, bem como anomalias da instrumentação instalada e são dos tipos regular e especial.

Na FIGURA 2.4 apresenta-se um organograma das atividades de controle de segurança. Estas atividades devem ser apoiadas por modelos de comportamento devidamente calibrados, correlacionando as propriedades estruturais, as ações e seus respectivos efeitos estruturais e eventuais consequências, obtidos através do monitoramento e das inspeções.

FIGURA 2.4 – Organograma das atividades de controle de segurança



Fonte: ANA (2016).

Podem ser estabelecidos modelos estatísticos, quando se dispõe de um número elevado de resultados do monitoramento, modelos determinísticos, analisados de forma direta (considerando os resultados do monitoramento das propriedades estruturais e das ações e determinando os respectivos efeitos e consequências), ou de forma inversa (considerando os resultados do monitoramento das ações e dos seus efeitos e estimando as propriedades estruturais) (ANA, 2016).

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE LEGISLAÇÃO DE BARRAGENS

2.3.1 Aspectos sobre legislações de alguns países

O início da legalização da segurança de barragens no mundo teve início no século passado. Países europeus e americanos tiveram suas legislações criadas em meados dos anos 1970 e 1990 e estas puderam ser detalhadas através de suas regulamentações posteriores de acordo com a característica de cada região (PANIAGO, 2019).

Nos Estados Unidos, o tema começou a ser tratado e regulamentado desde 1920, mas foi instrumentado anos depois com as agências federais, como o *U.S Army Corps of Engineers* (USACE). No início do século XX, construiu-se diversas barragens e institucionalizou diversas normas de segurança durante este tempo (USACE, 2011). Em Portugal, foi publicado, em janeiro de 1990, o Decreto-Lei nº 11, o qual versava sobre a regulamentação geral e ampla de segurança de barragens no país (PORTUGAL, Decreto-Lei n. 11, 1990). Já em 1993, o citado país publicou um regulamento mais estrito, direcionado às pequenas barragens (PORTUGAL, 1993).

Segundo Fontenelle (2007), evoluções, tais como a do processo natural de envelhecimento das obras, ou a da tendência, frequentemente verificada, para a ocupação dos vales a jusante das barragens, bem como o aumento da percepção do risco associado a este tipo de estrutura, conduzem à maiores exigências de segurança de barragens.

De acordo com o relatório do Banco Mundial, "vários países do mundo, inclusive o Brasil, têm se preocupado em legislar sobre o tema segurança de barragens. Destacam-se Estados Unidos, Canadá, Austrália, Portugal e Espanha em uma lista de mais de 50 países". Países como EUA, Austrália e Canadá iniciaram programas de segurança de barragens entre as décadas de 70 a 90 (IBRAM, 2021).

Órgãos como o ICOLD – *International Committee on Large Dams*, USACE - *U.S. Army Corps Of Engineers*, U.S. *Bureau of Reclamation*, CDA – *Canadian Dam Association*,

Queensland Government, New South Wales Dam Safety Committee e *ANCOLD - Australian National Committee on Large Dams, United Nations Economic Commission for Europe (ECE)* e o Banco Mundial, são exemplos de entidades que possuem publicações internacionalmente reconhecidas e que abordam o tema da segurança de barragens, na forma de diretrizes e recomendações; algumas dessas instituições produzem também trabalhos periódicos sobre assuntos mais específicos, como a avaliação de riscos e metodologias existentes.

Golder (1999) sugere que as regulamentações referentes ao armazenamento de rejeitos devem ser flexíveis suficiente para acomodar as variações físicas, técnicas e considerações sociais dos diferentes locais. Uma estrutura de regulamentação ideal deve acomodar mudanças futuras, como o conhecimento técnico e o crescimento esperado da comunidade. A regulamentação também deve ser escrita para identificar proativamente as mudanças potenciais e os perigos, ao invés de simplesmente reduzir os eventos inaceitáveis depois de ocorrido.

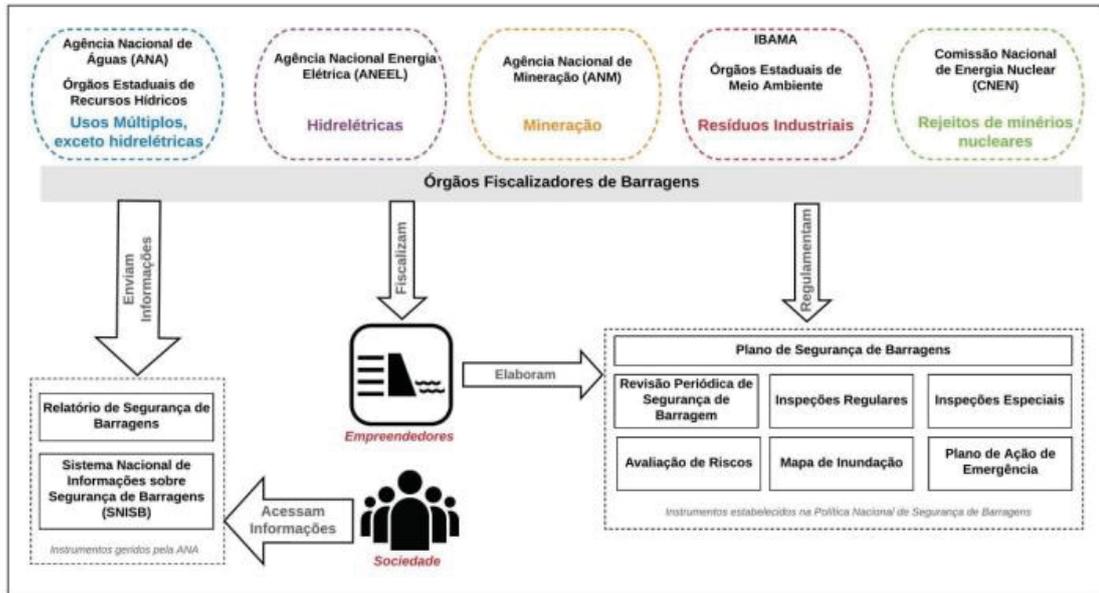
2.3.2 Legislação e normas brasileiras

No âmbito federal, a Lei N.º 14.066, de 30 de setembro de 2020 (BRASIL, 2020), altera a Lei N.º 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), estabelecendo a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Dentre as alterações percebe-se mais claramente as competências fiscalizatórias.

Segundo Fernandes (2020), as leis são uma referência para os órgãos fiscalizadores, como no caso da Agência Nacional de Mineração (ANM), que é responsável pela fiscalização das barragens de mineração no âmbito federal e Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), no que diz respeito a normatização do gerenciamento de disposição de rejeitos e acumulação de água, sendo que a FEAM abrange somente o estado de Minas Gerais. Já as Resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) são nacionais, aplicáveis em conformidade com as leis Nacionais para água e rejeitos, sendo que para gerenciamento das barragens de acumulação de água, tem-se Deliberações Normativas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Agência Nacional de Águas (ANA), também em âmbito Nacional.

O trabalho de Braga (2021) apresenta um organograma mostrado na FIGURA 2.5, do arranjo institucional e os instrumentos da PNSB e as respectivas competências regulatórias.

FIGURA 2.5 – Determinações da PNSB quanto aos órgãos fiscalizadores e ao PSB



Fonte: Braga (2021).

A razão que levou o Brasil, a elaboração e aprovação da lei que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), foi o reconhecimento do elevado nível de problemas de natureza organizacional, responsável pelo estado de abandono de várias barragens brasileiras a partir da vulnerabilidade nos projetos a construção e operação das estruturas existentes.

O aperfeiçoamento e o surgimento de novas políticas ambientais são catalisados ou impulsionados por diversos fatores, dentre eles destacam-se os desastres ambientais. Segundo Braga (2021), historicamente, eventos catastróficos são o principal gatilho do processo de mudanças políticas em matéria ambiental, pois, de forma súbita e contundente, expõem problemas preexistentes. As diversas modificações nas normas e legislações brasileiras relacionadas à mineração e disposição de resíduos demonstram esta tendência.

Existem outros desafios relacionados à implementação das diretrizes trazidas por guias internacionais que, também, de forma inédita, não se limitaram ao aspecto técnico do gerenciamento das estruturas de disposição de rejeito, já que propuseram uma profunda alteração da cultura de gestão e governança dos empreendedores.

De forma complementar, a TABELA 2.1 apresenta um descritivo de algumas das principais legislações vigentes aplicadas as barragens de todas as tipologias.

TABELA 2.1 – Principais legislações vigentes aplicadas a segurança de barragens

LEGISLAÇÃO	APLICAÇÃO		PRINCIPAL PONTO
LEI Nº 12.334, DE 20 DE SETEMBRO DE 2010	Nacional	Rejeitos e Água	Estabelecimento da PNSB - PSB e PAE
RESOLUÇÃO ANA Nº 91, DE 02 DE ABRIL DE 2012	Nacional	Água	Itens a serem considerados no PSB e revisão periódica
RESOLUÇÃO CNRH Nº 143, DE 10 DE JULHO DE 2012	Nacional	Rejeitos e Água	Critérios gerais de classificação de barragens - CRI e DPA
RESOLUÇÃO CNRH Nº 144, DE 10 DE JULHO DE 2012	Nacional	Rejeitos e Água	Diretrizes mínimas para elaboração do PSB
PORTARIA DNPM Nº 416, DE 3 DE SETEMBRO DE 2012	Nacional	Rejeitos	Cadastro de barragens e Inspeções
PORTARIA DNPM Nº 526, DE 9 DE DEZEMBRO DE 2013	Nacional	Rejeitos	Itens a serem considerados no PSB e revisão periódica
DECRETO Nº 46.993, DE 2 DE MAIO DE 2016	Estadual	Rejeitos	Auditoria extraordinária para barragens de Montante
RESOLUÇÃO CNRH Nº 178, DE 29 DE JUNHO DE 2016	Nacional	Rejeitos e Água	Altera a 144 - Diretrizes mínimas para elaboração do PSB
RESOLUÇÃO ANA Nº 236, DE 30 DE JANEIRO DE 2017	Nacional	Água	Tópicos para elaboração do PSB e do PAE
RESOLUÇÃO CONSELHO DESASTRES Nº 1, DE 28 DE JANEIRO DE 2019	Nacional	Rejeitos e Água	Recomenda ações de resposta à ruptura de Brumadinho
RESOLUÇÃO ANM Nº 4, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2019	Nacional	Rejeitos	Diretrizes para barragens alteadas por montante - Proibição
LEI Nº 23.291, DE 25 DE FEVEREIRO DE 2019	Estadual	Rejeitos e Água	Política Estadual de Segurança de Barragens + Licenciamento
RESOLUÇÃO SEMAD/FEAM Nº 2.784, DE 21 DE MARÇO DE 2019	Estadual	Rejeitos	Descaracterização das barragens de montante
RESOLUÇÃO ANM Nº 13, DE 8 DE AGOSTO DE 2019	Nacional	Rejeitos	Critérios de descomissionamento e descaracterização
RESOLUÇÃO ANM Nº 32, DE 11 DE MAIO DE 2020	Nacional	Rejeitos	Altera a Portaria 70.389, complementando o que já estava na Res.13
RESOLUÇÃO ANM Nº 40, DE 06 DE JULHO DE 2020	Nacional	Rejeitos	Altera artigo 7 e define prazos para monitoramento e vídeo
LEI Nº 14.066, DE 30 DE SETEMBRO DE 2020	Nacional	Rejeitos e Água	Altera a Lei nº 12.334 - PNSB
DECRETO Nº 48.078, DE 5 DE NOVEMBRO DE 2020	Estadual	Rejeitos e Água	Diretrizes para análise e aprovação do PAE
DECRETO FEAM Nº 48.140, DE 25 DE FEVEREIRO DE 2021	Estadual	Rejeitos e Água	Novo Sistema de Classificação Barragens
RESOLUÇÃO SEMAD/FEAM/IEF/IGAM Nº 3.049, 2 DE MAR/2021	Estadual	Rejeitos e Água	Termos para apresentação PAE, inclusive Termos de Referência
PORTARIA Nº 679, DE 06 DE MAIO DE 2021	Estadual	Rejeitos e Água	Procedimento Cadastro Auditor, Relatório RTSB e SigiBar
RESOLUÇÃO ANM Nº 85, DE 2 DE DEZEMBRO DE 2021	Nacional	Rejeitos	Aproveitamento de Rejeitos e Estéreis
RESOLUÇÃO ANM Nº 95, DE 7 DE FEVEREIRO DE 2022	Nacional	Rejeitos	Consolida normativos de Rejeitos

Fonte: Adaptado de FERNANDES (2020).

2.4 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

2.4.1 Generalidades

A ocorrência de falhas em estruturas geotécnicas pode ser atribuída a uma variedade de razões, abrangendo desde erros no projeto até questões relacionadas à instabilidade geológica, deficiências na manutenção, deterioração e envelhecimento das estruturas, entre outros fatores relevantes. Essa variedade de causas destaca a importância de adotar uma abordagem abrangente e rigorosa durante todo o processo, desde a concepção e construção até o monitoramento contínuo, a fim de assegurar a segurança e a longevidade dessas estruturas ao longo do tempo. No entanto, um bom plano de monitoramento geotécnico com vistorias periódicas em campo, subsidiados pela interpretação adequada dos dados coletados que sinalizariam o comportamento dos maciços das barragens podem prevenir tais falhas, fornecendo a informação fundamental para perceber onde e quando atuar, possibilitando a tomada de decisão frente ao cenário apresentado em tempo adequado.

Importante considerar que a segurança de uma barragem depende de um bom projeto baseado em estudos hidrológicos, hidrogeológicos, geológicos, geotécnicos, sismológicos combinados com o correto dimensionamento, do cuidadoso processo construtivo e da manutenção visando a não deteriorização da estrutura. A instrumentação bem planejada não aumenta a segurança das barragens, ainda que se constitua em importantíssima ferramenta de observação do comportamento de obras de engenharia (ANA, 2016). Todos os instrumentos possuem suas limitações técnicas, e o fato de uma barragem estar instrumentada e analisada, não elimina a necessidade de inspeções visuais periódicas e pormenorizadas, as quais podem detectar anomalias impossíveis de serem detectadas com a instrumentação: fissuras ou trincas, surgência de água, erosão ou degradação localizada de material, entre outros (CBDB, 1996). Infere-se que é necessário um estudo rigoroso, detalhado e preciso sobre os módulos de falha que envolvem determinada estrutura, para então determinar as variáveis críticas a serem monitoradas. A partir deste ponto, determina-se o objetivo da instrumentação para um monitoramento adequado, ajudando a prevenir/antever um colapso estrutural.

Para Cruz (2004), são três os objetivos da instrumentação: verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados em projeto; verificar a adequação de métodos construtivos; e verificar as condições de segurança das obras. A segurança de uma barragem está diretamente ligada ao seu projeto e sua construção, sendo assim a instrumentação não aumenta a segurança

da obra, mas é um meio importante para obtenção de dados e, a partir daí a tomada de decisões e reparos, caso sejam necessários.

A instrumentação é usada para um amplo espectro de medições para identificar as variações das quantidades físicas e mecânicas que são implementadas na área de engenharia geotécnica e construção de projetos (CASTRO, 2008). Toda barragem deve ser instrumentada, de acordo com seu porte e riscos associados e ter os dados analisados periodicamente, assegurando o constante monitoramento de suas estruturas, obtendo maior segurança e confiabilidade com relação a estabilidade deste empreendimento e, além disso, para cumprir os requisitos legais (VIEIRA, 2017). Trata-se de um procedimento fundamental para avaliar a estabilidade tanto na fase de alteamento como na etapa de operações e lançamento de rejeitos e resíduos, bem como para o processo de descomissionamento/desativação e recuperação do meio ambiente local.

A colocação desses instrumentos em locais sensíveis na estrutura da barragem, juntamente com dispositivos de medição adequados e, finalmente, o registro de dados online, leva a uma avaliação abrangente da segurança de barragens ao longo de sua vida útil. Embora exista uma grande diversidade de instrumentos/equipamentos disponíveis, é necessária uma análise adequada para aferir quais são os mais indicados para os vários tipos de estrutura ou infraestrutura a monitorar e qual deverá ser a sua localização para a obtenção de resultados representativos das situações mais adversas. Assim, uma instrumentação adequada não está apenas dependente da escolha apropriada dos equipamentos/instrumentos, mas também de todo o procedimento de conhecimento das estruturas por parte do engenheiro, para que sejam otimizados, em termos de quantidades, a utilizar e para que a localização abranja áreas representativas (DUNNICLIFF & GREEN, 1988).

No que diz respeito às quantidades a instalar, é necessário realizar uma análise detalhada da área para evitar a colocação de dispositivos em excesso, dificultando o acesso e, conseqüentemente, a coleta dos dados. Por outro lado, se for colocada uma quantidade inferior à necessária, quer por razões econômicas, quer por análise deficiente da área, os dados registados poderão não ser suficientemente representativos, o que irá dificultar a análise e a interpretação (SEGALINI et al., 2017).

Uma verificação cuidadosa de uma série de dados de instrumentação pode revelar uma possível condição crítica. Por outro lado, a instrumentação pode ser um meio de assegurar que uma condição observada não é grave e não requer medidas corretivas imediatas (ADAMO, 2020). Cruz (1996) comenta que a instrumentação geotécnica auxilia no processo de verificação da performance e tendência de comportamento de uma estrutura geotécnica, sendo ela fundamental para estudos analíticos.

De acordo com Dunnicliff (1988), a instrumentação geotécnica envolve a união das capacidades dos instrumentos de medida e das capacidades das pessoas. A prática da instrumentação não se restringe apenas à seleção de instrumentos, sendo na verdade um processo que começa com a definição do objetivo e termina com a análise rigorosa dos dados coletados. Cada passo neste processo é relevante para o sucesso do programa de instrumentação.

Fusaro (2007) salienta que, as boas práticas de controle de segurança de uma barragem determinam que existam inspeções visuais periódicas do maciço e estruturas auxiliares e monitoramento por meio de instrumentação geotécnica, nesse quesito é necessário, coletar, verificar e validar os dados advindos da instrumentação e interpretar os dados de forma analítica.

O desenvolvimento de especificações e procedimentos técnicos é uma necessidade imperativa para garantir a aquisição de dados com qualidade. Assegurar a excelência e a conformidade em todas as etapas de implantação, desde a fase de projeto até o comissionamento, é fundamental para o êxito da instrumentação geotécnica, mitigando riscos e reduzindo incertezas que, de outra forma, poderiam resultar em custos adicionais, atrasos e deficiências na qualidade ao longo do andamento e conclusão dos projetos.

A automação de instrumentos vem com novas propostas que tendem a minimizar os problemas e riscos da leitura manual, trazendo de forma mais precisa e frequente cada dado de cada equipamento. Com a implementação da automação bem projetada, é possível realizar leituras mais frequentes (SILVEIRA, 2006). Tais propostas podem trazer melhorias na gestão de segurança de barragens, pois a obtenção de dados correta e atual é fundamental para a detecção de comportamentos anômalos da barragem antes que se tornem irreversíveis.

Um bom plano de instrumentação geotécnica desempenha um papel fundamental na engenharia geotécnica, sendo essencial para a compreensão do comportamento e das propriedades mecânicas do solo e das estruturas. No entanto, é importante ressaltar que o plano por si só não é suficiente para garantir resultados satisfatórios.

A capacitação adequada da equipe que atua em campo durante a instalação e coleta dos dados, assim como o tempo de processamento e análise das informações, desempenham um papel igualmente fundamental. Sem uma equipe devidamente treinada e experiente, os instrumentos podem ser instalados, configurados ou lidos inadequadamente, comprometendo a qualidade dos dados obtidos. Além disso, o tempo de processamento de dados permite correções ou ajustes necessários ao longo do processo. Dessa forma, a combinação de um sólido plano de instrumentação com a capacitação da equipe e uma gestão eficiente do tempo de processamento é o que verdadeiramente impulsiona o sucesso e a confiabilidade da instrumentação e monitoramento geotécnico.

2.4.2 Objetivos da instrumentação em barragens

Há um alinhamento entre alguns autores com relação às premissas e objetivos da instrumentação nas diferentes fases citadas da utilização das barragens de mineração, abaixo segue a síntese bem descrita apontada por Soares (2010).

a) Fase de implantação das barragens:

- Indicar eventos de anomalias no comportamento das barragens ou de situações que possam favorecer o surgimento de aspectos incompatíveis com o esperado em projeto;
- Sugerir revisões no projeto, uma vez que as soluções até tal fase se mostrem conservadoras demais, ou o oposto, indicando a redução ou necessidade de aditivo a obra.
- Verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros utilizados no projeto executivo para permitir o aprimoramento da obra em estudo;

b) Fase de operação das barragens:

- Indicar eventos de anomalias que possam comprometer a estabilidade das estruturas;
- Avaliar o desempenho das estruturas comparando as medidas apontadas pelos instrumentos com aquelas esperadas por modelos matemáticos teóricos;
- Avaliar e ajustar o processo construtivo;
- Auditar a conformidade dos critérios utilizados do projeto;
- Avaliar o desempenho geral da barragem, conforme previsto em projeto;
- Caracterizar o comportamento dos materiais das estruturas com o desenvolvimento da obra, no intuito de levantar os parâmetros de tempo para estabilização dos deslocamentos, das tensões internas, estabilização das vazões, dentre outros;
- Analisar o comportamento do conjunto obra/maciço de suporte durante a vida útil do empreendimento.

c) Fase de desativação:

- Avaliar a estabilidade estrutural resultante do lançamento de rejeitos;
- Avaliar o desempenho estrutural, através das medições de tensão interna, variações de vazão, dentre outros.

Para atingir esses objetivos, os técnicos recorrem às inspeções visuais e periódicas de campo, aos equipamentos mecânicos e elétricos, à geodésia para estabelecer pontos de referência e, mais recentemente, buscam-se apoio nos recursos computacionais, como scanners, redes de transmissão de dados, bem como nos veículos aéreos não tripulados (drones) (CRUZ, 2004).

2.4.3 Piezômetros

O piezômetro é um instrumento de medição geotécnica, utilizado para medir a pressão da água e o nível do lençol freático durante a construção e operação de uma barragem, pilhas de rejeitos/estéril de mineração ou operações de exploração mineral. É usado principalmente para medir o nível do lençol freático produzido por alguma infiltração de águas subterrâneas. O monitoramento do lençol freático é muito importante, pois o aumento excessivo da pressão hidrostática ou da carga hidráulica pode ser muito arriscado, por isso o uso desse tipo de instrumentação é fundamental para conhecer essas variações de nível.

Os piezômetros têm como finalidade a medição de poropressões e podem ser instalados em diversas posições na barragem (maciço, sistema de drenagem e fundação) e aplicados para monitoramento do lençol freático, da pressão da água, dos sistemas de drenagem e da qualidade das águas subterrâneas.

Poropressão é definida como a pressão da água subterrânea atuante nos poros do solo e da rocha. Em qualquer ponto abaixo do lençol freático, a poropressão é o resultado do peso da coluna de água atuando naquele ponto contra os grãos interconectados ou fraturas. Poropressão é positiva nos pontos abaixo do lençol freático, nula nos pontos de mesmo nível que o nível do lençol freático e negativa nos pontos acima do lençol freático. (CERQUEIRA, 2017).

Os tipos mais comuns de piezômetros são: Casagrande de tubo aberto ou fechado (dependendo da pressão apresentada no ponto); hidráulico de dupla tubulação; pneumático; de resistência elétrica; de corda vibrante; e mais recentemente começaram a ser usados os piezômetros de fibra ótica (SILVEIRA, 2006). Essa pesquisa se concentrou apenas nos piezômetros Casagrande de tubo aberto e de corda vibrante.

Hanna (1985), cita que, na seleção de um piezômetro é essencial que a permeabilidade do solo seja considerada se as poropressões daquele solo estão sendo registradas com um mínimo intervalo de tempo de resposta (time lag). A instalação de qualquer sistema de piezometria e do tipo de piezômetro, basicamente requer:

- o registro da poropressão no terreno, se positiva ou negativa, na localização dos piezômetros. Os erros na leitura devem permanecer dentro dos limites conhecidos e tolerados;
- que não aconteça erro na leitura, independente do princípio de captação da pressão no solo;
- adoção de um tipo de piezômetro que cause o mínimo de interferência no solo natural a ser instalado;
- que o piezômetro deva responder rapidamente a mudanças nas condições da água subterrânea;
- que o piezômetro seja resistente e confiável quanto à interferência no meio ambiente e permaneça estável por longo período. Suas partes não devem ser suscetíveis ao ataque químico;
- que ele tenha capacidade de medição contínua ou intermitente, se requerido. O sistema de registro de dados não deve introduzir o erro na leitura;
- confiabilidade quanto ao sistema completo, como o tipo de piezômetro adotado, o responsável técnico pelas leituras e o método de registro dos dados coletados;
- avaliação do experimento para gerar uma correta calibração, instalação e manutenção. Este assunto é essencial para a educação e treinamento da equipe, chamando a atenção aos temas necessários, por meio de um manual de instrumentação bem elaborado e confiável, constando aspectos detalhados da sua montagem, instalação, leitura e processamento dos dados;
- um piezômetro mais confiável possível e que possa ser calibrado *in situ*, em intervalos de tempo regulares.

De modo geral a escolha de um dado piezômetro é feita em função de características como confiabilidade, simplicidade, robustez, durabilidade, sensibilidade, facilidade de instalação, custo e possibilidade de monitoramento remoto. Em termos gerais, entretanto, a caracterização geotécnica de um dado piezômetro é feita com base nos seguintes parâmetros (FONSECA, 2003):

- tempo de resposta (“time lag”): é o tempo necessário para o piezômetro detectar uma determinada variação na pressão ao nível da célula. Para efeitos práticos, adota-se para a caracterização deste parâmetro o tempo ($t_{90\%}$) correspondente a 90% da equalização da variação de pressão;

- fator de volume: é a quantidade de água que deve percolar pela célula de leitura para indicar uma variação unitária da pressão ao nível da célula;
- grau ou porcentagem de equalização: Está relacionada a variação de pressão indicada pelo sistema de medidas num dado tempo e a variação real de pressão ocorrida ao nível da célula do piezômetro;
- tempo de retardo básico: é o tempo necessário para um piezômetro de tubo aberto equalizar um acréscimo ou decréscimo de pressões, admitindo-se uma vazão constante no início do fluxo.

2.4.3.1 Piezômetro Casagrande

Os piezômetros de tubo aberto do tipo Casagrande também conhecidos por standpipe são utilizados para detectar, medir e monitorar o lençol freático, e através de cálculos complementares medir a pressão dos poros, especificamente na profundidade de instalação da ponta de medição, sendo necessário nas etapas de construção, conhecer os pontos críticos de medição e adquirir dados que podem ser úteis (BERLTRAN & VINTIMILLA, 2014).

São instrumentos tradicionais no monitoramento de barragens de rejeito pela robustez, facilidade de execução, alta durabilidade, boa confiabilidade a longo prazo e baixo custo. São utilizados principalmente na observação de poropressões, subpressões e cargas piezométricas em barragens de aterro e enrocamento (SILVEIRA, 2006). Porém, não são adequados para determinar poropressão em períodos construtivos da barragem, além de possuírem a limitação de não serem adequados para mudanças bruscas de variações nos níveis de água - podem apresentar atraso na resposta a essas variações (MACHADO, 2007).

O instrumento consiste basicamente num tubo de PVC, metálico ou tubo geomecânico, ranhurado ou perfurado em trechos, inserido num furo feito previamente (em geral, para sondagem). O fluxo da água subterrânea através das ranhuras do tubo submetida à uma determinada carga piezométrica faz com que o nível da água no interior da tubulação suba ou desça conforme a variação das condições deste fluxo. O instrumento oferece uma medida da carga piezométrica influenciada por ações barométricas, ou seja, uma medida da carga piezométrica atuante na posição da célula de areia. Um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. Esta célula de areia fica conectada à superfície do terreno por meio da tubulação e, portanto, tem suas variações medidas sujeitas às condições barométricas. Nas etapas de projeto, é necessário estudar o material que

constitui a área alvo, e o tempo de resposta necessário para nivelar as variações em determinadas condições de fluxo (CERQUEIRA, 2017).

Os procedimentos para a instalação de piezômetros abertos são baseados nas condições dos materiais que são atravessados e nas estabelecidas pelo projeto. Para instalar um piezômetro, é necessário localizar topograficamente a posição do topo do tubo, bem como sua elevação em relação ao nível do terreno. O piezômetro aberto funciona com base no princípio dos vasos comunicantes. Uma célula ou bulbo poroso capta a água de dentro do solo no ponto de interesse e a pressão atuante naquele ponto a eleva pelo tubo até uma posição (coluna d'água) que equilibra a pressão no bulbo piezométrico; A altura da coluna desde a elevação do bulbo piezométrico até o nível da água na tubulação é a medida da poropressão naquele ponto (BERLTRAN & VINTIMILLA, 2014).

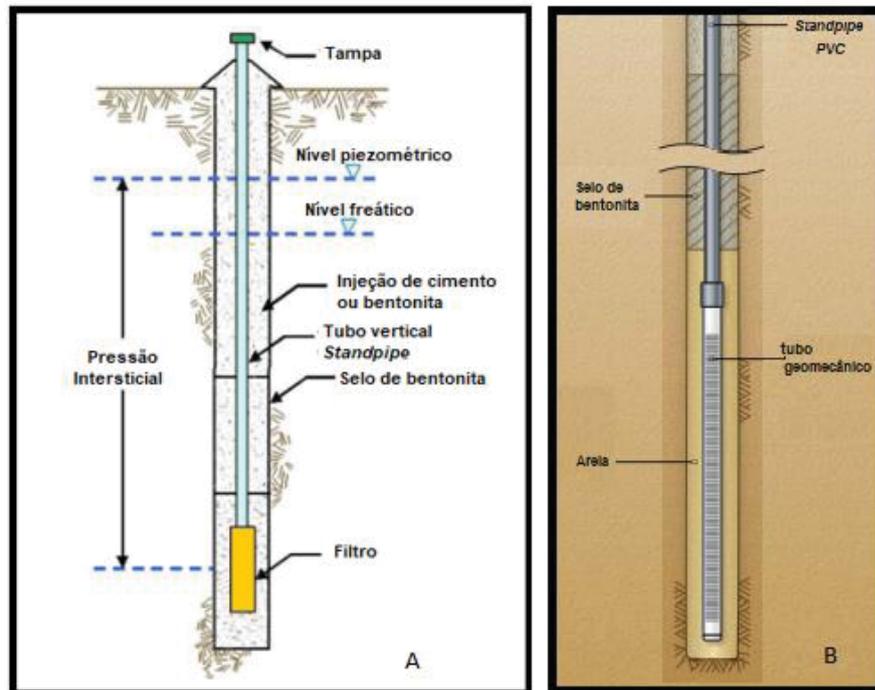
A variação das poropressões é obtida medindo as distâncias da superfície livre da água no tubo, em relação ao nível de elevação do topo do tubo de PVC do piezômetro; com esta distância e o nível de elevação do bulbo piezométrico, obtém-se o comprimento da coluna d'água de interesse. A coleta dos dados deve ser feita de forma ordenada e periódica. Além disso, o mesmo formato deve ser sempre utilizado para evitar erros no manuseio deles.

Os Piezômetros Casagrande são, de uma forma geral, uma versão aperfeiçoada dos indicadores de nível de água (INA) tradicionais. O que os difere é principalmente o comprimento da perfuração necessária para introdução do instrumento e o extremo inferior do tubo é envolvido em material filtrante, areia grossa, brita e areia fina em camadas. O instrumento mede a pressão hidrostática no nível da ponta porosa, e para o seu bom funcionamento, é necessário que esteja isolado hidráulicamente, através de uma barreira acima do ponto de medição, que é preenchida com calda de cimento, argila plástica ou bentonita (MACHADO, 2007).

Segundo Dunnycliff (1988), a maior limitação desse tipo de piezômetro é a resposta lenta à variação da carga piezométrica, devido ao volume significativo de água que precisa fluir para dentro do instrumento para equilibrar as pressões. Segundo Cruz (1996), dependendo do tipo de solo, o tempo de resposta pode variar de alguns minutos até semanas.

Na FIGURA 2.6 (A) é apresentado um esquema de um piezômetro Casagrande instalado em furo de sondagem, já a FIGURA 2.6 (B) ilustra um piezômetro Casagrande em que o elemento poroso (parte branca, na parte inferior da figura) é confeccionado em poliuretano hidrofílico de poros de alta densidade (tubo geomecânico).

FIGURA 2.6 - Perfil típico de um piezômetro Casagrande



Fonte: adaptado de Silveira (2006) e Geokon (2022).

As leituras dos piezômetros Casagrande (de tubo aberto) devem ser feitas com o auxílio de aparelho indicador de nível de água elétrico, usualmente denominado pio elétrico que é uma fita graduada a cada metro cuja extremidade há uma ponteira elétrica que quando entram em contato com a água fecham o circuito e acionam um alarme sonoro. Dessa forma, mede-se a distância entre a boca do tubo e o nível de água.

É recomendável que as medições sejam sempre realizadas pelo mesmo técnico, o qual deve também observar visualmente as estruturas, informando imediatamente sempre que detecte alterações que possam, eventualmente, indicar comportamentos anômalos. É também recomendável que cada instrumento seja lido na mesma hora do dia. Para tal, nas barragens com um número considerável de instrumentos, estes devem ser divididos em grupos de observação em um mesmo dia e suas leituras programadas com sequência e itinerário fixo. Os dados obtidos devem ser comparados com os anteriormente obtidos, em situações semelhantes, de modo a identificar se ocorreram alterações de comportamento ou simplesmente leituras incorretas. Uma adequada confirmação das leituras é indispensável nestes casos.

Os dados correspondentes às leituras dos vários instrumentos, após serem devidamente processados, permitem obter os resultados das leituras dos diferentes instrumentos, os quais são representadas em tabelas e gráficos, representando a variação das grandezas ao longo do tempo, em conjunto com as variações do nível da água no reservatório e, frequentemente, as variações

da temperatura no local da barragem. A interpretação dos resultados do monitoramento deve ser feita logo após sua obtenção, por profissional habilitado (geólogo e/ou engenheiro geotécnico) integrante equipe técnica responsável pela segurança da barragem, de acordo com critérios pré-estabelecidos e, seguidamente, reunidos num relatório de dados de modo que possam ser identificadas eventuais situações anômalas indicativas da necessidade de intervenções corretivas ou de investigações mais detalhadas, tais como análise de estabilidade dos taludes.

Esse relatório deve ser emitido e arquivado no Plano de Segurança da Barragem no período mais curto possível. No caso de se utilizarem sistemas de leitura automatizados, o controle destes sistemas deve ser realizado periodicamente pela equipe de segurança da barragem. Todos os instrumentos e os procedimentos utilizados no monitoramento da barragem devem ser avaliados periodicamente, nomeadamente, durante a inspeção de segurança realizada na Revisão Periódica de Segurança, por especialistas qualificados na área do projeto.

É importante que todos os dados obtidos sejam mantidos organizados e arquivados em boas condições, estando sempre disponíveis para consultas futuras. Ao longo do tempo, estes documentos formarão um histórico de dados que é essencial para esclarecer eventuais comportamentos inesperados e auxiliar na interpretação dos resultados obtidos.

Como limitações na utilização deste tipo de instrumentos se tem que as leituras requerem acesso direto ao topo do tubo e o prolongado tempo de resposta em solos com baixa permeabilidade. Cruz (2004) aponta como principais causas para os medidores ficarem inoperantes as seguintes: obstrução do tubo por queda de objetos em seu interior; obstrução do tubo por cisalhamento no interior do maciço; e colmatação dos orifícios do tubo ou do material drenante, com conseqüente aumento do tempo de resposta. Também é necessário que o instrumento esteja calibrado e que se evite usar equipamentos de leitura de diferentes modelos e fabricantes para evitar erros sistemáticos de coleta de dados.

A pressão é obtida a partir da medida da coluna d'água, a qual é feita a partir da extremidade superior de um sensor denominado pio elétrico, que identifica a superfície da água, conforme mostrado na FIGURA 2.7 A e 2.7 B.

FIGURA 2.7 – Leitura do nível d'água com pio elétrico



Fonte: Autora (2022).

2.4.3.2 Piezômetro de Corda Vibrante

Os piezômetros de corda vibrante compõem-se de um fio tensionado conectado a um diafragma interno e a uma pedra porosa que, ao ser submetida à pressão de água, provoca deflexões e conseqüentemente mudanças na tensão do fio. Essas variações são transmitidas pelo elemento de corda vibrante e medidas por um transdutor (DUNNICLIFF, 1988). Segundo Rizzo (2007), este elemento de corda vibrante (fio de invar) possui suas extremidades fixas e tem liberdade para vibrar na sua frequência natural. Esta frequência varia com a tensão aplicada e isso permite medir movimentos relativos muito pequenos entre as duas extremidades. A medição é feita por uma bobina elétrica que determina esse valor, medindo-o magneticamente no meio do fio. Este valor é então transmitido para um dispositivo de leitura que processa o sinal elétrico e indica a leitura de frequência em Hertz (Hz). Depois de serem obtidas, estas leituras devem ser processadas de acordo com os fatores de calibração do fabricante para obter unidades de pressão. Isto pode ser realizado automaticamente pela unidade leitora ou pelo processamento no computador.

Estes equipamentos possuem hoje grande utilização no mercado e a alta sensibilidade possibilita leituras precisas dos dados. Possuem ainda uma resposta imediata a variações de

poropressão em solos de baixa permeabilidade (SILVEIRA, 2006). Além disso, em suas versões elétricas trazem a possibilidade de automação, juntamente a alguns benefícios, como a leitura dos dados à distância, permitindo serem integrados em sistemas automatizados de monitoramento, o que reduz drasticamente os erros de leitura e coleta de dados. Para o seu bom funcionamento, assim como no caso dos “standpipe”, se faz necessária uma calibração precisa para evitar erros sistemáticos de coleta de dados.

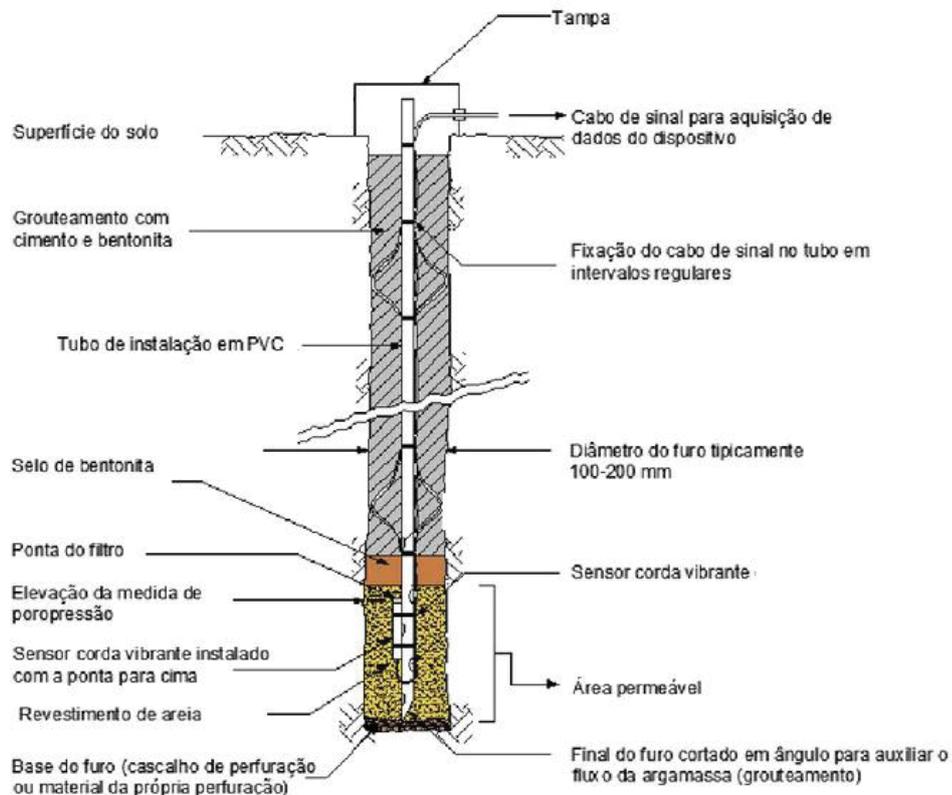
Entre as vantagens na utilização deste tipo de instrumento, uma delas é fornecer respostas rápidas em todos os tipos de solos além de ser adequado para monitoramento automático com o uso de *datalogger*. Já dentre as principais limitações/desvantagens estão erros potenciais devido a desvios da leitura zero e corrosão do elemento de corda vibrante. A maioria dos piezômetros de corda vibrante, porém, possuem uma cavidade seca e hermeticamente fechada em torno desse elemento, que minimizam eventuais problemas de corrosão. Erros causados por variações da leitura zero podem ser evitados com alguns procedimentos fornecidos pelo fabricante (DUNNICLIFF, 1988).

