



LUANA SOUZA RIBEIRO

**DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE PIEZOMÉTRICOS
PARA UMA BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS**

**LAVRAS – MG
2023**

LUANA SOUZA RIBEIRO

**DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE PIEZOMÉTRICOS PARA UMA
BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Orientador
MSc. Gedeon Carlos da Silva Junior
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

LUANA SOUZA RIBEIRO

**DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS DE CONTROLE PIEZOMÉTRICOS PARA UMA
BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE REJEITOS
DEFINITION OF PIEZOMETRIC CONTROL LEVELS FOR A TAILINGS DAM**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 12 de dezembro de 2023.

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido (UFLA)

MSc. Gedeon Carlos da Silva Junior (Kinross Brasil Mineração)

MSc. Hugo Assis Brandão (Pimenta de Ávila Consultoria)

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Orientador

LAVRAS – MG

2023

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Fábio e Rejiane, e minhas irmãs, Marina e Camila, pelo apoio, acolhimento, carinho e amor incondicionais. Obrigada pelos valores que me transmitiram e pelo exemplo incansável de dedicação. Vocês são a base de todas as minhas conquistas.

Ao meu namorado, Jordan, pelo suporte, incentivo e encorajamento constantes. Obrigada por se fazer presente mesmo estando distante. Compartilhar essa jornada contigo tornou cada passo mais valioso, e sou profundamente grata por ter você comigo.

À minha amiga Bárbara, por ser tão importante e me apoiar em todos os âmbitos da vida. Obrigada por me ouvir, me acalmar, me aconselhar e me acolher. Os últimos anos foram muito mais felizes e leves com a sua companhia diária.

Aos meus fiéis companheiros da graduação, Carol, Bianca e Filipe, por terem sido minha maior rede de apoio ao longo dos últimos anos. Foi uma dádiva poder ter compartilhado tantos momentos bons e desafiadores ao lado de pessoas tão especiais quanto vocês. Obrigada pela amizade, pelas risadas e pelos conselhos. Sinto muito orgulho de tudo o que construímos juntos.

À Vitória, minha querida psicóloga, por ser luz e sempre me lembrar do que eu sou capaz. Minha vida não seria a mesma sem o seu apoio, seus ensinamentos e suas palavras de conforto.

A todos os amigos e companheiros de trabalho na Pimenta de Ávila Consultoria, ambiente onde conheci pessoas maravilhosas que me apoiam e me incentivam cada vez mais a me tornar uma profissional melhor. Em especial ao Hugo e Mariana. Vocês são grandes inspirações para mim.

Ao professor Eduardo, pela orientação e pelas aulas excepcionais ao longo de minha formação acadêmica. Ao Gedeon, por ter me acompanhado ao longo de todo o trabalho, pela disponibilidade, contribuições e ensinamentos.

E, por fim, à Universidade Federal de Lavras, por todas as oportunidades que me foram concedidas durante a graduação. É uma honra muito grande encerrar um ciclo tão importante quanto esse em uma instituição de tamanho prestígio acadêmico.

RESUMO

Barragens são estruturas destinadas à contenção de água, rejeitos de mineração ou resíduos de processos industriais, contribuindo diretamente para o desenvolvimento da humanidade e configurando empreendimentos de notável interesse econômico. No entanto, são obras que representam riscos potenciais para a vida das pessoas e para o meio ambiente, cujo histórico nacional é marcado por grandes acidentes, que impulsionaram a legislação a estabelecer critérios de segurança cada vez mais rigorosos. Nesse sentido, reforça-se a importância da aplicação de ferramentas que são capazes de fornecer informações a respeito do desempenho das barragens, como, por exemplo, o monitoramento, que pode utilizar da instrumentação geotécnica para aferir diversos parâmetros que refletem o comportamento dessas estruturas. Um recurso muito empregado no ramo da mineração que auxilia diretamente na interpretação dessas leituras e na tomada de decisões é o estabelecimento de níveis de controle para os instrumentos, que permite a definição de valores que auxiliam na avaliação do nível de segurança da barragem frente a um dos modos de falha mais importantes (instabilização). Para o desenvolvimento deste trabalho, foi proposta a simulação dos níveis de controle para os piezômetros instalados em duas seções de uma barragem de rejeitos. Partindo de uma fundamentação teórica a respeito dos tipos de barragens existentes, instrumentos de auscultação empregados no monitoramento, legislação sobre a segurança desses empreendimentos, além de assuntos correlatos como percolação de água em estruturas de terra e análise de estabilidade, o estudo de caso se deu pelo uso de metodologia determinística para a definição dos níveis de controle. Os modelos computacionais foram elaborados no *software* Slide2, sendo calibrados por meio de um processo iterativo, a fim de validar os parâmetros de permeabilidade dos materiais que compõem a barragem de estudo. Posteriormente, foram realizadas análises de fluxo associadas a análises de estabilidade, simulando tanto o cenário de operação normal da barragem quanto cenários críticos, que foram estabelecidos por meio da redução da condutividade hidráulica dos materiais, de modo a obter-se a linha freática correspondente aos fatores de segurança de 1,5, 1,3 e 1,1. Os resultados provenientes do *software* retornaram as leituras nos piezômetros referentes a estas condições de estabilidade, sendo possível estabelecer quatro faixas de risco: normal ($FS \geq 1,5$), atenção ($1,5 > FS \geq 1,3$), alerta ($1,3 > FS \geq 1,1$) e emergência ($FS < 1,1$). Os níveis de controle foram apresentados em formato de tabela e, como forma alternativa, também foram plotados nas duas seções geológico-geotécnicas do estudo, a fim de tornar a visualização dos resultados mais objetiva e intuitiva. Além disso, foram discutidas ações associadas aos níveis de controle piezométricos que podem compor o Plano de Ativação de Ações de Resposta (PAAR), proposto pelo *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM). Por fim, concluiu-se que, apesar de configurar uma ferramenta poderosa para auxiliar a tomada de decisões por parte de um time experiente de profissionais, assim como qualquer outro recurso, os níveis de controle devem ser avaliados com cautela, sendo fundamental que outras ferramentas de gestão também sejam consideradas na análise dos riscos associados à estrutura.

Palavras-chave: Barragem. Segurança. Monitoramento. Instrumentação. Níveis de Controle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais componentes de uma barragem de terra.....	13
Figura 2 – Barragens de terra homogênea e zoneada.....	14
Figura 3 – Barragens de enrocamento.....	15
Figura 4 – Esquema de instalação de um piezômetro de tubo aberto.....	19
Figura 5 – Piezômetro elétrico de corda vibrante modelo VW2100 da <i>RST Instruments</i>	20
Figura 6 – Esquema de instalação de um medidor de nível d'água.....	21
Figura 7 – Medidor de vazão.....	22
Figura 8 – Sonda inclinométrica.....	23
Figura 9 – Medidor de Recalques Telescópico IPT.....	24
Figura 10 – Características que incluem uma barragem na aplicação da PNSB.....	27
Figura 11 – Seção 1.....	36
Figura 12 – Seção 2.....	36
Figura 13 – Malha de elementos finitos gerada para a Seção 1.....	39
Figura 14 – Malha de elementos finitos gerada para a Seção 2.....	39
Figura 15 – Condição normal de operação (Seção 1).....	47
Figura 16 – Condição crítica: nível de atenção (Seção 1).....	48
Figura 17 – Condição crítica: nível de alerta (Seção 1).....	49
Figura 18 – Condição crítica: nível de emergência (Seção 1).....	50
Figura 19 – Condição normal de operação (Seção 2).....	51
Figura 20 – Condição crítica: nível de atenção (Seção 2).....	52
Figura 21 – Condição crítica: nível de alerta (Seção 2).....	53
Figura 22 – Condição crítica: nível de emergência (Seção 2).....	54
Figura 23 – Níveis de controle piezométricos para a Seção 1.....	56
Figura 24 – Níveis de controle piezométricos para a Seção 2.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos instrumentos.	37
Tabela 2 – Níveis de controle associados aos valores de FS.	38
Tabela 3 – Parâmetros de permeabilidade dos materiais da barragem.	40
Tabela 4 – Parâmetros de resistência dos materiais empregados nas análises de permeabilidade.....	43
Tabela 5 – Comparação das cotas piezométricas de campo e das cargas totais obtidas com o <i>software</i>	44
Tabela 6 – Parâmetros de condutividade hidráulica dos materiais obtidos com a calibração dos modelos.....	45
Tabela 7 – Níveis de controle dos piezômetros da Seção 1 e Seção 2.	46
Tabela 8 – Parâmetros de condutividade adotados nas análises para a Seção 1.....	55
Tabela 9 – Parâmetros de condutividade adotados nas análises para a Seção 2.....	55

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CRI	Categoria de Risco
DPA	Dano Potencial Associado
FS	Fator de Segurança
GISTM	Global Industry Standard on Tailings Management
ICOLD	Comissão Internacional de Grandes Barragens
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEL	Método do Equilíbrio Limite
MV	Medidores de Vazão
PAAR	Plano de Ativação de Ações de Resposta
PAEBM	Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PVC	Policloreto de Vinila
PZC	Piezômetro de Tubo Aberto
PZE	Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante
SNISB	Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens
TARP	Triggered Action Response Plan
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Vazão percolada pelo solo
k	Coefficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica
h	Carga que se dissipa na percolação
L	Distância
A	Área
i	Gradiente hidráulico
H	Carga total
u	Pressão neutra
γ_w	Peso específico da água
v	Velocidade
g	Aceleração da gravidade
z	Carga altimétrica
k_i	Condutividade hidráulica ou permeabilidade na direção i
h	Carga total
e	Índice de vazios
S	Grau de saturação
t	Tempo
τ_{res}	Tensão cisalhante resistente
τ_{mob}	Tensões cisalhantes mobilizadas
Su	Resistência ao cisalhamento não drenada
σ'_v	Tensão vertical efetiva
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
c'	Coesão efetiva

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Tipos de barragens	13
2.1.1	Barragens de aterro.....	14
2.2	Monitoramento e instrumentação.....	16
2.2.1	Piezômetros (PZ)	17
2.2.2	Medidores de nível d'água (MNA).....	20
2.2.3	Medidores de vazão (MV).....	21
2.2.4	Inclinômetros (IC)	22
2.2.5	Medidores de recalque	23
2.2.6	Estações meteorológicas.....	25
2.3	Segurança de barragens.....	25
2.3.1	Leis e normas vigentes	26
2.3.2	Percolação de água no solo	28
2.3.3	Análises de estabilidade	30
2.4	Níveis de controle.....	31
3	METODOLOGIA	35
3.1	Estudo de caso.....	35
3.2	Seções geológico-geotécnicas selecionadas para o estudo	35
3.3	Método.....	37
3.3.1	Análises de fluxo	38
3.3.2	Calibração dos modelos	40
3.3.3	Condições de contorno para a modelagem numérica	41
3.3.4	Análises de estabilidade	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Resultado da calibração dos modelos	44
4.2	Definição dos níveis de controle piezométricos.....	45
4.3	Ações associadas aos níveis de controle.....	57
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas que exercem impactos significativos em diversos aspectos da sociedade, sendo empregadas tanto para a gestão de recursos hídricos, quanto para a contenção de resíduos industriais ou de rejeitos de mineração (ANA, 2016). No entanto, por serem submetidas às mais diversas condições, a possibilidade de falhas ou rupturas é inerente às estruturas, configurando um risco potencial para vidas humanas, meio ambiente e economia, que deve ser mitigado.

No Brasil, a ocorrência de grandes acidentes envolvendo barragens de rejeito nos últimos anos, como em Mariana/MG em 2015, e em Brumadinho/MG em 2019, reforçam a importância do controle e gerenciamento adequado de estruturas desse tipo (OLIVEIRA; GUIMARÃES, 2019). Nesse contexto, a legislação nacional tem se tornado cada vez mais rigorosa em relação aos padrões de segurança, a exemplo da lei de segurança de barragens nº 12.334/2010, que foi alterada em 2020 pela lei nº 14.066, introduzindo novas exigências principalmente no setor de mineração, que devem ser incorporadas pelos empreendedores e órgãos fiscalizadores (BRASIL, 2020), e a Resolução ANM nº 95/2022, que consolidou todos os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

Esse aprimoramento legislativo reflete a crescente preocupação em assegurar a integridade das barragens e a segurança das comunidades impactadas, sendo o monitoramento do comportamento dessas estruturas uma atividade essencial para identificar precocemente qualquer sinal de instabilidade, colaborando na prevenção de potenciais riscos. Segundo Costa (2012), o monitoramento geotécnico pode ser feito por meio de inspeção visual, topografia ou empregando instrumentação. Este último recurso é capaz de aferir inúmeras grandezas, de forma quantitativa e direta, e deve contemplar as fases de construção, ocupação do reservatório e operação da barragem, incluindo alteamentos, fechamento, descomissionamento e/ou descaracterização, identificando se há anomalias que possam comprometer o seu desempenho.

Mesmo que os instrumentos permitam ou auxiliem na medição de diversas variáveis, proceder somente com a coleta de informações não garante o aumento de segurança, sendo necessário que haja o tratamento dos dados e análise por uma equipe técnica apta a interpretar os resultados e tomar decisões frente a uma mudança no comportamento da barragem.

Uma ferramenta muito empregada para auxiliar na interpretação dos dados e na tomada de decisões é a definição de níveis de controle para a instrumentação, que estabelece para cada instrumento valores limite para as leituras, de modo que eles indiquem o nível de segurança da estrutura. O interesse no estabelecimento desses valores de controle remonta desde a década de

80, sendo a Itália o país precursor a utilizar métodos determinísticos para a determinação de “faixas de tolerância” a depender do desvio entre as leituras medidas e aquelas previstas (ICOLD, 1989).

Nesse viés, para o desenvolvimento do presente trabalho, foi proposto um estudo de caso com o objetivo de simular a definição dos níveis de controle para a instrumentação de duas seções de uma barragem de rejeitos, composta por piezômetros do tipo tubo aberto e elétrico de corda vibrante, valendo ressaltar que os resultados obtidos possuem fins puramente acadêmicos.

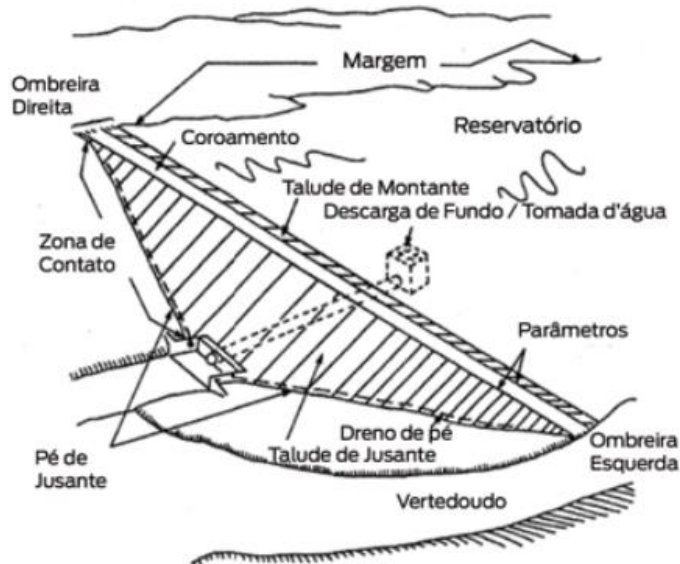
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Tipos de barragens

Barragens são estruturas que podem ser construídas em diversas geometrias e materiais, utilizadas primordialmente para fins de acumulação ou contenção, seja de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos. Construídas pelo homem há milhares de anos, foram fundamentais para o avanço das civilizações, permitindo o desenvolvimento de atividades como agricultura, pecuária e mineração.

Uma barragem possui como principais componentes a estrutura de retenção ou barramento, reservatório, ombreiras, fundação e estruturas extravasoras (ANA, 2016a). A Figura 1 apresenta um esquema de uma barragem de terra e seus principais dispositivos.

Figura 1 – Principais componentes de uma barragem de terra.



Fonte: ANA (2016a).

A depender do propósito, as barragens podem ser classificadas de diversas maneiras: considerando os materiais que compõem a estrutura, o método de construção, finalidade e até mesmo sua altura e volume (porte). Costa (2012) classifica as barragens em dois grandes grupos: convencionais e não convencionais, sendo as convencionais aquelas que possuem mecanismo amplamente conhecido na literatura e são mais utilizadas, incluindo as barragens de terra, enrocamento, concreto e mistas, e as não convencionais são aquelas pouco empregadas, como as de gabião, madeira e alvenaria de pedra. A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, ANA (2016a), classifica aquelas construídas essencialmente com solo e rocha como barragens de aterro, que incluem as barragens de terra e de enrocamento.

