

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ÓPTICO COM PROCESSAMENTO DE
DADOS PARA MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES DE BARRAGENS**

Daniel Carlos Ribeiro Trautwein

Itajubá, março de 2019.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA ÓPTICO COM PROCESSAMENTO DE
DADOS PARA MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES DE BARRAGENS**

Trabalho submetido para obtenção do Título de Mestre em Ciências
em Engenharia de Energia.

Área de Concentração: Engenharia de Energia

Linha de Pesquisa: Planejamento e Gestão de Sistemas Energéticos

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Co-orientadora: Profa. Dra. Adinele Gomes Guimarães

Itajubá, março de 2019.

DEDICATÓRIA

Tempos difíceis foram estes, a fé em Deus, em Nossa Senhora das Graças e a força da minha mãe Dona Ló foram os propulsores para a superação e aplicação da resiliência, que não me deixaram desistir.

Minha mãe é o maior exemplo de perseverança, honestidade, dedicação, garra e fé que um filho pode ter, agradeço a Deus pela senhora mãe.

Dedico esse trabalho a senhora Dona Ló, afinal com toda certeza, os pais se realizam nos filhos!

Sofro muito pela sua ausência, te amo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Dona Ló pelo encorajamento, ao meu irmão David por promover clareza e foco, a minha irmã Maria Eloina pelo carinho e atenção e incentivo e a minha irmã Erika pelas orações e alegria.

Um agradecimento especial aos meus filhos Jorginho e Leozinho, por serem o motivo da minha vontade de prosperar, lamento pela ausência do papai, por vocês estou aqui.

Agradeço ao meu orientador Prof. Tiago, por desde o primeiro encontro ter acreditado em mim e no meu projeto, o senhor foi fundamental.

Minha co-orientadora Prof.a Adinele, obrigado pela dedicação, capricho e entusiasmo.

“Até o meio da barragem faço tudo para a água não chegar. A partir daí faço tudo para a água sair da maneira que quero”
(Arthur Casagrande - Eng. civil, austríaco, “pai” da mecânica dos solos.)

RESUMO

Neste trabalho desenvolveu-se um equipamento didático e técnico para estudo em modelo reduzido para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos no rompimento de barragens de terra. As estruturas foram representadas dentro de um canal de vidro permitindo a visualização da secção da barragem, o enchimento do reservatório e a coleta de dados de deformação antes do colapso da estrutura. A partir da realização de ensaios laboratoriais para caracterização do solo utilizado e da construção dos modelos, ficou evidente de que o experimento trata-se de uma excelente ferramenta de análise. Por meio do estudo experimental foi possível demonstrar a relação entre tempo e as tendências das deformações e deslocamentos que antecedem uma ruptura e, contudo indicar as áreas mais críticas em cada momento, favorecendo a sugestão de locais onde deve haver maior atenção quanto a inspeções e instalação de instrumentação de monitoramento. A partir da definição desses pontos críticos, foi desenvolvido um sistema que, integrando *hardware* e *software* é capaz de identificar e de informar aos responsáveis, em tempo real, qualquer variação comportamental indesejada. O sistema opera utilizando sensores que fazem a análise de distância da estrutura monitorada e, por meio de um processador auxiliar, transmite constantemente os dados coletados – conectados à rede e armazenados na “nuvem” – a um processador principal. Este processador recebe os dados e os compara com dados anteriores, realizando interpretações e conclusões, quanto à estabilidade da barragem e emite alertas e emite relatórios em formato de planilhas e gráficos que mostram detalhadamente os monitoramentos realizados nos períodos selecionados pelo usuário.

Palavras-Chaves: Barragens, Segurança, Modelo Reduzido, Monitoramento e Instrumentação.

ABSTRACT

In this work was developed a didactic and technical equipment for experimental study in a reduced model to better understand the phenomena involved in the rupture of earth dams. The structures were represented within a glass channel allowing visualization of the dam section, filling of the reservoir and collection of deformation data before collapse of the structure. From the laboratory tests to characterization of the soil used and the construction of the models, it was verified that the experiment was an excellent analysis tool, since it was possible to demonstrate the relation between time and the tendencies of the deformations and displacements that precede a rupture and yet indicate the most critical areas at each moment, favoring the suggestion of places where there should be greater attention regarding inspections and installation of monitoring instrumentation. From the definition of these critical points, a system was developed that, integrating hardware and software, is capable of identifying and informing those responsible, in real time, of any undesired behavioral variation. The system operates using sensors that perform distance analysis of the monitored structure and, through an auxiliary processor, constantly transmits the collected data - connected to the network and stored in the "cloud" - to a main processor. This processor receives the data and compares it with previous data, making interpretations and conclusions regarding the stability of the dam and issues alerts and reports in the form of spreadsheets and graphs that show in detail the monitoring carried out in the periods selected by the user.

Keywords: Dams, Safety, Reduced Model, Monitoring and Instrumentation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Conceitos Introdutórios.....	15
1.2. Justificativa e Motivação	16
1.3. Objetivos do Trabalho	19
1.4. Estrutura do Trabalho	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. Conceito de Barragem, Classificações e Tipos Existentes	21
2.2. Projetos e Construção de Barragens	27
2.2.1. Concepção do projeto	28
2.2.2. Construção de barragens.....	32
2.3 Aspectos Geológicos e Geotécnicos	36
2.4 Etapas na Vida Operacional de uma Barragem	39
2.5 Segurança de Barragens.....	40
2.5.1 Legislação brasileira e fiscalização	42
2.5.2 Gerenciamento de riscos e análise de danos potenciais associados	52
2.5.3 Comportamento físico das estruturas e suas deformações	58
2.5.4 Incidentes e acidentes ocorridos com barragens.....	63
2.6 Monitoramento e Instrumentação de Barragens	68
3. METODOLOGIA	76
3.1. Simulação em Laboratório das Deformações e Rompimento de Barragens em Modelos Reduzidos.....	77
3.1.1. Metodologia e construção do modelo reduzido.....	77
3.1.2. Caracterização do material	82
3.1.3. Realização do experimento.....	84
3.2. Desenvolvimento do Sistema de Monitoramento Óptico de Barragens	84
3.2.1. Descrição do sistema aplicado.....	84
3.2.2. Construção do sistema aplicado	92
4. Resultados	93
4.1. Experimento de Rompimento de Barragem em Modelo Reduzido	93
4.1.1. Experimento em modelo reduzido com taludes de inclinação de 1:1,25	94
4.1.2. Experimento em modelo reduzido com taludes de inclinação de 1:1,50	101
4.2. Resultados da Precisão do Sistema Aplicado em Comparação com Estação Total	108

5. CONCLUSÕES.....	111
5.1. Deformações que Precedem o Rompimento de Barragens.....	111
5.2. Precisão e Acurácia do Sistema Aplicado	117
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
6.1 Objetivos Alcançados	119
Portanto pelo exposto pode-se concluir que os objetivos propostos foram todos alcançados, mesmo que ao longo do trabalho foram descobertas muitas possibilidades de evolução da pesquisa e, também do aprimoramento do sistema proposto. Estas possibilidades de melhorias são citadas a seguir, almejando a continuidade da pesquisa e ao mesmo tempo estimular outros pesquisadores.	119
6.2. Recomendações e Perspectivas Futuras.....	119
6.2.1. Operação do sistema aplicado no experimento de rompimento de barragens..	119
6.2.2. Integração do experimento de modelo reduzido com o sistema aplicado	120
6.2.3. Operação do sistema aplicado em barragem de rejeito de mineração.....	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Crescimento da quantidade de hidrelétricas brasileiras entre 2008 a 2018.	17
Tabela 2 – Relação de materiais de construção de barragens e suas aplicações.	30
Tabela 3 – Matriz de classificação das barragens quanto ao risco e dano potencial associado.	43
Tabela 4 – Classificação das barragens quanto ao tamanho do reservatório.....	44
Tabela 5 - Categorias de nível de segurança.	47
Tabela 6 – Frequência da Inspeção de Segurança Regular. Fonte: ANEEL – Resolução Normativa Nº 696 de 15 de dezembro de 2015.	48
Tabela 7 – Frequência da RPS para barragens hidrelétricas. Fonte: ANEEL – Resolução Normativa Nº 696 de 15 de dezembro de 2015.	48
Tabela 8 – Frequência da RPS para barragens de contenção de rejeitos de mineração. Fonte: DNPM – Portaria Nº 416 de 03 de setembro de 2012.	48
Tabela 9 – Barragens Brasileiras Atendendo a Lei 12.334. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens, 2016.	53
Tabela 10 – Dano Potencial Associado (DPA) das barragens cadastradas, segundo o uso principal.	56
Tabela 11 – Histórico de acidentes com barragens de rejeito no mundo. Fonte: ICOLD (2001)	64
Tabela 12 – Listagem dos acidentes e incidentes ocorridos na vigência do RSB 2016. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens (RSB) 2016.	67
Tabela 13 – Relação de instrumentos de monitoramento de barragens e as respectivas anomalias detectadas por eles. Fonte: adaptado Silveira (2006).....	71
Tabela 14 – Tipos de erros ocorridos na instrumentação de barragens, suas causas e medidas corretivas para evitá-los. Fonte: Silveira (2006)	73
Tabela 15 – Caracterização do solo utilizado no experimento. Fonte: Próprio autor	83
Tabela 16 – Resultados do experimento nº 1 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,25. Fonte: Próprio autor.....	97
Tabela 17 – Resultados do experimento nº 2 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,25. Fonte: Próprio autor.....	98
Tabela 18 – Resultados do experimento nº 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,25. Fonte: Próprio autor.....	98
Tabela 19 – Média dos resultados dos experimentos nº 1, 2 e 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,25. Fonte: Próprio autor.....	99
Tabela 20 – Resultados consolidados de todos os experimentos referentes ao modelo reduzido com inclinação de taludes 1: 1,25. Fonte: Próprio autor	100
Tabela 21 – Resultados do experimento nº 1 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50. Fonte: Próprio autor.....	104
Tabela 22 – Resultados do experimento nº 2 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50. Fonte: Próprio autor.....	105
Tabela 23 – Resultados do experimento nº 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50. Fonte: Próprio autor.....	105

Tabela 24 – Média dos resultados dos experimentos nº 1, 2, e 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50. Fonte: Próprio autor.....	106
Tabela 25 – Resultados consolidados dos experimentos nº 1, 2, e 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50. Fonte: Próprio autor.....	107
Tabela 26 – Comparação da precisão da estação total com o sistema proposto em relação a um deslocamento conhecido.....	111
Tabela 27 – Relação das deformações entre os pontos analisados.....	116
Tabela 28 – Relação dos deslocamentos entre os instrumentos utilizados.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das barragens quanto ao uso principal cadastradas no PNSB em 2016. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.	23
Figura 2 – UHE- Usina Hidrelétrica de São Simão. (modificada) Fonte: CEMIG, 2018	24
Figura 3 – Barragem Casa de Pedra - Contenção de rejeito de mineração. (modificada) Fonte: http://dam.com.br/index.php/pt-br/barragens-contencao	25
Figura 4 – Construção da PCH Telegráfica no rio Juruena – MT. Fonte: Próprio autor.	33
Figura 5 – Construção do vertedouro da PCH Parecis no rio Juruena –MT. Fonte: Próprio autor	34
Figura 6 – Método de alteamento a jusante de barragem de rejeito de mineração. Fonte: IBRAM (2016)	35
Figura 7 – Método de alteamento a montante de barragem de rejeito de mineração. Fonte: IBRAM (2016)	35
Figura 8 – Método de alteamento a linha de centro de barragem de rejeito de mineração. Fonte: IBRAM (2016)	35
Figura 9 – Categoria de Risco das barragens cadastradas segundo o uso principal. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.....	54
Figura 10 – Dano Potencial Associado (DPA) das barragens cadastradas, segundo o uso principal. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.	55
Figura 11 – Quantidade de barragens, de acordo com seu uso principal, que apresentaram o PAE em 2016. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.....	56
Figura 12 – Processo de formação de <i>piping</i> por erosão regressiva. Fonte: Perini (2009)	60
Figura 13 – Processo de formação de <i>piping</i> por meio de alargamento das paredes das trincas. Fonte: Perini (2009).....	60
Figura 14 – Processo de formação de <i>piping</i> por meio de carreamento de finos. Fonte: Perini, 2009	61
Figura 15 – Estatística geral de modos de ruptura de grandes barragens de terra, até 1986. Fonte: Foster (2000)	65
Figura 16 – Eixo 1, local onde havia a barragem de Fundão no município de Mariana – MG. Fonte: Próprio autor.....	66
Figura 17 – Acidentes e incidentes ocorridos anualmente após a publicação da Lei nº 12.334/2010. Barragens distribuídas segundo o uso principal. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.....	66
Figura 18 – Número vítimas fatais por ano devido a acidentes em barragens, em função do uso principal da barragem. Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.	67
Figura 19 – Elementos e Sequência do Processo de Monitoramento de Barragens. Fonte: ICOLD (2014)	72
Figura 20 – Estação total robotizada, monitorando uma barragem hidrelétrica. Fonte: NADAL (2017)	75
Figura 21 – Estação total robótica realizando monitoramento de campanha na barragem Sela na mineradora Samarco. Fonte: Próprio autor.....	75

Figura 22 – Fluxograma de metodologia aplicada.	76
Figura 23 – Pontos de análises de deformações no modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	78
Figura 24 – Tanque de vidro, utilizado para construção do modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	78
Figura 25 – Modelos de barragens adotados para realização do experimento de rompimento. Fonte: Próprio autor.....	79
Figura 26 – Coleta de solo na jazida. Fonte: Próprio autor.....	80
Figura 27 – Armazenado no laboratório. Fonte: Próprio autor.....	80
Figura 28 – Delimitação do tamanho do modelo reduzido. Fonte: Próprio autor.....	81
Figura 29 – Assentamento da jazida. Fonte: Próprio autor.....	81
Figura 30 – Nivelamento do modelo. Fonte: Próprio autor.....	82
Figura 31 – Esquema do experimento de rompimento de barragem em modelo reduzido. Fonte: Próprio autor.....	84
Figura 32 – Aparelho de monitoramento de barragens. Fonte: Próprio autor.....	85
Figura 33 – Fluxograma da operação do sistema. Fonte: Próprio autor.....	86
Figura 34 – Tela inicial do sistema. Fonte: Próprio autor.....	86
Figura 35 – Tela para inserção do coeficiente de dilatação do material utilizada para construção da estrutura monitorada. Fonte: Próprio autor.....	87
Figura 36 – Tela de configuração dos limites de faixas para interpretação do sistema. Fonte: Próprio autor.....	88
Figura 37 – Tela de adição de usuário do sistema. Fonte: Próprio autor.....	88
Figura 38 – Tela de remoção de usuário do sistema. Fonte: Próprio autor.....	89
Figura 39 – Tela do histórico das alterações. Fonte: Próprio autor.....	89
Figura 40 – Tela de monitoramento com o esquemático da estrutura. Fonte: Próprio autor...	90
Figura 41 – Planilha de monitoramento atualizada em tempo real. Fonte: Próprio autor.....	91
Figura 42 – Gráfico de monitoramento atualizado em tempo real Fonte: Próprio autor.....	92
Figura 43 – Início do enchimento do reservatório. Fonte: Próprio autor.....	94
Figura 44 – Reservatório no N.A. 17 cm, mostrando as etapas de projeção da percolação de água no maciço da estrutura. Fonte: Próprio autor.....	94
Figura 45 – Trena a laser monitorando deformações de recalque na crista do modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	95
Figura 46 – Reservatório no N.A. 25 cm. Fonte: Próprio autor.....	95
Figura 47 – Início da ruptura no modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	96
Figura 48 – Colapso estrutural do modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	96
Figura 49 – Vazão de enchimento do reservatório com relação ao tempo no modelo 1:1,25. Fonte: Próprio autor.....	101
Figura 50 – Início do enchimento do reservatório. Fonte: Próprio autor.....	102
Figura 51 – Reservatório no N.A. 19. Fonte: Próprio autor.....	102
Figura 52 – Trena a laser monitorando deformações de recalque na crista do modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	103
Figura 53 – Início da ruptura no modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	103
Figura 54 – Colapso estrutural do modelo reduzido de barragem. Fonte: Próprio autor.....	104

Figura 55 – Vazão de enchimento do reservatório em relação ao tempo no modelo 1:1,50. Fonte: Próprio autor.....	108
Figura 56 – Estação total TS-06 da Leica Geosystems.	109
Figura 57 – Ensaio de comparação das leituras da estação total com o sistema proposto.	109
Figura 58 – Conexão dos componentes eletrônicos do sistema proposto com o computador.	110
Figura 59 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto no topo de montante	111
Figura 60 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto na crista	112
Figura 61 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto no topo de jusante.....	112
Figura 62 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto na base de jusante.....	113
Figura 636 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,50, ponto no topo de jusante.....	115
Figura 647 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,50, ponto na base de jusante.....	115

1. INTRODUÇÃO

1.1. Conceitos Introdutórios

Algumas invenções mudaram a vida das pessoas e trouxeram evolução e facilidade nos seus cotidianos e uma delas foi a construção de barragens para armazenar água e garantir os seus usos. De acordo com Houghtalem (2012), barragem é uma barreira posicionada atravessando um curso de água para armazenar água e modificar o fluxo de corrente normal.

Um dos registros mais antigos no mundo quanto a construção de barragens foi a Barragem de Prosperina, que foi construída entre o primeiro século a.C. e o segundo século d.C. com a finalidade de abastecimento de água da Colônia Augusta Emerita fundada no ano 25 a.C. e está localizada a 5 km a noroeste da cidade de Mérida na Espanha (CRUZ, 1996).

Possivelmente no final do Século XVI foi construída a mais antiga barragem que se tem notícia em território brasileiro, localizada onde hoje é área urbana do Recife, PE. Conhecida presentemente como açude Apipucos, que na língua tupi significa onde os caminhos se encontram, aparece em um mapa holandês de 1577. A barragem original foi alargada e reforçada para permitir a construção de uma importante via de acesso ao centro do Recife (CBDB, 2011).

Além das finalidades de abastecimento de água e controle de enchentes e secas, com o passar do tempo surgiram outros usos das barragens, como geração de energia elétrica e depósito de rejeitos industriais e de mineração (CRUZ, 1996).

Apesar da grande importância no avanço social e econômico, as barragens nos seus diversos fins, sofrem restrições por parte da sociedade sob a alegação que apresentam grandes impactos negativos que são potencializados quando não há os devidos cuidados no planejar, projetar, construir, operar e ou manter essas estruturas. Esses impactos, segundo Cruz (1996) podem vir da própria construção com impactos sociais devido a possíveis deslocamentos de comunidades na área da construção e reservatório e impactos ambientais devido a supressão vegetal e alagamentos de áreas impactando na fauna e flora local. Existem também os riscos que esses empreendimentos oferecem ao vale jusante, em decorrência da possibilidade de ruptura da barragem com vários tipos e níveis de danos.

Com o objetivo de garantir as condições de segurança, as barragens devem ser periodicamente revisadas levando-se em consideração eventuais alterações resultantes do envelhecimento e deterioração das estruturas, ou de outros fatores, tais como, o aumento da ocupação nos vales a jusante (SILVEIRA, 2003).

A Lei Nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, conhecida por Lei de Segurança de Barragens, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), considerando os aspectos referidos, além de outros, e definiu atribuições e formas de controle necessárias para assegurar as condições de segurança das barragens, incluindo suas classificações por categorias de riscos e danos potenciais associados.

Mediante essas classificações, são apresentados pelos responsáveis legais pela barragem, empreendedores e responsáveis técnicos por eles escolhidos, o desenvolvimento e implementação do Plano de Segurança da Barragem, de acordo com metodologias e procedimentos adequados para garantir as condições de segurança necessárias, quanto à construção, operação e manutenção, sendo fiscalizados pelos órgãos públicos competentes (ANA, 2015).

Um desses procedimentos é o Plano de Ação e Emergência - PAE, que é uma das mais importantes formas de promover controle quanto à segurança das barragens. Esse plano visa estabelecer um conjunto de atuações em resposta em situações críticas, visando evitar a ocorrência de acidentes ou minimizar seus impactos (ANEEL, 2015).

Outra forma importante para promover a segurança das barragens é através do monitoramento físico e comportamental das estruturas. Existem vários tipos de monitoramentos adequados para analisar índices e parâmetros comportamentais de cada tipo de estrutura, permitindo a realização de análises comparativas e escolha das melhores ações preventivas e corretivas (SILVEIRA, 2006).

De acordo com Costa (2012), os procedimentos para responder a qualquer ocorrência de anormalidade comportamental de uma barragem requerem normalmente tomadas de decisões muito complexas, com necessidade de considerar vários fatores em um curto espaço de tempo, podendo desencadear graves danos quando decisões equivocadas forem tomadas.

1.2. Justificativa e Motivação

Segundo ANA (2017), no RSB- Relatório de Segurança de Barragens de 2016 existem no Brasil 22.920 barragens em operação nas mais diversas finalidades. Voltadas exclusivamente para a geração de energia elétrica e contenção de rejeitos de mineração, no Brasil há um número expressivo de 2.151 barragens em operação cadastradas no ano de 2017, sendo 1.312 para geração de energia elétrica, segundo ANEEL/BIG (2018) e 839 para contenção de rejeitos de mineração segundo ANA (2017).

O crescimento da quantidade de barragens hidrelétricas entre o ano de 2008 até 2018 foi de 186%, segundo ANEEL (Atlas2008) e (BIG2018), conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1 – Crescimento da quantidade de hidrelétricas brasileiras entre 2008 a 2018.

Crescimento das Hidrelétricas Brasileiras na Última Década			
Tipo de Hidrelétrica	2008	2018	Crescimento
CGH	227	665	293 %
PCH	320	429	34 %
UHE	159	218	37 %
Total	706	1312	186 %

Fonte: ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica (Atlas, 2008 e BIG, 2018)

Ainda de acordo com a ANEEL (2015), na Resolução N° 652, publicada no Diário Oficial da União de 10/12/03, as Centrais Geradoras Hidrelétricas - CGH são a hidrelétricas com capacidade de geração inferior a 5 MW, as Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH, tem a capacidade de geração entre 5 MW até 30 MW e Usina Hidrelétrica - UHE, também chamadas de GCH- Grandes Centrais Hidrelétricas, tem a capacidade de geração acima de 30 MW.

De acordo com o CNRH (2012), Resolução N° 143, manter as barragens em pleno estado de segurança é responsabilidade dos seus empreendedores sejam eles agentes privados ou agentes governamentais.

A Inspeção de Segurança Regular deve ser realizada pelo empreendedor através de equipe própria, onde deverão abranger todas as estruturas de barramento e retratar suas condições de segurança, conservação e operação. Quanto a Inspeção de Segurança Especial, essa deve ser realizada com equipe específica e só será realizada em condição especial onde houver alguma ocorrência advinda de fenômenos naturais, falha operacional onde o reservatório esteja em condições excepcionais (ANEEL, 2015).

A fiscalização do controle da segurança das barragens é de responsabilidade direta da entidade que outorgou o direito da atividade relacionada a finalidade da estrutura. E é classificado quanto ao uso dos recursos hídricos quando o objeto for de acumulação de água, do uso do potencial hidráulico quando se tratar de uso preponderante para fins de geração hidrelétrica e, deposição de rejeitos minerários e deposição de rejeitos industriais (BRASIL, Lei N° 12.334, 2010).

Quanto ao monitoramento de barragens, atualmente, existem vários tipos que realizam diferentes análises na estrutura de barramento. Esses instrumentos podem mostrar dados relacionados ao grau de umidade do maciço, pressão interna, recalque, vibração, inclinação da estrutura e deslocamento horizontal. Em quase todos necessários a participação integral de uma

pessoa para acompanhar, realizando leituras e comparando dados anteriores (SILVEIRA, 2006).

Mesmo projetos detalhados e bem elaborados projetos, critérios para construção das barragens e muitos sistemas de instrumentação, ainda há grandes riscos de acidentes provenientes a rupturas. Os acidentes com barragens são tão antigos quanto à própria história da construção das mesmas e o primeiro que se tem notícia foi com a barragem de Sattel Kafara e ficava localizada no antigo Egito. Ela foi construída com a finalidade de abastecimento e logo após sua conclusão sofreu um galgamento por não possuir uma estrutura vertente levando todo o maciço a ruínas (AGUIAR, 2014).

Ao longo dos últimos anos, segundo Faria (2015), somente no estado de Minas Gerais ocorreram cinco acidentes de rompimento de barragens.

- 22/06/2001: rompimento de barragem de rejeitos de minério de ferro da Mineradora Rio Verde, em São Sebastião das Águas Claras (Macacos) MG;
- 29/03/2003: rompimento de barragem de rejeitos industriais – Ind. Cataguases de Papel, em Cataguases (MG);
- 10/01/2007: rompimento de barragem de rejeitos da Mineradora de Bauxita Rio Pomba/Cataguases, em Mirai (MG);
- 10/09/2014: rompimento de barragem de contenção de rejeitos na Mina Retirado do Sapecado, em Itabirito (MG), e
- 05/11/2015: rompimento de barragem de rejeitos da Mineradora Samarco, em Mariana (MG).
- 25/01/2019: rompimento da barragem de rejeitos da Mineradora Vale no município de Brumadinho(MG).

O histórico de falhas de barragens é uma importante ferramenta para se visualizar os equívocos ocorridos anteriormente, bem como negligências e situações inesperadas para que se possam propor, baseando-se na experiência adquirida, medidas de prevenção, instrumentações com novos sistemas mais completos e planos de ações emergenciais mais eficazes (CRUZ, 1996).

Dentro da grande necessidade de segurança, através de inspeções, análises e verificações das condições estruturais das barragens, este trabalho visa contribuir para evolução do entendimento do comportamento dessas estruturas e seus limites de tolerância, através dos estudos e análises obtidos pelas simulações e leituras das deformações das barragens.

1.3. Objetivos do Trabalho

Objetiva-se com este trabalho conhecer o comportamento que precedem as rupturas das barragens e assim desenvolver um sistema de monitoramento, como ferramenta de apoio a tomada de decisão para seus empreendedores, visando reduzir riscos e ampliar a segurança.

São objetivos específicos deste trabalho:

- Construir um modelo para estudar e analisar as deformações físicas que antecedem e geram uma anormalidade comportamental da estrutura e verificar o quanto são determinantes para uma ruptura.
- Examinar se as deformações estruturais de uma barragem ocorrem gradativamente e exponencialmente nas faces de montante, crista e jusante do barramento e a relação em proporção e tempo entre elas.
- Desenvolver um sistema com metodologia inovadora utilizando sensores de distância a *laser* que instalados em pontos fixos externos ao barramento, que farão o monitoramento das estruturas.
- Criar um *software* específico, desenvolvido exclusivamente para o sistema de monitoramento proposto, que receberá os dados dos sensores e em tempo real, processará e emitirá relatórios e sinais de alerta quanto às deformações.

1.4. Estrutura do Trabalho

Essa dissertação está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1 são expostos conceitos introdutórios, a motivação para os estudos desenvolvidos e a justificativa para a criação do sistema desenvolvido, além da descrição do escopo geral do trabalho proposto.

No Capítulo 2, foi desenvolvida uma revisão da literatura, iniciando sobre conceitos básicos e tipos existentes de barragens, em seguida abordando sobre projetos, análises necessárias e sua concepção. Ainda nesse capítulo, foi descrito aspectos geológicos e geotécnicos os quais protagonizam como ciência básica sobre a estrutura de barragens. Finalizando o referido capítulo, foi apresentada uma detalhada revisão sobre a segurança de barragens, abrangendo desde a legislação brasileira, comportamento físico das barragens, gestão de riscos, métodos de monitoramento e registros de acidentes com deformação de maciços, envolvendo barragens brasileiras.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada no desenvolvimento da pesquisa, contemplando os estudos para a determinação de valores de controle para os dados da instrumentação aplicada. São apresentados os conceitos de funcionamento do sistema aplicado, seu desenvolvimento como construção do *hardware*, *software* e forma de comunicação entre eles. Também é contemplada neste capítulo a simulação do rompimento de barragem em laboratório, a atuação do sistema aplicado na simulação e a comparação da precisão do sistema aplicado com uma estação total aferida pelo INMETRO.

Os resultados são apresentados no Capítulo 4, onde são mostradas a precisão, a relação deslocamento e deformação com o tempo e o tempo de processamento de dados e detecção pelo sistema aplicado quanto a instabilidade da estrutura.

As conclusões e discussões obtidas com a aplicação da metodologia são apresentadas no Capítulo 5. O Capítulo 6 finaliza o trabalho apresentando as considerações finais, formado de recomendações e perspectivas futuras, seguido das referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Conceito de Barragem, Classificações e Tipos Existentes

As barragens são definidas como barreiras ou estruturas que cruzam rios ou canais para confinar e assim controlar o fluxo da água através de um desnível. As finalidades das barragens como também a geográfica local, justificam as variações dos formatos existentes, como comprimentos, alturas, espessuras e também a variação dos materiais de composição da estrutura (CBDB, 2011).

As barragens variam de tamanho e podem medir de alguns poucos metros de altura a mais de 100 metros em estruturas massivas. Duas das maiores barragens dos Estados Unidos são a Barragem Hoover, no Rio Colorado, construída em 1936, tem 222 metros de altura, 380 metros de comprimento e é capaz de armazenar 35,2 bilhões de m³ de água, e a Barragem Grand Coulee no Rio Columbia, construída em 1942, com 168 metros de altura, 1.592 metros de extensão e capacidade de armazenamento de 11,7 bilhões de m³ de água (HOUGHTALEN, 2012).

As barragens podem também, ser separadas em dois grandes grupos, barragens de regularização ou de contenção. Constituem o grupo de regularização as barragens que tem o objetivo de regularizar o regime hidrológico de um rio, armazenando água em períodos em que a afluência é maior que a demanda, para utilizá-la em períodos de déficit de afluência em relação a demanda e podem ser com a finalidade de, abastecimento de água, navegação, turismo, piscicultura, controle de enchentes e geração de energia elétrica, chamadas Hidrelétricas. As barragens de contenção são estruturas com o objetivo de reter água de forma temporária ou reter e acumular sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração (COSTA, 2012 e SOUZA, 2009).

A classificação quanto ao uso principal (finalidade) das barragens cadastradas no Plano Nacional de Segurança de Barragens - PNSB no ano de 2016 é mostrada na

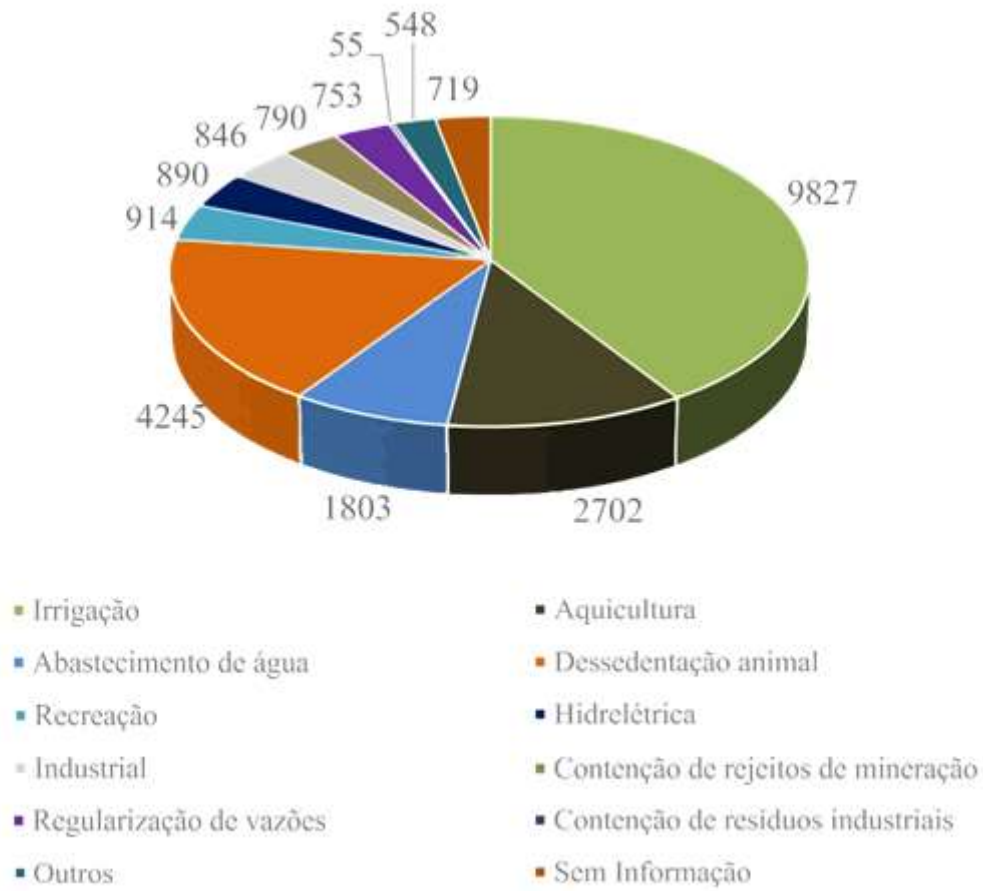


Figura 1.

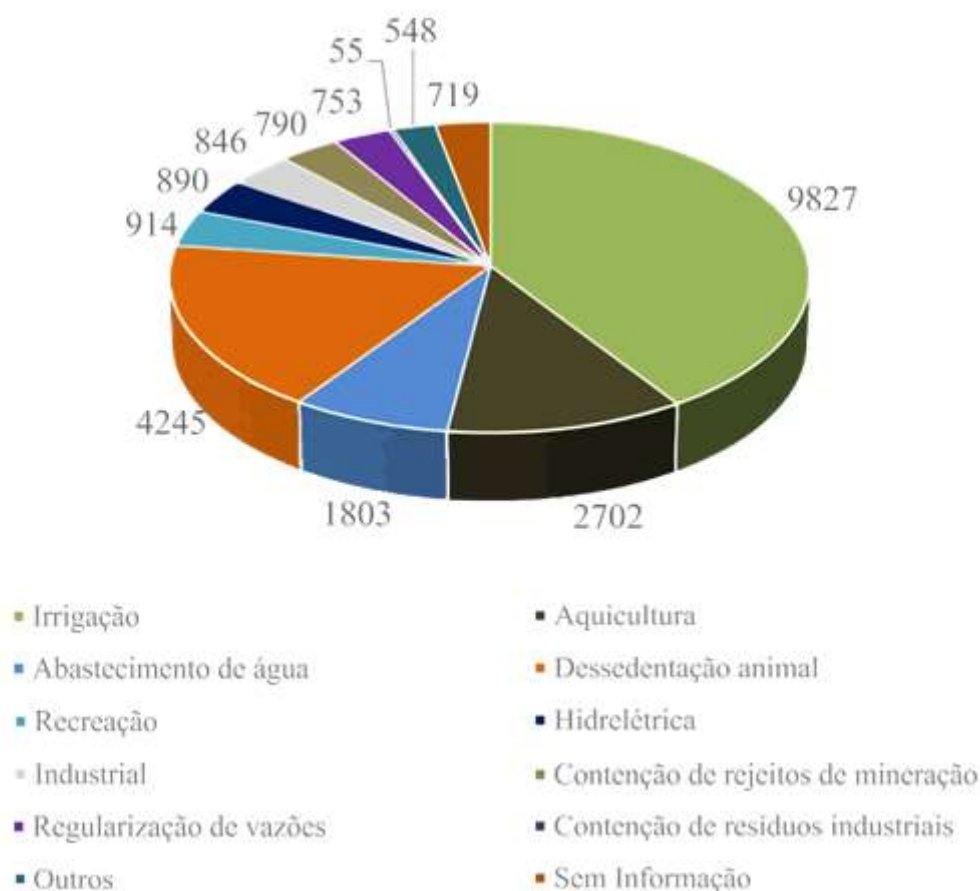


Figura 1 – Classificação das barragens quanto ao uso principal cadastradas no PNSB em 2017.
 Fonte: ANA (2018) – Relatório de Segurança de Barragens 2017.

