



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

DENI OTÁVIO OLIVEIRA DE SOUZA

**INTERPRETAÇÃO E APLICAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE DO
MONITORAMENTO GEOTÉCNICO NA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE
BARRAGENS DE MINERAÇÃO**

Tucuruí - PA

2018

DENI OTÁVIO OLIVEIRA DE SOUZA

**INTERPRETAÇÃO E APLICAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE DO
MONITORAMENTO GEOTÉCNICO NA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE
BARRAGENS DE MINERAÇÃO**

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

Orientador : Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto.

Tucuruí - PA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O87i Otávio Oliveira de Souza, Deni
 Interpretação e Aplicação dos Níveis de Controle do Monitoramento Geotécnico na Avaliação de Segurança de Barragens de Mineração / Deni Otávio Oliveira de Souza. — 2018
 118 f. : il. color
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (PEBGA), Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2018.
 Orientação: Prof. Dr. Aarão Ferreira Lima Neto
1. Segurança de Barragens. 2. Ruptura de Barragens. 3. Estabilidade de Barragens. 4. Níveis de Controle. I. Ferreira Lima Neto, Aarão, *orient.* II. Título
-

CDD 620

DENI OTÁVIO OLIVEIRA DE SOUZA

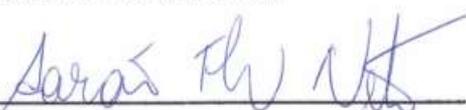
**INTERPRETAÇÃO E APLICAÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE DO
MONITORAMENTO GEOTÉCNICO NA AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE
BARRAGENS DE MINERAÇÃO**

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

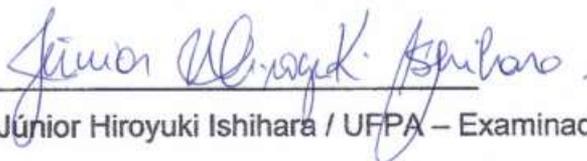
Dr. Aarão Ferreira Lima Neto

Aprovada em 11 de maio de 2018.

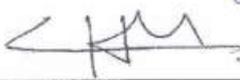
BANCA EXAMINADORA:



Dr. Aarão Ferreira Lima Neto / UFPA - Orientador



Dr. Júnior Hiroyuki Ishihara / UFPA – Examinador Interno.



Ph.D. Carlos Henrique Medeiros / UEFS (Prof. Aposentado) – Examinador Externo

Dedico este trabalho a meus pais Jair Alves e Ioni Alves, a minha esposa Rubiane Diz e meu amado filho Vínicius Diz Oliveira Souza, por todo meu amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por tudo que ele tem me proporcionado ao longo de minha vida e sempre se fazendo presente nos momentos difíceis.

Aos meus pais, pela criação e dedicação para que eu me tornasse o homem que sou hoje. Ao meu Pai Jair pela amizade, confiança e sacrifício para me propiciar um estudo de qualidade. A minha mãe Ioni pelo carinho, amor e dedicação desde sempre.

A minha esposa Rubiane, pelo incentivo para que eu buscasse meus sonhos e metas, pela compreensão durante minhas ausências, por ter me dado a maior alegria da minha vida, nosso filho, e ser minha fonte de inspiração na busca pelo conhecimento.

Ao meu filho Vinicius que mesmo sendo muito novo para compreender minhas ausências e ter consciência sobre a sua importância em nossas vidas, a cada sorriso e abraço ao me receber me davam mais força e certeza para continuar no caminho certo.

A família Diz Luiz, pela oportunidade, carinho e ajuda no momento que mais precisei me abrindo as portas da RDIZ Projetos.

Ao meu eterno mestre e amigo, Leonardo Leopoldo, pelos ensinamentos, orientações e aprendizado. Agradeço por acreditar no meu potencial e por me ensinar os fundamentos práticos e teóricos da Engenharia Geotécnica.

A VALE S/A, aos meus colegas de empresa, pelo incentivo e ajuda sempre que precisei, em especial ao meu líder, Ednelson Presotti, pela contribuição e compreensão ao longo do curso.

Ao Professor Dr. Aarão Ferreira Lima Neto por me dar a honra de tê-lo como orientador na elaboração deste trabalho, pela forma prática e direta nos envios das valiosas contribuições.

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

Aos amigos e familiares que torcem por mim, agradeço de coração.

RESUMO

É notória a importância do monitoramento e análise de segurança das barragens na redução do risco imposto por estas estruturas. O monitoramento de estruturas visa vários objetivos que vão desde permitir avaliar o desempenho frente ao projetado, avaliar a segurança da estrutura e estabelecer novas teorias. Entretanto, a instrumentação tem tido um viés cada vez mais preponderante para subsidiar a análise de estabilidade, e conseqüentemente, refletindo na limitação da avaliação de segurança dos empreendimentos. Se não bastasse a restrição da função do monitoramento nos projetos e citações de legislação, colocou-se uma grande importância para uma ferramenta, denominada por alguns profissionais como *carta de risco*, que estabelece níveis de controle, atenção, alerta e emergência, relacionados à leitura de cada instrumento. Porém, estes níveis de controle ou referência podem estar sendo utilizados amplamente e equivocadamente para determinar a segurança de barragens sobrepondo ou substituindo o julgamento por profissionais de engenharia em muitos casos. Além disso, foram apresentados critérios para aplicação de uma metodologia para elaboração de níveis de controle através do método determinístico, considerando os instrumentos que compõe a seção principal de uma barragem de mineração, aplicando-se uma metodologia para definição dos níveis de atenção, alerta e emergência para os instrumentos, com o intuito de auxiliar na análise prévia dos dados de monitoramento da estrutura e identificar de forma automática possíveis desvios no padrão de leitura dos instrumentos. Desta forma, foram estabelecidos limites para os níveis de controle dos instrumentos e os resultados obtidos foram utilizados na implantação de um sistema de pré-alarme associado a um procedimento padrão de reposta em relação ao nível de controle informado, tendo como intuito a melhoria no controle e segurança da estrutura. Finalmente, este trabalho procurou fazer uma reflexão da aplicação desta ferramenta de controle do monitoramento na segurança das barragens de mineração, fazendo uma análise crítica de conceitos técnicos aplicados para a análise de risco da estrutura, o que levou a uma conclusão de que as nomenclaturas utilizadas para os níveis de controle e os gráficos de risco amplamente utilizados devem ser revisados, de forma que não estejam associados por engano ao risco da estrutura ou aos Planos de Ações de Emergência das barragens de mineração.

Palavras-chave: Segurança de Barragens. Ruptura de Barragens. Estabilidade de Barragens. Níveis de Controle.

ABSTRACT

The importance of monitoring and analyzing dams' safety in reducing the risk imposed by these structures is well known. Structural monitoring aims at various objectives ranging from evaluating the performance against the projected, evaluating the safety of the structure and establishing new theories. However, instrumentation has been increasingly biased to support the stability analysis, and consequently, to limit the safety evaluation of the projects. If it was not enough to limit the role of monitoring in the projects and citations of legislation, it was very important for a tool, called by some professionals as a *risk chart*, which establishes levels of control, attention, alert and emergency related to reading of each instrument. However, these control or reference levels may be being used widely and mistakenly to determine dam safety by overlapping or superseding judgment by engineering professionals in many cases. In addition, criteria for the application of a methodology for the elaboration of levels of control through the deterministic method were presented, considering the instruments that make up the main section of a mining dam, applying a methodology to define the levels of attention, alert and instrument, in order to assist in the prior analysis of the structure monitoring data and to automatically identify possible deviations in the instrument reading pattern. In this way, limits were established for the control levels of the instruments and the results obtained were used in the implementation of a pre-alarm system associated to a standard response procedure in relation to the level of control informed, with the purpose of improving the control and safety of the structure. Finally, this work sought to reflect on the application of this monitoring control tool in the safety of mining dams, making a critical analysis of technical concepts applied to the risk analysis of the structure, which led to a conclusion that the nomenclatures used for control levels and widely used risk charts should be reviewed so that they are not mistakenly associated with the risk of the structure or the Emergency Action Plans of mining dams.

Keywords: Dams' Safety. Dams' Break. Dams' Stability. Control Levels.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Estrutura do Trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 A Mineração no Brasil	21
2.2 Complexo Minerador de Carajás	23
2.3 Barragem de Terra	26
2.3.1 Tipos de Alçamento	27
2.3.2 Alçamento a Montante	27
2.3.3 Alçamento a Jusante	28
2.3.4 Alçamento por Linha de Centro	29
2.4 Segurança de Barragens	30
2.5 Ruptura Hipotética de Barragens (DAM BREAK)	42
2.5.1 Material a ser Propagado para Jusante	43
2.6 Leis e Normas vigentes	45
2.6.1 NBR 13.028 (2017) - Fator de Segurança	45
2.6.2 Lei 12.334 / 2010 (Lei de Segurança de Barragens)	46
2.6.3 Portaria 70.389 / 2017	50
2.7 Análise Determinística em Softwares	55
2.8 Slide 6.0 (Rocscience)	58
2.8.1 Análise de Estabilidade	59
2.8.2 Análise de Percolação (Elementos Finitos)	60
2.9 Níveis de Controle do Monitoramento	63
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	71
3.1 Estudo de Caso – Barragem do Azul	71
3.2 Definição da seção crítica da Barragem	78
3.3 Modelagem da Seção no Software Slide 6.0	78
3.4 Análise de Estabilidade e Percolação	84
4 RESULTADOS E ANÁLISES	88

4.1	Análise de Estabilidade e Percolação.....	88
4.2	Definição dos Níveis de Controle.....	92
4.3	Utilização dos níveis de controle.....	98
4.4	Análise Crítica para Utilização e Finalidade dos Níveis de Controle.....	102
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
5.1	Conclusões	108
5.1.1	Condições de Estabilidade da Barragem	108
5.1.2	Níveis de Controle da Barragem.....	108
5.1.3	Análise dos Critérios para determinação do risco da estrutura....	109
5.2	Sugestões de trabalhos Futuros	110
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1 INTRODUÇÃO

A ruptura de uma barragem pode gerar consequências catastróficas ao meio ambiente e sociedade (DUARTE, 2008). Segundo dados divulgados pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), em 2016, o Brasil possui um número expressivo de barragens, em função dos recursos hídricos disponíveis e da crescente exploração mineral, como mostram as figuras 1 e 2.



Figura 1: Barragens inseridas na PNSB

Fonte: (DNPM, 2016)



Figura 2: Barragens não inseridas na PNSB

Fonte: (DNPM, 2016)

Segundo o DNPM (2016), além das barragens para geração de energia elétrica, têm-se de forma crescente as barragens de acumulação de água e resíduos de mineração. Para melhorar as condições de segurança destas obras é de fundamental importância a avaliação das condições de segurança já existentes, reduzindo a possibilidade de acidente e suas consequências, a figura 3, apresenta o número de barragens cadastradas na política nacional de segurança de Barragens (PNSB).



Figura 3: Número de barragens cadastradas na PNSB

Fonte: (DNPM, 2016)

De acordo com o próprio DNPM (2016), compete ao próprio órgão, no âmbito de suas atribuições, fiscalizar a pesquisa e a lavra para o aproveitamento mineral, bem como as estruturas decorrentes destas atividades, nos Títulos Minerários, concedidos por ela e pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

Todavia com a promulgação da Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que 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 e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, também o DNPM assume a atribuição de fiscalizar a implementação dos Planos de Segurança das barragens de mineração a serem elaborados pelos empreendedores, conforme previsto na referida Lei.

Como uma ferramenta de avaliação e atendimento as normas de segurança brasileira na elaboração e apresentação de projeto de Barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, têm-se a NBR 13.028 (2017), que tem por objetivo estabelecer os requisitos mínimos para atendimento as condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

Os acontecimentos recentes de acidentes envolvendo barragens de mineração e de resíduos industriais vêm despertando a atenção de todos no Brasil e no mundo. A diversidade de tamanhos e usos das barragens e aterros reflete-se, também, nas condições de manutenção dessas estruturas. Algumas são impecavelmente mantidas, atendendo normas de segurança compatíveis com os padrões internacionais mais exigentes, enquanto outras se apresentam com sérios riscos de ultrapassarem os limites de segurança, podendo, inclusive, resultar no rompimento da estrutura (ESPOSITO e DUARTE, 2010).

Um dos controles de segurança de fundamental importância para monitoramento da estrutura é o controle do nível dos instrumentos de monitoramento, para ser utilizado como ferramenta auxiliar para identificação inicial de possíveis anomalias nos padrões de leitura dos instrumentos da barragem (DUARTE, 2008).

Diversos empreendedores possuem o controle do monitoramento dos instrumentos e profissionais capacitados, conforme preconiza a Lei 12.334/2010, porém, muito destes instrumentos não dispõe de uma ferramenta adequada para auxiliar na análise dos dados, ou se existem, segundo Fontes (2016), encontram-se em divergência, conforme o parecer do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA sobre a Barragem de Fundão.

Ainda segundo Fontes (2016), recomenda-se que o empreendedor possua mapas georreferenciados da área, por ano, com a localização de todos os instrumentos de medições e monitoramento das barragens, indicando de status (funcionais, inativos, citados ou não em *carta de risco*; avaliados ou não na auditoria; situação – normal, alerta ou emergência), visando uma melhor compreensão dos relatórios de auditoria.

Sendo assim, a instrumentação tem tido um viés cada vez mais preponderante para subsidiar a análise de estabilidade, e conseqüentemente, refletindo na

limitação da avaliação de segurança dos empreendimentos. Se não bastasse a restrição da função do monitoramento nos projetos e citações de legislação, colocou-se uma grande importância para uma ferramenta, denominada por alguns profissionais, talvez de forma equivocada, como *carta de risco*, sendo uma ferramenta que estabelece níveis de controle, atenção, alerta e emergência, relacionados à leitura de cada instrumento. Porém, estes níveis de controle ou referência podem estar sendo utilizados amplamente e equivocadamente para determinar a segurança de barragens sobrepondo ou substituindo o julgamento por profissionais de engenharia em muitos casos.

Desta forma, se torna notória a importância de se fazer uma avaliação crítica dos resultados do monitoramento para uma melhor definição do risco da barragem.

Para melhor compreensão do objeto deste estudo, a barragem do Azul localizada no complexo Carajás, foi escolhida para uma revisão da análise de estabilidade da estrutura utilizando-se um *software* comercial moderno e reconhecido pelo meio técnico-científico, para uma possível determinação dos níveis de controle dos instrumentos da sua seção principal e conseqüentemente servindo de embasamento para uma análise crítica do uso desta ferramenta na determinação do risco da estrutura e possíveis tomadas de decisão mediante a situações de emergência.

A Barragem de terra que será utilizada neste estudo, denominada como Barragem do Azul, está inserida na mina de manganês do Azul, localizada no sudeste do Pará na Floresta Nacional de Carajás (Figura 4 e 5).



Figura 4: Localização de Carajás.

Fonte: (Geo–Conceição: Recursos Minerais, 2016)



Figura 5: Complexo Minerador de Carajás.

Fonte: (Google Earth, 2015)

A Barragem do Azul possui atualmente um volume de reservação de aproximadamente 12,5 milhões de metros cúbicos acumulados, sendo, 3,3 milhões de metros cúbicos de água e 9,5 milhões de metros cúbicos de rejeito, segundo dados de Batimetria realizado em 2017 e a distribuição dos volumes mostrada na figura 6.

Para melhor apresentar a importância desta barragem dentro de um cenário de ruptura hipotético, levando-se em consideração os conceitos e critérios utilizados por Pimenta (2014), para simulação hipotética de ruptura (DAM BREAK) das Barragens do Gelado, Geladinho e Pera Jusante, quando se utiliza os mesmos critérios para a barragem do Azul, objeto deste estudo, poderia ser adotado como premissa para simulação de uma ruptura hipotética, no pior cenário, que todo o volume de água afluente do reservatório (3,3Mm³) e do trânsito de cheias (3,5Mm³), somados a 1/3 do volume de sólidos (rejeitos/sedimentos) depositados, totalizando aproximadamente 9,9Mm³ de rejeitos, poderiam ser propagados para jusante em caso de ruptura, causando possíveis danos ambientais.

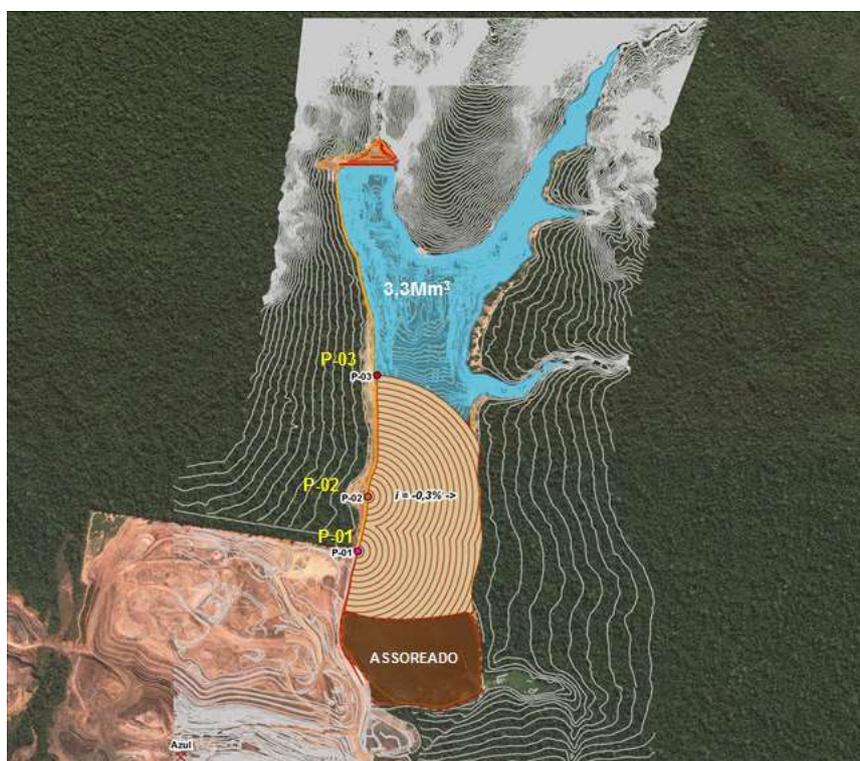


Figura 6: Barragem do Azul

Fonte: (Acervo Próprio)

Segundo PENNA *et al.*, (2015), a importância em se tratar o assunto é reconhecida em especial pelos grandes proprietários de barragens no Brasil e tem tido uma importância crescente dentre os demais empreendedores, face à Lei nº12.334/2010 (Lei de Segurança de Barragens), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A maior parte dos proprietários de barragens possui planos de monitoramento que incluem inspeções visuais periódicas das estruturas civis e instrumentação das barragens por eles operadas e mantidas. Em geral, a leitura da instrumentação é feita periodicamente, mas há uma fragilidade generalizada em termos das análises dos dados coletados. Para que a instrumentação assuma um papel importante na manutenção da segurança, é imprescindível não apenas que todos os instrumentos estejam funcionando bem e que a informação adequada seja coletada e documentada, mas, acima de tudo, que seja analisada em tempo hábil. Para que os máximos benefícios possam ser extraídos da instrumentação, a avaliação detalhada e a interpretação dos resultados devem ser feitos imediatamente após a coleta dos dados (FUSARO, 2007).

1.1 Justificativa

Desta maneira, se torna evidente a importância de se aplicar uma proposta metodológica para à análise preliminar dos dados de instrumentação de barragens de forma a permitir a emissão de alertas previamente definidos, por meio de sistemas informatizados, caso haja alterações no comportamento de determinado instrumento.

Portanto, em 2012 e 2013 respectivamente, o DNPM no âmbito de suas atribuições publicou as Portarias 416/2012 e 526/2013, que definiram os requisitos mínimos para estabelecimento do Plano de Segurança de Barragens (PSB) e o conteúdo mínimo do Plano de Ações Emergenciais para Barragens de Mineração (PAEBM) para barragens de Alto Dano Potencial associado. Após os acontecimentos de Mariana (MG), onde ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, o DNPM conclui que era necessário se fazer uma revisão destas portarias, e desta forma publicou em 17 de maio de 2017 a portaria 70.389 que revoga e engloba as portarias 416 e 526 em uma única portaria.

Dentro das várias mudanças e inclusões que visam o aprimoramento das referidas portarias e o aumento da segurança em barragens, um dos itens que merecem destaque, é o Art. 2 inciso XXVIII onde é mencionado os níveis de controle de instrumentação onde se estabelece que devem ser criados 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 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 (BRASIL, 2017).

Neste caso, com a elaboração de um nível de controle para o monitoramento e estabelecendo-se de um critério para análise dos dados obtidos através desse resultado de monitoramento, existe a possibilidade de se fazer uma detecção preliminar de um possível risco e determinar através de uma análise mais aprofundada, quais as reais condições que deverão ser consideradas para se declarar ou não um estado de emergência, trazendo um ganho na confiabilidade da estrutura e maior tempo para a tomada de decisão mediante às situações de risco.

Porém, o risco de ruptura de Barragens, não se trata de um problema exclusivo do Brasil, segundo BITTAR (2016), somente nos últimos 3 anos, ocorreram 3 grandes rupturas de Barragens: Barragem de Mt. Polley em 2014, Barragem de Fundão em 2015 e Barragem de Luoyang em 2016, na China, sendo que neste último, se conseguiu realizar a evacuação de cerca de 300 pessoas de um Vilarejo antes que os 2 milhões de metros cúbicos de lama liberados na ruptura da barragem pudessem devastá-lo, porém, os animais domésticos e de fazenda não puderam ser resgatados.

Outro grande exemplo foi em fevereiro de 2017, quando o risco de colapso da barragem de Oroville, na Califórnia (Figura 7), fez com que o governo americano retirasse ao menos 188 mil pessoas de suas casas. A barragem é considerada a mais alta dos Estados Unidos e poderia sofrer danos em um trecho do vertedouro auxiliar de Oroville, a 250 quilômetros de São Francisco.



Figura 7: Barragem de Oroville

Fonte: (Portal g1.globo.com, 2017)

A gestão da segurança de barragens pode ser aprimorada a partir da aplicação de metodologias de análises de riscos estruturadas, permitindo a antecipação de problemas que, eventualmente, seriam identificados apenas após sua materialização no campo (PENNA *et al.*, 2015).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é aplicar uma ferramenta de controle dos níveis de monitoramento de uma barragem de mineração, através da metodologia de análise de estabilidade determinística, fazendo uma análise crítica de conceitos técnicos aplicados para a análise de risco e segurança da estrutura para determinação do estado de emergência.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Aplicar metodologia para definição dos níveis de controle dos instrumentos com base na análise de estabilidade determinística de uma barragem de mineração;
- Fazer uma Análise crítica quanto ao critério para utilização dos níveis de controle o monitoramento para se determinar o estado de segurança de uma barragem de mineração.

1.3 Estrutura do Trabalho

Apresentam-se os tópicos abordados no presente trabalho e sua distribuição em seções conforme descrito a seguir:

- Capítulo 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – nesse capítulo está apresentada a revisão bibliográfica com o intuito de oferecer embasamento teórico aos temas abordados
- Capítulo 3: METODOLOGIA DE PESQUISA – mostra de forma objetiva a metodologia utilizada para a elaboração desta dissertação e exhibe detalhadamente a caracterização da área estudada. São apresentadas as características locacionais, histórico e características da barragem.
- Capítulo 4: RESULTADOS E ANÁLISES – apresenta os resultados obtidos a partir das metodologias descritas ao longo do trabalho, bem como uma análise crítica quanto aos critérios de utilização dos níveis de controle.
- Capítulo 5: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS – apresenta a conclusão do autor em relação aos resultados apresentados e sugestão para novas pesquisas relacionadas ao estudo.
- Capítulo 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS – apresenta todas as referências utilizadas para a elaboração do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Mineração no Brasil

A Indústria Extrativa Mineral brasileira é bastante diversificada. Há pelo menos 55 minerais sendo explorados atualmente no Brasil, cada qual com uma dinâmica de mercado específica (GOMES, 2012).

A pesquisa e o aproveitamento de bens minerais no Brasil são regidos pelo Código de Mineração de 1967, o qual preconiza que o interessado em explorar determinada área deve apresentar um requerimento ao Departamento Nacional de Produção Mineral, que será analisado, podendo resultar na outorga de um título, de acordo com o regime de aproveitamento de recursos minerais, Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967, solicitado pelo requerente. A quantidade de requerimentos protocolados e títulos outorgados para os diversos regimes de aproveitamento das substâncias minerais em 2015 são apresentados na Tabela 1 (GARCIA e PINHEIRO, 2015).

Tabela 1: Requerimentos Protocolados entre 2013 a 2015.

Regimes Mineraiis	1º/2013	1º/2014	1º/2015
Requerimento			
Autorização de Pesquisa	9.636	7.417	6.414
Registro de Licença	1.537	1.594	1.678
Permissão de Lavra Garimpera	1.125	647	479
Concessão de Lavra	668	619	526
Registro de Extração	100	144	168
Total	13.066	10.421	9.265
Outorga			
Autorização de Pesquisa	5.844	5.960	4.620
Registro de Licença	870	806	858
Permissão de Lavra Garimpera	128	61	73
Concessão de Lavra	80	73	294
Registro de Extração	60	96	128
Total	6.982	6.996	5.973
Outros Procedimentos			
Relatório Final de Pesquisa	761	643	702
Guia de Utilização	518	476	394
Cessão de Direitos	1.615	1.384	1.298
Total	2.894	2.503	2.394

Fonte: (GARCIA e PINHEIRO, 2015).

No primeiro semestre de 2015, foram protocolizados 9.265 requerimentos para os diferentes regimes de aproveitamento de substâncias minerais (Tabela 1). Desse total, 69,2% correspondem a requerimentos para autorização de pesquisa, 18,1% para registro de licença e 12,7% para os demais regimes, como mostrado na figura 8 (GARCIA e PINHEIRO, 2015).

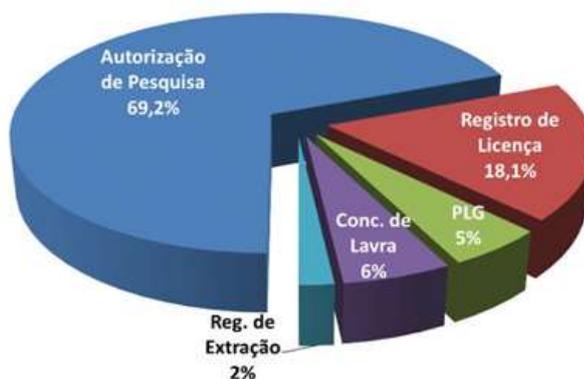


Figura 8: Distribuição dos Requerimentos em 2015.

Fonte: (GARCIA e PINHEIRO, 2015)

Com uma grande diversidade de sítios geológicos, o Brasil possui uma posição de destaque mundial na produção e comercialização de minerais metálicos e não metálicos. O que demonstra sua inquestionável vocação mineral, associada à produção e à exportação de um grande número de produtos minerais. Por outro lado, a atividade mineral tem contribuído em larga escala pela geração de milhares de empregos diretos e indiretos, proporcionando um impacto significativo no processo de dinamização sócio-econômica brasileira. O país detém uma posição privilegiada no quadro das reservas mundiais, com destaque para as seguintes substâncias minerais: pirocloro (minério de nióbio), tantalita, grafita, caulim, vermiculita, talco, magnesita, cassiterita, bauxita, manganês, minerais de lítio e ferro (GOMES, 2012).

Os estados com o maior número de títulos outorgados no primeiro semestre de 2015 foram Minas Gerais (1.035), Rio Grande do Sul (637) e Bahia (572), que juntos satisfizeram 37,6% do total de títulos para os regimes de aproveitamento mineral. Assim como no quantitativo geral, a maior

participação nas autorizações de pesquisa aconteceu em Minas Gerais (19,2%), seguindo da Bahia (11,8%) e São Paulo (9,4%), conforme figura 9 (GARCIA e PINHEIRO, 2015).

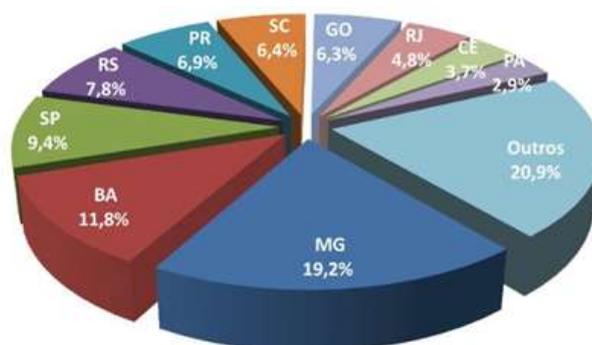


Figura 9: Participação dos Estados em Pesquisas Minerais em 2015.

Fonte: (GARCIA e PINHEIRO, 2015)

A VALE S/A e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), detêm a titularidade das maiores reservas mundiais de minério de ferro localizadas em território brasileiro. Além de ocupar a primeira posição na exploração/produção mundial de minério de ferro, em 2006, a VALE alcançou o segundo lugar no ranking mundial das maiores mineradoras, graças aos seus projetos altamente rentáveis e às inúmeras fusões e às aquisições de mineradoras, dentro e fora do país (GOMES, 2012).

2.2 Complexo Minerador de Carajás

A Serra dos Carajás é uma formação Vulcano-sedimentar que faz parte do grupo Grão-Pará e está localizada no Estado do Pará. Na região, além do minério de ferro, são encontrados também ouro, cobre, zinco, manganês, prata, bauxita, níquel, cromo, estanho e tungstênio em quantidades ainda desconhecidas e que fizeram da *Província Mineral de Carajás* uma das regiões do mundo mais ricas em minérios. O minério de ferro extraído em Carajás é importante não apenas pela quantidade em que se encontram, mas também pela qualidade: é o melhor minério de ferro do mundo, ou seja, o que possui maior teor de ferro já encontrado. Descoberta em 1967, a *Província Mineral de Carajás* possui reservas de aproximadamente 16 bilhões de toneladas de minério de ferro de alto teor e tem uma capacidade de produção de 100

milhões de toneladas por ano (Mta) (FERREIRA, 2009).

