

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Marília Machado Moureira

**SEGURANÇA DE BARRAGENS DE TERRA: SIMULAÇÃO DO
ESTABELECIMENTO DE NÍVEIS DE CONTROLE PIEZOMÉTRICOS
PARA A BARRAGEM CANA BRAVA, NO CEARÁ**

Santa Maria, RS
2022

Marília Machado Moureira

**SEGURANÇA DE BARRAGENS DE TERRA: SIMULAÇÃO DO
ESTABELECIMENTO DE NÍVEIS DE CONTROLE PIEZOMÉTRICOS
PARA A BARRAGEM CANA BRAVA, NO CEARÁ**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Orientador: Prof. Me. Talles Augusto Araújo

Santa Maria, RS
2022

Marília Machado Moureira

SEGURANÇA DE BARRAGENS DE TERRA: SIMULAÇÃO DO ESTABELECIMENTO DE NÍVEIS DE CONTROLE PIEZOMÉTRICOS PARA A BARRAGEM CANA BRAVA, NO CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Civil**.

Aprovado em 01 de julho de 2022:



Talles Augusto Araújo, Me. (UFSM)



Carlos José Antônio Kümmel Felix, Dr. (UFSM)



Elisa Porto, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, por ter apoiado minha decisão de ir estudar em Santa Maria, por ter oferecido tantas palavras de conforto durante a graduação e me lembrar sobre não ser tão dura comigo mesma. À minha tia Mani, por ter sempre me incentivado a estudar em uma universidade federal, por acreditar em mim e me inspirar durante toda a minha vida. Ao meu amigo Murilo Manzoni, por ter me amparado na cidade e ter sido meu porto seguro quando cheguei.

À Base Júnior, empresa júnior de engenharia civil e arquitetura da UFSM, por ter me proporcionado as experiências mais intensas de aprendizados pessoais e profissionais que vivi nesse período, e por ter me apresentado as melhores pessoas que tenho na minha vida hoje. Às empresas em que realizei meus estágios não obrigatórios: Construtora Continental, TZ Grupo, Redumax e Corsan, pelos conhecimentos adquiridos e pelo contato com as diversas áreas da Engenharia Civil.

Às minhas amigas Kelly e Carol, por serem minhas parceiras na casa do estudante e sempre me oferecerem suporte e inspiração. À minha amiga Bibiana, por me ouvir e me ajudar com sua visão analítica da vida. Ao Guilherme Baptista, por todas as vezes que me acolheu e por me oferecer sempre palavras de sabedoria. À Naquiele, por ter dividido comigo a experiência de tantos trabalhos e projetos, dando o seu melhor em todos eles e me ajudando a dar o meu também.

Ao Maxwell, por ser a pessoa mais disposta a ajudar que eu conheço e ter me amparado tantas vezes. Ao Murilo Souza e todos os amigos do apartamento 1340 da casa do estudante, por terem inserido música, arte, história e imensa alegria à minha caminhada universitária. À Emilie Palhano e ao Luiz Eduardo Welter, que dividiram comigo a primeira noite que pernoitamos na UFSM, em que estávamos alojados sozinhos no Centro de Eventos em meio a um temporal, quando prometi que os colocaria nos meus agradecimentos do TCC.

Agradeço muito ao professor Talles, por ter me despertado o encantamento pela área de Geotecnia por meio de suas aulas, pela ajuda ao conceber esse trabalho e por ter me incentivado e ajudado a ir trabalhar na transposição do Rio São Francisco. Ao Ministério do Desenvolvimento Regional, pelo concedimento da documentação de projeto e dos dados de instrumentação da barragem Cana Brava, para a realização do trabalho de cunho acadêmico, porém, com forte viés prático e realista. Este tipo de atitude favorece o desenvolvimento da ciência e tecnologia.

À empresa Ecoplan Engenharia, por ter me proporcionado a experiência de trabalhar no Gerenciamento desse projeto incrível que é a Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). Aos engenheiros Benhur e Elisa, pelo amparo quando cheguei em Pernambuco sem conhecer ninguém e por terem me ensinado tanto durante

meu período no PISF. Ao engenheiro Henrique pelos aprendizados compartilhados, conselhos e sugestões a respeito desse trabalho e por ter sido meu melhor amigo no Nordeste. Sou extremamente grata por ter conhecido pessoas tão maravilhosas no sertão.

Sou grata também à Nova Engevix Engenharia, local onde realizei o meu estágio final de graduação e aprendi grande parte dos conceitos que apliquei no estudo de caso desse trabalho. Especialmente à equipe do departamento de Geotecnia, que me acolheu tão bem em Florianópolis. É uma honra encerrar a minha graduação e iniciar minha carreira de engenheira trabalhando em uma empresa com tanto conhecimento da engenharia brasileira e contando com tantos profissionais exemplares e com vasto conhecimento técnico.

Sempre terei também gratidão à UFSM, por tantos ensinamentos que pude experienciar nesse período, e especialmente pelo suporte que recebi por meio dos programas de assistência estudantil, com destaque para a casa do estudante, os quais viabilizaram a realização da graduação que sempre sonhei. Além disso, agradeço pelas diversas atividades culturais, artísticas e de lazer que pude aprender e praticar durante esses anos morando na casa do estudante. Espero sempre orgulhar a universidade como uma egressa que faz diferença na sociedade.

RESUMO

SEGURANÇA DE BARRAGENS DE TERRA: SIMULAÇÃO DO ESTABELECIMENTO DE NÍVEIS DE CONTROLE PIEZOMÉTRICOS PARA A BARRAGEM CANA BRAVA, NO CEARÁ

AUTORA: Marília Machado Moureira
ORIENTADOR: Talles Augusto Araújo

Barragens são estruturas de grande relevância para a sociedade e entidades públicas, pois podem fornecer diversos recursos importantes para o desenvolvimento humano, como água para abastecimento, irrigação, geração de energia elétrica, entre outros. Além disso, são empreendimentos em que o monitoramento é muito importante, pois a possibilidade de falhas ou rupturas é um grande risco potencial para vidas humanas, meio ambiente e economia. Nos últimos anos, após a ocorrência de grandes acidentes de barragens no país, a legislação brasileira tem progredido e se tornado mais rigorosa a respeito das responsabilidades de empreendedores, profissionais técnicos e órgãos fiscalizadores. Tendo isso, esse trabalho tem como objetivo simular a definição de níveis de controle para piezômetros da barragem de terra homogênea Cana Brava, localizada no município de Brejo Santo, no estado do Ceará. Para isso, realizou-se uma fundamentação teórica sobre os princípios de projetos de barragens, os objetivos e funcionamento dos instrumentos de auscultação mais utilizados nas barragens brasileiras, explanou-se sobre o comportamento do fluxo e das poropressões no interior de barramentos e suas fundações e esclareceu-se como esse assunto se enquadra na lei de segurança de barragens e nas exigências da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico como órgão fiscalizador. Utilizando-se os projetos do empreendimento do estudo de caso e seu histórico de leituras de instrumentos, a definição dos valores de referência foi realizada por meio de modelagens matemáticas baseadas em dois cenários: um onde o comportamento do barramento está operando como previsto no projeto e um segundo cenário hipotético, chamado crítico, em que o sistema de drenagem interna da barragem estaria inoperante. Desta forma, obteve-se as diferenças de poropressões medidas pelos piezômetros em cada cenário e, a partir de faixas percentuais do valor dessa diferença, foram definidas as situações de atenção, alerta e emergência para os piezômetros estudados. Desse modo, gerou-se um tipo de gráfico de acompanhamento com os três valores de referência, que pode ser adotado nos relatórios de análise da instrumentação da barragem para aprimoração das observações das leituras dos piezômetros. Além disso, foi possível verificar que o sistema de drenagem interna da barragem está operando conforme previsto em projeto, por meio da comparação entre os resultados obtidos nas análises numéricas e os valores de leituras atuais dos instrumentos.

Palavras-chave: Barragem. Segurança de Barragens. Instrumentos de auscultação. Níveis de controle. Piezômetros.

ABSTRACT

EARTH DAMS SAFETY: SIMULATION OF PIEZOMETRIC CONTROL LEVELS ESTABLISHMENT FOR THE CANA BRAVA DAM, IN CEARÁ, BRAZIL

AUTHOR: Marília Machado Moureira

ADVISOR: Talles Augusto Araújo

Dams are structures of immense relevance to people and public entities because they provide several resources that are essential to human development, such as water supply, irrigation, and electricity. Furthermore, dams are enterprises that require monitoring due to the possibility of failures or ruptures, which is an enormous risk to human lives, the environment, and the economy. In the last years, following big dam bursts in the country, Brazilian legislation has been improving and becoming more strict concerning the entrepreneurs' responsibilities and regulatory affairs. The primary goal of this present work is to define the control levels for the piezometers in Cana Brava earth dam, localized in the city of Brejo Santo, in the state of Ceará. In order to do so, a theoretical foundation about the purposes and operation of the most used instruments of auscultation in Brazilian dams was carried out, a thorough understanding of the flow behavior and the pore pressure in earth dams was performed, and it was addressed how this subject fits in the Dam Safety Act and the demands of The National Water and Sanitation Agency (ANA) as a supervisory organ. Based on the enterprises' projects of this case study and their measurement reading of instruments, the definition of the reference range was accomplished through mathematical models grounded in two different scenarios: in the first one, the behavior of the dam is functioning as established on the project. The second was a hypothetical setting, named critic, in which the dam drainage system is unworkable. Therefore, it was obtained the pore pressure distinctions measured by piezometers in each scenario, and it was settled the percent relative range of the value of that difference in alert, attention, or emergency circumstances taking into account the piezometers studied. Hence, a chart containing the three reference values has been created, which can be utilized in the analytical reports of Dam Monitoring Instrumentation to improve the watching of measurement reading of piezometers. Moreover, it was possible to identify the correct operation of the dam drainage system by comparing the results obtained by the numerical analysis and the current measurement values of the instruments.

Keywords: Dam. Dam Safety. Auscultation Instruments. Control levels. Piezometers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais elementos de uma barragem de terra.....	18
Figura 2 – Elementos que podem ser instalados em uma barragem de seção em terra homogênea	19
Figura 3 – Representação do princípio do controle de fluxo.....	20
Figura 4 – Representação do princípio de estabilidade	20
Figura 5 – Representação do princípio da compatibilidade das deformações.....	21
Figura 6 – Representação de seções transversais de barragens de aterro	22
Figura 7 – Seção transversal de uma barragem de terra homogênea.....	23
Figura 8 – Seção transversal de uma barragem de terra zoneada	24
Figura 9 – Seção típica da barragem da UHE Sobradinho	25
Figura 10 – Características que incluem uma barragem na aplicação da Política Nacional de Segurança de Barragens.....	28
Figura 11 – Esquema da estrutura de fiscalização de barragens no Brasil.....	30
Figura 12 – Medidor de vazão de percolação na Barragem Morros, São José de Piranhas-PB	37
Figura 13 – Medidor de vazão de percolação na Barragem de Porcos, Brejo Santo-CE	38
Figura 14 – Medidor de nível d'água	39
Figura 15 – Medidor de nível d'água da Barragem Morros, em São José de Piranhas-PB	40
Figura 16 – Representação de um piezômetro de tubo aberto.....	42
Figura 17 – Perfil de um Piezômetro tipo Casagrande modificado de tubo aberto.....	43
Figura 18 – Caixa de proteção de Piezômetros tipo Casagrande modificado de tubo aberto ..	43
Figura 19 – Piezômetros de resistência elétrica tipo Kyowa.....	44
Figura 20 – Esquema de funcionamento de um piezômetro de resistência da Kyowa	45
Figura 21 – Perfil de instalação de um medidor magnético de recalque	47
Figura 22 – Medidor de recalque de tubos telescópicos.....	48
Figura 23 – Medidor de recalque telescópico na Barragem de Milagres, Salgueiro-PE.....	48
Figura 24 – Esquema de locação e instalação de Marcos Superficiais	49
Figura 25 – Marco de deslocamento superficial na crista e demais instrumentos a jusante na Barragem de Porcos, em Brejo Santo-CE	50
Figura 26 – Ângulo de inclinação e desvio lateral do tubo guia de um inclinômetro	51
Figura 27 – Exemplo de extensômetro de haste	52

Figura 28 – Células de tensão total instaladas em argila compactada e exemplo de uma célula	53
Figura 29 – Percolação de água em um permeâmetro.....	55
Figura 30 – Carga de pressão em rede de fluxo a carga piezométrica em um piezômetro	57
Figura 31 – Análise de percolação em regime permanente pelo método dos elementos finitos	59
Figura 32 – Localização da Barragem Cana Brava	61
Figura 33 – Características técnicas e seção típica da barragem Cana Brava	62
Figura 34 – Imagem via satélite da Barragem Cana Brava em julho de 2021.	63
Figura 35 – Arranjo Geral da Barragem Cana Brava com a locação das seções transversais em que realizou-se as análises.....	64
Figura 36 – Seção instrumentada da Estaca 50+00	65
Figura 37 – Seção instrumentada da Estaca 69+00	65
Figura 38 – Seção instrumentada da Estaca 85+00	66
Figura 39 – Malha de elementos finitos na seção da estaca 50 da Barragem Cana Brava.....	67
Figura 40 – Modelo da seção da estaca 50 da Barragem Cana Brava em Situação Operacional	72
Figura 41 – Modelo da seção da estaca 69 da Barragem Cana Brava em Situação Operacional	73
Figura 42 – Modelo da seção da estaca 85 da Barragem Cana Brava em Situação Operacional	73
Figura 43 – Modelo da seção da estaca 50 da Barragem Cana Brava na Situação Crítica	74
Figura 44 – Modelo da seção da estaca 69 da Barragem Cana Brava na Situação Crítica	74
Figura 45 – Modelo da seção da estaca 85 da Barragem Cana Brava na Situação Crítica	75
Figura 46 – Seção E50: Cargas totais no cenário de operação	77
Figura 47 – Seção E50: Cargas totais no cenário crítico.....	77
Figura 48 – Seção E69: Cargas totais no cenário de operação	78
Figura 49 – Seção E69: Cargas totais no cenário crítico.....	78
Figura 50 – Seção E85: Cargas totais no cenário de operação	79
Figura 51 – Seção E85: Cargas totais no cenário crítico.....	79
Figura 52 – Seção E50: Poropressões no cenário de operação.....	81
Figura 53 – Seção E50: Poropressões no cenário crítico.....	81
Figura 54 – Seção E69: Poropressões no cenário de operação.....	82
Figura 55 – Seção E69: Poropressões no cenário crítico.....	82

Figura 56 – Seção E85: Poropressões no cenário de operação.....	83
Figura 57 – Seção E85: Poropressões no cenário crítico.....	83
Figura 58 – Análise da estabilidade do talude de jusante da Seção E69 no cenário crítico	85
Figura 59 – Comparação entre os cenários: valores de carga piezométrica do PZ-10.....	86
Figura 60 – Carta de Risco Piezométrica proposta para a seção da estaca 50+00	87
Figura 61 – Carta de Risco Piezométrica proposta para a seção da estaca 69+00	88
Figura 62 – Carta de Risco Piezométrica proposta para a seção da estaca 85+00	88
Figura 63 – Histórico de leituras do PZ-18 com os níveis de controle calculados.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de definição da Classe de uma Barragem	29
Tabela 2 – Exemplos de possíveis questões geotécnicas	34
Tabela 3 – Grandezas a monitorar em barragens de aterro	35
Tabela 4 – Tipos de instrumentos medidores de deslocamentos.....	46
Tabela 5 – Posição dos piezômetros nas seções analisadas.....	66
Tabela 6 – Premissas da carta de segurança de estabilidade	68
Tabela 7 – Premissas da carta de segurança piezométrica	69
Tabela 8 – Propriedades hidráulicas dos materiais da barragem.....	70
Tabela 9 – Comparação das cotas piezométricas obtidas no modelo e as leituras de campo em maio de 2022	71
Tabela 10 – Resultados de poropressões nos locais dos piezômetros nas duas situações.....	84
Tabela 11 – Fatores de segurança do talude de jusante no cenário crítico hipotético.....	85
Tabela 12 – Definição dos níveis de controle dos piezômetros estudados.....	86
Tabela 13 – Resumo das colunas d’água nos piezômetros para cada situação de segurança do instrumento	87

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral.....	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	BARRAGENS.....	18
2.1.1	Barragens de aterro	19
2.1.1.1	Barragem de Terra	22
2.1.1.1.1	Barragem de Terra Homogênea	22
2.1.1.1.2	Barragem de Terra Zoneada.....	23
2.1.1.2	Barragem de Enrocamento.....	24
2.2	SEGURANÇA DE BARRAGENS	25
2.2.1	A Segurança de Barragens no Brasil	26
2.2.1.1	Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010	27
2.2.1.2	Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020	31
2.2.2	A instrumentação na Segurança de Barragens	31
2.2.2.1	Carta de risco ou níveis de controle dos instrumentos.....	32
2.3	INSTRUMENTOS DE AUSCULTAÇÃO	34
2.3.1	Medição de vazão	36
2.3.2	Medição do nível de água	38
2.3.3	Medição de poropressões.....	40
2.3.3.1	Piezômetro Casagrande modificado de tubo aberto.....	41
2.3.3.2	Piezômetros Elétricos.....	44
2.3.4	Medição de deslocamentos	45
2.3.4.1	Medidor de recalque magnético	46
2.3.4.2	Medidor de recalque telescópico.....	47
2.3.4.3	Marcos de deslocamento superficiais	49
2.3.4.4	Inclinômetros de deflexão	50
2.3.4.5	Extensômetros de hastes	52
2.3.5	Medição de tensão total	53

2.4	PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	54
2.4.1	Lei de Darcy.....	54
2.4.2	Equação de Laplace.....	56
2.4.2.1	Redes de fluxo.....	57
2.4.2.2	Métodos Numéricos – Método dos Elementos Finitos.....	58
3	METODOLOGIA.....	60
3.1	APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	60
3.1.1	O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF).....	60
3.1.2	Barragem Cana Brava.....	61
3.1.3	Seções transversais adotadas no estudo.....	63
3.2	MÉTODO.....	67
3.3	ANÁLISES DE PERCOLAÇÃO.....	69
3.3.1	Características dos materiais.....	69
3.3.2	Calibração do modelo numérico.....	70
3.3.3	Situação de operação.....	72
3.3.4	Situação crítica.....	74
4	RESULTADOS.....	76
4.1	COMPORTAMENTO DAS CARGAS TOTAIS NAS SEÇÕES ESTUDADAS.....	76
4.2	AVALIAÇÃO DAS POROPRESSÕES NAS SEÇÕES ESTUDADAS.....	80
4.3	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DA BARRAGEM NO CENÁRIO CRÍTICO.....	84
4.4	DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE.....	86
5	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas de extrema importância para o desenvolvimento do ser humano desde a antiguidade, pois viabilizaram seu assentamento à terra por meio do represamento de água para o uso humano e animal, a melhoria da agricultura através da irrigação e o progresso da indústria por meio da geração de energia elétrica. Essas obras foram empregadas como promotoras de crescimento em muitos países, sendo diretamente relacionadas ao desenvolvimento (FUSARO, 2007).

Barragens armazenam grandes massas de água, desse modo, são consideradas como fonte de um perigo potencial para a população que vive na região de jusante das estruturas (FRANCO, 2008). Assim, a segurança de barragens é uma preocupação constante para os órgãos públicos, pois além de serem estruturas com grande importância econômica, a possibilidade de acidente ou ruptura representa um grande risco potencial para vidas humanas, efeitos no meio ambiente, perdas materiais e impactos econômico-financeiros (ELETROBRAS, 2003).

Recentemente, a lei de segurança de barragens, nº 12.334/2010 foi alterada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, introduzindo novas exigências aos empreendedores de barragens, especialmente na área de mineração, com mudanças que deverão ser incorporadas e implementadas pelos empreendedores e órgãos fiscalizadores (BRASIL, 2020).

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens de 2020, elaborado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), atualmente há 21.953 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) por 33 órgãos fiscalizadores. Desse total, 3.267 não se aplicam à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), 5.591 estão submetidas à política e o valor restante – por volta de 60% das estruturas cadastradas – não se sabe se são submetidas à Lei nº 12.334/2010, por não possuírem informações suficientes.

Tendo isso, percebe-se a importância da difusão de informações a respeito de Segurança de Barragens no Brasil, de forma a haver maior protagonismo dos empreendedores na prevenção de falhas, elaborando a documentação prevista e implementando as ações de monitoramento de segurança de barragens. Também é necessária mais estruturação dos órgãos fiscalizadores em todas as esferas a fim de atuarem em conjunto em situações críticas, além de melhoria na propagação do tema com a população e os setores envolvidos, para incentivar a cultura de segurança de barragens (ANA, 2021).

Segundo Costa (2012), o monitoramento de uma obra é o conjunto de atividades que possibilitam o acompanhamento de sua segurança e a eficácia da construção, devendo garantir essa segurança durante toda sua vida útil. O monitoramento pode ser feito através dos processos de: inspeção visual, topografia e instrumentação. A instrumentação permite a aferição de uma gama de grandezas selecionadas, permitindo, junto com as inspeções de segurança, monitorar as condições de segurança de uma barragem durante sua construção, o enchimento do reservatório e posteriormente em sua operação e revisões periódicas de segurança (ANA, 2016a).

1.1 JUSTIFICATIVA

O interesse no tema de segurança de barragens e instrumentação surgiu devido ao período em que a autora trabalhou no Consórcio Gerenciador do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF), que possui como uma de suas incumbências a análise dos relatórios de instrumentação das barragens do projeto. Atrelado a isso, no mesmo período, diversos reservatórios passavam pelos procedimentos de enchimento, tornando a análise da instrumentação ainda mais primordial, visto que é o momento em que a estrutura passa a receber os carregamentos previstos no projeto.

A Lei Federal nº 12.334/2010 definiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), com os seguintes objetivos: assegurar o cumprimento de padrões de segurança de barragens a fim de diminuir as chances de acidentes e seus impactos; gerar artifícios para ampliação do controle dessas estruturas pela administração pública por meio da fiscalização, instrução e correção das ações de segurança; reunir informações que auxiliem a gestão da segurança de barragens pelo Estado; e incentivar a prática de segurança de barragens e gestão de riscos (ANA, 2021).

Nos últimos anos, nosso país passou por grandes acidentes de barragens, servindo inclusive como motivação para a atualização da Política Nacional de Segurança de Barragens. Casos como os das barragens de Miraf em 2007, Mariana em 2015, e Brumadinho em 2019, corroboram a relevância do controle e monitoramento de estruturas desse porte (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2019). Em 2020, foram relatados 44 acidentes com barragens, segundo o Relatório de Segurança de Barragens elaborado pela ANA no ano em questão.

Assim, fica claro que é necessário aprimorar os métodos de segurança e monitoramento de barragens. Logo, a execução de leituras e análises de dados de instrumentação como poropressões, tensões, níveis d'água, deslocamentos e vazões de percolação diminui a

possibilidade de acidentes, visto que essas informações podem alertar a respeito de anomalias, e servem como embasamento para reparos, reforços ou medidas de diminuição de danos no caso de um rompimento da estrutura.

Portanto, é de suma importância a expansão do conhecimento profissional no que tange os instrumentos de auscultação de barragens. A correta avaliação dessas leituras é essencial para a eficiência do monitoramento, pois a ausência dessa interpretação pode tornar esse procedimento prejudicial, causando uma impressão de segurança fictícia em relação à estrutura, visto que a existência dos instrumentos na barragem não garante a segurança da mesma (COSTA, 2012).

No estudo de caso deste trabalho, fez-se uso dos dados de projetos, estudos e histórico das leituras de instrumentação da barragem utilizada nas análises, cuja disponibilidade e autorização para uso foi concedida pelo empreendedor – Ministério do Desenvolvimento Regional. O uso de informações de projeto e operação de barragens são de grande importância para tornar os trabalhos acadêmicos de cunho mais realista das práticas profissionais e da necessidade de apropriação de novas metodologias de projeto e de desenvolvimento científico tecnológico.

Desse modo, é de grande valia o uso de informações de uma barragem em operação, especialmente considerando-se o elevado padrão dos trabalhos técnicos deste grandioso empreendimento nacional que é o Projeto de Integração do Rio São Francisco, em que se são reconhecidos os elevados padrões em todas as fases de viabilização dos seus estudos básicos, projetos, obras e os trabalhos de supervisão e operação.

Ressalta-se também que o estudo de caso está plenamente entrelaçado às oportunidades advindas do que a autora vivenciou e se propôs no último ano da graduação, com os trabalhos realizados, no campo, no Eixo Norte do Projeto de Integração do São Francisco e os aprendizados obtidos no estágio supervisionado em estudos, projetos e inspeções de barragens na Nova Engevix Engenharia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo de caso com a simulação da definição de níveis de controle piezométricos da Barragem de terra homogênea Cana Brava, pertencente ao Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF), localizada no município de Brejo Santo, no estado de Ceará.

1.2.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

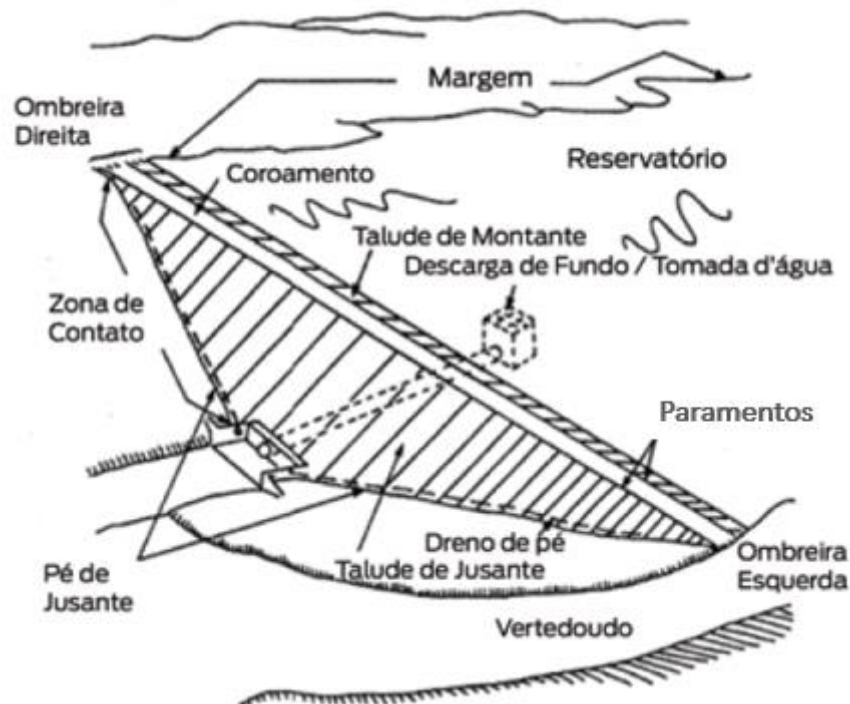
- Apresentar tópicos a respeito dos princípios de projetos de barragens no tocante a geotecnia, das características e do funcionamento de barragens;
- Explorar a respeito das principais exigências da legislação de segurança de barragens do Brasil e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico como órgão fiscalizador;
- Apresentar o funcionamento dos principais instrumentos de auscultação de barragens;
- Realizar análises de percolação da barragem estudada no cenário normal de operação e em um cenário hipotético crítico para as poropressões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BARRAGENS

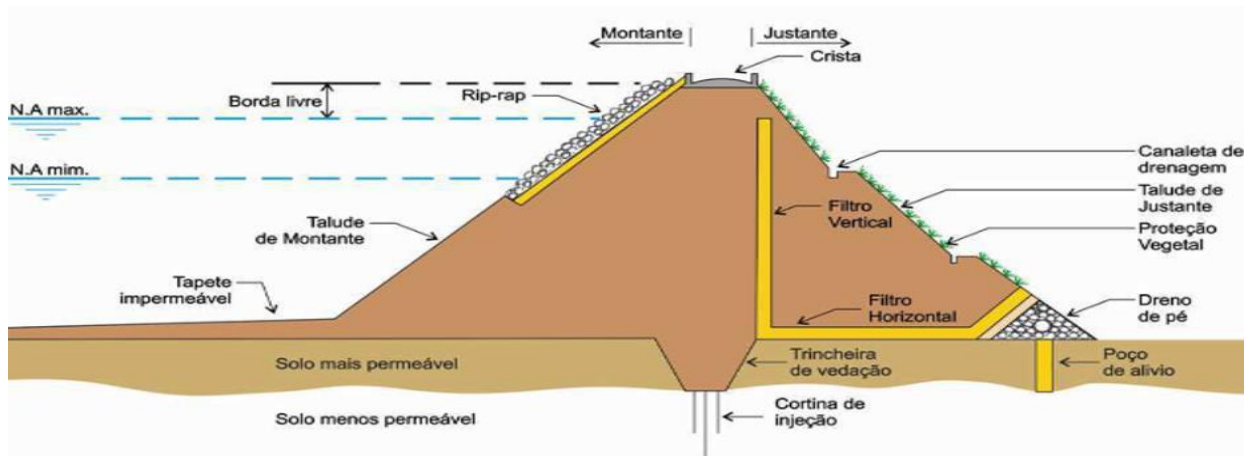
Barragens são estruturas construídas em um curso de água, que pode ser permanente ou provisório, com o objetivo de conter ou acumular água, demais materiais líquidos, ou misturas de líquidos e sólidos. Sua finalidade pode ser o abastecimento público ou de indústrias, geração de energia elétrica, regularização de cheias, irrigação, contenção de resíduos sólidos, piscicultura, recreação, entre outros. As barragens – conjunto do barramento, reservatório e estruturas relacionadas – são essenciais para que haja uma apropriada gestão de recursos hídricos e contenção de rejeitos de mineração ou de resíduos industriais (ANA, 2016). A Figura 1 e a Figura 2 apresentam as principais terminologias e dispositivos que compõem a maioria das barragens de terra.