Os piezômetros têm sido amplamente utilizados no monitoramento e previsão de comportamento de diversas barragens no mundo inteiro. A variação dos registros piezométricos pode ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições: aumento da vazão de percolação; elevação do nível d’água de montante ou jusante; aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezômetro; redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezômetro.

As medições de sensores de corda vibrante podem ser feitas usando uma unidade leitora de dados portátil conhecida como “*handheld readout*”. Os dados coletados podem ser registrados manualmente pelo operador em uma planilha ou por dispositivos que permitem o armazenamento digital das leituras que podem ser posteriormente transferidas para um computador no escritório para aplicar a equação de conversão para dados de engenharia. No escritório, os dados podem ser representados graficamente ou tabulados para análise e apresentação.

Existem na indústria basicamente dois métodos bem estabelecidos de se instalar um sensor de corda vibrante, o método convencional, onde o sensor fica posicionado em uma célula de areia idêntica à do piezômetro Casagrande, e o método completamente grauteado (“*Fully Grouted*”), onde o sensor é grauteado em conjunto com todo restante do furo de sondagem (CERQUEIRA, 2017), conforme apresentado na FIGURA 2.8.

FIGURA 2.8 - Perfil típico de um piezômetro de corda vibrante



Fonte: Adaptado de Cerqueira (2017).

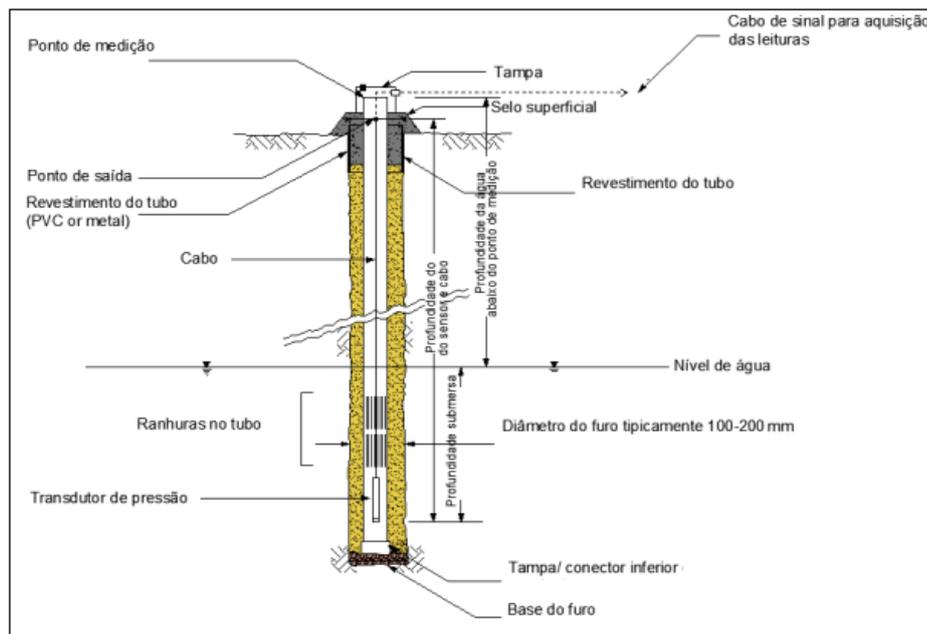
2.4.3.3 Piezômetro Casagrande automatizado com sensor de corda vibrante

Verifica-se que o meio técnico passou a discutir, recentemente, as técnicas e formas de se realizar o monitoramento contínuo, sistemático e de forma automática com uso de recursos de novas tecnologias na captação de dados de campo, bem como na conectividade e capacidade de transmissão contínua pelo sistema de automação.

A combinação do piezômetro Casagrande com o sensor de corda vibrante resulta em um piezômetro de alta precisão e sensibilidade. O piezômetro de corda vibrante utiliza o princípio de que a frequência de vibração de uma corda depende da tensão aplicada a mesma; essa, por sua vez, é função da pressão de água presente no local de instalação, a qual é transmitida por meio da pedra porosa do sensor a um diafragma que, ao movimentar-se, faz variar a frequência da corda. Embora o sensor seja fabricado com material que minimiza os efeitos térmicos, essa influência existe, por isso os sensores possuem um termistor interno que fornece a medida de temperatura para correção térmica das leituras. O sensor possui um sistema fechado que também responde a variações da pressão atmosférica e o dado de pressão é transmitido para um *datalogger* através de uma corrente elétrica.

O sensor de corda vibrante é colocado dentro do tubo e detecta as mudanças de frequência da corda vibrante que são causadas pela pressão da água no solo. Essas mudanças de frequência são então convertidas em valores de pressão pelo sensor. É importante que o sensor seja instalado corretamente, seguindo as instruções do fabricante e as recomendações de engenheiros geotécnicos experientes. A instalação inadequada do sensor pode resultar em medições imprecisas ou inúteis. Além disso, é importante que o piezômetro seja instalado em uma profundidade adequada, que permita a medição da pressão hidráulica em uma zona de interesse. A profundidade ideal depende das características do solo e do propósito da medição. Na FIGURA 2.9 é apresentado um esquema de um piezômetro Casagrande com sensor de corda vibrante.

FIGURA 2.9 - Perfil típico de um piezômetro Casagrande automatizado



Fonte: Adaptado de Cerqueira (2017).

O sensor de corda vibrante sintetiza a leitura no piezômetro Casagrande e um dos benefícios associados à coleta automatizada dos dados é a frequência contínua das leituras, sem interferências quanto à disponibilidade de horário, situação climática ou impossibilidade de acesso ao instrumento. O banco de dados resultante do processo permite acompanhar o comportamento do instrumento em frequência horária, diária, semanal, mensal e anual dentro do intervalo de leitura definido, o que possibilita a percepção de alterações significativas e a antecipação dos processos de manutenção e identificação da causa macro dessas alterações. Há, ainda, maior exatidão na leitura dos dados em termos de horário e posicionamento do

instrumento, que deixa de ser afetada pela acurácia do operador ou por falhas no instrumento de leitura manual.

2.4.3.4 *Dataloggers*

O *datalogger* é um equipamento eletrônico composto por um microcontrolador e um voltímetro com memória. Este dispositivo possui as funcionalidades para realizar diversas tarefas como produzir tensão pré-estabelecida com intervalos definidos, ler tensões e para armazenar dados. Além disso, pode ser configurado para fazer cálculos e armazenar os resultados, como por exemplo, converter a leitura de um piezômetro para diferentes unidades. Os instrumentos são interligados às conexões ou às chamadas “portas” no equipamento e a coleta de leitura é realizada em intervalos selecionados. Dispositivos periféricos, podem ser interligados às portas de controle e de excitação para efetuar funções específicas, como telefonia celular e testadores de cabo. Os *dataloggers* interligados à instrumentação eletrônica podem executar tarefas distintas automaticamente, como em determinado nível de alarme de um sensor ativar uma ação, como alarme de luz, sirene (KANE e BECK, 2000).

De acordo com Cerqueira et al. (2016), o *datalogger* é o principal componente de uma estação de campo para automatização da instrumentação de uma barragem. Este dispositivo tem por finalidade receber, armazenar e converter os dados de campo. Com a interligação dos instrumentos a este equipamento, é possível realizar a programação para registro contínuo das leituras dos piezômetros eliminando a necessidade de coleta periódica manual dos instrumentos. Santos et al. (2012) complementa que os *dataloggers* podem também realizar a medição desejada periodicamente em intervalo pré-definido e estas serem salvas em um banco de dados interno. Sendo necessário de acordo com o grau de automação a conexão e extração destes dados no equipamento. A FIGURA 2.10 apresenta um exemplo de um *datalogger* frequentemente utilizado em projetos para automação de barragens de mineração.

FIGURA 2.10 – Exemplo de modelo da *datalogger* sem fio



Fonte: Worldsensing (2023).

2.4.3.5 Gateway

Conforme aponta Franciscatto, Cristo e Perlin (2014), um *gateway* de rede é um dispositivo que promove a comunicação entre diferentes tipos de redes. Eles podem ser classificados basicamente em dois tipos. O primeiro chamado de *gateway* conversor de meio que é mais simples e que tem como função receber um pacote de rede de nível inferior, tratá-lo e enviar a um destino. O segundo, conhecido como tradutor de protocolo ou *gateway* de aplicação, traduz mensagens de uma rede de entrada para outra. Este equipamento pode ser visto como um dispositivo complexo para conexão das redes, combinando diferentes funções de bridge, roteadores e repetidores e, desta maneira, promove a interconexão entre diferentes redes. O *gateway* é um instrumento que faz a interface entre os *dataloggers* em campo e o sistema de automação através de um canal de comunicação Ethernet ou rede sem fio (*wireless*).

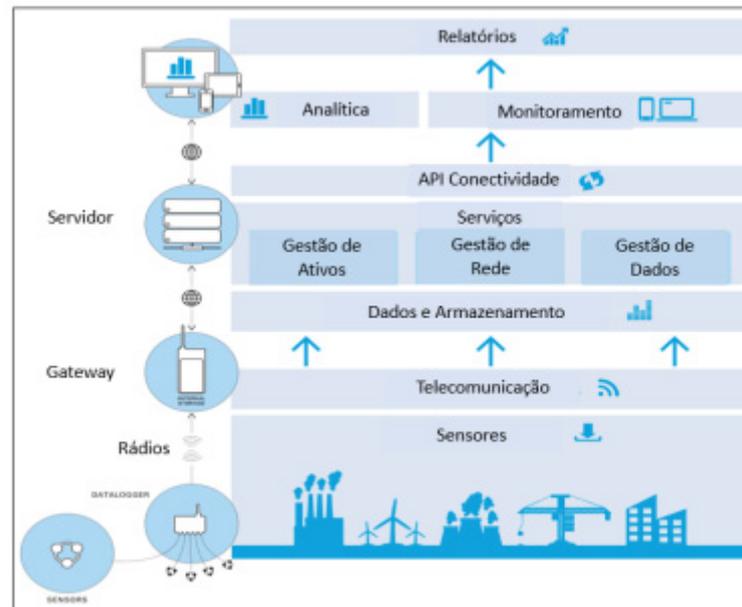
A FIGURA 2.11 apresenta um exemplo de *gateway* e a FIGURA 2.12 exemplo de utilização de *gateway* a qual recebe diferentes protocolos e traduz para a organização.

FIGURA 2.11 – Exemplo de modelo de *gateway*



Fonte: Worldsensing (2023).

FIGURA 2.12 - Exemplo de arquitetura para automatização do monitoramento



Fonte: Adaptado de Iotone (2019).

2.4.3.6 Coleta de dados da instrumentação

Existem três modalidades de obtenção de dados da instrumentação, sendo:

- **Aquisição Manual:** sistema tradicional de coleta de dados, utilizando um pio elétrico. Os dados, após terem sido coletados manualmente pelo técnico leiturista, são transcritos em tabelas para serem, posteriormente, interpretados e colocados sob forma de gráfico;
- **Aquisição Semiautomatizada:** O método semiautomatizado de aquisição de dados é aquele em que os dados dos sensores são lidos, registrados com uso de uma unidade leitora portátil com registros transcritos para uma tabela ou coletados e armazenados em um equipamento de memória permanente, como um *datalogger*, porém, sem transmissão dos dados.
- **Aquisição Automatizada:** o sistema automático é uma prática muito difundida atualmente. Os dados dos sensores são registrados, armazenados por um *datalogger* com sistema de transmissão sem fio. Este sistema oferece um número considerável de registros ao longo do dia permitindo uma análise mais detalhada e precisa do comportamento da estrutura.

Os métodos automatizados de aquisição de dados consistem na incorporação de um sistema de telemetria e um software especialista de gerenciamento de dados. Estes sistemas irão transmitir os dados convertidos em unidade de engenharia e tratá-los de forma a facilitar a análise das variações de cada grandeza física. Na maioria dos casos o sistema de telemetria é instalado entre o *datalogger*, equipamento de armazenagem, e o software especialista, porém, em alguns casos em que o cabeamento possa ser um desafio, a telemetria é instalada entre os sensores e o *datalogger* (sistemas *wireless*) (CERQUEIRA, 2017).

Existem diferentes tipos de *dataloggers* fabricados hoje em dia que são alimentados por bateria ou energia solar. Essas unidades podem ser configuradas usando um computador ou dispositivo portátil e, em seguida, deixados no campo para coleta de dados autônoma. Além disso, as inspeções rotineiras em campo devem continuar a ser realizadas mesmo que os dados estejam sendo coletados frequentemente, pois as observações visuais podem identificar problemas que possam interferir na qualidade da coleta de dados automática. Se forem observadas leituras inconsistentes ao carregar os dados, elas devem ser imediatamente investigadas, explicadas e/ou repetidas. Além disso, leituras manuais periódicas podem ser realizadas para verificar a compatibilidade das leituras automatizadas desde que o procedimento não interfira na integridade e no posicionamento do sensor.

Esses registros podem ser muito úteis para desenvolver uma compreensão de como a barragem responde as mudanças nas condições de carregamento, nas alterações de nível do reservatório ou em épocas de chuva por exemplo. Leituras de vários instrumentos podem ser coletadas simultaneamente para que diferentes parâmetros possam ser comparados diretamente. Isso também pode ser realizado com leituras manuais, mas dependendo do tamanho do projeto, número de instrumentos, localização dos instrumentos e frequência das leituras, é geralmente muito trabalhoso principalmente se forem necessárias leituras em um intervalo de mais de uma vez por dia. Os *dataloggers* também podem ser uma boa alternativa em relação as leituras manuais em áreas remotas ou de difícil acesso.

A automação de instrumentos vem com novas propostas que tendem a minimizar os problemas e riscos da leitura manual, trazendo de forma mais precisa e leituras mais frequentes. Tais propostas podem trazer melhorias na gestão de segurança de barragens e na gestão da qualidade da informação, pois a obtenção de dados correta e atual é fundamental para a detecção de comportamentos anômalos da barragem antes que se tornem irreversíveis.

Os benefícios relacionados ao processo automatizado de coleta de dados se dão menos pela coleta das informações e mais pela possibilidade de integração de inúmeros dados em um único sistema. Essa integração possibilita a gestão automatizada em tempo real, facilitando de

forma substancial o trabalho dos consultores e geotécnicos, bem como eliminando possíveis erros humanos. Os custos de implantação do sistema não são relevantes porque são parte de um gerenciamento de riscos mais amplo.

As vantagens dos sistemas automatizados no processo de monitoramento das barragens são diversas, dentre as quais, conforme aponta Veloso et al. (2007), podem-se citar:

- Leitura online das variáveis, auxiliando com uma maior rapidez para as tomadas de decisão diante de situações anômalas;
- Melhora na documentação dos dados, uma vez que serão armazenados em arquivos eletrônicos, evitando assim a interferência humana para inserção dos dados;
- Disponibilização dos dados para todos os integrantes da equipe responsável pelo monitoramento da barragem simultaneamente;
- Melhoria na análise dos dados, tendo em vista que será possível gerar gráficos em tempo real, fazer comparações e correlações entre as medidas;
- Confiabilidade dos dados obtidos.

2.4.4 Plano de instrumentação e monitoramento geotécnico

Um plano de instrumentação e monitoramento geotécnico bem elaborado é fundamental para garantir a qualidade e a segurança das obras geotécnicas, além de permitir a identificação precoce de problemas e a adoção de medidas preventivas ou corretivas adequadas. É um documento que estabelece as metodologias e procedimentos para monitorar as condições geotécnicas de um determinado local, visando identificar eventuais riscos e garantir a segurança de pessoas e estruturas. Esse plano é elaborado com base nas características geológicas e geotécnicas do local, bem como as finalidades e necessidades do empreendimento.

Um programa de monitoramento deve ser elaborado na fase de projeto e adaptado nas fases posteriores, de modo a incorporar as alterações que forem necessárias para a constante avaliação da estabilidade da estrutura geotécnica. Estes planos devem ser implementados por engenheiros responsáveis que apresentem um bom conhecimento dos métodos, dispositivos, equipamentos e instrumentos existentes.

Para cada tipo de estrutura há um plano de monitoramento individualizado que deve ser elaborado de acordo com as especificidades da estrutura e de fatores regionais, como

sismicidade e precipitação local, a fim de que a instrumentação possa contribuir para evitar grandes catástrofes.

Não existem normas nacionais aplicáveis exclusivamente a instrumentação, apenas normas ligadas a projetos geotécnicos que recomendam a instrumentação. A norma ABNT 13028 (2017) especifica os requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos de beneficiamento, contenção de sedimentos e reservação de água em mineração, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente. Para o monitoramento a norma rege que devem ser indicados os elementos a serem monitorados, a frequência da inspeção de campo, as leituras dos instrumentos e os critérios de análise dos dados obtidos.

Existe um esforço recente da normatização internacional que estabelece requisitos mínimos para a elaboração de planos de monitoramento e instrumentação, como é o caso da norma europeia ISO 18674-1 (2015). A FIGURA 2.13 ilustra a apresentação de um plano ideal de monitoramento a ser adotado para definir a instrumentação e o monitoramento.

FIGURA 2.13 - Plano ideal de monitoramento



Fonte: ISO 18674:1 (2015).

Um programa de monitoramento de uma barragem de rejeito requer um planejamento cuidadoso com atividades sistemáticas e contínuas de instrumentação do barramento e do terreno sobre o qual a barragem foi assentada. Tais atividades incluem as inspeções rotineiras e sistemáticas de campo realizadas por técnico habilitado e supervisionado por especialistas em

geotecnia, bem como a análise das leituras históricas de cada instrumento utilizado. Tanto a instrumentação como a inspeção de campo são igualmente importantes para a supervisão das condições de segurança do empreendimento: fundações, estrutura da barragem e o depósito de materiais.

Para realizar um programa de monitoramento de segurança da barragem, as mineradoras precisam estar preparadas para agir em eventuais e improváveis emergências. Esses procedimentos estão descritos no Plano de Ações Emergenciais de Barragens de Mineração (PAEBM). Uma situação é considerada emergência quando há alguma condição inadequada na conservação e operação da barragem. Isso pode ser notado a tempo de corrigir falhas, ou seja, durante as inspeções e atividades realizadas para controle e monitoramento da estrutura.

Em um programa de instrumentação, deve-se estabelecer quais instrumentos a serem utilizados assim como dimensionar a quantidade necessária aos objetivos que se deseja alcançar. Segundo o USACE (1995), os principais objetivos de um plano de instrumentação geotécnica podem ser agrupados em quatro categorias:

- a) avaliação analítica dos dados obtidos para verificação do comportamento da barragem;
- b) previsão de desempenho futuro, podendo validar as técnicas construtivas e até empregá-las para outras estruturas;
- c) avaliação jurídica em eventuais disputas litigiosas; e
- d) desenvolvimento e verificação de projetos futuros com utilização do conhecimento desenvolvido.

Conforme assinalado por Dunnicliff (1993), que desenvolveu uma abordagem sistemática para planejar e executar um programa de monitoramento geotécnico para diversas obras em todo o mundo e detalhado por Piasentini (2005) e outros autores consagrados no meio geotécnico, para uma auscultação adequada é necessário um plano completo de monitoramento que abranja todas as fases da vida de um projeto, desde a concepção até a operação e manutenção. O plano deve ser elaborado por um profissional especializado antes que os trabalhos de instrumentação sejam iniciados em campo considerando as seguintes atividades a serem realizadas:

- Identificar os possíveis riscos geotécnicos que podem ocorrer no local, como deslizamentos, instabilidade de taludes, recalques, entre outros e descrever os objetivos específicos da instrumentação e a finalidade dos dados coletados;
- Definição dos parâmetros a monitorar, objetivando o controle da segurança e do desempenho das estruturas;

- Definir as metodologias e técnicas de monitoramento que serão utilizadas para detectar e avaliar os riscos geotécnicos identificados;
- Projeto de instrumentação com base nas informações geotécnicas e nas metodologias de monitoramento definidas, que contemple desde a concepção do arranjo até os detalhes como desenhos de planta, vistas e seções transversais, com localização exata de cada instrumento (cotas e coordenadas) através de levantamento topográfico;
- Seleção dos instrumentos de auscultação, tipo e quantidade de instrumentos a serem utilizados, de acordo com os objetivos do monitoramento e as condições do solo. É importante também definir o espaçamento entre os instrumentos;
- Descrever os métodos, procedimentos e as especificações técnicas com detalhes da instalação dos instrumentos, bem como dos equipamentos de coleta e transmissão de dados;
- Fixação dos valores de alerta e de controle para todos os instrumentos instalados e para as diversas fases de sua vida (faixas normais de operação e níveis de alarme);
- Plano de operação da instrumentação, abrangendo frequências das leituras levando em conta a natureza e o grau de risco do empreendimento nas diversas fases da operação e durante possíveis eventos excepcionais;
- Descrever os procedimentos de manutenção e calibração dos instrumentos, bem como as rotinas de inspeção e verificação da integridade dos equipamentos;
- Descrever as metodologias de análise e interpretação dos dados coletados, incluindo os métodos estatísticos e modelos analíticos a serem utilizados;
- Definir os procedimentos para registro, armazenamento e metodologias de processamento dos dados;
- Estabelecer os critérios de interpretação dos dados coletados nos pontos de monitoramento, de modo a identificar precocemente eventuais anomalias e adotar medidas preventivas. As ações devem ser descritas de acordo com a gravidade da situação, podendo variar desde uma revisão dos procedimentos de monitoramento até a realização de uma intervenção física no local;

- Descrever os procedimentos para comunicação dos resultados do monitoramento às partes interessadas, bem como a periodicidade e os formatos a serem utilizados;
- Previsão do campo de variação das medidas;
- Registro dos fatores que podem influenciar os dados medidos;
- Definir as ações corretivas que serão tomadas caso seja identificado algum risco geotécnico. Essas ações podem incluir a interdição de áreas, a estabilização de taludes, a recomendação de obras de contenção, entre outras;
- Atribuição de tarefas nas fases de projeto, construção e operação;
- Estabelecimento dos procedimentos para assegurar a precisão das leituras;
- Preparo das especificações e listas de materiais, sensores e equipamentos para aquisição e orçamento atualizado;
- Plano e planejamento da instalação;
- Planos de observação visuais, inspeções in situ, manutenção periódica e eventual calibração;
- Preparo do orçamento e contrato e responsabilidades;

Conforme descrito por Fonseca (2003), um programa de auscultação por instrumentação de barragem apresenta objetivos que dependem basicamente da fase operacional considerada. Em termos gerais, na fase construtiva, estes objetivos podem ser resumidos nos seguintes pontos:

- Obtenção de parâmetros geotécnicos mais realistas e representativos das condições in situ;
- Valores de referência para futuras medições;
- Aferição de soluções técnicas menos conservadoras adotadas na fase de projeto, que resultaram em economia significativa para a obra;
- Previsão de possíveis zonas de risco durante a fase de construção;
- Avaliação de eventos não previstos ou detecção de eventuais anomalias durante a construção;
- Possibilidade de revisões ou reavaliações das premissas de projeto ou das metodologias construtivas então adotadas;

Na fase operacional da barragem, o monitoramento e controle da barragem através da instrumentação têm os seguintes objetivos:

- Verificação do desempenho geral da estrutura em conformidade ou não com as especificações de projeto;
- Caracterização do comportamento dos materiais dos aterros compactados e das fundações ao longo do tempo, monitorando a evolução das tensões, deslocamentos, vazões e poropressões;
- Previsão de possíveis zonas de risco durante o período de operação;
- Avaliação de eventos não previstos ou detecção de eventuais anomalias pós-construção;
- Reavaliação das condições de segurança da estrutura e/ou alterações e/ou extrapolações do projeto original;
- Nas condições atuais, esta reestruturação dos princípios da instrumentação de barragens pode ser caracterizada nos seguintes pontos (ROSSO e PIASENTIN, 1996);
- O número de instrumentos deve ser representativo da compartimentação da barragem e suficiente para garantir uma avaliação global do desempenho da estrutura;
- Cuidados especiais devem ser tomados com a instrumentação das fundações, mais susceptíveis a incertezas, comportamentos ou desvios imprevistos;
- A escolha deve privilegiar instrumentos com menor interferência sobre as atividades de construção e que permitam facilidade de acesso para manutenção e eventual substituição;
- A localização dos instrumentos deve aproveitar ao máximo as instalações pré-existentes (galerias, dutos, poços etc.);
- Para a escolha do tipo de instrumento, os seguintes aspectos devem ser priorizados:
 - Simplicidade;
 - Confiabilidade;
 - Sensibilidade;
 - Faixa de medição;
 - Durabilidade;
 - Resistência;

- Robustez e estabilidade;
- Custos de aquisição, instalação, operação e manutenção;
- Experiência prévia com a sua utilização;
- Reprodutividade;
- Disponibilidade e assistência técnica do fabricante.

Para a seleção de um monitoramento adequado, é necessário um levantamento para se fazer previsões de escala de produção e dimensões da barragem, geralmente com base no projeto. Estudos e ensaios de campo e laboratório prévio dos materiais que serão utilizados na barragem e de toda a área de fundação são fundamentais, como de mecânica dos solos, mecânica das rochas, hidrogeologia, percolação (definição do nível freático interno do talude de contenção) e geotecnia, para que então sejam estabelecidas as condições de estabilidade da determinada barragem, e o(s) módulo(s) de falha que ela estará submetida.

Conforme Fonseca (2003), um programa de instrumentação tende a garantir a acurácia, bem como fornecer parâmetros relacionados à confiabilidade das leituras e à compatibilidade em relação às metodologias construtivas e às premissas do projeto.

A TABELA 2.2 fornece um exemplo de atribuição de tarefas em um programa de monitoramento supervisionado pelo proprietário.

TABELA 2.2 - Exemplo de atribuição de tarefas para um programa de monitoramento

Tarefa	Parte responsável			
	Proprietário	Consultor do projeto	Especialista em instrumentação	Empresa construtora
Concepção do plano de auscultação	*	*	*	
Aquisição dos instrumentos e calibração de fábrica		*	*	
Instalação dos instrumentos			*	*
Manutenção e calibração periódica dos instrumentos			*	*
Estabelecimento da programação de coleta de dados		*	*	
Aquisição dos dados			*	*
Processamento e apresentação dos dados				
Análise e elaboração de relatórios periódicos		*	*	
Decisão pela implementação das recomendações e das medidas corretivas	*	*		

Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

As atividades de monitoramento são complementadas pelas inspeções de segurança, nomeadamente, com vista à detecção de deterioração, comportamentos anômalos ou sintomas de envelhecimento das estruturas, além da detecção de anomalias na própria instrumentação instalada na barragem. Elas são realizadas por uma equipe técnica e por informações de variáveis que suportam a tomada de decisões acerca da integridade das estruturas.

O monitoramento de barragens inclui a instrumentação do corpo da barragem e das estruturas extravasoras, bem como das respectivas fundações, de modo a permitir a medição de um conjunto de grandezas criteriosamente selecionado que, em conjunto com as inspeções de segurança, permita controlar as condições de segurança dessas estruturas, durante a construção da obra e durante a operação e nas revisões periódicas da segurança da barragem.

Segundo Souza Junior & Moreira, (2018) é necessário que as barragens tenham monitoramento e controle com certa periodicidade a fim de prever comportamentos de deformação das barragens. Para Castro (2008), além do monitoramento detalhado, o próprio programa de monitoramento deve passar por constante avaliação, analisando sua performance e verificando se as condições apresentadas estão sendo satisfatórias. Ele ainda cita que o projeto construtivo bem elaborado, servirá como o primeiro passo para o monitoramento da barragem e que este deve fornecer as condições para que o responsável avalie a eficiência da instrumentação instalada e quando será necessário ajustá-la.

O uso da instrumentação geotécnica não é apenas a seleção, mas um processo abrangente passo a passo. Planejamento adequado e interpretação qualificada pelo pessoal são essenciais para garantir a eficácia do programa geotécnico. A instalação do instrumento sem nenhum programa planejado para seu monitoramento é obviamente um fracasso. Portanto, é importante que o planejamento de programas de monitoramento garantir o manuseio preciso e o desempenho do instrumento durante sua fase de construção e operação (PIASENTINI, 2005).

2.5 FATORES QUE INTERFEREM NO PROCESSO DE MEDIÇÃO

2.5.1 Definições da metrologia

Segundo Reis (2018), com o avanço tecnológico e a globalização da informação, verificou-se a necessidade de uniformizar a terminologia no campo da metrologia, numa linguagem o qual padronizasse definições, sistemas de unidades e outros aspectos relacionados às medidas, o qual fosse possível compreender um projeto, montar, reproduzir ou aperfeiçoar

equipamentos e sistemas de medições no mundo inteiro. Esta unificação é representada pelo VIM (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia), com as diretrizes do Guia (INMETRO, 2012). No Brasil, o VIM foi aprovado pela Lei Nº 9.933 de 1999, Decreto Nº 6.275 de 2007, através da Portaria Nº 232 de 2012.

O vocabulário utiliza um conjunto de termos fundamentais e gerais de metrologia. Alguns deles são (INMETRO, 2012; FONSECA, 2003):

- **Medição** é o processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser razoavelmente atribuídos a uma grandeza;
- **Instrumento de medição** é um dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares;
- **Sistema de medição** é um conjunto de um ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e insumos, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de natureza especificadas;
- **Procedimento de medição** é a descrição detalhada duma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada num modelo de medição e incluindo todo cálculo destinado à obtenção dum resultado de medição;
- **Veracidade de medição** é o grau de concordância entre a média de um número infinito de valores medidos repetidos a um valor de referência;
- **Validação** é a verificação na qual os requisitos especificados são adequados para um uso pretendido;
- **Repetibilidade** é a condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período;
- **Comparabilidade** é a comparação de resultados de medição que, para grandezas duma dada natureza, são rastreáveis metrologicamente à mesma referência;
- **Calibração** é uma operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas;

numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir de uma indicação;

- **Linearidade** é denominado linear o instrumento que apresenta medições diretamente proporcionais aos estímulos e grandezas aos quais esse é submetido. Característica que traduz uma condição de proporcionalidade direta entre as leituras fornecidas pelo instrumento e os valores da grandeza que está sendo medida;
- **Conformidade** é a característica que expressa a influência específica da implantação do instrumento em relação aos valores da grandeza a ser medida. Uma maior conformidade implica em uma acurácia maior do instrumento;
- **Erro** é definido como o desvio entre o valor medido e o valor real ou o valor admitido como correto (erro grosseiro). O erro relativo é o quociente entre o erro absoluto e o valor real da leitura;
- **Ruído** é o termo utilizado para relatar medidas aleatórias induzidas por fatores externos, gerando falta de precisão e acurácia;
- **Histerese** é a aptidão do instrumento apresentar valores repetidos em sentidos diferentes de variação do valor verdadeiro. A identificação da histerese é muito importante por exemplo para se identificar o comportamento do instrumento em condições de carregamento e descarregamento;
- **Exatidão** consiste no grau de conformidade de um valor medido ou calculado em relação à sua definição ou com respeito a uma referência padrão. Exatidão de um instrumento reflete o quanto à leitura se aproxima do valor “verdadeiro”. Ela está relacionada ao erro relativo de uma medida, não é uma grandeza e não lhe é atribuído um valor numérico. Uma medição é dita mais exata quando fornece um erro de medição menor;
- **Acurácia** informa o quão próximo são os resultados de uma medição e seus valores reais, essa considera a influência de todas as parcelas de erros das mais diversas fontes. Quanto maior o erro, menor a acurácia. Acurácia é sinônimo de grau de exatidão;
- **Resolução** é a menor divisão na escala de leitura do instrumento, ou seja, é o menor incremento que se pode assegurar na leitura de um instrumento;

- **Sensibilidade** é a característica que expressa a relação entre o valor da grandeza medida e o deslocamento da indicação. Alta sensibilidade não indica alta acurácia ou alta precisão;
- **Precisão** é o grau de variação de resultados de uma medição, não sendo o mesmo que exatidão que se refere à conformidade com o valor real. A precisão tem como base o desvio-padrão de uma série de repetições da mesma análise. Ligado ao conceito de 'repetitividade', a precisão é um termo geral utilizado para expressar a dispersão de resultados, sendo a repetitividade uma das formas de quantificá-la. É a avaliação da proximidade dos resultados obtidos em uma série de medidas de uma amostragem múltipla de uma mesma amostra. A precisão de um instrumento reflete o número de dígitos significativos em uma leitura e depende da unidade usada para obter uma medida, sendo quanto menor a unidade, mais precisa a medida;
- **Campo de leitura** especifica o maior e o menor valor que o instrumento está projetado para medir. Os valores a serem medidos pelo instrumento devem cair dentro do campo limite do instrumento. Caso o mesmo seja ultrapassado, corre-se o risco de danificação imediata do instrumento, o que deve ser evitado;
- **“Span”** representa a diferença algébrica entre a leitura mínima e máxima que pode ser realizada pelo instrumento;

No monitoramento de barragens, a precisão é, em geral, mais importante que a exatidão, pois as variações de valor muitas vezes são de maior interesse que o valor absoluto em si (ASCE, 2000).

Uma forma de determinar a qualidade de um processo é efetuar um tratamento estatístico avaliando a exatidão e precisão. Exatidão (ou acuidade) corresponde ao grau de aproximação da medida com seu valor real, ou seja, faz-se uma avaliação do erro sistemático (SANTIL; QUEIROZ, 1996a). Precisão reporta ao grau de dispersão entre medidas repetidas sob as mesmas condições, e normalmente quantificada pelo desvio-padrão, variância e o coeficiente de variação. Portanto, a avaliação da precisão de uma medida não leva em consideração o valor verdadeiro. Assim, a exatidão e precisão examinam aspectos diferentes, mas fundamentais, que precisam ser levados em consideração na avaliação da qualidade do resultado de uma medição. Assim, existe a possibilidade que o resultado de uma medição seja exato e preciso, exato e impreciso, inexato e preciso ou inexato e impreciso. A FIGURA 2.14 apresenta um exemplo clássico de tiro ao alvo.

FIGURA 2.14 - Análise da precisão e exatidão



Fonte: Melo et. al (2014).

Analisando essa analogia do tiro ao alvo, pode-se dizer que a exatidão corresponde a acertar o tiro no centro do alvo ou próximo ao centro. A precisão corresponde à repetição de vários disparos acertando pontos muito próximos entre si. É importante ressaltar que ao efetuar uma medida, por maior que seja o cuidado no momento da realização, não existe medida perfeita, pois sempre estarão sujeitas a erros. As medições podem ser influenciadas por diversos tipos de erros, e classificá-los é uma prática habitual (CABRAL, 2004).

2.5.1.1 Fontes de Erros e Incerteza nas medições

A necessidade da utilização de ferramentas para medir, controlar e monitorar, está presente na vida dos seres humanos desde as primeiras civilizações, com o intuito de facilitar o comércio e as atividades cotidianas (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2011). As medições atuam como uma extensão da capacidade humana, desempenhando a função de quantificar as observações para obtenção de parâmetros que remetam a compreensão de determinado processo, criação, desenvolvimento e constatação de teorias e modelos científicos.

A importância das análises de confiabilidade em geotecnia está relacionada principalmente a grande incerteza envolvida. Morgenstern (1995, apud EL-RAMLY, 2001) dividiu as

incertezas geotécnicas em três categorias: incerteza nos parâmetros, incerteza de modelo e erro humano.

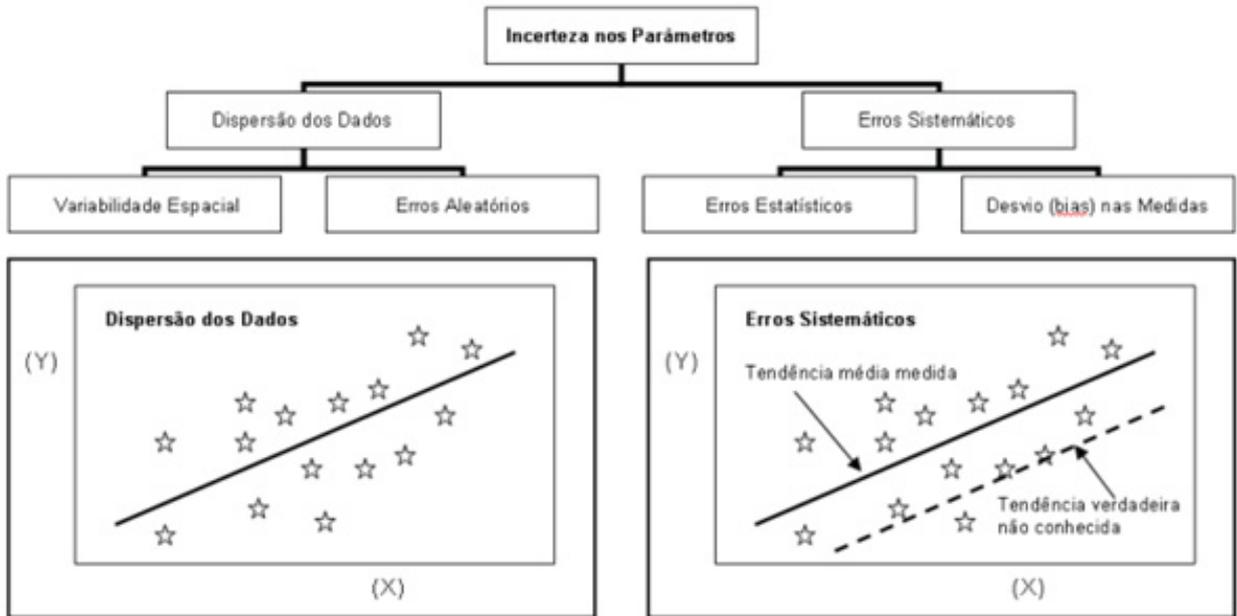
Baecher (1987) atribuiu incertezas nos parâmetros de duas fontes: dispersão dos dados e erro sistemático. A primeira diz respeito à dispersão dos dados em torno da média, causadas principalmente pela variabilidade espacial e erro aleatório. No caso da instrumentação geotécnica, pode-se incluir também os erros aleatórios que estão relacionados a falhas nos instrumentos e podem ser evitados. Erros humanos são aleatórios e imprevisíveis (EL-RAMLY, 2001). Eles podem ser causados por descuido, ignorância, falta de informação ou discrepantes, falta de comunicação entre as partes envolvidas no projeto, entre outros.

A incerteza humana é devido à carência ou a falta de conhecimento, ou à comunicação inapropriada entre as pessoas responsáveis pelo projeto. Este tipo de incerteza é frequentemente aleatório e imprevisível.

El-Ramly (2001), relata que o erro sistemático, por sua vez, está relacionado com uma tendência de desvio em relação ao valor verdadeiro (desconhecido), causado por erro estatístico ou viés na medição. O erro estatístico diz respeito principalmente ao número limitado de dados, quanto vieses na medição podem estar relacionados ao instrumento, às condições de contorno, distúrbio no processo de aquisição de dados, entre outros, e sempre causam erro, para mais ou para menos, em todas as medidas (FIGURA 2.15).

A incerteza de modelo está relacionada à distância entre os modelos teóricos de previsão com suas hipóteses simplificadoras e a realidade (EL-RAMLY, 2001). Comparando-se previsões com resultados de experimentos, pode-se calcular o erro de modelo observado.

FIGURA 2.15 - Fontes de incerteza dos parâmetros



Fonte: adaptado de EL-RAMLY (2001).

Antes de detalhar o que é incerteza precisamos diferenciá-la de um conceito conhecido, o erro. Erro é a variação entre o resultado da medição e o valor real da grandeza que é medida, enquanto a incerteza é o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas (VIM, 2012).

O erro é uma quantidade determinada pela relação $\text{Erro} = \text{Valor Medido} - \text{Valor Verdadeiro}$, é um desvio indicativo de problemas ocorridos durante as medições. Várias são as fontes de erros e é impossível eliminá-las durante os procedimentos, mas podem ser diminuídas, desde que os devidos cuidados sejam tomados. Essas fontes de erro são: falta de calibração dos instrumentos; condições estruturais dos materiais envolvidos no processo; interação entre o dispositivo e do mensurado; e variáveis que não podem ser controladas.

Os instrumentos envolvidos no monitoramento de barragens estão suscetíveis a uma gama de erros que podem levar a uma má interpretação da situação de estabilidade, seja pela falta de tomada de dados ou por erros de operação, as leituras dos respectivos equipamentos estão diretamente relacionadas com a capacidade (qualificação) do operador. Há diversos fatores que podem influenciar a leitura de um piezômetro.