2.1.1 Barragens de aterro

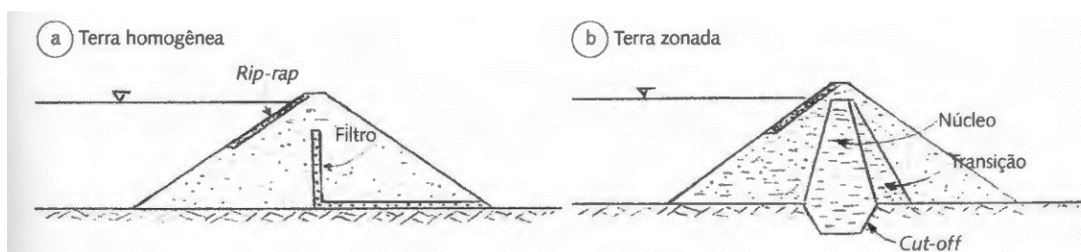
2.1.1.1 Barragens de terra

Segundo Miranda (2016), as barragens de terra são aquelas constituídas por mais de 50% (em volume) de material terroso, e podem ser do tipo homogênea ou zoneada (também chamada de zonada), exemplificadas na Figura 2. Para a construção desses maciços compactados, os materiais extraídos ou escavados para a execução da estrutura são transportados para o local do aterro e espalhados em camadas, que são compactadas e ligadas à camada anterior com o auxílio de rolos compactadores motorizados.

As barragens de terra homogêneas são as mais utilizadas no cenário brasileiro, uma vez que as condições topográficas do país e a grande disponibilidade de material terroso são fatores favoráveis (MASSAD, 2010). Segundo Marangon (2004), elas são compostas por apenas um único tipo de material, excluindo-se a proteção dos taludes. O material deve ser suficientemente impermeável para que constitua uma barreira contra a passagem de água, e os taludes devem possuir inclinação suave para garantir a estabilidade do maciço (MIRANDA, 2016).

Já as barragens de terra do tipo zoneadas, ou zonadas, possuem um núcleo central impermeável, envolvido por outros materiais mais resistentes e consideravelmente mais permeáveis, que podem consistir em areia, cascalho ou fragmentos de rocha. Essas zonas adjacentes têm como objetivo suportar e proteger o núcleo (MARANGON, 2004). A zona de montante deve assegurar a estabilidade da estrutura em situações de esvaziamento rápido do reservatório, enquanto a de jusante, além de garantir a estabilidade, deve funcionar como dreno para controlar o fluxo de água que infiltra através do maciço em caso de inexistência de sistema de drenagem interno (MIRANDA, 2016).

Figura 2 – Barragens de terra homogênea e zoneada.



Fonte: Adaptado de Costa (2012).

2.1.1.2 Barragens de Enrocamento

As primeiras utilizações das barragens de enrocamento, material cujo diâmetro máximo pode atingir até 1,5 m e, de acordo com Penman e Charles (1971) o coeficiente de

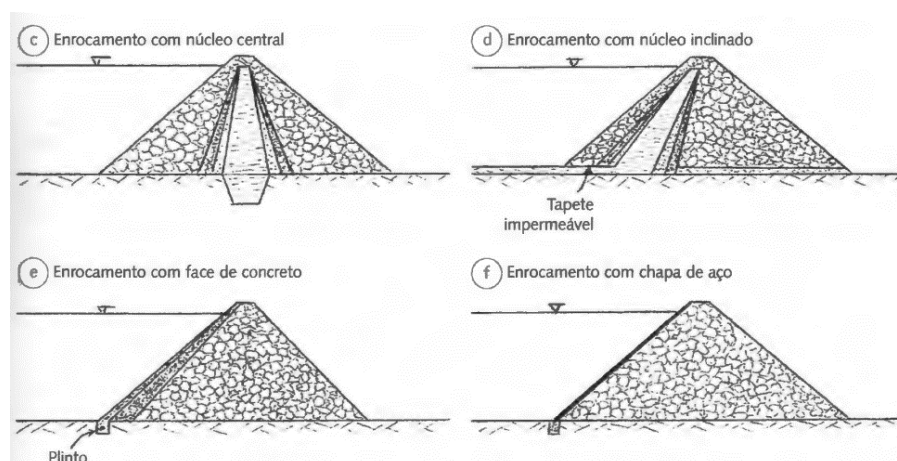
permeabilidade deve ser superior a 10^{-3} cm/s, foram registradas na Califórnia, em meados de 1850 (ICOLD, 2010a), e desde então são amplamente empregadas devido a sua versatilidade e eficiência. De acordo com Miranda (2016), são compostas por mais de 50% de material enrocamento que possua tamanho predominantemente igual ou maior que pedra de mão – também conhecida popularmente como “rachão”, obtida a partir de um procedimento denominado britagem, que gera diferentes tamanhos de rocha, podendo variar entre 80 mm e 200 mm. Devem ser assentadas em fundações mais resistentes, para garantir a compatibilidade com a resistência e deformabilidade dos materiais empregados na construção da estrutura.

Uma barragem de enrocamento possui basicamente duas regiões: uma zona impermeável, que é sustentada por uma zona mais permeável, composta por enrocamento (MIRANDA, 2016). Segundo Costa (2012), com base nas características da zona impermeável, as barragens de enrocamento podem ser de dois tipos: com núcleo impermeável ou face impermeável, representadas na Figura 3.

As barragens de núcleo impermeável possuem configuração relativamente semelhante as barragens de terra zoneada. A zona impermeável, que atua como barreira contra a percolação de água, pode ser composta por materiais argilosos, e pode ser central ou inclinada para montante (MASSAD, 2010). A região externa é constituída de enrocamento mais grosseiro e solto, que possibilita taludes mais íngremes já que é mais estável que um solo de granulometria fina.

Já nas barragens de enrocamento com face impermeável, como o próprio nome diz, para garantir a barreira contra a água a face de montante é impermeabilizada, podendo-se empregar uma placa de concreto, chapa de aço ou camada asfáltica (COSTA, 2012). O corpo da barragem é constituído por enrocamento.

Figura 3 – Barragens de enrocamento.



Fonte: Adaptado de Costa (2012).

2.2 Monitoramento e instrumentação

O monitoramento e a instrumentação de barragens cumprem um papel fundamental na garantia da segurança e no controle operacional dessas estruturas. Sejam convencionais ou para contenção de rejeitos, o interesse na avaliação do comportamento de barragens tem sido crescente, impulsionado principalmente pela ocorrência de falhas nessas estruturas.

Segundo Cruz (2004), os objetivos da instrumentação de uma barragem incluem três pontos principais: verificar critérios, hipóteses e parâmetros estabelecidos no projeto; verificar se os métodos construtivos estão adequados; e avaliar as condições de segurança das obras. E assim como o Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (1996) aponta, para que o sistema de monitoramento e instrumentação seja efetivo, ele deve contemplar todas as fases de desenvolvimento da barragem: construção, ocupação do reservatório e operação da barragem, incluindo alteamentos, fechamento, descomissionamento e/ou descaracterização.

Permitindo acompanhar o desempenho da estrutura, um plano de monitoramento e a implementação de instrumentação adequada configuram uma ferramenta extremamente útil para a tomada de decisões. Os dados coletados a partir das leituras permitem comparar as medições com os valores previstos no projeto e identificar se há algum desvio que possa comprometer a segurança da barragem, facilitando a elaboração de uma resposta rápida e eficaz diante de qualquer evento anormal (AFFONSO, 2004).

Para preparar um programa de monitoramento e instrumentação, deve-se levar em consideração a grande variedade de situações em que se encontram as estruturas, além do objetivo que se deseja alcançar. Cada barragem apresenta uma peculiaridade única, como o local em que se encontra, os materiais que a compõe, o método utilizado para a construção e o tipo de operação, e por isso é indispensável a realização de estudos específicos para que a gestão seja eficiente. Sendo assim, segundo Kanji & Figueira (1990) apud Affonso (2004), os projetos de instrumentação costumam variar muito e não há uma metodologia única para sua elaboração. O Volume VII do Manual do Empreendedor da ANA (2016b) apresenta alguns pontos principais que um plano de monitoramento e instrumentação deve contemplar:

- 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, 2016b, p. 76).

Segundo Silveira (2006), alguns dos parâmetros que podem ser monitorados em barragens incluem a pressão da água nos poros e na rocha de fundação, pressões totais, recalques, deslocamentos horizontais, as cargas e a tensão nos elementos estruturais, temperatura etc. Para barragens de aterro, a ANA (2016b) destaca que as grandezas mais comuns a serem monitoradas são os deslocamentos superficiais; recalques, na barragem e na fundação; deslocamentos da barragem e na fundação; pressões da água, na barragem e fundação; tensões totais na barragem; e os medidores de vazão na fundação.

Silveira (2006) aponta que a seleção do local de instalação de cada instrumento na barragem deve envolver a identificação de áreas de risco, onde, por exemplo, há carregamentos mais intensos ou áreas estruturalmente mais frágeis. Se não há regiões que apresentem essas características, devem ser selecionadas outras seções transversais que possam representar o comportamento geral da estrutura. O Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens, SNISB (2010), indica que a seção de maior altura seja instrumentada, por conta das maiores tensões internas à barragem e maior pressão hidrostática. Recomenda-se que seções que apresentem anomalias geológicas na fundação também sejam instrumentadas.

Para que a instrumentação atenda às necessidades tanto durante a fase de construção da barragem, quanto ao longo de sua vida útil, pode ser que existam critérios diferentes de escolha de instrumentos para essas diferentes etapas. Usualmente, os recursos mais empregados incluem piezômetros, medidores de nível d'água, medidores de vazão, inclinômetros, medidores de recalque e estações meteorológicas, descritos a seguir.

2.2.1 Piezômetros (PZ)

Os piezômetros são os instrumentos utilizados para determinar os valores de poropressões em maciços de terra ou rochosos, em zonas de contato com estruturas de concreto e no sistema de drenagem interna das barragens, possibilitando avaliar o desempenho do dreno e filtro (FONSECA, 2003).

Uma vez que as pressões internas nas fundações, além de geradas pela carga hidráulica proveniente do reservatório, também podem ser produzidas pelas tensões de carregamento causadas pela implantação do próprio barramento, conhecer essas poropressões auxilia na avaliação do comportamento do sistema de drenagem interna e dos dispositivos utilizados para vedação.

Os piezômetros podem ser instalados em profundidades diferentes a jusante da barragem. Segundo Machado (2007), sua locação deve ser evitada em pontos nos quais o

maciço rochoso seja pouco fraturado, ou onde o ensaio de perda d'água sob pressão não indique perda d'água.

Atualmente existem diversos tipos de piezômetros disponíveis no mercado, e a escolha varia de acordo com fatores como a confiabilidade, durabilidade, sensibilidade, necessidade de leituras automatizadas, custo, entre outros. Segundo Cruz (1996), os mais comuns são os piezômetros de tubo aberto, pneumáticos, hidráulicos e elétricos de corda vibrante. Neste trabalho serão abordados dois tipos: os piezômetros de tubo aberto e piezômetros elétricos de corda vibrante.

2.2.1.1 Piezômetros de Tubo Aberto (PZC)

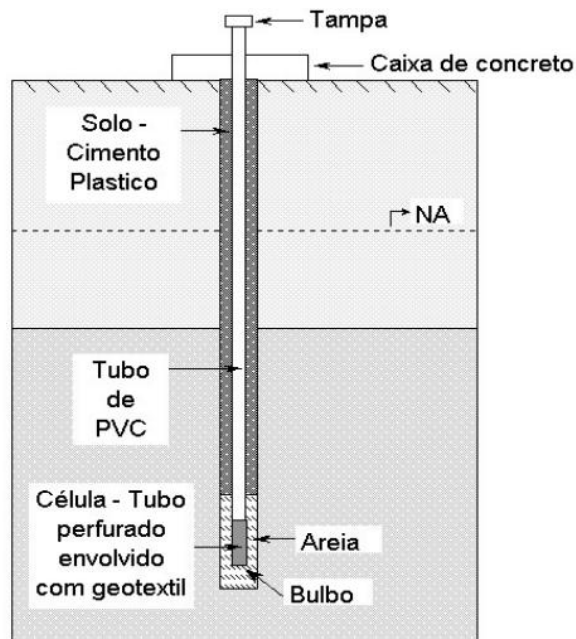
Também conhecidos como piezômetros Casagrande ou *standpipe*, estes instrumentos apresentam vantagens no quesito econômico e facilidade de instalação. Silveira (2006), ainda destaca outros pontos positivos como a possibilidade de verificação do seu funcionamento através de ensaios de recuperação do nível d'água, além da confiabilidade, durabilidade e sensibilidade.

Com relação às desvantagens, Fonseca (2003) destaca que esse tipo de instrumento não é apropriado para a leitura de poropressões na fase de construção, não realiza medição de pressões negativas, causa interferências na praça de construção, possui alto tempo de resposta no caso de materiais de baixos valores de permeabilidade, além de que o acesso aos terminais de leitura é mais complicado se comparado as outras variedades de instrumento.

O processo de instalação é muito parecido com o de um medidor de nível d'água, e as diferenças estão no comprimento e extensão do trecho perfurado (CRUZ, 2004). No caso desses piezômetros, dois ou mais instrumentos podem ser locados no mesmo furo de sondagem, sendo instalados em alturas diferentes.

Como indica a Figura 4, PZCs são constituídos por um tubo de PVC, e em sua extremidade inferior é acoplada uma célula, que fica inserida em um bulbo de material drenante e é confinada em um trecho limitado (de 1,0 a 1,5 m) por uma camada selante, que pode ser de bentonita ou solo-cimento.

Figura 4 – Esquema de instalação de um piezômetro de tubo aberto.



Fonte: Fonseca (2003).

O funcionamento é relativamente simples: a água dos poros passa pelo filtro do bulbo constituído de material drenante, até atingir o equilíbrio com a poropressão. Sendo assim, a poropressão corresponde à altura de água acima do bulbo do instrumento (SILVEIRA, 2006).

De acordo com a ANA (2016b), a leitura é realizada utilizando uma sonda elétrica chamada pio, que é conectada a um cabo e inserida no tubo. A sonda emite um sinal sonoro quando atinge a água, e o valor da poropressão (em metros de coluna d'água) se resume na diferença entre a cota de topo e a cota de fundo do instrumento, menos o valor da leitura registrada no pio.

2.2.1.2 Piezômetros Elétricos de Corda Vibrante (PZE)

Segundo o Manual de Piezômetros de Corda Vibrante (2020) da *RST Instruments*, os piezômetros elétricos de corda vibrante (*vibrating wire - VW*), ou PZEs, possuem saída de frequência de dispositivos VW imune a ruído elétrico externo, sendo capazes de suportar fiação molhada. São compostos por um cabo de aço de tração com uma âncora fixa em uma ponta, acoplados na outra extremidade a um diafragma em contato com a pressão da água. O cabo de aço é excitado eletricamente com a frequência ressonante da vibração proporcional à tensão no mesmo, induzindo uma corrente alternada em uma bobina, que é detectada por uma unidade de leitura, podendo ser convertida para pressão.

O PZE também é equipado com um filtro poroso sinterizado, a fim de impedir que as partículas do solo entrem em contato com a membrana que compõe o diafragma. Além disso,

um termistor, dispositivo eletrônico cuja resistência elétrica varia de maneira significativa com a variação da temperatura, é integrado no corpo do piezômetro, permitindo a medição de temperatura. A Figura 5 demonstra um dos modelos de PZE disponíveis no mercado.

Figura 5 – Piezômetro elétrico de corda vibrante modelo VW2100 da *RST Instruments*.



Fonte: *RST Instruments* (2023).

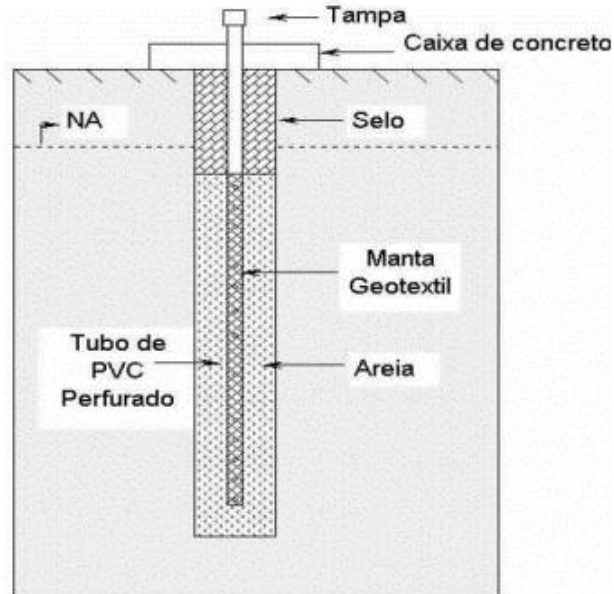
Dentre as vantagens do instrumento, pode-se mencionar que o sinal de frequência obtido é imune aos efeitos do cabo, o que inclui não só o comprimento, mas também aspectos como a emenda, resistência, umidade e ruído. Adicionalmente, o circuito da bobina do cabo de vibração é dotado de um dispositivo de proteção de descarga de gás ionizado integrado contra danos resultantes de surto. Sendo assim, o piezômetro de corda vibrante oferece desempenho excepcional nas mais diversas condições geotécnicas, apresentando curto tempo de resposta, excelente precisão, estabilidade de leituras e confiabilidade a longo prazo. De acordo com Cruz (1996), também são ideais para o processo de automatização de leituras, além de serem capazes de realizar medições de pressões neutras negativas. Entre as desvantagens, pode-se citar o custo elevado de aquisição (FONSECA, 2003).

2.2.2 Medidores de nível d'água (MNA)

Os medidores de nível d'água são os instrumentos mais simples de se construir e operar. Sua função é basicamente determinar a posição da linha freática nos maciços, e a instalação consiste na realização de um furo de sondagem ou poço. De acordo com Cruz (1996), é indicado que, no furo, seja inserido um tubo de PVC perfurado e envolto por um material filtrante e outro

drenante, vide Figura 6, com o intuito de impedir o colapso das paredes e a consequente perda do instrumento. Acima do trecho perfurado é executado um “selo”, como um marco de concreto, a fim de impedir a passagem de águas superficiais e pluviais (FUSARO, 2007).