Figura 1 – Principais elementos de uma barragem de terra



Fonte: ANA (2016b, p. 15).

Figura 2 – Elementos que podem ser instalados em uma barragem de seção em terra homogênea



Fonte: Carvalho (2011, p. 3).

Segundo Costa (2012), no que se trata de tipos de barragens, pode-se classificar essas estruturas em dois grandes grupos: as barragens convencionais, aquelas que possuem mecanismos amplamente conhecidos no meio técnico especializado, e as não convencionais, grupo que aborda as menos empregadas, geralmente com desenvolvimento mais recentes. As barragens consideradas convencionais pelo autor são: barragem de terra, barragem de enrocamento e barragem de concreto. As barragens que são compostas essencialmente com materiais de solo e rocha são denominadas como barragens de aterro (MIRANTE, 2016).

2.1.1 Barragens de aterro

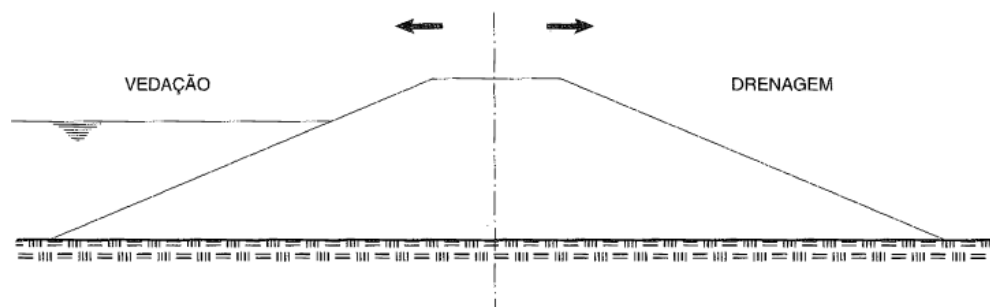
As barragens de aterro possuem algumas vantagens quando comparadas às barragens de concreto, pois sua construção é viável em uma gama maior de fundações e topografia e geralmente possuem um custo menor, visto que os materiais utilizados requerem um baixo processamento (MIRANTE, 2016).

De acordo com Cruz (1996), o projetista de barragens deve ter como prioridade o controle do fluxo de água no maciço e na fundação. A estabilidade da estrutura precisa considerar os requisitos básicos de segurança exigidas de acordo com as condições de carregamento e tipo de obra. Para a garantia de atendimento à essas exigências, o autor estabelece três princípios gerais de projetos: princípio do controle de fluxo, princípio da estabilidade e princípio da compatibilidade das deformações.

- Princípio do controle de fluxo

Conforme demonstra a Figura 3, a montante do eixo de uma barragem, a prioridade é garantir a vedação do corpo do maciço e sua fundação, de modo que se deve implementar os sistemas de vedação que sejam pertinentes. Já na área a jusante do eixo da barragem, o esforço do projetista deve ser em favorecer a saída da água do conjunto maciço-fundação, instalando-se os sistemas de drenagem necessários.

Figura 3 – Representação do princípio do controle de fluxo

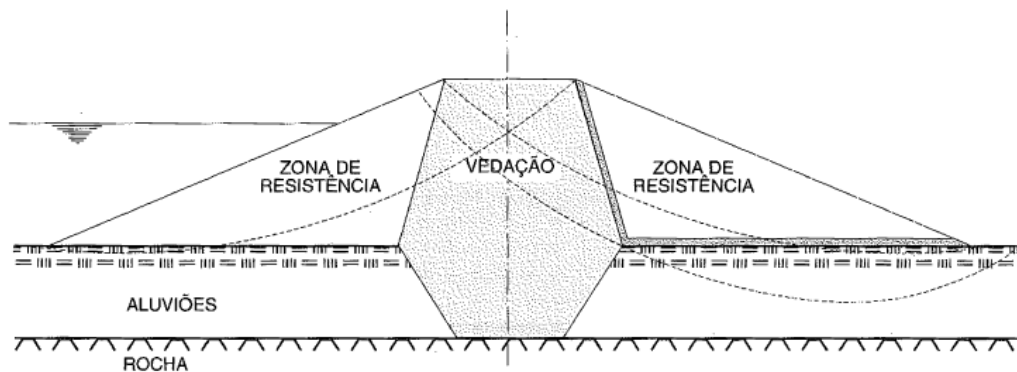


Fonte: Cruz (1996, p. 280).

- Princípio da estabilidade

Os paramentos da barragem precisam possuir parâmetros de resistência a fim de garantir a estabilidade dos taludes. Esses espaldares devem ter compatibilidade com as características da fundação, com o objetivo de assegurar a estabilidade do conjunto (maciço-fundação) com as diversas condições de carregamento, como apresenta a Figura 4.

Figura 4 – Representação do princípio de estabilidade



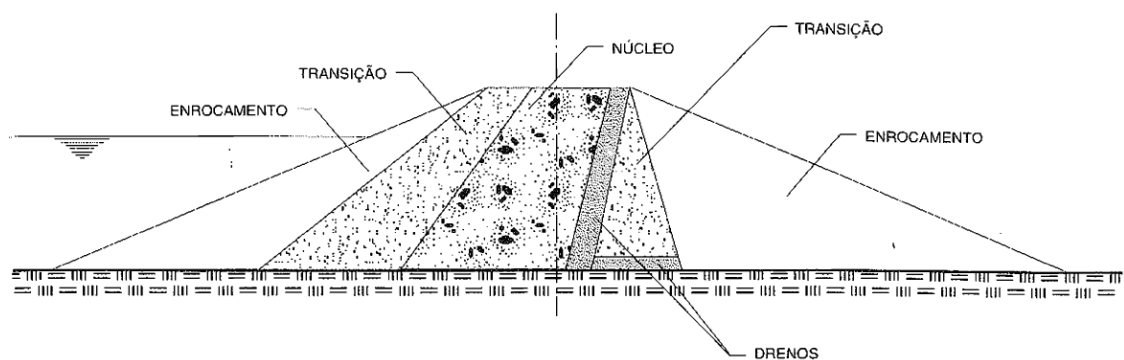
Fonte: Cruz (1996, p. 280).

- Princípio da compatibilidade das deformações

Os diferentes materiais empregados devem possuir compressibilidade compatíveis ou zonas adicionais de transição, como demonstrado na Figura 5. Desse modo, atenua-se os recalques diferenciais e totais que possam avariar os dispositivos de drenagem e vedação por meio de trincas passíveis de se tornar caminhos preferenciais de fluxo, ou através da inversão dos gradientes de fluxo no sistema de drenagem, em virtude de recalque totais abundantes.

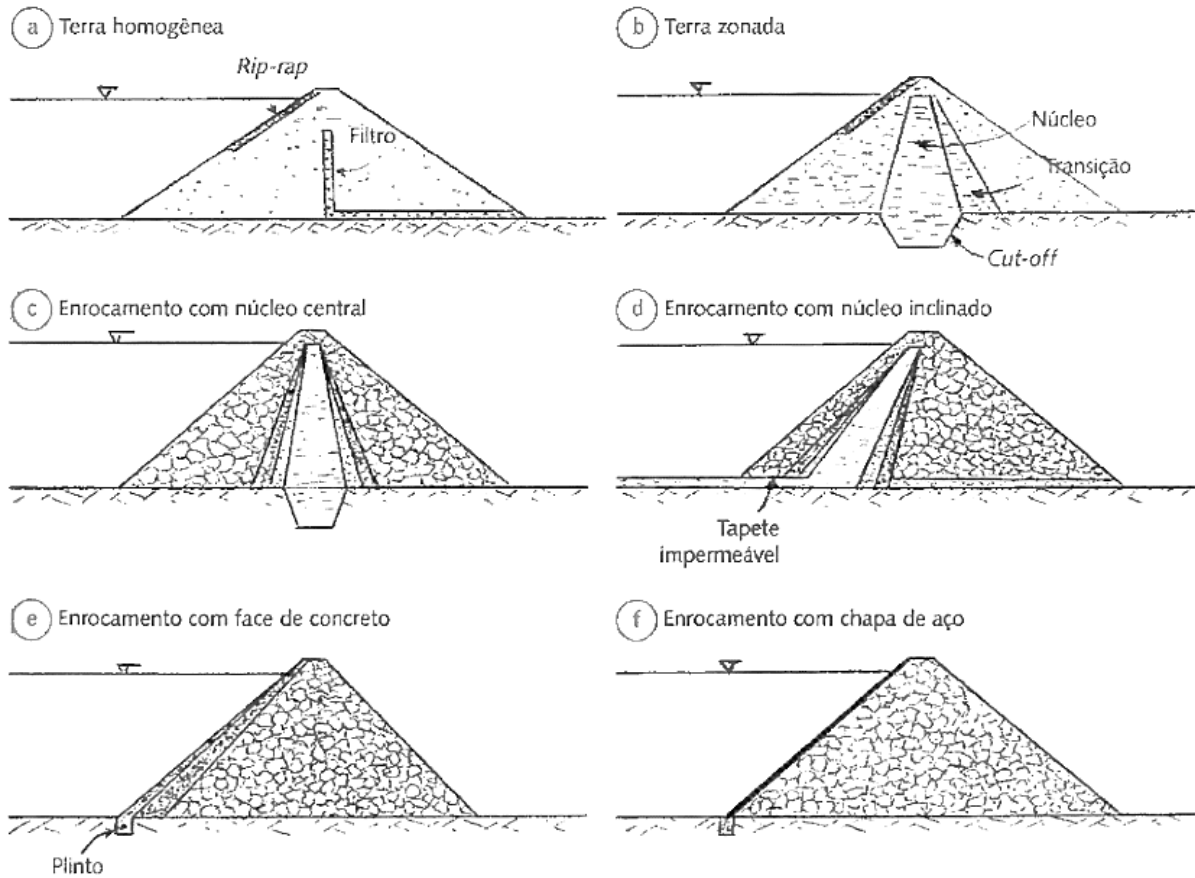
Esse tipo de estrutura pode possuir diversas definições, porém as duas principais categorias são: barragens de terra e barragens de enrocamento. A classificação mais comum a respeito desses tipos de barramentos é de que se pode chamar a estrutura de barragem de terra quando a mesma é composta por material terroso em mais de 50% do seu volume, e barragem de enrocamento quando seu volume possuir pelo menos 50% de enrocamento (material de tamanho igual ou maior que pedras de mão) (MIRANTE, 2016). A Figura 6 apresenta seções transversais típicas simplificadas de barragens de aterro, com suas principais configurações.

Figura 5 – Representação do princípio da compatibilidade das deformações



Fonte: Cruz (1996, p. 281).

Figura 6 – Representação de seções transversais de barragens de aterro



Fonte: Costa (2012, p. 25).

2.1.1.1 Barragem de Terra

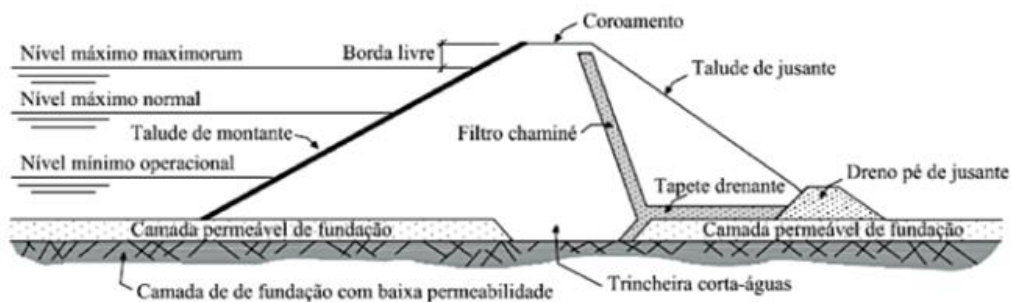
As barragens de terra são o tipo mais comum de barramento, pois necessitam de materiais apenas escavados, sem demandar processamentos mais complexos (PEREIRA, 2015). Esse tipo de estrutura de contenção geralmente pode ser implementado em regiões com a fundação de materiais formados por rocha compacta ou locais com materiais inconsolidados, sendo esse último o mais típico. As barragens de terra podem ser divididas em dois tipos: terra homogênea ou terra zoneada (MARANGON, 2004).

2.1.1.1.1 Barragem de Terra Homogênea

Segundo Costa (2012), uma barragem é considerada homogênea quando existe o predomínio de um único material de aterro, mesmo que existam elementos de drenagem ou

proteção como filtros ou *rip-rap*. Massad (2010) aponta que esse é o tipo de seção mais adotado na engenharia brasileira em virtude da grande disponibilidade de materiais terrosos no país. Esses barramentos podem ser implementados em locais com fundações deformáveis, inclusive sobre solos moles. A Figura 6 (a) e a Figura 7 apresentam exemplos de seções transversais de barragens zoneadas.

Figura 7 – Seção transversal de uma barragem de terra homogênea



Fonte: ANA (2016b, p. 16).

O material escolhido para a composição do aterro deve ser impermeável o suficiente para conferir estabilidade ao maciço e a dissipação da carga hidráulica da água do lago que percola por meio da estrutura (MIRANTE, 2016). A inclinação dos taludes do barramento é definida com o objetivo de assegurar a estabilidade da estrutura, especialmente no primeiro enchimento, fase de operação e ocorrências de rebaixamento rápido do reservatório (MASSAD, 2010).

2.1.1.1.2 Barragem de Terra Zoneada

As barragens de terra zoneadas são formadas por uma zona central denominada de núcleo, composta por material argiloso, e zonas adjacentes chamadas de maciços estabilizadores, constituídas por solos não argilosos. Nessas estruturas, o filtro vertical (ou chaminé) é implementado na face entre o núcleo e o maciço estabilizador de jusante (ANA, 2016b). A Figura 6 (b) e a Figura 8 demonstram exemplos de seções transversais de barragens zoneadas.

Figura 8 – Seção transversal de uma barragem de terra zoneada



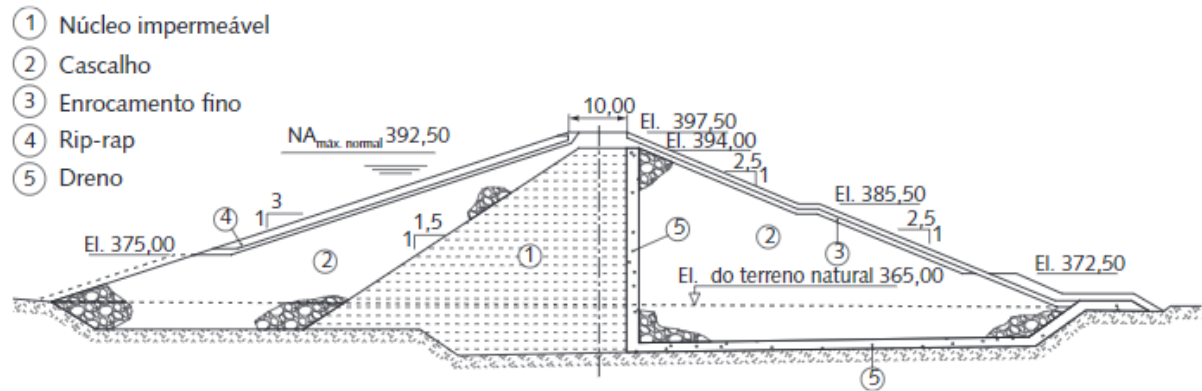
Fonte: ANA (2016b, p. 17).

As zonas laterais que envolvem o núcleo central impermeável devem suportar e proteger o mesmo. Esses maciços são mais permeáveis, sendo compostos por areia, cascalho ou fragmentos de rocha, ou uma combinação desses materiais (MARANGON, 2004). A zona de montante deve assegurar a estabilidade em situações de esvaziamento rápido do reservatório e a de jusante precisa garantir a estabilidade e, no caso de inexistência de sistema de drenagem interna, funcionar como dreno para conduzir o fluxo que infiltra por meio do maciço (MIRANTE, 2016).

2.1.1.2 Barragem de Enrocamento

Nesse tipo de barragem, utiliza-se aterro formado por blocos de rocha com diferentes dimensões e uma zona impermeável, que pode ficar na face de montante ou no centro – núcleo – do barramento. Geralmente, adota-se barragens de enrocamento onde é inviável a adoção de estruturas de concreto (seja pelo alto custo de transporte ou pelas condições da fundação), em locais com carência de solos ou onde há abundância de rocha dura e resistente (MARANGON, 2004). A Figura 9 apresenta um exemplo de seção de uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso.

Figura 9 – Seção típica da barragem da UHE Sobradinho



Fonte: CBDB (1982 apud PEREIRA, 2015 p. 98).

Nas barragens com núcleo impermeável, predomina o material rochoso, porém a estrutura responsável pela vedação é constituída de um núcleo argiloso que possui, nas regiões de alteração de material rochoso para solo, zonas de transição que têm o papel de impedir o carreamento do solo argiloso para a área do enrocamento (COSTA, 2012). Esse tipo de estrutura é vantajoso em locais onde é necessária a interligação da barragem com estruturas de concreto (vertedouro), pois o núcleo possui taludes mais íngremes, o que possibilita a redução do comprimento dos muros de abraço ou encosto, resultando na redução do custo da obra (PEREIRA, 2015). Como demonstra a Figura 6 (c) e (d), o núcleo pode ser inclinado ou centralizado.

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Em 1995, foi publicado pelo ICOLD (Comissão Internacional de Grandes Barragens) o boletim 99, que contém uma ampla relação histórica mundial de rupturas de barragens a partir do final do século XIX, além de diversas análises estatísticas sobre causas de falhas em barramentos.

De acordo com o boletim, a maioria das falhas ocorre nos primeiros 10 anos de operação das barragens, especialmente no ano subsequente ao primeiro comissionamento. Além disso, nas barragens de concreto a causa mais recorrente de falhas são problemas na fundação, sendo 21% devido a erosão interna e também 21% devido a esforços cortantes insuficientes da fundação. Nas barragens de aterro – em rocha ou solo – a maior causa de rupturas é o transbordamento, sendo 31% dos casos analisados, seguido de erosão interna no corpo do maciço, com 15%, e nas fundações, 12%.

Portanto, é de extrema importância o acompanhamento dessas estruturas, não apenas em sua fase de operação, mas também entender o seu histórico, como período em que a mesma foi construída, a fim de considerar os conhecimentos técnicos da época, e acidentes que ocorreram em barramentos similares. As ocorrências técnicas precisam ser analisadas e registradas, desse modo os profissionais responsáveis pela segurança da barragem poderão tomar decisões mais assertivas e embasadas (SMIDERLE, 2014).

Considerando então que as barragens possuem uma probabilidade de falha, mesmo que diminuta, e que esse evento pode causar grande impacto nas áreas a jusante, é importante trabalhar para reduzir esse risco. Tendo isso, pode-se considerar que a segurança de barragens se atinge por meio de três pilares básicos: segurança estrutural, monitoramento e manutenção. O projeto e a construção são fatores decisivos para evitar falhas, porém, ainda que os mesmos sejam adequados, resta um risco remanescente a ser monitorado (FUSARO, 2007).

2.2.1 A Segurança de Barragens no Brasil

Na década de 1980 houve duas publicações do CBDB (Comitê Brasileiro de barragens) que foram de extrema importância para alavancar as discussões sobre segurança de barragens no país. Em 1983, foi publicado o documento “Diretrizes para a Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação” e em 1986 “Recomendações para Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos de Segurança de Barragens”.

As evidências demonstram que os avanços em legislações e programas de segurança de barragens acontecem especialmente após a ocorrência de acidentes. Em 1997, houve o rompimento por galgamento da barragem de Euclides da Cunha, fato que, por consequência, causou também a ruptura da barragem Armando de Salles Oliveira (CBDB, 2011). Esse episódio motivou o estado de São Paulo – sede de ambas as estruturas – a ser o precursor na criação de um decreto-lei abordando segurança de barragens e sugerindo monitoramentos técnicos constantes. Embora o decreto não tenha sido implementado, serviu de modelo para a Lei Federal 9.433 de 1997, que definiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (SMIDERLE, 2014).

Em 2003, após a ruptura de uma barragem de rejeitos localizada no rio Pombas, em Cataguases, município do estado de Minas Gerais, o deputado Leonardo Monteiro propôs o PLC-168, projeto de lei voltado para a segurança de barragens. O projeto contou com o apoio de diversas entidades técnicas brasileiras, porém só foi tratado como prioridade novamente em 2009, após a ruptura da barragem de Algodões, no Piauí, com sete vítimas fatais confirmadas.

No ano seguinte, o projeto foi aprovado, estabelecendo a Política Nacional de Segurança de Barragens por meio da Lei Federal 12.334, publicada em 20 de setembro de 2010 (CBDB, 2011; SMIDERLE, 2014).

2.2.1.1 Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010

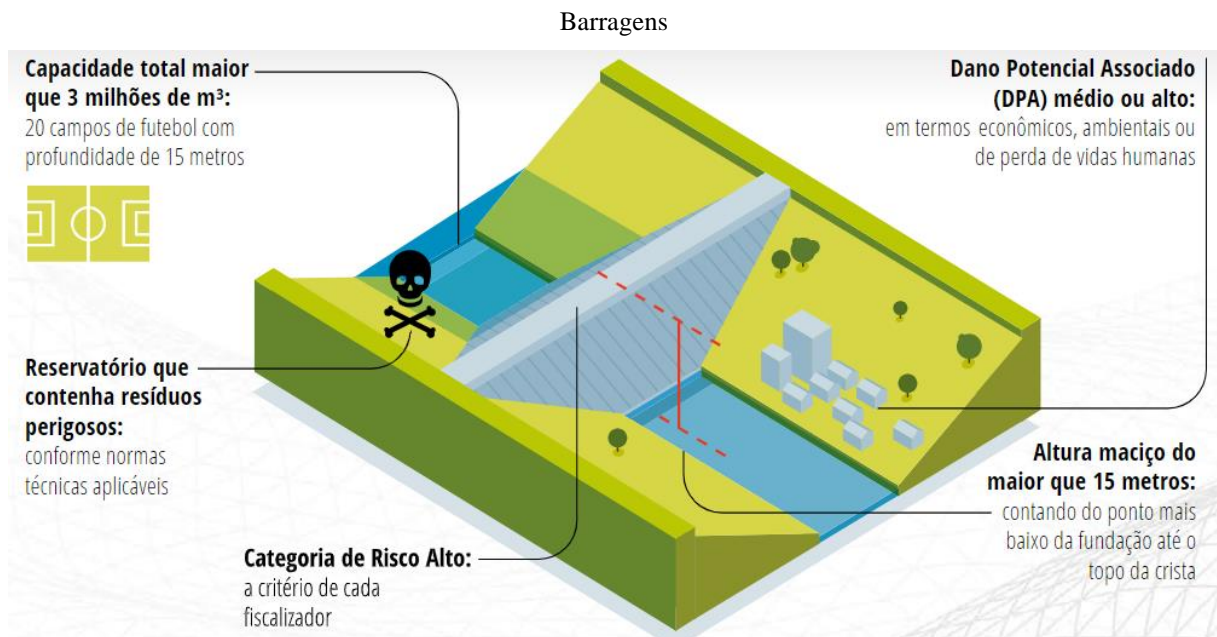
A Lei Federal 12.334, publicada em 20 de setembro de 2010, hoje conhecida como a lei de segurança de barragens, estabeleceu a PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens – determinando incumbências e procedimentos de monitoramento para garantir as condições de segurança das barragens. Essa legislação estabeleceu sete instrumentos da PNSB:

- I - O sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- II - O Plano de Segurança de Barragem;
- III - O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
- IV - O Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima);
- V - O Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- VI - O Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
- VII - O Relatório de Segurança de Barragens. (BRASIL, 2010)

Toda barragem existente deve ter a sua segurança garantida pelo empreendedor, porém nem todas estão inclusas nas exigências da legislação. A PNSB se aplica às barragens que possuam ao menos uma das características listadas abaixo e demonstradas na Figura 10.

- Altura do maciço maior ou igual a 15 metros, contando do local mais baixo da fundação até a crista;
- Capacidade do reservatório maior ou igual a 3 milhões de metros cúbicos;
- Estrutura que reserve resíduos perigosos;
- Categoria de dano potencial associado médio ou alto;
- Categoria de risco alto (item incluído pela Lei nº 14.066, de 2020).

Figura 10 – Características que incluem uma barragem na aplicação da Política Nacional de Segurança de



Fonte: ANA (2021, p. 39).

O sistema de classificação de barragens parte de dois itens: a categoria de risco e o dano potencial associado. A categoria de risco se baseia nas características técnicas, estado de conservação da barragem e atendimento ao PSB. Já o dano potencial associado trata do nível do impacto a jusante que um possível rompimento, vazamento, infiltração de solo ou mau funcionamento da barragem causaria (BRASIL, 2010).

A lei de segurança de barragens estabelece que os barramentos serão classificados por seus órgãos fiscalizadores, em concordância com parâmetros definidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) (BRASIL, 2010). Esses parâmetros e critérios são especificados posteriormente na Resolução nº 143/2012 do CNRH. Tendo isso, cabe à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico realizar a fiscalização das barragens enquadradas pela legislação para as quais outorgou o direito de uso dos recursos hídricos, com exceção das que possuem aproveitamento para geração de energia hidrelétrica (ANA, 2017). A responsabilidade pela fiscalização de barragens depende dos critérios apresentados na Figura 11.

No Brasil, os empreendedores podem ser públicos, como municípios, estados e a própria federação, ou privados, todos possuindo potenciais técnicos e monetários bastante variados (ANA, 2016b). Desse modo, os proprietários das barragens fiscalizadas pela ANA são responsáveis por atender à resolução nº 236 da agência, de 30 de janeiro de 2017 – alterada pela resolução nº 121, de 09 de maio de 2022 – que define diversos aspectos do Plano de Segurança

da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem, como o conteúdo mínimo, a qualificação dos responsáveis técnicos e a frequência de elaboração ou atualização (ANA, 2017). A definição da classe de uma barragem é efetuada conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de definição da Classe de uma Barragem

Categoria de Risco	Dano Potencial Associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	A	B	D
Baixo	A	B	D

Fonte: ANA (2022, p. 11).