Hvorslev (1951) apresenta as fontes de erro na determinação das pressões de água subterrânea como sendo:

- a) Tempo de resposta hidrostático: Tempo necessário à água percolar para dentro ou para fora do tubo;

- b) Tempo de resposta para ajuste da tensão: Tempo necessário à conclusão de processos de adensamento ou expansão do solo;
- c) Fontes gerais de erro:
- Erros na medição do nível da água no interior do tubo;
 - Erros na construção do instrumento ou na calibração de sensores;
 - Vazamentos na tubulação do instrumento;
 - Falhas ou deteriorização da conexão dos cabos elétricos ou condensação de valor;
 - Falhas devido à variação excessiva da temperatura ou falha relacionada ao congelamento de sensores.
- d) Conexão hidráulica entre camadas ocasionada pelo furo de sondagem;
- e) Interface de diferentes líquidos: Instrumentos equipados com líquidos de menor temperatura de congelamento e logo com diferentes superfícies de tensão;
- f) Bolhas de ar ou gás em sistemas abertos: As bolhas afetam na medida do nível de água no interior do tubo;
- g) Bolhas de ar ou gás em sistemas fechados: Aumento no tempo de resposta;
- h) Bolhas de ar ou gás no solo: Aumento no tempo de resposta;
- i) Sedimentação e colmatação: Aumento do tempo de resposta até a completa inutilização do instrumento;
- j) Erosão interna do solo adjacentes à célula de areia: Diminuição inicial do tempo de resposta e subsequente sedimentação do instrumento até sua completa inutilização.

Incerteza é uma estimativa que quantifica a confiabilidade do resultado de uma medição. Portanto, quanto maior é a incerteza de medição, menor é a confiabilidade do resultado. Supõe-se que a informação resultante do processo de medição permite apenas atribuir ao mensurando um “intervalo de valores razoáveis”. Informações adicionais relevantes podem reduzir a amplitude do intervalo de valores (diminuir a incerteza) que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. Entretanto, mesmo a medição mais refinada não pode reduzir o intervalo a um único valor, devido à quantidade finita de detalhes na definição de um mensurando.

As incertezas são de tipos diferentes porque são calculadas por procedimento distinto, mas ambos são baseados em distribuição de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variância ou desvios padrão. Embora de forma não exhaustiva, é comum considerar as cinco “famílias” seguintes de razões para que existam incertezas nas medições das instrumentações conforme apresentado na TABELA 2.3.

TABELA 2.3 – Resumo das incertezas das medições

Fontes das incerteza	Contribuição para a incerteza do resultado
Objeto da medição, ou Equipamento a calibrar	<ul style="list-style-type: none"> • Resolução finita, facilidade de leitura • Estado de conservação, vandalismo • Instabilidade das leituras
Instrumento(s) de medição, ou Padrão usado	<ul style="list-style-type: none"> • Incerteza devida à rastreabilidade (calibração) • Afastamento do “padrão ideal” • Deriva ao longo do tempo • Range e precisão do instrumento • Defeito do sensor e/ou do equipamento de coleta dos dados
Método de medição utilizado	<ul style="list-style-type: none"> • Adequabilidade do método ao fim em vista • Aproximações inseridas no modelo da medição
Operador (incerteza humana)	<ul style="list-style-type: none"> • Treino, formação, experiência • Paralaxe, capacidade visual • Falta de cuidado; • Leitura e registro de valores • Respeito dos tempos de warm-up • Informação enganosa e falta de comunicação entre partes envolvidas do projeto
Condições ambientais	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Umidade • Pressão atmosférica • Poeiras • Vibrações • Ruído eletromagnético • Descarga atmosférica

Fonte: Adaptado de Cabral (2004).

Cada uma dessas fontes contribui para a incerteza do resultado do valor de uma medição com um determinado “grau” de desconhecimento sobre aquilo que de fato está sendo medido. Embora seja impossível determinar a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, uma vez que este último é desconhecido, podemos definir grandezas que reflitam esta diferença de alguma forma, as chamadas incertezas, relacionadas diretamente com o conceito de precisão, que é tanto maior na medida quanto menor for a incerteza a ela associada. Infelizmente, não podemos quantificar a incerteza simplesmente pela média da diferença entre o valor medido e o verdadeiro, porque a diferença, que pode ser tanto positiva quanto negativa, tem valor médio nulo, nada informativo. Isso nos obriga a recorrer a elaborações matemáticas mais complexas.

2.5.2 Fontes de erros da instrumentação

Hvorslev (1951) afirma que na maioria dos casos temos que escolher qual fonte de erro é mais significativa e logo necessita mitigação. É possível que estas fontes de erro possam evoluir ou possam desaparecer e que suas influências nas leituras possam variar dentro de um amplo limite durante a vida útil de uma determinada instalação. Todos os tipos de erro podem ser expressos como "erro absoluto" ou como "erro relativo". Também, podem ser tratados pela análise numérica ou pela estatística.

De acordo com a literatura técnica e do conhecimento de especialistas no assunto que acompanharam e visitaram vários casos de automação de barragens é comum em uma fase inicial ocorrer problemas com sensores, mau funcionamento, e algumas medições incorretas sendo necessário da ordem de 5 anos para verificar o funcionamento correto dos sensores (QUISPE et. al., 2018).

Os instrumentos envolvidos no monitoramento de barragens denominados “manuais”, estão suscetíveis a uma gama de erros que podem levar a uma má interpretação da situação de estabilidade, seja pela falta de tomada de dados ou por erros de operação, as leituras dos respectivos equipamentos estão diretamente relacionadas com a capacidade (qualificação) do operador.

Medidas via qualquer método ou equipamento necessitam de certo grau de cuidado, julgamento, habilidade ou destreza do observador. Erros pessoais são frequentemente a causa de variação difícil de ser reconhecida. Leituras manuais por meio de medidores de nível d’água (pio) são, em muitas ocasiões, equivocadas pelo fato de o sensor deste equipamento emitir o sinal sonoro quando em contato com a umidade excessiva do interior do tubo (condensação), ao invés de somente sinalizar a altura d’água dentro do tubo geomecânico. Mesmo em instrumentos automatizados, a dificuldade em se controlar a profundidade de instalação do sensor no momento de sua descida junto à perfuratriz, faz com que esta profundidade seja registrada de forma equivocada ou com pouca acurácia, ocasionando assim medições pouco acuradas de carga hidrostática (CERQUEIRA, 2017).

Dados de séries temporais de instrumentação geotécnica são comumente processados e estruturados de forma única, distinta para cada tipo de observações e instrumentação. Os conjuntos de dados coletados também podem estar incompletos ou imperfeitos devido a tempos diferentes na frequência de medições, diferentes unidades de medição na mesma série temporal, mau funcionamento periódico de sensores ou alterações devido à calibração, valores anormais e lacunas de dados.

Como todo processo que depende do operador, as leituras também estão suscetíveis a erro humano como erro de tomada de leitura, erro de digitação dos dados e descontinuidade nas leituras. Erros dessa competência são muito comuns e vão apresentar uma análise errônea das reais condições da estrutura.

Segundo Silveira (2006), erro constitui o desvio entre o valor medido e o real. Erros surgem em função de várias causas distintas. Como todo processo que depende do operador, as leituras também estão suscetíveis a erro humano como erro de tomada de leitura, erro de digitação dos dados e descontinuidade nas leituras. Erros dessa competência são muito comuns e vão apresentar uma análise errônea das reais condições da estrutura. Os tipos de erros associados as respectivas causas da sua origem, bem como as medidas corretivas dos instrumentos estão sintetizadas na TABELA 2.4, que engloba causas de erros relacionados aos piezômetros.

TABELA 2.4 – Causas e medidas corretivas para os erros de medição

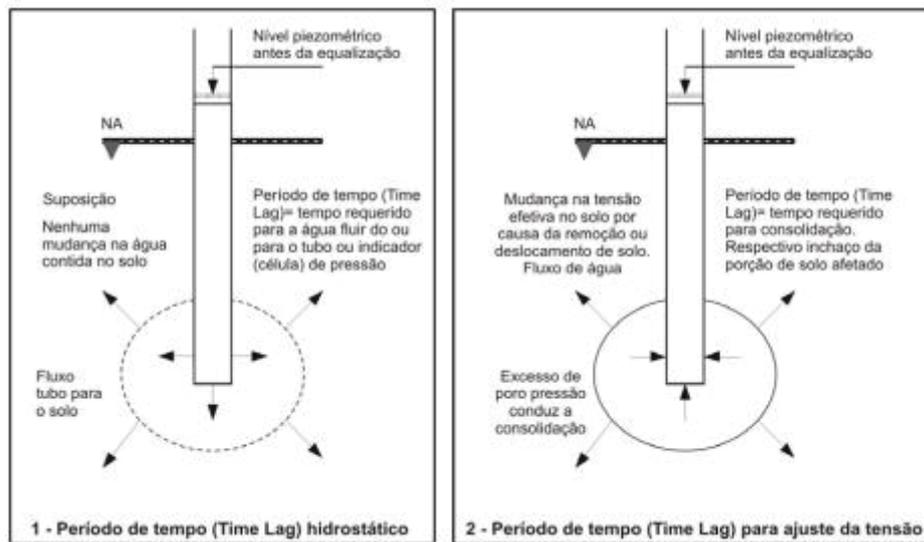
Tipo de Erro	Causas	Medidas Corretivas
Erro grosseiro	Inexperiência Falha durante a realização da leitura do instrumento Falha no registro da leitura do instrumento Erro ao digitar a leitura	Cuidado/atenção Treinamento do Operador Leituras duplicadas Dois observadores Comparação com as leituras prévias
Erro sistemático	Instrumento mal calibrado Perda ou falta de calibração Histerese Não linearidade	Uso de calibração correta Recalibração Uso de padrões Uso de procedimentos consistentes de leitura
Erro de conformidade	Erros no projeto do instrumento Detalhes de instalação incorretos Limitações do instrumento de medição	Seleção de instrumento apropriado Modificação dos procedimentos de instalação Aprimoramento do projeto de instrumentação
Erro ambiental	Tempo Temperatura Vibração Corrosão	Registrar as variações ambientais e introduzir correções Fazer escolha apropriada dos materiais dos instrumentos
Erro observacional	Mudança do profissional que realiza a leitura	Treinamento Uso de sistemas de aquisição automática dos instrumentos
Erro de amostragem	Variabilidade nos parâmetros medidos Técnicas incorretas de amostragem	Instalação de uma quantidade suficiente de instrumentos nos locais representativos
Erros aleatório	Ruído Atrito Efeitos ambientais	Seleção correta dos instrumentos Eliminação temporária de ruídos Leituras múltiplas Análises estatísticas
Lei de Murphy	Se algo pode dar errado, vai dar errado	Nenhuma - qualquer tentativa de remediar a situação irá piorá-la, então aprenda com os erros.

Fonte: Adaptado de Dunnycliff (1998).

- **Erros grosseiros** - erros relacionados à falta de experiência do operador ou fadiga, pela utilização de mais de um operador, conexões e instalações inadequadas, dentre outros. Esses podem ser evitados com leituras prévias, treinamento dos operadores, verificação e manutenção regular dos instrumentos.
- **Erros sistemáticos** - o erro sistemático é a parcela previsível do erro correspondente erro médio. O erro sistemático não pode ser eliminado, podendo ser reduzido e/ou corrigido. São erros produzidos por causas conhecidas, evitados através de técnicas particulares de observação ou mesmo eliminados mediante a aplicação de fórmulas específicas. São erros que se acumulam ao longo do trabalho. Na prática, esses erros podem se manifestar como variações nas condições ambientais, balizas tortas, trenas não suficientemente esticadas ou dilatadas, equipamentos mal calibrados ou baixa acuidade visual do operador do equipamento.
- **Erros de conformidade** - causados pela seleção errada dos procedimentos de instalação ou pelas limitações no projeto do instrumento.
- **Erros ambientais** – são erros relacionados à influência de fatores naturais, tal como pancadas de chuva e umidade, temperatura, descargas atmosféricas, vibração, pressão, intemperismo químico e físico, dentre outros.
- **Erros observacionais** – são erros relacionados às diferentes técnicas de observação empregadas para avaliação das leituras. Causados pela atuação de diferentes observadores (equipes de medições) usando diferentes técnicas observacionais. Esses tipos de erros podem ser minimizados através de treinamentos e cursos com intuito de inteirar toda equipe dos procedimentos de leitura adotados. Os erros de leitura são mais comuns em sistemas de instrumentação não automatizados.
- **Erros de amostragem** - causados pela instalação do instrumento em local inadequado e pela variabilidade do material sendo instrumentado.
- **Erros randômicos/aleatórios** – são erros relacionados a histerese, ruídos, atrito interno, vida útil dos equipamentos, dentre outros. Esses são minimizados através da escolha adequada do instrumento, acompanhamento dos resultados apresentados e do tratamento matemático das leituras por meio de análises estatísticas e determinísticas.

As FIGURAS 2.16 (1 e 2) destacam algumas fontes de erros relacionados ao período (intervalo) de tempo de resposta (time lag), parâmetro presente na instalação de um piezômetro, pois altera a pressão da água subterrânea. Dunnicliff (1993), descreve o time lag como sendo o tempo requerido para a água fluir para dentro ou fora do piezômetro para efeito de equalização no meio. Tal fenômeno depende primeiramente do tipo e dimensão do piezômetro a ser instalado bem como da permeabilidade do terreno.

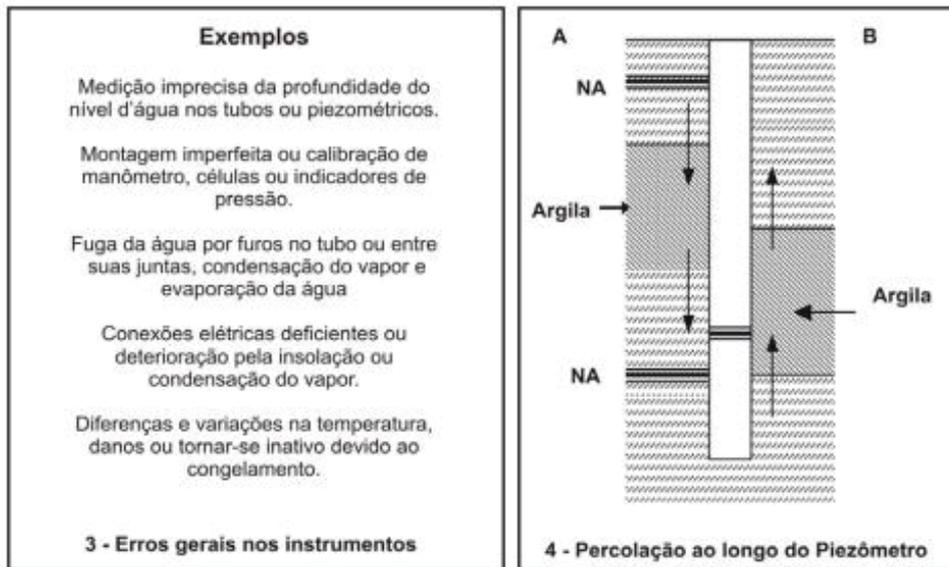
FIGURA 2.16 – Principais fontes de variação do período de resposta (time lag)



Fonte: Dunnicliff (1993)

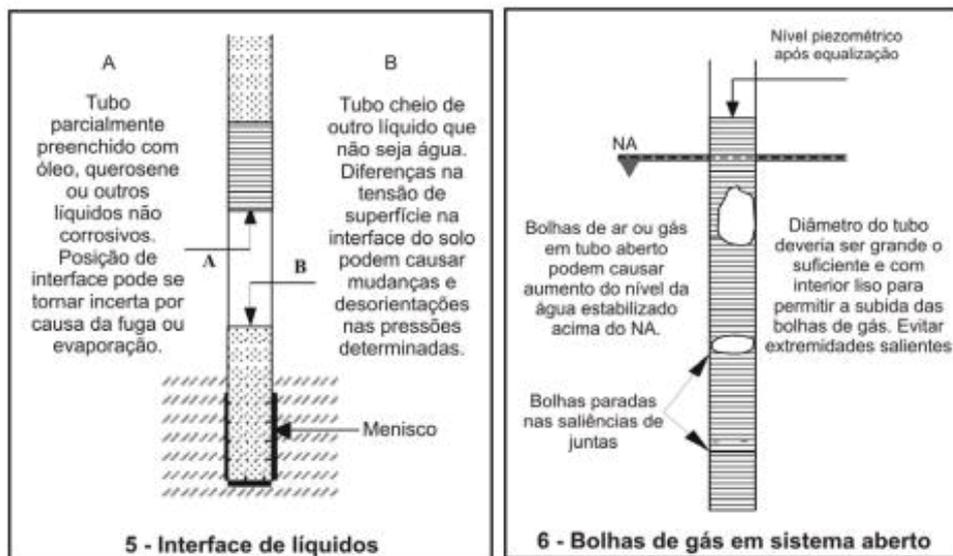
As FIGURAS 2.17 e 2.18 mostram alguns erros que afetam o valor de nível de água registrado durante a coleta com o sensor de leitura de nível d'água. Em relação à FIGURA 2.17, item (4), quanto ao nível d'água “empoleirado” com o fluxo descendente. Quanto a coluna (B) ilustra uma situação que, em decorrência de percolação ascendente da água por artesianismo pode ocorrer diminuição da pressão hidrostática no piezômetro. Na FIGURA 2.18 observa-se que a presença de outros fluidos, que não sejam água, e/ou de bolhas no tubo do piezômetro standpipe podem comprometer a leitura do nível d'água, pela diferença de tensão provocada. Por vezes, bolhas podem ficar retidas no interior do tubo, influenciando na elevação do nível d'água e sua estabilização acima da cota do nível d'água estático.

FIGURA 2.17 – Principais fontes de erros em piezômetros de tubo aberto (standpipe)



Fonte: Dunnycliff (1993).

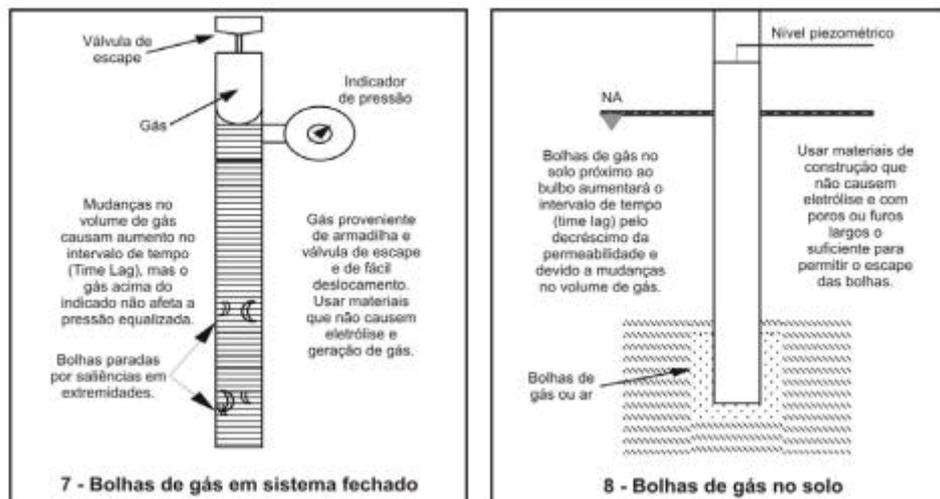
FIGURA 2.18 - Principais fontes de erros causados por fluidos e bolhas



Fonte: Dunnycliff (1993).

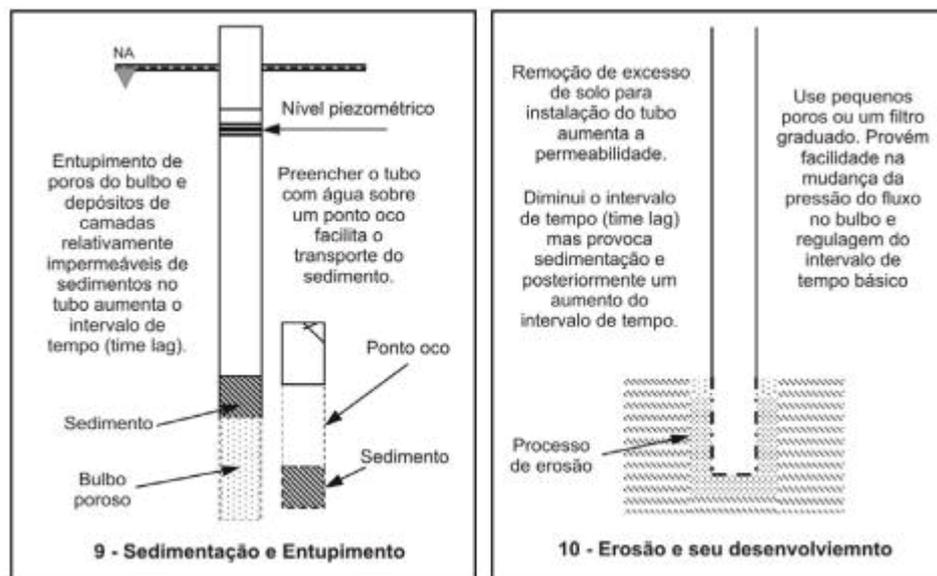
As FIGURAS 2.19 e 2.20 ilustram as possíveis fontes de alteração do time lag hidrodinâmico (intervalo de tempo de resposta para a estabilização do nível da água dentro do tubo do piezômetro), podendo gerar erros na leitura do nível d'água.

FIGURA 2.19 - Fontes de erros causados pela alteração do time lag hidrodinâmico



Fonte: Dunnycliff (1993).

FIGURA 2.20 – Outras fontes de erros causados pela alteração do time lag



Fonte: Dunnycliff (1993).

2.5.3 Limitações da instrumentação

Apesar de ser de grande valia, a instrumentação apresenta limitações que podem ser referentes ao próprio instrumento ou à leitura. Algumas dessas limitações são listadas por Cruz (2004) menciona alterações na medição caso a instalação do instrumento seja conduzida de forma equivocada; os instrumentos indicam o comportamento médio dos maciços, e não os extremos (que são de grande importância); alguns medidores não apresentam forma cabível de

verificar seu funcionamento após a instalação; ao apresentar comportamentos inesperados um instrumento pode ser considerado erradamente como defeituoso, bem como existe a possibilidade de assumir erradamente o comportamento adequado de um maciço e na realidade o instrumento estar apresentando uma falsa indicação de situação normal, por estar danificado; determinados tipos de instrumentos, como os piezômetros de tubo aberto, estão suscetíveis a danos irreparáveis de atravessarem uma zona submetida a deslocamentos concentrados; um plano de instrumentação deve ser acompanhado da existência de medidas reparadoras viáveis, para serem aplicadas para sanar eventuais deficiências detectadas; considerando que algumas rupturas de barragens estão associados a fenômenos que os instrumentos não conseguem identificar, fica reduzida a probabilidade de detectar, através de instrumentação, de forma incipiente a ocorrência de condições adversas à segurança. Desta forma, fica clara a importância não só da escolha dos instrumentos como da adequada instalação, manuseio e análise dos dados dos mesmos.

2.5.3.1 Problemas de leituras manuais

Os métodos de monitoramento manuais dependem diretamente da experiência e qualificação do profissional que fará a leitura em campo e do responsável pela segurança da barragem, e podem apresentar falhas que comprometem a interpretação correta da situação de estabilidade.

Os instrumentos envolvidos no monitoramento de barragens denominados “manuais”, estão suscetíveis a uma gama de erros que podem levar a uma má interpretação da situação de estabilidade, seja pela falta de tomada de dados ou por erros de operação, as leituras dos respectivos equipamentos estão diretamente relacionadas com a capacidade (qualificação) do operador e a calibração do instrumento. Os erros em um levantamento topográfico e no as built de um instrumento podem impactar diretamente nas leituras manuais dos instrumentos.

Nesse sentido, existem alguns critérios de verificação na hora de realizar um levantamento topográfico:

- estabelecer especificações de precisão e controle;
- selecionar adequadamente o método e o equipamento utilizado;
- executar as medições com o maior cuidado e atenção possíveis;
- garantir que os operadores dos equipamentos estejam treinados em seu uso;
- manter os equipamentos adequadamente ajustados e calibrados;

- realizar uma grande quantidade de medidas, o que vai possibilitar comparar os resultados, identificar possíveis erros e calcular médias aritméticas;
- utilizar fórmulas de correção, como média aritmética e desvio padrão.

2.5.3.2 Problemas de leituras automatizadas

A automação de instrumentos vem com novas propostas que tendem a minimizar os problemas e riscos da leitura manual, trazendo de forma mais precisa, rápida e frequente cada dado de cada equipamento. Como vantagem traz melhorias na gestão de segurança de barragens, pois a obtenção de dados correta e atual é fundamental para a detecção de comportamentos anômalos da barragem antes que se tornem irreversíveis.

Os principais problemas estão relacionados a falta de manutenção do sistema instalado, descargas atmosféricas, vandalismo, descalibração ou danos aos sensores durante inspeções manuais de verificação. Os equipamentos de coleta automática dos dados podem apresentar problema de conexão, alto consumo de bateria interna, problemas de sinal *wireless* ou ainda interferência ambiental como variações de temperatura, umidade, vibração e interferência eletromagnética podem afetar a precisão das leituras. Para que esses problemas sejam minimizados é recomendável um investimento em itens sobressalentes para substituição rápida sem impactar no monitoramento contínuo uma vez que a maior parte dos sensores e equipamentos são importados e pode demorar meses para o reparo ou substituição.

2.6 GARANTIA DA QUALIDADE E CONTROLE DE QUALIDADE (QA/QC)

2.6.1 Definição de QA/QC

QA/QC é a sigla para "Garantia da Qualidade e Controle de Qualidade" em inglês (Quality Assurance/Quality Control). Esses termos são amplamente utilizados em diversos setores para garantir que um produto ou serviço atenda aos padrões de qualidade exigidos.

Para Deming (1986) a qualidade de um serviço é influenciada por uma variedade de fatores, como a atitude dos funcionários, a eficiência do processo, a precisão das informações fornecidas ao cliente e a rapidez da resposta às reclamações do cliente. Ele também destacou a importância da capacitação dos funcionários, da coleta e análise de dados e do feedback do cliente como formas de melhorar a qualidade dos serviços prestados.

A garantia da qualidade se refere a um conjunto de atividades planejadas e sistemáticas que são implementadas em um processo de produção ou prestação de serviço para garantir que os requisitos de qualidade sejam atendidos (MACHADO, 2007). Essas atividades incluem o estabelecimento de padrões de qualidade, a implementação de processos de inspeção e teste, a realização de auditorias internas e externas, e a adoção de medidas corretivas para garantir a conformidade com os padrões estabelecidos. A garantia da qualidade é uma abordagem proativa que busca prevenir problemas e erros antes que ocorram, em vez de detectá-los após sua ocorrência (RAMOS, 2020).

Por outro lado, o controle de qualidade é um conjunto de medidas operacionais ou técnicas usadas para controlar o processo e garantir a qualidade do serviço e detectar e corrigir erros, problemas ou defeitos. Essa abordagem envolve o monitoramento do processo de produção ou prestação de serviço, a realização de inspeções em produtos ou serviços acabados e a adoção de medidas corretivas quando necessário. O controle de qualidade é uma abordagem reativa que busca detectar e corrigir problemas e erros depois que eles ocorreram (RAMOS, 2020).

Embora sejam abordagens distintas, a garantia da qualidade e o controle de qualidade são complementares e muitas vezes trabalham em conjunto para garantir que os produtos ou serviços atendam aos requisitos de qualidade e satisfaçam as necessidades do cliente. O QA/QC é amplamente utilizado em vários setores da indústria e nas operações de mineração e geotecnia não é diferente.

2.6.2 Implantação de um Programa de QA/QC

A preocupação com a qualidade, no sentido mais amplo da palavra, começou com Walter Andrew Shewhart, estatístico norte-americano que, já na década de 20, tinha um grande questionamento com a qualidade e com a variabilidade encontrada na produção de bens e serviços. Shewhart desenvolveu um sistema de mensuração dessas variabilidades que ficou conhecido como Controle Estatístico de Processo (CEP). Criou também o Ciclo PDCA (*Plan, Do, Check e Action*), método essencial da gestão da qualidade, que ficou conhecido como Ciclo Deming da Qualidade.

Segundo Shewhart (1924, apud COSTA et al, 2005) todo e qualquer processo, por mais bem projetado e por mais bem controlado que seja, possui em sua variabilidade um componente impossível de ser eliminado, trata-se de uma variabilidade natural do processo, que é

fruto de uma série de causas aleatórias. Monitorar o processo, é importante para identificar e reduzir a variabilidade dos dados, o que indica uma melhoria.

A implantação de um Programa de Garantia e Controle da Qualidade se mostra como uma tática para garantir a melhoria contínua da qualidade dos processos em diversas atividades da mineração e da geotecnia. Os estudos de QA/QC desempenham um papel importante especialmente em projetos de instrumentação e monitoramento geotécnico, pois não apenas melhoram a qualidade geral do projeto, mas também garantem que o projeto esteja sendo construído de acordo com os padrões.

A aplicação de QA/QC para instrumentação geotécnica é essencial para garantir a precisão, confiabilidade e segurança dos dados coletados por esses instrumentos. O processo pode ser conduzido internamente pela equipe responsável pelo projeto ou por uma empresa especializada em serviços de monitoramento geotécnico e pode envolver várias etapas, desde o projeto, especificação técnica, seleção e aquisição de instrumentos, instalação, verificação periódica, monitoramento da instrumentação e análise dos dados coletados. Implantar um programa de padronização da qualidade e governança para os projetos de instrumentação geotécnica fornecerá maior conformidade e qualidade dos dados representativos para aquele local onde o instrumento foi instalado contribuindo para a tomada de decisões críticas em projetos de engenharia geotécnica.

Segundo Pilco (2019), o objetivo principal do programa QA/QC está na garantia da integridade da informação, mapeados os erros, identificando-os, compreendendo-os e controlando-os corretamente. É através da implantação do QA/ QC que se torna possível a mitigação, de forma considerável, dos erros aleatórios de dados, otimizando os processos, possibilitando a realização de um bom controle e garantia da qualidade, obtendo dados precisos e bastante relevantes para a análise das estruturas geotécnicas da mineração. De maneira geral, o programa QA/QC é a construção de respostas para alguns questionamentos intrínsecos a qualquer processo, como por exemplo, o que é importante para a implantação deste processo, de que maneira é possível fazê-lo, de que forma é possível controlá-lo, e, em caso de desvios como corrigi-los. Funciona como uma orientação relacionada aos procedimentos, técnicas e ferramentas para assegurar o controle de qualidade e confiabilidade dessas informações e fazer com que os dados possam estar com a máxima qualidade possível.

O uso do QA/QC desde a fase de projeto tem como objetivo principal minimizar erros, otimizar a qualidade da informação para que possa ser usado como referência para profissionais que desejam aplicar ou iniciar esta atividade em seu trabalho diário. Se não houver um programa QA/QC, que se encarregue de monitorar os procedimentos, controle constante sobre os

possíveis erros inerentes ao processo, desde a etapa de projeto da instrumentação, que é uma fase que podem ocorrer erros fundamentais e grosseiros, pode vir a gerar erros significativos na instalação dos instrumentos e comprometer a segurança da estrutura geotécnica se não forem corretamente identificados e controlados. Devemos entender que os erros são cumulativos, por esta razão, este problema deve ser reduzido durante todos os processos.

Um plano de qualidade para a instrumentação geotécnica engloba um conjunto de vários documentos, que juntos especificam padrões de qualidade, práticas, recursos, projetos, especificações e a sequência de atividades relevantes para a execução das atividades de instalação e monitoramento dos instrumentos.

Enquanto o QC descreve as medidas individuais que são usadas para confirmar e relatar que os requisitos foram alcançados. É definido como “o uso rotineiro de procedimentos projetados para alcançar e manter um nível especificado de qualidade para um sistema de medição” (DEMING, 1990). É aplicado durante a execução das atividades, envolvendo a coleta de amostras, ensaios laboratoriais, instrumentação. O QA aborda as atividades na etapa de projeto para fornecer confiança de que os requisitos de qualidade serão cumpridos. Envolve a elaboração de planos de qualidade, a identificação de requisitos de qualidade, a seleção de fornecedores e prestadores de serviços qualificados e a realização de inspeções e auditorias de qualidade geotécnica para garantir a conformidade dos materiais utilizados, o monitoramento de parâmetros como a estabilidade do maciço rochoso, a qualidade dos aterros e a drenagem, e a realização de inspeções de qualidade em equipamentos e instalações.

Para garantir a qualidade específica dos dados, as atividades de controle de qualidade devem ser implementadas para todas as etapas das atividades, desde o projeto, a perfuração, instalação, coleta e monitoramento de dados. Todas as atividades de QA/QC devem ser documentadas.

Os planos de qualidade devem definir:

- Objetivos a serem alcançados com a instrumentação;
- Etapas nos processos que constituem a prática operacional, normas, projetos ou procedimentos da organização;
- Alocação de responsabilidades, autoridade e recursos necessários durante as diferentes fases do processo ou projeto;
- Padrões documentados específicos, práticas, procedimentos e instruções a serem aplicadas;
- Programas adequados de inspeção e auditoria em estágios apropriados;

- Um procedimento documentado para mudanças e modificações em um plano de qualidade à medida que um processo é aprimorado;
- Um método para medir a realização dos objetivos de qualidade (Ferramentas de Controle);
- Outras ações necessárias para atingir os objetivos.

No entanto, os planos de controle de qualidade devem sempre ter uma estrutura que permita melhorias no plano. Isso permite que à medida que for sendo implementado ofereçam informações sobre como melhorar a eficiência e a qualidade. Além disso, o plano deve ser revisado periodicamente por outras pessoas, incluindo as partes interessadas, para garantir que o plano seja abrangente.

Os planos de controle de qualidade geralmente incluem informações detalhadas sobre:

- Uma visão geral ou introdução do projeto ou processo detalhando o histórico, necessidade, escopo, atividades e datas ou prazos importantes;
- A estrutura organizacional ou organograma detalhando os membros da equipe necessários, incluindo fornecedores externos;
- As responsabilidades e qualificações de cada membro da equipe necessárias para cumprir os deveres declarados;
- Verificação do trabalho (por exemplo, quem é responsável por realizar uma tarefa, bem como quem é responsável por verificar o trabalho);
- Padrões do fornecedor (por exemplo, especificar os padrões que os possíveis; fornecedores devem atender antes de poderem licitar em um contrato);
- Uma lista de fornecedores qualificados;
- Parâmetros de teste;
- Padrões de desempenho e como o desempenho será documentado;
- Critérios de aceitação;
- Entregáveis;
- Um mecanismo de feedback para feedback do cliente interno e/ou externo;
- Procedimentos de controle de qualidade;
- Auditorias;
- Treinamento (por exemplo, visão geral, específico para o trabalho ou treinamento de atualização);
- Ação corretiva e ações preventivas, incluindo a(s) pessoa(s) responsável(is);
- Ação corretiva sugerida;

- Notificações necessárias;
- Quaisquer referências ou materiais relacionados, incluindo avaliações de desempenho ou relatórios de desempenho.

2.6.3 As ferramentas da gestão da qualidade

O conceito de qualidade é definido a partir do estabelecimento de padrões mensuráveis de avaliação da relação entre o que é planejado e o que é executado. As ferramentas da qualidade fazem parte de um conjunto de instrumentos estatísticos, cujo objetivo é a melhoria da qualidade dos produtos, serviços e processos. Dessa forma, a gestão da qualidade fundamenta-se na simplicidade e à coerência dos conceitos básicos (DE SOUZA COELHO; MANIÇOBA, 2016).

Dentro dos preceitos da gestão da qualidade, a estatística promove um importante papel na gestão da produtividade, porque é improvável a existência de produtos ou serviços exatamente iguais, providos da mesma fonte, com características exatamente de acordo com o modelo original. Por isso, faz-se necessário o domínio das possíveis variações existentes (BARBOSA; GAMBI; GEROLAMO, 2017).

Além disso, a estatística é capaz de oferecer todo o apoio necessário para coletar, tabular, analisar e demonstrar dados existentes. E isso pode ser aplicado em qualquer empresa, independentemente do seu porte, ou seja, pode ser utilizada em pequenas, médias e grandes empresas, apresentando a característica comum do uso de uma ferramenta gráfica e pessoal capacitado para análise crítica dos resultados obtidos (BARBOSA; GAMBI; GEROLAMO, 2017; DE SOUZA COELHO; MANIÇOBA, 2016).

A qualidade deixou de ser um diferencial para as empresas e passou a ser uma obrigação, uma condição básica para se manter no mercado. A qualidade não deve mais ser concebida como um ato isolado ou “departamento específico”, mas como uma concepção de pensamento e atitude a ser praticada em todos os processos organizacionais. É importante que os executivos, gestores e líderes das organizações utilizem técnicas e ferramentas da qualidade para auxiliá-los na incansável busca da excelência.

Ferramentas da qualidade são técnicas que se podem utilizar com a finalidade de definir, mensurar, analisar e propor soluções para problemas que eventualmente são encontrados e interferem no bom desempenho dos processos de trabalho. Essas ferramentas são amplamente utilizadas em diversos setores da indústria, comércio e serviços para melhorar a eficiência e a

eficácia dos processos, reduzir custos, aumentar a satisfação do cliente e garantir a conformidade com as normas e padrões de qualidade.

Segundo Carpinetti (2010), as principais ferramentas da qualidade incluem:

- **Diagrama de Ishikawa (ou diagrama de espinha de peixe ou diagrama de causa e efeito):** é uma ferramenta utilizada para identificar e analisar as possíveis causas de um problema, organizando as informações em categorias (pessoas, processos, máquinas, materiais, ambiente) e visualizando a relação entre as causas e o efeito.
- **Gráfico de Pareto:** é uma ferramenta utilizada para identificar e priorizar as causas de um problema, a partir da análise de dados e da identificação dos itens ou fatores mais frequentes ou significativos.
- **Folha de verificação:** é uma ferramenta utilizada para coletar e organizar dados, de forma estruturada, para identificar possíveis causas de um problema ou para monitorar o desempenho de um processo.
- **Histograma:** é uma ferramenta utilizada para representar graficamente a distribuição de um conjunto de dados, permitindo a verificação de um processo em relação à especificação, identificação de padrões e anomalias.
- **Diagrama de Dispersão:** é utilizado para verificar a relação entre duas variáveis e identificar possíveis padrões ou tendências.
- **Fluxograma:** é uma representação gráfica de um processo, permitindo a identificação de problemas, estabelecer limites e oportunidades de melhoria em cada etapa.
- **Gráfico de controle:** é uma ferramenta utilizada para verificar se processo está sob controle, a partir da representação gráfica dos dados coletados com limite de controle que permite o monitoramento dos processos e identificação de variações e tendências ao longo do tempo.
- **Brainstorming:** é uma técnica que busca gerar ideias e soluções para um problema, através de um processo criativo de discussão em grupo.

Podendo sofrer variações, dependendo do contexto da aplicação. O procedimento de implantação da gestão da qualidade, provém de políticas, decisões e metodologias suportadas pela administração, devendo aquelas serem conhecidas e entendidas por todos aqueles que irão colocá-las em prática.

Além dessas ferramentas, existem outras, como o ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), a matriz GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) e a análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*), que são amplamente utilizadas na gestão da qualidade.

2.6.3.1 Garantia da qualidade (QA)

Segundo Juran (2009), a gestão da qualidade é dividida em três pontos fundamentais: planejamento, controle e melhoria. Para ele, a melhoria da qualidade deve ser a prioridade do gestor, seguido pelo planejamento, e finalizando com o controle de qualidade, que deve ser delegado aos níveis operacionais. Carvalho e Paladini (2005) sugerem três processos associados ao gerenciamento da qualidade em projeto:

- a) **planejamento da qualidade:** identificação dos principais requisitos que os clientes pretendem ver atendidos através do novo produto e/ou serviço.
- b) **aplicar a garantia da qualidade:** realizar os testes, inspeções e avaliações delineadas no planejamento, a fim de que todas as etapas do processo de desenvolvimento sejam devidamente checadas.
- c) **fazer o controle:** significa avaliar os resultados dos testes e inspeções. Não basta fazer controle e identificar as causas de desempenhos abaixo das expectativas, precisamos agir sobre as não conformidades, aplicar ações corretivas para evitar reincidências.

A garantia da qualidade é um conjunto de ações planejadas e sistemáticas para garantir que um serviço atenda aos requisitos pré-definidos e especificados. Não envolve apenas a verificação dos dados finais de execução para evitar erros, mas também verificando a qualidade de forma planejada em todas as etapas de entrega do projeto. É o desenvolvimento de procedimentos para evitar que erros ocorram durante a instalação, com base em planejamento respaldado por especificações técnicas, manuais, projetos e ferramentas de qualidade adequados.

O sistema deve definir a necessidade de preparar documentos de execução, como instruções de trabalho, regimes de fiscalização, procedimentos, planos de ação e registros de conformidade. Deve incluir a finalidade dos procedimentos, referências necessárias a outros documentos, escopo, método e sequência de execução, critérios de aceitação e rejeição, pontos-chave de controle e tempo de inspeções.