É inserida neste complexo minerador que se encontra a mina de Manganês do Azul, conforme figura 10, onde está localizada a barragem do Azul, sendo o minério de Manganês um dos primeiros minerais com produção regular no Brasil e data do século XIX, se tornando o principal produto mineral de exportação no início de século XX. O Estado de Minas Gerais já registrava em 1900, exportações de 89 mil toneladas, chegando na 2ª Guerra Mundial em 1941 a exportar 440 mil toneladas. Em 1960, o Brasil produzia 1.100 mil toneladas, cerca de 7,3% da produção mundial e exportava 870 mil toneladas equivalente a 14% das exportações mundiais (QUARESMA, 2009).

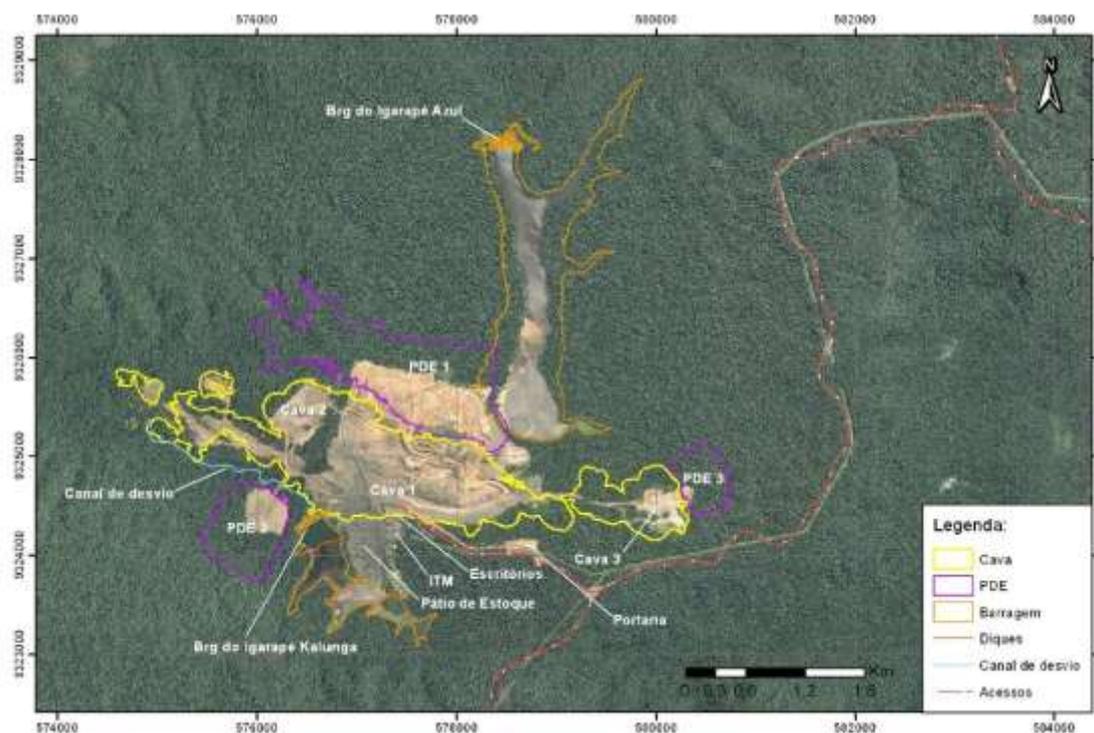


Figura 10: Mina de Manganês.

Fonte: (Google Earth, 2015)

Uma característica importante do minério de manganês é que o minério é essencial para a produção do aço. O uso do minério de manganês é feito na forma de minério natural com adição no alto forno de gusa, e como adição nos fornos para a produção de ferroligas a base de manganês. As ferroligas posteriormente são consumidas na indústria siderúrgica em praticamente todos

os tipos de aço e fundidas de ferro, devido a sua propriedade de dessulfurização (retirada do enxofre). O minério de manganês tradicionalmente em função de sua utilização é tecnicamente preparado em usina de beneficiamento com uma sequência de operações de britagem, peneiramento e classificação, produzindo produtos de granulometria distintas: minério granulado com dimensões entre 75 e 35 mm, minério médio com dimensões variando entre 35 e 9mm e minério de manganês fino (sinter-feed) com granulometria variando de 9mm a 0,15mm (QUARESMA, 2009).

Segundo Quaresma (2009), o depósito de manganês foi descoberto a 15 de setembro de 1971 durante trabalhos de reconhecimento geológico, parte do programa de pesquisa do minério de ferro do Sul do estado do Pará. A expansão e diversificação da atividade de manganês tiveram início em 1995, quando foi concretizada a transferência do controle acionário do Grupo Ferro Ligas para a VALE - USIMINAS Participações S.A. (VUPSA), seguido de uma reestruturação financeira. Ainda em 1995, a VUPSA cedeu a Eletrossiderúrgica Brasileira S.A. (SIBRA) a totalidade dos seus direitos de subscrição de ações no aumento de capital promovido pela Ferro-Ligas, tendo a SIBRA subscrito e integralizado ações que lhe proporcionam o controle da Ferro-Ligas. Em 1999, a CVRD e a Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A - USIMINAS, acionistas controladores da VUPSA, celebrou um instrumento de compra e venda de ações, pelo qual a USIMINAS retirou-se do negócio, transferindo à Vale do Rio Doce ações de emissão da VUPSA e da SIBRA. Entre o final de 2003 e início de 2004 através de simplificação societária a SIBRA, Companhia Paulista de Ferro Ligas (CPFL) e a mina de manganês foram concentradas numa única empresa – RDM – Rio Doce Manganês, abaixo é apresentada a organização dos núcleos operacionais de manganês, conforme figura 11.

construção, utilizando-se o filtro vertical como elemento de drenagem interna de barragens de terra no Brasil (MASSAD, 2003).

As barragens de terra na mineração continuam sendo as mais comuns, devido às facilidades para obtenção do material de sua construção. Caracterizam-se por permitir a utilização de equipamentos de fácil disponibilidade. Estas barragens, em mineração, têm seu custo mais competitivo do que os outros tipos, o que, para as condições brasileiras, torna seu uso bastante frequente, sobretudo para pequenos empreendimentos voltados ao armazenamento de água, irrigação e contenção de rejeitos e sedimentos (OLIVEIRA, 2014).

2.3.1 Tipos de Alteamento

Na grande maioria dos casos as barragens de rejeitos são projetadas para sofrer alteamentos periódicos, com a possibilidade de acréscimos de volumes de modo a evitar elevados custos de investimentos antecipados. Em conformidade com os aspectos técnicos do local selecionado, que envolvem condições topográficas, disponibilidades de materiais terrosos de construção, condições das fundações e das propriedades de engenharia dos rejeitos, os alteamentos podem ser realizados com o posicionamento do eixo pelos processos de montante, centro e jusante (OLIVEIRA, 2014).

Os estudos de viabilidade de barragens para contenção de rejeitos de mineração devem levar em consideração o alteamento em etapas. Como é comum em obras de mineração, a barragem é normalmente construída com uma altura inicial para atender aos primeiros anos de operação, sendo alteada posteriormente, de acordo com o avanço de lavra e aumento na produção. A grande vantagem é que não há necessidade de rebaixamento do nível de água do reservatório e interrupções na operação (MACHADO, 2007). E a seguir são apresentados os métodos mais comuns de alteamento para barragens de mineração.

2.3.2 Alteamento a Montante

Segundo Oliveira (2014), é o método mais antigo para alteamento de barragens, embora até hoje seja um dos mais utilizado pela maioria das mineradoras, este método apresenta um baixo controle construtivo, tornando-

se crítico principalmente em relação à segurança. A utilização do próprio rejeito para executar alteamentos é vantajosa nos casos em que não existem disponibilidades de materiais terrosos para construção de aterros. Desta forma os alteamentos são construídos sobre rejeito depositado dentro do reservatório, procedendo a disposição dos rejeitos com uso de ciclones apoiados sobre diques de pequena altura, de modo a separar a fração grossa necessária, para formar o talude de jusante do aterro, com maior resistência ao cisalhamento e maior coeficiente de permeabilidade. A fração fina será encaminhada para o interior do reservatório. Embora a solução apresente menor custo que as demais, ela resulta em depósitos de menor coeficiente de segurança, sujeito a ruptura pelo fenômeno de liquefação, de difícil antecipação, pois sob condição saturada, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação, conforme figura 12.

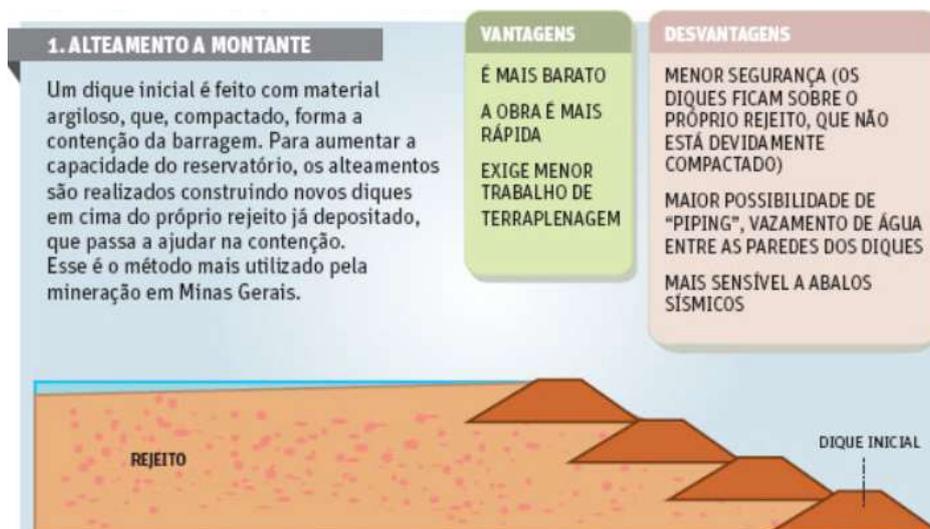


Figura 12: Alteamento por Montante.

Fonte: (LAGES e MANSUR, 2016)

2.3.3 Alteamento a Jusante

Esta modalidade de alteamento corresponde à solução clássica para barragens de rejeitos, em razão da maior facilidade de construção, uma vez que toda a obra é executada por jusante, portanto, não envolve obras de aterros dentro do reservatório. Entretanto, a solução exige a construção de aterros mais volumosos, exigindo explorações de jazidas de materiais terrosos, ou ainda disponibilidades de solos provenientes de escavações obrigatórias

para implantação de estruturas hidráulicas de vertedores, canais ou ainda volumes de rejeitos suficientes para o alteamento, caso este material seja usado como material de construção (OLIVEIRA, 2014).

As vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção; nenhuma parte ou alteamento da barragem é construída sobre o rejeito previamente depositado; além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem, e prolongados durante seu alteamento, permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem, aumentando sua estabilidade; a barragem pode ser projetada e subsequentemente construída apresentando a resistência requerida, inclusive resistir a forças sísmicas, como mostra a figura 13 (MACHADO, 2007).

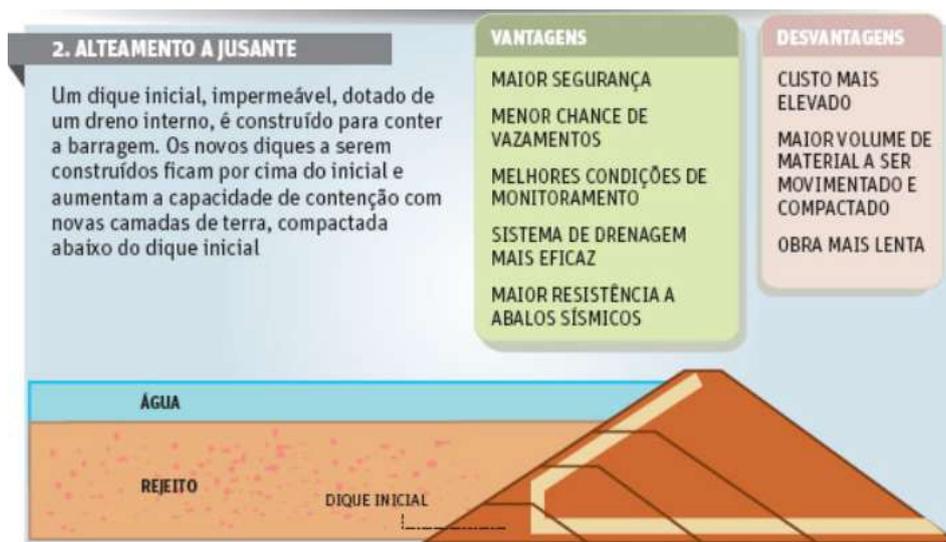


Figura 13: Alteamento por Jusante.

Fonte: (LAGES e MANSUR, 2016)

2.3.4 Alteamento por Linha de Centro

Segundo Oliveira (2014), para a garantia das propriedades de engenharia dos depósitos de rejeitos, é obrigatória a adoção de procedimentos de disposição de rejeitos que possibilitem melhorias das propriedades geotécnicas, como por exemplo a disposição de rejeitos pelo método do espigotamento a partir da crista da barragem e formação de praia, com esgotamento das águas para jusante.

Neste método, a barragem mantém a posição do eixo da barragem implicando na construção de parte da barragem (zona de montante) apoiada sobre o rejeito exercendo pressões de compressão e de cisalhamento sobre os depósitos de rejeitos de modo que os materiais sedimentados deverão apresentar propriedades de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade suficientes para assegurar a estabilidade da barragem, estes alteamentos são realizados com alturas, em geral, de no máximo 3 metros, uma vez que a solução exige menor volume de aterros compactados e menor custo em comparação aos alteamentos pelo deslocamento do eixo por jusante.

Sua escolha em alguns casos é determinada pelas disponibilidades insuficiente de materiais terrosos, ou ainda quando as propriedades de engenharia destes materiais são inadequadas para atender as necessidades volumétricas dos aterros, ver figura 14 (OLIVEIRA, 2013).

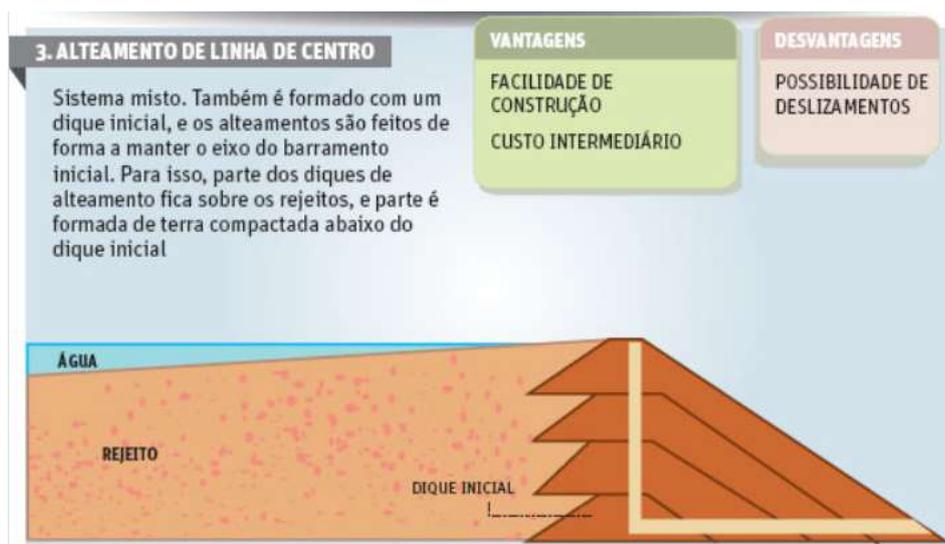


Figura 14: Alteamento por Linha de Centro.

Fonte: (LAGES e MANSUR, 2016)

2.4 Segurança de Barragens

Segundo Bittar (2016), como regra geral, recomenda-se que o risco de barragens de rejeitos seja considerado como um dos três principais riscos comerciais de qualquer empresa de mineração. Geralmente deve ser o segundo ou o terceiro, atrás dos próprios riscos inerentes ao preço do minério ou do metal.

No caso das barragens de terra e de enrocamento, a causa mais comum de ruptura é o overtopping (31% como causa principal e 18% como causa secundária), seguida por erosão interna do corpo da barragem (15%) e erosão interna da fundação (12%) (FUSARO, 2007).

De acordo com Pimenta (2008), especificamente para barragens de terra, os principais estados limites últimos ou modos de falha são:

- Erosão externa por galgamento, em situação de cheia natural ou de cheia resultante da ruptura de uma barragem a montante, por ondas resultantes de ruptura de taludes nas margens do reservatório; por carregamento estático (por exemplo, deformação excessiva do maciço) ou em situação de carregamento sísmico;
- Erosão interna, em situação de fluxo concentrado e desagregação mecânica (erosão regressiva), por sufusão, por dissolução ou por desagregação físico-química (por exemplo, dispersividade);
- Perda de estabilidade global do talude de montante ou de jusante na situação de esvaziamento rápido, carregamento estático ou dinâmico.

Tradicionalmente, a gestão da segurança de barragens na fase de operação é centrada em três componentes fundamentais: monitoramento, revisões periódicas de segurança e procedimentos de operação e manutenção. (PENNA et al., 2015).

As principais consequências de acidentes com barragem são: segurança das pessoas, redução de reservas, impactos econômicos, impactos ambientais, impactos sobre a comunidade e imagem da organização (OLIVEIRA, 2014).

No cenário nacional e no cenário mundial, nos últimos dez anos há reportes conhecidos de vários acidentes com rompimento de barragens de mineração com fatalidades (PIMENTA, 2017):

- 2015: Barragem de Fundão (Brasil) – 18 a 22 mortes;
- 2014: Barragem de Herculano (Brasil) – 3 mortes;
- 2010: Barragem Kolontár (Hungria) – 10 mortes;
- 2008: Barragem Taoshi (China) – 254 mortes;

- 2006: Barragem Shangluo (China) – 17 desaparecidos;
- 2001: Barragem Rio Verde (Brasil) – 5 mortes;
- 2000: Barragem Guangxi (China) – 15 mortes e 100 desaparecidos.

Segundo Buzzi (2007), existem diversas diretrizes adotadas por diferentes países sobre a gestão de segurança de barragens e diferentes metodologias empregadas na priorização de riscos e tomada de decisões relacionadas a barragens, visando sua segurança.

Um sistema de gestão da segurança é composto por ferramentas e processos para garantir que a instalação de armazenamento de rejeitos funcione em condições de segurança satisfatórias, reduzindo ao mínimo os riscos de falha e compondo um conjunto de procedimentos, ferramentas e melhores práticas que ajudam a controlar os riscos envolvendo instalações barragens de rejeitos (BITTAR, 2016). A figura 15 ilustra os principais itens na composição de um sistema de gestão para barragem de rejeitos.



Figura 15: Itens básicos de um sistema de Gestão de Barragens.

Fonte: (Adaptado de BITTAR, 2016)

Portanto, após definido e entendido em toda a organização que a gestão de barragens está relacionada como um alto risco de negócio, as etapas subsequentes estão relacionadas ao estabelecimento e implantação dos

requisitos relacionados ao controle de risco, conforme apresentados na figura 15.

Dentre os itens de gerenciamento citados, um que merece bastante destaque é o controle e monitoramento da estrutura, pois segundo Cruz (2005), um sistema de monitoramento, baseado em dados de instrumentação confiáveis, auxilia na prevenção de acidentes e incidentes. Na tabela 2, são apresentados os modos de falha que podem ser detectados através da instrumentação, inspeções visuais e análise de risco:

Tabela 2: Efetividade dos métodos de detecção de falhas em barragens.

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 excessiva	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
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 excessivas ou poropressões excessivas		Média / Baixa	Alta
Erosão externa excessiva	Alta	Alta	
Fissuração excessiva	Alta	Alta	
Deformações e movimentos excessivos de aterros	Média / Baixa	Alta	Alta
Erosão Externa do maciço (galgamento)	Alta	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 funcionalidade 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	
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

Fonte: (Adaptado de PENNA *et al.*, 2015)

Conforme Penna et al. (2015), apresenta na tabela 2, a análise de 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 muitas vezes pode não ser passível de correções.

Sem a instrumentação, as avaliações de segurança seriam feitas apenas com base nas informações provenientes das inspeções visuais, conhecimentos do projeto e construção e uso amplo do julgamento de engenharia. A instrumentação pode agregar valor a estas avaliações, como um meio de fazer medidas da aferição do comportamento de uma barragem. Estas medidas não eliminam a necessidade do julgamento de engenharia, mas fornecem informações importantes sobre o comportamento das estruturas e permitem uma visão *de dentro* sobre a existência ou não de determinado problema (FUSARO, 2007).

Segundo Nikolovski e Slavevski (2014), o monitoramento desempenha um papel significativo na gestão das estruturas, fornecendo dados que são vitais para as observações do comportamento das estruturas. O conceito de monitoramento das barragens baseia-se na análise sistemática de todos os dados relevantes, que confirmam a confiabilidade da barragem durante a construção, o primeiro enchimento e durante o período de operação.

Para a barragem de *Sveta Petka* localizada na cidade de Skopje, na capital da Republica da Macêdonia, conforme mostra a figura 16, o conceito de instrumentação e monitoramento da barragem, baseia-se no recolhimento e interpretação sistemática de todos os dados relevantes, que confirmam a segurança da barragem, em todas as fases da sua vida. (NIKOLOVSKI e SLAVEVSKI, 2014).

Apesar da barragem de *Sveta Petka* ser de concreto com a finalidade de contenção de água para geração de energia, os cuidados para instalação, escolha dos instrumentos e o monitoramento do comportamento da barragem não devem ser muito diferentes dos utilizados para as barragens de mineração, ou seja, independente do tipo de estrutura, o monitoramento deve ser cuidadosamente planejado e executado.

Cada instrumento tem seu próprio propósito específico, a fim de alcançar os efeitos desejados. (NIKOLOVSKI e SLAVEVSKI, 2014)

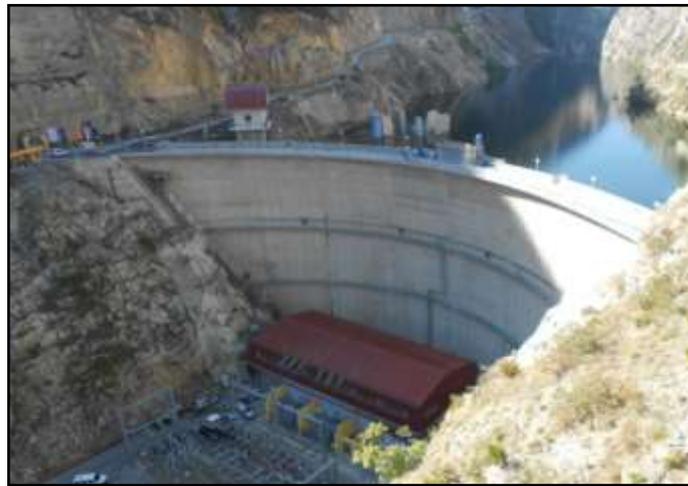


Figura 16: Barragem de *Sveta Petka*.

Fonte: (NIKOLOVSKI e SLAVEVSKI, 2014)

Ainda Segundo Nikolovski e Slavevski (2014), na barragem *Sveta Petka*, o processo de monitoramento é totalmente automatizado e com o apoio de um *software* especializado, qualquer instrumento pode ser monitorado a qualquer momento para o resto de sua vida, permitindo que o pessoal técnico monitore o comportamento de cada instrumento da barragem individualmente, o que traz o nível de confiabilidade para um patamar muito mais elevado, e, certamente, na fase de operação, a detecção precoce de quaisquer anormalidades e danos nas estruturas e a sua correção antecipada, significa a extensão do período de vida das estruturas. A tabela 3, apresenta os tipos e quantidades de instrumentos instalados na barragem de *Sveta Petka*, sendo alguns instrumentos aplicáveis e obrigatoriamente encontrados nas barragens de mineração, como por exemplo, piezômetros, medidores de nível de água e inclinômetros. Os demais instrumentos dificilmente serão encontrados em barragens de mineração, sendo considerados mais específicos para o monitoramento de barragens de concreto.

O principal objetivo da instrumentação é ser fonte de informações sobre o comportamento das estruturas de uma barragem, contribuindo para o entendimento do seu desempenho e para a manutenção da sua segurança (FUSARO, 2007).

Através da instrumentação das grandezas físicas de interesse e do monitoramento das leituras, é possível comparar o comportamento real de uma obra com o modelo teórico concebido em projeto, processo que se constitui num método eficaz e insubstituível para avaliação da segurança de uma estrutura e para o seu monitoramento ao longo do tempo, com isso, podendo evitar ou prever desastres como os já ocorridos (GUTIÉRREZ, 2003).

Tabela 3: Quantidades de Instrumentos da barragem de *Sveta Petka*.

Parâmetro a ser medido	Tipo de Instrumento	Quantidade
Nível de água	Medidor de nível de água	5
Temperatura do ar	Termômetros para ar	5
Temperatura da água	Termômetros para água	4
Temperatura do concreto	Termômetros para concreto	27
Deslocamentos (Longitudinal, Lateral, Fundação e Rotação)	Pendulum Normal	3
	Pendulum Invertido	3
	Extensômetros	12
	Inclinômetros	1
Dilatação das juntas	Medidores de junta	26
Tensão	Medidores de Tensão	74
Pressurização	Células de Pressurização	2
Pressão de água	Piezômetros	28
Total		190

Fonte: (Adaptado de NIKOLOVSKI e SLAVEVSKI 2014).

Segundo Fusaro (2007), no caso das barragens de terra e enrocamento, estão a seguir apresentados alguns dos instrumentos mais usualmente empregados no Brasil e destacados os instrumentos utilizados para análises de estabilidade determinística, como piezômetros e medidores de nível de água, responsáveis pelo monitoramento das pressões e nível freático no maciço e fundação, sendo apresentada sua descrição e funcionalidade de forma mais detalhada.

a) **Medidor de Nível de Água:** Mede a posição da linha freática no interior do maciço, têm a mesma configuração do piezômetro, porém o trecho perfurado do tubo do piezômetro pode ser de extensão maior, atingindo a espessura do nível d'água no interior da fundação da barragem. O uso do medidor de nível

d'água é produtivo quando se busca determinar a linha freática ao longo do maciço. Para sua instalação é necessário apenas a execução de um furo de sondagem com a determinação da cota do nível d'água por qualquer tipo de sistema de aquisição de dados. O medidor de nível d'água consiste de um tubo, geralmente de PVC para evitar corrosão, com perfurações em sua ponta para permitir a entrada de água em seu interior. Na extremidade inferior do tubo coloca-se tampa estanque e envolta em material filtrante (MACHADO, 2007).

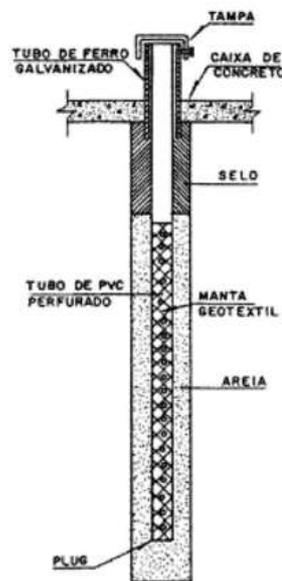


Figura 17: Medidor de Nível de Água

Fonte: (MACHADO, 2007)

Segundo Machado (2007), este instrumento perde sensibilidade de leitura ou torna-se inoperante pelas seguintes causas:

- Obstrução interior do tubo devido à queda de objetos;
- Cisalhamento do tubo inserido no maciço;
- Colmatação dos orifícios do tubo de PVC ou do material drenante;
- Ruptura do tubo plástico;
- Elevado tempo de resposta na leitura do instrumento devido à colmatação.

Se a obstrução no interior do tubo de PVC estiver localizada acima da faixa de leitura do instrumento, nível d'água, o instrumento passa a ser inoperante.

b) **Piezômetro de Tubo Aberto (Casagrande):** São constituídos por um tubo de PVC inserido em um furo de sondagem, em cuja extremidade inferior é instalado um elemento poroso (bulbo). A água penetra através do bulbo formando uma coluna d'água equivalente à pressão hidrostática atuante no seu ponto de instalação. Na região do bulbo o furo é preenchido com areia, e na altura restante é selado com solo-cimento plástico ou bentonita, delimitando assim a região drenante e medem pressões neutras em maciços de terra, taludes e fundações (FUSARO, 2007).

É importante ressaltar uma limitação na utilização de piezômetro de tubo aberto para monitoramento, em relação ao tempo de resposta, nos casos de mudanças bruscas de nível d'água nos reservatórios de barragens com fundação de baixa permeabilidade. Neste caso o piezômetro apresenta atraso na resposta a esta variação devido ao fluxo de água que ocorre no seu tubo até a equalização da pressão (MACHADO, 2007).

Segundo Machado (2007), o procedimento de leitura do nível de água para piezômetros de tubo aberto é constituído de um cabo elétrico com dois condutores, graduado em centímetros, possuindo na extremidade um sensor constituído por eletrodos dispostos concentricamente, isolados eletricamente entre si, conforme figura 18.

O sensor ao atingir o nível de água no interior do tubo é fechado o circuito elétrico formado pelo conjunto sensor/cabo/sinalizador/bateria. A condição de leitura é percebida pelo sinalizador que pode ser sonoro, por luz ou um galvanômetro.