Apesar de existirem diferentes tipos de barragens, nas suas diversas finalidades, serão enfatizadas neste trabalho as barragens hidrelétricas e barragens de contenção de rejeitos de mineração, cujas definições são apontadas a seguir.

(A) Barragem Hidrelétrica – Essas estruturas devem priorizar o desnível do perfil longitudinal do rio que é a principal característica do potencial hidráulico, juntamente com o regime hidrológico da bacia hidrográfica, pois não podem ser admitidas grandes depleções do reservatório (COSTA, 2012). São estruturas mais complexas tanto na sua forma de análise e elaboração de projeto, quanto na sua execução e operação, além de serem compostas por vários elementos estruturais com finalidades diversas que formam o arranjo da barragem (SOUZA, 2009). As hidrelétricas geralmente são compostas de barragem de terra, de enrocamento e estruturas de concreto. Os principais elementos constituintes são ilustrados pela Figura 2, mostrando a UHE – Usina Hidrelétrica de São Simão com capacidade de

geração de 1.710 MW, localizada nos municípios de São Simão – GO e Santa Vitória – MG, sob concessão da CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, de acordo com a CEMIG, (2006).



Figura 2 – UHE- Usina Hidrelétrica de São Simão. (modificada)
Fonte: CEMIG, 2018

(B) Barragens de Mineração - Diferente de barragens convencionais, que normalmente barram água, barragens de rejeito armazenam rejeitos dos processos minerais que podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até solos de granulometria fina e alta plasticidade (lamas), explica Araújo (2006). As barragens de mineração geralmente são compostas de barramento de terra e enrocamento, afirma Cardozo (2016). Um exemplo deste tipo de barragem é mostrado na Figura 3, a barragem Casa de Pedra, localizada no município de Congonhas - MG, pertencente à mineradora CSN – Companhia Siderúrgica Nacional.



Figura 3 – Barragem Casa de Pedra - Contenção de rejeito de mineração. (modificada)
 Fonte: <http://dam.com.br/index.php/pt-br/barragens-contencao>

De acordo com Costa (2012), ainda existem duas classificações quanto ao tipo, basicamente referindo ao tipo de material de composição, denominadas barragens convencionais e barragens não convencionais, sendo as barragens convencionais formadas por barragens de terra, enrocamento, concreto e mistas e as barragens não convencionais, de gabião, madeira e alvenaria de pedra. Algumas definições são elencadas a seguir:

- a) Barragens de Terra podem ser homogêneas ou zonadas. São consideradas homogêneas quando há predominância de um único material, embora possam ocorrer elementos diversificados, como filtros, rip-rap e outros. Denominadas de zonadas, as barragens com um zoneamento de materiais terrosos em função de suas características de materiais e ou permeabilidade.
- b) Barragens de Enrocamento formada por dois grupos, podem ser com núcleo impermeável ou com face impermeável.
 - Consideradas de núcleo impermeável, são as barragens quando tem predominância de material rochoso e a vedação é feita por material argiloso no centro da sessão, separando o enrocamento por zonas de transição, ou seja, materiais de granulometria intermediária, para evitar o carreamento do material

fino para o interior do enrocamento. O núcleo pode ficar centralizado ou inclinado para a montante.

- São classificadas como barragens de enrocamento com face impermeável, estruturas de barramento quando a vedação da água é garantida pela impermeabilização da face de montante, seja por uma camada de asfalto, placa de concreto ou até chapa de aço.
- c) Barragens de Concreto - Composto esse grupo estão as barragens de gravidade, gravidade aliviada, em contraforte, concreto compactado a rolo (CCR) e as barragens abóbadas.
- Barragens de gravidades são estruturas maciças, com pouca armação, cuja sua característica física é ter sua estrutura trabalhando apenas à compressão através do seu peso próprio.
 - Existem também as barragens de gravidade aliviada que são estruturas mais leves, sendo vazada no centro, com o objetivo de efetuar menor pressão as fundações e ou economizar concreto, podendo reduzir a metade do consumo de concreto, porém exigem um maior volume de armação devido aos esforços de tração e também armação de pele para conter fissuração.
 - Barragens em contraforte são estruturas semelhantes às barragens de gravidade aliviada, porém é ainda mais leve. Por concentrar em uma pequena da fundação os esforços causados pela pressão hidrostática, por isso apresentam maiores tensões de contato, exigindo uma maior armação e conseqüente uma maior redução no volume de concreto.
 - Chamadas de CCR, as barragens de concreto compactadas com rolo, também chamadas de barragem de concreto rolado, são estruturas de gravidade em que o concreto é espalhado com uso de trator de esteira e depois compactado com o rolo compactador. Na sua execução deve-se ter uma grande atenção quanto ao A/C, fator água cimento do concreto. Como esse concreto não é vibrado, a sua estanqueidade é garantida por uma camada de concreto convencional construída no paramento de montante.
 - Devido a sua forma, são chamadas de abóbadas as barragens formadas por arcos em duplo sentido, ou seja, curvatura na vertical, mostrada no perfil e também na horizontal, ao longo do traçado.

2.2. Projetos e Construção de Barragens

Uma barragem de regularização de vazão, grupo onde estão as hidrelétricas, geralmente é composta das seguintes partes: a fundação e seus apoios laterais, chamados de ombreiras, o maciço de que é construída com suas funções internas, a proteção junto ao reservatório contra ondas, chamada riprap, a proteção do topo ou crista, a proteção da face exposta ao tempo, por grama, pedras, etc (CBDB, 2011).

Conforme Marangon (2004), as barragens de contenção de rejeitos, geralmente são compostas de uma única estrutura que é a estrutura de barramento e esta é constituída por elementos chamados maciço, talude de jusante, crista, talude de montante, fundação, base e filtro.

As barragens de hidrelétricas têm um número de estruturas de barramento, muito superior as demais barragens, pois tem uma complexidade quanto ao uso e manuseio da água represada. Elas são compostas das seguintes estruturas (SOUZA, 2009; COSTA, 2012; CRUZ, 1996; SILVEIRA, 2003 e MARANGON, 2004):

- Vertedouro: Também chamado de extravasor, tem o objetivo de escoar o excesso de água acumulada pelo reservatório, evitando o risco de o nível da água atingir a crista da barragem ou até mesmo seu galgamento. Podem ser compostos de comportas vagão, comportas de segmento ou ter soleira livre.
- Tomada D'água: Representa o conjunto de obras que permite a retirada, do reservatório, da água a ser utilizada, seja para a obtenção de energia ou para outros fins. O tipo de tomada d'água varia com o tipo de barragem. Assim, as barragens de concreto, a tomada d'água consiste geralmente em um conduto que pode se desenvolver através do maciço da barragem ou em sua proximidade, enquanto na barragem de terra, aparece nas ombreiras do reservatório.
- Conduto Forçado: Tubulações que geralmente são de grande diâmetro que conduz o fluxo de água até as turbinas.
- Casa de Força: Estrutura de concreto armado onde são instaladas as máquinas, turbinas e geradores.
- Canal de Fuga: Estrutura por onde a água passa ao sair da casa de força.
- Bacia de Dissipação: Estrutura por onde a água passa ao sair do vertedouro.
- Dissipador de Energia: Uma das formas é o “Salto de Esqui” que é uma rampa no fim da bacia de dissipação que faz com que a água corrente forme uma onda e se

projete a superfície com um determinado grau de inclinação causando um atrito que diminui sua energia e velocidade.

- Muros de Ligação: Estruturas de concreto armado que fazem a ligação da barragem de terra com as estruturas de concreto, vertedouro ou tomada d'água, favorecendo o direcionamento do fluxo.
- Ensecadeira: Barragem construída com finalidade de desviar o rio, por tempo determinado, para que a obra permanente possa ser executada e posteriormente a ensecadeira é destruída ou fica submersa no reservatório.
- Túneis de Desvio: Possuem a mesma finalidade das ensecadeiras, sendo, porém, construídos em cursos d'água com vales íngremes, e quando possível, nos locais onde existam curvas. Em muitos casos, o túnel de desvio é usado posteriormente como túnel de adução, para transportar as águas do reservatório para a casa das máquinas.
- Barragem de Terra: Tem a finalidade de barramento e formação do reservatório e geralmente fazem conexão com as ombreiras e barragem de concreto.
- Ombreiras: são as encostas pertencentes a geologia local, onde as barragens iniciam em uma margem do rio e terminam em outra margem, por isso são chamadas de ombreira direita e ombreira esquerda. Geralmente são preparadas para fazer a ligação com a estrutura da barragem. Essas preparações podem ser escavações, detonações, tratamento de taludes com concreto projetado, atirantamentos e etc.

2.2.1. Concepção do projeto

A arte de projetar uma barragem está ligada a arte de controlar o fluxo da água pelo conjunto barragem-fundação, concentrando sempre na estabilidade, como afirma Cruz (1996).

De acordo com Silveira (2006), um projeto de engenharia começa com a definição de um objetivo e se processa por meio de uma série de passos lógicos até a preparação dos desenhos, especificações e lista de materiais.

O projeto de uma barragem é executado em fases sucessivas, cujos objetivos e metodologia variam não só em função da escala de estudo, mas principalmente em decorrência do progressivo detalhamento que as fases mais decisivas passam a exigir, que é o inventário ou plano diretor e a viabilidade (COSTA, 2012).

Segundo Souza (2009), a sequência para estudos de uma barragem é iniciada pela concepção do Inventário ou Plano Diretor, que é a profunda análise de dados topográficos,

através do mapeamento das curvas de nível detalhando variação com precisão métrica, podendo ser necessário sobre vó com coletas de dados e mapeamento, favorecendo a um estudo preciso quanto ao dimensionamento e posicionamento das estruturas de composição de uma barragem, inclusive a área do reservatório, formando assim o projeto de “Arranjo Geral”.

Como passo seguinte, de acordo com Costa (2012), deve-se realizar o estudo da viabilidade, dando início aos estudos específicos para uma determinada alternativa inventariada, ao final dos quais estarão definidos a exata posição do eixo barrável, o melhor tipo de barragem, as diferentes soluções de arranjo de obras e principalmente, a viabilidade técnica e econômica do empreendimento.

Para a melhor definição quanto a escolha do local, segundo ICOLD- CIGB (2008), após a conclusão de um levantamento hidrológico, realiza-se um programa de exploração, na forma de pontos de sondagem e poços de teste, que é conduzido em cada local para obter amostras de solo e rocha para testar as propriedades físicas desses materiais, dados estes que também contribuem para a definição do tipo de estrutura.

Os tipos de barragens são extremamente variáveis e a escolha do seu perfil é determinada pela influência de uma série de condicionantes locais como materiais disponíveis, clima da região, geologia e hidrologia local, recursos disponíveis para a execução da obra, legislação local, prazos para conclusão da obra e nível técnico dos projetistas (CRUZ, 1996).

A disponibilidade de materiais próximos ao empreendimento é grande fator contribuinte para o custo e também para o cronograma executivo. De acordo com Cruz (1996), deve ser dada prioridade a materiais provenientes da escavação para a construção das próprias obras de desvio, vertedouros, canais de adução, tomadas d'água e casas de força, desde que enquadrado nas características físicoquímicas. Ainda segundo o autor, a utilização de materiais de menor resistência, pode exigir taludes mais suaves e sessões maiores, das quais exigirão maior volume de material, maior número de horas máquinas e maior tempo de execução, portanto deverá ser feito uma análise criteriosa quanto ao benefício real da utilização desses materiais.

Para a definição do local da construção de uma barragem é fundamental realizar uma boa análise geológica, assim como para a definição da sua fundação, que dependem da espessura e características físicas, químicas e mineralógicas da rocha, que suportará o seu peso. Incluindo análise da permeabilidade e investigação da presença ou não de determinadas estruturas, como acamamento, xistosidade, dobras, fraturas, etc. As condições estão diretamente ligadas com a altura da barragem, isto é, as considerações diferem para uma barragem baixa e uma alta. (MARANGON, 2004).

Segundo Cruz (1996), projetos de barragens requerem um conhecimento da geotécnica das fundações, quanto dos materiais envolvidos para a construção da barragem e isso é determinante para a qualidade da obra, durabilidade e segurança.

Na Tabela 2 são mostrados alguns materiais que necessitam de análise geotécnica e suas aplicações na construção de uma barragem, de acordo com Marangon (2004).

Tabela 2 – Relação de materiais de construção de barragens e suas aplicações.

MATERIAL	APLICAÇÃO
Solos e Rochas	Maciço
Solos e Rochas	Diques, Ensecadeiras e Taludes
Areias	Filtro
Areias e Rocha (pedra britada)	Concreto

Fonte: Marangon (2004)

Um profundo estudo hidrológico é indispensável para a elaboração de um projeto de barragens, pois através dele haverá a obtenção direta de valores de vazão através de leituras diárias, que permitem calcular as vazões médias, diárias, mensais e anuais. Lembrando que a potência de uma barragem é função da vazão do curso na secção da barragem e do seu desnível, pode-se perceber a importância dos cálculos de vazão, obtendo reais dados quanto ao aproveitamento hidrelétrico e avaliação de potenciais hidrelétricos, localização do aproveitamento, tipo de barragem, dimensionamento de vertedores e dispositivos de descarga, instalações de aproveitamento, regularização de potências (MARANGON, 2004).

Depois de escolhido o local, o perfil da barragem e a área do reservatório, se dá início ao planejamento detalhado na região correspondente e no que diz respeito ao projeto para garantir que os valores econômicos, social e ambiental sejam adicionados a bacia, afirma o ICOLD-CIGB (2008). Ainda segundo a citada comissão, a restauração de ecossistemas é um dos principais objetivos ambientais dos projetos de barragens, garantido que a natureza, fauna e flora local voltem a se recuperar e se equilibrar ao máximo possível.

Quanto ao social, é necessário o envolvimento público, principalmente o local, com o objetivo de envolver a comunidade para garantir que os projetos e programas de barragens respondam às necessidades e as preocupações do público, através da disseminação de informações sobre as atividades propostas, a compreensão dos desejos, das necessidades e das

preocupações desse público, a realização de consultas antes da tomada de decisões e a consideração das suas opiniões, são elementos fundamentais para um bom processo de implantação de uma barragem, afirma o ICOLD- CIGB (2008).

Após realizados análises e estudos dos diversos aspectos da região onde será implantado o empreendimento, mencionados anteriormente, se dá início a concepção dos projetos. A princípio, com base nos dados multidisciplinares coletados, é concebido por uma equipe técnica especializada o projeto básico, que posteriormente se tornará o projeto executivo.

De acordo com o CONFEA (2015), projeto básico é a somatória do conjunto de todos os elementos conceituais, técnicos, executivos e operacionais abrangidos pelas áreas de atuação, pelas atividades e pelas atribuições dos profissionais da Engenharia, consiste nos principais conteúdos e elementos técnicos correntes aplicáveis às obras e serviços, sem restringir as constantes evoluções e impactos da ciência, da tecnologia, da inovação, do empreendedorismo e do conhecimento e desenvolvimento do empreendimento social e humano.

Na fase do projeto básico, segundo Costa (2012), são analisados todos os estudos e investigações necessárias a configuração final do projeto de obras, fornecendo todos os elementos que possibilitem realizar um orçamento coerente que pode ser para fins de licitar a construção dessas obras, pois as investigações realizadas conduzem a custos realísticos, envolvendo não apenas estudos geotécnicos criteriosos, mas também uma acurada análise dos problemas sociopolíticos, econômicos e ambientais.

No projeto básico são dimensionadas as estruturas, definido posicionamentos, metodologias construtivas, materiais de composição e equipamentos utilizados. As necessidades que surgem durante análises mais profundas do cenário que envolve o empreendimento ou vivenciadas durante sua construção, sinalizando pontos que deverão ser complementados ou alterados no projeto básico, geram um projeto mais completo e certo de uma precisa execução, se tornando um projeto executivo (CRUZ, 1996).

O projeto executivo, que consiste no conjunto dos elementos necessários e suficientes à execução completa da obra ou do serviço, conforme disciplinamento da Lei nº 8.666, de 1993, e das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (CONFEA, 2015).

Segundo Cruz (1996), a fase do projeto executivo deve se estender por todo o período de construção da barragem e mesmo durante o período de monitoração e acompanhamento do desempenho das obras, compreendendo os primeiros anos de sua operação. É necessária, durante esse período, a presença de um projetista atuante, independentemente das equipes alocadas à fiscalização, cabendo-lhe a função de confirmação das necessidades de alterações no projeto e as realizando.

2.2.2. Construção de barragens

Para iniciar a construção de uma barragem é necessário que o responsável pela obra, tenha a posse da Licença de Instalação (LI) e essa liberação é dada pelo órgão ao qual a barragem foi dada a outorga e cabe ressaltar que a Licença Prévia (LP) antecede a LI, juntamente com a Licença para Desmatamento, todas liberadas sequencialmente e mediante ao cumprimento das exigências e enquadramento a normas e leis pertinentes vigentes (MIN, 2015).

A execução de uma obra de barragem, segundo Costa (2012), abrange não apenas a barragem propriamente dita, mas todas as obras auxiliares que possibilitam a utilização da barragem, de acordo com os objetivos para os quais a obra foi concebida e a sua conclusão é dada encerrada com o enchimento do reservatório criado.

A seguir são discutidos aspectos construtivos para os dois tipos estudados neste trabalho.

(A) Barragens de armazenamento de água

As barragens de armazenamento de água por serem grandes obras iniciam-se pela construção de uma infraestrutura indireta necessária a instalação e acomodação das equipes, estradas de acesso, oficinas e galpões onde são processados materiais e componentes para a construção do empreendimento final, locais para estocagem de materiais e pátio de equipamentos e veículos.

Inicia-se a construção de uma barragem, como a marcação topográfica dos locais onde serão construídas as estruturas e área do reservatório, seguindo de supressão vegetal, escavação comum, escavação de rochas, fundações, obras civis, terraplanagem (SOUZA, 2009).

Considerando a impossibilidade de evitar que a água percorra o interior dos aterros compactados e alcance o talude de jusante, consagrou-se na prática de projetos adoção de aterros com sistemas de filtro vertical e horizontal, afirma Pirolli (2015), mencionando as três principais funções desse sistema:

- Disciplinar a vazão forçando o fluxo para uma direção determinada, e com isso aumentando o controle sobre as poropressões desenvolvidas;
- Impedir a remoção de partículas sólidas proveniente do fluxo de água pelo material do aterro e/ou das fundações prevenindo ocorrência de erosão interna;
- Exercer a função de dreno, disciplinando a água interceptada e a conduzindo para fora do aterro, podendo assim ser medida e analisada

As barragens, na maioria dos casos as hidrelétricas, podem ser construídas de Concreto Convencional Vibrado (CCV) ou Concreto Compactado a Rolo (CCR). Para execução do CCR, utiliza-se um concreto de abatimento nulo, o qual é lançado, transportado e compactado pelos

mesmos equipamentos utilizados em barragens de terra e enrocamento. Geralmente o CCV é utilizado para a construção da parte da barragem onde estão os componentes hidromecânicos, como tomada d'água, conduto forçado, casa de força e vertedouro, já o CCR é utilizado para construção da barragem, podendo essa também ser de terra ou enrocamento, como já mencionado anteriormente (GUSTEIN, 2003).

Obras de construção de barragens hidrelétricas são ilustradas pelas Figura 4 e Figura 5 a seguir.



Figura 4 – Construção da PCH Telegráfica no rio Juruena – MT.
Fonte: Próprio autor.



Figura 5 – Construção do vertedouro da PCH Parecis no rio Juruena –MT.
Fonte: Próprio autor

(B) Barragens de contenção de rejeitos

As barragens para contenção de rejeitos de mineração têm uma grande particularidade quanto as suas etapas de construção, pois elas não precisam ser construídas de uma única vez para entrar em operação, como ocorre nas hidrelétricas. Essas barragens podem começar a receber os resíduos do processo minerário logo após a conclusão da sua primeira etapa e assim que a barragem chegar ao seu limite máximo de contenção inicia-se a construção de novas etapas para aumentar sua capacidade de barramento, chamado de “alçamento da barragem” onde são utilizados o próprio material de rejeito para a execução da ampliação das estruturas de barramento.

Os três métodos existentes de alçamento de barragens são segundo Cardozo (2016):

- Método de alteamento a jusante: Consiste de construção e alteamento do barramento sempre a jusante. Na Figura 6 vemos um esquema simplificado de alteamento de uma barragem à jusante.

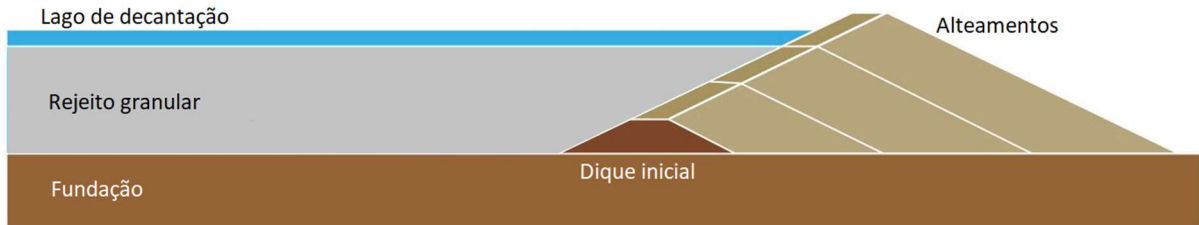


Figura 6 – Método de alteamento a jusante de barragem de rejeito de mineração.
Fonte: IBRAM (2016)

- Método de alteamento a montante: Consiste de construção e alteamento do barramento sempre à montante, depositando o material sobre o rejeito já consolidado. Na Figura 7 é representada a estrutura inicial de um barramento, com o dique inicial, a praia de rejeito e os alteamentos à montante.



Figura 7 – Método de alteamento a montante de barragem de rejeito de mineração.
Fonte: IBRAM (2016)

- Método de alteamento na linha de centro: Consiste de construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, acompanhando um eixo vertical, chamado de linha de centro, sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio barramento à jusante, mostrado na Figura 8.

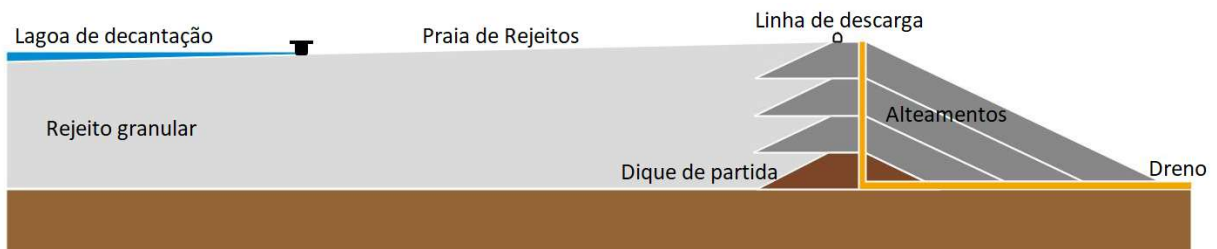


Figura 8 – Método de alteamento a linha de centro de barragem de rejeito de mineração.
Fonte: IBRAM (2016)

Os métodos de alteamento por montante e pela linha de centro têm vantagens econômicas, pois apresentam redução do custo de implantação e têm o custo de construção e o custo operacional distribuídos no tempo. Entretanto, têm na água dos poros do rejeito e do reservatório, o principal elemento instabilizador (IBRAM, 2016).

Geralmente as mineradoras tendem a optar por projetos de alteamento utilizando as técnicas de alteamento a montante, por se tratarem de obras com menor movimentação de volume de material e por consequência obras mais rápidas e mais econômicas. (IBRAM, 2016).

2.3 Aspectos Geológicos e Geotécnicos

Os aspectos geológicos e geotécnicos relacionados a barragens, analisados com técnicas específicas para cada fator buscado e tem os seguintes objetivos, (COSTA, 2012):

- Selecionar os melhores locais barráveis em função da geologia e topografia;
- Caracterizar superficialmente os eixos barráveis selecionados sob o ponto de vista geológico e geotecnológico;
- Definir as macrocaracterísticas dos reservatórios formados em cada eixo;
- Definir superficialmente as características dos materiais naturais de construção.

De acordo com Cruz (1996), deve-se analisar detalhadamente os dados sobre as características geológicas e geotécnicas não somente de toda região onde será construída a barragem, como também as características dos materiais que a compõe. Ainda segundo o autor, tão importante quanto os materiais de construção são os materiais de fundação ou as formações naturais sobre cujas propriedades de engenharia se pode atuar somente numa escala limitadas, e que irão permanecer por baixo das barragens.

Segundo Marangon (2004), as condições das fundações dependem da espessura e características físicas, químicas e mineralógicas da rocha, que suportará o peso da barragem, incluindo também a permeabilidade, a presença ou não de determinadas estruturas, como acamamento, xistosidade, dobras, fraturas, etc. Ainda segundo o autor, as condições estão diretamente ligadas com a altura da barragem, isto é, as considerações diferem para uma barragem baixa e uma alta, onde normalmente, são encontradas as seguintes condições de fundações:

- Rocha sã e sólida - normalmente aceita qualquer tipo de barragem. Inclui, via de regra, a escavação da camada superficial quando alterada (mesmo sendo rocha) e tratamento eventual por injeção, para consolidação.

- Sedimentos (Aluviões) - incluem os cascalhos, areias, siltes e argilas. Os cascalhos estão sujeitos à intensa percolação, os siltes e as areias ocasionam recalques e percolação, e as argilas sofrem recalques, principalmente quando saturadas de água. Dependendo do tipo de barragem, da sua altura e com aplicação de tratamentos adequados, qualquer desses materiais poderá ser utilizado.

Quanto aos materiais para compor o maciço, o corpo da barragem, os mais importantes são pedra, cascalho, areia e argila. Segundo Marangon (2004), a localização adequada das jazidas que forneçam materiais de boa qualidade é um dos fatores que mais influem no custo e no andamento das grandes obras civis. Identificação de jazidas naturais para exploração de material:

- Pedreiras (Pedra): Utilizadas para confecção de concretos e pavimentação.
- Jazidas de Cascalhos e Areia: Utilizados para construção de aterros, diques, ensecadeiras filtros e drenos.
- Jazidas de Argila: para impermeabilização de obras de terra, construção do maciço, diques e ensecadeiras
- As investigações e análises que devem ser feitas nos eixos barráveis, onde serão construídas as barragens, segundo Costa (2012), são:
- Características litológicas e geotecnológicas das rochas locais;
- Tipos de rochas;
- Estruturas presentes;
- Estado de alteração e provável espessura dos solos;
- Fundações;
- Características de estabilidade, como resistência ao cisalhamento das rochas, relação entre os esforços e as descontinuidades;
- Características de deformabilidade;
- Características de estanqueidade.

Ao concluir esses estudos topográficos, geológicos e geotécnicos no eixo barrável, de acordo com Costa (2012), torna-se possível fazer as recomendações quanto ao melhor tipo de barragem e o melhor arranjo de obras.

Em relação aos materiais de construção, pedra, areia, cascalho e argila, são necessários estudos detalhados que definem as capacidades das jazidas próximas, cuidados ambientais necessários para a exploração, detalhamento das características in situ dos materiais e coleta de amostras para ensaios laboratoriais que determinam suas características geotécnicas. Ainda

segundo o autor, devem-se aproveitar materiais provenientes das escavações obrigatórias para a construção da barragem, principalmente materiais rochosos (pétreos), caso tais materiais não sejam assim obtidos, ou o sejam, mas em volume insuficiente, devem ser exploradas as jazidas que se localizarem as menores distâncias do local da obra (CRUZ, 1996).

Ensaaios laboratoriais geralmente compreendem: Amostras Indeformáveis, Índice Suporte Califórnia (CBR), Casagrande, Adensamento de Solos, Cisalhamento Direto, Compressão Simples e Compressão Triaxial. Onde tem-se como resultados, Teor de Umidade, Peso Específico, Granulometria, Índice de Plasticidade, Limite de Plasticidade, Limite de Liquidez (FIORE, 2015; NBR-9895; NBR-6457 e NBR-7182).

Cruz (1996), afirma que durante a construção, ensaios laboratoriais específicos devem continuar durante todo o processo construtivo, controlando a qualidade dos serviços de compactação e a situação dos materiais aplicados naquela circunstância.

Nos encontros das estruturas de uma barragem de material de composição diferentes, cria-se uma interface, que é uma descontinuidade estrutural, pois materiais diferentes se comportam de forma diversa, causando uma descontinuidade de tensões e de deformações, além de criar um contraste de permeabilidade devido aos vazios, favorecendo ao fluxo causando infiltrações e colocando em risco a segurança da barragem. Essas interfaces podem ser entre solo-concreto e enrocamento-concreto ou até mesmo em estruturas homogêneas como barragens de terra e podem causar fenômenos conhecidos como *piping* (CRUZ, 1996).

Piping é o aparecimento de canais dentro da estrutura de contenção, formados pequenos funis, por onde a água acaba circulando e esse processo de erosão interna é muitas vezes agravado por falhas nos sistemas de drenagem que podem ser esmagados pelo próprio peso e da pressão da lama de rejeitos sobre o fundo da estrutura. (SILVEIRA, 2006).

Os efeitos dessa interface podem ser amenizados, incluindo entre os materiais de diferentes características, um terceiro material com características intermediárias, que são chamados de materiais de transição e esses materiais devem atender requisitos de permeabilidade, erodibilidade, deformabilidade e resistência (CRUZ, 1996).

De acordo com IBRAM (2016), o grande volume de rejeitos gerados, condicionados aos custos da disposição, faz com que seja atrativa a utilização destes materiais na construção das próprias barragens de contenção, desde que sejam obedecidas algumas premissas, tais como:

- Separação da fração grossa e fina (as propriedades geotécnicas são diferentes entre as frações);
- Controle dos processos de separação (granulometria);

- Utilização de sistemas de drenagens eficientes, compactação dos rejeitos (aumento da densidade e da resistência);
- Proteção superficial da barragem, dentre outras.

2.4 Etapas na Vida Operacional de uma Barragem

Como toda obra de engenharia, uma obra de barramento possui uma vida útil que considera todo o seu período de utilização, na hipótese de um dia vir a tornar-se inaproveitável para os objetivos que nortearam a sua construção. Essa vida, na verdade, inicia-se com o projeto da obra, admitindo três etapas distintas e bem características: projeto, construção e operação (COSTA, 2012).

Concluída a construção da barragem e demais estruturas de barramento, referindo-se principalmente as hidrelétricas, inicia-se ao enchimento do reservatório, segundo Costa (2012). É necessário que haja a comparação dos dados referentes às pressões hidrostáticas, medidas por piezômetros (instrumento de monitoramento de barragens, descrito no item 2.6 deste trabalho), a montante da fundação, exercidas antes e após o enchimento do reservatório, constituindo um bom indicador na supervisão das condições de segurança da obra, já que qualquer eventual problema seria rapidamente detectado e analisado (SILVEIRA, 2006).

Segundo Costa (2012), a operação de uma barragem corresponde ao efetivo funcionamento da obra, que poderá ter início com o uso parcial de sua capacidade de utilização, incrementando esse uso no decorrer do tempo.

Durante todo o período de operação de uma barragem, é indispensável à realização de um diagnóstico, fazendo um levantamento geral de todas as condições da barragem e seus componentes, estabelecendo as características operacionais, seus limites e de toda a instrumentação aplicada. Todos os resultados dos diagnósticos devem ser registrados e quando se fizer necessário, tomar as devidas providências para recuperação e as tendo concluído, registrar tais reparos (SOUZA, 2009).

Os principais objetivos das observações do comportamento das barragens e suas inspeções, de acordo com Costa (2012), são:

- Analisar o comportamento da obra durante o enchimento do reservatório e das variações de fluxo anuais;
- Observar o comportamento das encostas desmatadas ao longo do reservatório;
- Possibilitar a tomada de decisão rápida no caso de iminente acidente com algum componente do sistema.

2.5 Segurança de Barragens

Comumente, um barramento é dito seguro quando atende aos critérios técnicos de segurança estrutural, ou seja, possui harmonia entre projeto, execução e manutenção de tal forma que possa garantir o seu correto funcionamento necessitando apenas de reparos de manutenção preventiva. Porém, também deve ser levado em conta o potencial de danos que o barramento pode causar devido a uma hipotética ruptura. Isso reflete diretamente na sensação de segurança passada pela estrutura. Este potencial de dano independe da segurança técnica da estrutura e é avaliado levando em conta a posição do barramento em relação às ocupações de montante e jusante (AGUIAR, 2014).

As duas questões aqui expostas são tratadas na legislação brasileira como Categoria de Risco (CR) e Dano Potencial Associado (DPA). Assim sendo, não há como avaliar a segurança de um barramento sem considerar também a ocupação existente na área de influência do mesmo. A segurança de um barramento deve ser considerada como uma ponderação entre seu grau de qualidade técnica construtiva e sua alternativa locacional. A questão da segurança de barragens deve abranger inclusive a qualidade da equipe técnica gestora da estrutura (AGUIAR, 2014).

Numa primeira fase, o controle da segurança das barragens era basicamente orientado para a segurança estrutural e hidráulica-operacional, em que a característica básica era investir na causa potencial da ruptura da barragem. A regra era optar pelo controle rigoroso do projeto, construção e operação como forma de garantir à sociedade, em geral, e às populações residentes nos vales a jusante, uma segurança satisfatória, compatível com probabilidade de ruptura extremamente baixa. Posteriormente, as técnicas de observação do comportamento das barragens durante a operação vieram reforçar o controle da segurança em longo prazo (DUARTE, 2008).