Os procedimentos técnicos ou administrativos também podem fazer parte de uma gestão da qualidade sistema. O manual ou o guia deve fornecer uma descrição genérica do proprietário/operador do sistema de qualidade enquanto os procedimentos, sejam gerais ou

específicos, estabelecem o que é necessário para atingir os objetivos listados. Os procedimentos devem vincular os padrões ISO, aos requisitos e as atividades do proprietário/operador e deve incluir o pessoal envolvido, detalhes de materiais e equipamentos e uma descrição das principais atividades. Cada organização deve decidir quais processos devem ser documentados com base na natureza de suas atividades, sua estratégia corporativa, juntamente com os requisitos regulamentares.

Para resumir de uma forma simples, a garantia de qualidade tem tudo a ver com o planejamento ou finalização das metas de qualidade para um projeto e, em seguida, mostrar claramente as formas de alcançá-las.

2.6.3.2 Controle de qualidade (QC)

O termo qualidade, segundo Campos (1992), é o produto ou serviço que atende perfeitamente às necessidades do cliente no tempo, forma, seguro, acessível e confiável. Ainda segundo Campos (1992), controle significa localizar o problema, analisar e padronizar o processo, estabelecendo itens de controle. O controle de qualidade (QC) nada mais é que monitorar o resultado específico de um projeto, atividade, para determinar o cumprimento dos padrões de qualidade relevantes e identificar maneiras de eliminar a causa do desempenho insatisfatório.

Segundo Werkema (1995), o controle de qualidade moderno teve seu início nos Estados Unidos na década de 1930 pelo Dr. Walter Andrew Shewart, permitindo para os produtos e serviços o alcance, a manutenção e o controle de qualidade. O controle de qualidade foi adotado também no Reino Unido em 1935 e a Segunda Grande Guerra foi o maior catalisador para o seu uso.

O controle de qualidade inclui todas as tarefas ou atividades realizadas em campo de acordo com as diretrizes de qualidade ou estrutura prescrita nos documentos de garantia de qualidade, como especificações do projeto, a fim de verificar se as metas de qualidade estabelecidas nos documentos de QA são realmente alcançadas de maneira sistemática, conforme sugerido nesses documentos. Os documentos de qualidade gerados durante a execução dessas tarefas são documentos de controle de qualidade ou documentos de QC.

Nenhum planejamento é tão eficaz que não possa ocorrer desvios. Neste aspecto, entra a atividade de controle. Não se trata apenas de controlar os resultados dos processos, mas também avaliar o próprio planejamento, para então detectar oportunidades de melhoria. Resumindo, este aspecto estabelece que se deve avaliar o resultado real da qualidade; comparar o

resultado obtido com as metas estabelecidas; e tomar ações corretivas para corrigir eventuais desvios percebidos.

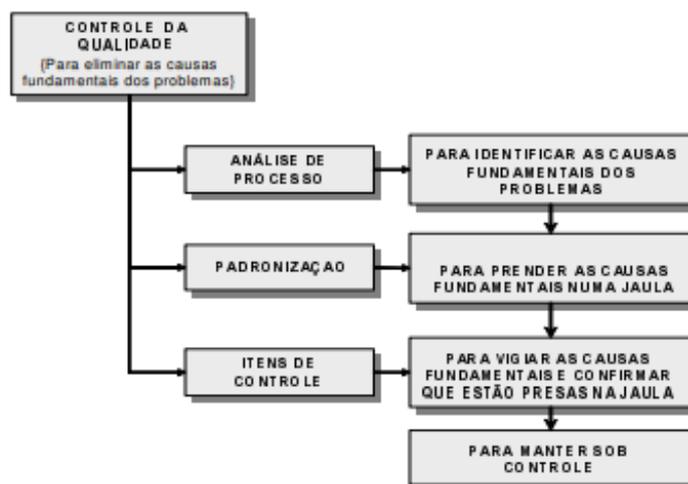
Para Campos (1992), controle significa o planejamento do processo que inclui o estabelecimento de várias metas e vários procedimentos-padrão. Normalmente quando ocorre um problema, faz-se a análise do processo, com objetivo de localizar a causa fundamental que, quando identificada, irá determinar um novo procedimento para execução da tarefa ou processo, de tal forma que a causa localizada seja evitada, o que significa que se está buscando uma padronização. Segundo Carvalho e Paladini (2005), a atividade de controle da qualidade tem quatro passos:

- estabelecimento de padrões;
- avaliação da conformidade;
- ação corretiva quando necessária;
- planejamento para a melhoria.

Para que um sistema de qualidade realmente alcance sua eficácia, gerando produtos e serviços economicamente viáveis, e simultaneamente satisfazendo as expectativas dos clientes, se faz necessário também que o sistema esteja estruturado em procedimentos gerenciais e operacionais, devidamente documentados e divulgados (CARVALHO; PALADINI, 2005).

Portanto, manter sob controle é saber localizar o problema, analisar o processo, padronizar e estabelecer itens de controle de modo que o problema não se repita. A FIGURA 2.21 mostra as bases do controle.

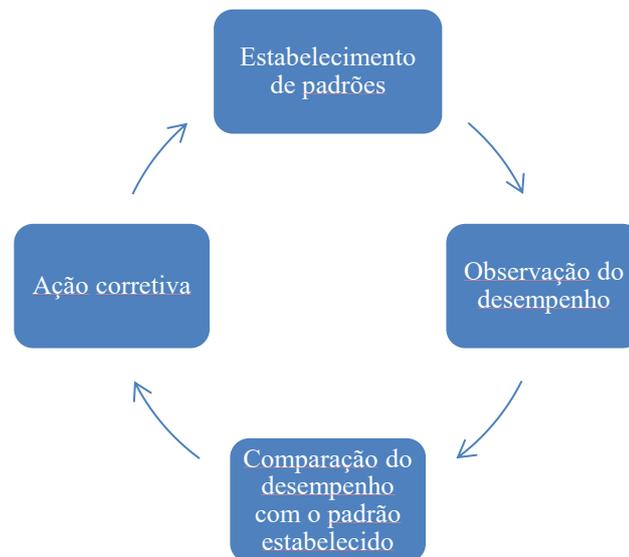
FIGURA 2.21– Bases do controle



Fonte: Campos (1992).

Chiavenato (2000), julga o controle como um processo analítico composto por quatro fases, como mostrado na FIGURA 2.22.

FIGURA 2.22– As quatro fases do controle



Fonte: adaptado de Chiavenato (2000).

O objetivo do controle é manter as operações dentro dos padrões estabelecidos para que os objetivos sejam alcançados da melhor maneira possível. Assim, variações, erros ou desvios devem ser corrigidos para que as operações sejam normalizadas. A ação corretiva visa fazer com que aquilo que é feito esteja exatamente de acordo com o que se pretende fazer. A FIGURA 2.22 mostra uma sequência de ações que definem o controle como forma de assegurar o alcance dos objetivos (CHIAVENATO, 2000).

Tendo em vista esse novo papel do uso de dados, é crucial que os profissionais garantam sua qualidade, para evitar quaisquer desvios nas análises e, por consequência, nas tomadas de decisão. Por muitas vezes, sensores e tecnologias que entregam dados de alto nível têm custo elevado, por isso, as indústrias tendem a optar por soluções mais em conta, porém que apresentem pequenas inconsistências.

Os profissionais, portanto, precisam ser treinados para mapear e entender esses desvios, a fim de munir os sistemas apenas com os dados realmente confiáveis. Assim, os projetistas e a equipe de geotecnia poderão trabalhar em cima de informações de qualidade e condizentes com a realidade.

2.6.3.3 O ciclo PDCA

O PDCA é um método iterativo de gestão de quatro passos, utilizado para o controle e melhoria contínua de processos e produtos. É uma ferramenta baseada na repetição, aplicada sucessivamente nos processos buscando a melhoria de forma continuada para garantir o alcance das metas necessárias à sobrevivência de uma organização. Pode ser utilizada em qualquer ramo de atividade, para alcançar um nível de gestão melhor a cada dia. Seu principal objetivo é tornar os processos da gestão de uma empresa mais ágeis, claros e objetivos.

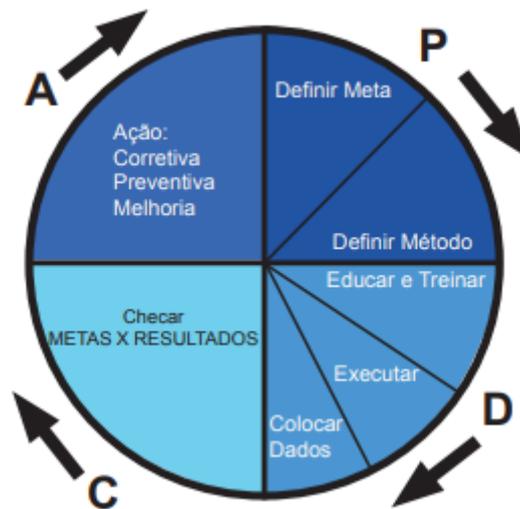
Para Montgomery (2009), o ciclo de Shewhart, também conhecido como ciclo de aprendizado e aperfeiçoamento e ciclo de Deming, combina o pensamento gerencial com a utilização de análise estatísticas. De acordo com Johnson (2002), o ciclo PDCA é uma metodologia conhecida para a melhoria de processos, pois ele ensina as organizações a planejar suas ações, como fazer isso, verificar como ela se ajusta ao plano de negócios e a agir de acordo com o que foi aprendido.

Até pouco tempo atrás estes conceitos eram exclusivamente utilizados para processos de fabricação, hoje o conceito deste ciclo pode ser utilizado nos diversos processos das empresas, muitas vezes adaptado a cada realidade, fomentando a cultura de busca pela melhoria de cada atividade em toda a empresa. Para Agostinetti (2006), o ciclo PDCA é descrito da seguinte forma:

- *Plan* (planejar) - Traçar o Plano: é estabelecimento de acordo com as diretrizes da empresa, identifica o problema, estabelece os objetivos e as metas, define o método a ser utilizado e analisar os riscos, custo, prazo e recursos disponíveis;
- *Do* (fazer) – Executar o Plano: estabelece treinamentos do método a ser utilizado, objetivos sobre os itens de controle, coleta dados para verificação do processo e finalmente, educa, treina, motiva e obtém comprometimento das pessoas;
- *Check* (controlar) – Verificar os Resultados: verifica se o trabalho está sendo executado de acordo com o que foi planejado, se as características de qualidade variam como esperado e comparar com o padrão, e se tem necessidade de voltar a fase de analisar o fenômeno, confrontar o planejado com o realizado;
- *Act* (implantar) – Realizar Ações Corretivas: toma ações para corrigir trabalhos que possam ter desviado do padrão, investiga as causas e toma ações para não os repetir e melhorar o sistema de trabalho e o método. Fixar a rotina e estabelecer o novo método como padrão, criando assim condições para a melhoria contínua a partir deste novo nível.

A metodologia PDCA, como apresentado por Campos (2009) na FIGURA 2.23 é um método gerencial para melhoria contínua utilizado para garantir que as metas sejam atingidas e para manter os resultados em um certo nível desejado de qualidade.

FIGURA 2.23- O Ciclo PDCA

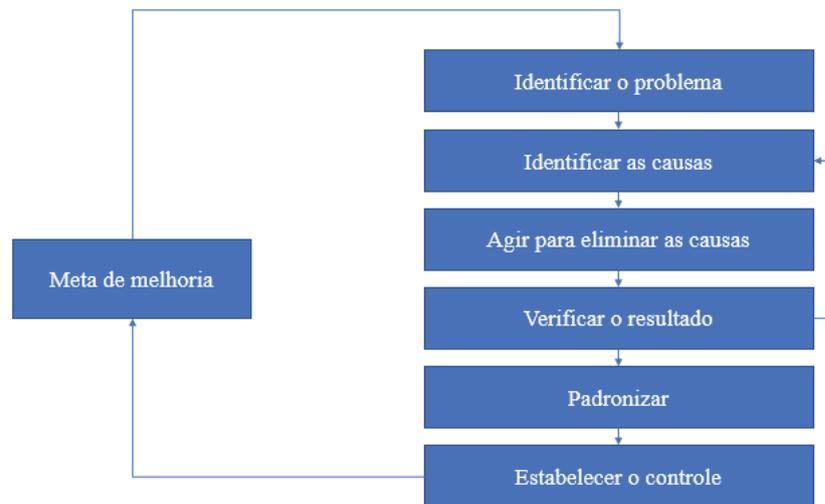


Fonte: Campos (2009).

A ideia é que as atividades sejam realizadas de forma cíclica com uma sequência de atividades para melhorar as práticas das organizações. Um método estabelecido com o objetivo de detectar e efetivar soluções para melhoria dos processos e de solução de problemas. Tem em sua forma uma sequência de passos estruturados de forma a planejar o início, meio e fim de uma ação corretiva, onde causas são investigadas, de maneira detalhada, por meio de fatos, causas e efeitos, a fim de oferecer medidas planejadas.

Segundo CARPINETTI (2010) melhorar continuamente não é o suficiente para localizar prováveis falhas ou problemas no processo de produção. Para isso é preciso identificar os problemas prioritários, coletar os dados, fazer uma análise, buscar as causas-raízes, planejar e implementar as ações para finalmente apurar os resultados. De acordo com CARPINETTI (2010), o comportamento do processo pode ser representado pela FIGURA 2.24.

FIGURA 2.24 - Etapas do controle de processos



Fonte: Carpinetti, (2010).

2.6.4 Variabilidade dos processos

A variabilidade dos processos refere-se às flutuações aleatórias nos resultados de um processo. Ela pode ser causada por diversos fatores, como diferenças na matéria-prima, na mão de obra, nas condições ambientais, nas máquinas e equipamentos, entre outros.

A variabilidade pode ter um impacto significativo na qualidade do produto ou serviço produzido pelo processo. Se a variabilidade for alta, é mais provável que haja produtos ou serviços com defeitos ou que não atendam às especificações desejadas. Por outro lado, se a variabilidade for baixa, é mais provável que a qualidade do produto ou serviço seja consistente e atenda às especificações.

Para gerenciar a variabilidade dos processos, é importante identificar as fontes de variação e implementar medidas para controlá-las. Uma abordagem comum para gerenciar a variabilidade dos processos é usar técnicas estatísticas de controle de processo, como a carta de controle. Essas técnicas permitem monitorar o desempenho do processo ao longo do tempo e detectar rapidamente quando o processo está fora de controle.

Além disso, outras técnicas como o mapeamento do processo, análise do sistema de medição e análise de causa raiz pode ser usada para identificar e tratar as fontes de variação. O objetivo final é reduzir a variabilidade do processo para produzir produtos ou serviços de alta qualidade e consistência.

Embora o projeto de um determinado processo deva ser planejado de forma a eliminar ou reduzir ao máximo a sua variabilidade e propensão a falhas, todos os processos apresentam

falhas. E não são somente os processos humanos que são suscetíveis a variações, equipamentos e materiais também podem variar em função das condições do clima como temperatura, umidade e pressão atmosférica, ou também por desgaste em função do uso e do tempo de utilização.

A variabilidade é a oscilação da média ou ponto ideal do processo e representa um aspecto fundamental para o controle da qualidade. Ela avalia a dispersão dos dados e é calculada para cada amostra a partir da divisão do desvio padrão pela média dos dados. Está relacionada principalmente a não uniformidade das matérias-primas, da habilidade e diferenças pessoais dos colaboradores, dos equipamentos, e muitas vezes, das condições contextuais inerentes ao processo. A determinação dos limites em valores aceitáveis em um processo é primordial para seu controle.

2.6.5 Tipos de causas de variabilidade no processo

No contexto da gestão de qualidade, as causas de variabilidade no processo podem ser divididas em dois tipos: causas comuns e causas especiais. Deming (1990) destaca a importância de se distinguir as causas comuns de causas especiais. Segundo o autor é um erro comum atribuir uma variação a uma causa especial, quando na realidade a variação trata-se de uma causa comum do processo. Quando somente causas comuns agem no processo ele apresentará um comportamento previsível.

- Causas Comuns: são as causas de variação que são inerentes ao processo e afetam todas as unidades produzidas. Elas são esperadas e podem ser previstas estatisticamente, incluindo fatores como variações nos materiais, equipamentos, métodos de trabalho e habilidades dos operadores. Estão associadas ao desenho, à estrutura e aos responsáveis pelo processo. Para eliminá-las ou minimizá-las é necessário rever o projeto do processo.
- Causas Especiais: são as causas de variação que surgem de forma imprevisível e não são parte do processo normal. Elas afetam apenas algumas unidades produzidas e podem ser identificadas e corrigidas. As causas especiais incluem fatores como falhas de equipamento, erros humanos e condições ambientais extremas. São difíceis de ser previstas, pois estão associadas a aspectos não controláveis do processo.

A distinção entre causas comuns e causas especiais é importante na gestão de qualidade, pois ajuda a determinar as ações corretivas apropriadas. As causas comuns exigem uma

abordagem de melhoria contínua para reduzir gradualmente a variabilidade do processo, enquanto as causas especiais exigem a identificação e eliminação imediata da causa raiz para evitar que o problema ocorra novamente.

Além disso, a variabilidade no processo pode ser causada por outros fatores, como variações no suprimento de matérias-primas, mudanças no processo de fabricação, erros de medição e falhas de comunicação. Identificar e controlar essas fontes de variação é fundamental para garantir a qualidade e a consistência do produto ou serviço final. A diminuição da variabilidade no processo é uma tarefa que precisa da contribuição de uma equipe capacitada, comprometida e com consciência da importância da melhoria do processo.

2.6.6 Análise estatística dos dados

A análise estatística dos dados é uma técnica utilizada para resumir e descrever as informações contidas em um conjunto de dados, bem como para extrair informações úteis e relevantes a partir desses. É uma ferramenta importante na gestão da qualidade, pois permite que as empresas identifiquem padrões e tendências nos dados, o que pode ajudar a detectar problemas e oportunidades de melhoria.

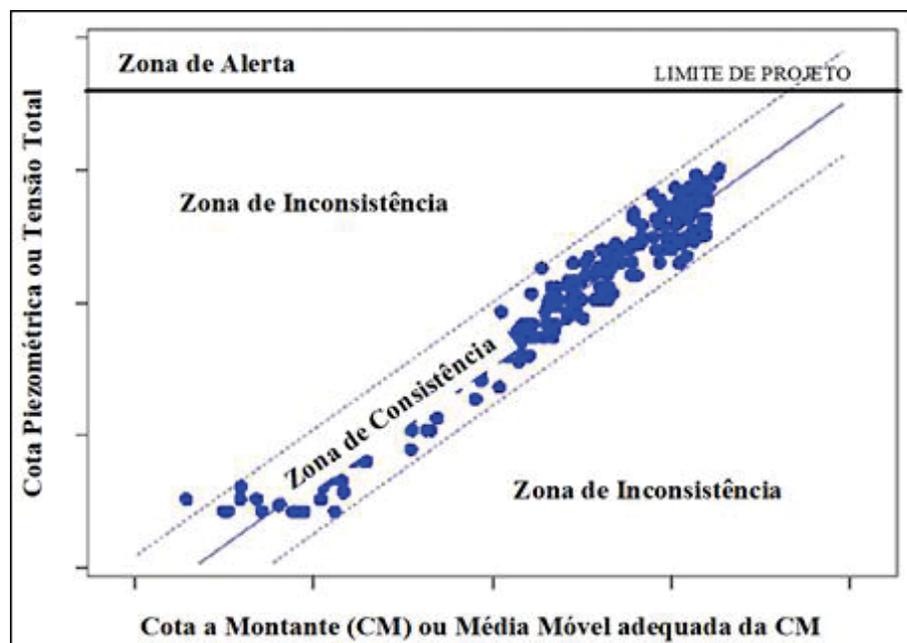
É senso comum que qualquer medição ou experiência é desaconselhável ter uma única leitura, pois existe sempre o risco de se cometerem erros que passarão despercebidos se não se tiver qualquer termo de comparação. Uma análise estatística dos dados provenientes da medição é prática comum, pois permite uma estimativa analítica da incerteza associada ao resultado. Para tornar significativos os métodos e as interpretações estatísticas são geralmente necessários dispor de muitas medidas. Para além disso, os erros sistemáticos devem ser pequenos em comparação aos erros aleatórios, visto que o tratamento estatístico dos dados não elimina o erro de fidelidade (bias) existente em todas as medições.

Para níveis de controle o método determinístico é a forma mais tradicional para determinação de níveis de controle de instrumentos piezométricos de uma estrutura geotécnica e envolve o desenvolvimento de análises de estabilidade pelo método de equilíbrio limite para simular cenários de elevação do nível de água nos quais a barragem atinge fatores de segurança de referência. Apesar de ser uma ferramenta essencial para o acompanhamento da performance, o método não aponta tendências e mudanças de comportamento das leituras da instrumentação em estágios intermediários, alterando o “*status*” apenas quando um cenário pré-estabelecido de atenção, alerta ou emergência já foi alcançado.

Ao utilizar o método determinístico para estabelecer níveis de controle, é importante levar em consideração a incerteza associada às medições e às variáveis utilizadas no modelo. Diante das limitações do método determinístico, torna-se importante a aplicação de ferramentas complementares para a avaliação das mudanças de comportamento, com base em tendências históricas. Um desses métodos é a utilização de níveis baseados em estudos estatísticos em dados históricos de leituras da instrumentação.

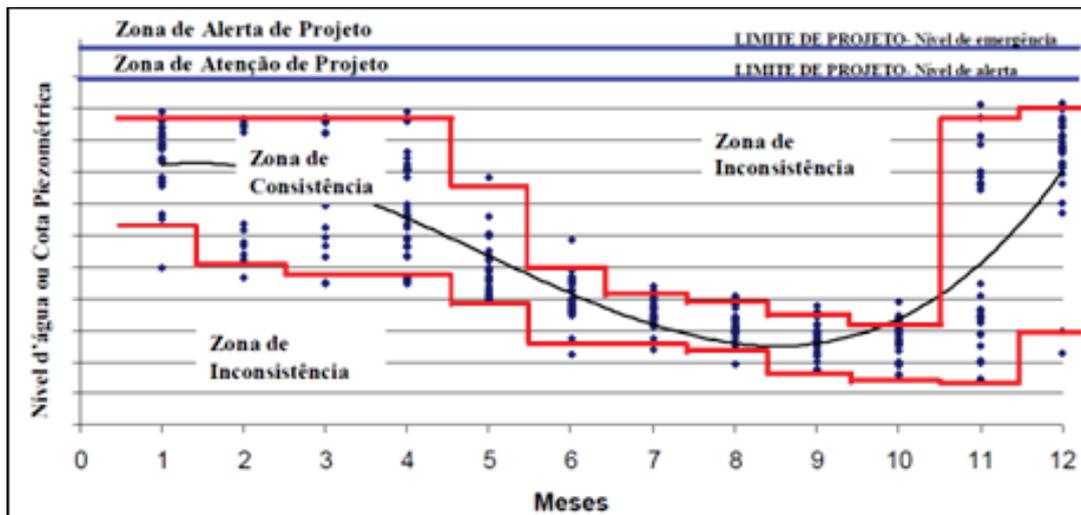
Segundo Fusaro (2007), a aplicação de alguns destes métodos é utilizada para acompanhar as variações de comportamento de duas estruturas geotécnicas diferentes. Para a primeira estrutura (Barragem de Emborcação) foi definido faixas de consistência para dados de poropressão, a partir de regressões lineares, correlacionando cotas piezométricas com medidas de nível do reservatório (FIGURA 2.25). Em relação a segunda estrutura, foram definidos limites estabelecidos por métodos de máximos e mínimos em intervalos pré-fixados em uma série temporal (FIGURA 2.26).

FIGURA 2.25 Valores de controle para piezômetros – Barragem de Emborcação



Fonte: Fusaro (2007).

FIGURA 2.26 Valores de referência para piezômetro – Barragem do Piau



Fonte: Fusaro (2007).

A definição de parâmetros de controle da instrumentação baseado em dados históricos permite a identificação de mudança de comportamento e avaliação antes do alcance de níveis de controle, favorecendo a tomada de decisão precoce, permitindo uma análise mais profunda do comportamento e contribuindo para uma gestão de risco mais eficiente.

A análise estatística pode ser uma ferramenta útil para comparar a variabilidade entre as leituras manuais e automatizadas de piezometria. Algumas técnicas comuns incluem:

- Coeficiente de correlação: pode ser utilizado para verificar a relação linear entre as leituras manuais e automatizadas de piezometria. O coeficiente de correlação pode variar de -1 a +1, sendo -1 uma correlação perfeitamente negativa, +1 uma correlação perfeitamente positiva e 0 indica que não há correlação entre as variáveis.
- Gráficos de dispersão: podem ser utilizados para visualizar a relação entre as leituras manuais e automatizadas de piezometria. O gráfico de dispersão pode ajudar a identificar a presença de valores discrepantes e padrões nos dados.
- Teste de diferenças significativas: pode ser utilizado para verificar se as leituras manuais e automatizadas de piezometria são estatisticamente diferentes. Por exemplo, o teste t de *Student* pode ser usado para comparar as médias dos dois conjuntos de dados.
- Análise de variância (ANOVA): pode ser utilizada para verificar se as diferenças entre as leituras manuais e automatizadas de piezometria são significativas quando mais de dois conjuntos de dados são comparados.

- Análise de regressão: pode ser utilizada para modelar a relação entre as leituras manuais e automatizadas de piezometria. A análise de regressão pode ajudar a identificar a existência de uma relação não linear entre as variáveis.
- A distribuição normal: também conhecida como distribuição de Gauss ou distribuição gaussiana, é uma distribuição de probabilidade contínua que é frequentemente na teoria das probabilidades e na estatística para calcular a probabilidade de eventos aleatórios. A distribuição normal é caracterizada pela sua média (μ) e pelo desvio padrão (σ). A curva normal é simétrica em torno da média e tem a forma de um sino, com a maior parte dos valores centrados na média e diminuindo à medida que se afastam dela.

Ao realizar uma análise estatística adequada das leituras manuais e automatizadas de piezometria, é possível determinar se há diferenças estatisticamente significativas entre as leituras e avaliar a concordância entre as leituras. Essas informações podem ser úteis para avaliar a qualidade dos dados e tomar decisões informadas com base nessas informações.

2.6.7 RMSE

Segundo Efron (1982), a raiz quadrada do erro médio ou, *Root Mean Square Error* (RMSE) é uma medida estatística usada para avaliar a precisão de um modelo de previsão ou estimativa em relação aos dados reais, sendo calculado a partir da raiz quadrada da média dos quadrados dos erros de previsão. A raiz quadrada do erro médio é uma medida de precisão amplamente utilizada em áreas como estatística, engenharia e ciência de dados, pois permite comparar a qualidade de diferentes modelos em relação aos mesmos dados observados. Além disso, ele aponta que o RMSE é uma medida intuitiva, pois tem a mesma unidade de medida dos dados observados, o que facilita a interpretação dos resultados.

O cálculo da raiz quadrada do erro médio é uma medida útil e usual para comparar a precisão de diferentes modelos em relação aos mesmos dados, pois leva em consideração a magnitude dos erros. Um RMSE menor indica uma maior precisão do modelo em relação aos dados reais, quanto menor o RMSE, melhor o modelo.

A equação (2.1) calcula a raiz quadrada da média dos quadrados das diferenças entre os valores reais e os valores previstos pelo modelo. O resultado do RMSE é uma medida de erro que indica a diferença média entre as previsões e os valores reais.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2.1)$$

em que,

n é o número de observações nos dados (tamanho da amostra);

y_i é o valor da cota em metros da leitura manual;

\hat{y}_i é o valor da cota em metros da leitura automatizada;

\sum representa a soma de todos os termos.

2.6.8 Controle estatístico de processo (CEP)

Takahashi (2011) relata que o controle estatístico de processos e sua aplicação na melhoria da qualidade iniciaram-se em 1924, quando Walter A. Shewhart, da Bell Telephone Laboratories desenvolveu o conceito estatístico de gráfico de controle (cartas de controle).

A ideia principal do Controle Estatístico de Processo (CEP) definida por Samohyl (2009) é de que processos com menor variabilidade propiciam resultados com melhores níveis de qualidade e menores custos. O CEP, diferentemente de inspeções realizadas de forma individual, tem como objetivo a melhoria do processo como um todo (SAMOHYL, 2009). É uma ferramenta de monitoramento em tempo real do desempenho de processos e uma técnica estatística amplamente utilizada para monitorar a variabilidade do processo ao longo do tempo.

A variabilidade, no entanto, é inerente ao processo, um processo que esteja operando apenas com causa aleatória de variação é considerado sob controle estatístico. O problema está, então, em processos que apresentam causas atribuíveis de variabilidade, este caso representa um nível inaceitável de desempenho e o processo é considerado fora de controle (MONTGOMERY, 2009). A ferramenta mais utilizada e importante na área de CEP, devido a facilidade de visualização, é o Gráfico de Controle. Esta ferramenta pode ser utilizada em processos que possuem variáveis ou atributos a serem controlados e possui uma conexão com um teste de hipótese que busca saber se o processo está em estado de controle estatístico ou não (MONTGOMERY, 2009).

De acordo com Kourti e Macgregor (1995), o controle estatístico de processos tem como objetivo principal realizar o monitoramento do desempenho de um processo ao longo de um horizonte de tempo e verificar sua performance quando a seu estado de controle. Para existir o estado de controle uma determinada variável do processo deve permanecer próxima de seu valor esperado.

O processo é controlado efetuando-se medições da variável de interesse em pontos espaçados no tempo e registrando-se o resultado dessas medições em cartas de controle. A cada medição, compara-se o resultado obtido com limites de controle que representam o padrão esperado de operação do processo. Resultados de medições das variáveis de interesse (pontos na carta) fora dos limites de controle indicam a presença de causas especiais (atípicas) atuando no processo. Uma vez identificadas as causas especiais, pode-se atuar sobre elas, melhorando continuamente a qualidade do produto ou no caso, do serviço de execução. O principal objetivo do CEP é possibilitar o controle em tempo real, feito pelo próprio operador e desta forma aumentar o seu comprometimento com a qualidade do que está sendo produzido, liberando a gerência para tarefas de melhoria.

Campos (1992) afirma que processo pode ser definido como um conjunto de causas que provoca um ou mais efeitos e que manter estes procedimentos e técnicas sob controle é saber localizar o problema, analisar o processo para identificar as causas fundamentais dos problemas, padronizar para prender as causas fundamentais, e estabelecer itens de controle para que o problema nunca mais ocorra. Para Juran (2009), processo é uma série sistemática de ações direcionadas para a consecução de uma meta. Segundo Paladini (1990), processo é qualquer conjunto de condições, circunstâncias ou causas que, agindo juntas, geram um resultado.

Segundo Shewhart (1924) todo e qualquer processo por mais bem projetado e mais controlado que seja, possui em sua variabilidade um componente impossível de ser eliminado, trata-se de uma variabilidade natural, que é fruto de uma série de causas chamadas aleatórias. Diante desse fato é preciso definir-se que faixa de variação é considerada aceitável para cada processo. Esta ocorrência de causas naturais no processo é considerada inevitável, e por isso sua eliminação é considerada inviável do ponto de vista físico e econômico.

Os processos devem ser permanentemente monitorados, de forma a detectar a presença de causas especiais. Uma vez identificada a presença de causas especiais, deve-se investigar o motivo para poder intervir no processo de forma a eliminar tal variabilidade. Baseado nisso, o controle estatístico de processo mostra-se como uma importante ferramenta de monitoramento, onde a ideia principal do controle estatístico é evitar defeitos, atuando de forma preventiva, combatendo o desperdício antes de sua ocorrência.

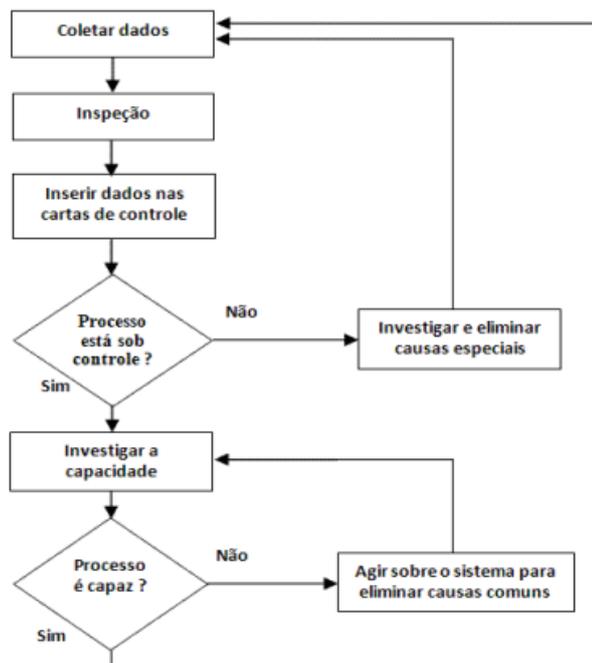
Na visão de Shewhart (1993), um fenômeno (processo) será controlado quando, através de experiências passadas podemos prever, dentro dos limites, como o processo pode variar ao longo do tempo. Pode-se afirmar, pelo menos aproximadamente, que a probabilidade do fenômeno observado caia dentro dos limites de dados (limites de controle).

Segundo Pawlicki et. al. (2005) todo processo para garantia da qualidade revela erros aleatórios e sistemáticos, que geralmente consistem em muitos pequenos erros aleatórios e um número muito pequeno de erros grandes que costumam dominar os resultados. Quando se consegue separar esses tipos de erros, permite-se que a fonte possa ser identificada de forma eficiente e tratada adequadamente.

Na visão de Benneyan (2010), em seu nível mais básico, o controle estatístico da qualidade é fundamentado na análise gráfica e estatística do processo para possibilitar a compreensão, o monitoramento e melhora do desempenho do processo em seu objetivo principal. A utilização de cartas de controle tem como principais vantagens a fácil elaboração, interpretação e a possibilidade de observar os dados de em forma gráfica simples para monitorar o comportamento dos dados ao longo do tempo.

Com a aplicação do controle estatístico se tem um conjunto de ferramentas para acompanhar e monitorar as características de qualidade e o comportamento do processo. Criando-se um ambiente propício para verificar instabilidades durante a execução e para tomar ações corretivas de retomada ao estado de controle. Ribeiro e Caten (1998) afirmam que os resultados estatísticos dão partida para a tarefa de análise, mas a explicação do que está acontecendo reside no próprio processo. A FIGURA 2.27 permite identificar as etapas na operacionalização do controle estatístico de processos.

FIGURA 2.27 Etapas na operacionalização do controle estatístico de processos



Fonte: Adaptado de Ribeiro e Caten (1998).

No caso da comparação da variabilidade entre leituras manuais e automatizadas da instrumentação geotécnica, o CEP pode ser utilizado para monitorar e comparar a variabilidade dos dados coletados por ambos os métodos. Para isso, é necessário coletar os dados de ambas as leituras (manual e automatizada) e plotá-los em uma carta de controle.

A carta de controle é uma ferramenta gráfica que permite monitorar a variação dos dados coletados ao longo do tempo. Ela consiste em um gráfico com duas linhas horizontais chamadas de limites superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC), que são calculados a partir dos dados coletados. A área entre as linhas representa o intervalo de variação esperado dos dados. Se os dados caírem dentro dessa área, o processo é considerado sob controle. Caso contrário, há evidências de que a variabilidade está fora do esperado e é necessário investigar as causas desse desvio.

Ao plotar os dados coletados manualmente e automaticamente na mesma carta de controle, é possível comparar a variabilidade dos dois métodos. Se a variabilidade dos dados coletados manualmente for maior que a variabilidade dos dados coletados automaticamente, isso pode indicar que a leitura manual apresenta mais erros e imprecisões do que a leitura automatizada. No entanto, é importante lembrar que a análise estatística por si só não é suficiente para identificar a causa raiz da variação. Por isso, outras técnicas de análise, como análise de causa raiz, podem ser necessárias para identificar e corrigir as causas subjacentes da variação.

2.6.8.1 Distribuição normal padrão

A função gaussiana, também chamada função normal de erros, é muito utilizada para descrever erros experimentais. Verifica-se experimentalmente que, em geral, os erros seguem uma distribuição gaussiana com boa aproximação (VUOLO, 1996). A importância da distribuição normal na teoria dos erros é explicada pelo teorema do limite central. O teorema do limite central é um conceito estatístico importante que estabelece que a média amostral de uma população tende a seguir uma distribuição normal, independentemente da distribuição da população original, desde que o tamanho da amostra seja grande o suficiente. Esse teorema é utilizado em diversas áreas da estatística, incluindo em gráficos de controle para monitorar processos. (MONTGOMERY et al. 2016).

A distribuição normal é caracterizada pela sua média (μ) e desvio padrão (σ) e é uma distribuição de probabilidade contínua amplamente utilizada em estatística. Quando se fala em 95% de confiança em relação à distribuição normal, refere-se ao intervalo de confiança de 95%, que é um intervalo estimado de valores que tem uma probabilidade de 95% de conter o

verdadeiro valor de uma população. O teorema do limite central é utilizado para justificar o uso da distribuição normal na análise de dados amostrais.

Quando trabalhamos com gráficos de controle, é comum utilizar uma distribuição normal com 95% de confiança para estabelecer os limites de controle (LSC e LIC). Isso significa que, se os dados estiverem dentro dos limites de controle, podemos concluir que o processo está sob controle estatístico.

2.6.8.2 Gráficos de controle

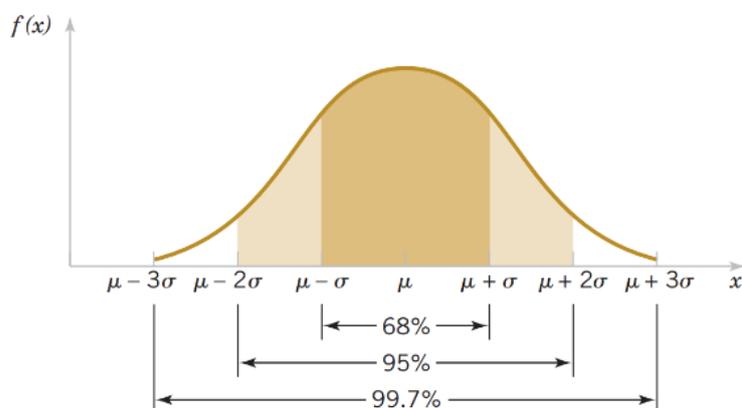
Os gráficos de controle são uma ferramenta útil e amplamente utilizada em diferentes setores da indústria para identificar problemas em processos e tomar ações preventivas ou corretivas antes que eles causem problemas mais sérios. Para uma distribuição normal de 95% de confiança, pode-se utilizar o gráfico de controle de médias (X-Bar) e o gráfico de controle de amplitude (R). (MONTGOMERY, 2012).

A melhor maneira para se avaliar uma sequência de dados é graficamente, pois eles permitem analisar e interpretar informações de forma mais organizada e simples. Segundo

Para Montgomery (2009) os gráficos de controles são utilizados para identificar e medir as variações que ocorrem durante o processo, apresentando limite central, limite inferior e limite superior, onde é possível verificar a normalidade dos processos, e caso necessário, aplicar melhorias. Para determinar os limites inferior e superior do intervalo de dados que representa a variável aleatória pode ser feita a partir de regras que se baseiam na distribuição normal (USACE, 2006).

A FIGURA 2.28 mostra uma função de densidade de probabilidade normal, com a porcentagem de área abaixo da curva para o valor médio, mais ou menos um desvio padrão (variação de 2σ), mais ou menos dois desvios padrão (variação de 4σ), e mais ou menos três desvios padrão (variação de 6σ). Para o último caso, ou seja, mais ou menos três desvios padrão, 99,7% de todos os valores possíveis da variável aleatória estão incluídos neste intervalo. Similamente, considerando mais ou menos dois desvios padrão, este valor passa a ser 95,5%. Finalmente, considerando mais ou menos um desvio padrão, 68,3% de todos os valores possíveis estão dentro deste intervalo.

FIGURA 2.28 Probabilidades associadas com uma distribuição normal



Fonte: Adaptado de Montgomery, (2009).

Para Samohyl (2009) a melhor forma de supervisionar a variabilidade de um processo é através dos gráficos de controles, pois contribuem no controle da qualidade e na garantia da conformidade das características do produto ou serviço. Se utilizados da forma correta, esta ferramenta age imediatamente, o que possibilita detectar a mudança no processo rapidamente. Os gráficos de controle são ferramentas fundamentais para a avaliação do grau de controle estatístico do processo, devido ao fato de que é possível determinar se as variações que ocorrem são devidas a causas assinaláveis ou a causas aleatórias.

O controle simultâneo de variáveis correlacionadas é necessário pois, muitas vezes, as variáveis parecem estar sob controle estatístico quando analisadas separadamente, mas, na verdade, o sistema poderá estar fora de controle (JACKSON, 1956).

A aplicação de ferramentas da qualidade é hoje uma das principais maneiras para analisar e acompanhar a qualidade dos produtos e serviços. Dentre elas, destaca-se o gráfico de controle, por ser capaz de identificar as variabilidades nas características, devendo estas serem as menores possíveis. Permite identificar variações que ocorrem naturalmente no processo e distinguir essas variações das variações que podem indicar um problema ou falha no processo. (TOLEDO, 1987).