A Lei Federal 12.334/2010 atribui aos empreendedores e aos responsáveis técnicos definidos por eles a responsabilidade de elaborar e implementar o Plano de Segurança da Barragem (PSB), documento que deve ser enviado ao órgão fiscalizador competente. O PSB é composto por até seis volumes, e tem a finalidade de registrar diversas características, práticas e procedimentos adequados a fim de garantir a devida segurança das estruturas da barragem. A disposição do PSB se dá do seguinte modo:

Volume I – Informações Gerais;

Volume II – Documentação Técnica do Empreendimento;

Volume III – Planos e Procedimentos;

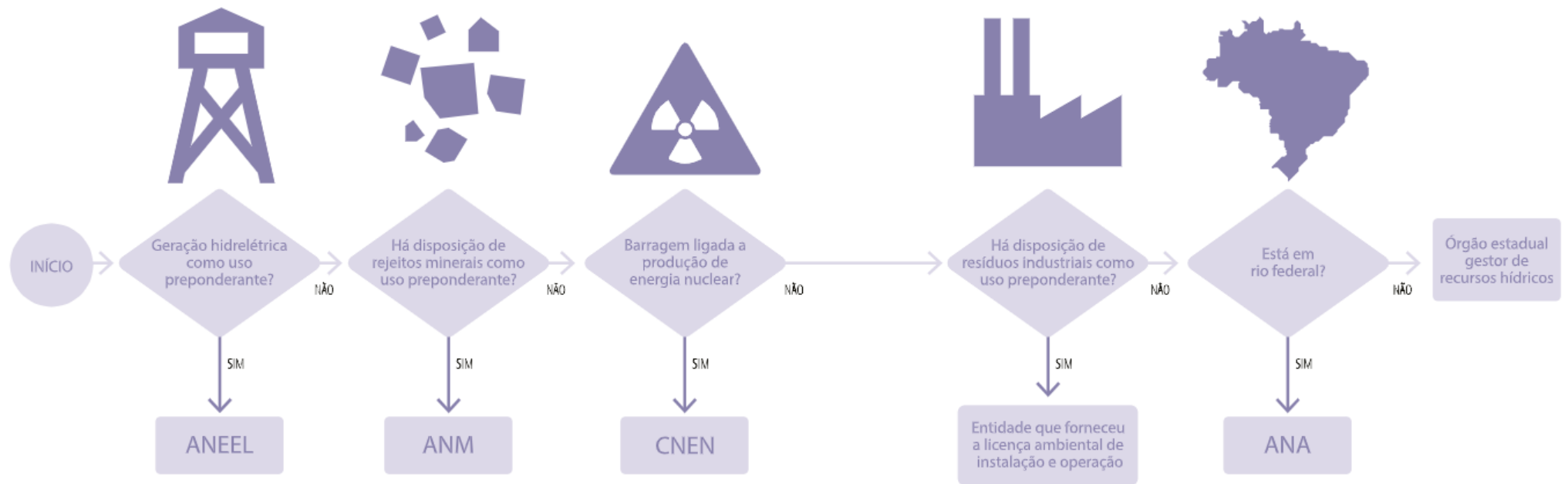
Volume IV – Registros e Controles;

Volume V – Revisão Periódica de Segurança de Barragem;

Volume VI – Plano de Ação de Emergência, quando exigido. (ANA, 2017)

As estruturas classificadas como de alto dano potencial associado, devem possuir o Plano de Ação de Emergência (PAE) para que, desse modo, os perigos potenciais que essas estruturas possuem sejam reconhecidos e minimizados quando possível (BRASIL, 2010).

Figura 11 – Esquema da estrutura de fiscalização de barragens no Brasil



Fonte: ANA (2021, p. 36 e 37).

2.2.1.2 Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020

Em 2020, o Brasil atualizou sua Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) por meio da Lei Federal nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, que altera a Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. A nova legislação surgiu por meio do PL 550/2019, apresentado ao senado após o colapso da barragem da Vale em Brumadinho, Minas Gerais, ocorrido que resultou em 259 vítimas fatais e 11 desaparecidos. Além disso, já havia pressão pública para a revisão da legislação que versa sobre segurança de barragens devido ao rompimento da barragem de Fundão, em 2015, no município de Mariana, também em Minas Gerais, fato que causou a morte de 19 pessoas e um dano inestimável ao meio ambiente (SENADO NOTÍCIAS, 2020).

A nova legislação repercutiu principalmente devido às alterações no que tange as sanções para os empreendedores que não cumprirem a lei, que ficaram mais severas. Além disso, houve a proibição da construção ou alteamento de barragens de mineração pelo método a montante, definida no artigo 2-A da lei como “a metodologia construtiva de barragem em que os diques de contenção se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado”. Ademais, a lei exigiu a descaracterização das barragens construídas por esse método até 25 de fevereiro de 2022 (BRASIL, 2020).

2.2.2 A instrumentação na Segurança de Barragens

No ano de 1853, na barragem em cantaria de Grosbois, França, foram realizadas medidas topográficas para aferição de deslocamentos no seu coroamento. O barramento apresentou anomalias desde seu enchimento, em 1838, necessitando de diversos reforços em sua estrutura. Desde então, aferições topográficas se tornaram comuns nas barragens dessa região. No fim do século XIX, foi empregado o uso de piezômetros na Índia para investigação de percolações nas fundações de barragens de irrigação sobre materiais aluvionares. Em 1907, instrumentos semelhantes foram utilizados por engenheiros na Inglaterra, a fim de determinar a linha freática em um barramento homogêneo. A partir de 1917, o uso de piezômetros tornou-se mais frequente em barragens de terra nos Estados Unidos (SILVEIRA, 2006).

No Brasil, foi a partir da década de 1950 que a instrumentação de barragens passou a ser uma técnica mais utilizada. Nessa época, foram construídas muitas usinas hidrelétricas, adotando-se grandes estruturas situadas em locais com bastante complexidade geológica-geotécnica, fato que exigiu projetos mais sofisticados e maior cautela na elaboração dos planos

de instrumentação dos barramentos, a fim de assegurar um monitoramento adequado de suas condições de segurança (SILVEIRA, 2006).

Conforme já foi abordado nesse trabalho, mesmo que o projeto e a construção de uma barragem tenham sido executados de forma adequada e prezando pela boa técnica, existe, nessas estruturas, um risco remanescente a ser monitorado por meio de atividades de auscultação (FUSARO, 2007). O termo auscultação de barragens pode ser definido como o “conjunto de processos que visam a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global”, possuindo duas ferramentas principais: inspeções visuais e instrumentação (FONSECA, 2003, p. 6).

O acompanhamento de barragens por meio de inspeções e instrumentação, auxilia na tomada de decisões a respeito de reparos a serem executados ou medidas de emergência a serem tomadas (FUSARO, 2007). A instrumentação de um barramento consiste no uso de diversos tipos de instrumentos que são instalados em diferentes pontos – como fundação, maciço, filtro – durante a construção da estrutura. Esses instrumentos são importantes para a realização de um controle da segurança da barragem, além de permitirem a verificação de parâmetros e métodos empregados no projeto (COSTA, 2012).

O Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, elaborado em 2002 pelo antigo Ministério da Integração Nacional (atual Ministério do Desenvolvimento Regional), determina que toda barragem deve possuir instrumentação em conformidade com o seu porte e riscos associados. Além disso, o documento define que as leituras desses instrumentos devem ser realizadas e analisadas periodicamente e que todos os instrumentos devem possuir valores de controle ou limites.

A legislação brasileira exige o Plano de Segurança de Barragens (PSB), sendo que o conteúdo destes documentos é especificado pelos órgãos fiscalizadores. Os empreendedores que são fiscalizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), devem apresentar o Plano de Monitoramento e Instrumentação, incluído no Volume III do PSB, cujo título é “Planos e Procedimentos”. O Plano de Monitoramento e Instrumentação deverá possuir informações como: parâmetros que serão monitorados, detalhes dos instrumentos, periodicidade de leituras e informações a respeito da manutenção dos instrumentos (ANA, 2016b).

2.2.2.1 Carta de risco ou níveis de controle dos instrumentos

Na prática de segurança de barragens, costuma-se definir valores de leituras de referência relativos a cada instrumento, de modo a indicar se as medições registradas

demonstram alguma situação inadequada no funcionamento da estrutura. A apresentação desses valores é comumente chamada de carta de risco ou de segurança da barragem, documento que tem como objetivo demonstrar níveis de atenção, alerta ou emergência das leituras dos instrumentos. A formatação da carta de risco tem de ser simples e objetiva, de modo que seja uma ferramenta de fácil observação e interpretação (MONTES, 2003).

O Manual para estudos e projetos de usinas hidrelétricas da Eletrobrás (2003) determina que esses valores de monitoramento são importantes para comparação com as leituras de campo, a fim de identificar possíveis anomalias no comportamento da estrutura, sendo que esses níveis devem ser estabelecidos fundamentados em: critérios de projeto, análises em modelos matemáticos e/ou estudos em modelos reduzidos. O documento cita também que, passados alguns anos do enchimento do reservatório, com a estabilização das grandezas geotécnicas analisadas, deve-se reavaliar os níveis de controle com base no histórico de leituras e possível melhoria na calibração dos modelos utilizados para os estudos de definição dos níveis de controle dos instrumentos.

Usualmente, adotam-se valores que representem quatro situações: normal, atenção, alerta e emergência. Para a descrição do que significa cada um desses cenários, pode-se relacionar os seus conceitos com as definições de nível de perigo de anomalias, descritos pela ANA na Resolução nº 236 de 2017:

- Normal: quando determinada situação não compromete a segurança da barragem;
- Atenção: situação em que não há comprometimento imediato da segurança da barragem, mas que pode vir a comprometê-la em caso de progressão, portanto, deve haver monitoramento e controle das leituras e situação da barragem no local instrumentado;
- Alerta: quando há comprometimento da segurança da barragem, então, devem ser tomadas medidas para investigações ou reparos da anomalia identificada;
- Emergência: cenário em que há grande possibilidade de ruptura da barragem.

Na prática de segurança de barragens, quando um instrumento ultrapassa os valores de atenção, alerta, ou até emergência, não se pode assumir imediatamente que a barragem está enquadrada em uma das situações descritas acima, pois primeiramente, o monitoramento de barragens abrange um conjunto de atividades além das leituras dos instrumentos, como inspeções visuais, conhecimento do histórico da estrutura e reavaliação dos parâmetros adotados no projeto. Em segundo lugar, é muito comum haver problemas no desempenho dos equipamentos ou equívocos na instalação, leitura ou calibração de instrumentos. Por isso, a

instrumentação é uma ferramenta muito significativa na avaliação de segurança de barragens, mas não pode ser observada isoladamente.

2.3 INSTRUMENTOS DE AUSCULTAÇÃO

Segundo Silveira (2006), todos os instrumentos existentes em uma barragem devem ser escolhidos de modo que respondam a perguntas relevantes. Tendo isso, as questões geotécnicas que possam vir a surgir ao longo das fases do empreendimento devem ser levantadas, como anomalias geológicas na fundação ou locais de fragilidades estruturais nas interfaces entre solo e concreto ou solo e enrocamento, que usualmente demandam instrumentação específica para seu correto monitoramento a longo prazo. A Tabela 2 apresenta questionamentos geotécnicos importantes relacionando-os com os locais a serem avaliados e os parâmetros a serem monitorados.

Tabela 2 – Exemplos de possíveis questões geotécnicas

Questões a serem respondidas	Componentes a se avaliar	Parâmetros para monitorar
Quais são as condições iniciais do local?	Fundação Ombreiras Bacia drenante	Poropressão Hidrologia Meteorologia
Como o aterro está performando durante a construção?	Fundação Aterro Ombreiras	Poropressão Movimentos horizontais e verticais
Como o aterro está performando durante o primeiro enchimento?	Todos os componentes e área a jusante	Poropressão Movimentos horizontais e verticais Infiltração Sólidos dissolvidos
Como o aterro está performando durante o rebaixamento?	Paramento a montante Taludes naturais adjacentes	Poropressão Estabilidade dos taludes
Como o aterro está performando durante a operação a longo prazo?	Todos os componentes	Todos os parâmetros

Fonte: USACE (1995, p. 18).

De acordo com o USACE (1995), os principais parâmetros e instrumentos ou procedimentos utilizados para monitorar a segurança de um maciço de terra adequadamente são:

- Poropressões em aterros e fundações: piezômetros;

- Vazões de percolação: medidores de vazão;
- Carregamento de material do aterro nos fluxos de água por meio das fundações e/ou maciço (*piping*): medição de turbidez da água percolada;
- Deformação no maciço e fundações: extensômetros de hastes, medidores de recalque, marcos superficiais e inclinômetros;
- Erosões: levantamentos topográficos;
- Sismos: acelerógrafos;
- Tensões no aterro ou fundação: células de pressão total;
- Empuxo de terra sobre estruturas de concreto: células de pressão total.

O Volume VII do Manual do Empreendedor da ANA recomenda a medição das seguintes grandezas para qualquer tipo de barragem: níveis de água a montante e a jusante do reservatório, temperatura da água do reservatório e do ar e precipitações. Porém, há parâmetros importantes de se medir de acordo com o tipo de estrutura, como mostra a Tabela 3 para barragens de aterro.

Tabela 3 – Grandezas a monitorar em barragens de aterro

Grandeza	Tipo de estrutura			
	Terra Enrocamento	Enrocamento com face de concreto	Terra	Terra com Galeria de desvio
Pressões neutras no aterro (poropressões)	X	X	X	X
Recalques do aterro	X	X	X	X
Deslocamentos superficiais (planialtimétricos)	X	X	X	X
Subpressões na fundação	X		X	X
Vazões de percolação	X	X	X	X
Materiais sólidos carregados pelas águas de percolação	X	X	X	X
Pressões totais e poropressões nas interfaces	X		X	X
Deslocamentos diferenciais da junta perimetral		X		
Deslocamentos entre lajes na região das ombreiras		X		
Tensões internas no concreto		X*		
Deflexão da laje de montante		X		
Tensões na interface solo-concreto da galeria				X
Recalques ao longo da galeria				X

* Barragem de altura superior a 100 m

Fonte: ELETROBRAS (2003, p. 251) adaptado por ANA (2016c, p. 78).

Assim como é essencial o armazenamento dos dados da barragem como os projetos, a memória construtiva e o histórico de ocorrências, é muito importante manter os registros e justificativas a respeito da instrumentação. Portanto, o Plano de Monitoramento e Instrumentação de uma barragem deve possuir os seguintes itens essenciais:

- Definição das grandezas a monitorar, objetivando o controle da segurança e do desempenho das estruturas;
- Especificação dos instrumentos a instalar e cuidados a tomar na instalação, bem como dos equipamentos de leitura e de transmissão de dados;
- Frequência das leituras e metodologias de processamento dos dados;
- Manutenção dos instrumentos (ANA, 2016a).

2.3.1 Medição de vazão

Uma das primeiras grandezas serem verificadas quando se supervisiona as condições de segurança de um barramento é a aferição das vazões de drenagem. As barragens não são estruturas estanques, logo, sempre haverá infiltrações por meio do aterro compactado ou das fundações, e a medição desses fluxos é de grande importância na supervisão do seu funcionamento (SILVEIRA, 2006).

A medição das vazões de percolação pode ser realizada com o uso de drenos da fundação e/ou a correta condução do fluxo que passa pelo sistema de drenagem interna do maciço, de forma que o mesmo seja corretamente aferido. No início da operação da barragem, essas medidas objetivam controlar o efeito dos drenos, todavia, essa medição deve ser mais cuidadosa no caso de haver surgências, pois o aumento de vazões que infiltram no maciço pode ser bastante nocivo para a integridade do mesmo. As metodologias de medição dependem das condições locais, sendo que os equipamentos mais empregados são os vertedouros triangulares e retangulares, além de recipientes com volume sabido que possam ser enchidos em um período menor que 30 segundos (COSTA, 2012).

O modo de medição comumente adotado é a construção de caixas de concreto que recebem o fluxo de percolação corretamente conduzido, as quais possuem em sua saída um dispositivo vertedouro formado por uma placa delgada com abertura em “V”, geralmente metálica ou acrílica. O cálculo da vazão é feito realizando-se a medida resultante da diferença de altura entre a lâmina d’água – medida 1 metro a montante da placa – e o vértice do vertedor, e utilizando-a em uma fórmula hidráulica condizente com o vertedor adotado (ANA, 2016a).

O medidor de vazão pode aferir o fluxo que percola nas ombreiras de uma barragem, maciços de terra ou enrocamento, fundações de estruturas de aterro ou de concreto. Para manter as boas condições do instrumento é importante evitar a oxidação e depósito de lodo na régua do medidor, manter o contato entre a chapa e o concreto isento de vazamentos e remover sedimentos, detritos ou qualquer depósito indevido de dentro da caixa (FUSARO, 2007). A Figura 12 apresenta um medidor de vazão de águas percoladas no trecho de uma barragem, com sua bacia de aproximação e canal de restituição. A Figura 13 mostra um exemplo de medidor de vazão cujo fluxo medido provém de poços de alívio, estruturas que consistem em furos de drenagem abertos com o fim de reduzir as subpressões na fundação devido à percolação de água (MIRANTE, 2016).

Figura 12 – Medidor de vazão de percolação na Barragem Morros, São José de Piranhas-PB



Fonte: autora (2021).

Figura 13 – Medidor de vazão de percolação na Barragem de Porcos, Brejo Santo-CE



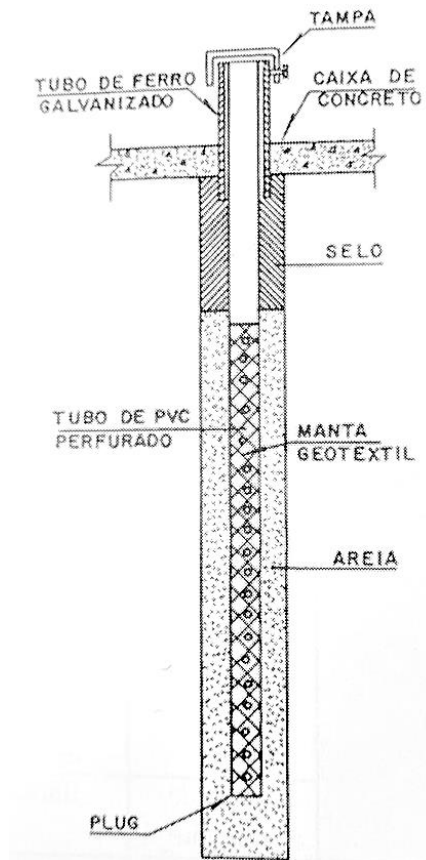
Fonte: autora (2021).

2.3.2 Medição do nível de água

Para a determinação da posição da linha freática, é comum a utilização de tubos medidores de nível d'água. Esses instrumentos consistem em um furo de sondagem onde é inserido um tubo de PVC perfurado envolto por uma tela ou manta geotêxtil. A área anelar ao redor do tubo é preenchida com areia para evitar colmatção, e acima do trecho perfurado executa-se um selo de solo-cimento a fim de evitar a passagem de águas superficiais e/ou pluviais (FUSARO, 2007). A Figura 14 mostra o esquema de um medidor de nível d'água.

É muito relevante o conhecimento da posição exata da linha freática no interior do maciço compactado de um barramento, pois contribui para uma análise de estabilidade mais verossímil, além de uma melhor interpretação de dados piezométricos. A leitura desse parâmetro geralmente é executada utilizando-se um cabo graduado que possui um sensor elétrico em sua extremidade inferior, e um emissor luminoso ou sonoro em sua superfície (FONSECA, 2003). Desse modo, o nível d'água é o resultado da subtração entre a cota de topo do tubo e a leitura medida (CRUZ, 1996).

Figura 14 – Medidor de nível d'água



Fonte: Cruz (1996, p. 610).

Em barragens de aterro, o medidor de nível d'água é instalado com frequência nas áreas de jusante e dentro de tapetes horizontais e filtros verticais, pois pode apontar a colmatção do sistema de drenagem interna e constatar carga hidráulica no local. É considerado um dos instrumentos de medida mais confiável, pois seu funcionamento pode ser facilmente verificado adicionando ou retirando água de seu interior (CRUZ, 1996). A Figura 15 mostra a caixa protetora de um medidor de nível d'água, usualmente chamado de MNA.

Figura 15 – Medidor de nível d'água da Barragem Morros, em São José de Piranhas-PB



Fonte: autora (2021).

2.3.3 Medição de poropressões

O equipamento que mede a subpressão em contato com estruturas de concreto ou a pressão neutra (poropressão) em maciços de terra ou rochoso é o piezômetro. Esse instrumento mede a pressão em uma região delimitada do maciço ou fundação, podendo ter diversas configurações. A escolha do tipo de piezômetro depende de parâmetros como custo, confiabilidade, durabilidade, sensibilidade e possibilidade de leituras automatizadas. O tempo de resposta de um piezômetro é um aspecto relevante na escolha do instrumento, esse valor é o período requerido para que a coluna d'água se estabilize no piezômetro após a variação de pressão no local. Esse parâmetro é inversamente proporcional à permeabilidade do solo na região e diretamente proporcional à seção transversal (SMIDERLE, 2014).

As pressões intersticiais nas fundações de uma barragem são produzidas não somente pela carga hidráulica provinda do reservatório, mas também pelas tensões de carregamento geradas pela própria implantação do barramento. O conhecimento e registro dessas poropressões viabiliza uma avaliação da situação real de drenagem interna e da eficiência dos dispositivos de vedação empregados. Para uma análise adequada dessas medidas, deve-se selecionar para instrumentação, seções transversais da barragem que sejam representativas no

que tange características geológico-geotécnicas da região e anisotropia naturais dos solos existentes (FONSECA, 2003).

A carga piezométrica é o valor da poropressão ou pressão neutra em um ponto submetido a um fluxo interno ou à percolação de água em uma barragem. Este valor é função das condições de contorno ou de fluxo do maciço ou da fundação da estrutura, tais como para o fluxo estabelecido, o rebaixamento rápido do reservatório ou um indicativo de uma condição anômala, por exemplo, decorrente de deformações cisalhantes (CRUZ, 1996).

Silveira (2006) explana sobre as variações das tensões efetivas em decorrência dos valores da poropressão no cisalhamento. O aumento da poropressão a um determinado valor pode ser um indicativo da real necessidade de uma mudança das premissas da carta de segurança piezométrica de uma barragem. Todos os cálculos de estabilidade relacionam a resistência ao cisalhamento disponível com a mobilizada para obtenção dos fatores de segurança. A leitura do piezômetro está relacionada à rede de fluxo atuante no barramento, e a poropressão obtida com a rede de fluxo está relacionada à tensão efetiva, parâmetro essencial para o cálculo da resistência ao cisalhamento do aterro e da fundação.

Fusaro (2007) aponta que os piezômetros auxiliam na verificação de diversas situações além da estabilidade do maciço. Quando instalados a montante e a jusante de uma cortina de injeção ou de vedação (*cut offs*), possibilitam a verificação de seu funcionamento. Permitem também a averiguação da eficiência de uma cortina de drenagem ou instalação de poços de alívio por meio da taxa de redução em relação à carga hidráulica gerada pelo reservatório. Além disso, a autora alerta que variações crescentes ou decrescentes nas medições de piezometria podem ser preocupantes, pois a obstrução de um dreno causa aumento de pressões, porém o *piping* pode gerar um decréscimo de pressão semelhantemente a implementação de um dreno.

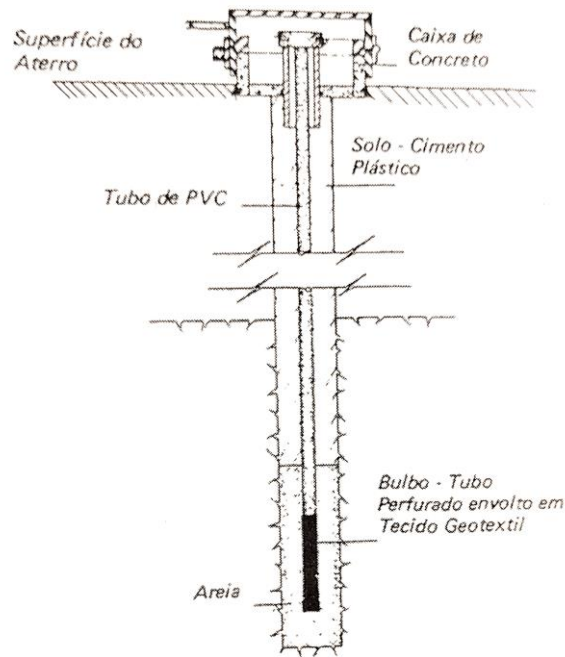
Segundo Cruz (1996), os piezômetros mais utilizados no meio técnico da engenharia brasileira são: piezômetro de tubo aberto, piezômetro pneumático, piezômetro hidráulico, piezômetro elétrico de resistência e piezômetro elétrico de corda vibrante. Neste trabalho serão abordados dois tipos de piezômetros: piezômetros tipo Casagrande modificado de tubo aberto e piezômetros elétricos.

2.3.3.1 Piezômetro Casagrande modificado de tubo aberto

A estrutura desse instrumento consiste em um tubo de PVC instalado em um furo de sondagem com um elemento poroso em sua extremidade inferior, chamado de bulbo. Como mostra a Figura 16, ao longo do tubo o furo é preenchido com solo-cimento plástico ou

bentonita, e na região do bulbo preenche-se com areia, demarcando assim a área drenante do instrumento (FUSARO, 2007).

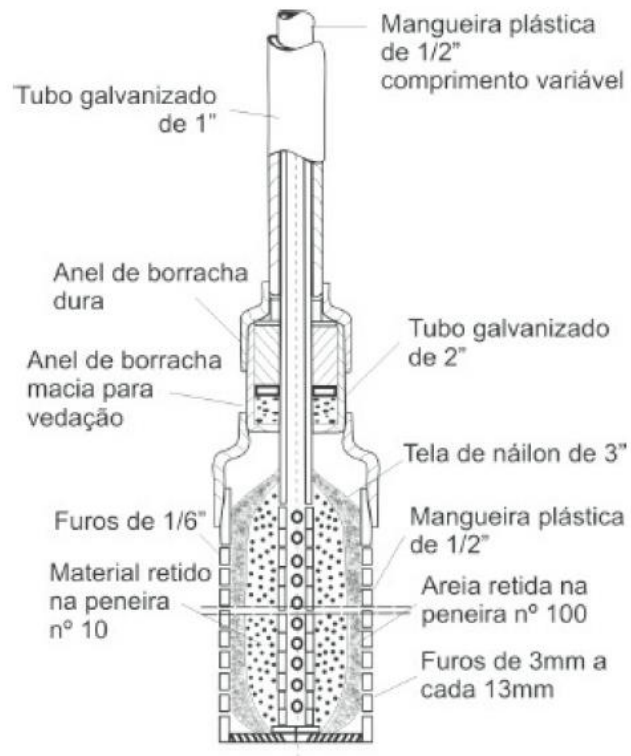
Figura 16 – Representação de um piezômetro de tubo aberto



Fonte: Cruz (1996, p. 611).

De acordo com Silveira (2006), a água situada nos poros do solo atravessa o bulbo drenante até equilibrar-se com a poropressão na região, que tem valor igual à altura d'água formada no tubo do instrumento. Os primeiros piezômetros desse tipo adotavam como elemento poroso da base uma vela de filtro e ficaram conhecidos como Casagrande devido ao seu criador Arthur Casagrande. Posteriormente, adotou-se um sistema formado por duas tubulações no bulbo, com um filtro de areia interno, como mostra a Figura 17. Esse instrumento é amplamente utilizado para observação de subpressões ou poropressões devido ao seu ótimo desempenho, baixo custo e durabilidade. A Figura 18 mostra dois piezômetros instalados no talude de jusante do Dique Pereiros, estrutura pertencente à Barragem Boa Vista, em São José de Piranhas-PB.

Figura 17 – Perfil de um Piezômetro tipo Casagrande modificado de tudo aberto



Fonte: Silveira (2006, p. 57).

Figura 18 – Caixa de proteção de Piezômetros tipo Casagrande modificado de tubo aberto



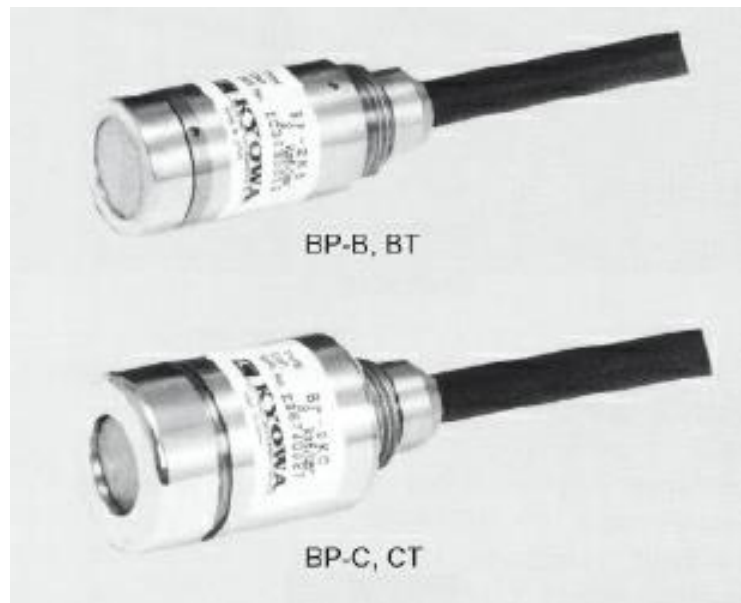
Fonte: autora (2021).

