

Universidade Federal de Ouro Preto

Núcleo de Geotecnia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica

PPGEG

Dissertação

**Proposta de metodologia para
definição dos níveis de controle da
instrumentação associados aos modos
de falha: estudo de caso em uma
barragem para disposição de rejeito de
mineração**

Rodrigo de Aguiar Marinaro

Ouro Preto
2022



UFOP

Rodrigo de Aguiar Marinaro

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA
DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE DA
INSTRUMENTAÇÃO ASSOCIADOS AOS
MODOS DE FALHA: ESTUDO DE CASO EM
UMA BARRAGEM PARA DISPOSIÇÃO DE
REJEITO DE MINERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**.

ESCOLA DE MINAS / UFOP

Área de Concentração: Geotecnia Aplicada à Mineração

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira

Ouro Preto, 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M337p Marinaro, Rodrigo de Aguiar.

Proposta de metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação associados aos modos de falha [manuscrito]: estudo de caso em uma barragem para disposição de rejeito de mineração. / Rodrigo de Aguiar Marinaro. - 2022.

159 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica.

Área de Concentração: Geotecnia Aplicada à Mineração.

1. Barragens e açudes - Segurança. 2. Barragens de rejeitos - Cartas de riscos. 3. Barragens de rejeitos - Níveis de Controle. I. Ferreira, Lucas Deleon. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13:622

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rodrigo de Aguiar Marinaro

Proposta de metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação associados aos modos de falha: estudo de caso em uma barragem para disposição de rejeito de mineração

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica, área de concentração Geotecnia aplicada à Mineração**.

Aprovada em 1º de julho de 2022

Membros da banca

Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profª. Drª. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa - (Universidade Federal de Minas Gerais)
Profª. Drª. Karla Cristina Araújo Pimentel Maia - (Vale S.A.)

Prof. Lucas Deleon Ferreira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 01/09/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Deleon Ferreira, COORDENADOR(A) DO MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA GEOTÉCNICA**, em 02/09/2022, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0391938** e o código CRC **B22781B7**.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais,
Pelo exemplo de luta e
Determinação que me impulsionaram
Nesta caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus tudo que Ele tem me proporcionado ao longo de minha vida, sempre se fazendo presente em todos os momentos.

Aos meus pais, agradeço a criação e dedicação para que eu me tornasse o homem que sou hoje.

Ao meu pai Paulo, a amizade, a confiança e o esforço para me propiciar um estudo de qualidade.

À minha mãe Virginia, o carinho, o amor incondicional e a dedicação desde sempre.

À minha namorada Jacqueline, o incentivo para que eu buscasse meus sonhos e metas e a compreensão durante minhas ausências.

Agradeço aos meus avós, a criação de uma família sólida, destacando principalmente a minha avó Elna Ribeiro, pessoa que me mostrou o verdadeiro amor e sentido da vida.

Ao meu querido avô Levi Fernandes, que infelizmente não está presente entre nós, mas tenho certeza de que, de onde ele estiver, se orgulhará do seu neto.

Ao meu irmão Gustavo, o carinho, o companheirismo e respeito.

Ao meu eterno mestre e amigo Washington Pirete, os ensinamentos, as orientações e aprendizado. Agradeço ter acreditado no meu potencial e me ensinado os fundamentos práticos e teóricos da Engenharia Geotécnica.

À VALE S/A.

Aos meus colegas de empresa, o incentivo e ajuda sempre que precisei.

Em especial ao colega Magno de Oliveira, a contribuição e a amizade que em um curto espaço de tempo foram fundamentais para me incentivar a concluir mais esta etapa.

Ao Professor Dr. Lucas Deleon Ferreira, que me deu a honra de tê-lo como orientador na elaboração deste trabalho, a forma prática e direta nos envios das valiosas contribuições.

Aos Professores e colegas do programa de Mestrado do NUGEO, a transmissão do conhecimento.

Obrigado 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.

Rodrigo de Aguiar Marinaro, 2022.

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

Filipenses 4:13

RESUMO

No setor mineral é cada vez mais frequente a elaboração de “carta de risco” como ferramenta de gestão de segurança, principalmente após ser exigida por alguns órgãos fiscalizadores/regulatórios de barragens, através da definição de níveis de controle da instrumentação. No entanto, a definição dos níveis de controle por meio da abordagem comumente utilizada no setor possui limitações e não deve ser utilizada isoladamente como instrumento de gestão de segurança de barragens. Este trabalho objetiva correlacionar os parâmetros avaliados aos possíveis modos de falha e, a partir de uma abordagem qualitativa e quantitativa, definir os níveis de controle da instrumentação de uma barragem de rejeito, denominada neste trabalho como Barragem-Piloto. A consistência dos dados básicos, o julgamento de engenharia com a análise crítica dos dados conjuntos da instrumentação foi fundamental e priorizado na avaliação de desempenho e comportamento da estrutura avaliada. A partir do entendimento dos mecanismos que controlam o comportamento da barragem, foi possível associar aos respectivos modos de falha aplicáveis na estrutura. Neste estudo de caso considerou-se o modo de falha instabilização, uma vez que os resultados revelaram a possibilidade de ocorrência deste modo de falha na estrutura. E com isto definiu-se os parâmetros que precisam ser monitorados. A interpretação destes parâmetros ocorreu por meio da adoção de métodos determinísticos e estatísticos. Como resultado, pode-se estabelecer zonas de aceitação ou não aceitação da leitura da instrumentação e a partir daí auxiliar na tomada de decisão e investigação de um comportamento anômalo da barragem. Sendo assim, concluiu-se que foi possível fazer uma crítica construtiva das atuais cartas de riscos usualmente utilizadas por métodos determinísticos para definição dos níveis de controles da instrumentação.

Palavras-chave: Segurança de Barragens; Cartas de Riscos; Modos de falhas; Níveis de Controles; Instrumentação.

ABSTRACT

In the mineral sector, the preparation of "risk cards" as a safety management tool is increasingly frequent, especially after being required by some dam inspection / regulatory bodies through the definition of instrumentation control levels. However, the definition of control levels through the approach commonly used in the sector has limitations and should not be used in isolation as a dam safety management tool. This work aims to correlate the parameters provided to the possible failure modes and, from a qualitative and quantitative approach, define the instrumentation control levels of a tailings dam called here this work as a Pilot Dam. The consistency of the basic data, the engineering judgment with the critical analysis of the instrumentation datasets was fundamental and prioritized in the evaluation of the performance and behavior of the evaluated structure. From the understanding of the mechanisms that control the behavior of the barrier, it is possible to associate the applicable failure modes. In this case study, consider the failure destabilization mode, since the results revealed the possibility of occurrence of this failure mode in the structure and with that defined the parameters that need to be monitored. The interpretation of these parameters occurs through the adoption of deterministic and statistical methods. As a result, it is possible to establish the acceptance or non-acceptance zones of the instrumentation reading and from there, assist in decision making and investigation of an anomalous behavior. Thus, it is concluded that it was possible to make a constructive criticism of the risk charts usually used by deterministic methods to define the levels of instrumentation controls.

Keywords: Dam Safety; Risk Dam Letter; Failure Modes; Levels of Controls; Instrumentation.

Lista de Figuras

Figura 2-1 – Causas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos, segundo o ICOLD	8
Figura 2-2 – Causas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos (Penna <i>et al.</i> , 2017)	8
Figura 2-3 – Causas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos, segundo Zhang <i>et al.</i> (2009)	10
Figura 2-4 – Principais subcausas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos, segundo Zhang <i>et al.</i> (2009) (Modificado de Zhang <i>et al.</i> , 2009)	10
Figura 2-5 – Segmentação dos Modos de Falha propostos por Rico <i>et al.</i> (2008) e modificado de Taguchi (2014) (Penna <i>et al.</i> , 2017)	11
Figura 2-6 – Segmentação dos Modos de Falha propostos por ICOLD (2001)	11
Figura 2-7 – Relação entre Fator de Segurança e piezometria e altura em barragens	14
Figura 2-8 – Mecanismos de falha em Barragens (Penna <i>et al.</i> , 2017)	15
Figura 2-9 – Carta de Risco de Barragens (Penna <i>et al.</i> , 2017)	16
Figura 2-10 – Valores de controle para piezômetros – Barragem de Emborcação	17
Figura 2-11 – Valores de Referência para Piezômetro – Barragem do Piau	17
Figura 2-12 – Série histórica de leitura, com linhas representando os Valores de Referência	18
Figura 2-13 – Vista de jusante do experimento (Vazques, 2014)	21
Figura 2-14 – Sequência do experimento (Adaptado de Vazques, 2014)	21
Figura 2-15 – Fluxo de Trabalho para Desenvolvimento do Programa de Monitoramento	25
Figura 2-16 – Determinações da PNSB quanto aos órgãos fiscalizadores e ao PSB	28
Figura 2-17 – Linha do tempo dos principais instrumentos legais avaliados na pesquisa de Braga (2021)	29
Figura 2-18 – Quantidade de barragens considerando a percolação nas barragens, de acordo com a pontuação obtida, dezembro/2016) (Danese, 2020)	33
Figura 3-1 – Mapa de localização da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2017)	34
Figura 3-2 – Maciço inicial da barragem em 1999 (Tetra Tech, 2017)	35
Figura 3-3 – Seção da barragem após o alteamento em 2007 (Tetra Tech, 2017)	35
Figura 3-4 – Seção da barragem após a berma de reforço em 2014 (Tetra Tech, 2017)	35
Figura 3-5 – Seção típica da barragem (Tetra Tech, 2017)	36
Figura 3-6 – Elementos do sistema extravasor da Barragem-Piloto. A) Canal de aproximação; B) Emboque/soleira; C) Descida d'água com dissipação em degraus; D) Bacia de dissipação por ressalto (Vale, 2018)	37
Figura 3-7 – Instrumentos instalados na Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)	38

Figura 3-8 – Distribuição com intervalos de aceitação e rejeição, para um grau de confiança	43
Figura 3-9 – Distribuição Normal (VALE, 2015)	43
Figura 3-10 – Croqui esquemático do cenário de ocupação crítica do reservatório (Tetra Tech, 2018).....	50
Figura 3-11 – Croqui esquemático para cálculo de volumes para amortecimento de cheias para pequenos reservatórios (Tetra Tech, 2018)	52
Figura 3-12 – Croqui esquemático para cálculo de volumes para amortecimento de cheias para reservatórios com morfologia complexa (Tetra Tech, 2018)	52
Figura 4-1 - Histórico de leituras do NA do reservatório (Tetra Tech, 2018).....	59
Figura 4-2 – Histórico de leituras das vazões da drenagem interna (Tetra Tech, 2018).....	60
Figura 4-3 – Histórico de leituras de Piezômetros e INAs (Tetra Tech, 2018).....	62
Figura 4-4 – Histograma dos registros obtidos pelo piezômetro BRUBSLCPZ018.....	67
Figura 4-5 – Definição dos níveis de controle para o piezômetro BRUBSLCPZ018.....	67
Figura 4-6 – Curvas de nível para o cenário de ocupação crítica do reservatório.....	72
Figura 4-7 – Curva cota vs. volume para o cenário de ocupação crítica do reservatório.....	73
Figura 4-8 – Comparação entre as curvas Cota vs. Volume do cenário crítico de ocupação e do cenário atual (Tetra Tech, 2018).....	73
Figura 4-9 – Curva de descarga do sistema extravasor da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)	75
Figura 4-10 – Resultado do trânsito de cheias pelo reservatório da Barragem-Piloto (TR=10.000 anos) (Tetra Tech, 2018)	76
Figura 4-11 – Superfície freática definida na seção 01 da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)	78
Figura 4-12 – Resultado da análise de estabilidade da seção 1 da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018).....	79
Figura 4-13 – Análise de estabilidade da seção 1 com análise de fluxo referente ao FS=1,5 (Tetra Tech, 2018)	80
Figura 4-14 – Análise de estabilidade da seção 1 com análise de fluxo referente ao FS=1,3 (Tetra Tech, 2018).....	81

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Etapas para a elaboração de um sistema de instrumentação e monitoramento (Modificado de Usace, 1995)	7
Tabela 2-2 – Causas e subcausas do rompimento de barragens (Modificado de Zhang <i>et al.</i> , 2009).....	9
Tabela 2-3 – Limites estabelecidos de acordo com níveis de controle (Modificado de Glunt <i>et al.</i> , 2004).....	19
Tabela 2-4 – Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor (ABNT NBR 13028, 2017).....	20
Tabela 2-5 – Efetividade dos métodos de detecção de falhas em barragens (Modificado de Penna <i>et al.</i> , 2015).....	22
Tabela 2-6 – Contextualização do monitoramento crítico e estratégico segundo Pimentel <i>et al.</i> (2021)	25
Tabela 2-7 – Classificação dos parâmetros e instrumentos do Programa de Monitoramento (Adaptado de Pimentel <i>et al.</i> , 2021).....	26
Tabela 2-8 – Parâmetros medidos\observados e modos de falha (Adaptado de Pimentel <i>et al.</i> , 2021).....	27
Tabela 2-9 – Correlação de Leis, Deliberações, Resoluções e Termos de Referência para Gestão de Barragens no Estado de Minas Gerais	30
Tabela 3-1 – Métodos analisados e Modos de Falha Associados	40
Tabela 3-2 – Modos de Falha, Componentes e Causas Identificadas para a Barragem-Piloto	41
Tabela 3-3 – Matriz de Classificação quanto a Categoria de Risco – Estado de Conservação (Brasil, 2022).....	47
Tabela 3-4 – Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor (ABNT NBR 13028, 2017).....	49
Tabela 3-5 – Parâmetros geotécnicos da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018).....	55
Tabela 4-1 – Piezômetros e INAs – seções transversais (Tetra Tech, 2018)	57
Tabela 4-2 – Piezômetros e INAs – seções longitudinais (Tetra Tech, 2018)	58
Tabela 4-3 – Fichas de Inspeção de Segurança Regular - Estado de Conservação.....	64
Tabela 4-4 – Valores máximos, mínimos e médios dos Piezômetros e INAs.....	68
Tabela 4-5 – Níveis de controle para medidor de vazão da drenagem interna.....	70
Tabela 4-6 – Parâmetros físicos e hidrológicos da área de drenagem da Barragem-Piloto (Tetra	

Tech, 2018).....	74
Tabela 4-7 – Resultados do trânsito de cheias pelo reservatório da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018).....	76
Tabela 4-8 – Comparativo entre nível piezométrico de campo e modelo computacional (Tetra Tech, 2018).....	78
Tabela 4-9 – Leituras da instrumentação da seção 1 referentes ao FS=1,5 (Tetra Tech, 2018)	80
Tabela 4-10 – Leituras da instrumentação da seção 1 referentes ao FS=1,3 (Tetra Tech, 2018)	81
Tabela 4-11 – Níveis de controle dos instrumentos instalados na seção 1 da Barragem-Piloto – Carta de Risco (Tetra Tech, 2018)	82
Tabela A4-1 – Piezômetros ativos instalados na Barragem-Piloto	I
Tabela A-4-2 – Indicadores de nível de água ativos instalados na Barragem-Piloto.....	III
Tabela A4-3 – Régua limnimétrica ativa instalada na Barragem-Piloto	III
Tabela A-4-4: Medidores de vazão ativos instalados na Barragem-Piloto	III
Tabela A-4-5: Resumo da seção longitudinal 1 (SL-1).....	I
Tabela A-4-6: Resumo da seção longitudinal 2 (SL-2).....	I
Tabela A-4-7: Resumo da seção longitudinal 3 (SL-3).....	II
Tabela A-4-8: Resumo da seção longitudinal 4 (SL-4).....	II
Tabela A-4-9: Resumo da seção longitudinal 5 (SL-5).....	III
Tabela A-4-10 – Resumo da seção longitudinal 6 (SL-6).....	IV
Tabela A-4-11 – Resumo da seção longitudinal 7 (SL-7).....	V
Tabela A-4-12 – Resumo da seção longitudinal 8 (SL-8).....	VI
Tabela A-4-13 – Resumo da seção transversal 1 (ST-1).....	VI
Tabela A-4-14 – Resumo da seção transversal 2 (ST-2).....	VII
Tabela A-4-15 – Resumo da seção transversal 3 (ST-3).....	VII
Tabela A-4-16 – Resumo da seção transversal 4 (ST-4).....	VIII
Tabela A-4-17 – Resumo da seção transversal 5 (ST-5).....	VIII

Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CRI	Categoria de Risco
DN	Deliberação Normativa
DPA	Dano Potencial Associado
EC	Estado de Conservação
EI	Elevação
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FERC	Federal Energy Regulatory Commission
FIR	Ficha de Inspeção de Segurança Regular
FS	Fator de Segurança
H	Altura do maciço
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IC	Intervalo de Confiança
ICOLD	International Commission on Large Dams
INA	Indicador de Nível d'Água
ISO	International Organization for Standardization
L	litro
L/s	litro/segundo
m	metro
m/s	metro/segundo
m ³	metro cúbico
m ³ /s	metro cúbico/segundo
n	número de elementos
NA	nível d'água
NBR	Norma Brasileira
PMP	Precipitação Máxima Provável
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragem

PZ	Piezômetro
QF	Quadrilátero Ferrífero
Q	vazão
RAL	Relatório Anual de Lavra
s	segundo
Sd	desvio padrão
V	volume
TR	Tempo de Retorno
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez

Lista de Anexos

Anexo I	I-1
Anexo II	II-1
Anexo III	III-1
Anexo IV	IV-1
Anexo V	V-1

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	4
Capítulo 2	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL.....	5
2.1.1 Modos de Falha de Barragens	7
2.2 METODOLOGIAS EXISTENTES PARA DEFINIÇÃO DE NÍVEIS DE CONTROLES	
15	
2.2.1 Segurança de Barragens.....	28
Capítulo 3	34
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.1.1 Levantamento dos Dados de Monitoramento.....	37
3.1.2 Consolidação e análise crítica dos dados de monitoramento	39
3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE	
POR MODOS DE FALHA	40
3.2.1 Identificação das Causas e Modos de Falha da Barragem-Piloto.....	41
3.2.2 Método 1 - Análise do Monitoramento por Histórico de Leituras dos Instrumentos	
42	
3.2.2 Método 2 - Inspeções Visuais.....	46

3.2.3 Método 3 - Análise do Volume Mínimo de Amortecimento para as Cheias	48
3.3 Interpretação dos Níveis de Controle	53
3.3.1 Análise dos níveis de controle atuais da Barragem-Piloto	54
Capítulo 4	56
RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 ANÁLISE DOS DADOS DE MONITORAMENTO DA BARRAGEM-PILOTO	56
4.1.1 Nível de água do reservatório da Barragem-Piloto	59
4.1.2 Medidas de vazão da drenagem interna da Barragem-Piloto	60
4.1.3 Piezômetros e Indicadores de Nível d'água da Barragem-Piloto	61
4.2 Avaliação dos Resultados por Modos de Falha	63
4.2.1 Modo de Falha: Erosão Interna	63
4.2.2 Modo de Falha: Instabilização	66
4.2.3 Modo de Falha: Galgamento	71
4.2.4 Apresentação dos atuais níveis de controle da Barragem-Piloto	77
Capítulo 5	84
CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA	84
5.2 CONCLUSÃO	85
5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS	88

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A definição dos níveis de controle para a instrumentação de barragens é um requisito legal que deve constar no Volume III – Registros e Controle do Plano de Segurança de Barragens (PSB), conforme estabelecido na Resolução ANM N.º 95 de 07 de fevereiro de 2022 (Brasil, 2022) a qual consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. A referida Resolução define níveis de controle da seguinte forma:

Níveis de Controle: níveis que delimitam os limites aceitáveis de auscultação para cada instrumento da estrutura visando subsidiar a tomada de decisão para ações preventivas e corretivas, utilizado como um dos elementos para a avaliação de segurança da barragem, devendo ser definido individualmente para cada estrutura através de avaliações de segurança e classificados nos níveis normal, alerta e emergência.

É importante mencionar que embora seja um requisito legal, a referida Resolução não define a metodologia a ser aplicada para a definição destes níveis de controle da instrumentação (Brasil, 2022). No setor mineral, atualmente, é comum a utilização de um instrumento denominado “carta de risco” para a definição de níveis de controle, para a instrumentação “piezômetros e indicadores de nível de água” (Penna *et al.*, 2017).

Ainda de acordo com este autor, há certas limitações na aplicação deste método. Além disto, a denominação de carta de risco é equivocada do ponto de vista epistemológico, relacionado à estimativa dos níveis de risco, tratando (na verdade) dos níveis de controle relacionados a alguns instrumentos de monitoramento e não de riscos. Os valores limites descritos nas cartas de risco contemplam apenas o modo de falha por instabilização do maciço e não alertam para falhas por erosão interna, galgamento e liquefação.

A estatística de rupturas de barragem indica que o modo e falha por instabilização corresponde apenas a uma parcela das causas de acidentes com barragens (*International Commission on Large Dams [ICOLD], 2001; Rico, 2008*). Além disto, o estabelecimento de limites apenas para magnitude das leituras impede a identificação de tendências anômalas, que poderiam ser

detectadas antes de o valor limite ser atingido. Considerando que as alterações (elevação ou rebaixamento) dos níveis piezométricos/freáticos acontecem gradativamente, a existência de um valor de limite estático pode provocar atraso na tomada de decisões para adequação de eventuais anomalias e/ou desempenho geotécnico não satisfatório (Penna *et al.*, 2017; Souza, 2018).

Frente às limitações da carta de risco, verifica-se a relevância da abordagem de formas alternativas de se estabelecer estes limites de referência. Este trabalho objetiva estabelecer a interpretação de níveis de controle para monitoramento geotécnico de barragens, a partir da análise dos parâmetros associados a possíveis modos de falha aplicáveis à estrutura.

De acordo com Taguchi *et al.* (2014) e Penna *et al.* (2017), é possível estabelecer quatro modos de falha típicos em barragens: i) erosão interna ou *piping*; ii) instabilização; iii) galgamento; e iiiii) liquefação. Por meio de uma abordagem qualitativa e quantitativa foram estabelecidos níveis de controle da instrumentação de uma barragem de rejeito utilizada como estudo de caso, denominada neste trabalho como Barragem-Piloto.

A consistência dos dados básicos, o julgamento de engenharia com a análise crítica dos dados obtidos pelo sistema de monitoramento instalado foi fundamental e priorizado na avaliação de desempenho e comportamento da estrutura avaliada (Souza, 2018).

1.2 JUSTIFICATIVA DA DISSERTAÇÃO

A utilização do nome “carta de risco” (comumente adotado) apresenta implicações quando associado ao conceito de risco. De acordo com a ABNT NBR ISO 31.000 (2009), “o risco pode ser definido como o efeito da incerteza nos objetivos, sendo expresso em termos de uma combinação de consequências do evento e a probabilidade de ocorrência associada”. Observa-se que a definição do risco depende fundamentalmente da determinação destes dois parâmetros: probabilidades e consequências.

Neste sentido, Penna *et al.* (2017) julgam que a utilização dos termos “níveis de referência da instrumentação” ou “níveis de controle” são mais apropriadas que o termo “carta de risco”.

A utilização de níveis de controle do sistema de monitoramento geotécnico na gestão de

segurança de barragens deve ser adotada com cautela e ser considerada como uma ferramenta complementar dentro de um processo mais amplo e abrangente de segurança de barragens. Segundo Penna *et al.* (2017), a metodologia adotada na elaboração do instrumento, comumente denominado carta de risco, apresenta alguns fatores que podem limitar a sua aplicação como única ferramenta de gestão de segurança de uma barragem:

- As estatísticas de ruptura de barragens indicam que a instabilização corresponde apenas a uma parcela das causas de acidentes com barragens;
- Os níveis de controle da instrumentação são específicos para o modo de falha de instabilização, não sendo considerados os demais modos de falha;
- Em alguns casos verifica-se que a utilização da carta de risco pode acarretar situações indesejáveis dentro do processo de gestão de segurança da barragem.

É importante destacar que além das limitações da carta de risco, torna-se imprescindível a definição dos níveis de controle na gestão do monitoramento, principalmente para muitos instrumentos.

A introdução de outras metodologias para definição dos níveis de controle da instrumentação deve ser feita de maneira gradual, sem a extinção da carta de risco, haja vista que este método faz parte da própria cultura de gestão de segurança de barragens. Neste contexto, não se pode desprezar a importância do estabelecimento dos níveis de controle nos sistemas de gestão de riscos da estrutura, sendo esta definição de extrema relevância em sistemas que contam com um elevado grau de instrumentação baseado em um número significativo de instrumentos. Destaca-se que em alguns casos, a carta de risco eventualmente poderá ser substituída por outros métodos e em outros poderá ser complementada por uma metodologia alternativa.

1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral apresentar uma metodologia para definição dos níveis de controle da instrumentação de uma barragem de terra para fins de disposição de rejeito de mineração, considerando os modos de falha instabilização, erosão interna e galgamento. O

modo de falha liquefação não será abordado neste trabalho devido às características técnicas da estrutura que serão apresentadas no item 4.1 deste trabalho.

1.3.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Apresentar o processo de definição dos valores de controle e/ou níveis de referência da instrumentação de uma barragem de disposição de rejeito de mineração;
- Apresentar a metodologia de definição dos níveis de controle para instrumentação por modos de falha;
- Fazer uma análise crítica da atual “carta de risco” da Barragem-Piloto.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos, sendo tratada uma breve apresentação ao tema relacionado ao trabalho no primeiro capítulo. No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre assuntos relacionados ao tema central desta dissertação. No terceiro capítulo são abordados os materiais (descrição da barragem utilizada no estudo de caso, e sistema de monitoramento desta estrutura) e métodos que serão utilizados na análise dos dados obtidos no sistema de monitoramento. No quarto capítulo são feitas análises e discussões de resultados, sendo o último capítulo composto por conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item será apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos principais modos de falha de barragens, bem como as metodologias comumente utilizadas na definição dos níveis de controle do sistema monitoramento de barragens.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL

Barragens são obras de engenharia de natureza altamente indeterminada, submetidas a condições que podem variar de infinitas formas, colocando em risco a segurança da estrutura (Federal Energy Regulatory Commission [FERC], 2003). Neste contexto, a obtenção de informações sobre o comportamento de uma barragem, por meio da instalação de instrumentos de medição, e da elaboração de um plano de monitoramento é essencial. Segundo a *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC, 2003), a excelência do projeto, operação e manutenção de uma barragem não garantem a proteção contra eventos inesperados que afetam a sua segurança, portanto, não há substituto para a observação inteligente e sistemática da estrutura. O simples registro e acúmulo de dados não garantem a segurança da barragem e a proteção de comunidades a jusante. A informação proveniente dos instrumentos disponíveis deve ser relevante e (além disto) deve ser analisada de forma adequada e em tempo hábil.

Para corroborar a tese de que a análise dos dados provenientes do sistema de monitoramento é um fator determinante na prevenção de acidentes, Fusaro (2007) cita o exemplo real da Barragem do Piau, onde as limitações dos métodos de análise empregados impediram a detecção de uma deficiência no sistema de drenagem que podia ter consequências para a estabilidade da estrutura.

Para uma análise eficiente dos dados fornecidos pela instrumentação, recomenda-se o estabelecimento de valores de controle para as leituras dos instrumentos instalados (FERC, 2003). Estes valores de controle representam limites que têm como objetivo indicar um desvio do comportamento esperado para a estrutura que suscita preocupação para a sua integridade. De acordo com Usace (2004), devem ser definidos três tipos de valores de controle, quais sejam:

Limites de projeto; Limites de atenção; e Indicadores de desempenho. De acordo com o referido manual, os limites de projeto representam os limites aceitáveis para recalques, estabilidade, percolação, dentre outros, estabelecidos pelo projetista e calibrados segundo observações durante a construção e operação. Já os limites de atenção são valores de alerta, inferiores ou superiores aos limites de projeto, que permitem a correção de anomalias antes que seja atingido um cenário de performance inadequada. Finalmente, os indicadores de desempenho são ferramentas para medir e avaliar os dados históricos, permitindo a previsão de tendências futuras, tendo como referência os limites de atenção e de projeto.

O *U.S Department of the Interior Bureau of Reclamation* (2014) afirma que para a definição dos parâmetros de performance de um sistema de monitoramento de uma barragem, é necessária a identificação dos potenciais modos de falha aos quais a estrutura estará sujeita e, posteriormente, são delineados os objetivos do programa de instrumentação. Este departamento norte-americano sugere a aplicação de um processo denominado “Procedimento de parâmetros de Performance” que contempla as seguintes etapas:

1. Identificar os potenciais modos de falha;
2. Para cada modo de falha, determinar parâmetros-chave que devem indicar a iniciação ou progressão da falha correspondente;
3. Para cada parâmetro monitorado, determinar os intervalos de performance esperados.

Esta perspectiva também é apoiada pela FERC (2003), que propõe que a instrumentação presente no plano de monitoramento de um barramento deve ser organizada de acordo com o modo de falha que visa prevenir. De acordo com este manual, a instrumentação deve ser dividida em quatro grupos distintos:

1. Instrumentação associada com um Potencial Modo de Falha;
2. Um modo de falha que foi identificado, mas não está associado a um instrumento;
3. Instrumentação não associada a um modo de falha — deve monitorar a segurança da barragem de forma geral;
4. Modo de falha não identificado inicialmente, mas identificado durante a revisão do plano de monitoramento.

Usace (1995) corrobora com a importância da elaboração de um plano de instrumentação e monitoramento a partir dos potenciais modos de falha associados à barragem. De acordo com o documento, todo instrumento instalado deve ter como propósito esclarecer alguma questão geotécnica específica. A Tabela 2-1 apresenta as etapas que devem ser seguidas para elaboração de um sistema de instrumentação, conforme recomendado por Usace (1995).

Tabela 2-1 – Etapas para a elaboração de um sistema de instrumentação e monitoramento (Modificado de Usace, 1995)

Elementos do plano	
a- Previsão dos mecanismos que governam o comportamento da estrutura.	j- Definição de procedimentos para garantir validade dos dados.
b- Definição do propósito da instrumentação.	k- Determinação dos custos.
c- Definição das questões geotécnicas que devem ser respondidas.	l- Planejamento da instalação.
d- Seleção dos parâmetros a serem monitorados.	m- Planejamento da proteção a longo prazo.
e- Previsão da magnitude das variações esperadas.	n- Planejamento de calibragem regular e manutenção.
f- Seleção da localização dos instrumentos.	o- Planejamento da coleta e gerenciamento dos dados.
g- Seleção dos instrumentos.	p- Coordenação dos recursos envolvidos.
h- Avaliação da necessidade de automação.	q- Determinação dos custos ao longo da vida útil.
i- Planejamento dos fatores que influenciam nas medições.	

2.1.1 Modos de Falha de Barragens

Na literatura nacional e internacional existem estudos com levantamentos dos principais eventos de ruptura de barragens, classificando-os segundo as possíveis causas de falha observadas. Neste tópico serão destacados os apontamentos relacionados a barragens de rejeito. A *International Commission on Large Dams* (ICOLD, 2001) categoriza 221 acidentes estudados em barragens de rejeito, segundo 9 possíveis causas de ruptura, sendo elas: galgamento; instabilidade do talude; terremotos; falha na fundação; percolação; estrutural; erosão; subsidência e causa desconhecida. De acordo com o estudo, a causa mais comum de rompimento é a instabilidade do talude do maciço. Já Rico *et al.* (2008) avaliam 147 acidentes

com barragens de rejeito e identificam 10 possíveis causas de ruptura. Segundo os autores, o maior número de acidentes está associado a chuvas intensas, liquefação sísmica e falhas na gestão operacional.

A Figura 2-1e Figura 2-2 apresentam a classificação dos eventos de ruptura, de acordo com a causa dos acidentes apontados por ICOLD (2001) e Rico *et al.* (2008), respectivamente.

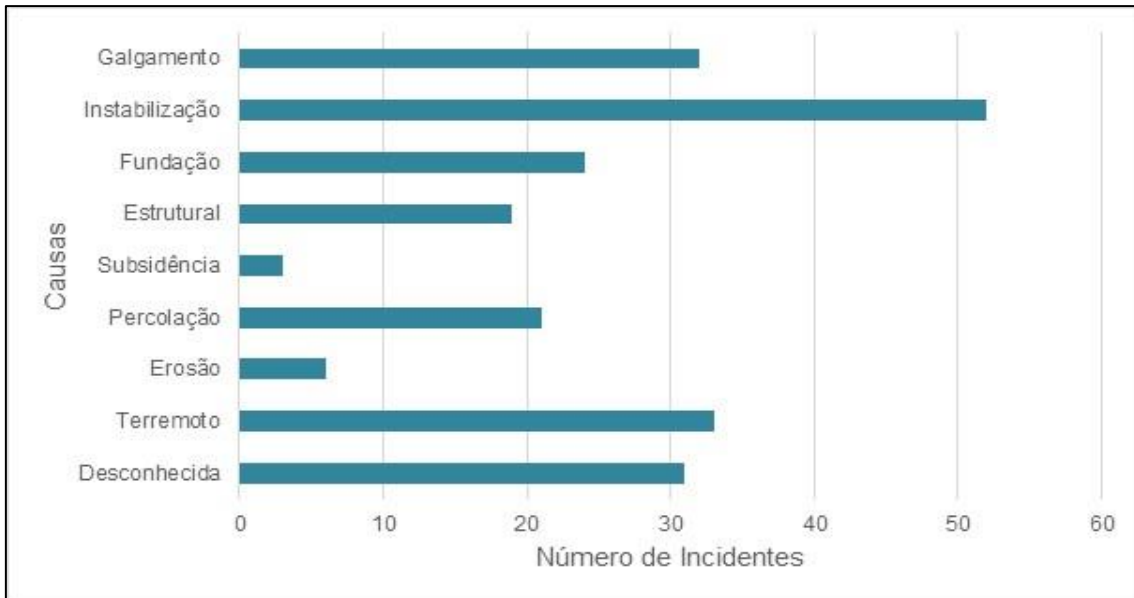


Figura 2-1 – Causas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos, segundo o ICOLD (Penna *et al.*, 2017)

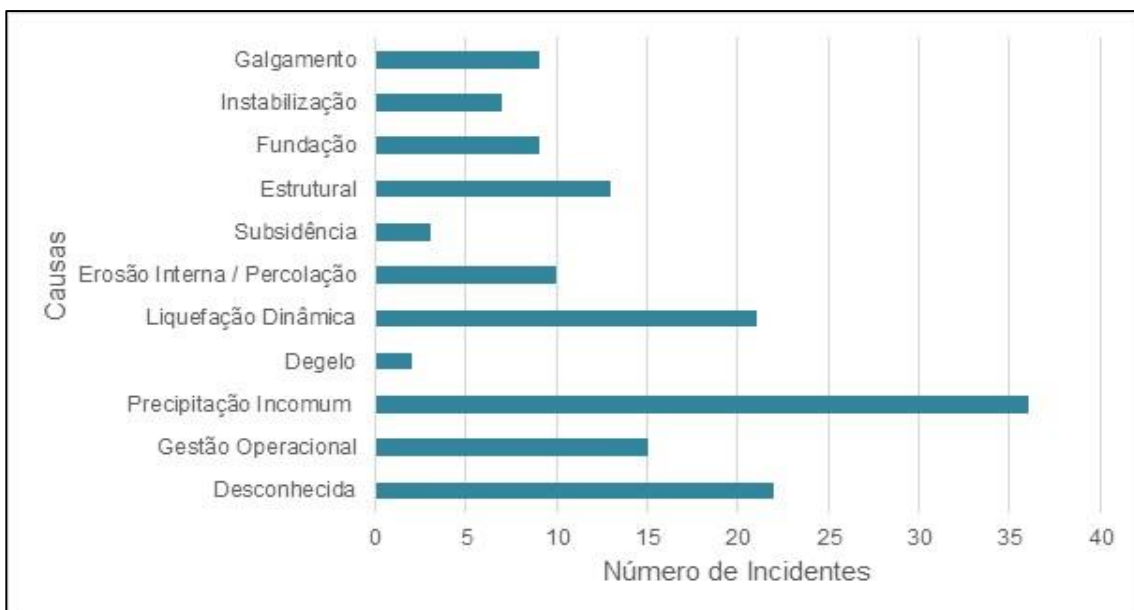


Figura 2-2 – Causas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos (Penna *et al.*, 2017)

No estudo de Zhang *et al.* (2009) são consideradas 5 causas para a ruptura de barragens, associadas a diversas subcausas, conforme ilustra a Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Causas e subcausas do rompimento de barragens (Modificado de Zhang *et al.*, 2009)

Causa	Subcausas
Galgamento	1) Capacidade insuficiente do vertedouro; 2) Eventos de chuvas intensas que excedem limites de projeto.
Problemas de Qualidade	1) <i>Piping</i> no Maciço/fundação; 2) Escorregamento do maciço; 3) <i>Piping</i> ao redor do vertedouro; 4) Deficiências no vertedouro; 5) <i>Piping</i> em bueiros ou outras estruturas enterradas; 6) Deficiências em bueiros ou outras estruturas enterradas.
Gerenciamento precário	1) Diminuição da capacidade do reservatório para passagem das cheias, devido à deposição excessiva de rejeitos; 2) Manutenção e operação precárias; 3) Correção tardia de aumento temporário na elevação da soleira do vertedouro; 4) Deficiência organizacional: Ausência de responsáveis pelo gerenciamento da barragem.
Desastres	1) Terremoto; 2) Guerra ou ataque terrorista; 3) Rompimento de barragem a montante; 4) 4) Ninho de roedores.
Outros	1) Obstrução do vertedouro devido a escorregamento de solo na margem do reservatório; 2) Formação de brecha, devido à escavação no maciço para liberação do fluxo; 3) Planejamento inadequado do layout geral do projeto.

A Figura 2-3 apresenta a classificação dos acidentes analisados, segundo a causa correspondente. Já a Figura 2-4 mostra as 4 subcausas principais consideradas no estudo. Segundo os autores, as causas de falha mais recorrentes são galgamento e *piping* no corpo da barragem ou fundação.

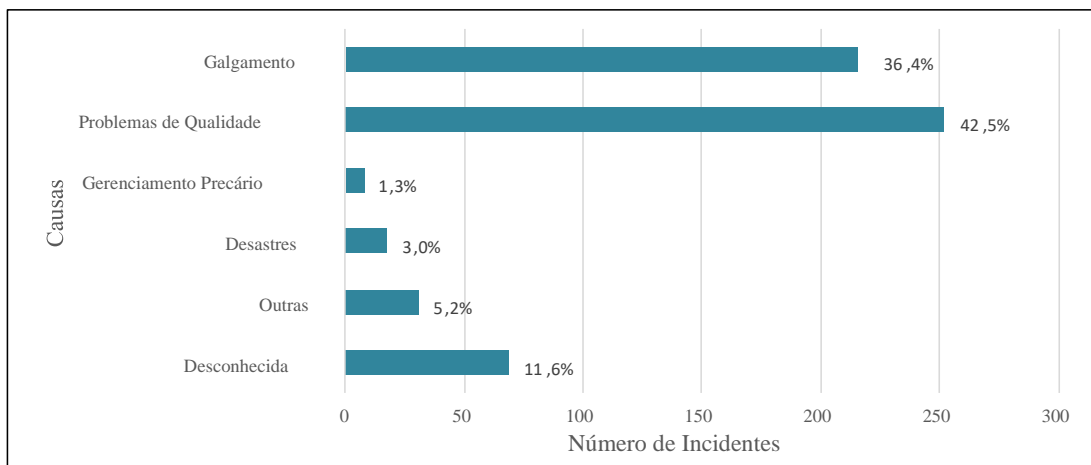


Figura 2-3 – Causas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos, segundo Zhang *et al.* (2009) (Modificado de Zhang *et al.*, 2009).

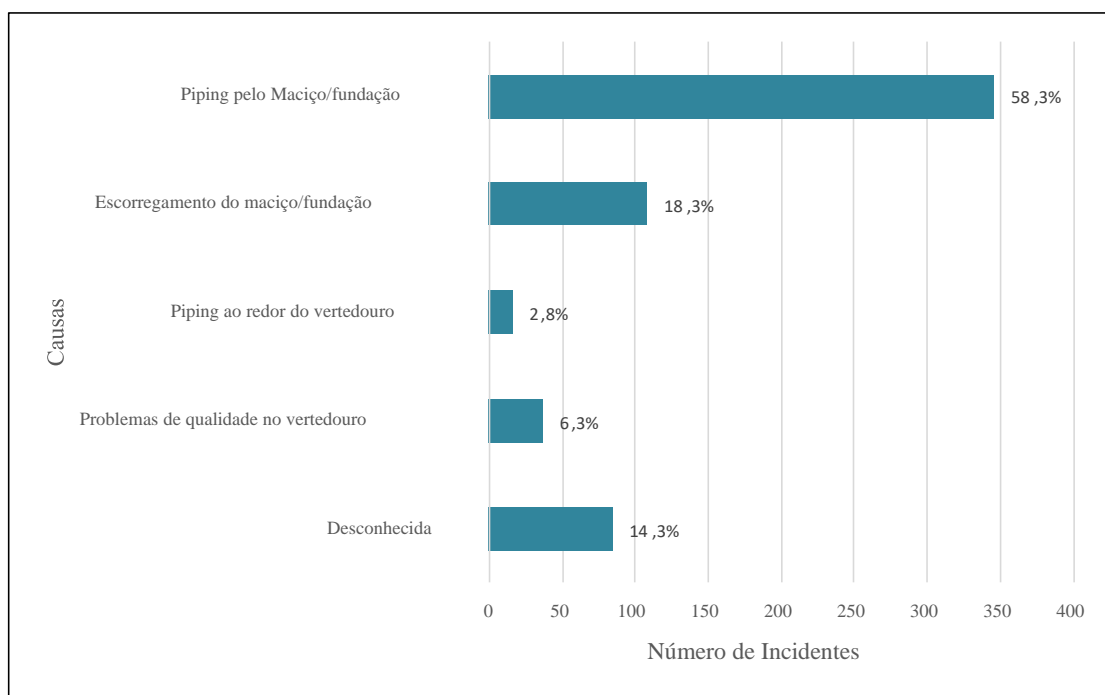


Figura 2-4 – Principais subcausas dos Acidentes com Barragens de Rejeitos, segundo Zhang *et al.* (2009) (Modificado de Zhang *et al.*, 2009)

Na tentativa de conciliar as diversas causas elencadas na literatura, Taguchi (2014) agrupa as causas levantadas por ICOLD (2001) e Rico *et al.* (2008) em 5 modos de falha distintos, quais sejam: galgamento; erosão interna; liquefação estática; instabilização estática; e instabilização sísmica. As Figura 2-5 e Figura 2-6 ilustram a forma como este agrupamento foi feito. O autor argumenta que as 5 causas propostas representam de forma adequada os possíveis mecanismos de falha de uma barragem de rejeito, visto que correspondem a mecanismos de ruptura bastante característicos e englobam quase todos os tipos de acidentes observados. A seguir são descritos os modos de falha apresentados pelo autor.

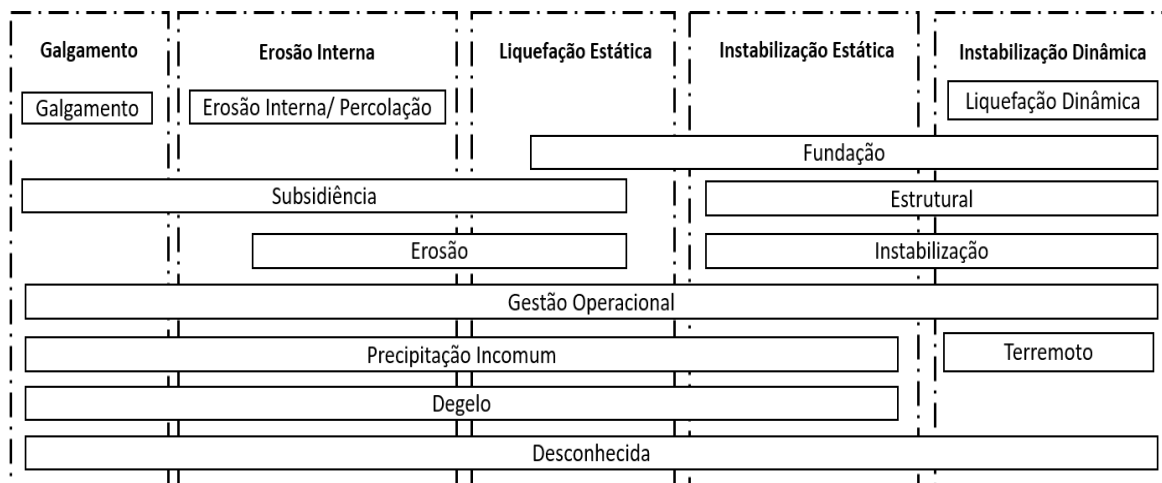


Figura 2-5 – Segmentação dos Modos de Falha propostos por Rico *et al.* (2008) e modificado de Taguchi (2014) (Penna *et al.*, 2017)

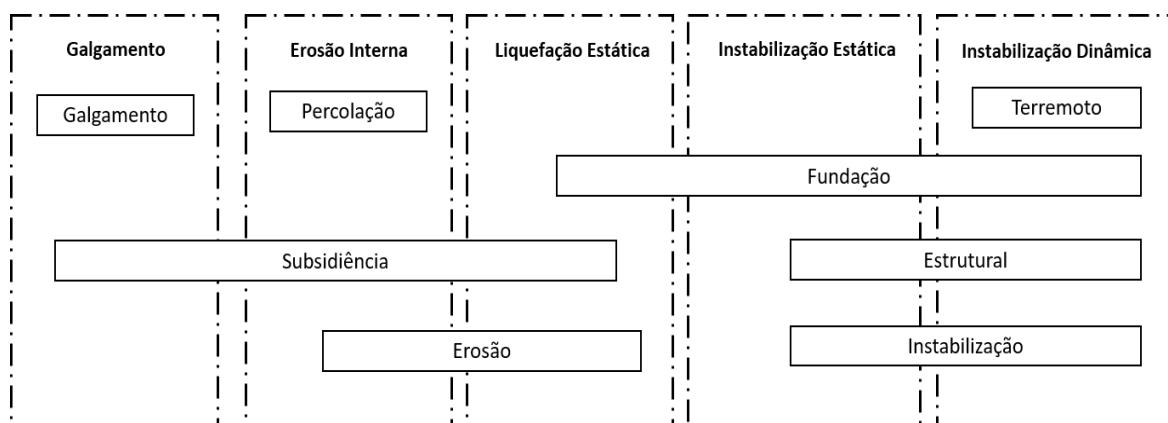


Figura 2-6 – Segmentação dos Modos de Falha propostos por ICOLD (2001) (Modificado de Taguchi, 2014)

Galgamento: este mecanismo de falha se refere ao rompimento da estrutura provocado pelo escoamento de água sobre a crista do maciço. Barragens e diques podem sofrer galgamento devido à passagem de um fluxo contínuo de água, quando a elevação do lago supera a elevação da crista da estrutura, ou pela ação de ondas provocadas pela incidência de vento. Barragens de terra normalmente não são capazes de suportar galgamentos significativos, dada a baixa resistência do material utilizado em sua construção a processos erosivos desencadeados pelo fluxo de água (Bureau of Reclamation, 2014).