O gráfico de controle possui uma Linha Central (LC) ou Linha Média (LM) que representa o valor médio de determinada característica quando o processo está controlado ou o valor alvo. Esta linha é cercada por outras duas determinadas em função da variabilidade natural do processo, chamadas Limite Superior de Controle (LSC) e Limite Inferior de Controle (LIC). As médias amostrais ou valor alvo de uma variável é monitorado através do gráfico \bar{X} .

(MONTGOMERY, 2009). Alguns resultados úteis relativos à distribuição normal são sumarizados na FIGURA 2.28. Para qualquer variável aleatória normal, tem-se as equações:

$$P(\mu - \sigma < X < \mu + \sigma) = 0,6827 \quad (2.2)$$

$$P(\mu - 2\sigma < X < \mu + 2\sigma) = 0,9545 \quad (2.3)$$

$$P(\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma) = 0,9973 \quad (2.4)$$

Para a construção do gráfico da média (gráfico \bar{X}) e a determinação de seus limites de controle para um intervalo de confiança de 95%, tem-se as Equações. (2.5), (2.6) e (2.7).

$$LSC = \bar{X} + 2. \sigma \quad (2.5)$$

$$LM = \bar{X} \quad (2.6)$$

$$LIC = \bar{X} - 2. \sigma \quad (2.7)$$

Em que, LSC é o limite superior de controle, LM é a linha média, \bar{X} é a posição central da distribuição (média) e σ é a dispersão da distribuição (desvio padrão). Na gestão de qualidade, os limites aceitáveis no processo são utilizados para determinar se um processo está operando dentro dos limites esperados ou se há desvios significativos que requerem ações corretivas. Existem diferentes tipos de limites aceitáveis no processo, incluindo:

- Limite Superior de Controle (LSC): é o limite superior do gráfico de controle que representa o limite máximo aceitável para o processo. Quando os dados ultrapassam este limite, é um indicativo de que o processo está fora de controle e requer ação corretiva.
- Limite Inferior de Controle (LIC): é o limite inferior do gráfico de controle que representa o limite mínimo aceitável para o processo. Quando os dados ficam abaixo deste limite, é um indicativo de que o processo está fora de controle e requer ação corretiva.
- Limite Superior de Especificação (LSE): é o limite máximo definido pelos requisitos do cliente ou especificações técnicas para um processo ou produto. Se

os dados do processo ultrapassarem este limite, o produto pode ser considerado fora de especificação e pode ser rejeitado.

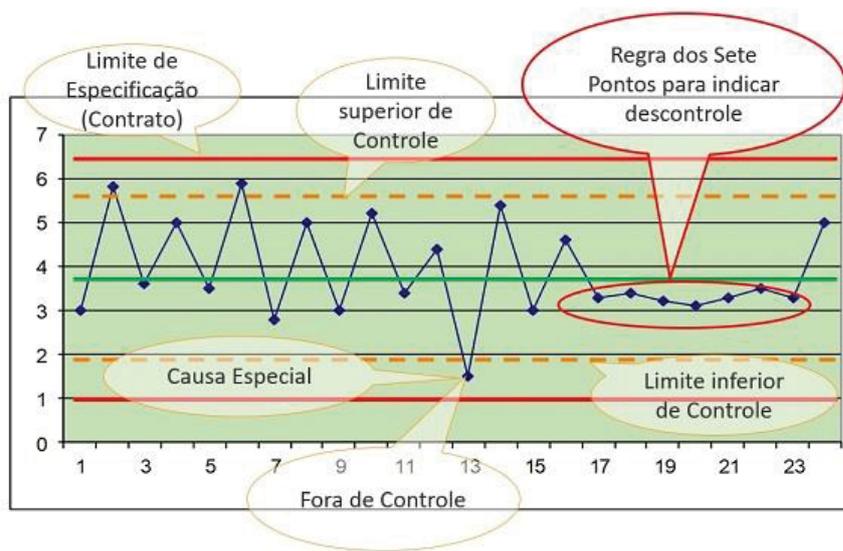
- Limite Inferior de Especificação (LIE): é o limite mínimo definido pelos requisitos do cliente ou especificações técnicas para um processo ou produto. Se os dados do processo ficarem abaixo deste limite, o produto pode ser considerado fora de especificação e pode ser rejeitado.
- Limite de Tolerância: é o intervalo entre o limite superior e inferior de especificação, representando a faixa aceitável de variação no processo ou produto.

Para Marshall (2006), os dados do processo que estão dentro desses limites (LSC e LIC), torna o processo estatisticamente sobre controle (estável), ou seja, a variação está dentro do esperado e que as flutuações são consistentes e inerentes ao processo. Por outro lado, dados fora desses limites caracterizam ocorrências indesejáveis (causas especiais), merecendo, conseqüentemente, análise pormenorizada.

É importante ressaltar que os limites aceitáveis no processo podem variar dependendo do tipo de processo. Além disso, os limites podem ser estabelecidos com base em critérios estatísticos ou técnicos, considerando as necessidades do cliente e as especificidades do processo. O Gráfico de controle ilustra como um processo se comporta ao longo do tempo, representando graficamente a interação de variáveis para determinar se estão dentro dos limites aceitáveis e quando um processo está dentro dos limites aceitáveis, ele não precisa ser ajustado, mas quando está fora, ele deve ser ajustado.

Os limites dos gráficos são determinados com base na média e no desvio padrão da variável quando o processo está isento de causas especiais. A média deve coincidir com o valor alvo do processo. Os limites de controle são definidos de forma que se todos os pontos estão sob controle, então os pontos traçados no gráfico estarão abaixo do limite superior de controle e acima do limite inferior, ou seja, variando entorno da média. Estes limites são também conhecidos como limites naturais do processo. Uma vez definidos os limites de controle, os dados continuam sendo coletados e são plotados na carta de controle. Um processo é considerado fora de controle quando um ponto de dados excede um limite de controle, ou se sete pontos consecutivos estiverem acima ou abaixo da média. Pode existir também um limite de especificação que fica após os limites de controle. Normalmente, usado quando existe um nível de serviço acordado com o cliente final. Esta é a tarefa do dia a dia (monitoramento). A FIGURA 2.29 ilustra os limites de controle, limite de especificação e um exemplo da regra dos setes pontos.

FIGURA 2.29 Exemplo de uma carta de controle



Fonte: Montes (2020).

Os autores Pylo (2008) e Guarnieri (2010) ressaltam que os limites de controle estatísticos não podem ser confundidos com especificações ou tolerâncias de projeto, esses limites refletem as variações aleatórias do processo impostas pelas chamadas causas comuns de variação, enquanto as especificações ou tolerâncias referem-se a cálculos determinadas na concepção do projeto.

Os limites de controle superior e inferior de refletem a variabilidade inerente do processo, resultante da incidência de causas comuns de variabilidade. Os limites de controle são calculados de tal forma que, na ausência de causas especiais atuando sobre o processo, a probabilidade de um ponto qualquer ultrapassar os limites de controle seja inferior a 1% (geralmente 0,27%). Assim, pontos fora dos limites de controle representam um forte indício da presença de causas especiais (SOUZA, 2002).

O cálculo dos limites de controle de uma carta de controle para variáveis pode ser feito após coleta de 20 amostras ou mais, sem que o processo gerador das amostras apresente indícios de uma situação anormal ou fora de controle. Assim, coletados os dados, calculam-se os limites de controle para a média e amplitude, e comparam-se essas mesmas amostras com os limites de controle programados para o processo. Havendo pontos fora dos limites de controle devem ser retirados das amostras e recalculados os limites de controle, esses pontos são desconsiderados somente para fins de cálculo dos limites, permanecendo no gráfico de controle para registro histórico do processo produtivo (KONRATH, 2002).

A leitura correta de gráficos de controle fornece elementos do atual estado do processo em estudo. A ausência de controle é, na prática, o que mais se observa, sendo caracterizado pelos seguintes critérios (Soares, Farias e Cesar, 1991):

- Há pontos fora do limite de controle. Limite superior de controle Limite inferior de controle.
- Há mais de sete pontos que caracterizam uma tendência, crescente ou decrescente.
- Há clara periodicidade.

Essas são regras empíricas e todos os critérios descritos podem ser utilizados como noção de sequência, satisfazendo uma determinada característica (SOARES et al., 1991).

Para criar um gráfico de controle para comparar a variabilidade das leituras manuais e automatizadas dos piezômetros, pode-se seguir os seguintes passos:

- Coletar um conjunto de dados de leituras manuais e automatizadas dos piezômetros. É importante que as leituras sejam feitas em intervalos de tempo semelhantes, para que a comparação seja válida.
- Calcular a média das leituras manuais e a média das leituras automatizadas separadamente.
- Calcular o desvio-padrão das leituras manuais e o desvio-padrão das leituras automatizadas separadamente.
- Plotar os dados em um gráfico de controle. Em um eixo, coloca-se a média das leituras e, no outro eixo, coloca-se o desvio-padrão das leituras.
- Desenhar uma linha central que representa a média das leituras manuais e a média das leituras automatizadas.
- Desenhar as linhas de controle superior e inferior (LCS e LCI) a uma distância de ± 3 desvios-padrão da linha central.
- Plotar os dados de leitura manual e automática no gráfico.

Estipulados os Limites de Controle, torna-se possível avaliar um processo como fora de controle ou não. De maneira geral, define-se que o processo saiu de controle quando uma nova observação possui um valor superior ao LSC ou inferior ao LIC (MONTGOMERY, 2009).

Quando um valor extrapola os limites de controle calculados (LSC ou LIC) é necessário investigar possíveis motivos para que isto tenha ocorrido. No entanto, é importante perceber

que nem sempre será encontrada uma causa atribuível àquela observação, ou seja, o valor observado pode ser fruto da variação aleatória inerente ao processo (SAMOHYL, 2009).

Montgomery (2009) comenta, ainda, a possibilidade de ajuste de Gráficos de Controle à modelos de Séries Temporais. Nessa situação, caso a série temporal trabalhada seja estacionária, ou seja, uma série livre de tendência e sazonalidade, é possível ajustar o gráfico de controle diretamente a série histórica dos dados, caso contrário, o gráfico de controle deve ser ajustado aos resíduos gerados pelo modelo selecionado (MONTGOMERY; JOHNSON, 1976).

O resultado será um gráfico que permite comparar a variabilidade das leituras manuais e automatizadas dos piezômetros. Se os dados de leitura manual e automática estiverem dentro dos limites de controle, o processo estará sob controle e a variação será considerada normal. Caso contrário, se os dados estiverem fora dos limites de controle, indica que a variação está fora do esperado e é necessário investigar as causas desse desvio.

2.6.8.3 Carta da diferença absoluta do processo

A carta da diferença absoluta do processo, também conhecida como carta MA (do inglês *Mean Absolute*), é um tipo de gráfico de controle utilizado para monitorar a variação absoluta de um processo.

Helene e Cervi (1997) apresentam a carta da diferença absoluta do processo (carta MA) como uma ferramenta de controle estatístico de processos (CEP) utilizada para monitorar a variação média absoluta dos dados de um processo. A carta MA é construída a partir de medições da diferença absoluta entre as observações e uma linha de referência central, geralmente a média do processo. Essas diferenças são então plotadas em um gráfico de controle, onde os limites de controle são determinados a partir dos desvios padrão das diferenças absolutas. Os autores enfatizam que a carta MA é uma ferramenta útil para detectar mudanças na variabilidade de um processo e identificar potenciais problemas de qualidade e podem ser combinadas com outras ferramentas CEP, como a carta \bar{X} e a carta R, para fornecer uma visão mais completa do desempenho do processo.

A construção da carta MA segue os mesmos passos básicos de outros gráficos de controle. Primeiro, coleta-se um conjunto de dados para o processo e determina-se um valor-alvo. Em seguida, calcula-se a diferença absoluta entre cada ponto de dados e o valor-alvo. A linha central da carta MA é então traçada na média dessas diferenças absolutas, e limites de controle superior e inferior são estabelecidos com base em limites estatísticos. Como em outros gráficos de controle, os dados são plotados ao longo do tempo para avaliar a estabilidade do processo.

O objetivo da carta MA é detectar variações que não são facilmente identificadas em gráficos de controle tradicionais. Por exemplo, um processo pode ter uma média estável, mas ainda pode apresentar variação significativa em termos de diferença absoluta em relação ao valor-alvo. Ao monitorar a variação absoluta, a carta MA pode ajudar a identificar essas variações e permitir que os operadores façam ajustes no processo para melhorar a qualidade e a eficiência.

2.6.9 Análise qualitativa, validação e correção de dados

Toda e qualquer medição incorpora erros de natureza aleatória e sistemática (JCGM, 2008b). Os erros aleatórios traduzem-se por um intervalo de oscilação de valores (in ex.: repetibilidade ou dispersão) e os sistemáticos exprimem-se pela diferença entre o valor obtido e o valor da grandeza a medir (in ex.: exatidão ou desvio). Os primeiros podem ser conhecidos, mas não são passíveis de correção. Os segundos podem ser corrigidos, mas nem sempre é possível proceder à identificação e quantificação deles.

A análise qualitativa de dados piezométricos faz-se com recurso a indicadores estatísticos que se obtêm a partir da redundância de leituras. Estes indicadores são balizados em função do erro típico de cada instrumento. Os procedimentos de validação que se apresentam neste capítulo devem integrar-se nas rotinas de processamento de dados com o objetivo de:

- Estimar a fiabilidade dos resultados e verificar o desempenho dos instrumentos;
- Detectar a presença de erros sistemáticos e quantificar a sua magnitude;
- Proceder à correção dos erros sistemáticos identificados, conforme viável e necessário;

Em sistemas de instrumentação, os erros aleatórios derivam essencialmente da repetibilidade dos sensores e os erros sistemáticos resultam de diversos fatores, tais como:

- Qualidade e estado de conservação da instalação dos piezômetros;
- Operação e manutenção dos sensores e equipamentos de coleta e transmissão de dados;
- Fatores externos;
- Histerese, desvio na origem.

3 PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA DE QA/QC PARA INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS AUTOMATIZADOS

Com base na revisão bibliográfica, este capítulo apresenta uma metodologia de Garantia de Qualidade (QA) e Controle de Qualidade (QC) destinada à instalação de instrumentação geotécnica automatizada. Essa metodologia engloba uma série de etapas com o propósito de assegurar a precisão e confiabilidade dos dados obtidos no estudo, tanto no monitoramento manual quanto no automatizado dos piezômetros.

A instalação e automação de instrumentos é uma parte crítica do monitoramento geotécnico e é importante garantir que seja realizada corretamente. A aplicação de ferramentas de controle de qualidade é essencial para garantir que os dados coletados sejam precisos e confiáveis.

3.1 QA PARA A ETAPA DE INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS AUTOMATIZADOS

No contexto da automação de instrumentos geotécnicos, o processo de QA tem como objetivo garantir que o sistema de automação seja projetado, implementado e operado de acordo com os padrões e requisitos de qualidade estabelecidos. O processo de QA da automação de instrumentos geotécnicos deverá incluir as seguintes atividades:

- **Definição de requisitos do projeto:** Os requisitos do projeto devem ser claramente definidos, documentados e validados pelos clientes e stakeholders. Os requisitos devem incluir as especificações técnicas, os prazos, o orçamento, os padrões de qualidade e os critérios de aceitação.
- **Planejamento de qualidade:** O plano de qualidade deve definir as atividades e os recursos necessários para garantir a qualidade do projeto. O plano deve incluir a definição de padrões de qualidade, os procedimentos de teste, a documentação de qualidade, a gestão de riscos e a avaliação da qualidade.
- **Projeto:** O projeto da automação de instrumentos geotécnicos deve ser realizado de acordo com as especificações e padrões definidos. Deve ser realizado um teste de aceitação de requisitos para garantir que o projeto atenda aos requisitos estabelecidos.
- **Implementação:** A implementação da automação de instrumentos geotécnicos deve seguir os padrões de qualidade definidos no plano de qualidade. Os

procedimentos de teste e documentação de qualidade devem ser seguidos para garantir que o sistema seja implementado corretamente.

- **Teste:** O sistema deve ser testado para garantir que atenda aos requisitos de qualidade estabelecidos. Devem ser realizados testes funcionais, de desempenho e de segurança para garantir a eficácia do sistema.
- **Avaliação de qualidade:** A avaliação de qualidade deve ser realizada em todas as etapas do processo de automação de instrumentos geotécnicos. A avaliação deve incluir a revisão da documentação, a revisão do projeto, a revisão da implementação e os testes de aceitação.
- **Capacitação dos profissionais envolvidos no processo:** é fundamental para garantir a qualidade do trabalho e evitar erros que possam comprometer os resultados. A capacitação deve ser contínua, com atualização constante dos conhecimentos e treinamento em novas técnicas e tecnologias que possam surgir. Além disso, é importante que os profissionais tenham oportunidades de compartilhar experiências e aprendizados, promovendo assim a melhoria contínua do processo.
- **Melhoria contínua:** A melhoria contínua é um processo fundamental na automação de instrumentos geotécnicos. A avaliação da qualidade deve identificar as áreas de melhoria e definir as ações necessárias para melhorar o desempenho e a qualidade do sistema.

Ao seguir essa metodologia, é possível que a instalação e automação dos piezômetros seja realizada com qualidade e precisão, e que os resultados do monitoramento geotécnico sejam confiáveis e precisos. O programa da qualidade se refere aos procedimentos, técnicas e ferramentas com o objetivo de assegurar que os serviços sejam entregues conforme as expectativas, desde o surgimento da especificação técnica até o armazenamento dos dados.

A matriz RASCI é uma ferramenta de gestão de projetos e processos que ajuda a definir as responsabilidades e envolvimento de cada membro da equipe em cada etapa do processo. Ela é dividida em cinco colunas:

- Responsável (R): pessoa que é responsável pela execução da atividade.
- Aprovador (A): pessoa que deve aprovar o resultado da atividade.
- Suporte (S): pessoa que auxilia na execução da atividade.
- Consultado (C): pessoa que é consultada durante a atividade.

- Informado (I): pessoa que precisa ser informada sobre o andamento da atividade.

Conforme mostra na FIGURA 3.1 o exemplo de uma matriz RASCI, cada etapa do processo ou atividade é listada em linhas na matriz e, para cada coluna, é designado um membro da equipe com o papel correspondente. A matriz ajuda a garantir que todas as tarefas sejam executadas de maneira eficiente, que cada membro da equipe esteja ciente de suas responsabilidades e que haja uma clara comunicação entre os membros da equipe.

FIGURA 3.1 Exemplo de uma matriz RASCI

RASCI Matriz		Papéis e Responsabilidades														
[Título/Nome do projeto]		Responsável, <u>A</u> provador, <u>S</u> uporte, <u>C</u> onsultado, <u>I</u> nformado														
Processos ou Atividades	Status	PAPÉIS					Área 1			Área 2			Área 3			
		Projetista	Consultor	Geotécnico (responsável)	CMG	Analista da qualidade de	Gerente/Fiscal de Projeto	Líder Técnico	Empresa de Instrumentação	Fiscal de projeto	Nome ou Função	Topografia	Técnico de Campo	Nome ou Função	Nome ou Função	Nome ou Função
Fase 1 / Atividade																
Emitir a especificação técnica		R		A								I				
Definir as coordenadas de projeto		R		I								I	I			
Monitoramento manual																
Fase 2 / Atividade																
Projeto detalhado		R		A	C	I										
Teste de vida dos instrumentos			C		A		I		R							
Fase 3 / Atividade																
Site Survey						I			R							
Crosscheck em campo									R				I			
Fase 4 / Atividade																
Seleção e aquisição dos instrumentos				A	C											
Seleção e aquisição do sistema de aquisição e transmissão dos dados				A	C											
Fase 5 / Atividade																
Teste de bancada									R							
Instalação dos sensores e dataloggers									R							
Aplicar Check list da leitura manual x automatizada				A					R							
Configuração do sistema									R							
Coleta de dados									R							
Fase 5 / Atividade																
Operação Assistida									R							
Monitoramento e análise dos dados			A		R											
Emissão de relatório <i>As built</i>									R							
Manutenção preventiva, preditiva e corretiva													R			

R Responsável	Responsável por realizar a tarefa ou projeto.
A Aprovador	Quem irá validar a atividade e o recebimento do trabalho. Somente um por tarefa.
S Suporte	Auxilia o responsável pela tarefa ou projeto.
C Consultado	Profissional a ser consultado antes da tomada de decisão.
I Informado	Deve ser informado após a decisão tomada.

Fonte: Autora (2023).

Como existem várias atividades envolvidas na automação de piezômetros e visando detalhar o procedimento, a FIGURA 3.2 apresenta o fluxo das principais etapas do processo de automação de piezômetros Casagrande, sendo detalhado na sequência um descritivo para cada uma destas etapas e na sequência consta um descritivo de cada etapa.

FIGURA 3.2 Principais etapas do processo de automação de piezômetros Casagrande



Fonte: Autora (2023).

3.1.1 Projeto detalhado e especificações técnicas da instrumentação

O projeto detalhado e as especificações técnicas dos diversos elementos constituintes dos instrumentos são partes fundamentais para a garantia da qualidade dos dados da instrumentação. Estes detalhamentos e especificações são, em muitos projetos, negligenciados e apresentados de forma genérica em textos curtos e seções típicas também genéricas. Esta falha de projeto proporciona a instalação de um instrumento que irá gerar um dado, na maioria das vezes, diferente do qual se pretende analisar para avaliação da performance e da segurança das estruturas geotécnicas.

Antes da instalação dos sensores de corda vibrante nos piezômetros Casagrande, é importante planejar cuidadosamente e verificar toda a documentação existente, tais como:

- Planta de locação e identificação dos instrumentos;
- Detalhe da instalação do instrumento "As built" contendo informações sobre:
 - Cotas e coordenadas;
 - Profundidade do instrumento (metros);
 - Diâmetro nominal do tubo;
- Especificação técnica do sensor contendo modelo, diâmetro, comprimento de cabo, range e detalhe do posicionamento do sensor dentro do instrumento;

- Série histórica das leituras manuais com informações listadas abaixo:
 - Identificação do instrumento;
 - Data e Horário da leitura;
 - Nome do técnico;
 - Condições Climáticas;
 - Anomalias observadas;
 - Número de série do PIO e certificado de calibração;
 - Leitura da pressão barométrica no momento da coleta dos dados.
- Programa de monitoramento.

Essas informações devem ser disponibilizadas pela equipe técnica responsável pela estrutura e usadas pelos profissionais que executarão a atividade para orientar a instalação.

3.1.2 Teste de vida (Ensaio de Permeabilidade in situ)

O teste de vida em piezômetros é uma verificação periódica da funcionalidade e precisão dos piezômetros instalados, ou mesmo para obtenção de parâmetros hidrodinâmicos, como a condutividade hidráulica dos materiais do entorno da célula drenante do instrumento, cujos resultados são interpretados para a determinação do coeficiente de permeabilidade do meio (maciço, fundação, drenagem interna etc., no caso de uma barragem de rejeitos). Se um piezômetro falhar na integridade e/ou no teste de vida, pode ser necessário realizar manutenção ou substituição do piezômetro para garantir que os dados coletados sejam precisos e confiáveis.

Do ponto de vista hidro-geotécnico tais ensaios podem ser classificados conforme o modo de realização (ensaios a nível constante ou a nível variável) e o diferencial de pressão aplicado ao aquífero, positivo (carga) ou negativo (descarga). Deve-se considerar que os ensaios realizados nas porções não saturadas dos solos (acima do lençol freático) admitem, obviamente, apenas a realização por injeção de água (ensaios de carga). Dada a maior simplicidade de execução, a escolha do tipo de ensaio frequentemente recai nos ensaios de carga (infiltração ou rebaixamento). A TABELA 3.1 a seguir apresenta a classificação proposta.

TABELA 3.1 – Classificação dos ensaios de teste de vida

Maneira de realização	Pressão aplicada	Denominação dos ensaios	Método de prospecção
Nível constante	carga	infiltração	sondagens, poços e cavas
	descarga	bombeamento	poços e sondagens
Nível variável	carga	rebaixamento	sondagens e poços
	descarga	recuperação	poços e sondagens

Fonte: ABGE (2013).

Antes da instalação, os instrumentos devem ser inspecionados cuidadosamente para verificar as suas condições físicas, como a profundidade real, presença de obstruções ao longo do tubo e problemas construtivos visíveis no seu entorno. Os resultados dos ensaios devem ser processados e analisados, permitindo ao especialista determinar as condições de funcionamento do instrumento. Esses resultados podem ser utilizados como um parâmetro para a validação ou não dos dados e, se necessário, indicar a necessidade de substituição ou de manutenção do instrumento.

É uma atividade que deve ser incorporada como boas práticas nas rotinas de monitoramento dessas estruturas, uma vez que auxiliam na validação dos dados gerados pelas instrumentações. A FIGURA 3.3 mostra o ensaio de rebaixamento sendo realizado com o objetivo de medir a permeabilidade do solo.

FIGURA 3.3 Ensaio de rebaixamento



Fonte: Autora (2022).

3.1.3 Site survey e crosscheck em campo

O *site survey* é um levantamento técnico em campo que envolve o uso de tecnologias automatizadas para coletar informações e dados geotécnicos. Durante o *site survey*, são avaliados fatores que podem afetar a qualidade do sinal de rádio frequência (RF), como a presença de obstáculos, interferência de outras fontes de RF, o alcance do sinal e a eficácia das antenas de transmissão e recepção. Esse tipo de levantamento é útil para avaliar a viabilidade e os requisitos de automação em projetos geotécnicos.

Nesta etapa também são verificadas e validadas as informações de projeto e das especificações com o que está instalado em campo (*crosscheck*) a fim de evitar erros e retrabalho durante a etapa de instalação e monitoramento conforme mostra a FIGURA 3.4. O *crosscheck* é uma verificação detalhada do ambiente e da localidade onde o instrumento está instalado bem como a sua condição operacional. É uma etapa importante a ser realizada antes de implementar uma automação. Durante o *crosscheck* em campo podem ser verificadas as seguintes informações:

- Durante a inspeção em campo verificar se os instrumentos estão identificados conforme planta de locação;
- Observar se o instrumento precisa de limpeza ou manutenção antes do início do processo de automação;
- Com uso de um GPS manual verificar se os instrumentos estão locados corretamente conforme planta de locação;
- Com o uso de uma trena calibrada confirmar a profundidade do instrumento, cota de topo e de fundo e diâmetro nominal do tubo do piezômetro Casagrande;
- Com o uso de um pio elétrico calibrado confirmar se a leitura do nível d'água (NA) está coerente com o histórico do monitoramento manual.

FIGURA 3.4 Verificações em campo dos piezômetros



Fonte: Autora (2022).

A implantação de um checklist pode ser uma ferramenta útil para garantir a qualidade do processo de controle de qualidade (QA) na instalação e automação de instrumentação geotécnica. Caso as informações do projeto não correspondam às informações em campo, recomenda-se informar o projetista ou engenheiro responsável sobre as discrepâncias entre os dados do projeto e os dados de campo e discutir possíveis soluções para corrigir ou ajustar o projeto. Também recomenda-se confirmar que as informações coletadas em campo estejam corretas e precisas, verificando se os equipamentos estão calibrados e que os dados foram registrados com precisão com apoio de um outro profissional com experiência comprovada para essa validação. É importante agir rapidamente e tomar medidas para corrigir quaisquer discrepâncias encontradas para garantir a segurança e a eficácia do projeto geotécnico. Lembrando que o checklist deve ser adaptado às necessidades específicas do projeto e pode ser modificado ao longo do tempo para se adequar às mudanças nas especificações e requisitos do projeto. A FIGURA 3.5 apresenta um exemplo de checklist que pode ser utilizado nessa etapa:

FIGURA 3.5 Crosscheck em campo dos piezômetros

Checklist - crosscheck em campo - automação dos piezômetros					
Dados do Projeto					
Obra - Código					
Data de verificação					
Município - UF					
Estrutura					
Calibração dos sensores/instrumentos/ equipamentos			Verificação em campo	Obs:	
Nome/Tipo	Pio elétrico				
Marca/ Modelo					
Número de série					
Calibração	Calibrado		✓		
Nome/Tipo	Trena				
Marca/ Modelo					
Número de série					
Calibração	Não Calibrado		✗	Enviar para calibração / bloqueado para uso	
Nome/Tipo	Barômetro				
Marca/ Modelo					
Número de série					
Calibração	Calibrado		✓		
Cotas e Coordenadas			Verificação em campo	Obs:	
Coordenada E (UTM SIRGAS2000)	Informação recebida		✓		
Coordenada N (UTM SIRGAS2000)	Informação recebida		✓		
Cota de topo do tubo de PVC (m)	Informação pendente		✗	Aguardando informação	
Informações sobre cada instrumento			Verificação em campo	Obs:	
Identificação/ nome dos instrumentos	Informação recebida		✓		
Comprimento do tubo de PVC (m)	Informação recebida		✗	Verificar informação	
Diâmetro nominal do tubo (mm)	Informação pendente		✗	Aguardando informação	
Última leitura do N.A (Cota em m)	Informação recebida		✓		
Dados do Piezômetro de Corda Vibrante			Verificação em campo	Obs:	
Fabricante	Informação recebida		✓		
Modelo	Informação recebida		✓		
Range (kPa)	Informação pendente		✗	Aguardando informação	
Comprimento do cabo (m)	Informação recebida		✓		
Teste de Vida dos instrumentos			Verificação em campo	Obs:	
Teste de vida	Realizado		✓		
Dados do Datalogger Local			Verificação em campo	Obs:	
Fabricante	Informação recebida		✓		
Modelo	Informação recebida		✓		
Dados do Protetor de Antissurto			Verificação em campo	Obs:	
Fabricante	Informação recebida		✓		
Modelo	Informação recebida		✓		
Notas					
Calibração	Cotas e Coordenadas	Informações sobre cada instrumento	Dados do Piezômetro de Corda Vibrante	Teste de Vida dos instrumentos	Status
Calibrado	Informação recebida	Informação recebida	Informação recebida	Realizado	✓
Não Calibrado	Informação pendente	Informação pendente	Informação pendente	Pendente	✗

Fonte: Autora (2022).

3.1.4 Seleção e aquisição de sensores e dataloggers

A seleção e aquisição dos sensores e *dataloggers* são processos importantes em qualquer projeto de monitoramento, pois garantem a coleta de dados precisos e confiáveis para análises e tomadas de decisão. Deve ser levado em consideração as especificações técnicas, o

tipo de medição a ser realizada, a precisão e exatidão necessárias para os dados, bem como as condições ambientais em que os sensores e *dataloggers* serão instalados e operados.

A escolha do tipo de sensor será o que melhor atende às necessidades do projeto com base nas especificações técnicas, como modelo, faixa de medição, precisão, resolução, exatidão, sensibilidade, temperatura de operação, diâmetro, comprimento de cabo do sensor etc. É importante escolher o sensor certo para as condições específicas do local onde o piezômetro será instalado. O diâmetro do sensor precisa ser compatível com o diâmetro do tubo do piezômetro Casagrande considerando uma folga técnica aproximada de 30% do diâmetro nominal do tubo. O comprimento de cabo deve ser compatível com a profundidade do instrumento informada em projeto e mais a distância do instrumento até o *datalogger* permitindo mobilidade do cabo do sensor durante a instalação e inspeção e a correta conexão do cabo no *datalogger*.

O *datalogger* é responsável por coletar as leituras do sensor e armazená-las para análise posterior. É importante escolher um *datalogger* compatível com os sensores escolhidos e que permita a integração dos dados com outros sistemas e softwares de análise. O *datalogger* também deve ter recursos de armazenamento, comunicação e alimentação que atendam às necessidades do projeto.

3.1.5 Teste de bancada

Previamente à instalação é importante que se realize um teste de funcionamento e calibração do sensor de corda vibrante e do sistema de aquisição, armazenamento e transmissão de dados para garantir que eles estejam funcionando corretamente.

O teste em bancada mostrado na FIGURA 3.6 é um processo de validação realizado em um ambiente de escritório ou oficina, onde é possível avaliar o desempenho, calibração e a funcionalidade dos sensores e equipamentos simulando condições reais de uso. Isso permite que sejam identificados possíveis problemas e defeitos no produto, possibilitando correções, substituições em garantia e melhorias antes de serem instalados. Isso pode incluir a verificação de cabos, sensores e outras partes dos instrumentos.

FIGURA 3.6 Exemplo de teste de bancada



Fonte: Autora (2022).

Para os piezômetros de corda vibrante trata-se de um processo de validação das leituras de pressão registradas em um *datalogger* ou unidade leitora portátil (FIGURA 3.7) e comparadas com as leituras de referência do certificado de calibração emitido pelo fabricante.

Para isso, o sensor é conectado à unidade leitora, após aguardar alguns instantes para o equilíbrio térmico com o meio e registrando-se a leitura com o sensor ao ar, segurando-o pelo cabo. Deve-se registrar também a pressão barométrica com barômetro manual (FIGURA 3.8). A calibração deve ser realizada de acordo com as especificações do fabricante e deve ser verificada regularmente. Essa leitura deve ser comparada com a leitura zero de fábrica, conforme indicado em vermelho no certificado de calibração do piezômetro apresentado na FIGURA 3.9.

FIGURA 3.7 Exemplo de equipamento utilizado para aquisição manual dos dados



Fonte: Autora (2022).

FIGURA 3.8 Exemplo de barômetro



Fonte: Autora (2022).

FIGURA 3.9 Exemplo de certificado de calibração

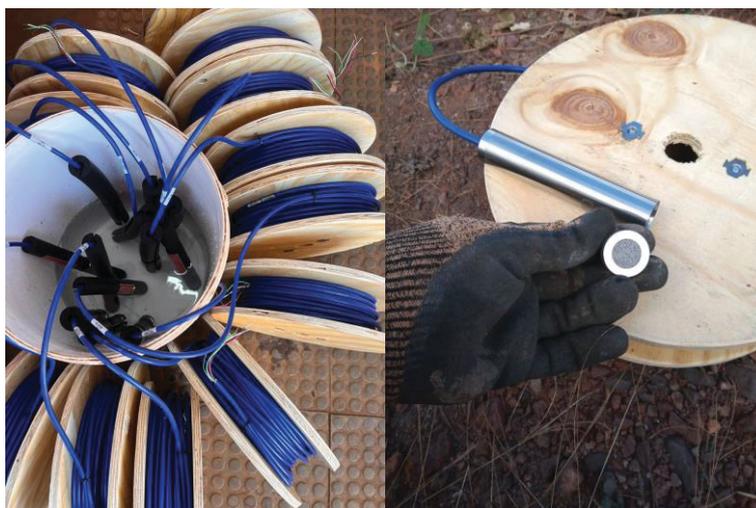
GEOKON.							
Vibrating Wire Pressure Transducer Calibration Report							
Model Number: <u>4500C-700 kPa</u>				Date of Calibration: <u>November 22, 2019</u>			
Serial Number: <u>1941556</u>				Temperature: <u>22.68 °C</u>			
Calibration Instruction: <u>CI-Pressure Transducer 7 kPa-1 MPa</u>				Barometric Pressure: <u>980.4 mbar</u>			
Cable Length: <u>48 meters</u>				Technician: <u>[Signature]</u>			
Applied Pressure (kPa)	Gauge Reading 1st Cycle	Gauge Reading 2nd Cycle	Average Gauge Reading	Calculated Pressure (Linear)	Error Linear (%FS)	Calculated Pressure (Polynomial)	Error Polynomial (%FS)
0.0	8364	8364	8364	0.547	0.06	0.028	0.00
140.0	7500	7599	7600	139.9	-0.02	140.0	0.00
280.0	6833	6833	6833	279.6	-0.06	280.0	0.00
420.0	6064	6064	6064	419.7	-0.04	420.1	0.02
560.0	5295	5295	5295	559.9	-0.02	560.0	-0.01
700.0	4523	4523	4523	700.6	0.08	700.1	0.05
(kPa) Linear Gauge Factor (G): <u>-0.1823 (kPa/digit)</u>							
Polynomial Gauge factors: A: <u>-2.537E-07</u> B: <u>-0.1790</u> C: _____							
Thermal Factor (K): <u>0.2362 (kPa/°C)</u>							
Calculate C by setting P=0 and R ₁ = initial field zero reading into the polynomial equation							
(psi) Linear Gauge Factor (G): <u>-0.02643 (psi/digit)</u>							
Polynomial Gauge Factors: A: <u>-3.68E-08</u> B: <u>-0.02596</u> C: _____							
Thermal Factor (K): <u>0.03426 (psi/°C)</u>							
Calculate C by setting P=0 and R ₁ = initial field zero reading into the polynomial equation							
Calculated Pressures: Linear, $P = G(R_1 - R_0) + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0) \cdot P$							
Polynomial, $P = AR_1^2 + BR_1 + C + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0) \cdot P$							
*Barometric pressures expressed in kPa or psi. Barometric compensation is not required with wired transducers.							
Factory Zero Reading: <u>8355</u> Temperature: <u>21.1 °C</u> Barometer: <u>987.2 mbar</u>							
<small>The above instrument was found to be in accordance to all operating ranges. The above stated instrument has been successfully compared with standards traceable to the NIST in compliance with 40CFR 21.011</small>							
<small>This report shall not be reproduced except in full without written permission of Geokon</small>							

Fonte: Geokon (2019).

O procedimento de saturação da pedra porosa do piezômetro de corda vibrante deve ser realizado com cuidado, para evitar a introdução de bolhas de ar que possam afetar a precisão

das medições. É necessário submergir a pedra em água limpa e deixá-la lá por um período suficiente para que a água penetre em todos os espaços vazios da pedra (FIGURA 3.10). Esse período pode variar dependendo da porosidade da pedra e da temperatura da água, mas geralmente leva algumas horas. É importante ter cuidado para não danificar o sensor durante esse processo e verificar se a leitura do sensor está estável antes de fazer medições precisas.

FIGURA 3.10 Exemplo de equipamento utilizado para aquisição manual dos dados



Fonte: Autora (2022).

No caso dos *dataloggers* os testes são realizados de acordo com orientações do fabricante, identificando falhas na coleta e transmissão dos dados, intervalo dos registros e armazenamento de dados, configurações e nível da carga da bateria. Essas informações são utilizadas para corrigir possíveis problemas ou falhas no dispositivo e garantir que ele possa fornecer dados precisos e confiáveis em campo.

3.1.6 Instalação do piezômetro de corda vibrante

A instalação adequada do sensor, de acordo com as especificações do fabricante e com as boas práticas é essencial para garantir a qualidade dos dados. O sensor deve ser instalado no local adequado dentro do tubo piezométrico até a profundidade especificada, para que possa medir a pressão da água com precisão. A instalação do sensor geralmente é feita manualmente por um profissional especializado.

Para a correta instalação dos sensores e *dataloggers* na estrutura é preciso saber a localização exata da instalação com informações das cotas e coordenadas e os detalhes de instalação dos instrumentos devem ser fornecidos e complementados com desenhos de plantas,

seções transversais e cortes. Devem também ser indicadas, para cada um dos instrumentos, a respectiva leitura inicial, valores de referência para futuras medições, dados e requisitos para calibração, faixas normais de operação e níveis de alarme, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária.

Existem diferentes modelos de sensores de corda vibrante no mercado, portanto, é importante escolher um sensor que seja compatível com o diâmetro do tubo do instrumento. Dentre as orientações para a instalação dos sensores e *dataloggers*, algumas são:

- Antes de instalar o sensor, certifique-se de que o piezômetro esteja limpo e livre de detritos ou sujeira que possam afetar a leitura do sensor.
- O sensor de corda vibrante deve ser fixado no interior do piezômetro, em uma posição que permita a medição precisa da variação de pressão. No cabo do sensor marque a profundidade de instalação com fita isolante. Introduza o sensor no tubo. Fixe o cabo no topo do tubo com abraçadeira plástica (conforme FIGURAS 3.11 e 3.12). Siga as instruções específicas do fabricante e do projetista para garantir que o sensor seja instalado corretamente.
- O sensor deve ser conectado ao sistema de aquisição de dados, aguardando a estabilização para registrar a leitura. Registre a leitura do sensor e da pressão barométrica e faça nova leitura com o pio elétrico.

FIGURA 3.11 Marcação do comprimento do instrumento no cabo do sensor



Fonte: Autora (2022).

FIGURA 3.12 Marcação do comprimento do instrumento no cabo do sensor



Fonte: Autora (2022).

3.1.7 Instalação do *datalogger*

Este dispositivo tem por finalidade receber, armazenar os dados de campo. Com a interligação dos sensores a este equipamento, é possível realizar a programação para registro contínuo das leituras dos piezômetros podendo reduzir a necessidade de coleta periódica manual dos instrumentos. A instalação do dispositivo pode ser feita diretamente no tubo metálico de proteção do instrumento, em suportes ou caixas de proteção contra interferências externas, vandalismo ou intempéries.