Segundo Cruz (1996), a segurança de uma barragem é determinada principalmente pela sua estabilidade e é fundamental que a estabilidade externa, formada por taludes e a estabilidade interna, constituída pelo conjunto barragem-fundação, devem atender aos requisitos básicos de segurança, estabelecidos em função do tipo de obra e das diversas condições de carregamento admitidas, assunto abordado com detalhes no item 2.5 Segurança de Barragens.

A identificação de riscos inerentes ao projeto de barragens é fundamental para o correto funcionamento do empreendimento. O nível de segurança fornece um diagnóstico do comportamento do talude e dos outros elementos da obra. O conceito de segurança deve ser

entendido em um sentido global, envolvendo aspectos de natureza geotécnica, estrutural, hidráulica, operacional e ambiental (SARÉ, 2006).

Com o avanço da exploração mineral e a necessidade de conservação socioambiental relacionada com a mesma, o assunto barragem de rejeitos vem merecendo grande atenção, devido a seu potencial danoso em caso de falhas. Historicamente, com certa frequência, a ruptura de barragens de mineração e os danos causados por estas podem ser percebidos.

Azam e Li (2010), citados por Cardozo (2016), apresentam um histórico mundial das falhas em barragens de mineração, onde segundo a revisão dos autores cerca de 1,2% das barragens de mineração apresentaram algum tipo de falha, contra 0,01% das barragens civis, isto para os 100 anos antecessores à publicação.

Barragens com finalidade de geração de energia elétrica recebem para sua construção, operação e manutenção um alto padrão de cuidado e atenção pelos proprietários e responsáveis técnicos. Em contrapartida, as barragens de contenção de rejeitos foram durante muito tempo vistas por muitos proprietários como improdutivas, ou parte da operação com perda de dinheiro. O significado destes aspectos é que as atitudes e os esforços na operação da mina são naturalmente menos voltados para o gerenciamento dos rejeitos, o que levou a ocorrência de muitos acidentes (DUARTE, 2008).

De acordo com Foster et. al (2000), levando em consideração a ruptura de 1.462 barragens, ressalta-se que a ocorrência de piping é a maior causa de rupturas. Em se tratando de fundação e barramento, a erosão regressiva corresponde a 48% das ocorrências (PIROLI, 2015).

Uma vez que os potenciais prejuízos e riscos decorrentes de acidentes em barragens podem assumir grandes dimensões, um projeto seguro, uma construção adequada e a correta operação de barragens são preocupações de âmbito mundial. Além disso, um efetivo monitoramento em grandes barragens é imprescindível para a segurança da estrutura. Diretrizes internacionais visando a segurança de barragens e muitas discussões produtivas sobre este tema têm sido propostas e conduzidas, tais como a da Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD – CIGB, 2008).

A cada tipo de barragem está intrinsecamente ligada maior ou menor probabilidade de risco, em função dos materiais, forma, local de construção, método construtivo. Em função disso, são projetadas com coeficientes de segurança que cubram a maior parte dos riscos, como qualquer outra obra de engenharia (CBDB, 2011).

2.5.1 Legislação brasileira e fiscalização

Em 20 de setembro de 2010 entrou em vigor a lei 12.334, que estabeleceu 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, criando o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). São fundamentos determinados pelo PNSB:

- A segurança de uma barragem deve ser considerada nas suas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros;
- A população deve ser informada e estimulada a participar, direta ou indiretamente, das ações preventivas e emergenciais;
- O empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la;
- A promoção de mecanismos de participação e controle social;
- A segurança de uma barragem influi diretamente na sua sustentabilidade e no alcance de seus potenciais efeitos sociais e ambientais.

A supracitada lei aplica-se a barragens que se enquadrem em ao menos uma das seguintes características:

- I- Altura do maciço, que contada do ponto mais baixo da fundação à crista, for igual ou maior que 15m;
- II- Capacidade total do reservatório for maior ou igual a 3.000.000 m³;
- III- Reservatórios que contenham 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.

As barragens são classificadas por categoria de risco e por dano potencial associado, pelo volume, com base nos critérios gerais do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), apresentados na Resolução N° 143 de 10 julho de 2012, como mostrado na Tabela 3 detalhados nos ANEXOS I e II deste trabalho.

O PAE, de acordo com a ANEEL (2015), é obrigatório a todas as barragens que se enquadrarem nas categorias “A” e “B” quanto a riscos e danos potenciais associados, a forma de obter essa classificação é através de tabelas que são anexos da Resolução Normativa N° 696 da ANEEL e que também se encontra nos ANEXOS I e II deste trabalho.

O PAE é o instrumento que estabelece as ações a serem executadas pelo empreendedor da barragem em caso de situação de emergência, bem como identificar os agentes a serem notificados dessa ocorrência, estando este sempre disponível no empreendimento, nas prefeituras envolvidas, encaminhado às autoridades competentes e aos órgãos de defesa civil, devendo neste instrumento contemplar (ANEEL, 2015):

- Identificação e análise de possíveis situações de emergências;
- Procedimentos para identificação e notificação do mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura da barragem;
- Procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situações de emergência, com indicação do responsável pela ação;
- Estratégia e meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas em situação de emergência.

Tabela 3 – Matriz de classificação das barragens quanto ao risco e dano potencial associado.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	B
Médio	B	C	C
Baixo	B	C	C

Fonte: ANA (2016) – Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens.

Essa classificação é limitada a variação de A a C, mostrada com detalhes nos anexos desse trabalho.

Em termos de Categoria de Riscos as barragens são classificadas de acordo com os aspectos do próprio barramento que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, considerando os seguintes temas:

- Características Técnicas:
 - Altura do barramento;
 - Comprimento do coroamento da barragem;
 - Tipo de barragem quanto ao material de construção;
 - Tipo de fundação da barragem;
 - Idade da barragem;
 - Tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro.
- Estado de Conservação da Barragem:
 - Confiabilidade das estruturas extravasoras;

- Confiabilidade das estruturas de captação;
- Eclusa;
- Percolação;
- Deformações e recalques;
- Deterioração dos taludes.
- Plano de Segurança da Barragem (PSB)
 - Existência de documento de projeto;
 - Estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança de barragem;
 - Procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento;
 - Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
 - Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.

Os critérios gerais a serem utilizados para a classificação quanto ao dano potencial associado são:

- I. Existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas;
- II. Existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários;
- III. Existência de infraestrutura ou serviços;
- IV. Existência de equipamentos de serviços públicos essenciais;
- V. Existência de áreas protegidas definidas em legislação;
- VI. Natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados;
- VII. Volume.

Para a classificação quanto ao volume do reservatório as barragens são divididas em dois grupos: barragens para contenção de rejeitos mineral ou industriais e barragens para acumulação de água, seja para abastecimento ou geração de energia elétrica, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das barragens quanto ao tamanho do reservatório.

Classificação de Barragens Quanto ao Volume do Reservatório		
Classe	Barragem Rejeito Mineral/Industrial	Barragem Acumulação de Água
Muito Pequeno	< 500.000 m ³	-
Pequeno	500.000 m ³ a 5.000.000 m ³	< 5.000.000 m ³
Médio	5.000.000 m ³ a 25.000.000 m ³	5.000.000 m ³ a 75.000.000 m ³
Grande	25.000.000 m ³ a 50.000.000 m ³	75.000.000 m ³ a 200.000.000 m ³

Fonte: CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2012)

Para os efeitos da Lei 12.334, complementada pela Resolução Nº 143 de 10 julho de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), pela resolução Nº 696 de 15 de dezembro de 2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Portaria Nº 416 de 03 de setembro de 2012 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), são estabelecidas as seguintes definições:

- I. Barragem: Qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas;
- II. Reservatório: Acumulação não natural de água, de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos;
- III. Segurança de Barragem: Condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente;
- IV. Empreendedor: Agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade;
- V. Órgão Fiscalizador: Autoridade de poder público responsável pelas ações de fiscalização da segurança da barragem de sua competência;
- VI. Risco: Probabilidade da ocorrência de um acidente;
- VII. Gestão de Risco: Ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos;
- VIII. Dano Potencial Associado a Barragem: Dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem;
- IX. Área Afetada: Área a jusante ou a montante, potencialmente comprometida por eventual ruptura da barragem, cuja metodologia de definição de seus limites deverá ser determinada pelo órgão fiscalizador;
- X. Anomalia: Deficiência, irregularidade, anormalidade ou deformação que possa vir a afetar a segurança da barragem;
- XI. Responsável Técnico: Engenheiro ou equipe multidisciplinar com registro no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA) e atribuições compatíveis com as de projeto, construção, operação ou manutenção de barragens, segundo critérios definidos pelo Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA).

Além da classificação das barragens quanto ao risco e dano potencial, segundo a Lei 12.334, a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), é constituída por outros instrumentos

que contribuem com a implantação, controle e fiscalização dos critérios estabelecidos, como: Plano de Segurança de Barragem (PSB), Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e Relatório de Segurança de Barragens (RSB).

O PSB é um documento obrigatório, exigido pela fiscalização dos órgãos competentes a barragem, ANEEL, ANA e DNPM, elaborado pelo empreendedor, constando:

- A identificação do empreendedor;
- Dados técnicos referentes a implantação do empreendimento, inclusive, projetos como construídos, planos de operação e de manutenção;
- A estrutura organizacional e qualificação técnicas dos profissionais da equipe de segurança da barragem;
- Manuais dos procedimentos dos roteiros de inspeções, monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- Regra Operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e a operação da barragem;
- Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido;
- Relatórios de inspeções de segurança;
- Revisões periódicas de segurança.

O DNPM, através da Portaria N° 526, de 11 de dezembro de 2013, determinou que os empreendedores responsáveis pelas barragens de mineração elaborassem o Plano de Ação de Emergência para Barragem de Mineração (PAEBM).

As Inspeções de Segurança, de acordo com a ANEEL (2015), podem ser classificadas como regular e especial. A Inspeção de Segurança Regular é realizada pelo empreendedor, com equipe técnica própria, deverá abranger todas as estruturas de barramento e retratar suas condições de segurança, conservação e operação. Esses relatórios deverão constar:

- Identificação do empreendedor e responsável técnico;
- Avaliação quanto a conservação, manutenção ou aquisição de instrumentação de monitoramento da barragem;
- Avaliação de anomalias que acarretem em mau funcionamento, indícios de deterioração ou defeitos construtivos da barragem;
- Comparativo com inspeções regulares anteriores;

- Diagnóstico do nível de segurança da barragem, de acordo com as categorias mostradas na Tabela 5:

Tabela 5 - Categorias de nível de segurança.

Normal	Quando não houver anomalias ou as que existirem não comprometerem a segurança da barragem
Atenção	Quando as anomalias não comprometerem a segurança da barragem no curto prazo, mas exigirem monitoramento, controle ou reparo ao decurso do tempo
Alerta	Quando as anomalias representem risco a segurança da barragem, exigindo providências para manutenção das condições de segurança
Emergência	Quando as anomalias representem risco de ruptura iminente, exigindo providências pra prevenção de mitigação de danos humanos e materiais

- Indicação de medidas necessárias a manutenção da segurança da barragem.

A periodicidade das Inspeções de Segurança Regular deverá ser realizada sempre que houver alteração do nível de segurança da barragem, observada a periodicidade limite disposta na Tabela 5, tendo como referência a classificação quanto ao risco e dano potencial associado.

A Inspeção de Segurança Especial possui o mesmo conteúdo mínimo da Inspeção de Segurança Regular e visa manter ou restabelecer o nível de segurança da barragem a categoria normal e deverá ser realizada por equipe de consultores ad hoc (destinada a essa finalidade), substituindo a Inspeção de Segurança Regular, sempre que o nível de segurança do barramento estiver nas categorias de alerta ou emergência, podendo também ser realizada após ocorrência de evento excepcional como abalo sísmico, galgamento, cheia ou operação hidráulica do reservatório em condições excepcionais. O órgão fiscalizador competente pode a qualquer momento demandar a realização de Inspeção de Segurança Especial a partir de denúncia fundamentada, de resultado de fiscalização desempenhada em campo ou de recebimento de comunicado de ocorrência feito pelo próprio empreendedor (ANEEL, 2015).

Tabela 6 – Frequência da Inspeção de Segurança Regular.
 Fonte: ANEEL – Resolução Normativa N° 696 de 15 de dezembro de 2015.

Periodicidade da Inspeção de Segurança Regular			
	Classe da Barragem		
	A	B	C
Periodicidade	1 ano	2 anos	3 anos

Conforme a Lei 12.334 (2010), Revisão Periódica de Segurança (RPS), tem o objetivo de diagnosticar o estado geral de segurança da barragem, levando-se em conta o avanço tecnológico, a atualização de informações hidrológicas na respectiva bacia hidrográfica, de critérios de projeto e de condições de uso e ocupação do solo a montante e a jusante do empreendimento, contendo:

- I- O exame de toda a documentação da barragem, em particular dos relatórios de inspeção;
- II- O exame dos procedimentos de manutenção e operação adotados pelo empreendedor;
- III- A análise comparativa do desempenho da barragem em relação às revisões efetuadas anteriormente.

Nas Tabela 6 e 7 são mostradas, de acordo com a ANEEL (2015) e o DNPM (2012), as frequências em que deve ser realizada a Revisão Periódica de Segurança (RPS) nas barragens de uso para geração de energia elétrica e contenção de rejeitos de mineração, respectivamente, em função das categorias de risco e dano potencial associado.

Tabela 7 – Frequência da RPS para barragens hidrelétricas.
 Fonte: ANEEL – Resolução Normativa N° 696 de 15 de dezembro de 2015.

Frequência da Revisão Periódica de Segurança – RPS para Barragens Hidrelétricas			
	Classe da Barragem		
	A	B	C
Frequência	5 anos	5 anos	10 anos

Tabela 8 – Frequência da RPS para barragens de contenção de rejeitos de mineração.
 Fonte: DNPM – Portaria N° 416 de 03 de setembro de 2012.

Frequência da Revisão Periódica de Segurança – RPS para Barragens de Mineração					
	Classe da Barragem				
	A	B	C	D	E
Frequência	5 anos	5 anos	7 anos	10 anos	10 anos

Segundo o CNRH (2012), a Agência Nacional de Águas (ANA) tem a responsabilidade da coordenação da elaboração do Relatório de Segurança de Barragem (RSB), emitido anualmente, ficando para os órgãos fiscalizadores a responsabilidade do fornecimento das informações, que por sua vez recebem tais informações dos empreendedores responsáveis por cada barragem. No RSB estão contidas as seguintes informações:

- I- Os cadastros de barragens mantidos pelos órgãos fiscalizadores;
- II- A implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens;
- III- A relação das barragens que apresentam categoria de risco alto;
- IV- As principais ações para melhoria da segurança de barragem implementadas pelos empreendedores;
- V- A descrição dos principais acidentes e incidentes durante o período de competência do relatório, bem como análise por parte dos empreendedores e o respectivo órgão fiscalizador sobre as causas, consequências e medidas adotadas;
- VI- A relação dos órgãos fiscalizadores que enviaram informações para a ANA com a síntese das informações enviadas;
- VII- Os recursos dos orçamentos fiscais da União e dos Estados previstos e investidos em ações para a segurança de barragens.

A Lei 12.334 (2010) instituiu o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), para realizar o registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo território nacional, compreendendo um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção, em operação e desativadas, tendo como princípios básicos para o seu funcionamento, a descentralização da obtenção e produção de dados e informações, a coordenação unificada do sistema e o acesso a dados e informação e garantindo a toda a sociedade.

Conforme o CNRH (2012), são responsáveis diretos pelas informações do SNISB a ANA, órgãos fiscalizadores e empreendedores, que possuem as seguintes competências:

- I- Compete a ANA:
 - Desenvolver plataforma informatizada para o sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações;
 - Estabelecer mecanismos e coordenar a troca de informações com os demais órgãos fiscalizadores;

- Definir as informações que deverão compor o SNISB em articulação com os demais órgãos fiscalizadores;
- Disponibilizar o acesso a dados e informações para a sociedade por meio da Internet.

II- Compete aos Órgãos Fiscalizadores:

- Manter cadastro atualizado das barragens sob sua jurisdição;
- Disponibilizar permanentemente o cadastro e demais informações sobre as barragens sob sua jurisdição e em formato que permita sua integração ao SNISB;
- Manter atualizada no SNISB a classificação das barragens sob sua jurisdição por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume.
- Exigir do empreendedor a Anotação de Responsabilidade Técnica- ART no CONFEA e CREA, referentes aos estudos, planos, projetos, construção, operação, fiscalização e demais relatórios;
- Exigir do empreendedor o cumprimento das recomendações contidas nos relatórios de inspeção e revisão periódica de segurança;
- Articular-se com outros órgãos envolvidos com a implantação e a operação de barragens no âmbito da bacia hidrográfica;
- Exigir do empreendedor o cadastramento e a atualização das informações relativas a barragem no SNISB.
- Informar imediatamente a ANA e ao SINDEC qualquer não conformidade que implique risco imediato a segurança ou qualquer acidente ocorrido nas barragens sob sua jurisdição.

III- Compete aos empreendedores:

- Manter atualizadas as informações cadastrais relativas às suas barragens junto aos órgãos fiscalizadores;
- Articular-se com o órgão fiscalizador, com intuito de permitir um adequado fluxo de informações.

Para consolidação dos dados no SNISB, a ANA deverá buscar a integração e a troca de informações e, no que couber com outros sistemas e departamentos voltados para proteção ambiental, recursos hídricos e segurança de barragens, como por exemplo, o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA), o Sistema Nacional sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC) (CNRH 2012 e ANEEL, 2015).

Além do SNISB, as barragens de rejeito de mineração, são também cadastradas no Relatório Anual de Lavra (RAL), que também ficam disponíveis no site do DNPM, juntamente com a declaração dos demais dados do empreendimento, sendo o empreendedor obrigado a declarar todas as barragens de mineração EME construção, em operação e desativadas sob sua responsabilidade, afirma o DNPM (2012) na Portaria N° 416, de 03 de setembro de 2012.

Atualmente, no Brasil, há 43 entidades ou órgãos fiscalizadores da segurança de barragens, sendo 4 federais (ANA, ANEEL, IBAMA e DNPM), 27 órgãos estaduais gestores de recursos hídricos e 12 órgãos estaduais ambientais (ANA, 2018).

A fiscalização da segurança de barragens, segundo Lei N° 12.334, (BRASIL, 2010), cabe a entidade que outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, no caso de barragem de acumulação de água (exceto para finalidade de aproveitamento hidrelétrico), a entidade que concedeu ou autorizou o uso do potencial hidráulico, quando se tratar de uso preponderante para fins de geração hidrelétrica, a entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária de rejeitos e a entidade que forneceu a licença ambiental de instalação e operação para fins de disposição de resíduos industriais.

Ainda conforme a Lei N° 12.334, (BRASIL, 2010), o empreendedor tem por obrigação realizar as seguintes ações referentes a promoção da segurança de barragens:

- Prover todos os recursos necessários a garantia da segurança da barragem;
- Organizar e manter em bom estado de conservação as informações e a documentação referentes ao projeto, construção, operação, manutenção, segurança e quando couber, a desativação da barragem,
- Informar ao respectivo órgão fiscalizador qualquer alteração que possa acarretar redução da capacidade de descarga da barragem ou em qualquer estrutura que possa comprometer a sua segurança;
- Manter serviço especializado em segurança de barragem, conforme estabelecido no PSB;
- Permitir acesso irrestrito do órgão fiscalizador e dos órgãos integrantes do SINDEC ao local da barragem e a sua documentação de segurança;
- Manter a atualização do PSB e seus instrumentos, inclusive atendendo rigorosamente as observações realizadas pela fiscalização nesses documentos;
- Manter registros do reservatório, como, NA, volume, características químicas e físicas do fluido armazenado e níveis de contaminação do solo e lençóis freáticos na área de influência.

Embora o empreendedor seja o responsável legal pela segurança da barragem, é importante que os órgãos e entidades fiscalizadoras realizem campanhas de fiscalização, periodicamente, de modo a cobrir o universo de barragens em um tempo razoável e a verificar o estado geral das estruturas, bem como o atendimento dos normativos (ANA, 2016).

A barragem que não atender aos requisitos de segurança nos termos da legislação pertinente deverá ser recuperada ou desativada pelo seu empreendedor, fazendo desses atos objeto de projeto específico e comunicar ao órgão fiscalizador sobre as providências adotadas. Na eventualidade de omissão ou inação do empreendedor, o órgão fiscalizador poderá tomar medidas com vistas a minimização de riscos e de danos potenciais associados a segurança da barragem, devendo os custos dessa ação ser ressarcidos pelo empreendedor (BRASIL, LEI Nº 12.334, 2010).

2.5.2 Gerenciamento de riscos e análise de danos potenciais associados

De acordo com CETESB (2011), risco é considerado como a medida de danos resultante da combinação entre frequência de ocorrência do cenário acidental (ou acidente) e a magnitude das consequências ou efeitos associados a esse cenário. Para OHSAS 18.001 (2007) e ABNT ISO 31.000 (2009), o risco é expresso pela combinação da probabilidade (ou frequência) de ocorrência de um evento com a gravidade (ou severidade) do dano causado pelo evento.

O processo de gestão de riscos, segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, envolve etapas de identificação dos riscos, análise, avaliação, monitoramento, comunicação, tratamento dos riscos e a prevenção de acidentes (IBAMA 2016).

Conforme o MIN (2005), no estudo e prática do gerenciamento de risco, uma dificuldade comum é encontrada no nível de definições básicas. Frequentemente se experimentam confusões que surgem de interpretações variadas de termos. Clareza e concordância rígida com interpretações bem definidas são os únicos meios pelos quais pode ser mantida uma comunicação positiva e construtiva entre os interessados.

De acordo com Vianna (2015), existem diversas metodologias de Análise de Risco descritas na literatura, tais como:

- Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA);
- Análise por Árvore de Eventos (ETA);
- Análise Árvore por Falhas (FTA);
- Diagramas de Localização, Causa e Indicadores de Falhas (LCI);

- Índices de Risco;
- Estudos de Perigo e Operabilidade (HAZOP);
- Simulação de Monte Carlo, entre outras.

Segundo Wolff (2009), na mineração existem métodos que são utilizados para aumentar a eficiência na produção mineral e para a redução da geração de rejeitos, e por consequência diminuem os riscos das barragens de mineração. Ainda segundo o autor, esses métodos consistem em conduzir os resíduos por alguns processos objetivando-se recuperar a água contida nos mesmos para recircular nas plantas de beneficiamento.

De acordo com Araújo (2006), esses processos normalmente são a hidrociclonagem, o espessamento e a filtração, tendo como características comuns a remoção de certa quantidade de água presente na polpa do rejeito, o aproveitamento de alguma parcela de rejeito que merecem reprocessamento e separação de parcelas de rejeito com diferentes granulometrias, em função dos métodos de disposição.

Para que seja feita uma efetiva gestão de riscos das barragens é preciso primeiramente que haja uma equipe técnica especializada, fazendo análises, avaliações, classificações, regularizações e manutenções corretivas e preventivas nas estruturas. De acordo com a ANA (2017), é muito grande o número de barragens que precisam ser objeto de classificação, identificação dos empreendedores e regularização, para que possam ser enquadradas na legislação vigente. Na Tabela 9 são mostrados alguns números que retratam a quantidade de barragens no Brasil e a proporção quanto a regularização e classificação.

Tabela 9 – Barragens Brasileiras Atendendo a Lei 12.334.
Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens, 2016.

Números do Relatório de Segurança de Barragens 2016				
	Cadastradas		Inadimplentes	
Total de barragens cadastradas	22.920			
Barragens no PNSB	3.174	14%	19.746	86%
Caracterizadas quanto ao risco (CRI)	3.691	16%	19.229	84%
Caracterizadas quanto ao dano potencial associado (DPA)	4.159	18%	18.761	82%
Classificadas nas categorias: (CRI) e (DPA), altos	695	3%	x	x
Sem outorga, concessão, licença ou qualquer autorização	12.590	55%	10.330	45%

De acordo com a ABNT ISO 31.010 (2012), o risco deve ser reduzido para patamares aceitáveis ou toleráveis com a implementação de ações para alterar a probabilidade de ocorrência, alterar o efeito do risco ou ambos. O nível do risco dependerá da adequação e

eficácia dos controles existentes e para considerar que o risco está em patamares aceitáveis, deve-se avaliar se os controles implementados são capazes de tratar adequadamente o risco e se estes controles estão operando na forma pretendida, podendo ser demonstrado por documentação e processos de garantia apropriados (OLIVEIRA, 2010).

Na Figura 9 apresenta-se a distribuição das barragens cadastradas por Categoria de Risco (CRI), segundo o uso principal da barragem. A distribuição refere-se somente às barragens classificadas quanto a esse critério, ou seja, 16% do total das barragens cadastradas.

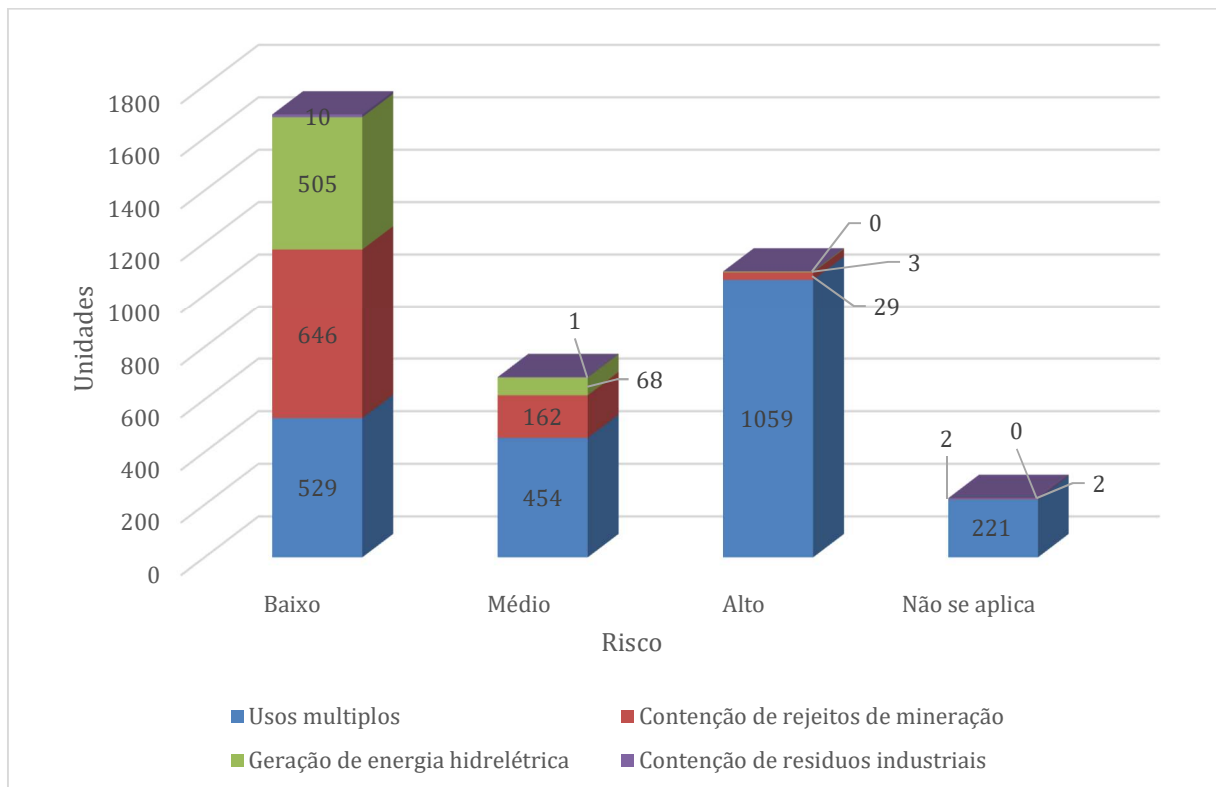


Figura 9 – Categoria de Risco das barragens cadastradas segundo o uso principal.
Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.

Segundo ANA (2017), Dano Potencial Associado é o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

Na Figura 10, apresenta-se a distribuição das 4.159 barragens cadastradas com classificação quanto ao Dano Potencial Associado (DPA), segundo o uso principal da barragem.

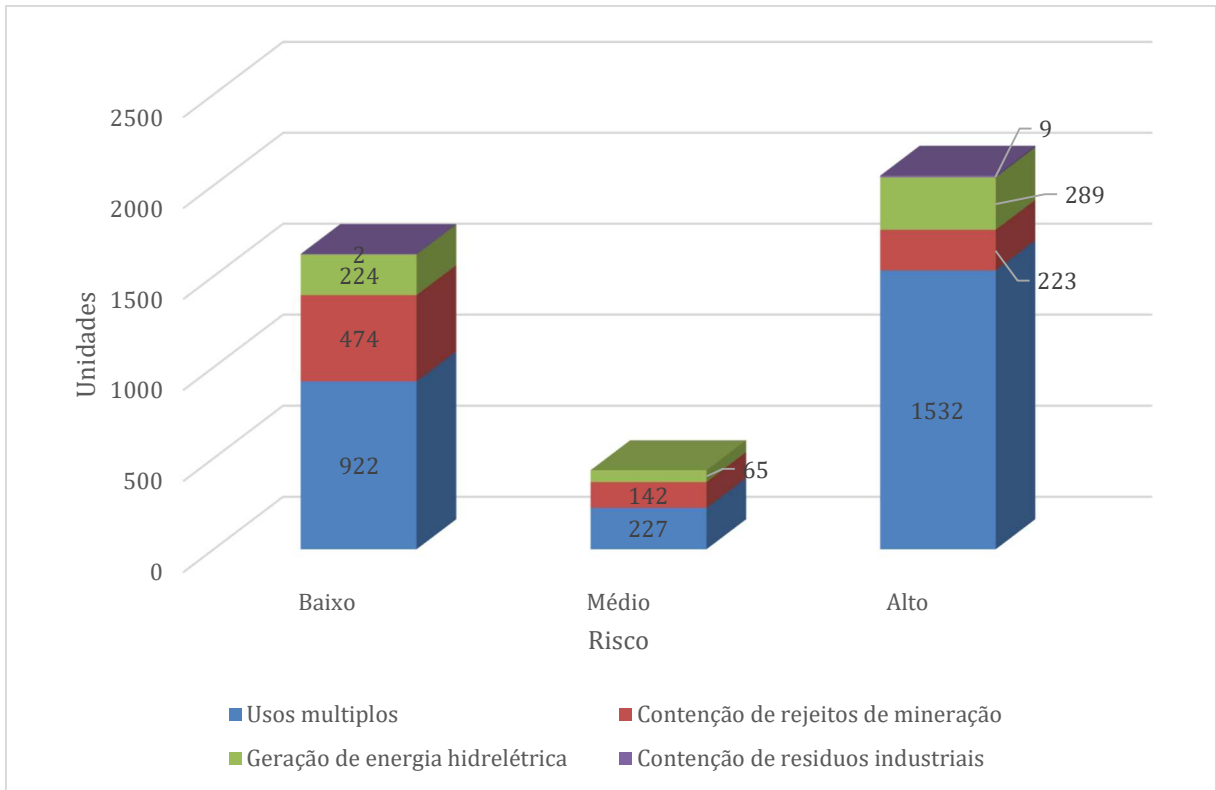


Figura 10 – Dano Potencial Associado (DPA) das barragens cadastradas, segundo o uso principal.
 Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.

A Figura 11 mostra as tendências de envolvimento das classificações das barragens quanto ao DPA e CRI, de acordo com ANA (2018)

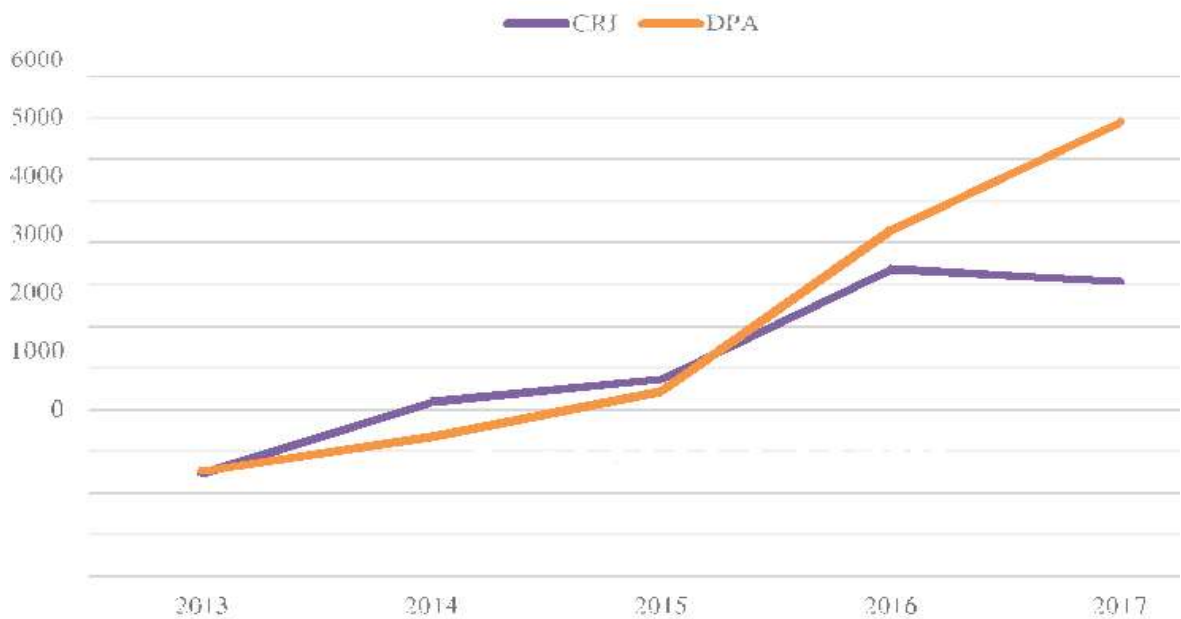


Figura 11 – Evolução da Classificação do Total de Barragens.
 Fonte: ANA (2018) – Relatório de Segurança de Barragens 2017.

De acordo com a ANA (2017), somente 1,5 % das barragens cadastradas possuem ou apresentaram o PAE, essa pequena parcela é representada em números e quanto ao seu uso principal na Figura .



Figura 12 – Quantidade de barragens, de acordo com seu uso principal, que apresentaram o PAE em 2016.
Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.