A leitura do Piezômetro de tubo aberto é realizada utilizando uma sonda elétrica milimetrada conhecida como Pio, que é inserido no tubo e emite um sinal sonoro ao atingir a coluna d'água (ANA, 2016a). O valor da poropressão é o resultado da subtração entre a cota de topo e a cota de fundo do instrumento, menos o valor da leitura do pio. Por isso, é necessário haver muita atenção em relação à execução e registro de sua cota de instalação.

2.3.3.2 Piezômetros Elétricos

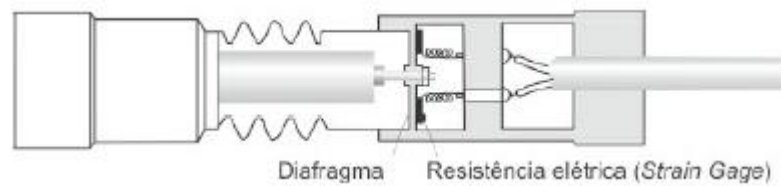
Segundo Smiderle (2014), “os piezômetros elétricos são constituídos de um diafragma de aço inoxidável sensível à pressão associado à extensômetros elétricos de resistência”. Após passar por um filtro, a água causa um fletimento no diafragma, que resulta em deformações nos extensômetros, fazendo com que sua resistência se altere e gerando uma resposta elétrica equivalente à pressão atuante. A determinação da pressão neutra se dá por meio de fórmulas específicas de cada tipo de instrumento, com constantes de calibração referentes ao local (FUSARO, 2007). A Figura 19 e a Figura 20 apresentam um modelo de piezômetro elétrico.

Figura 19 – Piezômetros de resistência elétrica tipo Kyowa



Fonte: Silveira (2006, p. 69).

Figura 20 – Esquema de funcionamento de um piezômetro de resistência da Kyowa



Fonte: Silveira (2006, p. 69).

No geral, os piezômetros elétricos possuem menor tempo de resposta, pois precisam de um pequeno volume de água para causar as deformações necessárias para enviar a saída elétrica que possibilita a leitura. Outra vantagem desse instrumento é o fato de que ele é mais favorável para a automação das leituras, além de realizar medições de pressão neutras negativas (CRUZ, 1996). Entre as desvantagens desse tipo de piezômetro, pode-se citar o seu maior custo, a possível danificação devido a sobretensões ou descargas elétricas e a impossibilidade de conserto em casos de avarias (FONSECA, 2003).

2.3.4 Medição de deslocamentos

Sempre ocorrerão deslocamentos na construção de barragens de terra ou enrocamento. Essas movimentações podem ser recalques do maciço, da fundação ou recalques diferenciais entre seções transversais do barramento, e podem causar danos se não foram corretamente examinadas e abrandadas no projeto. A relevância dos deslocamentos dependerá dos métodos construtivos adotados e dos aspectos do aterro e do projeto. Pode-se causar sobre-elevação da crista da barragem devido a recalques da fundação e no aterro compactado, e os recalques diferenciais podem causar trincas ao longo do corpo da barragem (SILVEIRA, 2006).

Existem diversos instrumentos para medição de deslocamentos. Esses equipamentos devem possuir referências topográficas chumbadas em locais que possam ser considerados como indeslocáveis da perspectiva técnica, de modo que apresentem então medidas confiáveis e deslocamentos absolutos (CRUZ, 1996). Segundo Fusaro (2007), as deformações mais importantes a se medir em barramentos e suas fundações são: deslocamentos horizontais – com marcos de recalque superficial; recalque no interior de maciços – medidor de recalque magnético ou inclinômetro de recalque; deformação de maciços – inclinômetro de deflexão; e recalques de fundação – extensômetros de hastes. A Tabela 4 apresenta diversos instrumentos utilizados para medição de deslocamentos.

Tabela 4 – Tipos de instrumentos medidores de deslocamentos

Deslocamentos Verticais (recalques)		Deslocamentos Horizontais
Instalados verticalmente	Medidor de recalque Telescópico (IPT)	Extensômetros múltiplos horizontais
	Medidor de recalque USBR	Inclinômetros
	Medidor de recalque KM	Cadeia de inclinômetros fixos
	Medidor de recalque Magnético	Eletrônicos
Instalados horizontalmente	Célula hidráulica de recalque	Fita de Cisalhamento
	Medidor de recalque de corda vibrante	
	Medidor contínuo de recalque	
Marcos de deslocamento superficial		

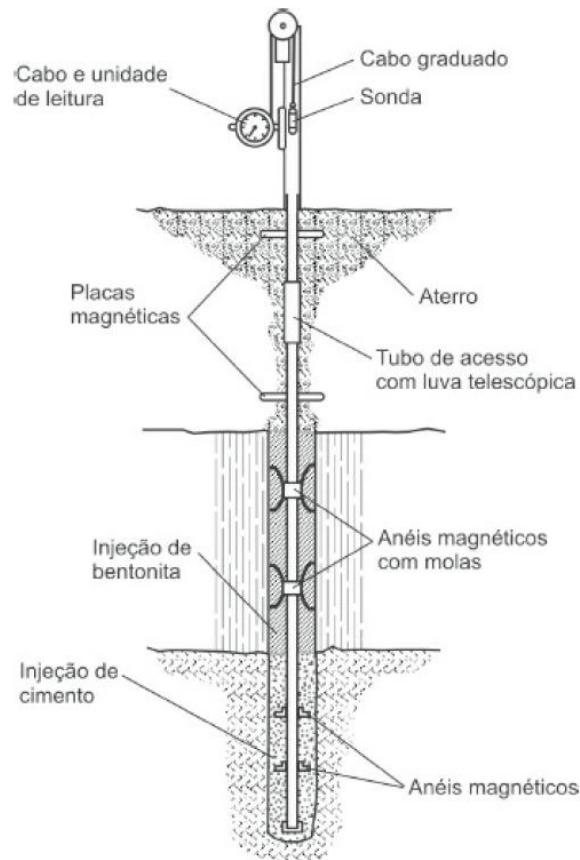
Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

Neste trabalho, serão apresentados os instrumentos mais utilizados para monitorar os deslocamentos nas barragens de terra e enrocamento brasileiras, que são: medidor de recalque magnético, medidor de recalque telescópico, marcos de deslocamento superficiais, inclinômetros de deflexão e extensômetros de hastes.

2.3.4.1 Medidor de recalque magnético

Esse instrumento mede o recalque da fundação e do maciço terroso de modo conjunto. O equipamento é instalado em um ponto julgado como indeslocável na fundação rochosa, sendo formado por um tubo-guia de PVC com luvas espaçadas adequadamente e com anéis magnéticos de referência no entorno do tubo em sua base indeslocável. Na extensão desse tubo são instaladas placas magnéticas (placas de recalque com ímãs) com um orifício em seu centro, como pode ser observado na Figura 21. A leitura é feita com uma sonda magnética acoplada à uma fila milimetrada que, ao passar pelas placas magnéticas emitem um sinal sonoro ou luminoso, permitindo-se saber suas cotas em relação ao topo do tubo (FUSARO, 2007).

Figura 21 – Perfil de instalação de um medidor magnético de recalque



Fonte: Silveira (2006, p. 208).

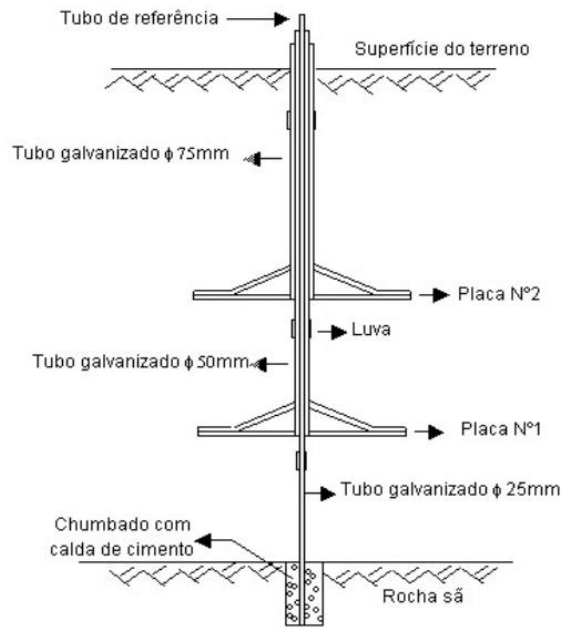
Na base do instrumento são instalados anéis externos porque o tubo é inserido em um furo de sondagem rotativa na rocha. No caso de instrumentação de aterros já existentes, instalam-se anéis magnéticos com molas (ou “aranhas magnéticas”) ao longo do tubo, que são arcos instalados ao seu redor e, após o correto posicionamento, são “armados” no aterro por meio de cabos de arame que os puxam no espaço anelar de sobra do furo de sondagem. Quando a instalação é feita ao longo do alteamento do aterro, adotam-se placas magnéticas. Os valores de recalques são resultado da diferença entre as cotas de leitura das placas e o anel magnético de referência instalado em local indeformável (FONSECA, 2003).

2.3.4.2 Medidor de recalque telescópico

Amplamente utilizado no Brasil, esse instrumento também é conhecido como Medidor de Recalque tipo IPT, pois foi concebido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (SILVEIRA, 2006). O medidor de recalque telescópico é formado por um tubo galvanizado de 25 mm, instalado em base indeformável, e uma série de placas acopladas a outros tubos

galvanizados com diâmetros decrescentes de cima para baixo. Como mostra a Figura 22, conforme as camadas de aterro do barramento vão sendo executadas, instala-se uma nova placa com tubo encaixado concentricamente ao tubo de referência (COSTA, 2012). A Figura 23 mostra um medidor de recalque telescópico instalado no talude de jusante da barragem de Cana Brava, em Salgueiro-PE.

Figura 22 – Medidor de recalque de tubos telescópicos



Fonte: Fonseca (2003, p. 41).

Figura 23 – Medidor de recalque telescópico na Barragem de Milagres, Salgueiro-PE.



Fonte: autora (2021).

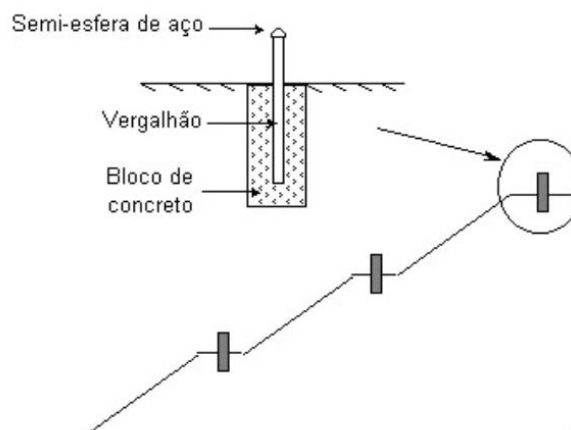
De acordo com Cruz (1996), na extremidade superior dos tubos realiza-se um punção, e a leitura de cada placa é realizada ajustando um compasso de pontas secas nas punções do tubo de referência e no tubo da placa a ser medida. Feito isso, usando uma escala milimetrada, mede-se a distância entre as pontas do compasso. O recalque da placa em questão será a subtração entre a leitura do momento e a leitura inicial da placa, mais a constante da placa (recalque anterior da mesma, quando obtida a sua leitura inicial, no fim da implantação do medidor). O recalque de cada camada delimitada pelas placas se dá da seguinte forma:

- Recalque camada 0/1 = recalque placa 1;
- Recalque camada 1/2 = recalque placa 2 – recalque placa 1 + recalque placa 1 quando a placa 2 foi instalada;
- Recalque camada (i-1)/i = recalque placa i – recalque placa (i-1) + recalque placa (i-1) quando a placa i foi instalada (CRUZ, 1996).

2.3.4.3 Marcos de deslocamento superficiais

Conforme apontado por Fonseca (2003), os marcos de deslocamento superficiais possibilitam a observação de deslocamentos verticais e horizontais de barragens de terra, enrocamento e concreto. Esse instrumento é composto por um vergalhão de aço chumbado em um bloco de concreto e uma semiesfera alocada em sua extremidade superior. Usualmente são instalados na crista, bermas e talude de jusante, como mostra a Figura 24. A Figura 25 mostra um marco de deslocamento superficial instalado na crista da Barragem de Porcos, em Brejo Santo-CE.

Figura 24 – Esquema de locação e instalação de Marcos Superficiais



Fonte: Fonseca (2003, p. 16).

Para efetuar a leitura dos deslocamentos dos marcos superficiais, deve-se instalar também estações topográficas de referência, que são instrumentos semelhantes aos marcos, porém mais robustas, e devem ser fixas em locais indeformáveis, numa área externa à região de influência da barragem. Os valores dos recalques são definidos com nivelamentos de precisão, e os deslocamentos horizontais, através de triangulação ou colimações geodésicas. É importante dar preferência para a instalação dos marcos a partir de um mesmo alinhamento a fim de viabilizar as colimações topográficas, pois é um método consideravelmente mais preciso que as triangulações (SILVEIRA, 2006).

Figura 25 – Marco de deslocamento superficial na crista e demais instrumentos a jusante na Barragem de Porcos, em Brejo Santo-CE



Fonte: autora (2021).

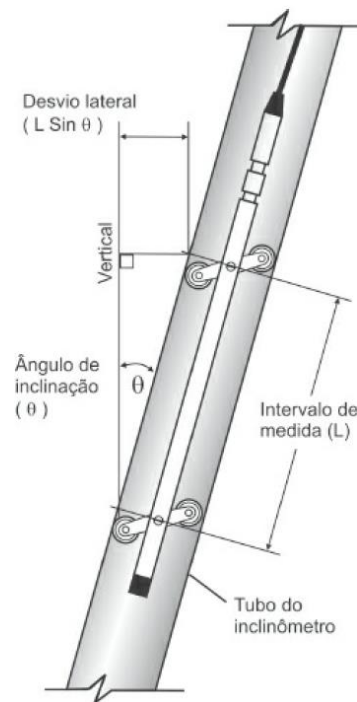
2.3.4.4 Inclínômetros de deflexão

Os inclinômetros de deflexão são instrumentos que permitem a elaboração de perfis de deslocamentos de maciços de terra e enrocamento (FUSARO, 2007). São formados por um conjunto de segmentos de tubos – que podem ser metálicos ou plásticos – implementados no sentido horizontal, sub-horizontal ou inclinados, dependendo do perfil de deslocamentos que se pretende obter, com sua base em local fixo na fundação (ANA, 2016a). Esses tubos possuem

quatro ranhuras posicionadas diametralmente, geralmente nas posições ombreira esquerda/ombreira direita e montante/jusante (CRUZ, 1996). A medição é realizada utilizando um sensor à prova d'água atrelado a um cabo que transmite sinais elétricos para o dispositivo de leitura, indicando a inclinação do sensor em relação à posição vertical – no caso de tubos instalados verticalmente (ANA, 2016a).

Para a leitura dos deslocamentos horizontais, por exemplo, o sensor é introduzido no tubo instalado horizontalmente até a sua base e içado de forma lenta, com a efetuação de leituras a cada meio metro. A inclinação do tubo-guia e, por consequência, desse torpedo, é transformada em dados de desvios horizontais de deslocamentos, como apresenta a Figura 26.

Figura 26 – Ângulo de inclinação e desvio lateral do tubo guia de um inclinômetro



Fonte: Silveira (2006, p. 259).

A instalação dos inclinômetros pode ser executada em furos de sondagem ou conforme é efetuado o alteamento do aterro, no caso de maciços compactados. No caso de instalação em furos de sondagem, deve-se preencher o espaço entre os segmentos de tubo e o furo com uma mistura de solo, cimento e bentonita, a fim de reduzir a dispersão dos resultados quando comparado com um preenchimento de areia nessa área (CRUZ, 1996).

2.3.4.5 Extensômetros de hastes

Os extensômetros de hastes têm como objetivo a medição de deslocamentos e deformações em maciços rochosos e blocos de estruturas de concreto. São formados por um grupo de hastes metálicas, protegidas por tubos ou mangueiras plásticas, instaladas em um furo de sondagem e fixadas na rocha em cotas distintas. No topo dessas hastes há um cabeçote de leitura que determina os deslocamentos, como ilustra a Figura 27 (FUSARO, 2007).

Figura 27 – Exemplo de extensômetro de haste



Fonte: Fusaro (2007, p. 33).

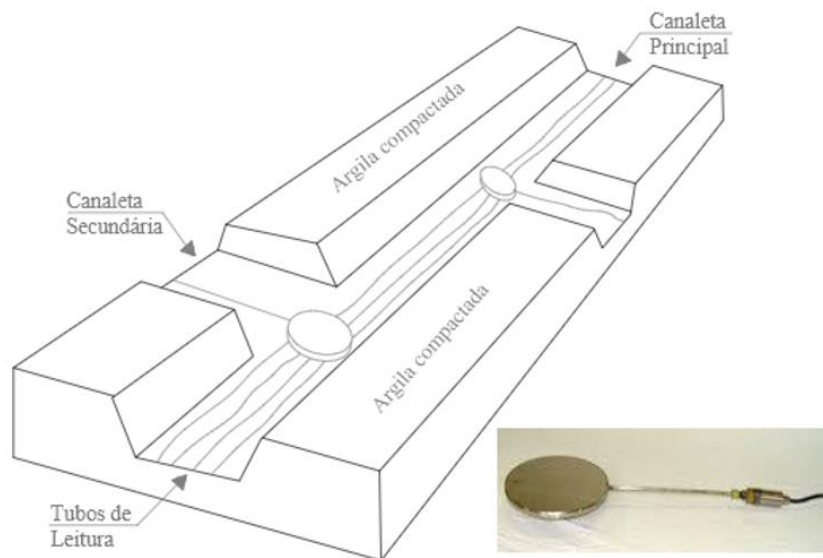
A obtenção dos recalques que ocorrem em barragens de concreto devido a deformações em sua fundação é um dos parâmetros mais relevantes na observação dessas estruturas. O extensômetro é usado com o fim de mensurar deformações e deslocamentos ocorridos entre pontos da fundação em função das cargas provenientes da construção da barragem, enchimento do reservatório e variações do nível durante sua operação. Esse instrumento mede o deslocamento entre o local de fixação das hastes e a cabeça do instrumento através de potenciômetros conectados ao cabeçote de leitura. Os potenciômetros são resistores de grande

precisão que possuem uma derivação que possibilita a variação do valor de resistência a partir do movimento de um eixo (SANTOS, 2018).

2.3.5 Medição de tensão total

A leitura de tensões totais tem como principal propósito indicar os esforços que o aterro exerce sobre alguma superfície. O instrumento utilizado para essa medição é a célula de tensão total, cujo tipo mais comum consiste em uma almofada metálica formada por duas placas de aço inoxidável soldadas de forma hermética nas suas bordas, tendo seu interior preenchido com óleo desgaseificado, como ilustrado na Figura 28. A medição da pressão gerada dentro da célula é feita através de um sensor que converte a resposta de pressão em uma resposta elétrica, ligado a um cabo com condutores até o equipamento de leitura (COSTA, 2012).

Figura 28 – Células de tensão total instaladas em argila compactada e exemplo de uma célula



Fonte: Smiderle (2014, p. 45).

Silveira (2006) aponta que a medição de tensões totais é importante em pontos do barramento que podem ocorrer atenuação das tensões verticais devido ao arqueamento do solo argiloso como: em *canyons* com taludes subverticais, *cut-offs* em rocha, núcleo vertical em barragens de encoramento, área de contato do aterro com estruturas de concreto, nos muros de abraço etc. O arqueamento do solo causa um alívio de tensões verticais pela tendência do solo

de se apoiar em materiais com maior rigidez que esteja em contato, diminuindo sua tensão vertical efetiva, tornando o meio propício para o desenvolvimento de erosão interna no maciço, a segunda maior causa de acidente em barragens de terra, como abordado no item 2.2.

A ANA (2016a) aponta a importância de que esses instrumentos sejam implementados junto a piezômetros na região de instalação, para que possa haver a estimativa da distribuição de tensões efetivas no local, pois a medição exclusiva da pressão total não pode apontar nada a respeito das chances de haver o desenvolvimento de erosões internas, porém a diminuição da pressão efetiva aponta uma possibilidade de ocorrer esse processo (SILVEIRA, 2006).

2.4 PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

Pinto (2006) afirma que os solos são materiais permeáveis devido à presença de vazios conectados, onde a água pode se movimentar, partindo dos pontos de maior energia para os de menor energia. O transporte da água no interior do solo e as tensões geradas por ela são relevantes para análises de diversas situações práticas, tais como:

- Cálculo de vazões, como a quantia de água infiltrada em uma escavação;
- Estudo de recalques, pois com frequência os deslocamentos em uma estrutura estão ligados à redução do índice de vazios devido à saída de água destes vazios;
- Análises de estabilidade, pois a tensão efetiva – parâmetro que controla a resistência do solo – depende da pressão neutra, fator diretamente relacionado com as tensões causadas pela percolação da água.

2.4.1 Lei de Darcy

Em 1850, Darcy demonstrou de forma experimental como os parâmetros geométricos, apresentados na Figura 29, influenciam no fluxo de água pelo solo e obteve a equação (1), que é chamada pelo seu nome.

$$Q = k \times \frac{h}{L} \times A = k \times i \times A \quad (1)$$

Q = vazão percolada pelo solo (m³/s/m)

k = coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (m/s)

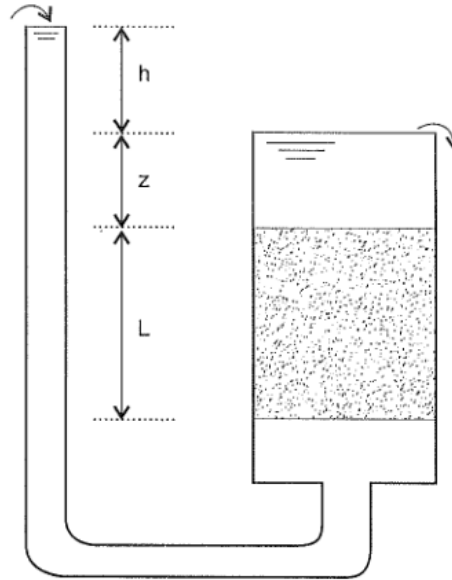
h = carga que se dissipa na percolação (m.c.a)

L = distância ao longo da qual a carga se dissipa (m)

A = área do permeâmetro (m²)

i = gradiente hidráulico

Figura 29 – Percolação de água em um permeâmetro



Fonte: Pinto (2006, p. 102).

A relação entre a carga dissipada pelo atrito viscoso do solo e a distância pela qual a mesma se dissipa é chamada de Gradiente hidráulico. A partir dessa equação, pode-se constatar que a velocidade de percolação é o produto entre a condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico. Gerscovich (2016) ressalta que, partindo-se da Equação de Bernoulli (2), que representa o princípio da conservação de energia, a carga total em um ponto é a soma das cargas de pressão, de elevação e de velocidade.

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (2)$$

H = carga total

z = carga altimétrica

u = pressão neutra

γ_w = peso específico da água

v = velocidade

g = aceleração da gravidade

Observando a Figura 29, pode-se constatar que na face superior da areia, a carga piezométrica é igual a z , e a carga altimétrica é L – considerando-se a face inferior como referência – e a carga total é a soma de ambas. Já na face inferior, a carga altimétrica é nula, e

a carga piezométrica é a soma de z , L e h . Ainda que a carga total na face superior seja maior, o fluxo ocorrerá de forma ascendente, pois a carga total é maior na face inferior. A diferença de carga total dos pontos é o h , valor usado no cálculo do gradiente hidráulico (PINTO, 2006).

2.4.2 Equação de Laplace

As equações de continuidade atestam que a diferença de vazão entre a entrada e a saída de um elemento corresponde à variação do volume de água no tempo decorrido. Tendo isso e considerando a validade da Lei de Darcy, a equação geral de fluxo bidimensional nos meios porosos é determinada pela equação (3) (GERSCOVICH, 2016).

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \left(e \frac{\partial S}{\partial t} + S \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (3)$$

k_i = condutividade hidráulica ou permeabilidade na direção i

h = carga total

e = índice de vazios

S = grau de saturação

t = tempo

Ao se considerar que: o fluxo de água no solo acontece na área saturada ($\frac{\partial S}{\partial t} = 0$); desprezando a variação volumétrica causada pelo movimento da água no solo ($\frac{\partial e}{\partial t} = 0$), tem-se a equação (4).

$$k_x \frac{\partial h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial h}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

A equação (4) é a equação fundamental para análise de um fluxo bidimensional em uma dada região de fluxo em um meio poroso com anisotropia em relação à permeabilidade $k_x \neq k_y$, caso comum dos aterros argilosos de barragens compactados em camadas. Assumindo isotropia em relação à condutividade hidráulica ($k_x = k_y$) e que os grãos e água são incompressíveis; desprezando-se os efeitos da capilaridade e considerando-se fluxo estacionário (gradiente hidráulico constante), a equação (5) se resume à equação de Laplace, utilizada para descrever diversos eventos físicos.

$$\frac{\partial h}{\partial x^2} + \frac{\partial h}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

Existem diversos métodos para a solução da equação de Laplace, tais como:

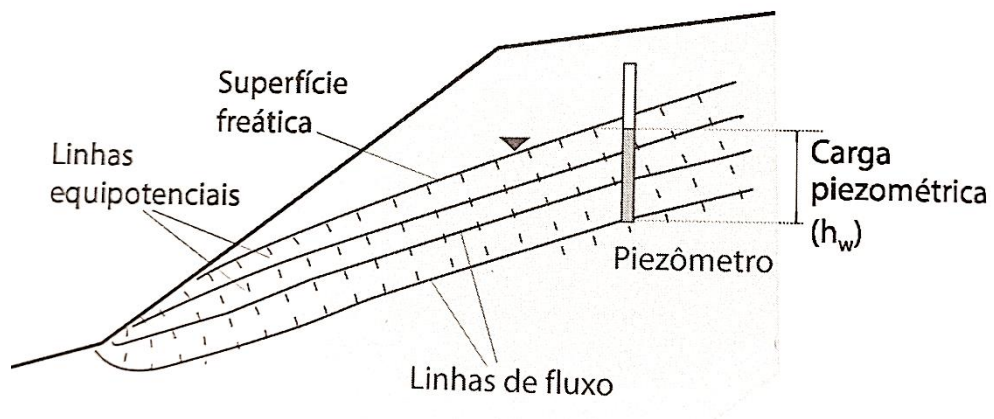
- Métodos gráficos, com redes de fluxo;
- Métodos numéricos;
- Solução analítica, nos casos simples;
- Modelos analógicos;
- Modelos físicos reduzidos.

A seguir serão abordados tópicos das duas soluções com grande volume de aplicação nos problemas de engenharia de barragens: redes de fluxo e métodos numéricos.

2.4.2.1 Redes de fluxo

A solução por redes de fluxo é composta por dois grupos de funções, que podem ser representadas, no caso da água no solo, pelas linhas equipotenciais e as linhas de fluxo, ortogonais entre si quando formadas em meios homogêneos e isotrópicos com relação a permeabilidade. A linha de fluxo é a trajetória em que uma partícula de água se movimenta de montante para jusante, por meio do solo. A linha freática é a linha de fluxo superior, onde atua a pressão atmosférica. Nesses pontos, a carga é puramente altimétrica, pois a carga piezométrica é nula. A linha equipotencial é o lugar geométrico dos pontos que apresentam a mesma carga hidráulica total, ou seja, ao se posicionar diversos piezômetros em uma linha equipotencial, esses apresentarão a mesma cota do nível d'água em seu interior (DAS, 2007). A Figura 30 apresenta os componentes de uma rede de fluxo em um aterro e, no detalhe, um piezômetro e a definição da carga piezométrica.

Figura 30 – Carga de pressão em rede de fluxo a carga piezométrica em um piezômetro



Fonte: Gerscovich (2016, p. 72).

As redes de fluxo em meios homogêneos e isotrópicos ($k_x=k_y$) possuem propriedades básicas, como: as linhas de fluxo e equipotenciais são ortogonais entre si; a vazão nos diferentes canais de fluxo é um valor constante por unidade de comprimento; as linhas de fluxo não se cruzam, pois uma partícula de água não pode possuir duas trajetórias distintas; as linhas equipotenciais também não se interceptam pois não pode haver duas cargas totais diferentes no mesmo ponto; e a perda de carga existente entre duas linhas equipotenciais sucessivas é sempre constante (MARANGON, 2018).