A falha por galgamento inicia-se tipicamente pela erosão do pé da barragem (“*headcutting*”) e avança na direção de montante até atingir a crista do barramento e a superfície do reservatório (Colorado, 2010). A intensidade da erosão depende da qualidade e do tipo de cobertura do talude, do material do maciço e das características do fluxo de galgamento (Bureau of Reclamation, 2014). De acordo com Taguchi (2014), este modo de falha está normalmente

associado a eventos climáticos como chuvas intensas, rápido descongelamento ou obstrução do vertedouro.

Erosão Interna: de acordo com Bureau of Reclamation (2014), erosão interna é um termo genérico utilizado para descrever a erosão do solo (transporte de partículas) ocasionada pela passagem de água pelo maciço ou fundação. Os mecanismos de erosão interna considerados pelo documento citado são os seguintes: erosão regressiva (*Piping*); migração interna (*Stoping*); e instabilidade interna (sufusão). O *piping* é o fenômeno mais observado e ocorre quando o transporte de partículas começa próximo ao local de saída do fluxo e a erosão avança na direção contrária deste fluxo (de jusante para montante), levando à formação de um tubo ao longo do percurso.

A ocorrência de *piping* está associada à presença de quatro condições: (1) fonte de água e passagem de fluxo; (2) saída do fluxo desprotegida e ausência de filtro; (3) material erodível ao longo do percurso do fluxo; e (4) presença de material com capacidade de suportar a formação do tubo. O processo de erosão interna pode ser dividido em quatro fases: iniciação; continuação; progressão; e formação da brecha.

De acordo com Garner e Fannin (2010 *apud* Taguchi, 2014), o processo de erosão interna se inicia devido à ocorrência simultânea de três fatores, quais sejam: (1) susceptibilidade do material; (2) estado de tensões crítico; e (3) elevada carga hidráulica. A susceptibilidade do material está relacionada ao tamanho e formato dos grãos que compõem o solo, bem como sua dispersão e resistência à erosão. Já o estado de tensões diz respeito à capacidade do solo de resistir à erosão devido a magnitudes das tensões efetivas no interior de maciço. As condições de tensão afetam a instabilidade interna e sinalizam a presença de fraturas no corpo da barragem ou fundação. Por fim, o fator de carga hidráulica se refere aos gradientes de pressão e às velocidades de percolação da água pelo maciço, que são capazes de provocar o movimento das partículas.

Liquefação estática: é o processo pelo qual um solo não coesivo, com comportamento contrátil durante o cisalhamento e saturado perde resistência, em resposta a uma tensão estática. A liquefação estática pode prejudicar a estabilidade de uma barragem, levando ao seu rompimento (Taguchi, 2014). Quando uma porção de solo sofre cisalhamento, seu volume pode aumentar ou contrair, dependendo da sua compacidade (índice de vazios) e da magnitude das tensões

efetivas aplicadas. Contudo, se a variação de volume é inibida durante a aplicação de um carregamento em condições não drenadas, a tendência de dilatação ou contração produz variações na poropressão do solo (Jefferies e Been, 2006 *apud* Sadrekarimi, 2014). Para solos contráteis submetidos à aplicação de tensões não drenadas, observa-se o aumento das poropressões e a conseqüente redução das tensões efetivas. Segundo Taguchi (2014), a iniciação do processo de liquefação está associada a mecanismos de gatilho, capazes de provocar a redução das tensões de resistência efetivas, a ponto de resultar no colapso da estrutura. A natureza repentina e as grandes deformações associadas ao rompimento por liquefação tornam este fenômeno um dos mais catastróficos mecanismos de falha para barragens de solos não coesivos, saturados (Sadrekarimi, 2014).

Instabilização estática: a falha por instabilização estática ocorre quando as tensões solicitantes no talude de um maciço superam as tensões de resistência ao cisalhamento do solo. A capacidade de resistência ao cisalhamento de um volume de solo está associada às tensões efetivas neste material, que por sua vez correspondem à diferença entre as tensões totais de confinamento e à poropressão, conforme o princípio das tensões efetivas de Terzaghi. Desta forma, as condições de fluxo através do maciço afetam diretamente a sua estabilidade e devem ser monitoradas por meio de instrumentos, tais como piezômetros e indicadores de nível d'água. Adicionalmente, solos com maior densidade possuem maior resistência ao cisalhamento e, portanto, a compactação do solo que constitui o maciço tem forte influência na estabilidade do talude (Taguchi, 2014). A estabilidade de um talude pode ser medida através de um Fator de Segurança, definido como sendo a razão entre a resistência do solo ao cisalhamento e à tensão solicitante, ao longo de uma potencial superfície de ruptura (Bureau of Reclamation, 2014).

De acordo com Kealy e Busch (1971), o Fator de Segurança de um talude varia drasticamente de acordo com a superfície freática no interior do maciço, conforme ilustra a Figura 2-7. Deste modo, indicadores de nível d'água e piezômetro são importantes instrumentos dentro do sistema de monitoramento de uma barragem.

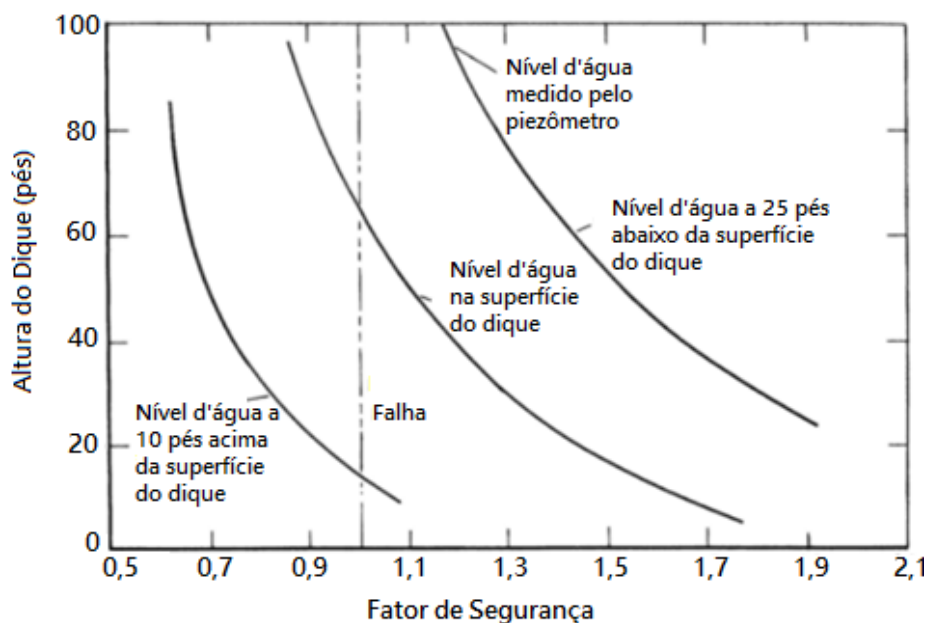


Figura 2-7 – Relação entre Fator de Segurança e piezometria e altura em barragens (Adaptado de Kealy e Bush, 1971)

Instabilização Dinâmica: este modo de falha corresponde à instabilidade do talude do maciço provocada pelas cargas cíclicas decorrentes de um terremoto, ou de outro carregamento de natureza sísmica (Taguchi, 2014). Carregamentos dinâmicos podem causar deformação permanente no barramento, caso as tensões solicitantes aumentem a ponto de superarem a resistência do solo ao cisalhamento. Adicionalmente, solos de comportamento contrátil (solos granulares fofos e saturados), sob a ação de um terremoto, estão sujeitos à liquefação, devido ao aumento das poropressões e consequente diminuição das tensões efetivas.

A redução excessiva das tensões resistentes pode desencadear um comportamento fluido do solo, levando a um rompimento rápido da barragem. Mesmo se não for observada liquefação completa, a redução da resistência do solo pode ocasionar grandes deformações que levam à instabilização dos taludes e que podem culminar em falha por galgamento, se houver rebaixamento da crista. Ademais, caso a ação do sismo não provoque rompimento imediato da barragem, o maciço pode ficar danificado internamente e, portanto, se tornar mais susceptível à ocorrência de erosão interna (Bureau of Reclamation, 2014).

Com base nos estudos de Taguchi *et al.* (2014) e Penna *et al.* (2017), foram estabelecidos quatro modos de falha típicos de barragens: galgamento; instabilização; erosão interna e liquefação. A metodologia apresentada nesta dissertação teve como referência estes mecanismos, ilustrados pela Figura 2-8.



Figura 2-8 – Mecanismos de falha em Barragens (Penna *et al.*, 2017)

2.2 METODOLOGIAS EXISTENTES PARA DEFINIÇÃO DE NÍVEIS DE CONTROLES

- **A Carta de Risco**

Neste item será apresentado metodologias para a definição dos níveis de controle associadas à carta de risco, baseadas nos dados históricos das leituras dos instrumentos e na tendência de comportamento das leituras dos instrumentos (subidas e/ou descidas).

Conforme mencionado anteriormente, a carta de risco é o método mais comum para a definição dos níveis de controle da instrumentação. Os valores de referência são obtidos por meio de análises de estabilidade determinísticas, as quais levam em consideração as características gerais do barramento (geometria, carregamentos, materiais constituintes, dentre outros).

Segundo Penna *et al.* (2017), a análise de estabilidade é feita para diferentes níveis piezométricos/freáticos no interior do maciço, de modo a obter-se a linha freática correspondente aos fatores de segurança de 1,5; 1,3; e 1,1. Desta forma, é possível estimar qual seria a leitura nos instrumentos instalados (piezômetros e INAs) para estas condições de estabilidade. Com base nos valores definidos são estabelecidas quatro “faixas de risco” ou “faixas de segurança”: normal; atenção; alerta e emergência; conforme ilustra a Figura 2-9.

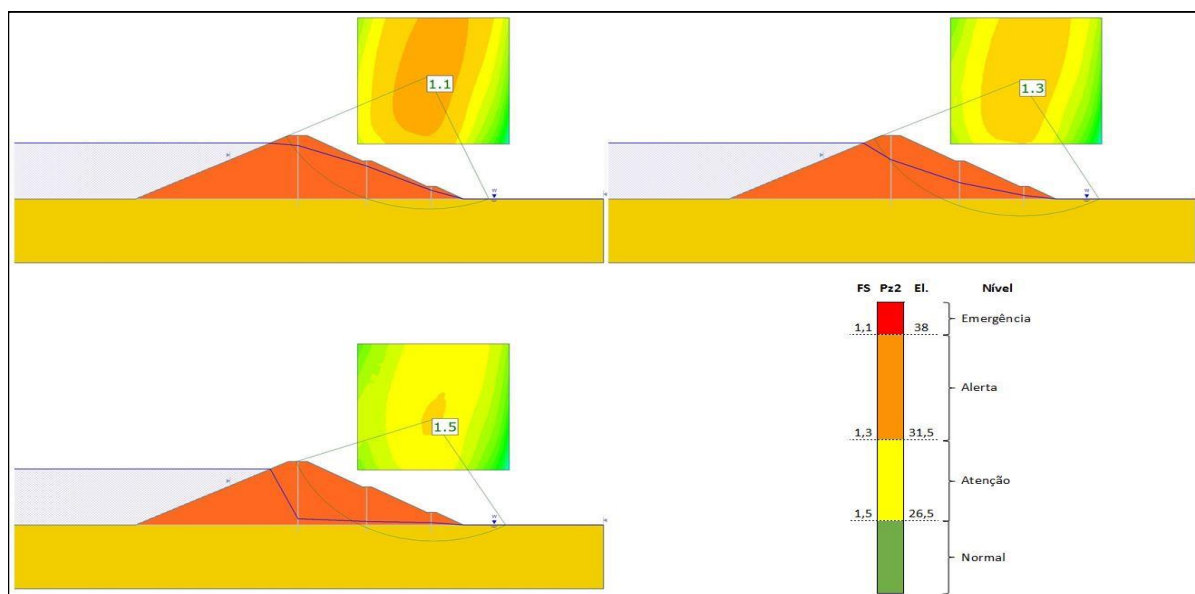


Figura 2-9 – Carta de Risco de Barragens (Penna *et al.*, 2017)

O trabalho de Velten *et al.* (2016) apresenta uma proposta de metodologia para elaboração de cartas de risco em Barragens de Terra-Enrocamento. A metodologia proposta consiste em quatro etapas: elaboração de análises de percolação; elaboração de análises de estabilidade para os resultados obtidos nas análises de percolação da etapa anterior; elaboração de análises de estabilidade para superfícies freáticas/piezométricas obtidas manualmente e obtenção da carta de risco.

- **Históricos das Leituras dos Instrumentos**

Uma metodologia alternativa e/ou complementar às cartas de risco pode ser a utilização dos dados históricos das leituras dos instrumentos para a definição dos níveis de controle. Fusaro (2007) analisou dados históricos de instrumentação de duas barragens distintas e estabeleceu para estas estruturas níveis de controle por meio de análises estatísticas. Para a Barragem de Emborcação, foram estabelecidas faixas de consistência para os dados de poropressão, por meio de regressões lineares, conforme ilustra a Figura 2-10. Esta mesma técnica não obteve resultados satisfatórios para a Barragem do Piau. Neste sentido, os limites para esta estrutura foram estabelecidos pelo método dos máximos e mínimos em intervalos pré-fixados em uma série temporal. A Figura 2-11 apresenta o gráfico de limites mensais estabelecidos para a Barragem do Piau.

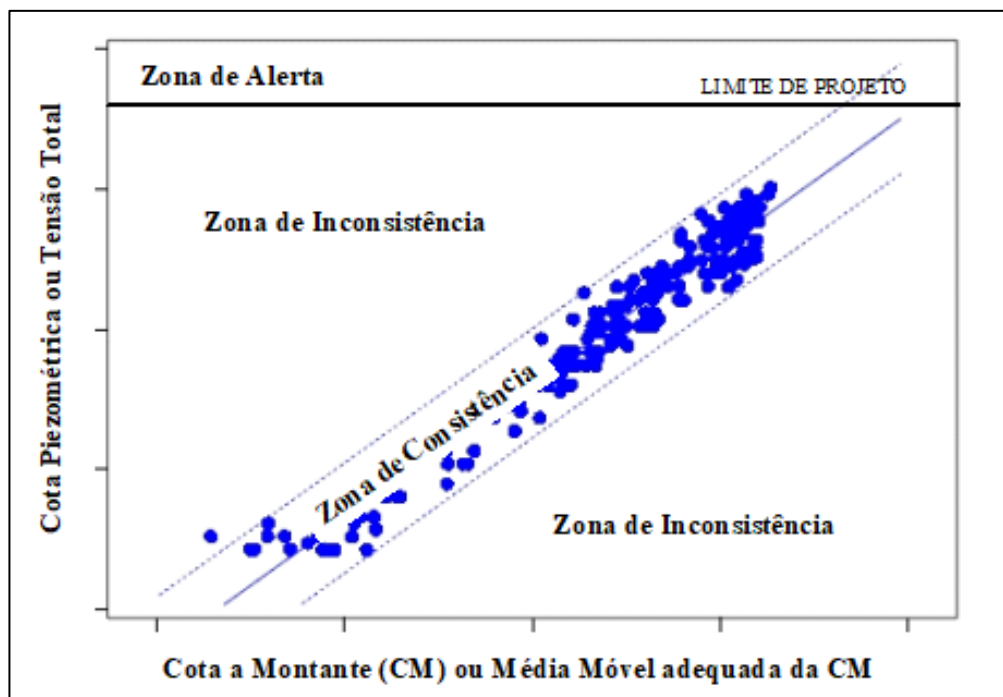


Figura 2-10 – Valores de controle para piezômetros – Barragem de Emborcação (Fusaro, 2007)

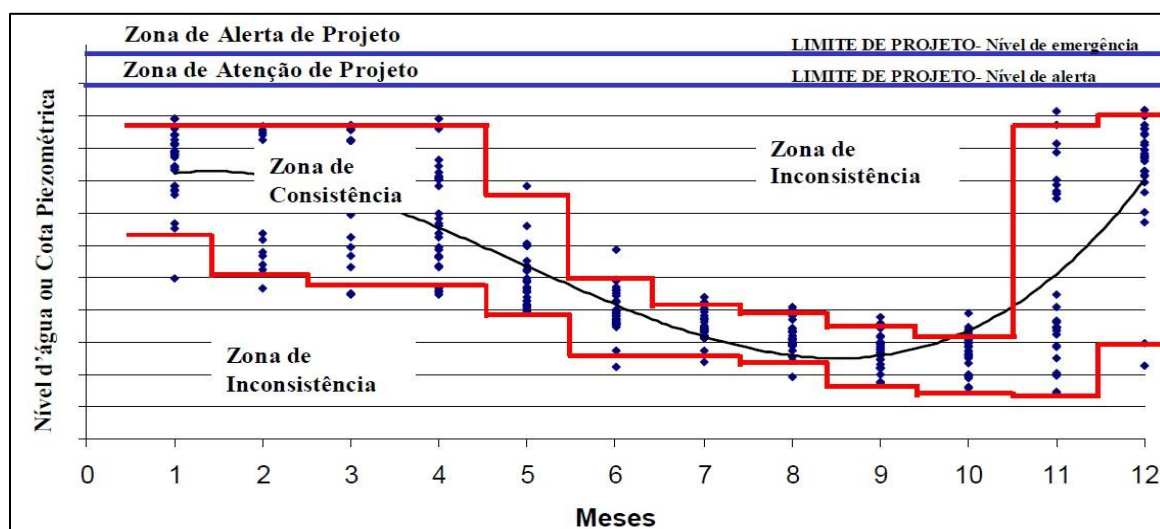


Figura 2-11 – Valores de Referência para Piezômetro – Barragem do Piau. (Fusaro, 2007)

Outro exemplo do uso de análise estatística para a definição de limites de controle é o método apresentado por Kuperman *et al.* (2003). A metodologia proposta pelos autores envolve análises de correlação entre as leituras com as forças atuantes no sistema, como: nível d'água a jusante; nível d'água a montante; e a diferença entre os dois níveis. As análises foram realizadas com o uso dos seguintes conceitos estatísticos: distribuição normal; variância; distribuição de *Student*; intervalo de confiança; testes de hipótese e significância, regressão linear simples e múltipla e coeficiente de correlação.

Ainda nesta linha, Kuperman *et al.* (2003) também definiram a zona de aceitação com base nos limites compreendidos pelos valores chamados de Valores de Referência Superior e Inferior. Estes valores foram obtidos por meio do cálculo da média e desvio padrão para a série histórica de leituras. E a partir disso foi estabelecida uma distribuição normal com grau de confiança de 95%. A Figura 2-12 apresenta um exemplo de gráfico de leituras de piezômetro de uma das barragens estudadas por Kuperman *et al.* (2003).

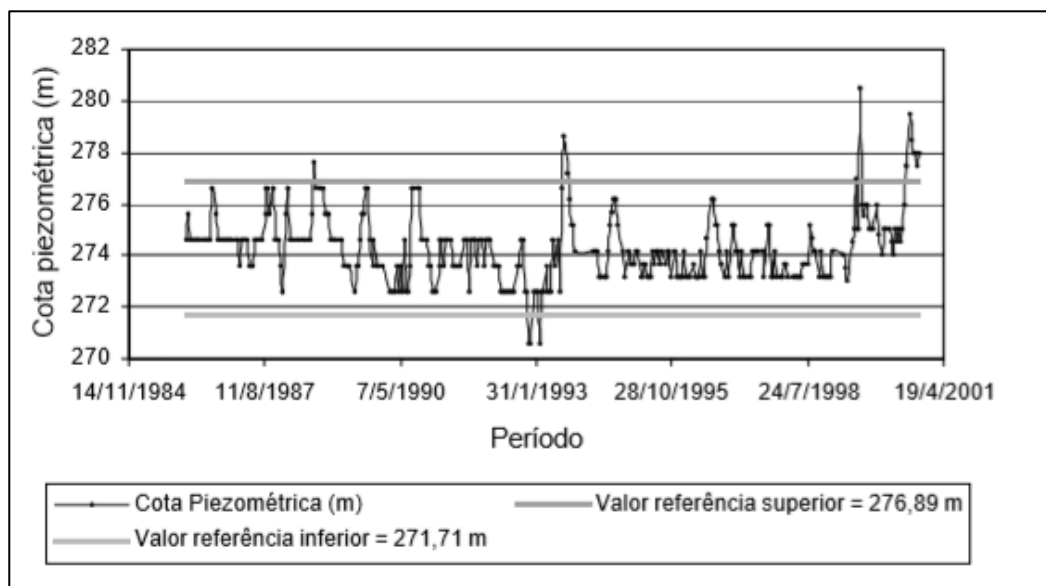


Figura 2-12 – Série histórica de leitura, com linhas representando os Valores de Referência (Kuperman *et al.*, 2003)

O trabalho de Wang *et al.* (2016) apresenta um modelo físico para analisar o mecanismo de iniciação, continuação e progressão do mecanismo de falha por erosão interna. Por meio de um sistema de inspeção contínuo com instrumentação e vigilância, os autores estabeleceram correlações baseadas no histórico de registros, que sistematizam o processo de desenvolvimento do piping. Contudo, em sistemas de monitoramento em escala real, a detecção de oscilações no sistema de instrumento é complexa devido à ampliação da área monitorada e limitações da abrangência do sistema de monitoramento.

- **Tendência de Comportamento das Leituras**

Outra metodologia que pode ser considerada, principalmente quando não é possível a aplicação da metodologia baseada no histórico de leituras, refere-se à definição dos níveis de controle a partir da verificação de tendências de comportamento, tais como: diferença não esperada entre duas leituras consecutivas; tendência de elevação não esperada das leituras (taxa de aumento

por tempo); e/ou tendência de redução não esperada das leituras (taxa de redução por tempo).

O trabalho de Glunt *et al.* (2004) apresenta um plano de monitoramento para uma operação de escavação executada no pé de uma barragem. De acordo com os autores, os limites foram estabelecidos por meio de uma avaliação do provável comportamento da estrutura. Foram estabelecidos quatro níveis de controle: alerta; aviso; congelamento da escavação; e aterro de emergência.

Destaca-se que anomalias identificadas durante a inspeção visual também foram levadas em consideração no monitoramento da estrutura. A Tabela 2-3 apresenta apenas os limites estabelecidos para as leituras piezométricas. Informa-se que o autor também apresentou os limites para as medições dos inclinômetros e para os elementos identificados durante inspeção visual.

Tabela 2-3 – Limites estabelecidos de acordo com níveis de controle (Modificado de Glunt *et al.*, 2004)

Nível de controle	Piezômetro
Alerta	<ul style="list-style-type: none">• 3 pés acima do valor de referência.
Aviso	<ul style="list-style-type: none">• Subida contínua acima de 3 pés.• Subida total excedendo a 4 pés.• Taxa de subida de 0,5 pés por dia.
Congelamento da escavação	<ul style="list-style-type: none">• 5 pés acima do valor de referência.• Taxa de subida de 1 pé por dia.
Aterro de emergência	<ul style="list-style-type: none">• 8 pés acima do valor de referência.• Taxa de subida de 2 pés por dia.

- **Níveis de Controle Versus Modo de Falha**

Conforme apresentado no item anterior, o método usualmente utilizado para a definição dos níveis de controle das barragens refere-se à elaboração da carta de risco, a qual se aplica apenas ao modo de falha de instabilização. Os demais modos de falha (galgamento, erosão interna e liquefação) para as barragens não são contemplados quando do desenvolvimento da carta de risco.

No que se refere ao modo de falha de galgamento, a Tabela 2-4 apresenta os períodos de retorno mínimo de referência para o nível de consequências esperadas, indicados na norma técnica ABNT NBR 13028 (2017).

Tabela 2-4 – Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor (ABNT NBR 13028, 2017)

Consequências ou dano potencial	Período de retorno de projeto (período operacional)	Período de retorno de projeto (período de fechamento)
Baixa	200 anos a 500 anos	10.000 anos a PMP
Média	500 anos a 1.000 anos	10.000 anos a PMP
Alta	1.000 anos a PMP	10.000 anos a PMP

Ao se tratar do modo de falha por erosão interna, mesmo que o mecanismo de falha ainda não seja totalmente compreendido, diversos trabalhos (Bowles *et al.*, 2013; Fell *et al.*, 2008; Foster e Fell, 2001; Fry, 2007) investigaram profundamente os mecanismos internos de erosão, definindo os modos de falha, estimando tempos e fornecendo métodos para avaliar a segurança das barragens; até desenvolveram análises de risco de erosão interna e, baseando-se em experimentos e falhas históricas, mencionam que o controle mais efetivo para erosão interna é baseado na inspeção visual do fluxo de água perolando pelo sistema de drenagem.

Neste sentido, a utilização de tecnologia de monitoramento como por exemplo o Turbidímetro, podem auxiliar ainda mais na obtenção de um diagnóstico mais preciso de erosão interna. De acordo com Laganaro *et al.*, (2019), o princípio base do Turbidímetro é a detecção e aferição de partículas suspensas na água através da medição da luz dispersa. Sua unidade de medida é expressa em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT).

Ainda segundo os autores, a aplicação desse instrumento em barragens, auxilia na identificação da qualidade da água do percolado e detecta alterações nas concentrações de sólidos suspensos, que por sua vez, pode estar associado a indicativos do processo de erosão interna devido ao aumento da turbidez causado pelo carreamento de particulados. Para a detecção de erosão, deve-se considerar um monitoramento contínuo, por meio da comparação de amostras a fim de se observar quaisquer alterações na turbidez (Laganaro *et al.*, 2019).

Vazquez (2014) em sua dissertação de mestrado desenvolveu um estudo em modelo reduzido do rompimento de um aterro em uma barragem, sob o mecanismo de falha por erosão interna. O aterro foi construído em um recipiente de aço de 11x2x2 m³ (Figura 2-13). Devido às dimensões reduzidas no compartimento, um plano de instrumentação foi especialmente projetado nesta fase também. A barragem foi monitorada em operação desde o primeiro enchimento. Conseqüentemente, na fase seguinte, os modelos numéricos foram configurados e calibrados com os resultados de um período de 10 dias de monitoramento. Finalmente, uma análise do modo de falha antes da ruptura foi comparada com o mecanismo real que causou a falha da barragem. A duração da dissertação de mestrado foi de seis meses. A seqüência desenvolvida na elaboração do estudo está descrita na Figura 2-14.



Figura 2-13 – Vista de jusante do experimento (Vazques, 2014)

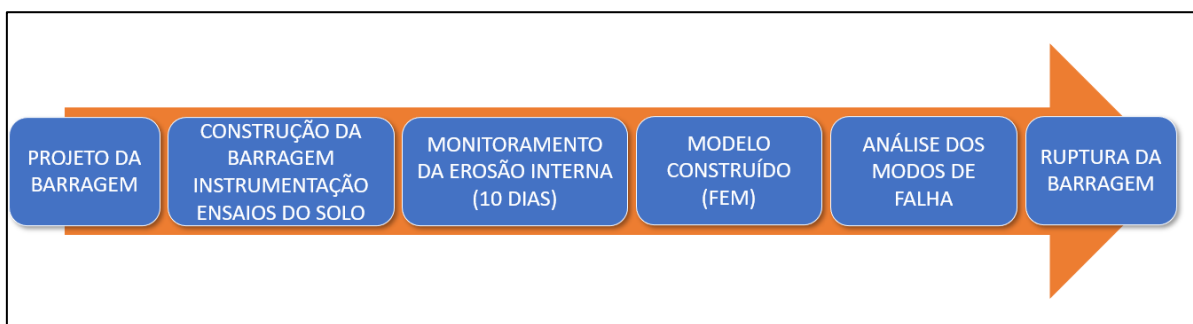


Figura 2-14 – Seqüência do experimento (Adaptado de Vazques, 2014)

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração ([IBRAM], 2019), uma boa compreensão dos modos de falha, bem como dos objetivos do monitoramento, permite o direcionamento da atenção para sinais visuais e instrumentação de dados que possam indicar o início ou desenvolvimento de um processo de falha.

Nesta linha, o trabalho de Penna *et al.* (2015) agrupa os modos de falha que podem ser detectados através da instrumentação, inspeções visuais e análise de risco (Tabela 2-5). A análise da instrumentação apresenta bastante efetividade para detecção de diversas falhas que não podem ser percebidas em um estágio inicial de inspeção visual, ou seja, sem a instrumentação tais falhas somente são perceptíveis nas inspeções visuais em um estágio avançado, o que pode não ser passível de correções.

Tabela 2-5 – Efetividade dos métodos de detecção de falhas em barragens (Modificado de Penna *et al.*, 2015)

Estados Limites Últimos em Barragens de Aterro	Efetividade na detecção de falhas (Alta ou Média/Baixa)		
	Inspeções Visuais		Análise Instrumentação
	Estágio Inicial	Estágio Avançado	
Encontro, Fundação e Vale imediatamente a Jusante			
Ruptura estrutural e/ou perda de funcionalidade de tapetes impermeáveis		Média / Baixa	Média / Baixa
Ruptura estrutural e/ou perda de funcionalidade de cortinas de vedação		Média / Baixa	Média / Baixa
Ruptura estrutural e/ou perda de funcionalidade de elementos de drenagem		Média / Baixa	Alta
Vazões ou poropressões excessivas		Média / Baixa	Alta
Erosão externa excessiva	Alta	Alta	
Fissuração excessivas	Alta	Alta	
Deformações e movimentos excessivos de fundação	Média / Baixa	Alta	Alta
Erosão externa da fundação (galgamento)	Alta	Alta	
Erosão interna da fundação			Média / Baixa
Perda de estabilidade global da fundação		Média / Baixa	Média / Baixa
Liquefação da fundação			
Capacidade de resistência da fundação insuficiente		Média / Baixa	
Perda de funcionalidade de dispositivos de observação (Instrumentação)	Média / Baixa	Alta	Alta

Estados Limites Últimos em Barragens de Aterro	Efetividade na detecção de falhas (Alta ou Média/Baixa)		
	Inspeções Visuais		Análise Instrumentação
	Estágio Inicial	Estágio Avançado	
Corpo da Barragem de Aterro			
Danos em cortinas de vedação de grande extensão e magnitude		Média / Baixa	Média / Baixa
Movimentos excessivos de cortinas de vedação			
Ruptura estrutural e/ou perda de funcionalidade de cortinas de vedação		Média / Baixa	Média / Baixa
Ruptura estrutural e/ou perda de funcionalidade de sistemas de drenagem interna		Média / Baixa	Média / Baixa
Vazões ou poropressões excessivas	Alta	Média / Baixa	Alta
Erosão externa excessiva	Alta	Alta	
Fissuração excessivas	Média / Baixa	Alta	
Deformações e movimentos excessivos de aterros	Alta	Alta	Alta
Erosão externa do maciço (galgamento)		Alta	
Erosão interna do maciço		Média / Baixa	Média / Baixa
Perda de estabilidade global do maciço (ou do conjunto aterro-fundação)		Alta	Média / Baixa
Liquefação do maciço			
Vegetação com raízes criando caminhos preferenciais	Alta	Alta	
Danos ou perdas de funcionalidades de dispositivos (Instrumentação)	Média / Baixa	Alta	Alta
Estruturas Hidráulicas			
Obstrução das seções de escoamento	Alta	Alta	
Colmatação de filtros e drenos		Média / Baixa	Alta
Percolação excessiva através de juntas	Alta	Alta	
Percolação excessiva através de concreto	Alta	Alta	
Deterioração excessiva do concreto	Alta	Alta	
Movimentos excessivos dos elementos estruturais		Média / Baixa	Alta
Capacidade de extravasão insuficiente		Média / Baixa	
Ruptura de elementos estruturais		Média / Baixa	

Estados Limites Últimos em Barragens de Aterro	Efetividade na detecção de falhas (Alta ou Média/Baixa)		
	Inspeções Visuais		Análise Instrumentação
	Estágio Inicial	Estágio Avançado	
Perda de estanqueidade de comportas	Alta	Alta	
Corrosão em equipamentos eletromecânicos	Alta	Alta	
Vibrações excessivas	Alta	Alta	
Ruptura estrutural (estruturas ou equipamentos eletromecânicos)		Média / Baixa	Média / Baixa
Ruptura do conjunto estrutura-fundação		Alta	Média / Baixa
Ruptura estrutural devido a movimentos da fundação		Média / Baixa	Média / Baixa
Ruptura estrutural devido a subpressões		Média / Baixa	Média / Baixa

Mais recentemente, o trabalho de Pimentel *et al.* (2021) apresentou a proposta de uma matriz de correlação da instrumentação de uma barragem associada aos possíveis modos de falha. Este estudo abordou o monitoramento de forma abrangente e holística, incluindo a identificação de tendências de longo prazo e integração com alertas e planos de respostas. Este programa definiu primeiramente os critérios abordando os principais parâmetros medidos/observados, a relação destes parâmetros com os modos de falha e os requisitos para a classificação do monitoramento em estratégico e crítico. A última etapa do programa proposto por Pimentel *et al.* (2021) é justamente correlacionar os planos de resposta aos resultados do monitoramento, conforme ilustra a Figura 2-15.



Figura 2-15 – Fluxo de Trabalho para Desenvolvimento do Programa de Monitoramento (Adaptado de Pimentel *et al.*, 2021)

De forma resumida, a principal diferença entre o monitoramento crítico e estratégico é o critério temporal, onde o monitoramento crítico necessita ser em tempo real ou quase real e o monitoramento estratégico não necessariamente precisa ser em tempo real. A Tabela 2-6 apresenta com maior detalhamento dos monitoramentos crítico e estratégico.

Tabela 2-6 – Contextualização do monitoramento crítico e estratégico segundo Pimentel *et al.* (2021)

Critério	Monitoramento Crítico	Monitoramento Estratégico
Monitoramento em tempo real	Sim	Não necessariamente
Consideração imediata de segurança	Elevada	Baixa
Alarmes	Decisões críticas operacionais e ativação de alarmes	Avaliação de tendências e comportamentos anômalos
Tempo do processo de ruptura	Rápida	Longo prazo e tendência lenta
Intervalo de tempo do monitoramento	Curto prazo	Longo prazo

Nesse contexto, as principais características dos monitoramentos Crítico e Estratégico são:

Monitoramento Crítico:

- Tipicamente implementado para aqueles parâmetros considerados como indicadores diretos de um modo de falha específico;
- Disponível em tempo quase-real (frequência de aquisição variando em segundos a algumas dezenas de minutos).

Monitoramento Estratégico:

- Pode incluir a análise de indicadores diretos e de suporte de cada modo de falha;
- Intervalo de tempo longo (semanas, meses ou anos).

A Tabela 2-7 apresenta um resumo do programa de monitoramento considerando os critérios mencionados anteriormente.

Tabela 2-7 – Classificação dos parâmetros e instrumentos do Programa de Monitoramento (Adaptado de Pimentel *et al.*, 2021)

Parâmetros de Monitoramento e Instrumentação		Galgamento		Instabilidade de Talude		Ruptura de Fundação		Erosão Interna		Liquefação Estática		Liquefação Dinâmica	
		Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico
NA Reservatório	Régua de Reservatório	x	x		x		x		x		x		x
Precipitação	Pluviômetro		x		x		x		x		x		x
Poropressão / Nível de Água	Medidor de Nível de Água				x		x		x		x		x
	Piezômetro Casagrande				x		x		x		x		x
	Piezômetro de Corda Vibrante				x		x		x	x	x	x	x
Percolação	Medidor de Vazão				x		x		x		x		x
	Turbidímetro								x				
	Geofísica				x				x				
Monitoramento de Movimento	Radar Terrestre	x	x		x	x	x	x	x		x		x
	Estação Total Robótica e prismas		x		x	x	x		x		x		
	Inclinômetro in-place				x	x	x			x	x	x	x
	InSAR		x		x		x		x				

Parâmetros de Monitoramento e Instrumentação		Galgamento		Instabilidade de Talude		Ruptura de Fundação		Erosão Interna		Liquefação Estática		Liquefação Dinâmica	
		Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico	Crítico	Estratégico
Sismicidade e vibração	Microssísmica				x				x	x	x	x	x
	Sismografia				x							x	x
Monitoramento Virtual	Inspeção visual		x		x		x		x				
	Inspeção Remota (drones)		x		x		x		x				
	Videomonиторamento	x		x		x		x		x		x	
Ativação Automática de Sirenes	Radar doppler	x		x		x		x		x		x	
	Tiltímetro	x		x		x		x		x		x	

Em seu trabalho, Pimentel *et al.* (2021) consideraram, no programa de monitoramento, os modos de falha galgamento; instabilidade; instabilidade da fundação; erosão interna; liquefação estática e dinâmica. A partir desta definição, criou-se uma relação entre o parâmetro medido/observado com o modo de falha, ou uma relação de suporte do parâmetro com o modo de falha, seguindo a abordagem proposta por Clarkson *et al.* (2021). Esta relação foi estabelecida por aquela variação do parâmetro que tem uma ligação direta com o modo de falha, ou sofre uma influência no início ou progressão do modo de falha; já a relação de suporte é uma relação secundária onde a variação do parâmetro pode contribuir e estimular o modo de falha conforme Tabela 2-8.

Tabela 2-8 – Parâmetros medidos\observados e modos de falha (Adaptado de Pimentel *et al.*, 2021)

Parâmetro medido/observado	Modos de Falha					
	Galgamento	Instabilidade de Talude	Ruptura de Fundação	Erosão Interna	Liquefação Estática	Liquefação Dinâmica
Nível de Água do Reservatório	Direta	Direta	Direta	Direta	Suporte	Suporte
Precipitação	Suporte	Direta/Suporte	Direta/Suporte	Suporte	Suporte	Suporte
Poropressão/Nível de Água	-	Direta	Direta	Direta	Direta	Suporte
Percolação (Fluxo de Água)	-	Suporte	Suporte	Direta	Suporte	Suporte
Deformação e Movimento	Suporte	Direta	Direta	Suporte	Suporte	Suporte
Sismicidade e vibração	Suporte	Direta	Suporte	Direta	Suporte	Direta

2.2.1 Segurança de Barragens

- Aspectos legais

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.

Neste aspecto, destacam-se a Agência Nacional de Mineração (ANM), que é responsável pela fiscalização das barragens de mineração no âmbito federal, e a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), como agente fiscalizador no âmbito do estado de Minas Gerais. O trabalho de Braga (2021) apresenta um organograma mostrado na Figura 2-16, do arranjo institucional e os instrumentos da PNSB e as respectivas competências regulatórias.

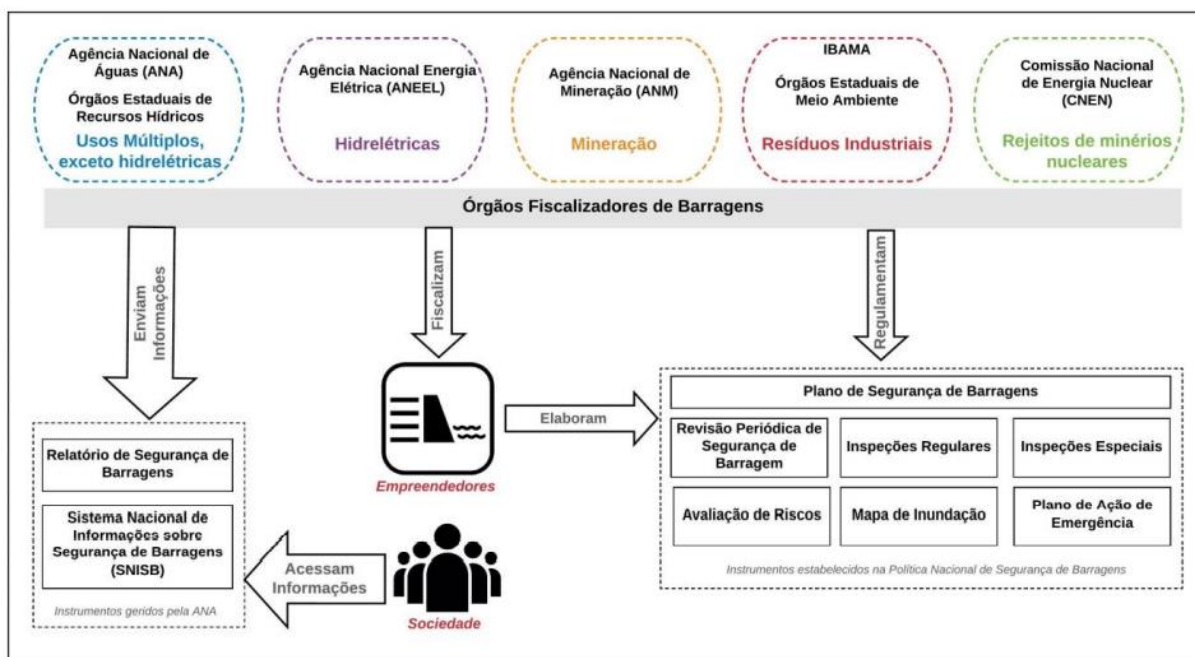


Figura 2-16 – Determinações da PNSB quanto aos órgãos fiscalizadores e ao PSB (Braga, 2021)

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.

Os eventos indesejados (acidentes) ocorridos em Minas Gerais impulsionaram um processo de aprendizado que, de forma reativa, tem buscado aperfeiçoamentos baseados nas causas e consequências dos desastres ocorridos. Nota-se um aumento significativo das legislações aplicadas ao tema “segurança de barragens” no Brasil após os acidentes em 2015 e 2019 com as Barragens de Fundão e B1. Em seu trabalho, Braga (2021) apresenta o progresso da legislação em formato cronológico com a influência dos acidentes citados, conforme ilustrado na 2-17.

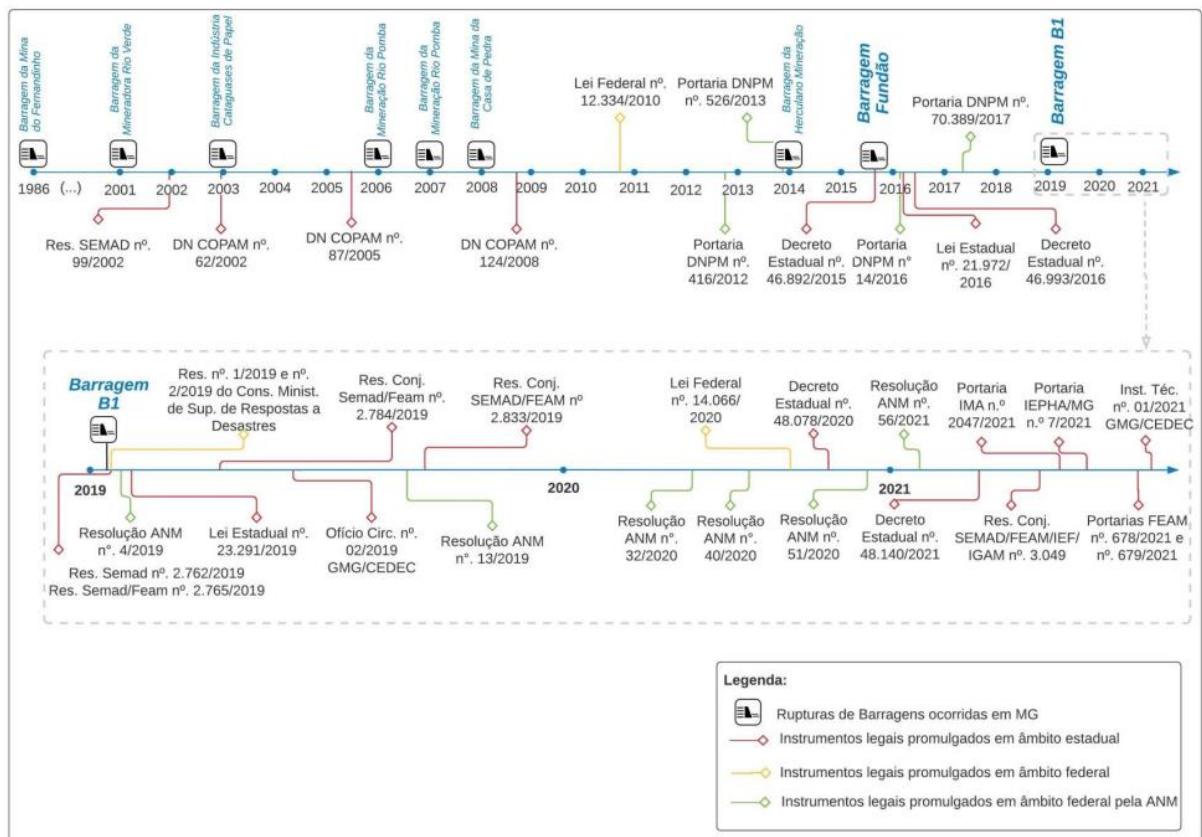


Figura 2-17 – Linha do tempo dos principais instrumentos legais avaliados na pesquisa de Braga (2021)

De forma complementar, a Tabela 2-9 apresenta uma síntese das premissas e enquadramentos das principais legislações no estado de Minas Gerais.