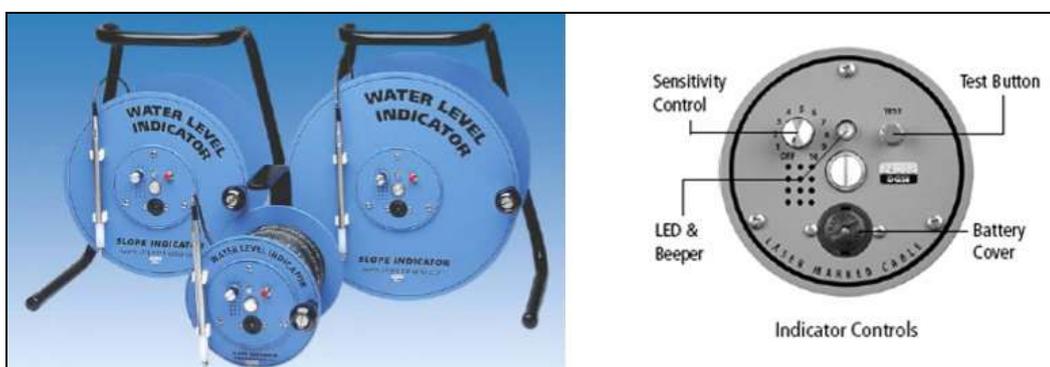


Figura 18: Indicador de Nível de Água

Fonte: (MACHADO, 2007)

A figura 19 mostra a leitura em campo do nível piezométrico e caixa fechada construída em alvenaria para proteção do equipamento. As principais vantagens e limitações deste instrumento são apresentadas na tabela 4.



Figura 19: Leitura do Piezômetro Tubo Aberto

Fonte: (MACHADO, 2007)

Tabela 4: Vantagens e Limitações do Piezômetro Tubo Aberto.

Vantagens	Limitações
Confiabilidade / durabilidade / sensibilidade.	Interferência na área do empreendimento susceptível a serem danificados.
Possibilidade de verificação de seu funcionamento através de ensaio de recuperação do nível d'água.	Não ser adequado para determinar poropressão no período construtivo.
Permite uma estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo próximo ao instrumento.	Dificuldade de instalação a montante da barragem devido ao reservatório (dificuldade de acesso para leituras).
Componentes de baixo custo e não necessitam ser calibrados.	Tempo de resposta elevado em solos de baixa permeabilidade (alguns minutos até semanas, segundo Cruz, 1996).
Simplicidade para realizar leitura.	A precisão da leitura depende da habilidade do operador.
Não elétrico.	Mais lento para mostrar mudanças bruscas da subpressão.
Confiabilidade em longo prazo.	Não é possível a aquisição remota de leituras.

Fonte: (MACHADO, 2007)

c) **Piezômetro Elétrico:** O piezômetro (Figura 20), possui um diafragma de aço inoxidável onde são fixados extensômetros elétricos de resistência, dispostos

em circuito de ponte completa. Quando submetido a uma pressão externa o diafragma flete, provocando deformações nos extensômetros, variando assim a resistência dos mesmos, dando uma saída elétrica proporcional à pressão aplicada. Possui ótimo tempo de resposta, sendo muito utilizado no período de construção de barragens. Mede pressões neutras e subpressões em obras, tais como, taludes, aterros e fundações (FUSARO, 2007).

A pressão externa aplicada ao diafragma produz um sinal elétrico de saída proporcional à posição do núcleo, que é lida com equipamento específico. Este instrumento possibilita efetuar medidas dinâmicas de poropressão com registro contínuo, recurso importante para instrumentação de barragens em regiões que apresentam sismicidade significativa. Possui vantagem alternativa de automação de leituras possibilitando monitoramento remoto das medidas de poropressão negativa (MACHADO, 2007).



Figura 20: Piezômetro Elétrico
Fonte: (MACHADO, 2007)

d) **Piezômetro Corda Vibrante:** Nesses instrumentos, a pressão no diafragma altera a tensão num fio no interior da célula, que por sua vez altera a frequência de resposta ao pulso elétrico emitido pela unidade de leitura. Mede pressões neutras e subpressões em obras, tais como, taludes, aterros e fundações (FUSARO, 2007).

Sistemas de medição de corda vibrante (vibrating wire) têm como princípio de operação do sensor o cálculo de um parâmetro físico pela medição da mudança na frequência de uma corda vibrante, estendida num corpo de uma estrutura que se deforma com ou pela quantidade a ser medida.

Projetados para oferecer precisão e confiabilidade em longo prazo sob condições geotécnicas severas. Os dispositivos de corda vibrante deste instrumento toleram umidade, comum em aplicação geotécnica, pois é construído em um cilindro selado contendo um transdutor de pressão. Converte a pressão da água a um sinal da frequência através de um diafragma metálico, de um fio de aço tensionado e de uma bobina eletromagnética colocada em seu ponto médio. Este diafragma metálico separa a água do solo do sistema de medição. O piezômetro é colocado no ponto a ser monitorado e é ligado a um cabo que se estende até a superfície onde é conectado a um aparelho de aquisição de dados. O transdutor de pressão, ver figura 21, é uma cápsula selada com um diafragma sensível a pressão em uma extremidade. Uma corda tensionada é ligada a parte interna do diafragma (MACHADO, 2007).

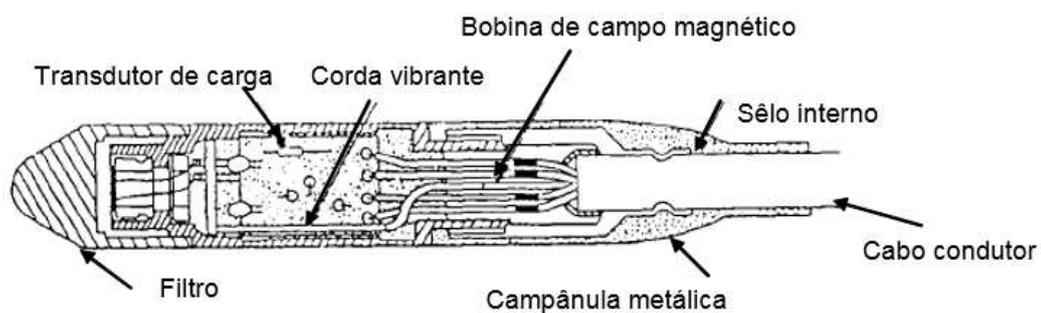


Figura 21: Transdutor de Pressão.

Fonte: (MACHADO, 2007)

Este tipo de piezômetro (figura 22), é projetado de modo que quando o diafragma deflete com uma mudança na poropressão, cause uma mudança na tensão do fio e o mesmo acontece com a frequência natural da corda. Quando excitado pela bobina eletromagnética, o fio vibra em sua frequência natural. A vibração do fio na proximidade da bobina gera um sinal da frequência que será transmitido ao dispositivo de leitura. O dispositivo de leitura processa o sinal, aplica fatores da calibração, e indica uma leitura na unidade de medida de pressão (MACHADO, 2007). As principais vantagens e limitações deste instrumento estão destacadas na tabela 5.



Figura 22: Piezômetro de Corda Vibrante.

Fonte: (MACHADO, 2007)

Tabela 5: Vantagens e Limitações do Piezômetro Corda Vibrante.

Vantagens	Limitações
Alta resolução e precisão.	Podem ser danificados por descarga elétrica e custo elevado de aquisição.
Resposta rápida.	
Os sinais podem ser transmitidos à longa distância.	
Facilidade de instalação e simples leitura.	
Possibilidade de automação das leituras.	

Fonte: (MACHADO, 2007).

2.5 Ruptura Hipotética de Barragens (DAM BREAK)

Conforme citado anteriormente a importância ou relevância da barragem que será utilizada como objeto do trabalho, dentro de um cenário de ruptura hipotético, seguem a determinação dos critérios utilizados por Pimenta (2014).

Os critérios e premissas geralmente adotados nos estudos de ruptura hipotética (Dam Break) de barragens, as ferramentas de geoprocessamento, o método de determinação das brechas de ruptura dos maciços e da propagação do hidrograma de ruptura geralmente se encontram em diretrizes apresentadas pela Agência Federal Americana de Gerenciamento de Risco (FEMA) e com a divisão de recursos hídricos do estado do Colorado – EUA (Colorado Division of Water Resources).

Segundo Pimenta (2014), para o estudo de ruptura hipotética de barragens geralmente são consideradas duas hipóteses de ruptura, uma

hipótese é baseada no possível galgamento da estrutura e a outra é fundamentada na ocorrência da erosão interna regressiva do maciço (*piping*).

Na hipótese de ruptura por galgamento, pressupõe-se que durante a ocorrência de uma cheia associada a um evento de precipitação decamilenar, a capacidade de armazenamento e o sistema extravasor da barragem não são suficientes para conter e escoar todo o hidrograma afluente, podendo haver a sobrelevação do nível de água do reservatório até uma cota acima da crista do maciço, culminando no galgamento da estrutura por uma parcela da vazão afluente, que por sua vez pode desencadear um processo de ruptura do barramento. Nesse caso, o hidrograma de ruptura é composto pela parcela de água e sólidos (sedimentos/rejeitos) vertidos pela brecha, pelo sistema extravasor e pela crista de coroamento do maciço (PIMENTA, 2014).

Ainda segundo Pimenta (2014), para a hipótese de ruptura por *piping*, considera-se que durante a passagem de uma cheia associada a um evento de precipitação decamilenar pelo reservatório ocorra uma falha por um processo inicial de *piping* que progressivamente se transforma em uma brecha de escoamento livre, que irá romper o maciço da barragem. O hidrograma de ruptura, nesse caso, é composto pela parcela de água e sólidos (sedimentos/rejeitos) vertidos pela brecha e, eventualmente, pelo sistema extravasor da estrutura.

2.5.1 Material a ser Propagado para Jusante

Os principais parâmetros utilizados para a definição de uma brecha de ruptura em barragens estão ligados à sua geometria (forma, altura e largura de fundo) e ao seu tempo de formação. Froehlich e Tufail (2004) constataram, com base em dados históricos, que a forma final mais frequente das brechas é trapezoidal.

Segundo Pimenta (2014), para o escoamento de fluidos não newtonianos, O'Brien e Julien (1984) apresentam relações de concentração volumétrica de sólidos (CV) como diretriz qualitativa para avaliação da propensão ao tipo de escoamento, ou seja, quanto maior for o teor de sólidos presentes nos fluidos, o mesmo tende a ser mais viscoso e laminar, variando assim as características do escoamento.

Neste sentido, o volume de sólidos (rejeito/sedimentos) depositado no reservatório é uma das parcelas consideradas para formação do hidrograma de ruptura ou hidrograma híbrido de ruptura. O volume total deste hidrograma (VT) a ser propagado para jusante pode ser decomposto conforme indicado na figura 23.

<p>Volume de Rejeito/Sedimento Depositado – Decomposto em duas parcelas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parcela Sólidos → V_{RS} • Parcela Água Retida → V_{RA} <p>Volume do Maciço em Terra (Região da Brecha) – Decomposto em duas parcelas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volume Solo Maciço – Região da Brecha (Parcela Sólidos) → V_{BS} • Volume Solo Maciço – Região da Brecha (Parcela Água Retida) → V_{BA} <p>Volume Útil ou Lago Permanente – parcela única:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volume de Água no Reservatório até o N.A. Máximo Normal → V_{AR} <p>Volume do Trânsito de Cheias – parcela única:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Volume de Água Proveniente do Trânsito de Cheias → V_{HC}
--

Figura 23: Volumes propagados a Jusante.

Fonte: (Pimenta, 2014)

Como premissa do estudo de ruptura hipotética, cabe salientar que para V_{RS} e V_{RA} , segundo Rico et al. (2008), em média 1/3 do volume total do reservatório é propagado para jusante. Desta maneira, o volume total do hidrograma de ruptura ou hidrograma híbrido é composto conforme equação 1.

$$VT = 1/3 \times (V_{RS} + V_{RA}) + V_{BS} + V_{BA} + V_{AR} + V_{HC} \quad (Eq. 1)$$

Onde:

VT é o volume total liberado na ruptura;

V_{RS} é a parcela de sólidos do rejeito/sedimento;

V_{RA} é a parcela de água retida no rejeito/sedimento;

V_{BS} é a parcela de sólidos do maciço da barragem;

V_{BA} é a parcela de água retida no maciço da barragem;

V_{AR} é o volume de água até o nível operacional do reservatório;

V_{HC} é o volume de água proveniente do trânsito de cheias.

Sendo que o volume da parcela de (V_{HC}) considera-se a pior situação, como nos casos de galgamento, onde todo o volume considerado para trânsito de cheias é ocupado durante um determinado evento.

Para facilitar o cálculo de uma forma a se obter uma ideia aproximada do volume de uma barragem a ser propagado para jusante, pode-se considerar neste caso, uma simplificação do cálculo, conforme apresentado na equação 2:

$$V_T = 1/3 \times (V_{RS}) + V_{AR} + V_{HC} \quad (Eq. 2)$$

Onde:

V_T é o volume total liberado na ruptura;

V_{RS} é a parcela de sólidos do rejeito/sedimento;

V_{AR} é o volume de água até o nível operacional do reservatório;

V_{HC} é o volume de água proveniente do trânsito de cheias.

Conforme citado no capítulo 1, utiliza-se esta premissa para simulação de ruptura, o volume total (V_T) de material (água + sólidos) propagado a jusante, desprezando as parcelas de água do rejeito e do maciço, além do volume do maciço, pois consideram-se parcelas pouco significativas em relação ao potencial de volume a ser propagado. Neste caso, para a barragem do Azul teríamos aproximadamente 9,9Mm³ de rejeitos.

2.6 Leis e Normas vigentes

2.6.1 NBR 13.028 (2017) - Fator de Segurança

Esta norma foi elaborada na Comissão de Estatuto Especial Temporária de Elaboração de Projetos para Disposição de Rejeitos e Estéreis em Mineração, sendo sua primeira edição datada em 1993. O objetivo da mesma é especificar os requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos de beneficiamento, contenção de sedimentos e reservação de águas, em mineração, visando atender as condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

A NBR 13028 (2017) trata de diversos tópicos relacionados à segurança de barragens tais como: fundação, geologia, materiais de construção, estudos hidráulicos e hidrológicos, ocupação do reservatório, sistema extravasor, drenagem superficial, instrumentação entre outros.

Para análise do Fator de Segurança (FS) do talude de Jusante do maciço da barragem, o projeto deve considerar os critérios para a seção considerada crítica, onde o ângulo geral da barragem deve ser tal que atenda os fatores de segurança, considerados para análises de estabilidade em termos de tensões efetivas, recomendados de acordo com a tabela 6 (NBR 13028, 2017):

Tabela 6: Fatores de segurança de acordo com a NBR 13028 (2017)

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,1
^a Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como "final de construção", devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.			

Fonte: (ABNT NBR 13028, 2017).

2.6.2 Lei 12.334 / 2010 (Lei de Segurança de Barragens).

Segundo Melo (2014), a *Lei de Segurança de Barragens* teve seu início no legislativo federal por meio da proposição de um projeto de lei, começando efetivamente sua tramitação na Câmara Federal no ano de 2003. A iniciativa

contou com a participação das instituições de ensino e pesquisa, organizações profissionais e apoio de técnicos e especialistas que atuam na engenharia de barragens. Após passar por várias comissões na Câmara dos Deputados e Senado (trâmites inerentes ao processo legislativo), finalmente, em 2010, a Lei nº 12.334 foi sancionada.

A lei 12.334 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (BRASIL, 2010). A PNSB tem como objetivos fundamentais garantir a observância de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança assumidas pelos responsáveis por barragens, visando a redução da possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população potencialmente afetada (BRASIL, 2010).

Esta Lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e também cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

I - Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

II - Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

III - Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6o.

Segundo Melo (2014), a Lei 12.334 definiu que o agente fiscalizador é o órgão que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, seja para acumulação de água, geração hidrelétrica, disposição de rejeitos ou disposição de resíduos industriais. Esses órgãos, especialistas em suas respectivas áreas de atuação, têm a responsabilidade por regulamentações complementares. No caso das barragens de hidrelétricas, essa atribuição cabe à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no caso das barragens de mineração, essa atribuição cabe à Agência Nacional de Águas (ANA) em parceria com o Departamento de Produção Mineral (DNPM) que em 2018 se tornou Agência Nacional de Mineração (ANM).

As entidades, atribuições e fluxo de atividades e responsabilidades contidas na PNSB são ilustrados na figura 24.

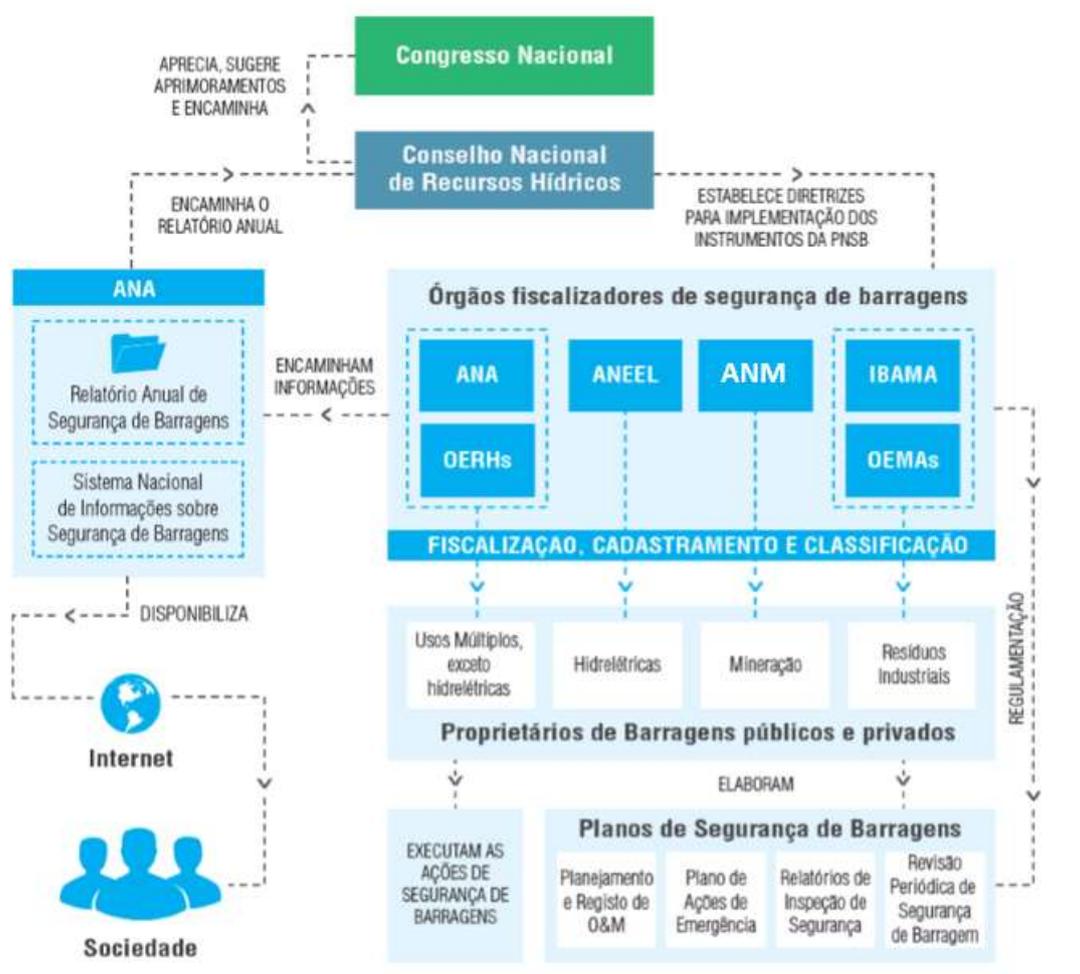


Figura 24: Política Nacional de Segurança de Barragens.

Fonte: (Adaptado de MELO, 2014)

A PNSB explicitou que a responsabilidade primária pela segurança da barragem é do empreendedor, o qual tem o dever de manter a barragem em condições adequadas. A política institui uma série de obrigações aos proprietários, com vistas à implantação de um efetivo sistema de gestão de segurança de barragens, das quais se destacam (BRASIL, 2010):

- Elaboração do Plano de Segurança da Barragem e o Plano de Ação de Emergência (PSB e PAE);
- Realização das Inspeções de Segurança Regular e Especial nas barragens;
- Realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragem.

Uma importante contribuição técnica da lei, caracterizada como um de seus instrumentos, foi a criação do sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado, que se constitui a base para análise de segurança das barragens, estabelecendo níveis apropriados de monitoramento, inspeção e planos de segurança (MELO, 2014)

Segundo o DNPM (2017), atualmente, o universo fiscalizável do órgão, engloba 32.569 títulos de empreendimento de lavra mineral sendo: 9.921 concessões minerais, 14.357 registros de licenças de materiais de uso na construção civil, 4.939 títulos de pesquisa, 1.924 permissões de lavra garimpeira e 1.428 registros de extração.

Quanto a atuação do órgão na área de barragens de mineração, o DNPM no ano de 2016, fiscalizou em todo o território nacional, 329 barragens de rejeitos inseridas na PNSB, que representaram 79% de todas essas estruturas, englobando os estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Bahia, Amazonas, São Paulo, Pará, Goiás, Tocantins, Rio Grande do Sul, Paraná e Sergipe. Cabe destacar que do universo de barragens fiscalizadas, no Estado de Minas Gerais estão situadas 224 estruturas de disposição de rejeitos de 38 Mineradoras, sendo tal desempenho alcançado devido ao aporte de recursos em dezembro de 2015 pelo MME e contratação de assessoria técnica especializada (DNPM, 2017).

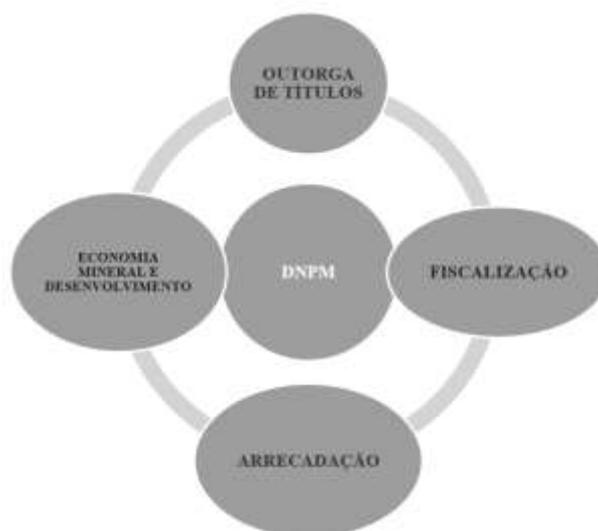


Figura 25: Atribuições do DNPM

Fonte: (DNPM, 2017)

2.6.3 Portaria 70.389 / 2017.

Publicada em 17 de maio de 2017, esta portaria do DNPM, entrou em vigor 30 dias após sua publicação e revogou as Portarias DNPM n.º 416, de 3 de setembro de 2012, e n.º 526, de 9 de dezembro de 2013, ou seja, propôs-se aglutinar as duas minutas de portarias em regulamento único, abrangendo todos os elementos do Plano de Segurança de Barragens, podendo, assim, contribuir para o entendimento dos jurisdicionados, nomeadamente, dos empreendedores de barragens fiscalizadas pelo DNPM. Outro motivador, foi o fato do Plano de Segurança de Barragem (PSB) ser um só plano, que abrange vários elementos, justificando, portanto, a elaboração de um regulamento único, conforme o art. 8º da Lei nº 12.334/2010 (DNPM, 2017).

A portaria nº 70.389/2017, 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, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB.

Dentro de várias mudanças e inclusões que visam o aprimoramento das referidas portarias e o aumento da segurança em barragens, um dos itens que merecem destaque, é a exigência da apresentação de níveis de controle para o monitoramento das estruturas.

Conforme citado anteriormente, o Art. 2 inciso XXVIII onde é mencionado os níveis de controle de instrumentação onde se estabelece que devem ser criados 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 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** (BRASIL, 2017).

Uma outra ferramenta tabulada proposta na Portaria Nº 416 (2012) e mantida pela Portaria 70.389 (2017) é a utilização do quadro do estado de conservação da estrutura (EC) para se determinar a categoria de risco da estrutura. O intuito desta ferramenta é identificar anomalias de grande relevância através de inspeções visuais e determinar o grau de risco da estrutura, sendo que anomalias de pontuação 10, sugere-se que seja tratada como gatilho para o acionamento do Plano de Ações Emergenciais para Barragens de Mineração (PAEBM).

TABELA 7 – Matriz de Classificação quanto à categoria de risco / Estado de Conservação (DNPM, 2017)

1.2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC			
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (g)
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)
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)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (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, ferrugem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias . (6)
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)

Entre as várias mudanças feitas pelo DNPM na nova portaria, destacam-se também:

a) Mudança no quadro e critério de classificação das Barragens.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO DNPM nº 416/2012			→	CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO DNPM nº 70.389/2017		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO			ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C		ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D		MÉDIO	B	C	D
BAIXO	C	D	E		BAIXO	B	C	E

Figura 26: Quadro de classificação de Barragens

Fonte: (DNPM, 2017)

- b) Obrigatoriedade a apresentação de mapa de inundação para todas as barragens, considerando o cenário de maior dano e elaborado por responsável técnico.



Figura 27: Simulação de DAM BREAK

Fonte: (DNPM, 2017)

- c) Implantação de Sistema de monitoramento onde o nível dependerá da classificação de Dano Potencial (DPA) da barragem de mineração. Barragens com DPA alto, existência de população de jusante com pontuação 10 e características técnicas com método construtivo contendo pontuação 10, o empreendedor é obrigado a manter monitoramento com acompanhamento em tempo integral, adequado à complexidade da estrutura, sendo de sua responsabilidade a definição da tecnologia, dos instrumentos e dos processos de monitoramento, devendo manter vídeo-monitoramento 24 horas por dia de sua estrutura e armazenamento das imagens pelo prazo mínimo de noventa dias.



Figura 28: Sala de Monitoramento.

Fonte: (DNPM, 2017)

- d) Criação de um Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM) onde o empreendedor é obrigado a reportar quinzenalmente informações relativas ao estado de conservação das estruturas (EC), além de gastos mensais e/ou atualizações de avaliações e estudos técnicos, como por exemplo, auditorias e revisões periódicas.



Figura 29: Cenário antes da Portaria 70.389

Fonte: (DNPM, 2017)

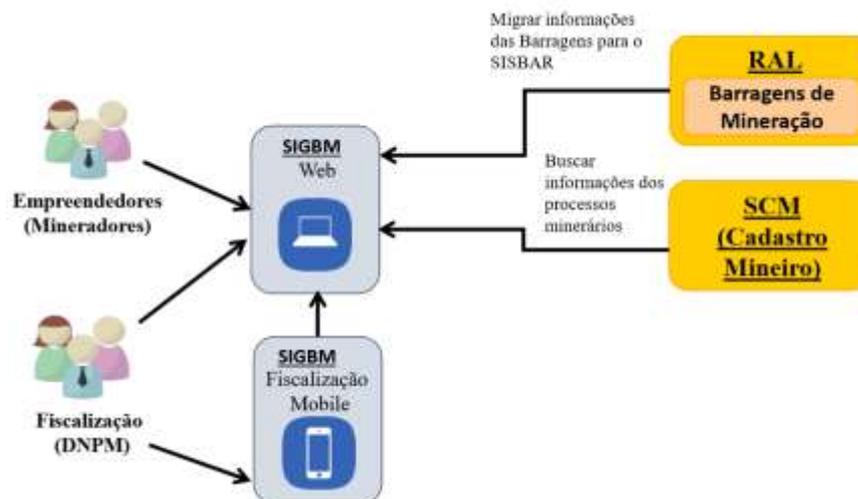


Figura 30: Cenário Atual

Fonte: (DNPM, 2017)

2.7 Análise Determinística em Softwares

Segundo Shuren *et al.*, (2015), é muito importante para garantir a segurança da estabilidade da barragem de rejeitos, a construção de um modelo computacional tridimensional que possa calcular o fator de segurança e o potencial de deslizamento da face de uma barragem considerando as condições atuais de nível de água operacional.

Para a modelagem numérica de uma barragem de rejeitos, SHUREN *et al.*, (2015), construiu um modelo utilizando os *softwares* FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) para modelagem 3D e o *software* comercial MIDAS/GTS da Coreia do Sul, como mostra a figura 31, para modelagem geométrica e geração de malha do corpo geológico. A utilização de ambos os *softwares* se deu para compensar as deficiências de pré-processamento do FLAC3D e dar pleno desempenho às suas funções de cálculo.

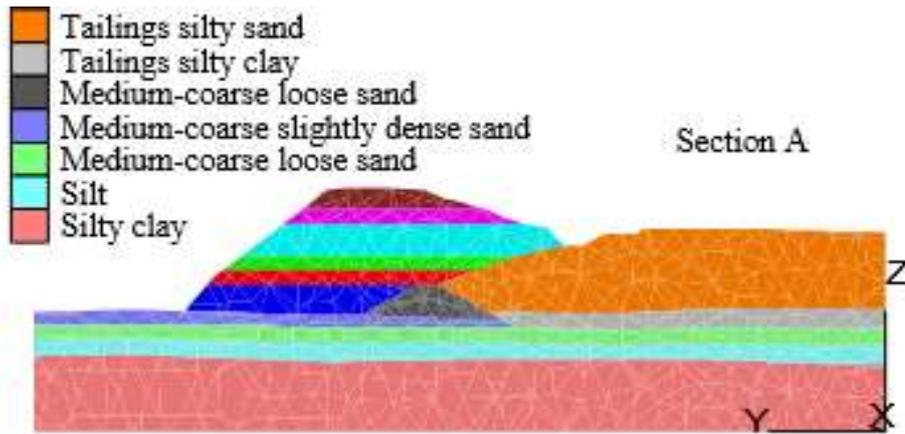


Figura 31: Modelagem no MIDAS/GTS

Fonte: (SHUREN *et al.*, 2015)

Segundo Shuren *et al.*, (2015), o material utilizado no modelo para determinação do fator de segurança da barragem, atendeu aos critérios de resistência de Mohr-Coulomb, sendo que os parâmetros físicos e mecânicos utilizados para a modelagem foram selecionados de acordo com os resultados de campo e os resultados de laboratório (Densidade, Módulo de elasticidade, Coeficiente de Poisson, Coesão, Ângulo de atrito e Coeficiente de permeabilidade), conforme apresentado na tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros Físicos e Mecânicos do Modelo, SHUREN *et al.*, 2015.