No ano de 2016, 9 entidades fiscalizadoras listaram 25 barragens que, na sua visão de fiscalizador, possuem algum comprometimento que impacte a sua segurança, sendo que geralmente esse comprometimento deve-se a alguma anomalia estrutural grave, ou o baixo nível de conservação da barragem ou por insuficiência do vertedor, afirma ANA (2017). Os aspectos comprometedores dessas barragens em relação a sua segurança estrutural são detalhadamente mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dano Potencial Associado (DPA) das barragens cadastradas, segundo o uso principal.

Barragem	Empreendedor	Órgão Fiscalizador	Problema Indicado	CRI	DPA
Canoas	Usina Santa Clotilde	SEMARH/AL	erosão no vertedor	Alto	Alto
Gulandim	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	com vertedor insuficiente	Alto	Alto
Prado	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	com vertedor insuficiente	Médio	Baixo
São Francisco	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	com vertedor insuficiente	Médio	Médio
Bosque IV	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	com vertedor insuficiente	Alto	Alto

Barragem	Empreendedor	Órgão Fiscalizador	Problema Indicado	CRI	DPA
Francisco Alves	Usina Coruripe Açúcar e Álcool	SEMARH/AL	Necessidade de reforço no vertedor	Baixo	Alto
Progresso	Usina Coruripe Açúcar e Álcool	SEMARH/AL	Necessidade de reforço no vertedor	Baixo	Médio
Facundo	COGERH	SRH/CE	erosões no maciço	Sem info	Sem info
São José II	COGERH	SRH/CE	afundamentos e buracos em talude	Médio	Alto
Tijuquinha	COGERH	SRH/CE	Fissuras e deterioração do concreto	Baixo	Alto
Pau Preto	Prefeitura de Potengi	SRH/CE	Erosões e vegetação nos taludes	Médio	Alto
Trapiá	COGERH	SRH/CE	vegetação nos taludes	Baixo	Alto
Cupim	COGERH	SRH/CE	Erosões e vegetação nos taludes e canais de aproximação	Baixo	Alto
São José III	COGERH	SRH/CE	Erosões e vegetação nos taludes e canal de aproximação	Baixo	Alto
Valério	COGERH	SRH/CE	Erosões no talude de jusante canal de restituição	Baixo	Médio
Poço Verde	Prefeitura de Itapipoca	SRH/CE	Erosões, afundamentos e vegetação nos taludes e coroamento	Baixo	Baixo
Jardim Botânico	Prefeitura de Londrina	AGUASPARANA/PR	Erosão no talude e vertedor	Médio	Alto
Jucazinho	DNOCS	APAC/PE	fissuras	Alto	Alto
Capa Zero	San Martins	SEDAM/RO	percolação com carreamento de material	Alto	Baixo
Fazenda Vista Montanha	Fazenda Vista Montanha LTDA	FEMARH/RR	Não especificado	Alto	Médio
Taboca	SEAGRO	NATURATINS/ TO	Erosão em talude e percolação com carreamento de material	Alto	Alto
PA Destilaria	INCRA	NATURATINS /TO	vertedor comprometido	Sem info	Sem info
Jaburu I	COGERH	ANA	Percolação e erosão regressiva no vertedor	Alto	Alto

Barragem	Empreendedor	Órgão Fiscalizador	Problema Indicado	CRI	DPA
Passagem das Traíras	SEMARH	ANA	Concreto com péssima qualidade	Alto	Alto
Marechal Dutra	DNOCS	ANA	Trincas em todo maciço	Médio	Alto

Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.

2.5.3 Comportamento físico das estruturas e suas deformações

A análise de segurança, segundo ICOLD (2001), de uma barragem deve ser feita para todas as estruturas principais, elementos estruturais, sistemas de interação entre as fundações e as estruturas submetidas ao diversos carregamentos e engloba análises de estabilidade no contato concreto-rocha, análise de estabilidade em planos inferiores ao da fundação, a definição dos coeficientes de segurança e a verificação entre as tensões atuantes e as tensões admissíveis dos materiais. Os casos de carregamentos a considerar nos estudos de estabilidade, esforços internos e tensões atuantes são:

- CCN- Caso de Carregamento Normal: São todas as combinações de ações que apresentem grande probabilidade de ocorrência ao longo da vida útil da estrutura, durante a operação normal ou manutenção normal da obra, em condições hidrológicas normais.
- CCE- Caso de Carregamento Excepcional: Corresponde a quaisquer ações de cargas eventuais com baixa probabilidade de ocorrência, tais como, condições hidrológicas excepcionais, falha no sistema de drenagem, manobra de caráter excepcional, efeito sísmico e etc.
- CCC- Caso de Carregamento de Construção: São todas as combinações de ações que apresentem probabilidade de ocorrência durante a construção da obra, apenas durante períodos curtos em relação a sua vida útil e em boas condições de controle. Podem ser devidas a carregamentos de equipamentos de construção, a estruturas executadas apenas parcialmente, a carregamentos anormais durante o transporte de equipamentos permanentes e quaisquer outras condições semelhantes.

Cruz (1996) considera que as barragens devem atender basicamente a três princípios de projeto: do controle do fluxo, da estabilidade e da compatibilidade das deformações. Apesar da grande diversidade observada na configuração das seções transversais e nos materiais

empregados, os projetos de barragens devem possuir, portanto, alguns elementos essenciais, como vedação, drenagem interna e estabilização.

De acordo com Silveira (2003), é chamada de deformabilidade do maciço a relação entre os esforços aplicados a estrutura de barramento e as deformações dela resultantes, sendo estas mais suscetíveis a barragens de concreto quanto a rocha da fundação, ao contrário das barragens de terra ou enrocamento, que são pouco influenciados pela deformabilidade do maciço da fundação.

Segundo ICOLD (2001), para barragens e demais estruturas de gravidade, a análise de estabilidade pode ser feita considerando a estrutura como um conjunto monolítico, ou seja, um corpo rígido, devendo ser verificadas as condições de estabilidade globais quanto a flutuação, ao tombamento e ao deslizamento, para todos os casos de carregamento e planos potenciais de ruptura.

- Segurança à Flutuação: É a relação entre o somatório das forças gravitacionais e o somatório das forças de subpressão.
- Segurança ao Tombamento: É a relação entre o momento estabilizante e o momento de tombamento em relação a um ponto ou uma linha efetiva de rotação.
- Segurança ao Deslizamento: É a relação entre forças horizontais resistentes e atuantes, forças normais à superfície de escorregamento juntamente com seus atritos e sua coesão superficial, proporcional a área estudada (GUSTEIN, 2003).

Hartford e Baecher (2004), afirmam que a identificação dos modos potenciais de ruptura de uma barragem de terra ou enrocamento converge nas categorias gerais listadas abaixo.

- Falhas hidráulicas devido a níveis excepcionais: inclui, por exemplo, galgamento e subsequente erosão externa devido ao vertedouro com capacidade de descarga insuficiente, ou até mesmo associado a danos em comportas ou erros de operação.
- Movimentos de massa devido a carregamentos excepcionais (com exceção das cheias, citadas no item anterior), propriedades inadequadas dos materiais de composição, ou singularidades geológicas não detectadas, que inclui instabilidade de taludes, deformações, liquefação de solos, instabilidades de fundação ou ombreiras, rebaixamento rápido associado a escorregamento do talude de montante e deslizamento de encostas para o interior do reservatório que também podem acarretar em galgamento.

- Erosão interna: Inclui o desenvolvimento de *piping* no núcleo da barragem e erosão de solos de fundação ou juntas de preenchimento de discontinuidades.

De acordo com Foster (2000), os processos de *piping* são:

- Erosão regressiva, no qual a erosão se inicia no talude de jusante, no ponto de saída do fluxo percolado, e progride para montante, formando um tubo que se liga ao reservatório, como mostrado na Figura 11.

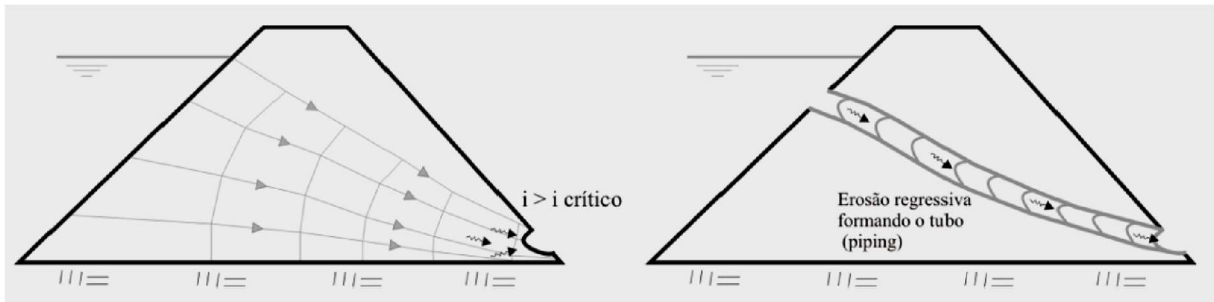


Figura 11 – Processo de formação de *piping* por erosão regressiva.
Fonte: Perini (2009)

- Erosão em torno de trincas existentes na barragem. Essas rachaduras ou fissuras permitem a formação de um fluxo concentrado, mostrado na Figura 12, que tem origem direta no reservatório e vai até um ponto de saída, o qual passa a erodir o solo, causando o alargamento deste caminho de água, formando o tubo.

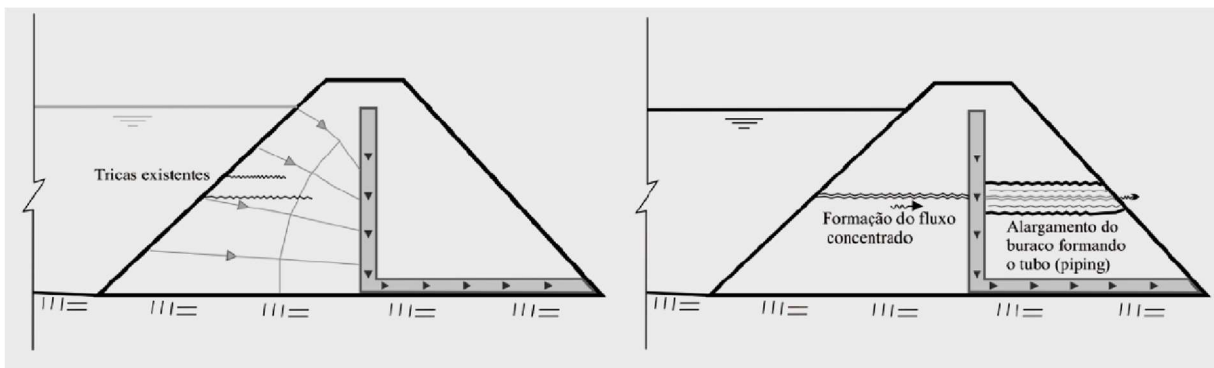


Figura 12 – Processo de formação de *piping* por meio de alargamento das paredes das trincas.
Fonte: Perini (2009)

- Erosão devido ao carreamento de finos. Ocorre geralmente quando os materiais utilizados são mal graduados, permitindo que solos finos escapem por uma matriz granular. Esta lavagem de finos, ilustrado na Figura 13, pode desestabilizar internamente o solo e permitir a formação do tubo.

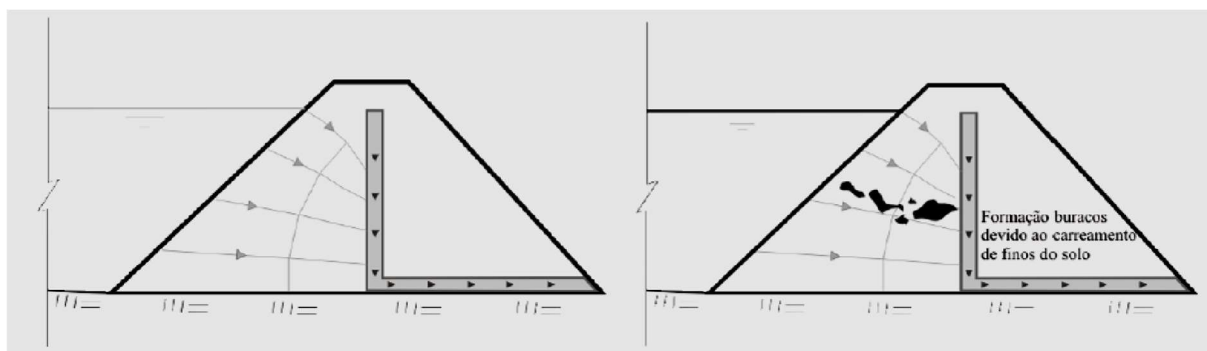


Figura 13 – Processo de formação de *piping* por meio de carregamento de finos.
Fonte: Perini, 2009

De acordo com Foster (2000), os acidentes em barragens causados por *piping* estão relacionadas com o zoneamento das seções e com a existência, ou não, de sistemas de controle de poropressões. Observou-se que a maior frequência de falhas e acidentes ocorreu em barragens homogêneas ou zoneadas sem um eficiente sistema de controle de poropressões, formado apenas por um filtro na fundação, ou por somente enrocamento de pé.

Para proporcionar um efetivo controle da estabilidade e segurança de barragem, é indispensável a definição das seções transversais críticas para que nelas seja dado maior atenção e monitoramento. Para tal definição é necessário um profundo conhecimento prévio do condicionamento geotécnico dos maciços de fundações e ombreiras e uma programação dinâmica e objetiva dos estudos e investigações de campo e laboratório necessárias à obtenção dos parâmetros condicionantes do projeto. Os estudos esclarecerão quais são os parâmetros que pouco condicionam o estado de equilíbrio, e esses referidos parâmetros resultar em fatores de segurança aceitáveis. Os resultados das análises de estabilidade preliminares realimentarão o processo de identificação das seções mais críticas devendo considerar o profundo conhecimento técnico e o bom senso, trunfos de grande peso na pré-seleção das seções críticas de uma barragem, evitando-se perdas de tempo e gastos inúteis no estudo de seções pouco perigosas. Lembra-se também que quanto mais complexo o condicionamento geotécnico das fundações, maior será o número de seções e situações a serem analisadas. O processo de escolha das seções críticas exige a consideração de vários fatores condicionantes tais como a altura da barragem, as características de resistência dos solos de fundação, a espessura das camadas de fundação, a permeabilidade relativa das mesmas, entre outras (MARANGON, 2004).

A barragem tem esforços de peso próprio e de água represada, que geram deformação e em consequência um movimento. Este movimento pode ser admissível ou não, conforme o tipo de barragem e se está bem projetada ou não (GUSMÃO FILHO, 2006).

De acordo com Cruz (1996), os problemas de movimento em uma barragem envolvem necessariamente as seguintes situações:

- Problemas de deformação, como recalque e tombamento;
- Problemas de permeabilidade, devido à percolação de água dentro dela ou na fundação, excesso da pressão hidrostática como poropressões;
- Problemas de resistência ao cisalhamento, como o de escorregamento de taludes;
- Problemas de transbordamento, que gera forças não avaliadas em uma barragem.

De acordo com Costa (2012), a deformabilidade ou compressibilidade de uma barragem pode ocorrer sem que haja ruptura das estruturas, incluindo sua fundação. Ainda segundo o autor deve-se estudar a deformação dos materiais coerentes (rochas) e dos materiais incoerentes (solos). Quanto aos solos, a deformação está relacionada à característica de compressibilidade desse material e esse efeito é representado pelo recalque da estrutura, podendo ser uniforme, que é quando a estrutura deforma por igual ou diferencial, que se refere a ocorrência de deformações diferentes ao longo da estrutura. A compressibilidade manifesta-se mais intensamente em dois tipos de solos: solos moles e solos porosos colapsáveis. Embora o de deformação em um maciço rochoso seja o mesmo verificado para o solo, o recalque das rochas são menores, portanto a maioria das barragens construídas sob solos são barragens de terra ou enrocamento, pois estas proporcionam maiores flexibilidades para admitir acomodamento aos pequenos recalques, sem grandes danos às obras, ao contrário das barragens de concreto, que devido a sua rigidez estrutural, mesmo com pequenos recalques podem causar danos significativos, provocando trincas que podem levar a grandes prejuízos a obra.

Contudo, em barragens de terra devem ser considerados também os esforços internos que dependem das características do solo, como: atrito interno, coesão, resistência ao cisalhamento, peso específico aparente, natural e compactado na umidade ótima, permeabilidade e outros. Isto se deve ao fato de que, mesmo que a barragem seja constituída de um material pouco permeável, ela estará sujeita a uma percolação que, depois da saturação, implicará em uma saída de água no talude de jusante, numa altura acima do terreno, correspondente a aproximadamente um terço da altura d'água da represa. Para se evitar os efeitos nocivos de erosão, pode-se colocar material permeável no pé do talude, na forma de enrocamento ou filtro horizontal, ou ainda, inserir um filtro vertical com uma ligação com o lado de jusante, na sua parte mais baixa, para dar saída à água infiltrada (SCHREIBER, 1977).

Anomalias em uma estrutura nada mais são que condições ou movimentos não admissíveis, que podem ocasionar danos mais graves como riscos de acidentes (SILVA, 2015).

2.5.4 Incidentes e acidentes ocorridos com barragens

De acordo com o CNRH (2012), é considerado acidente de barragem quando há comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa e incidente é quando há qualquer ocorrência que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa que, se não for controlada, pode causar um acidente.

O acidente é tido como um evento imprevisto e indesejável e deve ser diferenciado de manutenção preventiva, uma vez que esta última está associada a uma agenda já programada pelo gestor da estrutura, enquanto que o acidente resulta de uma falha ou risco e deve ser corrigido a partir do momento da detecção. Há uma diferença entre o acidente comum e o catastrófico, sendo que no primeiro há uma relação com a manutenção preventiva, um dano maior que o esperado e mais custoso para ser reparado (entende-se custo não somente financeiro, mas de tempo, mão de obra, planejamento e outros) e o acidente catastrófico é aquele no qual existem danos a terceiros, devastação e possivelmente mortes além do colapso total da estrutura (AGUIAR, 2014).

As barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais são estruturas complexas e dinâmicas que requerem cuidados especiais na elaboração dos projetos de engenharia, operação, manutenção das estruturas, bem como para o descomissionamento. As principais causas de rompimento dessas barragens são problemas de fundação, capacidade inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle da erosão, deficiências no controle e inspeção pós-fechamento e falta de dispositivos graduais de segurança ao longo da vida útil da estrutura.

As causas destes acidentes podem estar relacionadas com a perda da compreensão dos fatores que controlam a segurança das operações, ou seja, falta ou falhas na instrumentação e monitoramento. Existem poucos casos de eventos não previsíveis ou causados por condições climáticas inesperadas (tais como terremotos, por exemplo), uma vez que o conhecimento de hoje permite a previsão destes eventos. Os incidentes e acidentes também são resultados de condições inadequadas de investigações de campo, projeto, construção, operação, monitoramento, ou a combinação destes (DUARTE, 2008).

Na Tabela 11 apresenta-se o histórico de acidentes de barragens de rejeito no mundo, detalhando algumas consequências.

Foster (2000) relata que a média histórica anual de probabilidade de falha em grandes barragens de terra, com altura superior a 15m, é estimada em 45×10^{-5} barragens por ano (136

barragens de aterro falharam em um universo de 300.400 barragens de aterro/ano, construídas após o ano de 1986).

Apesar de ter sido elaborada pelos principais organismos mundiais e nacionais, uma série de guias sobre o projeto, a construção, a operação, a manutenção e o fechamento seguro de barragens de rejeitos, acidentes com as mesmas continuam acontecendo, em média de um a cada ano e estes estão usualmente, relacionados ao balanço hídrico nessas estruturas, ao método construtivo e à gestão de segurança da operação, segundo o ICOLD (2001).

Uma estatística dos modos de ruptura de grandes barragens até 1986, excluindo barragens construídas no Japão pré 1930 e na China é apresentado na Figura 14.

Apesar dos acidentes envolvendo grandes barragens não serem muito frequentes, suas consequências são normalmente catastróficas. Visando contornar este cenário, teve início o desenvolvimento do conceito atual de gestão de risco no âmbito da segurança de barragens (PIMENTA, 2009).

Tabela 11 – Histórico de acidentes com barragens de rejeito no mundo.
Fonte: ICOLD (2001)

Mês e Ano	Ocorrência
Setembro de 1970	Mufilira, Zambia: 89 mortes, 68.000 m ³ derramados na área de mineração
Fevereiro de 1972	Buffalo Creek, EUA: 125 mortes, 500 casas destruídas.
Novembro de 1974	Bafokeng, África do Sul: 3 milhões de m ³ de lodo seguiram por 45 km, resultando em 12 mortes.
Janeiro de 1978	Arcturus, Zimbawe: 20.000 m ³ , uma morte.
Julho de 1985	Stava, Itália: 269 mortes, rejeitos seguiram por 8 km
Fevereiro de 1994	Merriespruit, África do sul: 17 mortos, 500.000 m ³ de lodo seguiram por 2 km.
Agosto de 1995	Omai, Guiana: 4.2 milhões de m ³ lodo cianeto.
Setembro de 1995	Placer, Filipinas: 50.000 m ³ , 12 mortos.
Março de 1996	Marcopper, Filipinas: 1.5 milhões de toneladas de rejeitos.
Agosto de 1996	El Porco, Bolívia: 400.000 toneladas envolvidas.
Outubro de 1997	Pinto Valley, EUA: liberação de 230 .000 m ³ de rejeitos.
Abril de 1998	Aznalcóllar, Espanha: liberação de 4-5 milhões de m ³ água tóxica e lodo
Dezembro de 1998	Haelva, Espanha: liberação de 50.000 m ³ de resíduos industriais tóxicos e ácidos.
Abril de 1999	Placer, Surigaodel Norte, Filipinas: 700.000 toneladas de rejeitos contaminados com cianeto foram derramadas. 17 casas destruídas.
Janeiro de 2000	Baia Maré, Romênia: 100.000 m ³ de cianeto contaminaram água com os rejeitos derramados.
Março de 2000	Borsa, Romênia: 22.000 toneladas de rejeitos contaminados por metais pesados foram liberados, contaminando água e solo.

Setembro 2000	de	Mina de Aitik, Suécia: 1,8 milhões de m ³ de água liderada.
Outubro 2000	de	Martin Country Coal Corporation, Kentucky, EUA: 0,95 milhões de m ³ de rejeitos derramados nos rios a jusante, ocorrendo mortalidade de peixes e tornando água imprópria ao abastecimento.

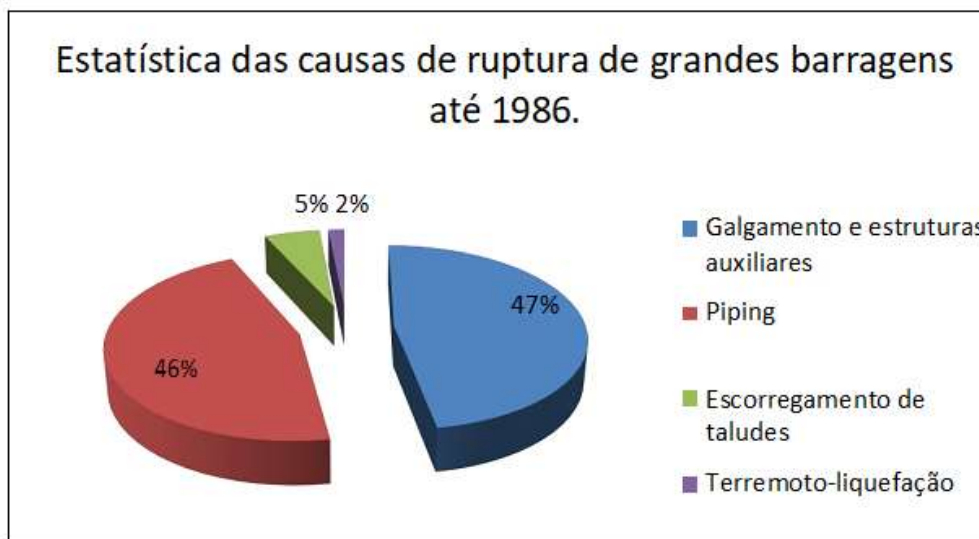


Figura 14 – Estatística geral de modos de ruptura de grandes barragens de terra, até 1986.
Fonte: Foster (2000)

No período de abrangência do RSB 2016 (ANA, 2017), excepcionalmente de 1 de outubro de 2015 até 31 de dezembro de 2016, foram relatados 6 acidentes e 17 incidentes com barragens, listados na Tabela 12. Nessa relação destaca-se o acidente de Mariana, não só pelo número de vítimas, mas pelos severos danos ambientais, econômicos e sociais causados na bacia do Rio Doce, atingindo 35 cidades no estado de Minas Gerais e 03 no Espírito Santo. O eixo onde estava construída a barragem de Fundão no município de Mariana – MG é mostrado na Figura 15.

Chama a atenção também o aumento expressivo do número de incidentes e acidentes reportados no período, muito superior que a média anual dos anos anteriores, como mostrado na Figura 16. Grande parte dos incidentes reportados ocorreu em barragens de usos múltiplos, sendo 12 de um total de 17. Além destes, 3 incidentes foram reportados em consequência aos acidentes de Mariana: Germano, Santarém, fiscalizadas pelo DNPM e UHE Risoleta Neves, fiscalizada pela ANEEL.

Ressalta-se o número expressivo de vítimas fatais nesse período, 20 mortes, sendo que 19 ocorreram no acidente de Mariana. O número é quase o dobro de todas as mortes reportadas nos RSB's 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015. Na Figura 17 encontra-se a distribuição do número de vítimas fatais por ano em função do uso principal da barragem.



Figura 15 – Eixo 1, local onde havia a barragem de Fundão no município de Mariana – MG.
Fonte: Próprio autor.

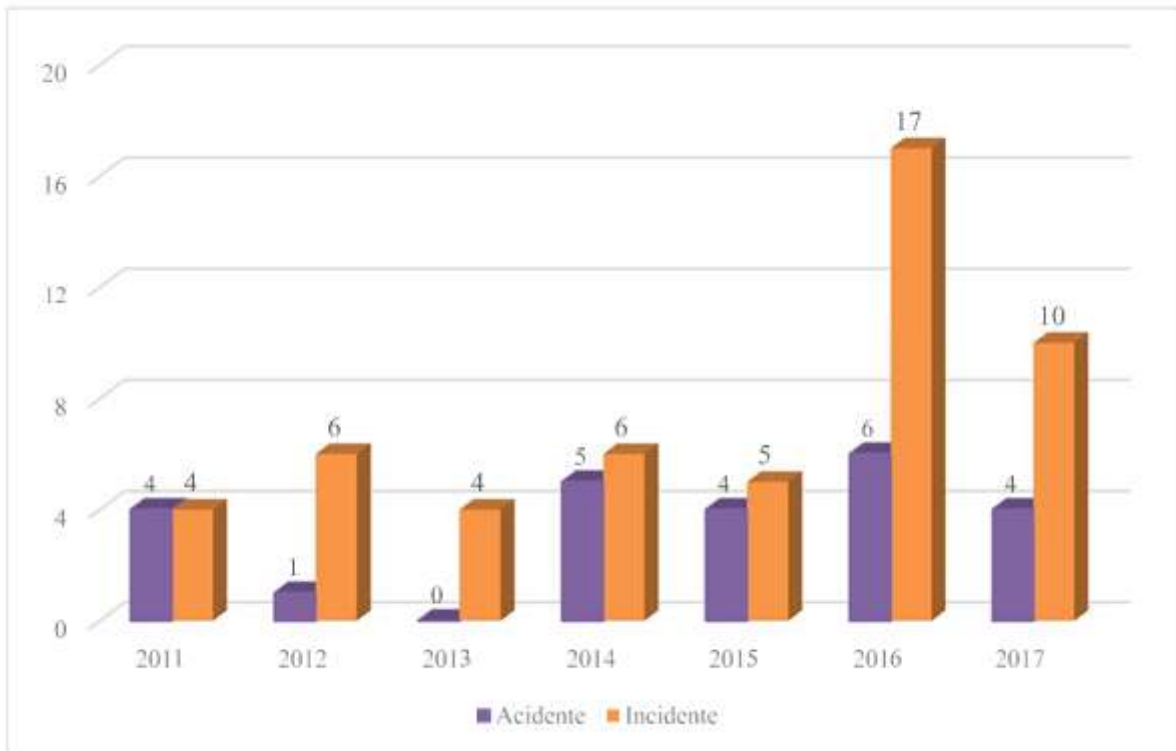


Figura 16 – Evolução dos números de acidentes e incidentes ocorridos e registrados pelos RSBs
Fonte: ANA (2018) – Relatório de Segurança de Barragens 2017.

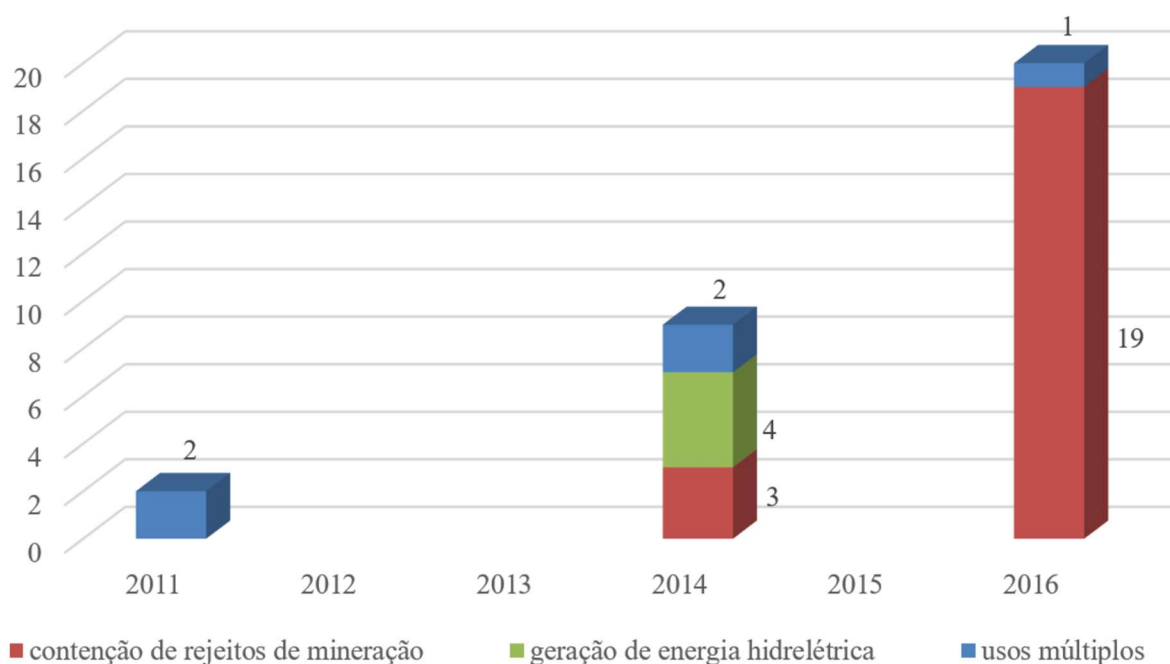


Figura 17 – Número vítimas fatais por ano devido a acidentes em barragens, em função do uso principal da barragem.

Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens 2016.

A relação de acidentes ocorridos no ano de 2015, na vigência do RSB 2016, é mostrada na Tabela 12.

Tabela 12 – Listagem dos acidentes e incidentes ocorridos na vigência do RSB 2016.

Fonte: ANA (2017) – Relatório de Segurança de Barragens (RSB) 2016.

Data	Evento	Nome da barragem	UF	Empreendedor	Entidade Fiscalizadora	Causa provável
05/11/2015	Acidente	Fundão	MG	Samarco S.A.	DNPM	Liquefação de efluentes
04/01/2016	Acidente	Alto Grande	BA	PM de Araci	INEMA/BA	Cheia
20/02/2016	Acidente	Fazenda Felícia (barragem 1)	GO	Alcides Basílio de Oliveira	SECIMA/GO	Sem informação
20/02/2016	Acidente	Fazenda Felícia (barragem 2)	GO	Alcides Basílio de Oliveira	SECIMA/GO	Sem informação
24/08/2016	Acidente	Fazenda Guavirova	PR	Ivo Polinário	AGUAS PARANA/PR	Cheia
Sem Informação	Acidente	Balneário Ayrton Senna	MS	Sem informação	IMASUL/MS	Cheia
05/11/2015	Incidente	Germano	MG	Samarco S.A.	DNPM	Rompimento de barragem a montante
05/11/2015	Incidente	Santarém	MG	Samarco S.A.	DNPM	Rompimento de barragem a montante
05/11/2015	Incidente	UHE Risoleta Neves	MG	Novelis do Brasil Ltda	ANEEL	Rompimento de barragem a montante
12/02/2016	Incidente	Jucazinho	PE	DNOCS	APAC/PE	Fissuras

Data	Evento	Nome da barragem	UF	Empreendedor	Entidade Fiscalizadora	Causa provável
02/03/2016	Incidente	Dique B3	MG	Emicon Mineração LTDA	DNPM	Sem informação
10/03/2016	Incidente	Itabiruçu	MG	Vale S.A.	DNPM	Sem informação
Março de 2016	Incidente	Canoas	AL	Usina Sta. Clotilde	SEMARH/AL	Falta de manutenção
Março de 2016	Incidente	Bosque IV	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
26/07/2016	Incidente	Taboca	TO	SEAGRO/TO	NATURATINS /TO	Carreamento de material
Setembro de 2016	Incidente	São Francisco	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
Setembro de 2016	Incidente	Prado	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
Setembro de 2016	Incidente	Gulandim	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
Setembro de 2016	Incidente	Piauí	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	SEMARH/AL	Insuficiência do Vertedor
06/12/2016	Incidente	Botuporã	BA	PM de Botuporã	INEMA/BA	Cheia
Sem Informação	Incidente	Chã dos Pereira	PB	SERHMACT-PB	AESA/PB	Falta de manutenção
Sem Informação	Incidente	Saulo Maia	PB	PM de Areia	AESA/PB	Falta de manutenção
Sem Informação	Incidente	Capa Zero	RO	San Martins	SEDAM/RO	Carreamento de material

No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem de Brumadinho da empresa Vale SA no município de Brumadinho-MG se rompeu, contabilizando 245 óbitos identificados e 25 pessoas não encontradas, totalizando 270 vítimas diretas. Dessas pessoas 131 eram funcionários diretos da Vale e 139 eram funcionários terceirizados e pessoas na comunidade do vale de jusante do barramento (VALE, 2019).