Tabela 2-9 – Correlação de Leis, Deliberações, Resoluções e Termos de Referência para Gestão de Barragens no Estado de Minas Gerais

Título	Ano	Premissas
DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM N.º 62	17 dez. de 2002	Critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais.
DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM N.º 87	17 jun. de 2005	Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM N.º 62, de 17/12/2002.
DELIBERAÇÃO NORMATIVA N.º 74	09 set. de 2004	Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ou de licenciamento ambiental no nível estadual; determina normas para indenização dos custos de análise de pedidos de autorização e de licenciamento ambiental, e dá outras providências. Observação: Foi revogada e substituída em 2017 pela Deliberação Normativa Copam N.º 217/2017. No entanto, algumas estruturas ainda estão licenciadas, baseadas nos critérios apresentados nesta Deliberação, por isso foram incluídas na listagem.
DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM N.º 124	09 out. de 2008	Complementa a Deliberação Normativa COPAM N.º 87, de 06/09/2005.
LEI N.º 12.334	20 set. de 2010	Política Nacional de Segurança de Barragens.
RESOLUÇÃO N.º 143	10 jul. de 2012	Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei N.º 12.334, de 20 de setembro de 2010.
RESOLUÇÃO CNRH N.º 144	10 jul. de 2012	Estabelece os critérios gerais para a elaboração do Plano de Segurança de Barragem e do Relatório de Segurança de Barragens pelo empreendedor.
PORTARIA N.º 416	03 set. de 2012	Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispõe sobre o Plano de Segurança, Revisão Periódica de Segurança e Inspeções Regulares e Especiais de Segurança das Barragens de Mineração, conforme a Lei N.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens.
LEI N.º 21.972	21 jan. de 2016	Dispõe sobre o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema) e dá outras providências. Observação: definição de barragem no Artigo 30, considerado nos processos de descaracterização de estruturas de barramento.
DECRETO N.º 46.993	02 maio de 2016	Institui a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem e dá outras providências

RESOLUÇÃO CONJUNTA SEMAD/FEAM N.º 2.372	06 maio de 2016	Estabelece diretrizes para realização da Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragens de rejeito com alteamento para montante e para a emissão da correspondente Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade de que trata o Decreto N.º 46.993 de 02 de maio de 2016 e dá outras providências.
PORTARIA DNPM N.º 70389 - SEGURANÇA DE BARRAGENS	17 maio de 2017	Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10º, 11º e 12º da Lei N.º 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).
DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM N.º 217	06 dez. de 2017	Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades utilizadores de recursos ambientais no Estado de Minas Gerais e dá outras providências.
DESCARACTERIZAÇÃO O E DESCADASTRAMENTO DE BARRAGENS ALTEADAS PELO MÉTODO DE MONTANTE	fev. de 2018	Dispõe sobre o módulo de barragens do Banco de Declarações Ambientais (BDA), os procedimentos para a apresentação das declarações de condição de estabilidade, cadastro, descaracterização, descadastramento e licenciamento ambiental de barragens de contenção de resíduos ou rejeitos da mineração.
DESCARACTERIZAÇÃO O E DESCADASTRAMENTO DE BARRAGENS CONSTRUÍDAS EM ETAPA ÚNICA OU ALTEADAS PELOS MÉTODOS LINHA DE CENTRO OU JUSANTE – IS 02/2018	fev. de 2018	Dispõe sobre o módulo de barragens do Banco de Declarações Ambientais (BDA), os procedimentos para a apresentação das declarações de condição de estabilidade, cadastro, descaracterização, descadastramento e licenciamento ambiental de barragens de contenção de resíduos ou rejeitos da mineração.
LEI N.º 23291	25 fev. de 2019	Institui a política estadual de segurança de barragens.
RESOLUÇÃO CONJUNTA SEMAD/ FEAM N.º 2.784	25 mar. de 2019	Determina a descaracterização de todas as barragens de contenção de rejeitos e resíduos, alteadas pelo método a montante, provenientes de atividades minerárias, existentes em Minas Gerais e dá outras providências.

RESOLUÇÃO ANM N.º 13	08 ago. de 2019	Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências.
RESOLUÇÃO N.º 32	11 maio de 2020	Altera a Portaria N.º 70.389, de 17 de maio de 2017 e dá outras providências.
TERMO DE REFERÊNCIA PARA A ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO TÉCNICO DE AUDITORIA DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	01 set. de 2020	Termo de Referência para a Elaboração do Relatório Técnico de Auditoria de Segurança de Barragens e do Termo de Referência para a Elaboração do Relatório Técnico de Auditoria Extraordinária de Segurança de Barragens.
LEI N.º 14.066	30 set. de 2020	Altera a Lei N.º 12.334, de 20 de setembro de 2020.
DECRETO N.º 48078	05 nov. de 2020	Regulamenta os procedimentos para análise e aprovação do Plano de Ação de Emergência (PAE), estabelecido no art. 9º da Lei N.º 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que instituiu a Política Estadual de Segurança de Barragens. Página 2 - Diário Oficial de Minas Gerais.
RESOLUÇÃO N.º 51	24 dez. de 2020	Cria e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento da Avaliação de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM - ACO, que compreende o Relatório de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM - RCO e a Declaração de Conformidade e Operacionalidade do PAEBM – DCO.
RESOLUÇÃO ANM N.º 56 SOLUÇÃO	28 jan. de 2021	Altera dispositivos da Resolução N.º 51, de 24 de dezembro de 2020, publicada em 29 de dezembro de 2020.
DELIBERAÇÃO NORMATIVA COPAM N.º 240 ANM	29 jan. de 2021	Altera a Deliberação Normativa Copam N.º 217, de 6 de dezembro de 2017.
RESOLUÇÃO N.º 95 ANM	07 fev de 2022	Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração e revoga a Portaria DNPM nº 70.389/2017, a Resolução ANM nº 13/2019, a Resolução ANM nº 32/2020 e a Resolução ANM nº 40/2020, a Resolução ANM nº 51/2020 e a Resolução ANM nº 56/2021.

Em seu trabalho, Danese (2020) desenvolveu uma avaliação dos dados cadastrais apresentados pelos empreendedores de barragens de mineração, notadamente após o evento de ruptura da Barragem do Fundão em 2015. O trabalho identificou 366 barragens de mineração no estado de Minas Gerais, sendo 222 inseridas na PNSB e 144 não inseridas na PNSB. A autora avaliou de forma estatística 4 dos 5 parâmetros relacionados aos Estados de Conservações definidos na Resolução ANM N.º 95/22 (Brasil, 2022) com base nas informações apresentadas no Relatório Anual de Lavra (RAL) ano-base 2015, a saber:

- Confiabilidade das Estruturas Extravasoras;
- Percolação;
- Deformações e Recalques;
- Deterioração dos Taludes/ Paramentos.

Ainda segundo o trabalho de Danese (2020), para as 222 estruturas analisadas, 99% das barragens não apresentaram problemas relevantes relacionados à percolação, sendo 189 barragens com percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (pontuação 0), e 31 barragens com umidade ou surgência nas áreas de jusante, parâmetros, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (pontuação 3). Apenas uma barragem apresentou umidade ou surgência nas áreas de jusante, parâmetros, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (pontuação 6); e uma barragem apresentou pontuação 10 na matriz Estado de Conservação conforme Figura 2-18.

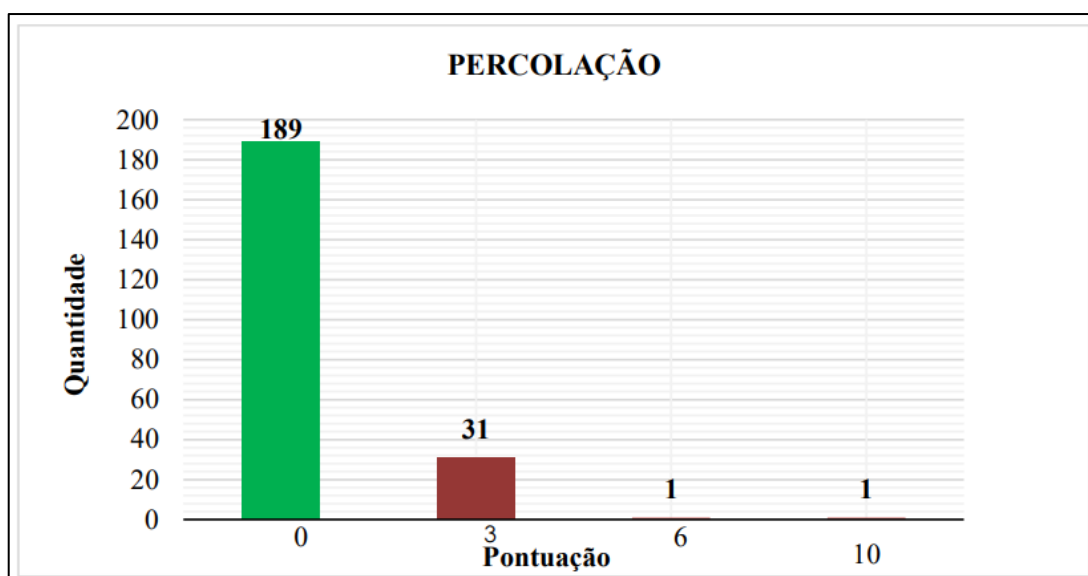


Figura 2-18 – Quantidade de barragens considerando a percolação nas barragens, de acordo com a pontuação obtida, dezembro/2016) (Danese, 2020)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para a elaboração desta dissertação foi escolhida uma estrutura denominada Barragem-Piloto, concebida com a finalidade de conter os rejeitos gerados na usina de processamento de minério de ferro, bem como servir de reserva hídrica para o abastecimento de água para utilização em processos industriais da usina. 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 barragem objeto deste estudo está localizada em Minas Gerais (Figura 3-1) e inserida no Quadrilátero Ferrífero (QF), em sua porção norte, no fechamento do sinclinal Gandarela.

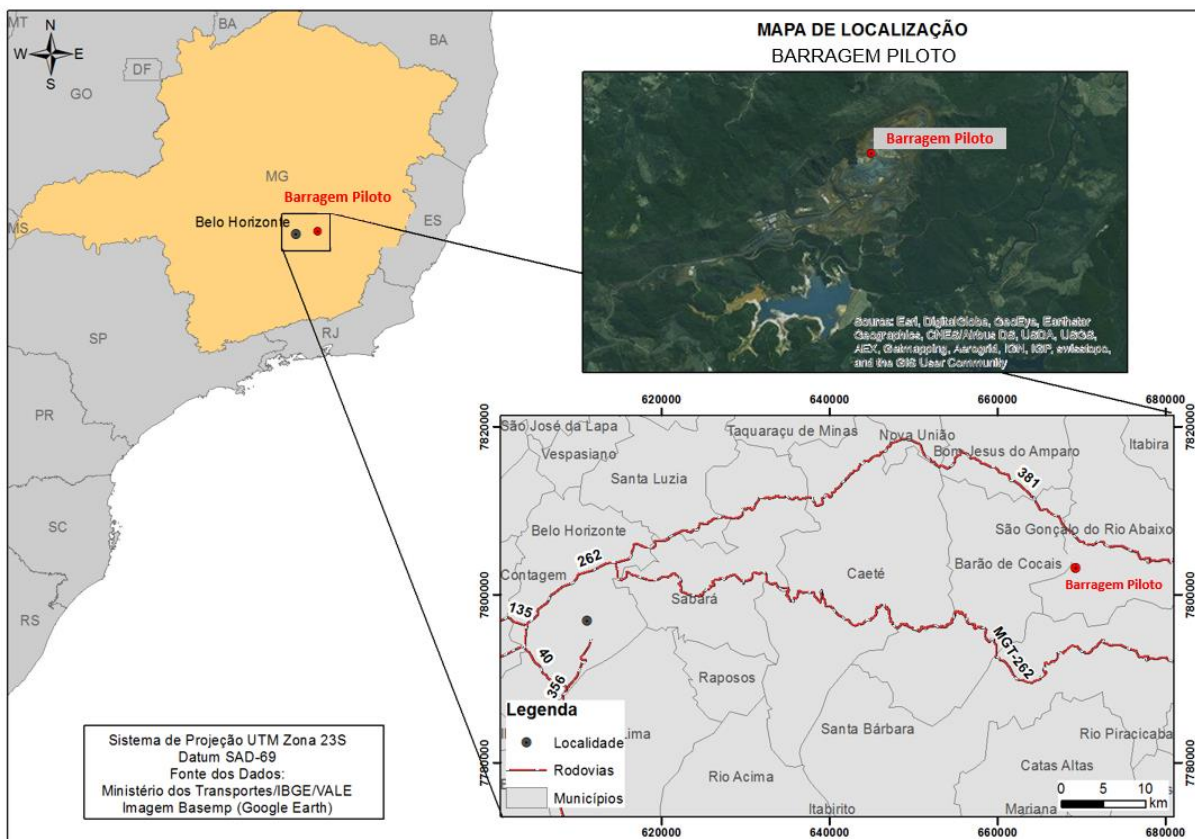


Figura 3-1 – Mapa de localização da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2017)

A fundação da barragem é constituída de solos oriundos da alteração das litologias xistosas do Grupo Nova Lima, representados por solos residuais maduros e jovens, de constituição predominantemente silto-arenosa.

A estrutura foi construída em solo compactado, o maciço inicial foi implantado em 1999, com coroamento da crista na El. 690,00 m (Figura 3-2).

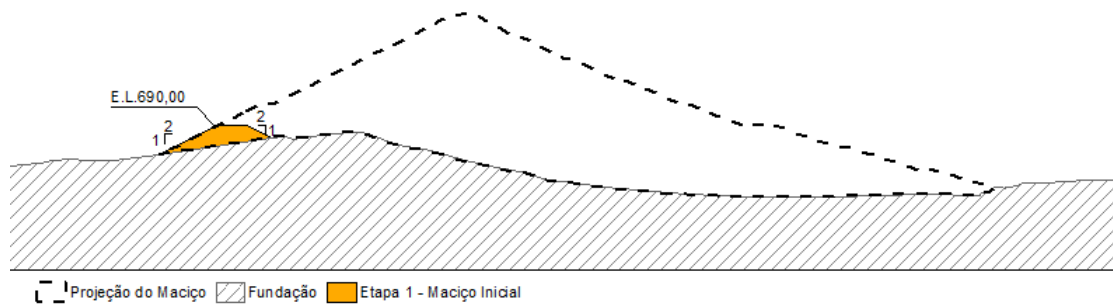


Figura 3-2 – Maciço inicial da barragem em 1999 (Tetra Tech, 2017)

Em 2006 foi executado o alteamento por jusante da barragem em etapa única, também construído em solo compactado até a El. 740,00 m (Figura 3-3).

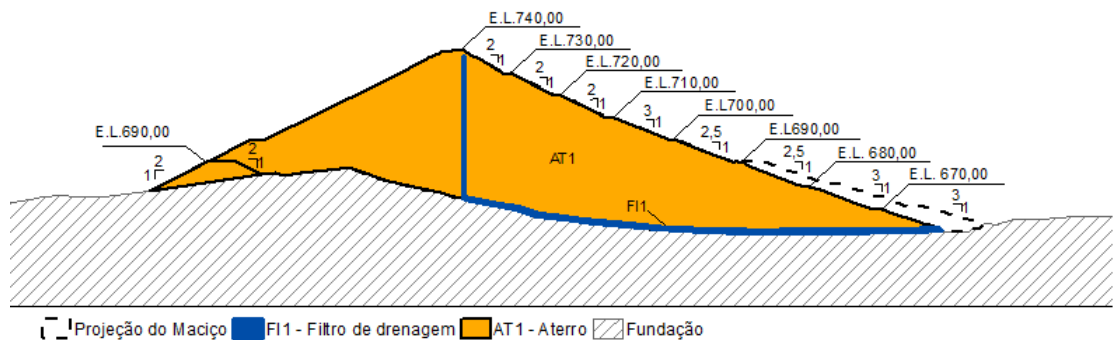


Figura 3-3 – Seção da barragem após o alteamento em 2007 (Tetra Tech, 2017)

Em 2014 foi concluída uma obra de adequação construtiva na qual foi implantada uma berma de reforço, conforme ilustra a Figura 3-4 que apresenta a seção da barragem após realização da berma de reforço.

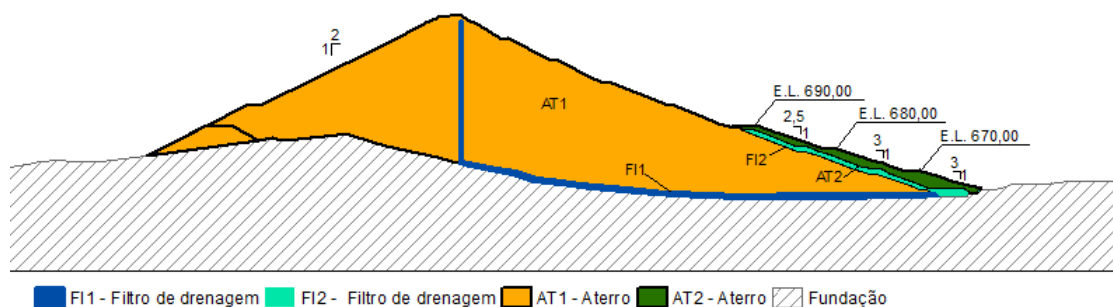


Figura 3-4 – Seção da barragem após a berma de reforço em 2014 (Tetra Tech, 2017)

A crista da barragem atual encontra-se na El. 740,00 m, com comprimento de 804,00 m e altura máxima de 83,0 m. O talude de montante possui inclinação de 1,0V:2,0H e para jusante os taludes são intercalados por bermas de 3,0 m de largura a cada 10,0 m de altura, com inclinações variáveis, conforme ilustra a Figura 3-5.

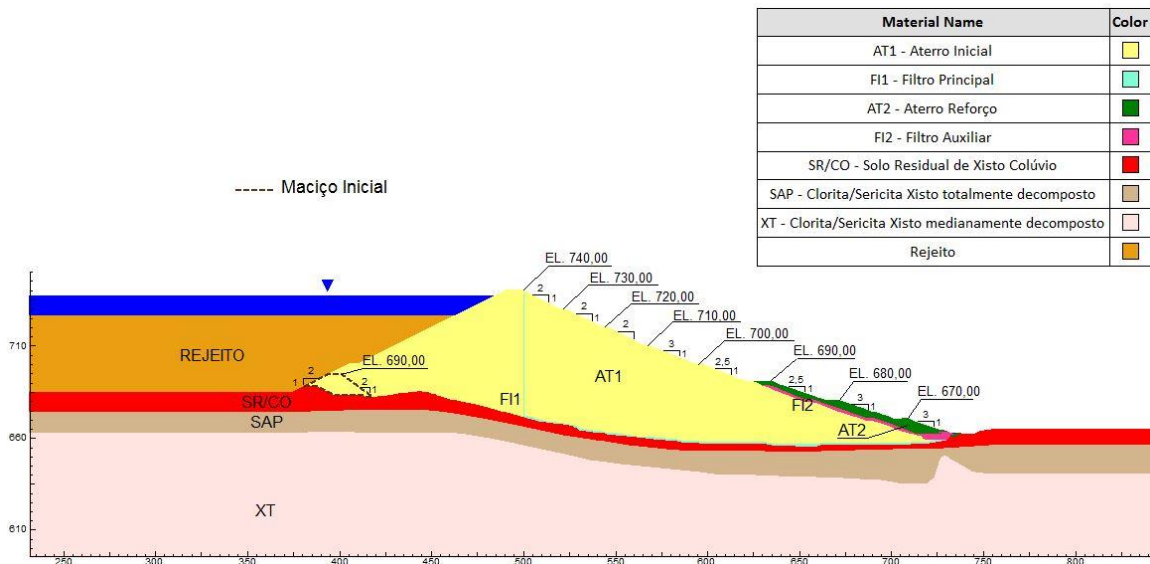


Figura 3-5 – Seção típica da barragem (Tetra Tech, 2017)

O sistema atual de drenagem interna da estrutura foi dividido em principal, complementar e de interligação. O primeiro, executado na etapa de alteamento da estrutura até a El. 740,00 m, é composto por três tipos de filtro “sanduíche” e um filtro vertical. O sistema complementar foi implantado nas obras da berma de reforço e se interliga ao sistema principal através de colunas e poços drenantes, que constituem o sistema de interligação.

O sistema extravasor da barragem é constituído por um vertedouro de superfície com seção de emboque retangular de 23,00 m e soleira posicionada na El. 737,00 m. O vertedouro é composto por canal de aproximação, emboque, descida d’água em degraus de concreto, bacia de dissipação em concreto e canal de restituição revestido com enrocamento, conforme apresentado na Figura 3-6. O atual sistema extravasor da Barragem-Piloto está dimensionado para atender aos critérios definidos na ABNT NBR 13.028 (2017) no que tange ao Período de Retorno de 10.000 anos.

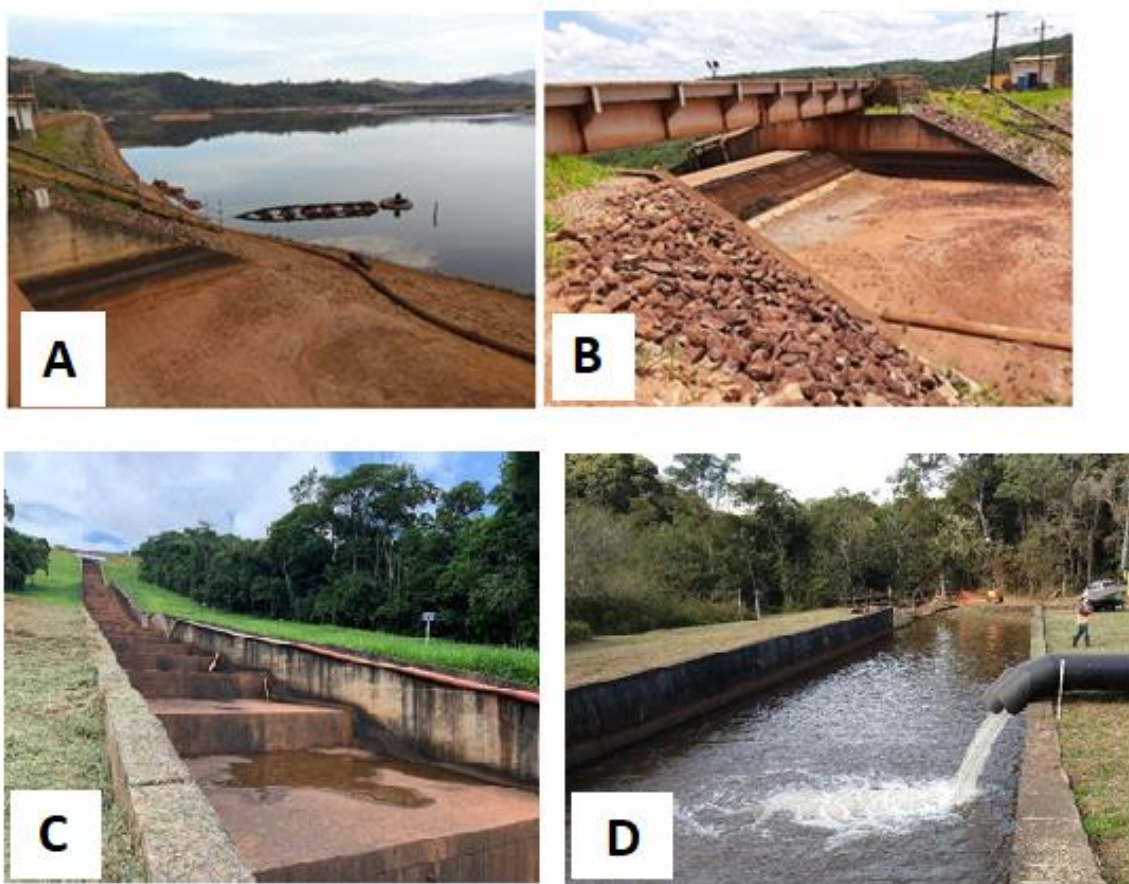


Figura 3-6 – Elementos do sistema extravasor da Barragem-Piloto. A) Canal de aproximação; B) Emboque/soleira; C) Descida d’água com dissipação em degraus; D) Bacia de dissipação por ressalto (Vale, 2018)

3.1.1 Levantamento dos Dados de Monitoramento

A Barragem-Piloto apresenta 01 (uma) régua limnimétrica com 2 segmentos, 45 (quarenta e cinco) piezômetros, 19 (dezenove) indicadores de nível d’água, 17 (dezesete) marcos superficiais, e 02 (dois) medidores de vazão. Além disto, são realizadas campanhas topobatimétricas periodicamente para o acompanhamento da ocupação do reservatório.

É importante destacar que, em função das variações das leituras e a dispersão nos resultados associados às medidas de deslocamentos/deformações (que podem estar associadas a erros de leituras, precisão do equipamento e método aplicado), é difícil ser conclusivo acerca do comportamento da Barragem-Piloto frente aos deslocamentos. Dentro deste contexto, para este trabalho acadêmico, os marcos superficiais não serão considerados na definição dos níveis de controle. Adicionalmente cabe destacar também que a análise do monitoramento topográfico é de extrema importância e deve ser incorporada à rede de monitoramento da barragem para

complementar as avaliações de desempenho e performance da estrutura. A adoção de tecnologias do tipo radar interferométrico InSAR (*Interferometric synthetic aperture radar*) para comparação com os dados de monitoramento topográfico por estação total e observação de magnitudes e direções de deslocamentos verticais e horizontais (direção Leste-Oeste) (caso existam) e tendências.

A Figura 3-7 apresenta a planta com a instrumentação instalada na barragem, bem como as seções (transversais e longitudinais) consideradas na análise. Destaca-se que na análise dos dados de monitoramento serão consideradas 5 seções transversais e 8 seções longitudinais, destacadas na Figura 3-7.

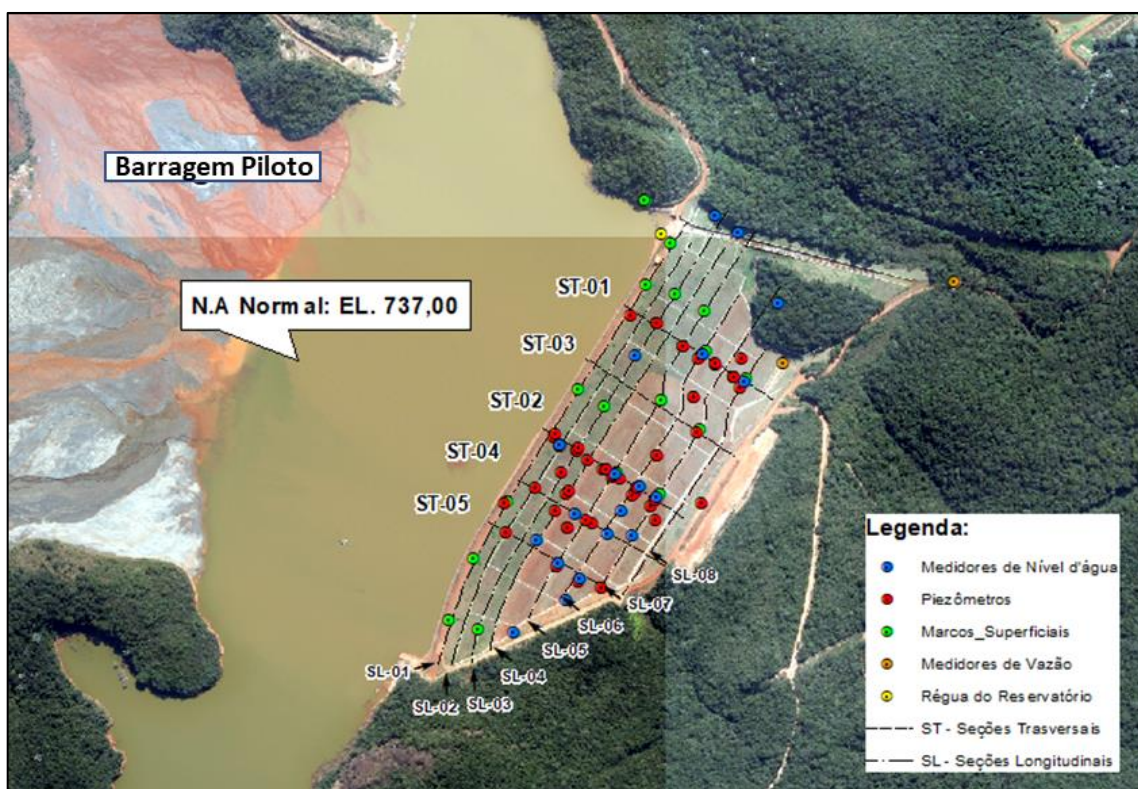


Figura 3-7 – Instrumentos instalados na Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)

As Tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 que constam no Anexo I deste trabalho, apresentam as principais informações acerca dos piezômetros, indicadores de nível d'água, régua limnimétrica e medidores de vazão.

É importante destacar que a consolidação dos dados da instrumentação, análise crítica dos resultados e entendimento do comportamento da barragem são a etapa prévia e fundamental

para a definição dos níveis de controle da instrumentação da barragem. Por conseguinte, com os dados em mãos foram avaliados os principais modos de falha propostos neste estudo.

3.1.2 Consolidação e Análise Crítica dos Dados de Monitoramento

Neste item serão apresentados os aspectos gerais a serem considerados para a definição dos níveis de controle da instrumentação implantada em barragens. Penna *et al.* (2017) destacam que, independentemente da metodologia a ser adotada, uma fase anterior e de extrema relevância que deve ser considerada neste processo é a Consolidação e Análise Crítica dos Dados de Monitoramento. Nesta fase de consolidação Penna *et al.* (2017) citam algumas etapas importantes dentre outras que devem fazer parte do trabalho:

- Elaboração/validação da planta instrumentada e seções instrumentadas (transversais e longitudinais) da barragem, de modo a checar se as informações dos instrumentos (código/ nome do instrumento, coordenadas, cota de topo, cota do terreno, cota da célula, cota de fundo, local de instalação etc.) estão coerentes com as diferentes bases de dados disponíveis (projeto, As Built, As Is, levantamentos topográficos, projeto geotécnico e outros);
- Verificação da consistência das leituras e correto funcionamento dos instrumentos (por exemplo: testes de vida, calibração etc.);
- Elaboração dos gráficos com as leituras dos instrumentos instalados (NA do reservatório, piezômetros, INAs, medidores de vazão) e dados de precipitação;
- Confrontar leituras do NA do reservatório com outras variáveis de interesse, por exemplo: poropressões, medidas de vazão, deformações;
- Indicar nas seções instrumentadas transversais e longitudinais as leituras mínimas, máximas e médias registradas nos piezômetros e INAs;
- Confrontar os dados de monitoramento com as previsões dos modelos numéricos de tensão x deformação e percolação (quando disponíveis);
- Cálculo de gradientes hidráulicos com base na posição e medidas de poropressão dos piezômetros;
- Elaboração de curva cota x área x volume para a definição do volume disponível para o trânsito de cheias no reservatório.

Uma análise crítica do comportamento da barragem é feita com base nestas informações, com o objetivo de avaliar o seu desempenho, assim como checar tendências de comportamento associados aos níveis piezométricos/freáticos, vazões da drenagem interna, ocupação do reservatório, entre outros aspectos. É importante mencionar que, além dos dados das leituras dos instrumentos, as informações provenientes das inspeções visuais de campo são de grande relevância para o entendimento do comportamento da estrutura e, desta forma, integram o processo de gestão e monitoramento da estrutura. Destaca-se que somente a partir deste pleno entendimento do comportamento da barragem, deve-se estabelecer a metodologia mais adequada para a definição dos níveis de controle da instrumentação.

3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE POR MODOS DE FALHA

Para o desenvolvimento deste trabalho foram estudados três métodos para a definição dos níveis de controle, baseados em estudos e trabalhos técnicos descritos no Capítulo 2, sendo eles:

- Método 1: Baseado no histórico de leituras;
- Método 2: Inspeções visuais;
- Método 3: Baseado no volume livre de amortecimento de cheias.

As metodologias 1 e 2 podem ser aplicadas aos modos de falha de instabilização e erosão interna; e a metodologia 3 é aplicada ao modo de falha de galgamento. A integração destas metodologias é a base do sistema de monitoramento e gestão da estrutura. Na

Tabela 3-1 as metodologias propostas e modos de falha associados são sumarizados.

Tabela 3-1 – Métodos analisados e Modos de Falha Associados

Métodos	Descrição	Instabilização	Erosão Interna	Galgamento
1	Histórico de leituras	X	X	
2	Inspeções visuais	X	X	
3	Volume livre de amortecimento de cheias			X

3.2.1 Identificação das Causas e Modos de Falha da Barragem-Piloto

De modo a auxiliar a identificação dos riscos da Barragem-Piloto foi elaborado um painel de controle da estrutura apresentada no Anexo V, a partir da compilação das ameaças/causas e modos de falha detectados nas auditorias técnicas de segurança. O objetivo deste painel foi permitir uma visualização global e estruturada das questões que afetam a segurança da barragem e permitir a definição dos modos de falha a serem avaliados quantitativamente. O Anexo V deste relatório apresenta o referido painel que indica não somente os modos de falha, mas também os meios de detecção, componentes, evidências e informações complementares, os controles existentes e principais recomendações. A análise do painel de controle permitiu a identificação dos seguintes modos de falha para a Barragem-Piloto: galgamento; erosão interna e instabilização, descartando a possibilidade de ocorrência de liquefação.

De forma resumida, a Tabela 3-2 apresenta os modos de falha, componentes e causas provenientes das análises de risco qualitativas que foram selecionados para serem avaliados quantitativamente.

Tabela 3-2 – Modos de Falha, Componentes e Causas Identificadas para a Barragem-Piloto

Modo de Falha	Componente	Causas
Erosão Interna	Maciço	<ul style="list-style-type: none">• Ausência de sistema de drenagem interna• Recalques diferenciais
	Fundação	<ul style="list-style-type: none">• Gradientes hidráulicos elevados
Instabilização	Maciço	<ul style="list-style-type: none">• Baixa resistência do material• Elevação das poropressões
Galgamento	Maciço	<ul style="list-style-type: none">• Capacidade de descarga insuficiente• Volume para trânsito de cheias insuficiente

O modo de falha liquefação não foi objeto deste estudo devido às características técnicas e construtivas da Barragem-Piloto, descritas no item 4.1 maciço da barragem construído em aterros compactados, controlados de solo residual, sendo este maciço alteado para jusante). Além disto, o maciço de fundação apresenta camadas de solo residual de xisto, maciço rochoso de xisto com diferentes graus de intemperização.

Segundo Olson (2001 *apud* Freire Neto, 2009), para avaliar a suscetibilidade à liquefação em barragens de rejeito, é preciso que os materiais do maciço e/ou da fundação da barragem

envolvam obrigatoriamente as 3 (três) etapas básicas: avaliação da suscetibilidade de liquefação; análise do mecanismo de início de liquefação (gatilho), seja ela por carregamento estático ou cíclico; estimativa da estabilidade de taludes pós-gatilho da liquefação. Caso as 3 condições descritas sejam atendidas, a barragem possui o potencial de ruptura por liquefação, o que não é percebido para a Barragem-Piloto. Dentro deste contexto, os materiais do aterro e de fundação descritos nos itens anteriores não se enquadram no primeiro critério de suscetibilidade à liquefação.

3.2.2 Método 1 - Análise do Monitoramento por Histórico de Leituras dos Instrumentos

A definição dos níveis de controle da instrumentação a partir dos dados históricos de leituras dos instrumentos mostra-se uma alternativa bastante interessante. Para as estruturas que dispõem de dados históricos de leitura do nível d'água no reservatório, pode ser feita a correlação entre as leituras do reservatório e as leituras de um referido instrumento que se deseja avaliar (medidor de vazão, piezômetro ou indicador de nível d'água).

Para o desenvolvimento deste trabalho e aplicação deste método foram avaliados os registros de leituras dos medidores de vazão, piezômetros e indicadores de nível d'água instalados no maciço e fundação da Barragem-Piloto, referente ao período de abril de 2007 a dezembro de 2018, dados estes fornecidos pela empresa VALE para fins acadêmicos.

O período de registros para a definição dos níveis de controle deve ser o mais representativo possível do comportamento da estrutura em condições normais de operação. Assim, o período de um ano adotado neste trabalho não seria o mais adequado. Nos casos em que o período de monitoramento é limitado torna-se relevante uma contínua atualização destas análises ao longo do monitoramento da estrutura, de forma que a compreensão do comportamento da estrutura seja refinada e a definição dos níveis de controle sejam mais representativos. Os registros de leituras dos instrumentos serão tratados com abordagem estatística em planilha de trabalho, no formato Excel, conforme metodologia descrita na sequência.

Neste estudo foi utilizada a metodologia sugerida por Kuperman *et al.* (2003), adotou-se como premissa que os valores obedecem a uma distribuição normal e o grau de confiança da amostra será de 95%. A Figura 3-8 apresenta um Intervalo de Confiança (IC), que define uma faixa (intervalo) de valores utilizados para se inferir o valor de um parâmetro populacional, sendo

este compreendido por linhas chamadas “valores de referência máximo” (X_2) e “valores de referência mínimo” (X_1).

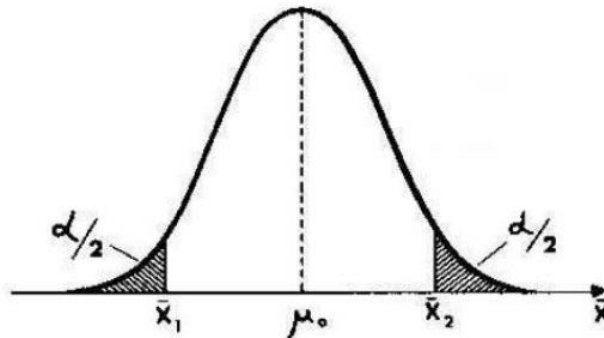


Figura 3-8 – Distribuição com intervalos de aceitação e rejeição, para um grau de confiança (Adaptado de Kuperman *et al.*, 2003)

- **Determinação dos Limites Inferior e Superior do Intervalo de Dados**

A determinação dos 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 3-9 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. Similarmente, 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.

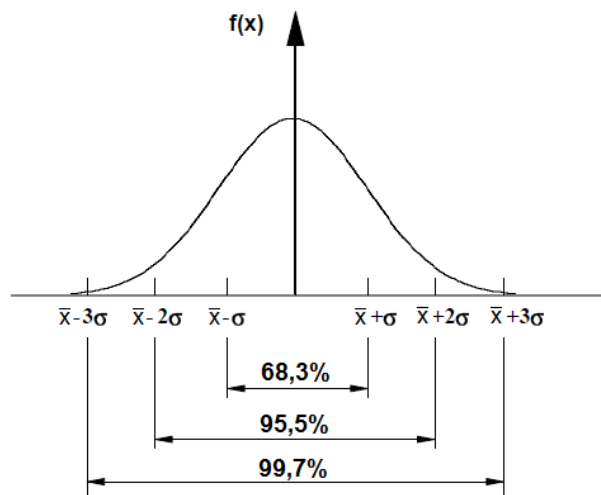


Figura 3-9 – Distribuição Normal (VALE, 2015)

Como recomendação deste trabalho acadêmico, se há praticamente 100% de confiança na estimativa dos limites superior e inferior da variável aleatória, deve ser utilizada uma variação de mais ou menos três desvios padrão em torno da média. Para um nível de confiança de 95%, deve ser utilizada uma variação de mais ou menos dois desvios padrão em torno da média. Cabe ressaltar novamente que os limites utilizados devem levar em consideração o julgamento de engenharia e o significado físico desta variação.

A definição dos níveis de controle a partir desta metodologia pode ser feita para qualquer instrumento (piezômetros, INAs, medidores de vazão, marcos superficiais, medidores de recalque, inclinômetros etc.). Entretanto, tendo em vista a dispersão nos resultados associados às medidas de deslocamentos/deformações da Barragem-Piloto, neste primeiro momento, para este trabalho, a metodologia será aplicada apenas para os piezômetros, INAs e medidores de vazão da drenagem interna. Contudo, reforça-se a importância do desenvolvimento de estudos que avaliem a associação dos registros de outros instrumentos de monitoramento, de maneira a complementar o processo de gestão de monitoramento da estrutura.

Adicionalmente, para melhor aplicação desta metodologia, o relatório técnico Tech Tetra (2018) destaca que para que o referido método possa ser aplicado, alguns critérios devem ser considerados:

- O NA do reservatório deverá ter atingido sua elevação de operação normal (soleira do extravasor), ou seja, o reservatório não poderá estar em fase de enchimento;
- Preferencialmente as condições do NA devem estar estabilizadas (sem grandes flutuações) e a rede de fluxo deve estar estabelecida;
- Deverá haver um histórico de leituras que permita avaliar o comportamento das leituras dos instrumentos. Sugere-se que se tenha um histórico de leituras com o NA do reservatório na condição normal de operação de no mínimo 2 anos, ou seja, dois períodos de seca e dois períodos de chuva;
- O comportamento geotécnico da barragem e histórico de leituras devem refletir uma condição normal/prevista para a estrutura, isto é, barragens que apresentam histórico de leituras não previstas e que denotam desempenho inadequado da barragem não podem ser utilizadas para a definição dos níveis de controle.

Após a análise crítica dos resultados do monitoramento e a partir da verificação do atendimento aos critérios ora mencionados, os seguintes aspectos devem ser considerados:

- Geração dos gráficos por instrumento e verificação da existência de leituras não coerentes que podem estar relacionadas à falha no instrumento e/ou erro de leituras;
- Exclusão destas leituras não coerentes;
- Definição dos valores das leituras mínimas, máximas e médias para cada instrumento;
- Definição da faixa de leituras prevista para cada instrumento. Esta faixa de leitura prevista refere-se à diferença entre a leitura máxima e mínima registrada no histórico de monitoramento;
- Definição da zona de consistência e inconsistência para cada instrumento.

Vale lembrar que os limites de controle estimados por esta metodologia não estão atrelados a um fator de segurança. No entanto, busca-se com esta metodologia traçar uma tendência de comportamento hidrodinâmico histórico da estrutura, a partir dos resultados do sistema de monitoramento. 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 a 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 pela segurança da barragem 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.

3.2.2 Método 2 - Inspeções Visuais

Para a aplicação deste método, foram avaliadas as Fichas de Inspeção de Segurança Regular da Barragem-Piloto que acontecem com frequência quinzenal e são realizadas por técnicos e engenheiros especializados. As referidas fichas de inspeção, assim como as avaliações mensais de performance geotécnica da estrutura, são arquivadas no Volume III do Plano de Segurança de Barragens (PSB). O PSB é um requisito legal disposto na Resolução N.º 95, de 07 de fevereiro de 2022 da ANM (Brasil, 2022).

Ainda segundo a referida resolução da ANM (Brasil, 2022), especificamente no Art. 19: é de responsabilidade do empreendedor realizar, quinzenalmente, ou em menor período, a seu critério, inspeções de rotina na barragem sob sua responsabilidade, sendo obrigatório o preenchimento da Ficha de Inspeção Regular.

Neste sentido, foram avaliados os registros fotográficos e as pontuações registradas no estado de conservação presentes nas Fichas de Inspeções de Segurança Regulares da Barragem-Piloto, no período de junho de 2017 a agosto de 2018 (o mesmo período adotado no método anterior). As Fichas de Inspeção Regular da Barragem-Piloto seguem o critério definido na Resolução ANM N.º 95/22 (Brasil, 2022), mais especificamente em relação aos campos Confiabilidade das Estruturas Extravasoras, Percolação, Deformações e Recalques, Deterioração dos Taludes/Paramentos e Drenagem Superficial referentes à Matriz de Estado de Conservação constante na referida legislação, conforme a Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Matriz de Classificação quanto a Categoria de Risco – Estado de Conservação (Brasil, 2022)

QUADRO 3 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS) L2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC				
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (k)	Percolação (l)	Deformações e Recalques (m)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (n)	Drenagem Superficial (o)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)	Drenagem superficial existente e operante (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)	Existência de trincas e/ou assoreamento e/ou abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias, sem restrição operacional e extravasor com capacidade plena (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)	Existência de trincas e/ou assoreamento e/ou abatimentos sem medidas corretivas em implantação (4)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Drenagem superficial inexistente (5)
EC - S (k até o)				

Ao se tratar do modo de falha erosão interna e conforme apresentado no item 3.3.4 uma maneira bastante assertiva para detecção é a partir da inspeção visual. Segundo Bureau of Reclamation (*U. S. Department of Interior, 2014*), juntamente com o monitoramento da instrumentação, a inspeção visual periódica seria recomendada para a detecção não somente deste, mas de outros potenciais modos de falha. O manual destaca ainda que o monitoramento isolado de instrumentos de medição de poropressão não é indicado para se detectar o processo de erosão interna em uma barragem. Isto se deve ao fato de estes instrumentos fornecerem informações

sobre pontos específicos do maciço e fundação. Desta forma, é improvável que algum instrumento esteja instalado exatamente no local onde se desenvolve o mecanismo de erosão interna. O referido manual (Bureau of Reclamation, 2014) cita os aspectos essenciais a serem observados no monitoramento para possível identificação de erosão interna em barragens:

- Evidência de material transportado pela percolação;
- Aumento de vazão percolada pelo maciço;
- Aparecimento de novas áreas de percolação ou surgência;
- Existência de regiões de percolação ou de lago a jusante da barragem que aumentam com o tempo;
- Aparecimento/crescimento exacerbado de vegetação que pode estar relacionado a novos caminhos de percolação;
- Existência de vegetação com raízes profundas no maciço que podem gerar caminhos preferenciais de fluxo;
- Presença de atividade animais/insetos no maciço que podem gerar caminhos preferenciais de fluxo;
- Existência de recalques ou subsidências (*sinkholes*);
- Existência de trincas transversais no maciço

Complementarmente, FEMA (2015) conclui que nada é tão importante quanto uma inspeção visual efetiva, uma vez que a partir desta podem ser detectados pontos de surgência, deformações e outros indicativos de erosão interna.

Entretanto, a utilização dos métodos 1 e 2 podem auxiliar na identificação de algum comportamento anômalo na barragem, que pode eventualmente estar associado ao fenômeno de erosão interna.