Certifique-se de que o *datalogger* esteja conectado a uma fonte de energia confiável, como uma bateria de lítio, solar ou uma fonte de energia elétrica. Importante verificar se as conexões estão firmes e seguras e que não haja interferência ou ruído na leitura dos dados. Nas FIGURA 3.13 estão representados respectivamente:

- 1- Painel de material não-metálico
- 2- *Datalogger* local
- 3- Cabo do sensor de corda vibrante
- 4 - Antena – transmissão de dados 900Mhz
- 5 - Conexão mini USB
- 6 - Chave da bateria
- 7- Conexão dos fios do sensor
- 8 - Bateria de lítio

FIGURA 3.13 *Datalogger local wireless*

Fonte: Autora (2022).

3.1.8 Instalação do gateway

O *gateway* é um dispositivo que concentra, converte e armazena os dados da automação dos *dataloggers* locais, permitindo que sejam controlados remotamente a partir de um único ponto de controle através de um canal de comunicação Ethernet ou *WiFi*, por exemplo. A instalação geralmente é em um poste com altura que permita a visada direta para os *dataloggers* locais (FIGURA 3.14). A alimentação é feita por sistema fotovoltaico ou fonte de energia elétrica estabilizada.

FIGURA 3.14 Instalação do concentrador de dados (*gateway*)

Fonte: Autora (2022).

3.1.9 Configuração do sistema de aquisição de dados

A configuração do sistema de aquisição de dados geotécnicos automatizados é uma etapa importante no processo de automação da instrumentação geotécnica. Essa configuração deve ser realizada de forma cuidadosa e seguindo as especificações técnicas do projeto, para garantir a qualidade e confiabilidade dos dados obtidos pelos instrumentos.

Os sistemas de aquisição e transmissão de dados devem ser configurados para coletar e transmitir os dados de forma automática e em intervalos regulares. É importante garantir que os sistemas estejam configurados para transmitir os dados em tempo real, de forma que os técnicos possam monitorar a estabilidade da estrutura e tomar as medidas necessárias em caso de problemas.

As leituras dos sensores de corda vibrante são convertidas em unidades de engenharia por meio de coeficientes de calibração de fábrica. Após a configuração do sistema de aquisição de dados, é recomendado realizar testes de validação para verificar se os dados estão sendo coletados e transmitidos corretamente. Esses testes podem incluir a comparação das leituras obtidas pelos sensores com as leituras manuais realizadas por técnicos.

3.1.10 Coleta dos dados e leitura de verificação em campo

Os dados de instrumentação devem ser coletados por pessoal treinado que possa reconhecer sinais de problemas e comunicá-los imediatamente ao responsável técnico pela estrutura para outras ações. Os dados coletados devem ser devidamente tabulados para registro do histórico ou para ação imediata, se necessário (ADAMO et. al 2020).

A verificação das leituras manuais *versus* automatizadas é uma etapa importante para avaliar a qualidade e confiabilidade dos dados obtidos pelos instrumentos geotécnicos. A verificação é realizada no momento da instalação do sensor e na etapa de configuração. Também pode ser realizada de forma periódica, comparando as leituras manuais obtidas por técnicos com as leituras automatizadas registradas pelo sistema.

A comparação entre as leituras manuais e automatizadas permite a identificação de possíveis erros ou inconsistências nos dados obtidos, como desvios, valores discrepantes ou falhas de comunicação entre os sensores e o sistema de aquisição de dados. Além disso, a comparação também pode permitir a verificação da calibração e precisão dos sensores, bem como a identificação de possíveis problemas na instalação ou manutenção dos equipamentos.

A verificação das leituras manuais *versus* automatizadas pode ser realizada de forma visual, por meio da comparação gráfica dos dados, ou por meio de ferramentas estatísticas que permitem a análise dos valores obtidos. É importante que essa verificação seja realizada de forma sistemática e constante, permitindo a identificação precoce de eventuais problemas ou inconsistências nos dados.

É importante ressaltar que as leituras manuais devem ser realizadas de forma rigorosa e seguindo os procedimentos definidos no projeto, para garantir a comparação precisa com as leituras automatizadas. Além disso, é recomendado que as leituras manuais sejam realizadas por técnicos capacitados e experientes em geotecnia, que possam identificar possíveis erros ou inconsistências nos dados.

Em resumo, a verificação das leituras manuais *versus* automatizadas é uma etapa importante para avaliar a qualidade e confiabilidade dos dados obtidos pelos instrumentos geotécnicos, contribuindo para a segurança e estabilidade da obra geotécnica. A verificação sistemática e constante das leituras permite a identificação precoce de eventuais problemas ou inconsistências nos dados, permitindo a tomada de ações preventivas ou corretivas.

Os dados coletados devem ser armazenados de maneira adequada para garantir que estejam disponíveis para análise e interpretação futuras. Os dados devem ser documentados e mantidos em um local seguro e protegido.

3.1.11 Operação assistida

A operação assistida após a automação dos instrumentos geotécnicos consiste em uma assistência técnica especializada para garantir a correta operação dos instrumentos e a qualidade dos dados obtidos. Essa assistência técnica pode ser realizada de forma remota ou presencial, dependendo das necessidades do projeto e das condições locais.

A operação assistida pode envolver atividades como a verificação da qualidade dos dados obtidos pelos instrumentos, a identificação e solução de problemas técnicos ou de conexão, o ajuste e configuração dos equipamentos, a calibração dos sensores e a capacitação de operadores para utilização dos equipamentos.

A operação assistida é importante para garantir a correta operação dos instrumentos geotécnicos, bem como a qualidade e confiabilidade dos dados obtidos. É comum que ocorram situações de mau funcionamento dos equipamentos ou de erros na aquisição ou transmissão dos dados, o que pode levar a resultados imprecisos ou inconsistentes.

A assistência técnica especializada, por meio da operação assistida, permite a identificação rápida desses problemas e a tomada de ações corretivas ou preventivas, minimizando os impactos e riscos para a obra. Além disso, a operação assistida também pode contribuir para a capacitação de operadores e técnicos locais, melhorando a operação e manutenção dos equipamentos a longo prazo.

Em resumo, a operação assistida após a automação dos instrumentos geotécnicos é uma importante etapa para garantir a correta operação dos equipamentos e a qualidade dos dados obtidos, contribuindo para a segurança e estabilidade da obra geotécnica.

3.1.12 Monitoramento e análise dos dados

O monitoramento dos dados após a automação dos piezômetros é essencial para garantir a precisão das medições e identificar anomalias ou comportamentos atípicos nos parâmetros geotécnicos monitorados. Este pode ser realizado de forma manual ou automatizada, onde no caso da automação, é possível utilizar software especializado que permite o monitoramento em tempo real dos dados, com alertas para situações de risco ou fora do padrão.

É importante que os dados sejam analisados por profissionais capacitados e experientes em geotecnia, que possam interpretar os resultados e identificar eventuais problemas ou riscos. A análise dos dados deve ser realizada de forma constante e sistemática, permitindo a identificação precoce de mudanças significativas nos parâmetros monitorados. Além disso, é

importante que os dados monitorados sejam comparados com dados históricos e com as expectativas definidas no projeto, permitindo a avaliação da evolução dos parâmetros e a identificação de tendências. A análise de tendências pode ser útil para a identificação de possíveis problemas ou riscos em potencial.

O monitoramento dos dados após a automação dos piezômetros é uma atividade crítica para garantir a segurança e estabilidade de obras geotécnicas. A análise constante e sistemática dos dados permite a identificação precoce de possíveis problemas ou mudanças significativas nos parâmetros monitorados, permitindo a tomada de ações preventivas ou corretivas.

Em relação aos procedimentos necessários para análise dos dados da instrumentação o aspecto básico e mais importante é a transmissão correta dos dados coletados e sua análise imediata por especialistas familiarizados com o projeto, construção e funcionamento da barragem. Este procedimento permite que a instrumentação cumpra com sua finalidade de diagnosticar precocemente eventuais problemas e possibilita ao projetista a implementação de medidas corretivas em tempo hábil.

No entanto, esta análise "imediate", também chamada de "preliminar", só é possível quando são feitas previsões das magnitudes de variações nas leituras, de forma que o pessoal responsável pelas leituras dos instrumentos possa distinguir, entre os valores coletados, aqueles que indiquem a necessidade de uma análise imediata. Os dados da instrumentação devem ser analisados também sob duas óticas: em função do tempo, para identificar mudanças de tendências, e dentro do contexto do comportamento esperado em relação ao projeto (CASTRO, 2008).

Salienta-se que a avaliação da segurança da barragem não deverá ser efetuada apenas com base nos resultados fornecidos pela instrumentação e modelos de comportamento, mas igualmente levando em conta o conjunto das características da barragem e suas fundações, as inspeções visuais, e apoiando-se sobre conhecimentos e experiências adquiridas em outros empreendimentos.

Os manuais de operação e as especificações técnicas de projeto deverão ser considerados na avaliação de possíveis tendências negativas. O comportamento dos dados deve ser observado e analisado periodicamente para determinar se os parâmetros estão alinhados com os de projeto e para detectar comportamentos e condições que possam indicar a necessidade de alguma ação corretiva (ADAMO et. al., 2020).

3.1.13 Emissão de relatório técnico

A emissão de relatório técnico e a documentação do "*as built*" da instalação da instrumentação geotécnica e do sistema de aquisição e transmissão dos dados são etapas essenciais para garantir a qualidade e confiabilidade dos dados obtidos durante a instrumentação. Esse relatório deve conter informações precisas sobre a instalação, operação e manutenção dos instrumentos, além de informações como a localização, profundidade, modelo do sensor utilizado, range e número de série. Sempre que houver alterações na instrumentação ou quando ocorrerem reparos ou manutenção nos equipamentos esse documento precisa ser atualizado.

A disponibilização dessas informações aos envolvidos no projeto, como engenheiros e gestores, permite a tomada de decisão com base em dados confiáveis e precisos, contribuindo para a segurança e sucesso da automação da instrumentação.

3.1.14 Manutenção dos instrumentos de monitoramento

A manutenção dos instrumentos que integram os sistemas de monitoramento instalados nas barragens é de grande importância para garantir a confiabilidade das leituras. Para assegurar o bom funcionamento dos instrumentos, a manutenção deve ser feita de forma sistemática pelos técnicos da equipe de segurança da barragem, ou empresa especializada, no caso de trabalhos de especial especificidade ou complexidade. Os procedimentos de manutenção dos instrumentos utilizados no monitoramento do comportamento da barragem devem ser devidamente documentados e arquivados no registro de operação, bem como a reparação, substituição e instalação de novos instrumentos.

A manutenção deve garantir que os instrumentos estejam operando corretamente, independentemente da frequência das leituras e avaliada nas inspeções de segurança regulares e nas revisões periódicas de segurança. Tal inclui a realização de manutenção regular no sensor e no sistema de aquisição de dados, a análise dos dados coletados e a resolução de quaisquer problemas que possam surgir. A limpeza ao redor dos instrumentos, dos sensores, painéis e do sistema fotovoltaico, a verificação das conexões, troca da bateria e a substituição de peças desgastadas também são manutenções necessárias para a perfeita operação do sistema.

É importante realizar a manutenção preventiva, preditiva e corretiva da instrumentação para garantir o funcionamento adequado e a precisão das medições. A seguir, são indicados alguns pontos importantes para cada tipo de manutenção:

- Manutenção preventiva:
 - Realizar inspeções periódicas para verificar se todos os sensores e instrumentos estão funcionando adequadamente;
 - Verificar as condições dos cabos de conexão e dos terminais, realizando trocas se necessário;
 - Fazer a limpeza dos sensores e dos equipamentos, removendo sujeiras e detritos que possam interferir nas medições;
 - Verificar a condição das baterias, realizando trocas quando necessário;
 - Atualizar o software de aquisição de dados, caso exista atualização disponível.

- Manutenção preditiva:
 - Monitorar os dados de medição em tempo real e compará-los com os dados históricos, para identificar possíveis anomalias e falhas;
 - Realizar calibrações periódicas dos sensores, para garantir a precisão das medições.

- Manutenção corretiva:
 - Identificar a causa da falha e realizar a reparação ou substituição dos componentes danificados;
 - Testar a instrumentação após a manutenção corretiva para garantir que os problemas foram resolvidos.

É importante seguir as recomendações do fabricante da instrumentação geotécnica automatizada em relação à manutenção preventiva, preditiva e corretiva. Dessa forma, é possível garantir que a instrumentação está funcionando adequadamente e que as medições são precisas e confiáveis. Além disso, a manutenção adequada prolonga a vida útil da instrumentação e minimiza o tempo de inatividade.

3.2 QC PARA A ETAPA DE INSTALAÇÃO DE PIEZÔMETROS AUTOMATIZADOS

O processo de automação de piezômetros envolve a utilização de sensores e *data-loggers* para monitorar e controlar processos geotécnicos, como mudanças de nível do lençol freático. A implantação do Controle de Qualidade (QC) na automação de instrumentação

geotécnica envolve a aplicação de procedimentos e metodologias específicas para garantir que as medições obtidas sejam precisas e confiáveis. A partir dessas diretrizes, são aplicados métodos de verificação em campo com controle de qualidade (QC) e possível garantia de qualidade (QA). Esses métodos integrados servem os seguintes propósitos:

- Correlação entre leitura manual *versus* automatizada;
- Verificar se o processo de instalação é adequado;
- Criar limites do processo.

Para implantar um Controle de Qualidade (QC) na automação de instrumentação geotécnica, é necessário seguir algumas etapas:

- Definir objetivos de qualidade: É importante definir objetivos claros de qualidade para o processo de automação de instrumentação geotécnica. Isso pode incluir metas de precisão das medições, frequência de monitoramento e prazos para verificação e validação dos dados.
- Identificar pontos críticos: É necessário identificar os pontos críticos do processo de automação de instrumentação geotécnica, onde problemas podem afetar significativamente a qualidade dos resultados. Isso pode incluir a seleção e calibração dos instrumentos, instalação dos instrumentos, monitoramento e coleta de dados, verificação e validação dos dados, e manutenção e reparo dos instrumentos.
- Definir padrões e procedimentos: É importante estabelecer padrões e procedimentos claros para cada etapa do processo de automação de instrumentação geotécnica, que devem ser seguidos rigorosamente para garantir a qualidade dos resultados. Isso pode incluir especificações para a seleção e calibração dos instrumentos, procedimentos de instalação, protocolos de monitoramento e coleta de dados, procedimentos de verificação e validação dos dados, e planos de manutenção e reparo dos instrumentos.
- Selecionar e treinar equipe: É importante selecionar e treinar a equipe que será responsável pela automação de instrumentação geotécnica, garantindo que eles tenham as habilidades e conhecimentos necessários para seguir os padrões e procedimentos definidos e alcançar os objetivos de qualidade estabelecidos.
- Realizar auditorias internas: É necessário realizar auditorias internas regulares para avaliar o desempenho do processo de automação de instrumentação geotécnica em relação aos objetivos de qualidade estabelecidos. Isso pode incluir

avaliação da precisão das medições, revisão dos procedimentos seguidos, verificação da conformidade com os padrões estabelecidos, e identificação de oportunidades de melhoria.

- Monitorar feedback do proprietário do empreendimento: É importante monitorar o feedback do proprietário do empreendimento em relação aos resultados fornecidos pelo processo de automação de instrumentação geotécnica, para garantir que atendam às suas necessidades e expectativas em termos de qualidade. Isso pode incluir solicitação de feedback sobre a precisão e confiabilidade das medições, a frequência de monitoramento e a entrega dos resultados.

Ao implantar um controle de qualidade na automação de instrumentação geotécnica, é possível garantir que as medições sejam precisas, confiáveis e atendam aos requisitos de qualidade do projeto. Algumas das etapas de QC comuns no processo de automação de piezômetros são:

- Verificar se o pio elétrico, trenas, barômetros, e outros dispositivos, são calibrados regularmente para garantir que os dados coletados manualmente sejam precisos e confiáveis. A calibração deve ser realizada por profissionais experientes e deve seguir as diretrizes do fabricante.
- Verificar se o piezômetro está instalado corretamente e que as leituras estejam sendo coletadas nas posições adequadas.
- Verificar se as leituras dos instrumentos estão sendo coletadas e registradas corretamente para garantir a precisão e a confiabilidade. Isso pode envolver a comparação dos dados coletados com outros métodos de medição ou a realização de testes de verificação para garantir que as leituras sejam consistentes e precisas.

Para documentar todas as etapas do processo de automação de instrumentação geotécnica, incluindo a seleção de instrumentos, a calibração, a instalação, o monitoramento e a verificação de dados propõem-se a utilização de uma ficha de instalação que reúne informações necessárias para o processo de automação de piezômetros. Isso ajudará a garantir que o sistema seja mantido adequadamente e que quaisquer problemas possam ser solucionados de forma rápida e eficiente.

A ficha de instalação de sensor piezométrico proposta na FIGURA 3.15 é um documento utilizado para coletar informações sobre os dados observados e medidos em campo durante a automação. Essa ficha possui campos para registrar informações como data, localização, dados do instrumento, dados do sensor, dados do *datalogger*, cotas de referência e os dados

coletados durante a instalação como leitura zero, leitura de instalação e leituras de verificação. Ao preencher estas informações na ficha de instalação é possível calcular a diferença da leitura manual e automatizada no momento da instalação do piezômetro de corda vibrante e verificar se atende ou não o critério estabelecido como limite do processo.

FIGURA 3.15 Ficha de Instalação

Ficha de Instalação de Sensor Piezométrico de Corda Vibrante											
Dados do Projeto		As Built de Instalação do Piezômetro de Corda Vibrante									
Obra - Código											
Data de emissão da ficha											
Município - UF											
Estrutura											
Dados do Instrumento											
Identificação											
Coordenada E (UTM SIRGAS2000)											
Coordenada N (UTM SIRGAS2000)											
Diâmetro nominal do tubo (mm)											
Comprimento do tubo de PVC (m)											
Cota de topo do tubo de PVC (m)											
Dados do Piezômetro de Corda Vibrante											
Fabricante											
Modelo											
Número de Série											
Range (kPa)											
Comprimento do cabo (m)											
A											
B											
C											
G (kPa/Digit)											
K (kPa/°C)											
Dados do Datalogger Local											
Fabricante											
Modelo											
Número de série											
Dados do Protetor de Antissurto											
Fabricante											
Modelo											
Número de série											
Cotas do As Built											
Referência	Legenda	Cota (m)									
Topo da proteção metálica	A										
Topo do tubo de PVC	B										
Terreno	C										
Instalação do sensor	D										
Fundo do tubo de PVC	E										
Dados das Etapas da Instalação											
Leitura	Data	Hora	Automação				Manual			Diferença (m)	
			R (Digit)	T (°C)	S (kPa)	Carga Piez. (mca)	Cota Piez. (m)	Posição do N.A. em Relação ao Topo do Tubo de PVC (m)	Carga Piez. (mca)		Cota Piez. (m)
Teste de Bancada											
Zero											
Instalação											
Verificação											
Notas											
1 - R (Digit) e T (°C) é a leitura do sensor.											
2 - S (kPa) é a leitura da pressão atmosférica registrada com barômetro manual ou datalogger local.											
3 - A "Posição do N.A. em Relação ao Topo de Tubo de PVC" foi obtida com medidor elétrico de N.A. (pio).											
4 - Automação: Carga Piez. (mca) = $[AR^2 + BR1 + C + K(T1 - T0) - (S1 - S0)] / 9,80665$. Sendo: R0, T0 e S0 a leitura zero e R1, T1 e S1 leituras realizadas na sequência.											
5 - Automação: Cota Piez. (m) = Carga Piez. (mca) + Cota de Instalação do sensor (m).											
6 - Manual: Carga Piez. (mca) = Comprimento do Tubo de PVC (m) - Posição do N.A. em Relação ao Topo de Tubo de PVC (m) - Distância em metros do sensor até o fundo do tubo especificada pela projetista.											
7 - Manual: Cota Piez. (m) = Cota de Topo do Tubo de PVC (m) - Posição do N.A. em Relação ao Topo do Tubo de PVC (m) .											
8 - Teste de Bancada: Leitura de verificação da calibração de fábrica do piezômetro de corda vibrante.											
9 - Leitura de Zero: Leitura do sensor saturado ao ar.											
10 - Leitura de Instalação: Leitura do sensor logo após a instalação no tubo e leitura manual para comparação.											
11 - Leitura de Verificação: Leitura do sensor no mínimo 24h após a instalação no tubo e após a configuração no sistema de aquisição de dados e leitura manual para comparação.											
12 - Diferença (m) é a diferença entre Cotas Piez. (m) registradas pela automação e por meio de leitura manual.											
Registro Fotográfico da Instalação Concluída						Observações de Campo					
Registro da Configuração no Sistema de Aquisição de Dados											

Fonte: Autora (2023).

4 APLICAÇÃO DE QA/QC PROPOSTO À AUTOMAÇÃO DE PIEZOMETROS CASAGRANDE

Para o desenvolvimento deste trabalho e aplicação do método proposto no Capítulo 3, foi avaliada a variação e a dispersão dos registros entre as leituras manuais e automatizadas associados aos piezômetros Casagrande do Dique 2. A série histórica refere-se ao período de julho de 2017 a julho de 2022 para as leituras manuais e de julho de 2021 a junho de 2022 para as leituras automatizadas. Os dados foram fornecidos pela empresa Anglo American para fins acadêmicos.

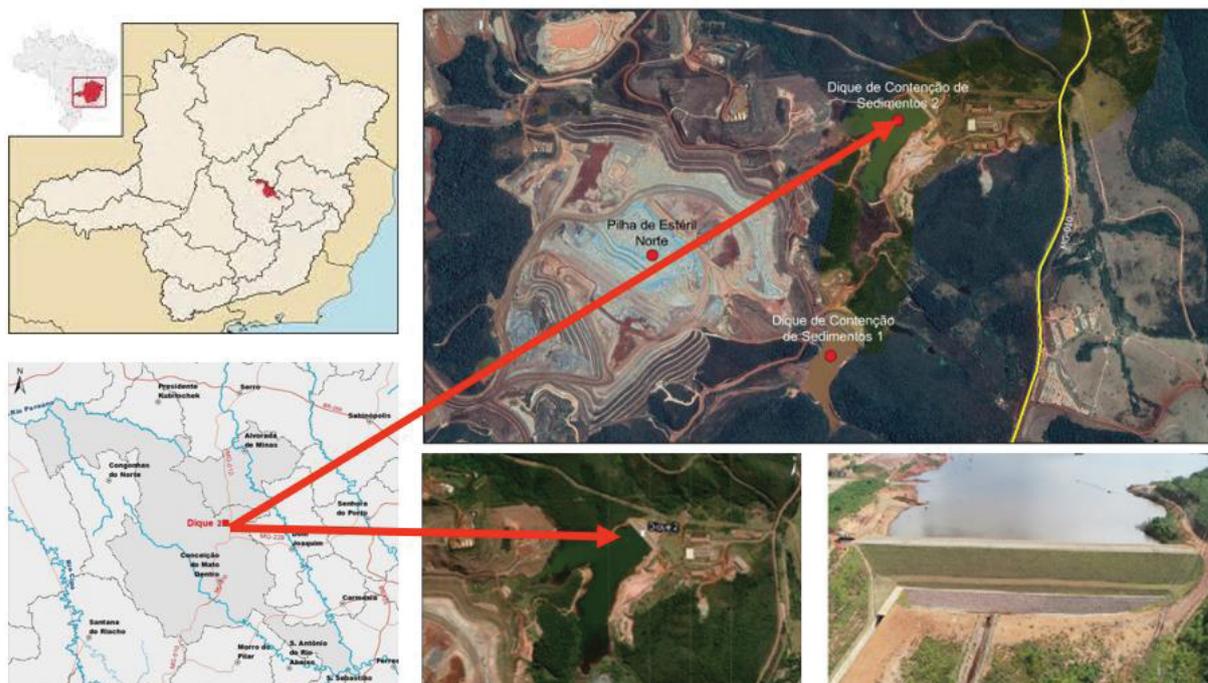
Os próximos itens descrevem esta estrutura, as características geológico-geotécnicas da região na qual a estrutura está inserida e uma análise do controle estatístico do processo.

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para a elaboração desta dissertação foi escolhida uma estrutura denominada Dique 2 que está em operação desde 2016, concebida com a finalidade de conter os sedimentos carreados da Pilha de Disposição de Estéril Norte (PDE Norte), bem como de sedimentos oriundos dos acessos e da voçoroca existente, no córrego Vargem Grande, a montante da rodovia MG-010, a jusante da PDE Norte e do Dique 1, a qual abrange parcialmente a área industrial da Mina do Sapo. Na caracterização da estrutura e no desenvolvimento da análise foram utilizadas diversas informações que constam em relatórios técnicos que não são públicos, mas que foram referenciados ao longo do texto.

A estrutura geotécnica do Dique 2, objeto deste estudo, está localizado em Minas Gerais (FIGURA 4.1,) dentro da área operacional do Sistema Minas-Rio, um empreendimento de mineração para a lavra de minério de ferro em Conceição do Mato Dentro.

FIGURA 4.1 Localização do Dique de Contenção de Sedimentos 2

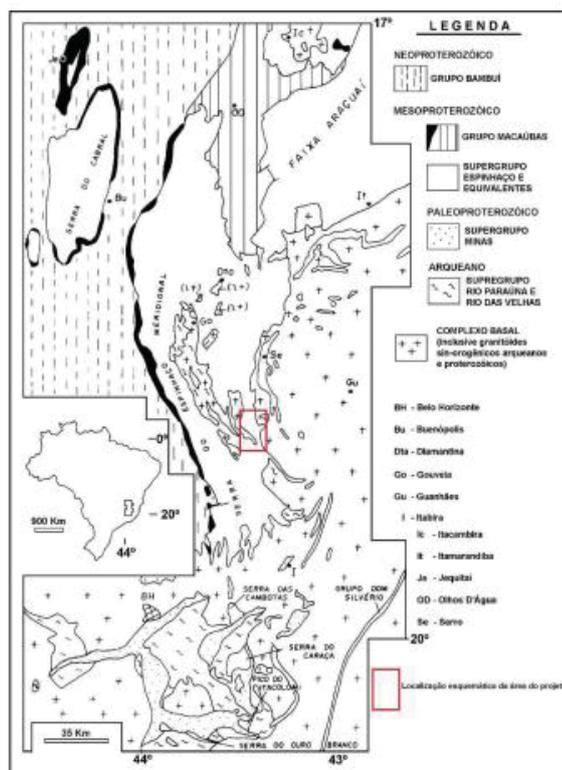


Fonte: Anglo American (2022).

4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Em termos de contextualização geológica regional, a área do Dique 2 está inserida na porção meridional da Faixa Orogênica Serra do Espinhaço (FIGURA 4.2). Na região do Dique 2 são reconhecidos quatro conjuntos lito-estratigráficos principais: Complexo Basal, o Supergrupo Espinhaço (Grupo Guinda e Grupo Serro), Grupo Serra da Serpentina e Unidade Metaígneia Conceição do Mato Dentro, sendo que a área onde está implantado o dique se encontra a leste dos itabiritos da formação Serra do Sapo (Grupo Serro) e inserida nos gnaisses pertencentes ao Complexo Basal.

FIGURA 4.2 Mapa Geológico regional com indicação da área de interesse



Fonte: Anglo American, (2022).

4.2.1 Investigações geotécnicas

Foram executadas investigações geotécnicas na área da fundação do Dique 2, bem como em potencial área de empréstimo para o material do maciço. As sondagens a trado identificaram predominantemente solo residual jovem e solo residual maduro e nas sondagens mistas foram identificadas as seguintes litogias: aluvião, colúvio, solo residual de gnaiss, saprolito de gnaiss e gnaiss.

4.2.2 Fundação

O solo de fundação em grande parte composta por solo residual ou saprolito, produto de alteração da rocha gnáissica existente na área, também podendo ocorrer localmente solos aluvionares. A maior parte do solo aluvionar foi removido, não indicando na fundação do dique a existência de solos inconsolidados.

4.3 CARACTERÍSTICA DA ESTRUTURA

Trata-se de um dique com maciço composto de solo compactado construído a partir de áreas de empréstimo localizadas próximas à área da obra, com filtro vertical conectado a um tapete drenante horizontal que deságua em um dreno de pé composto por enrocamento. O sistema de drenagem interna é composto por um filtro vertical de areia, com espessura de 1,0 m, conectado a um tapete drenante formado por uma camada central de brita 0, com espessura de 0,50 m, envelopada por camadas de areia de 0,30 m de espessura (FIGURA 4.3).

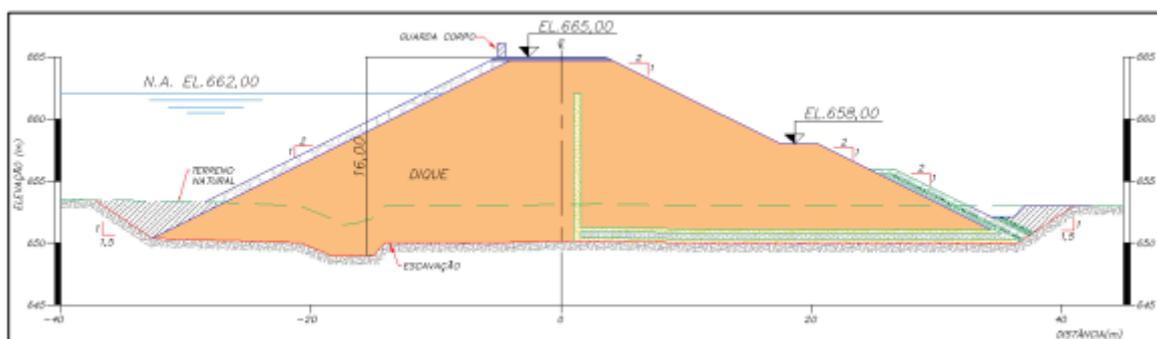
FIGURA 4.3 Detalhe do Dique de Contenção de Sedimentos 2



Fonte: Anglo American (2022).

O maciço do Dique 2 apresenta coroamento de crista na El. 665,0 m, largura de 8,5 m e comprimento de 204,0 m. O NA Máximo Normal na El. 662,00 m e pé do talude de jusante próximo à El.652,7 m, perfazendo uma altura máxima de 16,0 m. O dique possui berma intermediária na El. 658,0 m, no talude de jusante, com largura de aproximadamente 4 m. Os taludes de montante e jusante possuem inclinação de 1V:2H. (FIGURA 4.4).

FIGURA 4.4 Seção típica do Dique 2



Fonte: Anglo American (2022).

O levantamento topográfico primitivo realizado no reservatório, indica um volume total de 1.349.794 m³ entre a menor cota do fundo do reservatório (El. 651,00 m) e a cota da crista do maciço (El. 665,00 m). De acordo com a batimetria de maio de 2020, o volume livre operacional até a soleira do extravasor (El. 662,00 m) é de 541.657 m³. O sistema extravasor é composto por uma galeria de encosta localizada na ombreira direita com soleira na El. 662,00 m seguida de uma galeria de fundo e canal de superfície. O talude de jusante é protegido por vegetação, o talude de montante por uma camada de 40 cm de espessura de rip-rap entre a base e a crista (El. 665,00 m) e a crista é protegida por uma camada 30 cm de bica corrida. A TABELA 4.1 sumariza as principais características geométricas do Dique 2.

TABELA 4.1 Características geométricas do Dique 2

Informações Geométricas	Valor
El. da crista (m)	665,00
Comprimento da crista (m)	204,0
Largura da crista (m)	8,5
Altura máxima (m)	16,0
Largura da berma (m)	3,0
Altura entre bermas (m)	7,0
Inclinação do talude de montante	1V:2H
Inclinação entre bermas do talude de jusante	1V:2H
Volume do maciço (m ³)	75.588

Fonte: Anglo American (2022).

O sistema atual de drenagem interna da estrutura consiste em um filtro vertical de areia com 1,0 m de espessura, conectado a um tapete drenante. Na região central do maciço, correspondente ao fundo do talvegue (faixa de aproximadamente 100 m de extensão), o tapete é do tipo sanduíche, formado por uma camada de 50 cm de pedrisco envolvida por camada de 30 cm em areia. Na ombreira esquerda, o tapete drenante é composto por uma camada de 30 cm de pedrisco envolvido por camada de areia de 30 cm de espessura, sendo o tapete da ombreira esquerda conectado com o tapete central.

O sistema de drenagem superficial tem por função coletar as águas provenientes do escoamento superficial sobre o talude de jusante e crista do maciço e conduzi-las ordenadamente até o ponto deságue no terreno natural, evitando assim processos erosivos. A drenagem superficial do Dique de Contenção de Sedimentos 2 é constituída por canais de drenagens periféricas, com o intuito de coletar os escoamentos superficiais das bermas até as descidas de água e/ou canais de descarga. As águas coletadas das ombreiras são direcionadas para o

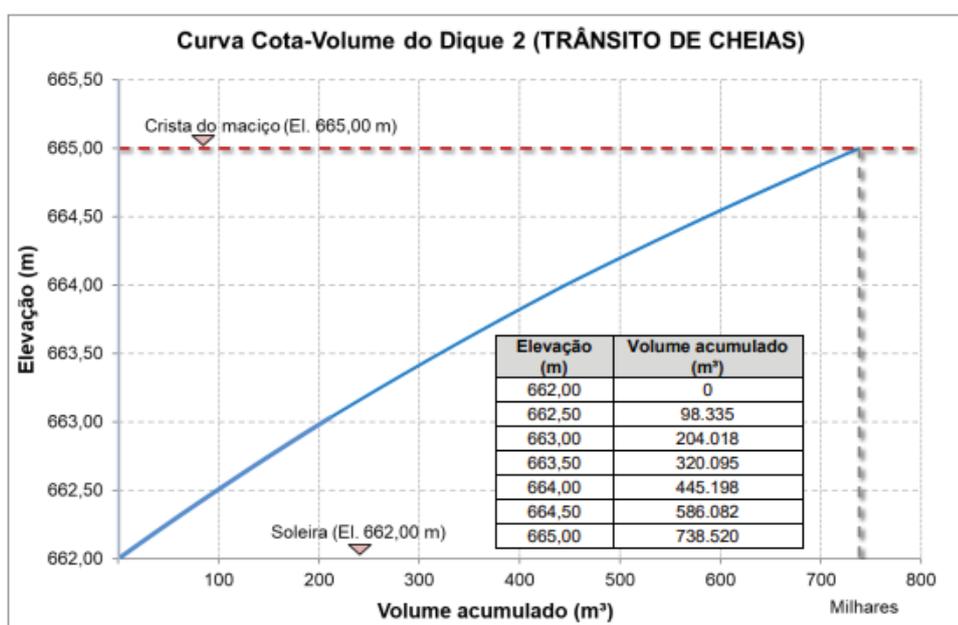
talvegue natural e para o canal do sistema extravasor; e para o escoamento sobre o maciço, o fluxo é direcionado ao canal de coleta da drenagem interna.

O sistema extravasor do Dique 2 é composto por um canal de emboque em galeria tripla de encosta em degraus, sendo regulada por um sistema “stop-log” com soleira variável sendo manipulada entre a El. 658,00 m e a El. 662,00 m. Conectado a isto, existe uma caixa de transição que é ligada a uma galeria de fundo, seguida por um canal que conduz até a bacia de dissipação. Os principais elementos do sistema extravasor são:

- Galeria de encosta;
- Sistema “stop-log”;
- Caixa de transição;
- Galeria de fundo;
- Canal rápido de calha lisa superficial;
- Bacia de dissipação;
- Canal de restituição.

O levantamento topobatimétrico disponibilizado mais recente do reservatório foi realizado em maio de 2020. Este levantamento mostra que o volume disponível para trânsito de cheias, entre a soleira do extravasor (El. 662,00 m) e a crista do dique (El. 665,00 m) é de 738.520 m³, conforme apresentado na FIGURA 4.5.

FIGURA 4.5 Curva cota-volume disponível para o trânsito de cheias no reservatório



Fonte: Anglo American (2022).

O estudo dessa pesquisa A TABELA 4.2 apresenta as principais informações acerca dos piezômetros instalados.

TABELA 4.2 Informações da instrumentação instalada

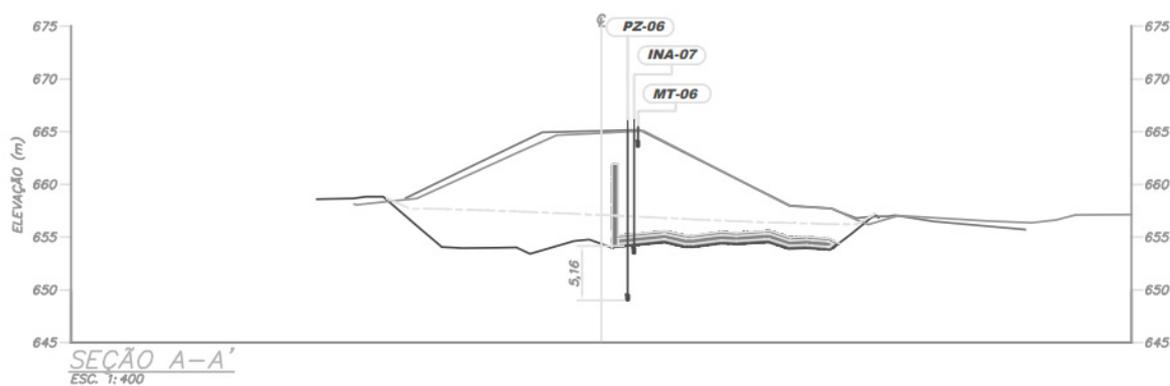
Instrumento	Coordenada N	Coordenada E	El. Terreno (m)	El. Fundo (m)	Prof. (m)
PZ-01	7.910.593,12	668.058,75	665,08	648,75	17,13
PZ-02	7.910.628,29	668.027,43	664,82	645,81	20,10
PZ-03	7.910.639,44	668.039,73	657,74	644,55	14,18
PZ-04	7.910.665,18	667.993,90	665,12	647,65	18,28
PZ-05	7.910.676,46	668.006,14	657,91	646,88	12,04
PZ-06	7.910.694,87	667.967,00	665,21	649,95	16,08

Fonte: Anglo American (2022).

4.4 INSTRUMENTAÇÃO EXISTENTE

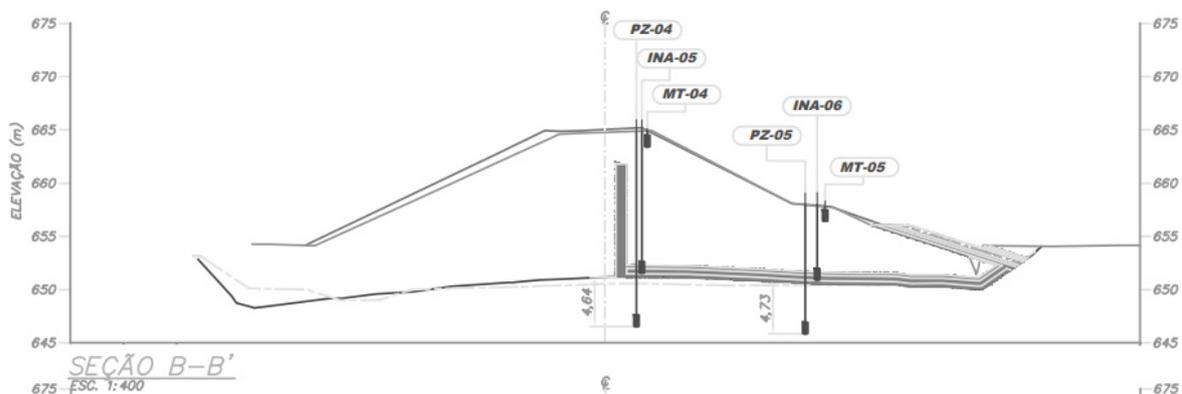
O Dique 2 possui quatro seções transversais instrumentadas, as quais estão locadas na FIGURAS 4.6 a 4.9, denominadas de Seção A-A, Seção B-B, Seção C-C e Seção D-D.

FIGURA 4.6 Seção A-A' do Dique 2



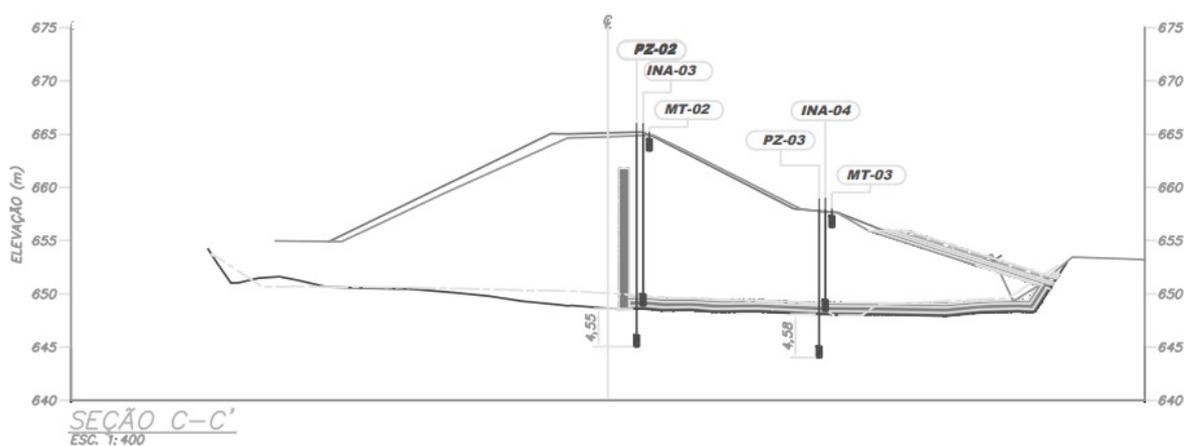
Fonte: Anglo American (2022).