2.6 Monitoramento e Instrumentação de Barragens

Para se definir o programa de monitoramento de uma barragem, utilizando instrumentação, segundo Silveira (2006), é imprescindível que seja feito um planejamento seguindo as seguintes etapas:

- Definição das condições do empreendimento;
- Definição das questões geotécnicas e dos objetivos da instrumentação;
- Seleção dos parâmetros a serem monitorados;
- Previsão do campo de variação de medidas;
- Planejamento de ações corretivas;

- Atribuição de tarefas nas fases de construção e operação da barragem;
- Seleção dos instrumentos de auscultação;
- Local de instalação dos instrumentos;
- Registro dos fatores que podem influenciar os dados medidos;
- Estabelecimento dos procedimentos básicos para assegurar a precisão das leituras;
- Elaboração das especificações dos instrumentos, lista de matérias e orçamento;
- Planejamento da instalação com mão de obra especializada;
- Manutenção periódica e calibração;
- Qualificação de equipe de operação para leituras, interpretação e emissão de relatórios.

De acordo com Silva (2015), os instrumentos destinados a garantir a segurança de uma barragem, são capazes de identificar movimentos não admissíveis, fornecendo leituras que comprovem esse comportamento. O profissional em segurança de barragens é capaz de interpretar essas leituras como uma possível anomalia, e assim, promover alguma ação corretiva. Alguns instrumentos são capazes de determinar uma mesma anomalia, o que indica que leituras fora de um determinado intervalo de confiança para esses instrumentos, apontam que tal anomalia pode estar ocorrendo, ou na eminência de ocorrer, afirma Silveira (2003).

Barragens são monitoradas para verificar se o desempenho está consistente com as expectativas do projeto original. O monitoramento da performance das barragens é geralmente realizado através da revisão e análise de dados coletados por instrumentos que medem indicadores críticos do comportamento da obra. Um programa de medição envolve o projeto do sistema de medição, instalação, operação, manutenção e avaliação dos instrumentos da barragem, incluindo estruturas e fundações. A instrumentação completa engloba medições de deslocamentos, deformações, tensões, pressões, cargas nos membros estruturais, percolação e drenagem junto com fatores ambientais que afetam o comportamento da barragem tais como temperatura, nível do reservatório e precipitação. Em quase todos é necessário a participação integral de uma pessoa para acompanhar com manutenções dos instrumentos, realizando leituras, coletando dados atuais e comparando com dados anteriores (CARVALHO, 2007).

Segundo Gusmão Filho (2006), a instrumentação de maciços rochosos visa determinar, fundamentalmente, as medições de deslocamentos, deformações, tensões, sub-pressões e vazões de drenagem, existentes na fundação de uma barragem. Os instrumentos mais usuais no monitoramento de barragens e que demonstram na prática melhor desempenho no campo são:

os extensômetros múltiplos, pêndulos diretos e invertidos, piezômetros, inclinômetros e medidores de vazão (SILVA, 2015).

Dentre as principais anomalias que a instrumentação pode detectar estão: piping (infiltração) através dos maciços de terra e suas fundações, eventuais trincas com infiltrações no concreto, movimentos bruscos entre os blocos da barragem, sub pressões excessivas na cabeça dos blocos a montante, ou a jusante da Casa de Força, movimentos excessivos na região da calha do vertedouro. Em grandes barragens, há instrumentos instalados nas estruturas de concreto e nas fundações da barragem. Em especial, o pêndulo direto é um instrumento instalado na estrutura de concreto e é responsável por medir o deslocamento da crista da barragem na direção do fluxo e normal a ele em relação a sua base (LAZZAROTTO,2015).

De acordo com Oliveira (2010), o monitoramento deve ter como objetivo principal contribuir para o diagnóstico oportuno e preciso do comportamento das estruturas civis de um barramento, permitindo a prevenção de consequências indesejáveis e para que se tenha um efetivo funcionamento é preciso que seja considerado os principais modos de falhas de uma barragem, que por sua vez é fisicamente plausível, resultante de uma inadequação ou defeito relacionado a uma condição natural de fundação, ao projeto da barragem e estruturas associadas, a construção e materiais incorporados, a operação, a manutenção ou ao processo de envelhecimento, que possa levar a uma liberação descontrolada do reservatório.

A relação de instrumentos de monitoramento de barragens e as respectivas anomalias detectadas por eles são mostrados na Tabela 123.

A Figura 18 mostra as linhas de monitoramento sendo dividida em três elementos: Instrumentação, Inspeção Visual e Testes em Equipamentos Eletromecânicos (exclusivo para barragens de acumulação de água), os seus caminhos e os elementos estruturais monitorados.

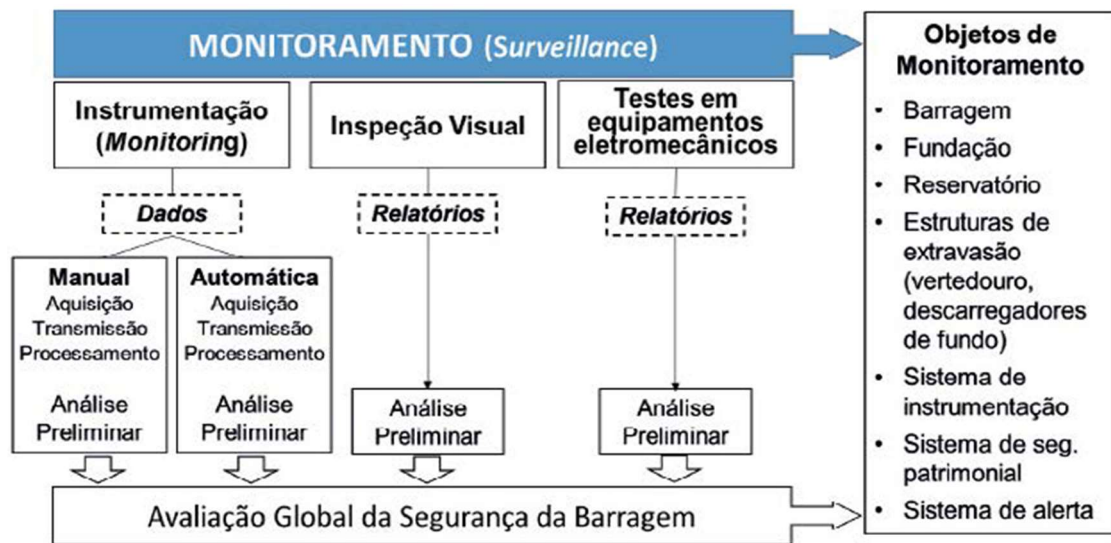


Figura 18 – Elementos e Sequência do Processo de Monitoramento de Barragens.
Fonte: ICOLD (2014)

Segundo Lazzarotto (2015), as leituras de instrumentos de monitoramento são séries temporais que podem indicar tendências no comportamento da barragem, porém algumas anomalias não podem ser previstas com acurácia por modelos numéricos, por isso, a disponibilidade de dados de monitoramento tem difundido a aplicação de modelos estatísticos para a previsão do comportamento da barragem e estes têm servido como um complemento às inspeções visuais e aos modelos numéricos no suporte a tomada de decisões.

Os instrumentos de monitoramento de barragens devem ser minuciosamente analisados de acordo com suas várias características em relação sua eficiência operacional avaliadas em: Conformidade, Acurácia, Precisão, Resolução, Campo de Leitura, Span ou Amplitude, Repetibilidade, Linearidade, Histerese, Sinal de Saída, Constante de Tempo, Bias, Curva de Calibração, Fator de Escala e Ruído.

De acordo com Silveira (2006) o erro, variação de desvio entre o valor medido e o valor real, podem ser divididos por tipos, causas e medidas corretivas como mostrado na Tabela 13.

Tabela 14 – Tipos de erros ocorridos na instrumentação de barragens, suas causas e medidas corretivas para evitá-los.

Fonte: Silveira (2006)

TIPO DE ERRO	CAUSAS	MEDIDAS CORRETIVAS DOS INSTRUMENTOS
Erro grosseiro	Inexperiência Falha na leitura Falha no registro Erro computacional	Mais cuidado/ atenção Treinamento Leituras duplicadas Dois observadores Comparação com as leituras prévias
Erro sistemático	Calibração imprópria Falta de calibração Histerese Não linearidade	Uso de calibração correta Recalibração Uso de padrões Uso de procedimentos de leitura consistentes
Erro de conformidade	Detalhes de instalação incorretos Limitações do instrumento de medição	Seleção de instrumento apropriado Modificação dos procedimentos de instalação Aprimoramento do projeto de Instrumentação
Erro ambiental	Clima Temperatura Vibração Corrosão	Registrar as variações ambientais e introduzir correções Fazer escolha apropriada dos materiais dos instrumentos
Erro observacional	Variação entre observadores	Treinamento Uso de sistemas de aquisição automática de dados
Erro de amostragem	Variabilidade nos parâmetros medidos Técnicas incorretas de amostragem	Instalação de um número suficiente de instrumentos nos locais representativos
Erro randômico	Ruído Atrito Efeitos ambientais	Seleção correta dos instrumentos Eliminação temporária de ruídos Leituras múltiplas Análises estatísticas

O monitoramento da estrutura de uma barragem pode gerar uma enorme massa de dados, cujas análises não são fáceis de interpretação. A análise minuciosa dos dados dos instrumentos de auscultação exige a combinação de conhecimentos de engenharia com matemática e estatística, bem como experiência prévia do engenheiro ou técnico responsável pela interpretação destes dados, consumindo muito tempo e muitas vezes inviabilizando o cumprimento rápido desta tarefa. Por esta razão, o uso de técnicas e ferramentas computacionais, que auxiliem o tomador de decisões, é relevante (NETO, 2010).

Uma das maneiras de executar o monitoramento do deslocamento de pontos ao longo do tempo é a aplicação de técnicas geodésicas, onde os pontos são definidos pelos engenheiros responsáveis pela execução e ou manutenção da estrutura de acordo com padrões geométricos, composição e cargas de barramento. As técnicas geodésicas convencionais baseiam-se no uso de instrumentos como estações totais e níveis, e na aplicação de métodos como triangulação, trilateração, poligonação e nivelamento geométrico. Com o avanço tecnológico da instrumentação utilizada, as estações totais receberam servos-motores e sistema de transmissão remotas de dados transformando-se em estações totais robotizadas/ robotic totalstation (ETR/RTS) (NADAL, 2017).

As estações totais necessitam de um nível mínimo de intensidade do sinal refletido para que seja possível sua efetiva detecção, onde usualmente, realizando a função de alvos são utilizados prismas devido ao grau de exatidão e as facilidades que pode proporcionar (FRIEDMANN, 2013).

A motorização e a automação das estações totais robotizadas iniciaram uma nova, mais rápida e mais efetiva forma de medições em levantamentos com capacidade de reconhecimento automático de alvos, que é a realização da busca e pontaria automática dos pontos monitorados, armazenando sequência de alvos por sessões. Em ETRs de posicionamento fixo e controladas remotamente é possível, inclusive, efetuar levantamentos periódicos das mesmas sequências de alvos a fim de monitorar as deformações da estrutura em função do tempo pela análise das sequências anteriores, sendo esse processo muito interessante, por exemplo, no monitoramento de grandes barragens. Em meados da década de 2000, uma nova evolução surgiu quanto ao monitoramento de estruturas que foi a união da ETR com os receptores GNSS (Global Navigation Satellite Systems), pode combinar automaticamente e em tempo real as informações efetuadas. As ETR's podem enviar os dados para uma interface de saída serial (cabo) ou rádio, para que as observações sejam registradas em um terminal remoto, possibilitando que múltiplos pontos de várias estruturas sejam monitoradas em um único local, por uma mesma equipe (NADAL, 2017 e FRIEDMANN, 2013).

Os principais fabricantes de estações totais no mercado mundial – Leica, Nikon, Sokkia, Topcon e Trimble – possuem modelos com estas características (FRIEDMANN, 2013).

Nas Figura 19 e Figura 20 são mostradas uma estação total robotizada, da marca Leica Geosystems®, modelo TCRA1205, monitorando respectivamente barragens hidrelétrica e de contenção de rejeito de mineração, que dentro de uma ampla gama de potencialidades, permite as operações citadas anteriormente.



Figura 19 – Estação total robotizada, monitorando uma barragem hidrelétrica.
Fonte: NADAL (2017)



Figura 20 – Estação total robótica realizando monitoramento de campanha na barragem Sela na mineradora Samarco.
Fonte: Próprio autor

3. METODOLOGIA

Para cumprir os objetivos propostos, a metodologia desse trabalho foi conduzida através de uma sequência que favorecesse a fluidez da pesquisa, obtendo-se um melhor entendimento das reações das barragens quando submetidas as cargas de barramento, dados conseguidos através de simulações de rompimentos de barragens em modelo reduzido e o desenvolvimento de um sistema com capacidade de interpretação e detecção do início de anormalidades comportamentais das barragens, utilizando em ambos a mais clara forma de demonstrar os caminhos percorridos para realização dos ensaios e testes, incluindo a validação dos dados obtidos.

A metodologia desse trabalho foi dividida em três partes principais: experimento em laboratório das deformações e rompimento de barragens, desenvolvimento do sistema de monitoramento óptico de barragens e operação do sistema aplicado em campo (barragens reais de hidrelétrica e mineração). Outras etapas, ditas secundárias, foram adicionadas como mostra a Figura 21.

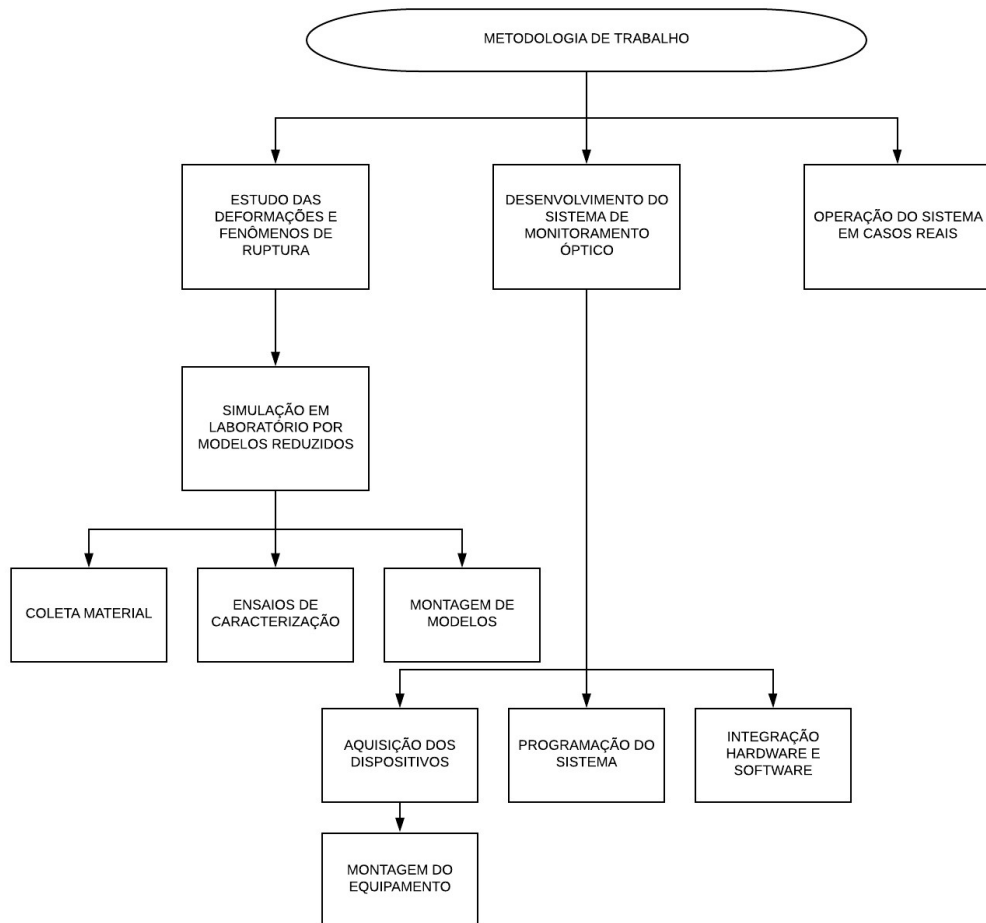


Figura 21 – Fluxograma de metodologia aplicada.

3.1. Simulação em Laboratório das Deformações e Rompimento de Barragens em Modelos Reduzidos

3.1.1. Metodologia e construção do modelo reduzido

No caso das barragens de aterro, dada a sua constituição por materiais porosos com certa permeabilidade, estabelece-se um escoamento no seu interior, em regime saturado e não saturado, que necessita de ser investigado com o rigor indispensável de forma a prevenir eventuais anomalias de funcionamento ao longo da sua vida útil. Estas estruturas geotécnicas podem ser distinguidas quanto à forma como o fluido é conduzido pelo seu interior e para essa análise é fundamental que se faça estudos sobre a estrutura e seus materiais de composição e também a realização de experimentos que possibilitem conhecer os seus comportamentos e fenômenos (UNAS, 2010).

A técnica de utilização de modelos físicos reduzidos é uma ferramenta para estudos da interação do escoamento com estruturas hidráulicas de geometrias complexas. Sendo utilizada para otimização de projetos e solução de problemas que possam vir a ocorrer durante ou após o andamento da obra. A representação de um fenômeno por meio de modelos é baseada em leis de semelhança e, para a correta modelação, é necessário que seja representado as ações como cargas atuantes e fenômenos em questão, de forma confiável (KANASHIRO et al 2013).

Para esse trabalho foi adotado o uso de um modelo reduzido para realizar os experimentos possibilitando analisar de forma sistemática as várias partes de uma barragem simultaneamente e assim obter dados quanto seu comportamento físico quando submetida aos esforços das cargas atuantes.

Foram construídos modelos reduzidos de barragens dentro de um tanque de vidro, seguido de enchimento de água em uma das partes, denominada montante, e a água acumulada simulando o reservatório. Com enchimento cronometrado e o reservatório graduado, foram feitas medidas de deslocamentos e deformações em alguns pontos da barragem, tendo como referência a linha de construção original do modelo e utilizando trena a laser e paquímetros para a realização das leituras. Ao relacionar os dados de deslocamentos, nível do reservatório e tempo, possibilitou conclusões sobre o comportamento das barragens quanto as deformações antes de rupturas e colapsos.

Os pontos de análises de deformações nos modelos reduzidos foram o topo do talude de montante, crista, topo de talude de jusante e base de talude de jusante, como mostra a Figura 22. Esses pontos foram escolhidos por serem os mais comuns pontos de ocorrência dos deslocamentos verticais (recalques) e deslocamentos horizontais.

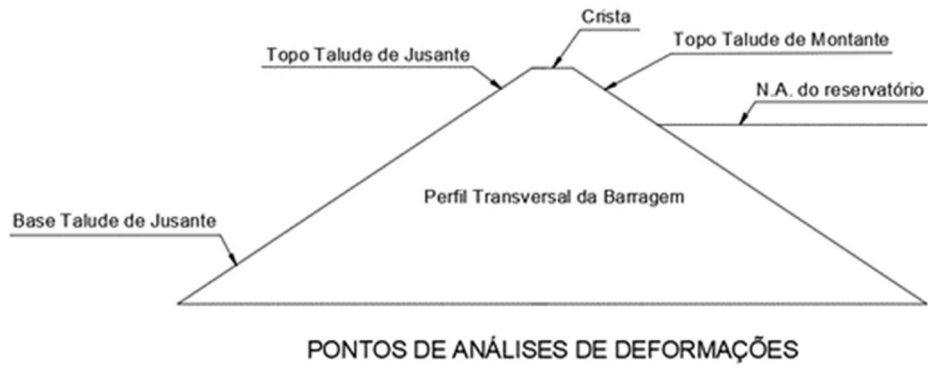


Figura 22 – Pontos de análises de deformações no modelo reduzido de barragem.

Fonte: Próprio autor

Para realização do experimento, foi projetado e construído um tanque de vidro transparente de 14 mm de espessura, tendo a necessidade da transparência do material para possibilitar o acompanhamento e coleta de dados quanto a deformações. Esse tanque, mostrado na Figura 23, tem as seguintes dimensões: comprimento de 180,0 cm, largura de 50,0 cm e altura de 60,0cm, posicionada em uma das bancadas do Laboratório de Geotecnia da UNIFEI.



Figura 23 – Tanque de vidro, utilizado para construção do modelo reduzido de barragem.

Fonte: Próprio autor

Fez-se necessário a marcação na lateral do tanque com graduações em centímetros no sentido horizontal para definição da largura dos modelos reduzidos e a marcação no sentido

vertical para a definição da altura. Também foi feita uma marcação de graduação na vertical, também em centímetros na parte do tanque onde é a montante do modelo reduzido, local esse onde há acúmulo, para controle do Nível de Água (NA).

O modelo reduzido tem uma escala de 1:100 considerando uma barragem com altura de 35 m. A escolha dos dois modelos de barragens para realização dos experimentos foi fundamentada por se tratarem de perfis comuns e usuais, sendo eles as barragens com taludes de inclinações iguais na montante e jusante de 1:1,25 e 1:1,50 que correspondem a rampas com inclinações de aproximadamente 39° e 34°, como mostra a Figura 24.

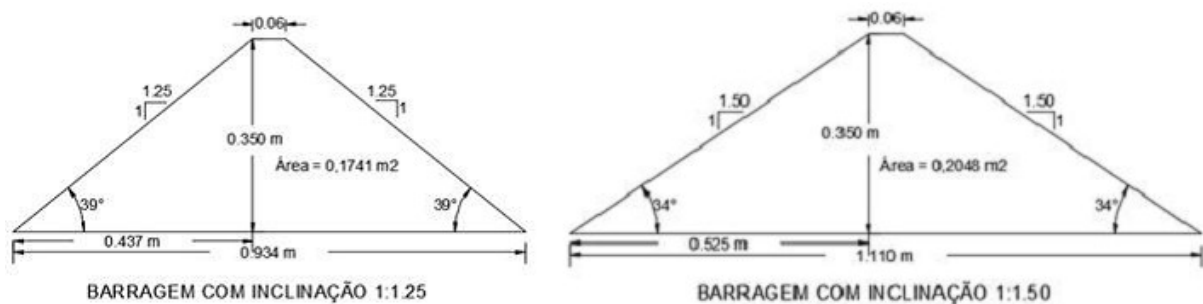


Figura 24 – Modelos de barragens adotados para realização do experimento de rompimento.
Fonte: Próprio autor

Para a construção do modelo reduzido foi utilizado um solo coletado em uma jazida próxima a prefeitura de Itajubá - MG. O ponto da captação do solo estava a 5,20 m de profundidade em relação a superfície com camada vegetal, a coleta foi realizada manualmente com a utilização de pás, enxadas, peneiras e baldes e o material foi armazenado em sacos plásticos e estocados no próprio laboratório do experimento, como mostram respectivamente as Figura 25 e Figura 26.

Para experimento como modelos reduzidos é necessário que as estruturas representadas possuam semelhança geométrica, para que se possa ter uma fiel representação do fenômeno e assim obter os resultados esperados (KANASHIRO et al, 2013).

A construção dos modelos reduzidos foi realizada o mais próximo possível das construções reais de barragens, adotando critérios de peneiramento do material, compactação por camadas e controle de alinhamento e nivelamento, como mostrado nas Figura 27, Figura 28 e Figura 29, que retratam as etapas da construção de um dos modelos reduzidos de barragem.



Figura 25 – Coleta de solo na jazida.
Fonte: Próprio autor



Figura 26 – Armazenado no laboratório.
Fonte: Próprio autor



Figura 27 – Delimitação do tamanho do modelo reduzido.
Fonte: Próprio autor



Figura 28 – Assentamento da jazida.
Fonte: Próprio autor

A compactação foi realizada de forma manual utilizando conchas, colheres e soquetes de compactação. Os dados do grau de compactação foram obtidos através de ensaios laboratoriais, como mostram no item 3.1.2 Caracterização do Material.



Figura 29 – Nivelamento do modelo.
Fonte: Próprio autor

3.1.2. Caracterização do material

De acordo com Neves (2010), a classificação dos solos, através de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, deve ser tratada de acordo com os fundamentos da Ciência dos Materiais, tanto no campo da Geologia, da Mecânica dos Solos. Ainda segundo o autor, os solos apropriados para a construção geralmente estão situados no subsolo, livres de matéria orgânica.

Através da realização de ensaios laboratoriais, foi possível definir o tipo de solo e suas características geotécnicas. Essa caracterização foi de grande importância para conhecer a composição do solo, seus limites de consistência e os parâmetros para montagem dos modelos reduzidos. Os ensaios realizados foram:

- Peneiramento: Esse ensaio determina a composição granulométrica do solo e nele se determina a quantidade porcentual das partículas que passam ou que são retidas em peneiras de aberturas normalizadas. A NBR7181 (ABNT, 1984a) foi utilizada para a execução deste ensaio.
- Textura: teor de areia, silte, argila. Para este ensaio foi utilizada a metodologia da EMBRAPA (2017).

- Peso específico dos grãos: é definido como a razão entre o peso da amostra do solo e o seu volume como coletado em campo. Para esse foi utilizada a NBR6504 (ABNT, 1984c).
- Limite de liquidez (LL): é o grau de umidade determinado pelo aparelho de Casagrande. Ele é constituído por uma concha metálica unida a uma manivela, que a move, fazendo-a cair sobre uma base sólida, um certo número de vezes, até o fechamento de 1 cm da ranhura padrão, feita previamente no solo colocado na concha. O limite de liquidez corresponde ao teor de umidade em que a ranhura se fecha com 25 golpes. A metodologia aplicada é referente a NBR6459 (ABNT, 1984b).
- Limite de plasticidade: é o grau de umidade necessário e suficiente para deslizar uma porção de solo umedecido sobre uma placa de vidro, até formar um pequeno cordão com 3 mm de diâmetro e 12 a 15 cm de comprimento. Para este ensaio foi utilizada a metodologia da NBR7180 (ABNT, 1984d)
- Proctor normal: é a relação entre o teor de umidade, a massa específica quando compactados a uma determinada energia, que neste caso refere-se a energia “normal” de acordo com a ABNT NBR 7182/86.

As preparações das amostras para ensaios de caracterização e compactação foram feitas de acordo com a NBR6457 (ABNT, 1986b). Os resultados obtidos são encontrados da Tabela 15.

Tabela 15 – Caracterização do solo utilizado no experimento.

Fonte: Próprio autor

Propriedade		Valores
Textura	Argila	11 %
	Silte	56 %
	Areia	33 %
Limite de Liquidez		48 %
Limite de plasticidade		34 %
Compactação	Teor de umidade ótimo	20 %
	Peso seco máximo	15 kN/m ³
Peso específico dos grãos		2,6 g/cm ³

Todo material aplicado para a construção do modelo reduzido de barragem foi pesado, pois assim foi possível calcular a densidade do material através do seu volume que é conhecido pela geometria da estrutura.

3.1.3. Realização do experimento

Utilizando uma mangueira como circuito hidráulico, que conectada a torneira da bancada do laboratório, conduz a água com vazão regular até o tanque de vidro a montante do modelo reduzido da barragem, representando o enchimento do reservatório. Ao começar o enchimento é iniciada a contagem do tempo através de cronometro instalado na própria bancada do experimento. O esquema de funcionamento do experimento é ilustrado na Figura 30.

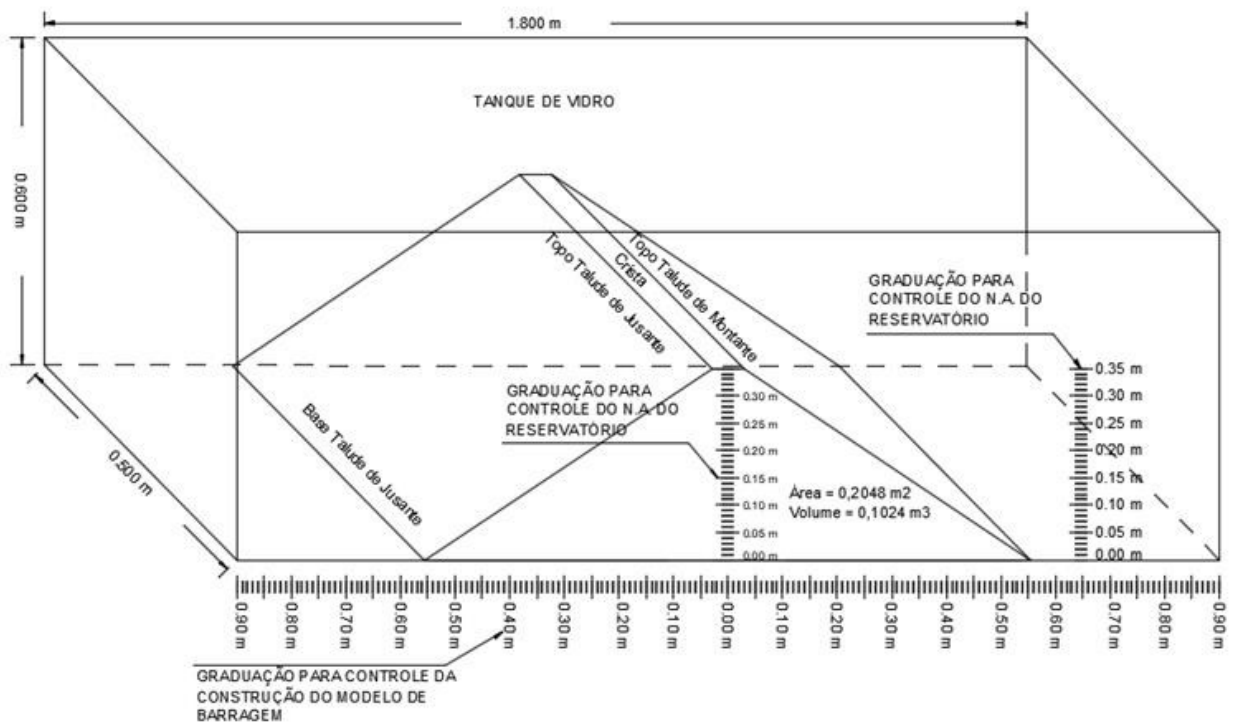


Figura 30 – Esquema do experimento de rompimento de barragem em modelo reduzido.
Fonte: Próprio autor

3.2. Desenvolvimento do Sistema de Monitoramento Óptico de Barragens

3.2.1. Descrição do sistema aplicado

Formado pela combinação de hardware e software que interagem entre si, realizando análise do posicionamento da barragem, através de sensores que medem distancia utilizando laser. O sistema aplicado realiza o monitoramento do posicionamento e da estaticidade de estruturas através da combinação de hardware e software específicos que atuam com leitores ópticos medindo distâncias entre o ponto de instalação do aparelho até os pontos de leituras nas faces da estrutura.

O aparelho, mostrado na Figura 45, é composto por sensor a laser, processador auxiliar e sistema de transmissão. O sensor a laser realiza leituras constantes da distância entre a

localização em que está e a face monitorada da barragem. O processador auxiliar tem a função de receber os dados das leituras do laser, realizar um pré-processamento das leituras, as transformando em dados, que em seguida serão transmitidos em tempo real, para o processador principal. Essa transmissão é através de ondas de rádio, podendo também ser via pode ser via WI-FI ou cabos, atendendo as necessidades específicas das barragens em relação as suas infraestruturas e localizações.



Figura 31 – Aparelho de monitoramento de barragens.
Fonte: Próprio autor

Ao receber os dados das leituras, o processador principal, software, os armazena em um banco de dados do próprio computador ou “na nuvem” e compara com os dados enviados anteriormente, formando um ciclo contínuo de recebimento e comparação. Com essa capacidade de comparação o sistema consegue identificar o imediato momento em que ocorreu uma variação de leitura acima do tolerável e detecta a anormalidade comportamental da estrutura. O fluxograma de funcionamento do sistema proposto é mostrado na Figura 46.

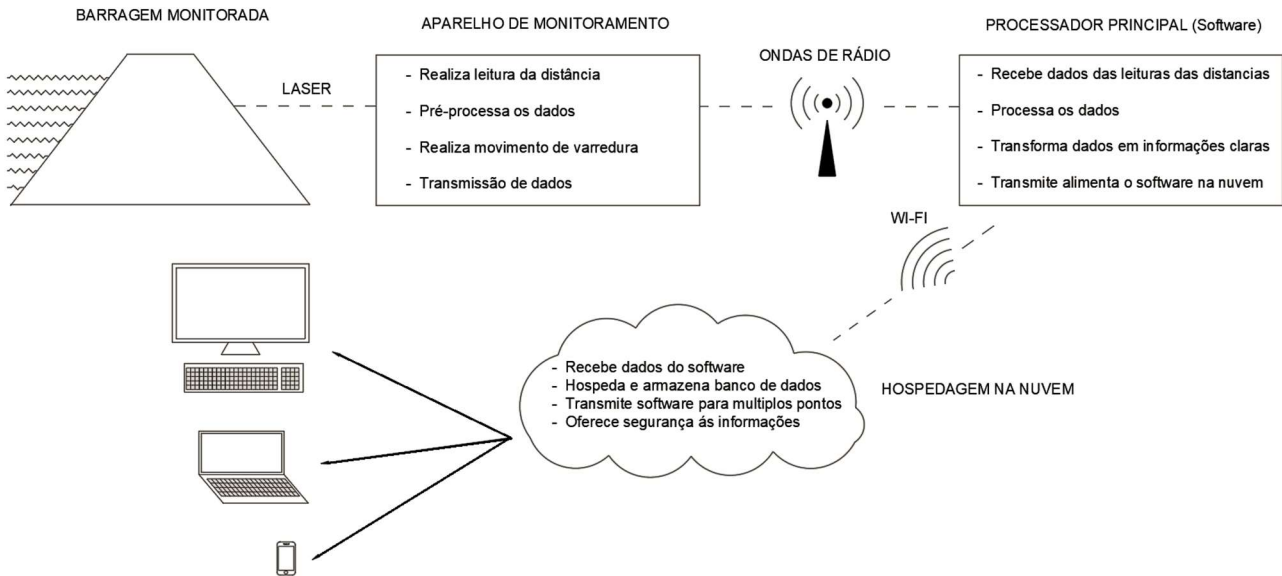


Figura 32 – Fluxograma da operação do sistema.
Fonte: Próprio autor

A Figura 47 mostra a tela inicial do sistema, onde é possível acessar a parte de configuração sistema, tela de monitoramento, planilha dos dados do monitoramento e gráficos de monitoramentos que mostram as variações de posicionamento e deformações da barragem.

Configurações

ODIMN

Monitoramento e Segurança de Estruturas

Monitoramento da Estrutura

Planilha do Monitoramento

Gráfico do Comportamento

Sair

Figura 33 – Tela inicial do sistema.
Fonte: Próprio autor

O ciclo, de leitura, emissão, recepção e processamento dos dados, são repetidos constantemente com intervalos de tempo pré-definidos na configuração do sistema, oferecendo um monitoramento preciso e ininterrupto.