3.2.3 Método 3 - Análise do Volume Mínimo de Amortecimento para as Cheias

O Método 3 se aplica especificamente ao modo de falha de galgamento e tem como princípio base a garantia de que o volume de amortecimento do reservatório da barragem seja suficiente para suportar a cheia de projeto prevista para a estrutura. Destaca-se que a cheia de projeto utilizada foi definida com base na norma ABNT NBR 13028 (2017), a qual determina o tempo de retorno mínimo a ser considerado para o dimensionamento do sistema extravasor de uma

barragem conforme a Tabela 3.3. De acordo com a ABNT NBR 13.028 (2017), o Tempo de Retorno (TR) da cheia de projeto a ser considerado para o dimensionamento de estruturas extravasoras de barragens em operação é definido em função do dano potencial associado à sua ruptura hipotética. Após fechamento, o TR sugerido é de 10.000 anos para a Precipitação Máxima Provável (PMP), conforme apresentado na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Tempo de retorno mínimo a ser considerado para dimensionamento do sistema extravasor (ABNT NBR 13028, 2017).

Consequências ou dano potencial	Período de retorno de projeto (período operacional)	Período de retorno de projeto (período de fechamento)
Baixa	200 anos a 500 anos	10.000 anos a PMP
Média	500 anos a 1.000 anos	10.000 anos a PMP
Alta	1.000 anos a PMP	10.000 anos a PMP

Com o auxílio do *software* HEC-HMS 4.1 foi simulado o trânsito de cheias da Barragem-Piloto. O estudo de trânsito de cheias da Barragem-Piloto foi realizado a partir dos parâmetros físicos e hidrológicos das bacias de contribuição, das chuvas de projeto da região, da curva cota-volume do reservatório e cota-descarga do extravasor da Barragem-Piloto.

Em relação a galgamento, ICOLD (2001) explica que a falta de controle do regime hidrológico e do balanço hídrico é a maior causa de ruptura de barragens por este modo de falha. Assim, tanto para barragens em operação quanto para barragens inativas, o critério hidrológico adotado para segurança dessas estruturas deve ser aquele que considera a ocorrência de eventos extremos, isto é, o de Precipitação Máxima Provável (PMP).

Com a definição da vazão de projeto do extravasor, é feito o cálculo do volume mínimo necessário para o amortecimento da cheia de projeto, tendo como referência as definições de borda livre, morfologia do reservatório, plano de disposição dos rejeitos e as características hidrológicas da região. Desta forma, a partir do volume mínimo que deve ser respeitado para o trânsito de cheias, estabelece-se as ferramentas e métodos de monitoramento. Atualmente têm sido empregados pelas mineradoras levantamentos topobatimétricos periódicos e leituras de réguas de reservatório para o controle do volume e nível de água do reservatório, respectivamente.

Neste contexto, a primeira etapa do método consiste em avaliar se o modo de falha de galgamento se aplica à barragem analisada. Neste sentido, uma das premissas que pode ser adotada seria a análise da condição crítica para o reservatório considerado totalmente assoreado. Esta simulação de ocupação pode ser feita considerando que o nível de rejeitos/sedimentos se encontra na soleira do extravasor e a praia formada possui uma declividade no sentido de montante. A declividade a ser considerada pode ser definida caso a caso, sendo consideradas as condições de lançamento do rejeito na barragem, inclinação do terreno de fundação e outros fatores. Entretanto, para uma análise inicial sugere-se a adoção de uma declividade de 1%. O volume para trânsito de cheias será aquele compreendido entre o talude de montante do maciço da barragem e a praia de rejeitos/sedimentos, entre as elevações da soleira do extravasor e da crista do barramento, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 3-10

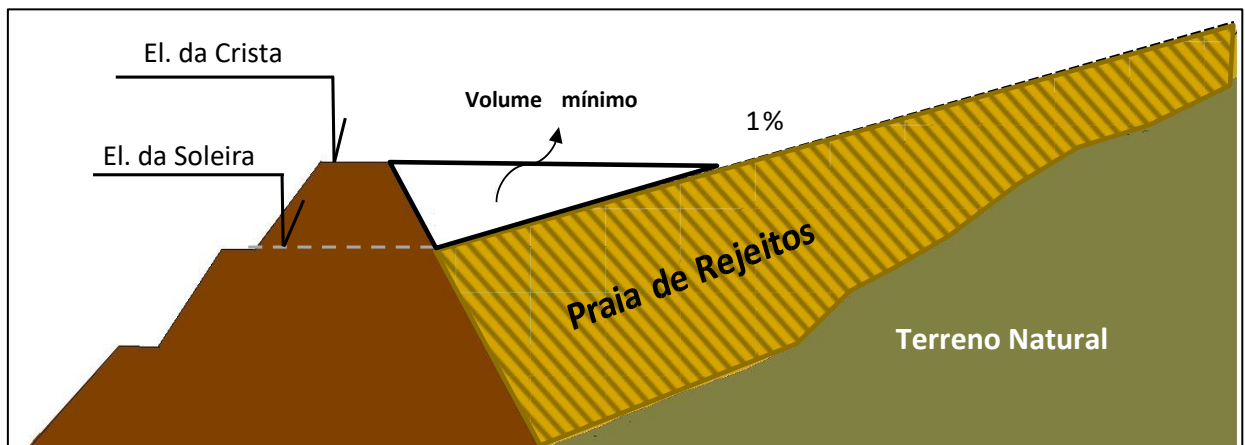


Figura 3-10 – Croqui esquemático do cenário de ocupação crítica do reservatório (Tetra Tech, 2018)

Os passos para aplicação do método de análise podem ser resumidos em:

- A obtenção da superfície da praia de rejeitos/sedimentos para a condição de ocupação máxima pode ser feita a partir do traçado de círculos concêntricos, com as elevações correspondentes à inclinação da praia (por exemplo: 1%) a partir da soleira do extravasor;
- Definição da curva cota x área x volume para a condição de ocupação crítica do reservatório;
- Realização do trânsito de cheias para a barragem e verificação se ela atende aos critérios de norma e/ou a um evento de precipitação superior (caso seja pertinente) para a condição de ocupação crítica.

A partir da análise do trânsito de cheias, caso seja verificado que mesmo para a condição crítica de ocupação do reservatório a cheia de projeto (ou cheia superior à de projeto – se for o caso) não acarreta galgamento da estrutura, pode-se considerar que o modo de falha galgamento não se aplica e não há necessidade de definição de níveis de controle para este modo de falha. Caso seja verificado o galgamento da estrutura para a condição crítica de ocupação do reservatório, as seguintes etapas devem ser consideradas:

- Realização de novos estudos de trânsito de cheias no reservatório, de modo a definir os volumes mínimos necessários para a passagem de cheias para períodos de retorno de referência de interesse (por exemplo: TR=10.000 anos; TR = 1.000 anos; TR=500 anos etc.);
- Definição do TR de referência a ser adotado para a barragem e seu respectivo volume de amortecimento necessário, tendo como referência a morfologia do reservatório e as características hidrológicas da região;
- Acompanhamento/monitoramento do volume livre para amortecimento de cheias. Este monitoramento pode ser feito a partir de campanhas topobatimétricas periódicas e/ou a partir de métodos expeditos.

A partir destes métodos torna-se possível a estimativa da área entre a cota da soleira e elevação da crista do barramento na praia de rejeitos/sedimentos. Cabe mencionar que se o NA do reservatório se encontrar na soleira do extravasor, esta área será referente à área do lago. Desta forma, multiplicando-se a área estimada pela altura disponível (cota da crista menos a cota da soleira) tem-se uma estimativa do volume livre para o amortecimento de cheias. É sugerida a aplicação deste método expedito de cálculo para reservatórios com pequenos volumes e que não apresentam morfologia complexa. De acordo com a Resolução ANM N.º 95/22 (Brasil, 2022), as barragens com volume total do reservatório menor ou igual a 500.000 m³, são classificadas como “muito pequeno”. A Figura 3-11 apresenta esquematicamente este método descrito.

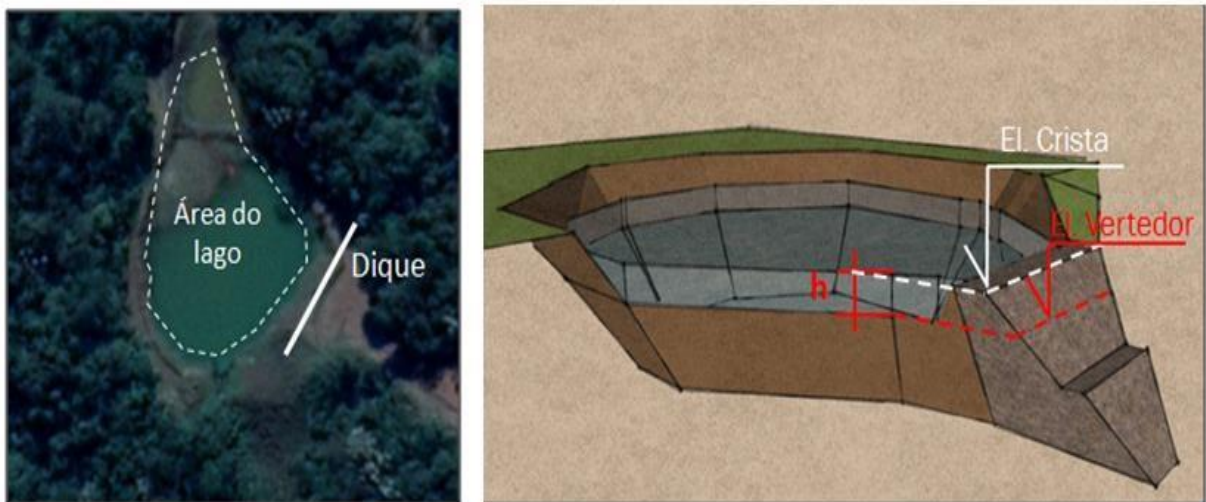


Figura 3-11 – Croqui esquemático para cálculo de volumes para amortecimento de cheias para pequenos reservatórios (Tetra Tech, 2018)

No caso de reservatórios de grande porte e/ou com morfologia complexa, o método descrito anteriormente também pode ser aplicado. De acordo com a Resolução ANM N.º 95/22 (Brasil, 2022), as barragens com volume total do reservatório maior ou igual a 50.000.000 m³, são classificadas como “muito grande”. Entretanto, a estimativa dos volumes a partir deste método para grandes reservatórios tende a ser conservadora. Dentro deste contexto, uma possibilidade é a implantação de estacas ao longo das margens do reservatório, de modo a possibilitar a identificação das regiões em que a praia de rejeitos/sedimentos atinge a cota da crista do barramento. A partir desta curva de nível na praia correspondente à cota da crista e com a declividade da praia, é possível estimar o volume livre para amortecimento de cheias, conforme representado esquematicamente na Figura 3-12

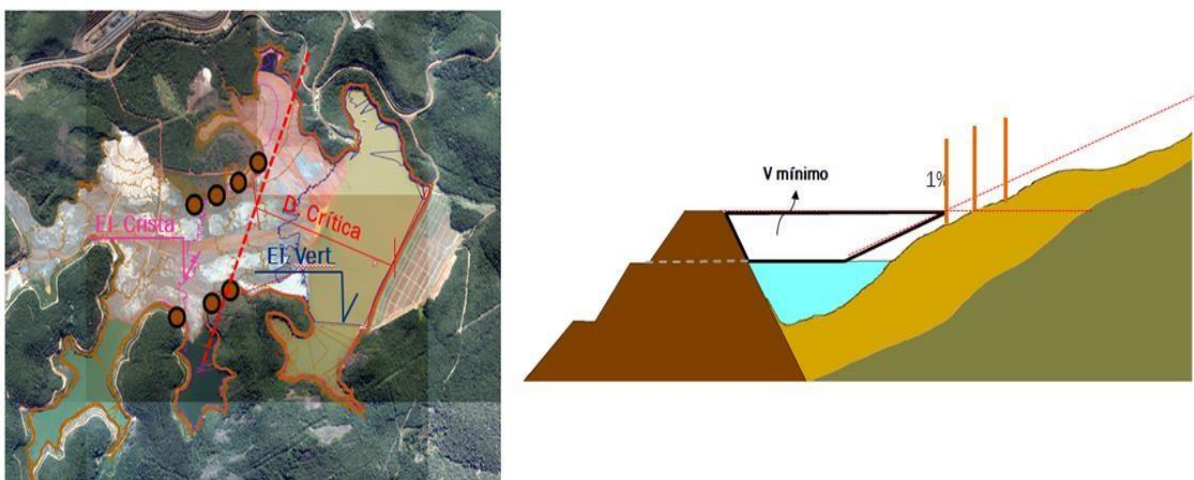


Figura 3-12 – Croqui esquemático para cálculo de volumes para amortecimento de cheias para reservatórios com morfologia complexa (Tetra Tech, 2018)

É importante destacar que, a depender das condições críticas de ocupação simuladas no reservatório, poderá ocorrer vertimento de água em condições fora de padrão. Neste sentido, este método tem foco na definição dos níveis de controle para a ocorrência de galgamento não se atentando aos aspectos relacionados às características físico-químicas do efluente.

3.3 INTERPRETAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE

A partir da definição dos níveis de controle da instrumentação utilizada no sistema de monitoramento devem ser estabelecidas as diretrizes e ações que serão tomadas quando a leitura de um ou mais instrumentos atingir um nível de controle (por exemplo: zona de inconsistência ou não aceitação). É importante destacar que quando um ou mais instrumentos atingirem um nível de controle, isto não necessariamente denota que a barragem se encontra em risco e/ou em uma condição crítica de segurança. Contudo, procedimentos devem ser adotados sempre que registros fora dos limites estabelecidos nos níveis de controle forem detectados. Alguns destes procedimentos são abordados em diferentes documentos e devem ser adaptados à realidade de cada estrutura e sistema de monitoramento utilizado.

Neste contexto, segundo o Guia de Boas Práticas - Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos (IBRAM, 2019):

- De acordo com a gravidade da situação, devem ser previstas ações a serem tomadas quando um ou mais instrumentos apresentarem comportamento anômalo, tais como:
- Repetição imediata da leitura;
- Inspeção visual da estrutura;
- Realização de estudos e análise para identificar a causa da alteração e planejamento de ações de reparo, quando necessárias;
- Realização de inspeções visuais e leituras da instrumentação com periodicidade reduzida;
- Realização de análises de estabilidade considerando os valores medidos;
- Acionamento de Inspeção Especial ou Plano de Ação de Emergência.

Por fim, o estudo de Kuperman *et al.* (2003) apresenta situações que, caso ocorram, representam situações de alerta:

- Medição de qualquer instrumento considerado importante para a avaliação de segurança da estrutura fora da faixa de Valores de Referência e manutenção deste valor mesmo após ter sido realizada verificação de consistência de leitura (repetição de leitura por outro técnico, verificação da integridade do instrumento e do aparelho de medição etc.);
- Manutenção do valor médio de cinco leituras efetuadas no mesmo instrumento, com espaçamento semanal entre elas, próximo da medida considerada anômala;
- Alteração na tendência de leitura, seja de aumento ou diminuição de valor medido, mesmo que os Valores de Referência não tenham sido ultrapassados.

Dentro deste cenário, a definição dos níveis de controle da instrumentação tem o propósito de auxiliar na gestão de segurança da barragem, de modo a informar ao responsável pela barragem quando um instrumento e/ou conjunto de instrumentos apresenta um comportamento não previsto e/ou pouco provável de ocorrer. A partir deste momento, o responsável pela barragem deve avaliar o comportamento destes instrumentos, levantar hipóteses e entender o comportamento e condições de segurança que a barragem 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.

É importante destacar que a definição dos níveis de controle deve ser entendida como uma ferramenta que tem como finalidade auxiliar na gestão de segurança da barragem. Os níveis de controle não devem ser entendidos como uma ferramenta de interpretação e análise crítica do comportamento da barragem, a qual deve ser de responsabilidade da equipe técnica responsável pela gestão de segurança da barragem.

3.3.1 Análise dos Níveis de Controle Atuais da Barragem-Piloto

A definição de níveis de controle (representados, equivocadamente, como Carta de Risco) torna-se uma ferramenta que tem sido usualmente adotada na gestão de segurança de barragens e se configura no estabelecimento dos níveis de controle, a partir da realização de análises de

estabilidade para diferentes condições de níveis piezométricos/freáticos, de modo a obter fatores de segurança de referência (FS = 1,5; FS = 1,3 e FS = 1,1) e as correspondentes leituras dos instrumentos.

Por este método se tratar da elevação dos níveis piezométricos, a fim de se alcançar os fatores de segurança de referência conforme ABNT NBR 13.028 (2017), é possível que outro mecanismo de falha ocorra antes que um destes níveis seja alcançado nos instrumentos.

A superfície freática da Barragem-Piloto foi estabelecida por modelo de fluxo, utilizando o programa computacional Slide versão 6.0, considerando o reservatório da Barragem em condições normais de operação (El. 737,00 m). A Tabela 3-5 apresenta um resumo dos parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade.

Tabela 3-5 – Parâmetros geotécnicos da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)

Litotipos	Peso Específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Permeabilidade (m/s)
AT1 – Aterro inicial	18,0	3,0	31,0	5 x 10 ⁻⁶
AT2 – Aterro da berma de reforço	22,5	22,0	32,0	1 x 10 ⁻⁹
FI1 – Filtro principal	18,0	0,0	32,0	3 x 10 ⁻³
FI2 – Filtro auxiliar tipo “sanduíche”	18,0	0,0	32,0	1 x 10 ⁻³
Horizonte Superior – Solo residual de Xisto Colúvio (SR/CO)	20,0	10,0	27,0	1 x 10 ⁻⁵
Horizonte Intermediário – Clorita/Sericita Xisto totalmente decomposto – saprólito (SAP)	22,0	10,0	32,0	1 x 10 ⁻⁵
Horizonte Inferior – Clorita/Sericita Xisto medianamente decomposto (XT)	18,0	200,0	38,0	1 x 10 ⁻⁹
Rejeito depositado (RJ)	19,0	0,0	30,0	1 x 10 ⁻⁵

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DOS DADOS DE MONITORAMENTO DA BARRAGEM-PILOTO

As seguintes considerações gerais são pertinentes acerca do monitoramento da Barragem-Piloto, a qual foi avaliada entre o período de janeiro/2007 a dezembro/2018. Os dados e relatórios técnicos referenciados foram fornecidos pela empresa VALE para fins acadêmicos. O histórico de monitoramento é descrito a seguir:

- Monitoramento da régua limnimétrica abrange o período de janeiro/2007 a dezembro/2018, com frequência quinzenal de leituras, exceto em determinados períodos em que as medições foram registradas com frequência menor (máximo de 44 dias) ou maior (mínimo de 1 dia);
- O histórico de medição das vazões da drenagem interna compreende o período de janeiro/2014 a dezembro/2018. As leituras foram registradas com frequência quinzenal até maio/2018, e a partir dessa data passaram a ser mensais;
- O histórico de monitoramento dos piezômetros e INAs correspondem ao período de janeiro/2009 a dezembro/2018. Destaca-se que os instrumentos possuem diferentes datas de instalação e, portanto, apresentam períodos distintos de leituras. Até maio/2018 as leituras foram registradas com frequência média de 15 dias, todavia, após esta data os registros tornaram-se mensais.

Para avaliar a rede de monitoramento da Barragem-Piloto foram consideradas 8 seções longitudinais (SL-1, SL-2, SL-3, SL-4, SL-5, SL-6, SL-7 e SL-8) e 5 seções transversais (ST-1, ST-2, ST-3, ST-4 e ST-5). A localização das referidas seções pode ser encontrada na Figura 3.7 e referências também são apresentadas em Tabelas (A.1, A.2, A.3 e A.4) no Anexo I. As Tabela 4-1 e Tabela 4-2 indicam os Piezômetros e INAs pertencentes a cada seção longitudinal e transversal, respectivamente.

Tabela 4-1 – Piezômetros e INAs – seções transversais (Tetra Tech, 2018)

ST - Seções Transversais				
ST-01	ST-02	ST-03	ST-04	ST-05
BRUBGNA032	BRUBGNA031	BRUBSLCPZ058	BRUBSLCNA038	BRUBSLCNA030
BRUBSLCNA034	BRUBGPZ046	BRUBSLCPZ059	BRUBSLCNA039	BRUBSLCNA036
BRUBSLCNA035	BRUBSLCNA031	BRUBSLCPZ060	BRUBSLCNA040	BRUBSLCNA037
BRUBSLCPZ018	BRUBSLCNA032		BRUBSLCNA041	BRUBSLCNA043
BRUBSLCPZ019	BRUBSLCNA033		BRUBGPZ042	BRUBSLCPZ038
BRUBSLCPZ020	BRUBSLCPZ008		BRUBGPZ043	BRUBSLCPZ041
BRUBSLCPZ021	BRUBSLCPZ009		BRUBSLCPZ034	BRUBSLCPZ051
BRUBSLCPZ022	BRUBSLCPZ010		BRUBSLCPZ039	BRUBSLCPZ052
BRUBSLCPZ045	BRUBSLCPZ011		BRUBSLCPZ040	BRUBSLCPZ053
BRUBSLCPZ046	BRUBSLCPZ012		BRUBSLCPZ054	
BRUBSLCPZ047	BRUBSLCPZ042		BRUBSLCPZ055	
BRUBSLCPZ050	BRUBSLCPZ043			
BRUBSLCPZ061	BRUBSLCPZ044			
BRUBSLCPZ067	BRUBSLCPZ048			
BRUBSLCPZ068	BRUBSLCPZ049			
	BRUBSLCPZ056			
	BRUBSLCPZ057			
	BRUBSLCPZ062			
	BRUBSLCPZ063			
	BRUBSLCPZ064			
	BRUBSLCPZ065			
	BRUBSLCPZ066			

Tabela 4-2 – Piezômetros e INAs – seções longitudinais (Tetra Tech, 2018)

SL - Seções Longitudinais							
SL-01	SL-02	SL-03	SL-04	SL-05	SL-06	SL-07	SL-08
BRUBSLCPZ 038	BRUBS LCPZ04 1	BRUBG PZ042	BRUBSL CPZ039	BRUBSL CNA031	BRUBSL CPZ043	BRUBSL CPZ044	BRUBSL CNA035
BRUBSLCPZ 009	BRUBS LCPZ04 0	BRUBSL CPZ010	BRUBSL CPZ034	BRUBSL CNA036	BRUBSL CPZ048	BRUBSL CPZ049	BRUBSL CPZ047
BRUBSLCPZ 018	BRUBG PZ046	BRUBSL CPZ011	BRUBGP Z043	BRUBSL CNA038	BRUBSL CPZ045	BRUBSL CPZ065	BRUBSL CPZ050
BRUBSLCPZ 008	BRUBG NA031	BRUBSL CPZ012	BRUBSL CPZ056	BRUBSL CPZ021	BRUBSL CPZ046	BRUBSL CPZ053	BRUBSL CPZ067
		BRUBSL CPZ020	BRUBSL CNA030	BRUBSL CPZ022	BRUBSL CPZ066	BRUBSL CPZ064	BRUBSL CPZ068
		BRUBSL CPZ019		BRUBSL CPZ042	BRUBSL CPZ052	BRUBSL CPZ059	
		BRUBG NA032		BRUBSL CPZ051	BRUBSL CPZ058	BRUBSL CNA033	
		BRUBSL CPZ007		BRUBSL CPZ054	BRUBSL CNA037	BRUBSL CNA041	
				BRUBSL CPZ055	BRUBSL CNA032	BRUBSL CPZ005	
				BRUBSL CPZ057	BRUBSL CNA034		
				BRUBSL CPZ062	BRUBSL CNA043		
				BRUBSL CPZ063	BRUBSL CNA040		
				SLCNA0 42	SLCNA0 39		
				SLCPZ00 6	SLCPZ06 0		
					SLCPZ06 1		

De modo geral, observa-se que as leituras dos instrumentos estão consistentes com o comportamento esperado para a barragem, sem tendências de subida e/ou descida dos níveis piezométricos/freáticos, bem como sem alterações relevantes nas vazões da drenagem interna. No Anexo II do presente trabalho são apresentados os gráficos das leituras dos piezômetros, indicadores de nível d'água (INAs), de acordo com as seções longitudinais e transversais correspondentes. No Anexo III são apresentadas as seções instrumentadas (transversais e longitudinais) com a indicação dos níveis máximos, mínimos e médios do histórico de leituras existentes. Destaca-se que para a representação das leituras nas seções instrumentadas foram descartados os registros identificados como erros de leitura e/ou leituras associadas a comportamentos anômalos dos instrumentos.

A título de exemplificar a plotagem das leituras nas seções instrumentadas, apenas as seções transversais ST-01 e ST-02 estão representadas de forma detalhada. As demais seções transversais (ST-03, ST-04 e ST-05) e todas as seções longitudinais (SL-1, SL-2, SL-3, SL-4, SL-5, SL-6, SL-7e SL-8) foram traçadas de forma esquemática, a partir da topografia atual e da topografia primitiva da barragem e, portanto, apresentam apenas o possível contato entre o maciço da barragem e a sua fundação. Ressalta-se que o dreno “sanduíche”, presente neste contato entre o maciço e fundação, não está representado nas referidas seções, assim como os demais detalhes.

4.1.1 Nível de água do reservatório da Barragem-Piloto

Os registros de leituras do nível de água do reservatório compreendidos entre o período de janeiro de 2007 a dezembro de 2018 foram obtidos por meio das régua linimétrica instaladas na Barragem-Piloto, possibilitando a interpretação do comportamento do NA do reservatório, através de gráficos, conforme apresentado na Figura 4-1. Nesta Figura são apresentados registros que extrapolam o período a ser utilizado na análise. A partir de janeiro de 2014, que compreende o final da construção da berma de reforço, nas leituras disponibilizadas e análise dos dados é possível perceber que o NA do reservatório se encontra na condição normal de operação (El. 737,00 m) e/ou pouco inferior à soleira do extravasor. Já a crista da barragem está na cota El. 740,00, conforme destaca a Figura 4-1.

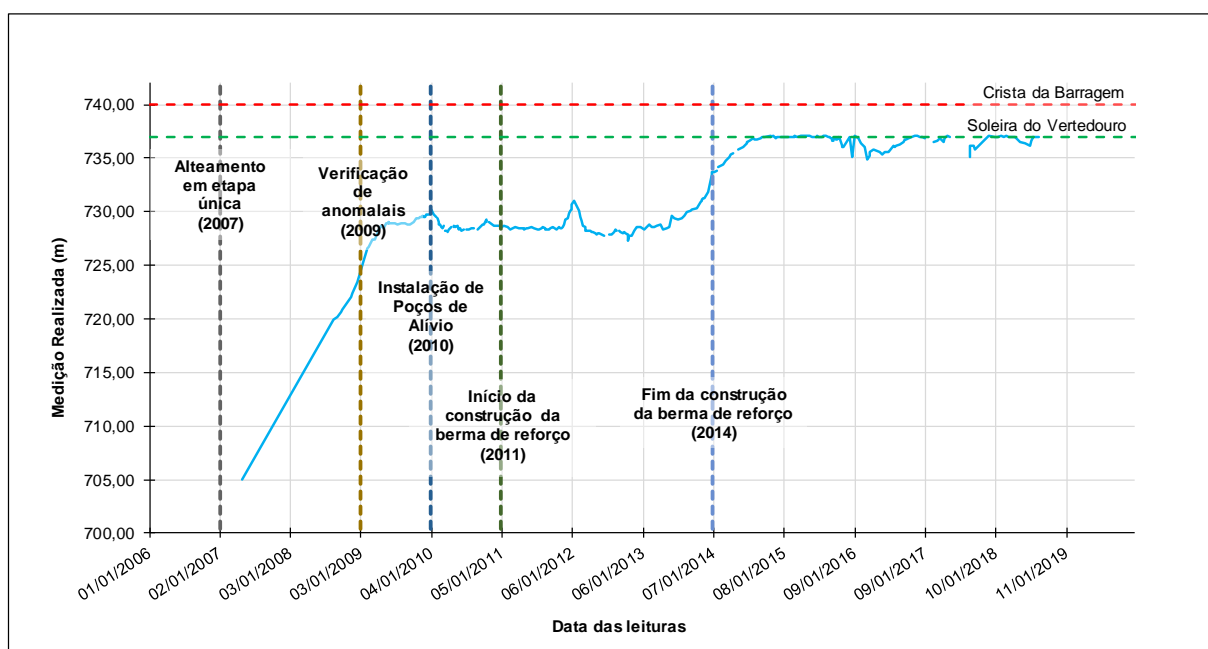


Figura 4-1 - Histórico de leituras do NA do reservatório (Tetra Tech, 2018)

4.1.2 Medidas de Vazão da Drenagem Interna da Barragem-Piloto

A Figura 4-2, apresenta os registros de leituras de vazão provenientes do sistema de drenagem interna, compreendidas entre o período de janeiro/2014 a dezembro/2018, obtidas por meio do medidor de vazão instalado na saída da drenagem interna na Barragem-Piloto. A partir destes registros torna-se possível, através de gráficos, interpretar o comportamento da vazão do sistema de drenagem interna conforme apresentado na Figura 4-2.

A partir das leituras disponibilizadas e análise dos dados, as seguintes considerações sobre os registros de leitura de vazão do sistema de drenagem interna da Barragem-Piloto foram realizadas:

- De maneira geral, as leituras das vazões estão compreendidas entre 20 L/s e 30 L/s, e o maior número de registros corresponde à vazão de 24,8 L/s, seguido da vazão de 21,8 L/s e 28,0 L/s;
- Verificam-se leituras inconsistentes nos dias 06/02/2014 ($Q = 5,28$ L/s), 26/03/2014 ($Q = 14,28$ L/s) e 23/04/2014 ($Q = 5,56$ L/s). Destaca-se que estas leituras não serão consideradas como representativas das vazões da drenagem interna. Já as leituras do dia 28/03/2014 ($Q = 32,1$ L/s) e 03/02/2015 ($Q = 29,1$ L/s), que estão acima dos limites superiores, foram consideradas na análise.

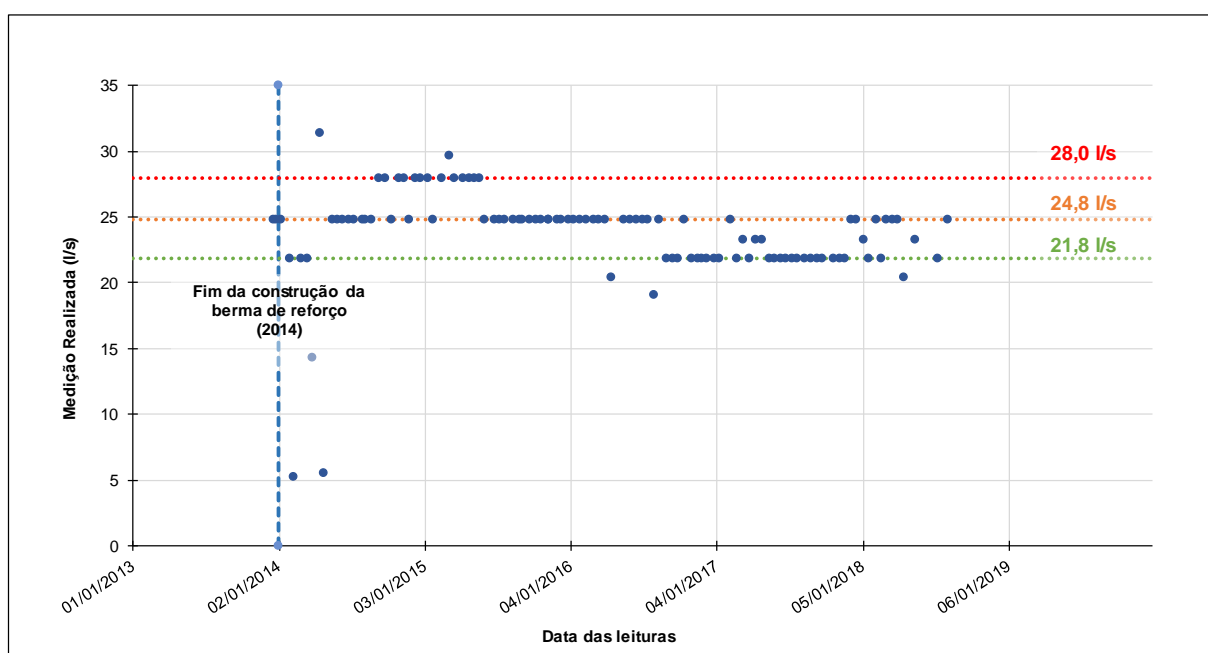


Figura 4-2 – Histórico de leituras das vazões da drenagem interna (Tetra Tech, 2018)

Desde modo, na Figura 4-2 foram definidos e destacados os seguintes níveis de controle: limite superior corresponde a moda dos registros históricos de maiores valores, nesse caso igual a 28,0 L/s (destacado em vermelho); limite inferior corresponde a moda dos registros históricos de menores leituras nesse caso igual a 21,8 L/s (destacado em verde); e um nível de operação referente à moda de todos os registros históricos de leituras igual a 24,8 L/s (destacado em amarelo). Como os níveis de controle definidos coincidem com os valores que mais se repetem na série histórica, eles podem ser constantemente alcançados, nesses casos, é necessário um julgamento crítico para definição mais realista dos limites de referência, podendo ser adotado também os maiores e menores registros de leituras como alternativa para definição dos limites de referência superior e inferior.

Os níveis de controle definidos serão utilizados, em associação às leituras de piezômetro e indicadores de nível de água, como indicativos de alerta relacionados a modos de falha de instabilidade e erosão interna. Um procedimento complementar e relacionado ao monitoramento das vazões de drenagem é a análise de turbidez da água percolada, podendo ser incorporada a utilização de turbidímetros associados a inspeções visuais.

4.1.3 Piezômetros e Indicadores de Nível d'água da Barragem-Piloto

Os registros de leituras dos piezômetros e indicadores de nível de água compreendidas entre o período de janeiro/2009 a dezembro/2018, obtidos por meio do histórico de monitoramento, são apresentados na Figura 4.3. Destaca-se que os gráficos contendo as leituras das seções transversais e longitudinais estão apresentados no Anexo II.

Além dos registros de piezômetros e INAs, a Figura 4-3 apresenta ainda o registro histórico do NA do reservatório já destacado na Figura 4.1. Destaca-se ainda (Figura 4-3) que a partir de 2014 foi instalado um número maior de instrumentos na estrutura; verifica-se que alguns instrumentos foram desativados ao longo do período de monitoramento. Tais processos são comuns no decorrer da existência da estrutura e devem ser considerados em procedimentos de atualização das análises de monitoramento. Deste modo, a instalação de novos instrumentos e desativação de outros estarão relacionadas à possibilidade de atualização dos níveis de controle.

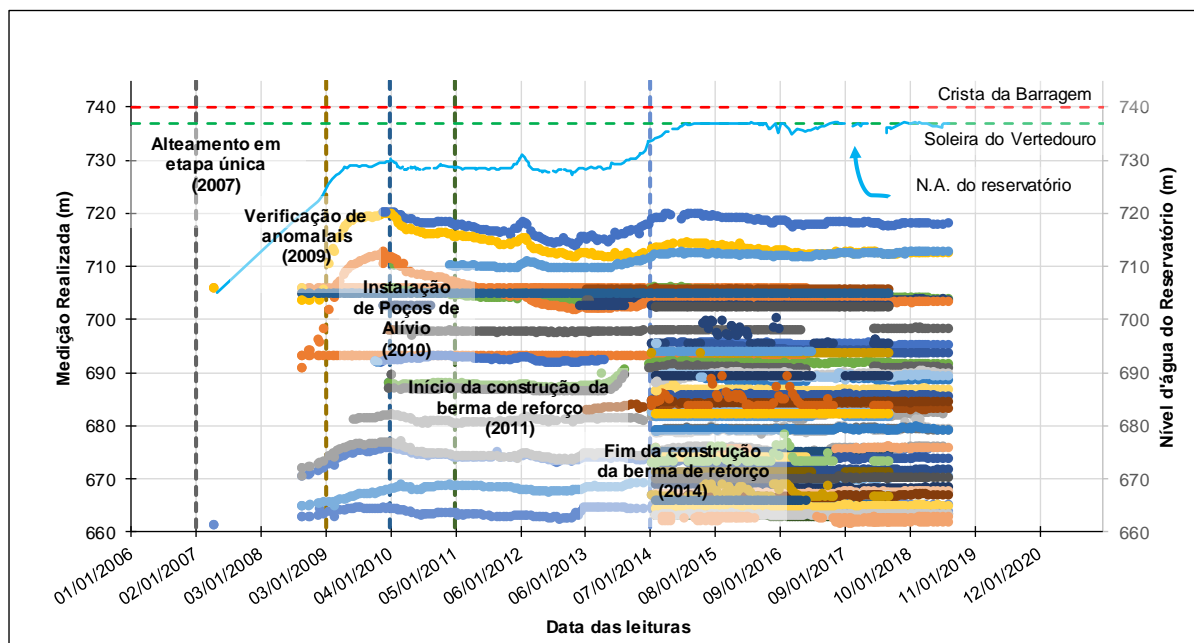


Figura 4-3 – Histórico de leituras de Piezômetros e INAs (Tetra Tech, 2018)

A partir da análise dos dados, as seguintes considerações são pertinentes. De maneira geral, é possível observar três períodos distintos no comportamento das leituras dos piezômetros e INAs:

- O primeiro período (entre 2007 e 2009) corresponde a uma tendência de elevação dos níveis piezométricos/freáticos em consonância com a elevação do NA do reservatório. Contudo, leituras de instrumentos neste intervalo só se mantêm perenes a partir da metade de 2008, quando o NA do reservatório foi mantido rebaixado por sistema de bombeamento próximo da El 730,0m;
- O segundo período (entre 2010 e 2013) corresponde a uma tendência de redução /estabilização dos níveis piezométricos/freáticos, possivelmente associados à instalação dos poços de alívio e manutenção do NA do reservatório rebaixado,
- O terceiro período (entre 2014 e 2018) corresponde a uma tendência de leve aumento/estabilização dos níveis piezométricos/freáticos, possivelmente associados à elevação/manutenção do NA do reservatório na soleira do extravasor (El. 737,00 m);
- Verifica-se consistência e coerência nas leituras da maioria dos piezômetros e indicadores de nível d'água instalados. Além disto, não se observam variações significativas nas leituras, principalmente a partir de 2014.
- Observa-se que a média das variações dos instrumentos é maior nas seções localizadas mais a montante (SL-01, SL-02 e SL-03). Esse comportamento é

esperado, visto que os instrumentos implantados a distâncias menores do reservatório tendem a reagir às mudanças no N.A. do reservatório de forma mais perceptível.

É importante mencionar que estas tendências de elevações e rebaixamentos dos níveis piezométricos/freáticos são mais evidentes em algumas seções e/ou instrumentos, sendo que tais instrumentos e seções devem ser destacadas em análises derivadas. Dentro deste contexto, no Anexo I são apresentadas as leituras dos instrumentos, de acordo com as seções estabelecidas e que permitem uma análise mais clara do comportamento citado. Além disto, as tabelas que constam no Anexo IV apresentam uma breve descrição do comportamento das leituras dos PZs e INAs por seção instrumentada (longitudinal e transversal).

4.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS POR MODOS DE FALHA

4.2.1 Modo de Falha: Erosão Interna

Conforme apresentado em itens anteriores, um dos métodos associados ao sistema de monitoramento é o de inspeções visuais. Neste contexto, conforme disposto no Art.19 da Resolução N.º 95, de 07 de fevereiro de 2022, da ANM (Brasil, 2022), é de responsabilidade do empreendedor realizar quinzenalmente, ou em menor período, a seu critério, inspeções de rotina na barragem sob sua responsabilidade, sendo obrigatório o preenchimento da Ficha de Inspeção Regular.

As inspeções de rotina na Barragem-Piloto aconteceram com frequência quinzenal e foram realizadas por uma equipe, devidamente treinada, da empresa VALE. As fichas de inspeções e as avaliações mensais de segurança são arquivadas no Volume III do Plano de Segurança de Barragens (PSB). As Fichas de Inspeção de Segurança Regular da Barragem-Piloto seguem o critério definido na antiga Portaria ANM N.º 70.389/17 (Brasil, 2017), revogada recentemente pela Resolução ANM N.º 95/22 (Brasil, 2022) mais especificamente em relação à Matriz Estado de Conservação constante na referida legislação.

A matriz Estado de Conservação é definida pela agência reguladora (ANM) e consiste nos parâmetros a serem inspecionados visualmente na barragem, notadamente: i) confiabilidade das estruturas extravasoras; ii) percolação; iii) deformações e recalques, iv) deterioração dos

taludes/paramentos. A referida matriz está inserida na Ficha de Inspeção de Segurança Regular (FIR) e deve ser preenchida no dia da inspeção de campo, ou seja, o Estado de Conservação é uma representação visual do dia da inspeção de campo aos componentes da estrutura. As pontuações obtidas são somadas, com o objetivo de compor classificação da barragem quanto à categoria de risco. A Tabela 4-3 apresenta um resumo das pontuações do estado de conservação presentes nas Fichas de Inspeções de Segurança Regulares da Barragem-Piloto no período de junho de 2017 a agosto de 2018.

Tabela 4-3 – Fichas de Inspeção de Segurança Regular - Estado de Conservação

MÊS/ANO		Confiabilidade das estruturas extravasoras	Percolação	Deformações e Recalques	Deterioração dos taludes / Paramentos	EC (máximo)
Jun./17	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0
Jul./17	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0
Ago./17	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0
Set./17	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0
Out./17	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0
Nov./17	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0
Dez./17	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0
Jan./18	1ª Quinzena	0	0	0	2	2
	2ª Quinzena	0	0	0	2	2
Fev./18	1ª Quinzena	0	0	0	2	2
	2ª Quinzena	0	0	0	2	2
Mar./18	1ª Quinzena	0	0	0	2	2
	2ª Quinzena	0	0	0	2	2
Abril/18	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	2	2
Maio/18	1ª Quinzena	0	0	0	2	2
	2ª Quinzena	0	0	0	2	2
Jun./18	1ª Quinzena	0	0	0	2	2
	2ª Quinzena	0	0	0	2	2
Jul./18	1ª Quinzena	0	0	0	2	2
	2ª Quinzena	0	0	0	2	2

MÊS/ANO		Confiabilidade das estruturas extravasoras	Percolação	Deformações e Recalques	Deterioração dos taludes / Paramentos	EC (máximo)
Ago./18	1ª Quinzena	0	0	0	0	0
	2ª Quinzena	0	0	0	0	0

Durante o período avaliado, as fichas de inspeção apresentaram máxima pontuação do Estado de Conservação igual a 2. Essa pontuação é referente à deterioração dos taludes/parâmetros e ocorreram de janeiro de 2018 até abril de 2018. Com exceção de apenas uma quinzena, foi observado nas fichas de inspeção que as ocorrências das pontuações são principalmente relacionadas à manutenção e serviços de limpeza da estrutura, tais como roçada e limpeza dos sistemas de drenagem, não apresentando risco para a sua integridade física, como por exemplo, presença de cupins, presença de vegetação, limpeza das drenagens e acessos. No entanto, foi registrado um pequeno escorregamento na margem esquerda que foi monitorado por prisma e classificado como estável. Com base nas inspeções realizadas, torna-se perceptível que não há indícios de um processo de erosão interna instalada na Barragem-Piloto.

Os 4 parâmetros avaliados no Estado de Conservação da Barragem-Piloto se mostram coerentes, quando comparados com as barragens avaliadas por Danese (2020) em sua dissertação. Segundo a autora, para as 222 estruturas analisadas, cerca de 99% das barragens inseridas na PNSB não apresentaram problemas relevantes e relacionados à percolação, a qual pode ser verificada tanto por meio da instrumentação quanto visualmente através de inspeções de campo. Cabe destacar ainda que conforme Art. 27 da Resolução ANM N.º 95/22:

Sempre que detectadas anomalias com pontuação 10 (dez) em qualquer coluna do Quadro 3 - Matriz de Classificação Quanto à Categoria de Risco (1.2 - Estado de Conservação), do Anexo IV, devem ser realizadas as ISE na forma desta Resolução.

Dentro deste contexto, neste trabalho, a observação visual foi considerada como a principal medida de identificação do modo de falha erosão interna. Contudo, variações (elevações ou reduções) relacionadas a vazões de drenagem interna podem ser indicativos de processos correlacionados à erosão interna, além disso, a condição de turbidez da água percolada através do maciço deve ser considerada no processo de análise visual (podendo neste contexto serem utilizados turbidímetros como instrumentos complementares). Outro aspecto a ser analisado é a existência de elevados gradientes hidráulicos que podem ser identificados por instrumentos

específicos (INA's e piezômetros). A identificação deste modo de falha, bem como todos os demais, é baseada em uma análise integrada de todo o sistema de monitoramento.

4.2.2 Modo de Falha: Instabilização

Na definição dos níveis de controle para o modo de falha de instabilização foram considerados os dados históricos de leituras e tratamento estatístico destes dados, conforme apresentado no item 4.4.1. Os seguintes critérios foram adotados na definição dos níveis de controle:

- Consideração do histórico de monitoramento dos últimos 4 anos (a partir de 2014), neste período verifica-se uma tendência de estabilização das leituras dos instrumentos (piezômetros, indicadores de nível de água e medidores de vazão da drenagem interna), o que justifica a delimitação deste espaço temporal. Este fato provavelmente está relacionado à pequena oscilação do nível de água do reservatório, que tem se mantido muito próximo à cota da soleira do extravasor;
- Foram desconsideradas as leituras relacionadas a erros e/ou mau funcionamento do instrumento. Neste sentido, foram descartadas as medições que apresentavam variação drástica entre leituras consecutivas (maior que 1 metro), caso esta tendência não fosse observada nos demais instrumentos;
- Os instrumentos BRUBSLCPZ066, BRUBSLCPZ052, BRUBSLCPZ060, BRUBSLCNA031, BRUBSLCNA032, BRUBSLCNA033 e BRUBSLCNA035 consistentemente apresentaram leituras anômalas. As causas dessas leituras anômalas foram identificadas, sendo essas leituras descartadas. Os referidos instrumentos também foram considerados para a definição dos níveis de controle, com exceção destas leituras comentadas anteriormente.

Com base no exposto, a partir da análise crítica dos dados, foram estabelecidos os níveis de controle dos instrumentos associados à faixa de variação das leituras esperada para cada instrumento, definindo valores mínimos e máximos. Foram calculadas a média e o desvio padrão das amostras. E, considerando um número de dados que varia em torno de 100 para todos os instrumentos, foi estabelecida distribuição normal com nível de confiança de 95%.

