



FABIANA APARECIDA BLANCO

**AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO DE
UMA BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS**

**LAVRAS – MG
2023**

FABIANA APARECIDA BLANCO

**AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO DE
UMA BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS**

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

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Orientador

Eng. Msc. Guilherme Henrique da Silva Pinto

Coorientador

LAVRAS – MG

2023

FABIANA APARECIDA BLANCO

**AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO DE UMA BARRAGEM
DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS**

PIEZOMETRIC MONITORING EVALUATION OF A SEDIMENT STORAGE DAM

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

APROVADO em 10 de julho de 2023

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido

Prof. Dr. Eduardo Souza Cândido
Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Blanco, Fabiana Aparecida.

AVALIAÇÃO DO MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO
DE UMA BARRAGEM DE CONTENÇÃO DE SEDIMENTOS /
Fabiana Aparecida Blanco. - 2023.

61 p.

Orientador(a): Eduardo Souza Cândido.

Coorientador(a): Guilherme Henrique da Silva Pinto.

Monografia (graduação) - Universidade Federal de Lavras,
2023.

Bibliografia.

1. Engenharia de Barragens. 2. Monitoramento Geotécnico. 3.
Geotecnia. I. Cândido, Eduardo Souza. II. Pinto, Guilherme
Henrique da Silva. III. Título.

Em geral, os geotécnicos trabalham com informação limitada que tenta representar uma realidade inacessível, e geralmente complexa, que pode mudar surpreendentemente em distâncias curtas.

(Paraíso da Mata, Pedro)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sabedoria mesmo nos dias mais difíceis.

Aos meus pais, por serem a base de toda minha vida, por renunciarem seus próprios sonhos para que eu pudesse viver os meus. Ana e Hélio, toda minha trajetória diz respeito à vocês.

Ao meu orientador Eduardo Souza Cândido, por além de ter plantado a sementinha da geotecnia no meu coração me encorajar nos desafios da carreira.

Ao coorientador e grande amigo Guilherme Henrique, por ter tornado essa caminhada mais leve, divertida, pela paciência inimaginável, por ter sido sempre solícito, paciente e me ensinado desde o início.

Ao meu namorado, Vitor Junqueira, por todo o apoio, companheirismo, incentivo e confiança. Obrigada por ter sido meu melhor amigo, meu melhor colega de profissão e minha âncora em todos os momentos.

Aos colegas da Pimenta de Ávila Consultoria, em especial à equipe MRN no qual faço parte por toda a oportunidade de aprendizado, ensinamento e conhecimento compartilhado.

A Universidade Federal de Lavras, por todos os ensinamentos, oportunidades, experiências vivenciadas, e principalmente por formar profissionais de excelência para o mercado de trabalho.

Aos colegas de graduação, pela companhia, companheirismo e amizade ao longo de cinco anos.

RESUMO

Os acidentes envolvendo barragens representam desastres que causam impactos socioeconômicos e ambientais significativos. A necessidade de avaliação adequada da segurança e do monitoramento constante dessas estruturas é crucial para a sociedade. Nesse contexto, medidas preventivas devem ser adotadas para reduzir os riscos de acidentes e minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais. Este trabalho tem como objetivo avaliar o monitoramento piezométrico de uma barragem de contenção de sedimentos, avaliando a influência da sazonalidade do comportamento piezométrico e interpretando o perfil de poropressão obtido a partir da linha freática estimada por meio do histórico de leituras dos instrumentos. Foram avaliadas quatro seções geológicas que possuem um total de 20 instrumentos de medição de poropressão, sendo 9 piezômetros de Casagrande e 11 piezômetros elétricos de corda vibrante. Das seções analisadas, três delas se localizam no vale principal da estrutura e uma seção na ombreira esquerda. Por meio da análise da instrumentação existente foi possível avaliar o perfil da linha freática obtida para cada uma das seções analisadas. Além disso, foi possível comparar a linha freática para cada uma das seções. Foi possível também, identificar pontos de melhoria da instrumentação na seção da ombreira esquerda, vista a escassez de informações para avaliação do fluxo na seção. Por meio de uma análise integrada dos instrumentos analógicos (PZC) e instrumentos elétricos (PZE), foi possível avaliar as condições piezométricas da estrutura.

Palavras-chave: Engenharia Geotécnica. Engenharia de Barragens. Monitoramento Geotécnico. Instrumentação Geotécnica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Linha do tempo da instrumentação.	15
Figura 2: Triângulo geotécnico.	16
Figura 3: Barragens de terra e enrocamento instrumentadas no Brasil no século XX .	17
Figura 4: Atividades de monitoramento.	18
Figura 5: Diferença entre leitura e medida.	19
Figura 6: Perfil típico de um piezômetro Casagrande.	23
Figura 7: Perfil típico de um piezômetro pneumático.	26
Figura 8: Perfil típico de um piezômetro hidráulico.	29
Figura 9: Perfil típico do instrumento piezômetro elétrico de corda vibrante.	30
Figura 10: Definições básicas e equação do tempo de resposta.	33
Figura 11: Seção tipo da Barragem Beta	38
Figura 12: Seção longitudinal da Barragem Beta.	39
Figura 13: Croqui esquemático do PZC simples instalado.	41
Figura 14: Croqui esquemático do PZE simples instalado.	42
Figura 15: Croqui de instalação de um PZE instalado.	42
Figura 16: Seção geológico/geotécnica da Seção A.	44
Figura 17: Seção geológico/geotécnica da Seção B.	47
Figura 18: Seção geológico/geotécnica da Seção C.	50
Figura 19: Seção geológico/geotécnica da Seção D.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tipos de piezômetros existentes.	21
Quadro 2: Características do instrumento Piezômetro Casagrande (PZC).....	25
Quadro 3: Características do instrumento piezômetro pneumático.	27
Quadro 4: Características do instrumento piezômetro hidráulico.	28
Quadro 5: Características do instrumento do tipo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante.	31
Quadro 6: Tempos de resposta estimados para vários métodos de instalação.	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Cota piezométrica - Seção A	45
Gráfico 2: Carga piezométrica - Seção A	45
Gráfico 3: Cota piezométrica - Seção B	48
Gráfico 4: Carga piezométrica - Seção B	48
Gráfico 5: Cota piezométrica - Seção C	51
Gráfico 6: Carga piezométrica - Seção C	51
Gráfico 7: Cota piezométrica - Seção D	54
Gráfico 8: Carga piezométrica - Seção D	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Histórico da instrumentação e panorama geral	15
2.2	Princípios e conceitos básicos de um monitoramento piezométrico	18
2.3	Tipos de piezômetros	20
2.3.1	Piezômetro Casagrande	21
2.3.2	Piezômetro Pneumático	25
2.3.3	Piezômetro Hidráulico	27
2.3.4	Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante	29
2.4	Tempo de resposta de um piezômetro	32
2.5	Fatores que influenciam a leitura de um piezômetro	34
2.6	Medidores de precipitação	35
3	MATERIAL E MÉTODOS	37
3.1	Considerações iniciais	37
3.2	Área de estudo	37
3.3	Perfil geológico-geotécnico típico da barragem Beta	38
3.4	Instrumentação existente	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
4.1	Seção A	43
4.2	Seção B	46
4.3	Seção C	49
4.4	Seção D	52
4.5	Comparação entre as seções estudadas	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.1	Conclusão	57
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS59

1 INTRODUÇÃO

Os acidentes envolvendo barragens sejam de reservação de água ou rejeitos de mineração são desastres que têm causado impactos socioeconômicos e ambientais significativos em todo o mundo. No Brasil, recentemente, ocorreram casos marcantes como o rompimento da barragem de Fundão em 2015 na cidade de Mariana (MORGENSTERN *et al.* 2016) e o rompimento da barragem em Brumadinho em 2019 (ROBERTSON *et al.* 2019). Tais desastres resultaram em centenas de mortes e danos ambientais irreparáveis que perdurarão durante anos para toda a sociedade. Esses e outros acidentes destacam a importância da correta avaliação da condição de segurança de tais estruturas e da necessidade de um monitoramento adequado, acurado e constante.

Entre as medidas que podem ser adotadas para aumentar a segurança de barragens, destacam-se a adoção de normas e padrões técnicos mais rigorosos, avaliação do monitoramento piezométrico e da estabilidade das barragens de forma constante, a implementação de sistemas de alerta precoce, a melhoria dos processos de manutenção e inspeção, dentre outras ações. É importante que tais medidas sejam implementadas de forma preventiva e constante, a fim de reduzir os riscos de acidentes e minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais em caso de ocorrência de um desastre.

A importância do monitoramento e da realização de campanhas de investigação para barragens é indiscutível, tendo em vista os riscos envolvidos durante todas as suas fases de vida útil, seja construção, operação ou fechamento. No que tange ao monitoramento Silveira (2006) descreve que o mesmo permite a identificação precoce de situações anômalas como vazamentos, infiltrações ou deformações estruturais, possibilitando a adoção de medidas preventivas e/ou corretiva para evitar possíveis acidentes. Além disso, o monitoramento também é fundamental para a gestão de riscos associados à barragem, permitindo a avaliação de seu comportamento ao longo do tempo e a identificação de tendências ou mudanças significativas de seu comportamento. Por sua vez, a realização de campanhas de investigação (campo e/ou laboratório), assim como inspeções técnicas e levantamentos topográficos, possibilitam a obtenção de informações detalhadas sobre as condições da barragem e de seu entorno. Essas informações podem ser utilizadas para identificar possíveis pontos de tensão ou falhas na estrutura, permitindo a adoção de medidas preventivas para garantir sua segurança (CASTRO, 2008).

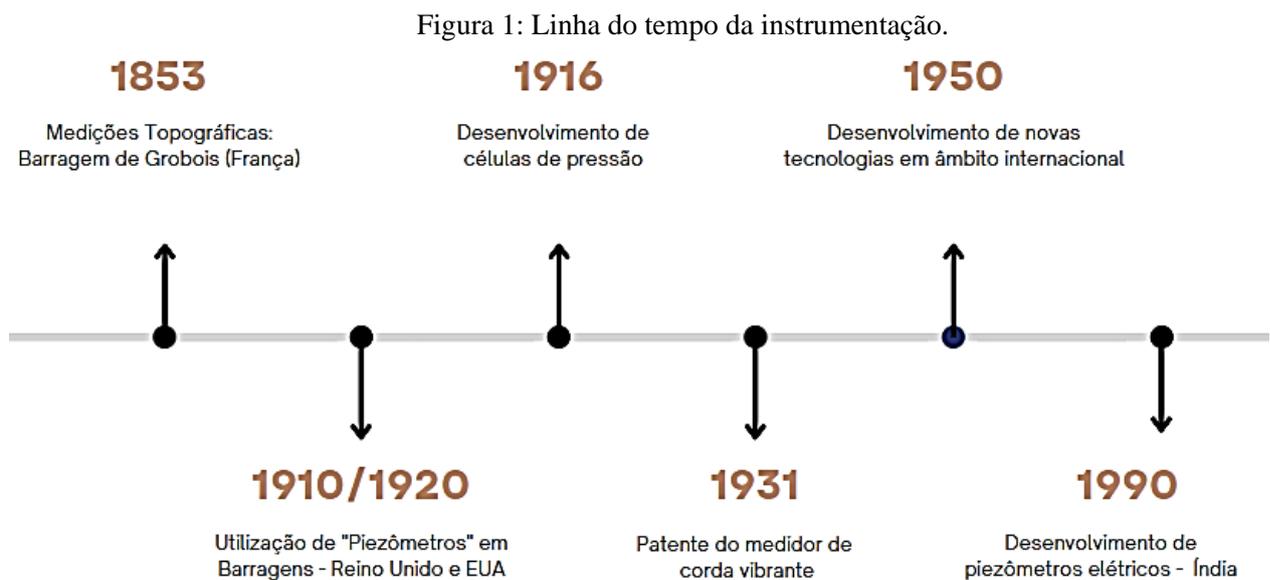
O objetivo geral deste trabalho é realizar uma avaliação do monitoramento piezométrico de uma barragem de contenção de sedimentos. Para tal, será estudada a influência da

sazonalidade do comportamento piezométrico, por meio da análise dos dados ao longo do tempo. A partir disso, será possível verificar a representatividade dos dados da instrumentação instalada e, conseqüentemente, sua capacidade em medir as condições de poropressão *in-situ* ao longo do tempo. Além disso, será discutida a possibilidade de melhorias na forma de monitoramento, visando aprimorar o gerenciamento e prevenir possíveis acidentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Histórico da instrumentação e panorama geral

Dunnicliff (1988), menciona que a gênese dos primeiros instrumentos de monitoramento geotécnico se deu nas décadas de 1930 e 1940. Inicialmente, tratavam-se primordialmente de instrumentos mecânicos e hidráulicos cuja evolução ocorreu através da prática diária no campo de trabalho, a partir de experiências, erros e acertos. Com o advento dos transdutores elétricos e pneumáticos os instrumentos ficaram mais confiáveis, com menor custo e maior flexibilidade na instalação. Atualmente, com o desenvolvimento de novas tecnologias, sensores cada vez menores e mais precisos, e formas de consolidação das informações captadas por satélites e radar, existe ampla gama de produtos disponíveis para monitoramento geotécnico, seja ele piezométrico ou de deslocamentos. Na Figura 1 é mostrado um breve histórico da instrumentação em âmbito internacional.

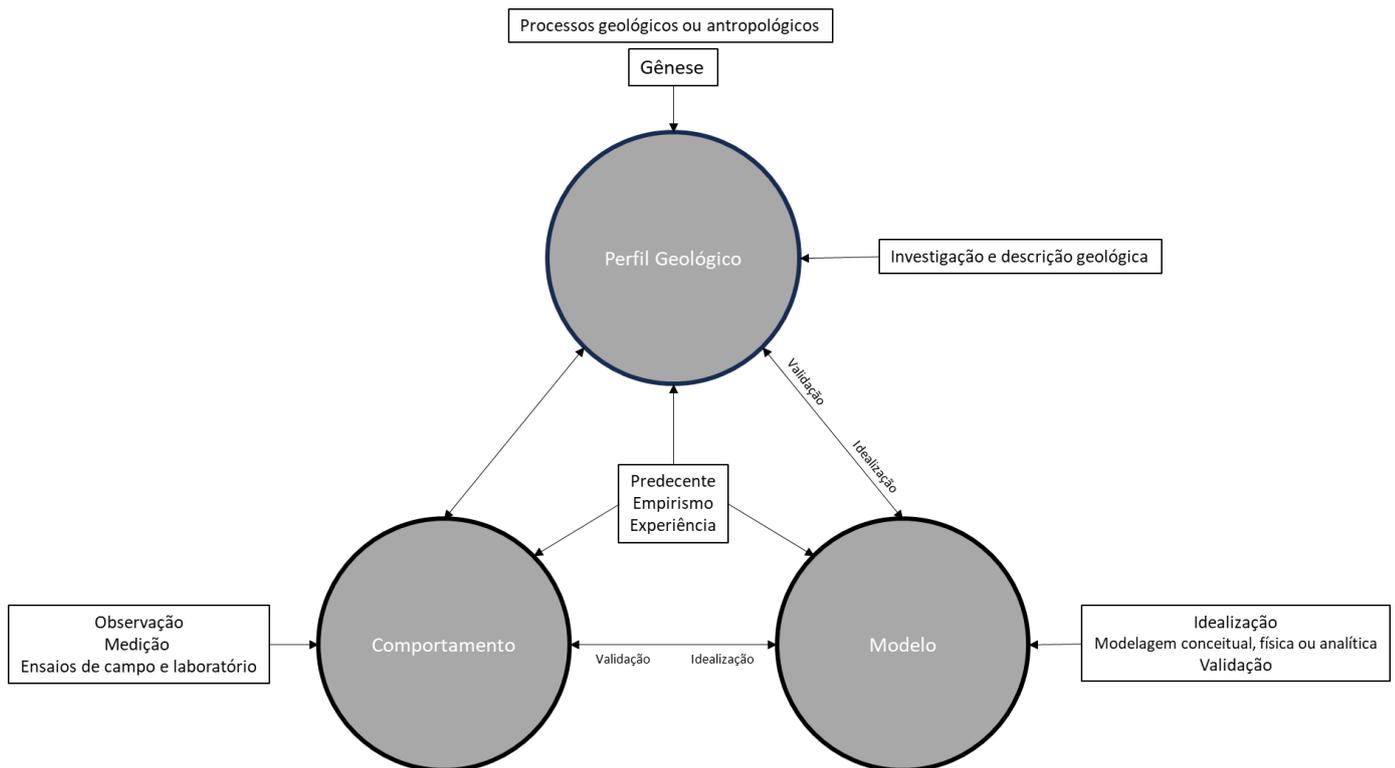


Fonte: Adaptado de Silveira (2006)

Atualmente são escassas as referências que sintetizem todos os avanços tecnológicos no monitoramento de barragens. No entanto, mais importante do que conhecer as novas técnicas, é importante saber as perguntas que efetivamente necessitam ser respondidas. De acordo com Dunnicliff (1988) “todo instrumento em um projeto deve ser selecionado e posicionado para ajudar a responder uma determinada questão: se não existe pergunta, não deve haver instrumentação”.

Para avaliar problemas geotécnicos Burland (1987) introduziu o conceito do triângulo geotécnico. Como é possível observar na Figura 2, o autor dividiu em três, os aspectos principais a serem analisados durante a análise de qualquer problema aplicado a geotecnia. No meio do triângulo, existem três aspectos relevantes nas análises dos problemas geotécnicos os quais são ligados por precedentes, empirismos e experiência.

Figura 2: Triângulo geotécnico.