Na configuração do sistema também pode especificar as faixas de limites das leituras que podem identificar as seguintes condições ou status da barragem: NORMAL, ALERTA, PERIGO e EMERGÊNCIA. As margens que delimitam as variações de leitura para cada uma dessas condições, podem ser programadas no recurso configuração do sistema, assim como também podem ser configurados os coeficientes de dilatação e cadastramento de usuários do sistema. Apresenta-se na Figura 48 a tela de configuração do software, onde o usuário pode especificar a forma de monitoramento do sistema.

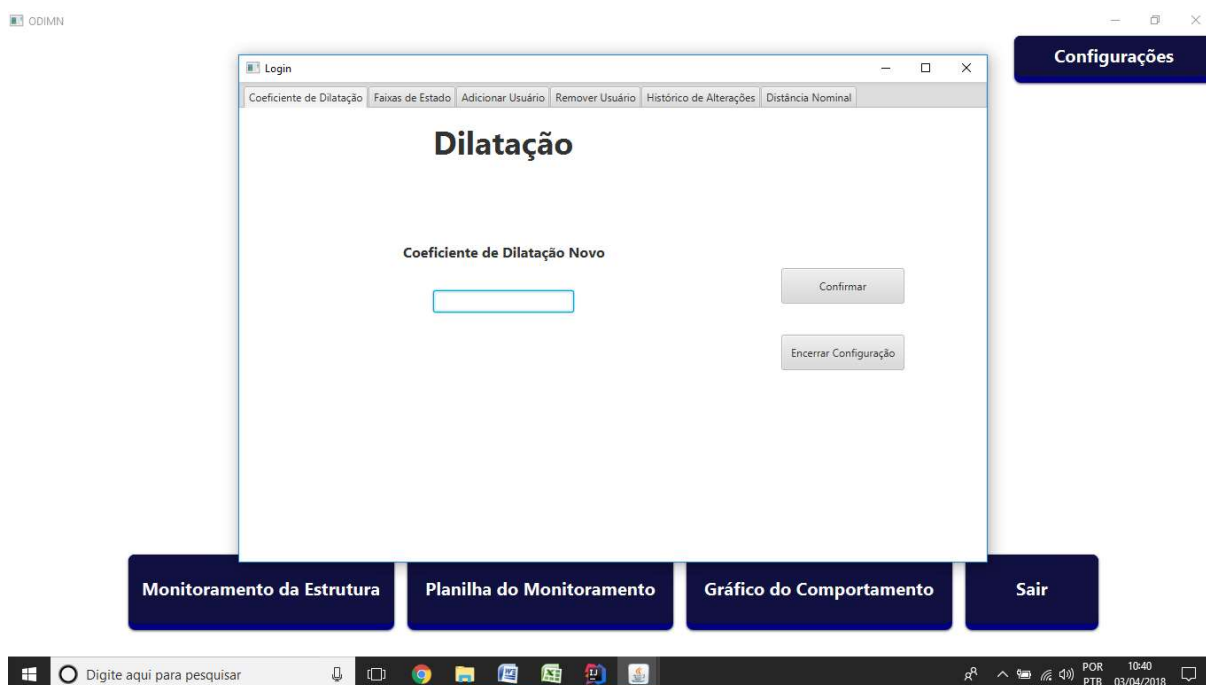


Figura 34 – Tela para inserção do coeficiente de dilatação do material utilizada para construção da estrutura monitorada.

Fonte: Próprio autor

A tela onde o usuário consegue alterar os limites de tolerância para cada um dos status identificado pelo sistema (NORMAL, ALERTA, PERIGO e EMERGÊNCIA) é mostrada na Figura 49.



Figura 35 – Tela de configuração dos limites de faixas para interpretação do sistema.
Fonte: Próprio autor

Na Figura 50 mostra-se a tela onde é possível inserir novos usuários do sistema.

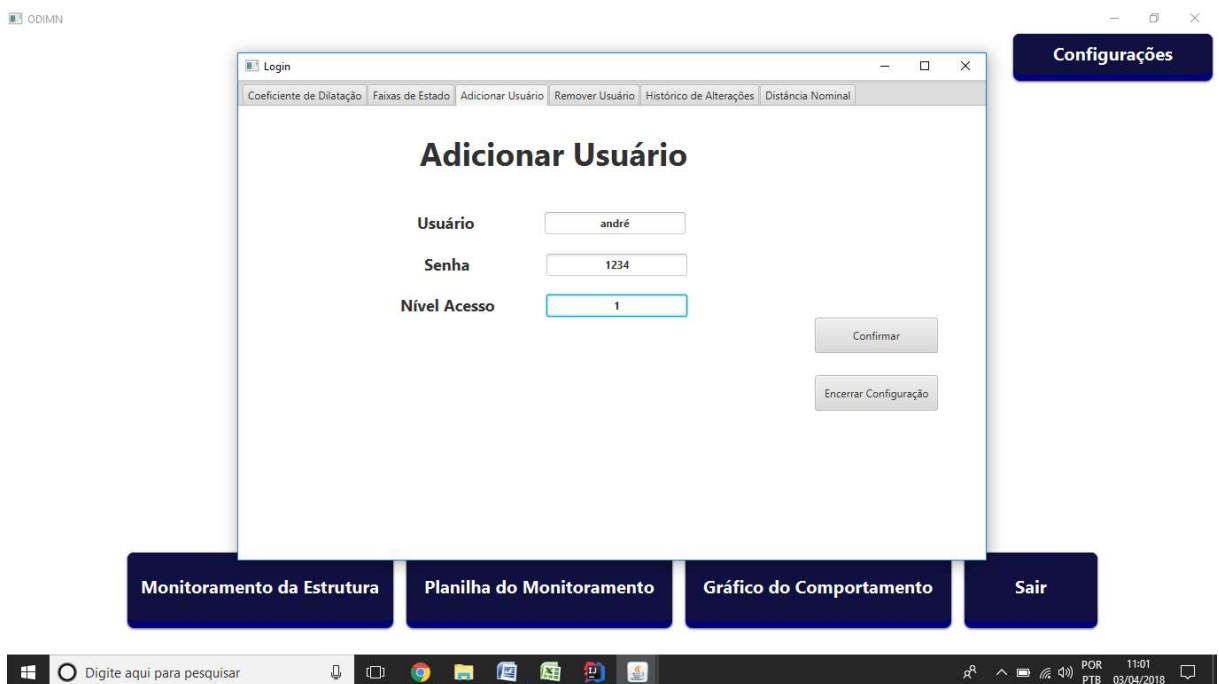


Figura 36 – Tela de adição de usuário do sistema.
Fonte: Próprio autor

Na Figura 51 mostra-se a tela na qual pode-se excluir usuários.

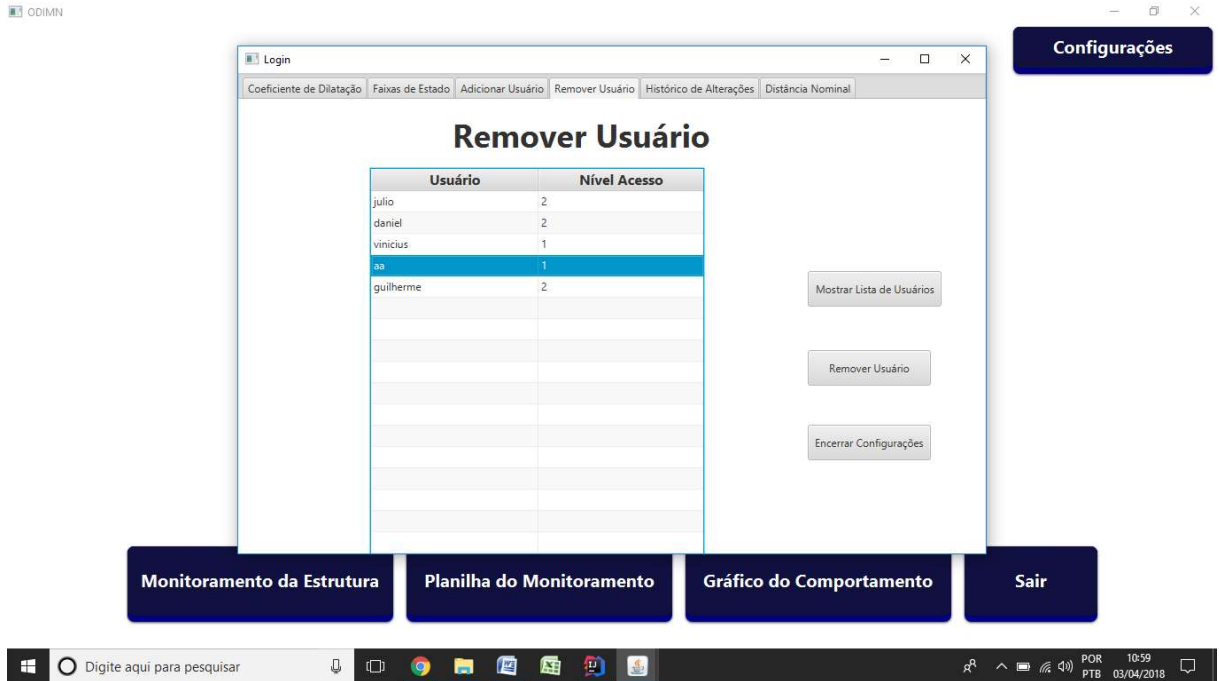


Figura 37 – Tela de remoção de usuário do sistema.
Fonte: Próprio autor

A Figura 52 mostra a tela onde se apresenta o histórico de todas as alterações feitas no sistema, mostrando também qual o usuário fez a alteração e o horário em que foi feita, proporcionando um registro que traz segurança que as responsabilidades de operação das alterações de configuração.

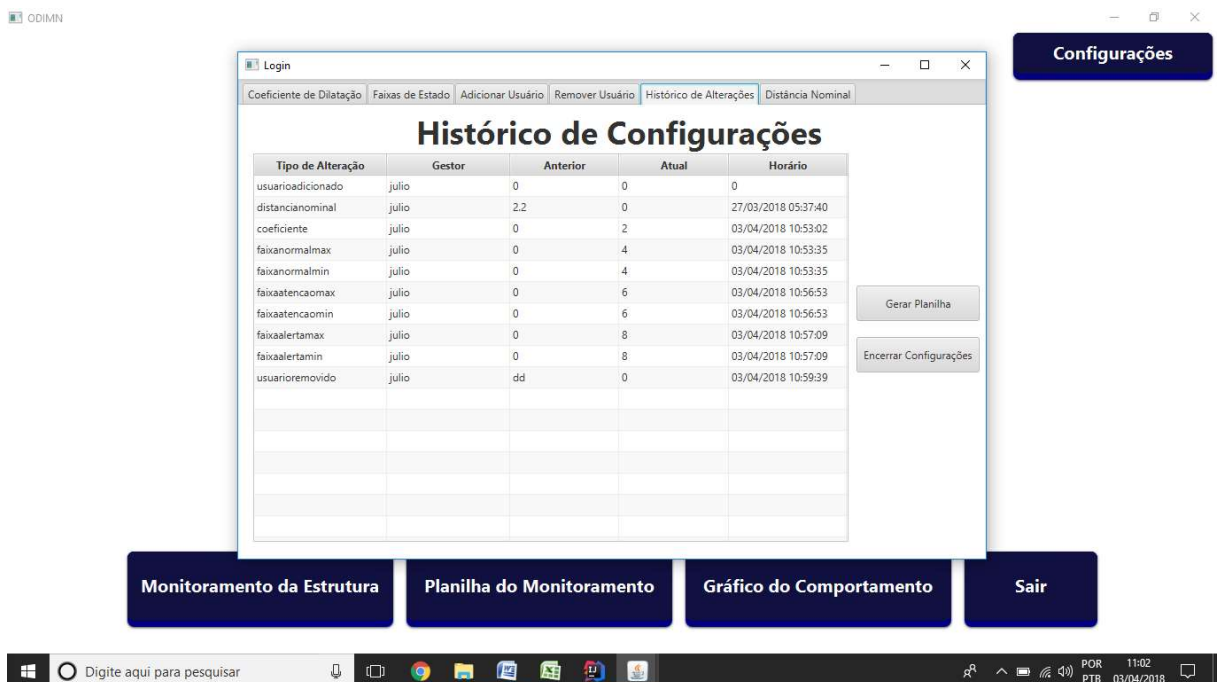


Figura 38 – Tela do histórico das alterações.
Fonte: Próprio autor

Quando houver alguma alteração contínua ou discrepante da leitura da distância, independente da relação com a temperatura ou horário, o sistema identifica como anormalidade comportamental e emitirá sinal de alerta na tela de monitoramento, correspondente a cor de cada faixa. De acordo com o grau da variação das leituras é relacionado a severidade da anormalidade comportamental e assim são emitidos sinais de alerta proporcional ao deslocamento da estrutura monitorada. Na Figura 53 apresenta-se a tela de monitoramento do sistema.

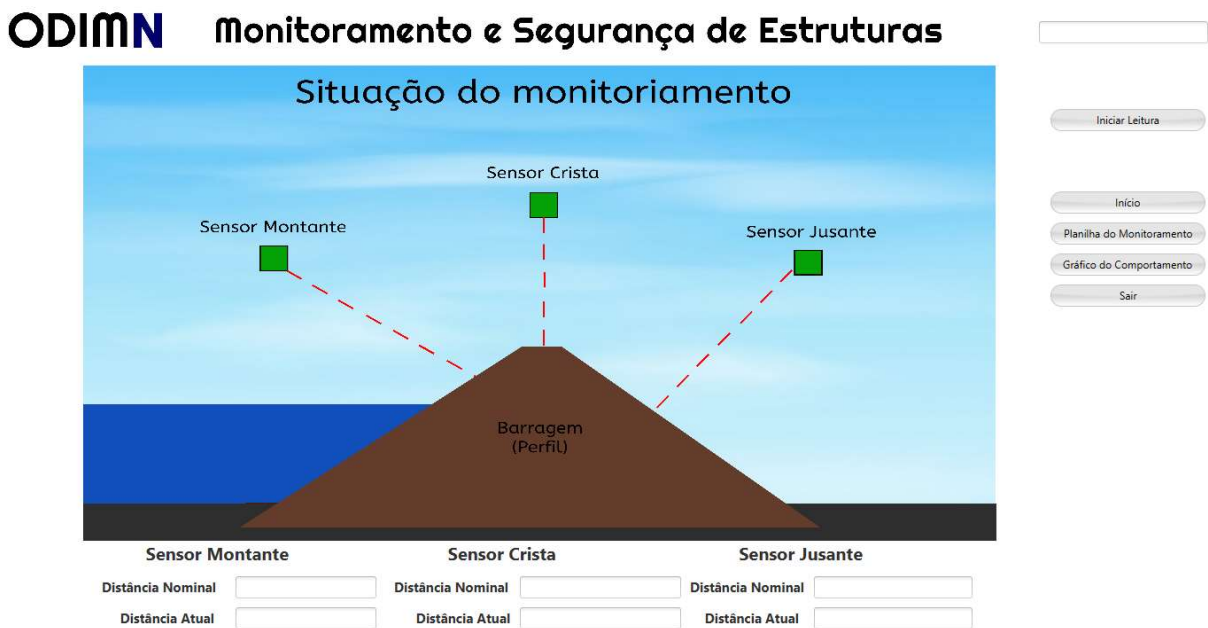


Figura 39 – Tela de monitoramento com o esquemático da estrutura.
Fonte: Próprio autor

Cada barragem tem suas áreas mais suscetíveis a deformações, fazendo que também seja variável a demanda quanto a quantidade de pontos a serem monitorados, como já mencionado no Item 3.1.1 deste trabalho, adotamos o critério de monitorar um ponto em cada parte da barragem, sendo estes: topo do talude de montante, crista, topo do talude de jusante e base do talude de jusante. Em prática, a quantidade de pontos a serem monitorados em uma estrutura pode variar de acordo com a sua geometria, porte, linhas de eixo longitudinal vulneráveis.

As variações do posicionamento de uma estrutura podem acontecer sem que haja anormalidade comportamental, como por exemplo, a dilatação e retração térmica. Dotado de inteligência artificial, o processador principal aprende com o comportamento normal da estrutura e sempre que for identificado, emite mensagem na tela, informando que existem novos parâmetros de normalidade comportamental e se deseja adota-los. Neste momento o sistema oferece as opções de “adotar, conhecer ou ignorar”, optando por conhecer, abre na tela uma

planilha que mostra todas as variações de leituras nos seus devidos horários, mostrando a dilatação térmica no calor do dia e a retração térmica no frio da noite, comportando da mesma forma nas variações de temperatura das estações climáticas ao longo do ano.

O sistema oferece condições para que o usuário a qualquer momento possa acessar os relatórios, representados em formato de planilhas e gráficos, demonstrando o comportamento da barragem. Eles podem ser acessados pelo software / aplicativo ou poderão ser enviados para endereços eletrônicos com frequência ou situação determinada. Nas Figuras 54 e 55 são ilustrados a interface de monitoramento.



Figura 40 – Planilha de monitoramento atualizada em tempo real.

Fonte: Próprio autor

Na Figura 54 mostra-se a planilha de dados gerada pelo monitoramento, apresentando os pontos lidos, horário das leituras e estabilidade desses pontos ou alvos. O software possibilita a exportação desses dados para o Excel ou em formato PDF, para elaboração de relatórios.

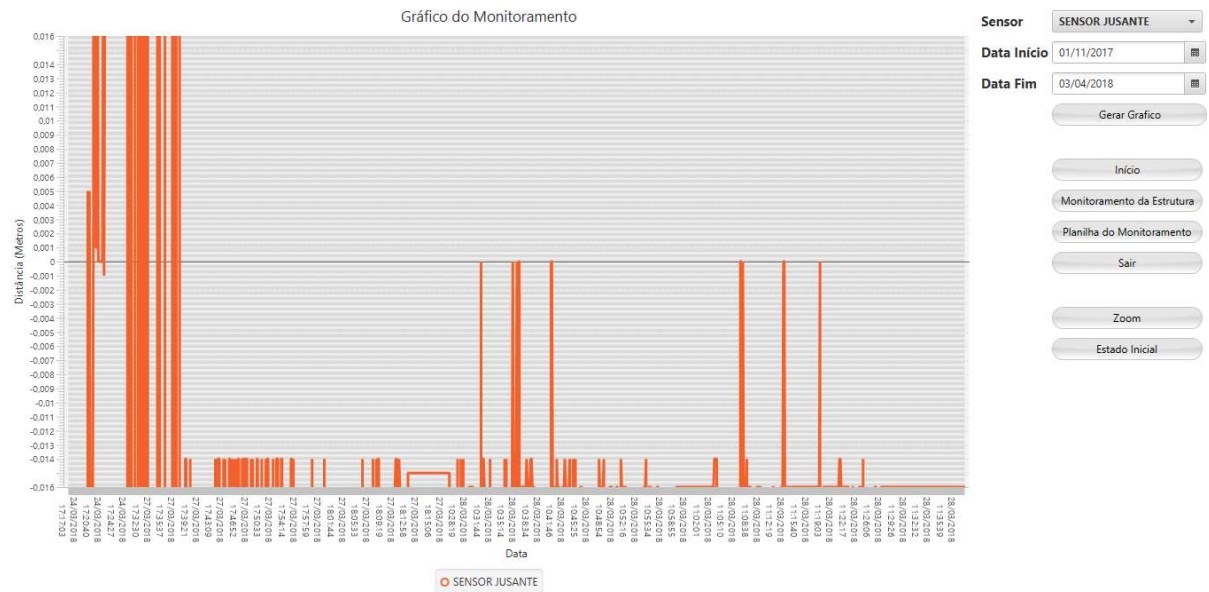


Figura 41 – Gráfico de monitoramento atualizado em tempo real
Fonte: Próprio autor

Os gráficos também apresentam dados das leituras referenciando aos pontos ou alvos lidos, horários das leituras e a estabilidade de cada alvo. Também podem ser exportados em formato PDF para elaboração de relatórios técnicos.

Atualmente os monitoramentos remotos quanto ao posicionamento e deslocamento das barragens são realizados com o uso estações totais convencionais ou robóticas, operadas por topógrafos, engenheiros agrimensores ou técnicos especializados e geralmente necessitam de auxiliares para o trabalho de campo. Após leituras, a estação total convencional é descarregada em software específico Topograph e assim feita a comparação com leituras anteriores. Uma equipe pode levar vários dias para repetir essa conferência. Existem monitoramentos também em tempo real, realizando estações totais robotizadas e radares terrestres conectados a satélites e operados por centrais de monitoramentos com equipes especializadas.

3.2.2. Construção do sistema aplicado

Através da formação de uma equipe multidisciplinar desenvolvemos o aparelho, hardware e o sistema, software. Essa equipe foi formada por alunos dos cursos de engenharia eletrônica e engenharia da computação, ambos desta instituição, UNIFEI- Universidade Federal de Itajubá e também por empresa local de usinagem. Foram utilizados os laboratórios de usinagem e eletrônica da Unifei.

Para desenvolvimento do hardware utilizamos placas de circuito integrado, onde a programação do firmware foi elaborada por nossa equipe, sistema de leitura com sensor laser de médio alcance e boa precisão, sistema de transmissão de dados por wi-fi, e bluetooth. A carcaça do aparelho foi desenvolvida por nossa equipe e executada por empresa local no município de Itajubá.

4. Resultados

4.1. Experimento de Rompimento de Barragem em Modelo Reduzido

Para realização do experimento, os intervalos definidos para que fossem coletados dados de deformações nos pontos especificados foi definido através das cotas de NA do reservatório 5,0cm, 7,5cm, 10cm, 12,5cm, 15,0cm, 17,5cm, 20,0cm, 22,5cm e 25,0cm, representando o que seriam m.c.a em uma barragem real. Como referência de início “zero” para essa medição foi adotada a parte mais baixa, ou base do talude de montante do barramento.

Considerando uma vazão regular o enchimento do reservatório, sempre que o NA chegava a essas cotas de referência, foram coletados dados das deformações nos pontos predeterminados e o tempo em que ocorreram. As leituras se sucederam até chegar ao colapso do barramento.

Os dados das deformações foram coletados utilizando réguas, paquímetro e trenas a laser, todos com precisão milimétrica, portanto os dados gerados tiveram essa mesma precisão.

Os experimentos para cada modelo de barragem foram repetidos três vezes, para que fosse possível calcular o desvio padrão e ter uma média dos dados obtidos. Portanto para cada linha de análise serão apresentados quatro resultados, compostos pelos experimentos e a média.

A combinação desses dados possibilitou para cada experimento de cada modelo de barragem as seguintes análises:

- Relação do NA em função do tempo no enchimento do reservatório.
- Deformações nos 4 pontos analisados em função do NA.
- A relação das deformações entre os pontos analisados.

4.1.1. Experimento em modelo reduzido com taludes de inclinação de 1:1,25

As Figuras 32 a 37, ilustram algumas etapas dos experimentos com modelo reduzido de rampa 1:1,25.



Figura 42 – Início do enchimento do reservatório.
Fonte: Próprio autor

Na etapa inicial do enchimento do reservatório, nota-se o início da percolação da água no maciço da estrutura.

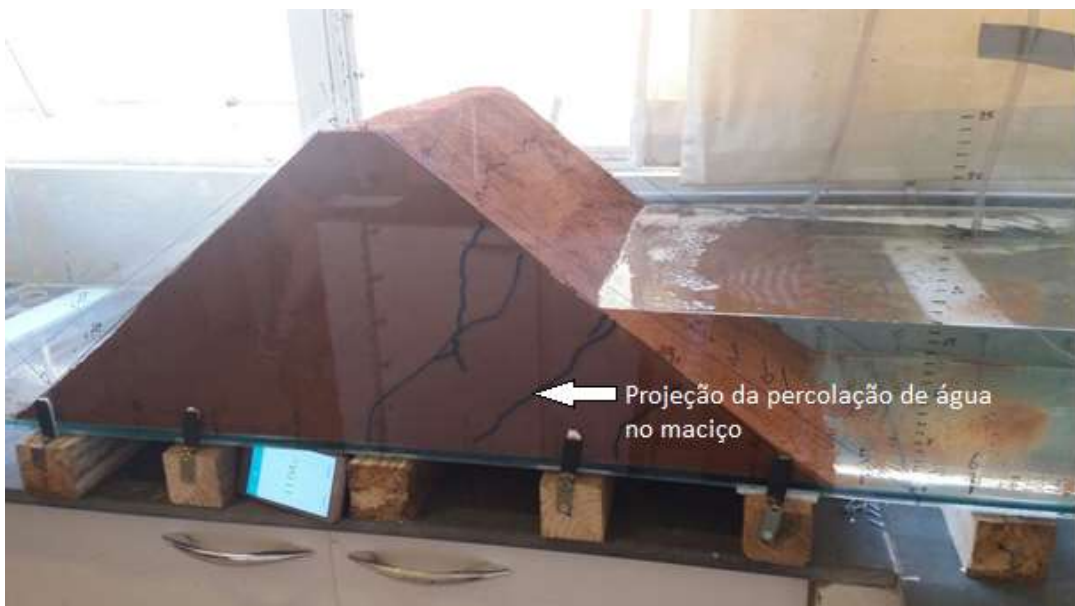


Figura 43 – Reservatório no N.A. 17 cm, mostrando as etapas de projeção da percolação de água no maciço da estrutura.

Fonte: Próprio autor

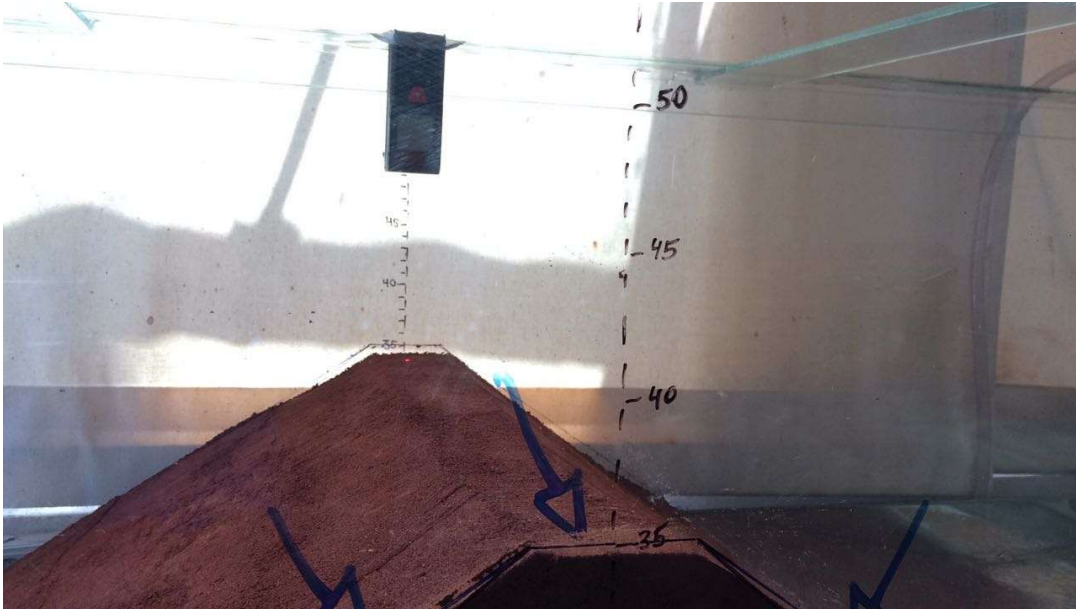


Figura 44 – Trena a laser monitorando deformações de recalque na crista do modelo reduzido de barragem.
Fonte: Próprio autor

Na Figura 45, torna-se perceptível o início das deformações, principalmente o abatimento ou recalque da crista da barragem.



Figura 45 – Reservatório no N.A. 25 cm.
Fonte: Próprio autor

Com o reservatório em sua capacidade de cota do N.A. em 25 cm, a estrutura apresenta além do considerável recalque na crista, a deformação do topo do talude de montante, no sentido a jusante do barramento.



Figura 46 – Início da ruptura no modelo reduzido de barragem.
Fonte: Próprio autor

A etapa de início de rompimento da estrutura é apresentada na figura 36, onde ainda não ocorreu o colapso estrutural e o esvaziamento do reservatório.



Figura 47 – Colapso estrutural do modelo reduzido de barragem.
Fonte: Próprio autor

Por fim, ilustrada na figura 37, o total colapso da barragem, onde ocorre imediatamente o esvaziamento do reservatório.

As Tabelas 16 a 18 mostram os dados obtidos em cada um dos três experimentos para a mesma inclinação, 1:1,25. Os valores médios calculados são apresentados na Tabela 19, e a Tabela 20 consolida os dados de todos os experimentos para esse modelo de inclinação de talude.

Tabela 16 – Resultados do experimento nº 1 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,25.

Fonte: Próprio autor

Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem								
Modelo 1:1,25		Data: 06/02/18		Nº do Experimento: 01		Volume: 0,087 m ³		
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo Montante (mm)	Crista (mm)		Topo Jusante (mm)	Base Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)	
			Régua	Trena Laser				
0,0	0:00:00	0	0	0	0	0	12,40	
5,0	0:03:26	0	0	0	0	0	8,60	
7,5	0:04:45	0	0	0	0	0	14,00	
10,0	0:07:20	0	0	0	0	0	18,35	
12,5	0:09:42	0	1	1	2	0	20,70	
15,0	0:12:40	1	4	4	4	0	13,70	
17,5	0:15:27	1	6	5	6	2	12,60	
20,0	0:18:42	6	8	7	8	4		
22,5	0:22:17	9	12	11	11	6		
25,0	0:26:01	16	26	20	15	8		
Colapso	0:28:12	Peso Específico γ : 11,30 kN/m ³				TOTAL	100,35	

Tabela 17 – Resultados do experimento nº 2 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,25.

Fonte: Próprio autor

Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem							
Modelo 1:1,25		Data: 08/02/18		Nº do Experimento: 02		Volume: 0,087 m ³	
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo Montante (mm)	Crista (mm)		Topo Jusante (mm)	Base Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)
			Régua	Trena Laser			
0,0	0:00:00	0	0	0	0	0	17,00
5,0	0:02:35	0	0	0	0	0	20,40
7,5	0:04:03	0	0	0	0	0	17,80
10,0	0:05:57	0	1	1	1	0	20,45
12,5	0:07:40	1	1	2	2	0	18,10
15,0	0:09:42	2	4	5	5	1	1,80
17,5	0:11:40	3	7	6	9	1	
20,0	0:14:00	6	10	9	10	2	
22,5	0:17:08	10	14	14	13	4	
25,0	0:18:56	15	20	19	14	7	
Colapso	0:27:20	Peso Específico γ : 10,76 kN/m ³				TOTAL	95,55

Tabela 18 – Resultados do experimento nº 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,25.

Fonte: Próprio autor

Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem							
Modelo 1:1,25		Data: 13/03/18		Nº do Experimento: 03		Volume: 0,087 m ³	
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo de Montante (mm)	Crista (mm)		Topo de Jusante (mm)	Base de Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)
			Régua	Trena Laser			
0,0	0:00:00	0	0	0	0	0	17,20
5,0	0:04:10	0	0	0	0	0	11,85
7,5	0:07:35	0	0	0	0	0	16,85
10,0	0:09:26	0	1	1	0	0	20,15
12,5	0:12:15	2	3	2	2	1	18,65
15,0	0:15:15	4	7	5	4	2	5,80
17,5	0:18:35	8	12	7	7	2	
20,0	0:22:20	9	15	13	11	2	
22,5	0:25:55	12	21	16	15	3	
25,0	0:26:51	18	32	28	22	5	
Colapso	0:27:10	Peso Específico γ : 10,20 kN/m ³				TOTAL	90,50

Tabela 19 – Média dos resultados dos experimentos nº 1, 2 e 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1:1,25.

Fonte: Próprio autor

(MÉDIA) Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem								
Modelo 1:1,25		Data: Variada		Média dos 3 Experimentos		Volume Médio: 0,087 m ³		
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo de Montante (mm)	Crista (mm)		Topo de Jusante (mm)	Base de Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)	
			Régua	Trena Laser				
0,0	0:00:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
5,0	0:03:24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
7,5	0:05:28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
10,0	0:07:34	0,0	0,7	0,7	0,3	0,0		
12,5	0:09:52	1,0	1,7	1,7	2,0	0,3		
15,0	0:12:32	2,3	5,0	4,7	4,3	1,0		
17,5	0:15:14	4,0	8,3	6,0	7,3	1,7		
20,0	0:18:21	7,0	11,0	9,7	9,7	2,7		
22,5	0:21:47	10,3	15,7	13,7	13,0	4,3		
25,0	0:23:56	16,3	26,0	22,3	17,0	6,7		
Colapso	0:27:34	Peso Específico γ : 10,75 kN/m ³				TOTAL	95,47	

Tabela 20 – Resultados consolidados de todos os experimentos referentes ao modelo reduzido com inclinação de taludes 1: 1,25.

Fonte: Próprio autor

GERAL - Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem																															
Modelo 1:1,25					Data do 1º Exp.: 06/02/18				Data do 2º Exp.: 08/02/18				Data do 3º Exp.: 13/03/18				Volume: 0,087 m³				Local: Laboratório de Solos da UNIFEI										
Enchimento do Reservatório					Topo de Montante (mm)				Crista								Topo de Jusante (mm)				Base de Jusante (mm)				Peso do Solo (Kg)						
NA (cm)	Tempo (h:min:s)								Régua				Trena Laser																		
	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd.			
0,0	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	12,4	17,00	17,20
5,0	0:03:26	0:02:35	0:04:10	0:03:24	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	8,6	20,40	11,85
7,5	0:04:45	0:04:03	0:07:35	0:05:28	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	14,0	17,80	16,85
10,0	0:07:20	0:05:57	0:09:26	0:07:34	0	0	0	0,0	0	1	1	0,7	0	1	1	0,7	0	1	0	0,3	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	18,4	20,45	20,15
12,5	0:09:42	0:07:40	0:12:15	0:09:52	0	1	2	1,0	1	1	3	1,7	1	2	2	1,7	2	2	2	2,0	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	20,7	18,10	18,65
15,0	0:12:40	0:09:42	0:15:15	0:12:32	1	2	4	2,3	4	4	7	5,0	4	5	5	4,7	4	5	4	4,3	0	1	2	1,0	0	0	0	0,0	13,7	1,80	5,80
17,5	0:15:27	0:11:40	0:18:35	0:15:14	1	3	8	4,0	6	7	12	8,3	5	6	7	6,0	6	9	7	7,3	2	1	2	1,7	0	0	0	0,0	12,6		
20,0	0:18:42	0:14:00	0:22:20	0:18:21	6	6	9	7,0	8	10	15	11,0	7	9	13	9,7	8	10	11	9,7	4	2	2	2,7	0	0	0	0,0			
22,5	0:22:17	0:17:08	0:25:55	0:21:47	9	10	12	10,3	12	14	21	15,7	11	14	16	13,7	11	13	15	13,0	6	4	3	4,3	0	0	0	0,0			
25,0	0:26:01	0:18:56	0:26:51	0:23:56	16	15	18	16,3	26	20	32	26,0	20	19	28	22,3	15	14	22	17,0	8	7	5	6,7	0	0	0	0,0			
Colapsos	0:28:12	0:27:20	0:27:10	0:27:34																				TOTAIS (kg)				100,35	95,55	90,50	95,47
																							Peso Especifico (γ) KN/M³				11,30	10,76	10,20	10,75	

A Figura 38 mostra os dados referentes ao enchimento do reservatório, relacionando o tempo e NA em cada um dos três experimentos e a média deles no modelo 1:1,25.