Figura 6 – Esquema de instalação de um medidor de nível d’água.



Fonte: Fonseca (2003).

A medição normalmente é realizada pelo mesmo sensor do tipo “pio” utilizado em PZCs. O sensor é introduzido pelo tubo, e o contato imediato com a água fecha o circuito elétrico. Sendo assim, a leitura é feita através de trena e referida à extremidade superior do tubo.

A presença de medidores de nível d’água nas barragens é extremamente relevante, uma vez que conhecer a posição exata da linha freática no interior do maciço pode contribuir para uma análise de estabilidade mais coerente.

2.2.3 Medidores de vazão (MV)

Os medidores de vazão são fundamentais para o gerenciamento de barragens, pois permitem conhecer o fluxo de água por meio da medida direta da vazão, contribuem para a gestão dos recursos hídricos e ajudam na avaliação da operação eficiente das estruturas.

A instalação adequada dos medidores de vazão é um aspecto importante a ser considerado. De acordo com Rocha et al. (2016), eles devem ser posicionados em locais representativos do fluxo de água, evitando obstruções que possam comprometer a medição. Em geral, são locados a jusante dos maciços drenantes das barragens e em zonas onde se verificaram surgências durante a construção.

A escolha do tipo de medidor a ser utilizado depende das características específicas da barragem, como o tamanho da vazão esperada e as condições hidráulicas. Os sistemas mais utilizados incluem recipientes com volume conhecido e que possam ser enchidos em menos que 30 segundos, além dos vertedouros do tipo triangulares ou retangulares (COSTA, 2012).

Uma metodologia de medição de vazão que é amplamente adotada consiste na construção de caixas de concreto para onde o fluxo de percolação é conduzido, possuindo uma saída equipada com um dispositivo vertedouro formado por uma pequena comporta com abertura em “V”, geralmente de material metálico ou acrílico, assim como exemplificado na Figura 7. O cálculo da vazão é realizado fazendo a diferença entre a altura do vértice do vertedor e da lâmina d’água, que é medida 1 metro a montante da placa (ANA, 2016b).

Figura 7 – Medidor de vazão.



Fonte: ANA (2016b).

Um aspecto importante são os cuidados de manutenção que se deve manter com o instrumento, uma vez que os locais onde eles estão instalados também podem servir como pontos de coleta de amostras para análises físico-químicas e medição de turbidez, que é indicativo qualitativo do funcionamento da estrutura (FONSECA, 2003). Sendo assim, é fundamental manter o contato entre a chapa do vertedouro e o concreto livre de vazamentos, remover qualquer tipo de sedimentos de dentro da caixa, além de evitar a oxidação e depósito de lodo na régua do medidor (FUSARO, 2007).

2.2.4 Inclinômetros (IC)

Os inclinômetros são instrumentos capazes de mensurar deslocamentos horizontais, sendo empregados para a avaliação da estabilidade de taludes. São compostos por um conjunto de tubos metálicos ou plásticos, instalados no sentido horizontal, sub-horizontal ou inclinados,

dependendo do perfil de deslocamentos que se pretende obter; esses tubos possuem dois pares de ranhuras internas, diametralmente opostas (ANA, 2016b).

Para realizar a medição, no caso de tubos instalados verticalmente, é utilizado um sensor à prova d'água atrelado a um cabo (Figura 8), que transmite sinais elétricos para a caixa de leitura, indicando a inclinação do sensor com relação à vertical (ANA, 2016b). Para tubos horizontais, o sensor é introduzido até a sua base e içado, de forma lenta, realizando leitura a cada meio metro. A inclinação desse torpedo é transformada em desvio horizontal de deslocamento, e, fazendo uma comparação com a leitura de referência (realizada imediatamente após a instalação), é possível observar a variação dos deslocamentos horizontais.

Figura 8 – Sonda inclinométrica.



Fonte: ANA (2016b).

Segundo Fonseca (2003), a instalação pode ser no início da construção do aterro, fixando o primeiro tubo guia em um ponto considerado indeslocável. A colocação também pode ser feita posteriormente, em furos de sondagem, e, nesses casos, de acordo com Cruz (1996), o espaço entre o furo e os tubos deve ser preenchido com uma mistura de solo, cimento e bentonita, para reduzir a dispersão dos resultados quando comparado com a utilização de areia para realizar o preenchimento dessa área.

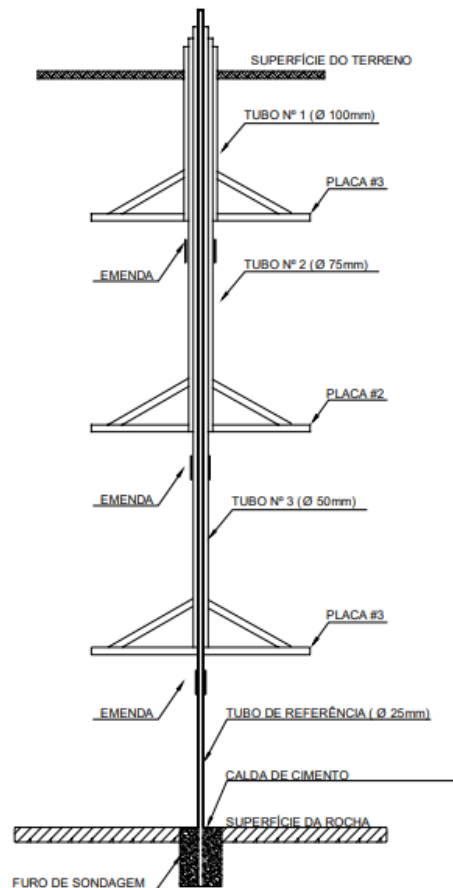
2.2.5 Medidores de recalque

Os medidores de recalque têm como função averiguar os deslocamentos verticais tanto no maciço quanto na fundação. Podem ser de vários tipos, como medidores magnéticos, telescópicos, USBR, KM, entre outros.

O mais empregado no Brasil é o do tipo telescópico, também conhecido como Medidor de Recalque tipo IPT, uma vez que foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (SILVEIRA, 2006). É composto por um tubo galvanizado de 25 mm, instalado

em base indeformável, e de uma ou mais placas acopladas a outros tubos também galvanizados. Os tubos de maior diâmetro são associados às placas que estão em cotas mais elevadas, conforme indica a Figura 9. À medida que mais camadas de aterro do barramento vão sendo construídas, são instaladas novas placas, de modo que o tubo seja posicionado concentricamente ao tubo de referência (COSTA, 2012).

Figura 9 – Medidor de Recalques Telescópico IPT.



Fonte: Cruz (1996).

De acordo com Cruz (2003), a leitura é realizada fazendo um puncionamento na extremidade superior de cada tubo. A leitura de cada placa é obtida ajustando um compasso de pontas secas nas punções do tubo de referência e no tubo da placa que se deseja realizar a medição. Em seguida, utilizando uma escala milimetrada, mede-se a distância entre as pontas do compasso, e o recalque da placa em questão será a variação entre a leitura do momento e a leitura inicial da placa. Sendo assim, para o recalque das camadas, tem-se:

- Recalque camada 0/1 = recalque placa 1;
- Recalque camada $\frac{1}{2}$ = 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).

Uma vantagem do medidor de recalque telescópico é a facilidade de instalação e uso. Ele pode ser fixado à estrutura de forma simples e rápida, permitindo monitoramento contínuo e em tempo real. Além disso, como não requer alimentação elétrica ou dispositivos eletrônicos complexos, o medidor de recalque telescópico é relativamente econômico e de baixa manutenção (CRUZ, 1996).

É importante destacar que, embora o medidor de recalque telescópico seja uma ferramenta útil, ele possui algumas limitações. Sua precisão pode ser afetada por fatores como a estabilidade do solo, a temperatura ambiente e a exposição a condições climáticas adversas. Além disso, a leitura direta dos deslocamentos ou inclinações requer uma interpretação visual precisa, o que pode apresentar limitações em termos de sensibilidade e precisão em comparação com sistemas eletrônicos de medição.

2.2.6 Estações meteorológicas

As estações meteorológicas instaladas em barragens são capazes de coletar dados essenciais para compreensão das condições meteorológicas locais e monitorar as variações climáticas ao longo do tempo. Além de fornecer informações como temperatura e precipitação pluviométrica (ANA, 2016b), elas também permitem determinar taxas de infiltração, vazões de escoamento superficial e ajudam a avaliar a necessidade de implantação de dispositivos de drenagem superficial (MACHADO, 2007).

Para aferição da temperatura do ar, por exemplo, são utilizados termômetros de máxima e mínima, que devem ser instalados em pontos que representem as condições ambientais do local da barragem, e onde não há incidência direta de raios solares (ANA, 2016b).

A medição da quantidade de precipitação pode ser feita por meio dos pluviógrafos. Eles são instrumentos fundamentais para o monitoramento contínuo da precipitação, registrando a quantidade e a intensidade das chuvas em intervalos regulares. Esses dispositivos são compostos por um coletor de chuva conectado a um mecanismo de registro, que pode ser mecânico ou eletrônico. A precisão e a frequência dos registros fornecem informações valiosas para a análise climatológica e hidrológica, auxiliando no estudo dos padrões de chuva, previsão de enchentes e gestão dos recursos hídricos.

2.3 Segurança de barragens

Nesse tópico serão discutidos aspectos a respeito da temática de segurança de barragens, a iniciar pelas legislações existentes no Brasil, e, posteriormente, outras pautas como a percolação de água no solo e análises de estabilidade também serão apresentadas, discorrendo

sobre a importância do entendimento do comportamento das barragens para a garantia da minimização dos riscos.

2.3.1 Leis e normas vigentes

A segurança de barragens é um tema de extrema importância, uma vez que a falha dessas estruturas pode levar a consequências devastadoras, como inundações, perda de vidas humanas e danos ambientais significativos. Tanto em nível mundial quanto no cenário brasileiro, diversos eventos trágicos já foram registrados envolvendo o colapso de barragens, que despertaram a necessidade de políticas e diretrizes mais rigorosas para garantir a segurança dessas estruturas.

Historicamente, a preocupação com a segurança de barragens remonta a vários séculos atrás, mas foi somente no século XX que as normas e regulamentos começaram a ser desenvolvidos em maior escala. No âmbito internacional, a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) foi fundada em 1928, com o objetivo de promover o intercâmbio de conhecimentos e experiências sobre barragens.

No cenário brasileiro, o país possui uma grande quantidade de barragens, especialmente devido à sua vasta extensão territorial e à importância da água para diversos setores, como a geração de energia elétrica, abastecimento público e agricultura. Infelizmente, o Brasil também vivenciou eventos trágicos envolvendo o rompimento de barragens, como os desastres de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, que resultaram em um grande número de vítimas e impactos ambientais irreparáveis.

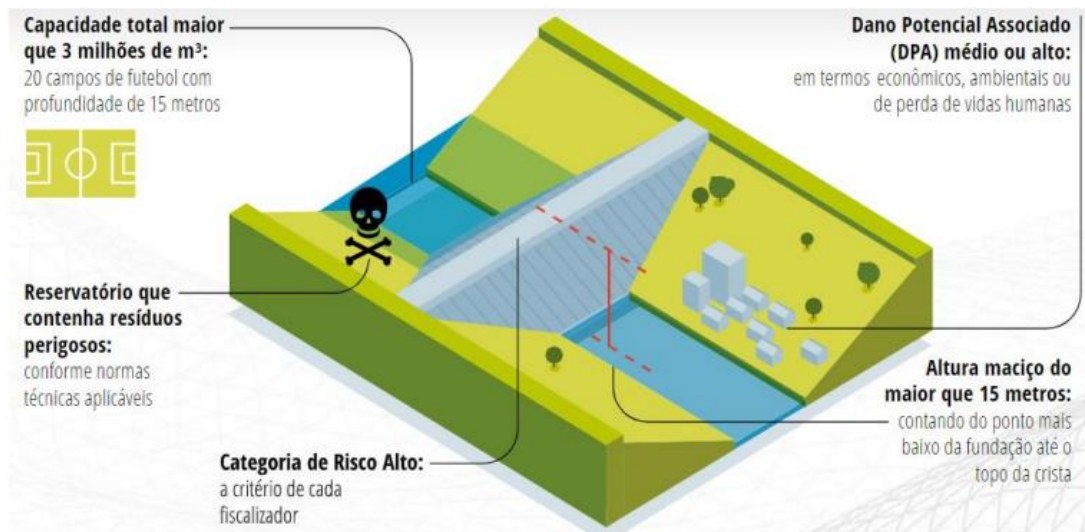
Em resposta a esses desastres, o Brasil tem adotado uma série de medidas para aprimorar a segurança das barragens. Em 2010, foi promulgada a Lei nº 12.334, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Essa lei definiu diretrizes gerais para a segurança de barragens, incluindo a obrigatoriedade de elaboração de planos de segurança, realização de inspeções periódicas e a classificação das barragens de acordo com o seu potencial de dano. Os instrumentos propostos pela PNSB são:

- I - o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- II - o Plano de Segurança da Barragem, incluído o PAE;
- 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.
- VIII - o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH);

- IX - o monitoramento das barragens e dos recursos hídricos em sua área de influência;
- X - os guias de boas práticas em segurança de barragens. (BRASIL, 2010).

No entanto, nem todas as estruturas estão inclusas nas exigências dessa legislação. Para que a PNSB se aplique, no caso de barragens de água, a barragem precisa possuir ao menos uma das características mostradas na Figura 10:

Figura 10 – Características que incluem uma barragem na aplicação da PNSB.



Fonte: ANA (2021).

Posteriormente, em 2020, a Lei nº 14.066 foi aprovada, modificando a PNSB e trazendo alterações importantes para a segurança de barragens no Brasil. Essa nova lei ampliou o escopo da PNSB, incluindo a fiscalização de barragens de mineração, e estabeleceu prazos mais rigorosos para a implementação das medidas de segurança.

Além das leis, o Brasil também conta com diversos documentos e diretrizes específicas para a segurança de barragens, emitidos por órgãos reguladores como a Agência Nacional de Águas (ANA) e a Agência Nacional de Mineração (ANM). Esses documentos estabelecem critérios técnicos e procedimentos a serem seguidos na construção, operação, manutenção e monitoramento das barragens.

Em fevereiro de 2022 foi publicada a Resolução ANM N° 95, que consolidou os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Seus critérios reforçam a importância da avaliação contínua da segurança dessas estruturas com base em análises de estabilidade atualizadas e que representem a atual situação das barragens, além da implementação efetiva de medidas corretivas para anomalias identificadas. A referida resolução também apresenta diretrizes para a classificação das barragens de rejeito de mineração com relação ao Dano Potencial Associado (DPA) e à Categoria de Risco (CRI), e categoriza as

situações de emergência em função do risco atual para a segurança da estrutura (BRASIL, 2022).

Em suma, a definição e as complementações recentes das políticas de segurança de barragens no Brasil foram motivadas por desastres ocorridos no passado, que revelaram a necessidade de medidas mais rigorosas para garantir a segurança dessas estruturas. As leis, como a Lei nº 12.334 e a Lei nº 14.066, bem como os documentos e diretrizes emitidos pelos órgãos reguladores, como a Resolução ANM nº 95/2022, têm o objetivo de estabelecer padrões mais elevados de segurança e fiscalização das barragens, visando a prevenção de acidentes e a proteção da vida humana e do meio ambiente.

2.3.2 Percolação de água no solo

Conforme mencionado por Pinto (2006), os solos são materiais permeáveis por conta dos vazios conectados através dos quais a água consegue se movimentar, saindo dos pontos de maior energia em direção aos de menor energia. Sendo assim, conhecer o comportamento da movimentação da água no interior do solo e as tensões geradas por ela é essencial para diversas situações práticas no que se refere à segurança de barragens, como cálculo de vazões, estudo de recalques e análises de estabilidade.

A velocidade com que a água pode se movimentar pelo solo, ou ainda, a facilidade com que o solo permite a sua passagem, é representada pelo coeficiente de permeabilidade ou coeficiente de condutividade hidráulica (k). Darcy, em 1956, conseguiu expressar uma solução que determinasse tal coeficiente (Lei de Darcy), conforme Equação (1):

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

Sendo: Q a vazão percolada pelo solo ($m^3/s/m$); k o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (m/s); h a carga que se dissipa na percolação (m.c.a); L a distância ao longo da qual a carga se dissipa (m); A a área do permeâmetro (m^2); e i o gradiente hidráulico.

Segundo Gerscovich (2016), a carga hidráulica total que atua sobre um ponto específico, pode ser definida partindo da Equação de Bernoulli, somando-se as cargas de pressão, elevação e velocidade, conforme apresentado na Equação (2).

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

Onde: H é a carga total ; u a pressão neutra; γ_w o peso específico da água; v a velocidade; g a aceleração da gravidade; e z a carga altimétrica.