FIGURA 4.7 Seção B-B' do Dique 2



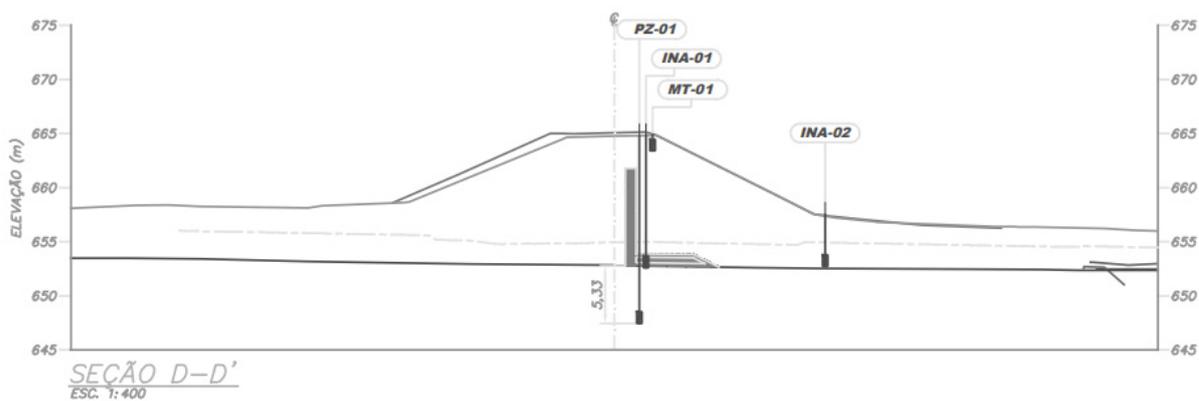
Fonte: Anglo American (2022).

FIGURA 4.8 Seção C-C' do Dique 2



Fonte: Anglo American (2022).

FIGURA 4.9 Seção D-D' do Dique 2



Fonte: Anglo American (2022).

4.4.1 Piezômetro Casagrande

As leituras dos piezômetros Casagrande são realizadas com um pio elétrico que é uma trena com uma ponteira elétrica que emite som assim que entra em contato com a água. O monitoramento manual tem como data de início julho de 2016. A FIGURA 4.10 apresenta a planta da instrumentação, a FIGURA 4.11 a locação dos piezômetros e a FIGURA 4.12 o detalhe do projeto as built do instrumento.

FIGURA 4.10 Planta da instrumentação do Dique 2



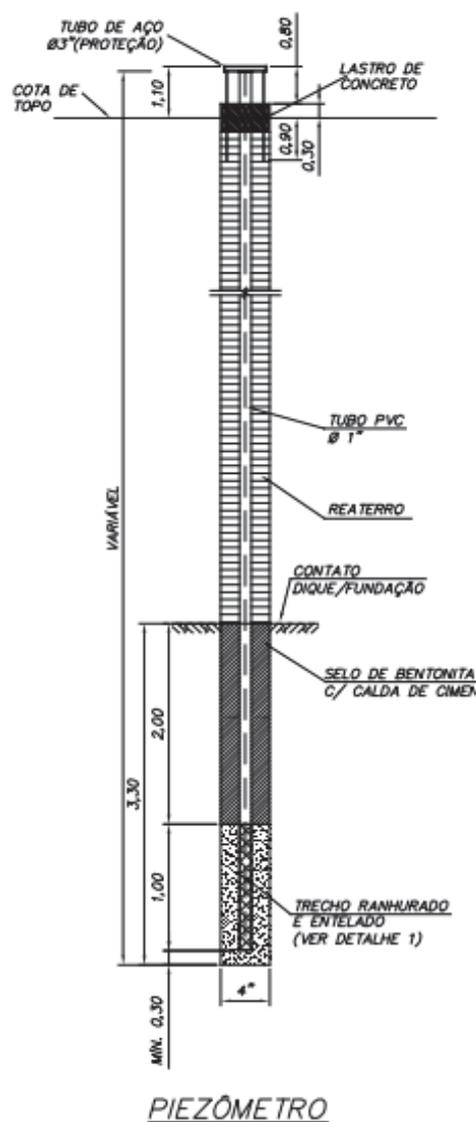
Fonte: Anglo American (2022).

FIGURA 4.11 Locação dos piezômetros localizados no Dique 2



Fonte: Google Earth (2022).

FIGURA 4.12 Detalhe do projeto as built do piezômetro Casagrande



Fonte: Anglo American (2022).

4.4.2 Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante

Os piezômetros de corda vibrante utilizados foram os sensores do fabricante Geokon de modelo 4500 apresentado na FIGURA 4.13. A coleta dos dados é realizada por um sensor piezométrico de corda vibrante instalado dentro dos instrumentos tipo Casagrande. Esse sensor faz a leitura da coluna de água existente acima dele através da pressão que essa coluna exerce no nível de água. Assim como para todos os instrumentos de corda vibrante, inicialmente foi necessário estabelecer uma leitura zero para os piezômetros de corda vibrante.

FIGURA 4.13 Modelo do Piezômetro de Corda Vibrante utilizado



Fonte: Geokon (2022).

4.4.3 Monitoramento geotécnico

Para garantir boa condição de segurança e funcionamento das estruturas (barragens, diques, pilhas, cavas, taludes), o monitoramento geotécnico é realizado a partir de inspeções visuais, leituras e análises de instrumentos. As inspeções se dividem em inspeções de rotina (realizadas quinzenalmente pela equipe de segurança de barragens formada pela equipe de profissionais da Anglo American), regulares (com plano de ação elaborado pela equipe de segurança de barragens e/ou em conjunto com empresas especializadas) e especiais (realizadas em caráter excepcional para avaliar as condições físicas das partes integrantes da barragem sempre que a inspeção regular identificar anomalia de pontuação máxima).

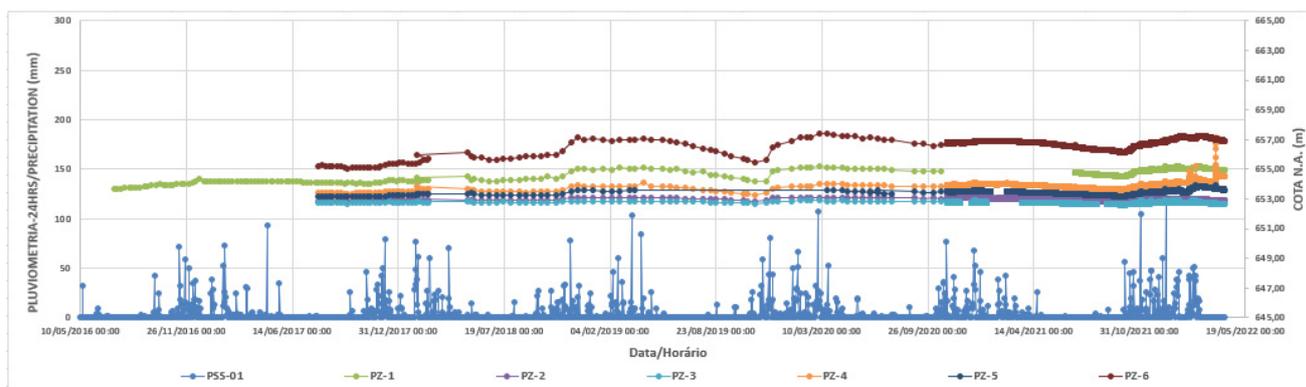
As leituras da instrumentação são realizadas e analisadas pela equipe técnica, tendo-se como objetivos correlacionar as leituras dos instrumentos com os níveis de controle e detectar condições insatisfatórias no dique que não forem observadas pela inspeção visual.

A frequência das leituras manuais é mensal, podendo ser intensificada em períodos de chuva, em caso de variação significativa dos valores obtidos, caso as leituras alcancem o nível de atenção ou por procedimento interno. As leituras observadas nos instrumentos são registradas de modo a criar uma base de dados de monitoramento. Em caso de leituras anômalas nos instrumentos, torna-se necessário investigar até que se descubra o motivo que gerou as leituras discrepantes. Para os piezômetros, o valor de cada leitura realizada é imediatamente comparado com os níveis de controle definidos no documento elaborado pela projetista responsável pelo laudo de estabilidade da estrutura.

É importante mencionar que a partir de novembro de 2020 os resultados de monitoramento referem-se às leituras automatizadas e anteriores à referida data referem-se às leituras

manuais (FIGURA 4.14). Os registros dos instrumentos automatizados ocorrem a cada uma hora, sendo que para fins de geração dos gráficos a primeira leitura registrada no dia foi adotada como referência.

FIGURA 4.14 Série histórica manual e automatizada dos piezômetros

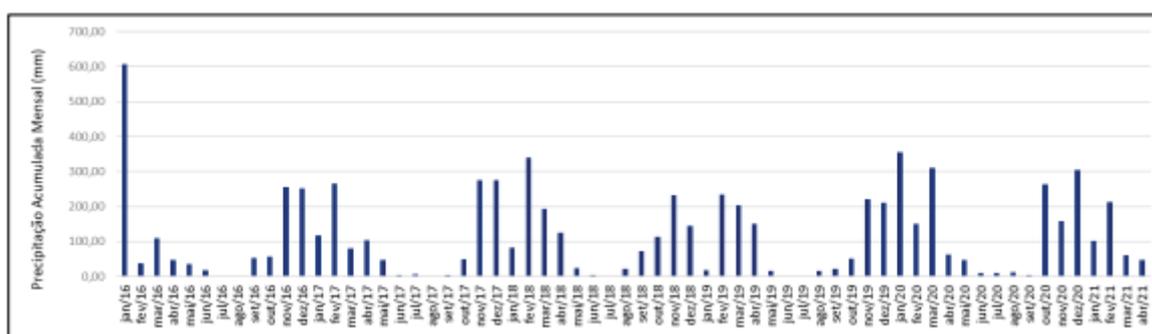


Fonte: Anglo American (2022).

Para garantia de segurança do Dique 2 quanto ao galgamento, simulações hidrológicas e hidráulicas são realizadas frequentemente, para definição dos volumes mínimos necessários para trânsito de cheias deca milenares, com borda livre complementar mínima de 1,0 m.

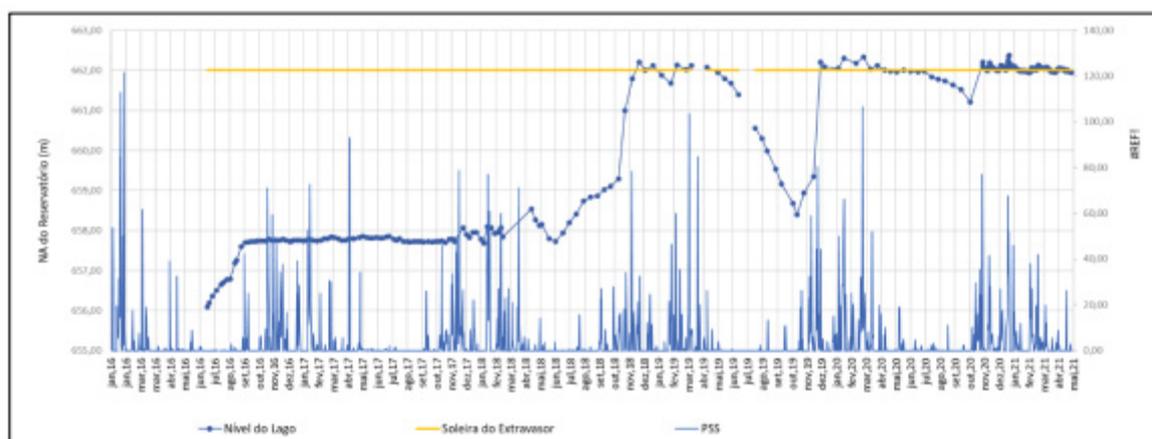
A FIGURA 4.15 apresenta a série histórica de pluviosimetria e a Figura 4.16 a série histórica do nível de água do reservatório, ambas de julho/2016 a abril/2021 a qual evidencia a sazonalidade das chuvas na região.

FIGURA 4.15 Monitoramento da pluviosimetria



Fonte: Anglo American (2022).

FIGURA4.16 Monitoramento do Nível de Água do reservatório



Fonte: Anglo American (2022).

Com base no monitoramento da pluviometria e nível do reservatório as seguintes considerações são importantes:

- De maneira geral, os meses mais chuvosos referem-se ao período de outubro a março e os meses menos chuvosos de abril a setembro;
- O ano mais chuvoso dentro do período de monitoramento apresentado foi o de 2020 (precipitação anual de 1.688 mm) e o mês mais chuvoso o de janeiro/2016, com precipitação acumulada de 606 mm;
- Verifica-se que o N.A do reservatório ficou em torno da El. 658,00 m até meados de 2018. No final de 2018 foi a primeira vez que o N.A do reservatório atingiu a cota da soleira do extravasor (El. 662,00 m);
- A partir de 2019 verifica-se que há uma tendência do N.A do reservatório se encontrar próximo da soleira do extravasor (El. 662,00 m), exceção feita em meados de 2019 em que foram registrados níveis de água no reservatório abaixo da El. 659,00 m.

4.4.4 Arquitetura do Sistema de Automação do Dique 2

O processo de automação geotécnica foi iniciado em meados de 2018 e concluída em 2022. Em sua etapa final, além do comissionamento de toda a infraestrutura implantada, foram elaborados os procedimentos e regras de governança para garantir a máxima transparência nos diversos níveis da companhia, bem como a celeridade nos processos decisórios.

O Dique 2 possui piezômetros automatizados com sensores de corda vibrante diretamente conectados a *dataloggers* de um canal com comunicação sem fio “*wireless*” baseado em tecnologia de rádio frequência LoRa (*Long Range wireless communication*) que permite comunicação a longas distâncias que opera sob uma banda de frequência em 900 MHz, homologado pela Anatel.

Os *dataloggers* locais são responsáveis por coletar, armazenar e transmitir as respostas dos sensores piezômetros de corda vibrante a uma unidade central (*gateway*). É importante ressaltar que, através do armazenamento local, os dados brutos dos sensores podem ser adquiridos diretamente nos *dataloggers* locais via cabo OTG USB e smartphone Android com o aplicativo do fabricante instalado no celular. Também há a possibilidade de leitura dos dados in loco nos *gateways* (através de porta USB) ou ainda diretamente dos sensores, através de uma unidade leitora.

A arquitetura de rede é em estrela, desta forma todos os dispositivos enviam os dados para um *gateway* (concentrador de dados), que repassa os dados via conexão de rede industrial TCP/IP (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) podendo ser acessado via navegador de internet ou enviando pacotes de dados via protocolo FTP (*File Transfer Protocol*) para o sistema PIMS (*Plant Information Management System*).

Os dados coletados pelo PIMS são integrados a um sistema para gerenciamento das inspeções e de monitoramento das estruturas em tempo real dos instrumentos, contando com gráficos dinâmicos dos níveis dos instrumentos manuais e automatizados. Esses gráficos auxiliam em uma análise de risco rápida, servindo também ao preenchimento de planilhas eletrônicas, utilizadas para avaliações mais detalhadas dos níveis dos instrumentos. Após análise da instrumentação, os geotécnicos fazem as análises de estabilidade por softwares específicos e os logs de dados são disponibilizados em formato .csv ou .xls, sendo flexível o output dos dados do sistema de coleta.

Com a automação dos instrumentos se espera obter níveis de controle para um melhor monitoramento destes instrumentos e em caso de divergências poder atuar de forma mais rápida e efetiva para sanar algum evento indesejado.

4.4.4.1 Gerenciamento de inspeções e monitoramentos das estruturas

A sala de monitoramento geotécnico permite o monitoramento de todos os processos, o que inclui, além das barragens, as operações de mina e de beneficiamento 24 horas por dia, nos sete dias por semana e 365 dias no ano. (FIGURA 4.17)

FIGURA 4.17 Sala do Centro de monitoramento geotécnico (CMG)



Fonte: Anglo American (2022)

O monitoramento geotécnico é realizado por técnicos e engenheiros especializados em Geotecnia, treinados nos processos e no sistema. Em caso de anormalidades, o sistema emite alertas aos técnicos, que fazem uma primeira avaliação para eliminar problemas de sistema ou automação. Se forem identificadas anomalias nas estruturas, os geotécnicos são acionados para análises mais detalhadas. As leituras estão sendo realizadas em intervalo de uma hora e, a cada atualização, o técnico de geotecnia da sala de controle faz a análise preliminar do dado para verificar a ocorrência de erro ou variação fora da faixa aceitável do instrumento.

4.5 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO DE AUTOMAÇÃO DOS PIEZÔMETROS

4.5.1 Apresentação e análise dos resultados

O presente estudo refere-se à comparação entre leituras manuais (M) obtidas mensalmente e leituras automatizadas (A) correspondentes obtidas no mesmo dia para seis piezômetros instalados no Dique 2. Esta comparação tem por finalidade validar a eficácia da metodologia QA/QC para automação de piezômetros tipo Casagrande proposta no Capítulo 3.

O conjunto de informações abrange um total de 809 leituras obtidas de piezômetros manuais durante o período de 02/08/2017 a 17/06/2022, bem como 138 leituras automatizadas coletadas entre 27/07/2021 e 17/06/2022. Todos esses dados foram originados de seis piezômetros Casagrande e gentilmente disponibilizados pela Anglo American para fins acadêmicos. A partir dessa coleta, os dados das leituras foram tratados com abordagem estatística em planilha de trabalho, no formato Excel, Minitab e MATLAB em forma de banco de dados. Em relação aos registros de leituras automatizadas foram selecionadas apenas as leituras nas mesmas datas que ocorreram leituras manuais de verificação periódica. Para fins de comparação da leitura manual e automatizada foi considerada a média das leituras automatizadas que são registradas a cada hora para comparar com a leitura manual única realizada no dia da coleta. Isso se deve pelo fato de não ter o registro do horário que o técnico de campo realizou a leitura manual.

Ao analisarmos um gráfico de dispersão da FIGURA 4.18, podemos obter uma primeira impressão de como as variáveis das medições estão relacionadas. A proximidade do coeficiente de determinação (R^2) a 1, conforme indicado na TABELA 4.3, sugere que o modelo é apropriado para descrever a relação entre as variáveis retratadas no gráfico de dispersão. Além disso, o baixo valor do RMSE na mesma tabela reforça a ideia de que o modelo possui uma precisão satisfatória.

FIGURA 4.18 Gráfico de dispersão entre leituras manuais e automatizadas

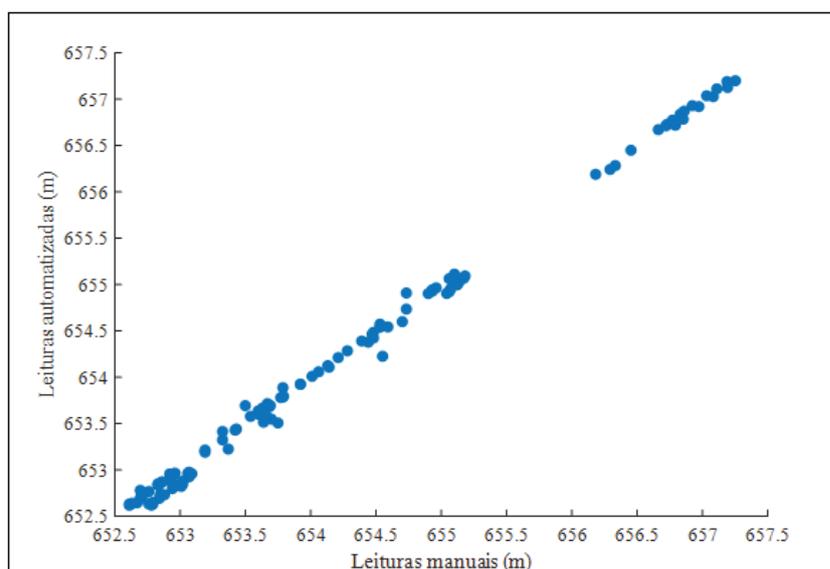


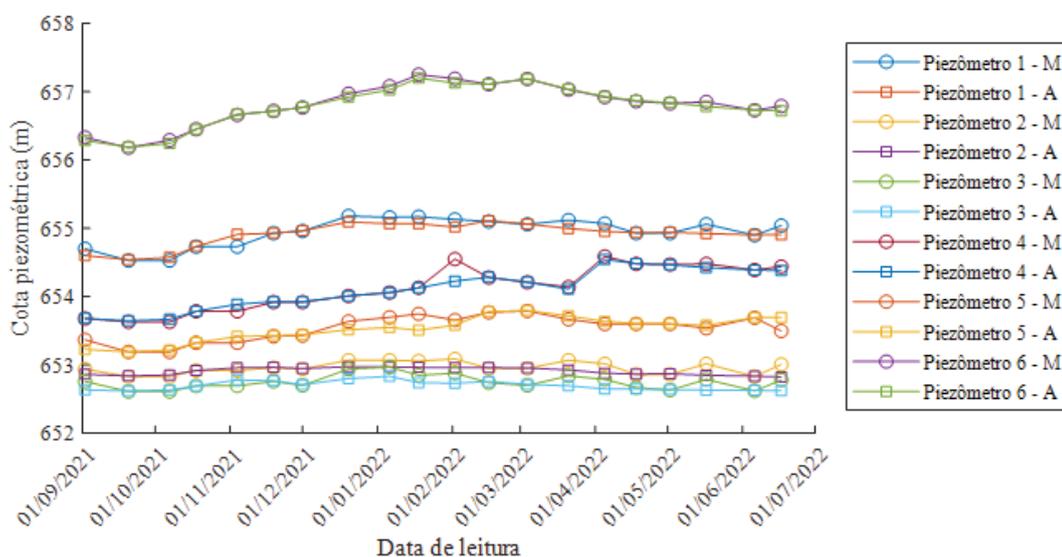
TABELA 4.3 Resultado do parâmetro estatístico de desempenho do modelo

 Coeficiente de Determinação (R^2): 0.99655

 Erro Quadrático Médio (RMSE): 0.082458

O gráfico de comparação entre leituras manuais (M) e automatizadas (A) da FIGURA 4.19 apresenta a comparação entre leituras manuais e automatizadas dos instrumentos no mesmo período (julho/21 a junho/2022), permitindo uma análise detalhada das variações dessas duas metodologias de coleta de dados.

FIGURA 4.19 Gráfico da comparação entre leituras manuais (M) e automatizadas (A)



Para construir a carta da diferença absoluta do processo apresentada na FIGURA 4.21, foi seguido os seguintes passos:

- Organização do banco de dados: Os dados da série histórica manual referentes aos seis piezômetros foram organizados por data de leitura para cada um dos seis piezômetros no período entre 02/08/2017 e 17/06/2022. Este intervalo de tempo compreende tanto o período anterior à implementação do processo de automação dos instrumentos quanto o período posterior.
- O cálculo da diferença histórica das leituras manuais: Dado que não ocorreram duas medições manuais consecutivas numa mesma data, a metodologia aplicada consistiu em calcular para cada piezômetro, a diferença entre leituras manuais subtraindo o valor cota (m) da leitura manual de uma data específica, da leitura da cota (m) da leitura manual na data subsequente. O resultado é a diferença, que representa o quanto a cota (m) variou entre duas leituras consecutivas para cada piezômetro.

FIGURA 4.20 Exemplo da estruturação de banco de dados para o cálculo da diferença absoluta

Data	COTA N.A (m)	Piezômetro	Tipo de Leitura	Diferença
02/08/2017	654,12	1	Manual	-0,01
02/08/2017	652,89	2	Manual	-0,01
02/08/2017	652,75	3	Manual	-0,01
02/08/2017	653,43	4	Manual	0,00
02/08/2017	653,21	5	Manual	-0,01
02/08/2017	655,19	6	Manual	-0,01
08/08/2017	654,13	1	Manual	0,01
08/08/2017	652,90	2	Manual	0,00
08/08/2017	652,76	3	Manual	0,01
08/08/2017	653,43	4	Manual	0,01
08/08/2017	653,22	5	Manual	0,01
08/08/2017	655,20	6	Manual	0,04
16/08/2017	654,12	1	Manual	0,03
16/08/2017	652,90	2	Manual	0,02
16/08/2017	652,75	3	Manual	0,00
16/08/2017	653,42	4	Manual	0,01
16/08/2017	653,21	5	Manual	0,02
16/08/2017	655,16	6	Manual	0,03

- Cálculo da média e o desvio padrão: foi calculada a média e o desvio padrão das diferenças das leituras manuais.
- Cálculo dos limites de controle: usando a média e o desvio padrão calculados, foram calculados os limites de controle superior e inferior. Esses limites podem ser calculados como a média mais ou menos duas vezes o desvio padrão considerando 95% de intervalo de confiança.

- Plotagem do gráfico de controle: foram plotadas as diferenças das leituras manuais em ordem cronológica no eixo horizontal e os valores das diferenças das leituras manuais no eixo vertical. Foram traçadas as linhas dos limites de controle superior e inferior no gráfico.
- Interpretação do gráfico: a análise do gráfico foi feita para determinar se há alguma tendência ou padrão fora dos limites de controle. Se houver, isso pode indicar uma mudança no processo que deve ser investigada.
- O limite de tolerância ou a faixa aceitável de variação encontrada nesse processo foi de aproximadamente 20 cm. Esse valor foi considerado como o limite de especificação.

$$LSC = \bar{X} + 2. \sigma$$

$$LSC = 0,005 + 2*0,10$$

$$LSC = 0,19$$

$$LIC = \bar{X} - 2. \sigma$$

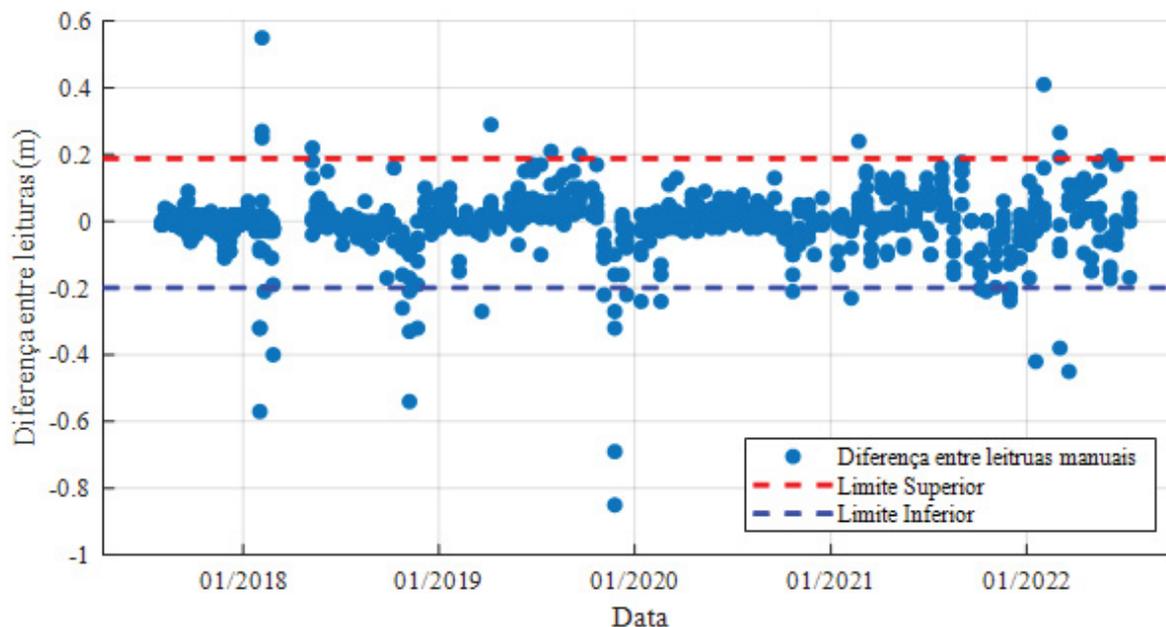
$$LIC = 0,005 - 2*0,10$$

$$LIC = - 0,20$$

TABELA 4.4 Resumo da estatística descritiva correspondente às variáveis

	PZ1-M	PZ1-A	PZ2-M	PZ2-A	PZ3-M	PZ3-A	PZ4-M	PZ4-A	PZ5-M	PZ5-A	PZ6-M	PZ6-A
Tamanho da Amostra	21		21		21		21		21		21	
Média	654,95	654,91	652,96	652,91	652,75	652,70	654,13	654,11	653,54	653,53	656,81	656,79
Desvio Padrão	0,20	0,17	0,09	0,05	0,11	0,07	0,32	0,29	0,19	0,18	0,31	0,31
Mediana	655,00	654,94	652,95	652,92	652,75	652,69	654,14	654,12	653,60	653,56	656,84	656,81
Mínimo	654,53	654,54	652,83	652,82	652,61	652,62	653,63	653,65	653,19	653,19	656,18	656,19
Máximo	655,18	655,11	653,09	652,98	652,97	652,83	654,59	654,54	653,79	653,80	657,25	657,20
Quartil 1 (Q1)	654,82	654,90	652,89	652,86	652,68	652,63	653,85	653,91	653,39	653,42	656,69	656,69
Quartil 3 (Q3)	655,11	655,04	653,04	652,96	652,81	652,75	654,46	654,39	653,68	653,67	657,06	657,03
IQR = Q3-Q1	0,29	0,14	0,15	0,10	0,13	0,12	0,61	0,48	0,29	0,25	0,37	0,34
Coefficiente de Determinação (R ²)	0,85		0,29		0,39		0,95		0,75		0,99	
RMSE	0,09		0,09		0,10		0,08		0,09		0,04	

FIGURA 4.21 Carta da diferença do histórico das leituras manuais

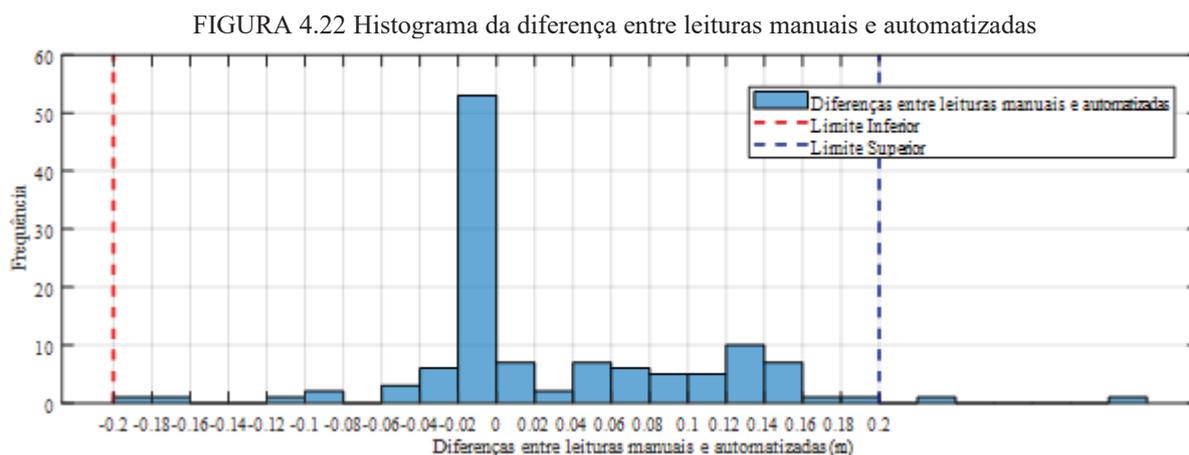


No caso da carta da diferença absoluta do processo apresentada na FIGURA 4.21, o valor-alvo de referência é zero, pois o monitoramento é das diferenças da série histórica das leituras manuais entre pares de medições consecutivas. Se as diferenças estiverem dentro dos limites de controle, isso indica que o processo está em controle e as variações são consideradas normais e aceitáveis. No entanto, se as diferenças excederem os limites de controle, isso indica que o processo está fora de controle e as variações são consideradas anormais e inaceitáveis.

Analisando os dados do gráfico da FIGURA 4.21 interpretou-se como um valor-alvo da diferença de leitura manual dos piezômetros do Dique 2 o valor de 20 cm como padrão para esse processo. Quando as variações excedem os limites de controle, é importante investigar a causa raiz do problema e tomar medidas corretivas para trazer o processo de volta ao controle. Isso pode envolver a reinstalação de sensores, verificação da coleta de dados manual, calibração de sensores, treinamento dos operadores etc., para identificar e corrigir as anomalias, entre outras ações.

Além disso, é importante lembrar que nem todas as variações não são necessariamente ruins. Em alguns casos, as variações podem ser úteis para entender melhor o processo e identificar oportunidades de melhoria. Por exemplo, se as variações estiverem dentro dos limites de controle, mas ainda forem significativas, isso pode indicar que há espaço para melhorias no processo para reduzir ainda mais as variações.

O histograma apresentado na FIGURA 4.22 mostra os valores da diferença entre as leituras manuais e automatizadas para os seis instrumentos analisados para o período entre 27/07/2021 e 17/06/2022. Nota-se que a maior frequência de ocorrência é de valores próximos a zero. Sendo observadas apenas duas ocorrências de valores fora do limite apresentado na FIGURA 4.21 da carta de controle. Assim, nota-se que a metodologia aplicada é satisfatória.



Com o valor-alvo de referência estabelecido de 20 cm, foram seguidas as seguintes etapas para a comparação das leituras em cada piezômetro automatizado:

- Cálculo da média e o desvio padrão: a partir dos dados da série histórica das leituras manuais e automatizadas foram calculadas a média e o desvio padrão da diferença das leituras. A média é a soma de todos os dados dividida pelo número de dados, e o desvio padrão é uma medida de quão dispersos os dados estão em relação à média.
- Plotar o gráfico de controle: foi plotado o gráfico de controle, que é um gráfico que mostra a variação dos dados ao longo do tempo. O gráfico de controle tem um eixo horizontal que representa o tempo e um eixo vertical que representa o valor dos dados.
- Definição dos limites de controle: usando a média e o desvio padrão calculados anteriormente, foram definidos os limites de controle superior e inferior para o gráfico de cada piezômetro. Esses limites geralmente são definidos como a média mais ou menos duas vezes o desvio padrão.
- Interpretação do gráfico: foi verificado para cada gráfico se a faixa da diferença entre as leituras fica dentro ou fora dos limites de controle estabelecido

anteriormente. Se os dados estiverem dentro dos limites de controle, o processo é considerado estável e previsível. Se os dados estiverem fora dos limites de controle, o processo é considerado instável e imprevisível, o que pode indicar a necessidade de ajustar o processo.

Nas FIGURAS 4.23 a 4.28 estão plotados os gráficos das leituras manuais e das leituras automatizadas na mesma carta de controle para verificar que as leituras automatizadas estão na faixa de controle de processo das leituras manuais. Foi considerado como limite de precisão do processo um intervalo de confiança de 95% para o cálculo dos limites.

Nenhum dos gráficos plotados abaixo apresentou valores de leitura automatizada fora do limite padrão. Caso algum valor estivesse fora do limite, um novo gráfico poderia ter sido feito retirando esses dados. A partir do novo gráfico, outra análise deveria ser feita, e a partir disso sugeridas mudanças na atividade, objetivando encontrar as possíveis causas dos desvios.