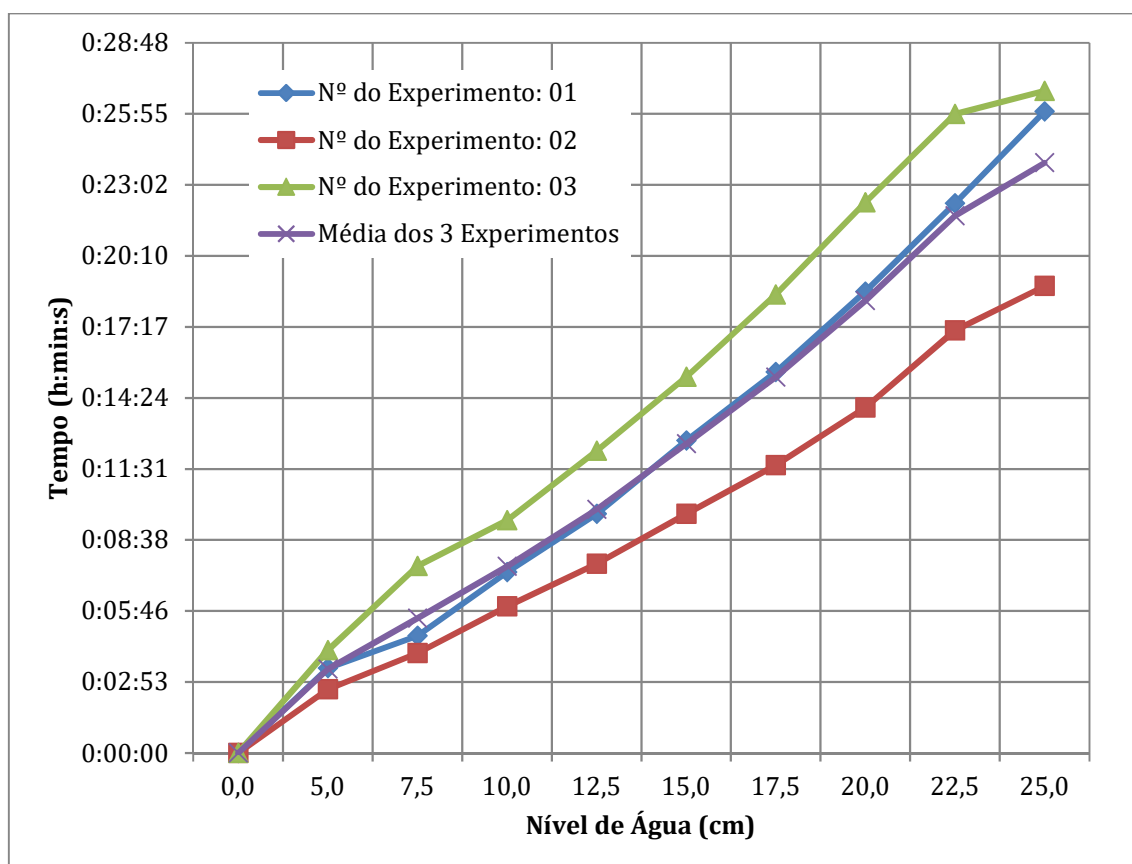


Figura 48 – Vazão de enchimento do reservatório com relação ao tempo no modelo 1:1,25.
Fonte: Próprio autor

Esses dados são importantes pois mostram a velocidade e vazão de enchimento do reservatório.

4.1.2. Experimento em modelo reduzido com taludes de inclinação de 1:1,50

As Figuras 39 a 43 ilustram algumas etapas dos experimentos com modelo reduzido de rampa 1:1,50.



Figura 49 – Início do enchimento do reservatório.
Fonte: Próprio autor



Figura 50 – Reservatório no N.A. 19.
Fonte: Próprio autor

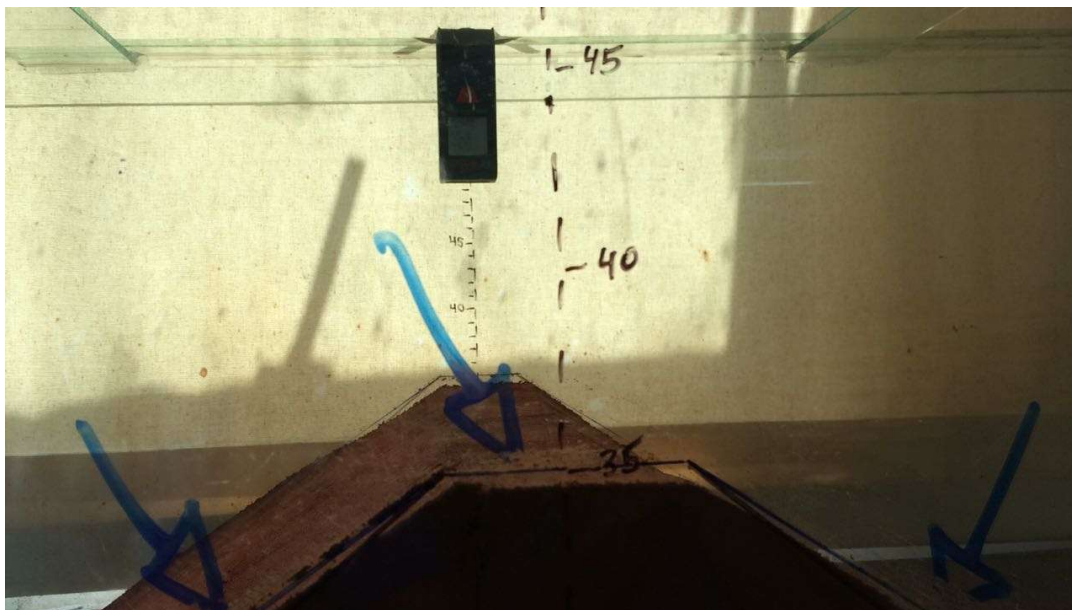


Figura 51 – Trena a laser monitorando deformações de recalque na crista do modelo reduzido de barragem.
Fonte: Próprio autor

Na Figura 41, torna-se perceptível o início das deformações, principalmente o abatimento ou recalque da crista da barragem.



Figura 52 – Início da ruptura no modelo reduzido de barragem.
Fonte: Próprio autor

A etapa de início de rompimento da estrutura é apresentada na Figura 42, onde ainda não ocorreu o colapso estrutural e o esvaziamento do reservatório.



Figura 53 – Colapso estrutural do modelo reduzido de barragem.
Fonte: Próprio autor

Ilustrada na figura 43, o total colapso da barragem, onde ocorre imediatamente o esvaziamento do reservatório.

As Tabelas 21 a 24 mostram os dados obtidos nos três experimentos validados e a média calculada de todos esses dados. A Tabela 24, consolida os dados de todos os experimentos para esse modelo.

Tabela 21 – Resultados do experimento nº 1 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50.
Fonte: Próprio autor

Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem							
Modelo 1:1,50		Data: 27/03/18		Nº do Experimento: 01		Volume: 0,1024 m ³	
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo de Montante (mm)	Crista (mm)		Topo de Jusante (mm)	Base de Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)
			Régua	Trena Laser			
0,0	0:00:00	0	0	0	0	0	17,10
5,0	0:04:19	0	0	0	0	0	20,40
7,5	0:07:38	0	0	0	0	0	19,40
10,0	0:11:43	0	0	0	0	0	18,50
12,5	0:15:15	1	3	2	2	0	17,95
15,0	0:19:46	3	6	7	4	0	21,65
17,5	0:24:40	5	8	9	6	0	
20,0	0:29:46	6	11	13	10	1	
22,5	0:35:21	11	14	16	14	2	
25,0	0:41:09	16	36	36	26	6	
Colapso	0:45:05	Peso Específico γ : 11,00 kN/m ³				TOTAL	115,00

Tabela 22 – Resultados do experimento nº 2 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50.

Fonte: Próprio autor

Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem							
Modelo 1:1,50		Data: 29/03/18		Nº do Experimento: 02		Volume: 0,1024 m ³	
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo de Montante (mm)	Crista (mm)		Topo de Jusante (mm)	Base de Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)
			Régua	Trena Laser			
0,0	0:00:00	0	0	0	0	0	16,20
5,0	0:03:57	0	0	0	0	0	21,10
7,5	0:06:07	0	0	0	0	0	20,20
10,0	0:08:55	0	0	0	0	0	22,15
12,5	0:11:20	1	1	1	1	0	18,50
15,0	0:14:31	3	3	3	2	0	16,80
17,5	0:17:39	5	5	6	3	1	1,50
20,0	0:21:06	7	8	9	6	1	
22,5	0:24:58	10	12	13	9	2	
25,0	0:29:27	14	17	18	14	4	
Colapso	0:32:48	Peso Específico γ : 11,14 kN/m ³				TOTAL	116,45

Tabela 23 – Resultados do experimento nº 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50.

Fonte: Próprio autor

Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem							
Modelo 1:1,50		Data: 02/04/18		Nº do Experimento: 03		Volume: 0,1024 m ³	
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo de Montante (mm)	Crista (mm)		Topo de Jusante (mm)	Base de Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)
			Régua	Trena Laser			
0,0	0:00:00	0	0	0	0	0	19,40
5,0	0:03:40	0	0	0	0	0	19,70
7,5	0:06:05	0	0	0	0	0	16,55
10,0	0:08:33	0	1	1	0	0	18,55
12,5	0:11:19	1	2	1	1	0	18,20
15,0	0:14:24	3	3	3	2	0	16,75
17,5	0:17:48	5	5	5	4	1	8,00
20,0	0:21:20	7	8	7	6	2	
22,5	0:26:05	9	12	12	9	4	
25,0	0:29:58	12	15	16	12	6	
Colapso	0:32:49	Peso Específico γ : 11,21 kN/m ³				TOTAL	117,15

Tabela 24 – Média dos resultados dos experimentos nº 1, 2, e 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50.

Fonte: Próprio autor

(MÉDIA) Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem							
Modelo 1:1,50		Data: Variada		Média dos 3 Experimentos		Volume Médio: 0,1024 m ³	
NA (cm)	Tempo (h:min:s)	Topo de Montante (mm)	Crista (mm)		Topo de Jusante (mm)	Base de Jusante (mm)	Peso do Solo (Kg)
			Régua	Trena Laser			
0,0	0:00:00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
5,0	0:03:59	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
7,5	0:06:37	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
10,0	0:09:44	0,0	0,3	0,3	0,0	0,0	
12,5	0:12:38	1,0	2,0	1,3	1,3	0,0	
15,0	0:16:14	3,0	4,0	4,3	2,7	0,0	
17,5	0:20:02	5,0	6,0	6,7	4,3	0,7	
20,0	0:24:04	6,7	9,0	9,7	7,3	1,3	
22,5	0:28:48	10,0	12,7	13,7	10,7	2,7	
25,0	0:33:31	14,0	22,7	23,3	17,3	5,3	
Colapso	0:36:54	Peso Específico γ : 11,12 kN/m ³				TOTAL	116,20

Tabela 25 – Resultados consolidados dos experimentos nº 1, 2, e 3 com o modelo reduzido de inclinação de talude 1: 1,50.

Fonte: Próprio autor

GERAL - Experimento de Análise de Deformação e Rompimento de Barragem																																															
Modelo 1:1,50					Data do 1º Exp.: 27/03/18				Data do 2º Exp.: 29/03/18				Data do 3º Exp.: 02/04/18				Volume: 0,1024 m³				Local: Laboratório de Solos da UNIFEI																										
Enchimento do Reservatório					Topo de Montante (mm)				Crista (mm)								Topo de Jusante (mm)				Base de Jusante (mm)				Peso do Solo (Kg)																						
NA (cm)	Tempo (h:min:s)								Régua				Trena Laser																																		
	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd	1º Exp	2º Exp	3º Exp	Méd																			
0,0	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0:00:00	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	17,1	16,20	19,40																				
5,0	0:04:19	0:03:57	0:03:40	0:03:59	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	20,4	21,10	19,70																				
7,5	0:07:38	0:06:07	0:06:05	0:06:37	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	19,4	20,20	16,55																				
10,0	0:11:43	0:08:55	0:08:33	0:09:44	0	0	0	0,0	0	0	1	0,3	0	0	1	0,3	0	0	0	0,0	0	0	0	0,0	18,5	22,15	18,55																				
12,5	0:15:15	0:11:20	0:11:19	0:12:38	1	1	1	1,0	3	1	2	2,0	2	1	1	1,3	2	1	1	1,3	0	0	0	0,0	18,0	18,50	18,20																				
15,0	0:19:46	0:14:31	0:14:24	0:16:14	3	3	3	3,0	6	3	3	4,0	7	3	3	4,3	4	2	2	2,7	0	0	0	0,0	21,7	16,80	16,75																				
17,5	0:24:40	0:17:39	0:17:48	0:20:02	5	5	5	5,0	8	5	5	6,0	9	6	5	6,7	6	3	4	4,3	0	1	1	0,7		1,50	8,00																				
20,0	0:29:46	0:21:06	0:21:20	0:24:04	6	7	7	6,7	11	8	8	9,0	13	9	7	9,7	10	6	6	7,3	1	1	2	1,3																							
22,5	0:35:21	0:24:58	0:26:05	0:28:48	11	10	9	10,0	14	12	12	12,7	16	13	12	13,7	14	9	9	10,7	2	2	4	2,7																							
25,0	0:41:09	0:29:27	0:29:58	0:33:31	16	14	12	14,0	36	17	15	22,7	36	18	16	23,3	26	14	12	17,3	6	4	6	5,3																							
Colapsos	0:45:05	0:32:48	0:32:49	0:36:54																			TOTALS (kg)				115,00	116,45	117,15	116,20																	
																						Peso Especifico (γ) KN/M³				11,00	11,14	11,21	11,12																		

A Figura 44 mostra os dados referentes ao enchimento do reservatório, relacionando o tempo e NA em cada um dos três experimentos e a média deles no modelo 1:1,50.

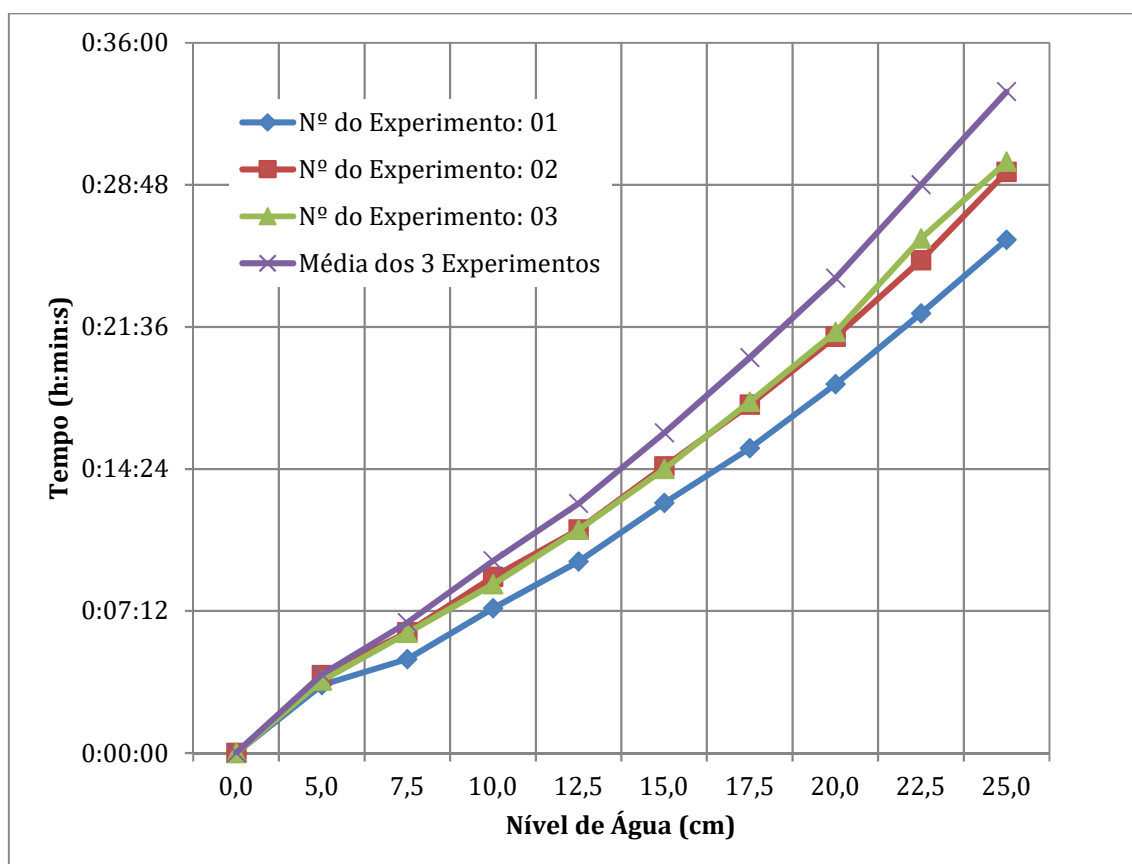


Figura 54 – Vazão de enchimento do reservatório em relação ao tempo no modelo 1:1,50.
Fonte: Próprio autor

Dados são importantes para retratarem a velocidade e vazão de enchimento do reservatório.

4.2. Resultados da Precisão do Sistema Aplicado em Comparação com Estação Total

Na realização dos testes de precisão do sistema desenvolvido, foram realizados testes de acurácia envolvendo estação total, aferida pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO.

A estação total robótica utilizada para comparar os dados obtidos com o sistema proposto, foi o modelo TS-06 da marca Leica Geosystems, como ilustrado na Figura 56.

Para realizar os testes foram posicionados paralelamente no na posição 00, a estação total (APARELHO 01) e o aparelho do sistema desenvolvido (APARELHO 02), onde realizaram leituras em um mesmo alvo.



Figura 55 – Estação total TS-06 da Leica Geosystems.
Fonte: <https://leica-geosystems.com/pt-BR/>

O alvo foi posicionado em vários pontos variando a cada 10 metros sua distância em relação aos aparelhos, considerando as seguintes posições: posição 01 (aproximadamente 10 m dos aparelhos), posição 02 (aproximadamente 20 m dos aparelhos) e assim, sucessivamente até a posição 10 (aproximadamente 100 m dos aparelhos), que é a capacidade máxima do sensor laser utilizado na composição do hardware do sistema. A Figura 57 ilustra os testes, mostrando a estação total ao lado do aparelho do sistema proposto.



Figura 56 – Ensaio de comparação das leituras da estação total com o sistema proposto.
Fonte: Próprio autor

A conexão dos componentes eletrônicos do sistema proposto com o computador usada durante os testes de acurácia encontra-se ilustrado na Figura 57.



Figura 57 – Conexão dos componentes eletrônicos do sistema proposto com o computador.
Fonte: Próprio autor

A falta de alinhamento entre os dois aparelhos, fazendo com que tenham leituras diferentes do alvo é irrelevante e não compreende uma falha, pois o teste consiste em variar o alvo em 30 mm a cada uma das 10 posições e verificar se a variação das leituras de distancias dos dois aparelhos foi a mesma. Portanto para o teste foram realizadas 20 leituras para cada aparelho, sendo 10 posições contendo leitura “A” (alvo sem deslocamento) e leitura “B” alvo com deslocamento de 30 mm. O deslocamento do alvo, com variação de 30 mm é realizada com um paquímetro.

A cada posição do alvo, foi realizada pelos dois aparelhos, a leitura inicial, em seguida o alvo é deslocado 30 mm e assim é realizada da leitura final. Portanto a diferença da leitura inicial, pela leitura final, deverá ser a mesma que a diferença do deslocamento do alvo. Sendo assim, conseguiremos obter a precisão de leitura para cada uma das 10 posições, que variam de 10 a 100 m.

Os dados obtidos na comparação das leituras são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Comparação da precisão da estação total com o sistema proposto em relação a um deslocamento conhecido.

Teste de Acurácia e Precisão do Sistema Aplicado									
MEDIÇÕES REFERENCIA	DIFERENÇA NO PAQUIMETRO	ESTAÇÃO TOTAL				SISTEMA APLICADO			
		1ª MEDIÇÃO	2ª MEDIÇÃO	DIFERENÇA ENTRE SI	DIFERENÇA COM PAQUIMETRO	1ª MEDIÇÃO	2ª MEDIÇÃO	DIFERENÇA ENTRE SI	DIFERENÇA COM PAQUIMETRO
10,000	0,040	10,112	10,151	0,039	0,001	10,021	10,054	0,033	0,007
20,000	0,040	20,086	20,127	0,041	-0,001	20,005	20,055	0,050	-0,010
30,000	0,040	30,043	30,084	0,041	-0,001	29,953	29,999	0,046	-0,006
40,000	0,025	40,011	40,036	0,025	0,000	39,916	39,959	0,043	-0,018
50,000	0,040	50,161	50,199	0,038	0,002	50,175	50,201	0,026	0,014
60,000	0,035	60,233	60,268	0,035	0,000	60,249	60,300	0,051	-0,016
70,000	0,050	69,906	69,957	0,051	-0,001	69,923	69,988	0,065	-0,015
80,000	0,060	80,083	80,142	0,059	0,001	80,102	80,181	0,079	-0,019
90,000	0,090	89,208	89,296	0,088	0,002	89,219	89,327	0,108	-0,018
100,000	0,065	99,989	100,053	0,064	0,001	100,004	100,089	0,085	-0,020

Obs: Todos os dados estão em "m" metros

5. CONCLUSÕES

5.1. Deformações que Precedem o Rompimento de Barragens

As Figura 61 mostram os dados dos deslocamentos em função da variação do nível de água (NA) para o modelo reduzido com rampa de 1:1,25. Para cada um dos quatro pontos analisados (topo de montante, crista, topo de jusante e base de jusante) estabeleceu-se um ajuste polinomial de tendência considerando os três experimentos validados.

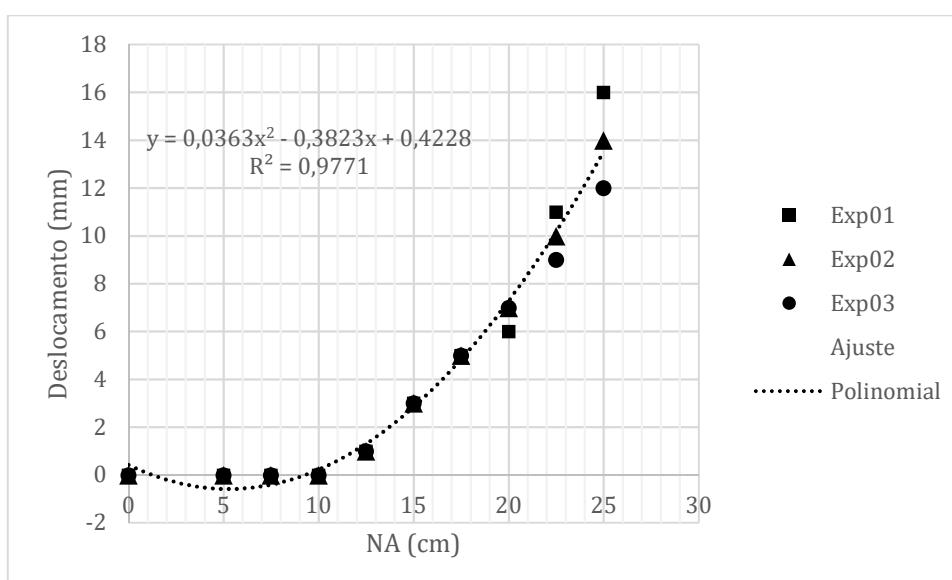


Figura 58 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto no topo de montante

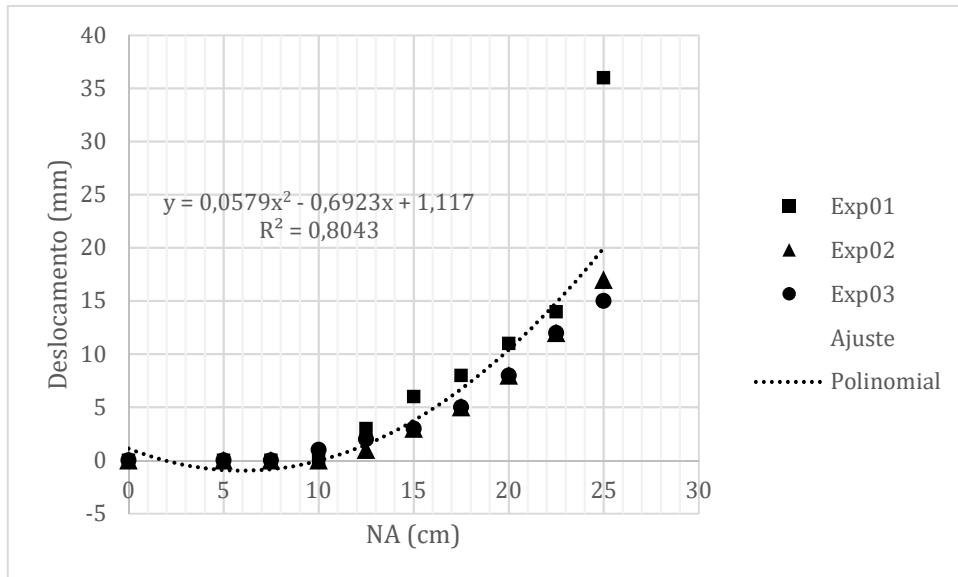


Figura 59 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto na crista

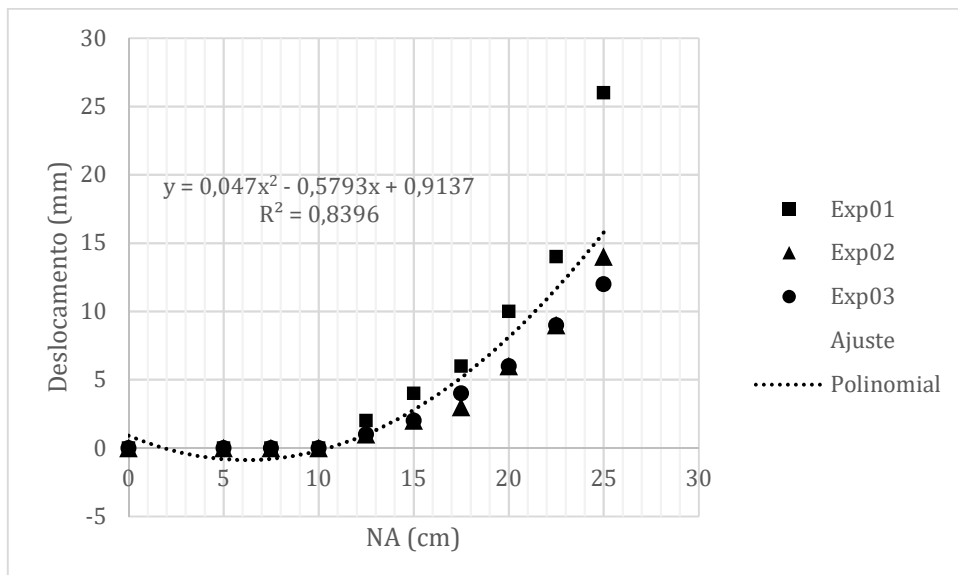


Figura 60 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto no topo de jusante

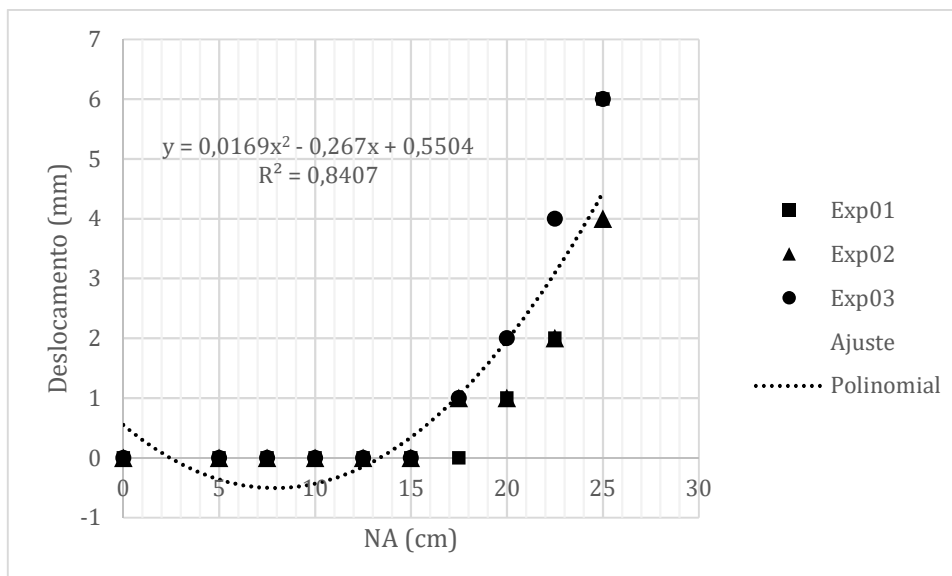


Figura 61 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,25, ponto na base de jusante

A média dos deslocamentos nos pontos estudados em função da variação do nível de água (NA) é mostrado na Figura 63.

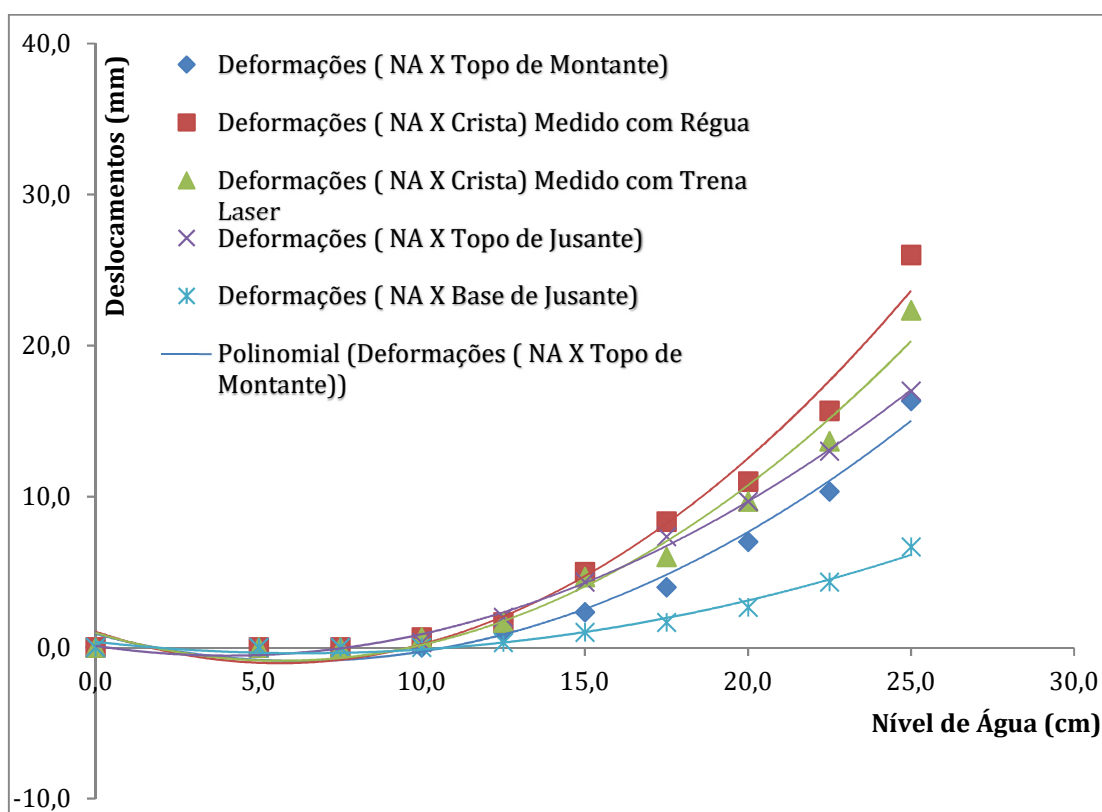


Figura 63 – Variação dos deslocamentos médios com o aumento do NA para os quatro pontos analisados, modelo 1:1,25

As Figura 644 a 67 mostram os dados dos deslocamentos em função da variação do nível de água (NA) para o modelo reduzido com rampa de 1:1,50. Como realizado para o modelo anterior, para os quatro pontos em análise estabeleceu-se um ajuste polinomial de tendência

considerando os três experimentos validados. E a média dos deslocamentos para os mesmos pontos é mostrada na Figura 68.