Fundamentado nas equações de continuidade, Gerscovich (2016) ainda explica que a diferença de vazão que entra e sai do interior de um elemento é igual à variação do volume de água no tempo transcorrido. Deste modo, e considerando a validade da Lei de Darcy, mencionada anteriormente, a formulação geral que representa o fluxo bidimensional nos meios porosos é expressa pela Equação (3):

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

Sendo: k_i a condutividade hidráulica ou permeabilidade na direção i ; h a carga total; e o índice de vazios; S o grau de saturação; e t o tempo.

No entanto, o modelo pode ser simplificado fazendo as seguintes considerações: a) como o fluxo interno em taludes acontece na área saturada ($\partial S/\partial t = 0$), pode-se desprezar os efeitos de capilaridade do solo; b) despreza-se a variação volumétrica no solo promovida pelas movimentações de água ($\partial e/\partial t = 0$); c) assume-se isotropia em relação à condutividade hidráulica ($k_x = k_z$); d) assume-se que os grãos e moléculas de água são incompressíveis. Deste modo, a Equação (3) resume-se à Equação de Laplace, vide Equação (4), amplamente conhecida e utilizada:

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

Gerscovich (2016) também explica que existem diversos caminhos para se resolver a Equação de Laplace no contexto de percolação de água em solos, sendo os mais empregados conhecidos como redes de fluxo e métodos numéricos. Uma vez que a elaboração de redes de fluxo pode ser um processo complexo, visto que a maioria das barragens são compostas por múltiplos materiais que possuem permeabilidades diferentes, neste trabalho será abordada somente a solução por métodos numéricos.

Segundo Cruz (1996), os métodos numéricos são capazes de traçar qualquer rede de fluxo. O Método dos Elementos Finitos (MEF) pode ser empregado para solucionar a equação de Laplace e discretizar o modelo de percolação. Uma das principais vantagens do MEF é sua flexibilidade para lidar com geometrias complexas e comportamentos não-lineares. Além disso, ele permite a utilização de diferentes tipos de elementos finitos, como elementos de barra,

elementos de placa e elementos tridimensionais, para modelar adequadamente as características do problema em análise.

De acordo com Strufaldi (2004), um estudo de percolação empregando o MEF pode ser executado em três passos. Primeiramente, é necessário modelar o problema, definindo uma malha de elementos finitos, as propriedades de permeabilidade dos materiais e as condições de contorno. Em seguida deve-se processar o modelo, utilizando a formulação do sistema de equações que rege os elementos finitos. O terceiro passo envolve a avaliação dos resultados e validação do modelo.

2.3.3 Análises de estabilidade

A análise de estabilidade é um componente fundamental no projeto e monitoramento de barragens, pois visa garantir a segurança das estruturas e das comunidades circundantes. Envolvendo um conjunto de procedimentos, as análises de estabilidade permitem quantificar o quão próximo da ruptura os taludes de montante e/ou jusante se encontram, considerando todas as condições de carregamento impostas pelo projeto.

De modo geral, em uma porção de solo, quando as tensões cisalhantes mobilizadas atingem a resistência ao cisalhamento, ocorrem os chamados escorregamentos de massa, que são movimentos rápidos e costumam formar superfícies bem definidas (GERSCOVICH, 2016). A possibilidade de ocorrência dessa falha, que é avaliada por meio das análises de estabilidade, pode se dar por meio da determinação de um Fator de Segurança (FS) dado pela Equação (5), conforme Silva (2019), que compara a resistência ao cisalhamento com as tensões cisalhantes mobilizadas na superfície de ruptura:

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{mob}} \quad (5)$$

Sendo: τ_{res} a tensão cisalhante resistente e τ_{mob} as tensões cisalhantes mobilizadas.

Existem diferentes métodos para obtenção do FS, no entanto, o mais utilizado é o método do equilíbrio limite (MEL), sendo destacado por Thomaz (1984) que sua grande aceitação se deve a fatores como simplicidade, nível de acurácia satisfatório dos resultados e o baixo custo para o processo de estimativa dos parâmetros de resistência do solo com a confiabilidade necessária para o funcionamento adequado do método.

O método de equilíbrio limite admite que um talude se encontra estável desde que o FS seja maior do que 1, e assume que a ruptura ocorre ao longo de uma superfície circular, poligonal ou de geometria qualquer. Dentre as hipóteses simplificadoras do método, Massad

(2010) aponta: considera-se que o solo se comporta como material rígido-plástico, rompendo de maneira brusca sem se deformar; as equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura; o coeficiente de segurança é o mesmo ao longo da superfície de ruptura.

A maioria dos métodos de equilíbrio limite divide a superfície de ruptura em várias fatias verticais, nas quais são aplicadas, isoladamente, as equações de equilíbrio (USACE, 2003), caracterizando o método das fatias (ou lamelas). Em função das suposições feitas para atender as condições de equilíbrio, existem vários métodos que podem ser empregados, como Fellenius (1927), Bishop (1955), Morgenstern e Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1973) e Bishop Simplificado (1995), sendo que os métodos de Morgenstern e Price (1965) e Spencer (1967) são mais rigorosos que os demais, uma vez que resolvem tanto o equilíbrio de forças quanto de momentos.

2.4 Níveis de controle

Assim como mencionado por Montes (2004), a falta de um sistema eficiente de controle do fluxo interno de água configura uma das principais causas de acidentes e rupturas de barragens. Por isso, é de extrema importância que toda estrutura possua instrumentos de auscultação, pois com a leitura e interpretação dos dados do processo de monitoramento, é possível deduzir a linha freática no interior do barramento e conseqüentemente determinar sua estabilidade.

Nesse sentido, costuma-se definir valores de leitura de referência (níveis de controle) para cada instrumento, de modo que, quando comparados com as medições realizadas em campo, consigam indicar o nível de segurança da estrutura quanto à estabilidade dos taludes. A Resolução ANM N° 95 de 07 de fevereiro de 2022, estabelece que esses níveis podem ser classificados em normal, alerta e emergência, sendo considerada como situação de alerta quando detectada uma anomalia que não compromete de imediato a segurança da barragem, mas que deve ser controlada e monitorada; e como situação de emergência qualquer cenário que represente potencial risco de comprometer a segurança da estrutura. Além dos três níveis estabelecidos pela referida resolução, Penna et al. (2017), cita que normalmente também pode ser considerado, entre as situações normal e alerta, o nível adicional de atenção.

Embora seja um requisito legal, é válido salientar que não há metodologia regulamentada a ser aplicada para a definição dos níveis de controle. No setor mineral, é comumente empregada uma ferramenta conhecida como “carta de risco”, que define os níveis de controle para piezômetros e indicadores de nível d’água (Penna et al., 2017). No entanto, atualmente o termo “carta de risco” tem entrado em desuso, visto que pode induzir o leitor a

concluir que o documento trata dos riscos de uma estrutura, quando na verdade ele está mais associado a níveis de controle para instrumentação geotécnica. Por isso, tem-se utilizado mais recentemente o termo “estabelecimento dos níveis de controle da instrumentação” ou similar.

De acordo com Fusaro (2007), os níveis de controle costumam ser obtidos por meio de duas abordagens: estatística ou determinística. A abordagem estatística é derivada da análise do comportamento da série histórica dos instrumentos, ou embasada na consideração de informações da bibliografia técnica e da experiência a respeito de outras barragens semelhantes (FUSARO, 2007). Entre os principais métodos estatísticos empregados estão os diagramas de dispersão, regressão linear e polinomial, séries temporais, médias móveis, entre outros (MENGA et. al, 1999).

Já a metodologia determinística propõe que os valores sejam estabelecidos por meio de modelos matemáticos, de forma que o nível de segurança da barragem é indicado pela concordância entre o valor medido em campo e o valor previsto analiticamente para as condições de contorno correspondentes. Sendo assim, são simuladas situações que alterem o nível da linha freática na barragem. Uma vez que essas simulações representam cenários que variam as poropressões internas na estrutura, podem ser feitas associações com valores de fatores de segurança (FS). Deste modo, cada nível de controle é associado a um desses valores, o que auxilia diretamente no processo de análise da influência da elevação da linha freática no interior da barragem, e conseqüentemente nas suas condições de estabilidade.

Fusaro (2007) ainda aponta que não existe um critério único para a definição da faixa de valores empregada para os FS associados aos níveis de controle no Brasil, indicando que comumente o nível de atenção é estabelecido para coeficientes de segurança entre 1,5 e 1,2, e o nível de emergência para coeficientes inferiores a estes. Ligocki et. al (2003) também adota, baseando-se em valores praticados na engenharia de barragens, para situação de atenção, condições de fluxo que resultam em FS entre 1,5 e 1,2, sendo aquelas com $FS < 1,2$ classificadas no nível de emergência. Para Penna et. al (2017), os níveis freáticos devem ser variados nas análises até que se obtenha os FS de 1,5, 1,3 e 1,1, sendo considerado como nível normal de operação aquele em que os níveis piezométricos refletem uma condição de estabilidade associada a FS superiores a 1,5, limite o recomendado pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), ou Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, para estabilidade de barragens; como nível de atenção quando o FS varia entre 1,5 e 1,3, alerta entre 1,3 e 1,1, e, por fim, emergência quando o FS é inferior a 1,1.

Embasado na metodologia determinística, Velten et. al (2016) propôs um método para elaboração de “cartas de risco” para barragens de terra-enrocamento, consistindo em quatro

etapas: elaboração de análises de percolação, elaboração de análises de estabilidade para os resultados obtidos nas análises de percolação realizadas na etapa anterior; elaboração de análises de estabilidade para superfícies freáticas obtidas manualmente; e, por fim, a obtenção dos níveis de controle. Entre outros trabalhos relacionados à metodologia determinística, Ligocki et. al (2003) apresentou a definição dos níveis de controle (normal, atenção e emergência), para os registros piezométricos de uma estrutura quando dos estudos de elevação do nível do reservatório para a instalação de uma unidade geradora adicional, por meio de análises simulando condições de fluxo que conduzissem a FS que refletiam diferentes situações de estabilidade.

É importante ressaltar que a metodologia determinística apresenta certas restrições:

- no caso de barragens de terra e/ou enrocamento, os limites obtidos indicam basicamente a possibilidade de ruptura por escorregamento, não conseguindo avaliar outros mecanismos de falha como “piping” ou recalques excessivos de fundação;
- os valores limites determinados para cada instrumento geralmente são fixos e incapazes de mostrar mudanças na velocidade de variação das medidas no tempo;
- as análises usualmente não consideram a variabilidade dos parâmetros geotécnicos;
- existem muitas causas de diferenças entre os valores previstos em projeto e aqueles obtidos pela instrumentação, e um modelo matemático, por melhor que seja definido e por mais criteriosa que tenha sido sua calibração, dificilmente conseguirá representar com perfeição todas as medidas e especificidades dos instrumentos instalados. (FUSARO, 2007, p. 73).

No entanto, apesar destas restrições, as informações obtidas por meio dessa metodologia continuam sendo importantes para o controle ao longo do tempo e para a avaliação do estado de segurança de uma estrutura, uma vez que abordam a concepção, as premissas e os objetivos do projetista quando do projeto da barragem. Além disso, Fusaro (2007) também destaca a importância e a validade dos modelos determinísticos essencialmente nos primeiros anos de operação da estrutura, momento no qual ainda não há um histórico de observações da instrumentação bem definido, que permita a análise de tendências históricas ou correlação com outras grandezas.

Segundo Montes (2003), a formatação da apresentação dos níveis de controle deve ser simples e objetiva, para que a ferramenta seja de fácil observação e interpretação. Sendo assim, ela desempenha um papel crucial na gestão da segurança dessas estruturas, permitindo uma compreensão clara dos potenciais perigos e auxiliando na tomada de decisões relacionadas à prevenção e mitigação de riscos.

No entanto, assim como aponta Penna et al (2017), os níveis de controle devem ser considerados um recurso complementar na prática de segurança de barragens, não podendo ser observados isoladamente. Quando um instrumento ultrapassa os valores de atenção, alerta ou até mesmo emergência, não se deve inferir de forma imediata que toda a estrutura está enquadrada nessas condições, visto que as atividades do monitoramento envolvem não apenas a interpretação das leituras dos instrumentos, mas também inspeções visuais e reavaliação dos parâmetros adotados no projeto, além de que são corriqueiras situações nas quais os instrumentos apresentem problemas de funcionamento, bem como equívocos no momento da instalação, leitura ou calibração. Nesse sentido, é essencial que a avaliação das leituras da instrumentação, especialmente ao serem identificados registros que ultrapassem algum nível de controle, seja realizada por profissionais capacitados para tal, com avaliação conjunta das leituras de todos os instrumentos de uma mesma seção para que sejam definidos os próximos passos.

3 METODOLOGIA

3.1 Estudo de caso

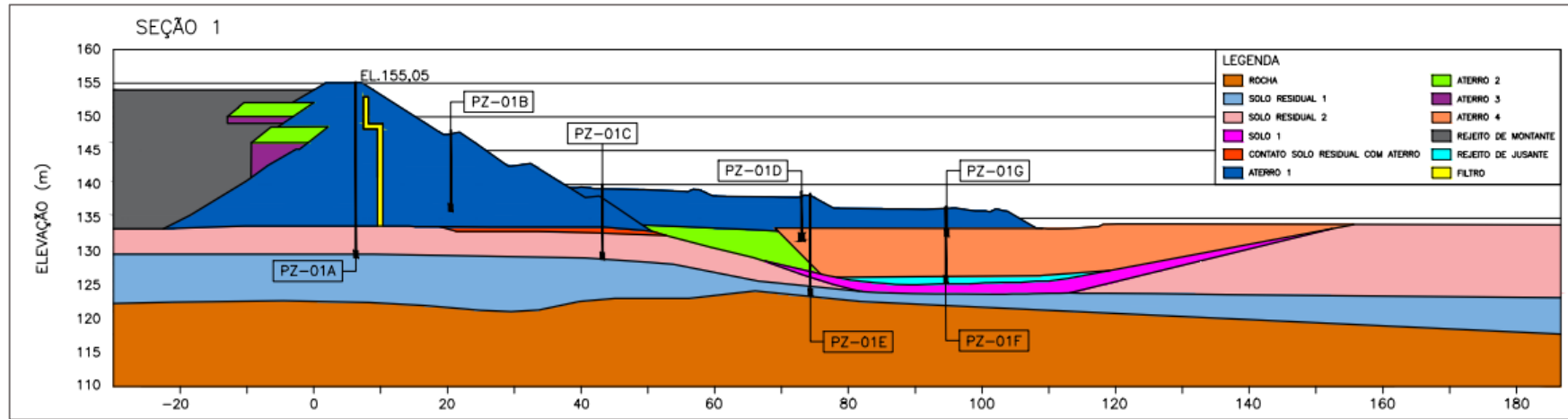
O objeto de estudo do presente trabalho é uma barragem que visa a contenção de rejeitos, cujos dados foram descaracterizados a fim de manter a segurança das informações do empreendimento. Portanto, informações como localização e planta do empreendimento não estão disponíveis, e, sempre que mencionada, a estrutura será denominada simplesmente “barragem de rejeitos”. Adicionalmente, a nomenclatura dos materiais e dos instrumentos instalados na mesma será apresentada de forma genérica. Para o desenvolvimento do trabalho, serão utilizados de forma fidedigna as seções geológico-geotécnicas da barragem, os parâmetros de resistência e condutividade hidráulica dos materiais e o histórico de leitura dos instrumentos.

3.2 Seções geológico-geotécnicas selecionadas para o estudo

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionadas duas seções instrumentadas de uma barragem de rejeitos, composta por um aterro compactado de material homogêneo, e um aterro da berma de equilíbrio. O sistema de drenagem interna é composto por uma trincheira principal paralela ao eixo do maciço conectada a um filtro vertical, e a ela são ligadas trincheiras secundárias transversais ao eixo da barragem.

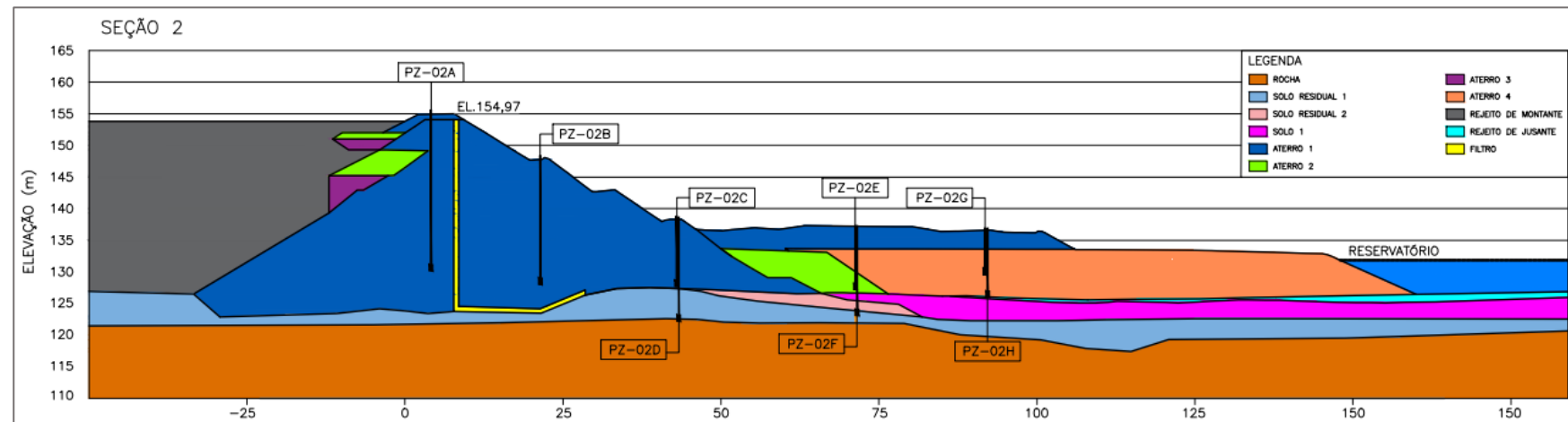
As seções selecionadas foram denominadas “Seção 1” e “Seção 2”, cada uma contendo, respectivamente, sete e oito piezômetros, sendo somente o piezômetro denominado “PZ-01D”, instalado na Seção 1, do tipo elétrico de corda vibrante, e os demais do tipo tudo aberto (ou Casagrande), valendo ressaltar que a Seção 2 possui uma bacia de controle à jusante. A Figura 11 e a Figura 12 demonstram as duas seções transversais em questão, bem como a localização dos instrumentos que serão analisados em cada uma.