A Figura 4.3 e Figura 4.4 exemplificam a análise estatística descritiva aplicada aos dados, sendo respectivamente apresentado o histograma dos registros obtidos pelo piezômetro

BRUBSLCPZ018 (Figura 4-4) e a demonstração gráfica dos níveis de controle máximos e mínimos do BRUBSLCPZ018 localizado na seção transversal – ST-01 (Figura 4-5).

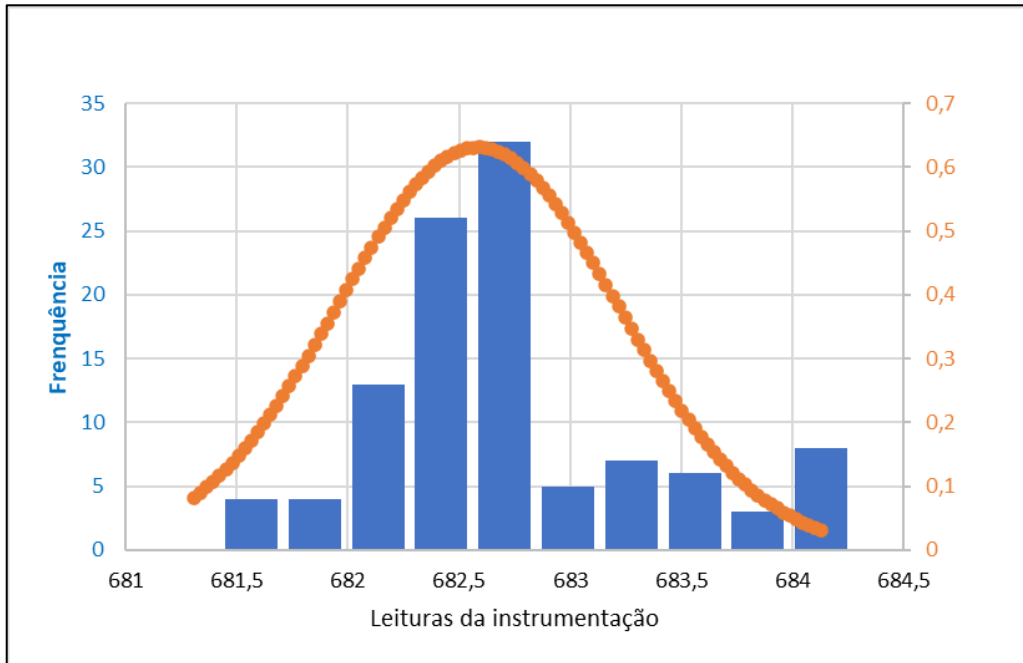


Figura 4-4 – Histograma dos registros obtidos pelo piezômetro BRUBSLCPZ018

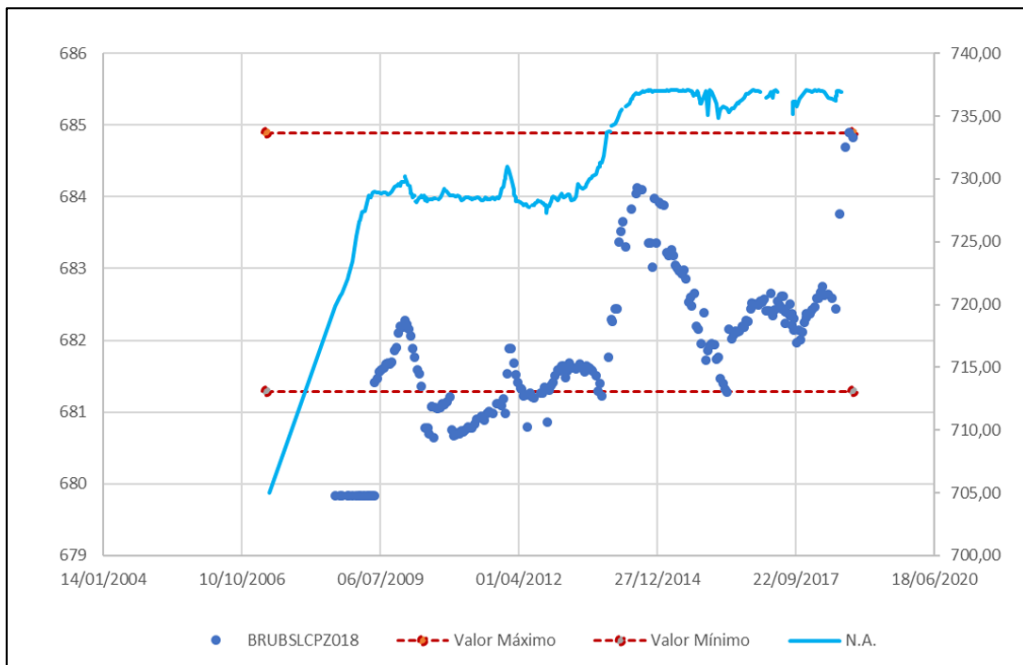


Figura 4-5 – Definição dos níveis de controle para o piezômetro BRUBSLCPZ018

A Tabela 4-4 apresenta os resultados da definição das leituras máximas e mínimas, assim como a variação entre elas para todos os instrumentos instalados na Barragem-Piloto. Ressalta-se que

os valores apresentados correspondem apenas às leituras realizadas a partir de 2014, uma vez que estes são os valores representativos do comportamento atual do barramento.

Tabela 4-4 – Valores máximos, mínimos e médios dos Piezômetros e INAs

ST	SL	Instrumento	Máximo	Mínimo	Médio	Variação	
ST-01	SL-01	BRUBSLCPZ018	684,13	681,28	682,57	2,85	
ST-01	SL-03	BRUBGNA032	684,92	682,63	683,92	2,29	
ST-01	SL-03	BRUBSLCPZ019	676,35	674,70	675,78	1,65	
ST-01	SL-03	BRUBSLCPZ020	676,09	673,69	675,09	2,40	
ST-01	SL-05	BRUBSLCPZ021	665,44	664,39	664,89	1,05	
ST-01	SL-05	BRUBSLCPZ022	670,79	668,43	670,04	2,36	
ST-01	SL-06	BRUBSLCNA034	673,30	671,64	672,28	1,66	
ST-01	SL-06	BRUBSLCPZ045	663,64	662,96	663,29	0,68	
ST-01	SL-06	BRUBSLCPZ046	664,08	663,45	663,73	0,63	
ST-01	SL-06	BRUBSLCPZ061	669,33	668,11	668,63	1,22	
ST-01	SL-08	BRUBSLCNA035	669,15	666,80	667,44	2,35	
ST-01	SL-08	BRUBSLCPZ047	Seco				
ST-01	SL-08	BRUBSLCPZ050	663,69	663,23	663,41	0,46	
ST-01	SL-08	BRUBSLCPZ067	663,02	661,72	662,19	1,30	
ST-01	SL-08	BRUBSLCPZ068	663,12	662,18	662,83	0,95	
ST-02	SL-01	BRUBSLCPZ008	714,66	712,32	713,23	2,34	
ST-02	SL-01	BRUBSLCPZ009	Seco				
ST-02	SL-02	BRUBGNA031	706,10	705,71	705,71	0,39	
ST-02	SL-02	BRUBGPZ046	705,13	703,52	704,07	1,61	
ST-02	SL-03	BRUBSLCPZ010	704,30	702,81	703,63	1,49	
ST-02	SL-03	BRUBSLCPZ011	693,64	693,42	693,43	0,22	
ST-02	SL-03	BRUBSLCPZ012	Seco				
ST-02	SL-04	BRUBSLCPZ056	695,95	693,75	694,60	2,20	
ST-02	SL-05	BRUBSLCNA031	Seco				
ST-02	SL-05	BRUBSLCPZ042	Seco				
ST-02	SL-05	BRUBSLCPZ057	686,13	685,40	685,92	0,73	
ST-02	SL-05	BRUBSLCPZ062	Seco				

ST	SL	Instrumento	Máximo	Mínimo	Médio	Varição
ST-02	SL-05	BRUBSLCPZ063	684,81	684,06	684,48	0,75
ST-02	SL-06	BRUBSLCNA032	Seco			
ST-02	SL-06	BRUBSLCPZ043	Seco			
ST-02	SL-06	BRUBSLCPZ048	Seco			
ST-02	SL-06	BRUBSLCPZ066	Inconsistente			
ST-02	SL-07	BRUBSLCNA033	Seco			
ST-02	SL-07	BRUBSLCPZ044	Seco			
ST-02	SL-07	BRUBSLCPZ049	667,90	667,23	667,52	0,67
ST-02	SL-07	BRUBSLCPZ064	667,26	666,19	666,81	1,07
ST-02	SL-07	BRUBSLCPZ065	Seco			
ST-03	SL-06	BRUBSLCPZ058	674,14	673,28	673,86	0,86
ST-03	SL-06	BRUBSLCPZ060	667,76	665,60	666,53	2,16
ST-03	SL-07	BRUBSLCPZ059	665,24	664,65	664,99	0,59
ST-04	SL-02	BRUBSLCPZ040	706,37	704,10	704,95	2,27
ST-04	SL-03	BRUBGPZ042	698,72	698,09	698,26	0,63
ST-04	SL-04	BRUBGPZ043	691,70	690,88	691,21	0,82
ST-04	SL-04	BRUBSLCPZ034	695,95	695,18	695,55	0,77
ST-04	SL-04	BRUBSLCPZ039	692,47	691,73	692,00	0,74
ST-04	SL-05	BRUBSLCNA038	689,33	688,63	688,88	0,70
ST-04	SL-05	BRUBSLCPZ054	688,00	686,62	686,92	1,38
ST-04	SL-05	BRUBSLCPZ055	689,97	688,65	689,54	1,32
ST-04	SL-06	BRUBSLCNA039	679,98	679,09	679,46	0,89
ST-04	SL-06	BRUBSLCNA040	679,86	678,56	679,56	1,30
ST-04	SL-07	BRUBSLCNA041	670,69	670,10	670,26	0,59
ST-05	SL-01	BRUBSLCPZ038	720,17	717,65	718,69	2,52
ST-05	SL-02	BRUBSLCPZ041	713,03	711,85	712,52	1,18
ST-05	SL-04	BRUBSLCNA030	Seco			
ST-05	SL-05	BRUBSLCNA036	Seco			
ST-05	SL-05	BRUBSLCPZ051	690,49	688,25	689,79	2,23
ST-05	SL-06	BRUBSLCNA037	Seco			
ST-05	SL-06	BRUBSLCNA043	Seco			
ST-05	SL-06	BRUBSLCPZ052	681,38	678,80	679,36	2,58

ST	SL	Instrumento	Máximo	Mínimo	Médio	Variação
ST-05	SL-07	BRUBSLCPZ053				Seco
-	SL-05	BRUBSLCNA042				Seco

Observa-se que as variações dos instrumentos são maiores nas seções longitudinais localizadas mais próximas à crista da barragem (SL-01, SL-02 e SL-03). Este comportamento é esperado, visto que os instrumentos implantados a distâncias menores do reservatório tendem a reagir às mudanças no NA do reservatório de forma mais perceptível.

Tendo em vista que as medições de vazão fornecem informações relevantes sobre o funcionamento da drenagem interna do barramento e, conseqüentemente, sobre a estabilidade da estrutura, também foram definidos níveis de controle para o medidor de vazão da drenagem interna da Barragem-Piloto. Estes limites foram determinados com base no histórico de leituras do medidor de vazão da barragem (Figura 4.2) e estão apresentados na Tabela 4-5.

Tabela 4-5 – Níveis de controle para medidor de vazão da drenagem interna

Código do instrumento	Valor máximo (L/s)	Valor Mínimo (L/s)	Variação (L/s)
BRUBSLCMI001	28	21,8	6,2

Conforme listados nas Tabelas 4.4 e 4.5, foram definidos os níveis de controle para os piezômetros, indicadores de nível d'água e medidor de vazão da drenagem interna. Verificou-se que em todos os instrumentos, a maioria das leituras apresentaram valores coerentes, havia um extenso histórico de registros e as avaliações de condição de estabilidade das estruturas mostraram-se adequadas em termos de segurança física. Assim sendo, optou-se pelo uso do modelo estatístico.

As leituras que se encontrarem fora da faixa definida (valor da leitura mínima e valor da leitura máxima) deverão ser analisadas sob a possibilidade de serem leituras em zonas de inconsistência ou não aceitação. No caso do presente estudo foi possível perceber os valores que se encontram na zona de inconsistência ou não aceitação referem-se aos momentos que foram identificadas as anomalias na estrutura (2009) e final da construção da berma de reforço (2014). Neste caso deve-se buscar um melhor entendimento sobre as causas deste comportamento não previsto e tomadas as ações que se fizerem necessárias. Kuperman *et al.*

(2003) apresentam situações que, caso ocorram, representam situações de Alerta:

1. Medição de qualquer instrumento considerado importante para a avaliação de segurança da estrutura fora da faixa de Valores de Referência e manutenção deste valor mesmo após ter sido realizada verificação de consistência de leitura (repetição de leitura por outro técnico, verificação da integridade do instrumento e do aparelho de medição etc.);
2. Manutenção do valor médio de cinco leituras efetuadas no mesmo instrumento, com espaçamento semanal entre elas, próximo da medida considerada anômala;
3. Alteração na tendência de leitura, seja de aumento ou diminuição de valor medido, mesmo que os Valores de Referência não tenham sido ultrapassados.

Destaca-se que a ação e/ou medida corretiva a ser adotada dependerá do entendimento do problema/comportamento anômalo e deverá ser definida caso a caso a partir de uma análise criteriosa dos dados da instrumentação, evidências de campo e documentos da barragem.

4.2.3 Modo de Falha: Galgamento

A metodologia de definição de níveis de controle para o modo de falha de galgamento tem como princípio base a garantia de que o volume de amortecimento da barragem seja suficiente para suportar a cheia de projeto prevista para a estrutura. Detalhes sobre o dimensionamento das estruturas hidráulicas para drenagem superficial foram apresentados no Capítulo 3.

Para avaliar se a estrutura estudada está sujeita ao galgamento para a cheia de projeto, foi verificado se há ocorrência deste modo de falha para uma situação crítica de ocupação do reservatório. Neste cenário, assume-se que os rejeitos estão dispostos na forma de uma praia de 1% de inclinação que se estende do ponto de disposição até a soleira do sistema extravasor. Portanto, o volume de amortecimento da barragem corresponde à parcela de volume compreendida entre o talude de montante do maciço e a praia de rejeitos, entre as elevações da soleira do extravasor e da crista do barramento, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 4-6.

Para avaliar se a Barragem-Piloto está sujeita ao galgamento, inicialmente foi traçada a curva Cota vs. Volume da barragem levando em consideração a situação de ocupação crítica. Destaca-

se que para simular a ocupação da praia de rejeitos, foram traçados na topografia atual da barragem círculos concêntricos com as elevações correspondentes à inclinação da praia, a partir da localização do vertedouro, conforme ilustra a Figura 4-6.

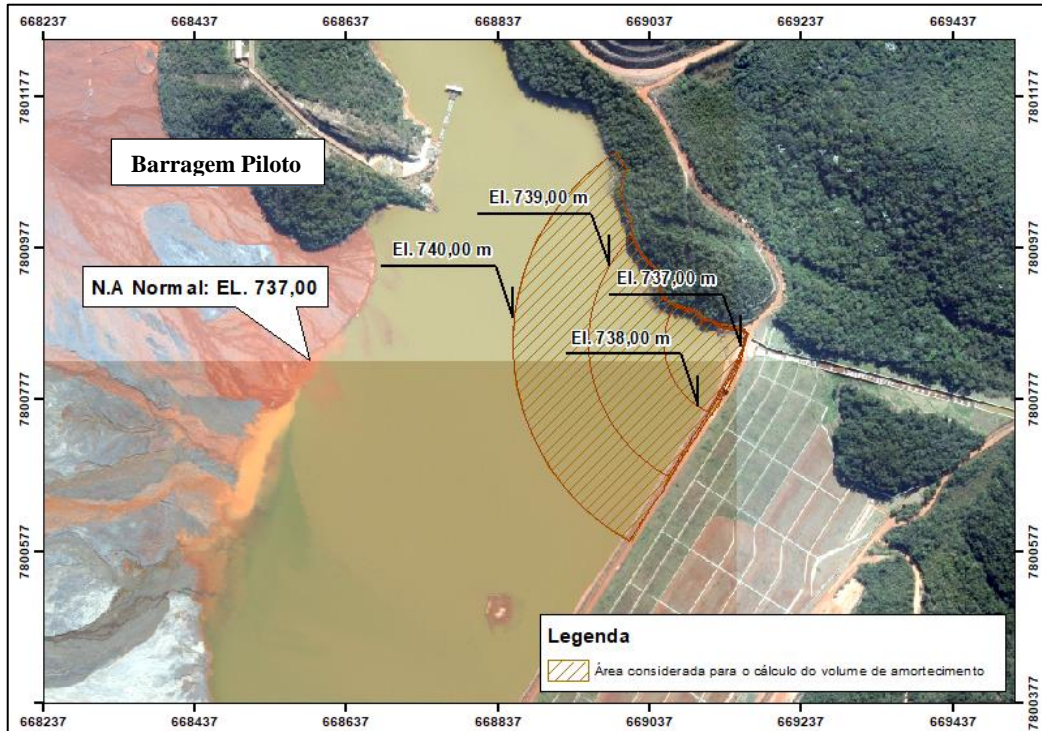


Figura 4-6 – Curvas de nível para o cenário de ocupação crítica do reservatório (Tetra Tech, 2018)

A Figura 4-7 apresenta a curva Cota vs. Volume, calculada a partir da topografia modificada, para a definição do volume disponível para o trânsito de cheias.

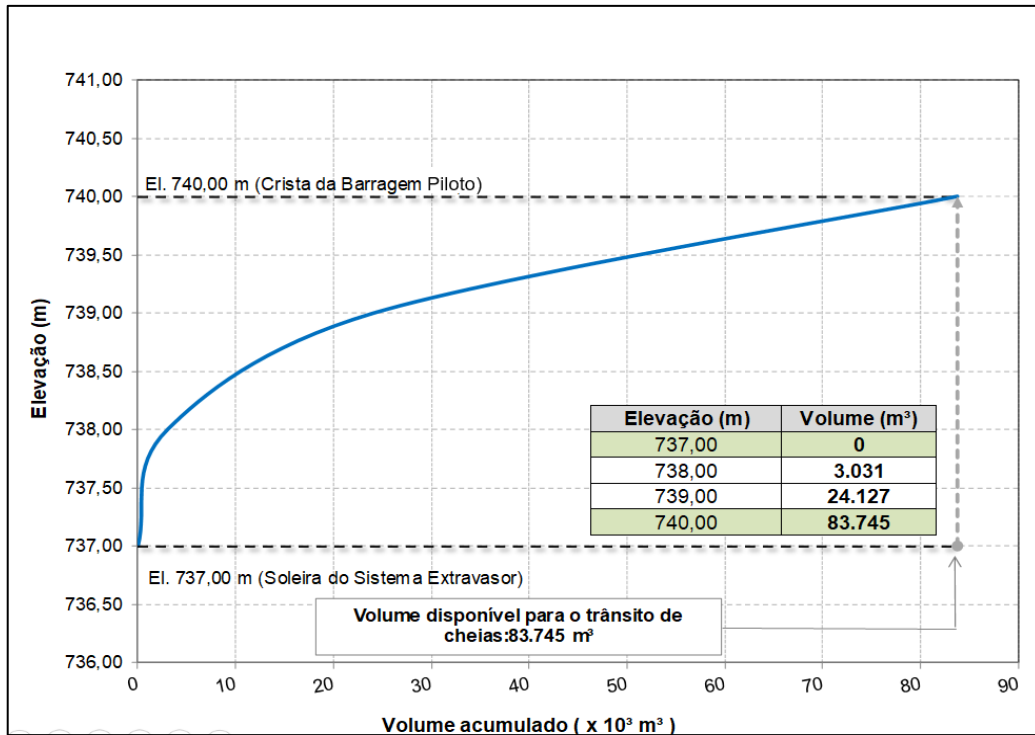


Figura 4-7 – Curva cota vs. volume para o cenário de ocupação crítica do reservatório (Tetra Tech, 2018)

Observa-se que o volume obtido para a condição crítica de ocupação do reservatório (83.745 m³) é consideravelmente inferior ao volume disponível na situação atual, que é igual a 2.551.025 m³. A Figura 4-8 ilustra o contraste entre os dois volumes calculados.

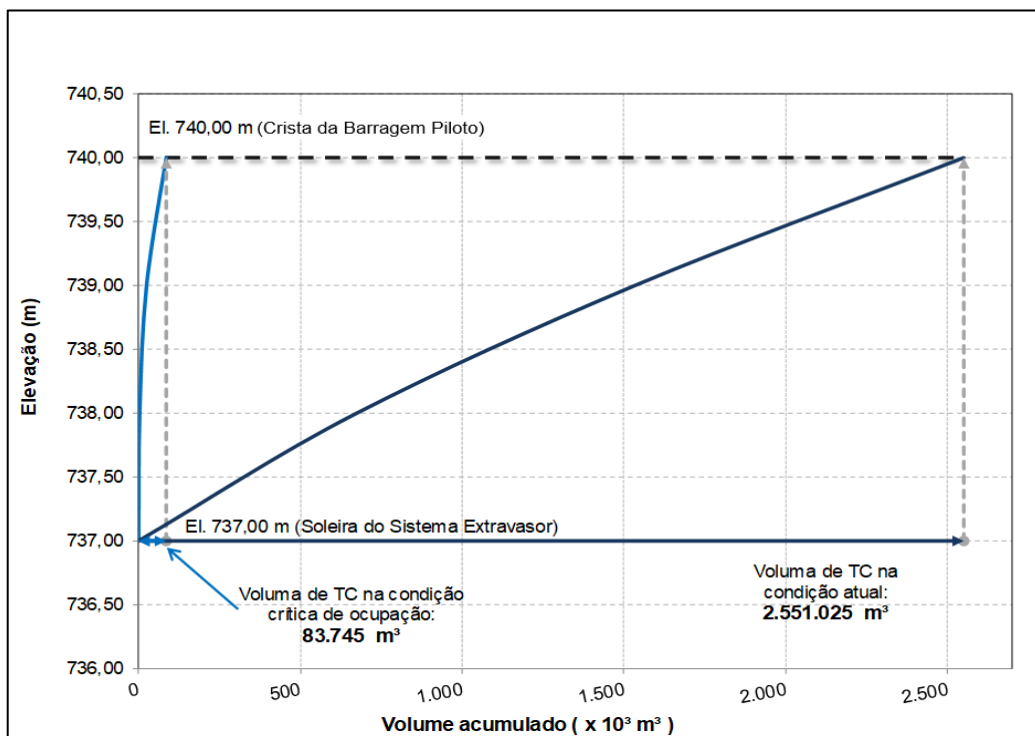


Figura 4-8 – Comparação entre as curvas Cota vs. Volume do cenário crítico de ocupação e do cenário atual (Tetra Tech, 2018)

O estudo de trânsito de cheias da Barragem-Piloto foi realizado a partir dos parâmetros físicos e hidrológicos das bacias de contribuição, das chuvas de projeto da região, da curva cota-volume do reservatório e cota-descarga do extravasor da Barragem-Piloto. Os referidos parâmetros utilizados foram obtidos no estudo de trânsito de cheias (Tetra Tech, 2018).

Como o sistema extravasor da Barragem-Piloto foi dimensionado para suportar cheias associadas a eventos de precipitação com tempo de retorno de 10.000 anos, este foi o período considerado para a definição de níveis de controle da estrutura. Neste contexto, destaca-se a importância da existência de registros hidrológicos consistentes que embasam as análises hidrológicas. A Tabela 4-6 apresenta uma síntese dos principais dados hidrológicos utilizados na simulação. Já Figura 4-9 ilustra a curva de descarga adotada para o sistema extravasor.

Tabela 4-6 – Parâmetros físicos e hidrológicos da área de drenagem da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)

Estrutura	Área de drenagem (km ²)	% A _{imp}	CN _{ponderado}	I _a (mm)	L _{talvegue} (m)	S _e (%)	t _c (min)	lagtime (min)
Barragem-Piloto	11,85	5,11	77	15,17	6.429	1,36	128	76,8

Na Tabela 4-6 tem-se que:

- (% A_{imp}) representa a relação entre a área do reservatório e a respectiva bacia de contribuição;
- (CN) denota Número da Curva Índice, o qual depende do Uso e Ocupação do Solo nos terrenos da bacia de contribuição e representa um parâmetro do método utilizado para a transformação dos hietogramas totais em efetivos. Para o presente estudo, o CN foi definido considerando-se o solo da região pertencente ao Grupo Hidrológico C1 e condição de umidade antecedente II;
- (I_a) denota a abstração inicial ocorrida no terreno da bacia de contribuição, calculada por meio do (CN) e utilizada na transformação dos hietogramas totais em efetivos;

¹ SARTORI, A; GENOVEZ, A. M. *Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN*. 235p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

- (Ltalvegue) representa o comprimento do talvegue principal da área de drenagem, medido desde o ponto mais distante do exultório ao eixo da barragem;
- (Se) corresponde à declividade média equivalente do talvegue principal. Destaca-se que para o trecho ocupado por rejeitos considerou-se como premissa a inclinação da praia de 1%;
- (tc) denota o tempo de concentração da bacia, aqui calculado pela média aritmética dos valores determinados pelas fórmulas de Kirpich e G.B. Williams;
- e
- (lagtime) também conhecido como tempo de retardo, denota um parâmetro do método utilizado, a transformação chuva-vazão, equivalente a 3/5 do tempo de concentração.

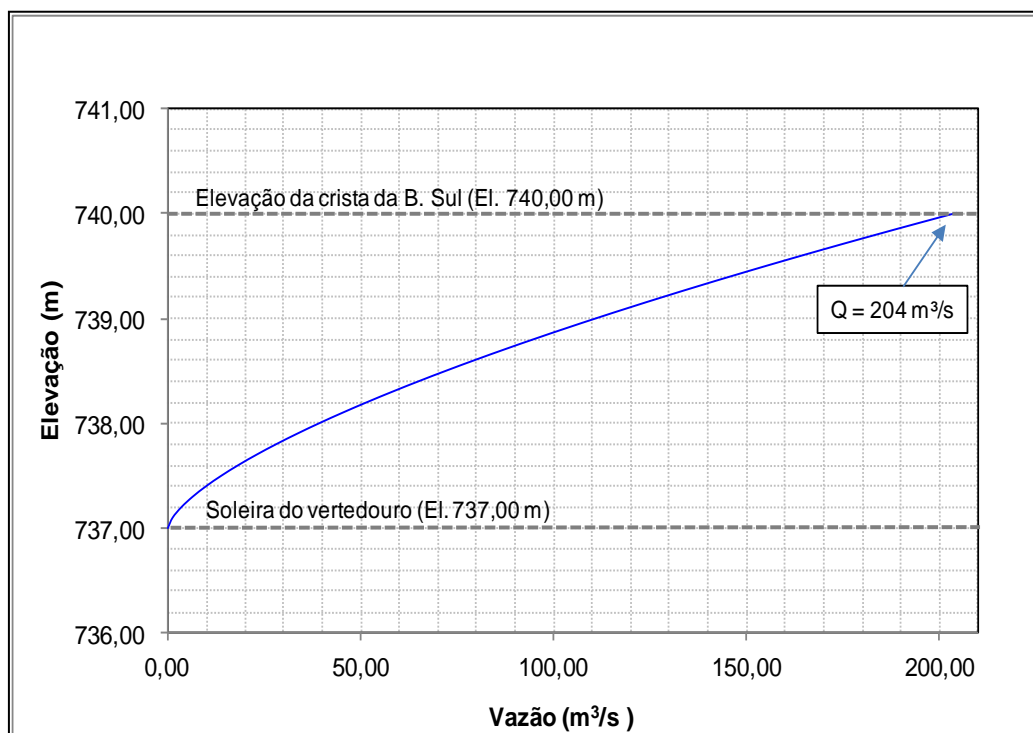


Figura 4-9 – Curva de descarga do sistema extravasor da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)

Os resultados da análise de trânsito de cheias da Barragem-Piloto, podem ser encontrados da Tabela 4-7.

Tabela 4-7 – Resultados do trânsito de cheias pelo reservatório da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)

Resultados – Barragem-Piloto	
Cheia de Projeto (TR)	10.000 anos
Duração da chuva de projeto ²	4 horas
Altura da chuva de projeto (mm)	180
Elevação da crista do reservatório (m)	740,00
Elevação do NA Normal no reservatório (m)	737,00
Vazão máxima afluente (m ³ /s)	158,41
Vazão máxima efluente (m ³ /s)	155,32
NA máximo <i>maximorum</i> (m)	739,50
Volume do hidrograma afluente (m ³)	1.384.878
Volume disponível para amortecimento de cheias	83.745
Volume de pico associado ao NA máx.	53.834
Borda livre remanescente (m)	0,50

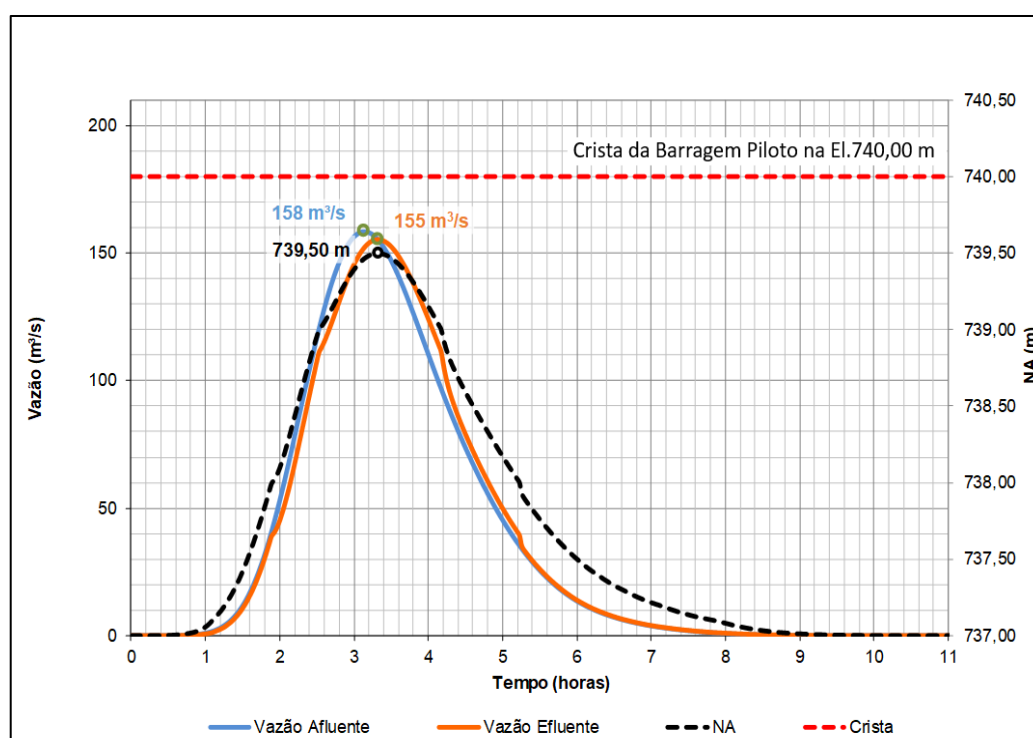


Figura 4-10 – Resultado do trânsito de cheias pelo reservatório da Barragem-Piloto (TR=10.000 anos) (Tetra Tech, 2018)

² Chuva de Projeto é aquela cuja duração gera a maior sobrelevação do nível de água (NA) no interior do reservatório, quando da passagem da cheia decorrente desta chuva (chuva de projeto).

De acordo com os resultados obtidos nas simulações hidrológicas, levando em consideração o estado crítico de ocupação do reservatório, a duração crítica observada foi de 4 horas, para o tempo de retorno de 10.000 anos. O nível de água máximo verificado no reservatório correspondeu a El. 739,50 m, com uma borda livre de 0,50 m. O pico de vazão afluente foi de 158 m³/s, totalizando um volume de 1.384.878 m³. O coeficiente de escoamento verificado na bacia hidrográfica afluente à Barragem-Piloto foi igual a 0,65, já que o volume precipitado totalizou 2.142.000 m³. Por fim, cabe mencionar que a vazão máxima defluente, após o amortecimento da passagem da cheia pelo reservatório, foi de 155 m³/s.

Conclui-se que, mesmo para o cenário de ocupação crítica, o reservatório da Barragem-Piloto é capaz de transitar a cheia correspondente a um evento de precipitação de 10.000 anos de tempo de retorno, sem que haja ocorrência de galgamento.

Neste sentido, considera-se que para a Barragem-Piloto, o modo de falha por galgamento não é aplicável e que, portanto, não seria necessária a definição de níveis de controle para este mecanismo de ruptura.

4.2.4 Apresentação dos Atuais Níveis de Controle da Barragem-Piloto

A Tabela 4-8 apresenta um resumo comparativo dos níveis registrados pelos instrumentos em campo contemplados até setembro de 2017 e os valores estabelecidos pelo modelo computacional. De acordo com a calibração obtida conforme Figura 4-11, verifica-se que de maneira geral os valores de poropressão do modelo refletiram, de maneira satisfatória, as leituras de campo. Entretanto, para alguns instrumentos, não foi possível a adequada calibração modelo/leituras de campo. Considera-se que não foi possível obter um bom resultado de calibração do modelo, uma vez que os valores das leituras de indicadores de nível d'água apresentam-se muito altos em comparação com os valores de pressão dos piezômetros, impossibilitando uma calibração mais assertiva. Dessa forma, levanta-se outra hipótese que alguns INAs, podem estar sofrendo influência no registro de leitura por uma entrada de água preferencial pela superfície do terreno.

Material Name	Color	KS (m/s)
AT1 - Aterro Inicial	Yellow	5.1e-006
F11 - Filtro Principal	Cyan	0.0025
AT2 - Aterro Reforço	Green	1e-009
F12 - Filtro Auxiliar	Pink	0.1
SR/CO - Solo Residual de Xisto Colúvio	Red	1e-005
SAP - Clorita/Sericita Xisto totalmente decomposto	Light Brown	1e-005
XT - Clorita/Sericita Xisto medianamente decomposto	Light Pink	1e-009
RJ - Rejeito	Orange	0.01

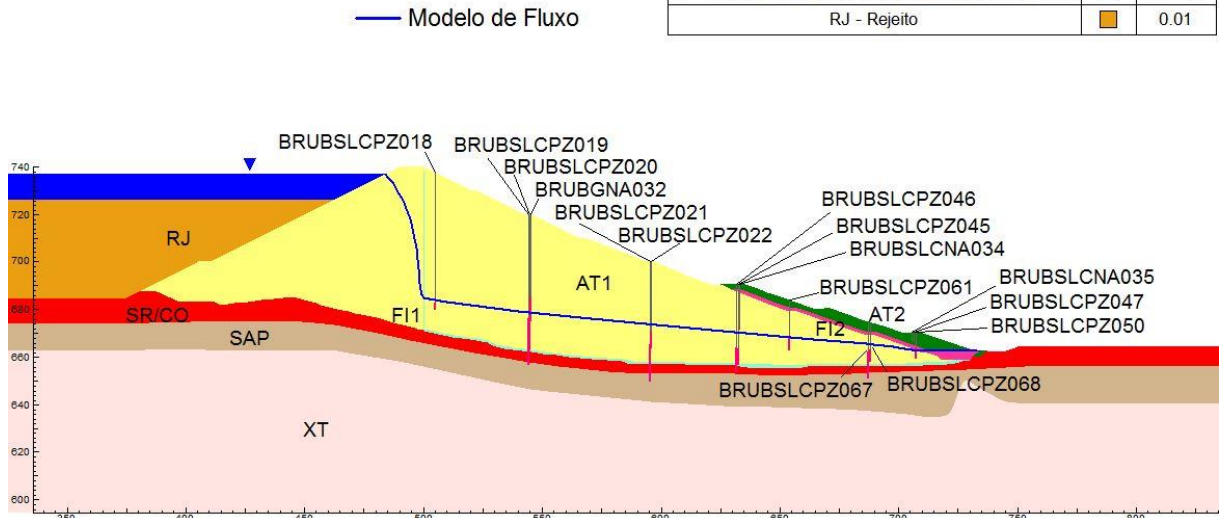


Figura 4-11 – Superfície freática definida na seção 01 da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)

Tabela 4-8 – Comparativo entre nível piezométrico de campo e modelo computacional (Tetra Tech, 2018)

Código do instrumento	Nível Piezométrico (m) (Modelo de Fluxo)	Nível Piezométrico Máximo (m) (10/2016 - 09/2017)
BRUBGNA032	694,47	684,69
BRUBSLCNA034	665,35	672,02
BRUBSLCNA035	Seco	Seco
BRUBSLCPZ018	682,54	682,65
BRUBSLCPZ019	677,35	676,10
BRUBSLCPZ020	677,40	676,23
BRUBSLCPZ021	672,80	665,14
BRUBSLCPZ022	672,87	670,37
BRUBSLCPZ045	669,54	663,57
BRUBSLCPZ046	669,62	663,98
BRUBSLCPZ047	Seco	Seco
BRUBSLCPZ050	663,03	663,49
BRUBSLCPZ061	667,98	668,58
BRUBSLCPZ067	665,33	662,13
BRUBSLCPZ068	665,13	662,86

O FS mínimo obtido foi de 1,56, a partir da superfície potencial de ruptura circular. Por tratar-se de uma ruptura local, optou-se por apresentar o FS global da estrutura. Para esta superfície, o FS obtido foi de 1,88. O resultado da análise de estabilidade para a seção 1 da Barragem-Piloto é apresentado Figura 4-12.

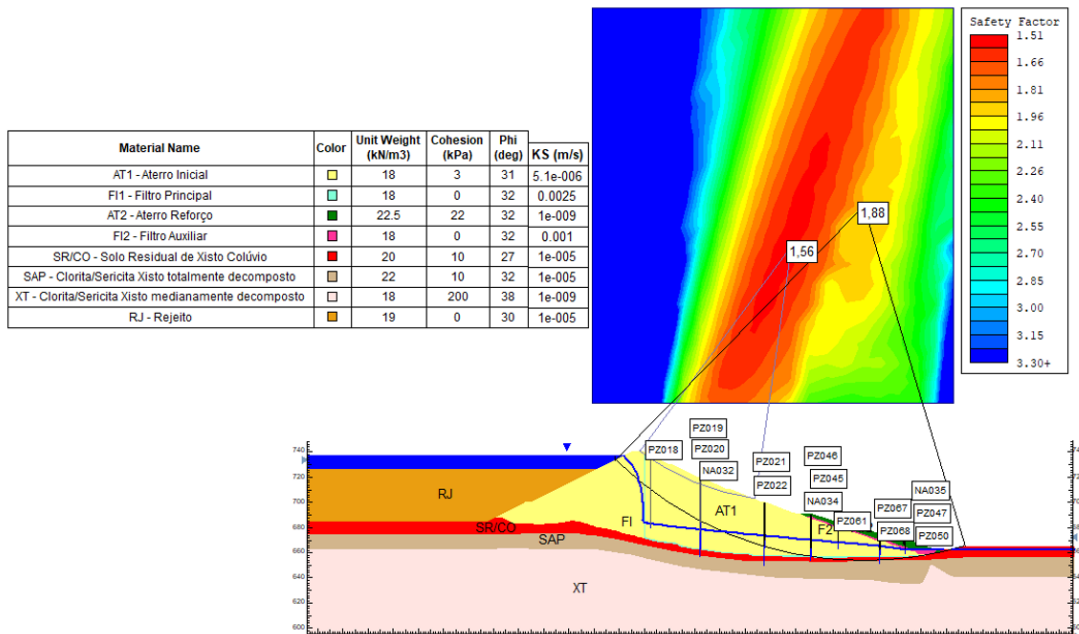


Figura 4-12 – Resultado da análise de estabilidade da seção 1 da Barragem-Piloto (Tetra Tech, 2018)

- **Resultados do Fator de Segurança Simulados para o Nível Normal (FS \geq 1,5)**

Foi realizada a simulação de colmatção parcial do sistema de drenagem interna da seção, diminuindo as condutividades hidráulicas do filtro principal (FI) até o valor de 5×10^{-4} m/s. A Figura 4-13 apresenta a análise de estabilidade para esta condição.

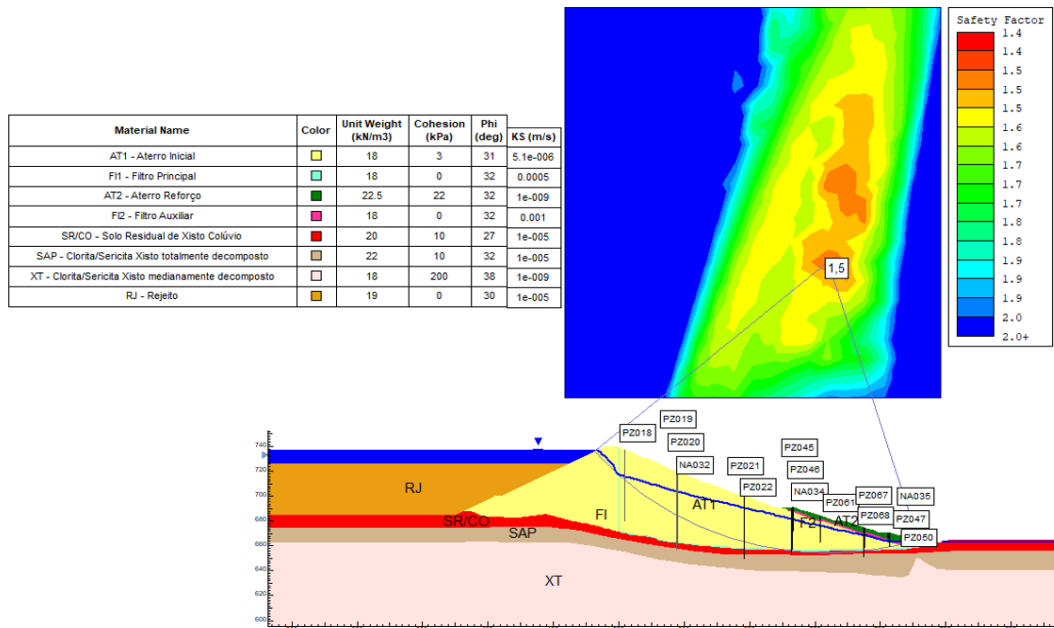


Figura 4-13 – Análise de estabilidade da seção 1 com análise de fluxo referente ao FS=1,5 (Tetra Tech, 2018)

A Tabela 4-9 apresenta os níveis piezométricos encontrados para esta condição.

Tabela 4-9 – Leituras da instrumentação da seção 1 referentes ao FS=1,5 (Tetra Tech, 2018)

Instrumento	Nível Piezométrico (m)	Variação quanto ao nível atual de operação (m)
BRUBGNA032	707,20	12,73
BRUBSLCNA034	675,20	9,85
BRUBSLCNA035	663,75	-
BRUBSLCPZ018	706,87	24,33
BRUBSLCPZ019	696,50	19,15
BRUBSLCPZ020	696,57	19,17
BRUBSLCPZ021	686,67	13,87
BRUBSLCPZ022	687,25	14,38
BRUBSLCPZ045	679,90	10,36
BRUBSLCPZ046	679,40	9,78
BRUBSLCPZ047	663,50	-
BRUBSLCPZ050	665,10	2,07
BRUBSLCPZ061	675,93	7,95
BRUBSLCPZ067	669,77	4,44
BRUBSLCPZ068	669,47	4,34

- **Resultados do Fator de Segurança Simulados para o Nível de Atenção ($1,5 > FS \geq 1,3$)**

Foi realizada a simulação de colmatação parcial do sistema de drenagem interna da seção,

diminuindo as condutividades hidráulicas do filtro principal (FI) até o valor de 2×10^{-4} m/s. A Figura 4-14 apresenta a análise de estabilidade para esta condição. A Tabela 4-10 apresenta os níveis piezométricos encontrados para esta condição.

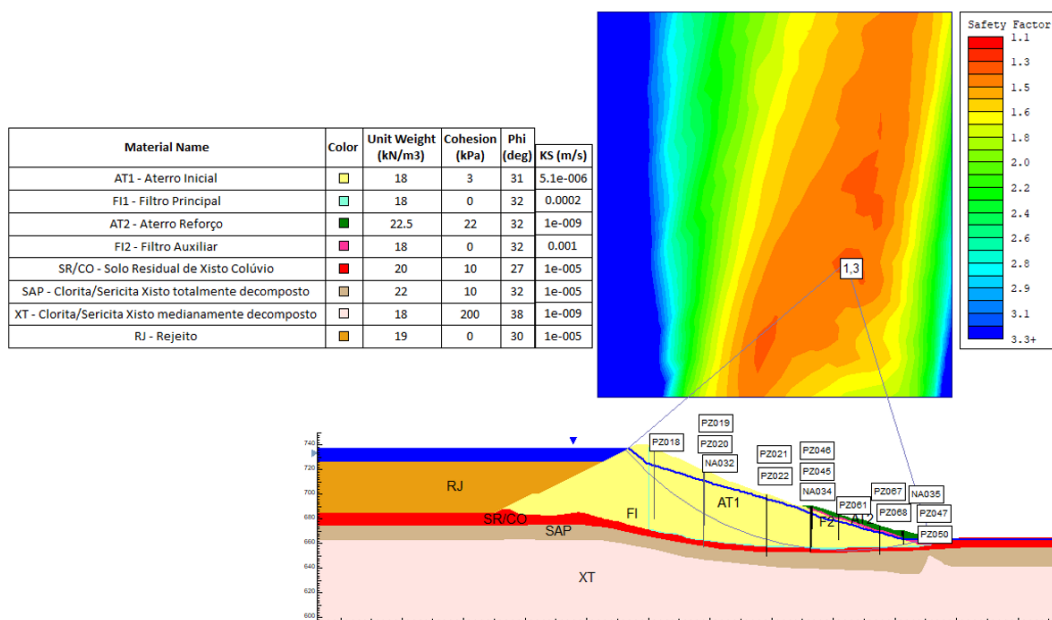


Figura 4-14 – Análise de estabilidade da seção 1 com análise de fluxo referente ao FS=1,3 (Tetra Tech, 2018)

Tabela 4-10 – Leituras da instrumentação da seção 1 referentes ao FS=1,3 (Tetra Tech, 2018)

Instrumento	Nível Piezométrico (m)	Variação quanto ao nível atual de operação (m)
BRUBGNA032	712,47	18,0
BRUBSLCNA034	680,08	14,73
BRUBSLCNA035	663,75	-
BRUBSLCPZ018	713,46	30,92
BRUBSLCPZ019	702,08	24,73
BRUBSLCPZ020	702,50	25,1
BRUBSLCPZ021	690,93	18,13
BRUBSLCPZ022	691,40	18,53
BRUBSLCPZ045	682,23	12,69
BRUBSLCPZ046	682,47	12,85
BRUBSLCPZ047	663,45	-
BRUBSLCPZ050	665,20	2,17
BRUBSLCPZ061	677,68	9,7
BRUBSLCPZ067	670,13	4,8
BRUBSLCPZ068	669,67	4,54

- **Resultados do Fator de Segurança Simulados para os Níveis De Alerta ($1,3 > FS \geq 1,1$) e de Emergência ($FS < 1,1$)**

No desenvolvimento das análises de estabilidade na Barragem-Piloto foi observado que para se obter fator de segurança de 1,1, a linha freática resultante é extremamente crítica, surgindo na face dos taludes superiores de jusante da barragem, o que torna a condição improvável de ocorrer sem que seja detectada previamente. Dentro deste contexto, não foram estabelecidos níveis de emergência para esta seção, sendo os níveis de alerta aqueles que fornecem $FS < 1,3$.