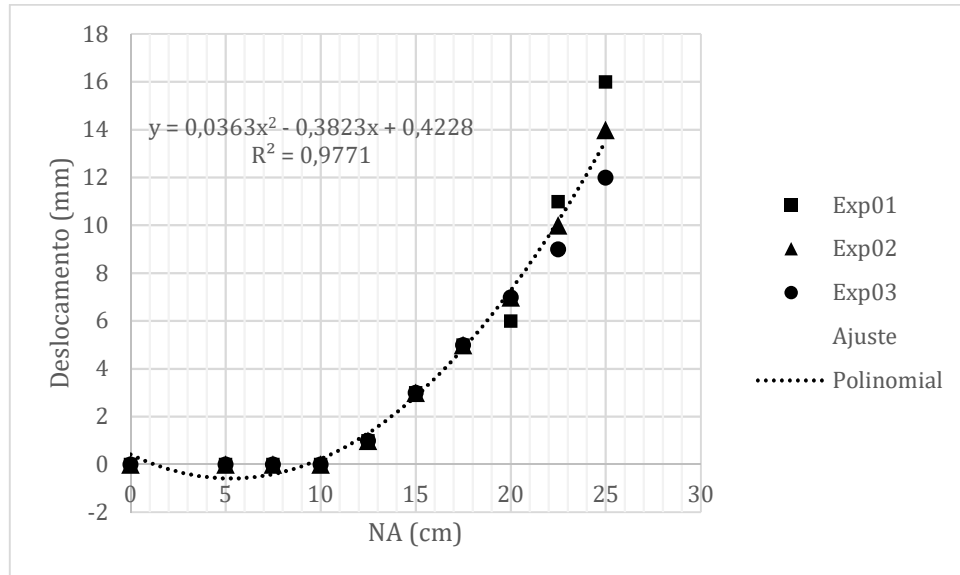


Figura 64 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,50, ponto no topo de montante

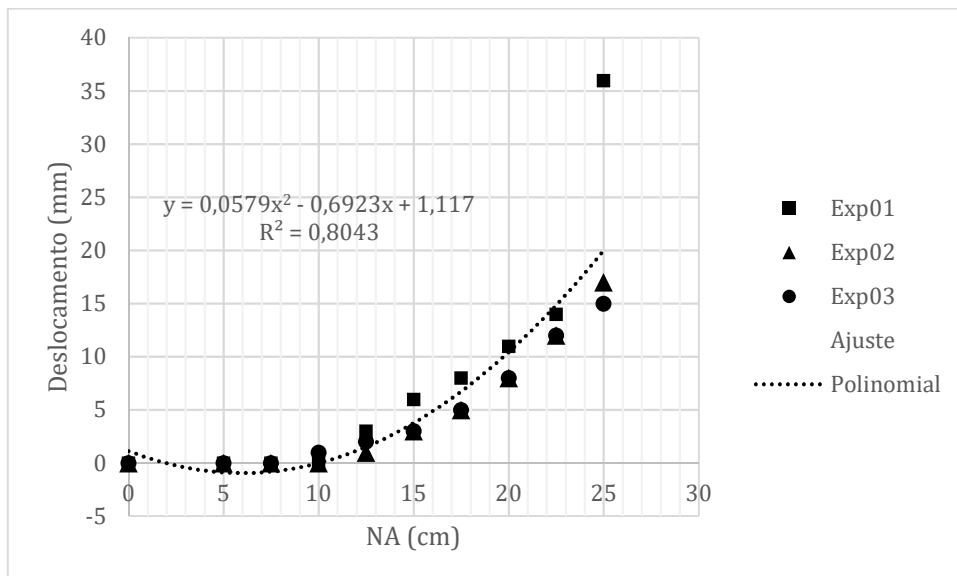


Figura 65 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,50, ponto na crista

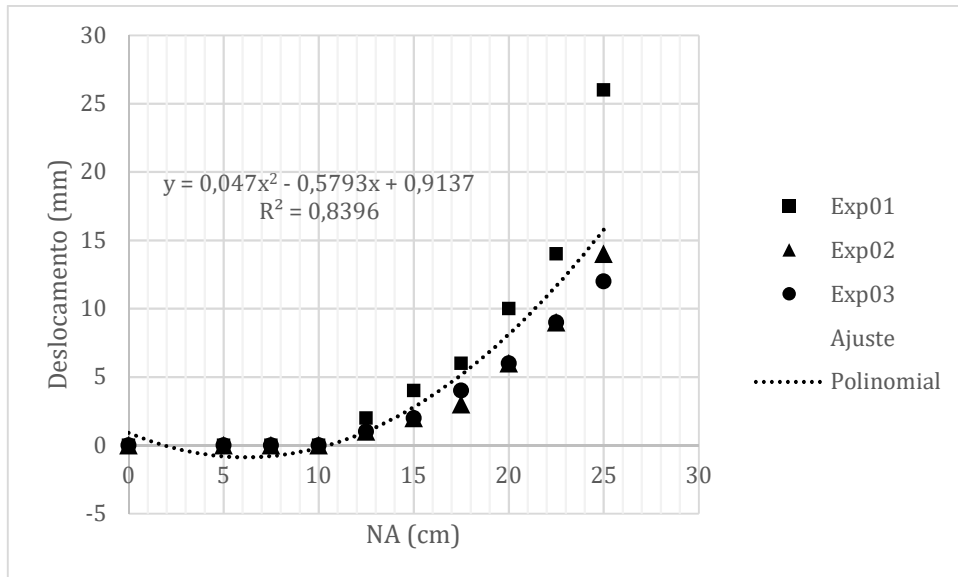


Figura 626 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,50, ponto no topo de jusante

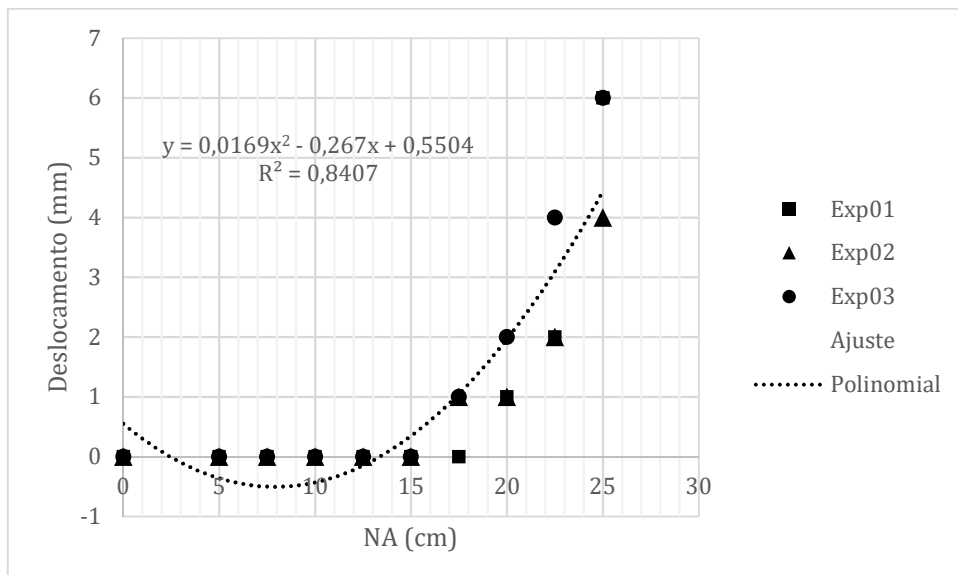


Figura 637 – Variação dos deslocamentos com o aumento do NA, modelo 1:1,50, ponto na base de jusante

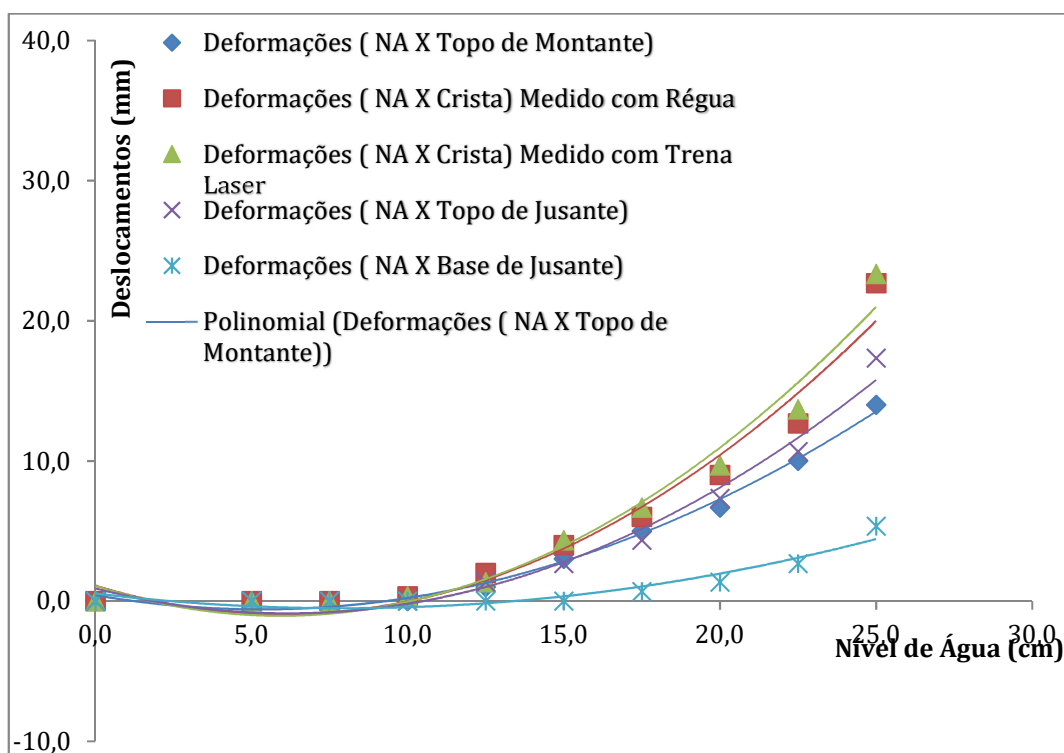


Figura 68 – Variação dos deslocamentos médios com o aumento do NA para os quatro pontos analisados, modelo 1:1,50

Com os resultados dos três experimentos para cada modelo de barragem, entre outras análises, serão observadas as relações dos deslocamentos entre os pontos analisados.

Foram feitas análises buscando um padrão entre as deformações nos pontos para obtenção de dados para encontrar os pontos críticos quanto a estabilidade da barragem.

A Tabela 27 apresenta os dados obtidos através da comparação das deformações entre pontos analisados. Essa comparação se refere a quantas vezes um ponto deformou mais que o outro.

Tabela 27 – Relação das deformações entre os pontos analisados

RELAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES ENTRE PONTOS NOS MODELOS ANÁLISADOS (%)				
Pontos Comparados	Modelo 1:1,25	Modelo 1:1,50	Diferença	Média
Crista x Topo da Jusante	65,0	63,2	1,8	64,1
Crista x Topo da Montante	22,1	21,0	1,1	21,6
Crista x Base da Jusante	316,9	313,2	3,7	315,1
Topo da Jusante x Topo da Montante	56,2	59,1	-2,9	57,7
Topo da Jusante x Base da Jusante	298,5	306,7	-8,2	302,6
Topo da Montante x Base da Jusante	153,2	149,8	3,4	151,5

Ao analisar a Tabela 27 nota-se que o ponto “Crista” tem a maior deformação comparada com outros pontos, sendo que a média entre os modelos estudados foi de 21,6 % maior que “Topo de Montante”, que é o segundo ponto mais instável. E ao analisar as Figura 61 e Figura 64 que mostram as medias das deformações dos pontos em ambos modelos de barragens,

concluimos que o ponto “Crista” foi o primeiro a apresentar sinais de deformações. Portanto concluimos que a crista da barragem é o ponto mais instável da estrutura desses modelos estudados.

Continuando as interpretações mantendo o mesmo padrão de análises, podemos concluir que o segundo ponto mais instável é o “Topo da Jusante”, conclusão dada a partir da quantidade de vezes que se deformou ao ser comparado com outros pontos, como por exemplo 56,2 % maior deformação que o “Topo de Jusante” na média dos dois modelos estudados.

Outro ponto analisado, “Topo de Montante” ficou em terceiro lugar, de quatro pontos analisados, como mais instável e por fim o ponto “Base de Jusante” como o menos instável, por se tratar do ponto mais distante da face de barramento, que é a superfície da barragem em contato com a água.

5.2. Precisão e Acurácia do Sistema Aplicado

Ao comparar os dados obtidos pelo experimento de validação do sistema aplicado com os dados gerados pela estação total (equipamento topográfico aferido pelo Inmetro), concluimos que a medida que se deslocava o alvo de referência, aumentava a diferença das leituras entre os instrumentos utilizados.

A Tabela 28 mostra a comparação entre a precisão dos instrumentos utilizados, tendo como referência os deslocamentos com paquímetro.

Concluimos que a diferença entre um sistema aferido, Estação Total, e o sistema aplicado, ficou com desproporção considerada muito grande, em 12,5 vezes maior. Ao se comparar com as deformações encontradas nos experimentos de rompimento dos modelos reduzidos. Porém deve-se levar em consideração que as deformações das barragens reais, incluindo os efeitos de dilatação e retração térmica, são maiores que a imprecisão do sistema aplicado. Sendo assim o sistema utilizado pode ser aplicado ao monitoramento de estruturas desde que o ponto de instalação do aparelho não seja superior a 100,00 metros em relação a face monitorada da barragem e que não são exigidas grande precisão das detecções das deformações.

Tabela 28 – Relação dos deslocamentos entre os instrumentos utilizados

Análise de Precisão Entre Instrumentos Utilizados				
Distância da Leitura (m)	Erro da Estação Total (m)	Erro do Sist. Aplicado (m)	Proporção do Erro	Média da Proporção do Erro
10,00	0,001	0,007	7	12,5
20,00	-0,001	-0,010	10	
30,00	-0,001	-0,006	6	
40,00	0,000	-0,018	18	
50,00	0,002	0,014	7	
60,00	0,000	-0,016	16	
70,00	-0,001	-0,015	15	
80,00	0,001	-0,019	19	
90,00	0,002	-0,018	9	
100,00	0,001	-0,020	20	

Novas perspectivas podem se abrir no âmbito do controle de segurança de grandes barragens com a possibilidade de complementar os sistemas de observação instalados com redes fixas de “*smart-sensors*”

- Alta precisão- O laser opera com precisão milimétrica.
- Autonomia operacional - Não há necessidade de nenhuma pessoa operar o aparelho.
- Monitoramento contínuo - O sistema funciona 24 horas por dia.
- Informações em tempo real - O aparelho transmite ininterruptamente os dados das leituras para o processador principal, sendo imediato o aviso de alterações.
- Capacidade de alertar – Múltiplos sinais de alerta favorecem a inexistência de falha de comunicação.

Contudo o sistema de monitoramento óptico do comportamento das estruturas identifica o início da anormalidade e avisa antecipadamente para que haja tempo suficiente para reforços estruturais, redução ou eliminação da carga exercida na estrutura, evacuação e isolamento da área, podendo evitar acidentes e eliminar riscos de vida, impactos ambientais e danos materiais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Objetivos Alcançados

- Foram construídos modelos que possibilitaram estudar e analisar as deformações físicas que antecedem e geram uma anormalidade comportamental da estrutura e verificou-se o quanto são determinantes para uma ruptura.
- Examinou-se que as deformações estruturais de uma barragem ocorrem gradativamente e exponencialmente nas faces de montante, crista e jusante do barramento e a relação em proporção e tempo entre elas, encontrando os pontos onde iniciam as deformações e instabilidades.
- Foi desenvolvido um sistema com metodologia inovadora utilizando sensores de distância a laser que instalados em pontos fixos externos ao barramento, que farão o monitoramento das estruturas.
- Foi criado um *software* específico, desenvolvido exclusivamente para o sistema de monitoramento proposto, que recebe os dados dos sensores e em tempo real, processa e emite relatórios e sinais de alerta quanto às deformações.

Portanto pelo exposto pode-se concluir que os objetivos propostos foram todos alcançados, mesmo que ao longo do trabalho foram descobertas muitas possibilidades de evolução da pesquisa e, também do aprimoramento do sistema proposto. Estas possibilidades de melhorias são citadas a seguir, almejando a continuidade da pesquisa e ao mesmo tempo estimular outros pesquisadores.

6.2. Recomendações e Perspectivas Futuras

6.2.1. Operação do sistema aplicado no experimento de rompimento de barragens

Primeiramente é recomendado que seja adotado, como material de construção de modelos reduzidos de barragens, o uso da combinação de solos, polímeros e raspas de borracha de pneus, como já utilizado em outras pesquisas. Essa indicação tem intuito de melhorar os resultados do estudo aplicando a escala de redução da geometria da estrutura, ajustando a mesma proporcionalidade das características do material que será utilizado na construção do modelo reduzido.

Outra importância é atentar a correlação dos fatores citados acima com as características do material barrado, que forma o reservatório. Para o material barrado, ou reservatório, pode

utilizar água ou lama em densidade específica que pode retratar o rejeito de minério, por exemplo, cabendo também um pré-estudo para essa escolha.

Esse estudo também possibilita que novas pesquisas sejam realizadas incluindo-se outros elementos na construção nos modelos reduzidos, como por exemplo, os filtros de proteção. Lembrando que na reprodução desses filtros, sejam do tipo verticais ou de pé, também devem ser respeitadas a proporcionalidade da escala, mantendo-se o mesmo padrão adotado para as demais estruturas.

Sendo assim, esse estudo abre uma variação grande de pesquisas, experimentos e análises com grande potencial de descobertas e contribuições para o meio acadêmico e científico.

6.2.2. Integração do experimento de modelo reduzido com o sistema aplicado

Quanto a combinação da abordagem experimental com a aplicação do sistema de monitoramento óptico visa estabelecer uma ligação concreta entre a realidade da percepção física e a detecção computacional, contribuindo para uma aprendizagem mais profunda em que a teoria seja vista em ação e assim se faça uma preparação para aplicação do sistema em barragens reais.

A integração do sistema de monitoramento com o experimento de barragens em modelo reduzido tem o objetivo de automatizar a coleta de dados, que neste trabalho foi manual, quanto as deformações que precedem aos colapsos das barragens e comprovar o funcionamento do sistema quanto a detecção das deformações, a velocidade de processamento dos dados, sua transmissão e as emissões de alertas quanto a instabilidade estrutural a partir da configuração dos limites aceitáveis para a barragem experimental.

Considerando já serem conhecidas as variações comportamentais e deformações dos vários pontos das barragens que foram comprovadas pelos experimentos aqui apresentados, será possível instalar os lasers de leituras nos pontos exatos e assim ter um trabalho com novas conclusões e recomendações para o desenvolvimento de um produto aplicável no mercado.

6.2.3. Operação do sistema aplicado em barragem de rejeito de mineração

As mais importantes recomendações para a continuação do desenvolvimento do sistema aplicado como objeto de testa-lo em uma barragem real, são:

- Utilizar sensores com maior *range* que possibilitem leituras a longas distancias, favorecendo assim a definição do ponto de instalação do aparelho, preservando a capacidade de visada de toda a face da estrutura a ser monitorada.

- Os sensores deverão ter uma maior precisão para ter uma maior eficiência de detecção das anormalidades comportamentais das estruturas e poder detectar a diferença entre anormalidade e normalidade, como por exemplo as deformações térmicas por efeitos das variações da temperatura.

- Implantação de sistema robótico para obter a condição de leitura de múltiplos pontos da estrutura. Devido as grandes dimensões das barragens, por exemplo, pode ser necessários a implantação de muitos pontos em cada face de linha.

- Evoluir o sistema de transmissão de dados para um sistema híbrido composto *wi-fi*, GSM ou rádio frequência, pois existem estruturas em diversas situações que facilitam ou dificultam a comunicação de dados.

- Implantar sistema *off-grid* de abastecimento elétrico dos *hardwares* considerando que em algumas estruturas não há rede de energia elétrica.

O posicionamento do aparelho deverá ser em local que favoreça visão total ou parcial da estrutura e seguir critérios de nivelamento e estabilidade do solo evitando que materiais soltos na superfície desloquem o aparelho. É fundamental que o aparelho seja instalado fora da estrutura de barramento ou qualquer terreno que não esteja sobre ação de alguma carga, chamado terreno inerte, para evitar deslocamentos do aparelho que contribuirão com alterações das leituras.

Sendo assim, o tempo de resposta das atividades de monitoramento devem ser realizadas para detectar precocemente qualquer tipo de anormalidade comportamental ou de consistência, em relação a estrutura original e funcional, atentando aos dados das instrumentações, seguida de inspeções visuais, causando um bom entendimento da situação, que possibilita ações precisas e eficazes, para que em tempo hábil, seja possível restabelecer a condição de segurança aceitável a barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6457 –Amostra de solo- Preparação para ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7182--Solo–Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9895–Solo–Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT NBR ISO 31.000:2009 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão de riscos — Princípios e diretrizes. 2009.

ABNT NBR ISO 31.010:2012 Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão de riscos — Técnicas para o processo de avaliação de riscos. 2012.

ABNT, NBR. 6457, Amostras de solo-Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986.

AGUIAR, Daniel Prenda de Oliveira et al. Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens-ISB. 2014.

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). Relatório de segurança de barragens 2016 / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2017. 225 p. : il. ISBN: 978-85-8210-035-6

ANA – Agência Nacional de Águas.Manual do Empreendedor – Volume V - Guia Para Elaboração de Projetos de Barragens / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2015.

ANA - Agência Nacional do Aguas (Brasil). Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem / Agência Nacional das Águas. -- Brasília: ANA, 2016. 218 p. il. – (Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, 2)

ANA- Agência Nacional de Águas (Brasil). Relatório de segurança de barragens 2016 / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2017.

ANA –Agencia Nacional de Aguas Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/apresentacao/entidades-fiscalizadoras>> Acesso em 05/02/18.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa N° 652, DE 09 DE DEZEMBRO DE 2003.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa N° 696, DE 15 DE DEZEMBRO DE 2015.

ANEEL (Atlas2008) Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília: Aneel, 2008.

ANEEL(BIG2018) Disponível em:
<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em 08/02/18.

ARAUJO, Cecília Bhering de. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. 2006. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

BRASIL. Congresso Nacional. Lei n. 12.334 de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do Art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do Art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 21 set. 2010. Seção 1. p. 1. Disponível em: <<http://www.in.gov.br>>. Acesso em 25/01/2018.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO-UMA REVISÃO/CONSTRUCTION METHODS OF MINING TAILINGS DAM. HOLOS, v. 32, n. 8, p. 77, 2016.

CARVALHO, Janaina Veiga; ROMANEL, Celso. Redes neurais temporais aplicadas ao monitoramento de barragens. Revista Eletrônica de Sistemas de Informação ISSN 1677-3071 doi: 10.21529/RESI, v. 6, n. 1, 2007.

CBDB - COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens / [coordenador, supervisor, Flavio Miguez de Mello ; editor, Corrado Piasentin]. - Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.: il. ; 29 cm

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Disponível em:
<http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/nossos_negocios/usinas> Acesso em 02/02/18.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Usinas da Cemig: 1952-2005. / Coordenação Paulo Brandi de Barros Cachapuz. – Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2006. 304p. : il. color ; 22,5 cm.

CETESB. Risco de acidente de origem tecnológica – método para decisão e termos de referência. (2011). Norma técnica 261. 2ª edição.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº144 de 10 de julho de 2012.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (CBDB). Apresentação das barragens. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresentacao das Barragens](http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresentacao%20das%20Barragens)>. Acesso em 15/04/2014.

CONFEA - CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA – DECISÃO NORMATIVA Nº 106, DE 17 DE ABRIL DE 2015.

COSTA, Walter Duarte. Geologia de barragens. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria Nº 416 de 03 de setembro de 2012.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria Nº 526 de 11 de dezembro de 2013.

DUARTE, Anderson Pires. Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2008.

FARIA, M. 2015. Barragens de rejeitos já causaram diversas tragédias em Minas Gerais. Estado de Minas. 5 de novembro de 2015. http://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2015/11/05/interna_gerais,705019/barragens-de-rejeito-ja-causaram-diversas-tragedias-em-minas-gerais-r.shtml

FIGLIOTTI, Alberto Pio. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas : aplicações na estabilidade de taludes / Alberto Pio Fiori, Luigi Carmignani. – São Paulo : Oficina de Textos, 2015.

FOSTER, Mark; FELL, Robin; SPANNAGLE, Matt. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping.

Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37.5: 1025-1061.

FRIEDMANN, Raul Marques Pereira. Desenvolvimento de sistema de levantamentos semi-autônomo empregando estação total robotizada e veículo terrestre não tripulado. 2013.

GUSMÃO FILHO, Jaime De A. Desempenho de obras geotécnicas. Editora Universitária UFPE, 2006.

GUTSTEIN, Daniela et al. Estudo das tensões em fundações de barragens de gravidade de concreto pelo método de elementos finitos. 2003.

HARTFORD, Desmond ND; BAECHER, Gregory B. Risk and uncertainty in dam safety. Thomas Telford, 2004.

HOUGHTALEN, Robert J. Engenharia Hidráulica / Robert J. Houghtalen, A. Osman Akan, Ned H.C. Hwang; [tradução Luciana Teixeira]. – São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Disponível em <<http://www.ibama.gov.br/component/content/article?id=746>> Acesso em 05/02/18.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016. 128 p.

ICOLD (2014) – “Bulletin 158 – Dam Surveillance Guide”, Paris;

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS – ICOLD. Tailings dams: risk of dangerous occurrences - Lessons learnt from practical experiences. Paris: UNEP/ICOLD, 2001. (Bulletin 121).

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS – ICOLD. Disponível em: <<http://www.icold-cigb.org>>. Acesso em: 15 de maio de 2018.

KANASHIRO et al, 2013 TÉCNICAS DE LABORATÓRIO PARA ESTUDOS EM MODELO REDUZIDO COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS XXIX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS PORTO DE GALINHAS – PE, 08 A 11 DE ABRIL DE 2013

- LAZZAROTTO, Emerson, et al. Melhoria na Previsão da Série Temporal de Instrumentos de Monitoramento de Barragem Via Combinação de Métodos. Cadernos do IME- Série Estatística, 2015, 38: 1.
- MARANGON, M. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia. 2004. Material didático ou institucional. 25 p.
- MELO, A. V. Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT. Dissertação. Mestrado em Geotecnia. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014. 244 p.
- Ministério da Integração Nacional. 2015
- Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Unidade de Gerenciamento do Proágua/Semi-árido. Diretrizes ambientais para projeto e construção de barragens e operação de reservatórios. / Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica, Unidade de Gerenciamento do Proágua/Semi-árido. – Brasília : Bárbara Bela Editora Gráfica e Papelaria Ltda., 2005. CX, 112 p. : il. ; 21 cm, 26 cm
- NADAL, Marco Aurélio Debus et al. Emprego de estações totais robotizadas na automação, controle e aquisição de dados, voltado ao monitoramento de barragens. Revista Brasileira de Geomática, v. 5, n. 1, p. 18-30, 2017.
- NETO, Marco Aurélio Silva et al. Técnicas de mineração visual de dados aplicadas aos dados de instrumentação da barragem de Itaipu. Visual data mining techniques applied for the analysis of data collected at Itaipu power plant gest. prod, v. 17, n. 4, p. 721-734.
- OHSAS 18.001:2007 Occupational Health and Safety Assessment Series. Sistema de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho – Requisitos. 2007.
- OLIVEIRA, José Bernardo Vasconcelos Rodrigues de. Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens. 2010.
- OLIVEIRA, S. et al. Monitorização e modelação do comportamento dinâmico de barragens de betão. In: VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional, Universidade de Évora. 2003.
- PERINI, Daniel Sosti. Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. [Distrito Federal] 2009. Xxi, 128p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009).

- PIMENTA, Lurdes. Abordagens de riscos em barragens de aterro. 2009.
- PIROLI, Carina; VENDRAMIN, Rafael Tiago. AVALIAÇÃO DE CRITÉRIOS DE FILTRO EM BARRAGENS DE TERRA ESTUDO DE CASO DA UHE COLÍDER. 2015.
- SARÉ, Alexandre Reis et al. Revisão das Condições de Segurança da Barragem de Curuá-Uma (PA). COBRAMSEG'2006, 2006.
- SCHREIBER, GERHARD PAUL; HIDRELÉTRICAS, Usinas. Editora Edgard Blucher. São Paulo, 1987.
- SILVA, O. C., MARQUES, J. M., NIERADKA, I. P., Testes Estatísticos e Análise Multivariada na Determinação dos Modos de Falha Monitorados Pelos Instrumentos em Blocos de Concreto da Barragem de Itaipu. HOLOS [enlinea] 2015, 5 [Ficha de consulta: 24 de janeiro de 2018]. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481547288002>> ISSN 1518-1634
- SILVEIRA, João Francisco Alves – Instrumentação e comportamento de fundação de barragens de concreto / João Francisco Alves Silveira. – São Paulo : Oficina de Textos. 2003
- SILVEIRA, João Francisco Alves. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- SOUZA, Zulcy de. Centrais hidrelétricas: implantação e comissionamento / Zulcy de Souza, Afonso Henriques Moreira Santos, Edson da Costa Bortone. – 2ª ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 520p.
- UNAS, Mário Sérgio Pereira et al. Estudo experimental e numérico de problemas de percolação em modelo reduzido. 2010.
- VALE SA, 2019 – Site da Vale SA, visto em 05 de abril de 2019 - http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/paginas/default.aspx?utm_source=Google&utm_medium=CPC&utm_campaign=2019|Search|BarragemBrumadinho&utm_content=Link3
- VIANNA, VIANNA, Luiz Filipe Venturi. V617m Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens [manuscrito]: auxílio ao processo de tomada de decisão / Luiz Filipe Venturi Vianna. – 2015.
- WOLF, Ana Paula. Caracterização de rejeitos de minério de ferro de minas da Vale [manuscrito] / Ana Paula Wolff. – 2009.xv, 90f. : il., graf., tabs., mapas.

ANEXO I

CRITÉRIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS

NOME DA BARRAGEM	
NOME DO EMPREENDEDOR	
DATA:	

II.1 - CATEGORIA DE RISCO		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		0

FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 63 ou $EC^* \geq 8$ (*)
	MÉDIO	36 a 63
	BAIXO	≤ 36

(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO		Pontos
	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)	

FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 18
	MÉDIO	$12 < DPA < 18$
	BAIXO	≤ 12

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:

CATEGORIA DE RISCO	Alto / Médio / Baixo
DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Alto / Médio / Baixo

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)						
1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT						
Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazão de Projeto (f)	Casa de Força (g)
Altura ≤ 15m (0)	comprimento ≤ 200m (2)	Concreto convencional (1)	Rocha sã (1)	entre 30 e 50 anos (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (3)	Barragem/Dique sem Casa de Força associada (0)
15m < Altura < 30m (1)	Comprimento > 200m (3)	Alvenaria de pedra / concreto ciclopiçado / concreto rolado - CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)	Casa de força associada à barragem por meio de conduto forçado, túnel, etc (2)
30m ≤ Altura ≤ 60m (2)	-	Terra homogênea / enrocamento / terra enrocamento (3)	Rocha alterada - sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento (3)	entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (8)	Casa de força ao pé da barragem (5)
Altura > 60m (3)	-	-	Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10)	-
-	-	-	Solo residual / aluvião (5)	-	-	-
CT = Σ (a até g):						

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)							
2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC							
Confiabilidade das Estruturas Extravadoras (h)	Confiabilidade das Estruturas de Adução (i)	Percolação (j)	Deformações e Recalques (k)	Deterioração dos Taludes / Parâmetros (l)	Eclusa (*) (m)	Equipamentos Eletromecânicos de Geração (n)	
Estruturas civis e hidroeletromecânicas em pleno funcionamento / canais de aproximação ou de restituição ou vertedouro (tipo soleira livre) desobstruídos (0)	Estruturas civis e dispositivos hidroeletromecânicos, em condições adequadas de manutenção e funcionamento (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Inexistente (0)	Inexistente (0)	Não possui eclusa (0)	Monitoramento on-line e inspeção visual de todos os componentes do grupo gerador com as respectivas análises qualitativas e correspondente conexão de relatório (0)	
Estruturas civis e hidroeletromecânicas preparadas para a operação, mas sem fontes de suprimento de energia de emergência / canais ou vertedouro (tipo soleira livre) com erosões ou obstruções, porém sem riscos a estrutura vertente. (4)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação (4)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, parâmetros, taludes ou ombreiras estabilizadas e/ou monitoradas (3)	Existência de trincas e abatimentos de pequena extensão e impacto nulo (1)	Falhas na proteção dos taludes e parâmetros, presença de arbustos de pequena extensão e impacto nulo. (1)	Estruturas civis e hidroeletromecânicas bem mantidas e funcionando (1)	Inspeção visual dos elementos responsáveis pela geração de energia elétrica da usina com a geração de respectivo relatório (1)	
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e com medidas corretivas em implantação (6)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, parâmetros, taludes ou ombreiras sem tratamento ou em fase de diagnóstico (5)	Existência de trincas e abatimentos de impacto considerável gerando necessidade de estudos adicionais ou monitoramento (5)	Erosões superficiais, ferrugem exposta, crescimento de vegetação generalizada, gerando necessidade de monitoramento ou atuação corretiva (5)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e com medidas corretivas em implantação (2)	Inspeção visual dos elementos responsáveis pela geração de energia elétrica da usina, sem a produção de relatório de acompanhamento (2)	
Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados, com redução de capacidade de vazão e sem medidas corretivas/ canais ou vertedouro (tipo soleira livre) obstruídos ou com estruturas danificadas (10)	Surgência nas áreas de jusante, taludes ou ombreiras com carreamento de material ou com vazão crescente (8)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos expressivos, com potencial de comprometimento da segurança (8)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança (7)	Estruturas civis comprometidas ou dispositivos hidroeletromecânicos com problemas identificados e sem medidas corretivas (4)	Não monitoramento dos equipamentos voltados à geração de energia elétrica (4)	
EC = Σ (h até n):							

II.1 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)					
3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - P S					
Existência de documentação de projeto (o)	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança da Barragem (p)	Procedimentos de roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento (q)	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem (r)	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação (s)	
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui estrutura organizacional com técnico responsável pela segurança da barragem (0)	Possui e aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (0)	Sim ou Vertedouro tipo soleira livre (0)	Emitte regularmente os relatórios (0)	
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui técnico responsável pela segurança da barragem (4)	Possui e aplica apenas procedimentos de inspeção (3)	Não (6)	Emitte os relatórios sem periodicidade (3)	
Projeto básico (4)	Não possui estrutura organizacional e responsável técnico pela segurança da barragem (8)	Possui e não aplica procedimentos de inspeção e monitoramento (5)	-	Não emite os relatórios (5)	
Anteprojeto ou Projeto conceitual (6)	-	Não possui e não aplica procedimentos para monitoramento e inspeções (6)	-	-	
inexiste documentação de projeto (8)	-	-	-	-	
PS = Σ (o até s):					

II.2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)					
Volume Total do Reservatório (a)	Potencial de perdas de vidas humanas (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)	Barragens à Jusante (Efeito Cascata) (e)	
Pequeno < = 5 milhões m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem não representa área de interesse ambiental, áreas protegidas em legislação específica ou encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais) (3)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações e serviços de navegação na área afetada por acidente da barragem) (0)	Barragens com reservatório grande e muito grande (0)	
Médio 5 milhões a 75 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (4)	MUITO SIGNIFICATIVO (área afetada da barragem apresenta interesse ambiental relevante ou protegida em legislação específica) (5)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (4)	Barragens com reservatório médio (2)	
Grande 75 milhões a 200 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal, estadual, federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (6)		ALTO (existe grande concentração de instalações residenciais e comerciais, agrícolas, industriais, de infraestrutura e serviços de lazer e turismo na área afetada da barragem ou instalações portuárias ou serviços de navegação) (8)	Barragens com reservatório pequeno (4)	
Muito Grande > 200 milhões m ³ (5)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (12)		-	Inexistente (8)	
DPA = Σ (a até e):					