FIGURA 4.23 Carta de controle referente ao piezômetro 1

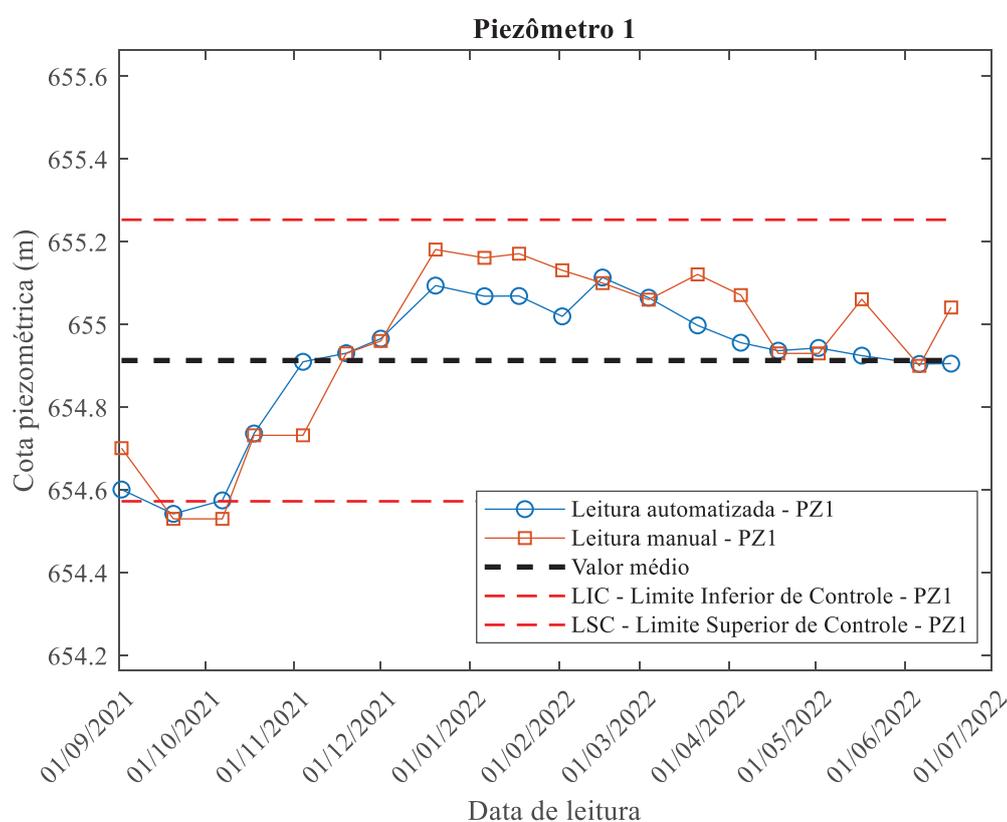


FIGURA 4.24 Carta de controle referente ao piezômetro 2

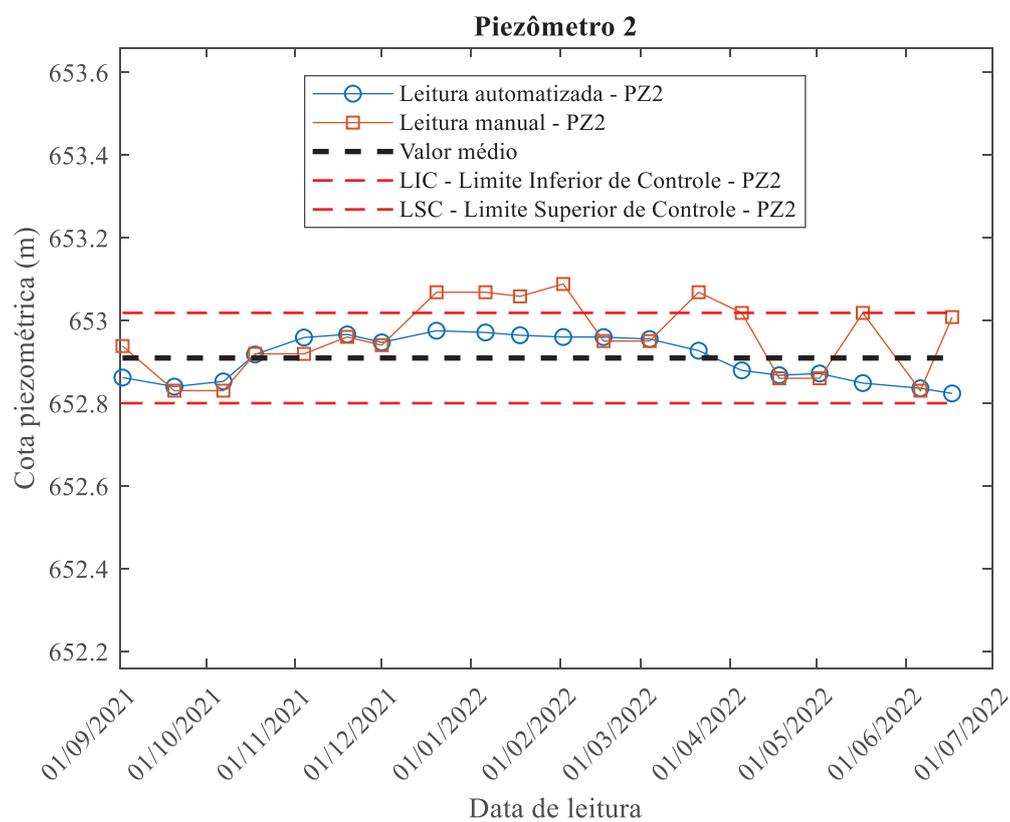


FIGURA 4.25 Carta de controle referente ao piezômetro 3

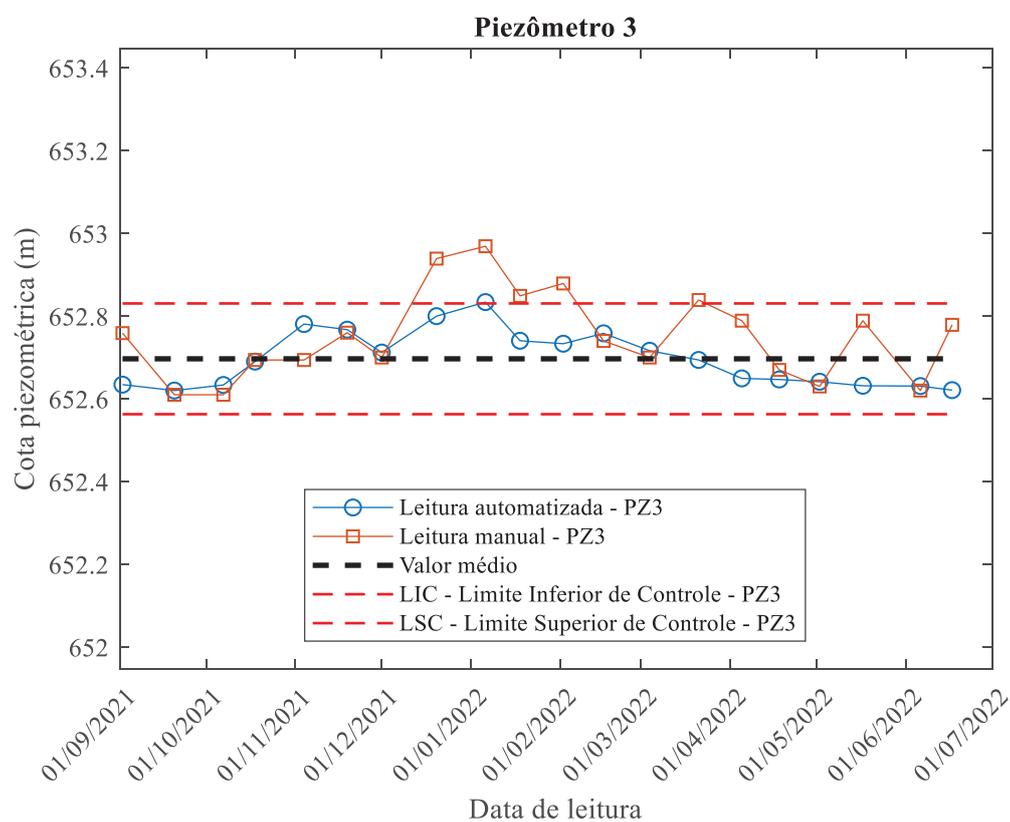


FIGURA 4.26 Carta de controle referente ao piezômetro 4

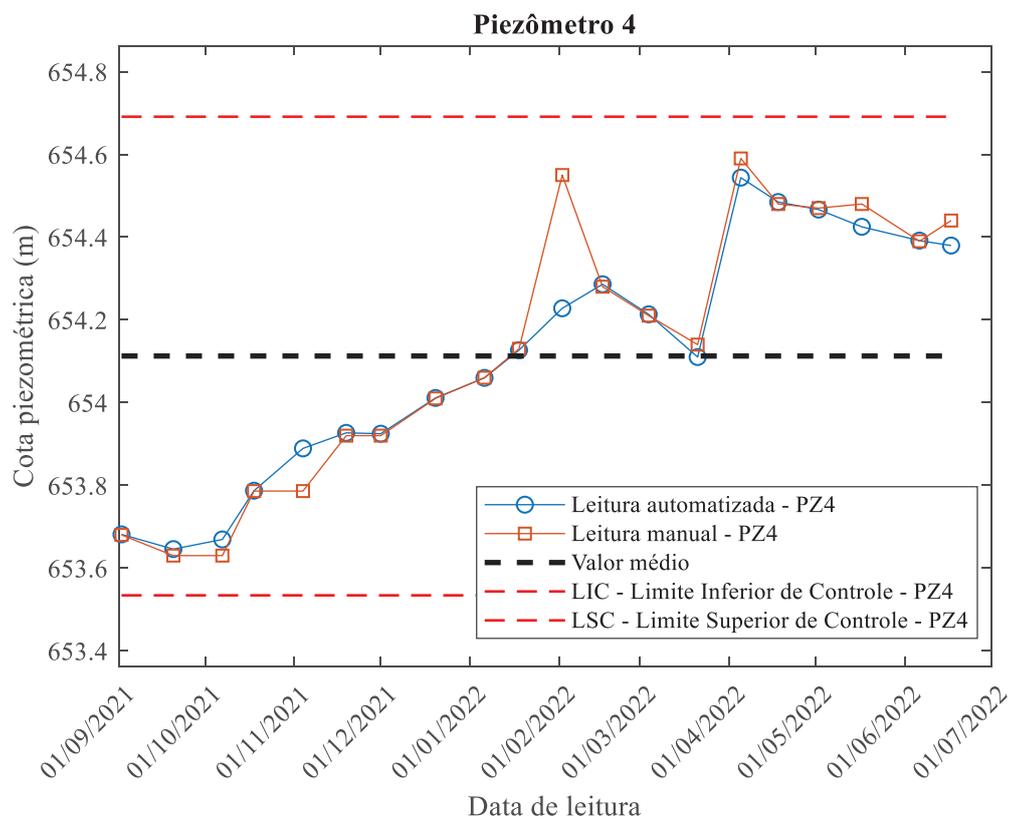


FIGURA 4.27 Carta de controle referente ao piezômetro 5

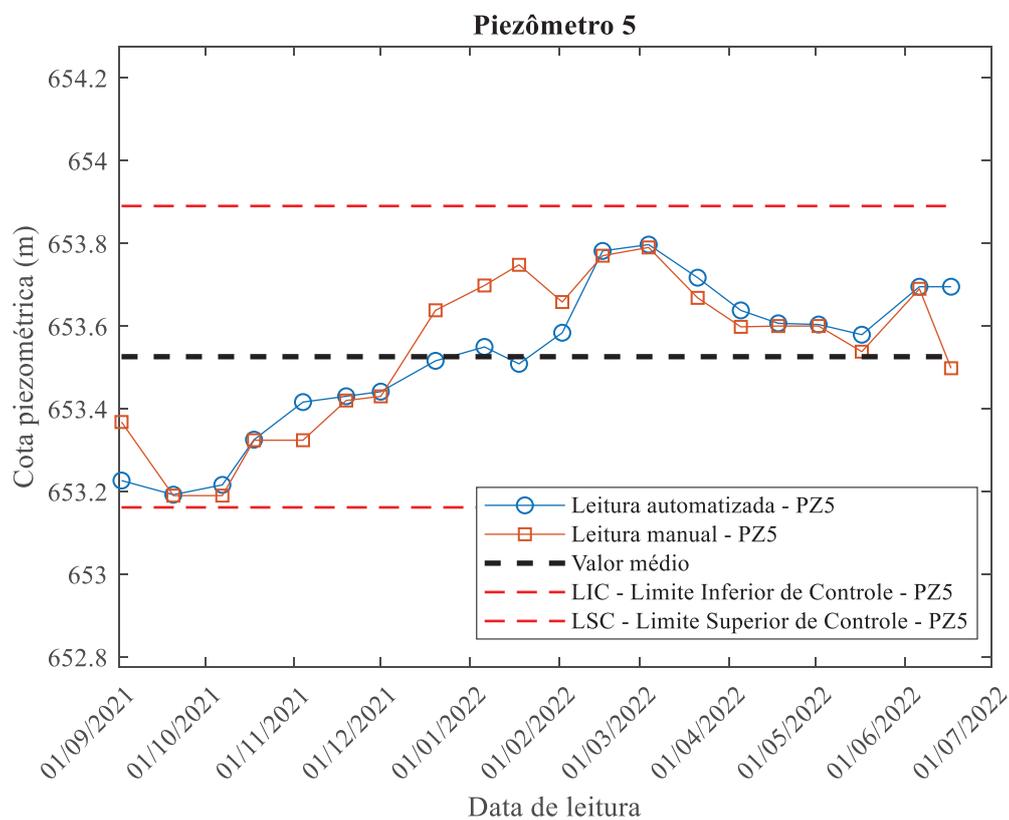
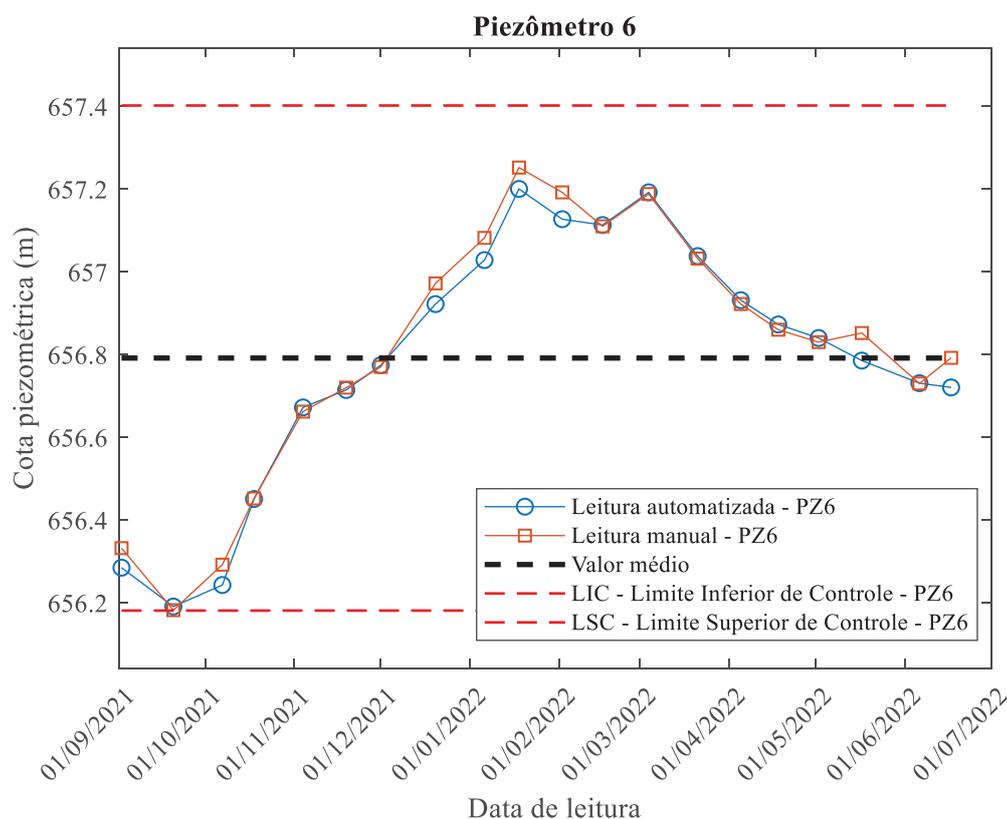


FIGURA 4.28 Carta de controle referente ao piezômetro 6



4.6 DIFERENÇA ENTRE LEITURAS MANUAIS E AUTOMATIZADAS

A diferença entre as leituras manuais e automatizadas apresentaram valores de RMSE baixos, indicando que os valores medidos estão em concordância.

O valor de RMSE tem a mesma unidade do valor de entrada, no caso metros. Isso facilitou interpretar a métrica, pois podemos entender que o erro médio está variando de 0,04 m a 0,10 m. Observa-se que os valores estão dentro da faixa estabelecida para o processo de 20 cm. Hyndman (2018) destaca que o RMSE é sensível a valores extremos, o que significa que ele é influenciado por valores discrepantes que podem afetar a precisão geral do modelo.

A FIGURA 4.29 apresenta o tamanho da amostra usando para o cálculo do valor de RMSE para o Piezômetro 1.

FIGURA 4.29 Exemplo do banco de dados para o cálculo do RMSE do Piezômetro 1

	PIEZÔMETRO 1						Mean Abs.Erro (MAE)	RMSE
	Leitura manual Cota (m)	Leitura automatizada Cota (m)	Diferença	Diferença abs.	Diferença quadrada			
27/07/2021	654,78	654,69	0,09	0,09	0,01	0,01	0,09	
02/08/2021	654,66	654,67	-0,01	0,01	0,00			
02/09/2021	654,70	654,60	0,10	0,10	0,01			
20/09/2021	654,53	654,54	-0,01	0,01	0,00			
07/10/2021	654,53	654,57	-0,04	0,04	0,00			
18/10/2021	654,73	654,74	0,00	0,00	0,00			
04/11/2021	654,73	654,91	-0,18	0,18	0,03			
19/11/2021	654,93	654,93	0,00	0,00	0,00			
01/12/2021	654,96	654,97	-0,01	0,01	0,00			
20/12/2021	655,18	655,09	0,09	0,09	0,01			
06/01/2022	655,16	655,07	0,09	0,09	0,01			
18/01/2022	655,17	655,07	0,10	0,10	0,01			
02/02/2022	655,13	655,02	0,11	0,11	0,01			
04/03/2022	655,06	655,06	0,00	0,00	0,00			
21/03/2022	655,12	655,00	0,12	0,12	0,02			
05/04/2022	655,07	654,96	0,12	0,12	0,01			
18/04/2022	654,93	654,94	-0,01	0,01	0,00			
02/05/2022	654,93	654,94	-0,01	0,01	0,00			
17/05/2022	655,06	654,92	0,14	0,14	0,02			
06/06/2022	654,90	654,90	0,00	0,00	0,00			
17/06/2022	655,04	654,91	0,14	0,14	0,02			
			Σ	1,35	0,16			

O valor de RMSE tem a mesma unidade do valor de entrada, no caso metros. Isso facilitou interpretar a métrica, pois podemos entender que o erro médio está variando de 0,04 m a 0,10 m.

Exemplo: Para o Piezômetro 1

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{0,16}{21}} = 0,09$$

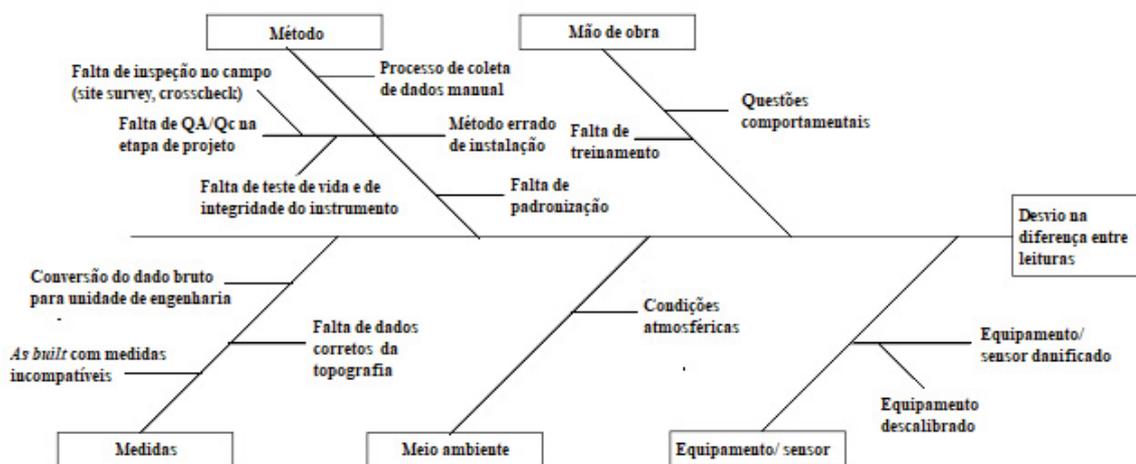
4.7 IDENTIFICAÇÃO DAS POSSÍVEIS CAUSAS DE VARIAÇÃO DAS LEITURAS

O objetivo deste item é a aplicação da metodologia de QA/QC apresentada no capítulo 3 usando como ferramenta de controle a ficha de instalação proposta para mitigar as variações das leituras durante o processo de automação do piezômetro.

O diagrama de Ishikawa, também conhecido como diagrama de espinha de peixe ou diagrama de causa e efeito, é uma ferramenta utilizada para identificar as possíveis causas de um problema específico. No contexto da variabilidade de dados geotécnicos de instrumentação, o diagrama de Ishikawa pode ser uma ferramenta eficaz para identificar as possíveis causas de variabilidade de dados e contribuir para identificar as causas dentro de cada categoria principal.

Para se chegar as possíveis causas a serem colocadas no diagrama, foi realizado um *Brainstorming* entre técnicos e a autora desta da pesquisa que atuaram em diversos projetos de automação dos piezômetros e as causas estão dispostas no diagrama da FIGURA 4.30.

FIGURA 4.30 Diagrama de Ishikawa



Fonte: Autora (2022).

Para elaborar o diagrama de Ishikawa, foram considerados alguns critérios:

- Definição do problema: O problema ou a variabilidade de dados foi considerado o desvio na diferença entre as leituras manuais e automatizadas.
- Identificação das principais categorias: As principais categorias consideradas no diagrama de Ishikawa para a diferença entre as leituras foram método, mão de obra, medidas, meio ambiente, equipamento/sensor.
- Coleta de dados: A coleta dos dados relevantes para o problema ou diferença das leituras, incluiu lições aprendidas nos projetos de automação, registros de *crosscheck* de campo, relatórios de inspeção, dados de calibração etc.
- Identificação das possíveis causas: Com base nas categorias definidas e nos dados coletados, foi possível identificar as possíveis causas das diferenças entre leituras ou variabilidade de dados. Essas causas foram listadas no diagrama de Ishikawa.
- Análise das causas: É importante analisar cada uma das possíveis causas identificadas para determinar se elas realmente estão contribuindo para o problema.
- Priorizar as causas: Com base na análise das possíveis causas, é possível priorizar aquelas que parecem ser as mais significativas e/ou fáceis de corrigir.
- Implementar medidas corretivas: Com as causas identificadas e priorizadas, é possível implementar medidas corretivas, ferramentas de controle, para solucionar o problema ou reduzir a diferença das leituras.

4.8 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA

A utilização da metodologia de QA/QC é fundamental para garantir a qualidade e a confiabilidade dos dados gerados da instrumentação geotécnica. Isso ocorre porque a instrumentação geotécnica é uma técnica que envolve a coleta de dados em campo (manual e/ou automatizada), que são então utilizados para análise e tomada de decisões importantes em projetos geotécnicos.

A aplicação da metodologia proposta pela autora reduz a possibilidade de erros ou falhas no processo de coleta e análise dos dados. Além disso, a metodologia permite identificar e corrigir rapidamente quaisquer problemas que possam surgir durante o processo, garantindo a qualidade e evitando a necessidade de retrabalho ou reinstalações. Dessa forma, a presente pesquisa contribuiu para o sucesso do empreendimento e a redução de custos, uma vez que o processo se tornou mais eficiente.

Ressalta-se que a instrumentação geotécnica é de fundamental importância para monitorar a saúde das estruturas, e que a automatização desse processo fornece maior segurança pelo fato de possibilitar que o controle seja feito de forma remota, reduzindo a exposição de pessoas a riscos.

Este estudo apresentou as principais fontes de erros que impactam na variabilidade dos dados no processo de automação de piezômetros e em como reduzir a diferença entre as leituras manuais e automatizadas de cada piezômetro aplicando o procedimento de verificação em campo das leituras usando uma ferramenta de controle apresentada neste estudo com a finalidade auxiliar os técnicos que atuam na instalação, monitoramento e manutenção das instrumentações geotécnicas na conferência e análise crítica dos dados.

Ainda que identifique uma pequena variabilidade no processo, os resultados obtidos com a implantação das ações citadas acima, como também um trabalho de conscientização com os técnicos de campo, mostrou uma variação das leituras dentro de uma faixa limite e que traduz uma confiabilidade dos dados coletados após automação e uma melhoria significativa no processo.

A utilização de séries temporais de leituras automatizadas se revela altamente benéfica na construção de modelos computacionais de previsão, possibilitando antecipar o comportamento das estruturas com base em um registro histórico de dados. Esses modelos podem ser usados na identificação de tendências, padrões e na realização de projeções futuras, apoiando-se na qualidade e precisão dos dados históricos coletados.

Vale ressaltar que a aplicação de técnicas estatísticas necessita de aprendizado constante, onde o conhecimento do processo juntamente com a busca por uma melhoria contínua possibilita a obtenção de resultados que contribuem para o sucesso do monitoramento. É importante comentar também que o principal fator para o sucesso na redução da variabilidade é o comprometimento de todas as áreas envolvidas, desde a etapa de projeto e principalmente dos técnicos de campo e das equipes que monitoram e analisam os dados.

É importante destacar que a aplicação de técnicas estatísticas requer aprendizado contínuo, no qual o entendimento do processo, juntamente com a busca constante por melhorias, possibilita a obtenção de resultados que contribuem para o sucesso do monitoramento. Além disso, é relevante mencionar que o comprometimento de todas as áreas envolvidas, desde a fase de projeto até a análise dos dados contribuem para o sucesso na redução da variabilidade.

4.9 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

4.10 CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia de QA/QC proposta permitiu avaliar a importância de sua utilização no processo de automação de instrumentação geotécnica. A análise do estudo de caso apresentado evidenciou que a utilização dessa metodologia permite a melhoria significativa na qualidade dos dados obtidos, contribuindo para a segurança e eficiência da estrutura geotécnica. A importância de mapear e definir limites do processo nas especificações, bem como realizar o controle adequado da instrumentação, foi verificada e comprovada pelos resultados obtidos. No entanto, os seguintes aspectos devem ser considerados:

A aplicação da metodologia proposta permitiu apontar erros de leitura manual e/ou leituras associadas a comportamentos anômalos dos instrumentos durante a análise dos dados das séries históricas. Dentro deste contexto, quando um instrumento e/ou conjunto de instrumentos apresenta um comportamento não esperado em relação aos valores de referência, a equipe responsável pela estrutura deve avaliar o comportamento destes instrumentos, fazer uma inspeção visual, levantar hipóteses e entender o comportamento e condições de segurança que a barragem ou a estrutura se encontra. Somente a partir desta análise crítica e entendimento do problema, serão tomadas as ações pertinentes que podem ser desde a simples continuidade do monitoramento até ações relacionadas a intervenções (obras) que incrementem a segurança da barragem.

A geração dos gráficos e os valores de RMSE próximos a 0,08 por instrumento possibilitou a verificação de que as leituras automatizadas apresentaram bom desempenho e aderentes ao processo. Isso está diretamente relacionado à aplicação de ferramentas de controle de QA/QC implantadas no processo de automação do Dique 2. No entanto, como parte da garantia da qualidade e melhoria contínua, é importante observar criticamente os dados dos Piezômetros 2 e Piezômetro 3 que apresentaram valores baixos de R^2 como 0,29 e 0,39 respectivamente. Isso pode ocorrer por vários motivos, como um modelo inadequado, falta de variáveis importantes no modelo, suposições não atendidas, ou simplesmente porque a relação entre as variáveis é intrinsecamente complexa e não pode ser bem capturada por um modelo linear.

É fundamental que os limites superiores e inferiores adotados por esta metodologia sejam limitados por valores piezométricos e freáticos, previstos para a operação normal/adequada/prevista para cada estrutura.

Esta metodologia se mostra eficiente na identificação de leituras anômalas e/ou não previstas nos instrumentos, podendo estas serem associadas a irregularidades na estrutura, ou à exposição da estrutura a eventos excepcionais, ou ainda a potenciais modos de falha, tais como erosão interna, colmatação do sistema de drenagem interna (caso existente), trincas etc. É importante destacar que este método é relativamente simples de ser aplicado e pode trazer resultados práticos e objetivos, no sentido de alertar a equipe responsável pelo monitoramento dos instrumentos e pela segurança da estrutura monitorada quando algo está fora da normalidade, ou seja, quando algum nível de um instrumento atingir um valor pouco frequente e/ou até então nunca registrado no histórico de monitoramento. Sendo assim, seria uma das ferramentas a serem integradas ao sistema de gestão e monitoramento da estrutura.

Uma seleção criteriosa de fabricantes de equipamentos e profissionais de excelência no mercado de instrumentação, recursos para operação e supervisão de qualidade, e condições operacionais das estruturas geotécnicas, podem proporcionar um ganho significativo à qualidade do serviço, e, sempre que possível, proporcionar um número reduzido de interferências do operador. A verificação da consistência dos dados básicos, os cuidados na instalação e o julgamento de engenharia com a análise crítica dos dados obtidos do monitoramento piezométrico instalado na estrutura geotécnica apresentada nesse trabalho foram fundamentais para a avaliação do desempenho da automação da instrumentação piezométrica.

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

Vale frisar que a implantação do QA/QC não é suficiente para garantir segurança à estrutura. É imprescindível que se tenha conhecimento das características construtivas, que haja troca de experiência em obras equivalentes, que se tenha a boa prática de inspeções visuais, que se revise os planos de instrumentação e que se busque sempre elementos que despertem a percepção dos responsáveis técnicos para uma boa supervisão das condições de segurança da estrutura.

4.11 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante essa pesquisa surgiram alguns aspectos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. Em seguida, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser objeto de trabalhos futuros:

- Estudar a aplicação da metodologia de QA/QC para monitorar a eficácia de projetos de instrumentação geotécnica para diversas estruturas geotécnicas (barragens, pilhas de rejeito e estéril, cavas, taludes, aterros). Uma análise da padronização da documentação e especificações de projeto com base nas melhores práticas de mercado.
- Estudar a aplicação dos métodos QA/QC na instalação de outros instrumentos geotécnicos, como inclinômetros, medidores de vazão, extensômetros, tiltímetros etc., de maneira a complementar o processo de gestão de monitoramento das estruturas geotécnicas. Se projetados e implementados adequadamente, tais abordagens QA/QC irão melhorar a qualidade dos dados coletados, aumentar a certeza da tomada de decisão do projeto e, finalmente, economizar tempo e dinheiro.
- Mensurar os impactos da ausência de QA/QC nos processos de instrumentação geotécnica por erros de execução, falha na verificação dos dados e ações necessárias para controle do processo e possível redução de custos para o proprietário do empreendimento com a implementação desta metodologia.
- Estudar outras ferramentas de controle e métodos estatísticos e de QA/QC para melhoria da qualidade de projetos geotécnicos ligados a instrumentação.
- Utilizar técnicas estatísticas e de aprendizado de máquina para identificar anomalias em dados de monitoramento.

- Aplicar os métodos apresentados nesta dissertação e avaliar a influência das variações das leituras em relação a análise de estabilidade da estrutura geotécnica.

REFERÊNCIAS

- ADAMO, N et al (2020). **Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams**. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol. 11, nº1, 2020, 145-202, <https://doi.org/10.47260/jesge/1115>. Scientific Press International Limited Dam Safe.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. (2016). **Diretrizes para a Elaboração do Plano de Operação, Manutenção e Instrumentação de Barragens**. Brasília, DF 2016, 135 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. (2016). **Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras**. Brasília, DF 2016, 222 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. (2017;2018;2019;2020;2021). **Relatório de segurança de barragens**. Brasília, DF. Recuperado de Anteriores — Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens SNISB.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. (2021). **Entenda o Relatório de Segurança de Barragens. Versão Síntese**. Brasília, DF, 38p. Recuperado de cartilha-sintese-barragens.pdf (snisb.gov.br), 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. (2019). **Resolução nº 4**, de 15 de fevereiro de 2019. Brasília, 15 de fevereiro de 2019. Disponível em: Acesso em 26 jul. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM (Brasil). (2022). **Relatório Mensal Barragens de Rejeito, janeiro 2022**. v.3. Brasília, DF, 2022, 14 p.
- AGOSTINETTO, J. S. (2006). **Sistematização do Processo de Desenvolvimento de Produtos, Melhoria Contínua e Desempenho: O Caso de uma Empresa de Autopeças**. 2006.
- ALBUQUERQUE FILHO, L. H. (2004). **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- ARAÚJO, C. B. (2006). **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006, 133p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. (2017). **NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água**. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 10 p.
- BAECHER, G.B. et. al. (1987). **Statistical analysis of Geotechnical data**. Final Report Nº GL-87-1, USACE Waterways Experiment Station, Wickburg, MI, 1987.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. (2011). **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**: volume 1. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2011.
- BENNEYAN, J. C. (2010). **Statistical quality control methods in infection control and hospital epidemiology** Part I. v. 19, n. 3, p. 194–214, 2010.

BNDES (2017). **Desafios da mineração: desenvolvimento e inovação para redução dos impactos ambientais e sociais.** Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/inovacao-tecnologia-mineracao-metais>. Acesso: 01/02/2023.

BRAGA, M. C. dos R. (2021). **Mudanças de política ambiental motivadas por catástrofes [manuscrito]: lições dos rompimentos de duas barragens de rejeitos no Brasil.** / Michelle Cristina dos Reis Braga. - 2021.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. (2010). **Lei nº 12.334**, de 20 de set. de 2010. Disponível em: [Lei n 12.334-2010.pdf](#) — Português (Brasil) (www.gov.br). Acesso em 29 jul. 2022.

BRESSANI, L. A. **Instrumentação em obras geotécnicas–taludes e escavações.** In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas. Anais. São Paulo, SP. 2009.

CABRAL, P. (2004). **Erros e Incertezas nas Medições.** IEP - Instituto Eletrotécnico Português e ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2004.

CAMPOS, V. F. (1992). **TQC: Controle da Qualidade Total (no estilo japonês).** Belo Horizonte, MG: Fundação Cristiano Otoni, 1992.

CAMPOS, V. F. (2009). **O Verdadeiro Poder: Práticas de Gestão que Conduzem a Resultados Revolucionários.** 1. ed. [s.l.] Falconi, 2009.

CARDOZO, N. S. (2019). **Instrumentação geotécnica: conceitos básicos, ensaios e aplicações.** Oficina de Textos.

CARPINETTI, L. C. R. (2010). **Gestão de Qualidade: conceitos e técnicas.** São Paulo: Atlas, 2010.

CARVALHO, Marly Monteiro de; PALADINI, Edson Pacheco. (2005). **Gestão da qualidade: teorias e casos.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

CASTRO, L. V. P. (2008). **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante.** Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia ambiental. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

CERQUEIRA, H. M. L. (2017). **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas em mineração** – Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-graduação em Geotecnia. 2017.

CHIAVENATO, I. (2000). **Administração nos novos tempos.** Rio de Janeiro: Elsevier.

CLARKSON, R.; TETI, R. (2020). **Digital transformation in mining: Enabling a mining organization to become digitally mature.** Journal of Cleaner Production, 261, 121225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121225>

COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS - CBDB (Brasil). (1996). **Auscul-tação e Instrumentação de barragens no Brasil**. Belo Horizonte: CBDB - Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 1996. 123 p.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS-CNRH (2012). **Resolução No 143**, de 10 de julho de 2012.

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. (2005). **Controle estatístico de qualidade**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2005. 334 p.

CRUZ, P.T. (1996) **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CRUZ, P. T. da. (2004). **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 680 p.

DEMING, W.E (1986). **Out of crisis**. MIT Center for Advanced Engineering Study. Cambridge University Press.

DEMING, W.E (1990). **Qualidade: A revolução da Administração**. Rio de Janeiro: Marques-Saraiva, 1990.

DUARTE, A. P. (2008). **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

DUNNICLIFF, J. (1988). **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. EUA: Ed. John Wiley and Sons, 1988, 577p.

DUNNICLIFF, J. (1993). **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. New Yourk: Ed. John Wiley and Sons, 1993.

EL-RAMLY, H. (2001). **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice**. Thesis (Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering), Faculty of Graduate Studies and Research, Department of Civil and Environmental Engineering. Edmon-ton, Alberta, Canada; 391 p.

FERNANDES, R. B. (2020). **Metodologia para gestão de risco em barragens a partir de árvore de eventos e análise FMEA**. Tese de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), 2020, 243 p.

FERNANDES, R. B. (2022). **Inspeção, monitoramento e estabilidade de barragens**. Vol.I e II – 1. Ed. Appris.

FONTENELLE, A. S. **Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nor-deste brasileiro** - estudo de caso: barragens do Estado do Ceará. 2007. 213 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 2007.

FONSECA, A. R. (2003). **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. Dissertação apresentada como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia civil. Ouro Preto: UFOP.

GAIOTO N. (2003). **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. São Carlos: Ed. USP São Carlos, Brasil, 2003, 126p.

GOLDER (1999). **Operating manual for the tailings management facility at the Lisheen mine**. Ireland: Golder Associates, 1999. p. 81. (Report No. 99640128).

GUIMARÃES FILHO, U. (2021). **A importância da instrumentação automatizada para a gestão de segurança de barragens**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá-MG.

HANNA, T. H. (1985). **Field Instrumentation in geotechnical engineering**. Series on rock and soil Mechanics. United States of America, 1985. 843 p. v. 10. (ISBN: 0080-9004).

HELENE, P. R. L., & Cervi, W. R. (1997). **Ferramentas estatísticas básicas para o controle da qualidade**. Atlas.

HYNDMAN, R. J. (2018). **Forecasting: principles and practice**. (2nd ed.). OTexts.

HU, Jun; LIU, Xingzong. **Design and implementation of tailings dam security monitoring system**. Procedia Engineering, v. 26, p. 1914-1921, 2011.

HUI, S., CHARLEBOIS Charlebois, D., & SUN, W. (2017). **Risk-based inspection and maintenance of tailings dams**. Canadian Geotechnical Journal, 54(10), 1358-1367. doi: 10.1139/cgj-2016-0378.

HVORSLEV, M.J. (1951). **Time lag and soil permeability in ground-water observations**. Bull. No. 36, Waterways Experiment Station. Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, 50p.

IBRAM (2016). Instituto Brasileiro de Mineração. **Guia de Boas Práticas: Mineração Sustentável na Área de Influência de Unidades de Conservação**. 1ª ed. Brasília: IBRAM, 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em 28 de jul., 2022.

IBRAM (2019). **Guia de Boas Práticas. Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos**. Brasília, 2018, 144 p. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2019/09/arte_gestao_barragem_ibram_web.pdf. Acesso em 28 de jul., 2022.

INMETRO (2012). **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados**. 3ª ed. Duque de Caxias - Rio de Janeiro, 2012. ISBN 978-85-86920-09-7.

IPEA. (2012). **Atividade mineradora no Brasil e seu impacto na economia**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/4571/1/RA_v41_mineracao.pdf. Acesso em: 03 mai. 2022.

JOHNSON, C. (2002). **The benefits of PDCA: use this cycle for continual process improvement Quality Progress**, 2002. Disponível em: <https://www.proquest.com/docview/214762325?pq-origsite=gscholar&fromopenview=true>

JURAN, J. M. (2009). **A qualidade desde o projeto: novos passos para o planejamento da qualidade em produtos e serviços**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

KOURTI, T.; MACGREGOR, J. F. J. F. (1985). **Process analysis, monitoring and diagnosis, using multivariate projection methods**. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, v. 28, p. 3–21, 1995.

MACHADO, W. G. de F. (2007). **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. 2007. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – USP (Universidade de São Paulo), São Paulo - SP. 2007.

MARSHALL, I. Jr. (2006). **Gestão da Qualidade**. 8 ed. Rio de Janeiro - RJ. Editora FGV., 2006. 195 p.

MONTES, E. (2020). **Ferramentas de Qualidade: Gráfico de Controle**. Disponível em: <https://escritoriodeprojetos.com.br/grafico-de-controle>. Acesso: 10 de janeiro de 2023.

MONTGOMERY, D.C. (2004, 2009, 2012). **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4^a Ed. Rio de Janeiro: LTC.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. (2016). **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros - 7^a ed.** - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

PANIAGO, L. **Panorama Mundial da regulamentação de Segurança de Barragens**. Brasil, 2019. Disponível em: Acesso em: 03 abr. 2019.

PAWLICKI, T.; WHITAKER, M.; BOYER, A. L. (2005). **Statistical process control for radiotherapy quality assurance**. *Medical Physics*, v. 32, n. 9, p. 2777–2786, 2005.

PIASSENTINI, C. (2005). **Considerações Sobre a Importância das Observações Visuais na Auscultação de Barragens**. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, p. 149- 155, Salvador, BA.

QUISPE, C. C; FONTES, M.M. M; CARDOSO, J. C. M. (2018). **Instrumentação em barragens: a automatização é realmente uma necessidade?** In: Cobramseg 2018, Salvador, BA.

RAMOS, E. M. L S.; ALMEIDA, S. S.; ARAÚJO, A. R. (2013). **Controle estatístico da qualidade**. Porto Alegre: Bookman, 2013. 176p.

REIS, R. F. (2018). **Sistema de Medição Automatizado e com transmissão de dados para monitoramento de recalques em Obras de Aterros Sanitários**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Capina Grande-PB, 107 p.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, S. T. (2012). **Série Monográfica Qualidade**. Porto Alegre: FE-ENG/UFRGS, 2012. 172p. ISBN 85-88085-10-0. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título. IV.

RIZZO, S. M. (2007). **Monitoramento das escavações de uma área de rejeito de bauxita**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Da Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ROSSO, J.A. e Piasentin, C. (1996). Critérios Usados nos Projeto de Auscultação da Barragem de Itaipu e a sua Reavaliação com Base no Desempenho da Instrumentação. CBGB - II Simpósio Sobre Instrumentação de Barragens, Volume 2, p. 33-42.

RUSSO, Felipe de Moraes (2007). **Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo**. Tese de Doutorado em Geotecnia. UnB-Universidade de Brasília-DF, 295 p.

SAMOHYL, Robert Wayne. **Controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SANTIL, Fernando Luiz de Paula; QUEIROZ, Deise Elias Regina (1996). **Leitura e entendimento dos elementos contidos numa carta topográfica**. Boletim de Geografia, Maringá, v. 14, n. 1, p 41-49, 1996a. Disponível em: <<http://www.periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/12884/7337>> Acesso em: 25 ago. 2023.

SILVA, J. M., JÚNIOR, O. C., COSTA, A. L. C., & DA COSTA, F. B. (2019). **Análise de risco e suas implicações em barragens de rejeitos**. Revista Matéria, 24(4), e12376.

SILVA NETO, M. A. et al. (2010). **Técnicas de mineração visual de dados aplicadas aos dados de instrumentação da barragem de Itaipu**. Gestão & Produção, São Carlos, v. 17, n. 4, p. 721-734, dez. 2010.

SILVEIRA, J.F.A. (1979). **Glossário de Instrumentação**. São Paulo: ABGE, 1979.

SILVEIRA, J.F.A. (2006). **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de textos, 2006, 416p.

SILVEIRA, J.F.A. (2011). **Segurança e Controle de Risco na Realização e Operação de Barragens**, XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, RJ.

SHEWHART, W. A. (1924, 1993). **Economic Control of Quality of Manufactured Product**. The American Mathematical Monthly, v. 40, n. 6, p. 353, jun. 1933.

SOARES, L (2010). Barragem de rejeitos. In: Luz, A.U.; Sampaio J. A.; França, S. C. A. (Orgs). **Tratamento de Minérios**. (5ª ed., Cap. 19, pp. 831-888). Rio de Janeiro, Brasil: Cetem, 867p.

SOUZA JUNIOR, Moreira, Heineck (2018). **Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil**. Holos, Ano 34, Vol. 05, 2018.

TOLEDO, J.C. (1987). **Qualidade Industrial: conceitos, sistemas e estratégias**. São Paulo: Atlas, 1987.

USACE – United States Army Corps of Engineers. (1995). **Design manual EM-1110-2-1908: Instrumentation of Embankment Dams and Levees**. Washington, 1995.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers Headquarters. (2006). **Reliability Analysis and Risk Assessment for Seepage and Slope Stability Failure Modes for Embankment Dams**.

USACE - United States Army Corps of Engineers. (2011). **The history of dam safety in the United States**.

VELOSO, L. A. C. M., et al. (2007). **Projeto de pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) para Automação da Instrumentação das Obras Civas da UHE Tucuruí**. In XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belém-PA, 03 a 07 de junho de 2007. Belém: Comitê Brasileiro de Barragens.

VICK, S. G. (1990). **Considerations for estimating structural response probabilities in dam safety risk analysis**. Denver, Colorado: U.S. Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 1999.

VIEIRA, M. F., et al. (2017). **Influência do lago da UHE Tucuruí sobre a barragem de concreto: um estudo sobre os MTJ's**. Revista CIATEC-UPF.2017, Vol.9 Issue 1, p1-14. 14p.

ZATELLI, K. S. (2019). **Segurança das barragens de mineração ao redor do mundo: arcabouço legal**. Disponível em: <https://www.matanativa.com.br/seguranca-barragens-mineracao-mundo/>. Acesso em 15 jul. 2022.