Name	Density (kg/m ³)	Elasticity modulus (GPa)	Poisson ratio	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Permeability coefficient (cm·s ⁻¹)
Gravel with silt	2250	50	0.32	1	35	1.34×10 ⁻¹
Tailings silty sand	1710	15	0.40	3	25	2.93×10 ⁻³
Tailings silty clay	1910	8	0.35	19	8	2.30×10 ⁻⁶
Medium-coarse loose sand	1950	70	0.30	3	30	1.70×10 ⁻²
Medium-coarse slightly dense sand	1960	75	0.30	3	32	3.20×10 ⁻²
Medium-coarse loose sand	1870	63	0.30	3	29	2.80×10 ⁻³
Silt	2190	47	0.32	30	20	1.20×10 ⁻⁴
Silty clay	2030	80	0.30	35	15	1.50×10 ⁻⁶
Water	1000					

Segundo Ratan e Manoj (2004), o critério de Mohr-Coulomb é o critério de falha mais comum encontrado na engenharia geotécnica. Muitos métodos de análise geotécnica e programas possuem este modelo de resistência para uso. O critério de Mohr-Coulomb descreve uma relação linear entre tensões normais e de cisalhamento (ou tensões principais máximas e mínimas) na falha, onde a densidade, a coesão e o ângulo de atrito são os parâmetros utilizados como dados de entrada para o cálculo de resistência.

De acordo com os códigos técnicos adotados na China, o fator de segurança da barragem de rejeitos não deve ser inferior a 1,25 em condições normais de operação. O método de redução de resistência ao cisalhamento interno do FLAC3D foi adotado para calcular o fator de segurança da barragem de rejeitos e determinar a posição potencial da superfície de deslizamento. O fator de segurança (FS) da barragem de rejeitos foi de 1,28, conforme figura 32 (SHUREN *et al.*, 2015).

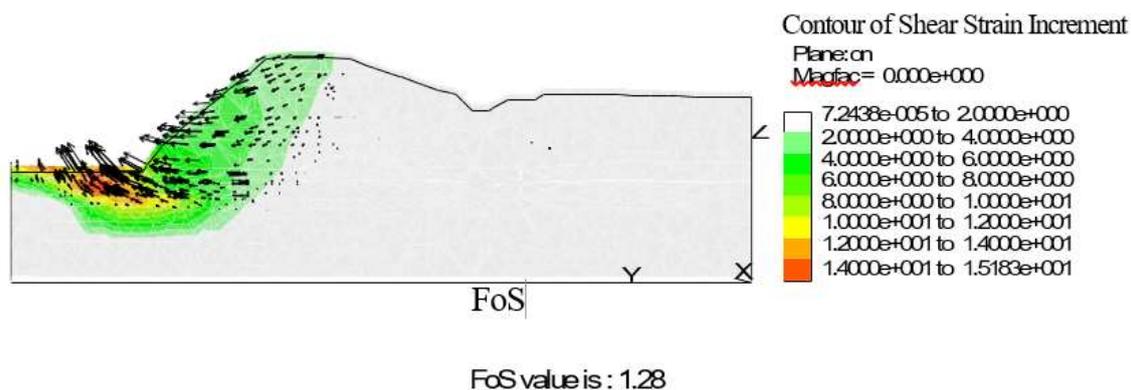


Figura 32: Análise de Estabilidade no FLAC3D

Fonte: (SHUREN *et al.*, 2015)

Segundo Duncan (2013), no início dos anos 80, quando os computadores mainframe tornaram-se disponíveis para uso em engenharia civil, começaram se a desenvolver programas de computador, entre eles os programas de análise de estabilidade. Estes programas foram usados por algumas empresas e engenheiros geotécnicos por alguns anos. Os programas eram crus pelos padrões de hoje, com os arquivos de dados datilografados para a entrada e somente a saída alfanumérica, mas foram usados porque não havia nenhuma alternativa melhor. Nas três décadas que se seguiram ao advento dos computadores pessoais, engenheiros geotécnicos se associaram

a programadores profissionais (ou se tornaram programadores sofisticados) para desenvolver programas comerciais que aproveitam a velocidade e a capacidade dos poderosos computadores desktop e laptop agora disponíveis. Estes programas de geração atual fornecem grande poder analítico, interfaces gráficas fáceis de usar, rascunho assistido por computador e recursos de processamento de texto dentro dos programas de análise de estabilidade. Muitos programas de computador comercialmente disponíveis para a estabilidade da inclinação do solo estão agora disponíveis. Alguns estão listados na Tabela 9 e têm uma grande variedade de recursos necessários para torná-los úteis e eficientes para a aplicação prática.

Tabela 9: Programas para análise de estabilidade, adaptado de DUNCAN (2013).

Softwares de Análise de Estabilidade			
1	CHASM	9	SLIDE
2	Clara-W (2D and 3D)	10	Slope 2000
3	GALENA	11	SLOPE/W
4	Geo-Tec B	12	Stable for Windows
5	GGU-Stability	13	STABLPRO
6	GSLOPE	14	SVSLOPE (2D and 3D)
7	GSTABL 7 with STED win	15	TSLOPE (2D and 3D)
8	LimitState:GEO	16	UTEXAS3

A validade dos resultados de uma análise é, naturalmente, a responsabilidade do usuário. Não importa qual programa é usado, é possível que os resultados sejam incorretos se o programa for aplicado incorretamente (DUNCAN, 2013).

O *Software* comercial escolhido para ser utilizado no desenvolvimento deste trabalho foi o Slide, da Rocscience, versão 6.0.

2.8 Slide 6.0 (Rocscience)

Segundo a Rocscience (2017) o *software* Slide é um dos programas comerciais de análise de estabilidade de inclinação mais completo disponível no mercado, completo com análise de infiltração de água subterrânea de elementos finitos, levantamento rápido, sensibilidade e análise probabilística e projeto de suporte. Podem ser analisados todos os tipos de solo e rochas,

taludes, barragens de terra e muros de contenção. As capacidades de CAD avançadas permitem que você crie e edite modelos complexos com muita facilidade. Atualmente, existem em torno de 7.000 usuários em todo mundo, distribuídos em 120 países, além de aproximadamente 380 universidades que utilizam o software educacional.

De acordo com Barrett (2018) e Silva (2015), das ferramentas de análise geotécnica da Rocscience, o software Slide é um dos mais abrangentes programas de análise de estabilidade de taludes no mercado, muito utilizado para analisar rupturas do tipo circular e também plano-circulares.

Ainda segundo a Rocscience (2017), Slide é um *software* que possui análise de estabilidade de declive com análise de infiltração de água subterrânea de elementos finitos integrada para condições de estado estacionário ou transitório. Fluxos, pressões e gradientes são calculados com base nas condições de contorno hidráulico definidas pelo usuário. A análise de infiltração é totalmente integrada com a análise de estabilidade da inclinação ou pode ser usada como um módulo autônomo. A análise de sensibilidade permite determinar o efeito de variáveis individuais sobre o fator de segurança do talude.

2.8.1 Análise de Estabilidade

No *software* Slide, a análise de sensibilidade permite ao usuário determinar a "sensibilidade" do fator de segurança à variação nas variáveis de dados de entrada. Isso é feito variando uma variável de cada vez, mantendo todas as outras variáveis constantes, e traçando um gráfico de fator de segurança versus a variável. O usuário também pode gerar parcelas com vários parâmetros para determinar qual tem a maior influência sobre o fator de segurança. Neste caso, o eixo horizontal será em termos de Alteração de Porcentagem. A Variação Percentual é a diferença relativa entre o valor mínimo de uma variável (0%) e o valor máximo de uma variável (100%). Isso permite determinar um valor de parâmetro exato que fornece um fator de segurança especificado (por exemplo, $FS = 1,0$) ou o fator de segurança que corresponde a um valor de parâmetro especificado. Neste programa um usuário pode definir uma grade (ou múltiplas grades) de centros para uso na busca da superfície de falha circular ou compósita com o fator mínimo de segurança. Para cada ponto

da grelha é gerado um número especificado de superfícies circulares com base num raio mínimo e máximo. O raio mínimo e máximo é determinado a partir da geometria do modelo. A análise então calcula os fatores de segurança associados a todas as superfícies da grade, conforme figura 33. No Interpretador do *software*, a grade é contornada com base na superfície com fator mínimo de segurança em cada ponto da grade. Os parâmetros de pesquisa dos materiais podem ser inseridos e alterados na caixa de diálogo (ROCSCIENCE, 2017).

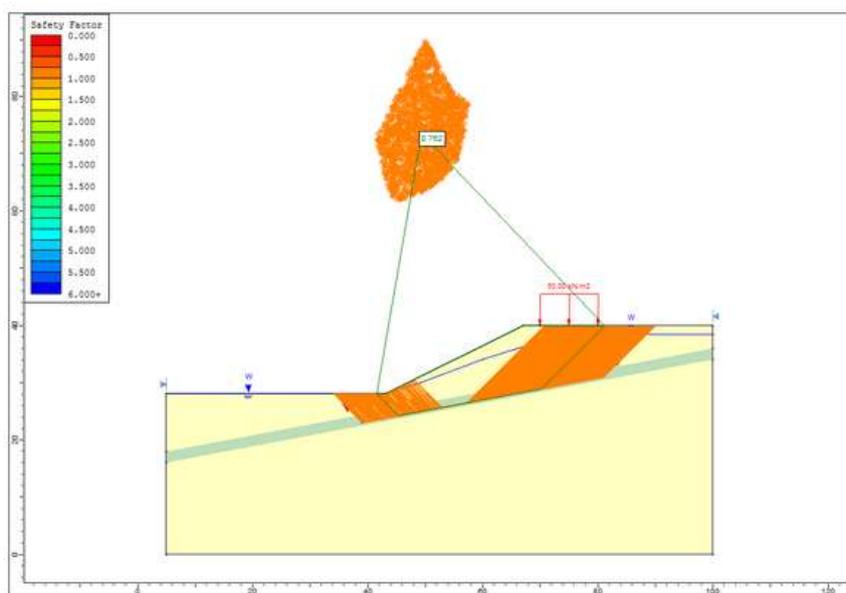


Figura 33: Análise de Estabilidade no Slide.

Fonte: (ROCSCIENCE, 2017)

2.8.2 Análise de Percolação (Elementos Finitos)

Dentro do Slide os usuários podem realizar análises de infiltração de água subterrânea de elementos finitos para condições de saturação / insaturação, estado estacionário ou fluxo transitório. O recurso de análise de infiltração pode ser usado independentemente ou em conjunto com a análise de estabilidade, conforme a figura 34 (ROCSCIENCE, 2017).

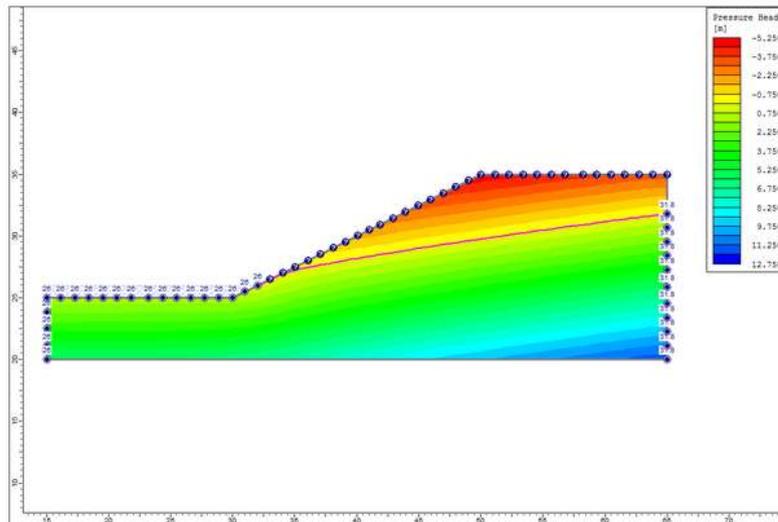


Figura 34: Análise de Percolação no Slide.

Fonte: (ROCSCIENCE, 2017)

Segundo Rojas e Fonini (2006), uma vez obtidos os parâmetros físicos e mecânicos do solo necessários para o modelamento numérico de uma barragem, é possível se executar diversas análises de percolação e estabilidade estudando se como hipótese uma única seção crítica da barragem.

O coeficiente do engenheiro, ou coeficiente de Darcy, é normalmente referido como simplesmente o *coeficiente de permeabilidade*. É definida como a velocidade de descarga através de uma área unitária sob um gradiente hidráulico unitário e é dependente das propriedades do meio, bem como da viscosidade e densidade do fluido (USACE, 1993)

Ainda segundo Usace (1993), a percolação é definida como o fluxo de água através de solo homogêneo saturado em condições de estado estacionário. Além disso, as partículas do solo, a estrutura do solo e a água são assumidas incompressíveis e o fluxo obedece à lei de Darcy e Laplace, a água passa de um estado de energia mais alta para um estado de energia mais baixo e, na infiltração, a diferença de estados de energia é a quantidade de energia necessária para mover a água através do solo, isto é, para superar a resistência do solo à fluxo de água. Modelos de computador são usados para fazer equações em condições de fluxo complexas. Os dois métodos principais da solução numérica são a diferença finita e o elemento finito. Ambos podem ser usados em modelos um, dois ou tridimensionais. O método dos elementos

finitos é uma forma de solução numérica. Este método também é baseado no padrão de grade (não necessariamente retangular) que divide a região de fluxo em elementos discretos e fornece N equações com N incógnitas. As propriedades do material, tais como a permeabilidade, são especificadas para cada elemento e as condições de contorno (cabeças e taxas de fluxo) são definidas. Um sistema de equações é resolvido para calcular cabeças em nós e fluxos nos elementos, como mostra a figura 35.

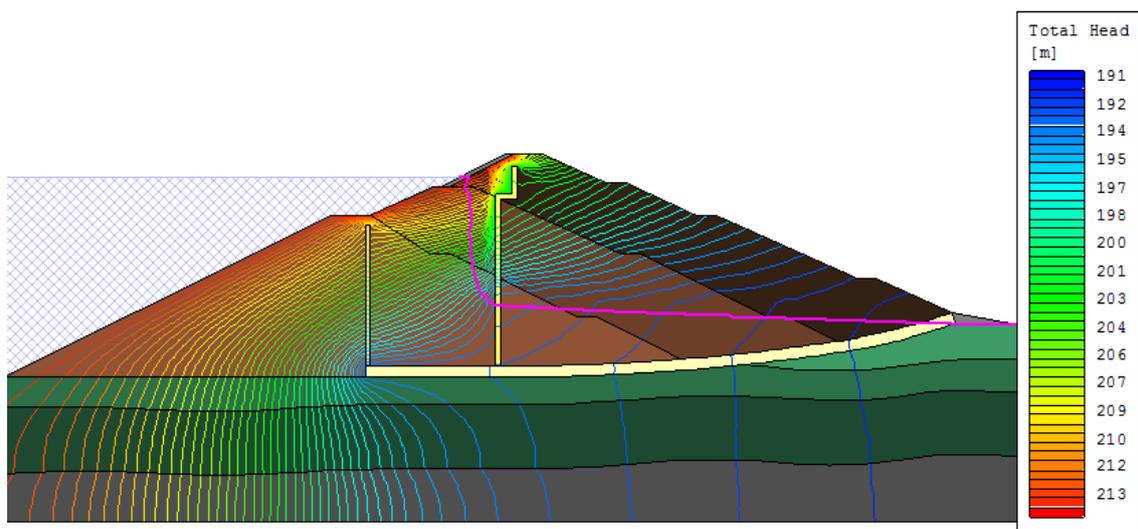


Figura 35: Seção de Percolação.

Fonte: (Acervo Próprio)

Segundo Adel *et al.* (1988) e Skempton e Brogan (1994), os gradientes horizontais e verticais elevados podem causar o fenômeno de erosão interna conhecido como *piping*, iniciando-se em decorrência de uma perda de resistência pontual, ocasionando assim a erosão interna do local, permitindo desta forma uma maior concentração de fluxo nesta região. Este fenômeno consiste no carregamento das partículas de solo pela água em fluxo numa progressão de jusante para montante.

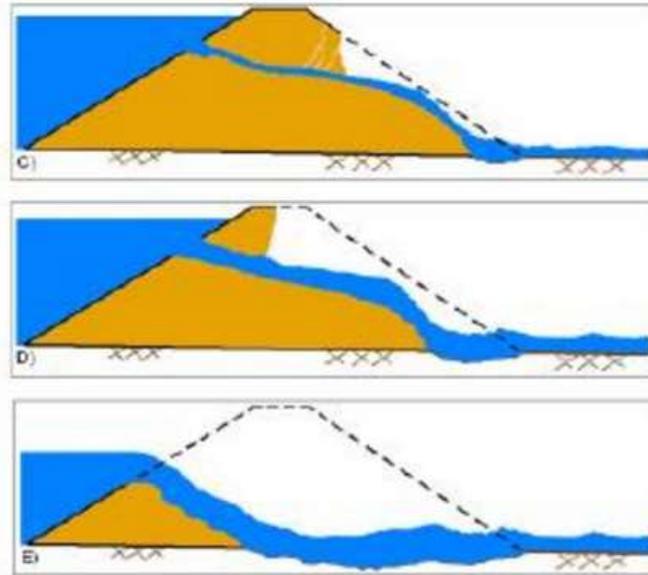


Figura 36: Modelo de Ruptura por piping.

Fonte: (LARA, 2016)

De acordo com Lara (2016), para o caso de ruptura por formação de piping, a fuga d'água pelo macroporo formado pelo escoamento preferencial erode o interior do corpo da barragem e transporta o material do núcleo do corpo da barragem em direção à jusante. Este processo gera uma progressão do tamanho do buraco formado pelo piping, aumentando a vazão e o transporte de material do interior da barragem. Com o aumento da erosão do interior da barragem, num determinado momento, a massa remanescente do corpo da barragem na parte superior do piping colapsará, mudando o escoamento pressurizado para escoamento livre.

2.9 Níveis de Controle do Monitoramento

Segundo Penna et al. (2017), a elaboração de uma *carta de risco* para barragens é comumente adotada pelas empresas do setor mineral como ferramenta de gestão de segurança, bem como tem sido exigida por alguns órgãos fiscalizadores / regulatórios de barragens. Contudo, a *carta de risco* com a definição dos níveis de controle da instrumentação (piezômetros e INAs) não deve ser utilizada isoladamente como instrumento de gestão.

Segundo Fusaro (2007), durante a fase de operação de uma Barragem, os sistemas de instrumentação geotécnica podem ser instalados para prover um alarme quando um indicador de desempenho exceder os limites

estabelecidos como aceitáveis. Neste caso, a instrumentação passa a constituir uma ferramenta eficaz na identificação de possíveis situações de risco à segurança das estruturas. Na medida em que a instrumentação pode ajudar ou inferir as prováveis causas de um problema, ela constitui apoio e auxílio essenciais para tomadas de decisão de como responder a uma mudança no comportamento da barragem. Permite identificar se esta mudança não impõe risco para as estruturas, se há necessidade de obras de reparo ou necessidade de uma resposta emergencial.

É importante ressaltar que a instrumentação de barragens tem valor relativo por si só, uma vez que mesmo o melhor instrumento não aumenta a segurança se não estiver funcionando, ou se estiver no local errado ou se não estiver sendo lido em intervalos de tempo adequados. Da mesma forma, os dados também não têm valor por si só; as pessoas que coletam os dados devem ser capazes de dar rapidamente significado aos registros coletados e tomar decisões (USACE, 1995).

A análise dos dados da instrumentação envolve a correlação dos valores medidos com os carregamentos, determinação de tendências de variação e cuidadosa comparação dos valores medidos com aqueles previstos teoricamente ou experimentalmente. Para que essa análise seja possível, as informações completas devem estar disponíveis em um formato tal que facilite a sua interpretação. Geralmente são utilizados modelos estruturais baseados nos métodos dos elementos finitos, bi ou tridimensionais. O desenvolvimento destes modelos é um desafio, uma vez que a configuração de cada barragem é única. Os dados históricos da instrumentação instalada durante a construção ou mesmo durante a vida da barragem são úteis nos estudos determinísticos, pois são usados na aferição e calibração do modelo (FUSARO, 2007).

➤ **MÉTODOS DETERMINÍSTICOS:**

- **EQUILÍBRIO LIMITE DE UMA MASSA DE SOLO;**
- **ANÁLISE TENSÕES x DEFORMAÇÕES.**

} AMBOS

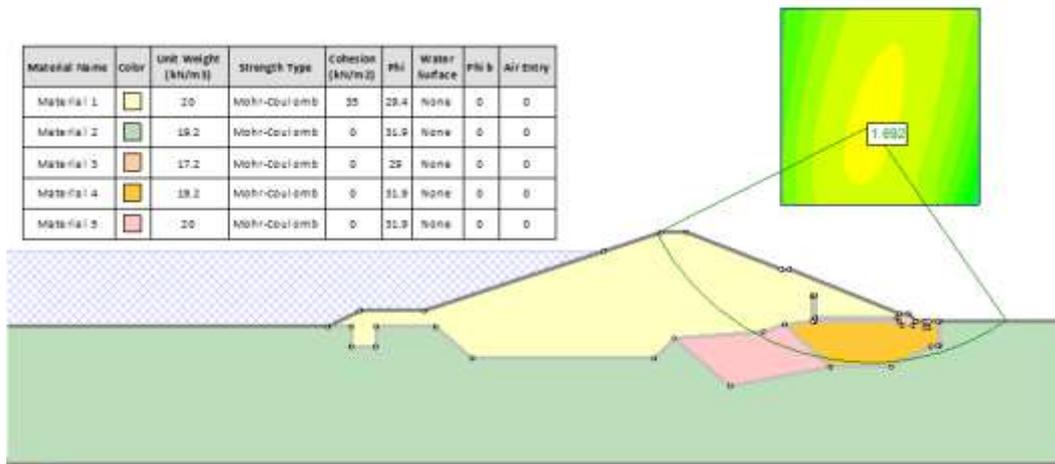


Figura 37: Exemplo de análise de estabilidade no software SLIDE.

Fonte: (ROCSCIENCE, 2017)

A partir destas informações iniciais, o modelo numérico é calibrado, fazendo-se sucessivas simulações das condições de fluxo, até se obter a condição que melhor reproduz a linha freática observada no campo (LIGOCKI *et al.*, 2003).

De maneira geral, o estabelecimento desses valores de referência ocorre a partir da realização de análises de estabilidade variando-se os níveis piezométricos / freáticos de modo a se obter fatores de segurança de 1,5; 1,3 e 1,1. A partir da definição dos fatores de segurança e respectivos níveis associados nos instrumentos instalados são estabelecidas quatro *faixas de risco* ou *faixas de segurança*: Normal, Atenção, Alerta e Emergência (PENNA *et al.*; 2017).

TABELA 10 – Níveis de Monitoramento com base no Fator de Segurança (FS), adaptado de PENNA *et al.* (2017).

Níveis de Operação	Fator de Segurança
Normal	FS ≥ 1,50
Atenção	1,30 ≤ FS < 1,50
Alerta	1,10 ≤ FS < 1,30
Emergência	FS < 1,10

- **Nível Normal:** Quando a barragem operar com um fator de segurança (FS) $\geq 1,50$;
- **Nível de Atenção:** Quando a barragem operar com um fator de segurança dentro do intervalo $1,30 \leq FS < 1,50$;
- **Nível de Alerta:** Quando a barragem operar com um fator de segurança dentro do intervalo $1,10 \leq FS < 1,30$;
- **Nível de Emergência:** Quando a barragem operar com um fator de segurança (FS) $< 1,10$.

Os valores limites para as medidas da instrumentação, representativos das condições de atenção, alerta e emergência, são estabelecidos utilizando um programa comercial para análises determinísticas, elevando-se gradualmente o nível da linha freática de modo que o fator de segurança vai sendo reduzido. Os valores limites fixados, 1,5; 1,3 e 1,1 são utilizados com base nos fatores de segurança estabelecidos pela *Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD)*, para condições normais e saturadas, conforme apresentado na figura 38.

Condição de Carregamento	US Corps of Eng. (Nota 1)	Mínimo recomendado para Barragens de Rejeitos (Nota 2)	Força de Cisalhamento (Nota 6)
Infiltração Constante a níveis elevados	1,5	1,5	Pressões Totais e efetivas
Rebaixamento rápido	1,2	1,2 (Nota 3)	Pressões Totais ou efetivas
Sismos (Níveis elevados de infiltração a jusante ou mediano nas encostas a montante)	1,0	1,1 para análise pseudo-estática (Nota 4)	Pressão Total ou Liquefação
Condições de construção ou inclinação	-	1,3 ou 1,1 (Nota 5)	Pressões Totais ou efetivas

Nota 1 - National Research Council (1983) cita estes números como os requisitos da US Corp of Engineers.

Nota 2 - O método de Bishop Simplificado ou equivalente deveria ser usado.

Nota 3 - Fator de Segurança somente para análise não drenada. Se a análise considerar condição de poro pressão de análise de percolação transiente, usar FS de pelo menos 1,4

Nota 4 - A condição de análise pseudo-estática é somente usada para uma avaliação preliminar das condições de estabilidade. A US Corp of Engineers sugere FS de 1,1 usando pós-sismos e pós Liquefação.

Nota 5 - Se forem assumidos parâmetros de solos saturados

Nota 6 - Considerar a condição mais crítica.

Figura 38: Fatores de Segurança aceitáveis ANCOLD

Fonte: (adaptado de ANCOLD, 1999)

Segundo Penna et al. (2017), a carta de monitoramento 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, sendo a denominação *carta de risco* comumente adotada, conceitualmente não se aplica à definição de risco, pois a metodologia adotada para a definição dos valores de controle da

instrumentação apresenta alguns fatores que podem limitar a sua aplicação como ferramenta de gestão de segurança:

- a) Histórico de Ruptura: As estatísticas de ruptura de barragens indicam que a instabilização corresponde apenas a uma parcela das causas de acidentes com barragens;
- b) Modos de Falha: Os valores de controle da instrumentação usualmente são específicos para o modo de falha de instabilização, não sendo considerados os demais modos de falha;
- c) Confiabilidade dos Valores de Controle Estabelecidos: Em alguns casos verifica-se que a utilização da *carta de risco* pode acarretar em situações indesejáveis dentro do processo de gestão de segurança da barragem.

O ICOLD (1989), sugere outra possível alternativa como o estabelecimento dos valores de controle com base na análise estatística do histórico de leituras dos instrumentos. Fusaro (2007) apresenta outras correlações estatísticas, como por exemplo uma definição dos valores de referência para um determinado instrumento em função do histórico de leituras do instrumento.

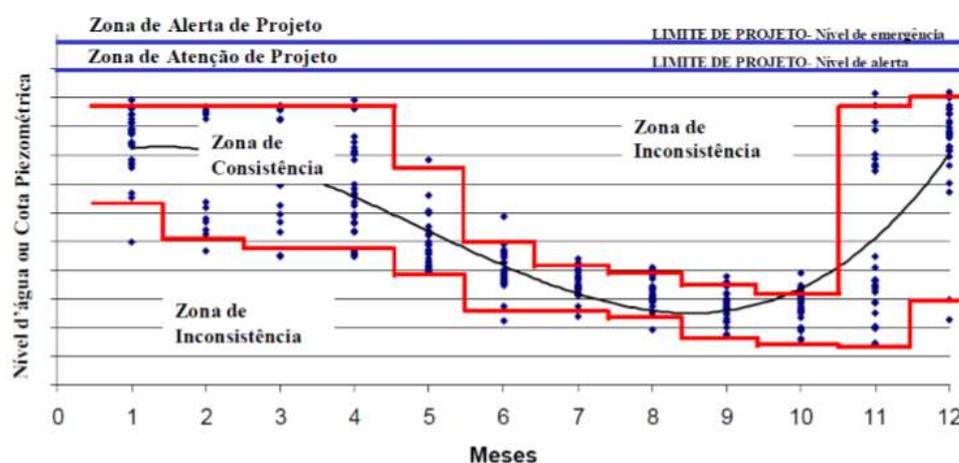


Figura 39: Modelo de análise para piezômetro.

Fonte: (Fusaro, 2007)

No gráfico foram definidas duas zonas distintas:

- a) Zona de consistência: Valor lido encontra-se dentro da faixa pré-definida estatisticamente conforme histórico de leitura e abaixo do limite de projeto. A leitura é considerada correta e não necessita de análise imediata complementar.
- b) Zona de inconsistência: Valor lido encontra-se fora da faixa pré-definida estatisticamente conforme histórico de leitura.

Segundo Penna et al. (2017), sugere-se a adoção do termo zona de consistência para leituras dos instrumentos dentro da faixa de valores de controle; e zona de inconsistência para leituras fora da faixa de valores de controle, de modo a evitar eventuais conflitos na comunicação, pois as *cartas de risco* são usualmente adotadas como ferramenta no processo de gestão de segurança de barragens de rejeito. Entretanto, a definição dos níveis de controle baseada em análises de estabilidade apresenta certas limitações e restrições de aplicação.