De acordo com Massad (2010), tendo-se a rede de fluxo, pode-se obter a vazão por metro de seção transversal e a pressão neutra em qualquer ponto, conforme a seguir:

- i) Perda de água ou vazão (Q) por metro de seção transversal

$$Q = k \times H \times \left(\frac{n_c}{n_q} \right) \quad (6)$$

Q = vazão por metro de seção transversal

H = carga total a ser dissipada

n_c = número de canais de fluxo

n_q = número de espaços equipotenciais (perdas de carga ΔH)

- ii) Carga hidráulica total (H) e pressão neutra ou poropressão (u) em qualquer ponto de uma rede de fluxo, pode ser definida partindo-se da equação de Bernoulli (2), resultante na expressão (7) ao considerar-se que a velocidade da água no solo é de baixa magnitude, então em termos práticos pode-se desprezar essa parcela de energia.

$$H = \frac{u}{\gamma_w} + z \quad (7)$$

u = pressão neutra no ponto

γ_w = peso específico da água

H = carga total do ponto

z = carga altimétrica do ponto

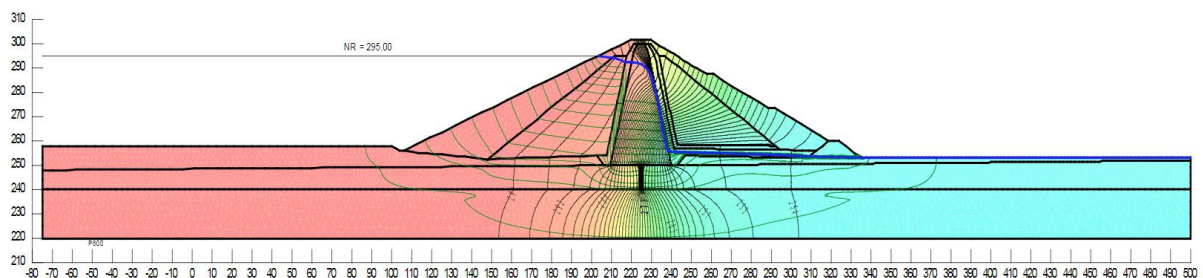
2.4.2.2 Métodos Numéricos – Método dos Elementos Finitos

Embora o fluxo obedeça à Lei de Darcy e à equação de Laplace, as redes de fluxo segundo proposto por Casagrande em 1937, não se aplicam a barragens que possuem a permeabilidade variável, não apenas vertical e horizontalmente, mas também conforme o nível

de tensões. Atualmente, se utilizando de métodos numéricos, pode-se traçar qualquer rede de fluxo, com diversas composições de permeabilidades, contando que se tenha um bom programa computacional e que as condições de entrada e saída sejam adequadamente ajustadas (CRUZ, 1996).

Geralmente, para os estudos de percolação e estabilidade, basta considerar modelos planos de fluxo em regime permanente, explorados através de soluções em métodos numéricos que adotam métodos de elementos finitos, como o exemplo da Figura 31. Existem diferentes programas de cálculo automático no mercado, os quais adotam a condutividade hidráulica como função da pressão do escoamento e indicam a posição da linha de saturação iterativamente, para os escoamentos não confinados, caso das barragens de aterro (ANA, 2016e).

Figura 31 – Análise de percolação em regime permanente pelo método dos elementos finitos



Fonte: ANA (2016e, p. 67)

Strufaldi (2004) enuncia que um estudo de percolação por meio do Método de Elementos Finitos é executado em três passos. Primeiramente, modela-se o problema, por meio da definição da malha de elementos finitos, determinação das características de permeabilidade dos materiais presentes e indicação das condições de contorno. A segunda etapa é o processamento do modelo por meio da formulação do sistema de equações de elementos finitos e sua respectiva solução. O terceiro passo consiste na avaliação dos resultados – cargas hidráulicas, pressões neutras, gradientes e vazões.

3 METODOLOGIA

3.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O objeto de estudo desse trabalho é uma barragem de terra homogênea, chamada Cana Brava e situada no município de Brejo Santo, no estado do Ceará. Essa estrutura faz parte do Eixo Norte do Projeto de Integração do São Francisco, também chamado de PISF ou Transposição do Rio São Francisco. O objetivo do estudo de caso apresentado neste trabalho consiste em uma simulação da definição de níveis de controle – ou carta piezométrica – dos piezômetros localizados em três seções transversais instrumentadas da barragem estudada.

A definição de níveis de controle piezométricos da barragem tem como base elementos técnicos, como as seções do projeto implantado, histórico de leituras de piezômetros e parâmetros dos materiais do aterro e da fundação do empreendimento. Porém, os níveis de controle piezométricos obtidos e definidos nas simulações e conclusões têm caráter de cunho acadêmico.

3.1.1 O Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias do Nordeste Setentrional (PISF)

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional abrange partes dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte e visa otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos nas regiões receptoras, para regularização do fornecimento de água com o objetivo de compensar os efeitos da seca. O serviço de adução de água bruta do PISF consiste no fornecimento dos volumes pactuados nos pontos de entrega dos estados beneficiados.

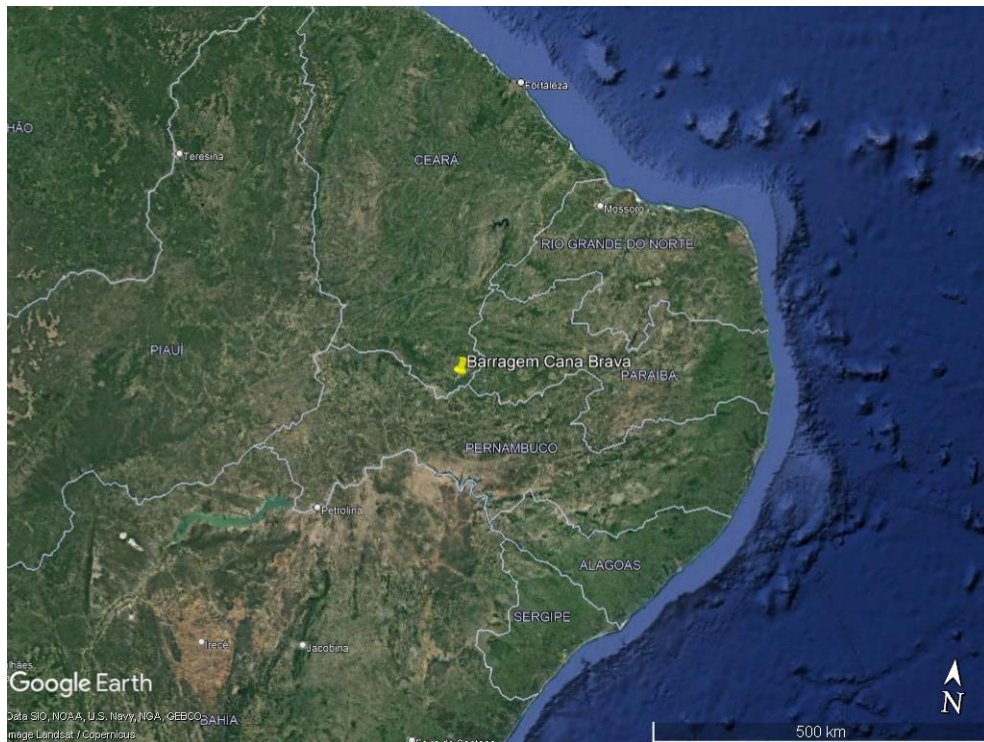
O PISF é constituído de dois grandes eixos de transposição, denominados Eixo Norte e Eixo Leste, que têm início em estações de bombeamento do Rio São Francisco, prosseguindo por redes de estruturas hidráulicas que derivam água aos açudes das bacias beneficiárias. A maior parte do percurso das águas realiza-se em canais que, dependendo da topografia, podem ser escavados no terreno natural, construídos sob aterro compactado ou têm seção mista. A travessia de talvegues e vales é realizada através de aquedutos e reservatórios, estes existentes ou projetados, necessários à operação do Sistema de Transposição.

Por fim, são utilizados os leitos naturais de rios para o percurso final de parte das vazões até os açudes receptores. O Eixo Norte parte de uma captação, no município de Cabrobó, em

Pernambuco, com vazão máxima de 99 m³/s, possuindo 260 km de canais, intercalados por três estações de bombeamento e 16 reservatórios.

A estrutura utilizada para o estudo de caso deste trabalho é a Barragem Cana Brava, que gera o décimo reservatório do referido Eixo, no sentido de montante para jusante (partindo do Rio São Francisco). O empreendedor – Ministério do desenvolvimento Regional – disponibilizou e autorizou o uso dos dados de projetos e histórico de leituras da instrumentação adotados nas presentes análises. A localização do empreendimento está exposta na Figura 32.

Figura 32 – Localização da Barragem Cana Brava



Fonte: modificado de Google Earth (2022).

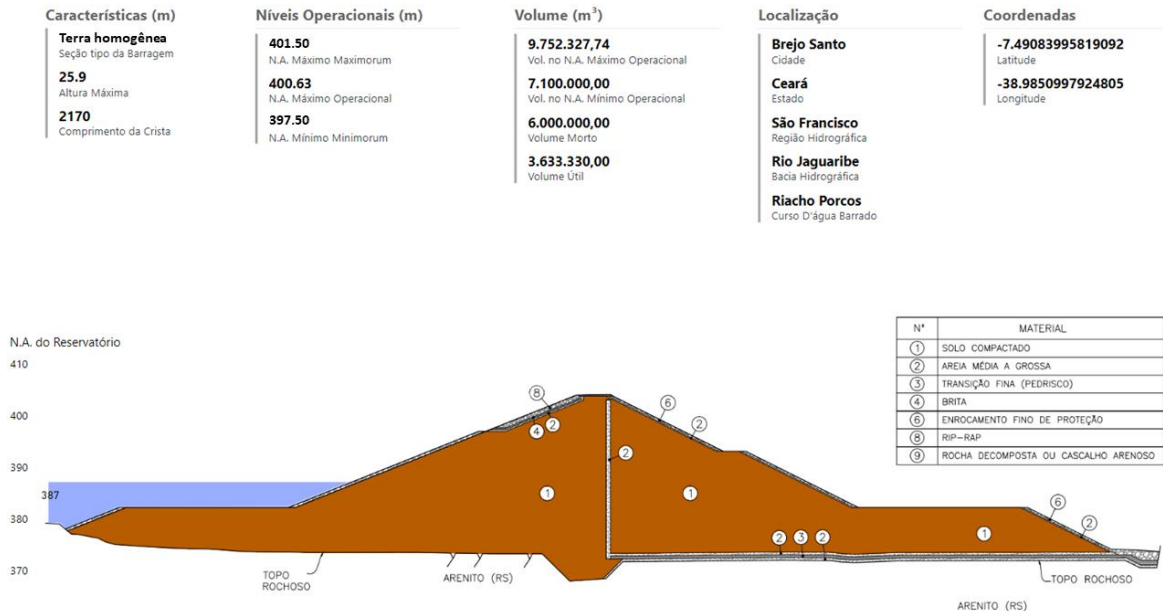
3.1.2 Barragem Cana Brava

A Barragem Cana Brava é composta por um maciço de terra homogênea com 2.170,00 m de comprimento e altura máxima de 25,90 m. Esse barramento possui um sistema de drenagem interna formado por um filtro vertical e filtro horizontal tipo sanduíche. A estrutura conta com bermas de equilíbrio a montante e a jusante, ambas com 30,00 m de largura na cota

de 382,35 m. As bermas e o coroamento da barragem são cobertos com cascalho ou rocha decomposta.

O talude de montante da barragem Cana Brava possui inclinação de 1,0V : 2,5H e o de jusante 1,0V : 2,0H, e a cota do coroamento se encontra na elevação 402,35 m. A proteção do talude de montante é composta por: areia, brita e *rip-rap* no local onde ocorre variação do nível do reservatório e, abaixo da cota de 396,50 m, foi feita uma camada de enrocamento. O talude de jusante da Barragem Cana Brava possui duas bermas, a berma inferior encontra-se na cota 382,35 m e a berma superior com quatro metros de largura na elevação de 392,35 m. A proteção do talude de jusante é composta por uma camada de areia média e grossa, sobreposta por um aterro de enrocamento de proteção, adotado devido às severas condições do clima local. A Figura 33 apresenta as características técnicas e a seção transversal típica da barragem do estudo. A Figura 34 mostra uma vista superior da barragem logo antes de seu enchimento por adução, com o reservatório alimentado apenas por águas pluviais.

Figura 33 – Características técnicas e seção típica da barragem Cana Brava



Fonte: Portal do Projeto São Francisco (2021).

Figura 34 – Imagem via satélite da Barragem Cana Brava em julho de 2021.



Fonte: Google Earth (2021).

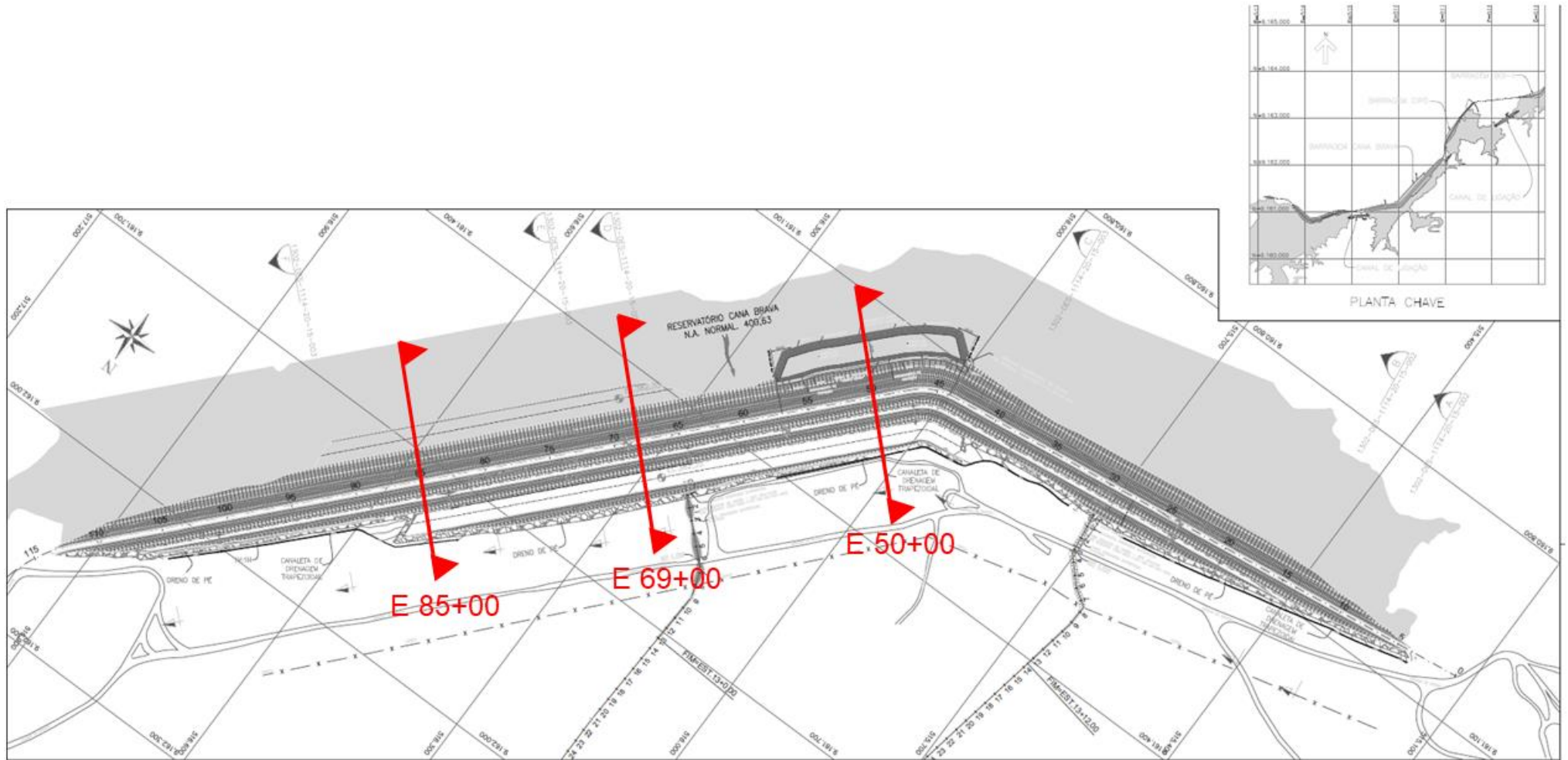
3.1.3 Seções transversais adotadas no estudo

As seções transversais instrumentadas escolhidas para fundamentar as análises neste trabalho são as listadas abaixo, e suas localizações estão representadas na Figura 39.

- E (50+00), exposta na Figura 36;
- E (69+00), exposta na Figura 37;
- E (85+00), exposta na Figura 38.

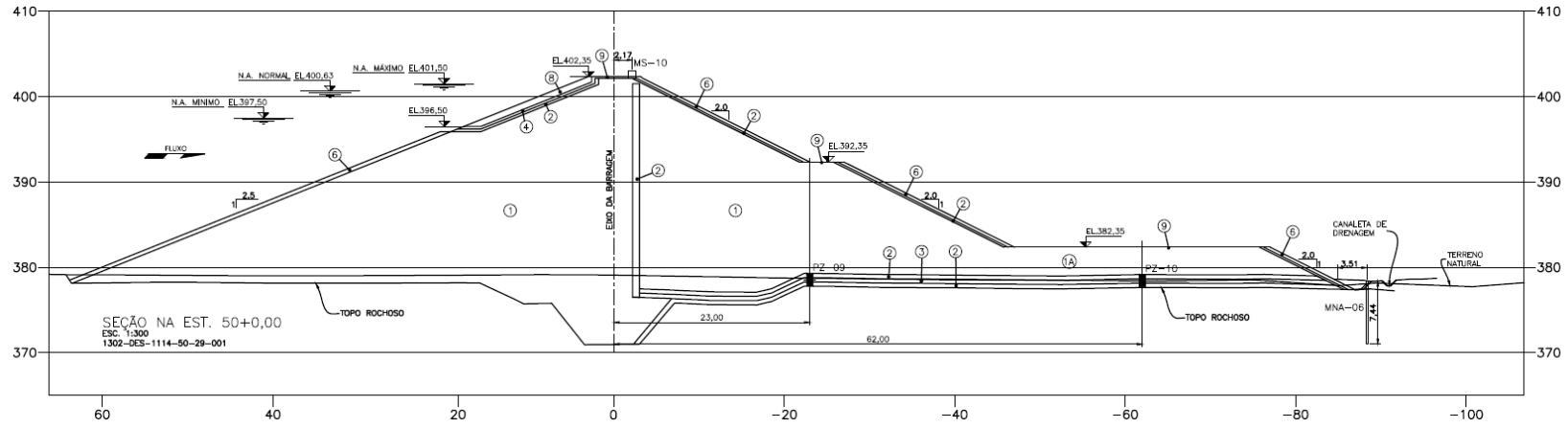
A seção transversal que passa pela E (50+00) foi adotada para o estudo por ser instrumentada com os piezômetros PZ-09 e PZ-10, por possuir *cut-off* e uma cortina de injeção de calda de cimento, conforme representado pelo projeto *as built*. A seção localizada na E (69+00) possui a máxima altura do barramento, conta com uma berma de equilíbrio a montante, o *cut-off*, e é instrumentada com os piezômetros PZ-17 e PZ-18. Já a seção transversal da E (85+ 00) é instrumentada com o PZ-23 e o PZ-24, e foi adotada neste estudo por não possuir *cut-off* e injeções de calda de cimento. Todos os piezômetros citados são do tipo Casagrande modificado de tubo aberto. A Figura 35 apresenta a localização dos instrumentos analisados. A Figura 36, Figura 37 e a Figura 38 demonstram as seções transversais de instrumentação adotadas para a realização dos estudos.

Figura 35 – Arranjo Geral da Barragem Cana Brava com a localização das seções transversais em que realizou-se as análises



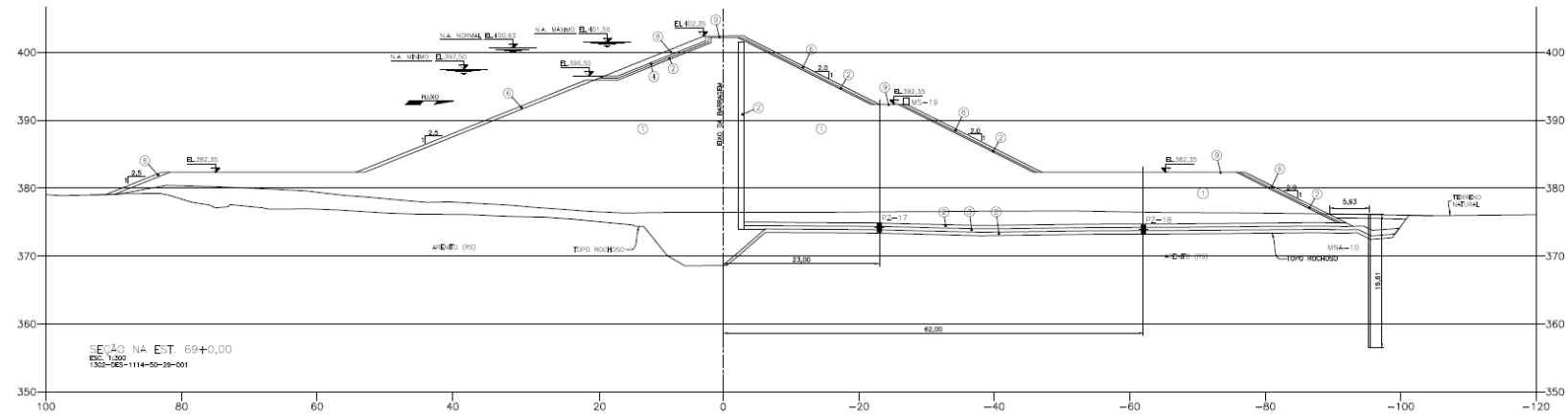
Fonte: adaptado de Magna Engenharia (2019).

Figura 36 – Seção instrumentada da Estaca 50+00



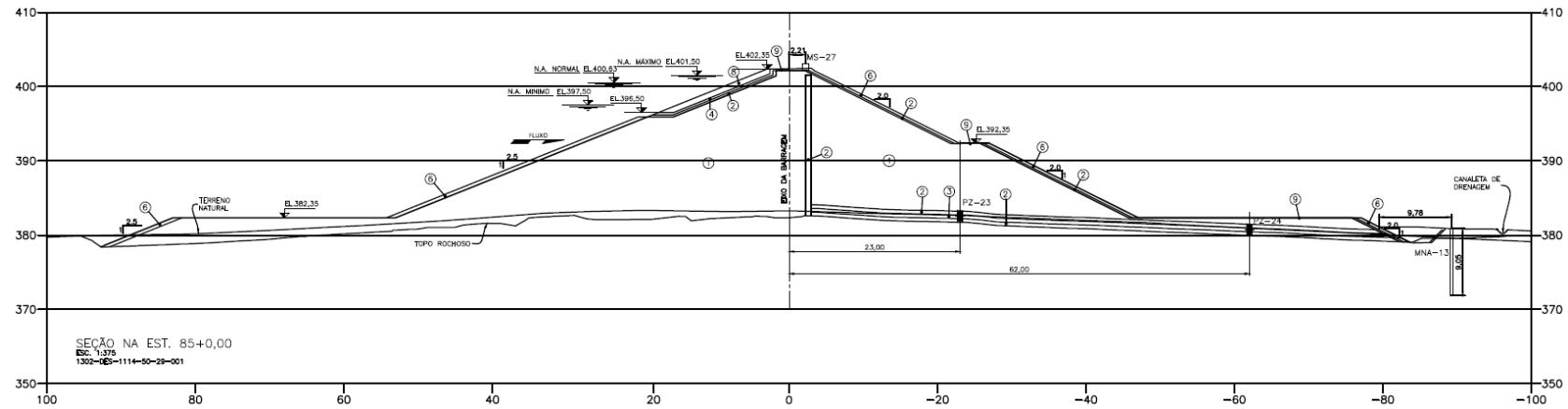
Fonte: adaptado de Magna Engenharia (2019).

Figura 37 – Seção instrumentada da Estaca 69+00



Fonte: adaptado de Magna Engenharia (2019).

Figura 38 – Seção instrumentada da Estaca 85+00



Fonte: adaptado de Magna Engenharia (2019).

Tabela 5 – Posição dos piezômetros nas seções analisadas

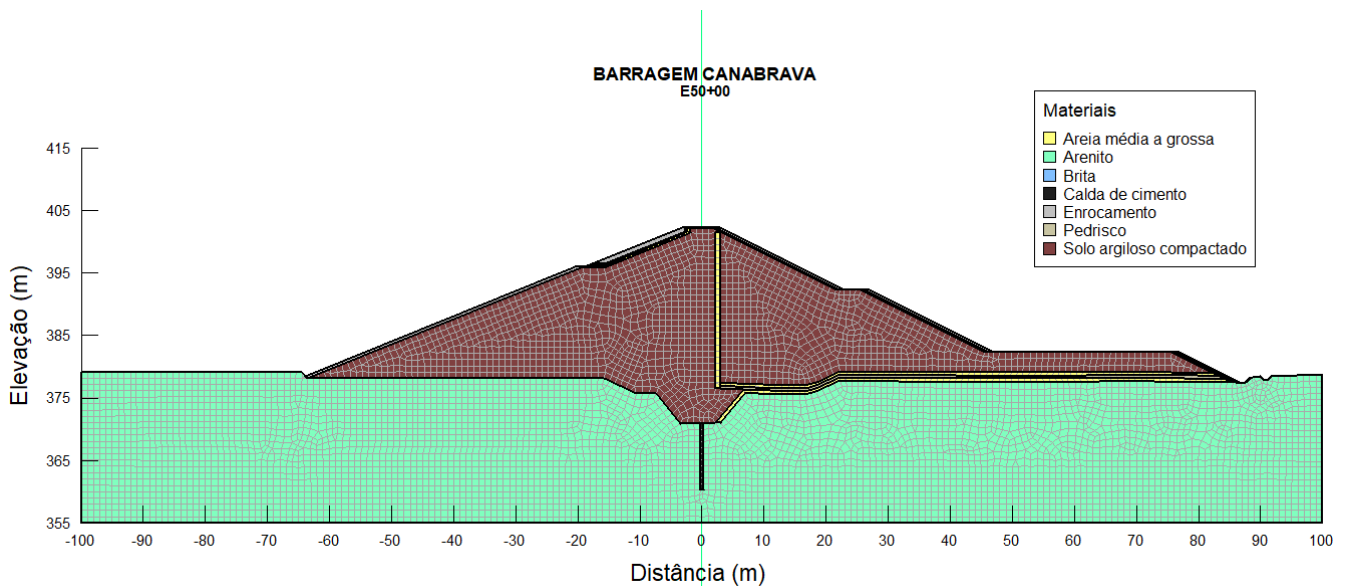
Estaca	Piezômetros	Posição a Jusante a Partir do Eixo	Cota de Instalação	Local de Instalação
50	PZ-09	23,00 m	377,81 m	Filtro horizontal
	PZ-10	62,00 m	376,35 m	Fundação
69	PZ-17	23,00 m	374,23 m	Filtro horizontal
	PZ-18	62,00 m	373,90 m	Filtro horizontal
85	PZ-23	23,00 m	382,60 m	Filtro horizontal
	PZ-24	62,00 m	380,75 m	Filtro horizontal

Fonte: adaptado de Magna Engenharia (2019).

3.2 MÉTODO

A definição dos níveis de controle dos piezômetros estudados foi realizada por meio de simulações em modelos matemáticos realizadas com auxílio do programa computacional SEEP/W do *software* GeoStudio, da GEO-SLOPE International. Esse *software* adota o método dos elementos finitos para solucionar os problemas de fluxo e, para a modelagem das seções escolhidas, determinou-se uma malha formada por elementos quadriláteros e triangulares com dimensão máxima global de um metro, conforme exposto na Figura 39.

Figura 39 – Malha de elementos finitos na seção da estaca 50 da Barragem Cana Brava



Fonte: autora (2022).