Figura 11 – Seção 1.



Fonte: Da autora (2023).

Figura 12 – Seção 2.



Fonte: Da autora (2023).

As informações de cota de boca, cota de instalação e profundidade de cada instrumento estão registradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados dos instrumentos.

Seção	Instrumento	Cota de boca (m)	Cota de instalação (m)	Profundidade (m)
Seção 1	PZ – 01A	155,20	129,12	26,08
	PZ – 01B	148,06	136,05	12,01
	PZ – 01C	140,03	128,85	11,18
	PZ – 01D ¹	138,99	131,69	7,30
	PZ – 01E	138,67	123,46	15,21
	PZ – 01F	136,69	132,29	4,40
	PZ – 01G	136,69	125,37	11,32
Seção 2	PZ – 02A	155,57	130,14	25,43
	PZ – 02B	148,41	128,02	20,39
	PZ – 02C	138,66	122,16	16,50
	PZ – 02D	138,81	127,65	11,16
	PZ – 02E	137,72	130,02	7,70
	PZ – 02F	137,29	127,18	10,11
	PZ – 02G	136,94	129,52	7,42
	PZ – 02H	136,92	125,98	10,94

¹ Piezômetro elétrico de corda vibrante. Fonte: Da autora (2023).

3.3 Método

Definidas as seções transversais a serem avaliadas no estudo, os níveis de controle dos instrumentos foram definidos com base na metodologia determinística, envolvendo, primeiramente, a realização de retroanálises de fluxo para calibração dos modelos. Posteriormente, foram realizadas análises de fluxo alterando a linha freática em um processo iterativo, por meio da variação dos parâmetros de condutividade hidráulica dos materiais, estabelecendo cenários que simulam a condição normal de operação da barragem, e outras situações consideradas críticas.

Após a realização das análises de fluxo, nas quais o nível da linha freática é elevado gradualmente, realizou-se análises de estabilidade, de modo a obter valores de fator de segurança de 1,5, 1,3 e 1,1. Associando esses fatores de segurança às leituras indicadas pelos instrumentos instalados nas seções, foi possível estabelecer quatro níveis de controle: normal, atenção, alerta e emergência, conforme já explanado anteriormente.

Assim como já discutido no tópico 2.4, é válido salientar que o Brasil não possui uma diretriz que define os valores de fatores de segurança que compõem os níveis de controle. Os limites fixados de 1,5, 1,3 e 1,1 são baseados em valores usualmente considerados adequados

no meio geotécnico, embasados no conceito de que o fator de segurança 1,5 indica o limite do comportamento considerado “normal”. Sendo assim, conforme apresentado na Tabela 2, considera-se que a estrutura que apresentar FS acima de 1,5 está em nível normal de segurança, aquela com FS entre 1,5 e 1,3 é considerada em nível de atenção, entre 1,3 e 1,1 em nível de alerta e abaixo de 1,1 define-se o nível de emergência.

Tabela 2 – Níveis de controle associados aos valores de FS.

Nível de risco	Fator de Segurança (FS)
Normal	$1,5 \leq FS$
Atenção	$1,5 < FS \leq 1,3$
Alerta	$1,3 < FS \leq 1,1$
Emergência	$FS < 1,1$

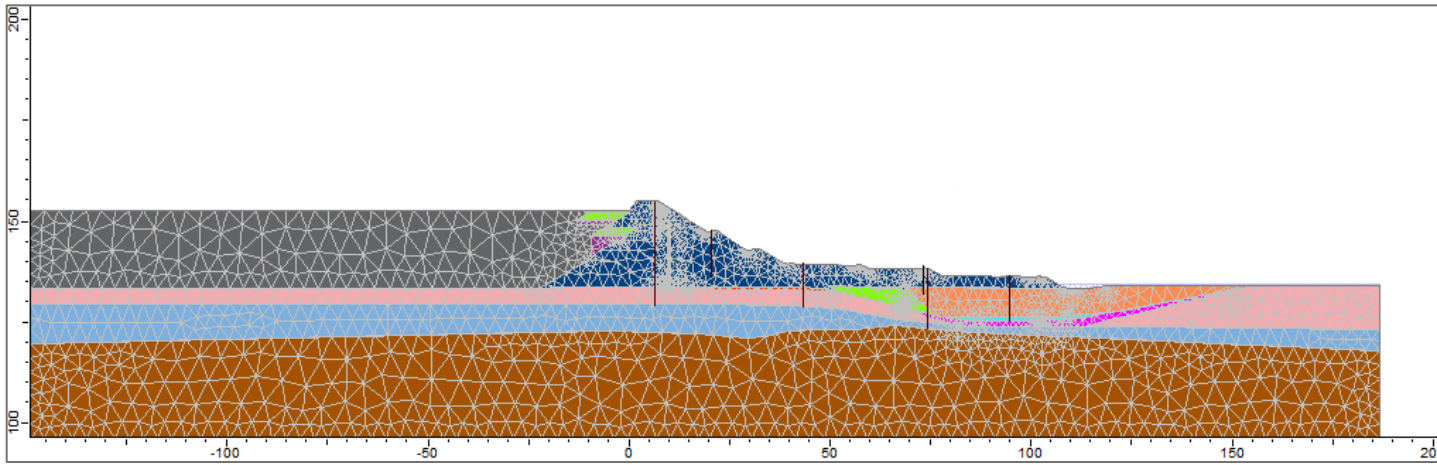
Fonte: Adaptado de PENNA et al (2017).

Para o estudo de caso apresentado, as análises de fluxo e de estabilidade foram realizadas no *software* comercial Slide2, desenvolvido pela empresa Rocscience Inc., que é amplamente utilizado por engenheiros geotécnicos, geólogos e profissionais da área de engenharia civil e geotécnica. O *software* é uma poderosa ferramenta que permite a avaliação detalhada da estabilidade de taludes nos mais variados cenários geológicos e de carregamento, considerando diversos parâmetros geotécnicos, condições de água e drenagem.

3.3.1 Análises de fluxo

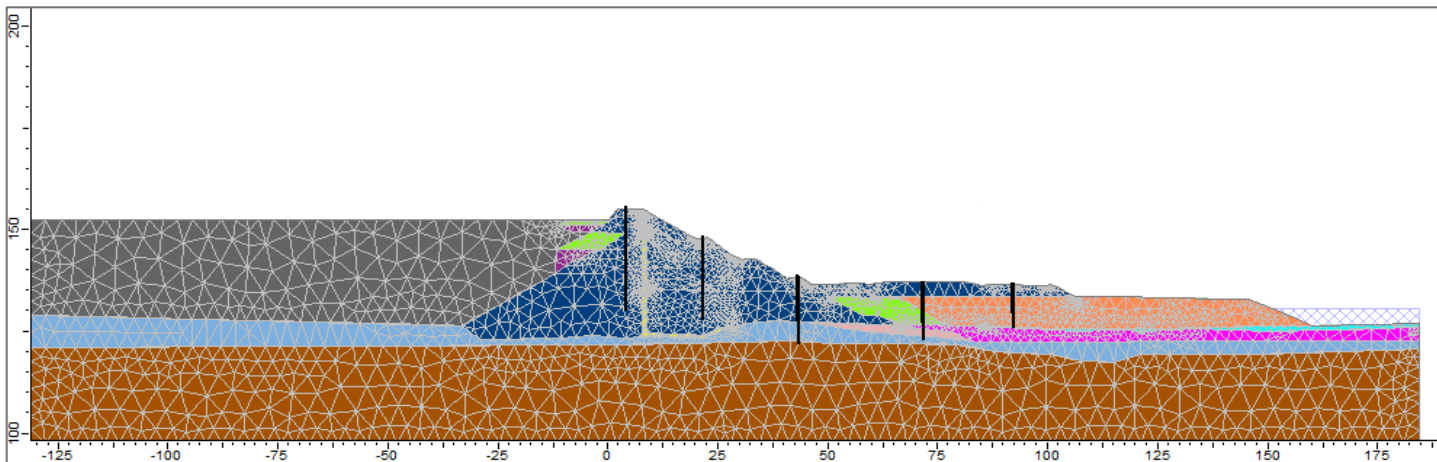
Para a realização das análises do estudo, inicialmente as geometrias das duas seções selecionadas foram importadas para o *software* Slide2, que utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF) para resolução dos problemas de fluxo. A modelagem das seções foi realizada gerando malhas formadas por aproximadamente cinco mil elementos triangulares de três nós, definidas a partir de avaliações preliminares de sensibilidade que indicaram que malhas com mais elementos não resultariam em alterações nos resultados encontrados. Ressalta-se que na região dos filtros, as malhas foram refinadas aumentando-se a densidade de elementos na área. A Figura 13 e a Figura 14 e apresentam a modelagem das seções.

Figura 13 – Malha de elementos finitos gerada para a Seção 1.



Fonte: Da autora (2023).

Figura 14 – Malha de elementos finitos gerada para a Seção 2.



Fonte: Da autora (2023).

Em seguida, definiu-se no modelo as propriedades de permeabilidade dos materiais: a condutividade hidráulica, que quantifica a facilidade com que a água pode fluir através do meio, e a anisotropia, que diz respeito à variação das propriedades dos materiais conforme as direções observadas. Esses parâmetros foram obtidos por meio da campanha de investigação mais recente da barragem de estudo, sendo apresentado na Tabela 3 um resumo dos valores empregados inicialmente nas análises de fluxo.

Tabela 3 – Parâmetros de permeabilidade dos materiais da barragem.

Material	Condutividade Hidráulica	
	Kx (m/s)	Ky/kx
Rocha	5,00E-07	1
Solo Residual 1	5,00E-07	1
Solo Residual 2	5,00E-07	1
Solo 1	1,00E-08	1
Contato Solo Residual com Aterro	1,00E-08	1
Aterro 1	5,00E-08	0,2
Aterro 2	1,00E-07	1
Aterro 3	1,00E-08	1
Aterro 4	5,00E-08	1
Filtro	1,00E-04	1
Rejeito de Montante	1,00E-08	1
Rejeito de Jusante	1,00E-08	1

Fonte: Da autora (2023).

3.3.2 Calibração dos modelos

A utilização de modelagens numéricas na geotecnia desempenha um papel central na identificação de pontos críticos de uma estrutura e na verificação de sua segurança, sendo assim, a precisão dos modelos é crucial para se obter resultados confiáveis que sustentem tomadas de decisões.

No entanto, mesmo dispondo de informações acerca das estruturas, como campanhas de investigações geotécnicas com ensaios de campo e laboratório, além de documentos dos projetos executivos, ainda existem muitas incertezas associadas ao processo de modelagem se levada em consideração a variabilidade dos parâmetros dos materiais e a imprecisão inerente à geometria da estrutura e das camadas da fundação, por exemplo.

Deste modo, visando realizar análises mais verossímeis às condições de campo, os modelos numéricos podem passar por um processo de calibração, que se trata de uma abordagem iterativa que busca minimizar as diferenças entre as previsões da simulação e as observações da realidade, por meio da adaptação dos parâmetros adotados.

Neste trabalho, a calibração consistiu em validar os coeficientes de permeabilidade dos materiais que compõem a barragem de estudo. Partindo dos valores já definidos a partir da campanha de investigação mais recente realizada na barragem, apresentados anteriormente na Tabela 3, os coeficientes foram convenientemente alterados, com o objetivo de aproximar os resultados obtidos com o *software* às leituras dos piezômetros obtidas em campo. Deste modo, para cada piezômetro foram comparados os resultados de carga total do *software* aos valores de cota piezométrica (que correspondem à cota de topo subtraída da leitura de campo), sendo considerada aceitável uma diferença próxima de $\pm 0,50$ m, valor usualmente empregado como adequado no meio geotécnico.

Foram adotadas as seguintes condições de contorno para as análises desse procedimento:

- Existência de uma região de “praia” de rejeitos nas duas seções, isso é, região sem a formação de um espelho de água, a fim de tornar os modelos mais próximos da situação de campo, onde não é esperada a formação de espelho de água na região de contato com o aterro compactado;
- Para a bacia de controle na Seção 2, o nível d’água adotado foi de 130,50 m;
- Para Seção 1 foi considerada uma pequena lâmina d’água a jusante, na elevação 134,50 m, a fim de simular o acúmulo de água que ocorre por capilaridade na região, vindo da bacia de controle;
- Nível de rejeito nas Seções 1 e 2 de 152,88 m e 152,54 m, respectivamente.

Tais valores considerados para o nível d’água e de rejeito, bem como as leituras dos instrumentos utilizadas de referência para a calibração, são referentes às condições de um mesmo dia de operação da barragem, e foram obtidos por meio do histórico de dados do monitoramento da estrutura.

3.3.3 Condições de contorno para a modelagem numérica

Retomando a metodologia explicitada anteriormente, para o estabelecimento dos quatro níveis de controle da instrumentação da barragem foi proposta a simulação do cenário de condição normal de operação e outros cenários críticos. Na simulação dos cenários críticos, foram adotadas diferentes considerações, que incluem essencialmente a redução gradual dos parâmetros de condutividade hidráulica dos materiais da barragem, que foram definidos a partir da calibração dos modelos, induzindo a elevação da linha freática no interior do maciço.

- 1) **Condição normal de operação:** o sistema de drenagem interna foi considerado funcionando normalmente, com o parâmetro de condutividade hidráulica de 1×10^{-4} m/s, e assumiu-se o nível de rejeito associado ao fim de vida útil da barragem. Além disso, para a Seção 2, onde existe a bacia de controle a jusante, foi adotado nível d'água máximo normal de operação, na elevação de 131,82 m. Adicionalmente, para a Seção 1 foi considerada uma pequena lâmina d'água na elevação 134,50 m também a jusante;
- 2) **Condição crítica:** na primeira situação crítica simulada, o sistema de drenagem interna foi considerado inoperante, simulando um processo de colmatção, sendo o valor de condutividade hidráulica adotado de 1×10^{-8} m/s. As demais condições estabelecidas no cenário normal de operação foram mantidas;
- 3) **Condição crítica com a fundação menos permeável:** além do sistema de drenagem interna colmatado (com condutividade hidráulica igual a 1×10^{-8} m/s), a camada de fundação também foi considerada menos permeável. As demais condições estabelecidas no cenário normal de operação foram mantidas;
- 4) **Condição crítica com a fundação e maciço menos permeáveis:** considerou-se o sistema de drenagem interna colmatado (com condutividade hidráulica igual a 1×10^{-8} m/s) e fundação e maciço menos permeáveis. Além disso, para a Seção 2, adotou-se o nível d'água do reservatório da bacia de controle equivalente ao máximo *maximorum*, na elevação de 133,89 m, e, na Seção 1, o nível da lâmina d'água a jusante na elevação 135 m.

3.3.4 Análises de estabilidade

As análises de estabilidade, realizadas para todos os cenários pré-estabelecidos a fim de se obter os valores de FS associados às leituras dos piezômetros instalados nas seções, também foram desenvolvidas no *software* Slide2, empregando o Método do Equilíbrio Limite (MEL).

Para a execução deste trabalho foi utilizado o método de Morgenstern e Price (1965), que além de ser capaz de solucionar todas as incógnitas do equilíbrio limite, calculando simultaneamente o equilíbrio de forças e momentos, também é compatível com a maior parte dos *softwares* de análise de estabilidade disponíveis no mercado, incluindo o Slide2. Como método de busca das superfícies de ruptura críticas, foi empregado o de superfícies não circulares otimizadas.

Os parâmetros geológico-geotécnicos adotados para cada material nas análises foram obtidos por meio da última campanha de investigação na barragem, e são apresentados na Tabela 4. Vale destacar que, para os materiais contráteis abaixo da linha freática, onde pode haver excesso de geração de poropressão, foram empregados parâmetros de resistência não

drenados (S_u e $S_u/\sigma'v$); já para os materiais que se encontram na porção acima da linha freática, onde não há geração significativa de poropressão, foram considerados parâmetros efetivos (ϕ' e c').

Tabela 4 – Parâmetros de resistência dos materiais empregados nas análises de permeabilidade.

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	S_u (kPa)	$S_u/\sigma'v$
Rocha	21	40	34	-	-
Solo Residual 1	20	0	33	-	-
Solo Residual 2	19	0	29	-	-
Solo 1	18	-	-	20 (constante)	-
Contato Solo Residual com Aterro	18	-	-	15	0,26
Aterro 1	20	16	32	-	-
Aterro 2	19	-	-	20	0,50
Aterro 3	16	-	-	16 (constante)	-
Aterro 4	19	-	-	20	0,50
Filtro	18	0	32	-	-
Rejeito de Montante	16	-	-	-	0,144
Rejeito de Jusante	16	-	-	20 (constante)	-

Fonte: Da autora (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos tópicos a seguir serão apresentados os resultados e discussões obtidos por meio da metodologia desenvolvida.

4.1 Resultado da calibração dos modelos

Assim como mencionado no tópico 3.3.2, foi realizado o processo de calibração dos modelos numéricos a fim de validar os coeficientes de permeabilidade dos materiais que compõem a barragem de estudo e aproximar os resultados obtidos com o *software* às leituras de campo dos instrumentos.

De modo geral, foram obtidos resultados satisfatórios, sendo a diferença entre os valores das leituras de campo e os obtidos por meio do *software*, dentro ou muito próxima do limite proposto como aceitável ($\pm 0,50$ m).

A Tabela 5 apresenta a diferença entre os valores de carga total (m.c.a.) da calibração no *software* e de cota piezométrica (m) provenientes da leitura de campo. Os parâmetros de condutividade hidráulica dos materiais correspondentes à calibração encontram-se na Tabela 6.

Tabela 5 – Comparação das cotas piezométricas de campo e das cargas totais obtidas com o *software*.

Seção	Instrumento	Cota Piezométrica (m) de Campo	Carga total (m.c.a.) da Calibração	Diferença (m)
1	PZ-01A	135,89	135,58	-0,31
	PZ-01B	136,05	135,51	-0,53
	PZ-01C	135,46	135,41	-0,05
	PZ-01D	135,61	135,21	-0,40
	PZ-01E	134,75	135,25	0,49
	PZ-01F	134,44	135,04	0,59
	PZ-01G	134,78	134,97	0,19
2	PZ-02A	136,31	135,83	-0,48
	PZ-02B	135,75	135,57	-0,18
	PZ-02C	135,29	135,24	-0,05
	PZ-02D	134,72	135,23	0,50
	PZ-02E	134,02	134,65	0,63
	PZ-02F	134,12	134,66	0,54
	PZ-02G	133,99	134,14	0,15
	PZ-02H	133,70	134,13	0,43

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 6 – Parâmetros de condutividade hidráulica dos materiais obtidos com a calibração dos modelos.

Material	Seção 1		Seção 2	
	Kx (m/s)	Ky/kx	Kx (m/s)	Ky/kx
Rocha	5,40E-06	1	1,05E-06	1
Solo Residual 1	6,60E-06	1	2,30E-06	1
Solo Residual 2	9,00E-07	1	1,00E-06	1
Solo 1	1,00E-08	1	3,50E-08	1
Contato Solo Residual com Aterro	1,00E-08	1	1,00E-08	1
Rejeito de Jusante	2,00E-08	0,2	3,90E-08	0,2
Rejeito de Montante	1,00E-08	1	1,08E-08	1
Aterro 1	6,00E-08	1	5,00E-08	1
Aterro 2	1,00E-08	1	1,00E-08	1
Aterro 3	1,00E-08	1	1,00E-08	1
Aterro 4	6,20E-08	1	6,00E-08	1
Filtro	1,00E-04	1	1,00E-04	1

Fonte: Da autora (2023).

4.2 Definição dos níveis de controle piezométricos

Nesse tópico são apresentados os resultados de cargas totais (m.c.a.) para cada piezômetro das duas seções de estudo, obtidos a partir das simulações computacionais no *software* Slide2 para o cenário de condição normal de operação e demais cenários críticos, estabelecendo os quatro níveis de controle: normal, atenção, alerta e emergência.

Notou-se que, para o estabelecimento dos níveis de controle de atenção, alerta e emergência, além de considerar o sistema de drenagem inoperante, foi necessário recorrer com a redução dos coeficientes de permeabilidade tanto da fundação quanto do maciço, conforme a quarta hipótese para modelagem descrita no tópico 3.3.3.

Para alguns piezômetros, a carga total dada pelo *software*, associada aos fatores de segurança das faixas estabelecidas, resultou em um valor superior à elevação da cota de boca dos instrumentos. Sendo assim, para esses piezômetros, o valor adotado para o nível de controle foi a própria cota de boca dos instrumentos. Ademais, quando essa condição foi identificada e ainda existiam níveis de controle posteriores a serem definidos para o instrumento, optou-se por não estabelecer um valor para os mesmos. Nesses casos, é importante destacar que a inspeção visual de campo se torna indispensável, a fim de verificar a ocorrência de saída de água pela boca dos tubos.

A Tabela 7 sumariza as cargas totais que levam aos níveis de controle para cada piezômetro instalado nas seções 1 e 2.

Tabela 7 – Níveis de controle dos piezômetros da Seção 1 e Seção 2.

Seção	Instrumento	Normal (m)	Atenção (m)	Alerta (m)	Emergência (m)
		FS \geq 1,5	1,5 > FS \geq 1,3	1,3 > FS \geq 1,1	FS < 1,1
1	PZ-01A	< 136,14	139,62	142,39	146,93
	PZ-01B	< 136,06	139,71	142,13	145,08
	PZ-01C	< 135,88	138,63	140,03 ¹	-
	PZ-01D	< 135,58	137,38	138,35	138,61
	PZ-01E	< 135,63	137,74	138,67 ¹	-
	PZ-01F	< 135,31	136,69 ¹	-	-
	PZ-01G	< 135,21	136,44	136,69 ¹	-
	PZ-02A	< 137,74	145,78	148,06	149,14
2	PZ-02B	< 137,19	143,24	145,34	146,99
	PZ-02C	< 136,76	138,66 ¹	-	-
	PZ-02D	< 136,75	138,81 ¹	-	-
	PZ-02E	< 136,02	137,72 ¹	-	-
	PZ-02F	< 136,04	137,29 ¹	-	-
	PZ-02G	< 135,22	136,94 ¹	-	-
	PZ-02H	< 135,26	136,92 ¹	-	-

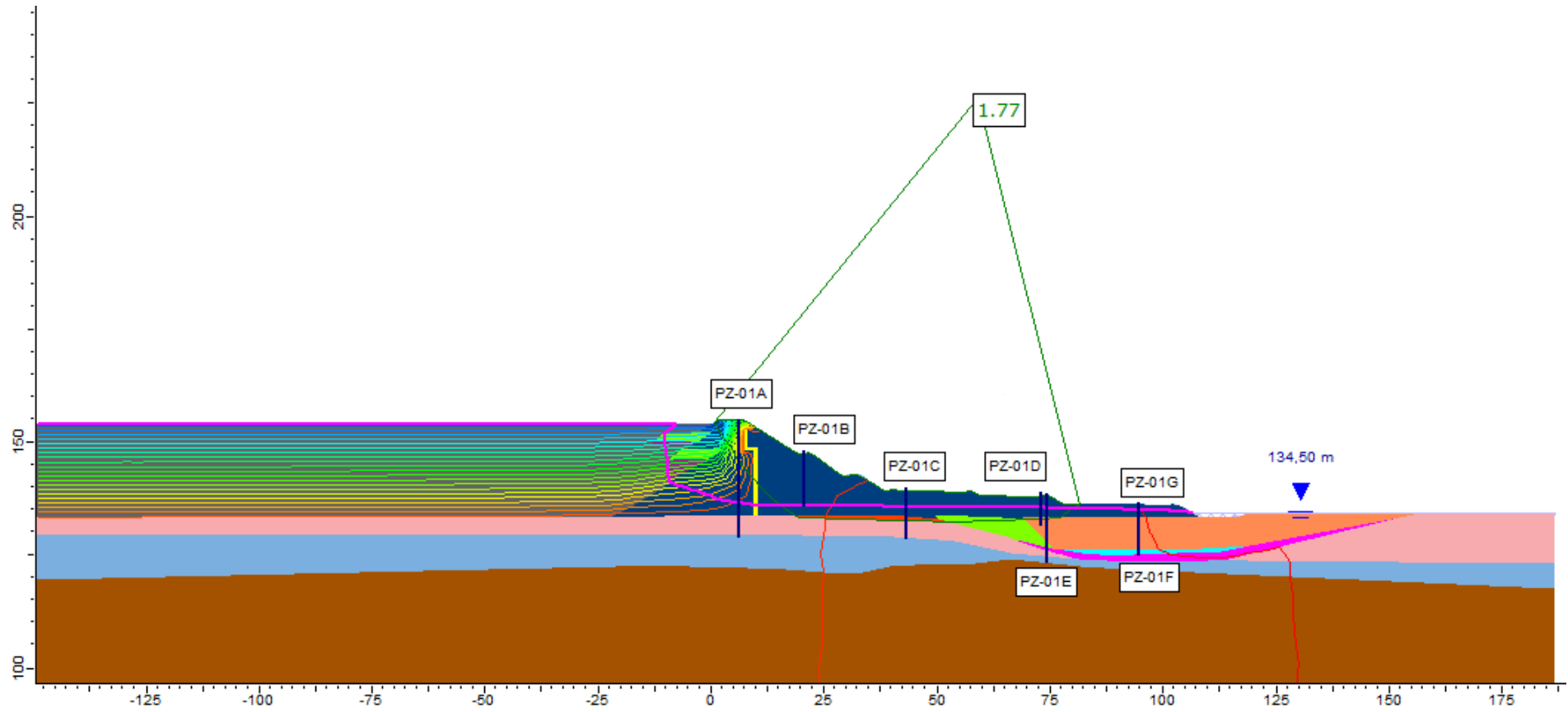
¹ Nível de controle cuja carga total estabelecida foi superior à elevação da cota de boca do instrumento, adotando-se, então, o próprio valor da cota de boca (vide Tabela 1). Fonte: Da autora (2023).

Considerando os cenários críticos, uma série de efeitos significativos no comportamento hidráulico da barragem são desencadeados. Assim como já destacado anteriormente no presente estudo, a diminuição dos coeficientes de permeabilidade dos materiais que compõe a estrutura contribui para o aumento do nível do lençol freático no maciço, afetando diretamente a estabilidade da barragem, diminuindo seu FS. Além disso, essa redução nos parâmetros de condutividade hidráulica também resulta em uma resistência adicional ao fluxo de água, aumentando o gradiente hidráulico, elevando as pressões hidrostáticas no interior do maciço.

É importante salientar que os níveis de controle estabelecidos estão diretamente relacionados ao modo de falha por instabilização. Deste modo, não é possível utilizá-los para estimar os riscos inerentes a outros modos de falha (como erosão interna, galgamento e liquefação).

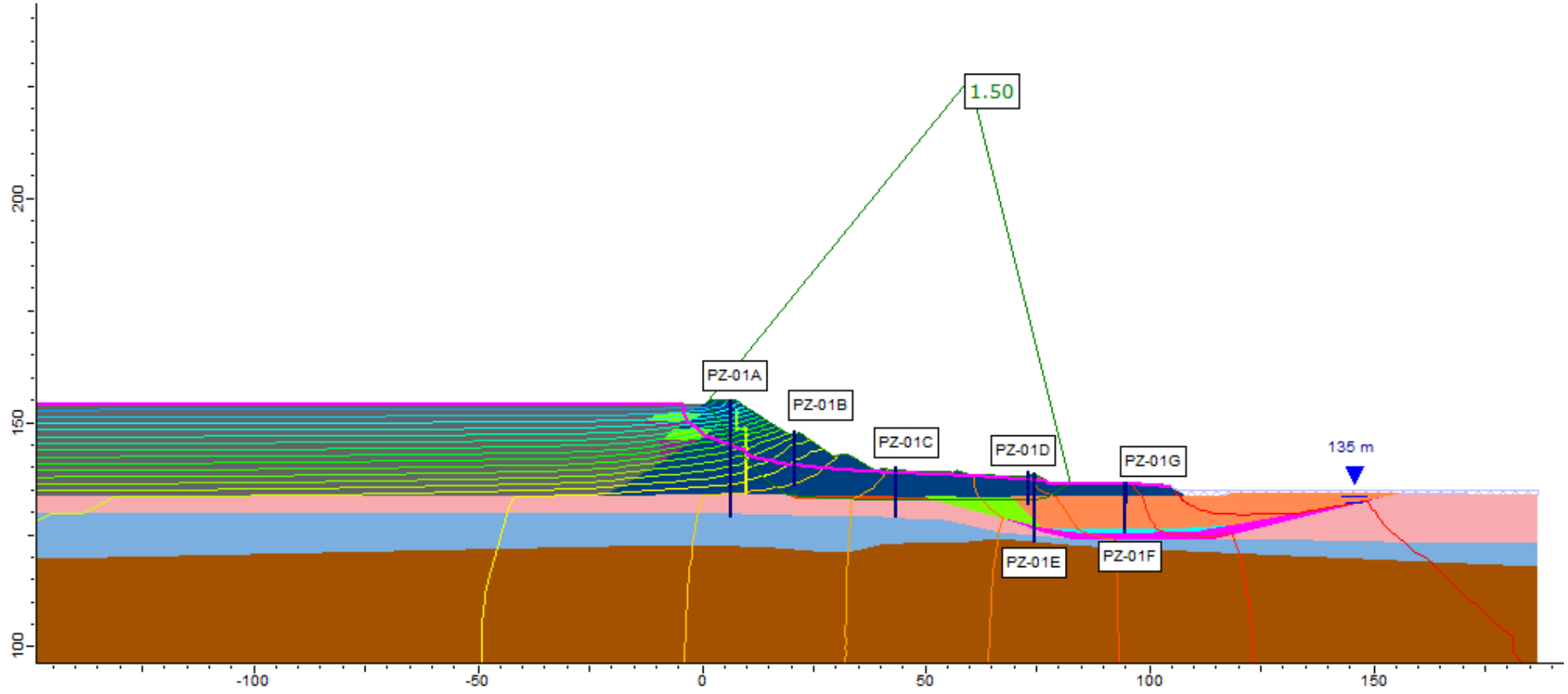
As Figura 15 a Figura 22 ilustram as análises de fluxo associadas às análises de estabilidade na condição normal de operação e nas condições críticas estabelecidas, utilizadas para a definição dos quatro níveis de controle piezométricos nas seções 1 e 2. A Tabela 8 e a Tabela 9 apresentam os parâmetros de condutividade hidráulica adotados para cada material nas análises.

Figura 15 – Condição normal de operação (Seção 1).



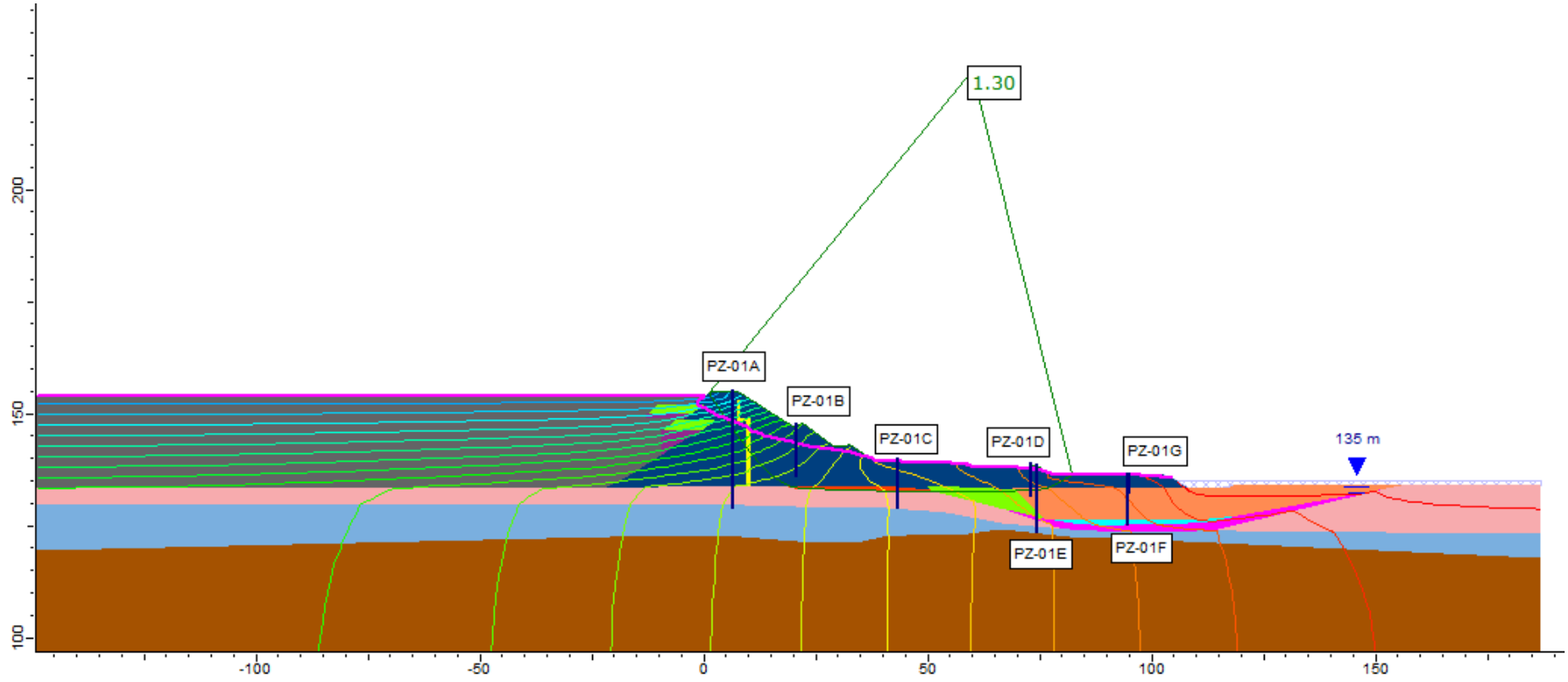
Fonte: Da autora (2023).

Figura 16 – Condição crítica: nível de atenção (Seção 1).



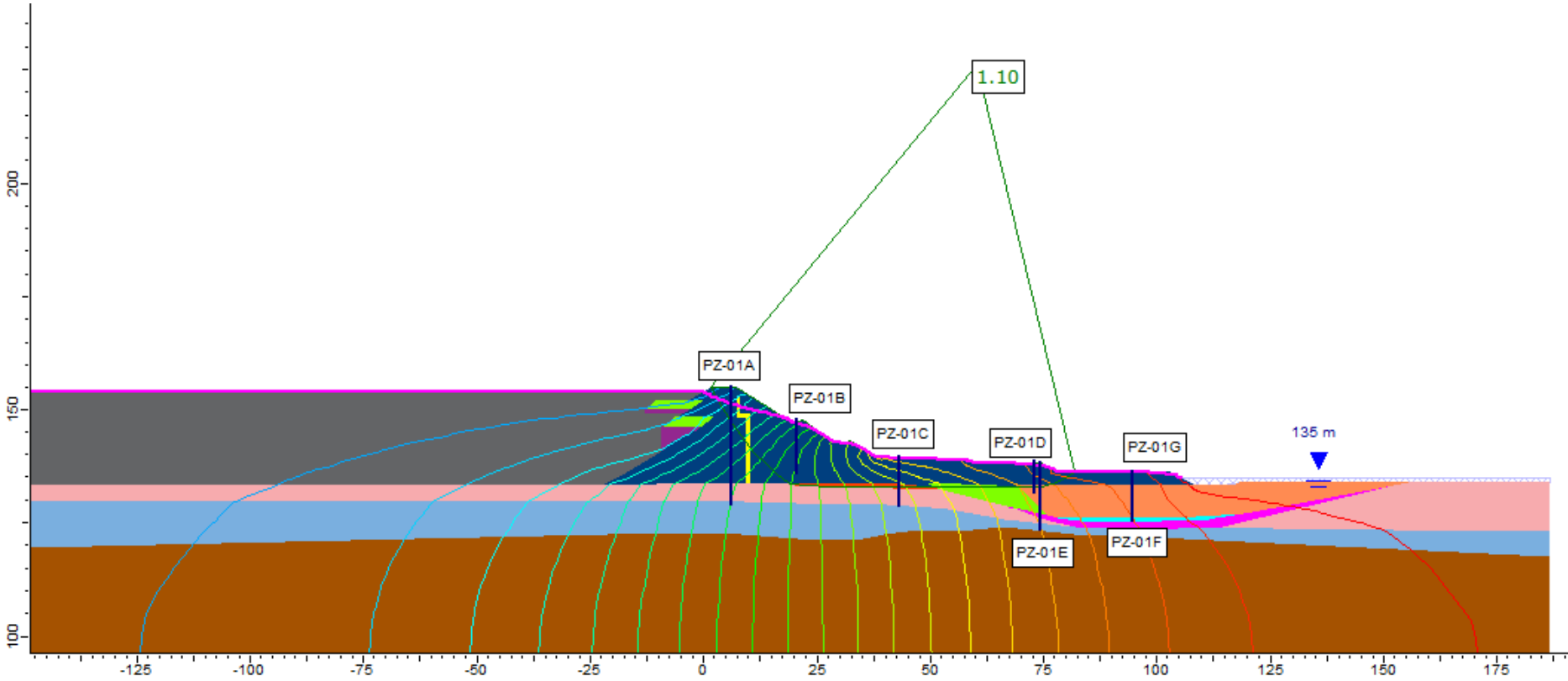
Fonte: Da autora (2023).

Figura 17 – Condição crítica: nível de alerta (Seção 1).



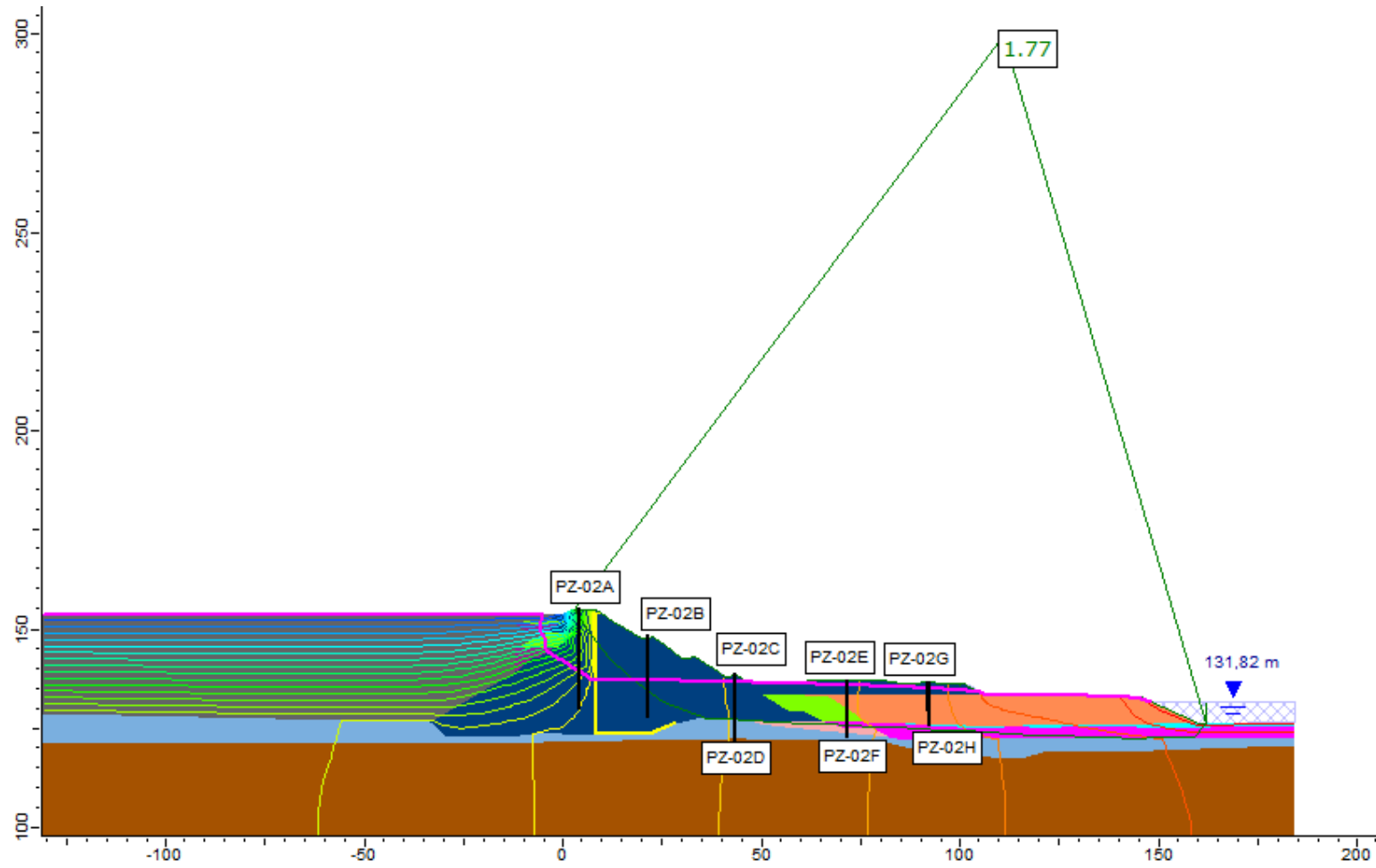
Fonte: Da autora (2023).

Figura 18 – Condição crítica: nível de emergência (Seção 1).



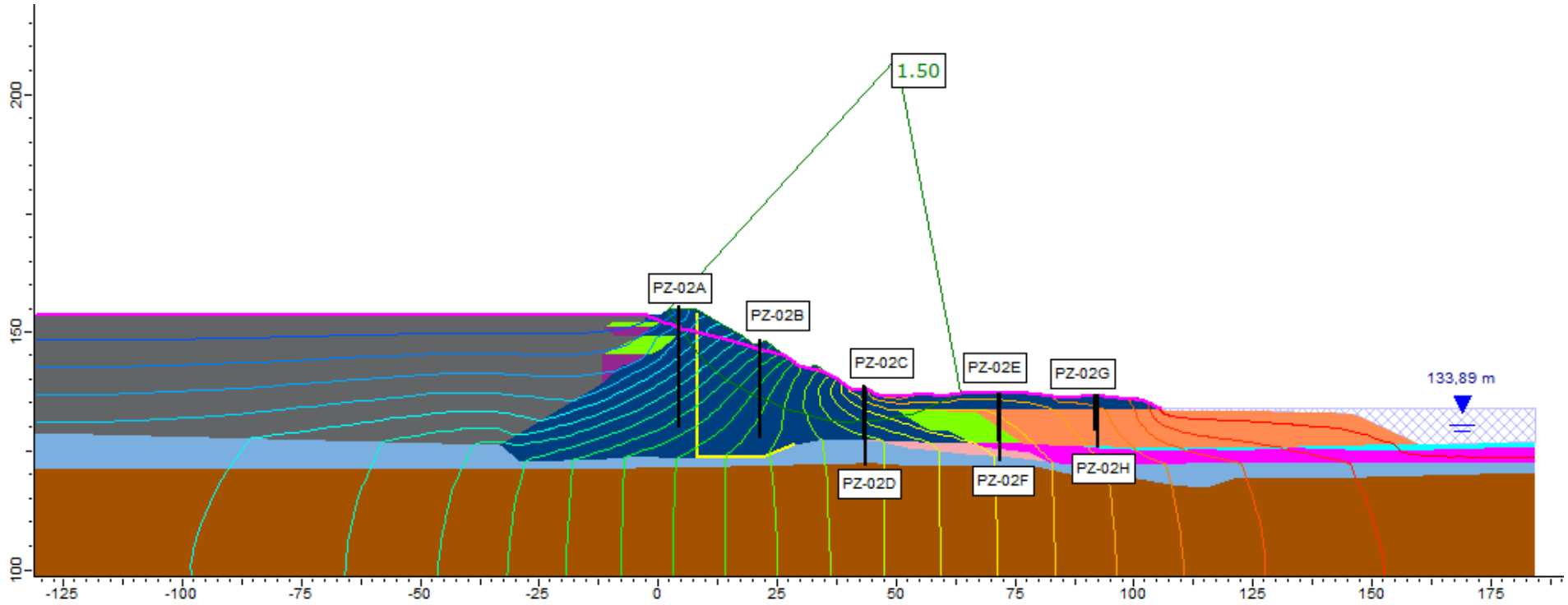
Fonte: Da autora (2023).

Figura 19 – Condição normal de operação (Seção 2).



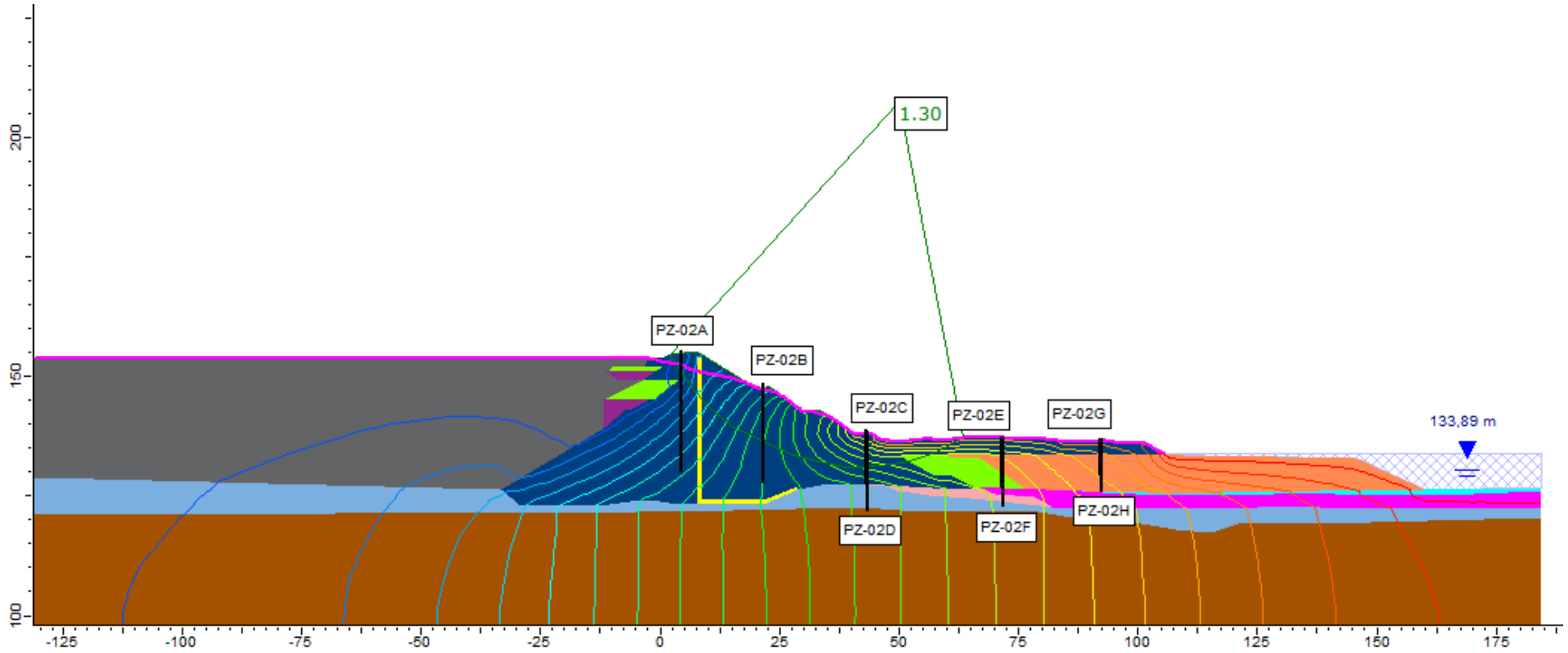
Fonte: Da autora (2023).

Figura 20 – Condição crítica: nível de atenção (Seção 2).



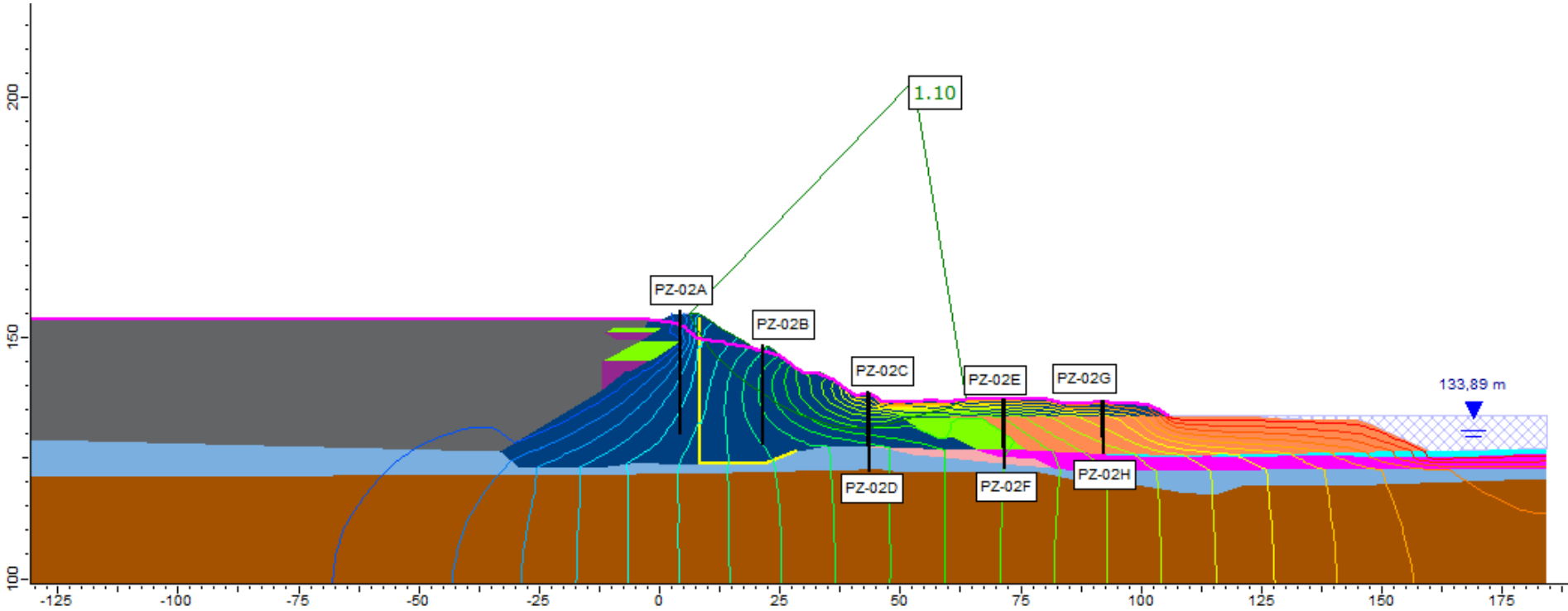
Fonte: Da autora (2023).

Figura 21 – Condição crítica: nível de alerta (Seção 2).



Fonte: Da autora (2023).

Figura 22 – Condição crítica: nível de emergência (Seção 2).



Fonte: Da autora (2023).

Tabela 8 – Parâmetros de condutividade adotados nas análises para a Seção 1.

Material	Kx (m/s) adotado			
	Normal Operacional	Atenção	Alerta	Emergência
Rocha	5,40E-06	1,05E-06	4,10E-07	2,00E-08
Solo Residual 1	6,60E-06	9,00E-07	4,00E-07	2,00E-08
Solo Residual 2	9,00E-07	9,00E-07	1,00E-07	1,00E-08
Solo 1	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Contato Solo Residual com Aterro	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Rejeito de Jusante	2,00E-08	2,00E-08	2,00E-08	2,00E-08
Rejeito de Montante	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Aterro 1	6,00E-08	5,00E-08	4,00E-08	1,10E-08
Aterro 2	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Aterro 3	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Aterro 4	6,20E-08	6,20E-08	4,00E-08	1,00E-08
Filtro	1,00E-04	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08

Fonte: Da autora (2023).

Tabela 9 – Parâmetros de condutividade adotados nas análises para a Seção 2.

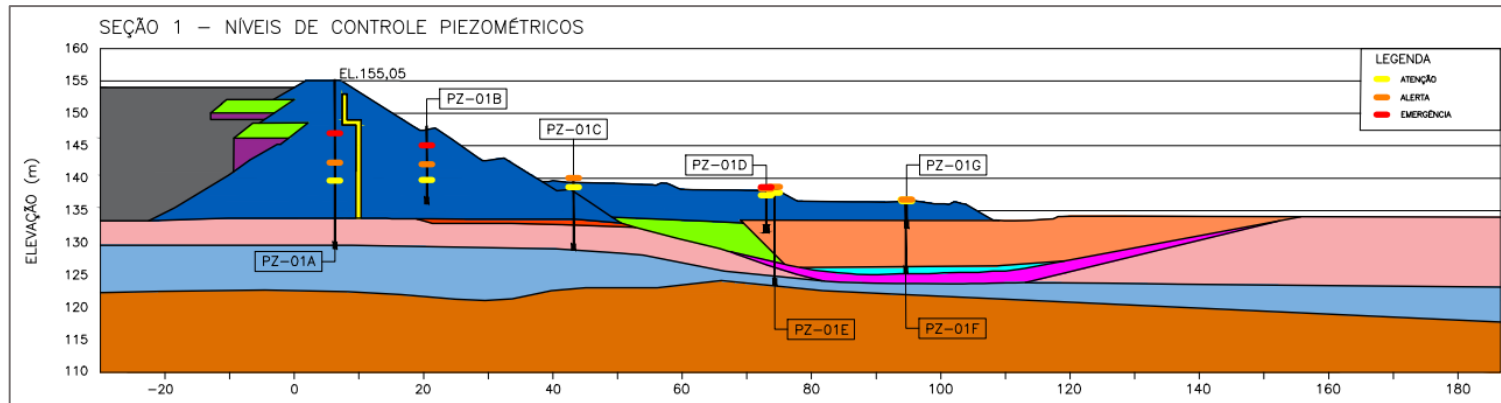
Material	Kx (m/s) adotado			
	Normal Operacional	Atenção	Alerta	Emergência
Rocha	1,05E-06	1,00E-07	2,00E-08	9,90E-09
Solo Residual 1	2,30E-06	1,00E-07	2,00E-08	9,90E-09
Solo Residual 2	1,00E-06	1,00E-08	1,00E-08	9,90E-09
Solo 1	3,50E-08	1,00E-08	3,00E-09	4,85E-10
Contato Solo Residual com Aterro	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Rejeito de Jusante	3,90E-08	3,70E-08	3,50E-08	1,00E-08
Rejeito de Montante	1,08E-08	1,05E-08	1,00E-08	1,00E-08
Aterro 1	5,00E-08	1,00E-08	1,00E-09	1,00E-10
Aterro 2	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	9,00E-09
Aterro 3	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	9,00E-09
Aterro 4	6,00E-08	1,00E-08	1,00E-09	1,00E-10
Filtro	1,00E-04	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08

Fonte: Da autora (2023).

A definição dos níveis de controle para cada instrumento instalado nas seções da barragem configura uma referência prática para a análise das leituras dos instrumentos, permitindo uma compreensão mais clara dos potenciais riscos diante do comportamento da estrutura. E, assim como destacado anteriormente no tópico 2.4, a formatação dos resultados deve ser simples e intuitiva, para que a ferramenta seja de fácil interpretação. Sendo assim, além da tabela que resume as cargas totais referentes aos níveis normal, atenção, alerta e emergência,

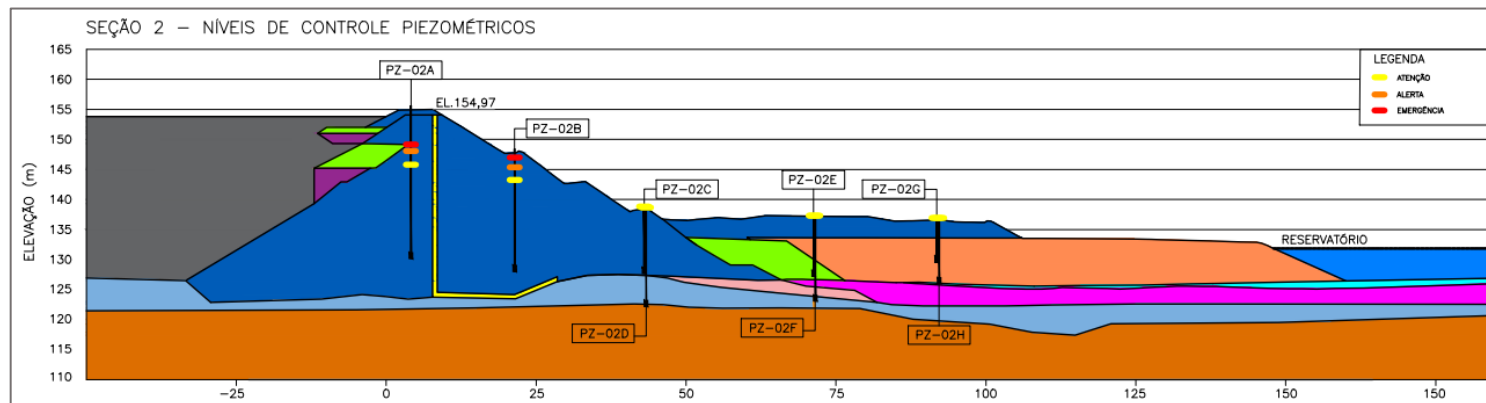
foi proposta uma apresentação mais visual e objetiva dos níveis de controle, representando os valores plotados diretamente nas seções geológico-geotécnicas, conforme a Figura 23 e a Figura 24.

Figura 23 – Níveis de controle piezométricos para a Seção 1.



Fonte: Da autora (2023).

Figura 24 – Níveis de controle piezométricos para a Seção 2.



Fonte: Da autora (2023).

4.3 Ações associadas aos níveis de controle

A instrumentação presente nas barragens tem como objetivo principal o diagnóstico antecipado de situações que podem oferecer potenciais riscos ao desempenho das estruturas, permitindo que medidas mitigadoras sejam tomadas precocemente. Neste sentido, os níveis de controle estabelecidos funcionam como indicadores do comportamento e operação das barragens, e, caso algum instrumento apresente nível de atenção, alerta ou emergência, cabe ao empreendedor e equipe técnica responsável promover as ações necessárias para a prevenção de eventos de maior gravidade.

Atualmente, pode-se utilizar da ferramenta denominada *Triggered Action Response Plan* (TARP), conhecida nacionalmente como Plano de Ativação de Ações de Resposta (PAAR), proposta pelo *Global Industry Standard on Tailings Management* (GISTM), ou Padrão Global da Indústria para Gestão de Rejeitos, para o estabelecimento de medidas associadas aos níveis de controle da instrumentação. Sendo um recurso para gestão do controle de riscos, o PAAR descreve uma série de ações que devem ser ativadas caso os níveis de controle definidos sejam excedidos.

Entre as ações que podem ser propostas para compor o PAAR, estão:

- Análise dos dados de monitoramento geotécnico conforme a frequência recomendada pelo engenheiro responsável;
- Realização de inspeções visuais periódicas de segurança nos taludes, a fim de identificar possíveis anomalias;
- Aferição do funcionamento do instrumento com desempenho fora da faixa normal, propondo testes de vida ou outras adequações;
- Repetição das leituras do instrumento em nível de atenção, alerta ou emergência (automáticas e manualmente);
- Uma vez que o comportamento dos instrumentos não deve ser avaliado isoladamente, deve-se propor a aferição das leituras e análise do comportamento dos demais instrumentos instalados na mesma seção que o instrumento que indicou leituras em nível de atenção, alerta ou emergência;
- Verificação da estabilidade da seção em que está instalado o instrumento com leituras em nível de atenção, alerta ou emergência, considerando as máximas leituras registradas no período analisado;
- Considerando o nível de emergência, acionar o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM), documento que detalha os procedimentos e estratégias a serem

seguidos em caso de uma situação emergencial. Para o nível de alerta, a necessidade de acionamento do PAEBM pode ser avaliada.

Ademais, cabe destacar que o estabelecimento dos níveis de controle é uma avaliação dinâmica, e deve ser revisada sempre que houver alteração nas condições de contorno, como modificações na geometria ou estratigrafia da estrutura, instalação ou descomissionamento de instrumentos e alteração dos parâmetros dos materiais por meio de novas campanhas de investigação geotécnica na barragem.

5 CONCLUSÃO

Diante da ocorrência de diversos eventos trágicos envolvendo o colapso de barragens tanto no cenário nacional quanto no internacional, a segurança dessas estruturas é um tema de extrema pertinência, que reforça a relevância da existência de legislações e diretrizes dos órgãos fiscalizadores. Nesse sentido, o presente trabalho buscou abordar as temáticas de segurança e monitoramento de barragens, por meio de um estudo de caso que visou o estabelecimento dos níveis de controle para a instrumentação de uma barragem de contenção de rejeitos.

Para isso, inicialmente foram explorados assuntos que envolvem os tipos de barragens existentes e a importância que o monitoramento e a instrumentação geotécnica representam na garantia do controle operacional dessas estruturas, trazendo as características e funções dos instrumentos usualmente empregados para esse propósito. Por fim, foram discutidos os principais pontos a respeito das exigências das políticas de segurança de barragens, e como a ferramenta conhecida como “carta de risco”, atualmente denominada níveis de controle, pode contribuir como indicadora do comportamento e operação das estruturas. Além disso, também foram explorados assuntos como percolação de água no solo e análises de estabilidade, que complementam o entendimento dos processos necessários para o estabelecimento desses níveis.

Para o desenvolvimento do estudo de caso, adotando a metodologia determinística para o estabelecimento dos níveis de controle, inicialmente os modelos numéricos das seções foram calibrados considerando as condições de contorno propostas, sendo que os resultados obtidos ficaram dentro ou muito próximos ao limite proposto. Foram definidos cenários que simulassem a condição normal de operação e condições críticas para duas seções da barragem de rejeitos, por meio da elevação gradual do nível da linha freática no maciço. Posteriormente, foram realizadas análises de fluxo associadas às análises de estabilidade, sendo possível relacionar as leituras dos instrumentos instalados nas seções, no caso, piezômetros, a fatores de segurança.

Os resultados das análises apontaram qual a carga total (m.c.a.) que cada piezômetro indicaria para os quatro níveis de controle estabelecidos: normal, atenção, alerta e emergência, atingindo com êxito o objetivo do trabalho. Os valores foram representados nas próprias seções geológico-geotécnicas instrumentadas, de modo a facilitar a interpretação e visualização das cargas que levariam a cada nível.

Cabe ressaltar que a metodologia empregada para a definição dos níveis de controle apresenta certas limitações, como, por exemplo, a incerteza inerente aos parâmetros dos materiais e geometria das seções, bem como as oscilações de nível d'água, que levam a variações cíclicas de carregamentos.

Por fim, conclui-se que o estudo de caso desenvolvido no presente trabalho demonstra que o estabelecimento dos níveis de controle para a instrumentação de barragens é um excelente recurso que pode auxiliar os profissionais na tomada de decisões, sendo importante destacar que, assim como qualquer outra ferramenta de gestão, ele deve ser avaliado com cautela. Neste sentido, os níveis de controle não devem ser analisados isoladamente, sendo fundamental associá-los à realização de inspeções de campo regulares e ao acompanhamento do funcionamento e das tendências de leituras da instrumentação instalada na estrutura. Como última consideração, salienta-se que a metodologia adotada para a definição dos níveis está relacionada somente ao modo de falha de por instabilização, não sendo possível utilizá-los para estimar os riscos inerentes a outros modos de falha.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se, para fins comparativos, a utilização de mais de um método de equilíbrio limite nas análises de estabilidade para a definição dos níveis de controle por meio da metodologia determinística. Além disso, recomenda-se o estudo de outros métodos de estabelecimento de níveis de controle associados a outros modos de falha, como erosão interna e liquefação.

REFERÊNCIAS

- AFFONSO, H. M. M. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. 2004, 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens: guia prático de pequenas barragens**. Volume VIII. Brasília, DF. 126 p, 2016a.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens: diretrizes para a elaboração do Plano de operação, manutenção e instrumentação de barragens**. Volume VII. Brasília, DF, 141 p, 2016b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens 2020**. Brasília. DF, 68 p, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução no 236, de 30 de janeiro de 2017**. Brasília, DF. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução N°95, de 7 de fevereiro de 2022**. Diário Oficial da União n° 35, Brasília, DF, 2022, Seção 1, p. 51.
- ALONSO, U. R. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. 2. ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2018.
- BARBOSA, C. J. R. **Análise de Fiabilidade de Taludes em Solos**. 2014. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, 2014.
- BRASIL. **Lei no 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Brasília, DF Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, 2010.
- COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CRUZ, P. T. da. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.
- ELETROBRAS (Brasil). **Critérios de projeto Civil de usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas S.A., 2003.
- FONSECA, A. R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - Estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. 2003. 158 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

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.** 2007. 309 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia de Barragens) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

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

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Concrete face rockfill dams: concepts for design and construction.** Bulletin 141. Paris: ICOLD, 2010a, 401 p.

KANJI, M. A.; FIGUEIRA, P. C. S. **Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens.** In: SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DE CAMPO, 1990, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: ABMS, 1990. p. 119-128.

LIGOCKI, L.P., SARÉ, A.R., SAYÃO, A.S.F.J., GERSCOVICH, D.M.S. **Avaliação de Segurança da Barragem de Curuá-Una com Base da Piezometria.** In: II CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA - II CITENEL, 2003, Salvador. **Anais...**Salvador: ANEEL, 2003. p. 207-217.

MACHADO, W.G.F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração.** 2007. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

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.

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

MENGA, R., MASERA, A., BECOCCI, L., JULIANI, M. **Gestão, Tratamento e Interpretação de Dados de Monitoração Estrutural para Controle de Barragens.** In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 23., 1999, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: CBDB, 1999. p. 329- 335.

MIRANTE, A. N. DE. **Curso: Inspeção e Segurança de Barragens.** Curso: Fundação Parque Tecnológico Itaipu e Agência Nacional de Águas, 2016.

MONTES, C. C. **Estudos piezométricos e análise de estabilidade de taludes da barragem bico da pedra.** 2004. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

OLIVEIRA, A. S. DE; GUIMARÃES, M. **Monitoramento geotécnico da barragem de terra de uma pequena central hidrelétrica (PCH) no estado de Minas Gerais.** In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2019. **Anais...**Fortaleza: IBEAS, 2019. p. 1-10.

PENMAN, A. D. M.; BURLAND, J. B.; CHARLES, J. A. **Observed and predicted deformations in a large embankment dam during construction.** In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS, 4., 1971. *Proceedings...* [S. l]: ICE, 1972. p.729-755.

PENNA, D. C. R. et al. **Carta de Risco como ferramenta na gestão de segurança de barragens**. In: SEMINÁRIO DE GESTÃO DE RISCOS E SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO, 2., 2017, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: CBDC, 2017. p. 1-20.

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

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

ROCHA, A.; SANTOS, L.; SILVA, M. **Medição de vazão em barragens**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 1, p. 73-81, 2016.

RST INSTRUMENTS. **Vibrating Wire Piezometer**. Canada, 2 p, 2020.

SILVA, D. L. da. **Estudo Comparativo entre Análises Probabilísticas e determinísticas de Estabilidade de Talude de Um Depósito de Resíduos de Mineração**. 2019. 150 p. Projeto de Graduação (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 2., 1996, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: CBDB, 1996.

SNISB. **Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens**. Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>>. Acesso em: 4 set. 2023.

STRUFALDI, E. G. B. **Retro análise probabilística: aplicação prática de análise de percolação em uma barragem de terra**. 2004. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

THOMAZ, J. E. S. **Rotina de geração randômica de superfícies críticas na análise de estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 1984.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). **Engineering and Design - Slope Stability**. Washington, DC., 2003.