Segundo Fusaro (2007), a Itália foi o país precursor na tentativa de prever leituras utilizando métodos determinísticos e de estabelecer *faixas de tolerância* ou espectros distintos de comportamento de uma dada estrutura (normal, alerta leve e alerta sério), dependendo do desvio entre os valores medidos e previstos. As faixas de tolerância para as medidas da instrumentação eram, então, definidas a partir da estimativa do desvio padrão das diferenças entre os valores previstos no modelo e aquelas medidas ao longo de um período de dois ou três anos de comportamento normal da estrutura.

Para que seja possível identificar os comportamentos anômalos tanto das estruturas quanto dos próprios instrumentos, é importante a predefinição de faixas de valores aceitáveis para cada instrumento, conforme figura 40. Somente o estabelecimento destas faixas e a automação da verificação imediata dos dados pós-leituras tornam possível um diagnóstico precoce de anomalias no comportamento de uma barragem e a otimização do potencial da instrumentação instalada (USACE, 2004).

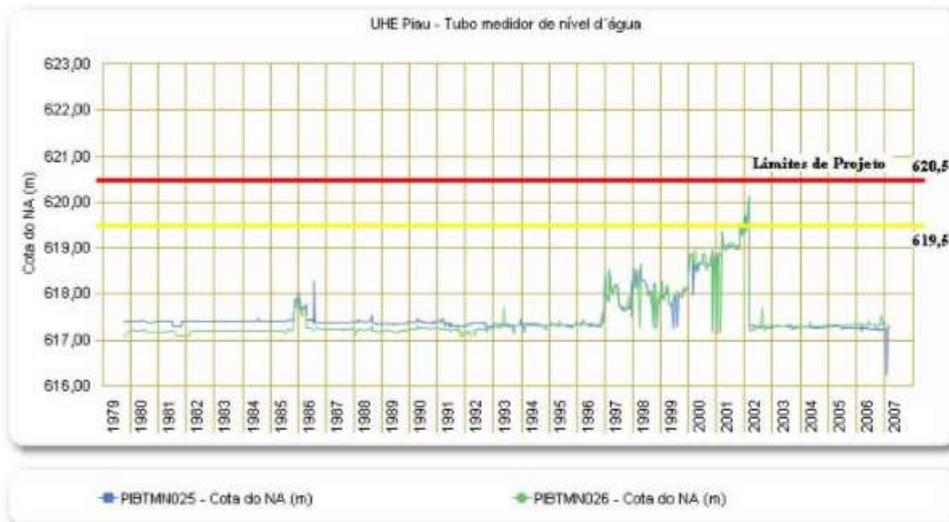


Figura 40: Gráfico de Monitoramento com limites pré-estabelecidos.

Fonte: (FUSARO, 2007)

Segundo Veloso (2007), um modelo criado em 2002 denominado de DW3D foi utilizado como referência para a preparação de *cartas de risco* ao cisalhamento das estruturas de barramento da UHE Guilman-Amorim. As variações de subpressões nas fundações das estruturas foram obtidas através da simulação da colmatação dos drenos, por efeito, por exemplo, da carbonatação e da proliferação de ferrobactérias. Estas *cartas de risco* permitiram que a equipe de operação da Usina pudesse monitorar a estabilidade ao cisalhamento das estruturas da barragem, em função das leituras piezométricas, e decidir, caso necessário, pela limpeza e desobstrução dos drenos na fundação. Este modelo incorpora a geometria real do sistema de drenagem subsuperficial da barragem e as propriedades dos materiais de fundação, representadas pelos seus tensores de permeabilidade. Este modelo, desenvolvido através do Método dos Elementos Finitos, permite que sejam realizadas análises de fluxo completas para as fundações da barragem, com a consequente obtenção de potenciais, gradientes, pressões neutras, velocidades e vazões em qualquer ponto das fundações das estruturas.

TABELA 11 – Níveis d'água adotados para a estrutura da barragem e vertedouro da Usina de Guilman Amorim, Veloso (2007).

CARTA DE RISCO - ESTRUTURAS DO BARRAMENTO DE GUILMAN AMORIM			
Barragem - Seção Instrumentada A-A			
Piezômetro	Atenção Normal	Alerta	Emergência
PW110	PW110 < 488,94	488,94 < PW110 < 490,52	PW110 > 490,52
PW111	PW111 < 476,81	476,81 < PW111 < 481,36	PW111 > 481,36
PW112	PW 112 < 475,33	475,33 < PW112 < 478,68	PW112 > 478,68
Vertedouro - Seção Instrumentada B-B			
Piezômetro	Atenção Normal	Alerta	Emergência
PW207	PW207 < 488,76	488,76 < PW207 < 490,03	PW207 > 490,03
PW208	PW208 < 475,11	475,11 < PW208 < 479,30	PW208 > 479,30
PW209	PW209 < 474,03	474,03 < PW209 < 477,12	PW209 > 477,12

De acordo com Enji Sun *et al.* (2012), para melhorar a segurança das barragens, o monitoramento deve estar associado a um sistema de pré-alarme, tailings dam monitoring and pre-alarm system (TDMPAS), baseado na Internet e dados armazenados em uma nuvem de computação, funcionando em tempo real o monitoramento da linha saturada e a deformação da barragem.



Figura 41: Monitoramento remoto.

Fonte: (Enji Sun et al., 2012)

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Estudo de Caso – Barragem do Azul

A Mina de Manganês está localizada no Município de Parauapebas, no sudeste do estado do Pará, dentro da Floresta Nacional de Carajás, que se situa entre os vales dos rios Itacaiúnas e Parauapebas, o empreendimento dista, aproximadamente, 37 km do Núcleo Urbano de Carajás e 62 km da cidade de Parauapebas, conforme mostra a figura 42.

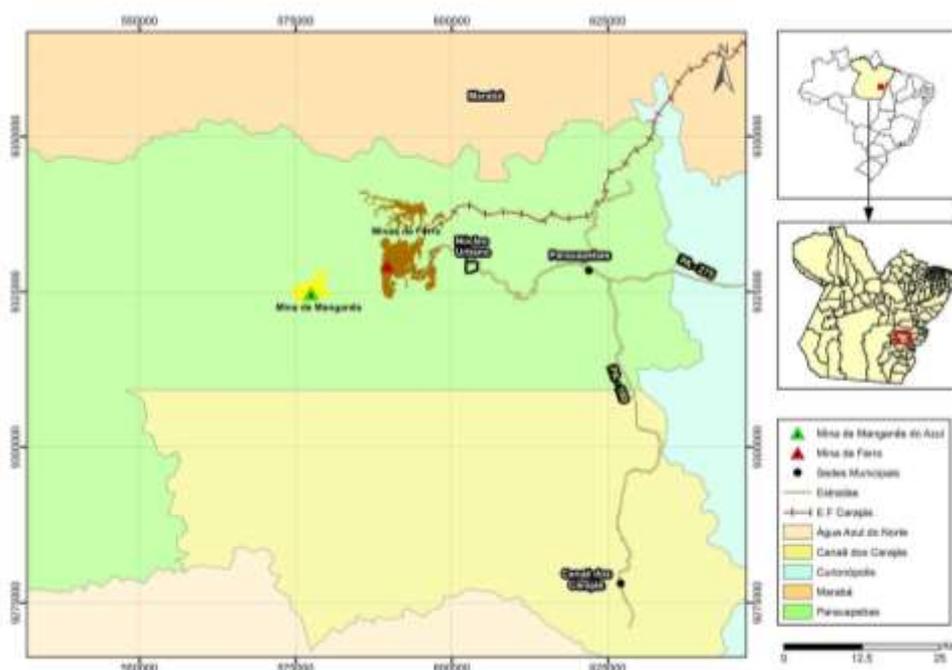


Figura 42: Localização da Mina de Manganês.

Fonte: (FERRARI, 2012)

A finalidade da barragem do Azul é a contenção de rejeitos provenientes da Mina do Manganês do Azul, citada anteriormente, sendo seu arranjo geral composto pela barragem principal de terra fechando o vale e um sistema extravasor principal de superfície livre posicionada na ombreira direita (Figura 43).



Figura 43: Foto Aérea da barragem.

Fonte: (Acervo Próprio, 2016)

A fundação da barragem é composta por quatro tipos de solos:

- Solos colúvio-lateríticos: natureza silto-argilosa com fragmentos lateríticos que recobrem os solos residuais;
- Solos colúvio-aluvionares: em geral areno-siltosos podendo ocorrer com características argilosas;
- Solos aluvionares: possuem espessura máxima de 6,0 m, sobreposta por camada existente de argila orgânica de cor preta e areia média a grossa. Possuem características geotécnicas desfavoráveis;
- Embasamento local: formado pelo solo residual/saprolítico que ocorre a profundidade, variando de 10 a 20 m na ombreira esquerda e mais superficialmente na direita, apresentando características adequadas de resistência e permeabilidade.

A figura 44 mostra a delimitação das áreas de acordo com o tipo de uso de solo na região da barragem em estudo. A barragem inicial foi construída em 1995, do tipo homogênea de terra e constituída de maciço de solo argiloso compactado, após o 1º alteamento da barragem em 2012, a estrutura atualmente apresenta coroamento da crista na Elevação 501,0 m e 6,0 m de largura, altura máxima de 32,0 m, inclinação dos taludes de jusante de 1V:2H e do talude montante de 1V:2,5H. O alteamento executado em 2012 foi pelo

método de jusante e teve início na metade da crista da barragem inicial em diante. O monitoramento da barragem é realizado atualmente por 86 instrumentos de diferentes tipos, conforme apresentado na tabela 12.

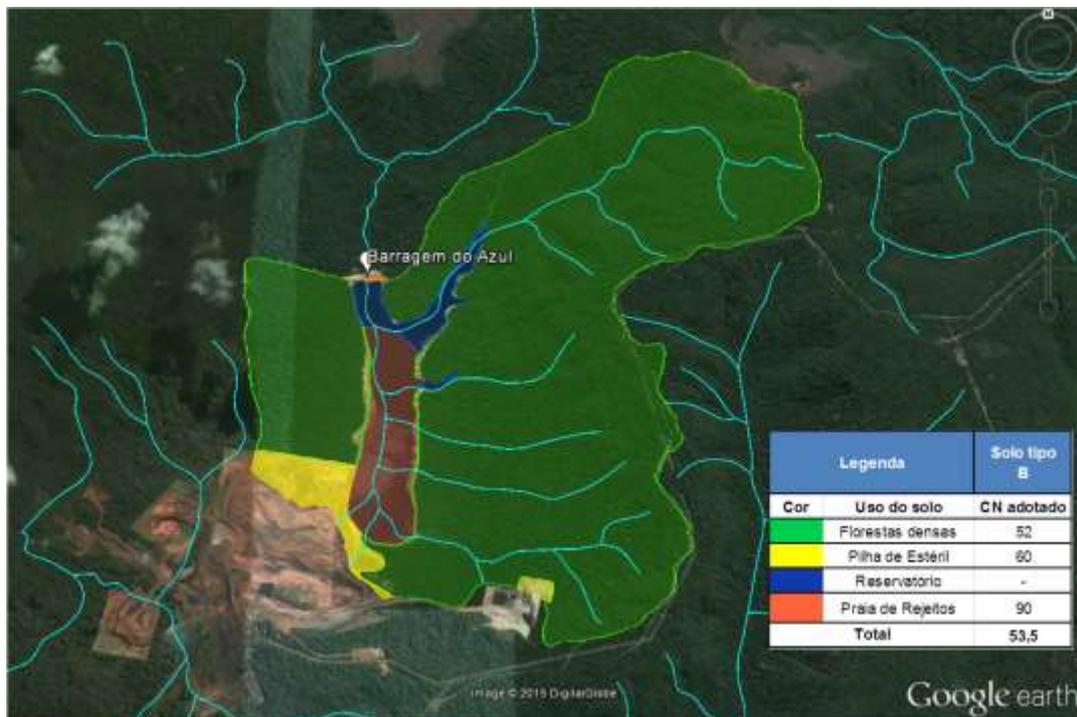


Figura 44: Uso do solo na bacia hidrográfica.

Fonte: (GOOGLE EARTH, 2014)

Tabela 12: Plano de Instrumentação da Barragem.

Instrumentação	
Tipo de Instrumento	Quantidade
Régua Reservatório	1
Prismas	17
Medidor de Vazão	2
Piezômetro	42
Indicador de Nível de Água	15
Inclinômetro	2
marco Superficial	7

O sistema extravasor da barragem encontra-se na ombreira direita e é constituído por um vertedouro, um canal de aproximação e uma bacia de dissipação, seguem os detalhes do sistema:

- Vertedouro com canal de entrada na El. 497,0 m do tipo superfície livre com 5,0 m de largura, soleira da ogiva na El. 498,0 m, escavado em solo na ombreira direita, com muros laterais de 2,5 m de altura;
- Canal de aproximação da etapa inicial prolongado até a El. 495,0 m, em seção trapezoidal de 6,0 m de largura na base, revestido em concreto, soleira vertente, com taludes naturais de 1V:1H, com muros laterais em concreto armado com 2,5 m de altura, que interliga o reservatório com o vertedouro. Este canal está conectado a ogiva no vertedouro;
- Bacia de dissipação na extremidade inferior do canal de aproximação também construída em concreto, com fundo na El. 469,7 m, com largura de 5,0 m, extensão de 22,0 m e muros laterais com 6,1 m de altura.

A figura 45 mostra um gráfico com a seção típica e a curva de capacidade de descarga do extravasor da barragem do azul.

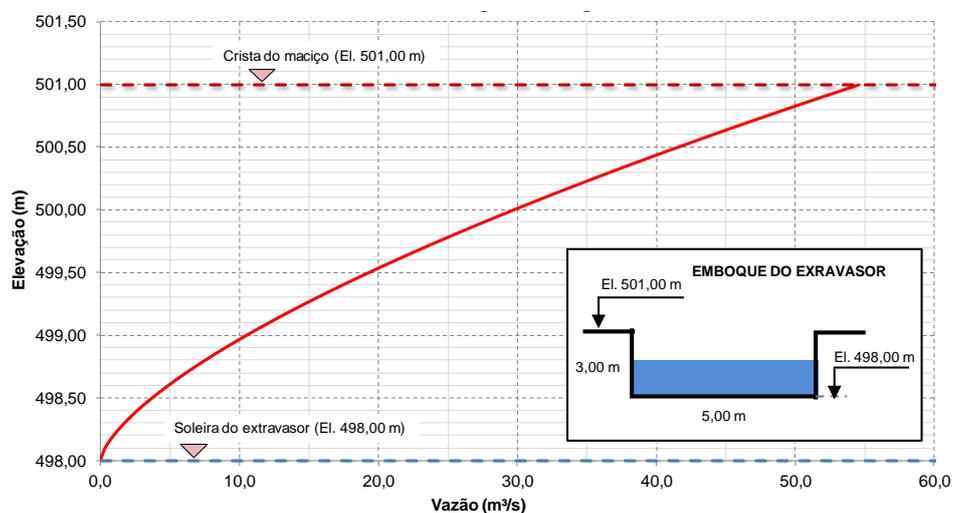


Figura 45: Extravasor (Curva de descarga)

Fonte: (PIMENTA, 2015)

O sistema de drenagem interna da barragem é constituído por dois dispositivos, um filtro inclinado para jusante interligado ao tapete horizontal, tipo *sanduíche*, e na extremidade de jusante da barragem foi projetado um dreno de pé feito com enrocamento interligado ao tapete, podendo ser melhor observado

na figura 46. A ficha técnica da barragem é apresentada na tabela 13.

Tabela 13: Ficha Técnica da barragem

DADOS TÉCNICOS	BARRAGEM
Finalidade	Contenção de rejeitos
Cota atual da crista (m)	501,00
Comprimento atual da Crista (m)	305,00
Altura atual da barragem (m)	32,00
Área atual do reservatório (m ²)	1.990.675,00
Volume Atual do reservatório (m ³)	12.517.282,37
Volume de água atual do reservatório (m ³)	3.258.872,00
Borda Livre (m)	3,00
NA Máximo Operacional (m)	498,00
Cheia de projeto	10.000 anos

As figuras 46 a 48 mostram a planta do reservatório, a distribuição dos instrumentos na barragem de terra e uma seção principal da barragem, respectivamente.

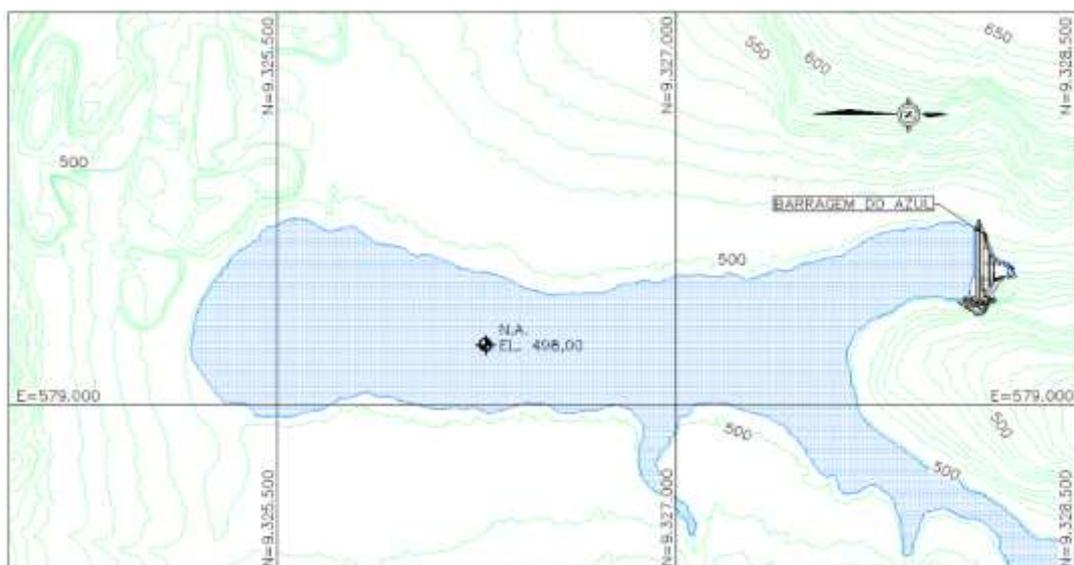


Figura 46: Planta do reservatório.



Figura 47: Distribuição dos Instrumentos na Barragem.

3.2 Definição da seção crítica da Barragem

Para as análises de estabilidade e percolação do maciço foi necessária a definição de uma seção crítica, ou seja, aquela seção transversal que melhor representa as características atuais da barragem. Para o estudo, a seção crítica escolhida foi a seção principal, corte A-A, apresentado na figura 47, pois esta seção representa a maior altura encontrada na barragem passando pelo eixo principal, possui vários instrumentos de análise disponíveis e levando-se em consideração a homogeneidade da fundação ao longo do maciço da barragem, conforme figura 49.

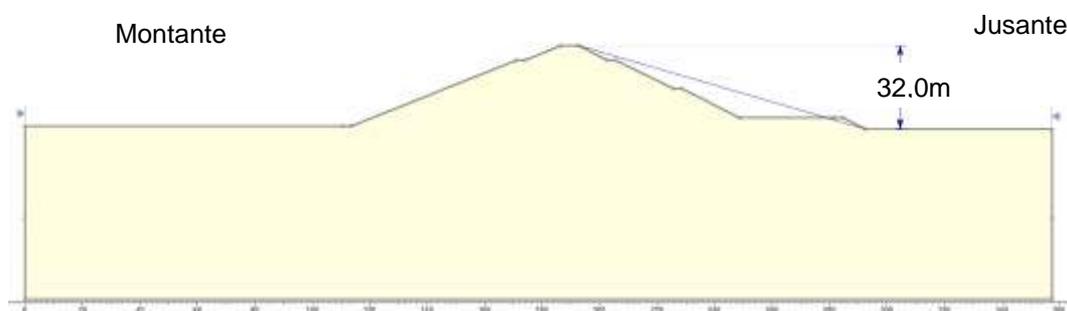


Figura 49: Seção Principal da Barragem.

3.3 Modelagem da Seção no Software Slide 6.0

Em função da proposta de elaboração dos níveis de controle para a barragem, existe a necessidade anterior de se fazer a verificação da estabilidade do maciço e do estabelecimento de valores de controle determinísticos para as medidas de cada um dos instrumentos instalados na seção crítica da barragem, visando uma melhoria na visualização e interpretação dos dados. Conforme apresentado no capítulo 2.9, a elaboração da denominada *carta de risco* é importante para determinar os níveis de controle de instrumentação afim de delimitar 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 avaliação de segurança da barragem.

Para se verificar a estabilidade do maciço no *software* comercial slide 6.0 se faz necessária a modelagem da seção crítica escolhida utilizando se os

mapeamentos geológicos, sondagens, ensaios de campo e análises laboratoriais, pois através destes estudos e ensaios são determinados a litologia, os parâmetros de resistência e permeabilidade do solo.

As informações disponíveis sobre os parâmetros dos materiais de construção e fundação da barragem foram obtidas na verificação dos relatórios de projeto da barragem de construção do maciço e principalmente nos estudos de alteamento, em 2012, para o qual foram executadas sondagens à percussão no maciço, com ensaio de SPT e instalação de piezômetros nos furos realizados. Entre 2016 e 2017 também foram coletados blocos indeformados e realizadas novas sondagens na barragem para execução de ensaios de laboratório, ensaios de infiltração e confirmação das litologias e parâmetros apresentados nos relatórios de projeto, conforme apresentado na tabela 14.

Tabela 14: Relação de Sondagens realizadas na Barragem do Azul

INSTRUMENTOS	SONDAGENS	DATA DE EXECUÇÃO		PROF. (m)	N.A. (m)	LOCAL	SITUAÇÃO
		INÍCIO	FIM				
OS 02							
SONDAGENS ROTATIVA / MISTA							
PZ-OE-01	SR-01	28/11/2016	02/12/2016	21,60m	4,39	OMBREIRA ESQUERDA	Concluído
PZ-OE-02	SR-02	02/12/2016	06/12/2016	16,20m	12,05	OMBREIRA ESQUERDA	Concluído
PZ-OE-03	SR-03	14/12/2016	16/12/2016	20,80m	11,98	OMBREIRA ESQUERDA	Concluído
PZ-OE-04	SR-04	16/12/2016	19/12/2016	16,05m	12,36	OMBREIRA ESQUERDA	Concluído
PZ-OE-05	SR-05	20/12/2016	21/12/2016	20,75m	14,17	OMBREIRA ESQUERDA	Concluído
PZC-A-01	SM-01	10/01/2017	10/01/2017	4,45m	3,12	BERMA	Concluído
PZC-F-01	SR-06	11/01/2017	11/01/2017	8,00m	SECO	BERMA	Concluído
PZC-A-02	SM-04	23/01/2017	23/01/2017	9,00m	6,56	BERMA	Concluído
PZC-T-02	SM-03	17/01/2017	27/01/2017	14,45m	SECO	BERMA	Concluído
PZC-F-02	SR-07	12/01/2017	16/01/2017	17,05m	SECO	BERMA	Concluído
PZC-A-03	SM-06	14/02/2017	15/02/2017	16,50m	14,52	BERMA	Concluído
PZC-T-03	SM-05	16/02/2017	16/02/2017	14,45m	10,36	BERMA	Concluído
PZC-F-03	SR-08	08/02/2017	13/02/2017	20,10m	13,78	BERMA	Concluído
PZC-A-04	SM-08	15/03/2017	15/03/2017	9,45m	7,75	BERMA	Concluído
PZC-T-04	SM-07	14/03/2017	15/03/2017	12,20m	10,21	BERMA	Concluído
PZC-F-04	SR-09	13/03/2017	13/03/2017	14,32m	10,39	BERMA	Concluído
PZC-T-05	SM-09	20/03/2017	20/03/2017	4,29m	SECO	BERMA	Concluído
PZC-F-05	SR-10	17/03/2017	20/03/2017	12,50m	5,69	BERMA	Concluído
INC-01	SM-11	26/01/2017	06/02/2017	50,60m	-	BERMA	Concluído
INC-02	SM-12	23/02/2017	08/03/2017	38,50m	-	BERMA	Concluído

A campanha de sondagens e as amostras retiradas, conforme mostram as figuras 50 e 51, confirmaram a litologia apresentada nos relatórios de projeto

de alteamento da barragem do Azul, assim como, as análises laboratoriais confirmaram a especificação dos parâmetros adotados.



Figura 50: Sondagem na Crista da Barragem, 2017.



Figura 51: Caixa de Amostra de uma sondagem no maciço, 2017.

Portanto, como não houveram variações significativas nos resultados laboratoriais apresentados na campanha de sondagem 2016/2017, os parâmetros de resistência representativos da barragem apresentados nos relatórios de projeto foram mantidos para as análises de percolação e estabilidade da barragem apresentadas neste trabalho, conforme Tabela 14. Os coeficientes de permeabilidade dos materiais de fundação e do aterro foram

também checados com base nos ensaios de infiltração realizados durante a campanha de investigação e instrumentação da barragem, sendo o embasamento constituído de solos do tipo residual e saprolítico, apresentando permeabilidades variáveis entre 10^{-4} a 10^{-6} cm/s (tabela 15).

Tabela 14: Parâmetros dos Materiais (FERRARI, 2012).

MATERIAL	γ (kN/m ³)	RESISTÊNCIA CISALHAMENTO		
		c'(kg/cm ²)	ϕ' (°)	B barra (%)
Aterro - Etapa inicial	18,0	0,25	26	0
Aterro - Etapa 1º alteamento	18,0	0,20	26	0
Enrocamento	22,0	0,00	40	0
Filtros e Transição	18,0	0,00	32	0
Fundação - Camada 1	18,0	0,20	25	0
Fundação - Camada 2	19,0	0,50	30	0

Tabela 15: Coeficientes de Permeabilidade (FERRARI, 2012).

Material Name	Color	Model	K _S (m/s)	K ₂ /K ₁	K ₁ Angle (deg)	Soil Type
Aterro Inicial		Simple	1e-007	10	0	General
Aterro Alteamento		Simple	1e-006	10	0	General
Fundação		Simple	1e-008	1	0	General
Filtro		Simple	0.0001	1	0	General
Enrocamento		Simple	1	1	0	General
Fundação 2		Simple	1e-008	1	0	General

Para a modelagem da seção crítica no software comercial Slide 6.0, foram utilizados os dados de mapeamento geológico e sondagens para determinação das camadas dos materiais de fundação, filtro e aterro, em seguida, são inseridos os parâmetros de peso específico, coesão, ângulo de atrito, permeabilidade dos materiais e critérios de análise que foram utilizados, conforme mostram as figuras 52 a 54.

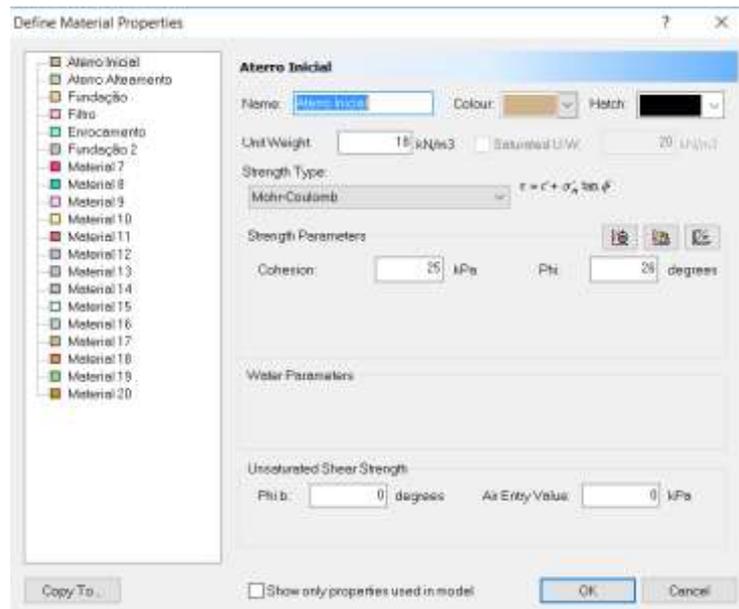


Figura 52: Inserção dos parâmetros de resistência e critérios para análise de estabilidade no software Slide 6.0

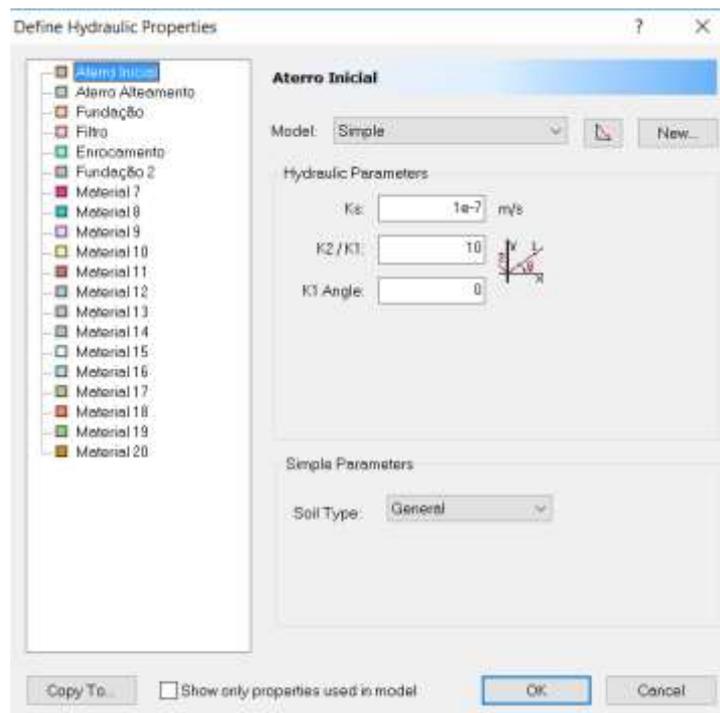


Figura 53: Inserção dos parâmetros de permeabilidade e critérios para análise de percolação no software Slide 6.0

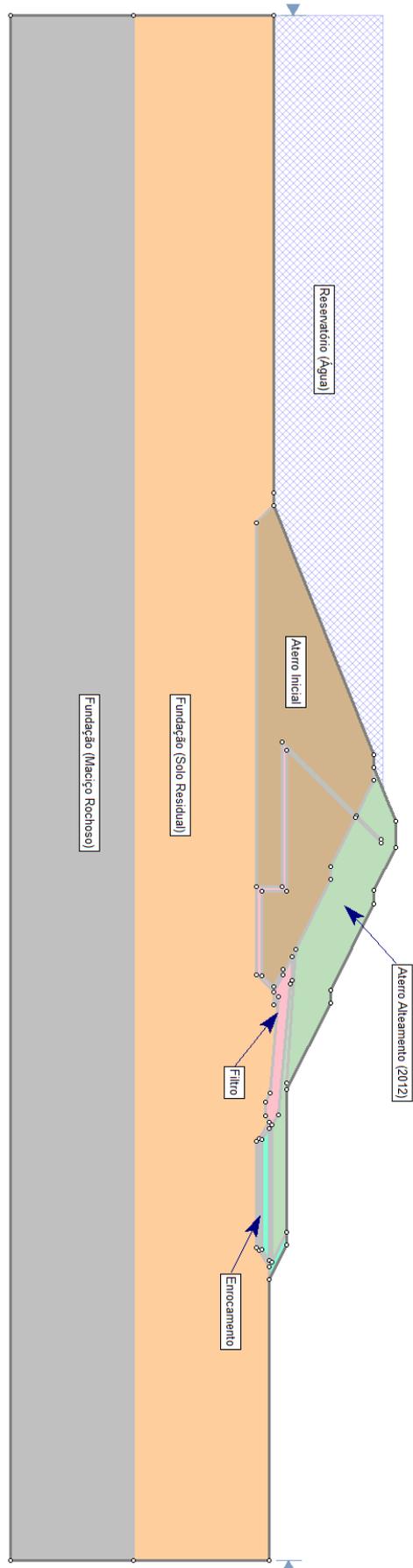


Figura 54: Seção geológica modelada no software Slide 6.0

3.4 Análise de Estabilidade e Percolação

Para que seja realizada a análise de estabilidade e percolação, após a modelagem da seção e inserção dos parâmetros de resistência e permeabilidade dos materiais que compõe a seção crítica da barragem, é importante que se faça a escolha dos métodos e critérios que serão utilizados para as análises.