Na prática da engenharia geotécnica, em muitos casos a definição dos níveis de controle é realizada por meio de análises de estabilidade que simulem situações de carregamento que afetem o fator de segurança (FS) da estabilidade dos taludes da barragem. Para isso, adota-se o que frequentemente é chamado de carta de segurança de estabilidade, conforme a Tabela 6, com valores que podem alterar conforme o nível de confiabilidade dos parâmetros geotécnicos adotados.

Tabela 6 – Premissas da carta de segurança de estabilidade

Situação	Fator de Segurança
Normal	$FS \geq 1,5$
Atenção	$1,4 \leq FS < 1,5$
Alerta	$1,3 \leq FS < 1,4$
Emergência	$FS < 1,3$

Fonte: Ribeiro (2020).

Porém, muitos profissionais de projetos geotécnicos defendem que, em diversos casos, podem ocorrer anomalias significativas para diminuição da segurança da barragem, que não implicam em uma redução direta dos fatores de segurança dos taludes de montante ou de jusante do barramento. Considerando esse fato, neste trabalho foi adotado o método de carta de risco por níveis piezométricos, sugerido por Ribeiro (2020), e adotado em diversas empresas de projetos geotécnicos no país. A metodologia consiste em comparar os resultados de poropressões obtidas no SEEP/W para um cenário considerado de operação normal da barragem e outra situação considerada crítica.

No cenário normal de uma determinada seção transversal do projeto de uma barragem de terra, os fatores de segurança são obtidos a partir de análises de estabilidade ao escorregamento dos taludes, em superfícies diversas, com valores maiores ou iguais a 1,5. A rede de fluxo da condição normal de operação é usada como referência nas simulações, comparativamente à situação considerada crítica.

O cenário crítico se vale da variação hipotética nos valores de permeabilidade das estruturas drenantes, simulando uma colmatação total dos dispositivos de drenagem interna da barragem, fazendo com que as poropressões aumentem por meio da elevação da linha freática no interior do barramento.

Seguindo a metodologia, na prática, alterou-se o valor de permeabilidade do filtro horizontal e vertical para o mesmo valor do aterro compactado. Desse modo, simula-se uma situação de drenagem interna inoperante, condição de grande rigor técnico.

Tendo isso, mediu-se a diferença de cotas piezométricas entre o cenário considerado normal e o cenário crítico hipotético e adotou-se faixas percentuais dessa diferença para cada nível de controle representativo de cada situação de segurança do instrumento, como demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Premissas da carta de segurança piezométrica

Situação	Percentagem da diferença de cota piezométrica entre os cenários
Atenção	20%
Alerta	40%
Emergência	60%

Fonte: Ribeiro (2020).

Desse modo, a cota piezométrica para cada situação de segurança dos instrumentos será definida por meio da soma da cota piezométrica do cenário adotado como o de operação normal e a percentagem do valor da diferença correspondente à respectiva situação. Diante disso, a carta de segurança piezométrica composta com os diferentes níveis de controle para cada piezômetro do estudo foi elaborada por meio das análises de percolação executadas no item a seguir.

3.3 ANÁLISES DE PERCOLAÇÃO

3.3.1 Características dos materiais

Para as análises de percolação por meio da ferramenta SEEP/W do *software* Geostudio, deve-se inserir os parâmetros hidráulicos do solo, ou seja, permeabilidade e a anisotropia do material. Os valores adotados para essas características foram obtidos por meio de ensaios de permeabilidade realizados nos materiais da fundação e das jazidas da obra da barragem, que por sua vez foram disponibilizados nos estudos de estabilidade realizados para elaboração do relatório da Revisão Periódica de Segurança da Barragem, documento concedido pelo empreendedor para esse estudo.

A anisotropia é a variação de propriedades de materiais de acordo com as direções observadas. No que tange a condutividade hidráulica dos solos, sabe-se que esse parâmetro costuma ser maior na direção horizontal do que na vertical, e esse fato é comprovado em solos compactados (PINTO, 2006).

Para as análises deste trabalho adotou-se uma anisotropia de 0,50 para o solo compactado, material mais abundante da estrutura. Ou seja, a condutividade horizontal, nesse caso, possui o dobro do valor da condutividade vertical. A discriminação dos parâmetros utilizados nas análises de percolação está exposta na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades hidráulicas dos materiais da barragem

Componente da barragem	Material	Condutividade hidráulica horizontal (k) (m/s)	Anisotropia (k_y/k_x)
Solo compactado	Argila	1,00E-07	0,50
Filtro	Areia média a grossa	4,00E-04	1,00
Transição fina	Pedrisco	1,70E-03	1,00
Transição grossa	Brita	1,70E-03	1,00
<i>Rip-rap</i> e proteção dos taludes	Enrocamento	1,00E-01	1,00
Fundação	Arenito	6,00E-07*	1,00
Injeções	Calda de cimento	1,00E-10	1,00

*na seção E69 a condutividade hidráulica adotada foi 1,00E-06

Fonte: adaptado de Consórcio Operador do PISF (2022).

3.3.2 Calibração do modelo numérico

As modelagens geológico-geotécnicas são excelentes ferramentas para verificação da segurança e identificação de pontos críticos de uma estrutura, além de execução de cálculos e apresentação de resultados. Porém, esse tipo de análise pode possuir algumas incertezas, como: geometria da estrutura e das camadas de fundação, propriedades geotécnicas e anisotropia dos materiais.

Campanhas de investigações geotécnicas por meio de sondagens e ensaios de laboratório são muito eficientes para se obter os parâmetros dos materiais presentes no campo ou adotados para empréstimo, bem como a estratigrafia da fundação ou do próprio barramento já construído. Ainda, é importante manter e prezar pela conservação dos documentos de projetos executivos, memoriais de cálculos e projeto *as built* (conforme construído) ou *as is* (como está) confiáveis além de relatórios da obra e inspeções visuais atualizadas.

Porém, em muitos casos, o empreendimento não dispõe de documentação básica acerca de sua construção, ou não há o adequado registro e documentação dos dados geotécnicos dos materiais observados na fundação do barramento no momento da execução da barragem. Além disso, mesmo dispondo de todos os dados necessários para a modelagem, a variabilidade dos parâmetros do solo é uma incerteza inerente à área da geotecnia.

Tendo isso, para efetuar uma simulação mais verossímil às condições de campo, pode-se utilizar as leituras de instrumentos de auscultação para calibração do modelo matemático, ou seja, alterar as condições de contorno do modelo e parâmetros dos materiais de modo que as

grandezas identificadas nos pontos onde há instrumentos instalados se aproximem das leituras de campo.

Na análise numérica deste trabalho, a única alteração necessária para que os valores das leituras do *software* se aproximassem das medidas de campo foi a diminuição em dez vezes do valor da condutividade hidráulica da rocha de fundação na Seção transversal situada na estaca 69+00, como já exposto no item 3.3.1, na Tabela 8. Essa discrepância de valor pode ter sido causada por uma alteração nas propriedades na rocha de fundação, a ausência de registros de uma camada mais permeável no local da seção, ou alguma fratura que gere fluxo para jusante, diminuindo a poropressão no filtro, local dos piezômetros dessa seção instrumentada. A Tabela 9 apresenta as diferenças entre as leituras obtidas em campo e no modelo, considerando o nível atual do reservatório, que se encontra na elevação 397,32 m.

Tabela 9 – Comparação das cotas piezométricas obtidas no modelo e as leituras de campo em maio de 2022

Seção Instrumentada	Título	Cota de Topo (m)	Cota de instalação (m)	Leitura em campo (m)	Cota piezométrica de campo (m)	Cota piezométrica do modelo (m)	Carga piezométrica de campo (m.c.a)	Carga piezométrica do modelo (m.c.a)	Diferença (%)
E50	PZ-09	393,18	377,81	15,02	378,16	378,33	0,35	0,52	1,11%
	PZ-10	383,32	376,35	5,21	378,11	378,07	1,76	1,72	-0,57%
E69 (k fundação= 6E-06)	PZ-17	393,24	374,23	16,89	376,35	376,53	2,12	2,30	0,95%
	PZ-18	383,44	373,90	7,12	376,32	375,68	2,42	1,78	-6,71%
E85	PZ-23	393,15	382,60	10,55	382,60	382,60	0,00	0,00	0,00%
	PZ-24	383,61	380,75	2,86	380,75	380,75	0,00	0,00	0,00%

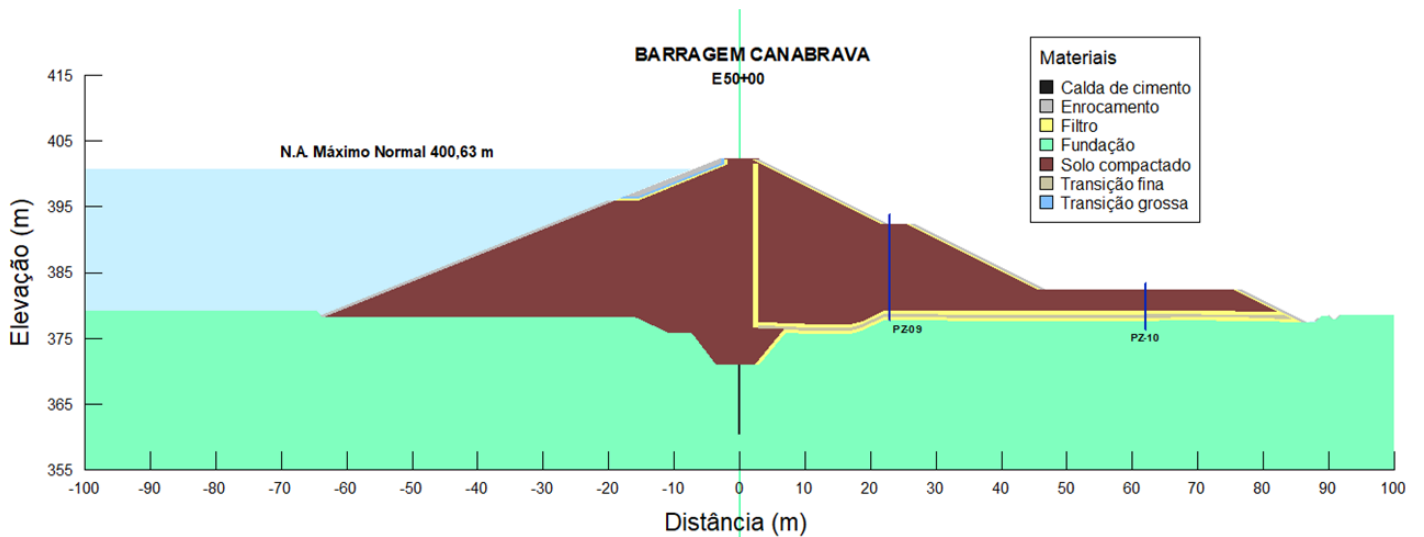
Fonte: autora (2022).

O item da leitura em campo se refere ao valor da medição realizada pela sonda elétrica tipo Pio nos piezômetros, que são do tipo tubo aberto, com procedimento de medição conforme explanado no item 2.3.3.1. Tendo isso, o valor da cota piezométrica de campo foi obtido por meio da subtração da cota de topo e a leitura de campo. De modo análogo, essa medida também pode ser encontrada por meio da soma da cota de instalação do bulbo do instrumento e a carga piezométrica ou de pressão de água (coluna d'água) do instrumento.

3.3.3 Situação de operação

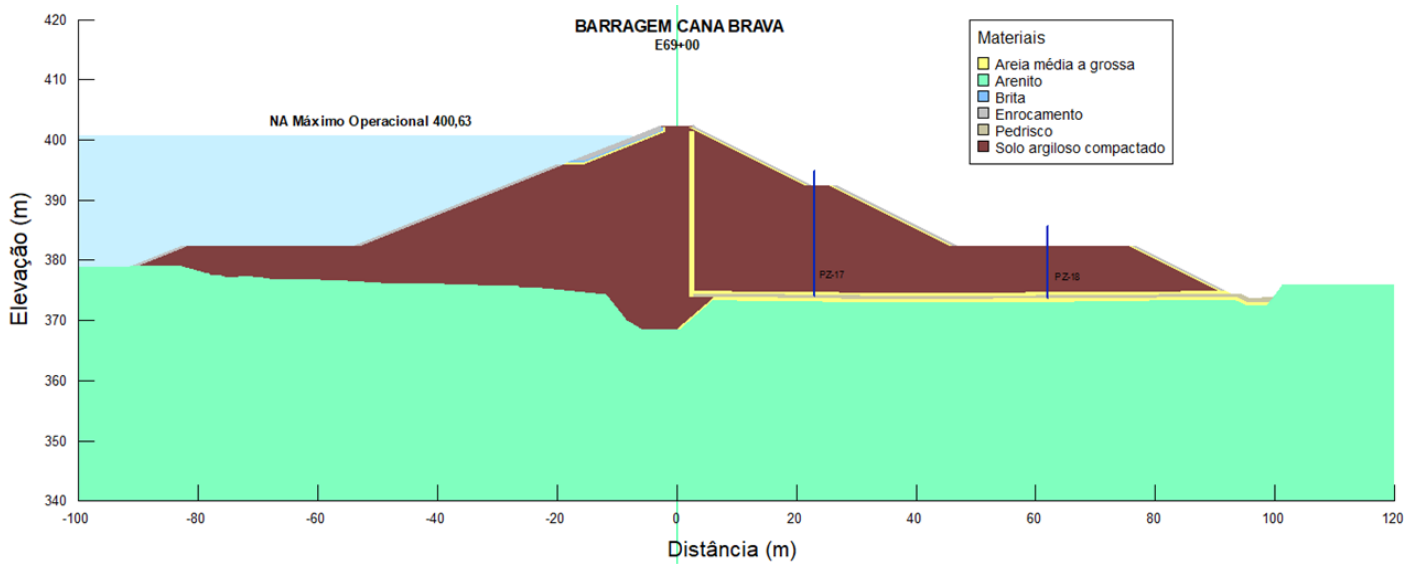
O cenário adotado como referência é a situação que foi considerada como a que representa a operação natural da barragem conforme previsto em projeto. Nas modelagens, assumiu-se o nível do reservatório na elevação máxima operacional, igual a 400,63 m e os valores dos parâmetros dos materiais da estrutura foram adotados conforme apresentado no item 3.3.1, na Tabela 8. A Figura 40, Figura 41 e Figura 42 demonstram o modelo numérico das seções estudadas na situação normal de operação.

Figura 40 – Modelo da seção da estaca 50 da Barragem Canabrava em Situação Operacional



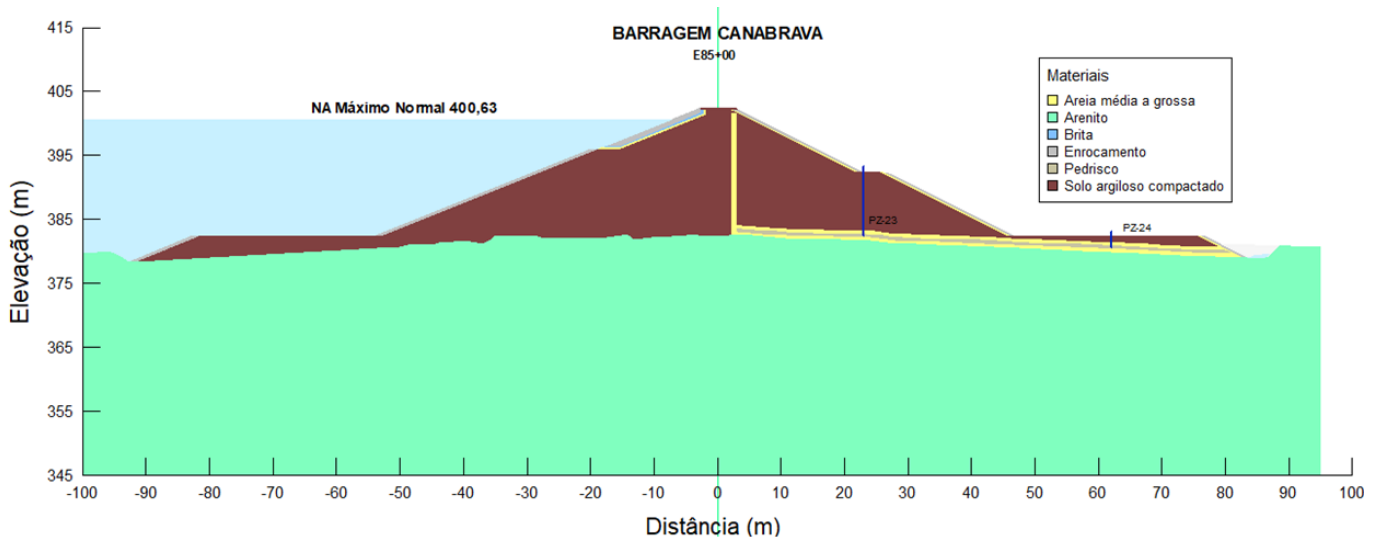
Fonte: autora (2022).

Figura 41 – Modelo da seção da estaca 69 da Barragem Cana Brava em Situação Operacional



Fonte: autora (2022).

Figura 42 – Modelo da seção da estaca 85 da Barragem Cana Brava em Situação Operacional

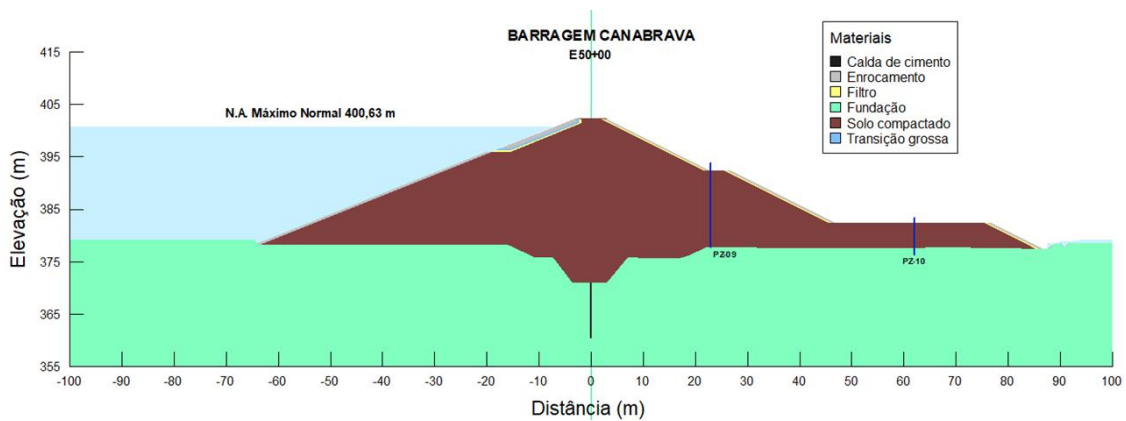


Fonte: autora (2022).

3.3.4 Situação crítica

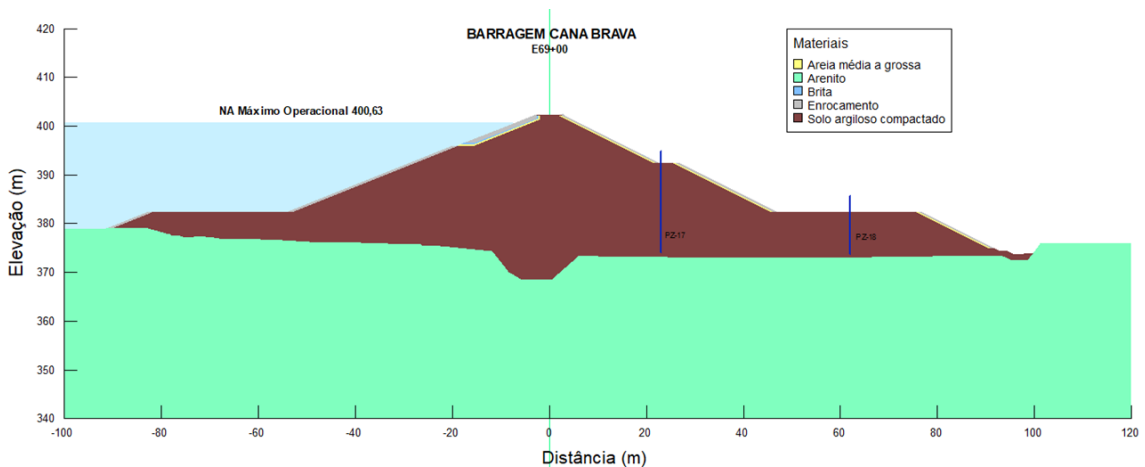
Na situação crítica considerada, adotou-se o nível do reservatório também na elevação máxima operacional, porém com a alteração dos parâmetros geotécnicos dos dispositivos de drenagem interna da barragem. Considerou-se, para os filtros vertical e horizontal da estrutura, o mesmo valor de permeabilidade hidráulica do solo compactado, ou seja, diminuiu-se a condutividade hidráulica dos filtros de modo a simular a inoperância do sistema de drenagem interna da barragem, que poderia vir a ocorrer por meio de colmatagem, por exemplo. As seções estudadas com a geometria representativa da situação crítica são apresentadas na Figura 43, Figura 44 e Figura 45.

Figura 43 – Modelo da seção da estaca 50 da Barragem Cana Brava na Situação Crítica



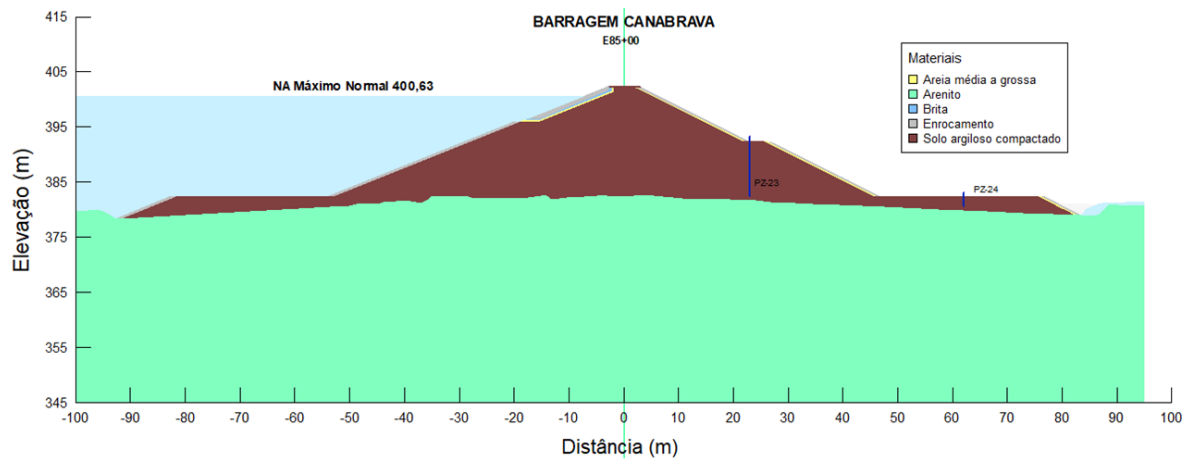
Fonte: autora (2022).

Figura 44 – Modelo da seção da estaca 69 da Barragem Cana Brava na Situação Crítica



Fonte: autora (2022).

Figura 45 – Modelo da seção da estaca 85 da Barragem Cana Brava na Situação Crítica



Fonte: autora (2022).

Esse tipo de cenário seria preocupante pois a saturação do talude de jusante resultaria no aumento dos esforços solicitantes e com a elevação da linha freática ocorreria um aumento da poropressão e, por consequência, a diminuição dos fatores de segurança da estabilidade do talude. Somado a isso, a elevação da poropressão na região de jusante pode acarretar elevadas forças de percolação e gradientes hidráulicos. Essas condições favorecem os mecanismos de ocorrência de erosão interna (ou *piping*), segunda maior causa de rupturas de barragens, como já abordado no item 2.2.

4 RESULTADOS

Nesse item, serão apresentados, por meio de imagens dos resultados das modelagens computacionais, os valores de carga total e poropressão obtidos nas três seções estudadas, nos dois cenários analisados: de operação e crítico. Com base nas diferenças de leituras entre essas duas situações, foram definidos os níveis de controle dos piezômetros estudados, divididos nas categorias: atenção, emergência e alerta.

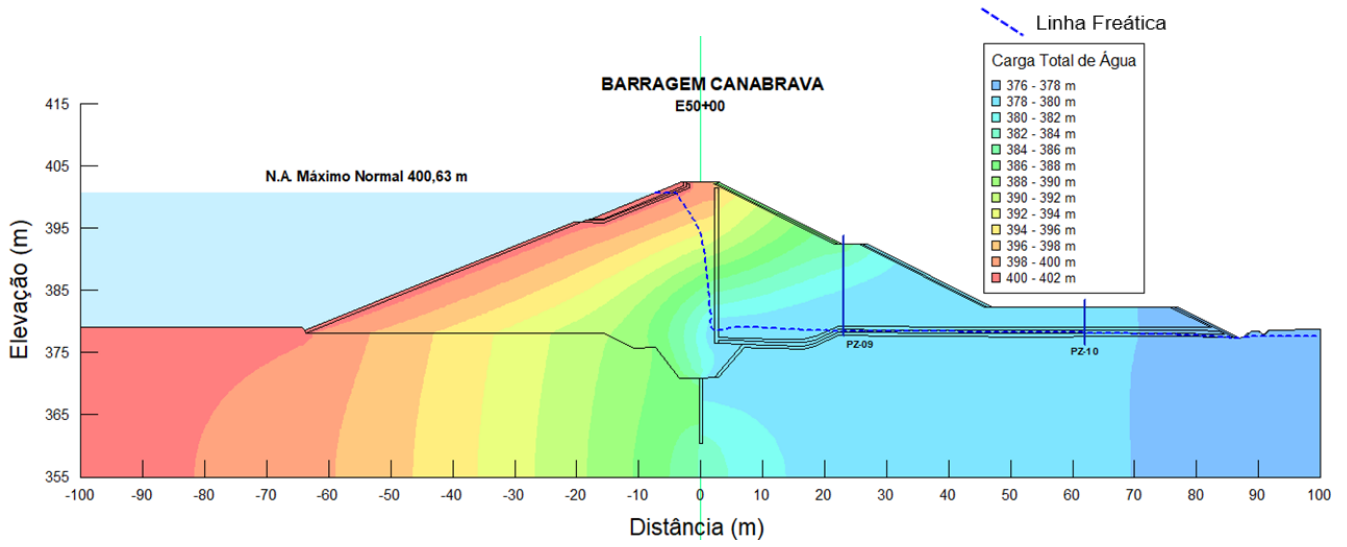
4.1 COMPORTAMENTO DAS CARGAS TOTAIS NAS SEÇÕES ESTUDADAS

As figuras a seguir demonstram o comportamento das cargas totais ao longo da estrutura do barramento em cada uma das seções, de modo a esclarecer o entendimento das mudanças nas leituras dos piezômetros nos cenários analisados. As linhas que separam cada faixa de cor da modelagem é o lugar geométrico dos pontos que apresentam mesma carga hidráulica total, ou seja, a soma da carga piezométrica e a altimétrica, como explanado no item 2.4.2.1.

Ao observar o comportamento da carga total nas seções, pode-se constatar que, sem o sistema de drenagem interna da barragem para interceptar e conduzir o fluxo existente no maciço (situação do cenário crítico), a dissipação da diferença de carga entre jusante e montante é realizada de forma menos efetiva ao longo da seção, como pode ser constatado ao comparar a Figura 46 e a Figura 47, por exemplo.