- **Resumo dos Resultados**

A Tabela 4-11 apresenta um resumo dos níveis de controle da instrumentação da Barragem-Piloto, obtidos a partir da aplicação da metodologia de carta de risco.

Tabela 4-11 – Níveis de controle dos instrumentos instalados na seção 1 da Barragem-Piloto – Carta de Risco (Tetra Tech, 2018)

Código	Nível atual (m)	Nível Normal (m) $FS \geq 1,5$	Nível de Atenção (m) $1,5 > FS \geq 1,3$	Nível de Alerta (m) $FS < 1,3$
BRUBGNA032	694,47	Nível $\leq 707,20$	707,20 < Nível $\leq 712,47$	Nível > 712,47
BRUBSLCNA034	665,35	Nível $\leq 675,20$	675,20 < Nível $\leq 680,08$	Nível > 680,08
BRUBSLCNA035	seco	Nível $\leq 663,75$	663,75 < Nível $\leq 663,75$	Nível > 663,75
BRUBSLCPZ018	682,54	Nível $\leq 706,87$	706,87 < Nível $\leq 713,46$	Nível > 713,46
BRUBSLCPZ019	677,35	Nível $\leq 696,50$	696,50 < Nível $\leq 702,08$	Nível > 702,08
BRUBSLCPZ020	677,40	Nível $\leq 696,57$	696,57 < Nível $\leq 702,50$	Nível > 702,50
BRUBSLCPZ021	672,80	Nível $\leq 686,67$	686,67 < Nível $\leq 690,93$	Nível > 690,93
BRUBSLCPZ022	672,87	Nível $\leq 687,25$	687,25 < Nível $\leq 691,40$	Nível > 691,40
BRUBSLCPZ045	669,54	Nível $\leq 679,90$	679,90 < Nível $\leq 682,23$	Nível > 682,23
BRUBSLCPZ046	669,62	Nível $\leq 679,40$	679,40 < Nível $\leq 682,47$	Nível > 682,47
BRUBSLCPZ047	Seco	Nível $\leq 663,50$	663,50 < Nível $\leq 663,45$	Nível > 663,45
BRUBSLCPZ050	663,03	Nível $\leq 665,10$	665,10 < Nível $\leq 665,02$	Nível > 665,00
BRUBSLCPZ061	667,98	Nível $\leq 675,93$	675,93 < Nível $\leq 677,68$	Nível > 677,68
BRUBSLCPZ067	665,33	Nível $\leq 669,77$	669,77 < Nível $\leq 670,13$	Nível > 670,13
BRUBSLCPZ068	665,13	Nível $\leq 669,47$	669,47 < Nível $\leq 669,67$	Nível > 669,67

Com base nos resultados encontrados, verifica-se que (de maneira geral) para que seja atingido o nível de atenção nos instrumentos, há necessidade de uma significativa elevação dos níveis dos instrumentos em comparação com as leituras atuais. Na maioria dos instrumentos, para que seja atingido o nível de atenção há necessidade que ocorra uma elevação na leitura do instrumento superior a 10 m, por outro lado, também são vistas situações em que variações de alguns centímetros indicam a mesma situação. Também são verificadas situações em que os piezômetros instalados se apresentam secos durante o período de monitoramento (conforme

ilustra a tabela 4-11), tais instrumentos devem ser analisados de maneira que a consistência e representatividade destas leituras sejam comprovadas. Situações que podem provocar conflitos de interpretação devem ser discutidas e reavaliadas após um determinado período de análise histórica de registros consistentes.

Dentro deste contexto, julga-se de grande importância que a carta de risco não seja utilizada de maneira isolada, sendo fundamental o acompanhamento das tendências de leitura, considerando que para que o nível “atenção” seja alcançado, há necessidade de uma elevação considerável dos níveis piezométricos/freáticos, podendo a barragem estar em uma situação crítica de segurança mesmo antes do nível de atenção ser atingido.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA

O presente trabalho acadêmico apresentou três métodos utilizados para a definição dos níveis de controle da instrumentação em substituição e/ou complementação às cartas de risco usualmente adotadas. Os dois primeiros métodos (Método 1 baseado no histórico de leituras e Método 2 baseado na inspeção visual) são aplicáveis ao modo de falha instabilização e, eventualmente, podem ser aplicáveis ao modo de falha de erosão interna.

Conforme mencionado anteriormente, o melhor controle para o modo de falha de erosão interna está relacionado às inspeções visuais. O terceiro Método (Método 3 baseado no volume livre de amortecimento) é aplicável ao modo de falha galgamento. Ressalta-se que em alguns casos, mesmo para uma condição crítica de ocupação do reservatório (assoreamento completo do reservatório), não se verifica o galgamento da crista da barragem por meio das simulações, não sendo aplicável a definição de níveis de controle para este modo de falha.

Embora seja uma proposta inicial de integração de métodos que serão utilizados na avaliação no processo de monitoramento da estrutura, os métodos analisados apresentam potencial de aplicação para serem utilizados em substituição e/ou complementação às cartas de risco. Os resultados apresentados demonstram inconsistências entre as simulações e os níveis medidos pelos instrumentos, fato que demonstra a necessidade da associação entre diferentes métodos para o estabelecimento de níveis de controle para o processo de monitoramento.

Cabe mencionar que tendo em vista que as cartas de risco se encontram na cultura de operação das empresas, e é uma ferramenta amplamente utilizada por auditores e órgãos fiscalizadores, sugere-se que as cartas de risco não sejam descontinuadas, mas que sejam utilizadas de maneira criteriosa e em conjunto com as metodologias alternativas ora propostas. Em casos específicos, em que, mesmo para uma condição de elevação máxima da freática no maciço, os fatores de segurança inferiores a 1,5 não são atingidos, recomenda-se que as cartas de risco não sejam utilizadas.

Por fim, é importante destacar que a definição dos níveis de controle deve ser entendida como uma ferramenta que tem como finalidade auxiliar na gestão de segurança da barragem. Os níveis de controle não devem ser entendidos como uma ferramenta de interpretação e análise crítica do comportamento da barragem, a qual deve ser de responsabilidade da equipe técnica responsável pela gestão de segurança da barragem.

5.2 CONCLUSÃO

Destaca-se que antes da definição dos níveis de controle, uma etapa fundamental refere-se à consolidação dos dados da instrumentação e entendimento do comportamento da barragem nos aspectos associados ao NA do reservatório, níveis piezométricos/freáticos, medidas de vazão da drenagem interna e deformações, bem como a relação entre estas diferentes variáveis.

É importante destacar que (de maneira geral) a faixa de variação das leituras (leitura máxima menos leitura mínima) dos piezômetros e INAs foi inferior a 2,5 m e das medidas de vazão (leitura da vazão máxima menos leitura da vazão mínima) em torno de 6,0 L/s. Esta faixa pouco ampla de variação se justifica, haja vista não se verificar flutuações significativas no NA do reservatório. Este comportamento já estabelecido do reservatório permitiu adotar métodos estatísticos e definir com mais clareza a faixa de variação das leituras.

Com base na metodologia aplicada (baseada no histórico de monitoramento) é possível identificar previamente algum comportamento anômalo ou não esperado para a estrutura, o qual pode estar associado a mecanismos de ruptura de instabilização e/ou erosão interna. Destaca-se que a detecção de fenômenos associados à erosão interna usualmente ocorre a partir de observação visual. Desta forma, embora os níveis de controle definidos no estudo piloto possam indicar algum mecanismo relacionado à erosão interna, o foco para identificação deste modo de falha foi a inspeção visual.

Para o modo de falha de galgamento, os estudos indicaram que mesmo para uma condição crítica de ocupação do reservatório não ocorre o galgamento da crista, para uma cheia associada ao período de retorno de 10.000 anos. Mesmo para estas condições críticas foi obtida uma borda livre de 0,5 m, ou seja, não é aplicável a definição de níveis de controle para o modo de falha de galgamento para a Barragem-Piloto.

Destaca-se que, com base neste estudo desenvolvido para a Barragem-Piloto, verifica-se potencialidade da utilização da metodologia ora proposta (baseada no histórico de dados de monitoramento) para outras barragens, nas quais o regime de fluxo se encontra estabelecido e não ocorrem variações significativas do NA do reservatório.

Com base na definição dos níveis a partir da carta de risco, verificou-se que para muitos instrumentos (piezômetros e/ou INAs), o nível de atenção só será atingido se houver uma significativa elevação dos níveis dos instrumentos em comparação com as leituras atualmente registradas pela estrutura. Na maioria dos instrumentos, para que seja atingido o nível de atenção, há necessidade que ocorra um aumento na leitura do instrumento superior a 10 m.

Dentro deste contexto, julga-se de grande importância que a carta de risco não seja utilizada de maneira isolada, sendo fundamental o acompanhamento das tendências de leitura. A espera de uma alteração desta magnitude nos níveis da barragem pode resultar em uma situação crítica de segurança, mesmo antes do nível de atenção ser atingido.

Ademais cabe destacar que este estudo de caso é uma abordagem alternativa para definição dos níveis de controle. Neste sentido, com o avanço dos estudos sobre o tema e aplicação da metodologia em outras barragens, melhorias e novos critérios podem ser incorporados. Dentre os pontos que devem ser considerados no avanço dos estudos, está a definição de quais instrumentos são mais relevantes de serem considerados para cada modo de falha (propósito do monitoramento), e a seleção de quais instrumentos devem ter seus níveis de controle estabelecidos, considerando que em muitos casos não haverá a necessidade de definição de níveis de controle para todos os instrumentos instalados.

Finalmente, é importante destacar que antes da definição dos níveis de controle, é fundamental a avaliação da instrumentação implantada, o seu funcionamento, bem como sua suficiência quanto ao monitoramento do comportamento da barragem. A partir desta avaliação, implantação de ajustes (complementação e/ou retirada de instrumentos), consolidação e análise crítica do monitoramento que se deve avançar para a etapa seguinte de definição dos níveis de controle da instrumentação.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na sequência do presente trabalho 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 métodos para definição de níveis de controle para instrumentos de monitoramento topográfico com utilização de informações obtidas a partir de levantamentos com estações totais e registros de radar interferométrico InSAR;
- Estudar outros métodos para definição de níveis de controle para parâmetros de monitoramento associados aos modos de falha erosão interna e liquefação;
- Avaliar a influência das variações dos intervalos de confiança na definição dos níveis de controle (limites superior e inferior);
- Aplicar os métodos apresentados nesta dissertação para definição dos níveis de controle em estruturas com reservatório em enchimento;
- Estudar ferramentas para modelagem estatística quando se tem dados limitados de monitoramento.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 2009. NBR ISO 31.000 – “Gestão de Riscos – Princípios e Diretrizes”, Rio de Janeiro.

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 – Requisitos, Rio de Janeiro.

Braga, R.M.C. 2021. Mudanças de política ambiental motivadas por catástrofes: lições dos rompimentos de duas barragens de rejeitos no Brasil, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Brasil, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2017. ABNT NBR 13028, de 14 de novembro de 2017, v. 1-16, 3 ed. Brasil.

Brasil. 2020a. Lei N.º 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Brasília.

Brasil. 2020b. Lei N.º 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei N.º 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e outras. Brasília.

Brasil, Agência Nacional de Mineração (ANM). 2017. Portaria N.º 70.389, de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos. Brasília.

Brasil, Agência Nacional de Mineração (ANM). 2022. Resolução N.º 95, de 7 de fevereiro de 2022. Revoga a Portaria DNPM n.º 70.389/2017, a Resolução ANM n.º 13/2019, a Resolução ANM n.º 32/2020 e a Resolução ANM n.º 40/2020, a Resolução ANM n.º 51/2020 e a Resolução ANM n.º 56/2021.

Bowles, D., Brown, A., Hughes, A., Morris, M., Sayers, P., Topple, A., Wallis, M., E Gardiner, K. 2013. Risk Assessment in Dam Reservoir Safety Management. Environment Agency, Bristol, UK.

Chambers, D.M. e Higman, B. 2011. Long term risks of tailings dam failure. Center for Science in Public Participation, Bozeman, Montana.

Clarkson, L., Williams, D., Redcliffe, P., e Van Der Wal, F. 2021. Trends in real-time instrumentation and monitoring techniques for tailings dams. Proceedings of Mine Waste and Tailings Conference 2021, Brisbane, Australia.

Colorado. 2010. Department of Natural Resources, Division of Water Resources, Dam Safety Branch. Guidelines for Dam Breach Analysis, Colorado.

Danese, L.C. 2020. Síntese Geral do Diagnóstico e Reavaliação Geotécnica das Barragens de Rejeitos de MG Inseridas na PNSB, Dissertação de Mestrado, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

DNPM. 2017. Portaria N.º 70.389, de 17 de maio de 2017. 122 Guia de Boas Práticas de Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.

Federal Emergency Management Agency – FEMA. 2015. Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion. Interagency Committee on Dam Safety (ICODS).

Federal Energy Regulatory Commission – FERC. 2003. Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, Capítulo 9, “Instrumentation and Monitoring”.

Federal Energy Regulatory Commission – FERC. 2014. Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, Capítulo 14, “Performance Monitoring Program”.

Foster, M. e Fell, R. 2001. Assessing embankment dam filters that do not satisfy design criteria. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(5): 398-407.

Foster, M. e Fell, R. 2008. A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping” Draft Guidance Document dated. CORPS of ENGINEERS, URS, UNSW.

Foster, M., Fell, R., e Spannagle, M. 2000. The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, 1000-1024.

Freire Neto, J.P. 2009. Estudo da liquefação Estática em Rejeitos e Aplicação de Metodologia de Análise de Estabilidade, Dissertação de mestrado, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Fry, J.J. 2007. Current practice and new view on granular filter. Freising. ICOL, Germany, pp. 60-69.

Fusaro, T.C. 2007. “Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau”, Dissertação de Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Fusaro, T.C., Furtado, A.S.O., Oliveira, V.R.F., e Couto, I.T. (2017). Estruturação do Manual de Monitoramento como Ferramenta para a Segurança de Barragens. *Revista Brasileira de Engenharia de Barragens*, Comitê Brasileiro de Barragens, CBDB.

Garner, S.J. e Fannin, R.J. 2010. Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event. *The International J. on Hydropower & Dams* **17**: 93-98.

Glunt, M., Mann, J.A., e Sonsekina, E. 2004. Listening to the Dam-Instrumentation and

Monitoring Program Saluda Dam Remediation.

Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM. 2019. Guia de Boas Práticas – Gestão de Barragens e Estruturas de Disposição de Rejeitos, 1ed. Brasília, 144 p.

International Commission on Large Dams - ICOLD. 2001. Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences. United Nations Publications.

International Commission on Large Dams - ICOLD. 2013. Bulletin 164: Internal erosion of existing dams, levees, and dikes, and their foundations. ICOLD.

Jefferies, M.G. e Been, K. 2006. Soil liquefaction: A critical state approach. Taylor and Francis, Abingdon.

Kealy, C.D. e Busch, R.A. 1971. Determining Seepage Characteristics of Mill-Tailings Dams by the Finite Element Method, U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations 7477.

Kuperman, S.C., Cifu, S., Moretti, M.R., Re, G., Pínfari, J.C., Carneiro, E.F., Rossetto, S.L.G., e Reigada, R.P. 2003a. Reavaliação da Instrumentação de Auscultação Instalada em Barragens da CESP. *In XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Salvador, pp. 116-133.

Kuperman, S.C., Cifu, S., Moretti, M.R., Celestino, T.B., Re, G., Zoellner, K., Pínfari, J.C., Carneiro, E.F., Rossetto, S.L.G., e Reigada, R.P. 2003b. Critérios para fixação de valores limites da instrumentação civil de barragens de concreto e terra. *In XXV SNDB*, Salvador.

Laganaro, R.A., Jesus, M.B., di Liberato, C.A.S., Macedo, A. e Bueno, A.S. (2019). Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente 30º. Controle da qualidade da água de barragens. 2019, São Paulo. 265.

Pimentel, K., Vasconcelos, I., Mapa, B., Lage, D., Costa, F., Lisboa, P., Costa, T., e Farina, P. 2021. Towards the Development of an Effective Monitoring Program of Tailings Dams: The Vale Experience. *In 7ª International Conference on Tailings Management*.

Olson, S.M. 2001. Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance, Tese de doutorado, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, Ill.

Penna, D., Marinaro, R., Lopes, M., e Carmo, A. 2017. Carta de risco como ferramenta na gestão de segurança de barragens. Belo Horizonte, pp. 1-15.

Penna, D., Aragão, G., e Fusaro, T. 2015. Complementariedade entre o monitoramento e análises de risco na gestão da segurança de barragens, Foz do Iguaçu, pp. 1-14.

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Diaz-Herrero, A., e Pereira, H.G. 2007. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, **152**(2): 846-852, 2008.

Sadrekarami, A. 2014. Static liquefaction-triggering analysis considering soil dilatancy. *Soils and Foundations*, **54**(5): 955-966, 2014.

Sartori, A. e Genovez, A.M. 2010. Desenvolvimento de Critérios para Classificação Hidrológica de Solos e Determinação de Valores de Referência para o Parâmetro CN, Tese de

Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

Souza, D.O.O. 2018. Interpretação e aplicação dos níveis de controle do monitoramento geotécnico na avaliação de segurança de barragens de mineração, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Universidade Federal do Pará.

Taguchi, G. 2014. Fault Tree Analysis of Slurry and Dewatered Tailings Management: A Framework, Dissertação de Mestrado em Ciências Aplicadas, University of British Columbia, Vancouver.

Tetra Tech Coffey. 2017. Relatório Técnico de Consolidação de Dados e Definição de Premissas, Tetra Tech Coffey, Belo Horizonte.

Tetra Tech. 2018a. Projeto Conceitual - Diretrizes para a Determinação de Níveis de Controle para Instrumentação Geotécnica em Barragens de Terra, Tetra Tech, Belo Horizonte.

Tetra Tech. 2018b. Relatório Técnico – Aplicação de Metodologia Para Definição de Níveis de Controle de Instrumentação Geotécnica, Tetra Tech, Belo Horizonte.

Triola, M.F. 2008. Introdução à estatística. 10 ed. Rio de Janeiro, LTC. pp. 250-303.

Usace - U.S. Army Corps of Engineers Headquarters. 1995. EM 1110-2-1908 - Instrumentation of Embankment Dams and Levees. Disponível em: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EM%201110-2-1908.pdf?ver=SZ5K1AeyStmXACafxcvJ_g%3d%3d [acessado em 25 de maio de 2022].

Usace - U.S. Army Corps of Engineers Headquarters. 2004. EM 1110-2-2300 - Appendix E - Process for Establishing Performance Parameters. Disponível em: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2300.pdf?ver=IBhPjsdKP1Mv03QatvHIyQ%3d%3d [acessado em 25 de maio de 2022].

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

U.S. Department of Interior. Bureau Of Reclamation. 2014. Embankment Dams - Design Standards nº13, Capítulo 11 “Instrumentation and Monitoring”.

Vazquez, A.B. 2014. Modelling Internal Erosion Within an Embankment Dam Prior To Breaching, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.

Velten, R. Z., Santos, R.D.N., Elian, L.H., Ribeiro, L.L., e Dias, M.A.L. 2016. Proposição de Metodologia para a Elaboração de Carta de Risco de Barragens de Terra e Terra-Enrocamento. In XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte.

Wang, Y., Guo, N., Wang, S., e Gu, Y. 2016. Detection of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams.

Zhang, L. M., Xu, Y., e Jia, J. S. 2009. Analysis of earth dam failures: A database approach. Georisk, 3(3): 184-189.

ANEXOS

ANEXO I. Informações sobre instrumentos de monitoramento da Barragem-Piloto

Tabela A5-1 – Piezômetros ativos instalados na Barragem-Piloto

Código	Descrição	Data Instalação	Coord. X	Coord. Y	Cota Terreno	Cota Fundo
BRUBGPZ042	PZ 13C	04/12/2009	668.996,48	7.800.472,14	721,22	697,16
BRUBGPZ043	PZ 07C	27/11/2009	669.002,03	7.800.439,93	710,06	686,37
BRUBGPZ046	PZ 102	13/04/2010	668.992,97	7.800.512,64	729,96	700,64
BRUBSLCPZ008	PZBS 01 - ESTACA 21 + 0,00 – 10m JUSANTE	26/06/2006	668.983,77	7.800.527,62	737,35	703,91
BRUBSLCPZ009	PZBS 02A - ESTACA 21+4,80 - 10,18m CRISTA JUSANTE	01/07/2006	668.986,45	7.800.531,49	738,06	706,19
BRUBSLCPZ010	PZBS 03 - EST. 21+0 51m JUSANTE - 2ª BERMA	01/07/2006	669.018,41	7.800.505,69	720,26	691,13
BRUBSLCPZ011	PZBS 04 - 2ª BERMA EST. 21 - AFAST.51m	01/07/2006	669.018,41	7.800.505,69	720,26	693,42
BRUBSLCPZ012	PZBS 04A - EST.21+5 50m JUSANTE - 2º BERMA	01/07/2006	669.020,64	7.800.510,78	720,18	705,18
BRUBSLCPZ018	PZBS 10A - SEÇÃO 02 - CRISTA MACIÇO	01/07/2006	669.099,35	7.800.709,05	737,57	679,84
BRUBSLCPZ019	PZBS 11A - SEÇÃO 02 - 2ª BERMA	01/07/2006	669.138,74	7.800.697,58	720,34	657,01
BRUBSLCPZ020	PZBS 12A - SEÇÃO 02 - 2ª BERMA	01/07/2006	669.138,86	7.800.697,41	719,99	662,80
BRUBSLCPZ021	PZBS 13 - SEÇÃO 02	01/07/2006	669.179,13	7.800.664,21	700,04	649,74
BRUBSLCPZ022	PZBS 14 - SEÇÃO 02 4ª BERMA	01/07/2006	669.178,12	7.800.663,74	700,04	664,09
BRUBSLCPZ034	PZ 04C	01/01/2014	668.986,78	7.800.414,76	711,42	662,13
BRUBSLCPZ038	PZ 05C	27/10/2009	668.910,23	7.800.426,28	741,12	684,41

Código	Descrição	Data Instalação	Coord. X	Coord. Y	Cota Terreno	Cota Fundo
BRUBSLCPZ039	PZ 06C	13/09/2009	669.006,16	7.800.446,36	711,19	678,75
BRUBSLCPZ040	PZ 10C	11/12/2009	668.955,68	7.800.450,75	730,95	697,40
BRUBSLCPZ041	PZ 11C	17/12/2009	668.912,54	7.800.383,66	731,46	709,69
BRUBSLCPZ042	PZ20	30/09/2013	669.072,81	7.800.466,35	702,19	693,99
BRUBSLCPZ043	PZ21	03/10/2013	669.105,92	7.800.444,01	692,56	681,76
BRUBSLCPZ044	PZ22	23/09/2013	669.205,49	7.800.426,33	682,17	671,37
BRUBSLCPZ045	PZ23	26/09/2013	669.205,49	7.800.648,58	692,49	657,69
BRUBSLCPZ046	PZ24	27/09/2013	669.202,65	7.800.644,46	692,49	653,69
BRUBSLCPZ047	PZ25	19/09/2013	669.267,16	7.800.644,46	672,05	666,05
BRUBSLCPZ048	PZ26	03/10/2013	669.102,86	7.800.439,21	692,54	675,14
BRUBSLCPZ049	PZ27	23/09/2013	669.130,27	7.800.421,62	682,13	667,23
BRUBSLCPZ050	PZ28	19/09/2013	669.263,71	7.800.600,14	672,12	659,32
BRUBSLCPZ051	BRUBSLCPZ051	01/01/2014	668.989,14	7.800.332,68	701,13	686,18
BRUBSLCPZ052	BRUBSLCPZ052	01/01/2014	669.021,39	7.800.309,79	691,49	674,97
BRUBSLCPZ053	BRUBSLCPZ053	01/01/2014	669.054,90	7.800.299,42	681,17	675,41
BRUBSLCPZ054	BRUBSLCPZ054	01/01/2014	669.032,45	7.800.402,33	701,22	679,86
BRUBSLCPZ055	BRUBSLCPZ055	01/01/2014	669.004,60	7.800.390,84	705,27	683,71
BRUBSLCPZ056	PZ08C	29/10/2013	669.034,89	7.800.492,07	711,01	684,21
BRUBSLCPZ057	PZ12C	30/10/2013	669.074,25	7.800.468,82	701,19	667,39
BRUBSLCPZ058	BRUBSLCPZ058	01/01/2014	669.139,80	7.800.499,13	691,44	664,01
BRUBSLCPZ059	BRUBSLCPZ059	01/01/2014	669.200,38	7.800.534,42	681,05	658,40
BRUBSLCPZ060	BRUBSLCPZ060	01/01/2014	669.195,85	7.800.586,40	686,4	656,80
BRUBSLCPZ061	PZ17C	01/01/2014	669.227,26	7.800.636,61	684,98	662,81
BRUBSLCPZ062	PZBS05	01/01/2014	669.062,25	7.800.477,97	704,75	689,46
BRUBSLCPZ063	PZBS06	01/01/2014	669.062,50	7.800.478,33	704,74	683,80
BRUBSLCPZ064	PZBS07	11/11/2013	669.136,39	7.800.402,30	680,21	665,27
BRUBSLCPZ065	PZBS08	24/08/2015	669.136,65	7.800.431,78	681,33	667,11
BRUBSLCPZ066	PZ07A	24/08/2015	669.110,13	7.800.449,12	691,71	664,11
BRUBSLCPZ067	PZBS15	24/08/2015	669.254,59	7.800.616,52	675,56	651,16
BRUBSLCPZ068	PZBS16	24/08/2015	669.254,84	7.800.616,88	675,55	658,29

Fonte: (VALE, 2018).

Tabela A-5-2 – Indicadores de nível de água ativos instalados na Barragem-Piloto.

Código	Descrição	Data Instalação	Coord. X	Coord. Y	Cota Terreno	Cota Fundo
BRUBGNA031	INA 100	08/04/2009	668.994,38	7.800.514,45	730,93	705,71
BRUBGNA032	INA 101	31/03/2010	669.106,47	7.800.648,61	720,94	675,05
BRUBSLCNA030	INA 06D	29/09/2009	668.959,42	7.800.372,36	711,83	702,47
BRUBSLCNA031	INA30	28/01/2016	669.075,84	7.800.471,10	702,21	695,71
BRUBSLCNA032	INA31	03/10/2013	669.112,61	7.800.452,82	692,60	683,80
BRUBSLCNA033	INA32	24/09/2013	669.140,12	7.800.435,17	682,19	673,39
BRUBSLCNA034	INA33	27/09/2013	669.209,56	7.800.651,86	692,56	665,20
BRUBSLCNA035	INA34	19/09/2013	669.270,11	7.800.609,81	671,17	666,80
BRUBSLCNA036	INA35	01/01/2014	668.991,98	7.800.337,28	701,14	693,74
BRUBSLCNA037	INA36	01/01/2014	669.024,27	7.800.314,41	691,39	682,66
BRUBSLCNA038	INA 025	27/01/2014	669.017,35	7.800.411,78	705,30	688,63
BRUBSLCNA039	BRUBSLCNA039	01/01/2014	669.064,62	7.800.380,54	691,17	669,90
BRUBSLCNA040	BRUBSLCNA040	01/01/2014	669.086,80	7.800.414,39	691,26	660,44
BRUBSLCNA041	BRUBSLCNA041	01/01/2014	669.103,04	7.800.378,87	681,11	665,81
BRUBSLCNA042	BRUBSLCNA042	01/01/2014	668.922,78	7.800.233,62	707,65	702,50
BRUBSLCNA043	BRUBSLCNA043	01/01/2014	669.003,31	7.800.281,06	691,75	682,29
BRUBSLCPZ005	INABS 05 - LATERAL DIREITA DO EXTRAVASOR	01/06/2006	669.322,82	7.800.727,26	685,65	681,53
BRUBSLCPZ006	INABS 06 - LATERAL ESQUERDA DO EXTRAVASOR	01/07/2006	669.261,33	7.800.833,32	698,61	693,01
BRUBSLCPZ007	INABS 07 - LATERAL ESQUERDA DO EXTRAVASOR	01/07/2006	669.227,39	7.800.859,41	721,15	716,61

Fonte: (VALE, 2018).

Tabela A5-3 – Régua limnimétrica ativa instalada na Barragem-Piloto

Código	Descrição	Data Instalação	Coord. X	Coord. Y	Cota Base
BRUBSLCRR004	Rn04- temporariamente próximo à vazão residual	27/01/2014	669.146,30	7.800.833,19	736,00

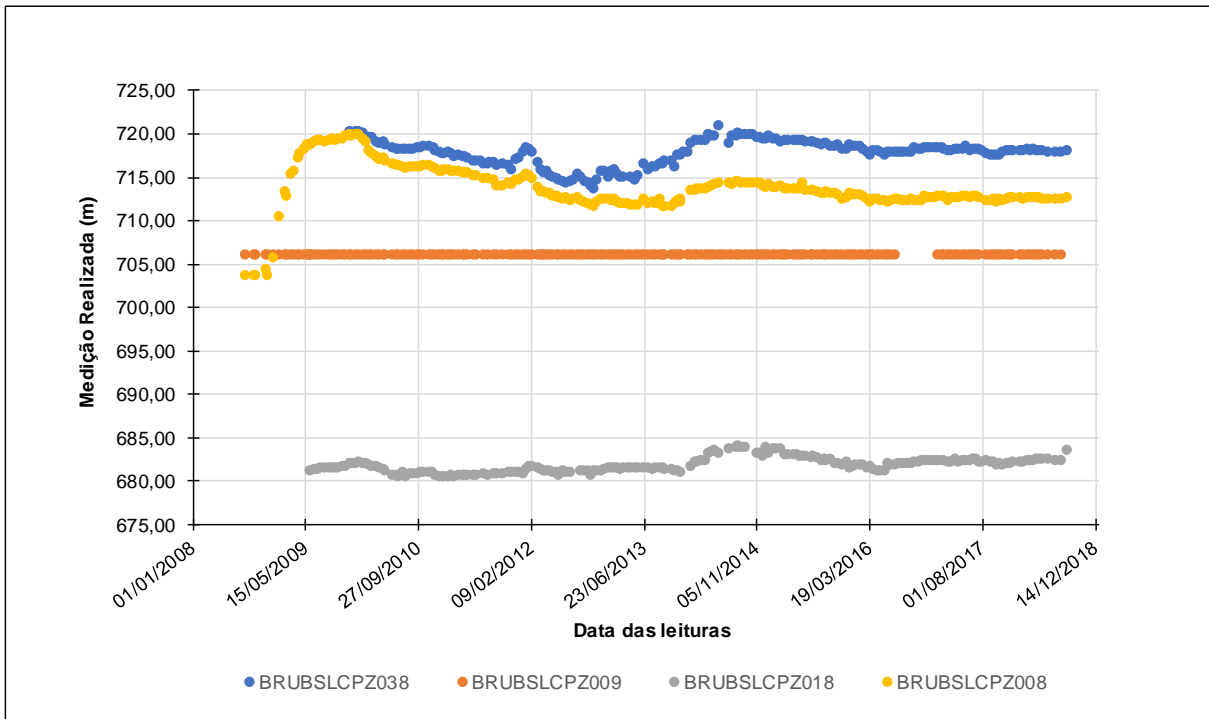
Fonte: (VALE, 2018).

Tabela A-5-4: Medidores de vazão ativos instalados na Barragem-Piloto

Código	Descrição	Data Instalação	Coord. X	Coord. Y	Elevação (Z)
BRUBSLCMI001	VT saída dreno de fundo	04/02/2013	669.329,77	7.800.638,73	660,66
BRUBSLCMT001	Vazão Fluxo Residual	01/08/2013	669.585,00	7.800.760,00	660,00

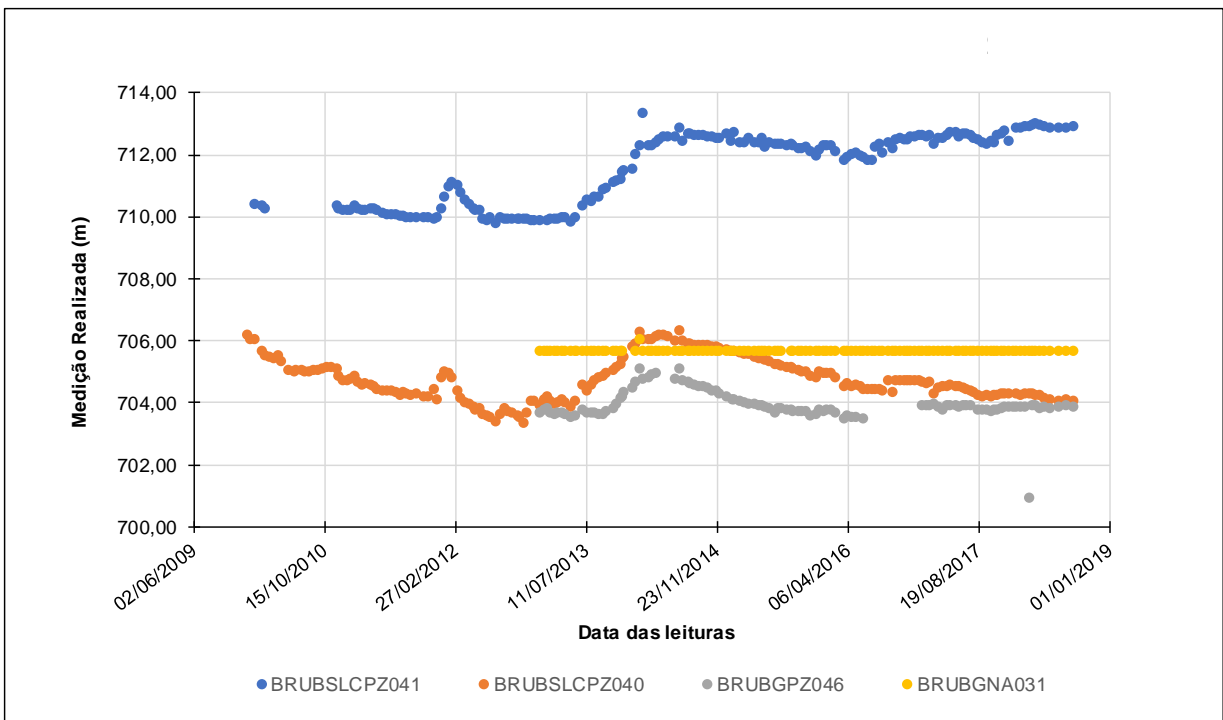
Fonte: (VALE, 2018).

ANEXO II. Gráficos da instrumentação por seção



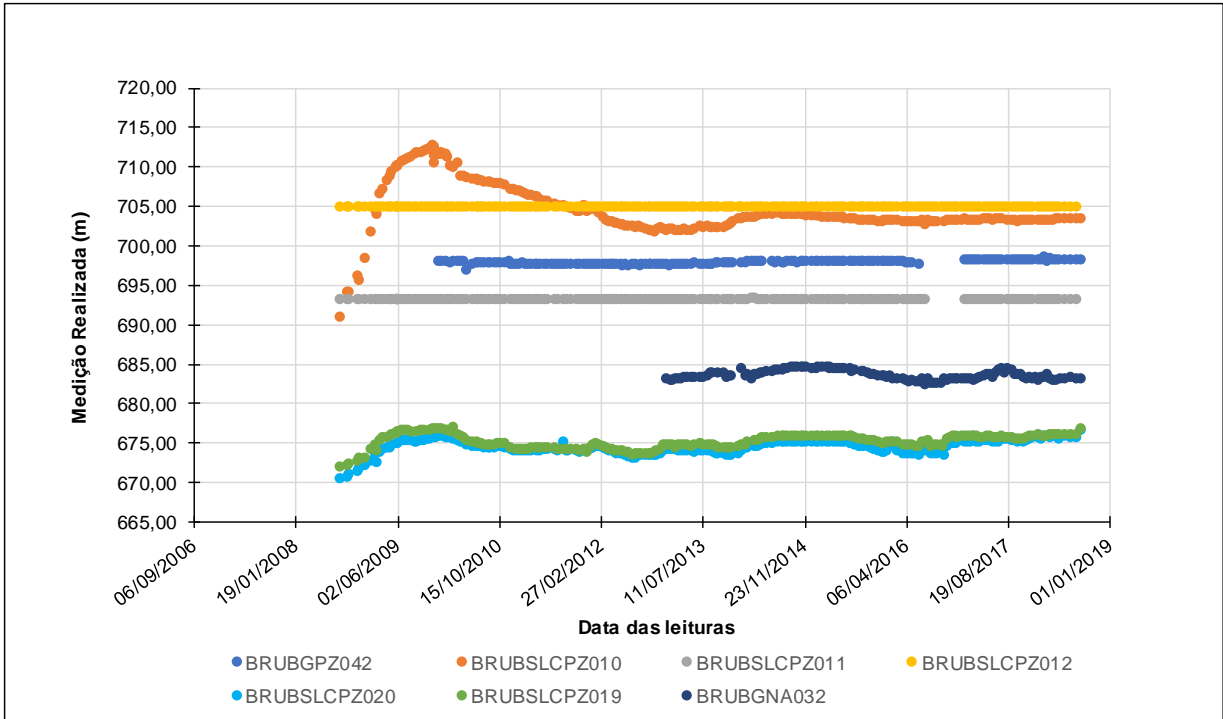
Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-01

Fonte: Tetra Tech, 2018

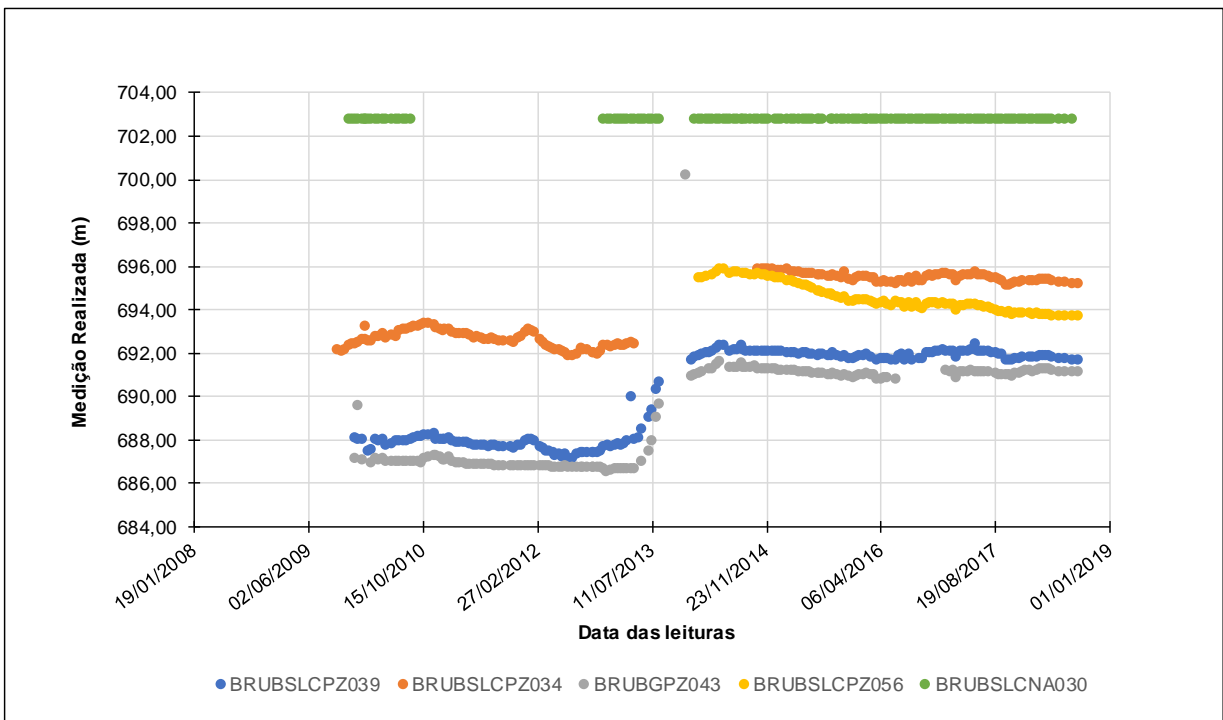


Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-02

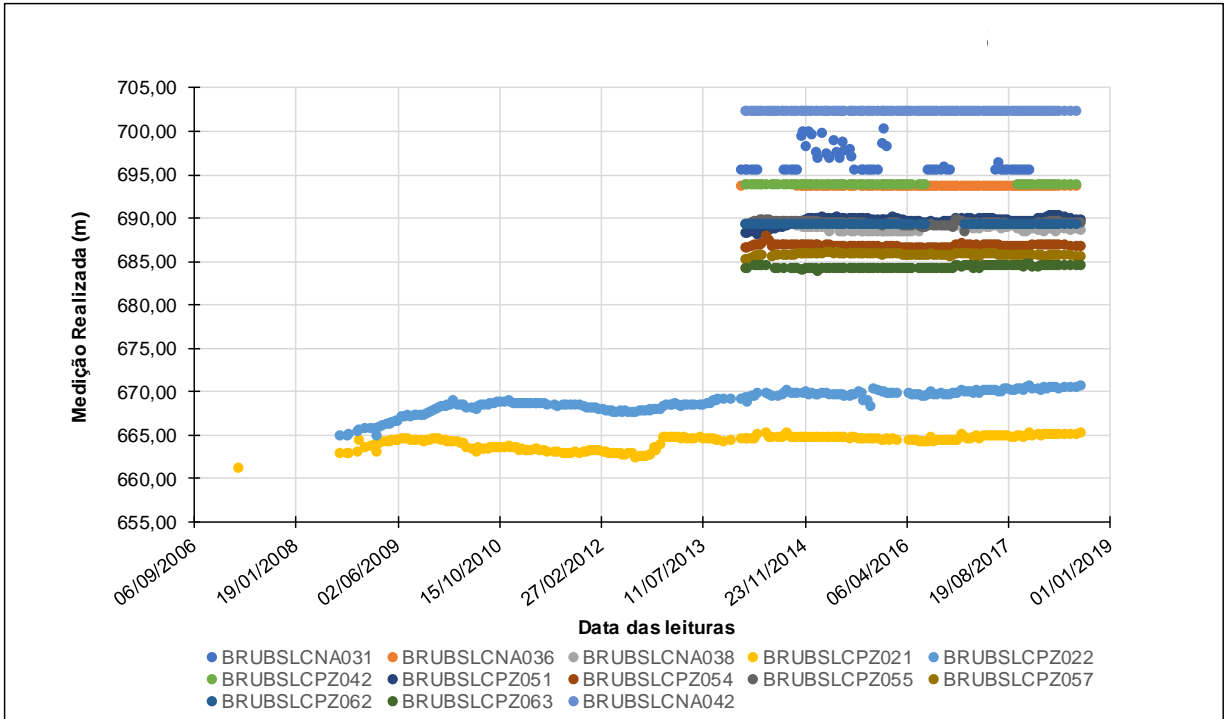
Fonte: Tetra Tech, 2018



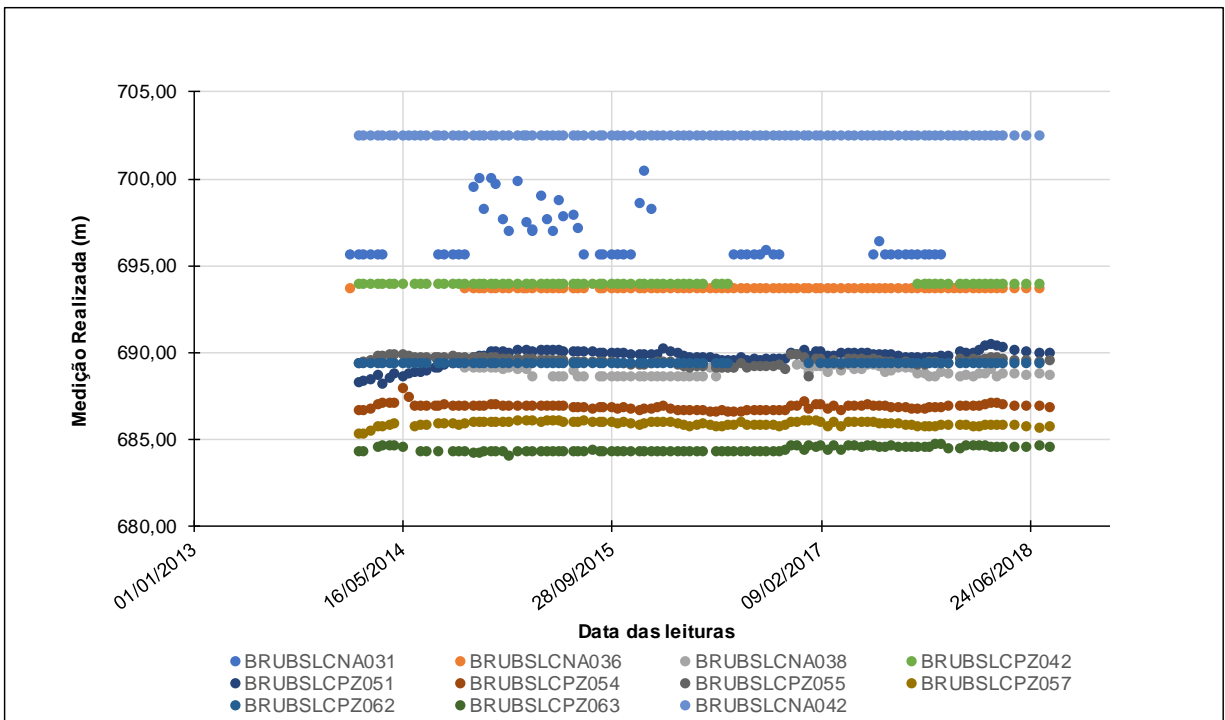
Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-03
 Fonte: Tetra Tech, 2018