Para a análise de estabilidade, o método de Bishop Simplified (1955) foi o escolhido, sendo o método baseado em equilíbrio limite e o maciço deslocado pelo método de fatias, pois considera-se a superfície de ruptura circular, tendo como hipótese que a resultante das forças é horizontal.

As hipóteses básicas consideradas nos métodos de equilíbrio limite são:

- A superfície de ruptura é bem definida;
- A condição de ruptura da massa de solo é generalizada e incipiente;
- O critério de ruptura de Mohr-Coulomb se satisfaz ao longo da superfície potencial de ruptura;
- O fator de segurança ao longo da superfície de ruptura é único.

Após a definição destes critérios determinou-se a posição da linha freática, ou seja, a posição da coluna de água dentro do maciço, através da leitura dos instrumentos, indicador de nível de água e piezômetros, que compõem a seção crítica escolhida.

A figura 55, mostra a seção crítica escolhida e os instrumentos que melhor representam as condições do nível freático da barragem do azul. Para que fosse determinado o nível freático considerado para a análise de estabilidade, foi feita uma avaliação dos últimos dados de leitura dos instrumentos e determinou-se um valor médio baseado no comportamento histórico de cada instrumento.

Os instrumentos escolhidos são mostrados na figura 58, de acordo com sua localização geográfica no maciço da barragem e sua nomenclatura corresponde a barragem no qual o instrumento pertence.

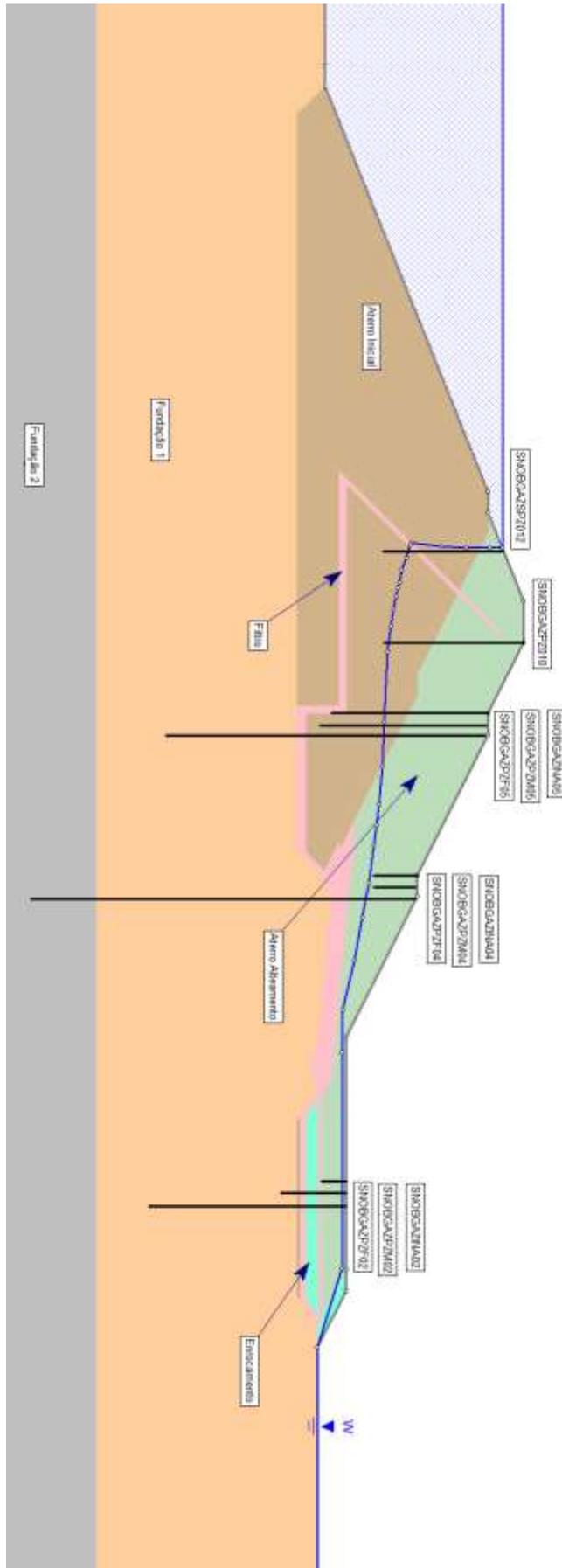


Figura 55: Seção modelada para análise de estabilidade.

Conforme verificou-se os instrumentos que compõem a seção crítica da barragem e o histórico de leituras referente ao ano de 2017 estão apresentados nas tabelas 16 e 17.

Tabela 16: Leituras dos Instrumentos em 2017

Instrumentos	SNOBGS PZ012	SNOBGP Z010	SNOBGA ZINA02	SNOBGAZ PZM02	SNOBGAZ PZF02	SNOBGAZ INA04
Data Leitura	LEITURA (m)	LEITURA (m)	LEITURA (m)	LEITURA (m)	LEITURA (m)	LEITURA (m)
25/01/17	14,08	19,58	2,72	1,70	0,95	4,60
22/02/17	13,63	19,57	2,72	1,70	0,95	4,59
29/03/17	13,77	seco	2,75	1,67	0,90	4,57
28/04/17	13,56	seco	2,74	1,78	0,92	4,70
30/05/17	12,92	seco	2,71	2,05	2,14	4,88
28/06/17	13,19	seco	2,73	2,67	2,20	4,91
26/07/17	13,96	19,62	2,76	1,73	2,20	4,99
30/08/17	13,40	seco	2,73	1,70	2,20	4,96
27/09/17	13,43	seco	2,74	1,71	2,20	4,96
27/10/17	13,81	19,64	2,69	1,68	2,20	4,98
29/11/17	13,99	seco	2,69	1,67	2,20	4,89
21/12/17	13,99	seco	2,69	1,67	2,20	4,89

Tabela 17: Leituras dos Instrumentos em 2017

Instrumentos	SNOBGAZ PZM04	SNOBGAZ PZF04	SNOBGAZ INA05	SNOBGAZ PZM05	SNOBGAZ PZF05
Data Leitura	LEITURA (m)				
25/01/17	seco	7,38	18,28	17,27	14,85
22/02/17	seco	7,32	18,17	17,20	14,76
29/03/17	seco	7,85	18,40	18,31	15,45
28/04/17	seco	9,72	18,61	18,40	15,39
30/05/17	seco	7,72	18,27	18,21	15,20
28/06/17	seco	7,93	18,44	18,20	15,30
26/07/17	seco	8,03	18,73	18,39	15,50
30/08/17	seco	8,02	18,88	18,47	15,34
27/09/17	seco	8,02	18,89	18,42	15,38
27/10/17	seco	8,03	18,90	18,45	15,50
29/11/17	seco	8,03	18,85	18,23	15,44
21/12/17	seco	8,03	18,85	18,23	15,44

Para análise de percolação foi utilizado o método *Steady State* FEA, conhecido como elementos finitos, que consiste na criação de uma malha triangular para interpolação dos parâmetros e definição das condições de contorno para cada nó delimitando-se a região de solo onde ocorre o fluxo, neste caso têm-se dois tipos de fronteiras, as conhecidas e as desconhecidas. Como locais permeáveis foram definidos o talude de montante até o nível máximo de água como entrada e a saída da fundação da barragem nos pés do talude.

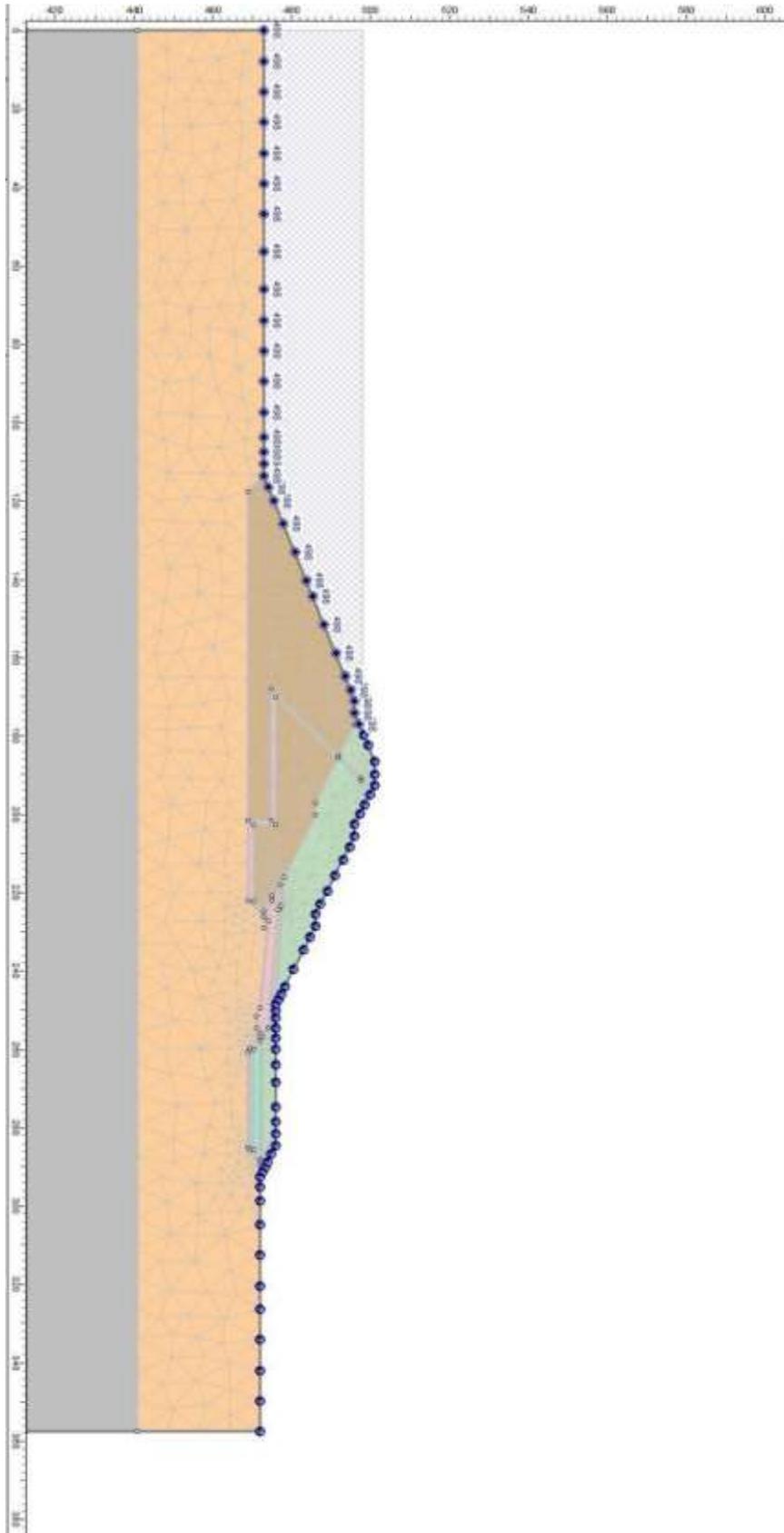


Figura 56: Modelagem da seção de percolação utilizando-se Elementos Finitos

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Análise de Estabilidade e Percolação

Para a análise de estabilidade utilizando-se os valores considerados para os parâmetros geotécnicos, apresentados na tabela 14 e níveis de água e piezométrico apresentados nas tabelas 16 e 17, obteve-se o Fator de Segurança determinístico de 1,60, conforme mostrado na figura 57. Observa-se que a superfície crítica de ruptura se desenvolve praticamente ao longo dos maciços do primeiro e segundo alteamento tangenciando a camada de fundação.

Para a análise de percolação utilizando-se os parâmetros de permeabilidade apresentados na tabela 15, obteve-se o Fator de Segurança determinístico de 1,79. Observa-se que a superfície crítica de ruptura e a linha freática traçada pelo *software* comercial slide 6.0 para a análise de percolação é muito semelhante a linha freática apresentada na análise de estabilidade baseada na leitura dos instrumentos da barragem, conforme figuras 57 e 58.

As análises de estabilidade e percolação realizadas apresentaram resultados relacionados a um fator de segurança superior a 1,5, atendendo à norma NBR 13028 (2017) para a situação de operação da barragem.

Através da análise de percolação também foi possível à verificação da não existência de gradientes hidráulicos elevados e zonas de concentração de fluxo sujeitas ao fenômeno denominado como *piping*, iniciado pela decorrência de uma perda de resistência pontual, consistindo desta forma, no carregamento de partículas sólidas pela água em fluxo numa progressão de jusante para montante. Na seção apresentada na Figura 59, somente foram verificados gradientes hidráulicos elevados na porção do talude de montante no início do fluxo de percolação da água pelo maciço da Barragem, porém estes gradientes não representam o risco de carreamento de partículas sólidas, pois se trata de um fluxo descendente para o interior do próprio maciço.

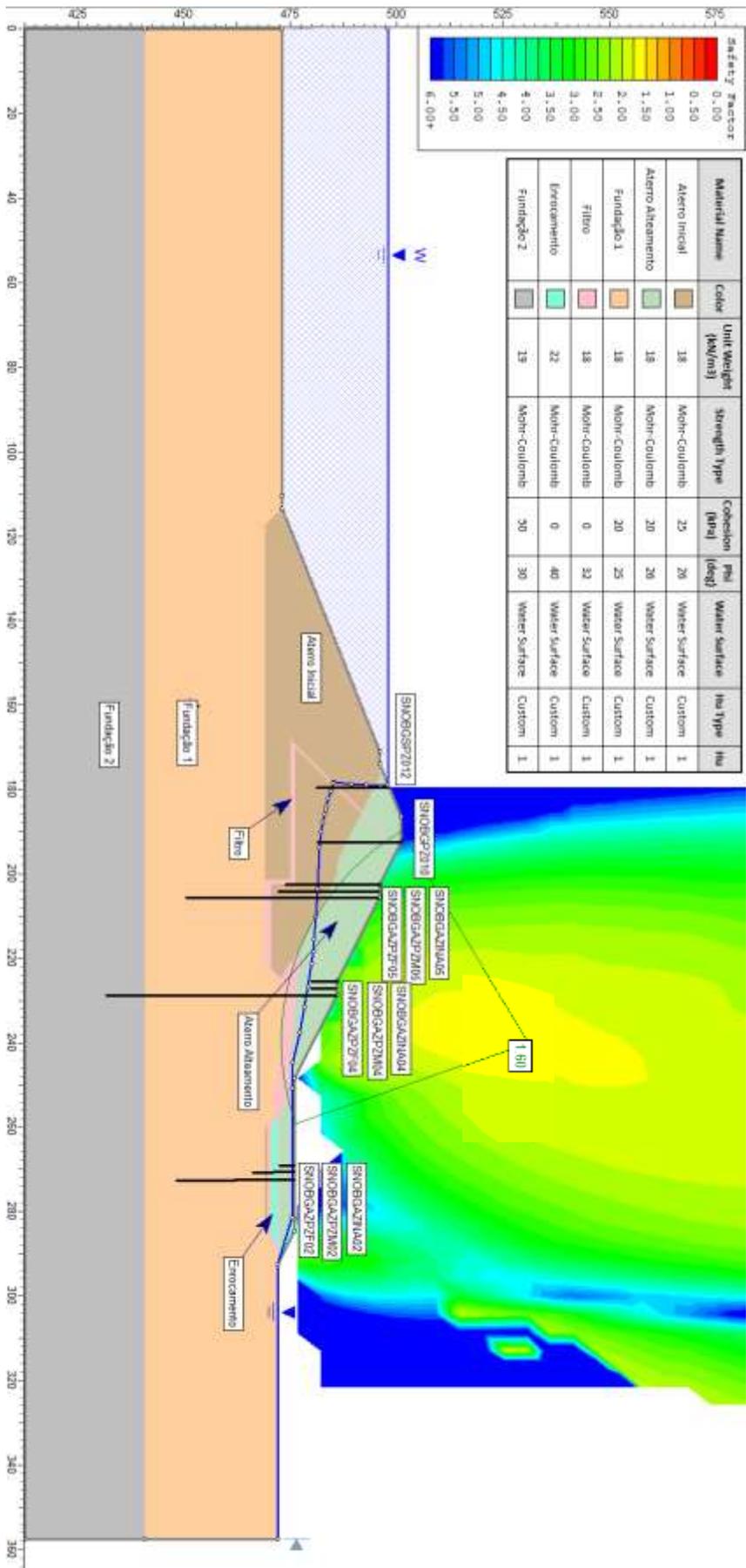


Figura 57: Seção de Estabilidade da Barragem do Azul

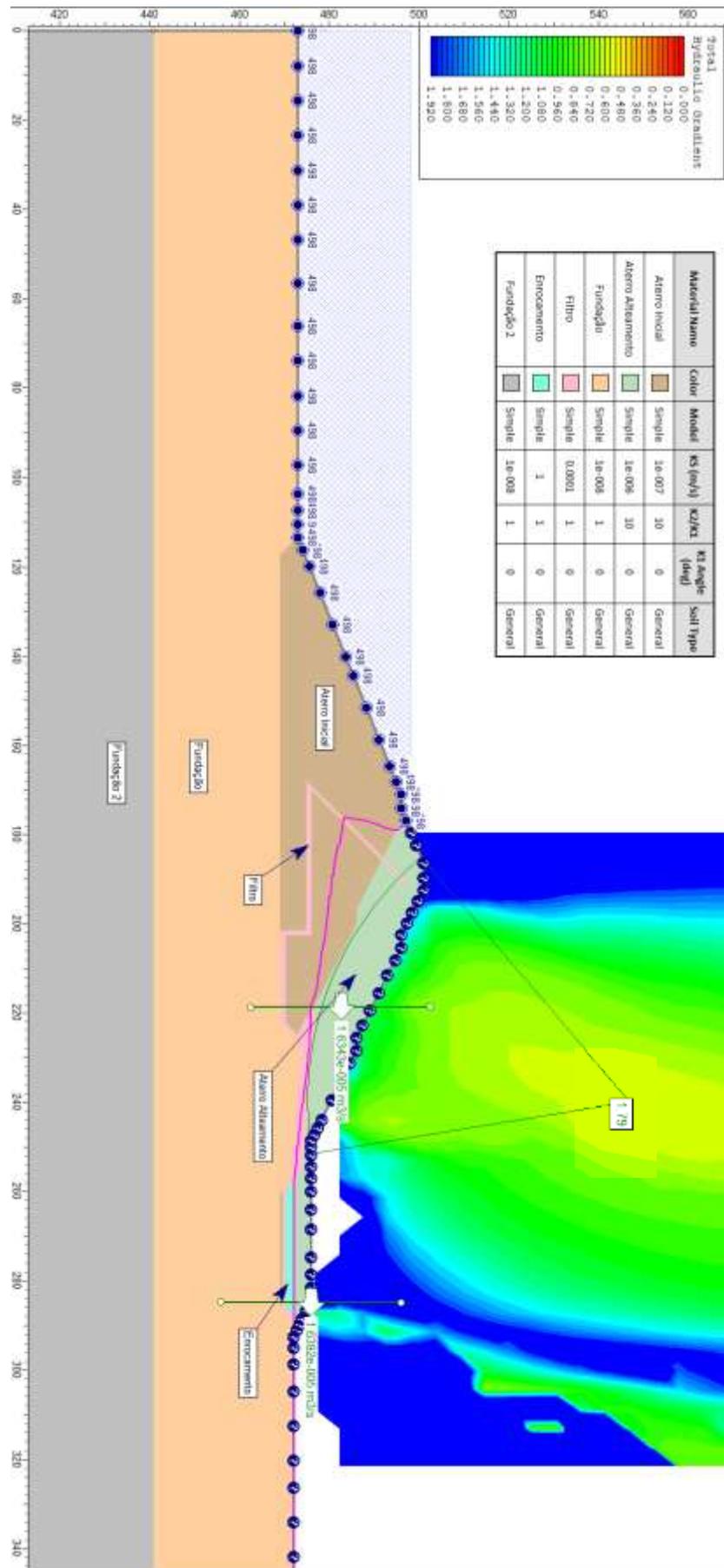


Figura 58: Seção de Análise de Percolação da Barragem do Azul

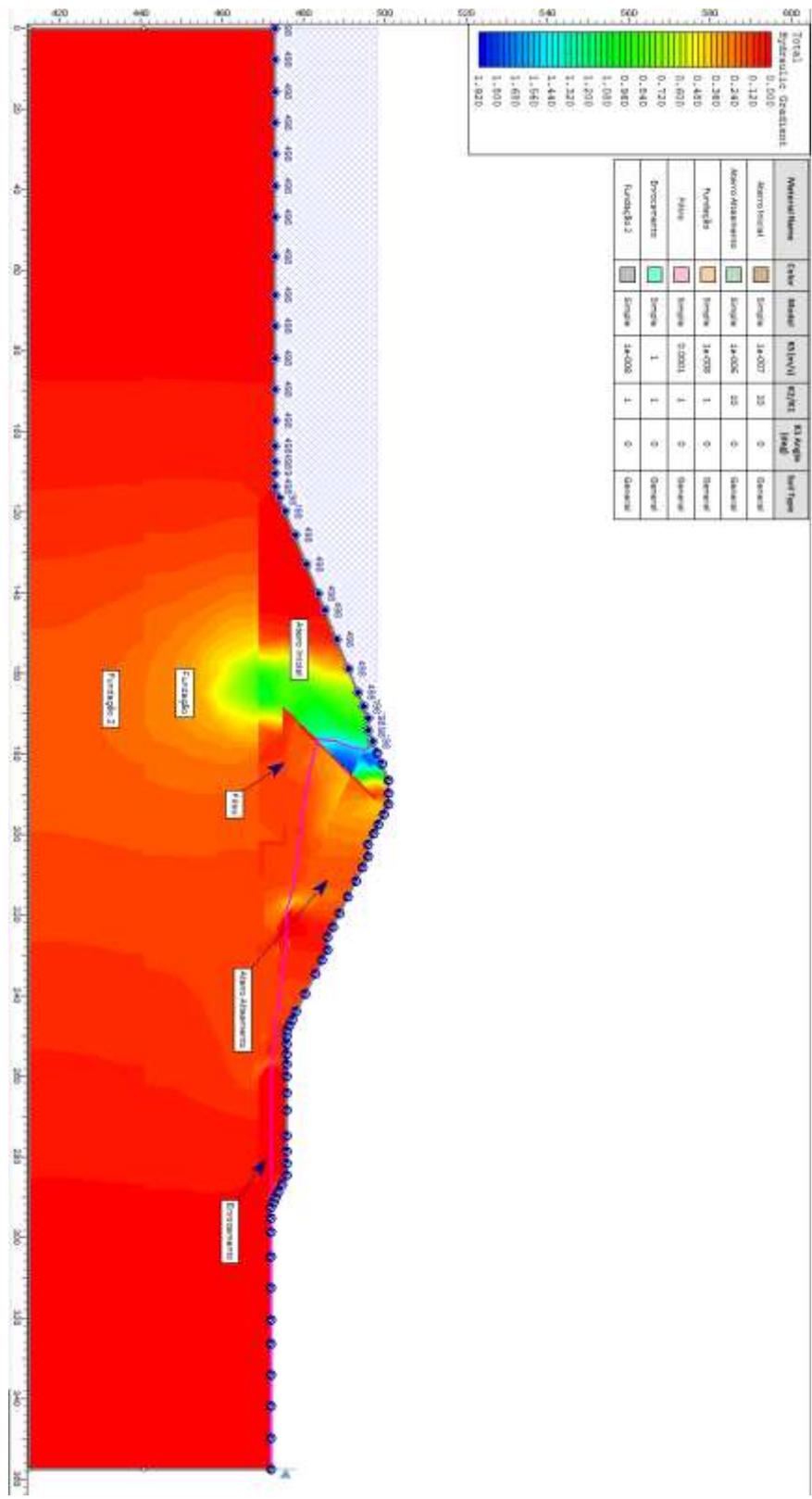


Figura 59: Seção de Análise dos gradientes hidráulicos da Barragem do Azul

4.2 Definição dos Níveis de Controle

Conforme o atendimento das análises aos critérios de segurança estabelecidos pela norma NBR 13028 (2017), a seção utilizada na análise de estabilidade determinística da barragem do Azul foi utilizada para se determinar os níveis de alerta, atenção e emergência dos instrumentos que compõe a seção crítica, simulando-se a elevação da linha freática, até que se atinja os valores limites do fator de segurança estabelecidos pela *Australian National Committee on Large Dams* (1999), para condições normais e saturadas, pois quando se eleva o nível freático de um modelo de barragem de terra, automaticamente têm se uma queda no fator de segurança da barragem.

Desta forma foi possível se estabelecer faixas limites para os níveis de leitura dos instrumentos, onde os níveis que se encontram abaixo da linha freática amarela, são considerados como situação normal. Os níveis encontrados entre a linha freática amarela e à linha freática laranja, são considerados em situação de alerta. Os níveis encontrados entre a linha freática laranja e à linha freática vermelha, são considerados em situação de atenção. Os níveis encontrados acima da linha freática vermelha, são considerados em situação de emergência, conforme figura 60.

Observa-se que a linha freática que passa no pé da barragem não foi alterada durante a simulação, pois a mesma já se encontra muito próxima do limite do aterro impossibilitando a elevação da freática.

Determinando-se as posições da linha freática para cada nível pré-estabelecido, foi possível se determinar os níveis de controle, atenção, alerta e emergência, para cada instrumento que compõe a seção crítica da barragem do Azul, em relação a cota de instalação do instrumento, conforme tabela 18.