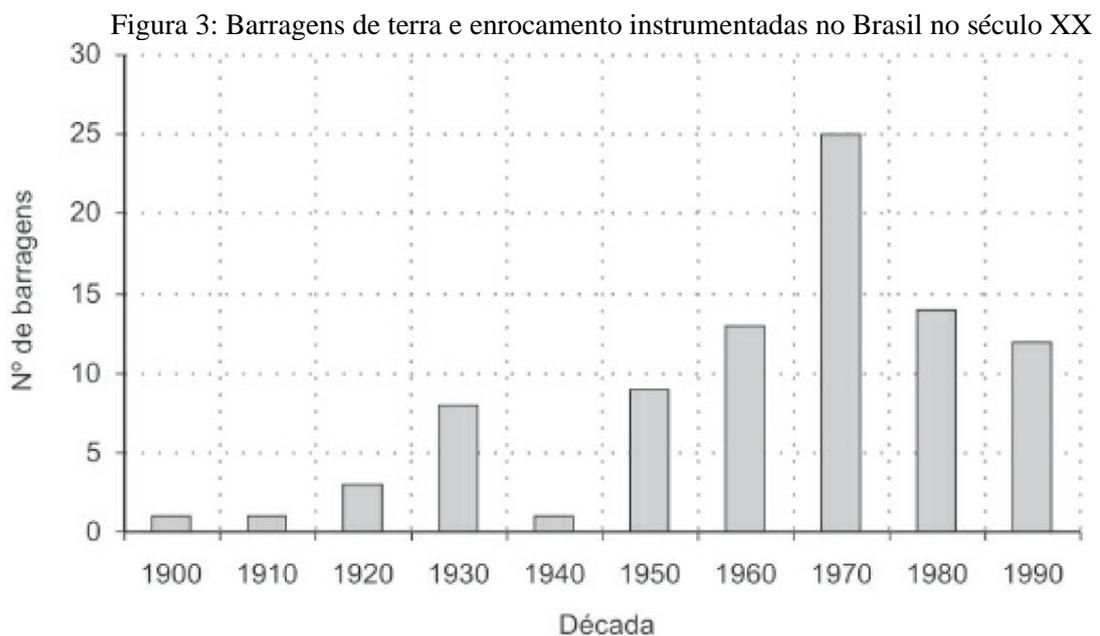
Fonte: Adaptado de Burland (2012)

Na prática dos projetos geotécnicos, ainda persiste uma alta confiança no empirismo (itens centrais do triângulo da Figura 2). Considerando todo o avanço no entendimento do comportamento dos solos e nas novas normativas relacionadas à segurança, utilizar o empirismo como fator preponderante na escolha das premissas de projeto e nos modos de análise de problemas pode parecer uma abordagem um tanto quanto simplificada. Ainda, o uso do empirismo e da experiência, pura e simples, sem uma abordagem quantitativa e teórica que embase tais afirmações, pode ser vítima do viés de confirmação de quem o sugere. Sob este aspecto, a utilização da instrumentação pode ser uma importante ferramenta para que se quantifique as observações, ampliando e qualificando a experiência observada do fenômeno.

Somente com dados confiáveis e testados na prática, pode-se avançar para a adoção de premissas de projetos menos conservadoras, ainda comuns nas práticas de projetos geotécnicos.

Esta abordagem foi descrita pela primeira vez por (PECK, 1969) e é chamada de método observacional.

Em âmbito nacional Silveira (2006) destaca o crescimento a partir da década de 1950 impulsionado pela construção das primeiras hidrelétricas, conforme apresentado na Figura 3. A partir de 1970, motivado por tal crescimento, o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e a CESP (Companhia Energética de São Paulo) começam a desenvolver os primeiros instrumentos de cunho nacional.



Fonte: Adaptado de Silveira (2006)

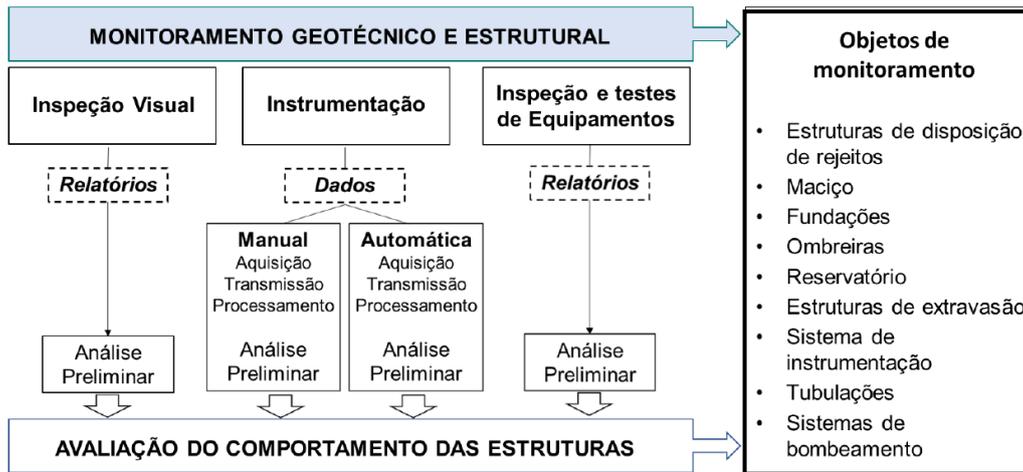
Em relação à normatização existente no Brasil, não existem normas vigentes aplicáveis exclusivamente à instrumentação geotécnica. No que tange as normativas internacionais a ISO 18674-2015, ISO 18674-2016, ISO 18674-2017, ISO 18674-2020 e ISO 18674-2021 refere-se à instrumentação, sendo:

- I. Investigação e testes geotécnicos — Monitoramento geotécnico por instrumentação de campo — Parte 1: Regras gerais;
- II. Investigação e testes geotécnicos — Monitoramento geotécnico por instrumentação de campo — Parte 2: Medição de deslocamentos ao longo de uma linha: Extensômetros;
- III. Investigação e testes geotécnicos — Monitoramento geotécnico por instrumentação de campo — Parte 3: Medição de deslocamentos ao longo de uma linha: Inclínômetros;
- IV. Investigação e testes geotécnicos — Monitoramento geotécnico por instrumentação de campo — Parte 4: Medição da pressão intersticial: Piezômetros;

- V. Investigação e testes geotécnicos — Monitoramento geotécnico por instrumentação de campo — Parte 5: Medições de mudança de tensão por células de pressão total (TPC).

Destaca-se também que o guia apresentado no ICOLD (2014), descreve um guia básico sobre monitoramento, sendo este apresentado na Figura 4.

Figura 4: Atividades de monitoramento.



Fonte: Adaptado de Icold (2014)

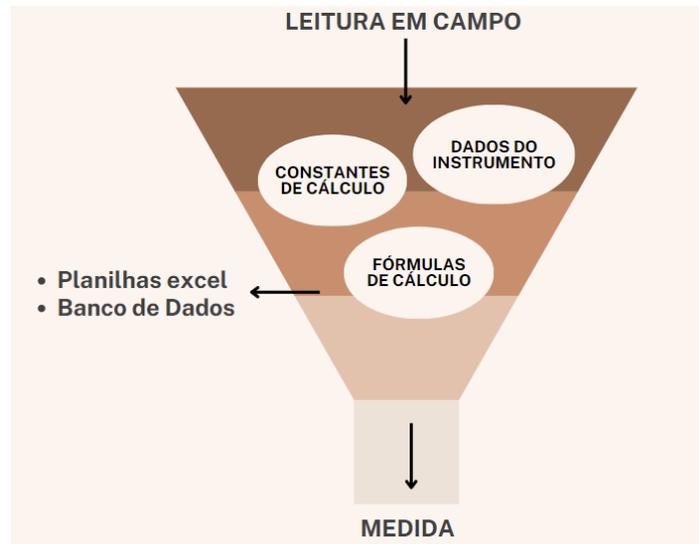
2.2 Princípios e conceitos básicos de um monitoramento piezométrico

Desde que Terzaghi (1925) idealizou o princípio das tensões efetivas, estudo clássico da mecânica dos solos tradicional, entender e mensurar os efeitos da poropressão no comportamento dos solos tornou-se essencial em projetos geotécnicos independente da fase de vida da estrutura (operação, monitoramento, fechamento e/ou pós fechamento). Dessa maneira, efeitos oriundos da variação das tensões efetivas no solo, podem ser motivadas por carregamentos do tipo compressão, distorção e variação de resistência ao cisalhamento. Nessa perspectiva, entender e conhecer a real condição piezométrica torna-se essencial para avaliação da estabilidade de toda estrutura geotécnica. Sendo assim, foi concebido o piezômetro (e suas diferentes variações) no intuito de medir as poropressões existentes em um maciço do solo.

Um conceito que deve ficar claro antes de monitorar qualquer instrumento é a diferença entre a leitura do instrumento e a medida realizada, como evidenciado na Figura 5. A leitura refere-se à observação visual de um valor numérico indicado em um instrumento de medição, sem um significado de engenharia (dado matemático). Já a medida (leitura do instrumento)

refere-se a um valor quantitativo obtido por meio de um processo de medição através de equacionamentos matemáticos, que apresentam significado físico.

Figura 5: Diferença entre leitura e medida.



Fonte: Da Autora (2023)

A poropressão, é conceitualmente definida como a pressão da água atuante nos poros do solo e da rocha, conforme detalhado por (PINTO, 2006). Já a carga altimétrica em um determinado ponto é a porção da carga referente à altimetria daquele ponto, acima de um *datum* pré-determinado, podendo este ser, por exemplo, o nível do mar. Por fim, a carga cinética é a contribuição da energia cinética cujo líquido detém por estar em movimento. Em barragens de terra e enrocamento essa parcela embora seja significativamente pequena deve ser considerada.

A partir de tais definições, e utilizando o mesmo sistema métrico, sendo estes metros de coluna de água (m.c.a.) ou simplesmente metro (m) é possível definir a carga total como a soma das três componentes supracitadas. Tal variável é definida conforme Equação (1).

$$H_t = H_a + H_p + H_c \quad (1)$$

Onde H_t é a carga total, H_a é a carga altimétrica (elevação do ponto), H_p é a carga de pressão e H_c é a carga cinética.

Para mensurar a carga de pressão, comumente são utilizados os piezômetros. Existem diferentes tipos de piezômetros, cada um com características específicas que os tornam adequados para diferentes aplicações. Os principais tipos de piezômetros são: piezômetros de tubo aberto, piezômetros de tubo fechado, piezômetros de célula de carga, piezômetros de fibra ótica e piezômetros elétricos de tensão como detalhado por (SILVEIRA, 2017). Cada um desses

tipos de piezômetros tem sua própria forma de medição e tecnologia, tornando-os mais adequados para certos tipos de aplicações do que outros.

Já Silveira (2017) e Peck (1969) destacam que além dos piezômetros existem inúmeros instrumentos capazes de monitorar outras grandezas. Dentre eles cabe-se citar:

- Inclinômetros: instrumentos utilizados para medir a inclinação de taludes e estruturas geotécnicas, como barragens e diques;
- Medidores de vazão: utilizados para mensurar a vazão de água que passa em uma seção pré-determinada;
- Medidores de nível d'água: utilizados para medir a profundidade do nível d'água a partir da superfície em poços de observação; e
- Marcos superficiais: medidores de deslocamentos superficiais, dentre outros.

Por fim, os *dataloggers* são dispositivos eletrônicos utilizados para armazenar e transmitir dados coletados por instrumentos de monitoramento. Eles permitem o monitoramento contínuo, possibilitando a detecção rápida de eventuais anomalias e a tomadas de decisões mais assertivas.

Em sequência são detalhados os principais instrumentos utilizados nesta monografia. Vale ressaltar, que serão detalhados apenas os instrumentos do tipo piezômetros, esses que são capazes de medir poropressão e são o foco do desenvolvimento do trabalho.

2.3 Tipos de piezômetros

Segundo Dunnycliff (1988) os piezômetros podem ser divididos em instrumentos com a presença de um diafragma entre o transdutor e a área de medição e aqueles que não possuem. Ainda segundo o autor, o primeiro em questão pode ser do tipo pneumático, de corda vibrante ou elétricos, já os outros são de tubo aberto ou hidráulicos. Entretanto, independentemente de sua classificação a partir de tais pontos de medição (células piezométricas) é possível mensurar a carga piezométrica em determinado ponto.

Vale ressaltar que a informação obtida se refere apenas a um ponto determinado no maciço. Logo, a definição do posicionamento das células piezométricas se torna extremamente relevante, pois, se necessário, mais de uma célula pode ser posicionada na mesma vertical a fim de se obter informações completas para a análise da condição freática da estrutura.

No Quadro 1 observa-se as diferenças básicas entre os tipos de piezômetros existentes, diferenciando-os em subtipos e características dos mesmos.

Quadro 1: Tipos de piezômetros existentes.

Tipo de instrumento	Subtipo	Características
Aberto	-Indicador de Nível d'Água (INA) ou Medidor de Nível de Água (MNA) -Piezômetro de Casagrande	- Filtro e reservatório, instalado no terreno e a céu aberto; - Dispositivo de medição passível de ser retirado; - Leituras podem ser automatizadas ou manuais; - Podem não apresentar um tempo de resposta adequado para solos com baixa permeabilidade.
Fechado	- Elétrico e fibra ótica - Piezômetro pneumático - Piezômetro dupla-tubulação	- Filtro, reservatório e transdutor de pressão são instalados no terreno e sem contato com a atmosfera; - Transdutores de pressão passíveis de recuperação quando utilizados sistemas especiais; - Dispositivos fechados comumente apresentam tempo de resposta menores do que dispositivos abertos.

Fonte: Da Autora (2023)

No que tange à instalação dos piezômetros, o croqui de instalação de um piezômetro é um desenho esquemático que mostra as dimensões e características da instalação do piezômetro no local onde serão aferidas as medições. Esse desenho deve incluir informações como a profundidade da perfuração, o diâmetro do tubo de revestimento, a localização do intervalo de interesse, a profundidade e o comprimento da zona de interesse, o tipo de material usado para o tubo, a localização do filtro e da tela, e outros detalhes relevantes. O croqui de instalação do piezômetro é importante porque ele ajuda a garantir que o piezômetro seja instalado corretamente e de acordo com as especificações do projeto, permitindo que as medições de pressão sejam precisas e confiáveis. Além disso, o croqui também pode ser usado para documentar a instalação do piezômetro e permitir a reprodução do processo em outros locais e verificar os materiais existentes no solo investigado.

Outro processo importante é a calibração de um piezômetro. Tal etapa é essencial para garantir a precisão das medições aferidas. Com a calibração adequada, é possível verificar se o piezômetro está operando de acordo com as especificações do fabricante, bem como as medições esperadas pelo projetista, sabendo assim se leituras são confiáveis e precisas.

2.3.1 Piezômetro Casagrande

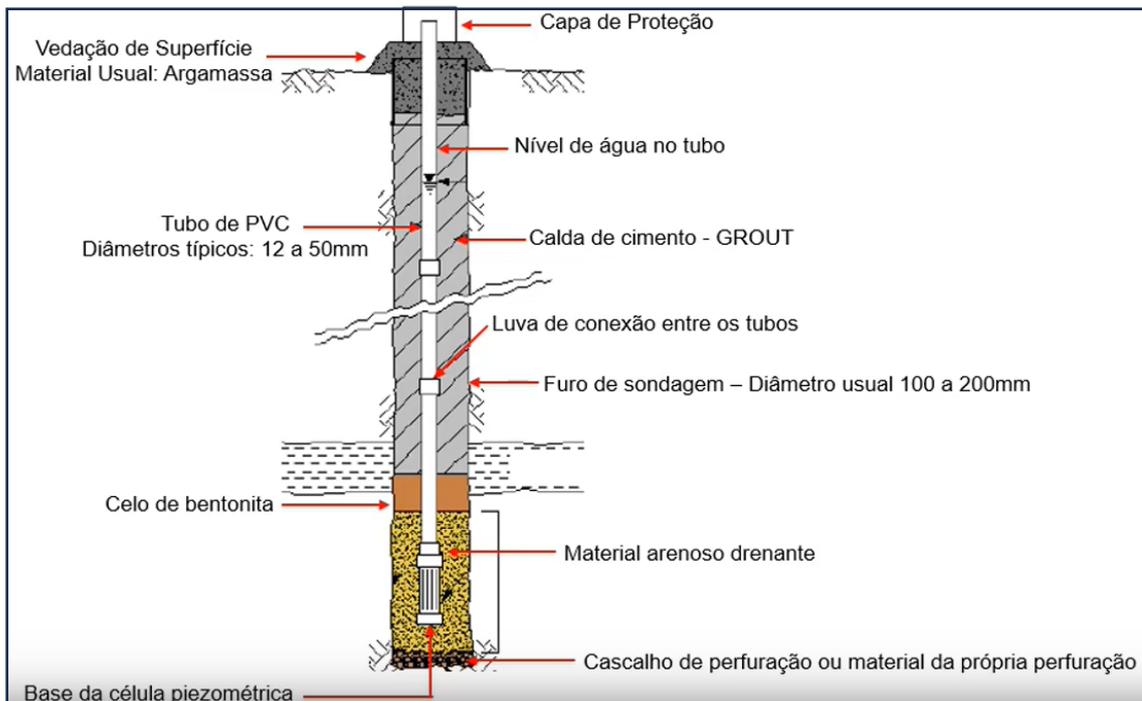
Cerqueira (2017) aponta que o instrumento consiste num dispositivo de medição de pressão da água em solos e rochas do tipo aberto. Ele é composto por um tubo, que pode ser

feito de PVC, metal ou material geomecânico, com ranhuras ou perfurações em trechos de cerca de 1 metro. No ponto de medida de pressão é realizado preenchimento de areia (material drenante), denominado célula de pressão. A água subterrânea flui pelas ranhuras do tubo e, quando submetida a uma determinada pressão o nível da água dentro do tubo sobe ou desce de acordo com as variações de poropressão. Esse nível de água dentro do tubo representa a pressão da água na posição da célula de areia. Comumente, para evitar interferências de camadas de água superiores, um selo de bentonita ou solo cimento é utilizado. A célula de areia está conectada à superfície por meio da tubulação e suas variações são medidas, considerando as condições barométricas.