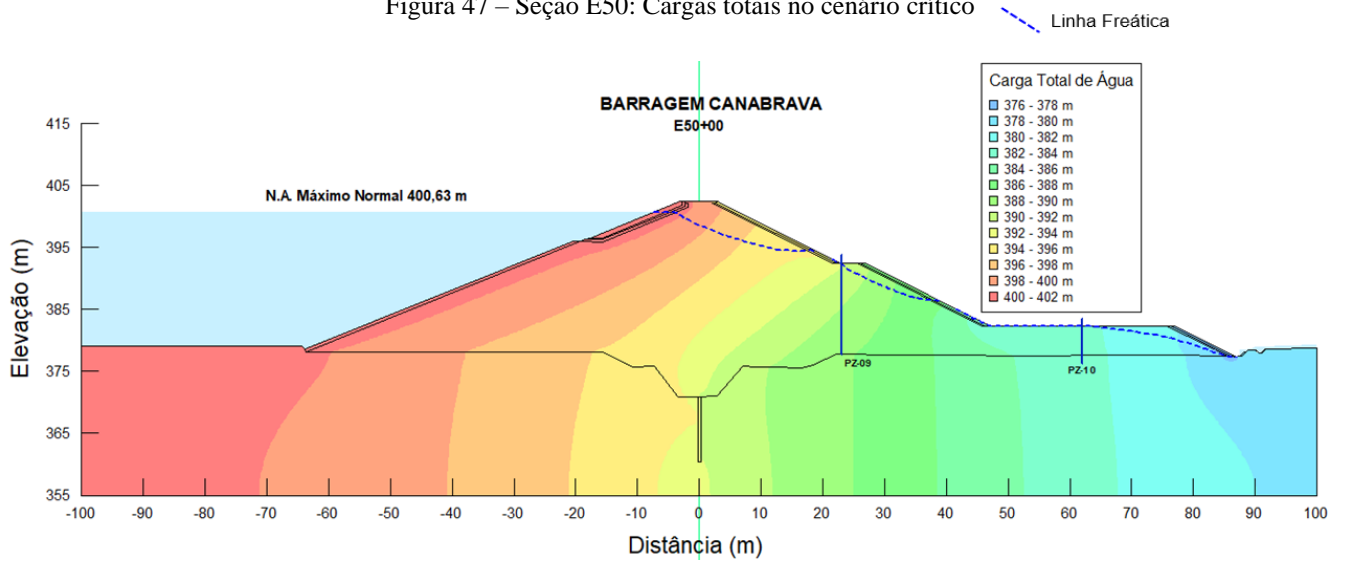
Com maiores cargas totais na porção de jusante da barragem, há maiores forças de percolação e gradientes hidráulicos na região, o que favorece o desencadeamento de processos danosos à segurança da barragem, como erosão interna e redução do fator de segurança do talude de jusante devido ao aumento dos esforços solicitantes causados pela saturação.

Figura 46 – Seção E50: Cargas totais no cenário de operação



Fonte: autora (2022).

Figura 47 – Seção E50: Cargas totais no cenário crítico



Fonte: autora (2022).

Figura 48 – Seção E69: Cargas totais no cenário de operação

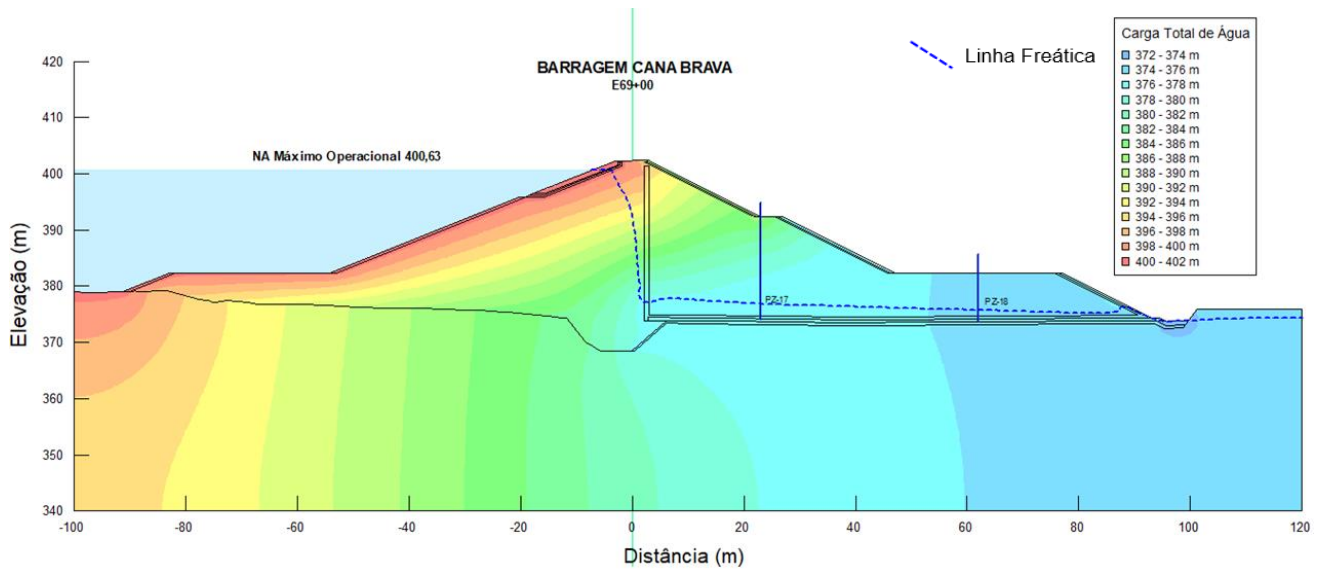


Figura 49 – Seção E69: Cargas totais no cenário crítico

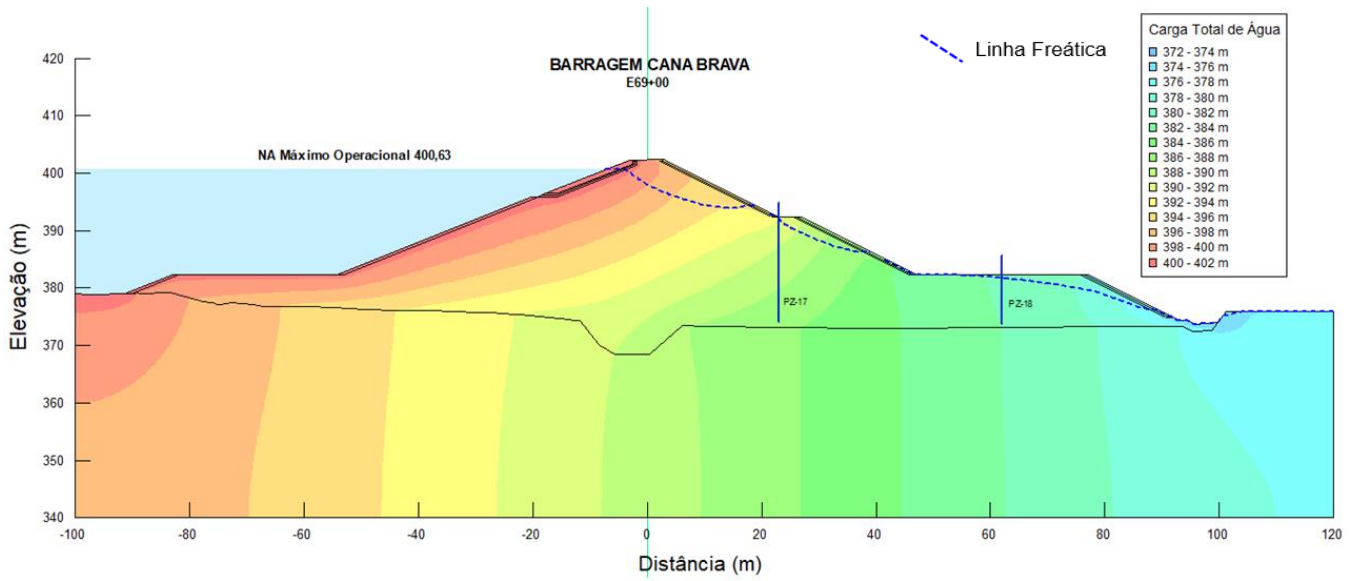
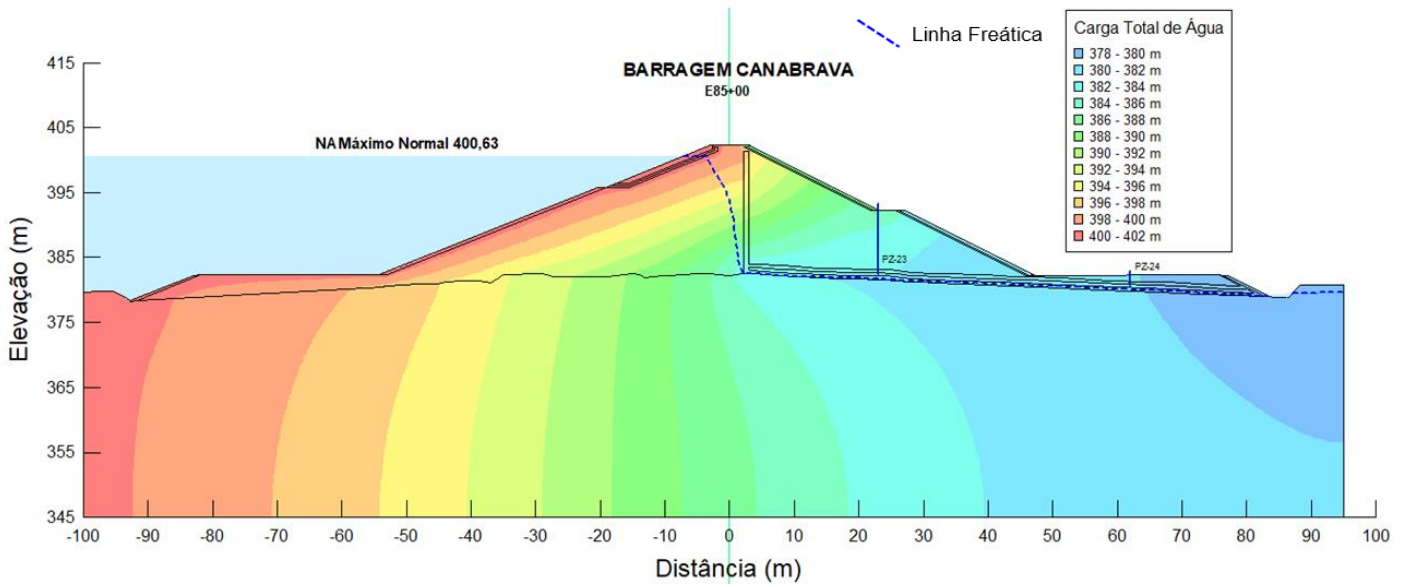
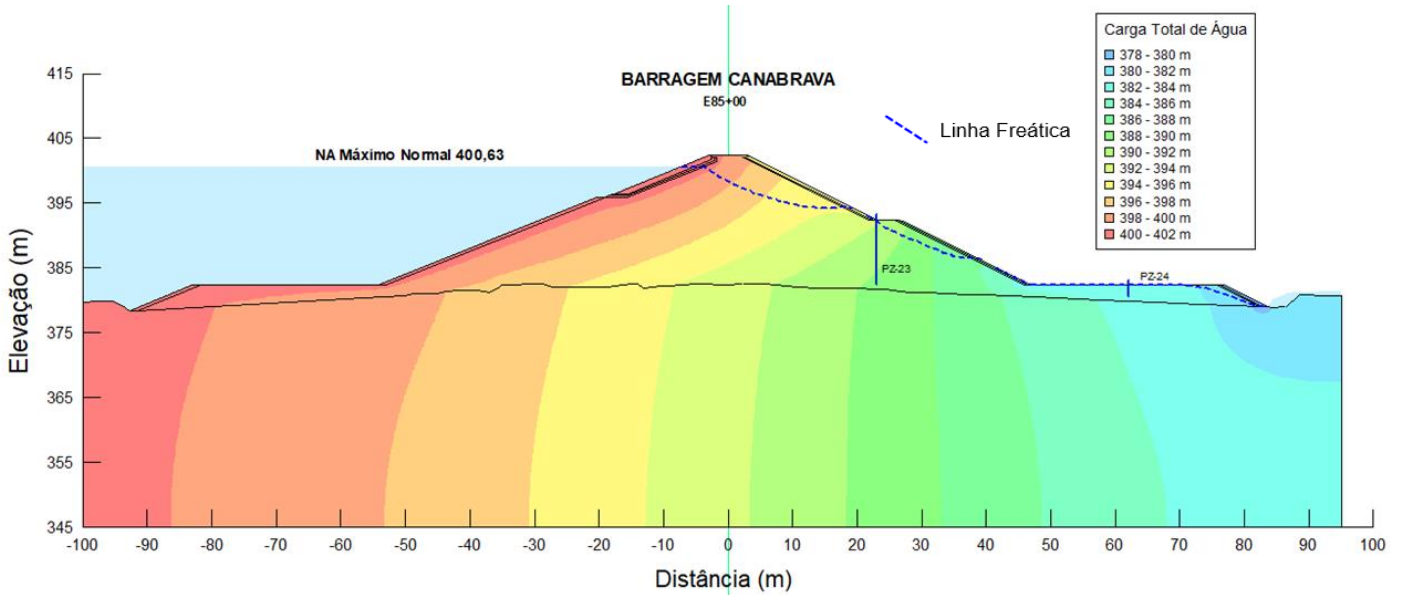


Figura 50 – Seção E85: Cargas totais no cenário de operação



Fonte: autora (2022).

Figura 51 – Seção E85: Cargas totais no cenário crítico

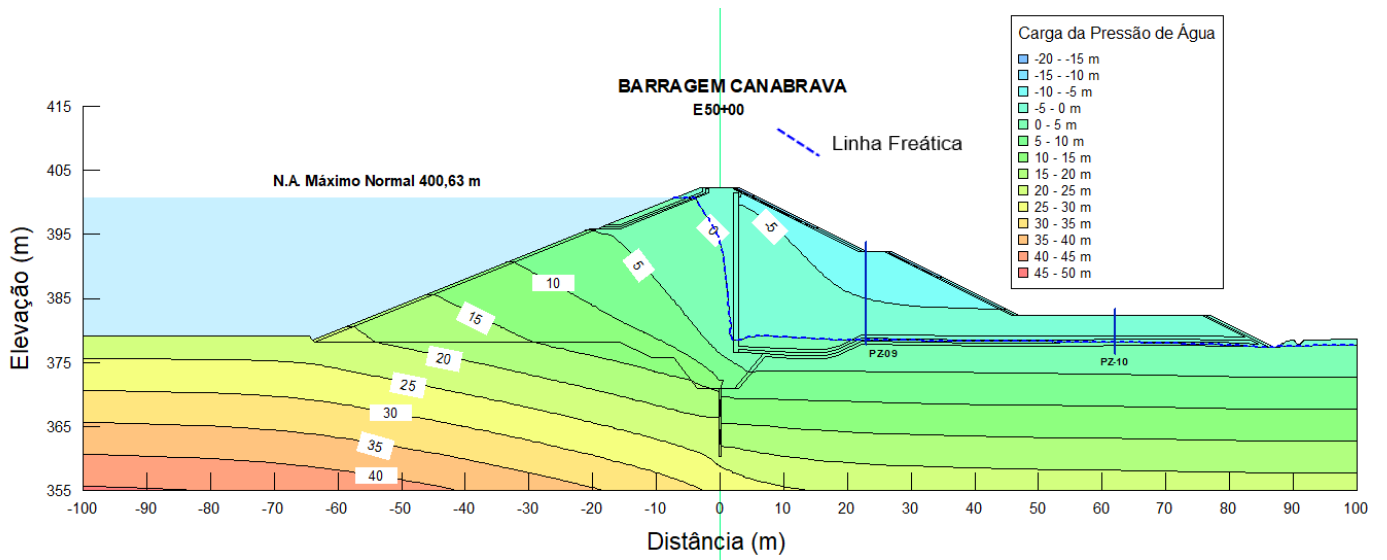


Fonte: autora (2022).

4.2 AVALIAÇÃO DAS POROPRESSÕES NAS SEÇÕES ESTUDADAS

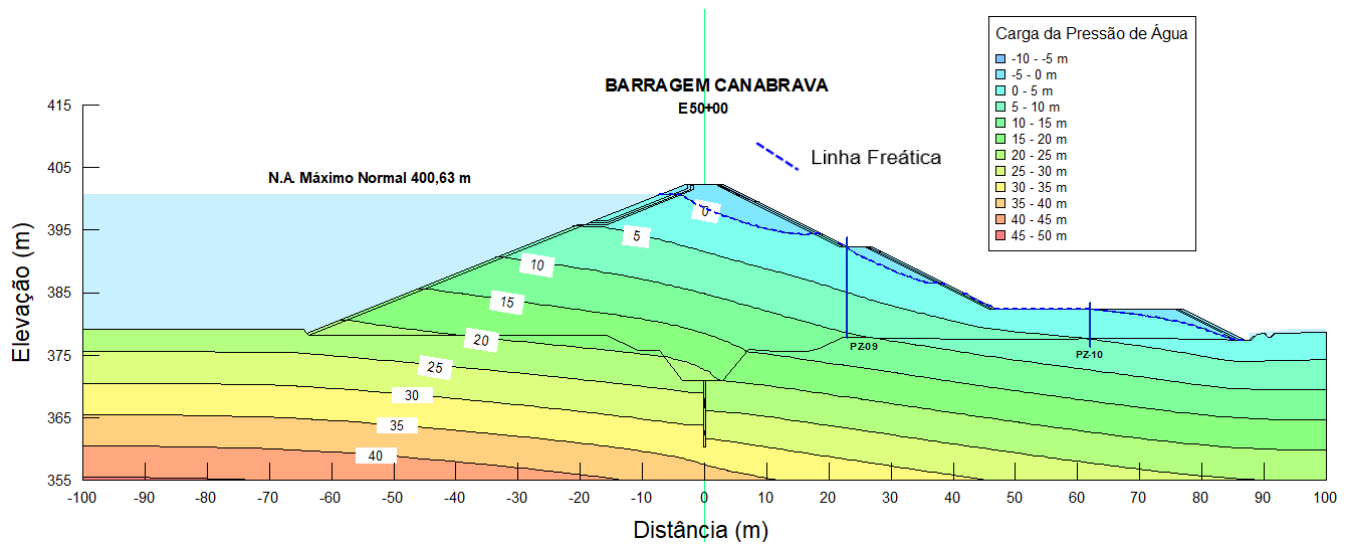
No caso da poropressão, seu comportamento no barramento consiste em aumentar sua grandeza com a profundidade abaixo da linha freática, onde seu valor é nulo. Ao comparar a Figura 52 e a Figura 53, por exemplo, percebe-se que a ascensão dos valores de poropressão é muito maior no cenário crítico, sem o adequado funcionamento dos filtros, pois esses dispositivos cumprem, entre outras funções, a de interiorizar e rebaixar a linha freática. Desse modo, no caso crítico, a linha freática se eleva e alcança grande parte do talude de jusante, evidenciando novamente elevadas forças de percolação (gradientes hidráulicos) na porção de jusante da barragem, o que pode causar surgências de água no talude e o processo de erosão interna.

Figura 52 – Seção E50: Poropressões no cenário de operação



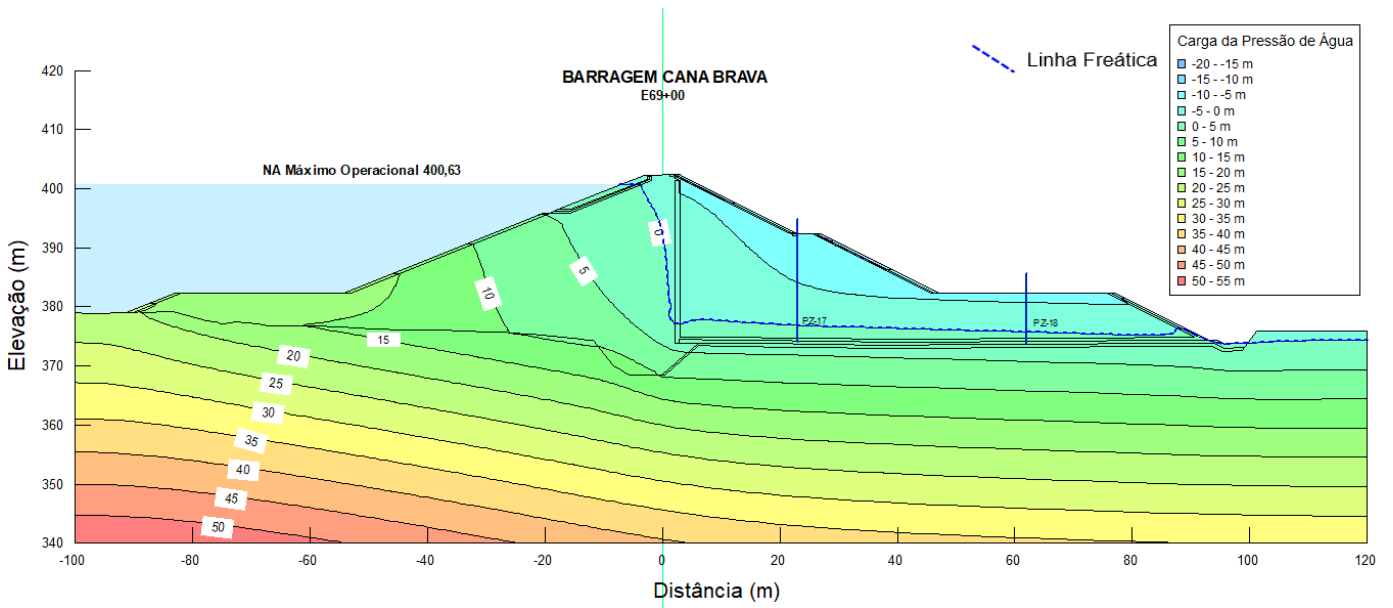
Fonte: autora (2022).

Figura 53 – Seção E50: Poropressões no cenário crítico



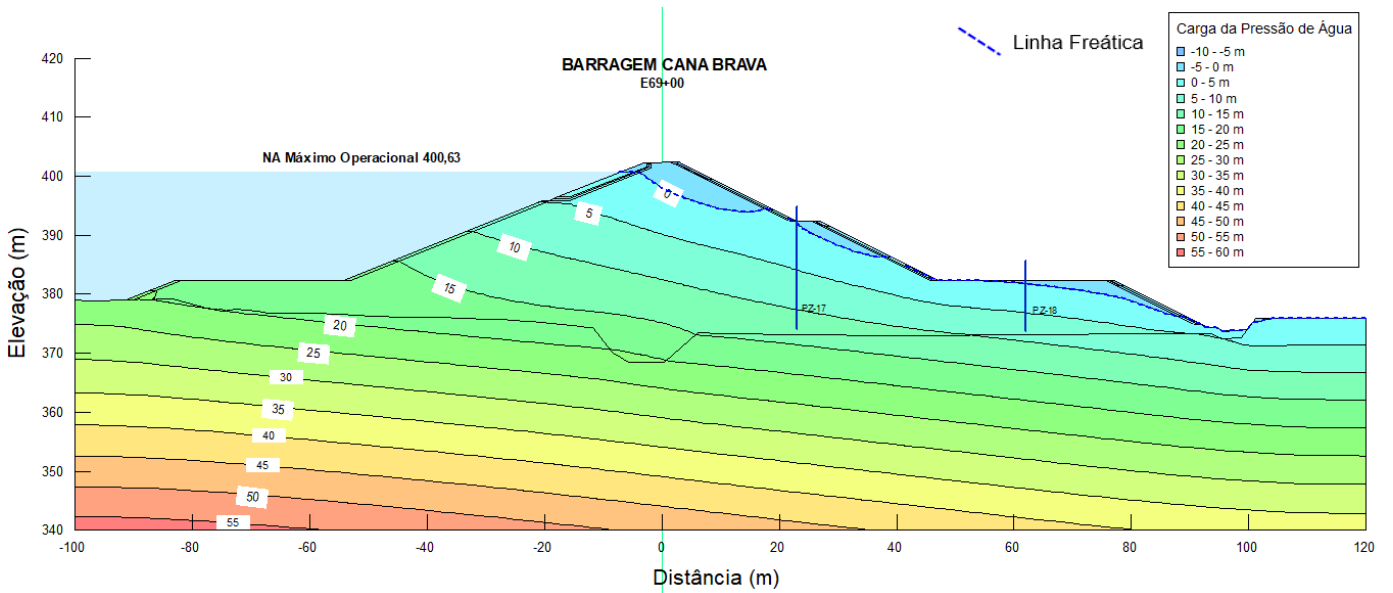
Fonte: autora (2022).

Figura 54 – Seção E69: Poropressões no cenário de operação



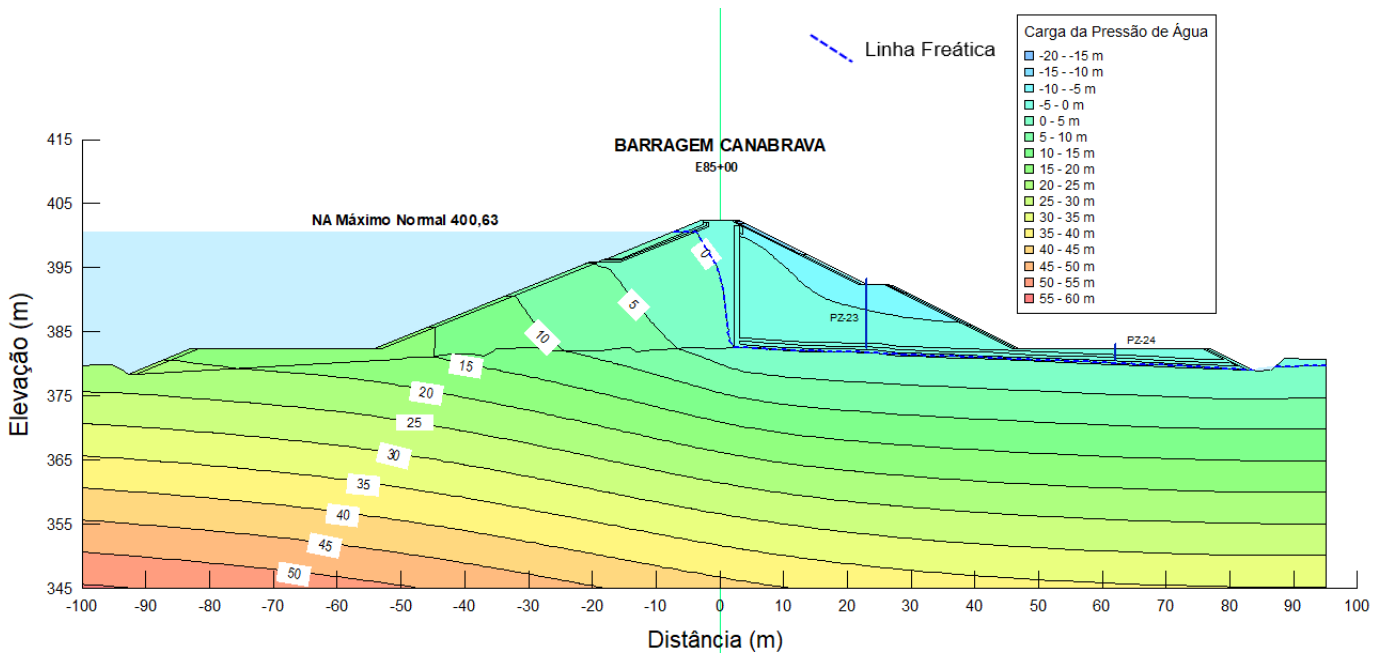
Fonte: autora (2022).

Figura 55 – Seção E69: Poropressões no cenário crítico



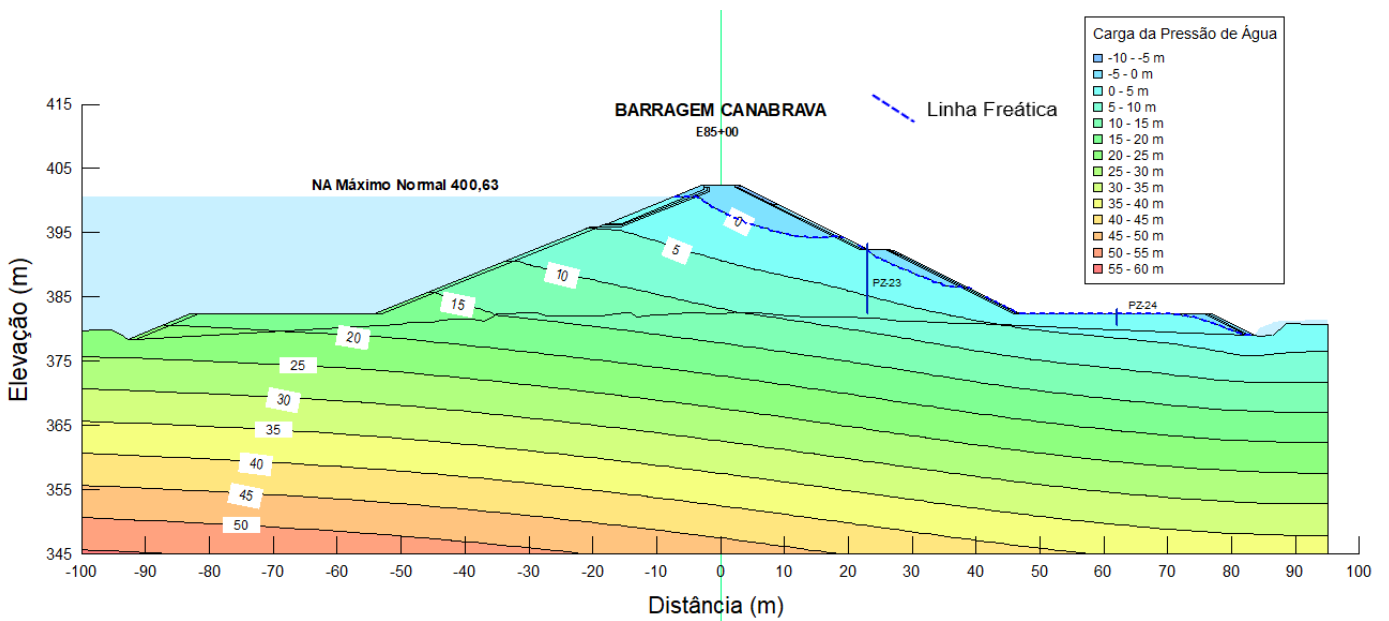
Fonte: autora (2022).

Figura 56 – Seção E85: Poropressões no cenário de operação



Fonte: autora (2022).

Figura 57 – Seção E85: Poropressões no cenário crítico



Fonte: autora (2022).

A Tabela 10 apresenta os valores de poropressões nos locais de instalação dos piezômetros nas seções estudadas. A cota piezométrica é a soma da cota altimétrica de instalação do instrumento e a carga piezométrica no piezômetro. O campo “coluna d’água no piezômetro” representa apenas a carga de poropressão, subtraindo a cota de instalação do piezômetro da cota piezométrica. As cotas de instalação dos piezômetros foram expostas no item 3.1.3, na Tabela 5.

Tabela 10 – Resultados de poropressões nos locais dos piezômetros nas duas situações

Estaca da seção transversal	Piezômetro	Cota Piezométrica (m)		Coluna d’água no piezômetro (m.c.a)		Diferença (m)
		Situação Normal	Situação Crítica	Situação Normal	Situação Crítica	
E50	PZ-09	378,44	388,31	0,63	10,50	9,87
	PZ-10	378,15	382,56	1,80	6,21	4,41
E69	PZ-17	375,78	386,65	1,55	12,42	10,87
	PZ-18	375,90	382,04	2,00	8,14	6,14
E85	PZ-23	382,60	389,69	0,00 (seco)	7,09	7,09
	PZ-24	380,75	393,89	0,00 (seco)	13,14	13,14

Fonte: autora (2022).

4.3 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DOS TALUDES DA BARRAGEM NO CENÁRIO CRÍTICO

A escolha do método de definição dos níveis de controle utilizando cenários de referência ao invés da metodologia por fatores de segurança da estabilidade de taludes foi baseada no fato de que a barragem possui uma geometria favorável e materiais de boa qualidade em sua composição, fatos que geram fatores de segurança altos mesmo em situações críticas de segurança. Além disso, muitos projetistas defendem esse método por utilizar apenas um parâmetro do solo: a permeabilidade hidráulica; enquanto as análises de estabilidade demandam três: coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo; aumentando as incertezas do modelo.

Para embasamento da escolha, foram realizadas análises de estabilidade do talude de jusante em regime permanente de fluxo, no cenário crítico hipotético adotado nesse estudo, com o objetivo de demonstrar os fatores de segurança obtidos. A Tabela 11 demonstra os resultados dessas análises para as seções estudadas. Os valores obtidos ficam situados acima do mínimo recomendado por Cruz (2006) para situações excepcionais, definido como de 1,30. Desse modo,

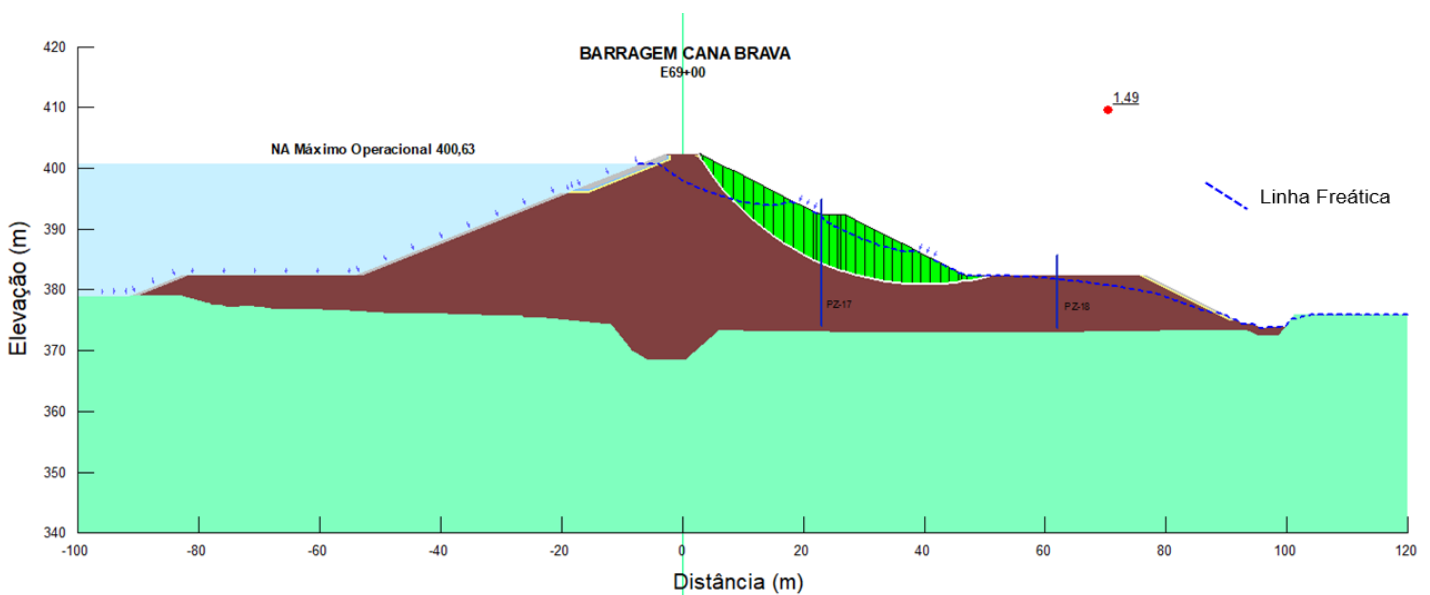
a situação dos instrumentos se enquadra na categoria de perigo “Atenção” segundo os princípios da carta de risco de estabilidade, expostos no item 3.2, Tabela 6, enquanto a estrutura está em situação de “Emergência” considerando as premissas da carta de risco piezométrica, demonstradas na Tabela 7. A Figura 58 demonstra a análise de estabilidade realizada na seção transversal da estaca E 69+00.

Tabela 11 – Fatores de segurança do talude de jusante no cenário crítico hipotético

Seção	FS no cenário crítico hipotético
E 50+00	1,41
E 69+00	1,49
E 85+00	1,45

Fonte: autora (2022).

Figura 58 – Análise da estabilidade do talude de jusante da Seção E69 no cenário crítico



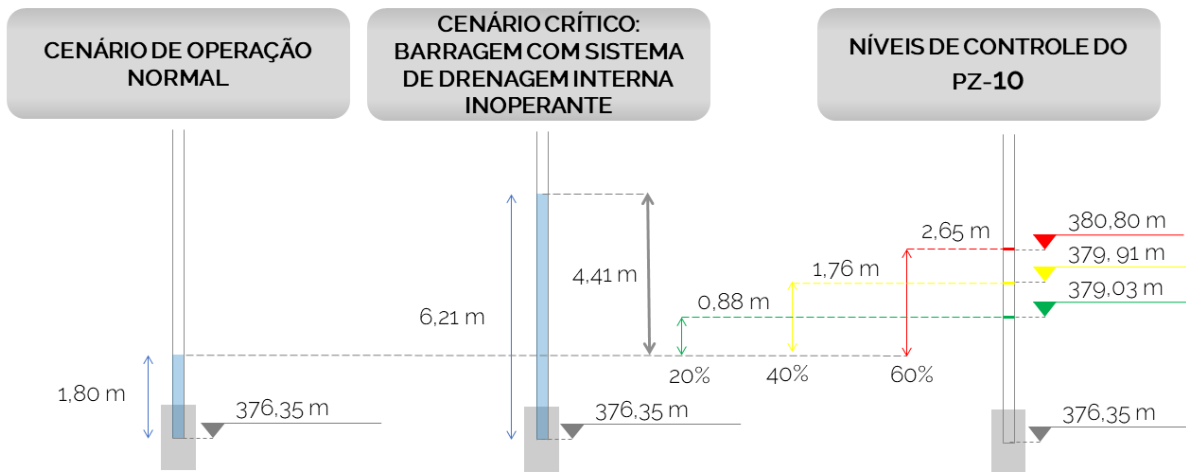
Fonte: autora (2022).

Desse modo, validou-se a metodologia adotada para esse trabalho, pois conforme os resultados expostos na Tabela 11, cotas piezométricas em níveis preocupantes podem não afetar diretamente os fatores de segurança dos taludes da barragem.

4.4 DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE

Portando a medida da diferença de cota piezométrica entre o cenário de operação e o crítico, pode-se calcular os valores de controle para cada uma das situações de segurança definidas na Tabela 7. Desta forma, toma-se as medidas de poropressão do cenário de operação como referência e soma-se a elas as porcentagens referentes a cada uma das situações de controle, conforme exposto no exemplo da Figura 59. A Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam as cotas piezométricas e as cargas piezométricas para cada nível de controle adotado.

Figura 59 – Comparação entre os cenários: valores de carga piezométrica do PZ-10



Fonte: autora (2022).

Tabela 12 – Definição dos níveis de controle dos piezômetros estudados

Estaca	Piezômetro	Cota Piezométrica de Operação (m)	Diferença entre os cenários (m)	Cotas Piezométricas de controle (m)		
				ATENÇÃO (20%)	ALERTA (40%)	EMERGÊNCIA (60%)
E50	PZ-09	378,44	9,87	380,41	382,39	384,36
	PZ-10	378,15	4,41	379,03	379,91	380,80
E69	PZ-17	375,78	10,87	377,95	380,13	382,30
	PZ-18	375,90	6,14	377,13	378,36	379,58
E85	PZ-23	382,60	7,09	384,02	385,44	386,85
	PZ-24	380,75	13,14	383,38	386,01	388,63

Fonte: autora (2022).

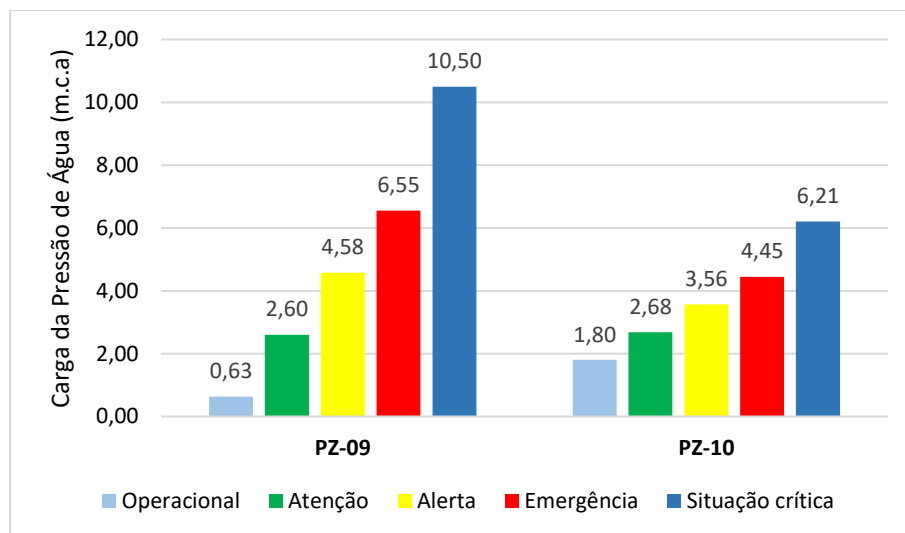
Tabela 13 – Resumo das colunas d'água nos piezômetros para cada situação de segurança do instrumento

Situação de segurança	E50		E69		E85	
	PZ-09	PZ-10	PZ-17	PZ-18	PZ-23	PZ-24
Operacional	0,63	1,80	1,55	2,00	0,00	0,00
Atenção	2,60	2,68	3,72	3,23	1,42	2,63
Alerta	4,58	3,56	5,90	4,46	2,84	5,26
Emergência	6,55	4,45	8,07	5,68	4,25	7,88
Situação crítica	10,50	6,21	12,42	8,14	7,09	13,14

Fonte: autora (2022).

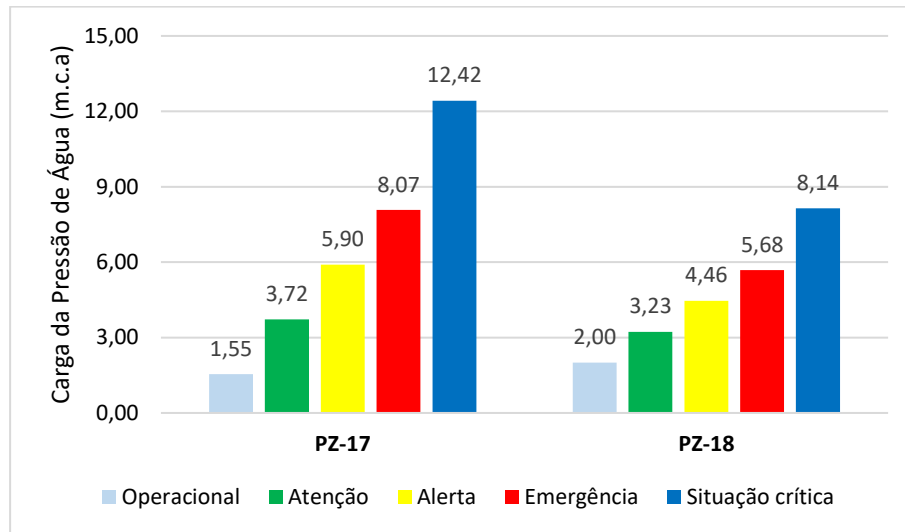
Ao comparar a Tabela 12 e a Tabela 9, exposta no item 3.3.2, pode-se perceber que o sistema de drenagem interna da barragem está operando conforme o previsto, pois praticamente todos os piezômetros estudados localizam-se no filtro horizontal do barramento e as leituras atuais estão abaixo dos níveis de perigo definidos. As figuras a seguir demonstram os valores de controle em metros de coluna d'água no interior dos instrumentos, para cada seção transversal estudada e seus respectivos piezômetros.

Figura 60 – Carta de Risco Piezométrica proposta para a seção da estaca 50+00



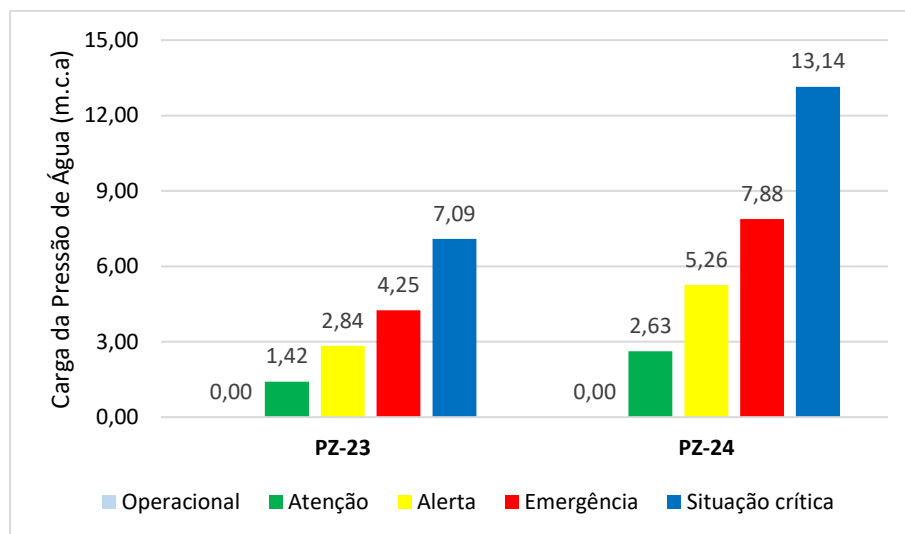
Fonte: autora (2022).

Figura 61 – Carta de Risco Piezométrica proposta para a seção da estaca 69+00



Fonte: autora (2022).

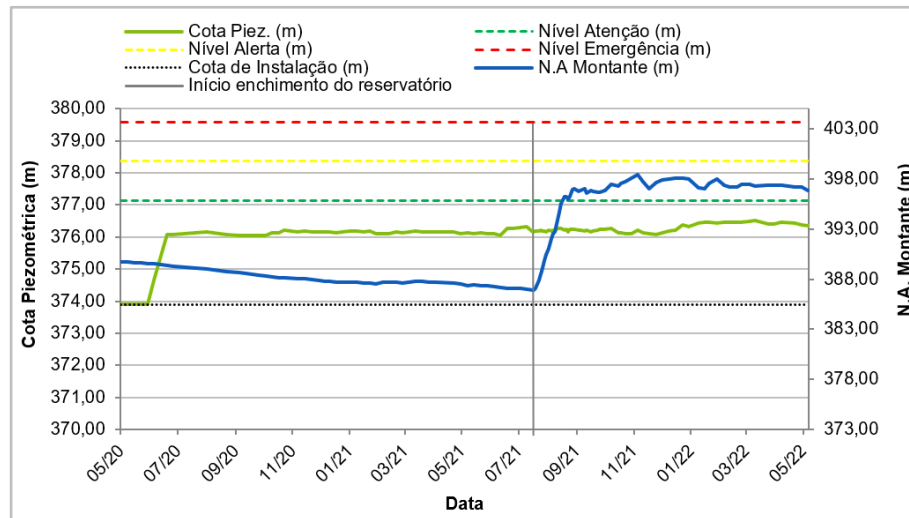
Figura 62 – Carta de Risco Piezométrica proposta para a seção da estaca 85+00



Fonte: autora (2022).

Com os valores de controle de cada piezômetro, o monitoramento da segurança da barragem se torna mais intuitivo, pois eles fornecem uma referência prática para análise das leituras dos instrumentos. A Figura 63 é um exemplo do uso de níveis de referência para o monitoramento de piezômetros, e apresenta o histórico de leituras do piezômetro nº 18, situado na seção da estaca 69+00.

Figura 63 – Histórico de leituras do PZ-18 com os níveis de controle calculados



Fonte: autora (2022).

No caso de a leitura de um piezômetro atingir os valores de atenção, alerta ou emergência, cabe ao empreendedor promover, por meio de equipe técnica, medidas de investigações a respeito da segurança da barragem, tais como: aferição do correto funcionamento do instrumento, análise das leituras dos demais instrumentos próximos ao que apresenta medições alteradas, inspeções de segurança na estrutura, estudo dos modelos que definiram os níveis de controle, entre outros. Se essas investigações confirmarem um comportamento anômalo da estrutura, devem ser previstas intervenções de reforço ou reparo na barragem.

Conforme já abordado nesse trabalho, as leituras dos instrumentos de auscultação não são medidas a serem analisadas isoladamente, pois suas dimensões dependem de diversas questões da área de Geotecnia, cujos parâmetros são dotados de incertezas intrínsecas devido à variabilidade das características de solos e rochas. Uma questão relevante a observar é que os níveis de controle consideram apenas a elevação das pressões como cenário crítico, porém, há casos em que a redução brusca de pressão em um piezômetro pode indicar erosão interna na região próxima, pois o processo de entubamento (ou *piping*) pode causar um decréscimo na pressão semelhante à instalação de um dreno.

Por isso, é importante que as barragens possuam equipe técnica apta a fazer essas análises e colocar em prática as duas principais ferramentas de auscultação de barragens segundo Fonseca (2003): inspeções visuais e instrumentação. As inspeções de segurança regulares devem ser promovidas pelo empreendedor e submetidas ao órgão fiscalizador periodicamente. Nessas inspeções, há um item dedicado à instrumentação da barragem, onde

deve-se expor a situação dos instrumentos em relação a seus níveis de controle, caso a barragem possua os mesmos.

São nas inspeções regulares que se define o Nível Global de Segurança da Barragem (NPGB), o qual pode ser classificado como normal, atenção, alerta ou emergência. Esse parâmetro é definido com base na observação das condições da barragem em campo e análise de documentação do empreendimento. Com essa classificação, o órgão fiscalizador define um filtro para priorizar as estruturas a serem fiscalizadas e pode exigir mais informações ou medidas para atenuar os problemas.

Tendo isso, a gestão de uma barragem só será efetiva e segura com um processo definido de monitoramento periódico da estrutura, como exige a atual legislação de barragens brasileira. Desse modo, a instrumentação é uma ferramenta que confere um alto nível de embasamento nos estudos percolação e estabilidade de uma barragem, fazendo com que o entendimento de anomalias seja mais completo e as intervenções mais efetivas.

5 CONCLUSÕES

Os recentes episódios de desastres causados por rupturas de barragens e as posteriores alterações na legislação federal e diretrizes dos órgãos fiscalizadores demonstram a relevância do tema segurança de barragens no Brasil. Esse trabalho buscou abordar o tema da instrumentação geotécnica no contexto do gerenciamento e segurança de barragens no país.

Para isso, foram expostos alguns dos principais tópicos a respeito de projetos, propriedades, funcionamento de barragens e de práticas profissionais nas áreas especializadas de geotecnia. Também foram abordadas questões a respeito das exigências da atual legislação de segurança de barragens e apresentou-se as características e funcionamento dos principais instrumentos de auscultação utilizados em barragens de aterro no Brasil. Finalmente, foi realizado um estudo de percolação para definição dos níveis de controle piezométricos de uma barragem de terra homogênea, com o uso de ferramentas computacionais que se baseiam no método dos elementos finitos.

Para a simulação do estabelecimento dos níveis de controle, no estudo de caso do trabalho, foi adotado o método comparativo entre um cenário operacional da barragem e outro considerado crítico, que consistiu em considerar a inoperância completa dos dispositivos de drenagem interna da barragem, que podem vir a ocorrer em virtude de uma colmatação ou obstrução do sistema. Os resultados demonstraram circunstâncias de risco à segurança da estrutura, como o talude de jusante quase inteiramente saturado e elevadas poropressões e cargas hidráulicas na porção de jusante do maciço de terra.

Desta forma, obteve-se os valores de poropressão considerados normais e críticos e estabeleceu-se de faixas da diferença entre essas leituras para cada situação de segurança dos instrumentos analisados – atenção, alerta e emergência. Os valores calculados para cada piezômetro poderiam ser inseridos no gráfico de histórico de leituras do instrumento, pois desse modo, a observação do histórico de leituras de cada instrumento seria mais completa, com valores que servem como parâmetros para as medidas observadas.

Foram realizadas também análises de estabilidade dos taludes de jusante da barragem no cenário hipotético crítico para as poropressões adotado. Os resultados dessas análises apresentaram fatores de segurança acima do mínimo exigido pela literatura da área. Ou seja, pode-se concluir que a barragem operando sem um sistema de drenagem estaria segura do ponto de vista de estabilidade. Porém, elevadas poropressões podem causar anomalias que, caso progridam, colocam a segurança da estrutura em risco, a exemplo da erosão interna, segunda maior causa de acidentes em barragens de terra.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a reavaliação dos parâmetros do modelo portando os dados de piezometria provenientes de um maior tempo de operação da barragem, visto que o enchimento do reservatório do empreendimento de estudo ocorreu durante os meses de julho e agosto do ano de 2021, ou seja, apenas dez meses antes das análises deste trabalho. Nesse tempo, não se pode afirmar que houve a estabilização das poropressões na barragem.

Além disso, recomenda-se a definição dos níveis de controle de todos os instrumentos da barragem, e não apenas de piezômetros. A análise de piezometria em conjunto com dados de deslocamentos, vazões de percolação e comportamento da linha freática fornece uma visão mais completa do comportamento da estrutura.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, volume III:** guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem, 2016a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens, volume VIII:** guia prático de Pequenas Barragens. Brasília, 2016b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens volume I:** instruções para apresentação do Plano de Segurança da Barragem. Brasília, 2016c.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens, volume VII:** diretrizes para a elaboração do Plano de operação, manutenção e instrumentação de barragens. Brasília, 2016d.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, volume V:** diretrizes para a Elaboração de Projetos de Barragens. Brasília, 2016e.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Resolução nº 236, de 30 de janeiro de 2017.** Estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. Brasília, DF. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens 2020.** Brasília, DF, 2021. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de->>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução nº 121, de 09 de maio de 2022.** Altera a Resolução ANA nº 236, de 30 de janeiro de 2017, 2022.

BRASIL. **Manual de segurança e inspeção de barragens.** Ministério da Integração Nacional. Brasília, 2002.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Brasília, DF Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Poder Executivo, 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm>

BRASIL. **Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, Poder Executivo, 2020. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art2>

CARVALHO, D. DE. **Barragens. Uma introdução para graduandos.** São Paulo. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, 2011.

CBDB. **A História das barragens no Brasil**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2011.

CBDB. **A legislação de segurança de barragens: um breve histórico e desafios**. Rio de Janeiro, RJ Comitê Brasileiro de Barragens, [s.d.]. Disponível em: <<http://cbdb.org.br/a-legislacao-de-seguranca-de-barragens-um-breve-historico-e-desafios>>. Acesso em: 9 nov. 2021

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (CNRH). **Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012**. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 2012.

CONSÓRCIO OPERADOR. **Relatório da revisão Periódica de Segurança**. Barragem de Cana Brava. 2022

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.

DAS, B. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo, SP. Cengage Learning, 2007.

ELETROBRAS, BRASIL. **Critérios de projeto Civil de usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro, Centrais Elétricas S.A, 2003.

FONSECA, A. DA R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – Estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Ouro Preto, MG, 2003.

FRANCO, C. S. S. P. DE A. **Segurança de barragens: aspectos regulatórios. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente)**. Goiânia, GO. Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2008. Disponível em: www.pdfactory.com

FUSARO, T. C. **Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia de Barragens). Ouro Preto, MG, 2007.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes: 2ª edição com exercícios resolvidos**. São Paulo, SP.: Oficina dos Textos, 2016.

ICOLD. **Dam failures statistical analysis**, Bulletin 99. CICB/ICOLD Paris, 1995.

MAGNA ENGENHARIA. **Projeto as built da instrumentação**. Barragem de Cana Brava. 2019.

MARANGON, M. **Barragens de terra e enrocamento**. Apostila da disciplina Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2004.

MARANGON, M. **Hidráulica dos Solos**. Juiz de Fora. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2018.

MASSAD, F. **Obras de Terra - Curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MIRANTE, A. N. DE. **Curso: Inspeção e Segurança de Barragens**. Curso: Fundação Parque Tecnológico Itaipu e Agência Nacional de Águas, 2016. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2207/2/Material_didatico_-_Parte_II.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022

MONTES, C. C. **Estudos Piezométricos e Análise de estabilidade de taludes da Barragem Bico Da Pedra**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Ouro Preto, MG. Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.

OLIVEIRA, A. S. DE; GUIMARÃES, M. **Monitoramento geotécnico da barragem de terra de uma pequena central hidrelétrica (PCH) no estado de Minas Gerais**. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2019.

PEREIRA, G. M. **Projeto de usinas hidrelétricas**. [s.l.] Oficina de Textos, 2015.

PINTO, C. DE S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3. ed. São Paulo, SP.: Oficina dos Textos, 2006.

RIBEIRO, S. G. S. Estabilidade e Percolação em Barragens. Apostila do curso da empresa GeoFast Geotechnical Modelling. 2020.

SANTOS, V. O. DOS. **Segurança de barragens de concreto: auscultação por instrumentação da barragem da UHE Dona Francisca-RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica). Porto Alegre, RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2018.

SENADO NOTÍCIAS. **Brasil tem nova lei de segurança de barragens**. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/10/01/brasil-tem-nova-lei-de-seguranca-de-barragens>>. Acesso em: 26 nov. 2021.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SMIDERLE, C. DE S. D. **Segurança de Barragens: Análise da Instrumentação da Barragem de Itaúba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Porto Alegre Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

STRUFALDI, E. G. B. **Retro análise probabilística: aplicação prática de análise de percolação em uma barragem de terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Paulo, SP. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

USACE. **Instrumentation of Embankment Dams and Levees**, 1995.