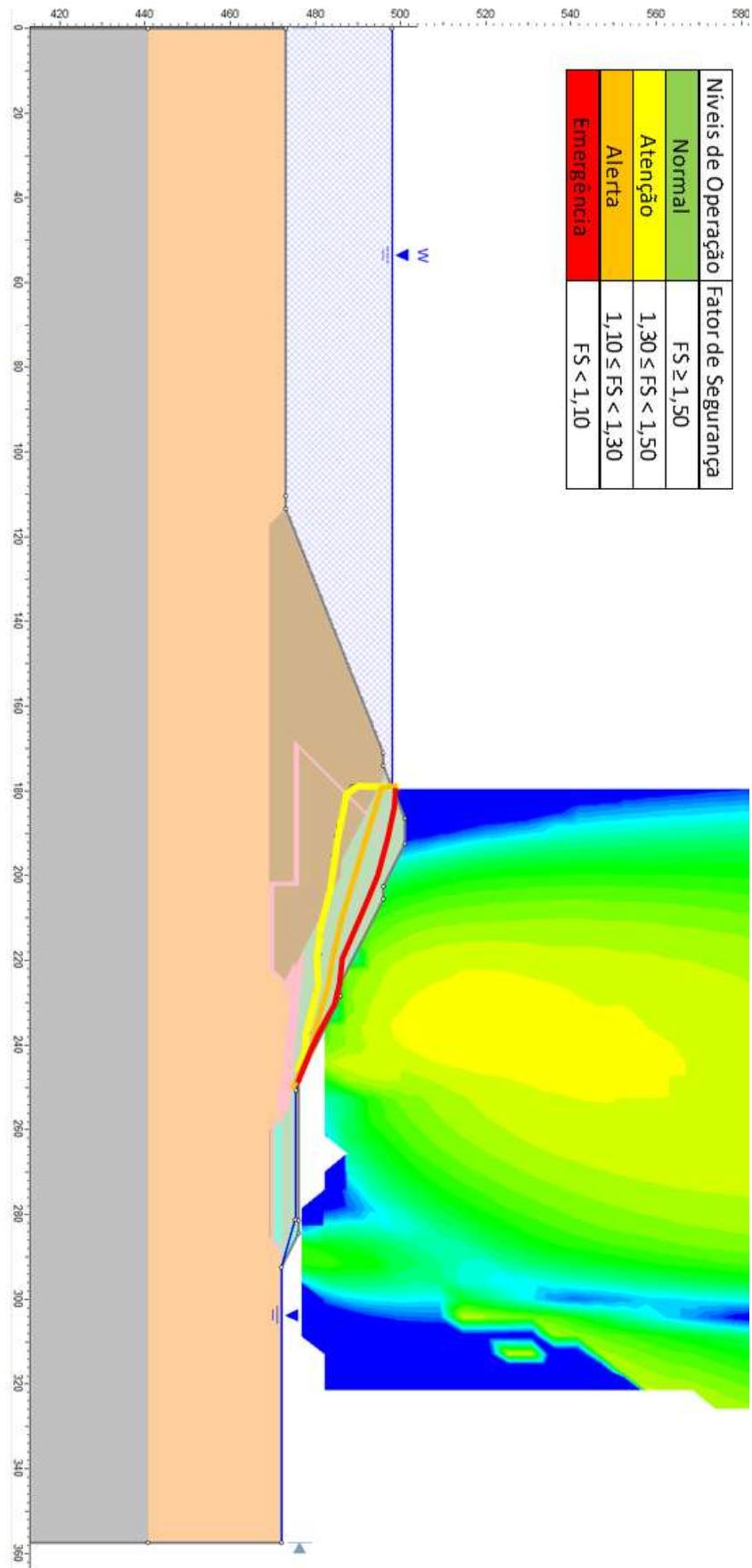


Figura 60: Simulação da elevação do nível freático da Barragem do Azul

Tabela 18: Níveis de Controle dos instrumentos

Instrumento	Cota de Instalação	Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência
SNOBGSPZ012	499,06	492,80	494,90	497,00
SNOBGPZ010	500,92	489,70	492,23	494,75
SNOBGZPZM05	496,30	486,87	489,77	492,17
SNOBGZPZF05	496,30	486,87	489,77	492,17
SNOBGAZINA05	496,30	486,87	489,77	492,17
SNOBGZPZM04	486,85	483,35	484,50	486,00
SNOBGZPZF04	486,85	483,35	484,50	486,00
SNOBGAZINA04	486,85	483,35	484,50	486,00
SNOBGZPZM02	478,44	-	-	478,20
SNOBGZPZF02	478,44	-	-	478,20
SNOBGAZINA02	478,44	477,20	477,70	478,20

Com os níveis de controle já estabelecidos foram montados gráficos, para cada instrumento, considerando a série histórica de leitura utilizando-se dados desde 2011, ano em que ocorreu o início do alteamento da barragem e consequentemente a instalação dos instrumentos, onde os intervalos em branco significam a leitura seca, conforme mostrado nos gráficos de 1 a 11.

A figura 61 apresenta a nomenclatura utilizada para identificação dos instrumentos.

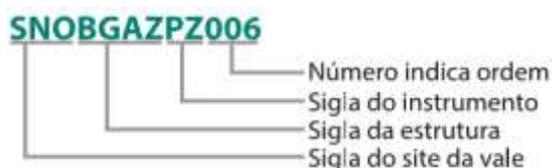


Figura 61: Significado da nomenclatura dos instrumentos da Barragem do Azul.

Gráfico 1: Piezômetro SNOBGSPZ012, Fonte: (Próprio Autor).

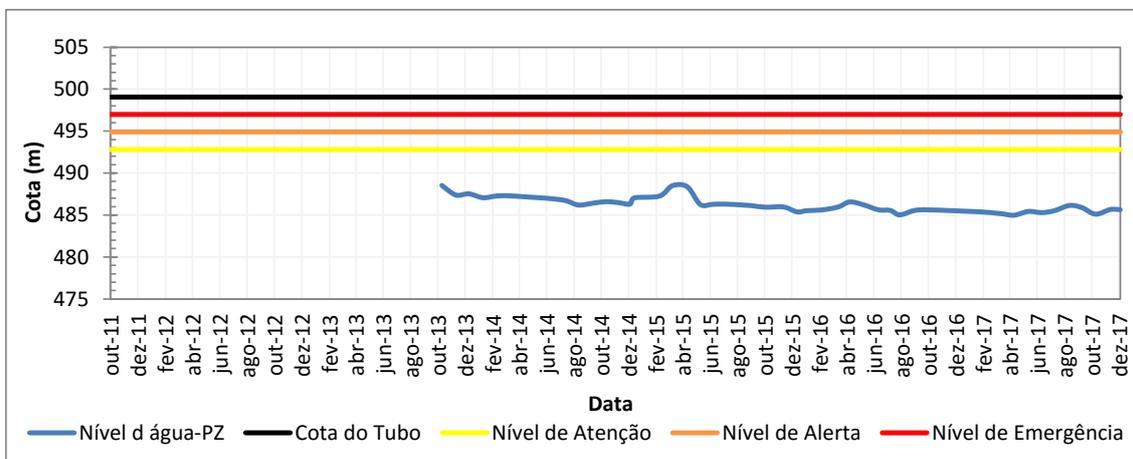


Gráfico 2: Piezômetro SNOBGPZ010, Fonte: (Próprio Autor).

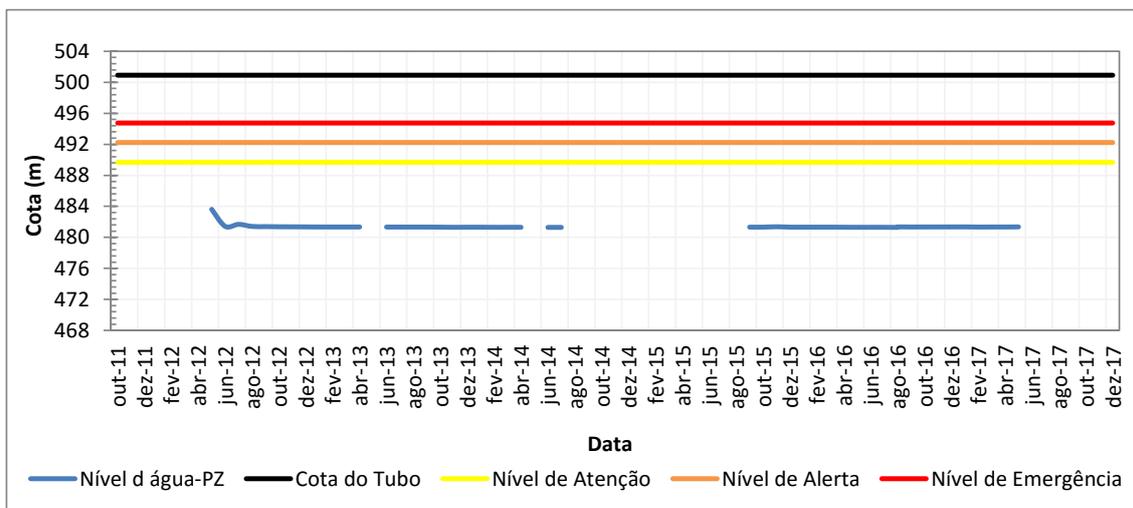


Gráfico 3: Piezômetro SNOBGAZPZM05, Fonte: (Próprio Autor).

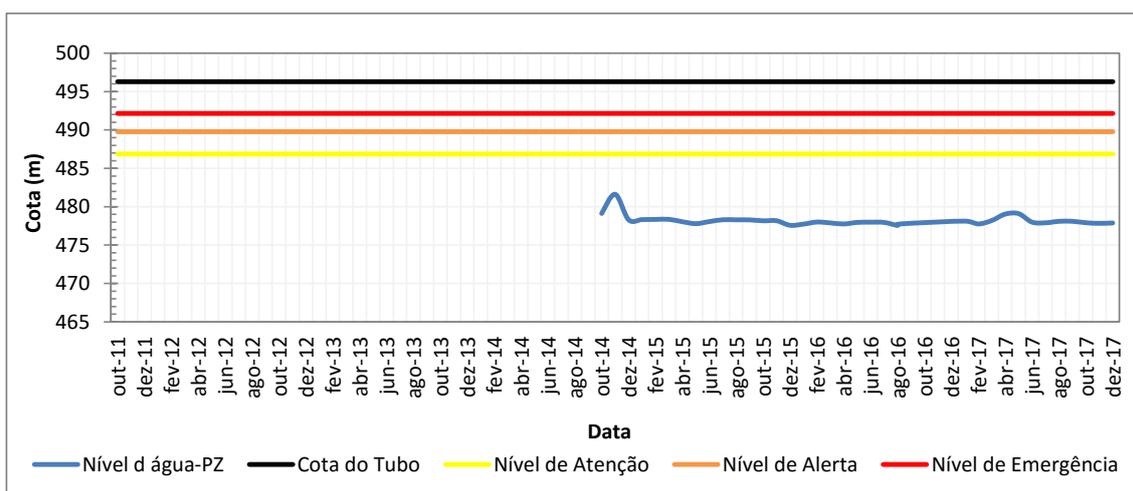


Gráfico 4: Piezômetro SNOBGAZPZF05, Fonte: (Próprio Autor).

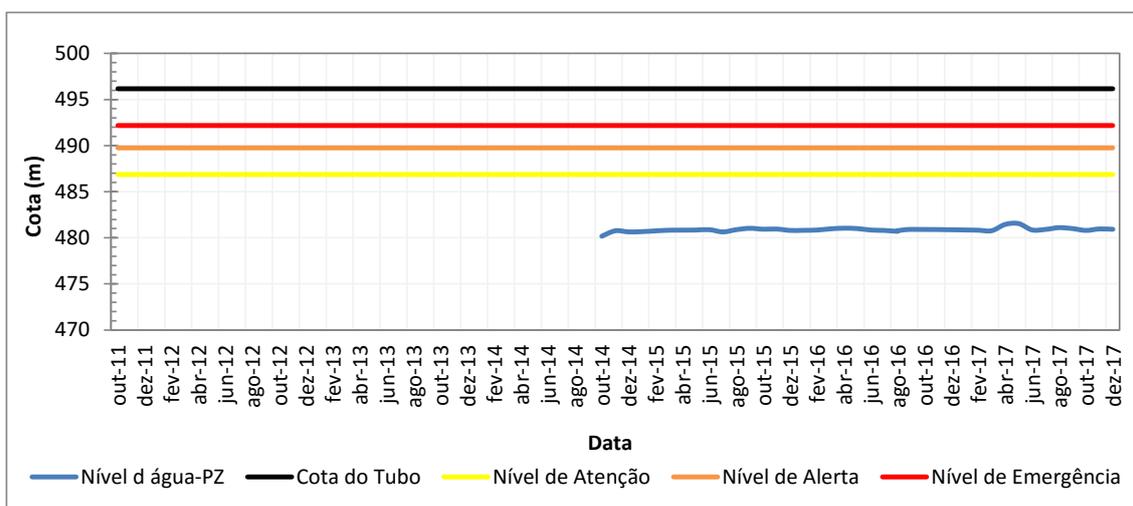


Gráfico 5: Indicador Nível D'água SNOBGAZINA05, Fonte: (Próprio Autor).

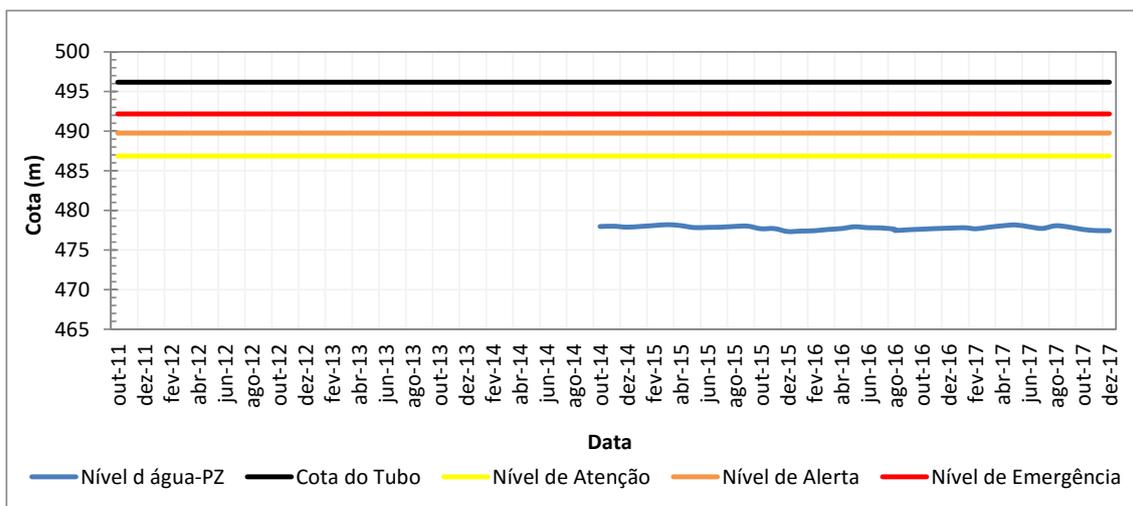


Gráfico 6: Piezômetro SNOBGAZPZM04, Fonte: (Próprio Autor).

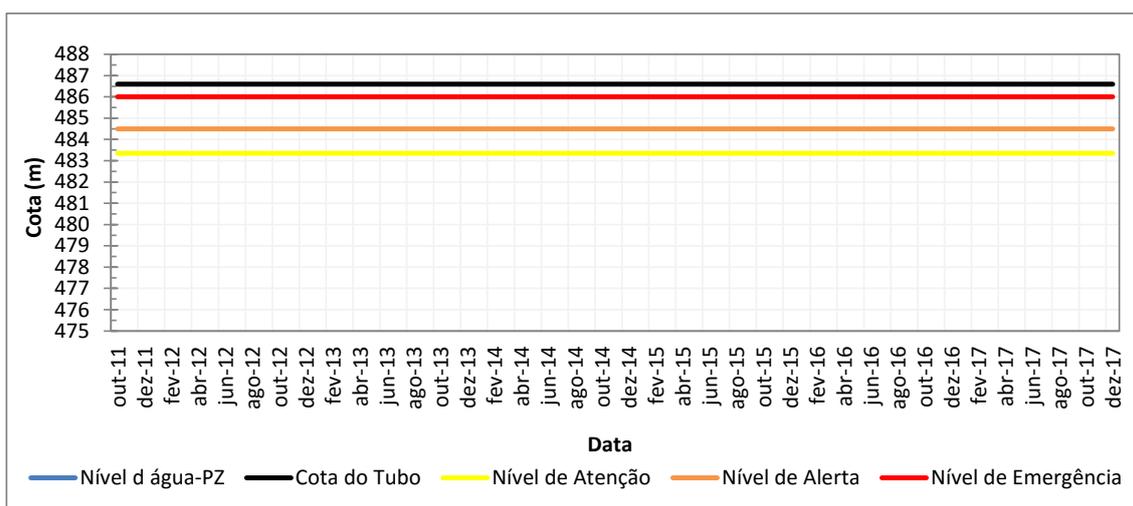


Gráfico 7: Piezômetro SNOBGAZPZF04, Fonte: (Próprio Autor).

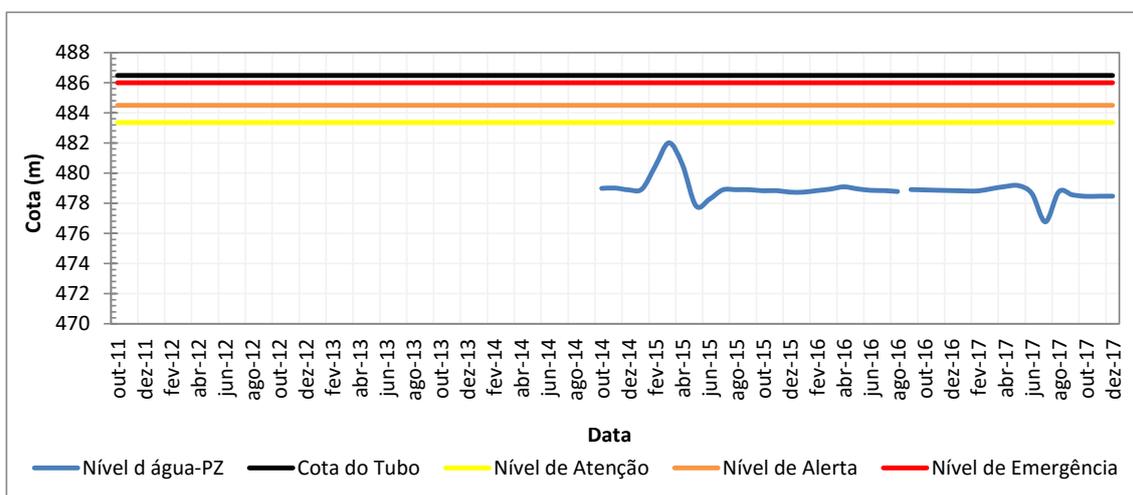


Gráfico 8: Indicador Nível D'água SNOBGAZINA04, Fonte: (Próprio Autor).

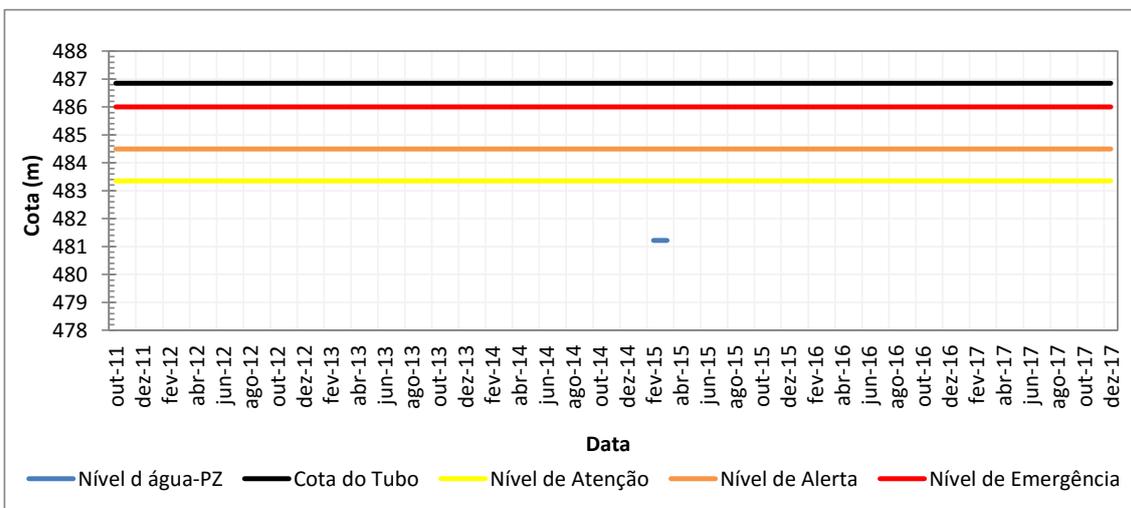


Gráfico 9: Piezômetro SNOBGAZPZM02, Fonte: (Próprio Autor).

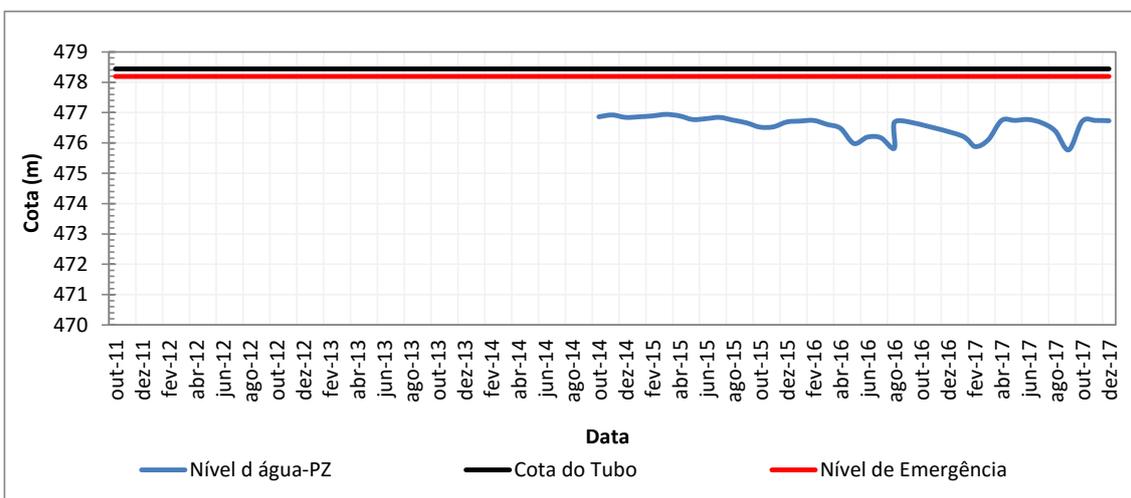


Gráfico 10: Piezômetro SNOBGAZPZF02, Fonte: (Próprio Autor).

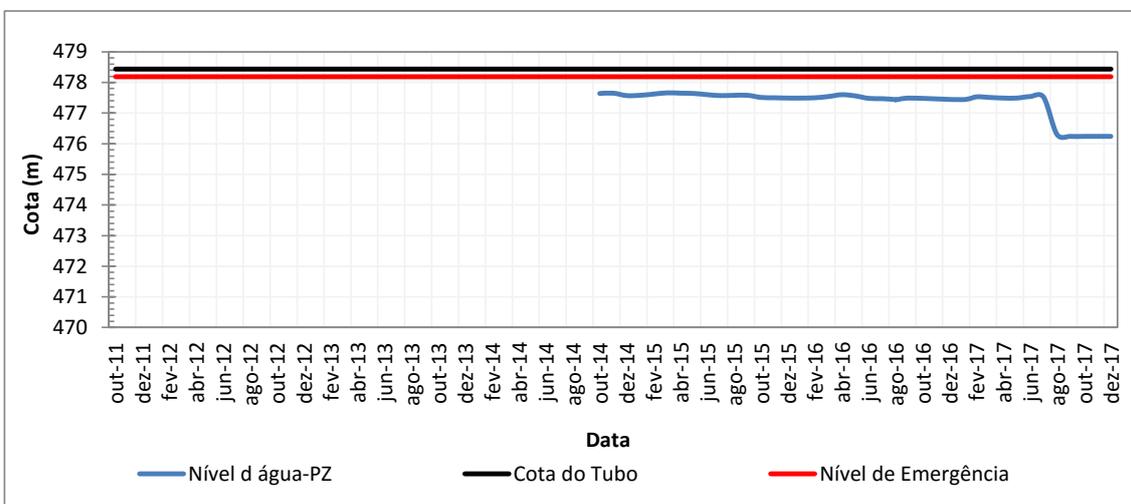
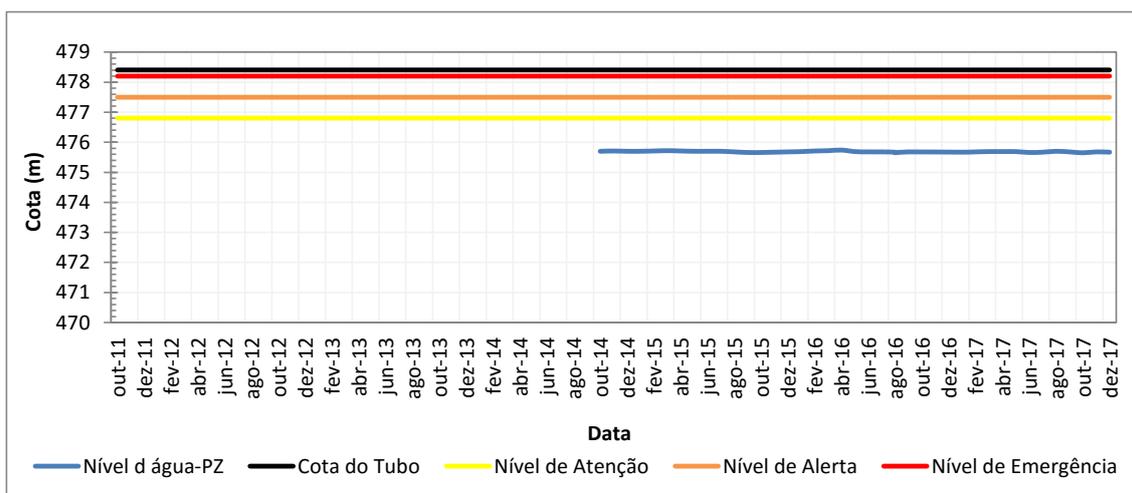


Gráfico 11: Indicador Nível D'água SNOBGAZINA02, Fonte: (Próprio Autor).



Para os piezômetros localizados no pé da Barragem, SNOBGAZPZF02 e SNOBGAZPZM02 considerou-se apenas o nível de emergência devido à proximidade da leitura com o topo do aterro, portanto qualquer condição de elevação da freática neste ponto, poderia causar uma saturação no pé da estrutura, inclusive, não sendo considerada na simulação realizada para determinação dos níveis de atenção, alerta e emergência dos instrumentos.

Para o medidor de nível de água SNOBGAZINA02 por apresentar leituras de nível mais baixas foi aplicado o mesmo nível limite de emergência adotado para os piezômetros citados anteriormente, porém acrescentado as 2 faixas de alerta e atenção com uma diferença de 50cm entre elas.

É importante ressaltar que o mesmo critério e os procedimentos utilizados para a modelagem e análise da seção crítica da barragem, podem ser replicados para as ombreiras e demais instrumentos, bastando apenas a criação de novas seções intermediárias de análise ao longo do maciço e conforme a distribuição dos instrumentos de monitoramento.

4.3 Utilização dos níveis de controle

Os resultados obtidos através do estabelecimento dos níveis de controle foram utilizados na implantação de um sistema de pré-alarme associado ao monitoramento, tendo como intuito a melhoria no controle e segurança das estruturas, conforme sugerido por Enji Sun *et al.* (2012) e estão apresentados na figura 62.

A solução consiste em coletar informações dos níveis piezométricos, pela rede da automação e armazenar essas informações no sistema de Carajás. Com as informações armazenadas, lógicas de negócio foram implementadas no próprio sistema, gerando os cálculos de controle de nível para cada instrumento e emitindo avisos por e-mail e SMS, caso algum instrumento ultrapasse os limites pré-estabelecidos, conforme figura 63.

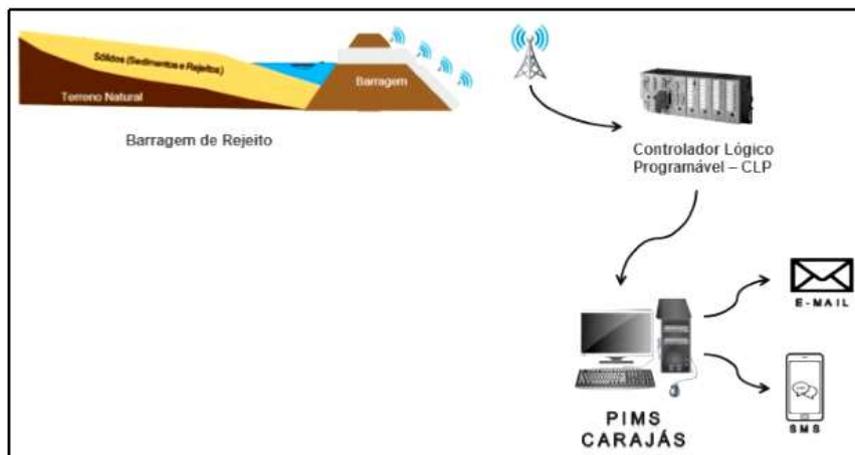


Figura 62: Sistema de pré-alarme em função dos níveis de controle



Figura 63: Teste do modelo de aviso via SMS

É importante frisar, que neste caso, a utilização dos níveis de controle de forma automatizada para a seção crítica da barragem do Azul tem o intuito de apontar anomalias em relação a cada instrumento, não sendo considerada para

fazer qualquer tipo de análise ou pré-julgamento em relação ao risco de ruptura da estrutura, por si só.

Desta forma, foi também criado um procedimento ficando a cargo do empreendedor a sua utilização, este serve como diretriz para os engenheiros responsáveis pelo monitoramento atuarem de acordo com cada situação ou nível de controle e está separado por horários de provável ocorrência do evento, detalhados a seguir.

1) De Seg. a Sexta em horário Normal de trabalho. (De 08h30min até 17h30min).

- a) Recebimento de mensagens de **ATENÇÃO**, **ALERTA** ou **EMERGÊNCIA** para 1 ou mais instrumentos da barragem:
- Verificar as leituras do sistema PIMs e posição dos instrumentos;
 - Realizar uma inspeção de campo imediata;
 - Fazer check da leitura dos instrumentos em campo;
 - Verificar sistema de monitoramento em campo;
 - Realizar diagnóstico da ocorrência;
 - Propor ações para controle do risco, caso seja necessário.

2) Finais de Semana, Feriados ou Fora do horário de expediente:

- a) Recebimento de mensagens de **ATENÇÃO** para 1 ou mais instrumentos da barragem após as 18:00hrs até 05:00hrs (NOITE):
- Aguardar até o amanhecer do dia seguinte;
 - Se deslocar até o escritório;
 - Verificar as leituras do sistema PIMs e posição dos instrumentos;
 - Realizar uma inspeção de campo;
 - Fazer check de leitura dos instrumentos em campo;
 - Verificar sistema de monitoramento em campo;
 - Realizar diagnóstico da ocorrência;
 - Propor ações para controle do risco, caso seja necessário.