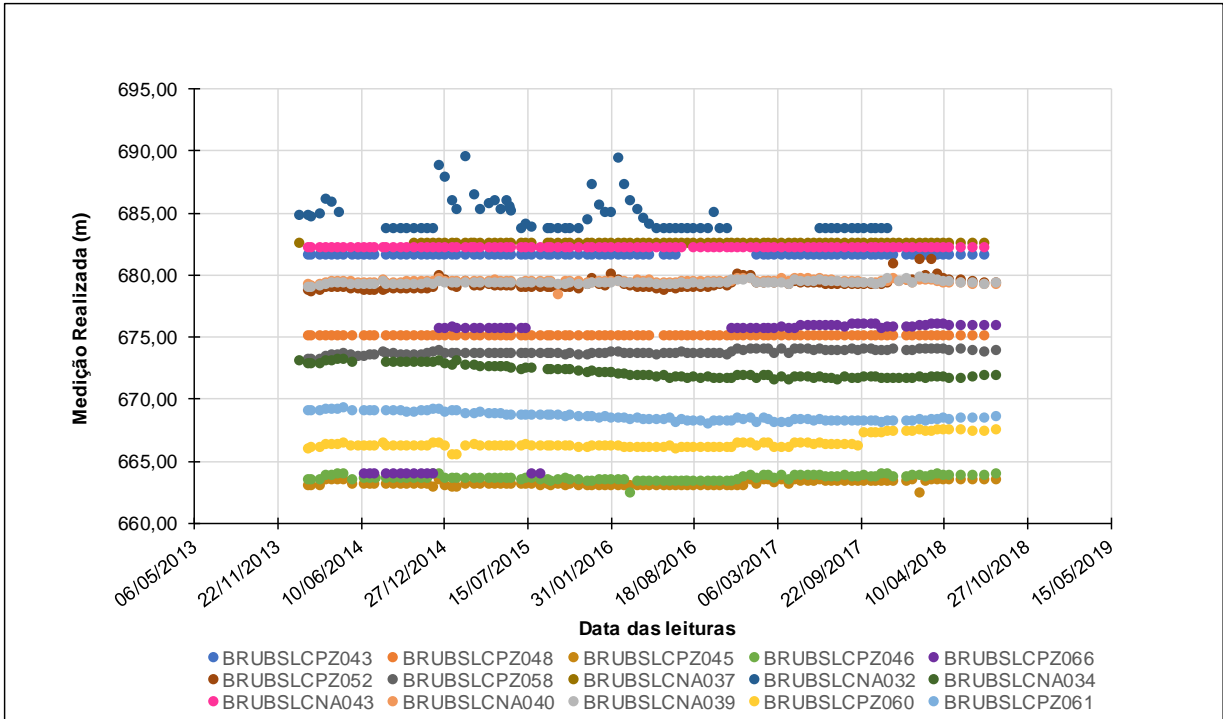
Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-04
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-05
 Fonte: Tetra Tech, 2018

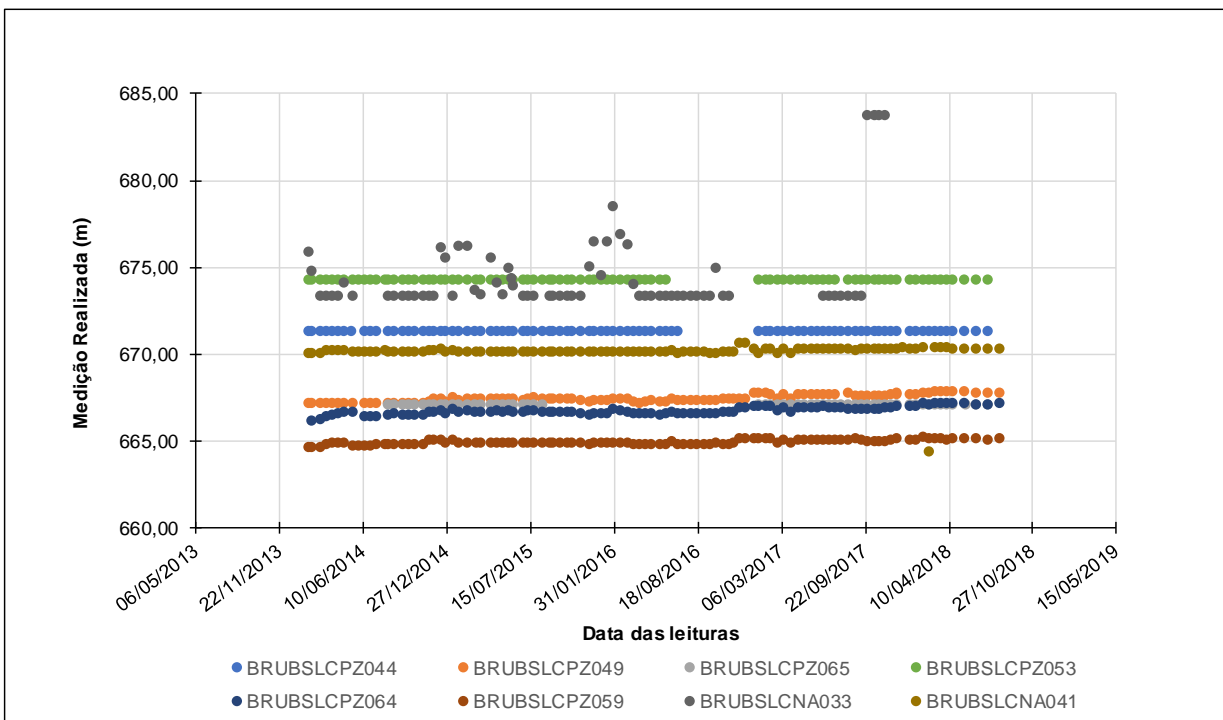


Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-05 (detalhe) – Leituras entre as cotas: El. 680 m e El. 705 m
 Fonte: Tetra Tech, 2018



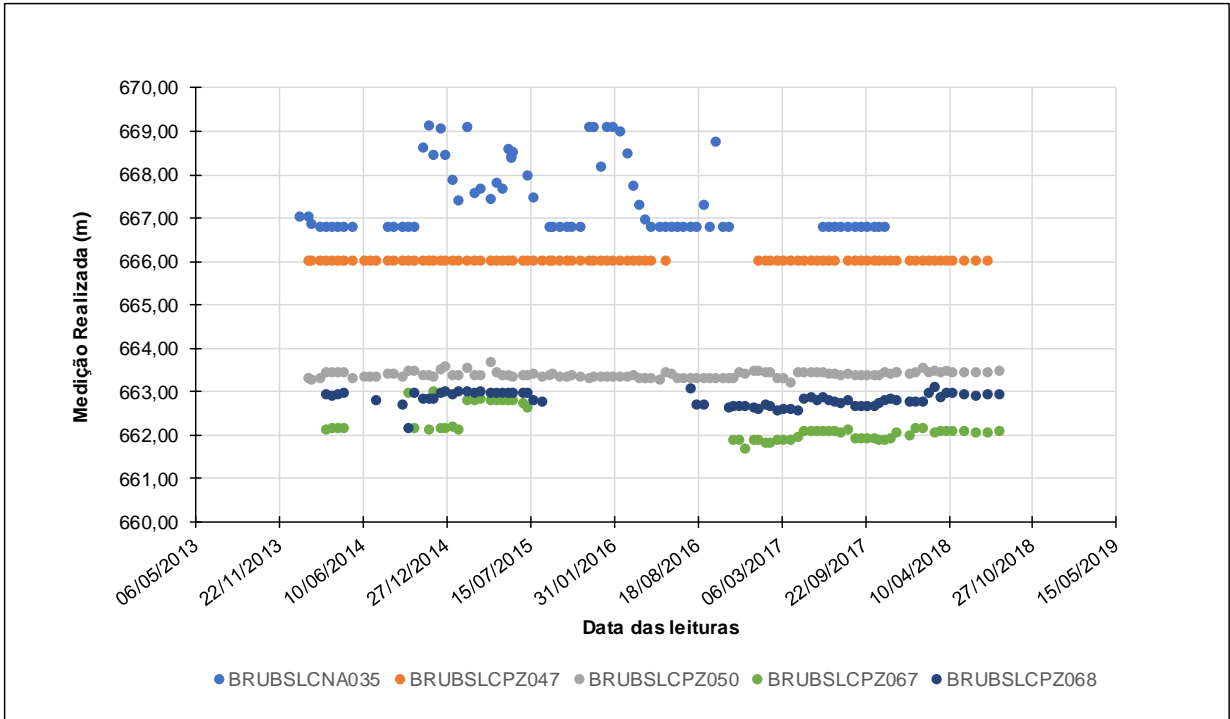
Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-06

Fonte: Tetra Tech (2018).

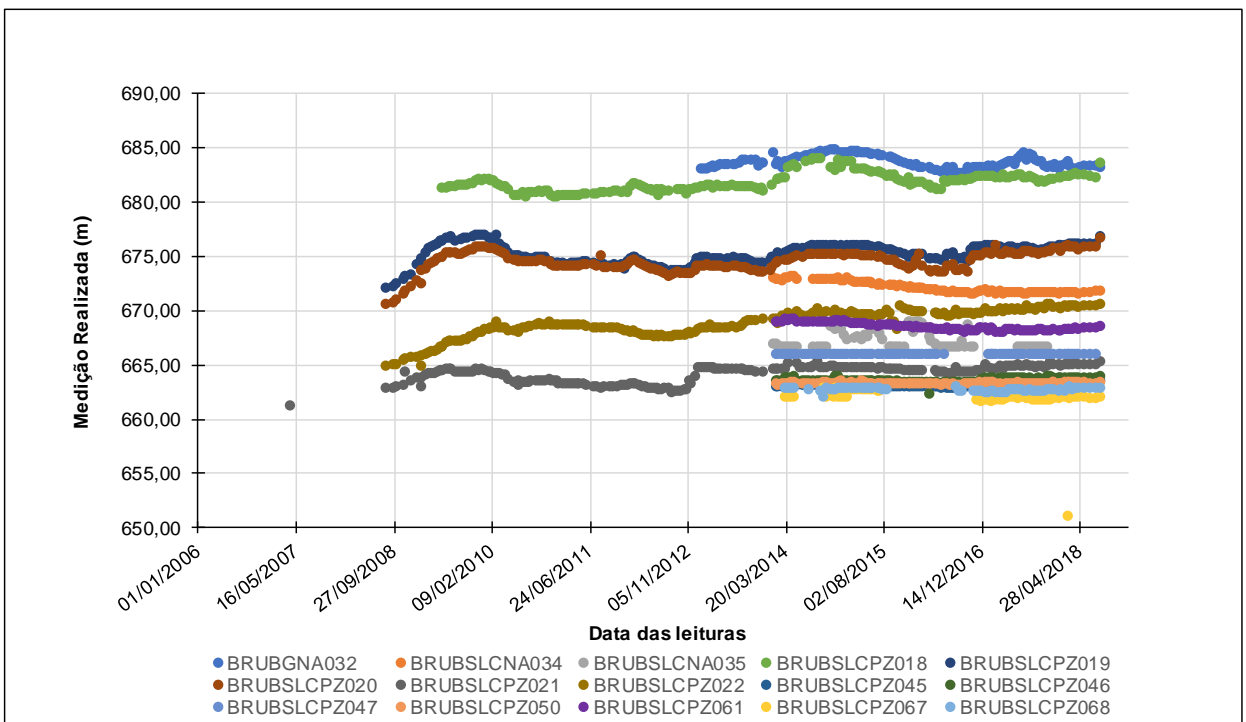


Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-07

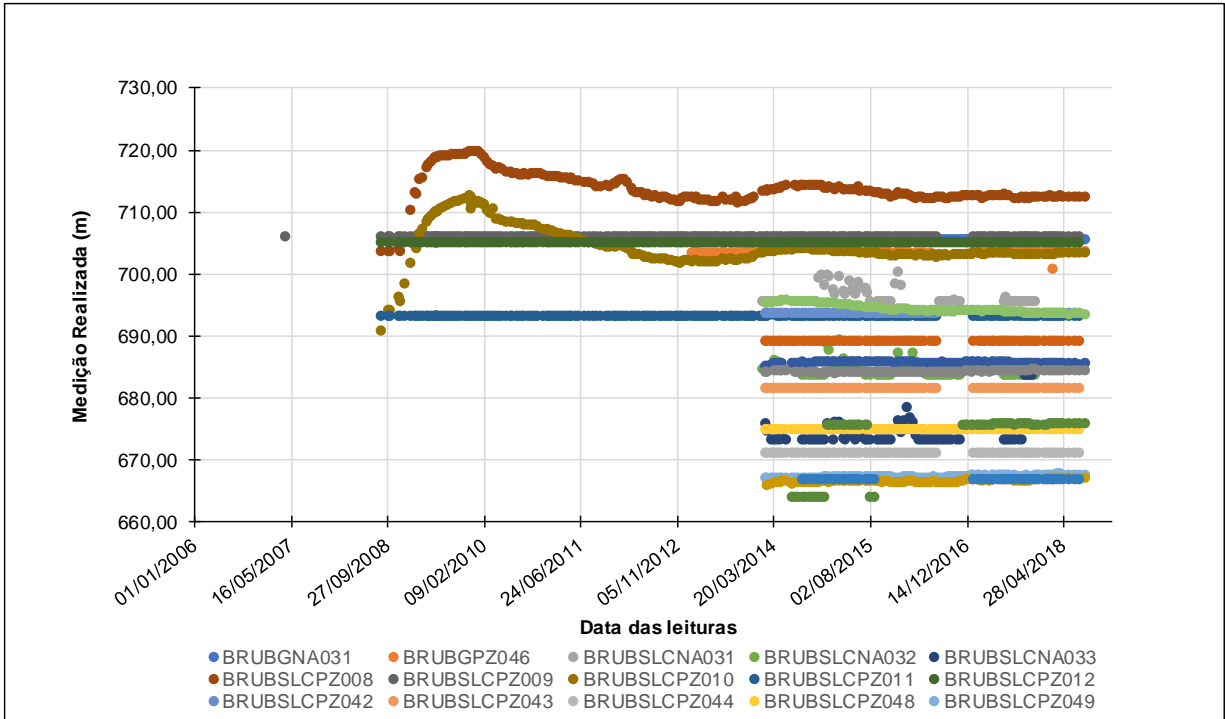
Fonte: Tetra Tech, 2018



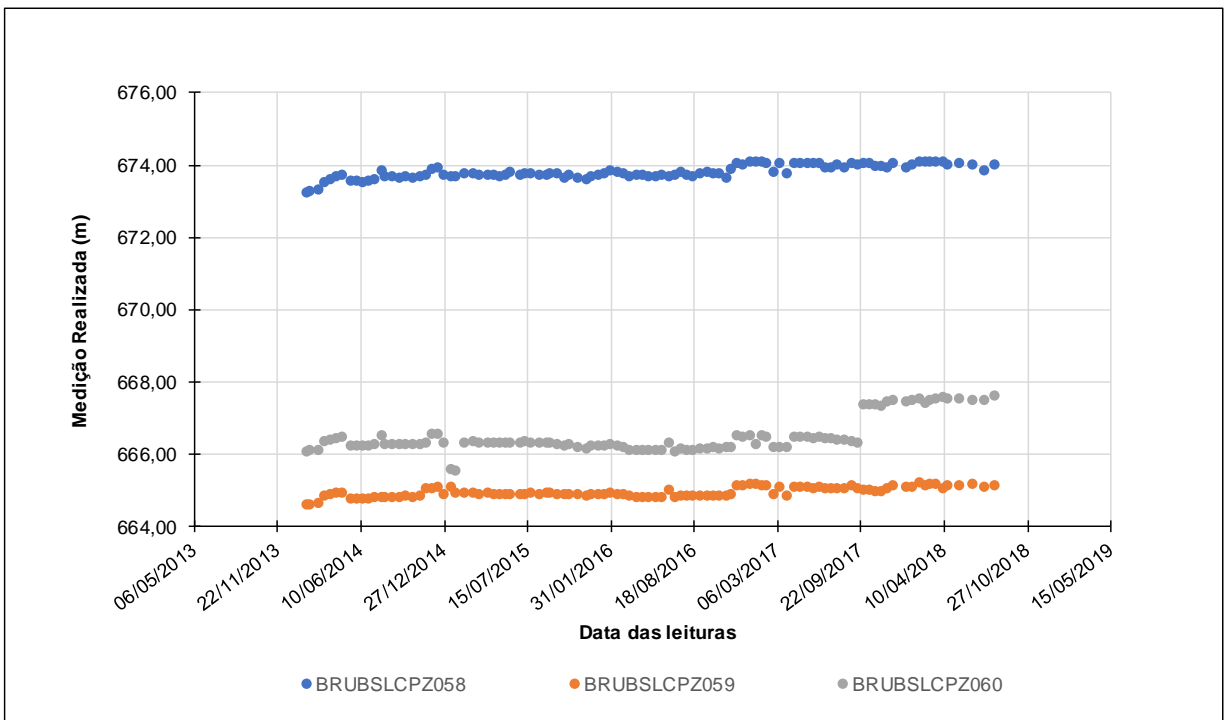
Piezômetros e INAs – Seção Longitudinal: SL-08
 Fonte: Tetra Tech, 2018



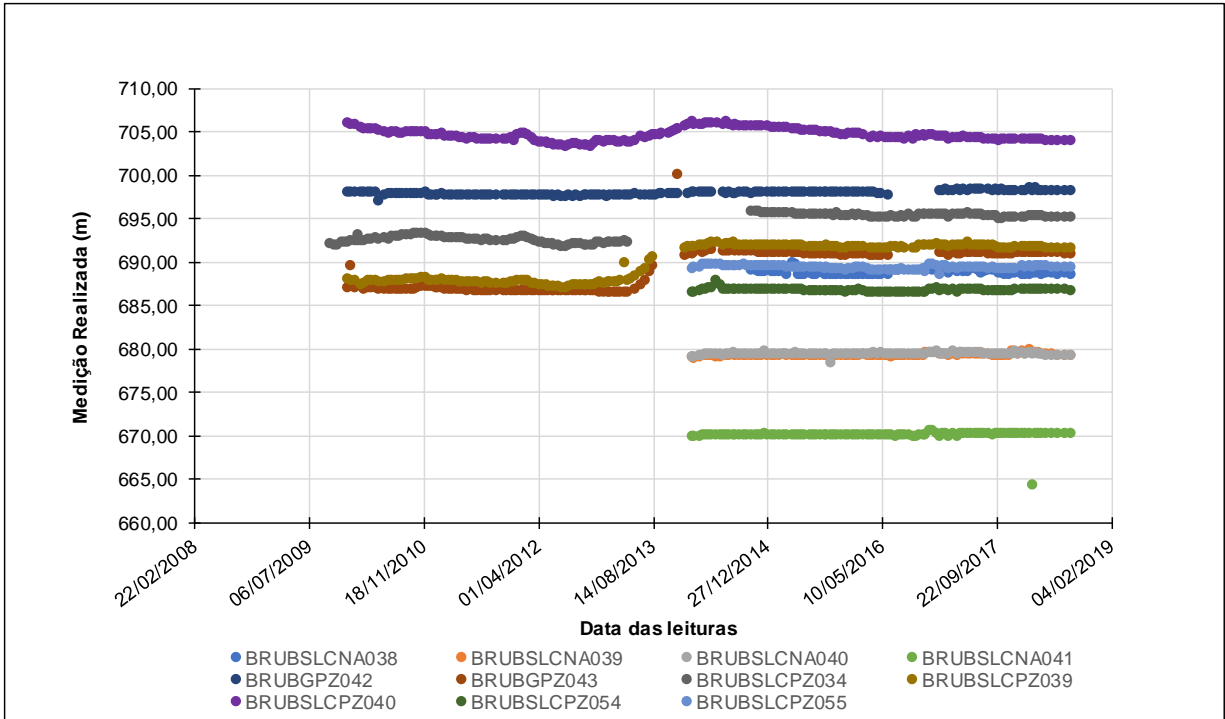
Piezômetros e INAs – Seção Transversal: ST-01
 Fonte: Tetra Tech, 2018



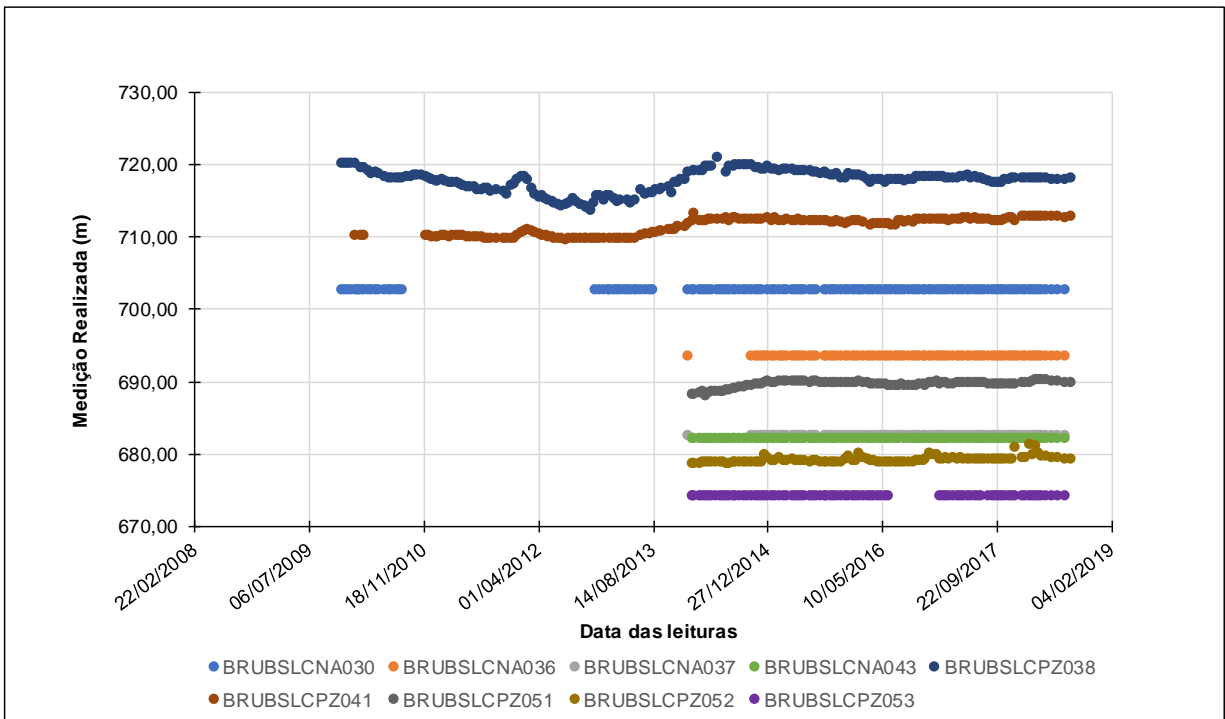
Piezômetros e INAs – Seção Transversal: ST-02
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Piezômetros e INAs – Seção Transversal: ST-03
 Fonte: Tetra Tech, 2018

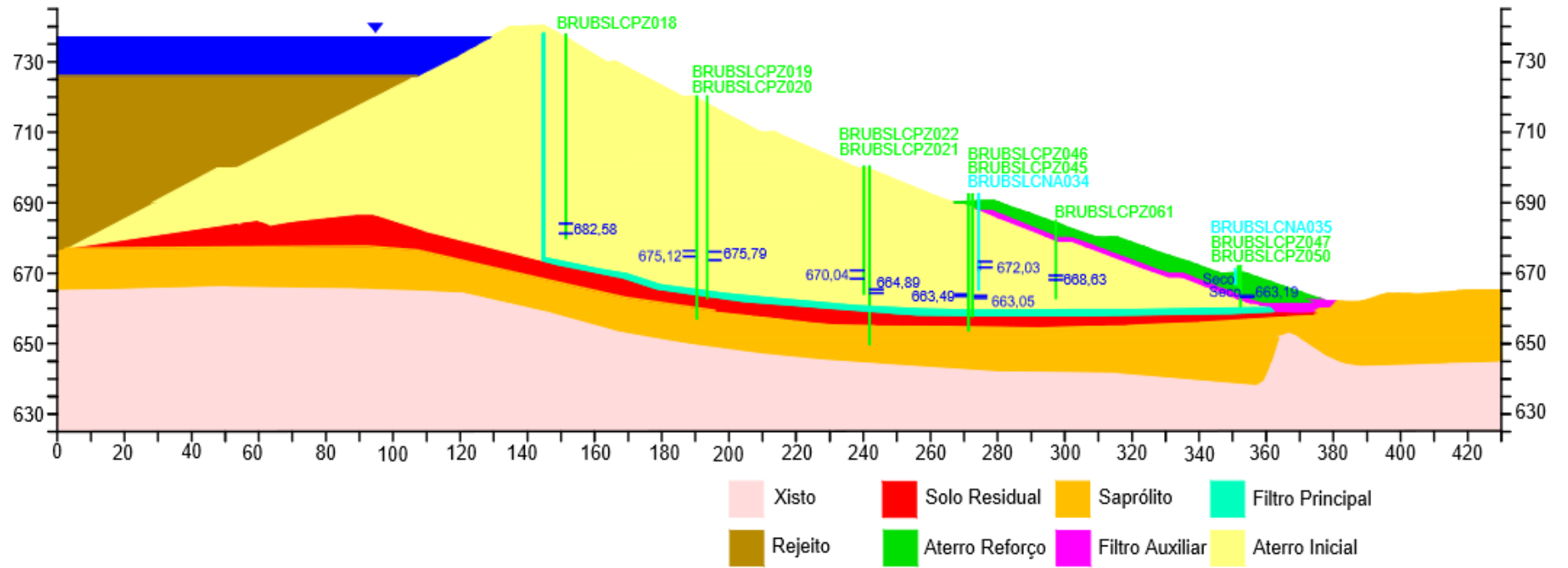


Piezômetros e INAs – Seção Transversal: ST-04
 Fonte: Tetra Tech, 2018



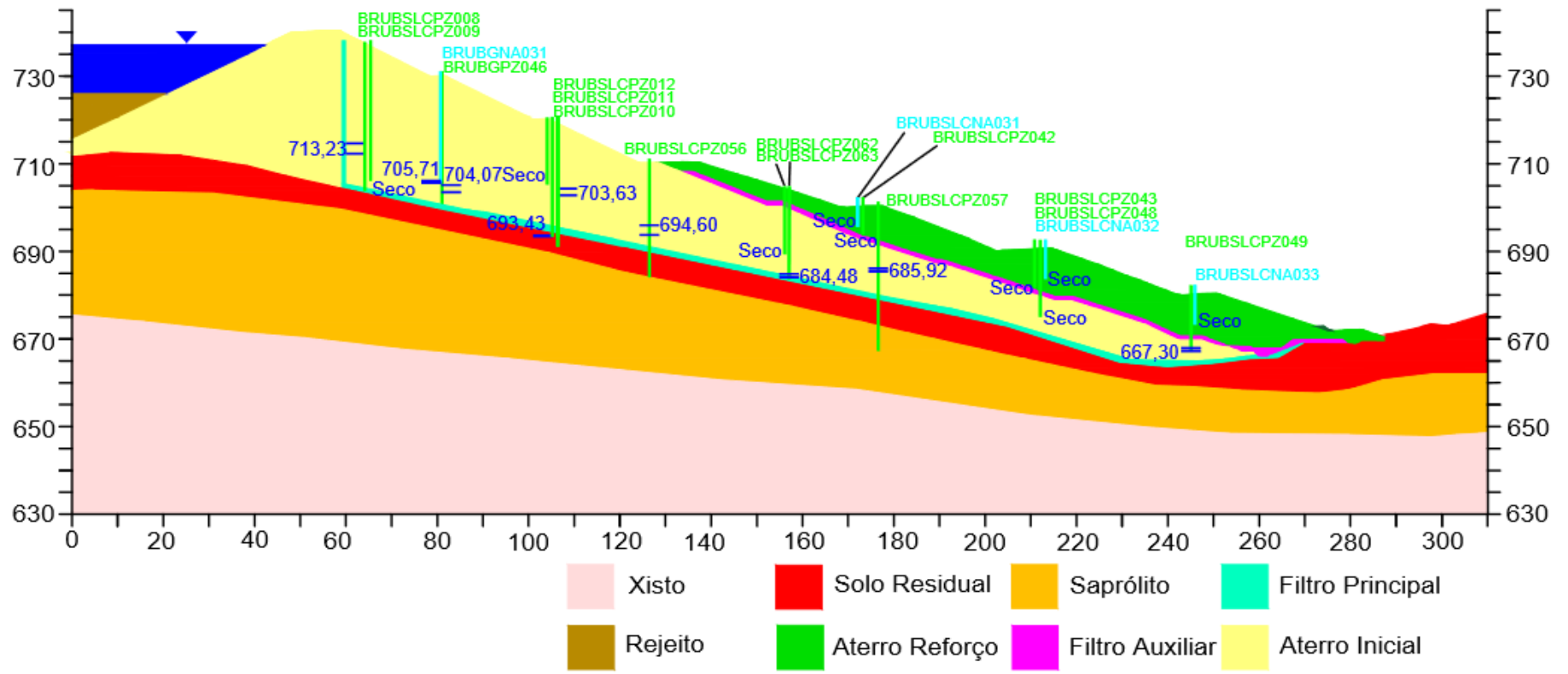
Piezômetros e INAs – Seção Transversal: ST-05
 Fonte: Tetra Tech, 2018

ANEXO III. Seções Instrumentadas da Barragem-Piloto



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

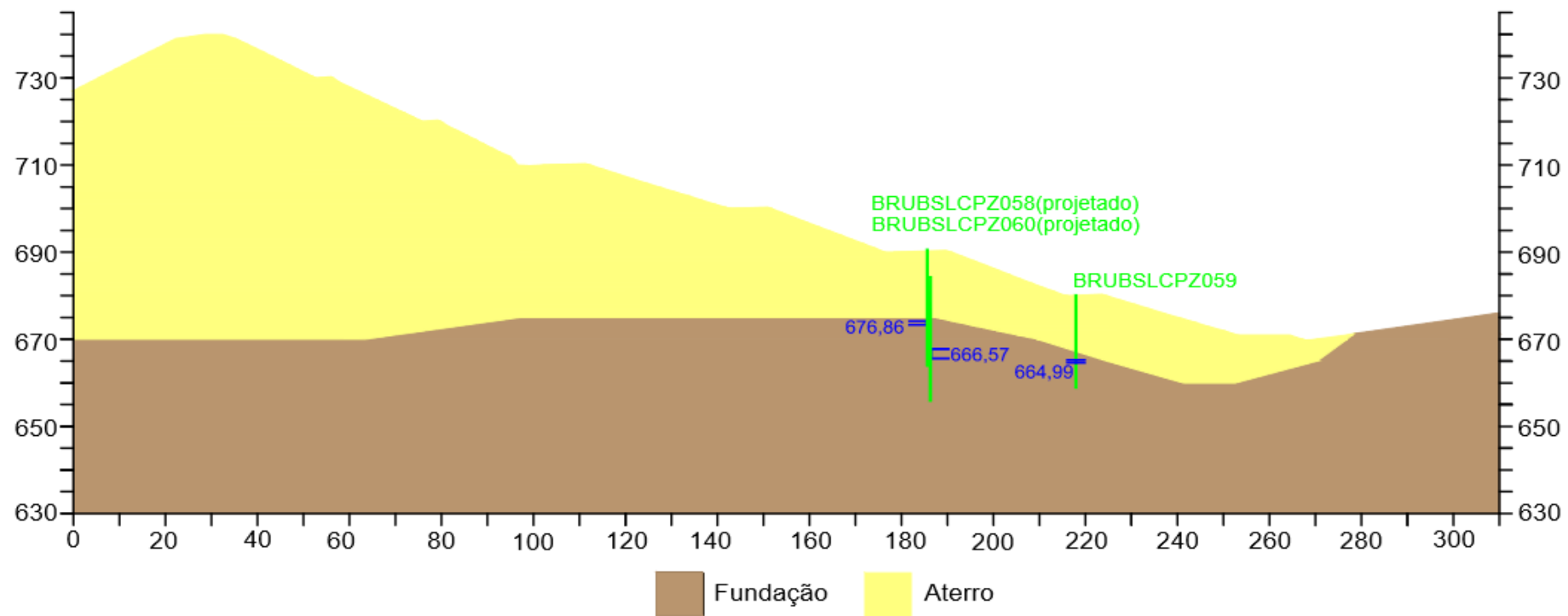
Seção Transversal: ST-01
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

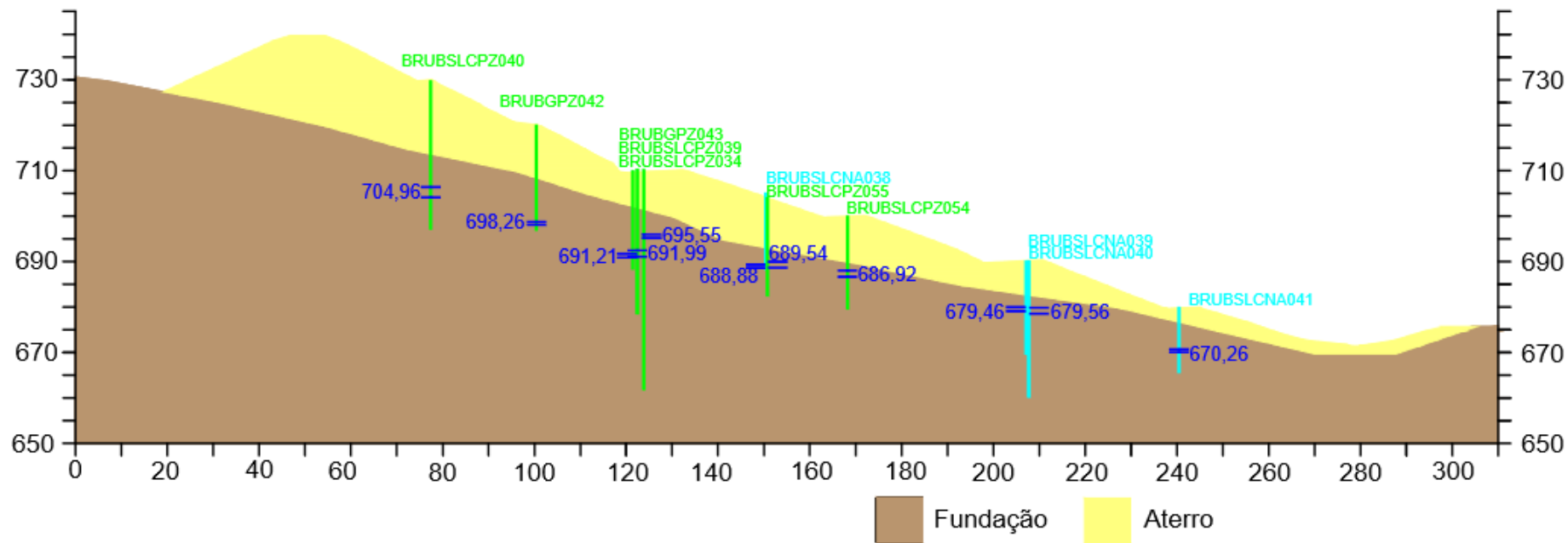
Seção Transversal: ST-02

Fonte: Tetra Tech, 2018



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

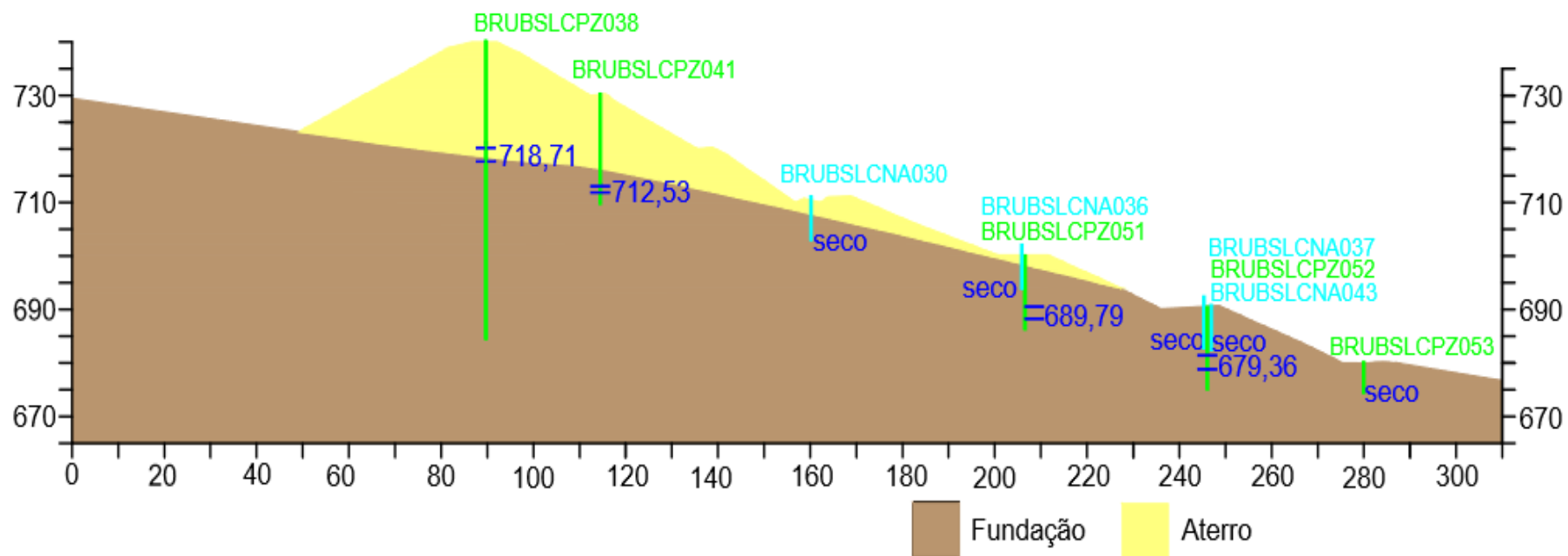
Seção Transversal: ST-03
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

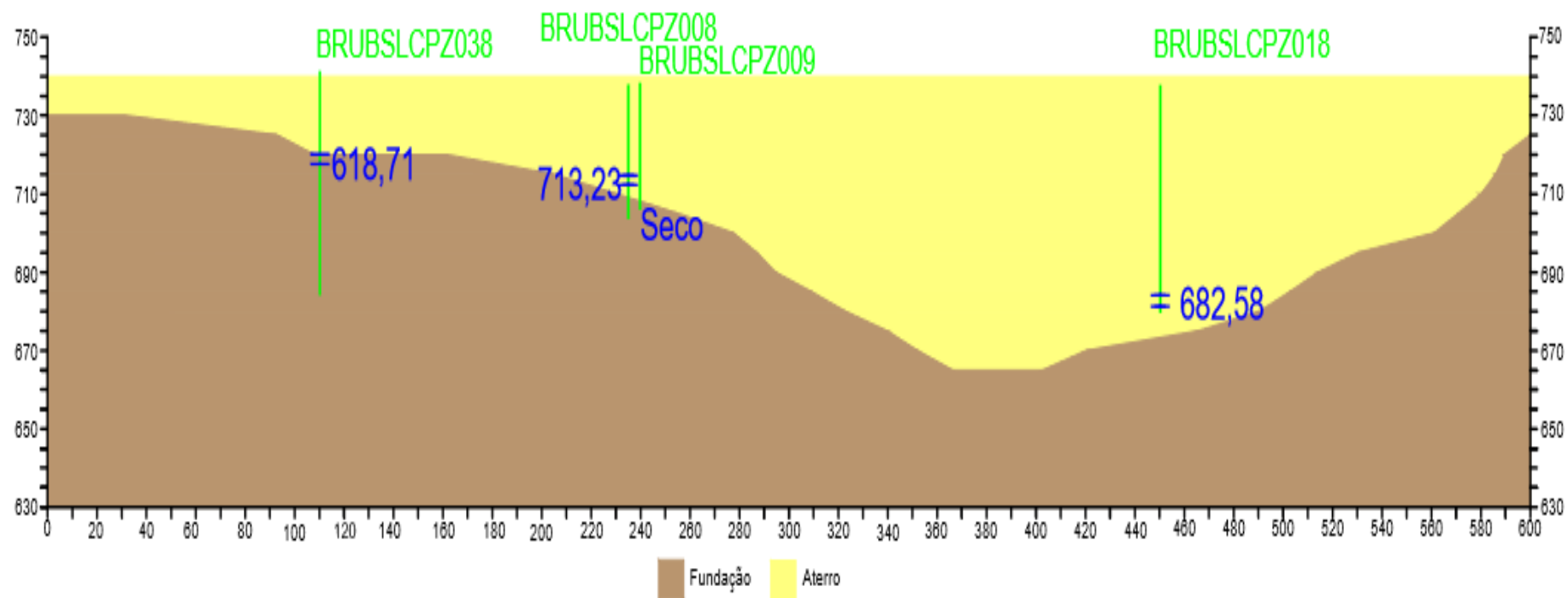
Seção Transversal: ST-04

Fonte: Tetra Tech, 2018



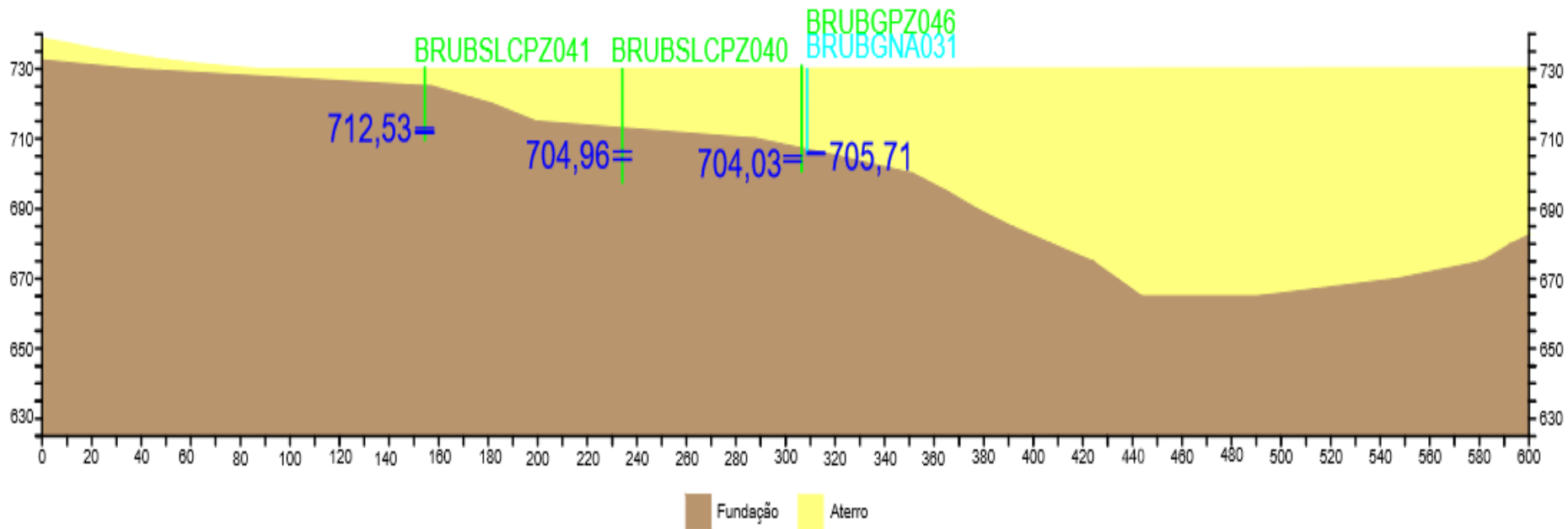
Nota 1: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras;