Conforme descrito por Silveira (2017), o piezômetro de Casagrande é um instrumento de fácil instalação e construção simples, não necessitando de mão de obra especializada ou materiais complexos. Além disso, é um instrumento robusto e durável, que requer pouca manutenção de rotina e possui um custo acessível. Ele pode ser instalado de forma que a boca do instrumento fique dentro de uma caixa de passagem enterrada, com acesso restrito à equipe de monitoramento, o que o torna mais seguro. Ademais, o piezômetro de Casagrande elimina bolhas de ar formadas durante a instalação e não apresenta riscos de defeitos por descargas atmosféricas ou interferências elétricas/magnéticas. Destaca-se ainda que o instrumento não precisa ser calibrado, podendo ser utilizado também para a amostragem de água para análise de qualidade.

A Figura 6 apresenta o perfil típico de um instrumento do tipo piezômetro de Casagrande.

Figura 6: Perfil típico de um piezômetro Casagrande.



Fonte: Adaptado de Cerqueira (2017)

Assim como todo instrumento, o piezômetro Casagrande apresenta vantagens e limitações. Já Hvorslev (1951) considera uma das vantagens do piezômetro de Casagrande a sua tendência a não formação de bolhas de ar. Segundo o autor bolhas de ar em um instrumento de observação do nível d'água ou em um piezômetro pode influenciar o tempo de resposta e provocar a elevação do nível indicado no tubo. Portanto, o interior do tubo deve ser liso, protuberâncias direcionadas para baixo ou juntas devem ser evitadas, e o diâmetro do tubo deve ser grande o suficiente para fazer com que as bolhas subam para a superfície.

Yungwirth (2013) considera o longo tempo de resposta uma das desvantagens do piezômetro Casagrande:

O projeto tradicional do poço de monitoramento da água subterrânea tem a desvantagem de a necessidade de um volume finito de água fluir adentro ou fora do furo de sondagem para se registrar uma mudança em níveis de água. Isto cria um tempo de resposta entre a pressão piezométrica da camada e o poço de monitoramento. Em camadas de baixa condutividade hidráulica, a taxa de equilíbrio pode ser devagar demais para propiciar uma informação útil dentro de um intervalo de tempo razoável.

No que tange às limitações, o instrumento não mede poropressão, mas sim a carga piezométrica em um ponto específico conforme descrito no processo de medição anterior. Além disso, o tempo de resposta é considerado muito longo e o instrumento pode ser facilmente danificado por atividades de terraplenagem. A acurácia da medida depende da habilidade e

experiência do operador, assim como a necessidade de se manter a verificação da elevação do ponto de referência. Outra limitação é que os poros da célula de areia e perfurações no tubo podem se colmatar, o que compromete a precisão das medições.

Segundo Cerqueira (2017) o processo de medição do piezômetro Casagrande envolve as seguintes etapas:

1. Verificação da conexão: Antes de iniciar a medição, é necessário verificar se o piezômetro está corretamente conectado ao tubo de medição e ao manômetro. É importante garantir que não haja vazamentos de água que possam comprometer a precisão da medição.
2. Calibração do manômetro: O manômetro do piezômetro de Casagrande deve ser calibrado antes da medição, de modo a garantir a precisão das leituras. Isso é feito utilizando-se um dispositivo de calibração específico, que permite ajustar o manômetro para a pressão correta.
3. Preparação do piezômetro: Antes de iniciar a medição, é necessário preencher o tubo de medição do piezômetro com água limpa até uma altura pré-determinada.
4. Leitura do manômetro: Após a preparação do piezômetro, é feita a leitura do manômetro, que indica a pressão exercida pela água no interior do tubo de medição. Essa pressão é convertida em altura de água utilizando-se uma tabela de calibração específica para o piezômetro.
5. Anotação dos dados: Finalmente, os dados de pressão e altura de água são anotados em um registro específico para o piezômetro de Casagrande, permitindo a análise posterior dos resultados e a avaliação da estabilidade e comportamento do solo ou rocha em estudo.

A aparente simplicidade do instrumento muitas vezes resulta em uma possível baixa acurácia e confiabilidade das leituras que pode afetar a qualidade dos dados obtidos. Ademais, é necessário realizar a correção do tempo de resposta para se alcançar adequada utilização dos dados em materiais de baixa permeabilidade. Além disso, a ocorrência de interferência do sensor com a umidade do interior da tubulação não é rara, além do erro do operador. Por fim, é importante destacar que o instrumento requer acesso direto do operador para sua leitura, exceto quando automatizado via transdutor de pressão ou sensor piezométrico.

No Quadro 2, apresentada as principais características desse tipo de instrumento.

Quadro 2: Características do instrumento Piezômetro Casagrande (PZC).

Características observadas	
Parâmetro Medido	<ul style="list-style-type: none"> - Pressões neutras em maciços de terra, taludes e fundações. Subpressões nas fundações de estruturas em concreto.
Características principais	<ul style="list-style-type: none"> - Constituídos por um tubo PVC inserido em um furo de sondagem, em cuja extremidade inferior é instalado um elemento poroso (bulbo); - A água penetra através do bulbo formando uma coluna d'água equivalente à pressão hidrostática no ponto de instalação; - Na região do bulbo o furo é preenchido com areia e na altura restante é preenchido com solo-cimento plástico ou bentonita, delimitando a região drenante.
Manutenção necessária	<ul style="list-style-type: none"> - Proteger o topo da tubulação contra entrada de água e queda de materiais dentro do tubo; - Calibração periódica do cabo de leitura, através da aferição de seu comprimento utilizando uma trena; - Limpeza da célula do instrumento para remoção de sedimentos, através da injeção de água sob pressão.
Erros observados na leitura	<ul style="list-style-type: none"> - Graduação deficiente, deformação ou corte do cabo de leitura; - Instalação de piezômetros à montante ou a jusante de cortinas de injeção antes da conclusão da mesma; - Falha na execução do selo ao longo do tubo; - Cadastramento incorreto da cota de instalação da célula; - Alteração na cota de boca do tubo devido a recalque do maciço, sem a correção da fórmula de cálculo na medida

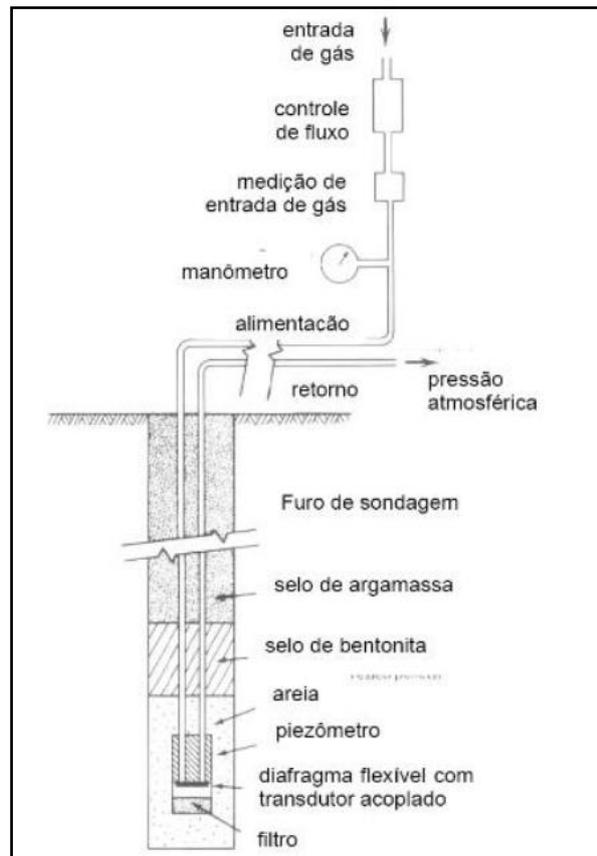
Fonte: Da Autora (2023)

2.3.2 Piezômetro Pneumático

Como apontado por Cerqueira (2017) o piezômetro pneumático é um instrumento que contém sensor piezométrico pneumático. Este é colocado em um furo de sondagem através de uma estrutura de suporte ou, em alguns casos, cravado em solo macio. O sensor é revestido de areia, permitindo que a água subterrânea flua através dela e atue no sensor, que é submetido a uma determinada poropressão. Um selo de bentonita é utilizado para garantir que a leitura não seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. Diferentemente dos piezômetros de tubo, o sensor não está conectado à superfície do terreno por meio de um tubo, o que significa que as variações não são afetadas pelas condições barométricas.

A Figura 7 apresenta um perfil típico de piezômetro pneumático.

Figura 7: Perfil típico de um piezômetro pneumático.



Fonte: Adaptado de Dunnycliff (1988)

Ainda em Cerqueira (2017) é possível verificar que o seu funcionamento é baseado no equilíbrio de pressões no diafragma, o qual fica sujeito à pressão a ser medida de um lado e, do outro, é exercida uma pressão controlada que equilibra o referido diafragma. O piezômetro do tipo pneumático apresenta as vantagens de medir a média da poropressão, visto que não está sujeito a danos pela terraplenagem se as mangueiras forem instaladas horizontalmente. Já a acurácia da medida não depende da habilidade do operador, não há risco de defeito por descargas atmosféricas ou interferências eletromagnéticas e o tempo de resposta é mais curto em comparação ao piezômetro Casagrande.

McKenna (1995) quantifica e exemplifica o pequeno volume necessário à equalização da pressão interna de um piezômetro pneumático. Este pequeno volume garante um rápido tempo de resposta às variações piezométricas:

Para um piezômetro pneumático com uma escala de leitura e alcance de 700 kPa, o volume para deflexão da escala completa é $0,01\text{cm}^3$. O volume de equalização necessário é aproximadamente linear com a mudança em carga, portanto para uma variação de 100cm em carga (~ 10 kPa), o volume de equalização é somente $1,4 \times 10^{-4}\text{cm}^3$.

Dentre as limitações desse tipo de instrumento, pode-se citar a necessidade de acesso direto do operador para leitura e a impossibilidade de instalação totalmente camuflada devido às mangueiras de alimentação e retorno. Além disso, há o risco de colmatção dos poros da célula de areia e a complexidade da confecção do selo de bentonita. O selo de bentonita também pode não ser volumetricamente estável em determinadas formações. Por fim, o instrumento é suscetível a erros de leitura e aumento do tempo de resposta em caso haja a formação de bolhas de ar no sistema (CERQUEIRA, 2017).

O Quadro 3 apresenta as principais características desse tipo de instrumento.

Quadro 3: Características do instrumento piezômetro pneumático.

Características observadas	
Parâmetro Medido	<ul style="list-style-type: none"> - Pressões neutras e subpressão em obras de engenharia
Características principais	<ul style="list-style-type: none"> - Funcionamento baseado no equilíbrio de pressões atuantes no diafragma flexível; - Atuação da água cuja pressão deseja-se medir em um lado do instrumento e do outro um gás (em geral nitrogênio) cuja pressão é controlada; - A conexão pneumática entre o instrumento e o painel de leituras é feita através de dois tubos de nylon denominados de alimentação e retorno que se comunicam com o diafragma através dos dois orifícios, do lado oposto da água. Enquanto a pressão da água não supera a pressão do gás, o diafragma permanece vedando os orifícios impedindo o retorno do gás. Quando a pressão do gás supera a da água a membrana flete ligeiramente permitindo o fluxo e retorno do gás.
Manutenção necessária	<ul style="list-style-type: none"> - Checar conexões; - Manter o manômetro calibrado; - Manter a identificação dos instrumentos.
Erros observados na leitura	<ul style="list-style-type: none"> - Fórmulas ou constantes de cálculo de calibração incoerentes; - Não aguardar o tempo de estabilização do instrumento para realização de leituras; - Cadastramento da cota da célula de instalação errado.

Fonte: Da Autora (2023)

2.3.3 Piezômetro Hidráulico

Assim como os demais piezômetros, o piezômetro hidráulico é mais um dos instrumentos disponíveis e utilizados para medir a pressão da água em um meio poroso, como

o solo ou rocha. Ele consiste em um tubo de PVC ou metal instalado no meio poroso com uma extremidade aberta em contato com a água subterrânea e a outra extremidade selada, conectada a um manômetro que mede a pressão da água.

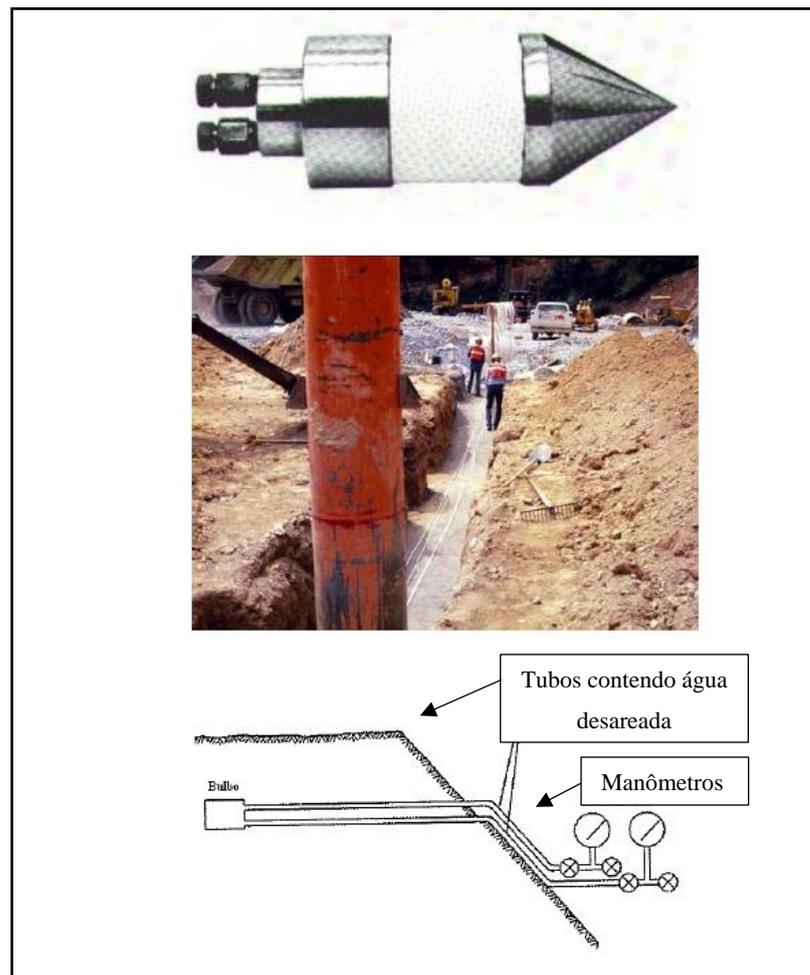
Segundo Santos e Lima (2018) dentre as vantagens dos piezômetros hidráulicos destacam-se: (i) medem diretamente a pressão da água no interior do solo; (ii) não possuem problemas relacionados à colmatação dos poros da célula de areia. Além disso, no que tange as limitações desse tipo de instrumento, cita-se: (i) sua sensibilidade a variações barométricas; (ii) podem sofrer problemas de obstrução e entupimento caso o solo possua grande quantidade de sedimentos; (iii) são mais caros e complexos de instalar que os piezômetros pneumáticos; (iv) o selo de bentonita precisa ser confeccionado com cuidado para evitar falhas; e (v) exigem que o operador tenha conhecimento específico para realizar as medições e manutenção. A Figura 8 apresenta um perfil típico de um piezômetro hidráulico e o Quadro 4 apresenta as principais características do piezômetro hidráulico.

Quadro 4: Características do instrumento piezômetro hidráulico.

Características observadas	
Parâmetro Medido	- Pressões neutras e subpressão em maciço de terras e fundações.
Características principais	<ul style="list-style-type: none"> - Consiste em um corpo metálico ou plástico ao qual está solidária uma pedra porosa, conectado ao painel de leitura através de dois tubos flexíveis; - Funcionamento baseado no equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível; - De um lado atua-se a água cuja pressão se deseja medir e do outro a água desareada, similarmente ao princípio de funcionamento de um piezômetro pneumático; - Quando a água e o painel estão saturados a leitura é efetuada abrindo os registros que conectam cada um dos dois tubos do piezômetro no manômetro de leitura, e aguardando a estabilização do ponteiro.
Manutenção necessária	<ul style="list-style-type: none"> - Checar conexões; - Manter os manômetros calibrados; - Manter a identificação dos instrumentos.
Erros observados na leitura	<ul style="list-style-type: none"> - Vazamentos nas conexões; - Presença de bolhas de ar nas tubulações; - Cadastramento incorreto da cota de instalação do instrumento; - Não aguardar rigorosamente o tempo de estabilização para realizar as leituras; - Fórmulas ou constantes de calibração incorretas.

Fonte: Da Autora (2023)

Figura 8: Perfil típico de um piezômetro hidráulico.



Fonte: Adaptado de Geotechnical Observations (2023)

2.3.4 Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante

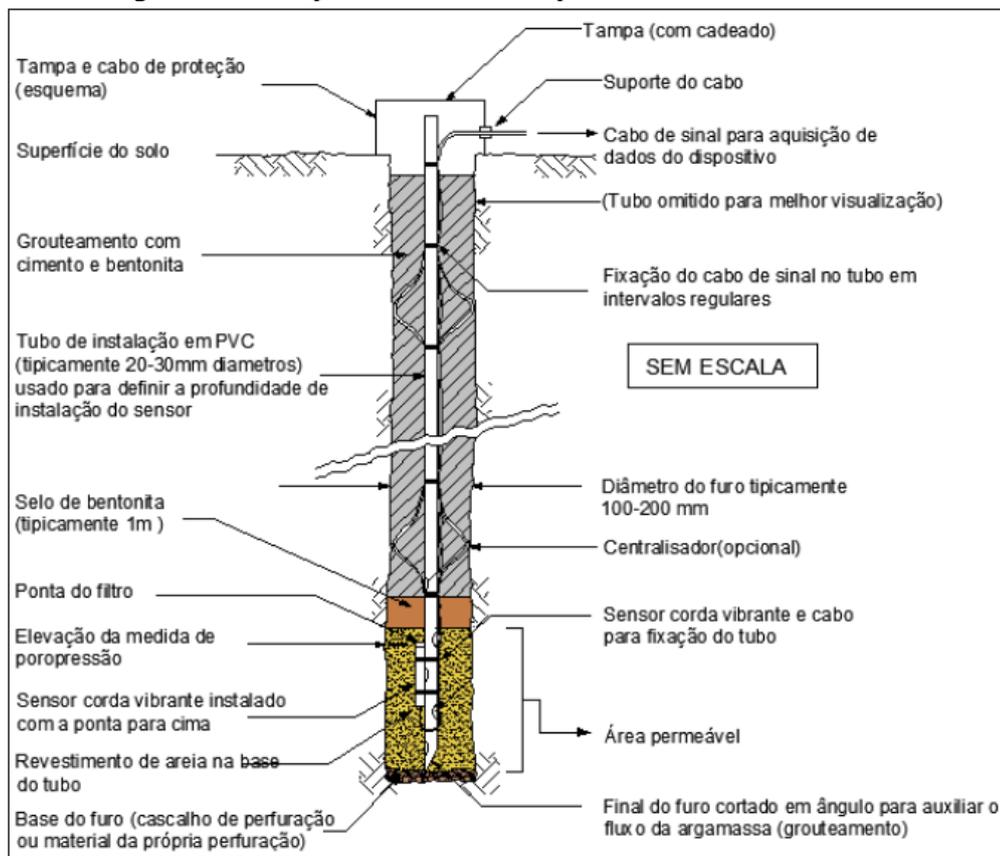
Com o avanço da tecnologia, os piezômetros de Casagrande vêm sendo amplamente substituídos pelos piezômetros elétricos de corda vibrante. Tal instrumento consiste em um sensor piezométrico de corda vibrante, inserido em um furo de sondagem pré-perfurado através de uma investigação, em geral do tipo SPT (*Standart Penetration Test*) ou CPT (*Cone Penetration Test*). O sensor pode ou não ser envolto em areia, por onde o fluxo da água subterrânea percola até atuar também no sensor, que por sua vez é submetido a uma determinada poropressão de equilíbrio. Para os casos em que é empregado a célula de areia, um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia (CERQUEIRA, 2017).

Conforme Silveira (2006) o seu funcionamento é simples onde mede-se a frequência da tensão de um arame fixo a um diafragma e submetido às variações da poropressão da camada alvo. O instrumento utiliza um diafragma de aço inox conectado à um elemento de arame

vibrante. As mudanças de pressão no diafragma fazem com que ele se esvazie e esticando o arame, mudando também a tensão e frequência de vibração do elemento de arame vibrante. A partir da medição da frequência do instrumento e utilizando a equação própria do mesmo, determina-se a poropressão no ponto. A

Figura 8 apresenta um perfil típico do piezômetro elétrico de corda vibrante.

Figura 8: Perfil típico do instrumento piezômetro elétrico de corda vibrante.



Fonte: Adaptado de Cerqueira (2017)

Ainda em Cerqueira (2017) é possível observar que o piezômetro elétrico de corda vibrante possui inúmeras vantagens e desvantagens. As vantagens deste dispositivo são diversas comparadas a outros instrumentos. Primeiramente, ele pode ser instalado de forma totalmente camuflada, com o protetor antissurto em uma caixa de passagem enterrada e o cabo seguindo para a estação de monitoramento através de uma trincheira também aterrada. O tempo de resposta também é mais rápido em comparação ao piezômetro Casagrande, pois a água não precisa percorrer o tubo de PVC. Ele também não fica sujeito a danos devido à terraplanagem se o cabeamento for realizado fora da área de aterramento. A acurácia da medida é independente

da habilidade e experiência do operador e as versões cravadas não são suscetíveis à colmatação. Por fim, é importante ressaltar que não requer acesso direto do operador para a leitura do instrumento.

No que tange às limitações, pode-se citar: (i) há o risco de defeito por descargas atmosféricas ou interferências eletromagnéticas; (ii) os poros da célula de areia podem se colmatar, o que prejudica a precisão da medida; e (iii) a confecção do selo de bentonita é complexa e suscetível a falhas, o que pode comprometer a leitura correta da poropressão.

O uso do selo de bentonita é questionado por alguns estudiosos, como Mikkelsen *et al.* (2003), é necessário um isolamento adequado da célula do sensor piezométrico ao longo do comprimento do furo de sondagem. No entanto, é importante ressaltar que o selo de bentonita não é volumetricamente estável em determinadas formações, o que pode levar a incertezas sobre as poropressões localmente induzidas pelo processo de hidratação. Para neutralizar essas propriedades expansivas do componente bentonita, Mikkelsen *et al.* (2003) sugerem a introdução de cimento na mistura. O Quadro 5 apresenta um resumo das características de um piezômetro elétrico de corda vibrante.

Quadro 5: Características do instrumento do tipo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante.

Características observadas	
Parâmetro Medido	- Pressões neutras e subpressões em obras tais como taludes, aterros e fundações.
Características principais	- A pressão no diafragma altera a tensão em um fio no interior da célula, que por sua vez altera a frequência de resposta ao pulso elétrico emitido pela unidade de leitura do instrumento.
Manutenção necessária	- Calibrar periodicamente a unidade de leitura; - Checar proteção contra raios; - Proteger o terminal contra impactos e intempéries; - Manter a identificação dos instrumentos.
Erros observados na leitura	- Aterramento das células e caixa terminal deficiente. É necessário verificar se o aterramento foi feito individualmente, para cada instrumento ou somente no terminal. É necessário verificar o projeto quanto à resistividade do terreno para ter a certeza quanto à malha de aterramento e se os pontos de aterramentos estão ligados entre si. - Cadastramento incorreto da cota de instalação do instrumento; - Fórmulas ou constantes de calibração incorretas; - Verificação da resistência do termistor e do transdutor de corda vibrante

Fonte: Da Autora (2023)

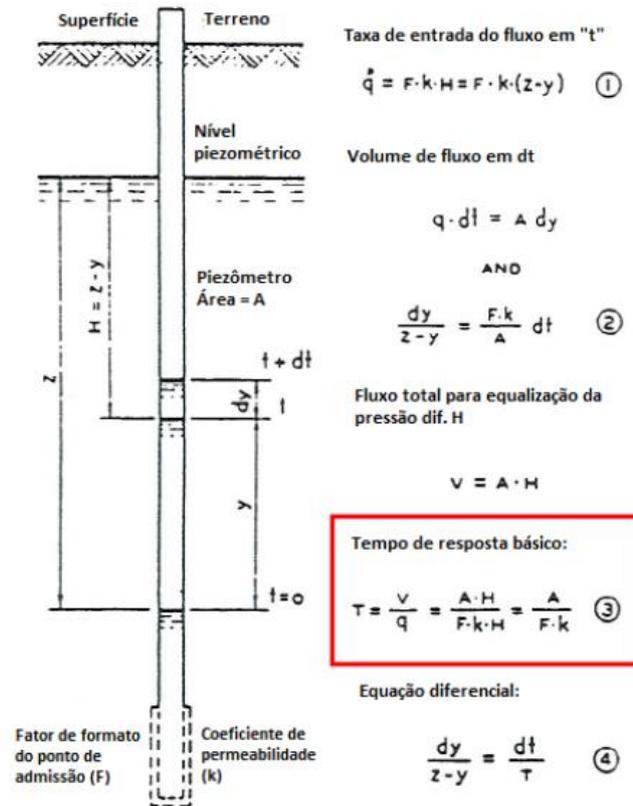
2.4 Tempo de resposta de um piezômetro

Cerqueira (2017) menciona que o tempo de resposta é o intervalo de tempo necessário para a equiparação da variação de pressão piezométrica ocorridas no ponto alvo na formação geológica e a pressão efetivamente medida no piezômetro. A consideração do tempo de resposta é um aspecto muito importante ao optar pelo tipo de instrumento de monitoramento adequado, especialmente no que se refere à escolha do tipo de piezômetro. Além disso, o processo de equalização das poropressões é dependente do coeficiente de permeabilidade do solo (k). Quanto menor o coeficiente de permeabilidade, maior o tempo decorrido entre a variação de poropressão no solo e o valor registrado no aparelho. Sendo assim, não existe instrumento com tempo de resposta igual a zero.

Já Hvorslev (1951), define tempo de resposta como sendo o tempo necessário para a praticável eliminação das diferenças entre pressões hidrostáticas na água subterrânea e as pressões dentro do equipamento de medição da pressão (piezômetro). A Figura 9 mostra a equação do tempo básico de resposta (T) como sendo a razão da área da seção do piezômetro (A) pelo produto do fator de formato da célula (F) com o coeficiente de permeabilidade do solo (k).

McKenna (1995), em seu estudo sobre piezômetros grauteados, apresenta estimativas de tempo de resposta para vários tipos de piezômetros e métodos de instalação. Tal estimativa é baseada nas equações propostas anteriormente por Hvorslev (1951) e considera misturas de graute com permeabilidade na ordem de 10^{-8} cm/s. O Quadro 6 apresenta a estimativa do tempo de resposta obtido pelo autor.

Figura 9: Definições básicas e equação do tempo de resposta.



Fonte: Adaptado de Hvorslev (1951)

Quadro 6: Tempos de resposta estimados para vários métodos de instalação.

Tipo	Método de instalação	Altura típica da célula (cm)	Diâmetro da célula (cm)	Volume de equalização aproximado para 100cm de carga (cm ³)	Tempo aproximado de 99% de equalização de pressão
Piezômetro pneumático Sinco	Convencional	-	17	10e-4	<1s
	Grauteado	-	5	10e-4	10s
Piezômetro de corda vibrante Geokon	Convencional	-	17	10e-5	<<1s
	Grauteado	-	5	10e-5	1s
Piezômetro pneumático Sinco	Convencional	-	7,5	10e-4	1s
	Grauteado	-	5	10e-4	10s
Piezômetro Casagrande diâmetro = 2,5cm	Convencional	-	17	500	10 dias
	Grauteado	-	2,5	500	10 meses

*Nota: Baseado em formações de permeabilidade na ordem de 10⁻⁷ cm/s e graute de permeabilidade na ordem de 10⁻⁸ cm/s.

Fonte: Adaptado de McKenna (1995)

2.5 Fatores que influenciam a leitura de um piezômetro

Uma boa medição das leituras em um piezômetro vai além das boas práticas praticada na engenharia e é essencial para o monitoramento das condições de fluxo da área estudada, seja ela uma barragem, pilha ou cava. No entanto, uma leitura precisa e confiável de um piezômetro pode ser influenciada por diversos fatores, como a localização, a profundidade, o tempo de resposta e a presença de interferências externas. Neste contexto, entender esses fatores é fundamental para garantir a precisão e a confiabilidade das leituras piezométricas.

Segundo King (1986) as principais fontes de erro em leituras piezométricas são erros comuns incluindo problemas na medição do nível da água, erros de calibração, vazamentos na tubulação, problemas de condutividade elétrica, interferência de outros fatores e erros de interpretação ou registro. A medição precisa do nível da água pode ser comprometida por dificuldades de leitura, falta de precisão nos instrumentos de medição ou problemas de visualização do nível da água. Além disso, a calibração inadequada dos instrumentos pode levar a leituras imprecisas ou enviesadas. Os vazamentos na tubulação conectada ao piezômetro são outro problema comum, no qual eles podem afetar a pressão da água e, conseqüentemente, causar leituras incorretas. Além disso, em piezômetros elétricos, a condutividade elétrica do solo pode interferir na precisão das leituras.

Além disso, outro ponto relevante a ser considerado são as interferências de outros fatores. Por exemplo, influências de pressão atmosférica, gradientes hidráulicos locais ou movimentação do solo podem afetar as leituras e resultar em erros. Erros de interpretação ou registro também podem ocorrer. A interpretação incorreta das leituras ou erros durante o registro dos dados podem levar a informações incorretas ou incompletas. Para minimizar esses erros, é crucial realizar uma calibração adequada dos instrumentos, garantir um treinamento adequado dos operadores e ter uma compreensão abrangente das condições e limitações do local de medição.

Hvorslev (1951) afirma ainda que na maioria dos casos temos que escolher qual fonte de erro é mais significativa e logo necessita mitigação:

Deve ser notado que várias fontes de erro mencionadas acima requerem medidas de remediação conflitantes, e para cada instalação deve ser determinado quais destas fontes de erro são mais sérias. Aquelas listadas nos itens 3, 4, 5 e 6 afetarão os resultados das leituras, mesmo quando estas leituras forem realizadas após o término da equalização entre as pressões no lado de dentro e no lado de fora. Aquelas descritas nos itens 7, 8, 9 e 10, primeiramente, influenciam o tempo de resposta, mas elas podem afetar também o resultado final quando as leituras finais de campo forem corrigidas pela influência do tempo de resposta. É possível que estas fontes de erro possam evoluir ou possam desaparecer e que suas influências nas leituras

possam variar dentro de um amplo limite durante a vida útil de uma determinada instalação.

É importante ressaltar que a precisão das leituras piezométricas pode ser afetada por muitos fatores, e por isso é fundamental seguir os procedimentos adequados de instalação, calibração e manutenção do equipamento para minimizar erros e garantir a qualidade dos dados obtidos conforme indicações da fabricante. Além disso, as boas práticas advindas das experiências do técnico em campo são cruciais para uma boa leitura dos instrumentos.

A ASCE (2020) menciona que o olho humano treinado é o melhor instrumento para avaliar a performance de uma barragem. Além disso, destacam que apesar das inspeções visuais terem limitações, nenhum outro método tem o mesmo potencial de integrar rapidamente toda a situação do comportamento. Dessa forma, a proposta do método observacional descrita por Peck (1969) é rotina no que tange ao monitoramento de barragens.

2.6 Medidores de precipitação

Os medidores de precipitação são instrumentos para aferição do volume de precipitação em um dado local. A aferição pode ser realizada num período diário ou horário, a depender do tipo de equipamento instalado.

Para uma medição horária, utiliza-se o pluviógrafo. Já para uma medição diária, utiliza-se o pluviômetro. O pluviômetro registra a altura de chuva total acumulada num dado período de tempo. Esse aparelho é mais utilizado para totalizar a precipitação diária. Já o pluviógrafo registra automaticamente as variações de precipitação ao longo do tempo mais curto. Pode ser gráfico ou digital, automatizado ou semiautomatizado. Como seu registro é contínuo, possibilita a medição da intensidade da chuva

Como menciona Pereira e Mota (2016) a estrutura do pluviômetro consiste essencialmente em um recipiente cilíndrico de coleta de água da chuva, com uma área de coleta padrão, geralmente de 20 cm de diâmetro, e uma régua graduada que permite a medição da quantidade de água coletada. Existem diferentes tipos de pluviômetros, que variam em tamanho, forma e material. Alguns pluviômetros são feitos de plástico, enquanto outros são feitos de materiais mais resistentes, como o metal. Alguns pluviômetros possuem funis ou telas de proteção para evitar que detritos entrem no recipiente de coleta.

O pluviômetro geralmente, é instalado em uma área aberta e plana, longe de árvores ou obstáculos que possam afetar a coleta da chuva. Quando ocorre a precipitação, a água da chuva é coletada no recipiente do pluviômetro e é medida pela régua graduada. A quantidade de

precipitação é geralmente expressa em milímetros ou polegadas de água. Sendo assim, pode-se mencionar que seu processo de aferição é simples e direto.

Os dados coletados pelos pluviômetros são importantes para a previsão do tempo e prevenção de enchentes e inundações, para a compreensão do clima de uma região e para o planejamento de atividades que dependem da disponibilidade de água, como a agricultura. No que tange a engenharia geotécnica o pluviômetro permite avaliar como a quantidade e intensidade da chuva e como a mesma pode afetar o comportamento do fluxo do solo seja ele na fundação ou maciço. Além disso, a partir das informações coletadas é possível estimar a quantidade de água que infiltrará no solo, o que pode afetar a resistência e a estabilidade das estruturas construídas sobre ele.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Considerações iniciais

Esse capítulo tem como objetivo descrever as características da barragem em estudo, as premissas empregadas, os dados utilizados e o processo de análise dos mesmos. Tendo em vista a confidencialidade dos dados, o local do empreendimento e outras informações pertinentes serão descaracterizados e substituídas por pseudônimos.

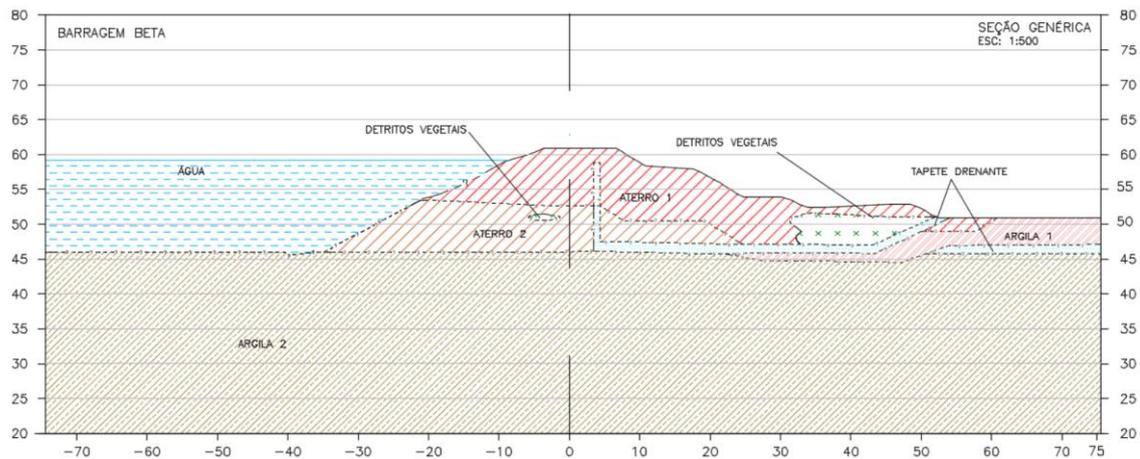
3.2 Área de estudo

A Barragem Beta (estrutura a ser analisada) foi construída com objetivo de reter sedimentos oriundos do processo de exploração mineral. No processo minerário toda água proveniente da limpeza da área industrial (correias transportadoras, piso de concreto localizado abaixo das correias e empilhadeiras de minério) e da drenagem dos pátios de estocagem de minério segue por um sistema de drenagem, em direção às bacias de sedimentação. Dessas bacias, a água drenada é direcionada para a Barragem Beta e, posteriormente, para a Barragem Gama, localizada à jusante da primeira, seguindo clarificada para o Rio próximo à cidade minerária.

Conforme dados do projeto *As Built* da estrutura, a Barragem Beta foi projetada e construída no início dos anos 2000 e teve sua operação iniciada logo após sua construção. Nessa perspectiva, tem-se as seguintes etapas construtivas: escavação e limpeza da fundação, execução do aterro compactado e construção do sistema de drenagem interno (filtro chaminé e tapete drenante). A Figura 10 apresenta uma seção tipo da Barragem Beta.

Além do registro de construção a estrutura possui uma grande quantidade de informações no que tange a investigações de campo, seja para instalação de instrumentos ou caracterização geotécnica do subsolo, ou instalação de instrumentos do tipo piezômetros elétricos ou Casagrande. Tais dados serão utilizados no decorrer do trabalho empregando pseudônimos.

Figura 10: Seção tipo da Barragem Beta.



Fonte: Da autora (2023)

3.3 Perfil geológico-geotécnico típico da barragem Beta

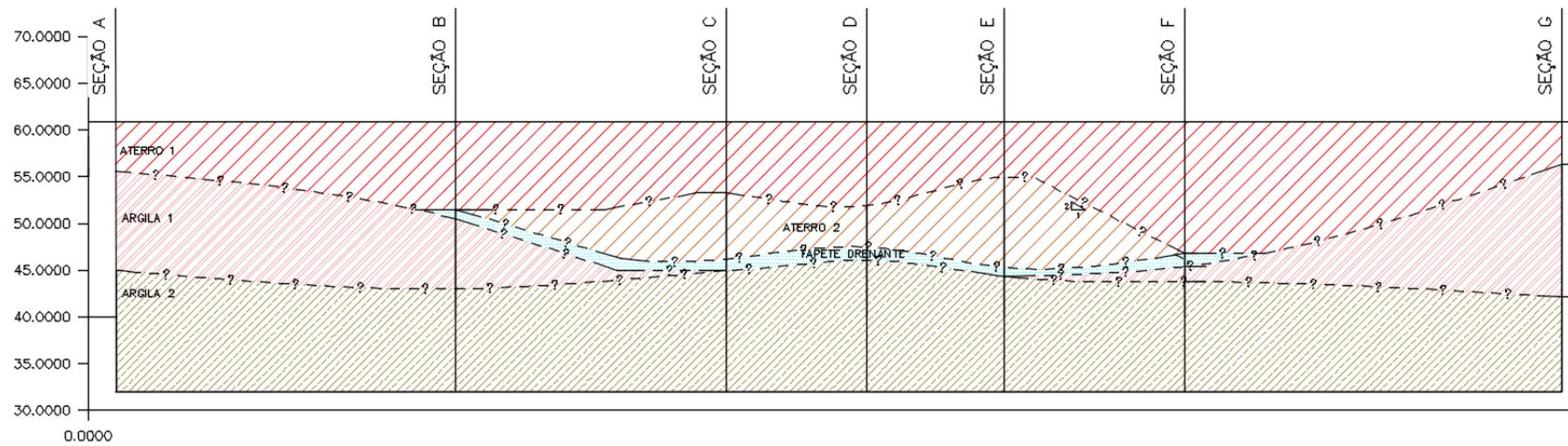
A Barragem Beta possui campanhas de investigações ao longo das 7 seções instrumentadas. Nessas seções a estrutura possui investigações geológico-geotécnicas, com sondagens a percussão com o SPT (*Standart Penetration Test*), ensaios de penetração com o piezocone (CPTu – *Cone Penetration Test with porepressure measurement*), e ensaios de palheta *Vane Test* (VT). Além disso, na barragem foram coletadas amostras indeformadas do tipo bloco (BL) e amostras deformadas. A partir da coleta de tais amostras, foram realizados ensaios de laboratório: (i) Teor de Umidade Natural; (ii) Granulometria Completa (peneiramento e sedimentação); (iii) Massa Específica Real dos Grãos; (iv) Limites de Atterberg; (v) Triaxial CIU sat; e (vi) Permeabilidade a Carga Variável (CV), esses que são capazes de realizar a caracterização granulométrica e definir parâmetros de mecânicos e de deformabilidade dos materiais.

A Figura 11 mostra-se o perfil longitudinal da Barragem Beta, no qual é possível observar a disposição dos materiais, sua elevação e as espessuras de suas camadas. Vale salientar, que o perfil transversal para as seções escolhidas para análise é apresentado em detalhes no item de resultados e discussões.

Figura 11: Seção longitudinal da Barragem Beta.

OMBREIRA
ESQUERDA

OMBREIRA
DIREITA



SEÇÃO LONGITUDINAL: BARRAGEM BETA

ESC.: 1/500

Fonte: Da Autora (2023)

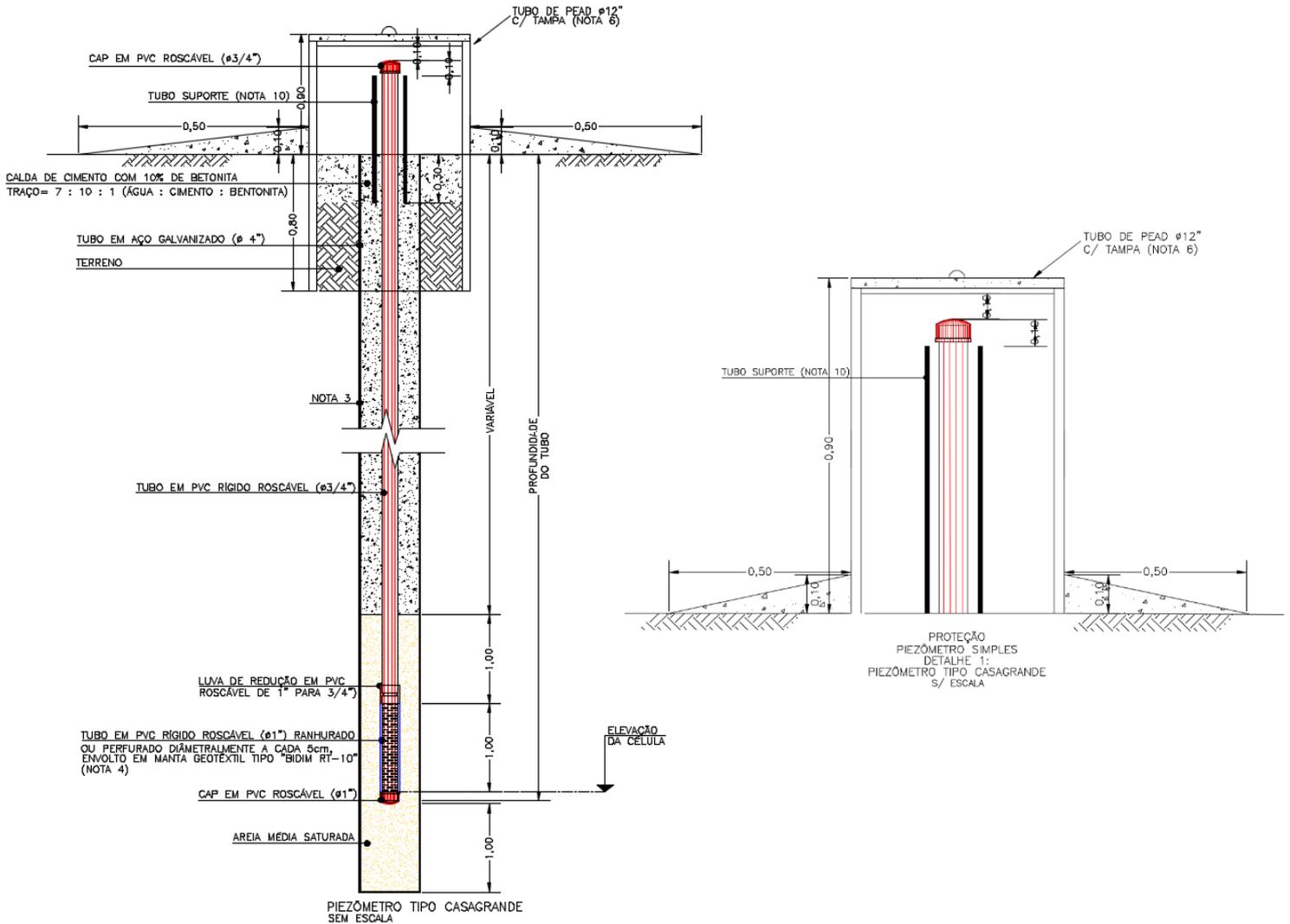
3.4 Instrumentação existente

O programa de vigilância (ações de monitoramento e inspeção) é feito atualmente por meio de análise dos dados registrados pela instrumentação, bem como inspeções visuais rotineiras realizadas em campo. A instrumentação instalada tem a função de medição de poropressões (PZE e PZC), medição do nível de água à montante e jusante do reservatório (régua de monitoramento, NA), bem como a medição de vazão (MV), poços de monitoramento (PC) e turbidez por meio de medidores de vazão e turbidímetros. Para a avaliação dos dados de monitoramento são considerados também os dados de precipitação do local aferidos através de um pluviômetro localizado na região. Ressalta-se que os piezômetros elétricos estão automatizados e apresentam leituras diárias através de uma plataforma de registros de digital, enquanto as régua linimétrica e poços de monitoramento são lidos manualmente com periodicidade semanal e suas leituras inseridas posteriormente no mesmo. Quanto aos medidores de vazão e turbidímetros, a frequência de leitura é quinzenal sendo os dados registrados no mesmo portal.

Além disso, o monitoramento de deslocamentos superficiais é realizado por meio de uma técnica de monitoramento por satélite, denominada interferometria por radar de abertura sintética (*Interferometric Synthetic Aperture Radar - InSAR*).

No presente trabalho, à título de simplificação serão abordadas discussões referentes ao monitoramento piezométrico da estrutura estudada, avaliando suas variações durante um determinado período pré-estabelecido. Os 14 piezômetros de Casagrande foram instalados no ano de início da operação do reservatório conforme os croquis de instalação apresentados na Figura 12.

Figura 12: Croqui esquemático do PZC simples instalado.

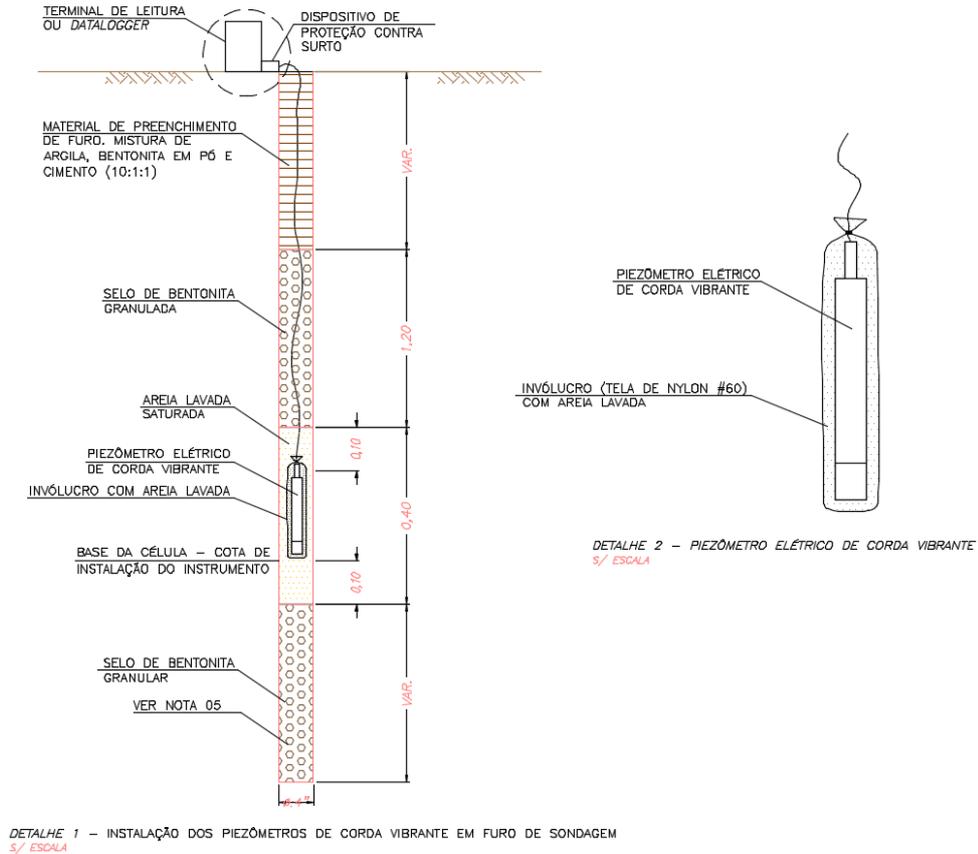


Fonte: Da Autora (2023)

Os 30 piezômetros elétricos de corda vibrante foram instalados segundo o projeto de instrumentação complementar. Da mesma forma que os piezômetros Casagrande, para esses instrumentos também foram realizadas campanhas de investigações do tipo SPT (*Standart Penetration Test*). As Figura 13 e Figura 14 apresentam o croqui esquemático da instalação do PZE.

Além disso, cabe destacar que na Barragem Beta, somente os PZE possuem certificado de calibração.

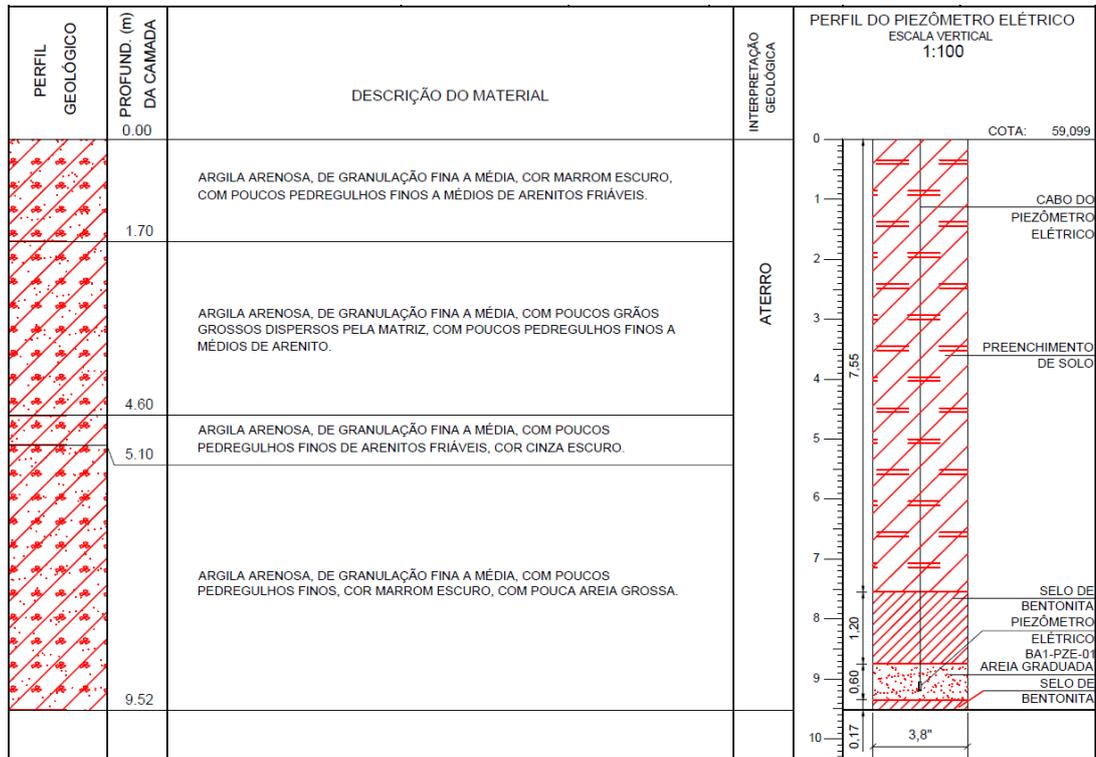
Figura 13: Croqui esquemático do PZE simples instalado.



DETALHE 1 - INSTALAÇÃO DOS PIEZÔMETROS DE CORDA VIBRANTE EM FURO DE SONDAGEM 5/ ESCALA

Fonte: Da Autora (2023)

Figura 14: Croqui de instalação de um PZE instalado.



Fonte: Da Autora (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o desenvolvimento do trabalho, foram estudadas quatro seções instrumentadas, sendo elas: a Seção A que contém apenas 1 instrumento do tipo Piezômetro Casagrande (PZC), a Seção B que contém 3 instrumentos do tipo Piezômetro Casagrande e 4 (quatro) instrumentos do tipo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante (PZE), a Seção C que contém 5 instrumentos do tipo Piezômetro Casagrande e, por último a Seção D que contém 6 instrumentos do tipo Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante.

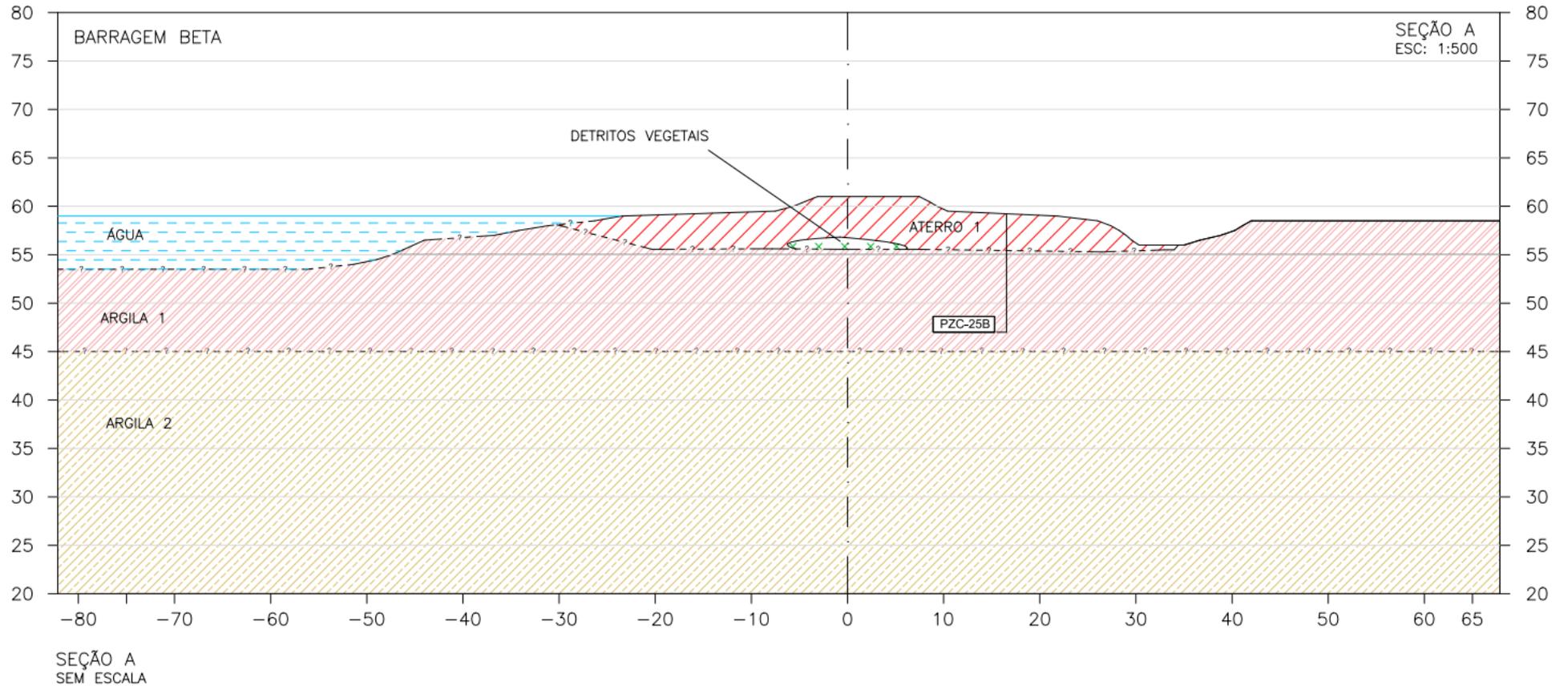
O histórico de monitoramento dos instrumentos é composto de leituras correspondentes a um período de 3 ciclos hidrológicos (aproximadamente 3 anos de dados). Foi avaliado a sazonalidade e a pluviometria local, através dos dados de pluviometria e da régua linimétrica presente no reservatório. A partir dos dados obtidos, foi realizada a interpretação do comportamento da rede de fluxo estabelecida, sendo filtrados os possíveis dados inconsistentes ocasionados por erros no funcionamento da instrumentação ou no registro das leituras pelo responsável. Vale ressaltar que a escolha das quatro seções permite a discussão sobre o impacto na diferença de quantidade e tipo de instrumentos instalados em cada uma das seções.

4.1 Seção A

A Seção A corresponde a uma seção transversal presente na ombreira esquerda da Barragem Beta e contém 1 piezômetro do tipo Casagrande, denominado PZC-25B, instalado no material denominado Argila 1. Na Figura 15 está apresentada a Seção A da Barragem Beta, com sua respectiva interpretação estratigráfica bem como a localização do piezômetro instalado, à jusante da estrutura.

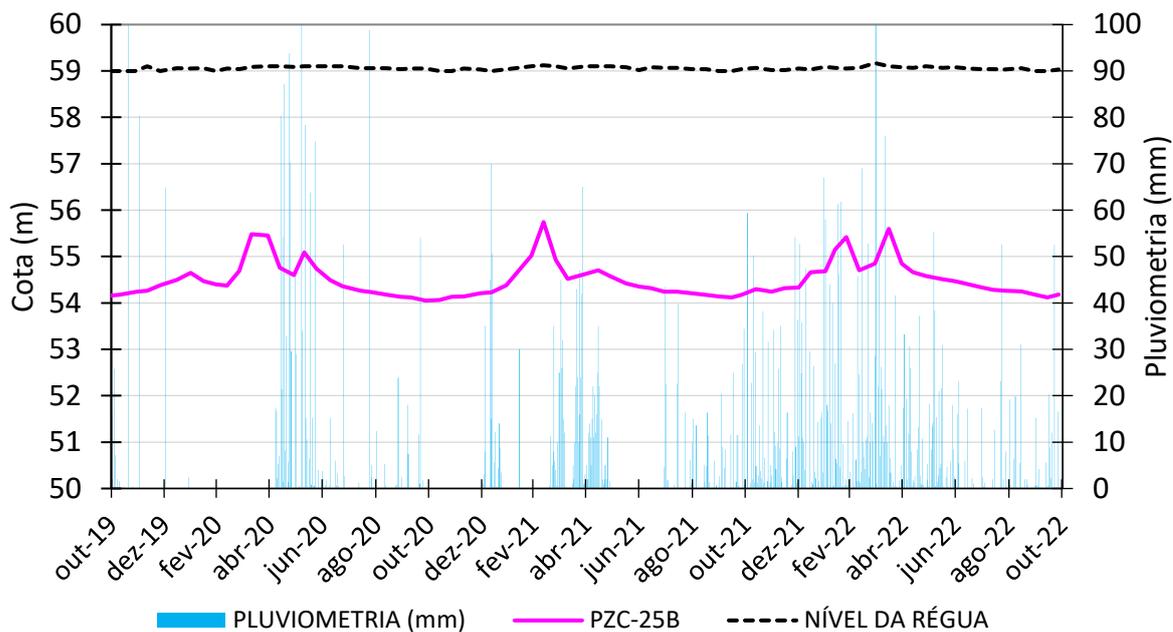
Nos Gráfico 1 e Gráfico 2 estão representadas, respectivamente, a cota piezométrica e a carga piezométrica da Seção A.

Figura 15: Seção geológico/geotécnica da Seção A.



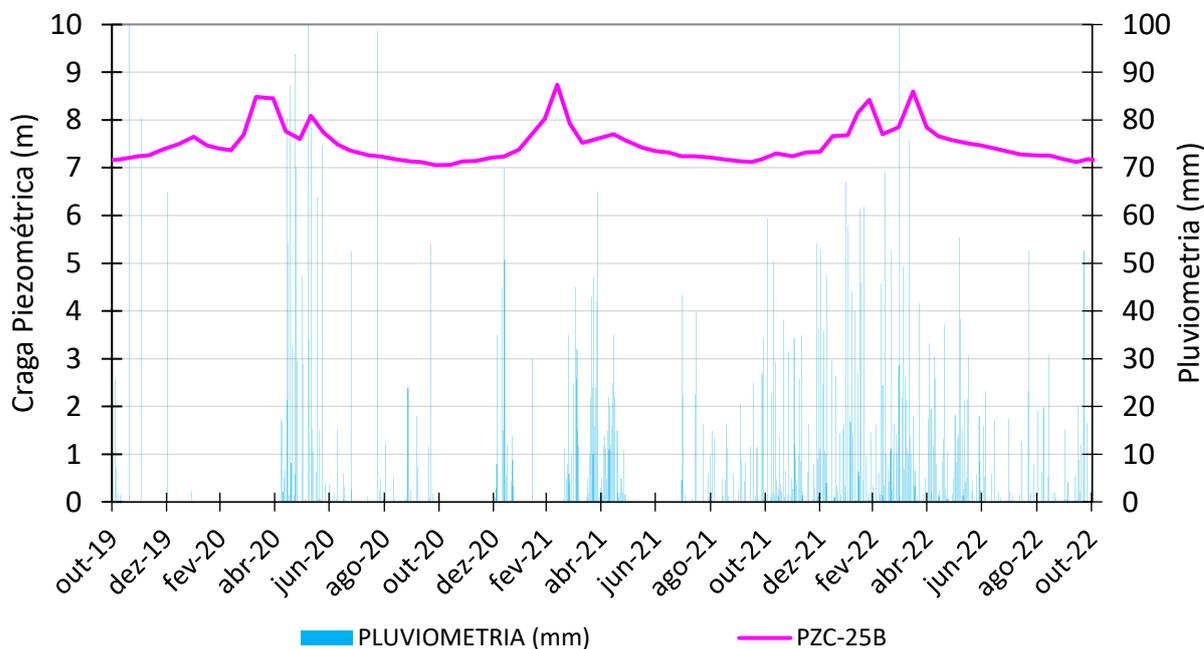
Fonte: Da Autora (2023)

Gráfico 1: Cota piezométrica - Seção A



Fonte: Da Autora (2023)

Gráfico 2: Carga piezométrica - Seção A



Fonte: Da Autora (2023)

A partir das informações apresentadas, é possível notar que as leituras do Piezômetro PZC-25B são influenciadas pela pluviometria local, uma vez que, nos períodos de estiagem, as leituras de cota e carga piezométricas atingem seus valores mínimos e nos períodos de máxima pluviometria as leituras atingem seus valores máximos. Observa-se também que a carga

piezométrica nunca atinge o valor nulo (igual a 0), o que indica que há um lençol freático permanente e estabelecido na região, que apenas oscila nos períodos chuvosos.

A partir da leitura da régua, é possível constatar que o nível do reservatório não oscila significativamente entre os períodos de cheia e estiagem. Isso se deve, provavelmente, à existência de um sistema extravasor na estrutura que controla seu nível. Sendo assim, a única condição de contorno que influencia nas leituras do piezômetro é, possivelmente, a pluviometria.

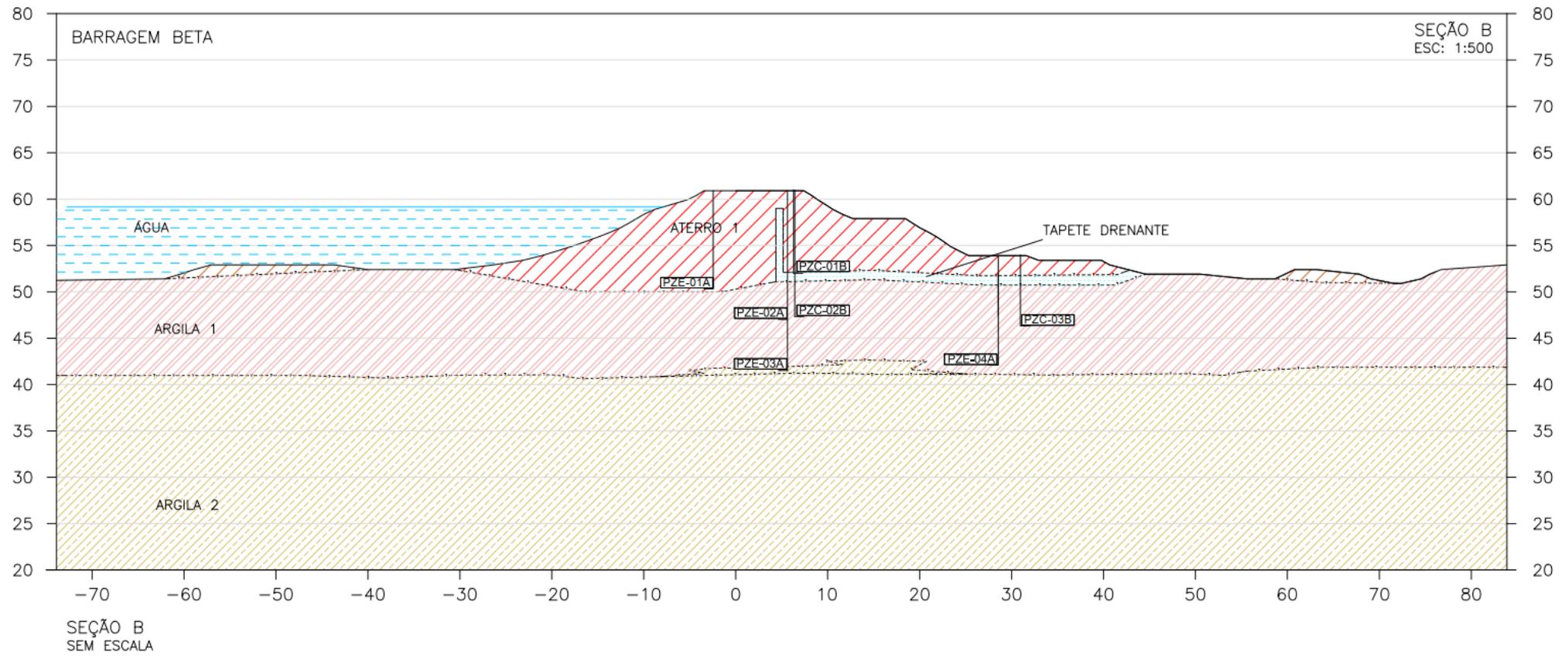
Tendo em vista que a seção possui apenas um instrumento, não é possível comparar o tempo de resposta do mesmo.

4.2 Seção B

Na Figura 17 é apresentada a Seção B da Barragem Beta, com sua respectiva interpretação estratigráfica bem como os piezômetros instalados, sendo 4 PZE e apenas 3 PZC. Como pode ser observado, foram instalados 4 instrumentos no material denominado como Argila 1, sendo PZE-02A, PZC-02B, PZE-04A e PZC-03B. Além disso, a seção possui 1 instrumento instalado no Aterro 1, sendo este PZE-01A, 1 instrumento no Tapete Drenante, sendo PZE-01B e 1 instrumento na Argila 2, sendo PZE-03A.

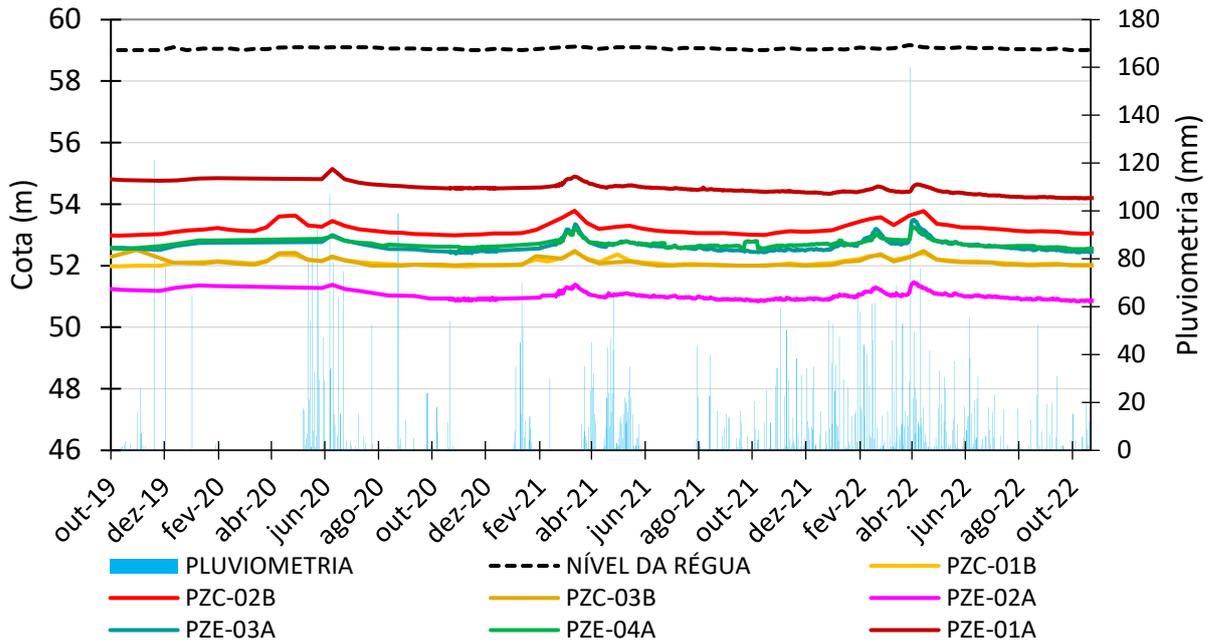
Nos Gráfico 3 e Gráfico 4 estão representadas, respectivamente, a cota piezométrica e a carga piezométrica dos instrumentos instalados na Seção B da Barragem Beta.

Figura 16: Seção geológico/geotécnica da Seção B.



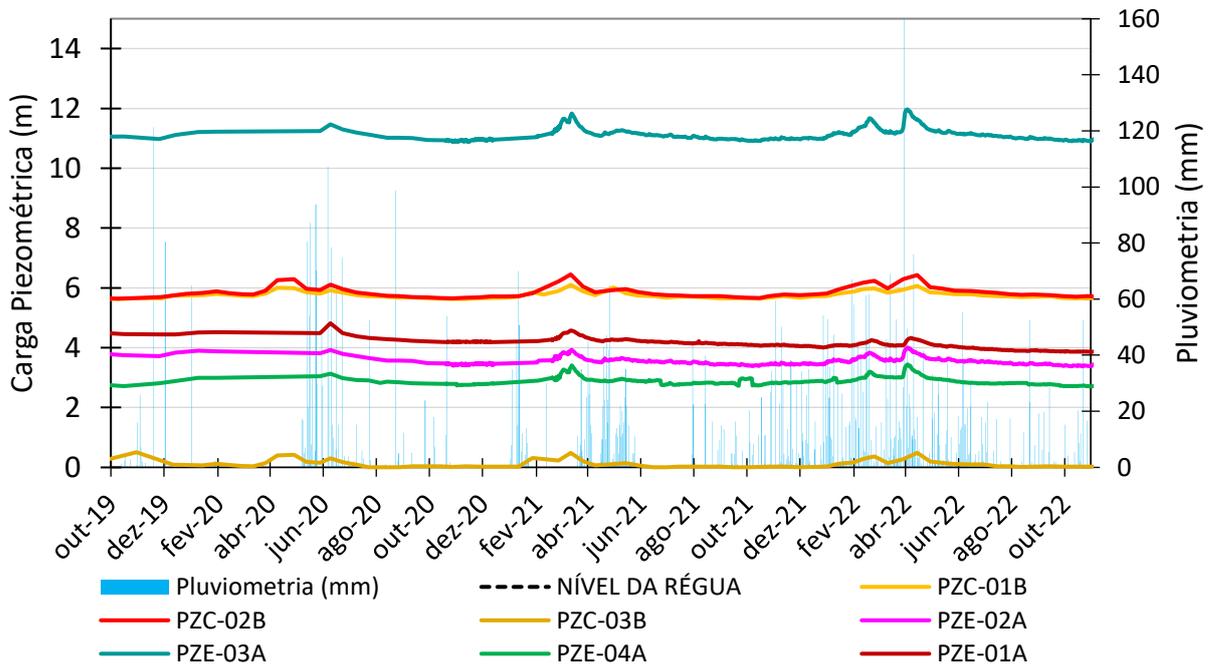
Fonte: Da Autora (2023)

Gráfico 3: Cota piezométrica - Seção B



Fonte: Da Autora (2023)

Gráfico 4: Carga piezométrica - Seção B



Fonte: Da Autora (2023)

De forma similar ao observado na Seção A, é possível concluir que as leituras dos piezômetros instalados são influenciadas pela pluviometria local, uma vez que, nos períodos de estiagem, as leituras de cota e carga piezométricas atingem seus valores mínimos e nos períodos de cheia as leituras atingem seus valores máximos.

É possível constatar também que o nível do reservatório não oscila significativamente entre os períodos de cheia e estiagem. Possivelmente tal fato está associada ao sistema extravasor, como discutido anteriormente.

No pico de leituras pluviométricas, registrado entre os meses de fevereiro e abril de 2022, é possível constatar que as leituras dos instrumentos elétricos PZE-01A, PZE 02A, PZE 03A e PZE-04A respondem imediatamente ao evento. Em contrapartida, as leituras dos instrumentos analógicos PZC-01B, PZC-02B e PZC-03B respondem ao evento de chuva em uma data posterior, demonstrando de forma prática o impacto do tempo de resposta dos instrumentos. Tal diferença é provocada pelo princípio de funcionamento dos instrumentos.

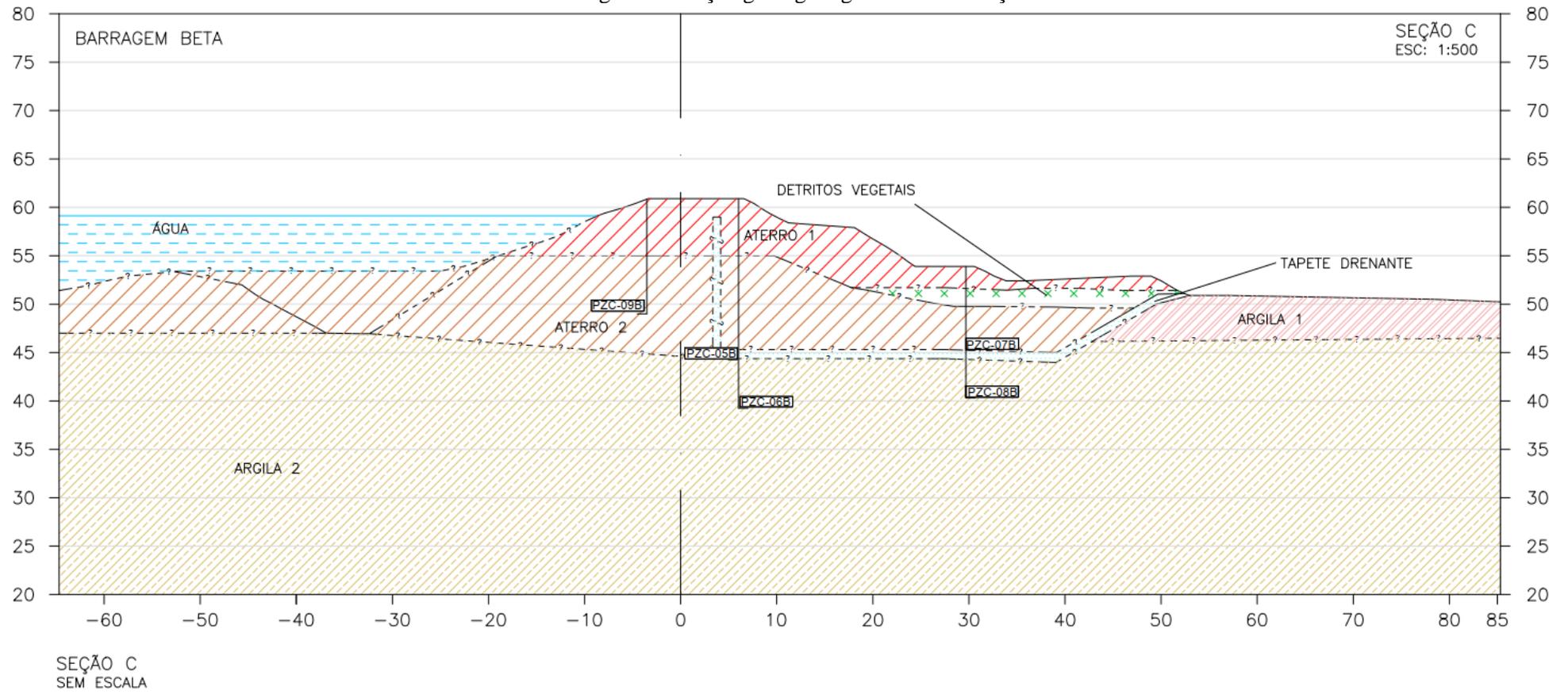
Com relação ao comportamento da linha freática na seção, é possível constatar a influência do filtro de drenagem. Quando as leituras históricas do instrumento PZE-01A (à montante do filtro) são comparadas com o PZC-01B (a jusante do filtro), constata-se que as leituras do primeiro possuem valores constantes maiores do que o segundo. Tal comportamento indica a eficiência do dispositivo de drenagem que reduz as poropressões à jusante.

4.3 Seção C

A Seção C corresponde a uma seção instrumentada com 5 piezômetros do tipo Casagrande. Na Figura 17 está representada a Seção C da Barragem Beta, com sua interpretação estratigráfica bem como os piezômetros instalados. Nota-se que os instrumentos PZC-05B, PZC-06B e PZC-08B foram instalados nos materiais denominados Argila 2 e os instrumentos PZC-09B e PZC-07B no material Aterro 2.

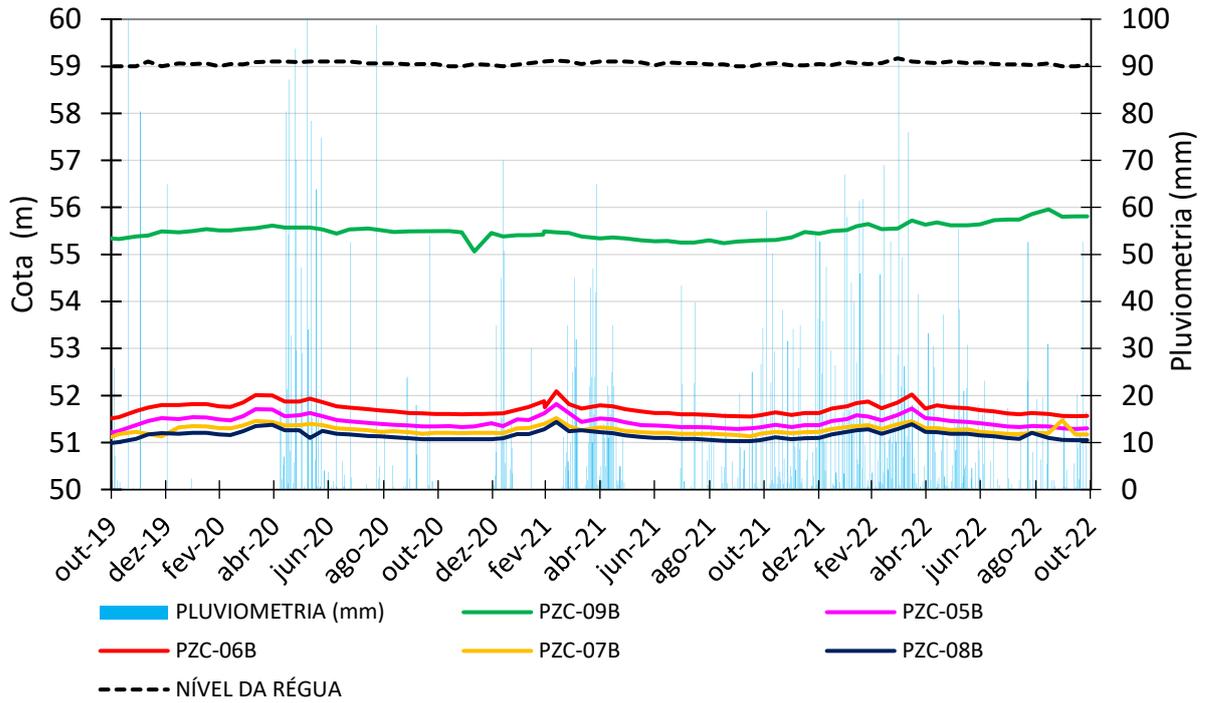
Nos Gráfico 5 e Gráfico 6 estão representadas respectivamente as cotas piezométricas e as cargas piezométrica dos instrumentos instalados na Seção C da Barragem Beta. Além disso, em todos os respectivos gráficos também estão sendo considerados o nível da régua linimétrica da barragem Beta.

Figura 17: Seção geológico/geotécnica da Seção C.



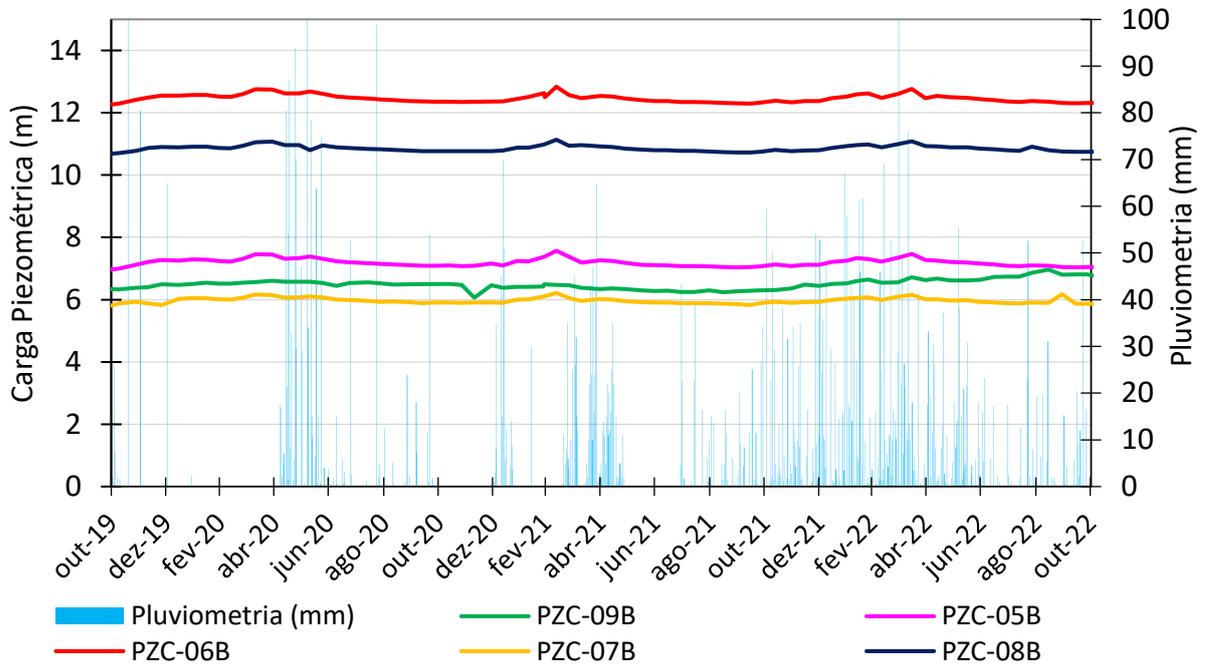
Fonte: Da Autora (2023)

Gráfico 5: Cota piezométrica - Seção C



Fonte: Da Autora (2023)

Gráfico 6: Carga piezométrica - Seção C



Fonte: Da Autora (2023)

De forma similar as Seções A e B, é possível concluir que as leituras dos piezômetros instalados na Seção C também são influenciadas pela pluviometria local. Além disso, também é possível observar que o nível do reservatório não oscila significativamente entre os períodos

de cheia e estiagem. Tal constatação, pode ser atribuída ao sistema extravasor, assim como para as Seções A e B.

No pico de leituras pluviométricas, registrado entre os meses de fevereiro e abril de 2022, é possível constatar que as leituras dos instrumentos PZC-09B, PZC-05B, PZC-06B, PZC-07B e PZC-08B respondem em uma data posterior ao evento, demonstrando o tempo de resposta desse tipo de instrumento.

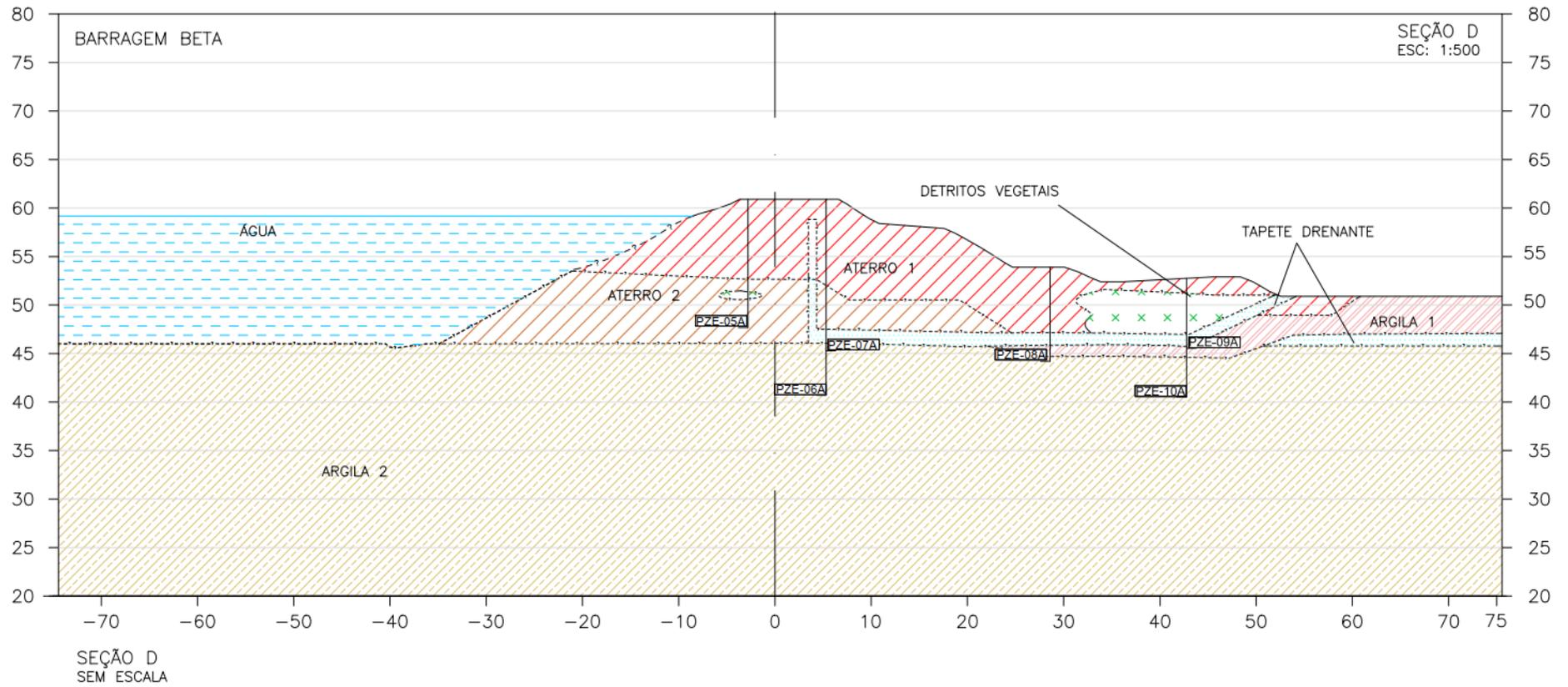
Com relação ao comportamento da linha freática na seção, é possível observar a influência do sistema de drenagem interno. Quando as leituras históricas do instrumento PZC-09B (à montante do filtro) são comparadas com o PZC-05B (a jusante do filtro), constata-se que as do primeiro possuem, constantemente valores superiores em relação ao segundo, indicando que o dispositivo de drenagem reduz as poropressões à jusante.

4.4 Seção D

A Seção D é instrumentada com 6 piezômetros elétricos de corda vibrante. Na Figura 18 está representada a Seção D da Barragem Beta, sua interpretação estratigráfica bem como os piezômetros instalados. Nessa seção, os instrumentos foram instalados em todos os materiais com exceção do material denominado Detritos Vegetais.

Nos Gráfico 7 e Gráfico 8, estão representadas, respectivamente, os gráficos relativos à cota piezométrica e a carga piezométrica dos instrumentos instalados na Seção E da Barragem Beta.

Figura 18: Seção geológico/geotécnica da Seção D.



Fonte: Da Autora (2023)

Gráfico 7: Cota piezométrica - Seção D

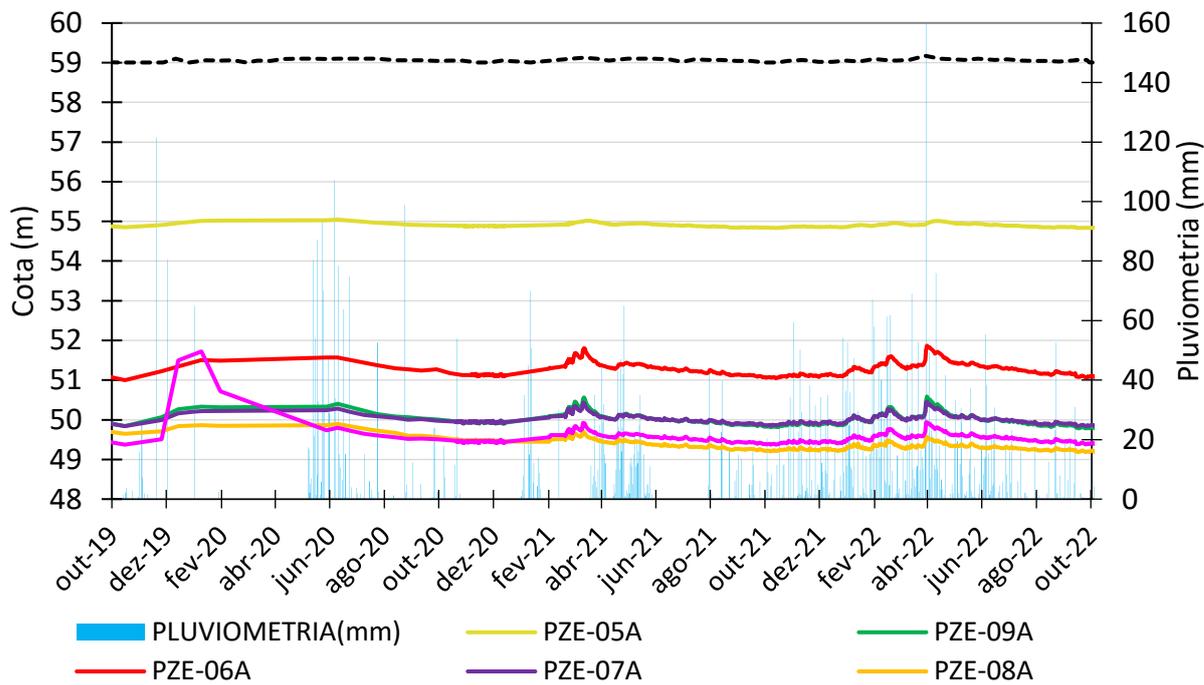
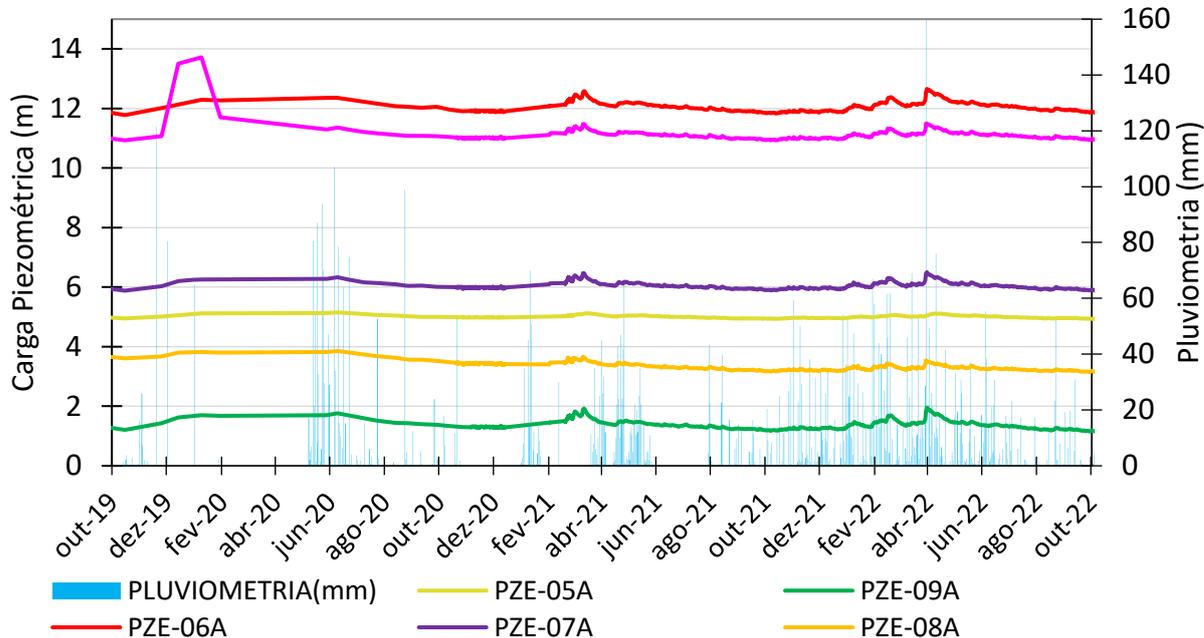


Gráfico 8: Carga piezométrica - Seção D



A partir das informações apresentadas, de forma similar as Seções A, B e C é possível concluir que as leituras dos piezômetros instalados na Seção D são influenciadas unicamente pela pluviometria local, visto que o nível de água não apresenta variações significativas.

No que tange ao comportamento da instrumentação, é possível notar que no período de dezembro de 2019 a abril de 2020, o instrumento PZE-10A apresenta comportamento anômalo se comparado aos demais instrumentos localizados na seção. Tal observação advém de um aumento expressivo de leituras (aproximadamente 2,5 m.c.a.) e posterior redução, diferentemente dos demais instrumentos localizados na seção. Como esse comportamento não se repete em outros períodos dos ciclos hidrológicos em estudo, assumiu-se que as leituras foram causadas por alguma possível inconsistência como as mencionadas no item 2.5, não sabendo ao certo o que causou tal interferência. No entanto, tal anomalia pode ter sido causada por alguma obra na estrutura (construção de berma, regularização de crista, coleta de amostras, dentre outras).

Já no pico de leituras pluviométricas, registrado entre os meses de fevereiro e abril de 2022, é possível constatar que as leituras dos instrumentos elétricos PZE-05A, PZE-06A, PZE-07A, PZE-08A, PZE-09A e PZE-10A respondem de forma praticamente imediata ao evento de chuvas, demonstrando o curto tempo de resposta desse tipo de instrumento.

Com relação ao comportamento da linha freática na seção, é possível constatar a influência do filtro de drenagem visto que as leituras históricas do instrumento PZE-05A (à montante do filtro) são superiores se comparadas com o PZE-07A (a jusante do filtro). Dessa forma, o sistema de drenagem interno provoca uma perda de carga e redução das poropressões reduzindo o nível freático à jusante da seção.

4.5 Comparação entre as seções estudadas

Nas quatro seções transversais, as leituras dos instrumentos instalados respondem ao período de cheias entre os meses de novembro e junho, e ao período de estiagem entre os meses de julho e outubro. Tal comportamento se repete no histórico dos três ciclos hidrológicos analisados.

Na Seção B foi possível verificar a diferença no tempo de resposta das leituras dos diferentes tipos de instrumentos na ocorrência de um evento hidrológico, pois é a única seção dentre as analisadas que possui piezômetros Casagrande (PZC) e piezômetros elétricos de corda vibrante (PZE) instalados.

Nas Seções B, C e D foi possível constatar a influência do sistema de drenagem interna, representada filtro drenante, no comportamento da linha freática, em que, de forma geral, as leituras da instrumentação instalada a jusante do dispositivo de drenagem são menores em relação dos instrumentos à montante.

Em todas as seções foi possível constatar que o fator governante para o comportamento das leituras no histórico analisado é a pluviometria na região, uma vez que a leitura da régua não varia significativamente no período. Dessa forma, torna-se essencial a presença, monitoramento e boa manutenção do pluviômetro na região. A correlação entre os dados de pluviometria e da piezometria permite o entendimento das causas de ocorrências de leituras críticas e permite uma melhor tomada de decisões a partir dos dados registrados.

Na Barragem Beta, o empreendedor optou por colocar mais instrumentos nas seções centrais da barragem (B, C e D), no entendimento de que tais seções seriam mais críticas do ponto de vista de estabilidade e eventualmente possuísem maior probabilidade de ocorrência de deformações ou deslocamentos. Na Seção A, localizada na ombreira da estrutura, seria menos susceptível a tais riscos, foi instalado apenas um instrumento. Dessa forma, as conclusões sobre o comportamento da rede de fluxo nesta seção ficam limitados pela baixa quantidade de dados disponíveis.

Por se tratar de uma estrutura de aproximadamente 160 metros (comprimento da crista da estrutura) com os mesmos materiais na fundação e com parede construída com os materiais da mesma jazida, e submetida às mesmas condições de contorno espera-se que o comportamento da rede de fluxo nas seções seja similar. Ao comparar os dados de leituras das seções A, B, C e D, observa-se que essa hipótese é verdadeira. Em diferentes seções, a magnitude das cotas piezométricas para instrumentos instalados aproximadamente nas mesmas posições é semelhante, e a variação ao longo dos ciclos hidrológicos é também correspondente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Neste trabalho foi avaliado o monitoramento piezométrico de uma barragem de contenção de sedimentos oriundos do processo de beneficiamento de bauxita. Para isso, foram realizadas análises das 4 seções instrumentadas da barragem utilizando dados de monitoramento dos instrumentos, dados do nível de água e da pluviometria local.

A partir das análises, foi possível verificar a consistência de funcionamento dos instrumentos da estrutura, a exceção de um período de leituras anômalas do instrumento PZE-10A. De uma forma geral, os instrumentos estão em perfeito estado de funcionamento e respondem às variações pluviométricas. Além disso, seu posicionamento e quantidade de instrumentos instalada é suficiente para monitorar a estrutura, com ressalva a ombreira esquerda que contém apenas um instrumento instalado, na qual é recomendada a instalação de uma malha mais robusta de instrumentação.

Foi observado que a pluviometria é o único fator que influencia na leitura dos instrumentos, visto que o nível de água se mantém praticamente constante ao longo do período analisado tendo em vista o funcionamento do sistema extravasor que mantém o nível de água praticamente constante.

Ademais, foi possível denotar os aspectos de tempo de resposta do instrumento em relação ao seu princípio de funcionamento, no qual os instrumentos do tipo PZE apresentaram tempo de resposta menores se comparados aos do tipo PZC, ambos localizados na Seção B.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sabe-se que o processo de monitorar e investigar uma estrutura seja ela de contenção de resíduos ou rejeitos é complexo e envolve inúmeras variáveis. Nessa perspectiva, propõe-se além da análise piezométrica, a avaliação dos demais instrumentos tais como: medidores de nível d'água, inclinômetro, poços de monitoramento dentre outros quando disponíveis.

Nas verticais em que foram instalados dois ou mais instrumentos do mesmo tipo, avaliar o aumento linear da carga piezométrica em função da profundidade, indicando que a estrutura tem uma condição de equilíbrio hidrostático, onde há uma rede de fluxo estabelecida graficamente.

Com o aumento do banco de dados a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina tem ganhado relevância no meio geotécnico. No que tange a avaliação de dados de

instrumentação de barragens, a aplicação do modelo ARIMA (do inglês *AutoRegressive Integrated Moving Average*) tem mostrado resultados expressivos para a predição de valores e interpretação do comportamento piezométrico, como destacado por TAKAFUJI *et al.* (2018). Conforme descrito pelo autor o modelo ARIMA pode ser descrito como uma generalização do modelo auto-regressivo de médias móveis. Dessa forma, recomenda-se a utilização de tal algoritmo em trabalhos futuros para a avaliação da instrumentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BURLAND, J.B. **The teaching of Soil Mechanics: a personal view**. In: Proceedings of the 9th European conference on soil mechanics and foundation engineering, Dublin, vol 3, pp 1427–1447. 1987.

BURLAND, J. B. **ICE Manual of Geotechnical Engineering: Geotechnical engineering principles, problematic soils and site investigation**. Institution Of Civil Engineers (Great Britain): Ice, 2012, 2012. 1537 p.

CASTRO, L. V. P. **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante**. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia ambiental. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

CERQUEIRA, M. L. H. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas de mineração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2017.

DUNNICLIFF, 1. **Geotechnical Instrumentation for Measuring Field Performance**, New York, 1. Wiley. Green, G.E. 2000. Geotechnical Field Instrumentation: What's New in 2000. Geotechnical News, VoL 18, No.4, Dec.: 26-30. 1988.

GEOTECHNICAL OBSERVATIONS. **Piezometers**. <http://www.geo-observations.com/piezometers>. Acesso em 25 de jun. 2023.

HVORSLEV, M.J. **Time lag and soil permeability in ground-water observations**. Bull. No. 36, Waterways Experiment Station. Corps of Engineers, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, 50pp.

ICOLD WRD (INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS WORLD REGISTER OF DAMS). **Journal of Water Resource and Protection Vol.6 No.10**, July 30, 2014.

ISO 18674-1:2015 **Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation - Part 1: General rules** (ISO 18674-1:2015)

ISO 18674-2:2016 **Geotechnical investigation and testing — Geotechnical monitoring by field instrumentation — Part 2: Measurement of displacements along a line: Extensometers** (ISO 18674-2:2016)

ISO 18674-3:2017 **Geotechnical investigation and testing — Geotechnical monitoring by field instrumentation — Part 3: Measurement of displacements across a line: Inclinometers** (ISO 18674-3:2017)

ISO 18674-4:2020 **Geotechnical investigation and testing — Geotechnical monitoring by field instrumentation — Part 4: Measurement of pore water pressure: Piezometers** (ISO 18674-4:2020)

ISO 18674-5:2019 **Geotechnical investigation and testing — Geotechnical monitoring by field instrumentation — Part 5: Stress change measurements by total pressure cells (TPC)** (ISO 18674-5:2019)

KING, G. A. **Instrumentation and Monitoring Methods for Stress, Movement and Deformation"** 1986

MCKENNA, G.T. **Grouted-in Installation of Piezometers in Boreholes.** Geotechnical Journal, Number 32, pp. 355-363.

MIKKELSEN, P.E. **Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments.** Geotechnical News December 2002, pp. 38-42.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. **Fundão Tailings Dam Review Panel, Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam.** 2016

PECK, R.B. **Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. State-of-the-Art Report.** Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969, 225-290

PEREIRA, A. R; MOTA, L. T. **Pluviômetros. In: Geotecnia Ambiental Oficina de Textos.** (pp. 121-122).

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

ROBERTSON, P.K., L.D. MELO, D.J. WILLIAMS, AND G.W. WILSON. **Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I.** 2019

SANTOS, C. A; LIMA, C. V. **Utilização de piezômetros e métodos para a determinação em campo de percolação de água nos solos.** 2018

SILVEIRA. J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento.** 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 416 p.

TAKAFUJI, Eduardo Henrique de Moraes; ROCHA, Marcelo Monteiro da; MANZIONE, Rodrigo Lilla. **Groundwater level prediction/forecasting and assessment of uncertainty**

using SGS and ARIMA models: a case study in the Bauru Aquifer System (Brazil). *Natural Resources Research*, v. 28, n. 2, p. 487-503, 2019.

TERZAGHI, K. **“Principles of Soil Mechanics: I—Phenomena of Cohesion of Clays,”** *Engineering News-Record*, Vol. 95, No. 19, 1925, pp. 742-746