- b) Recebimento de mensagens de **ALERTA** para 1 instrumento da barragem após as 18:00hrs até 05:00hrs (NOITE):
- Aguardar até o amanhecer do dia seguinte;
 - Se deslocar até o escritório;
 - Verificar as leituras do sistema PIMs e posição do instrumento;
 - Realizar uma inspeção de campo;
 - Fazer check de leitura dos instrumentos em campo;
 - Verificar sistema de monitoramento em campo;
 - Realizar diagnóstico da ocorrência;
 - Propor ações para controle do risco, caso seja necessário.
- c) Recebimento de mensagens de **ALERTA** para 1 ou mais instrumentos da barragem após as 18:00hrs até 05:00hrs (NOITE):
- Se deslocar até o escritório;
 - Verificar as leituras do sistema PIMs;
 - Avaliar a posição dos instrumentos e verificar a necessidade de realizar uma inspeção de campo imediata ou após o amanhecer;
 - Fazer check de leitura dos instrumentos em campo;
 - Verificar sistema de monitoramento em campo;
 - Realizar diagnóstico da ocorrência;
 - Propor ações para controle do risco, caso seja necessário.
- d) Recebimento de mensagens de **EMERGÊNCIA** para 1 instrumento da barragem após as 18:00hrs até 05:00hrs (NOITE):
- Aguardar até o amanhecer do dia seguinte;
 - Se deslocar até o escritório;
 - Verificar as leituras do sistema PIMs e posição do instrumento;
 - Realizar uma inspeção de campo;
 - Fazer check de leitura dos instrumentos em campo;
 - Verificar sistema de monitoramento em campo;
 - Realizar diagnóstico da ocorrência;
 - Propor ações para controle do risco, caso seja necessário.

e) Recebimento de mensagens de **EMERGÊNCIA** para 1 ou mais instrumentos da barragem após as 18:00hrs até 05:00hrs (NOITE):

- Se deslocar até o escritório;
- Verificar as leituras do sistema PIMs;
- Avaliar a posição dos instrumentos e verificar a necessidade de realizar uma inspeção de campo imediata ou após o amanhecer;
- Fazer check de leitura dos instrumentos em campo;
- Verificar sistema de monitoramento em campo;
- Realizar diagnóstico da ocorrência;
- Propor ações para controle do risco, caso seja necessário.

f) Recebimento de mensagens de **ATENÇÃO**, **ALERTA** ou **EMERGÊNCIA** para 1 ou mais instrumentos da barragem durante o horário de 06:00hrs até 18:00hrs (Durante o dia no feriado e final de Semana):

- Se deslocar até o escritório;
- Verificar as leituras do sistema PIMs e posição dos instrumentos;
- Realizar uma inspeção de campo;
- Fazer check de leitura dos instrumentos em campo;
- Verificar sistema de monitoramento em campo;
- Realizar diagnóstico da ocorrência;
- Propor ações para controle do risco, caso seja necessário.

4.4 Análise Crítica para Utilização e Finalidade dos Níveis de Controle.

Apesar do método determinístico do fator de segurança da barragem ser utilizado para definição dos níveis de controle dos instrumentos, a utilização destes níveis de forma isolada para avaliação do risco de uma barragem, se apresenta como uma ferramenta simplista que pode não representar a real condição de segurança da estrutura, pois a própria metodologia considera a elevação de todos os instrumentos que compõe a seção utilizada sendo realizada de uma forma conjunta, portanto a mesma situação deve ser considerada para uma análise mais criteriosa.

A elevação de 1 ou 2 instrumentos não é suficiente para determinar a elevação do nível freático da barragem para dentro das faixas limites pré-

estabelecidas no modelo e conseqüentemente reduzir o seu fator de segurança, por isso a necessidade de se adotar todos os procedimentos descritos no capítulo anterior e realizar uma análise detalhada de todos os itens para se chegar a um diagnóstico da ocorrência.

Portanto, é muito importante tentar desvincular a nomenclatura utilizada para os níveis de controle dos instrumentos, principalmente da nomenclatura de emergência sugerida pela Portaria 70.389 (2017), pois a própria portaria art. 2º, inciso XXIX, estabelece que nível de emergência é a convenção utilizada nesta portaria para graduar as situações de emergência em potencial para a barragem que possam comprometer a segurança da barragem.

Desta forma, a utilização da nomenclatura emergência, se for utilizada dentro de uma análise equivocada, como por exemplo, verificando-se a elevação do nível de apenas 1 ou 2 instrumentos de forma isolada, onde a causa do problema pode até mesmo estar associada a uma falha do próprio instrumento, por exemplo, sem nenhuma relação com a estrutura, pode assim, gerar um desconforto e uma pré-análise também equivocada da estrutura por profissionais que não possuem pleno conhecimento do assunto, pois a nomenclatura emergência, segundo Giglio (2005), é o acontecimento de alguma coisa séria, cuja aparição súbita causa ou ameaça perigo, mas a definição não aponta para qualquer necessidade de ação rápida. Portanto, para alguns profissionais, pode ser facilmente associada a denominação de urgência, que de acordo com o próprio Giglio (2005), é alguma coisa que já exige uma ação rápida e indispensável.

A adoção das nomenclaturas sugeridas pelos métodos estatísticos, como zona de consistência e inconsistência, torna-se uma opção muito mais atrativa para ser usada como convenção para a análise de dados de monitoramento, pois não cria nenhum vínculo que possa ser associado ao risco da estrutura.

Sendo assim, as nomenclaturas de emergência adotadas para a definição de valores de controle de instrumentação apresentam alguns fatores que podem limitar a sua aplicação como ferramenta de gerenciamento de segurança e especialmente na determinação do verdadeiro grau de risco da barragem, pois as nomenclaturas atualmente adotadas podem levar a erros de interpretação principalmente se comparada e associadas a outras ferramentas de gerenciamento, como por exemplo, os planos de Ações Emergenciais de

barragens de Mineração (PAEBM), pois uma outra forma de determinação do grau de risco da barragem, também sugerida pela portaria do DNPM é a apresentação de uma matriz de classificação denominada como estado de conservação da estrutura (EC), conforme apresentada no capítulo 2.6.3, nesta análise são levadas em consideração as anomalias que podem ser observadas através da inspeção visual da barragem. Quando algum destes itens do estado de conservação recebe uma pontuação igual a 10, sugere-se que deva ser considerado o grau de risco da estrutura como uma situação de emergência e adotadas as ações previamente estabelecidas no Plano de Ações Emergenciais da referida barragem.

Os níveis de emergência estabelecidos no PAEBM de barragens, convencionalmente, são divididos em 3 níveis distintos:

- Nível 1(Verde): Quando detectada anomalia que resulte na pontuação máxima de 10 (dez) pontos em qualquer coluna do Quadro - Matriz de classificação quanto à categoria de risco (1.2 – Estado de Conservação), do Anexo, da portaria 70.389 (2017), ou seja, quando iniciada uma inspeção de segurança especial e para qualquer outra situação com potencial comprometimento da segurança da estrutura;
- Nível 2 (Amarelo): Quando o resultado das ações adotadas na anomalia referida no inciso I for classificado como “não controlado”, de acordo com a definição do parágrafo 1 do art. 27 desta portaria; ou
- Nível 3 (Vermelho): A ruptura é iminente ou está ocorrendo.

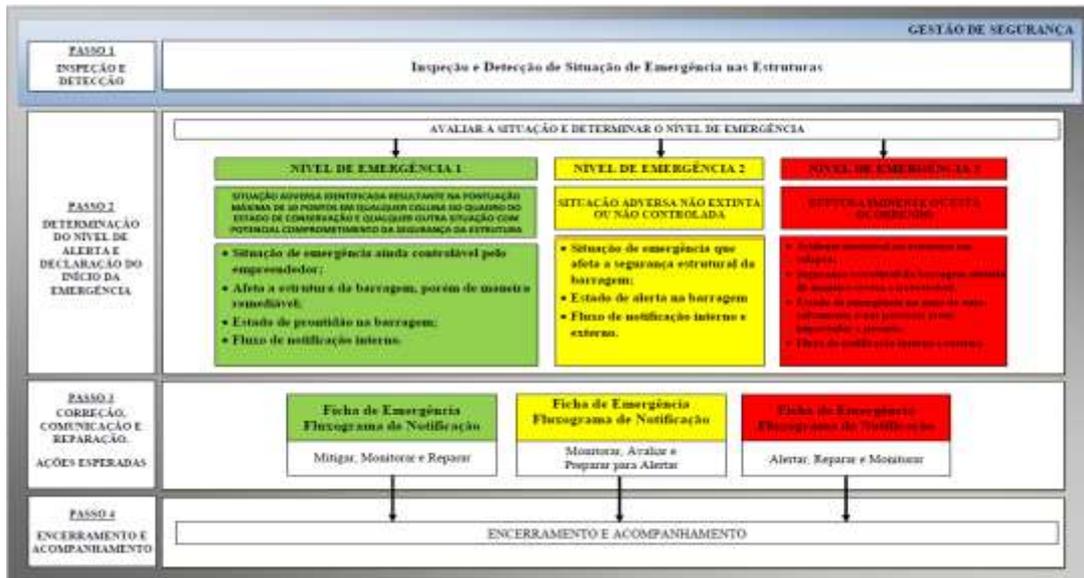


Figura 64: Fluxograma de um modelo de PAEBM

Fonte: (Adaptado de PIMENTA, 2016)

Diante desta situação, podemos encontrar também situações em que a declaração de estado de emergência não necessariamente pode estar associada ou ter alguma relação direta com uma possível elevação dos níveis de controle dos instrumentos, como por exemplo, o rompimento da barragem de Fundão em 2015.

Segundo Morgenstern et al. (2016), a barragem de rejeitos de Fundão continha um grande número de instrumentos que mediam pressões, fluxos e movimentos internos da água. Juntos, esses dados fornecem um registro do comportamento de engenharia da barragem, permitindo que tendências e mudanças sejam rastreadas ao longo de sua vida útil, mas apesar de observar uma superfície desnivelada e inclinada afastando-se da ombreira esquerda, os registros piezométricos indicaram um lençol freático relativamente planos. Relatos de testemunhas revelaram que o deslizamento foi iniciado na ombreira esquerda, onde a represa foi recuada de seu antigo alinhamento. A análise de estabilidade da ombreira esquerda apresentou valores acima dos valores aceitáveis pela NBR 13028 (2017).



Figura 65 – Dados de piezômetros da ombreira esquerda

Fonte: (Morgenstern et al., 2016)



Figura 66 – Dados de piezômetros da ombreira esquerda

Fonte: (Morgenstern et al., 2016)

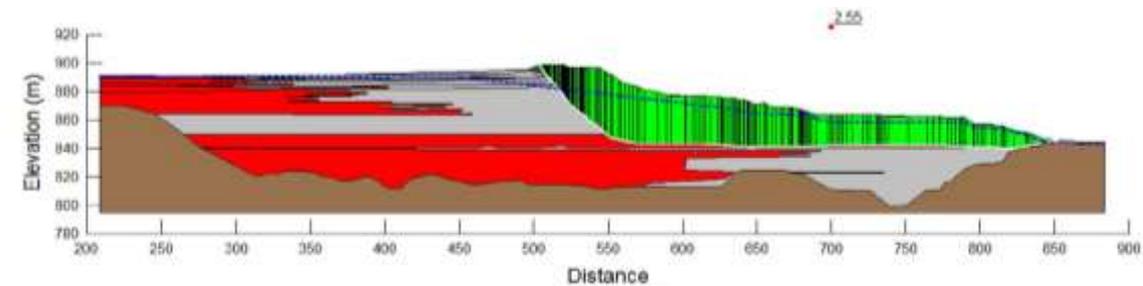


Figura 67 – Análise Drenada – Ombreira esquerda – nov. /2015

Fonte: (Morgenstern et al., 2016)

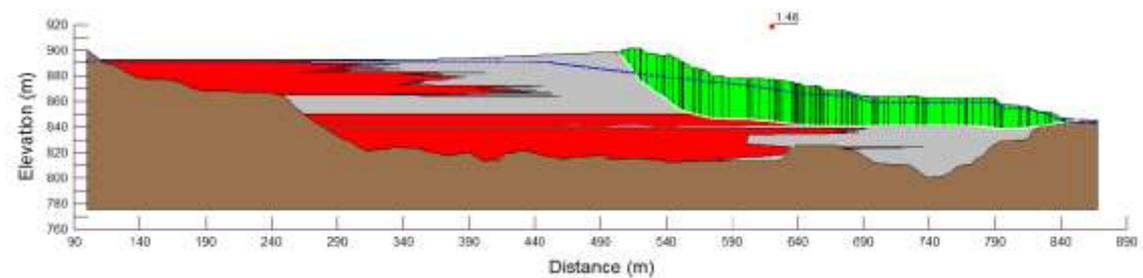


Figura 68 – Análise Não Drenada - Ombreira esquerda – nov. /2015

Fonte: (Morgenstern et al., 2016)

Os gráficos de monitoramento geralmente estabelecem níveis para apenas um comportamento, neste caso o drenado, mas para barragens de alteamento a montante ou barragens de linha central, esta não é a única condição que devemos considerar para análise de uma estrutura.

A intenção de se buscar outras formas de análise, não inibe que os gráficos de monitoramento baseados em análises determinísticas continuem a ser utilizados, pela razão de que as análises estatísticas, dependem de dados históricos de monitoramento, ou seja, não sendo possível aplicá-los na fase de projeto, mas apenas na fase de operações.

Desta forma, as análises na fase de projeto são importantes para que seja possível conhecer um pouco sobre o comportamento esperado para a estrutura, mas não garantem que sempre se conseguirá estabelecer um limite para um determinado instrumento, por exemplo, algumas inclinações observadas com alta resistência ao ângulo de inclinação construtivo definitivo, na medida em que podemos hipoteticamente elevar o nível de água/piezômetro, ainda é possível se manter um fator de segurança acima de 1,5 ou outro limite que pretende-se alcançar. Neste caso, o estudo da percolação seria mais assertivo para definição dos limites do que se tentar inventar níveis de piezômetros impossíveis.

Portanto, analisar e configurar o alarme para uma análise detalhada dos valores de comportamento previstos no projeto pode se tornar uma alternativa mais importante que o gráfico de risco tradicionalmente aplicado, pois o gráfico de risco, muitas vezes, não leva em consideração os diferentes tipos de regime de percolação dos modelos, embora possa apresentar depressões concentradas acima ou abaixo da hidrostática em uma determinada região, dependendo da permeabilidade da base ou de uma camada, podendo levar a interpretações erradas da condição de segurança da estrutura.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

5.1.1 Condições de Estabilidade da Barragem

As avaliações anteriormente citadas, mostraram que o desempenho da barragem, notadamente a estabilidade do talude de jusante mostram-se adequados, atendendo às exigências das normas brasileiras que prescrevem as condições mínimas de segurança das barragens de rejeito.

O fator de segurança relativo à estabilidade do maciço é considerado aceitável ($FS = 1,60$) para a análise de estabilidade e ($FS = 1,79$) para a análise de percolação atendendo à norma NBR 13028 (2017) para a situação de operação da barragem, ou seja, a barragem Azul se encontra em condições satisfatórias de segurança quanto a estabilidade dos taludes de jusante, ou seja, as estruturas atendem as recomendações propostas pela normatização vigente quanto a segurança para análises de percolação e a estabilidade física.

5.1.2 Níveis de Controle da Barragem

Através da elaboração das faixas de nível de controle para os instrumentos que compõe a seção crítica da barragem do Azul e utilizando-se os dados históricos de leitura dos instrumentos obtidos entre o intervalo de 2011 a 2017, foi possível perceber que nenhum dos instrumentos chegou a atingir os estados de alerta, atenção e emergência pré-estabelecidos, mesmo aqueles posicionados próximo ao pé do barramento, não sendo necessária nenhuma avaliação mais profunda do comportamento da instrumentação em relação à ferramenta proposta.

Com a exceção do piezômetro SNOBGPZ010 que apresentou o início das suas leituras logo após o alteamento da barragem em 2012, todos os demais instrumentos somente foram apresentar leituras entre 1 a 2 anos depois do alteamento, porém todas as leituras se mostraram estáveis e sem grandes variações, conforme apresentados nos gráficos dos instrumentos.

Vale ressaltar, que este critério não pode ser aplicado a barragens de enrocamento, pois devido a permeabilidade do material, não ocorre a elevação da freática no talude de jusante.

5.1.3 Análise dos Critérios para determinação do risco da estrutura

Um caminho que deve ser considerado antes do estabelecimento de limites de segurança para a análise de dados de instrumentação associados ao risco de ruptura da estrutura, é a necessidade de se avaliar o próprio projeto de instrumentação. A importância de fazer uma avaliação crítica dos resultados do monitoramento através de ferramentas que permitem a análise de dados de instrumentação para um melhor gerenciamento de risco da barragem é notória, sendo essas análises feitas de uma forma judiciosa, evitando interpretações que acabem gerando uma análise de risco da estrutura que não esteja em consonância com a realidade.

A verificação das hipóteses, critérios e parâmetros adotados no projeto de instrumentação deve ser realizada antes de qualquer sugestão de melhoria ou ferramenta para a análise dos dados.

As nomenclaturas utilizadas na Portaria número 70.389 (2017) para os níveis de controle, os gráficos limite amplamente utilizados, denominados níveis de alerta, atenção e emergência, devem ser revisados, de forma que não estejam associados por engano ao risco da estrutura ou aos Planos de Ações de Emergência das barragens.

A ocorrência de um ou mais instrumentos com leituras registradas acima dos valores de referência, por exemplo, jamais devem ser motivo de negligência por parte dos empreendedores, porém, o nível de emergência adotado ao nível do controle das estruturas, não implica necessariamente que a barragem esteja sob condições críticas de segurança e / ou risco de ruptura, pois mesmo se tendo os instrumentos em condições normais, o estado atual pode não representar uma condição de segurança.

Portanto, os níveis de controle do monitoramento devem ser utilizados apenas como meios de se identificar anomalias na leitura ou no comportamento esperado de um determinado instrumento, dando início a um estudo mais aprofundado da situação identificada, sendo desvinculada de uma análise prematura de risco da estrutura quando interpretada de forma isolada, pois a utilização de nomenclaturas como estado de alerta, atenção e emergência podem induzir a diagnósticos errados e precoces com relação a estrutura.

Para uma definição do nível de segurança para uma barragem, deve se basear no que é esperado para o comportamento da estrutura no estágio de projeto e não somente em diferentes níveis pré-estabelecidos de fator de segurança para altos níveis hipotéticos de piezometria ou nível de água, pois a análise de estabilidade, não é a única condição que envolve a segurança de uma estrutura, mas geralmente, é a única abordada nos gráficos de risco.

Finalmente, entre todos os itens utilizados para a gestão da barragem, a análise e interpretação do monitoramento por profissionais qualificados antes de qualquer previsão tabulada da estrutura são essenciais na prevenção de acidentes e incidentes.

5.2 Sugestões de trabalhos Futuros

Os instrumentos de uma barragem não servem apenas para monitorar a estabilidade da estrutura, mas também subsidia ou ajuda a compreender comportamentos específicos ou gerais e a criar condições de pesquisa para a melhoria de projetos, sendo um desafio e proposta de pesquisas para o futuro, o estabelecimento de critérios de controle para medidores de vazão ou medidores de deformação de barragens.

Recomenda-se também que seja feita para pesquisas futuras uma análise de segurança desta barragem frente a outros métodos de análise, como por exemplo, a utilização de análises computacionais 3D comprovando através de outros métodos, não somente através de análises determinísticas, as condições de segurança da estrutura.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEL, H., BAKKER, K. and BRETELER, M. (1988) **“Internal Stability of Minestone”**, **Proceedings International Symposium Modeling Soil-Water-Structure Interaction**, Rotterdam, 1988, pages 225-231.

AGURTO-DETZEL, H.; BIANCHI, M.; ASSUMPÇÃO, M.; SCHIMMEL, M.; COLLAÇO, B.; CIARDELLI, C.; BARBOSA, J. R.; CALHAU, J. (2016) **The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence**. *Geophysical Research Letters*. v. 43, p. 4929-4936, May.

BALBI, D. A. F. (2008) **Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens: estudo de caso Barragem de Peti – MG**. 2008. 336f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BARRETT, C. (2018) **Launched Soil Nails: What they are, what they’re used for, and how to model them in Slide 2018** - 3f. *Geostabilization International - GeoHazard Mitigation Experts* - Vancouver, Canada.

BITTAR, R. J. A. (2016) **Designing and operating a tailings safety management system: the key success aspects**. Nova Lima, Brazil.

BUZZI, M. F. (2007) **Avaliação das correlações de séries temporais de leituras de instrumentos de monitoração geotécnico estrutural e variáveis ambientais em barragens estudo de caso de itaipu**. 101f. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA.

BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028**, de 4 de outubro de 2006, Brasil, v.1-9, n. Segunda edição, p. Brasil, out. 2006.

BRASIL. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028**, de 14 de novembro de 2017, Brasil, v.1-16, n. terceira edição, p. Brasil, nov. 2017.

BRASIL. Decreto-Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília; 189º da Independência e 122º da República.

BRASIL. Decreto-Lei nº 70.389 de xx de xxxxxxxx de 2017. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília; 189º da Independência e 122º da República.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. (2016). Cadastro nacional de barragens de mineração PNSB. On line. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/assuntos/barragens/arquivos-barragens/cadastronacional-debarragens-de-mineracao-dentro-da-pnsb>>. Acesso em 15 dez. 2016.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. (2012). Portaria nº 416, de 03 de setembro de 2012. Poder Executivo, Brasília, Brasil.

DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. (2013). Portaria nº 526, de 09 de dezembro de 2013. Poder Executivo, Brasília, Brasil.

COLORADO. **Guidelines for Dam Breach Analysis. Office of the State Engineer Dam Safety Branch**. Fevereiro, 2010.

CRUZ, Paulo T. (2005) **100 Barragens Brasileiras**. São Paulo: Oficina de Textos.

Departamento Nacional de produção Mineral (DNPM). Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/>> Acesso em: 24 mar. 2017.

DUARTE, A. P. (2008) **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. 130f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte.

DUNCAN, J. M. (2013) **Slope stability then and now**, Virginia, Geo-Congress 2013 © ASCE.

ENJI Sun, XINGKAI Zhang, ZHONGXUE Li. (2012) **The internet of things (IOT) and cloud computing (CC) based tailings dam monitoring and pre-alarm system in mines**, Safety Science 50.

ESPÓSITO, T.J; DUARTE, A. P. (2010) **Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco**, Esc. Minas de Ouro Preto.

FEMA. **Federal Guidelines for Inundation Mapping of Flood Risks Associated with Dam Incidents and Failures**. Julho, 2013.

FERRARI I. (2012) **Relatório Técnico - 1º Alçamento da Barragem do Azul - RL-5830KM-X-09565**, Ismar Ferrari Consultoria, 100p, São Paulo

FERREIRA, J. C. (2009) **Estudos sobre drenagem e redução de umidade do minério de ferro de Carajás com a utilização de geossintéticos**. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília.

FONTES, D. C. (2016). **Parecer técnico. 02024.000023/2016-47** - Instituto brasileiro do meio ambiente e dos recursos naturais renováveis (IBAMA) - NUGEO/RO/IBAMA - Núcleo de Geoprocessamento-Ro.

FROEHLICH, D. C., TUFAIL, M. (2004) **Evaluation and use of embankment dam breach parameters and their uncertainties in Proceedings of the Annual Conference of the Association of State Dam Safety Officials**. Phoenix. Setembro, 15 p.

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**. 309f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade federal de Ouro Preto.

GARCIA, C. L.; PINHEIRO, W. F. (2015) **Informe Mineral 1º/2015. Informe Mineral 1º/2015**, DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, n.18070388, p.1-23.

GIGLIO-JACQUEMOT, A. **Definições de urgência e emergência: critérios e limitações**. In: **Urgências e emergências em saúde: perspectivas de profissionais e usuários** [online]. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2005. Antropologia e Saúde collection, pp. 15-26. ISBN 978-85-7541-378-4. Available from SciELO Books < <http://books.scielo.org> >.

GOMES, L. L. (2012) **Avaliação espacial da perda de solo por erosão pela equação universal de perda do solo (eups) – pilha de estéril sul, Carajás/pa**. 192f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP.) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

GUTIÉRREZ, João L. C. (2003) **Monitoramento da Instrumentação da Barragem de Corumbá-I por Redes Neurais e Modelos de Box & Jenkins**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro.

IBGE (2017), <http://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos>, acessado em maio/2017.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; HUDSON-EDWARDS, K. (2014) **A. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts and remediation**. Applied Geochemistry, v. 51, p. 229-245.

LAGES M; MANSUR R. (2016) **Processo chamado de “alçamento a montante” chega a ser 70% mais barato que outras alternativas.** Minas Gerais: O Tempo. <http://thinkgreenzerosum.blogspot.com.br/2016/01/estado-vai-proibir-tecnica-para-elevar.html>, Acessado em abril/2017:

LARA P G; (2016) **Metodologia Probabilística de Previsão de Brecha de Ruptura de Barragens.** 181f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental da Universidade de Santa Catarina). Florianópolis, SC

LIGOCKI, L.P., SARÉ, A.R., SAYÃO, A.S.F.J., GERSCOVICH, D.M.S. (2003). **Avaliação de Segurança da Barragem de Curuá-Una com Base da Piezometria.** XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador, pp. 207-217.

MACAMBIRA J.B. (2003) **O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão-Pará.** 217 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.

MACHADO, W. G. F. (2007) **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração.** 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MASSAD, F. (2003) **Obras de Terra - Curso Básico de Geotecnia.** São Paulo: Oficina de Textos, 170p.

MELO, A. V. (2014) **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig gt.** 244f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Universidade Federal de Minas Gerais.

MORGENSTERN, Norbert. R., VICK Steven G., VIOTTI Cássio B., WATTS Bryan D. (2016) - **FUNDÃO TAILINGS DAM REVIEW PANE - “Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam”** – 1-75 – Brazil

NIKOLOVSKI Zlatko, SLAVEVSKI Mile. (2014) **Monitoring of Sveta Petka dam during different phases of dams life**, Struga, Republic of Macedonia.

OLIVEIRA, J. C. (2014) **Gestão operacional das barragens de terra do complexo minerário das minas de ferro Carajás da vale**. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade federal de Ouro Preto.

PENNA, D; ARAGÃO, G; FUSARO, T. (2015) **Complementariedade entre o monitoramento e análises de risco na gestão da segurança de barragens**, Foz do Iguaçu – p. 1-14.

PENNA, D; MARINARO, R; LOPES, M; CARMO, A. (2017) – **“Carta de risco como ferramenta na gestão de segurança de barragens”**. Belo Horizonte – p. 1-15.

PIMENTA, M.L. (2008) **“Abordagens de Riscos em Barragens de Aterro”**. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

PIMENTA A. (2014) **Relatório Técnico - Plano de ações emergenciais (PAEBM) barragens Gelado, Geladinho e Pera jusante - Estudo de cenários (DAM BREAK)** - RD-165-RL-38484-00, Pimenta de Ávila Consultoria, 95p, Belo Horizonte.

PIMENTA A. (2015) **Balanço hídrico e segurança hidráulica barragem do Azul** – RD-145-RL-39613-00, Pimenta de Ávila Consultoria - 56p, Belo Horizonte.

PIMENTA A. (2016) **Relatório Técnico – Revisão do Plano de ações emergenciais (PAEBM) barragens Gelado, Geladinho e Pera jusante - Estudo de cenários (DAM BREAK)** - RD-165-RL-38484-01, Pimenta de Ávila Consultoria, 95p, Belo Horizonte.

PIMENTA A. (2017) **Acidentes em Barragens de Rejeitos no Brasil**. Belo Horizonte: Pimenta de Ávila Consultoria - 40p. <http://www.energia.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/07/ACIDENTES-EM-BARRAGENS-Joaquim-Pimenta-Pimenta-de-%C3%81vila-Engenharia.pdf>

PORTAL G1 (2017), <http://g1.globo.com/mundo/noticia/mais-de-188-mil-sao-retirados-apos-problema-em-barragem-da-california.ghtml>, acessado em Junho/2017.

QUARESMA, L. F. (2009) **Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. - Perfil da mineração de manganês - J. Mendo Consultoria.

RATTAN L; MANOJ K.S. (2004) **Principles of soil physics**, the Ohio State University Columbus, Ohio, U.S.A.

RICO, M. BENITO, G. DIEZ-HERRERO, A. (2007) **Floods from Tailings Dam Failures**. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 154.

RICO, M. et al. (2008) – “**Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context**”, *Journal of Hazardous Materials* 152 p. 846–852;

ROCSCIENCE. (2016) SLIDE version 6.0: project planning *software*.[S.l.]: ROCSCIENCE Corporation. Conjunto de programas. 1 CD-ROM.

ROJAS, J. W. e FONINI A. (2006) **Análise de percolação em barragem de terra utilizando SEEP/W. 2006**. Dissertação de Mestrado (Pós em Engenharia Civil). – Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Brasil.

SILVA, C. C. (2015) **Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia). – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. Brasil.

SHUREN Wang, HAIQING Zhang, ZHENGSHEG Zou, PING Wang & TAO Yu. (2015) **Potential Risk Analysis of Tailings Dam under Preloading Condition and Its Countermeasures**, J. Eng. Technol. Sci. Vol. 47, No. 1, 46-56, China.

SKEMPTON, A. and BROGAN, J. M. (1994) **Experiments on Piping in Sandy Gravels**, Geotechnique, Volume 44, No. 3, pages 449-460.

USACE (1993), EM 1110-2-1901. Engineering and Design. **Seepage analysis and control for dams**. www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1901/toc.htm.

USACE (1995). EM 1110-2-1908 - **Instrumentation of Embankment Dams and Levees**. www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1908/toc.htm.

USACE (2004). EM 1110-2-2300 - **Appendix E - Process for Establishing Performance Parameters**. www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-2300/toc.htm.

VELOSO, I. G. (2007) **Preparação de cartas de risco para o controle da estabilidade ao cisalhamento da barragem de concreto gravidade da usina hidrelétrica de Guilman-Amorim**, Dissertação (Mestrado em Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP.) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.