Seção Transversal: ST-05
 Fonte: Tetra Tech, 2018



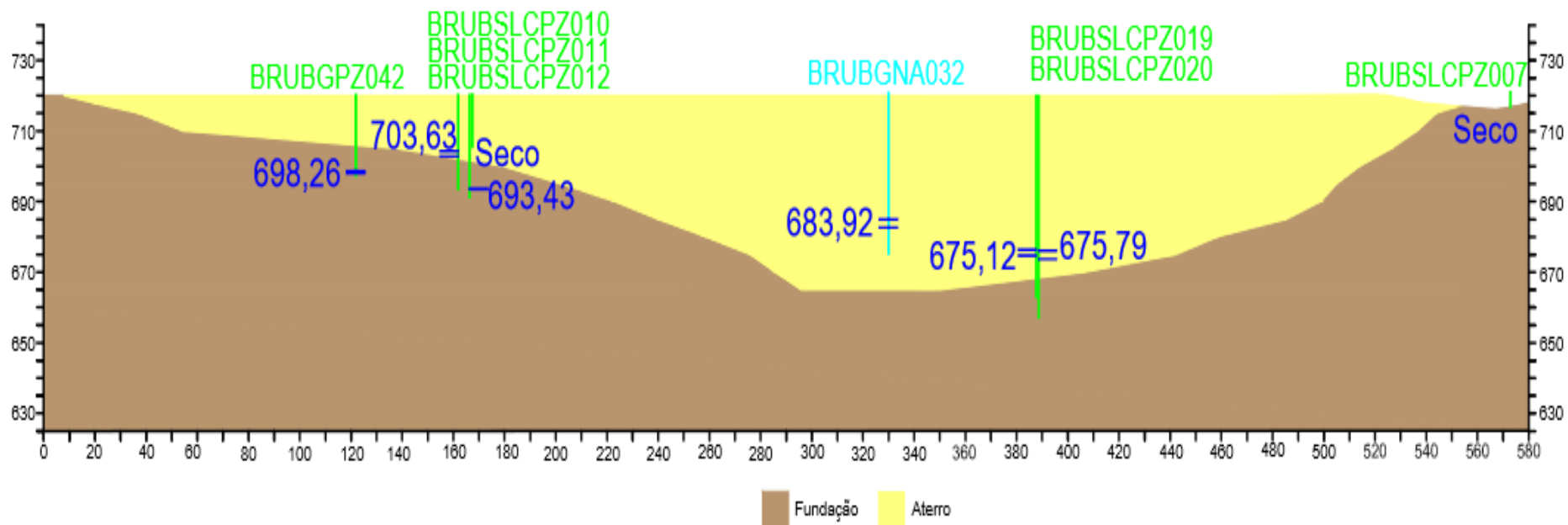
Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

Seção Longitudinal: SL-01
 Fonte: Tetra Tech, 2018



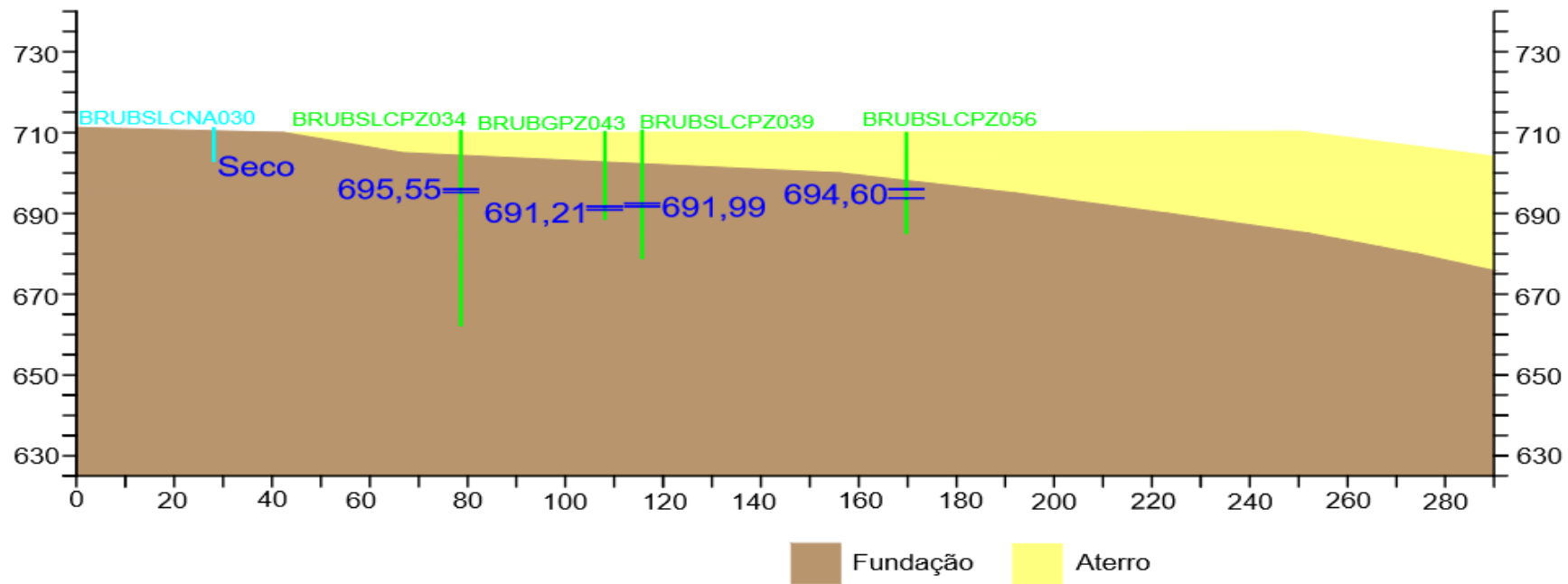
Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

Seção Longitudinal: SL-02
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

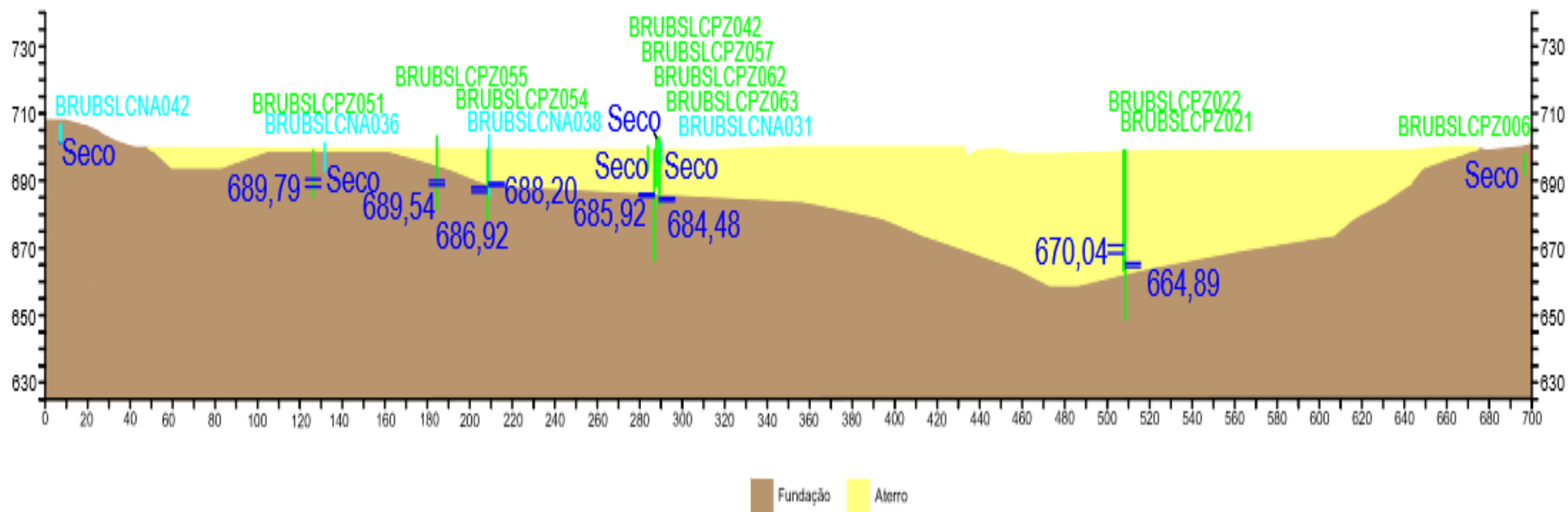
Seção Longitudinal: SL-03
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

Seção Longitudinal: SL-04

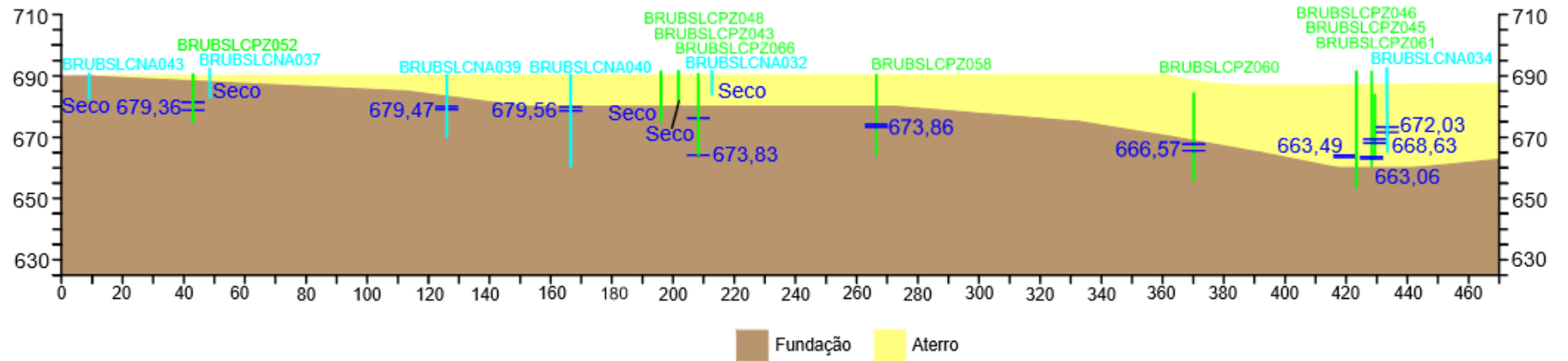
Fonte: Tetra Tech, 2018



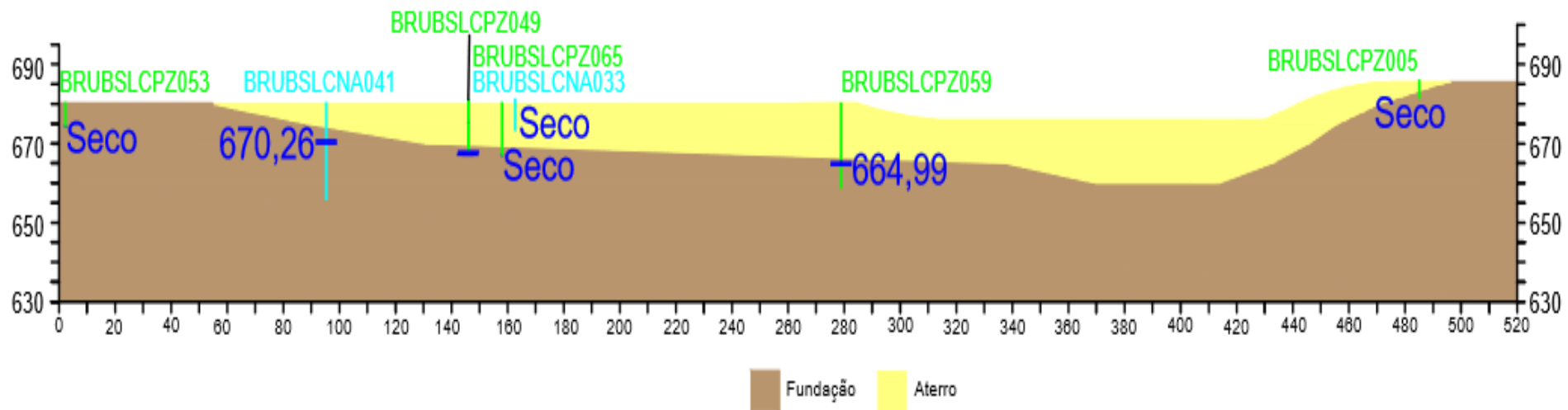
Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

Seção Longitudinal: SL-05

Fonte: Tetra Tech, 2018

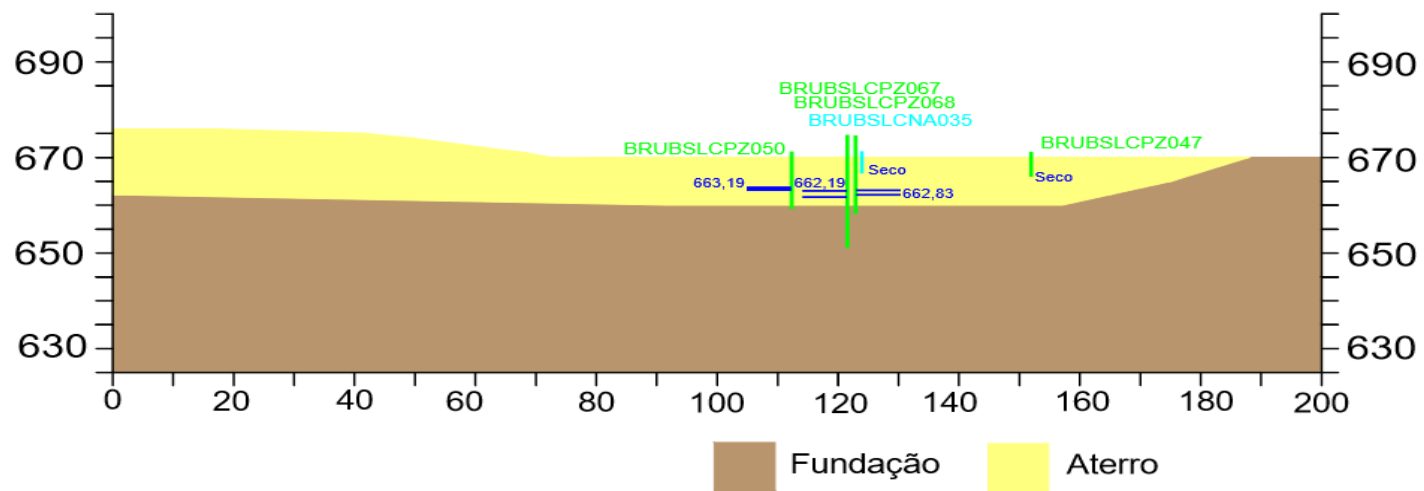


Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.
 Seção Longitudinal: SL-06
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

Seção Longitudinal: SL-07
 Fonte: Tetra Tech, 2018



Nota: O valor apresentado na figura corresponde à média entre o valor máximo e o valor mínimo das leituras.

Seção Longitudinal: SL-08
 Fonte: Tetra Tech, 2018

ANEXO IV. Análise das seções instrumentadas

Seções longitudinais:

Tabela A-5-5: Resumo da seção longitudinal 1 (SL-1)

Seção Longitudinal (SL-1) - El. 740,00 m			
Observações sobre a seção	A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a 2,85 m.		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBSLCPZ038	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ08	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ09	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 706,19 m.
BRUBSLCPZ018	Maciço	Coerente com NA	Tendência de acompanhamento do NA menos pronunciada.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-6: Resumo da seção longitudinal 2 (SL-2)

Seção Longitudinal 2 (SL-2) - El. 730,00 m			
Observações sobre a seção	A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a: 2,27 m.		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBSLCPZ041	Fundação	Coerente com NA	A partir de novembro/2015, observa-se tendência de leituras levemente ascendente.
BRUBSLCPZ040	Fundação	Coerente com NA	A partir de novembro/2015, observa-se tendência de leituras levemente descendente.
BRUBGPZ046	Fundação	Coerente com NA	Leituras semelhantes às dos demais piezômetros da seção, porém datadas a partir de 2013 e com um intervalo sem registros, entre maio/16 e junho/17.
BRUBGNA031	Fundação	Seco	Há apenas um registro de altura piezométrica de 0,40 m, no dia 28/01/2014. (Cota de fundo na El. 695,71 m.).

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-7: Resumo da seção longitudinal 3 (SL-3).

Seção Longitudinal (SL-3) - El. 720,00 m			
Observações sobre a seção	A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a: 2,40 m.		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBGPZ042	Fundação (ombreira direita)	Estáveis	Instrumento estável com baixa amplitude de variação. A partir de 2014 as leituras apresentam variação máxima de 0,63 m. Adicionalmente, observa-se que há um período sem registros, entre maio/2016 e junho/2017.
BRUBSLCPZ010	Fundação	Coerente com NA	Tendência de variação mais pronunciada em comparação aos demais, principalmente no período entre agosto/2008 e novembro/2012.
BRUBSLCPZ011	Maciço	Seco	Observa-se apenas duas leituras com altura piezométrica de 22 cm, nos dias 26/02/2014 e 13/03/2014. Cota de fundo na El. 693,42 m.
BRUBSLCPZ012	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 705,18 m.
BRUBGNA032	Maciço	Coerente com NA	Leituras registradas apenas a partir de 2013.
BRUBSLCPZ019	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ020	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ007	Terreno Natural (Ombreira esquerda)	Seco	Cota de fundo na El. 716,61 m.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-8: Resumo da seção longitudinal 4 (SL-4).

Seção Longitudinal (SL-4) - El. 710,00 m			
Observações sobre a seção	A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a: 2,20 m.		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBSLCNA030	Fundação (ombreira direita)	Seco	Cota de fundo na El. 702,85 m.
BRUBSLCPZ034	Fundação	Coerente com NA	Não apresenta leituras entre maio/2013 e dezembro/2014 devido a problemas técnicos.
BRUBGPZ043	Fundação	Coerente com NA	Não apresenta leituras entre agosto e novembro de 2013 devido às obras de reforço.
BRUBSLCPZ039	Fundação	Coerente com NA	Não apresenta leituras entre agosto e novembro de 2013 devido às obras de reforço.

BRUBSLCPZ056	Fundação	Leituras descendentes	Tendência de variação descendente entre maio/2014 e agosto/2018, com variação total de 2,20 m. Destaca-se que a variação das leituras é mais acentuada entre 2014 e 2015 e torna-se mais suave a partir de 2016.
--------------	----------	-----------------------	--

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-9: Resumo da seção longitudinal 5 (SL-5)

Seção Longitudinal (SL-5) - El. 700,00 m			
Observações sobre a seção	<p>A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a 2,36 m para os instrumentos com leituras consistentes.</p> <p>Observa-se que, em geral, a amplitude de variação nas leituras dos instrumentos desta seção é menor quando comparada a seções anteriores. Este comportamento é esperado, tendo em vista que a seção está localizada mais a jusante do maciço.</p>		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBSLCNA042	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 702,50 m.
BRUBSLCPZ051	Fundação	Coerente com NA	Tendência de subida entre 2014 e 2015. Este comportamento não foi observado nos demais instrumentos da seção.
BRUBSLCNA036	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 693,74 m.
BRUBSLCPZ054	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ055	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCNA038	Fundação	Coerente com NA	Adicionalmente, o instrumento encontra-se seco entre março/2015 e maio/2016.
BRUBSLPZC042	Maciço	Seco	Cota de fundo na El. 693,99 m.
BRUBSLCPZ057	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ062	Maciço	Seco	Sempre apresentou histórico de leituras secas.
BRUBSLCPZ063	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCNA031	Maciço	Inconsistente	As leituras alternam valores muito altos e secos, indicando incoerência provavelmente relacionada ao histórico de interferência de águas pluviais no instrumento.
BRUBSLCPZ021	Fundação	Coerente com NA	Possui maior histórico de leituras, em relação aos demais instrumentos da seção (desde 2009). Adicionalmente, está instalado em cota mais profunda (El. 649,74 m). Comportamento semelhante ao do instrumento BRUBSLCPZ022.

BRUBSLCPZ022	Maciço	Coerente com NA	Possui maior histórico de leituras, em relação aos demais instrumentos da seção (desde 2009). Adicionalmente, está instalado em cota mais profunda (El. 664,09 m). Comportamento semelhante ao do instrumento BRUBSLCPZ021.
BRUBSLCPZ006	Terreno Natural (Ombreira esquerda)	Seco	Cota de fundo na El. 693,01 m.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-10 – Resumo da seção longitudinal 6 (SL-6)

Seção Longitudinal (SL-6) - El. 690,00 m

Observações sobre a seção	A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a 2,58 m para os instrumentos com leituras consistentes.		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBSLCPZ043	Maciço	Seco	Cota de fundo na El. 681,76 m.
BRUBSLCPZ052	Fundação	Coerente com NA	Possui picos de leitura que desviam da média do instrumento em períodos chuvosos.
BRUBSLCNA037	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 682,66 m.
BRUBSLCNA039	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCNA040	Fundação	Coerente com NA	Cota de topo utilizada como referência para as medições de 28/01/2014 a 12/06/2017 é divergente da utilizada para as datas posteriores.
BRUBSLCPZ048	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 675,14 m.
BRUBSLCPZ066	Fundação	Inconsistente	Inicialmente o instrumento registrou leituras secas, no período entre junho e novembro de 2014. Em seguida, de forma repentina, as medições assumiram valor correspondente a cerca de 12 metros de coluna d'água. Destaca-se que em julho e agosto de 2015 o instrumento voltou a apresentar leituras secas. Adicionalmente, o instrumento não possui registros entre novembro/2015 e novembro/2016.
BRUBSLCNA032	Maciço	Inconsistente	As leituras alternam valores muito altos e secos, indicando incoerência, provavelmente relacionada ao histórico de interferência de águas pluviais no instrumento.
BRUBSLCPZ058	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ060	Fundação	Coerente com NA	Observa-se uma descontinuidade de leituras entre setembro e outubro de 2017, associada à mudança do referencial da cota de topo do

			instrumento. Informa-se que até setembro de 2017, a cota de topo registrada para o instrumento era na El. 685,415 m, após esse período a cota de topo passou a ser considerada na El. 686,395 m.
BRUBSLCPZ046	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ045	Fundação	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ061	Maciço	Coerente com NA	Observa-se tendência de descida não registrada nos demais instrumentos, no período entre setembro/2014 e dezembro/2016.
BRUBSLCNA034	Fundação	Coerente com NA	Tendências menos pronunciadas de subida e descida. Observa-se tendência de descida não registrada nos demais instrumentos, no período entre setembro/2014 e dezembro/2016.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-11 – Resumo da seção longitudinal 7 (SL-7)

Seção Longitudinal (SL-7) - El. 680,00 m

Observações sobre a seção	A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a 1,07 m para os instrumentos com leituras consistentes.		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBSLCPZ053	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 674,34 m.
BRUBSLCNA041	Fundação	Coerente com NA	Apresenta baixa amplitude de variação.
BRUBSLCPZ049	Maciço	Coerente com NA	-
BRUBSLCPZ065	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 667,11 m. Destaca-se que o instrumento não apresenta registros de medição entre agosto/2015 e janeiro/2017.
BRUBSLCNA033	Maciço	Inconsistente	As leituras alternam valores muito altos e secos, indicando incoerência provavelmente relacionada ao histórico de interferência de águas pluviais no instrumento.
BRUBSLCPZ059	Fundação	Coerente com NA	Tendências de subida e descida consonante com o NA.
BRUBSLCPZ044 ⁽¹⁾	Maciço	Seco	Cota de fundo na El. 671,37 m.
BRUBSLCPZ064 ⁽¹⁾	Fundação	Coerente com NA	-

BRUBSLCPZ005	Fundação	Seco	Cota de fundo na El. 681,53 m.
--------------	----------	------	--------------------------------

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-12 – Resumo da seção longitudinal 8 (SL-8)

Seção Longitudinal (SL-8) - El. 670,00 m

Observações sobre a seção	A partir de 2014, as leituras dos instrumentos na seção estão consideravelmente estáveis, sendo a variação máxima observada entre a leitura mínima e máxima inferior a 1,30 m para os instrumentos com leituras consistentes.		
Instrumento	Região	Comportamento	Observações
BRUBSLCPZ050	Fundação	Coerente com NA	Tendências de subida e descida consonante com o NA, tendo menor amplitude de variação em relação aos demais instrumentos com este comportamento na seção.
BRUBSLCPZ067	Fundação	Coerente com NA	Não apresenta registros de medição no período entre abril/2014 e setembro/2014 e entre agosto/2015 até novembro/2016. Adicionalmente, entre fevereiro e julho de 2015 o instrumento apresentou leituras maiores que a média, cerca de 0,65 m acima dos valores registrados nos meses anteriores.
BRUBSLCPZ068	Fundação	Coerente com NA	Não apresenta registros de medição entre agosto/2015 e julho/2016.
BRUBSLCNA035	Maciço	Inconsistente	As leituras alternam valores muito altos e secos, indicando incoerência provavelmente relacionadas à interferência de águas pluviais no instrumento.
BRUBSLCPZ047	Maciço	Seco	Cota de fundo na El. 666,05 m.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Seções transversais:

Tabela A-5-13 – Resumo da seção transversal 1 (ST-1)

Seção Transversal 1 (ST-1)

Instrumentos	BRUBSLCPZ018, BRUBSLCPZ019, BRUBSLCPZ020, BRUBSLCPZ022, BRUBSLCPZ021, BRUBSLCPZ046, BRUBSLCPZ045, BRUBSLCNA034, BRUBSLCPZ045, BRUBSLCNA035, BRUBSLCPZ047, BRUBSLCPZ050.
Observações sobre a seção	Os instrumentos PZ018, PZ019, PZ020, PZ022 e PZ021, instalados sequencialmente de montante para jusante, tem apresentado registros de leituras com tendência de comportamento similar e cargas piezométricas decrescentes, conforme esperado. Em seguida, na berma de reforço os instrumentos PZ045 e PZ046 instalados na fundação apresentam registros de leituras muito próximos. A jusante deles, o PZ061 instalado no maciço apresenta leituras mais altas do que o esperado, comparadas com o fluxo estimado pelos registros dos demais instrumentos da seção. Os instrumentos PZ050, PZ068 e PZ067 instalados próximo ao pé da barragem apresentam comportamento de leituras similares. Os instrumentos INA034 e INA035, instalados no maciço e berma de reforço, apresentam leituras muito inconsistentes, podendo estar sofrendo influência por águas pluviais.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-14 – Resumo da seção transversal 2 (ST-2).

Seção Transversal 2 (ST-2)	
Instrumentos	BRUBSLCPZ008, BRUBSLCPZ009, BRUBGNA031, BRUBGPZ046, BRUBSLCPZ012, BRUBSLCPZ011, BRUBSLCPZ010, BRUBSLCPZ056, BRUBSLCPZ062, BRUBSLCPZ063, BRUBSLCNA031, BRUBSLCPZ042, BRUBSLCPZ057, BRUBSLCPZ043, BRUBSLCPZ048, BRUBSLCNA032, BRUBSLCPZ049, BRUBSLCNA033.
Observações sobre a seção	A grande maioria dos instrumentos possuem leituras apenas a partir de início de 2014. De montante para jusante, os instrumentos PZ008, BRUBGNA031, BRUBGPZ046 e PZ056, no filtro e fundação, têm apresentado registros de leituras com tendência de comportamento similar e cargas piezométricas decrescentes, conforme esperado. Os instrumentos PZ010 e PZ057, instalados na fundação, apresentam leituras mais altas que os demais instrumentos na seção. Os instrumentos NA031, NA032 e NA033, instalados na berma de reforço, apresentaram leituras muito inconsistentes, podendo estar sofrendo influência por águas pluviais.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-15 – Resumo da seção transversal 3 (ST-3)

Seção Transversal 3 (ST-3)	
Instrumentos	BRUBSLCPZ058, BRUBSLCPZ060, BRUBSLCPZ059.
Observações sobre a seção	Os instrumentos instalados na fundação apresentam a mesma tendência de comportamento de leituras. As cargas piezométricas dos instrumentos PZ058 e PZ060 são divergentes. No entanto, destaca-se que ambos estão projetados na seção.

Fonte: Tetra Tech, 2018

Tabela A-5-16 – Resumo da seção transversal 4 (ST-4)

Seção Transversal 4 (ST-4)

Instrumentos	BRUBSLCPZ040, BRUBGPZ042, BRUBGPZ043, BRUBSLCPZ039, BRUBSLCPZ034, BRUBSLCNA038, BRUBSLCPZ55, BRUBSLCPZ54, BRUBSLCNA039, BRUBSLCNA040, BRUBSLCNA041.
Observações sobre a seção	Os instrumentos apresentam tendência de comportamento parecida, com variações pequenas das leituras no período avaliado, com exceção do PZ040, a montante na seção, que apresenta maior sensibilidade quanto à variação do nível do reservatório. Todos os instrumentos encontram-se instalados na fundação.

Fonte: Tetra Tech, 2018


Tabela A-5-17 – Resumo da seção transversal 5 (ST-5)

Seção Transversal 5 (ST-5)


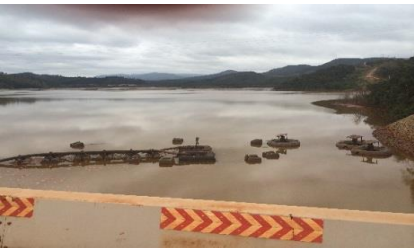
Instrumentos	BRUBSLCPZ038, BRUBSLCPZ041, BRUBSLCNA030, BRUBSLCNA036, BRUBSLCPZ51, BRUBSLCNA037, BRUBSLCPZ52, BRUBSLCNA043, BRUBSLCPZ53.
Observações sobre a seção	Os instrumentos PZ038, PZ041, PZ051 e PZ052 PZ021, instalados na fundação, sequencialmente de montante para jusante, apresentam tendência de comportamento similar e cargas piezométricas decrescentes, conforme esperado. Todos os demais instrumentos de menor profundidade apresentam-se secos. O PZ038, na crista, apresenta maior sensibilidade à variação do nível do reservatório.



Fonte: Tetra Tech, 2018


ANEXO V. Painel de avaliação dos modos de falha identificados na Barragem-Piloto

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(A) Galgamento	Análise de risco	Reservatório	-	Volume para trânsito de cheias insuficiente	<p>Apesar de a Barragem-Piloto não receber os rejeitos de minério de ferro provenientes da usina, o reservatório recebe as descargas e excedentes de produção (polpa) de algumas etapas do processo de beneficiamento com alto teor de ferro, além de sedimentos exógenos provenientes da bacia de drenagem.</p> 	Nenhum	Alto	<p>Elaborar estudo específico para avaliar a questão do enchimento do reservatório (sedimentos exógenos do vale e deposição de descarga da usina) versus volume útil para reservação e volume disponível para trânsito de cheias.</p> <p>Realizar topobatimetrias (batimetria + altimetria da praia de rejeito) e estudos de trânsito de cheias. Segundo Pinheiro (2011), recomenda-se a realização do levantamento topobatimétrico pelo menos uma vez no ano.</p> <p>Realizar análise probabilística do modo de falha galgamento, considerando a perda do volume disponível para o amortecimento da passagem das cheias, dado o avanço da ocupação do reservatório.</p>	Não

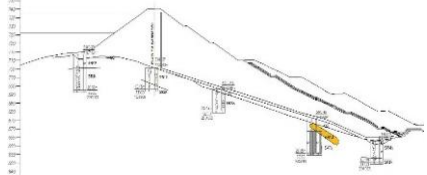
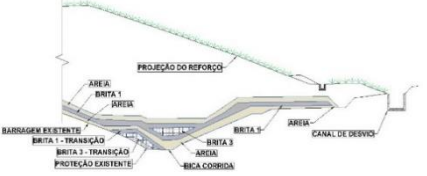
Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(A) Galgamento	FMEA (2012)	Reservatório	-	Volume para trânsito de cheias insuficiente	O extravasor é projetado para evento de cheia de 10.000 anos com borda livre e verificado para PMP sem borda livre (sem armazenamento). Para verificação de segurança atual, não há levantamento altimétrico da praia de rejeito para a derivação da curva cota x volume.	Nenhum	Alto	Realizar topobatimetrias, levantar curva cota x volume e estudos de trânsito de cheias. Segundo Pinheiro (2011), recomenda-se a realização do levantamento topobatimétrico pelo menos uma vez no ano. Realizar análise probabilística do modo de falha galgamento a partir da determinação do tempo de retorno da precipitação que irá elevar o NA acima da crista da barragem.	Não
(A) Galgamento	FMEA (2012)	Sistema extravasor	-	Capacidade de descarga insuficiente	O extravasor é projetado para evento de cheia de 10.000 anos com borda livre e verificado para PMP sem borda livre (sem armazenamento).	-	Alto	Verificar a capacidade de descarga do sistema extravasor. Realizar análise probabilística do modo de falha galgamento a partir da determinação do tempo de retorno da precipitação que irá elevar o NA acima da crista da barragem. Este item será analisado em conjunto com o item 2.	Não


Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(A) Galgamento	Análise de risco	Sistema extravasador	-	Obstrução	<p>Não foram identificadas obstruções na entrada do vertedouro. Caso a ponte de acesso sobre o vertedouro entre em colapso, ela funcionará como potencial objeto de redução da capacidade de descarga.</p> 	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Realizar inspeções periódicas.	Rotina
(A) Galgamento	Análise de risco	Sistema extravasador	Sistema de Adução/ Captação	Obstrução	<p>Não foram identificadas obstruções na entrada do vertedouro. Entretanto, o conjunto de bombas está locado próximo à entrada do vertedouro. Caso alguma bomba/flutuante se solte do sistema de ancoragem, ela funcionará como potencial objeto de redução da capacidade de descarga.</p> 	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Durante o período de operação, realizar periodicamente a manutenção do sistema. Para a desativação da barragem, deve-se desmobilizar o sistema de bombeamento.	Rotina


Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(A) Galgamento	Análise de risco	Maciço	-	Desniveleamento da crista	Foram observados pontos localizados de abatimento na crista, devido ao tráfego de equipamentos. 	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Realizar manutenção corretiva nos pontos de abatimento para evitar o acúmulo de água pluvial. Realizar topografia com detalhes de todos os elementos da barragem.	Não
(A) Galgamento	Análise de risco	Reservatório	-	Ruptura de estruturas geotécnicas nas áreas adjacentes	Não há registros de erosões e/ou ruptura dos taludes naturais que possam comprometer a capacidade de descarga e/ou o volume útil da barragem. 	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Manter inspeções visuais.	Rotina


Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(A) Galgamento	Análise de risco	Sistema extravasor	Ombreiras	Ruptura de taludes naturais nas margens	<p>Não há sinais de erosão e/ou ruptura dos taludes na lateral do vertedouro que possam provocar redução da capacidade de escoamento do vertedouro.</p> 	Manut. Preditiva- Inspeções visuais	Médio	Manter inspeção periódica.	Rotina

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(A) Galgamento	Análise de risco	Sistema extravasor	-	Falha estrutural	<p>Não foram identificados sinais/indícios de anomalias. Não há documentos formais sobre inspeções por profissional especializado em concreto armado.</p> 	Nenhum	Baixo	<p>Implantar rotina de inspeções com finalidade de verificar as condições estruturais do vertedouro. Essa inspeção deve ser realizada por um especialista em concreto armado, preferencialmente, estando o fluxo interrompido e a área devidamente seca.</p>	Não

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(B) Erosão interna	Análise de risco	Fundação/Maciço		Zonas de alta permeabilidade	<p>Incertezas geológicas sobre a existência de zonas de alta permeabilidade (presença de lentes de quartzitos a serem confirmadas) na fundação em função da presença de elevadas poropressões na região central – ombreira direita.</p> 	Nenhum	Baixo	A Barragem-Piloto já apresenta rede fluxo permanente. Recomenda-se para desativação da estrutura a realização de novas investigações, mais detalhadas e profundas próximas às seções centrais, e elaboração de um modelo geológico (preferencialmente em 3D) reunindo os furos de sondagem existentes e novas campanhas, para confirmar a presença do veio de quartzito e/ou quartzito no local detectado pela alta poropressão registrada nos piezômetros da fundação.	Não
(B) Erosão interna	Análise de risco	Maciço	-	Colmatação do sistema de drenagem interna	<p>Identificada a precipitação de óxidos de ferro (em especial, óxido férrico) no descarte das vazões. Fato atenuante: o novo sistema de drenagem interna elaborado foi projetado para trabalhar afogado para minimizar a precipitação de ferro.</p> 	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Realizar limpeza na região próxima ao pé da barragem.	Não

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(B) Erosão interna	FMEA (2012)	Maciço	Ombreiras	Caminhos de percolação criados por vegetação/animais	Formação de túneis bióticos, com possibilidade de criação de caminhos preferenciais para o fluxo d'água. Registros com indícios visuais de formigueiros e/ou cupinzeiros. 	Manut. Corretiva e Preventiva	Alto	Remover formigueiros e cupinzeiros quando presentes; intensificar o controle periódico de pragas (dedetização).	Rotina
(B) Erosão interna	FMEA (2012)	Maciço	Sistema extravasor	Fluxo concentrado no contato/interface com estruturas de concreto	HISTÓRICO: Em 2011, durante as verificações pós-construção, foi identificada a presença de trincas no vertedouro e houve dúvidas sobre a competência do aterro localizado na interface maciço/concreto. Em 2013 foram refeitos os aterros de encontro no emboque do vertedouro e foi promovido o preenchimento dos vazios sob a laje de fundo do vertedouro com <i>grouting</i> . Conforme projeto ATUAL: Não há sinais de fluxo no contato vertedouro/maciço.	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Manter inspeções visuais periódicas.	Rotina


Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
					 <p>Fotos da época do tratamento.</p>				
(B) Erosão interna	Análise de risco	Maciço	Sistema extravasor	Fluxo concentrado ao longo de dutos enterrados	<p>As tubulações de aço (utilizadas para garantir a vazão residual e o antigo sistema de bombeamento utilizado no deplecionamento durante as obras de reforço) encontram-se enterradas no maciço.</p> <p>FATO ATENUANTE: O nível do reservatório nas condições normais não atinge a elevação onde as tubulações estão enterradas.</p>	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Médio	Para a desativação da barragem, deve-se desmobilizar o sistema de bombeamento e retirar a tubulação embutida no maciço.	Não

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(B) Erosão interna	FMEA (2012)	Maciço	-	Zonas de alta permeabilidade	Em 2013 foi construído um reforço (berma de jusante e novo sistema de drenagem interna). ATUAL: A berma de reforço corrigiu a questão das zonas de alta permeabilidade e baixa compactação.	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Manter inspeções visuais.	Rotina
(B) Erosão interna	FMEA (2012)	Maciço	-	Material com potencial erodibilidade	O núcleo do maciço na El. 740,00 é composto por solos saprolíticos (siltes e argilas) de xistos que possuem potencial de erodibilidade. FATO ATENUANTE: As camadas de núcleo são envelopadas por material argiloso menos susceptível à erosão e a berma de reforço foi executada com material argiloso. Além disso, não foram observados indícios de movimentações. 	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Manter inspeções visuais para combater possíveis focos erosivos no seu início.	Rotina


Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(B) Erosão interna	FMEA (2012)	Ombreira	Fundação/Ombreira	Trincas transversais devido à forma e inserção no vale.	Não há registros de recalques diferenciais na estrutura; a ombreira esquerda apresenta geometria íngreme e sem patamares. A ombreira direita apresenta geometria íngreme na porção inferior; e na porção superior, geometria suave com patamares. Além disso, não foram observados indícios de movimentações.	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Alto	Manter inspeções visuais.	Rotina
(C) Instabilização	FMEA (2012)	Maciço	-	Geometria Inadequada	HISTÓRICO: Em 2013 foi construído um reforço (berma de jusante e novo sistema de drenagem interna), projetado para adequar a geometria e o fator de segurança. ATUAL: o fator de segurança da barragem encontra-se atualmente acima de 1,5 (NBR 13.028/17).	Manut. Preditiva - Inspeções visuais	Médio	Manter rotina de avaliação de desempenho.	Rotina


Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(C) Instabilização	FMEA (2012)	Maciço	Fundação	Baixa resistência do material	<p>Conforme os documentos "as-built", os materiais de baixa resistência da fundação foram removidos. A fundação, em sua maioria, consiste em solo residual de alteração de xistos.</p> <p>Foram realizados 8 ensaios nos materiais de fundação.</p> <p>Foram realizados no maciço ensaios de caracterização, compactação, permeabilidade e ensaios triaxiais. Em virtude de uma grande quantidade de dados foi necessário um tratamento estatístico desses dados.</p>	Nenhum	Médio	Investigar as características de resistência dos materiais para diminuir as incertezas dos dados.	Não

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(C) Instabilização	FMEA (2012)	Maciço		Poropressões Elevadas	<p>HISTÓRICO: na porção central (seção de maior altura) foi identificada zona com elevadas poropressões, bem acima das condições de projeto e da elevação do tapete drenante. Segundo documentos (2008), o desempenho deficiente do sistema de drenagem interna ocorreu em função do uso de materiais inadequados e alteração das características geométricas durante a fase de construção.</p> <p>ATUAL: evidências apontam que os níveis de segurança foram reestabelecidos com a construção da berma de jusante.</p>	Manut. Preditiva- Inspeções visuais e leitura dos instrumentos	Alto	<p>Manter inspeções visuais do talude de jusante e ombreiras, notificando o aparecimento de áreas úmidas e/ou surgências.</p> <p>Manter a leitura dos instrumentos instalados.</p>	Rotina

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(C) Instabilização	FMEA (2012)	Fundação/Maceração		Poropressões Elevadas	<p>ATUAL: Evidências apontam que os níveis de segurança foram restabelecidos com a construção da berma de jusante.</p> 	Manut. Preditiva - Leitura dos instrumentos	Alto	Manter inspeções visuais do talude de jusante e ombreiras, notificando o aparecimento de áreas úmidas e/ou surgências. Manter a leitura dos instrumentos instalados, inclusive nos poços de alívio instalados.	Rotina

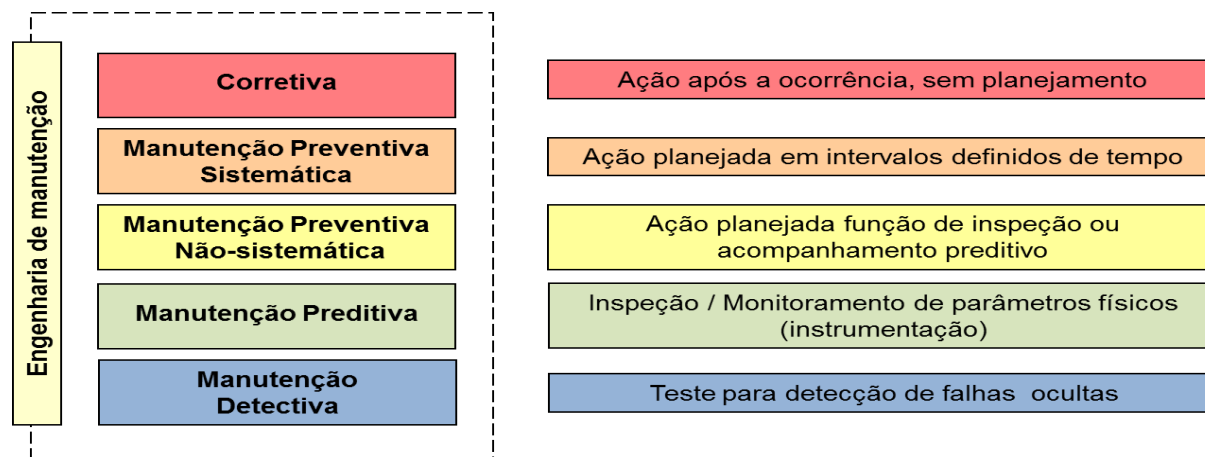
Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
© Instabilização	FMEA (2012)	Maciço	-	Funcionamento inadequado do sistema de drenagem interna	<p>Em 2013 foi construído um reforço (berma de jusante e novo sistema de drenagem interna) ATUAL: evidências apontam que as poro-pressões foram controladas com a construção da berma de jusante.</p> 	Manut. Preditiva Inspeções visuais	Médio	Realizar análises de estabilidade probabilísticas para a estrutura, considerando a condição atual.	Rotina
(C) Instabilização	FMEA (2012)	Maciço	-	Proteção superficial ausente ou inadequada	<p>Verificou-se a boa condição da proteção vegetal. Entretanto, faz-se necessária a correção de ocorrências localizadas, no talude de jusante.</p> 	Manut. Corretiva e Preditiva	Alto	Realizar correção da proteção vegetal em pontos localizados. Acompanhar através das inspeções de rotina e programar serviços de manutenção (poda e retirada das raízes) no talude de jusante e montante, quando necessário.	Rotina

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(C) Instabilização	Análise de risco	Maciço	Ombreiras	Falha no sistema de drenagem superficial	<p>Verificou-se a boa condição do sistema de drenagem superficial.</p> 	Manut. Corretiva e Preditiva	Alto	Manter manutenção e limpeza periódica das canaletas.	Rotina
(C) Instabilização	FMEA (2012)	Maciço	Fundação	Deformação excessiva	Não há registros de recalques na estrutura.	Manut. Preditiva-Inspeções visuais e leitura dos instrumentos	Alto	Manter inspeções visuais.	Rotina

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(C) Instabilização	Análise de risco	Maciço	Fundação	Colmatação do sistema de drenagem interna	<p>O sistema de drenagem interna estava em condições adequadas de funcionamento.</p> 	Manut. Preditiva - Leitura dos instrumentos	Baixo	Recomenda-se leituras periódicas do nível de água nos poços de alívio, quando possível.	Rotina
(D) Liquefação	Análise de risco	Maciço	Fundação	Geração abrupta de excesso de poropressão	<p>A região de inserção da barragem não se encontra em zona sismogênica ativa, nem possui histórico de sismos com magnitudes preocupantes. No local do maciço também não há a produção de efeitos dinâmicos (detonações, cravação de estacas, escorregamentos etc.).</p> <p>-</p>	Nenhum	Alto	-	-

Modo de falha da estrutura	Meio de Detecção / Origem	Componente	Componente	Causa	Evidências / Informações Complementares	Controles Existentes (1)	Nível de Confiança	Recomendações	Plano de ação? (2)
(D) Liquefação	Análise de risco	Maciço	Fundação	Presença de materiais susceptíveis à liquefação	O material do aterro e os materiais de fundação são considerados pouco susceptíveis à liquefação. -	Nenhum	Alto	-	-

- (1) Os controles existentes foram classificados conforme tabela abaixo, observando-se os controles atualmente empregados para cada risco. Salienta-se que o nível de controle deve ser adequado para o risco em questão, não existindo controle "certo" ou "errado".
- (2) Foram definidas como ROTINA as atividades realizadas periodicamente, dentro de um plano de monitoramento ou de manutenção preventiva sistemática.



Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2010).

DECLARAÇÃO

Eu, Rodrigo de Aguiar Marinaro, declaro que esta dissertação intitulada “Proposta de Metodologia para Definição dos Níveis de Controle da Instrumentação Associados aos Modos de Falha: Estudo de Caso em uma Barragem para Disposição de Rejeito de Mineração” é inteiramente e exclusivamente de minha autoria e que, com exceção das citações diretas e indiretas claramente indicadas e referenciadas neste trabalho, e do uso autorizado de banco de dados, seu texto, figuras, gráficos, quadros, tabelas, algoritmos e demais dados foram por mim obtidos e, portanto, não contém plágio.

Assinatura

RODRIGO DE

AGUIAR MARINARO

Assinado de forma digital por
RODRIGO DE AGUIAR MARINARO
Dados: 2022.09.13 21:34:51 -03'00'

Data:

