



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE BARRAGENS:
ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS

KATIA DE OLIVEIRA VIEIRA SEIXAS LADEIRA

DESEMPENHO DE UMA BARRAGEM DE TERRA E
ENROCAMENTO COM BASE NOS DADOS DA
INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA APÓS 10 ANOS DA
CONSTRUÇÃO. ESTUDO DE CASO: A BARRAGEM DE UMA
UHE NO INTERIOR DE MINAS GERAIS

Salvador
2019

KATIA DE OLIVEIRA VIEIRA SEIXAS LADEIRA

**DESEMPENHO DE UMA BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO
COM BASE NOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA
APÓS 10 ANOS DA CONSTRUÇÃO. ESTUDO DE CASO: A
BARRAGEM DE UMA UHE NO INTERIOR DE MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens.

Esta monografia foi apresentada em sessão pública e aprovada em 31 de janeiro de 2019, pela Banca examinadora, composta pelos membros:



Prof. Me. Luís Edmundo Prado Campos _____
Mestrado em Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.
Universidade Federal da Bahia – UFBA (Orientador)



Prof. Dr. Carlos Henrique Medeiros _____
Doutorado em Geotechnical Engineering. University of Newcastle Upon Tyne, Inglaterra.
Ex titular da Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

Salvador
2019

ABSTRACT

This study had as main theme the analysis of the performance of a dam of earth and rock formation based on the data of the installed geotechnical instrumentation, after 10 years of its construction and filling of the reservoir. Firstly, a literature review was carried out with the intention to base the study, to review the theoretical basis of soil behavior, geotechnical parameters and design criteria for dam stability, as well as the types of auscultation instruments for geotechnical monitoring. After the literature review, a case study of a hydroelectric dam located in the state of Minas Gerais was performed and its stability analysis was performed based on the data of the instruments, concluding that the dam presents behavior within the safety criteria and according to project.

Keywords: Geotechnical instrumentation, earth dam, Dam Safety, Safety Factors

RESUMO

Este estudo teve como tema principal a análise do desempenho de uma barragem de terra e enrocamento com base nos dados da instrumentação geotécnica instalada, após 10 anos de sua construção e enchimento do reservatório. Primeiramente foi realizada revisão de literatura com a intenção de fundamentar o estudo, revisar o embasamento teórico do comportamento dos solos, parâmetros geotécnicos e critérios de projeto para estabilidade de barragens, bem como os tipos de instrumentos de auscultação para monitoração geotécnica. Após a revisão de literatura é apresentado o estudo de caso de uma barragem de usina hidrelétrica localizada no estado de Minas Gerais e realizada a análise de sua estabilidade com base nos dados dos instrumentos, concluindo que a barragem apresenta comportamento dentro dos critérios de segurança e conforme projeto.

Palavras Chave: Instrumentação geotécnica, barragem de terra, Segurança de Barragens, Fatores de Segurança

À
*Deus, por zelar por mim tão maravilhosa e paternalmente
Luzia, mãe querida, por ter me ensinado a aprender.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, sou grata à Deus que por longos períodos me carregou, a quem não tenho palavras para agradecer tudo o que fez, tem feito e ainda fará por mim.

Sou imensuravelmente grata a todos que direta e indiretamente fizeram parte de mais esta etapa do meu aprendizado na academia. À minha mãe, Luzia, grande propulsora de quem sou e de quem quero ser.

À minha família, amigos e amigas, pelo apoio e boas risadas ajudando a equilibrar com momentos de maior esforço e tensão.

“O conhecimento nos faz
responsáveis”.

(Che Guevara)

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Barragem Teton, EUA: piping causou rompimento durante enchimento do reservatório	2
Figura 02	Estabilidade de barragens: resistência ao cisalhamento e forças atuantes em uma fatia vertical	6
Figura 03	Condições geológicas de uma seção de estudo	10
Figura 04	Drenagem interna em barragens de terra	11
Figura 05	Barragem de terra apoiada sobre solo de maior permeabilidade	15
Figura 06	Barragem de terra com trincheira vedante ou cut-off	15
Figura 07	Característica de desempenho dos instrumentos	24
Figura 08	Acurácia e precisão dos instrumentos	25
Figura 09	Ilustração esquemática de MV triangular	28
Figura 10	MS instalado em barragem de terra com tampa protetora	30
Figura 11	Medidor de nível	32
Figura 12	Ilustração esquemática do INA	32
Figura 13	Ilustração esquemática do PZA	34
Figura 14	Ilustração esquemática do PZE	36
Figura 15	Ilustração esquemática do PZE de corda vibrante	37
Figura 16	Foto aérea tomada sobre a usina hidrelétrica em estudo	38
Figura 17	Arranjo geral das estruturas da UHE em estudo	40
Figura 18	Localização dos furos de sondagens da investigação geotécnica	41
Figura 19	Trincheira de inspeção na ombreira esquerda – alteração de gnaisse	42
Figura 20	Perfil de escavação da fundação junto à ombreira esquerda	43
Figura 21	Zona de fraturas no leito do rio	43
Figura 22	Preenchimento das depressões rochosas sob o filtro horizontal	44
Figura 23	Localização da instrumentação instalada	45
Figura 24	Detalhe instrutivo para instalação dos PZAs e INAs	45
Figura 25	Detalhe instrutivo para instalação PZEs na fundação	47
Figura 26	Detalhe instrutivo - instalação dos MSs	48

Figura 27	Detalhe instrutivo para instalação dos RNs	48
Figura 28	Legenda utilizadas nos projetos de instrumentação desta UHE	55
Figura 29	Seção instrumentada A-A	56
Figura 30	Seção instrumentada B-B	56
Figura 31	Seção instrumentada C-C	57
Figura 32	Seção instrumentada D-D	58
Figura 33	Seção instrumentada E-E	58
Figura 34	Seção instrumentada F-F	59
Figura 35	Marcos superficiais em planta	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	Localização e limites para MS	51
Tabela 02	Fatores de Segurança mínimos admissíveis no projeto	52
Tabela 03	FS referente aos valores limites para piezometria	52
Tabela 04	Valores limites para piezometria	53
Tabela 05	Resumo dos dados dos PZA e leitura atual	60
Tabela 06	Resumo dos dados dos PZE e leitura atual	68
Tabela 07	Resumo dos dados de instalação dos INA	75
Tabela 08	Limites e dados dos marcos superficiais	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 01	Fatores de Segurança para análises de estabilidade Frequência de leitura dos instrumentos durante	18
Quadro 02	primeiro ano de operação	54
Quadro 03	Instrumentação na seção A-A	55
Quadro 04	Instrumentação na seção B-B	56
Quadro 05	Instrumentação na seção C-C	57
Quadro 06	Instrumentação na seção D-D	57
Quadro 07	Instrumentação na seção E-E	58
Quadro 08	Instrumentação na seção F-F	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01	PZA-01	62
Gráfico 02	PZA-02	62
Gráfico 03	PZA-03	63
Gráfico 04	PZA-04	63
Gráfico 05	PZA-05	64
Gráfico 06	PZA-06	64
Gráfico 07	PZA-07	65
Gráfico 08	PZA-08	65
Gráfico 09	PZA-09	66
Gráfico 10	PZA-10	66
Gráfico 11	PZA-11	67
Gráfico 12	PZA-12	67
Gráfico 13	PZE-01	69
Gráfico 14	PZE-02	70
Gráfico 15	PZE-03	70
Gráfico 16	PZE-04	71
Gráfico 17	PZE-05	71
Gráfico 18	PZE-06	72
Gráfico 19	PZE-07	72
Gráfico 20	PZE-08	73
Gráfico 21	PZE-09	73
Gráfico 22	PZE-10	74
Gráfico 23	PZE-11	74
Gráfico 24	PZE-12	75
Gráfico 25	INA-01	76
Gráfico 26	INA-02	77
Gráfico 27	INA-03	77
Gráfico 28	INA-04	78
Gráfico 29	INA-05	78

Gráfico 30	INA-06	79
Gráfico 31	INA-07	79
	Marcos superficiais adjacentes ao MS-09 - primeiro ano	
Gráfico 32	após enchimento	82
	Marcos superficiais adjacentes ao MS-09 (2 últimos	
Gráfico 33	anos)	83
Gráfico 34	Marcos superficiais da crista (2 últimos anos)	83
Gráfico 35	Marcos superficiais na Berma El. 142 m (2 últimos anos)	84
Gráfico 36	Marcos superficiais na Berma El. 142 m (2 últimos anos)	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EI. – Elevação

m – unidade de medida em metro

mca – metro de coluna d'agua

NA – Nível D'agua

UHE – Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE GRÁFICOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Organização do Trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO	5
2.1. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS.....	5
2.2. CRITÉRIOS DE PROJETO DE BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO	7
2.2.1. Investigações geológico-geotécnicas	9
2.2.2. Filtros – Sistema de drenagem interna	11
2.2.3. Transições	13
2.2.4. Contato entre aterro e estruturas de concreto	13
2.2.5. Proteções dos taludes	13
2.2.6. Fundações e tratamentos	14
2.3. ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA.....	17
2.3.1. Casos de carregamento para análise de estabilidade	18
Período do final da construção	19
Rebaixamento rápido.....	19
Percolação Estável	20
Análise Sísmica	20
2.3.2. Métodos de análise de estabilidade.....	21
2.4. INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA	22

2.4.1.	Desempenho e característica dos instrumentos de medida	23
	Conformidade	24
	Acurácia	24
	Precisão	25
	Resolução	25
	Erro de leitura	25
2.4.2.	Instrumentação para barragens de terra e enrocamento	26
2.4.3.	Instrumentos para medição de vazões	27
	Técnicas expeditas	27
	Medidor de vazão triangular	28
	Calha tipo Parshall	29
2.4.4.	Instrumentos para medição de deslocamentos	29
	Marco de deslocamento superficial	30
2.4.5.	Instrumentos para medição da linha freática	31
	Indicador de Nível D'água	31
2.4.6.	Instrumentos para medição de poropressão	33
	Piezômetro de Tubo Aberto	33
	Piezômetro pneumático	35
	Piezômetro elétricos	36
	Piezômetro de corda vibrante	37
3.	ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DE UMA USINA HIDRELÉTRICA NO INTERIOR DE MINAS GERAIS	38
3.1.	ARRANJO GERAL E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	39
3.2.	SÍTIO GEOLÓGICO E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS	40
3.3.	INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA INSTALADA	44
3.3.1.	Valores limites para monitoramento da instrumentação	49

Estimativa de recalques.....	50
Estimativa de pressões piezométricas.....	51
3.3.2. Frequência de leitura	54
3.3.3. Seções Instrumentadas.....	55
Seção instrumentada A-A	55
Seção instrumentada B-B	56
Seção instrumentada C-C.....	57
Seção instrumentada D-D.....	57
Seção instrumentada E-E	58
Seção instrumentada F-F.....	59
4. RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO	60
4.1. Resultado dos Piezômetros de Tubo Aberto	60
4.2. Resultado dos Piezômetros Elétricos	66
4.3. Resultado dos Indicadores de Nível D'agua	74
4.4. Resultado dos Marcos Superficiais.....	78
5. Conclusões	83
REFERÊNCIAS.....	85

INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, barragens são utilizados para acumular água, quer abastecimento, amortecimento de cheias ou geração de energia pelo acúmulo de energia potencial. Portanto, barragens estão relacionadas à sobrevivência humana (Pereira, 2015).

Desde o início do século XX já se construíam barragens de terra no Brasil, em especial na região nordeste, visando o combate à seca, segundo Massad (2010). Na década de 50 teve início no Brasil a construção de grandes barragens para aproveitamentos hidrelétricos, acompanhado de pesquisas e estudos para aperfeiçoamento das técnicas e boas práticas de engenharia, regulamentação e desenvolvimento tecnológico de instrumentos para monitoramento geotécnico.

Cada projeto de barragem é único e possui particularidades, como geologia local e regime hídrico da região. O rompimento de uma barragem afeta drasticamente o ecossistema e a população humana e animal em seu entorno. A população a montante será afetada pela perda do reservatório de água e dos seus benefícios diretos, como abastecimento, pesca e recreação. A população à jusante é fortemente afetada pela inundação de suas áreas e desequilíbrio da fauna e flora, podendo haver ainda perda de vidas humanas.

Sendo assim, cada barragem constitui um desafio para a engenharia em construir barragens seguras, sustentáveis e viáveis economicamente. Entretanto o desafio não se encerra com a construção, mas segue com a manutenção e operação do barramento, proporcionando segurança à população.

A inspeção visual é uma das principais formas de monitorar o comportamento estrutural das obras. Boa parte das anomalias que levam à incidentes e até mesmo acidentes em barragens, podem ser diagnosticados em inspeções visuais. Entretanto este diagnóstico pode ocorrer quando a manifestação da patologia está em escala maior, manifestando-se aos olhos. Um instrumento de auscultação instalado em posição estratégica pode monitorar se, por exemplo, a fundação está trabalhando dentro do regime de tensões aceitável e seguro para os materiais da construção, conforme estudos realizados em fase de projeto. Assim, a implantação e

devida análise dos dados da instrumentação geotécnica nas obras de engenharia, são meios de minimizar as ocorrências de acidentes e incidentes e até mesmo melhorar a qualidade das obras (Silveira, 2003).

Fundamentalmente, o objetivo da instrumentação de auscultação é avaliar as condições de segurança durante as fases de construção e operação da barragem. A fase de enchimento, é provavelmente a mais importante em termos de observação de desempenho das estruturas, por ser o primeiro contato com as cargas na fundação, ombreiras e estrutura, designando à auscultação um papel muito importante, pois permite um diagnóstico preciso da obra, comparando os dados com os limites de projeto. O controle de parâmetros como deslocamentos horizontais e verticais, movimento de juntas, temperatura e deformação do concreto, podem prevenir a ruptura ou fissuramento excessivo durante esse primeiro enchimento (ANDRIOLO, 1993).

Os registros históricos de rompimentos nessa fase não são inéditos, como o caso histórico da barragem de Teton no EUA em 1976, que rompeu por *piping*, erosão interna, na ombreira direita, durante o primeiro enchimento do seu reservatório.

Figura 01 – Barragem Teton, EUA: *piping* causou rompimento durante enchimento do reservatório



FONTE: Jornal da Unicamp (8 a 14 de setembro de 2014)

Na fase de operação, as inspeções visuais aliadas ao monitoramento da instrumentação, fornece parâmetros para manutenção da operação segura da estrutura mediante comparação dos valores limites projetados.

1.1. Objetivos

Diante do cenário apresentado, este trabalho se propõe a apresentar o caso de uma barragem de terra e enrocamento e concluir, com base em seus dados de 10 anos de operação, sobre a segurança desta barragem.

Com base neste estudo de caso, este trabalho objetiva apresentar critérios de projeto visando segurança das barragens, os instrumentos de auscultação mais comumente utilizados em barragens de terra e as rotinas de leitura nas fases de operação do empreendimento, analisar dados reais destes instrumentos, desde a instalação dos instrumentos, antes do enchimento do reservatório e finalmente comparar os resultados reais com os valores de projeto.

Será analisado o caso de uma barragem de UHE localizada na cidade de Recreio no estado de Minas Gerais. Não é citado o nome do empreendimento por questões de confidencialidade da empresa que possui a concessão e opera o ativo.

1.2. Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos.

O Capítulo 1 consiste da introdução ao tema onde são apresentados os objetivos da elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão literária sobre os tópicos de geotecnia que serão abordados neste trabalho. São utilizadas como fonte livros, teses, boletins técnicos e artigos científicos.

O Capítulo 3 é apresentado o estudo de caso, com suas particularidades técnicas e a instrumentação instalada na barragem. Para este estudo, foram reunidos projetos,

relatórios e registros da obra em estudo, disponibilizado pelo acervo técnico da empresa que atualmente possui a concessão do ativo.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados de cada um dos instrumentos instalados nesta barragem, comparando com os critérios especificados pela projetista.

O Capítulo 5, e último, apresenta as conclusões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO

Neste capítulo serão apresentados alguns fundamentos teóricos que estão relacionados ao comportamento geotécnico do solo, e discorre-se sobre alguns instrumentos disponíveis para monitoramento de taludes.

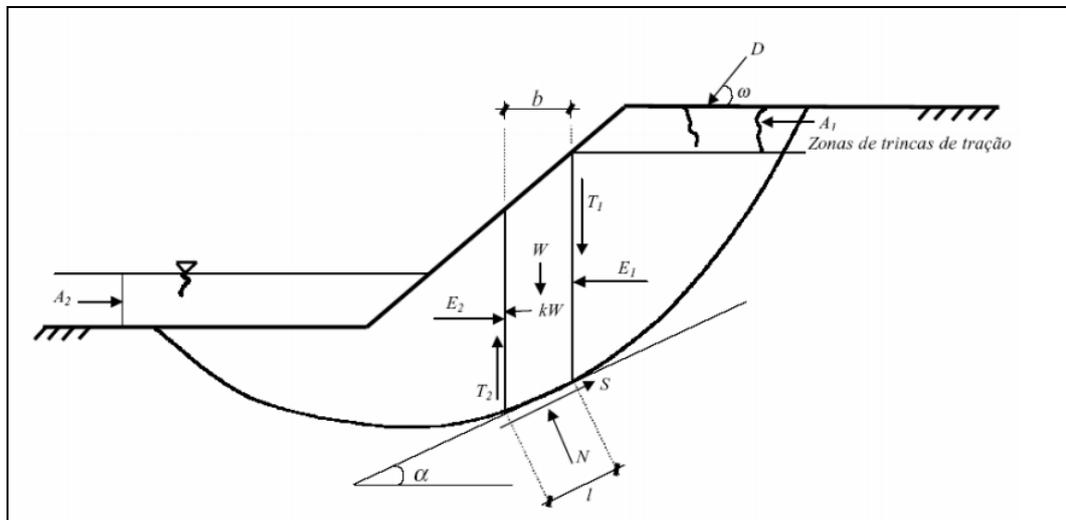
Os solos se originam da decomposição de rochas pela atuação de agentes químicos e físicos, tais como variações de temperatura, penetração de água nas fissuras e trincas, que pode congelar ou acelerar processos como hidratação, oxidação, carbonatação, hidrólise e trocas catiônicas (PINTO, 2006). Também a própria fauna e flora também contribuem para a desagregação das rochas. Conclui-se, portanto, que as características de um determinado solo são função do tipo de rocha que o originou, bem como dos fatores físicos e químicos que atuaram ao longo do tempo para sua metamorfização.

2.1. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS SOLOS

A resistência do solo quanto aos esforços externos e internos aplicados se dá principalmente por sua resistência ao cisalhamento, que é um tipo de esforço que tende a cisalhar um corpo, ou seja, “cortá-lo” ao longo de um plano.

A resistência ao cisalhamento do solo (τ) pode ser definida como “a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que a ruptura estiver ocorrendo” (PINTO, 2006) Em Mecânica dos Solos, o conhecimento da resistência ao cisalhamento dos solos é essencial em inúmeros tipos de obras, como obras para estabilidade de taludes naturais, de corte e de aterro, capacidade de carga de fundações, estabilidade de aterros sobre solos moles e estabilidade de barragens, como exemplificado na Figura 02.

Figura 02 – Estabilidade de barragens: resistência ao cisalhamento e forças atuantes em uma fatia vertical



FONTE: (CHUQUIMUNI, 2005)

A ruptura por cisalhamento nos solos é caracterizada por uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo, em torno da qual existe uma camada de solo que perde suas características iniciais durante o processo de ruptura, formando assim uma zona cisalhada.

A resistência ao cisalhamento dos solos pode ser vista como composta de duas parcelas: coesão entre as partículas e atrito interno entre os grãos de solo. A coesão é devida à atração química entre as partículas, sendo o seu efeito geralmente interpretado como se uma cola tivesse sido aplicada entre os dois corpos (PINTO, 2006).

O comportamento das forças de ação e reação exercidas por uma camada de solo é exposto pela teoria de Coulomb. Daí, Coulomb derivou a primeira fórmula matemática que se destinava a prever o comportamento do solo. Esta equação, segundo Seara (2010) continha os principais agentes físicos elementares do solo: força de resistência, tensão de cisalhamento, coesão e atrito interno. A Lei de Coulomb considerou que:

$$T = c + p \tan \varphi$$

Onde:

T = resistência ao cisalhamento do solo

c = é a coesão,

p = unidade de pressão sobre a superfície de deslizamento, e

φ = o ângulo de atrito interno.

Em 1918, segundo Seara (2010), o método da análise de estabilidade, conhecido como *Método das Fatias* ou *Método de Fellenius*, através de círculos de escorregamento, foi utilizado pela primeira vez. Este método consiste na comparação entre a resistência ao cisalhamento disponível e a mobilizada para manter o equilíbrio limite. A massa de solo acima da superfície potencial de ruptura é subdividida em planos verticais, fatias. A análise está baseada na utilização de um fator de segurança global, definido com a proporção entre a resistência ao cisalhamento disponível e a resistência ao cisalhamento que deve ser mobilizada para manter o equilíbrio no limite. Em 1929, Karl Terzaghi, no artigo "*Mechanics of Shear Failures in Clay Slopes*", detalhou a utilização de análises de estabilidade para o dimensionamento de taludes de barragens.

Segundo Rizzo (2007), dentre os diversos métodos de análise de estabilidade de taludes, baseados neste tipo de análise citam-se: Fellenius, Janbu, Bishop Simplificado, Morgenstern-Price, Spencer e Sarma. O que diferencia um método do outro são as simplificações e hipotéticas adotadas.

2.2. CRITÉRIOS DE PROJETO DE BARRAGENS DE TERRA E ENROCAMENTO

As primeiras barragens de terra no Brasil foram construídas no início do século XX, projetada em bases empíricas. Apenas em 1947 foi construída a primeira barragem, barragem do Vigário, atual barragem Terzaghi, localizada no estado do Rio de Janeiro, com a técnica moderna de projeto e construção, onde foi utilizada o elemento de drenagem interna, o filtro vertical (MASSAD, 2010).

Segundo Marangon (2004), as barragens de terra podem ser homogêneas ou

zoadas.

Homogênea – são compostas de um único material que precisa ser suficientemente impermeável e estanque. Os taludes precisam ser relativamente suaves para adequada estabilidade.

Zonada – é composta por núcleo central impermeável envolvido por duas zonas de material de maior permeabilidade, para proteção e suporte do núcleo. O material permeável pode ser areia, cascalho, fragmentos de rocha ou mistura desses materiais.

Entre os tipos de barragem, a barragem de terra e terra-enrocamento são as que mais tem uso no Brasil, devido à disponibilidade de material argiloso no território nacional. Ainda, segundo Massad (2010), a inclinação dos taludes de montante e de jusante é determinada de modo a garantir a estabilidade durante a vida útil, em especial no caso de rebaixamento rápido do reservatório.

As barragens de terra-enrocamento, ou zonadas, possuem um incremento no quesito estabilidade devido às pedras do enrocamento que apresentam elevado ângulo de atrito, mesmo quando íngremes, em inclinações de 1:1,6 a 1:2,2, aumentam a estabilidade dos taludes de montante e jusante. O enrocamento ainda atua como material altamente permeável, permitindo vazão das águas percoladas pelo núcleo de aterro argiloso. O núcleo de argila atua para a estanqueidade e represamento de água (MASSAD, 2010).

Conforme o Manual da Eletrobrás (2003), os fatores que influenciarão para a escolha de uma barragem de seção mista terra e enrocamento são:

Disponibilidade de enrocamento proveniente das escavações obrigatórias;

Fundações de boa resistência para garantir a estabilidade de taludes mais íngremes da barragem;

Seções de maiores alturas da barragem permitirão grandes reduções dos volumes totais em função da declividade dos taludes.

Segundo Marangon (2004), as rochas para essas barragens, devem ter resistência ao intemperismo físico e químico. Os blocos de rocha são colocados de modo a se obter o maior contato entre suas superfícies dos blocos e os vazios entre elas, que

são preenchidos por material de menor tamanho. O *piping* pode ser evitado com a transição de granulometria graduada entre o aterro e o enrocamento.

Outros elementos construtivos das barragens de terra, além do núcleo e enrocamento, são: filtros, transições, contato entre aterro e estruturas de concreto, proteções dos taludes e fundações.

Conforme orientações da USACE - *U.S. Army Corps of Engineers*, há critérios básicos que devem ser adotados quanto às condições adequadas de desempenho e segurança de uma barragem de terra:

Os taludes da barragem devem apresentar estabilidade durante a construção e todas as fases de operação, incluindo para eventos sísmicos e esvaziamento de reservatório;

As percolações, tanto através do maciço, fundação e ombreiras devem ser coletadas e controladas de modo a prevenir a formação de poropressões excessivas, *piping*, liquefação, remoção de material por dissolução ou erosão de materiais nas fissuras, interfaces ou cavidades. O projeto deverá prever dispositivos para controlar e medir as perdas de água através da fundação e estabelecer limites admissíveis para os valores de infiltração admissíveis;

A fundação não deve ser submetida a valores demasiados de tensão;

A borda livre, também conhecida como *free-board* da barragem, deve ser tal que impeça o transbordamento por efeitos de ondas e cheias, bem como apresentar uma folga adicional referente aos recalques após construção;

O represamento deve ser dotado de um vertedouro com capacidade dimensionada por estudos hidrológicos, para impedir o transbordamento do reservatório sobre o aterro.

2.2.1. Investigações geológico-geotécnicas

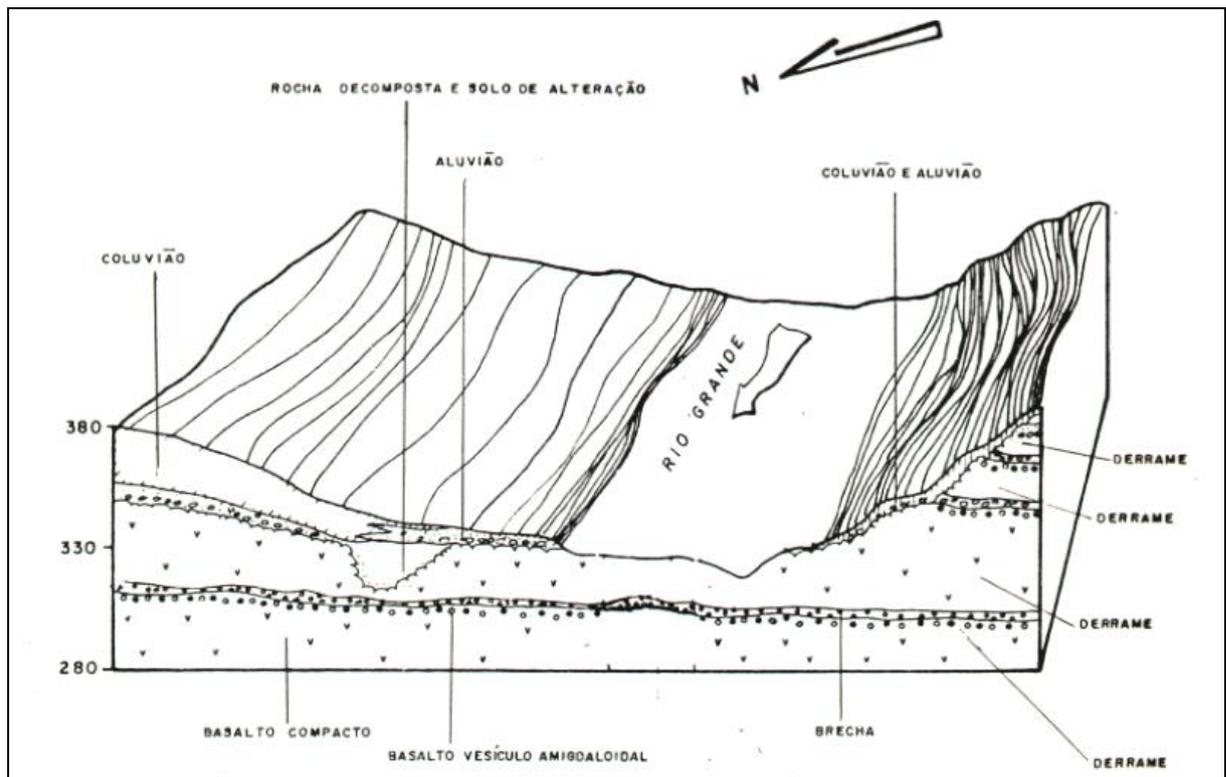
O programa de investigações geológico-geotécnicas, conforme ELETROBRÁS (2003), deverá fornecer as informações necessárias para se elaborar o projeto de

escavação.

A investigação geológica engloba, no mínimo o mapeamento de superfície e as sondagens mecânicas (percussão, rotativa e trado). Essa investigação pode ser complementada por poços, galerias, amostragens especiais e ensaios *in-situ*.

O primeiro passo é a elaboração de um modelo geológico para a área do projeto. Este é fundamental para toda a programação das investigações e para a concepção do projeto. Este modelo será definido em função da composição litológica e estrutural do local, procurando identificar suas principais características que possam influenciar o desenvolvimento das obras. A experiência com maciços similares deve ser usada na previsão de eventuais feições geológicas que possam levar a comportamento adverso. A Figura 03 ilustra as variações geológicas em um sítio.

Figura 03 – Condições geológicas de uma seção de estudo



FONTE: (MARANGON, 2004)

Em muitos casos, em complemento são realizadas não apenas sondagens mecânicas, mas também outros métodos de investigação, como a geofísica (sísmica

de refração e reflexão, eletrorresistividade e outras), para permitir uma melhor elaboração do modelo geológico-geotécnico.

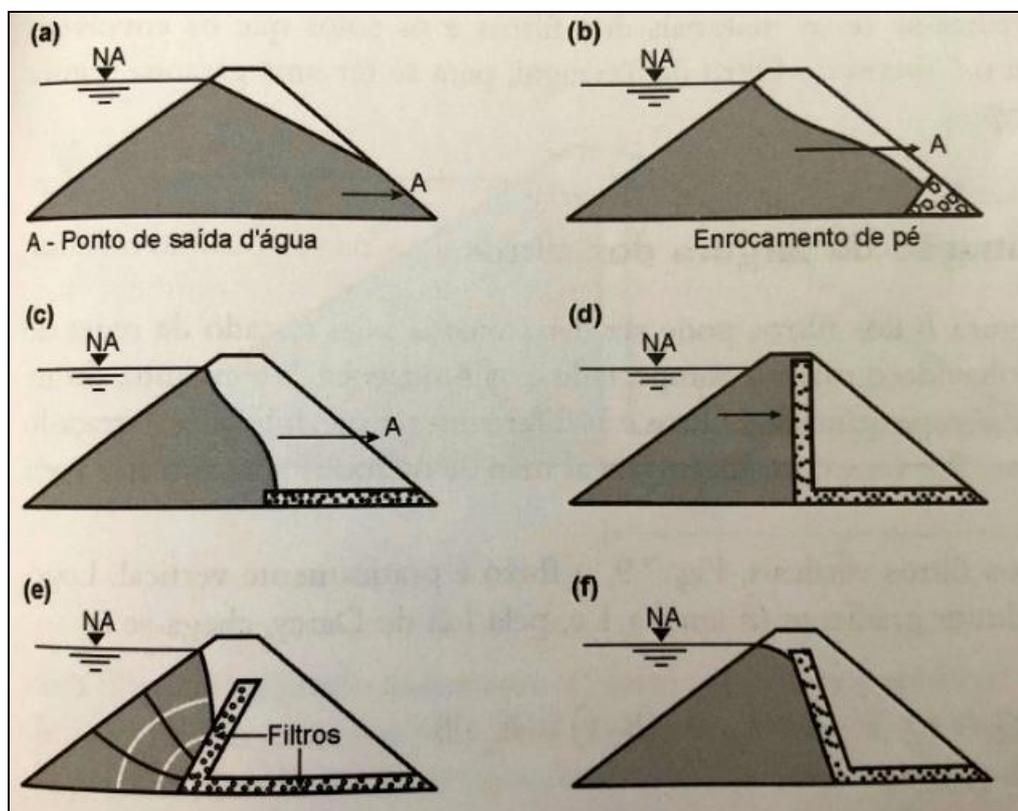
Deve ser realizada caracterização geomecânica dos materiais envolvidos e avaliação das condições hidrogeotécnicas, através de ensaios de perda d'água, infiltração, bombeamento, instalação de medidores de nível d'água e piezômetros.

Mesmo sendo realizados ensaios, a observação do comportamento do maciço de campo é de fundamental importância e deve ser sistematicamente feita (ELETROBRÁS, 2003)

2.2.2. Filtros – Sistema de drenagem interna

A Figura 04 apresenta seções de barragens de terra e o comportamento da linha freática com a evolução nos estudos e aplicações do sistema de drenagem.

Figura 04 – Drenagem interna em barragens de terra



FONTE: (MASSAD, 2010)

O filtro chaminé e o tapete drenante em geral constituem o sistema de drenagem interna da barragem de terra. O filtro pode ser vertical, inclinado para montante ou para jusante ou ser construído em inclinações variáveis.

Segundo Magela (2015), o filtro chaminé deverá ter cota de topo coincidente com a elevação do nível de água máximo *maximorum* do reservatório.

Se necessário, os sistemas de drenagem da fundação poderão ser compostos por trincheiras drenantes e/ou poços de alívio a jusante, além do próprio dreno sub-horizontal utilizados para controlar os gradientes hidráulicos de saída no talude de jusante e reduzir, portanto, as subpressões.

O filtro chaminé geralmente é constituído de apenas um material, areia natural. a largura do filtro pode ser determinado pela lei de Darcy, sendo B a largura do filtro (MASSAD, 2010).

$$Q = k . i . A$$

Onde:

Q é a vazão absorvida pelo filtro

A é a área, considerando a altura unitária, A=B

k é o coeficiente de permeabilidade do material do filtro

i é o gradiente hidráulico

Portanto temos:

$$B = Q / k . i$$

A vazão Q é obtida nas análises de percolação, considerando um coeficiente de segurança mínimo de 10, visto que os cálculos envolvem coeficientes de permeabilidade de difícil estimativas, como é o caso dos materiais, solos e rocha, naturais, como é o caso das fundações, conforme Massad (2010).

Os tapetes drenantes geralmente são apoiados diretamente sobre a fundação são constituídos de camadas de materiais de alta permeabilidade em transição. Ele conduz para jusante as águas que percolam corpo da barragem e pela fundação. No

processo construtivo, é realizada compactação deste material após irrigação intensa (MARANGON, 2004).

Eletrobrás (2003) orienta que por razões construtivas, as dimensões mínimas (espessura / largura / diâmetro) são:

- Filtro sub-horizontal – 0,25 m;
- Filtro chaminé: vertical ou inclinado – 0,60 m;
- Trincheira drenante da fundação – 0,60 m;
- Poços de alívio – 0,10 m;
- Transições a jusante do núcleo – 0,60 m
- Transições em drenos de pé – 0,40 m.

2.2.3. Transições

As camadas concomitantes de material graduado são espalhadas e compactadas sobre a face do aterro ou do enrocamento, de forma que as pedras maiores fiquem mais distantes do aterro. Os materiais de transição são compactados com rolos pneumáticos ou vibratórios ou mesmo compactador manual (tipo sapo) (MARANGON, 2004).

2.2.4. Contato entre aterro e estruturas de concreto

É muito importante que as regiões do aterro próximo às estruturas de concreto sejam bem compactadas. Conforme Marangon (2004), essas camadas podem ser compactadas com soquetes manuais. É uma boa prática de projeto que seja prevista uma ligeira inclinação na superfície de concreto, 1 H:10 V por exemplo, facilitando a compactação no contato.

2.2.5. Proteções dos taludes

Conforme Magela (2015), o talude de montante, no entorno do nível de água, fica

exposto às ações de ondas geradas pela ação do vento sobre a superfície do reservatório. Desta forma, esta região sujeita a este efeito erosivo, deve ser adequadamente protegida. A proteção poderá ser por blocos de rocha (*rip-rap*) ou proteção não rochosa como solo-cimento.

O *rip-rap* é utilizado para proteção do talude de montante, sendo uma camada de cobertura parcial que vai do meio do talude até à crista (SILVA, 2016).

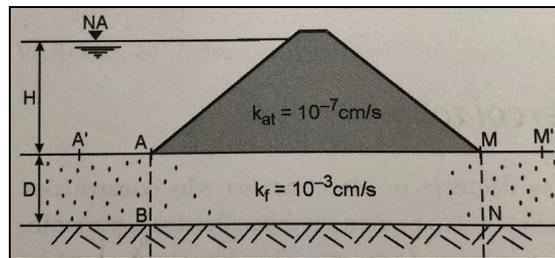
Segundo Marangon (2004), os projetos de *rip-rap* preveem a inclusão de uma ou mais camadas de transição entre as rochas do *rip-rap* e o aterro. Quando o enrocamento é bem graduado o *rip-rap* pode ser lançado sem uma camada de transição.

O talude de jusante, em barragens de terra, geralmente é protegido por vegetação gramínea ou outro material vegetal apropriado, como proteção contra erosão pelo escoamento de águas de chuvas. Caso haja material granular disponível na obra, segundo Magela (2015), poderá ser utilizado também.

2.2.6. Fundações e tratamentos

As barragens, por serem obras artificiais, são constituídas de materiais controlados, com especificações conhecidas. Ao contrário, o terreno da fundação possui características naturais, onde o homem pode apenas interferir com tratamentos para melhorar as características. Os tratamentos são em geral para controlar as percolações, visto que características como capacidade de suporte e compressibilidade dificilmente podem ser melhoradas para uma determinada camada do solo (Figura 05).

Figura 05 – Barragem de terra apoiada sobre solo de maior permeabilidade



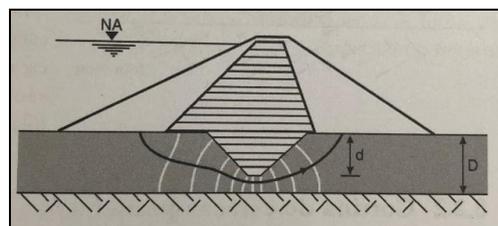
FONTE: (MASSAD, 2010)

Portanto, no caso de uma barragem de terra, por exemplo, apoiada sobre solo permeável, visando reduzir as infiltrações pela fundação e as conseqüentes perda d'água, excesso de pressão neutra e gradientes elevados de saída, pode-se, conforme Massad (2010) aplicar uma das duas opções:

- Reduzir a permeabilidade deste substrato por meio de tratamento do solo existente, ou
- Aumentar o caminho de percolação.

Segundo Magela (2015), com o objetivo de reduzir as vazões pela fundação e gradientes elevados de saída, os dispositivos de impermeabilização aplicados na fundação pelo homem poderão contemplar: trincheiras impermeáveis (*cut-offs* de solo compactado, paredes diafragma, trincheira de lama, etc.), cortinas de injeção e tapetes impermeáveis (Figura 06).

Figura 06 – Barragem de terra com trincheira vedante ou *cut-off*



FONTE: (MASSAD, 2010)

O dimensionamento destes dispositivos será feito com base nas análises de

percolação (redes de fluxo). A definição de gradientes, pressão neutra e vazões, conforme orientado no Manual *Critérios de projeto para usinas hidrelétricas da Eletrobrás* (2003), poderá ser obtida pelo traçado de redes de fluxo ou através de soluções analíticas.

O dimensionamento será efetuado a partir de análises de percolação considerando os diferentes materiais constituintes da fundação e aterro e suas respectivas permeabilidades, k .

Soluções numéricas, como através dos modelos de elementos finitos, poderão ser usadas para obtenção de valores dos potenciais e velocidades de fluxo para dimensionamento os sistemas de drenagem, impermeabilização da fundação e cálculos de estabilidade.

As fundações podem ser tratadas, conforme ELETROBRÁS (2003), sendo os objetivos principais do tratamento:

- Melhorar e garantir as condições de contato do material a ser lançado sobre a fundação;
- Melhorar as qualidades mecânicas do maciço;
- Reduzir a permeabilidade da fundação e controlar subpressão;
- Evitar carreamento de finos pela fundação.

O modelo geológico-geotécnico incluindo o hidrogeológico deve ser o principal instrumento de análise das condições dos maciços de solo e/ou rocha a serem tratados, levando em conta os requisitos de fundação de cada estrutura.

Os tratamentos podem ser superficiais e/ou profundos, segundo ELETROBRÁS (2003), como:

- Remoção de materiais indesejáveis por escavação;
- Regularização da fundação;
- Limpeza de materiais soltos;
- Recobrimento superficial para evitar carreamento de finos;
- Drenagem superficial;
- Injeções localizadas para vedação e/ou redução do fluxo pela fundação;
- Drenagem profunda, como escavação de drenos e galerias na rocha.

2.3. ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE TERRA

A ruptura de uma barragem de terra pode ter origem em uma das três seguintes principais causas: instabilidade dos taludes (montante e/ou jusante), erosão interna e, ainda, pelo transbordamento, ocasionando erosão tanto da crista como do talude de jusante, causa esta relacionada ao dimensionamento hidráulico inadequado. (SEARA, 2010 apud CRAIG, 2007).

Segundo o mesmo autor, a solução de Fellenius subestima o fator da segurança, pois não considera as forças atuantes nas interfaces de cada fatia e que, portanto, atualmente o método não é recomendado para ser utilizado na prática por ser excessivamente conservador. No ano de 1955, Bishop propôs uma solução que leva em consideração os efeitos das forças nas faces de cada fatia até certo ponto, sendo provavelmente nos dias de hoje o método mais utilizado.

De acordo com o mesmo autor, os fatores de segurança para ambos os taludes da barragem devem ser determinados para as solicitações mais enérgicas. Para o talude de montante, devem ser consideradas como mais críticas as fases de final de construção e rebaixamento rápido, neste último caso após a barragem estar em operação há algum tempo. Já para o caso do talude de jusante, o final de construção e a fase regular de operação com percolação constante constituem-se nas principais fases para a análise.

Em suma, conforme ELETROBRÁS (2003), para garantia da estabilidade ao escorregamento dos taludes da barragem, estes deverão ser verificados nas seguintes condições de carregamento:

- Final da construção;
- Rebaixamento rápido;
- Percolação estável;
- Sísmica.

O manual da ELETROBRÁS (2003) indica o “*U.S. Corps of Engineer - Design Manual EM - 1110-1-1902 - Stability of Earth and Rockfill Dams*”, com algumas adaptações a seguir apresentado no Quadro 01.

Quadro 01 – Fatores de Segurança para análises de estabilidade

CASO	COEFICIENTE DE SEGURANÇA	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	OBSERVAÇÕES
Final da Construção	1,3 *	Q ou S **	Taludes Montante e Jusante
Rebaixamento rápido	1,1, a 1,3 ***	R ou S	Valor mínimo para solos dilatantes Valor máximo para solos que contraem no cisalhamento
Percolação estável	1,5	R ou S	Talude Jusante
Análise sísmica	1	R ou S	Taludes Montante e Jusante

(*) – Para barragens acima de 15 m de altura sobre fundações relativamente fracas, usar fator de segurança mínimo de 1,4.

(**) – Em zonas em que não são antecipadas pressões neutras, usar resistência de ensaios S.

(***) – Nos casos em que o rebaixamento ocorre com frequência, considerar o coeficiente 1,3.

Q – Ensaios não consolidados, não drenados (UU).

S – Ensaios não consolidados e drenados (CD).

R- Ensaios consolidados e não drenados (CU).

FONTE: ELETROBRÁS (2003).

2.3.1. Casos de carregamento para análise de estabilidade

As análises de estabilidade deverão ser feitas por tensões efetivas, considerando os parâmetros de pressão neutra e de resistência ao cisalhamento dos diversos materiais envolvidos nas análises de estabilidade. Estes parâmetros deverão ser obtidos de ensaios de laboratório programados para representar, o mais proximamente possível, as condições de carregamento real, especialmente no caso dos parâmetros de pressão neutra para análises por tensões efetivas e de resistência para análises de tensões totais (ELETROBRÁS, 2003). Os casos de carregamento destes materiais para análises são: final da construção, rebaixamento rápido, operação normal e análise sísmica.

Período do final da construção

Esta etapa contempla o estágio anterior ao enchimento do reservatório, logo após o término do aterro, considerando que ainda não ocorreu a dissipação das poropressões ocasionadas pelo processo construtivo da barragem de terra. As poropressões dependem do teor de umidade do lançamento do material do aterro e também da velocidade de construção. Em aterros compactados, o solo está parcialmente saturado. Por esta razão, a poropressão inicial é negativa. (SEARA, 2010 apud CRAIG, 2007).

Conforme ELETROBRÁS (2003), tanto para o talude de montante como para o de jusante, o fator de segurança mínimo para este carregamento deverá ser de 1,3 e 1,4 para barragens acima de 15 metros de altura, assentadas sobre fundações fracas.

Rebaixamento rápido

Esta particularidade refere-se a possíveis condições que podem ocorrer, por questões emergenciais, no reservatório da barragem já em operação, resultando no rebaixamento rápido do nível de água (ELETROBRÁS, 2003).

Este rebaixamento irá resultar na redução das tensões principais com aumento da diferença entre elas, rotação da direção das tensões principais e estabelecimento de condições transientes de fluxo gravitacional de água. Toda esta dinâmica será função, além da velocidade do rebaixamento, das condições de drenagem da água intersticial, ou seja, a permeabilidade e compressibilidade do material do aterro, conforme este mesmo manual.

No cenário de rebaixamento rápido, o talude de montante da barragem é o mais ameaçado, pois após algum tempo de operação e conseqüente saturação, a rede de fluxo que ocorre pode gerar forças de percolação praticamente paralelas ao talude no sentido, portanto, favorável a um eventual escorregamento (MASSAD, 2003).

Conforme ELETROBRÁS (2003), para esta condição o fator de segurança mínimo recomendado pode estar entre 1,1 e 1,3.

Percolação Estável

O caso denominado em ELETROBRÁS (2003) como percolação estável, compreende o período em que, após o nível do reservatório ter atingido o nível operacional máximo, permanece neste, por um período suficiente para saturação do maciço. Admite-se, neste cenário, que o adensamento do maciço tenha ocorrido e que a percolação já tenha se estabilizado.

Neste cenário, o talude de jusante poderá sofrer as maiores solicitações, pois a atuação das forças de percolação, devido ao sentido do fluxo, é favorável ao talude de montante.

Seara (2010) *apud* Craig (2007) comenta que após a entrada em operação da barragem, o solo abaixo da linha de fluxo superior encontra-se no estado completamente saturado, devendo esta condição ser considerada em termos de tensões efetivas, com valores da poropressões determinadas a partir da rede do fluxo.

Conforme ELETROBRÁS (2003), o fator de segurança para o talude de jusante deverá ser de 1,5. Este valor apresenta-se mais conservador em relação ao fator de segurança para o final de construção, pois neste caso, com o reservatório cheio, uma ruína poderá ocasionar consequências catastróficas.

Análise Sísmica

Esta análise é recomendada mesmo para zonas consideradas historicamente assísmicas, devido à possibilidade de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório da própria barragem, especialmente no caso de barragens de grandes reservatórios.

ELETROBRÁS (2003), orienta que seja realizada a análise das condições da barragem face a sismos naturais ou induzidos adotando-se cargas sísmicas correspondentes a acelerações de 0,05g na direção horizontal e 0,03 da direção vertical. Os valores dos coeficientes de aceleração sísmica poderão ser majorados, caso as condições geológico- estruturais do local sejam desfavoráveis.

O fator de segurança indicado para consideração nesta análise, conforme ELETROBRÁS (2003) é de 1,0.

2.3.2. Métodos de análise de estabilidade

Conforme ELETROBRÁS (2003), há disponíveis vários métodos de análise disponíveis, todos baseados no método das fatias e lamelas, variando apenas as hipóteses básicas sobre os esforços entre lamelas. Em função da hipótese adotada por cada método, é maior ou menor o atendimento às condições de equilíbrio dos esforços horizontais, verticais e dos momentos. A escolha do método a aplicar deve ser função da forma da superfície de ruptura a analisar.

Os métodos mais frequentemente utilizados por melhor atender às condições de equilíbrio são:

- Método de Bishop Simplificado
- Método de Morgenstern e Price
- Método de Spencer
- Método de Janbu Generalizado
- Método de Sarma
- Método de Lowe e Karafiath

Os cálculos são, geralmente, feitos com uso de softwares disponíveis no mercado, utilizando como referência os coeficientes de segurança indicados no Quadro 01.

O método de Fellenius admite uma superfície de ruptura circular e o fator de segurança do talude é calculado através do equilíbrio de momentos, não leva em conta, portanto as forças tangenciais e normais das fatias. É um método simples, porém muito conservador, que pode levar a erros consideráveis. Por esta razão não é muito indicado para análises em barragens.

2.4. INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

Segundo ITAIPU (2018), auscultação é o conjunto de formas de observação do comportamento da barragem e fundações, para controlar suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculos utilizados no projeto e verificar a necessidade de medidas corretivas.

As observações podem ser provenientes tanto de dados da instrumentação instalada, como de inspeções visuais. Implantar uma instrumentação em um talude, conforme Guidicini e Nieble (1976), significa sistematizar as observações sobre o comportamento do mesmo.

Fonseca (2003) sumariza a expressão auscultação de uma barragem como conjunto de processos que visam a observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que constituem risco potencial às condições de sua segurança global.

Segundo Silveira (2006), todo instrumento em um empreendimento deve ser selecionado e instalado para responder a questões específicas. Assim, segundo o referido autor, recomenda-se elencar as questões geotécnicas que poderão surgir referentes ao projeto.

As grandezas medidas por instrumentação em barragens são basicamente: nível d'água, poropressão, deslocamentos, tensão total, vazão e sismos. Os sistemas de aquisição de dados podem ser: mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou elétricos.

Uma auscultação adequada necessitará de um plano completo de monitoramento que abranja todas as fases da vida da barragem, bem como as atividades a serem realizadas (Piasentini, 2005 *apud* FONSECA, 2003):

- Projeto de instrumentação que contemple desde a concepção do arranjo até os detalhes e as especificações da instalação e montagem;
- Determinação de valores de alerta e de controle para todos os instrumentos instalados e para as diversas fases de sua vida;
- Plano de operação da instrumentação, abrangendo frequências das leituras nas diversas fases da vida da obra e durante possíveis eventos excepcionais;
- Planos de observação visuais e inspeções in situ;

- Plano de análise e interpretação do comportamento da obra com bases nos resultados da instrumentação e das inspeções visuais.

Não é o objetivo deste trabalho apresentar maiores detalhes sobre todos os aspectos ligados à instrumentação geotécnica, recomendando-se para isso a leitura de Dunicliff (1993).

2.4.1. Desempenho e característica dos instrumentos de medida

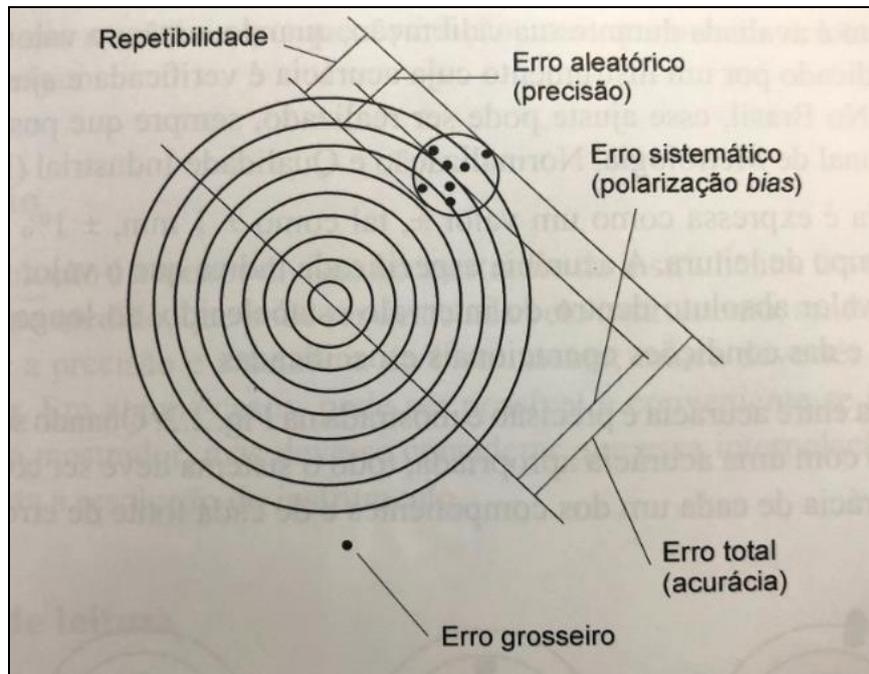
Conforme Silveira (2006), a instrumentação é instalada com a função de realizar medições e cada medida realizada envolve erros e incertezas. Portanto, na seleção de um instrumento, o projetista deve avaliar as características de desempenho indicadas nos catálogos, para realizar a adequada escolha quanto ao uso que se pretende fazer. O desempenho especificado pelo fabricante deve ser considerado inclusivo quando da análise e interpretação dos dados.

Dentre as principais características dos instrumentos de medição, estão:

- O campo de leitura;
- A resolução;
- A precisão;
- A acurácia e
- A repetibilidade.

A Figura 07 ilustra a diferença entre estas características que são frequentemente confundidas.

FIGURA 07 – Característica de desempenho dos instrumentos



FONTE: SILVEIRA, 2006

A seguir são comentadas as principais características dos instrumentos de medição.

Conformidade

É esperado de um instrumento que este não altere o valor do parâmetro medido. Quando esta interferencia do instrumento ocorre, alterando o valor, diz-se que ele apresenta baixa conformidade. Conformidade é um ingrediente desejável para que seja alcançada maior acurácia. Esta característica, conformidade, pode ser exemplificada por uma célula de pressão total, instalada em um aterro e que apresenta a mesma deformabilidade que o aterro (SILVEIRA, 2006)

Acurácia

Acurácia representa o grau de aproximação de uma leitura em relação ao valor real da grandeza. É sinônimo de exatidão. A calibração é fundamental para validação da acurácia de um instrumento.

A acurácia é indicada por um valor precedido de +/- e indica dentro de que amplitude o valor lido se adequa ao valor real ou absoluto. (SILVEIRA, 2006) A Figura 08

ilustra a diferença entre acurácia e precisão.

FIGURA 08 – Acurácia e precisão dos instrumentos



FONTE: SANTIAGO E CINTRA, 2018

Precisão

Conforme Silveira (2006), precisão está relacionada à repetibilidade e representa a aproximação de cada número em uma série de medições similares, em relação à média aritmética.

Precisão de um instrumento é indicada por um valor precedido de +/- , por exemplo +/- 1,0.

No caso de instrumentação de barragens, a precisão sobressai em importância à acurácia, visto que a variação entre leituras é mais interessante na prática do que o valor absoluto.

Resolução

É a menor divisão no mostrador do instrumento, menor variação que pode ser detectada por este, conforme Silveira (2006).

Erro de leitura

É o desvio entre o valor medido e o valor real, matematicamente igual à precisão. Silveira, 2006 *apud* Dunnicliff, 1993 identifica os tipos de erros de leitura:

- Erros grosseiros: geralmente causados por descuido, fadiga ou inexperiência do operador e erro computacional;
- Erros sistemáticos: causados por calibração imprópria, alterações da calibração com o tempo, histerese e não-linearidade;
- Erros de conformidade: causados pela seleção errada dos procedimentos de instalação ou pelas limitações no projeto do instrumento;
- Erros ambientais: causados pelos efeitos de calor, umidade, vibrações, pressão e outros, sobre o instrumento de medida;
- Erros observacionais: causados pela atuação de diferentes observadores (equipes de leitura) usando diferentes técnicas observacionais;
- Erros de amostragem: causados pela instalação do instrumento em local inadequado e pela variabilidade do material sendo instrumentado;
- Erros randômicos: causados por ruídos, atrito interno e fatores ambientais.
- Erros acidentais ou Lei de Murphy: erros imponderáveis, essencialmente variáveis e não susceptíveis de prevenção.

2.4.2. Instrumentação para barragens de terra e enrocamento

A instrumentação instalada em barragens de terra tem como objetivo a mensuração das ações atuantes na estrutura e seus efeitos. Seu propósito principal é o de fornecer dados que auxiliem na avaliação da segurança da barragem através do seu desempenho ao longo do tempo e que possibilitem a detecção precoce de patologias para que sejam sanados (Kuperman *et al*, 2003). Para tanto, é necessário ter valores de referência para avaliar se os dados obtidos em campo, que traduzem o comportamento da barragem, trazem algum risco à estabilidade da barragem.

Em barragens de terra e de enrocamento, os instrumentos podem ser instalados nos aterros, crista e taludes da barragem, nas fundações, nas ombreiras, em interfaces solos – estruturas e nas estruturas associadas ao corpo da barragem, tais como: ensecadeiras incorporadas, vertedores e tomada d'água.

As principais grandezas a serem monitoradas em barragens de terra-enrocamento são (ELETROBRÁS, 2003):

- Pressões neutras no aterro;
- Recalques do aterro;
- Deslocamentos superficiais (plani-altimétricos);
- Subpressão na fundação;
- Vazões de percolação;
- Sólidos carregados pelas águas percoladas;
- Pressões totais e poropressão nas interfaces.

2.4.3. Instrumentos para medição de vazões

As barragens são barreiras artificiais construídas para barrar fluxo natural e armazenar volumes, entretanto, não são estruturas estanques, por isso, toda barragem apresenta infiltrações através do próprio aterro ou das fundações, sendo essas medições de alta importância para o controle do desempenho da barragem (SILVEIRA, 2006).

Geralmente medidores de vazão são identificados pela sigla **MV**.

Técnicas expeditas

Para pequenos merejamentos ou infiltrações, não há necessidade de instalar medidor de vazão elaborado, bastando pequenas muretas e tubulação e nestes casos o cálculo da vazão será pela simples razão:

$$Q = V / T$$

Onde:

Q – Vazão

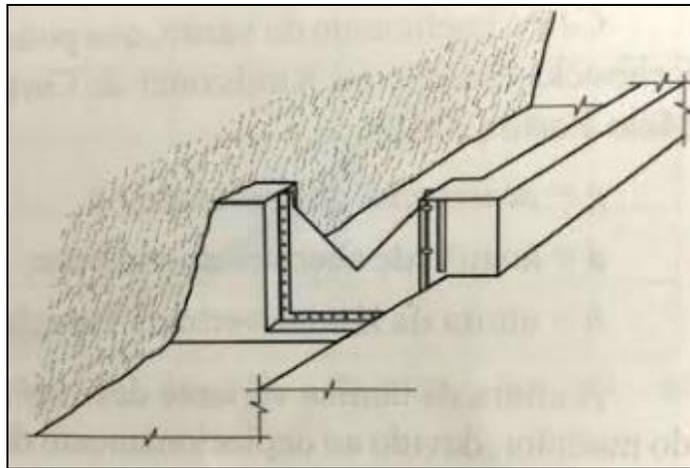
V – Volume coletado

T – Intervalo de tempo da coleta.

Medidor de vazão triangular

Segundo Silveira (2006), há três tipos de medidores de vazão de face plana largamente utilizados: medidor retangular, triangular ou Cipolletti (trapezoidal). O comprimento do canal de aproximação da placa deve ser pelo menos 10 vezes a largura do líquido no medidor. A placa não deve ter espessura superior a 3 mm. Os medidores de chapa triangular são os mais utilizados destes três, sendo recomendado para vazões entre 0 l/min a 600 l/min. A Figura 09 ilustra um medidor triangular de vazão em canal aberto.

FIGURA 09 – Ilustração esquemática de MV triangular



FONTE: SILVEIRA, 2006

Dentre os medidores do tipo triangular, o ângulo de abertura de 90° é o mais usado por questões práticas.

As vazões para medidores de vazão triangulares de ângulo de abertura a 90° podem ser calculadas pelas expressões abaixo, onde h é a altura da lâmina vertente em relação ao vértice do vertedouro, limitado a 38 cm (SILVEIRA, 2006).

- Thompson → $Q = 1,40 \cdot h^{5/2}$
- Gouley e Crimp → $Q = 1,32 \cdot h \cdot 2,48$

O acúmulo de sedimentos a montante da placa vertedoura pode afetar a precisão das medições, por isso é necessário manter limpa a calha. Ademais, o sedimento acumulado deve ser alvo de monitoramento como indicativo de que material da barragem está sendo carregado, o que não é previsto em projeto e pode indicar erosão regressiva (*piping*).

Calha tipo Parshall

Utilizadas quando as vazões a serem medidas são de grande intensidade, devem ser usadas calha tipo Parshall (FONSECA, 2003).

A partir da altura da lâmina d'água medida na secção convergente é possível medir a vazão aproximada pela seguinte expressão:

$$Q = 2,2. W H^{3/2}$$

Onde:

W – Largura da garganta em metros e

H – Altura da lâmina d'água em metros

2.4.4. Instrumentos para medição de deslocamentos

O monitoramento dos deslocamentos ocorridos é particularmente importante em termos da quantificação e distinção dos recalques oriundos do próprio maciço e da fundação, da locação de superfícies críticas de ruptura em profundidade e da avaliação do potencial de desenvolvimento de trincas de tração na barragem por recalques diferenciais ou de trincas de cisalhamento induzidas por deslocamentos horizontais diferenciais (FONSECA, 2003)

As medições de recalque, segundo Silveira (2006), são essenciais no plano de instrumentação para as fases de construção, enchimento e período operacional.

Diversos instrumentos podem ser utilizados para a quantificação dos deslocamentos ocorridos em uma barragem, entre eles os instalados vertical ou horizontalmente.

- Medidor de recalque tipo telescópico (IPT);
- Medidor de recalque tipo USBR (*crossarm gage*);
- Medidor de recalque tipo KM – similar ao extensômetro múltiplo de hastes;
- Medidor de recalque tipo magnético, também denominado Idel;
- Célula hidráulica de recalque, também denominado caixa sueca;
- Medidor de recalque de corda vibrante;

- Inclínômetro horizontal;
- Marcos de deslocamento superficial

Dentre estes, um dos mais amplamente utilizado é o marco de deslocamento superficial, geralmente identificado pela sigla **MS**.

Marco de deslocamento superficial

É um dos métodos mais antigos e simples para observação dos deslocamentos de barragens. Os marcos podem ser instalados na crista, ombreiras ou nas bermas para acompanhamento de recalques e deslocamentos horizontais da estrutura. As medições devem ocorrer sistematicamente desde a fase de construção (Figura 10).

Para a realização de medições, é necessário que se tenha um referencial fixo, em região fora da influência de recalques do aterro. O marco de referência para medição dos recalques é designado, em inglês, como *benchmark* e o marco de referência para deslocamentos horizontais é denominado *control station* ou *reference monument*. Em português não há esta diferenciação, a referência para monitoramento vertical ou horizontal pode ser, portanto, denominada estação de referência, muitas vezes denominado pela sigla **RN** – referência de nível (SILVEIRA, 2006).

FIGURA 10 – MS instalado em barragem de terra com tampa protetora



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Segundo Silveira (2006), na maioria dos casos, os recalques ocorrem quase que exclusivamente durante o período construtivo.

2.4.5. Instrumentos para medição da linha freática

O nível freático é definido como a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo na qual atua a pressão atmosférica, conforme Silveira (2006).

A determinação da posição da linha freática no interior do aterro de uma barragem é relevante para análises de estabilidade e para auxiliar na interpretação dos resultados da piezometria.

O princípio geral dos instrumentos para a medição do nível d'água em maciços de solo ou rocha consiste basicamente em se acessar diretamente a água por meio de furos de e medir a cota da sua superfície por meio de um dispositivo (FONSECA, 2003).

Indicador de Nível D'água

Em engenharia de barragens, é providenciado um furo revestido por um tubo de PVC, metálico ou outro material rígido, perfurado ou ranhurado e instalado no corpo da barragem, em pontos de interesse. O tubo é envolvido por material filtrante, geotêxtil e material drenante, areia. Uma camada selante é utilizada para vedar o espaço superior entre o tubo e o furo. A água percola através das ranhuras do tubo, e o nível da água do solo é medido pelo nível da água dentro deste tubo com auxílio de medidor de nível com cabo flexível e graduado, dotado de um sensor elétrico na extremidade inferior que atua quando em contato com superfície de água e um emissor sonoro ou luminoso na superfície. Este equipamento auxiliar é comumente denominado pio, ilustrado na Figura 11.

FIGURA 11 – Medidor de nível

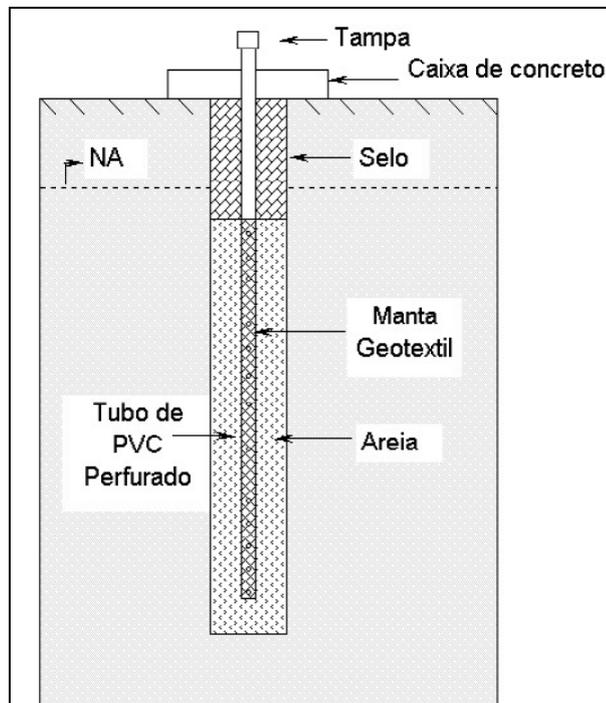


FONTE: DRILL CENTER, 2018

Esses instrumentos são denominados Medidores de Nível d'água ou Indicador de Nível D'água e identificados pelas siglas **MNA** ou **INA**.

Para proteção contra vandalismo, em superfície pode ser feita uma estrutura de concreto, conforme Figura 12.

FIGURA 12 – Ilustração esquemática do INA



FONTE: FONSECA, 2003

As principais causas de perda ou comprometimento destes medidores resultam da obstrução do tubo por objetos ou da colmatação dos sistemas filtrante e drenante periféricos, segundo FONSECA, 2003.

2.4.6. Instrumentos para medição de poropressão

O conhecimento da magnitude e da evolução das pressões intersticiais que se desenvolvem nos aterros compactados e na fundação, durante as fases construtiva, enchimento do reservatório, operação da barragem ou no caso de um rebaixamento do nível do reservatório, são essenciais para avaliação das condições de segurança de barragens de terra. É necessário também o controle das poropressões nas zonas dos contatos com estruturas de concreto e no sistema de drenagem interna da barragem, conforme Fonseca (2003).

Os instrumentos utilizados para a medida de poropressões em obras geotécnicas são os piezômetros.

Há diferentes tipos e princípios de funcionamento, compreendendo tanto a medição direta das poropressões:

- Medição direta: piezômetros de tubo aberto ou de Casagrande, através da leitura da altura da coluna d' água no interior de um tubo de pequeno diâmetro,
- Medição indireta: piezômetros de membrana, através da correlação com medidas de outras grandezas.

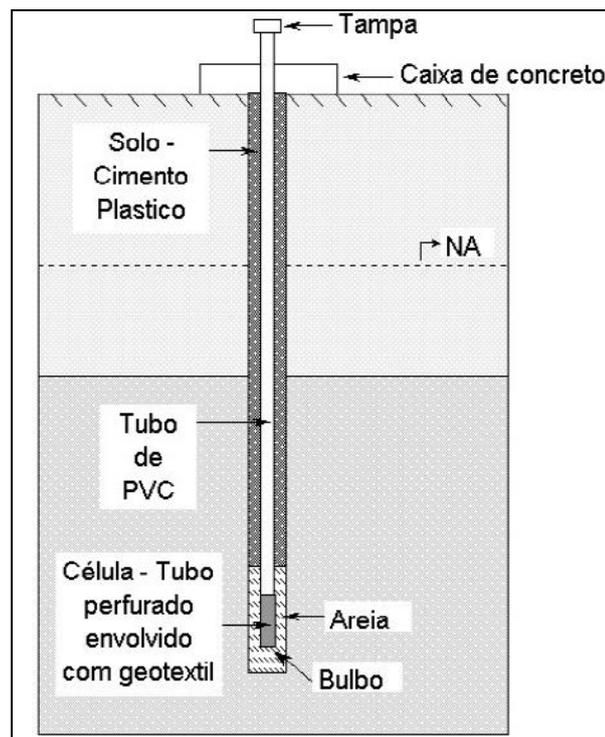
A escolha de um dado piezômetro é feita em função de características como confiabilidade, simplicidade, robustez, durabilidade, sensibilidade, facilidade de instalação, custo e possibilidade de monitoramento remoto. Uma das características relevantes dos piezômetros é o tempo de resposta, *Time-Lag*.

Piezômetro de Tubo Aberto

Piezômetros tubo aberto, também são conhecidos como piezômetros de

Casagrande ou piezômetros *standpipe*. São identificados geralmente pela sigla **PZA**. O piezômetro de Casagrande, Figura 13, consiste em um tubo em PVC, metálico ou outro material, ranhurado ou perfurado em um trecho de geralmente 1 metro, inserido em um furo de sondagem. O fluxo da água subterrânea através das ranhuras do trecho do tubo submetida à uma determinada carga piezométrica e isso faz com que o nível da água no interior da tubulação suba ou desça conforme a variação das condições deste fluxo. O nível da água no interior desta tubulação representa a poropressão na posição da célula de drenagem. Um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. Esta célula de areia fica conectada à superfície do terreno por meio da tubulação e tem medidas realiza pelo mesmo instrumento de leitura de INA, o pio.

FIGURA 13 – Ilustração esquemática do PZA



FONTE: FONSECA, 2003

Conforme Silveira (2006), poropressão são denominadas como as medidas tomadas no aterro, já as observações na fundação, recebem o nome de subpressão, pois atuam de baixo para cima.

Dentre as principais vantagens desse tipo de piezometro, citam-se:

- Confiabilidade;
- Durabilidade;
- Sensibilidade;
- Possibilidade de verificação de desempenho por meio de ensaios de recuperação de NA.

Entre as desvantagens, uma das principais é o tempo de resposta que é alto para solos de baixa permeabilidade, que é o caso do aterro compactado.

Piezômetro pneumático

Conforme Fonseca (2003), os piezômetros pneumáticos efetuam as medidas das poropressões a partir de um processo pneumático (um gás, geralmente nitrogênio) que tem por objetivos propiciar um regime de equalização de pressões internas na célula piezométrica e forçar a deflexão de um diafragma associado à mesma.

Através do tubo de alimentação, o gás é injetado com pressão conhecida atuando sobre uma das faces do diafragma flexível interno e valor da pressão injetada é monitorado através de um manômetro instalado na caixa de leituras do instrumento. No lado oposto do diafragma, atua a pressão da água que se deseja medir, atuando através da pedra porosa localizada na base da célula piezométrica.

Enquanto a pressão de gás aplicada for inferior à pressão da água, o diafragma mantém-se fechado, não permitindo o fluxo de gás em direção ao tubo de retorno. Quando a pressão de gás é maior que a pressão da água, o diafragma se abre, permitindo o fluxo de gás pela tubulação de retorno, que é detectado pelo leitorista. Neste momento, a injeção de gás é suspensa e a pressão de injeção reduz-se gradualmente até ocorrer a equalização das pressões da água e do gás no interior da célula piezométrica (diafragma fechado). O valor estabilizado da pressão do gás injetado é a medida indireta da poropressão desejada.

Entre as vantagens deste instrumento, destaca-se o tempo de resposta pequeno.

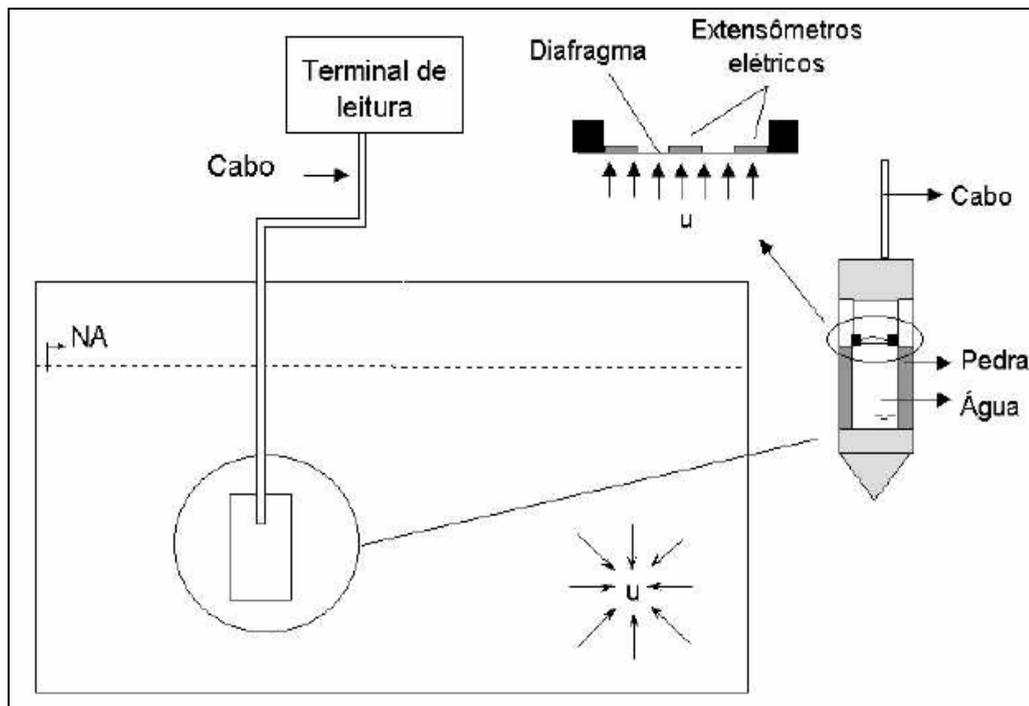
Como desvantagem, a baixa confiabilidade para pressões negativas e necessidade de recarregar periodicamente as ampolas de gás.

Piezômetro elétricos

Possuem transdutor de resistencia elétrica, tipo *strain gage* por exemplo, em um diafragma, ilustrado na Figura 14. A variação de resistência dos extensômetros são reflexos da deflexão do diafragma, gerando sinal elétrico de saída, conforme a magnitude da poropressão, u , na pedra porosa (FONSECA, 2003).

Os piezômetros elétricos geralmente são identificados pela sigla **PZE**.

FIGURA 14 – Ilustração esquemática do PZE



FONTE: FONSECA, 2003

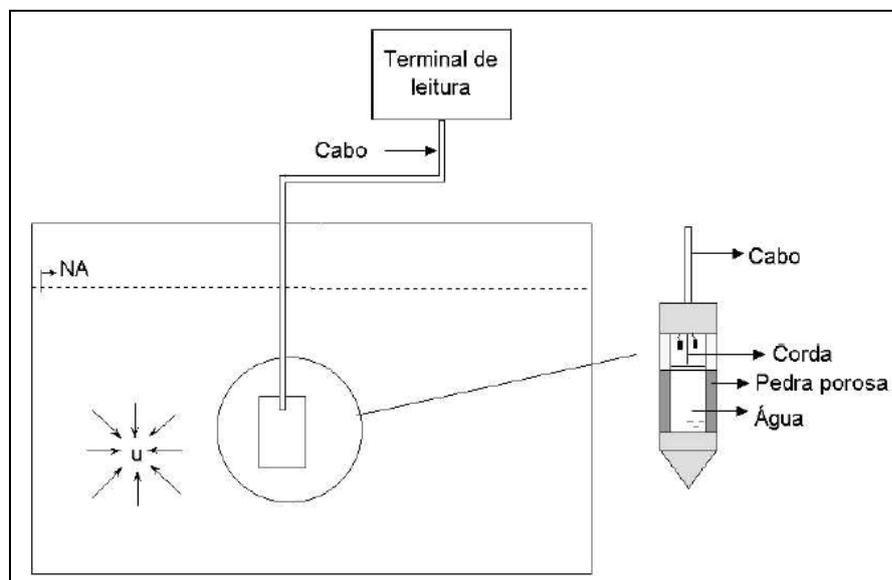
Conforme Silveira (2006), os piezômetros elétricos apresentam bom desempenho inicial, porém vida útil curta. Isto ocorre, devido a dificuldade de proteção contra umidade na resistência elétrica e fluência da cola de aderência da resistência à membrana. Esta é a principal desvantagem deste tipo de piezômetro.

Como vantagem, similarmente ao piezômetro pneumático, possui tempo de resposta baixo, sendo sensível a pequenas variações.

Piezômetro de corda vibrante

Silveira (2006) descreve o princípio de funcionamento dos piezômetros de corda vibrante da seguinte forma: a pressão da água é transmitida pela pedra porosa ao diafragma interno cujas deflexões são medidas por um transdutor, um fio de aço, daí o nome corda, fixado em uma das faces de uma membrana de aço inox, diagrama. O fio passa através de um eletroímã ou bobina de indução magnética. Quando da vibração desta corda, ocorre indução na bobina do eletroímã gerando sinal de saída de frequências variadas, como ilustrado na Figura 15. As frequências de oscilação são então correlacionadas à poropressão.

FIGURA 15 – Ilustração esquemática do PZE de corda vibrante



FONTE: FONSECA, 2003

Os piezômetros de corda vibrante apresentam boa precisão, alta sensibilidade e podem ser lidos a distância. Os principais problemas relatados sobre os piezômetros de corda vibrante são:

- Erro causado pela alteração do “zero”;
- Corrosão da corda vibrante;
- Uso de cabos elétricos não blindados, sujeitando os dados à interferências causadas por campos eletromagnéticos;
- Vida útil média de 30 anos.

3. ESTUDO DE CASO: BARRAGEM DE UMA USINA HIDRELÉTRICA NO INTERIOR DE MINAS GERAIS

Este capítulo descreve a usina hidrelétrica alvo deste estudo. É apresentada também a instrumentação instalada na barragem e suas estruturas auxiliares, bem como realizada análise com base nos dados coletados durante 10 anos de operação.

Devido a questões de confidencialidade do empreendedor responsável por esta usina, não será identificado por nome da usina.

Abaixo, uma foto aérea do acervo do empreendedor, tomada sobre este empreendimento, dando visão geral – Figura 16.

Figura 16 – Foto aérea tomada sobre a usina hidrelétrica em estudo



Fonte: Acervo técnico do empreendedor

3.1. ARRANJO GERAL E CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

A UHE em estudo está localizada em Minas Gerais, foi construída no rio Pomba, nos municípios de Laranjal, Leopoldina e Recreio. No local do barramento a bacia do rio Pomba apresenta uma área de drenagem de aproximadamente 7.180 km². A usina foi projetada pela MEK Engenharia, com as obras civis implementadas pela construtora CESBE. Teve seu início de operação em 2009 e sua potência nominal é de 39,00 MW. O arranjo geral é apresentado na Figura 17.

A UHE aproveita uma queda de 25 m, com um reservatório de 10,05 km² e um volume total de 93,653 hm³, no NA_{max} .

Possui barragem de terra e enrocamento com altura máxima de 34 m e crista na El. 154,0 m, comprimento de 328 m, da seguinte forma:

- Estruturas de concreto: tomada d'água e vertedouro na margem direita
- Barragem de enrocamento com núcleo de argila no leito do rio
- Barragem de terra sobre a ombreira esquerda.

A ensecadeira de jusante foi incorporada ao corpo da barragem. A barragem de terra conta com sistema de drenagem interna composto de dreno vertical de areia de 0,80m de largura e tapete drenante tipo sanduíche (areia-brita- areia), com 1,00m de espessura total.

Os taludes de montante e jusante da barragem de enrocamento têm inclinação 1V:1,5H. A montante, a ensecadeira foi incorporada, com sua crista formando uma berma de 7m na El. 138 m. O espaço entre a ensecadeira de montante e o núcleo da barragem foi preenchido com solo compactado, de modo que o espaldar de montante é constituído de solo até a El. 138 m, passando a enrocamento daí até a crista. Entre o solo compactado e o enrocamento, a montante existe uma camada de transição fina e outra de transição grossa, totalizando 2 m de espessura. A jusante além das transições fina e grossa há mais 1 m de filtro de areia em contato com o núcleo. A barragem de enrocamento está fundada em rocha. Foi executada uma cortina de injeção sob toda a barragem.

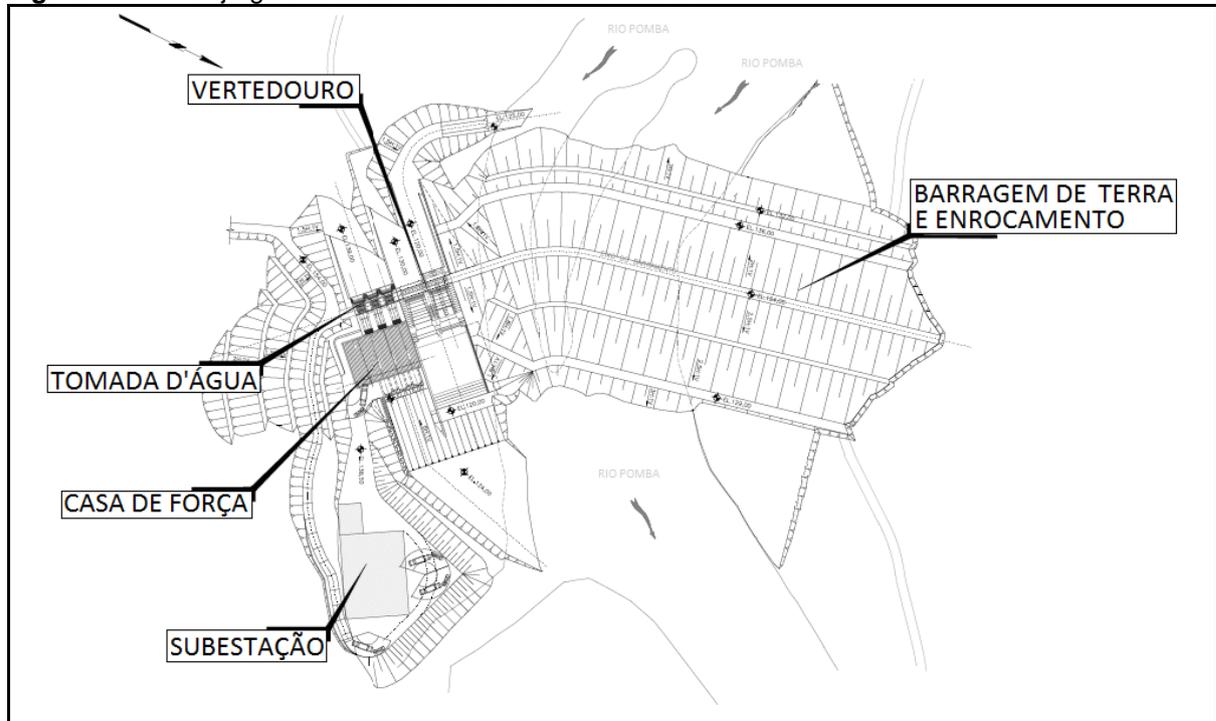
O talude de jusante foi protegido com a plantação de vegetação gramínea e o de

montante protegidos com *rip-rap*.

O vertedouro é controlado por duas comportas tipo segmento de 16 m de altura e 12 m de largura, com comprimento de 32 m e capacidade de 3.296 m³/s.

A tomada d'água para o circuito de geração de energia elétrica possui 3 vãos e comprimento total de 30,65 m, operadas por comporta tipo vagão de 4,5 x 4,5 m. a tomada d'água é seguida por três condutos forçados com diâmetro de 3,7 m e comprimento de 15,5 m, até as três turbinas tipo Kaplan com potência nominal de 13,8 MW cada, em uma casa de força de comprimento de 43 m e largura 34,7 m.

Figura 17 – Arranjo geral das estruturas da UHE em estudo



Fonte: Acervo técnico do empreendedor

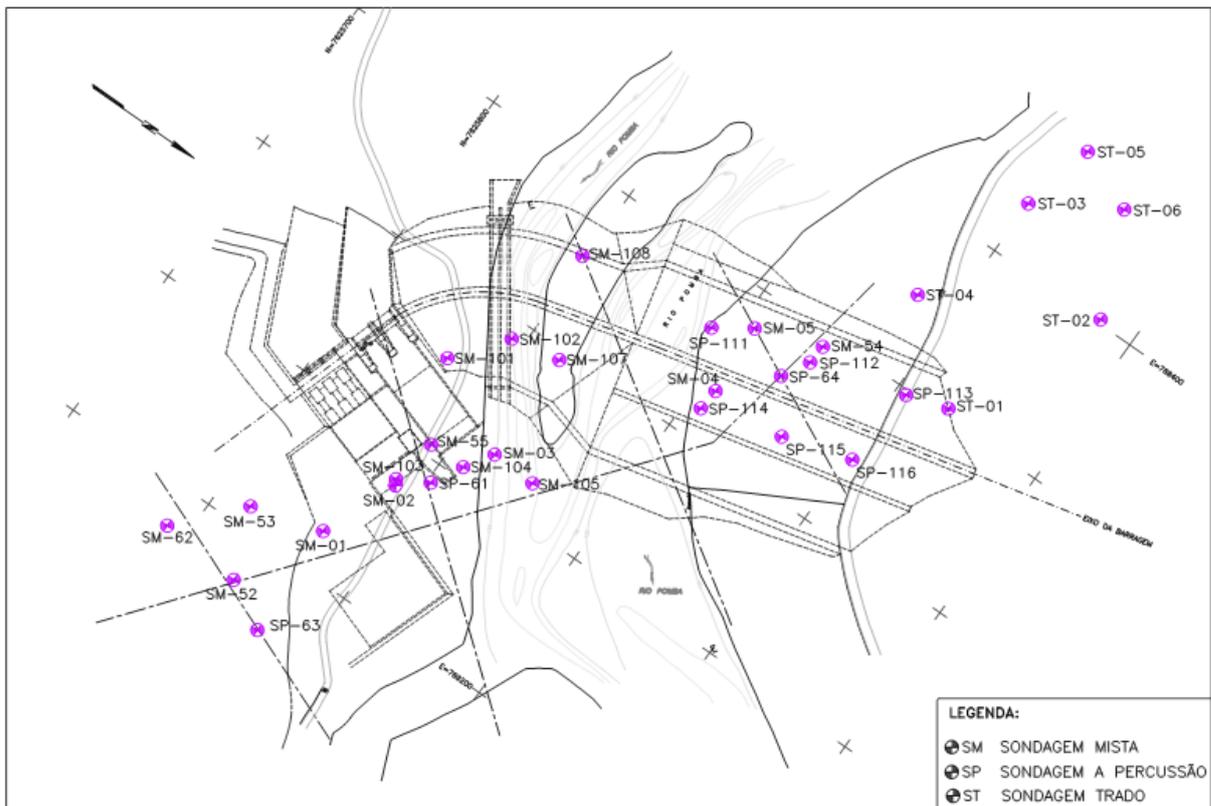
3.2. SÍTIO GEOLÓGICO E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

A UHE situa-se na região dos planaltos cristalinos rebaixados, adjacentes à fossa tectônica do rio Paraíba do Sul, que se caracteriza por um relevo fortemente dissecado ou mesmo montanhoso, onde a rede de drenagem e as estruturas tectônicas tiveram grande influência no modelado, formando grandes terraços e

morros arredondados, que se alternam com espigões e vales estreitos.

As sondagens na ombreira esquerda, mostram que após a camada de cerca de 5 m de colúvio, ocorre solo residual que gradativamente passa a solo saprolítico silto-arenoso micáceo, com espessuras que variam de 30 m no alto da ombreira esquerda (SM-52 na cota 160m) – Figura 18, diminuindo em direção ao leito do rio para cerca de 7 m a 10 m, antes de atingir o maciço rochoso. Nesta margem o nível rochoso ocorre entre as cotas 120m a 125m chegando a 115m já mais próximo da margem.

FIGURA 18 – Localização dos furos de sondagens da investigação geotécnica



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

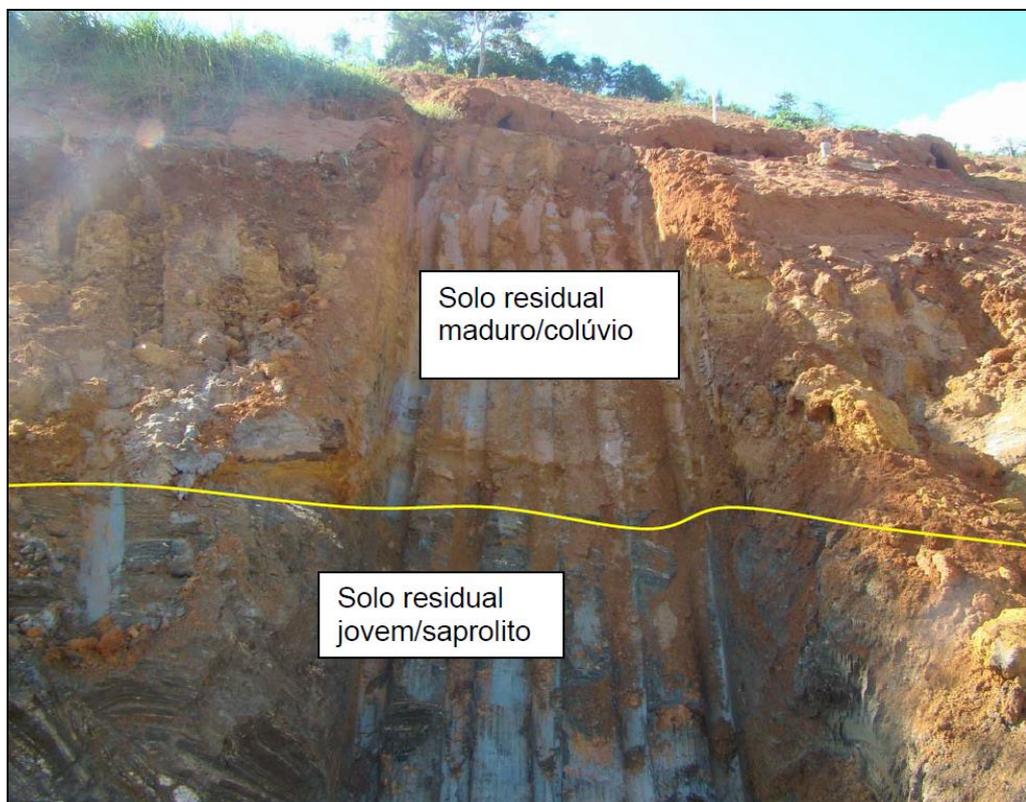
No leito do rio, as sondagens SM-107 e SM-108, executadas na ilha, apresentaram espessura de solo coluvionar + aluvionar + saprolítico de 9,83 m a 14,75 m, com cotas do topo rochoso nas El. 118,21 m e 112,28 m, respectivamente. Sondagens executadas no leito do rio, SM-102 (junto a margem direita) e SM-105 (cerca de 100m a montante do eixo da barragem), apontaram as El. 118,78m e 119,62 m como cotas do topo rochoso.

De um modo geral a superfície do maciço rochoso predomina na fundação da barragem no leito do rio, com alguns pontos localizados onde ocorria elevado grau de fraturamento e alteração da rocha. Os pontos que foram de maior atenção sob o ponto de vista geotécnico, durante a obra, foram o leito de rio e a ombreira esquerda.

Junto à ombreira esquerda foi verificado uma região localizada com ocorrência de solo com baixa capacidade de suporte para a fundação da barragem. Foi feita uma trincheira de investigação para verificar se a zona de baixa resistência era constituída de solo de alteração de gnaiss ou aluvião; o resultado da investigação confirmou a presença de solo de alteração. A ocorrência de aluvião foi verificada superficialmente apenas junto ao pé da ensecadeira de montante. Nas outras regiões a aluvião foi removido para a exposição do topo rochoso.

A trincheira aberta é apresentada na Figura 19, onde foi possível verificar o perfil de intemperização do maciço de fundação; a transição do solo residual maduro para o solo residual jovem/saprolito ocorre de forma abrupta.

Figura 19 – Trincheira de inspeção na ombreira esquerda – alteração de gnaiss

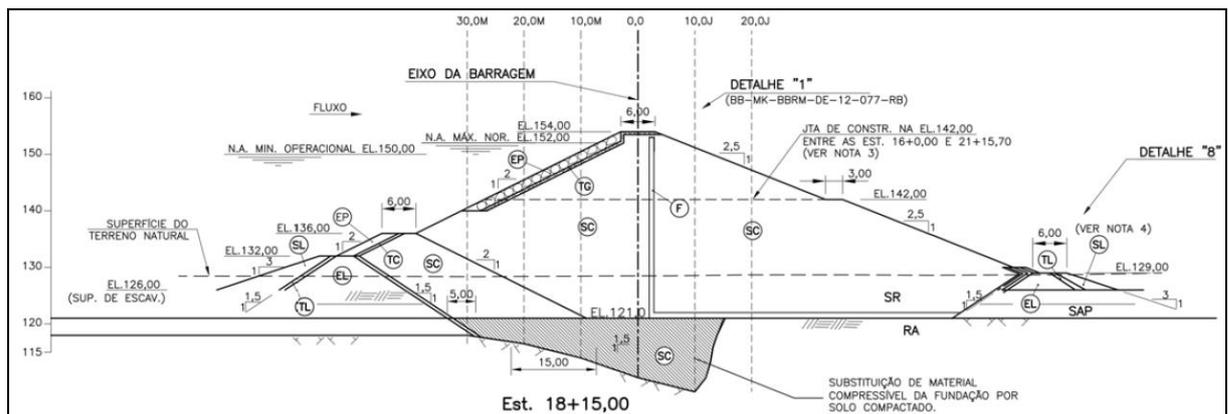


Fonte: Acervo técnico do empreendedor

Visando minimizar danos no maciço compactado da barragem, tendo em vista recalques na fundação, optou-se por substituir o material compressível por solo compactado.

Na Figura 20 é apresentado o perfil de escavação na fundação, junto à ombreira, com a indicação da zona de substituição de material.

Figura 20 – Perfil de escavação da fundação junto à ombreira esquerda



Fonte: Acervo técnico do empreendedor

No leito do rio foram verificadas zonas muito fraturadas e alteradas no maciço rochoso, conforme Figura 21.

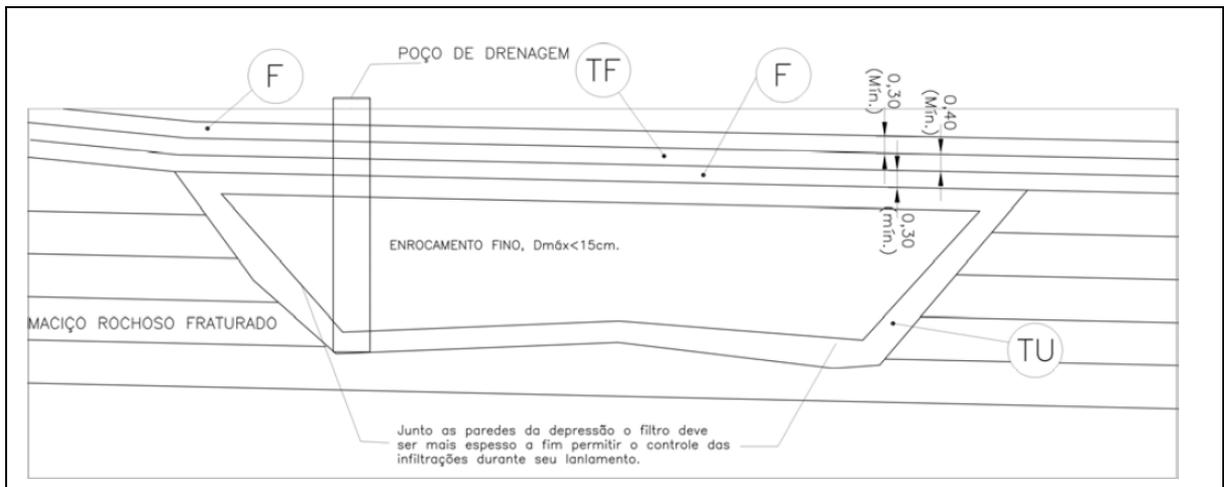
Figura 21 – Zona de fraturas no leito do rio



Fonte: Acervo técnico do empreendedor

Nas zonas de fraturamento no leito do rio onde ocorria de infiltração intensa, foi realizado preenchimento das depressões conforme indicado na Figura 22.

Figura 22 – Preenchimento das depressões rochosas sob o filtro horizontal



Fonte: Acervo técnico do empreendedor

As investigações geológicas utilizaram 41 sondagens mistas e a percussão para a elaboração do projeto executivo das escavações e das fundações das estruturas de concreto e solo.

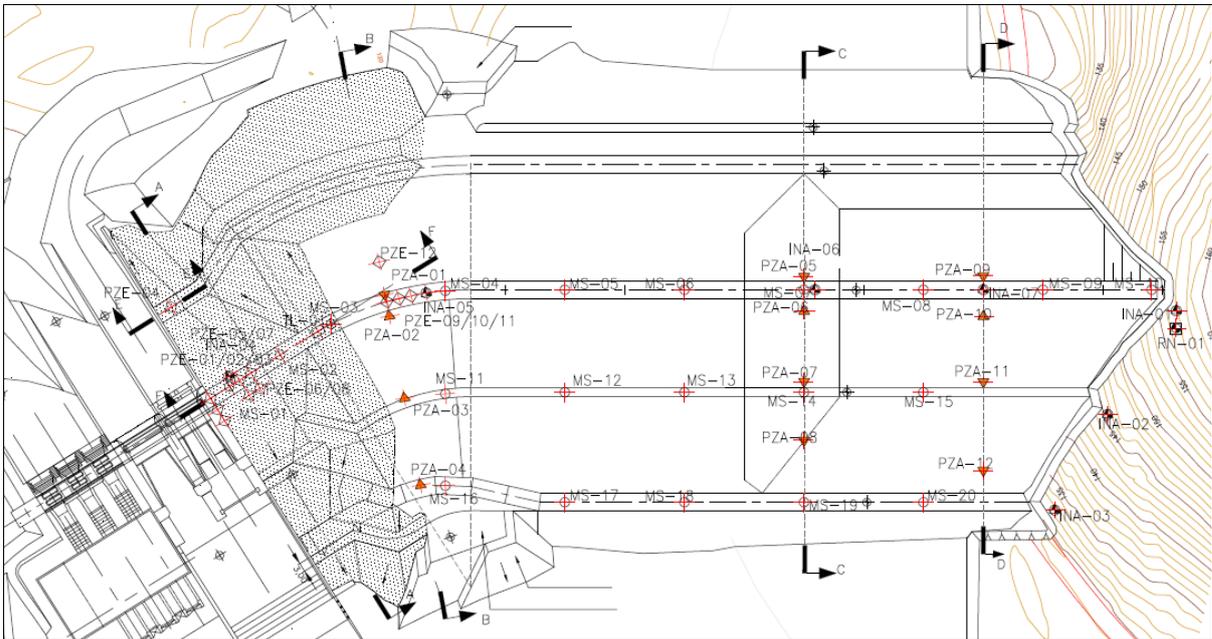
3.3. INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA INSTALADA

A instrumentação instalada nesta UHE compõe-se de:

- 12 piezômetros de tubo aberto - PZA
- 12 piezômetros de corda vibrante – PZE
- 7 indicadores de nível d'água - INA
- 20 marcos superficiais – MS

Como pode ser verificado na Figura 23 os instrumentos estão distribuídos em seções na barragem.

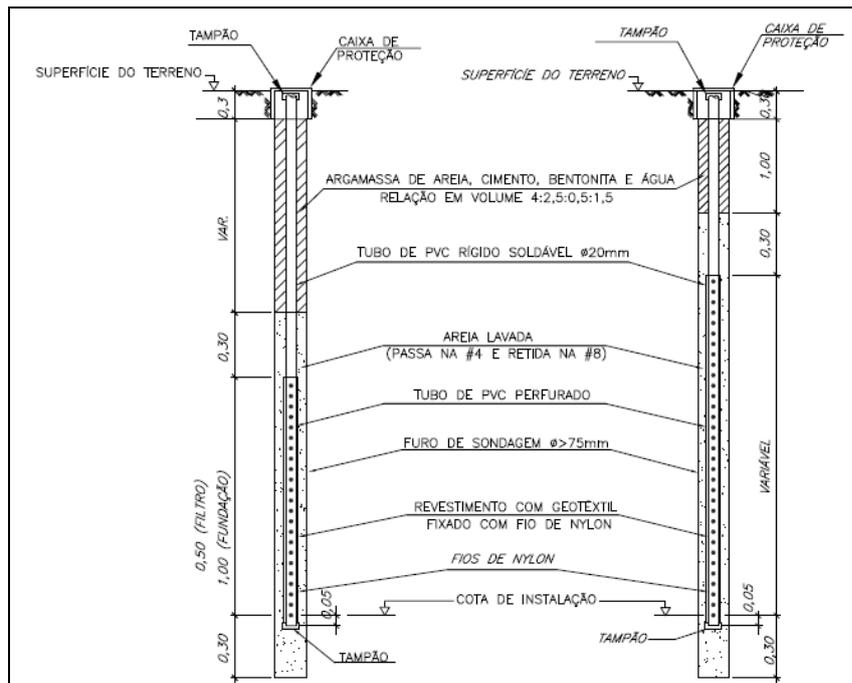
FIGURA 23 – Localização da instrumentação instalada



FONTE: Acervo tecnico do empreendedor

Os piezômetros de tubo aberto e os indicadores de nível d'água foram instalados conforme o seguinte esquema do projetista, sendo o piezômetro o da esquerda e o indicador de nível d'água o da direita – Figura 24

FIGURA 24 – Detalhe instrutivo para instalação dos PZAs e INAs



FONTE: Acervo tecnico do empreendedor

Os indicadores de nível d'água (INA) consistem de um tubo de PVC com diâmetro externo nominal de 20 mm. Em sua extremidade inferior, o tubo é perfurado (trecho drenante de comprimento variável) e envolto por duas camadas de tela de nylon malha 60 cuja finalidade é evitar a colmatação dos furos. O espaço existente entre o furo e o trecho drenante é preenchido com areia lavada passante na peneira #4 e retida na peneira #8. Para o espaço existente entre o tubo e o furo nos trechos não drenantes são preenchidos com argamassa de areia, cimento, bentonita e água.

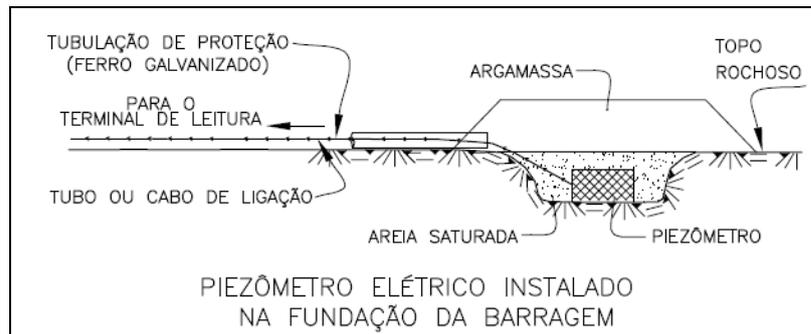
As leituras serão realizadas com medidor de nível d'água elétrico ("pio") que possui em sua extremidade um sensor de circuito aberto. Quando em contato com a água, fecha-se o circuito do sensor, permitindo o estabelecimento de corrente elétrica que aciona o dispositivo sonoro no terminal de leituras. A profundidade do nível d'água é obtida tendo-se como referência a cota da boca do tubo. O nível d'água do terreno é determinado pela expressão:

$$\text{Nível d'água} = \text{Cota de topo do tubo} - \text{leitura da trena.}$$

Os piezômetros de tubo aberto (PZA) são constituídos por tubos de PVC com diâmetro externo nominal de 20 mm. Em sua extremidade inferior, o tubo é perfurado (trecho drenante) e envolto por duas camadas de tela de nylon malha 60 cuja finalidade é evitar a colmatação dos furos. O trecho drenante constitui o bulbo piezométrico e projeto prevê que o comprimento deste bulbo seja de 0,50 m para os PZA instalados na região dos filtros (PZA 02, 03, 04, 06, 07, 10 e 11) e bulbo piezométrico com 1,00 m de comprimento para os piezômetros que possuem localização diferente da anteriormente citada. O espaço existente entre o furo e o trecho drenante é preenchido com areia lavada passante na peneira #4 e retida na peneira #8. Para o espaço existente entre o tubo e o furo nos trechos não drenantes são preenchidos com argamassa de areia, cimento, bentonita e água. As leituras são realizadas com o mesmo procedimento dos INA. A cota piezométrica é determinada pela expressão.

$$\text{Cota piezométrica} = \text{Cota de topo do tubo} - \text{leitura da trena}$$

Já os piezômetros elétricos seguiram a seguinte instrução de instalação – Figura 25.

FIGURA 25 – Detalhe instrutivo para instalação PZEs na fundação

FONTE: Acervo tecnico do empreendedor

Os piezômetros elétricos são do tipo corda vibrante e seu princípio de funcionamento baseia-se na frequência de vibração de um cabo tensionado e ligado a uma membrana de aço submetida à pressão d'água. A variação da pressão d'água sobre a membrana provoca alteração na tensão existente no cabo alterando consequentemente sua frequência de vibração. Com a calibração efetuada em laboratório é possível converter as leituras de frequência em unidades adequadas à engenharia. A pressão atuante na membrana é dada pela expressão:

$$P = ((R_0 - R_1) \times G) + ((T_1 - T_0) \times K)$$

Sendo:

- P é a pressão atuante na membrana;
- R₀ é a leitura inicial em Hz²x10⁻³;
- R₁ é a leitura corrente;
- G é a constante de calibração;
- T₀ é a temperatura do sensor na leitura inicial;
- T₁ é a temperatura corrente;
- K é a constante térmica do sensor.

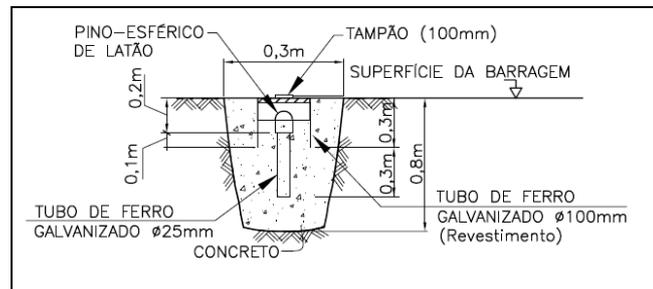
Os doze piezômetros elétricos são fabricados pela Geokon, modelo 4500 S de 350 kPa. Especificações técnicas:

- Capacidade Nominal (CN) 3,5 kgf/cm² (350 kPa)

- Resolução: 0,025% CN
- Sensibilidade: 0,025% CN
- Precisão 0,25%CN

Os marcos superficiais foram instalados conforme as seguintes instruções do projetista – Figura 26.

FIGURA 26 – Detalhe instrutivo - instalação dos MSs

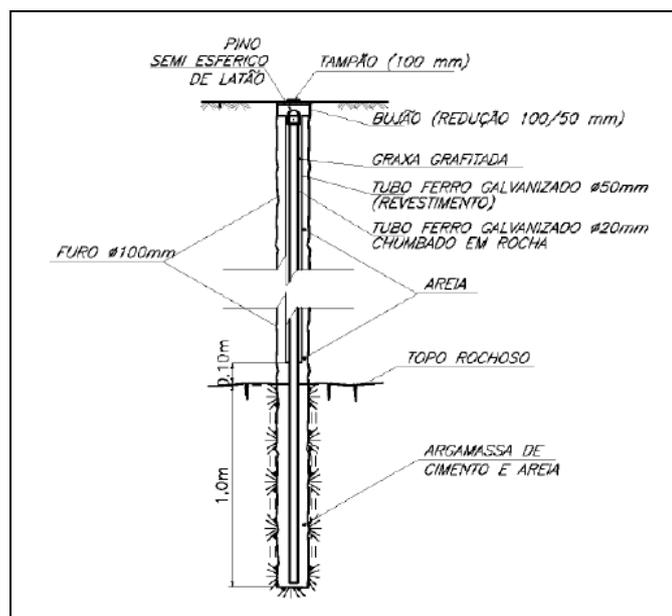


FONTE: Acervo tecnico do empreendedor

Os marcos de recalque superficial são constituídos por um tubo de aço galvanizado de diâmetro de 1” e comprimento em torno de 60 cm. A outra extremidade é acabada com uma calota esférica de latão para apoio da mira.

A Referência de Nível (RN) é de instalação profunda, conforme a Figura 27.

FIGURA 27 – Detalhe instrutivo para instalação dos RNs



FONTE: Acervo tecnico do empreendedor

O RN é constituído por tubos galvanizados de 1” e 2” de diâmetro sendo que o tubo externo funciona como revestimento protetor para o interno (haste) que é chumbado em estrato consistente. No topo da haste metálica será solidarizada peça para apoio da mira topográfica formada por pino semiesférico de latão sendo que no topo, próximo ao nível do terreno, haverá proteção por tubo de 4” de diâmetro abrigados por tampa de proteção. O espaço existente entre os tubos externos e internos são preenchidos com graxa grafitada com a finalidade de se diminuir o atrito e a corrosão.

3.3.1. Valores limites para monitoramento da instrumentação

Denomina-se de valores limites àqueles estipulados com base nos dados de projeto, sem levar em consideração dados obtidos em campo. Para o estudo desta UHE foram assumidos três valores limites diferentes: o de projeto ou normal, de alerta e crítico:

- O valor, ou nível, de projeto (normal) corresponde ao valor teórico calculado a partir das hipóteses de projeto.
- O nível de alerta se refere ao valor a partir do qual se torna obrigatório à verificação das hipóteses iniciais de projeto para adequação destas às condições de contorno de campo, e então prever as intervenções reparadoras necessárias para assegurar a integridade da estrutura instrumentada caso este valor evolua para o crítico.
- O nível crítico corresponde à situação limite suportado pela estrutura, e corresponde a situação onde devem ser imediatamente implantadas as medidas reparadoras.

Para um acompanhamento adequado das condições de segurança da barragem, a projetista determinou valores limites tanto para os recalques como para os níveis piezométricos.

Estimativa de recalques

Valores de recalques que possam indicar problemas na barragem foram estimados de acordo com a possibilidade de formação de trincas (fissuras) transversais ao eixo ao longo do barramento e sub-horizontais juntos as ombreiras.

Sherard *et al* (1963) comentaram que as fissuras mais críticas e perigosas são aquelas que ocorrem transversalmente ao eixo, criando uma concentração de fluxo através do núcleo e podendo causar a ruptura da barragem por erosão interna. São particularmente perigosas quando ocorrem internamente, não apresentando reflexos na superfície. Elas são causadas por recalque diferencial entre trechos adjacentes do maciço, geralmente entre a região das ombreiras e a calha central do rio.

Considerou-se que trincas transversais aparecerão na barragem para uma relação de δ / L (recalque diferencial) menor que 1:1000. Sendo:

δ – Deslocamento vertical da crista e

L – Comprimento.

Esta condição foi adotada no presente trabalho para indicar a condição de limite de alerta. Os valores calculados são apenas indicativos, estimados com base em dados de barragens construídas com solos sedimentares.

Silveira (2006) relata em seu livro que recalques diferenciais (relação de δ / L) da ordem de 1:100 já foram observados tanto no sentido transversal quanto ao longo do eixo longitudinal em barragens de terra, sem que se evidenciasse qualquer tipo de fissuração. Esta condição foi adotada nos estudos da projetista para indicar a condição de limite crítico.

Conforme instruções da projetista, recalques relativos (δ / H) inferiores a 0,5% após o período construtivo podem ser considerados limites normais de recalque para os marcos superficiais instalados na crista e na berma da barragem. Os valores são apresentados na Tabela 01.

TABELA 01 – Localização e limites para MS

MS	Localização	Cota Instalação El. (m)	Fundação El. (m)	Altura barragem - H (m)	Distancia entre marcos - L (m)		Valores limites de recalque (cm)		
							Normal $\frac{\delta}{H} \leq 0,5\%$	Alerta $\frac{\delta}{L} \leq 10^{-2}$	Crítico $\frac{\delta}{L} \leq 10^{-3}$
							Absoluto	Entre MS adjacentes	
1	Crista	153,93	125,60	28,33			14,17		
2	Crista	153,94	121,20	32,74	MS 1-2	40	16,37	4,00	40,00
3	Crista	153,93	121,40	32,53	MS 2-3	40	16,27	4,00	40,00
4	Crista	153,98	124,00	29,98	MS 3-4	40	14,99	4,00	40,00
5	Crista	153,97	123,00	30,97	MS 4-5	40	15,49	4,00	40,00
6	Crista	153,95	120,60	33,35	MS 5-6	40	16,68	4,00	40,00
7	Crista	154,00	121,00	33,00	MS 6-7	40	16,50	4,00	40,00
8	Crista	154,02	115,00	39,02	MS 7-8	40	19,51	4,00	40,00
9	Crista	153,96	140,00	13,96	MS 8-9	40	6,98	4,00	40,00
10	Crista	154,28	153,00	1,28	MS 9-10	40	0,64	4,00	40,00
11	Berma*	141,92	123,00	18,92			9,46		
12	Berma*	141,95	122,00	19,95	MS 11-12	40	9,97	4,00	40,00
13	Berma*	142,10	120,60	21,50	MS 12-13	40	10,75	4,00	40,00
14	Berma*	141,96	120,00	21,96	MS 13-14	40	10,98	4,00	40,00
15	Berma*	141,78	121,40	20,38	MS 14-15	40	10,19	4,00	40,00
16	Berma**	131,10	123,00	8,10			4,05		
17	Berma**	130,43	124,00	6,43	MS 16-17	40	3,22	4,00	40,00
18	Berma**	130,21	122,00	8,21	MS 17-18	40	4,11	4,00	40,00
19	Berma**	130,30	120,00	10,30	MS 18-19	40	5,15	4,00	40,00
20	Berma**	130,45	124,00	6,45	MS 19-20	40	3,22	4,00	40,00

Legenda:

(*) Berma intermediária

(**) Berma da ensecadeira

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Estimativa de pressões piezométricas

Para determinar os valores limites dos piezômetros situados no maciço de solo compactado, tapete horizontal e fundação da barragem, analisou-se a estabilidade dos taludes em três cenários, detalhados na Tabela 02:

- Operação Normal
- Rebaixamento rápido e
- Final de construção

TABELA 02– Fatores de Segurança mínimos admissíveis no projeto

CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO		FS _{adm}
OPERAÇÃO NORMAL	N.A. _{MAX.NORMAL} = 152,00 m	1,5
FINAL DE CONSTRUÇÃO	Ru=0,20	1,3
REBAIXAMENTO RÁPIDO	N.A. _{MINIMO ADM} = 146,00 m	1,2

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Para o cenário de Operação Normal, as condições de segurança da barragem foram verificadas mediante o estabelecimento de 3 situações de fluxo: normal, alerta e crítica. Para a barragem em operação, sob condição de fluxo estacionário, considerou-se como situação de operação normal aquela em que os níveis piezométricos descrevem uma condição de estabilidade associada a fatores de segurança (FS) maiores ou iguais a 1,5. As condições de estabilidade foram classificadas conforme o FS – Fator de Segurança – Tabela 03.

TABELA 03 – FS referente aos valores limites para piezometria

Situação	Fator de Segurança Limite (FS)
Normal ou projeto	≥ 1,5
Alerta	1,3
Crítico	1,1

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Todo o estudo de estabilidade foi baseado na Teoria de Equilíbrio Limite, empregando os Métodos de Morgenster-Price, considerando superfícies potenciais de ruptura circulares. Utilizou-se o programa computacional Slope/W desenvolvido pela GEO-SLOPE International Ltda. Anteriormente ao estudo de estabilidade foram desenvolvidas as análises de percolação correspondentes a cada situação de fluxo d'água na barragem. As análises numéricas foram realizadas com o auxílio do programa SEEP/W, também desenvolvido pela GEO-SLOPE International Ltda.

Os parâmetros de resistência e permeabilidade dos materiais foram obtidos através de ensaios de laboratório, sondagens e bibliografia técnica. Os parâmetros de permeabilidade da fundação foram estimados em função do perfil geológico na região do barramento que apresentou um maciço rochoso são, pouco fraturada, com baixa a moderada condutividade hidráulica.

Os resultados das análises apresentam condições de estabilidade satisfatórias para a barragem face às condições de carregamento de projeto, considerando os fatores de segurança admissíveis adotados. Os valores limites foram definidos em função dos níveis piezométricos verificados a partir da rede de fluxo obtida na análise de percolação para cada condição de fluxo, considerando a hipótese de colmatagem do sistema de drenagem interna da barragem. Os resultados são apresentados na Tabela 04.

TABELA 04 – Valores limites para piezometria

INSTRUMENTO	SEÇÃO DE ANÁLISE	LOCALIZAÇÃO (PROJETO)	COTA DE INSTALAÇÃO (PROJETO) EL. (m)	VALORES LIMITES		
				NORMAL EL. (m)	ALERTA EL. (m)	CRÍTICO EL. (m)
PZE						
01	A-A	Contato c/estr de concreto(*)	150,00	150,00	151,00	152,00
02		Contato c/estr de concreto(*)	140,00	148,00	150,00	152,00
03		Contato c/estr de concreto(*)	130,00	140,00	142,00	144,00
04		Contato c/estr de concreto(*)	125,00	148,00	149,00	150,00
05		solo compactado	145,00	148,00	150,00	152,00
06		solo compactado	136,00	136,00	138,00	140,00
07		topo rochoso	123,00	138,00	140,00	142,00
08		topo rochoso	123,00	134,00	138,00	140,00
09	B-B	solo compactado	144,00	142,00	146,00	148,00
10		solo compactado	134,00	132,00	144,00	146,00
11		topo rochoso	124,00	130,00	140,00	142,00
12		topo rochoso	124,00	140,00	146,00	147,00
PZA						
01	B-B	topo rochoso	124,00	132,00	145,00	146,00
02		Filtro	123,00	127,00	140,00	142,00
03		Filtro	125,00	127,00	135,00	138,00
04	C-C	Filtro	125,00	127,00	129,00	132,00
05		topo rochoso	115,00	134,00	142,00	144,00
06		Filtro	122,00	127,00	140,00	142,00
07		Filtro	122,00	127,00	135,00	138,00
08	D-D	topo rochoso	117,00	128,00	130,00	132,00
09		topo rochoso	121,00	132,00	142,00	144,00
10		Filtro	127,00	127,00	140,00	142,00
11		Filtro	127,00	127,00	135,00	138,00
12		topo rochoso	121,00	128,00	130,00	132,00

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Na fase de operação, após 5 anos de construção da barragem, a projetista revisou os limites de instrumentação a pedido do empreendedor e instruiu quanto à análise dos dados de instrumentação, dividindo-os em 2 grupos:

- Grupo 1

Conjunto de instrumentos posicionados em locais específicos definidos durante a fase de projeto, considerados indicadores diretos da condição de estabilidade do

talude de jusante da barragem e, portanto, passíveis de monitoramento através de níveis de referência pré-definidos. Os instrumentos que compõe o grupo 1 são: Piezômetros instalados no filtro horizontal e piezômetros instalados na fundação a jusante do filtro vertical.

Grupo 1: PZA-02, PZA-03, PZA-04, PZA-06, PZA-07, PZA-08, PZA-10, PZA-11 e PZA-12.

- Grupo 2

Conjunto de instrumentos instalados com o objetivo principal de avaliar o desempenho da barragem durante o enchimento do reservatório. São denominados instrumentos complementares, e cuja análise, após estabilização da rede de fluxo, deveria ser realizada qualitativamente, monitorando a evolução ao longo do tempo. Na fase atual de operação, estes instrumentos auxiliam na interpretação do desempenho da barragem através da análise global de todos os instrumentos em operação. Os instrumentos que compõe o grupo 2 são: Indicadores de nível d'água e piezômetros instalados no maciço de solo compactado ou fundação do aterro a montante do filtro vertical.

Grupo 2: todos PZE's, PZA-01, PZA-05, PZA-09.

3.3.2. Frequência de leitura

No Quadro 02 é sintetizada a frequência de leitura para a instrumentação da barragem para uma situação de normalidade de operação da usina, durante o primeiro ano de operação.

QUADRO 02 – Frequência de leitura dos instrumentos durante primeiro ano de operação

INSTRUMENTAÇÃO	DURANTE O ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO.	PERÍODO APÓS O ENCHIMENTO DO RESERVATÓRIO		
		ATÉ 6 MESES	6 A 12 MESES	APÓS 12 MESES
Piezômetro na fundação	2 leituras diárias	3 leituras semanais	Semanal	Quinzenal
Piezômetro no maciço compactado	2 leituras diárias	3 leituras semanais	Semanal	Quinzenal
Marco superficial.	2 leituras diárias	3 leituras semanais	Quinzenal	Mensal

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Após 1 ano de operação, como não foi registrado comportamento anômalo quanto à estabilidade da barragem, as leituras de piezômetros e indicadores de nível d'água passaram à frequência mensal e dos marcos superficiais para frequência semestral.

3.3.3. Seções Instrumentadas

A simbologia utilizada nas seções para identificação dos instrumentos é indicada na Figura 28.

FIGURA 28 – Legenda utilizadas nos projetos de instrumentação desta UHE

LEGENDA		
PLANTA	SEÇÃO	INSTRUMENTO
		PZE-Nº – PIEZÔMETRO ELÉTRICO
		PZA-Nº – PIEZÔMETRO DE TUBO ABERTO
		MS-Nº – MARCO SUPERFICIAL
	-	RN-Nº – REFERÊNCIA DE NÍVEL
	-	INA-Nº – INDICADOR DE NÍVEL D'ÁGUA
	-	TL-Nº – TERMINAL DE LEITURA DOS PZE'S
		CABOS DOS PZE'S

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

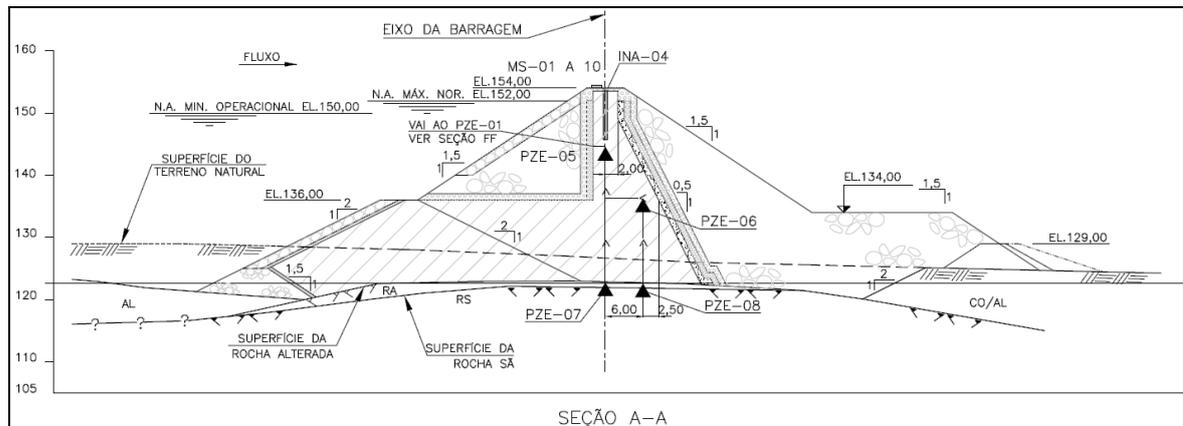
A seguir são apresentadas as seções instrumentadas, com a ilustração da seção da barragem e das informações sobre os instrumentos instalados em cada uma delas.

Seção instrumentada A-A

Os instrumentos desta seção são os indicados no Quadro 03. A Figura 29 é uma representação da seção A-A.

QUADRO 03 – Instrumentação na seção A-A

Instrumento	Cota de instalação (m)	Localização	Grupo
PZE-05	144,60	solo compactado	2
PZE-06	136,22	solo compactado	2
PZE-07	122,77	topo rochoso	2
PZE-08	122,56	topo rochoso	2
INA-04	143,91	solo compactado	*

FIGURA 29 – Seção instrumentada A-A

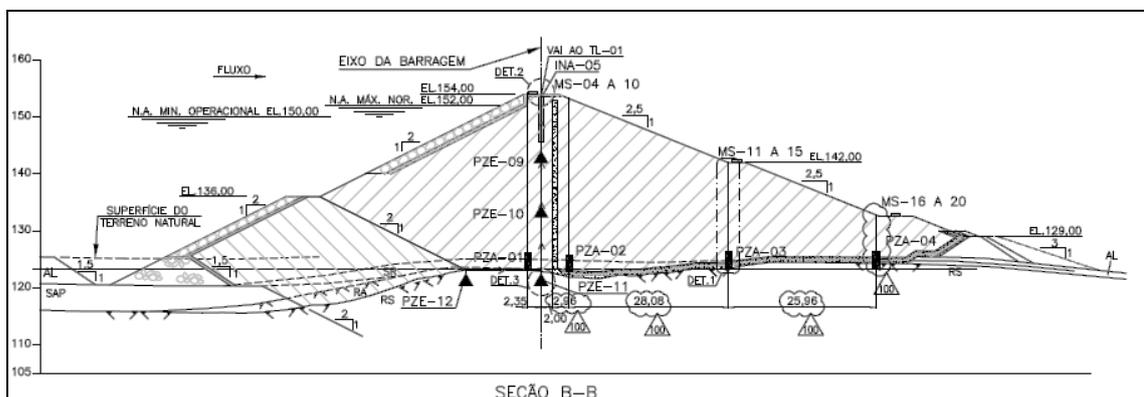
FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Seção instrumentada B-B

A seção B-B tem seus instrumentos indicados no Quadro 04. A Figura 30 é uma representação da seção B-B, em análise.

QUADRO 04 – Instrumentação na seção B-B

Instrumento	Cota de instalação (m)	Localização	Grupo
PZE-09	144,10	solo compactado	2
PZE-10	134,54	solo compactado	2
PZE-11	122,56	topo rochoso	2
PZE-12	122,56	topo rochoso	2
PZA-01	123,10	topo rochoso	2
PZA-02	122,87	Filtro	1
PZA-03	123,40	Filtro	1
PZA-04	123,39	Filtro	1
INA-05	144,06	solo compactado	*

FIGURA 30 – Seção instrumentada B-B

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

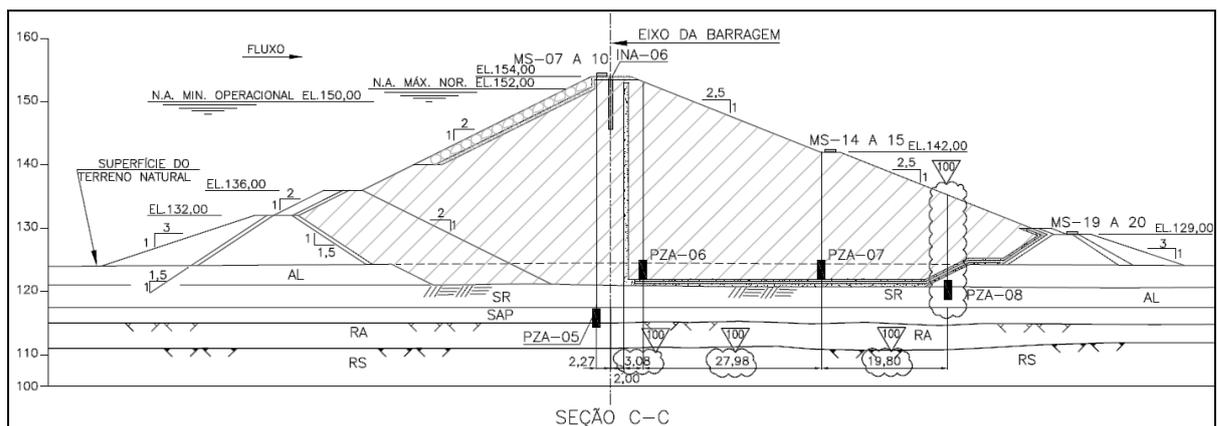
Seção instrumentada C-C

Os instrumentos são apresentados no Quadro 05 e representados na Figura 31.

QUADRO 05 – Instrumentação na seção C-C

Instrumento	Cota de instalação (m)	Localização	Grupo
PZA-05	114,34	topo rochoso	2
PZA-06	121,91	Filtro	1
PZA-07	121,44	Filtro	1
PZA-08	118,77	saprolito fundação	1
INA-06	142,96	solo compactado	*

FIGURA 31 – Seção instrumentada C-C



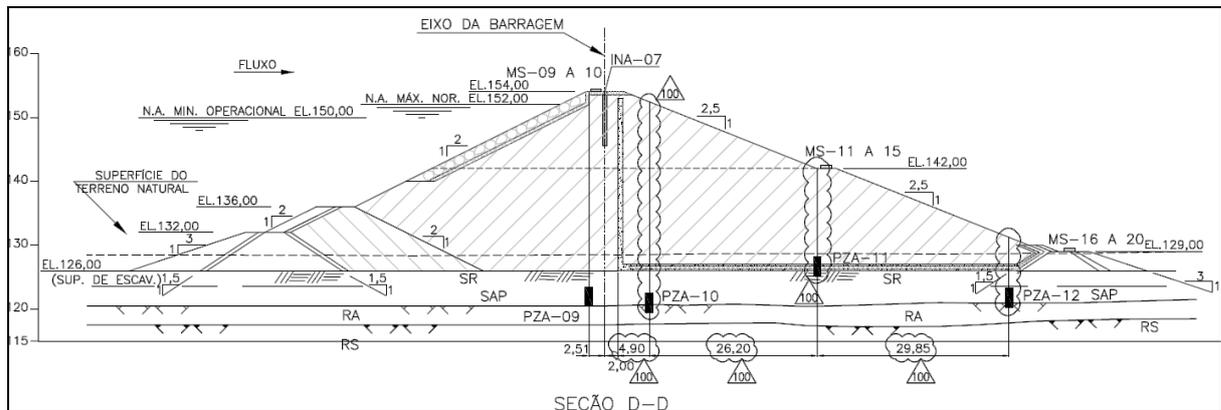
FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Seção instrumentada D-D

Os instrumentos são apresentados no QUADRO 06 e representados na FIGURA 32.

QUADRO 06 – Instrumentação na seção D-D

Instrumento	Cota de instalação (m)	Localização	Grupo
PZA-09	120,43	topo rochoso	2
PZA-10	119,48	Fundação	1
PZA-11	125,20	Filtro	1
PZA-12	120,28	Saprolito	1
INA-07	143,26	solo compactado	*

FIGURA 32 – Seção instrumentada D-D

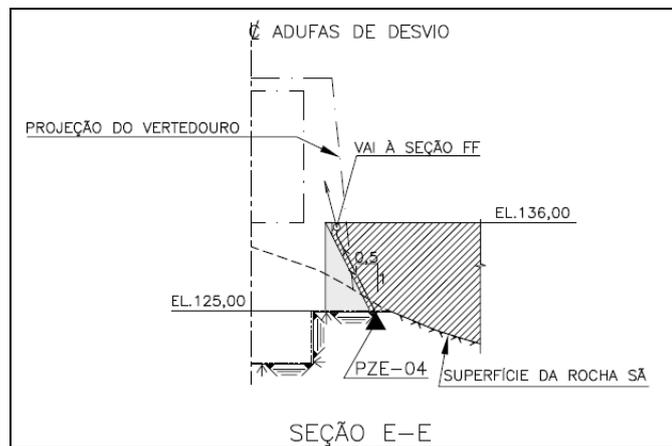
FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Seção instrumentada E-E

O instrumento é apresentado no Quadro 07 e representado na Figura 33.

QUADRO 07 – Instrumentação na seção E-E

Instrumento	Cota de instalação (m)	Localização	Grupo
PZE-04	124,80	contato das estruturas	2

FIGURA 33 – Seção instrumentada E-E

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

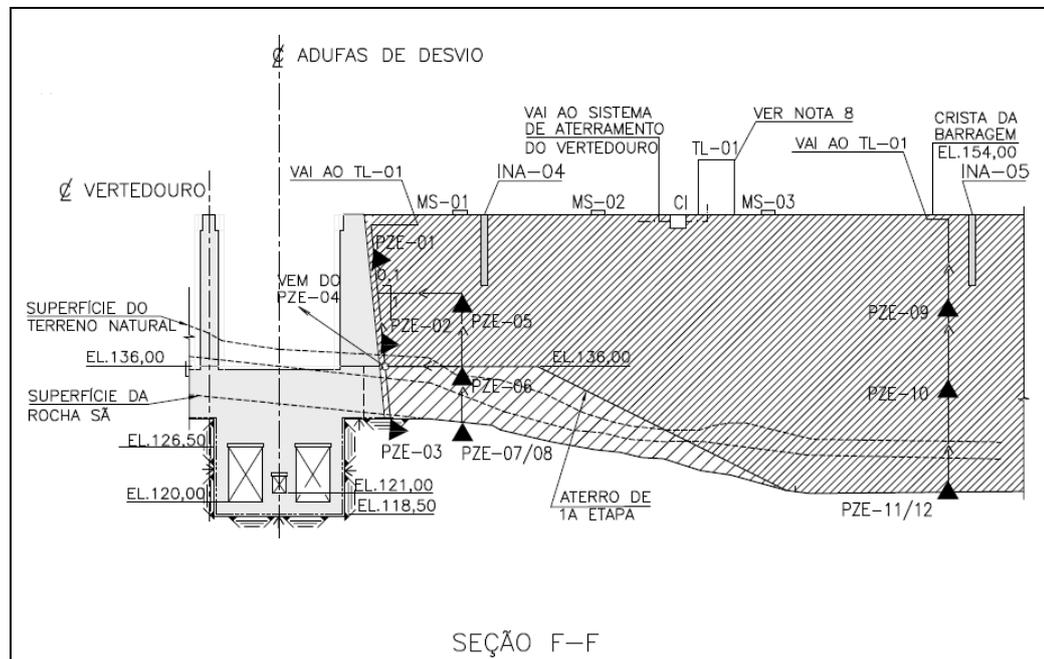
Seção instrumentada F-F

Os instrumentos dessa seção estão no Quadro 08 e a representação na Figura 10.

QUADRO 08 – Instrumentação na seção F-F

Instrumento	Cota de instalação (m)	Localização	Grupo
PZE-01	150,00	contato das estruturas	2
PZE-02	140,00	contato das estruturas	2
PZE-03	129,94	contato das estruturas	2

FIGURA 34 – Seção instrumentada F-F



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

4. RESULTADOS E ANÁLISES DOS DADOS DA INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo é apresentada a análise da estabilidade da barragem em estudo, com base no histórico de dados dos instrumentos, confrontando estes dados com os valores limites indicados pela projetista.

4.1. Resultado dos Piezômetros de Tubo Aberto

A Tabela 05 indica os dados de instalação, os valores de referência e a última leitura de novembro de 2018 para os Piezômetros de Tubo aberto (PZA). Os valores indicados nesta tabela são os valores após a revisão da projetista, realizado em 2013.

TABELA 05 – Resumo dos dados dos PZA e leitura atual

PZA	Localização	Cota de Instalação (m)	Valores Limites El. (m)		Leitura atual El. (m)
			Alerta	Crítico	
PZA-01	Topo rochoso	123,1	*	*	134,37
PZA-02	Filtro	122,87	136,50	140,00	126,28
PZA-03	Filtro	123,4	132,50	135,00	126,59
PZA-04	Filtro	123,39	128,50	129,50	126,66
PZA-05	Topo rochoso	114,34	*	*	144,86
PZA-06	Filtro	121,91	127,50	138,00	126,53
PZA-07	Filtro	121,44	127,50	133,00	126,64
PZA-08	Topo rochoso	118,77	127,50	130,00	126,38
PZA-09	Topo rochoso	120,43	*	*	141,42
PZA-10	Topo rochoso	119,48	137,00	141,00	130,88
PZA-11	Filtro	125,2	133,00	135,50	128,01
PZA-12	Topo rochoso	120,28	128,50	129,50	127,81

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

Os instrumentos PZA-02, PZA-03, PZA-04, PZA-06, PZA-07, PZA-08, PZA-10, PZA-11 e PZA-12, instalados no tapete horizontal e fundação do aterro a jusante do filtro horizontal, que podem ser considerados indicadores diretos da condição de estabilidade do talude de jusante da barragem, operam dentro do limite estabelecido

pela projetista, dentro do limite normal, abaixo o valor de alerta.

Os limites inicialmente determinado em fase de projeto, foram calculados considerando a colmatação do sistema interno de drenagem, sendo conservadores, portanto. Há vários indícios de que o sistema de drenagem interno está funcionando adequadamente, como indicam as inspeções visuais e os dados dos instrumentos antes e após o filtro. Por este motivo, os PZA-01, PZA-05 e PZA-09 foram, na reavaliação da projetista em 2013, designados como instrumentos do Grupo 2, instrumentos cujo objetivo principal era avaliar o desempenho da barragem durante o enchimento do reservatório e sua avaliação nesta fase da operação deve auxiliar na interpretação do desempenho da barragem em análise global com os demais instrumentos.

O PZA-05 apresentou níveis crescentes até 2016 quando estabilizou em torno da El. 145,0 m e segue com registros de leitura estabilizados nesta cota até a data atual.

Os Gráficos de 01 a 12 apresentam o comportamento dos PZA. Nos instrumentos complementares, PZA-01, 05 e 09, foi mantida a linha de limite de monitoramento estabelecida em projeto para fins de comparação.

GRÁFICO 01 – PZA-01

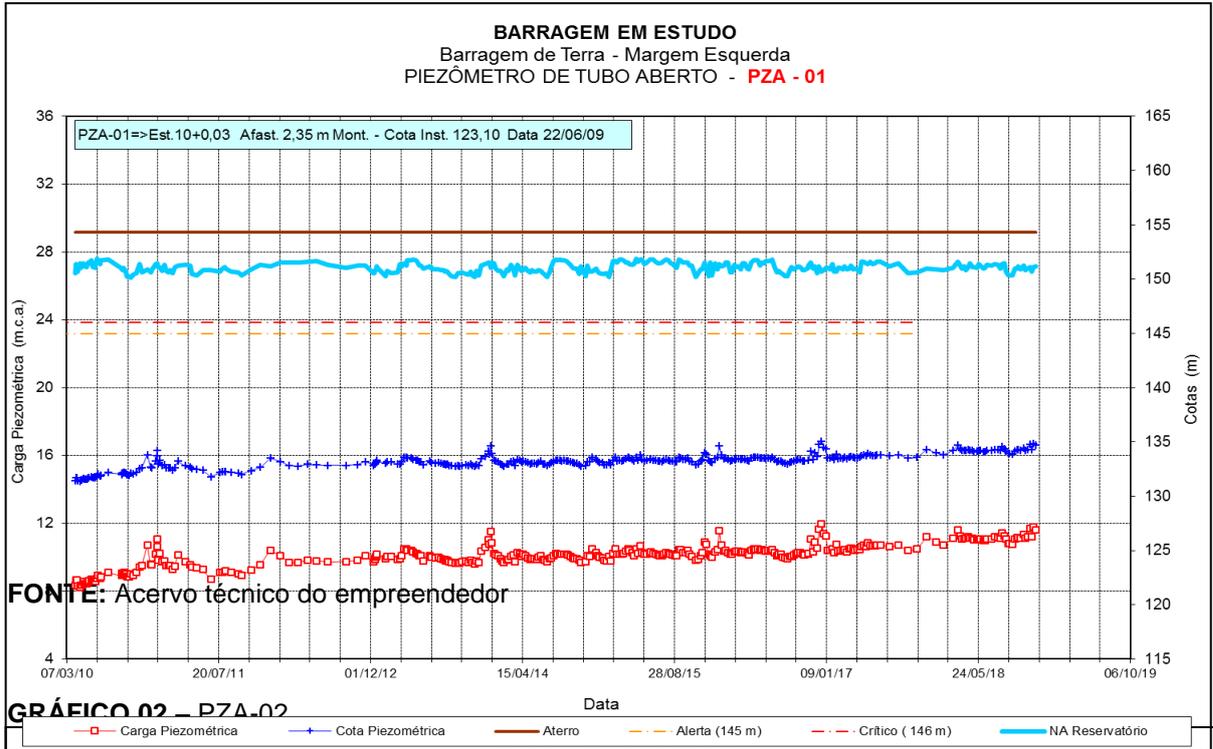


GRÁFICO 02 – PZA-02

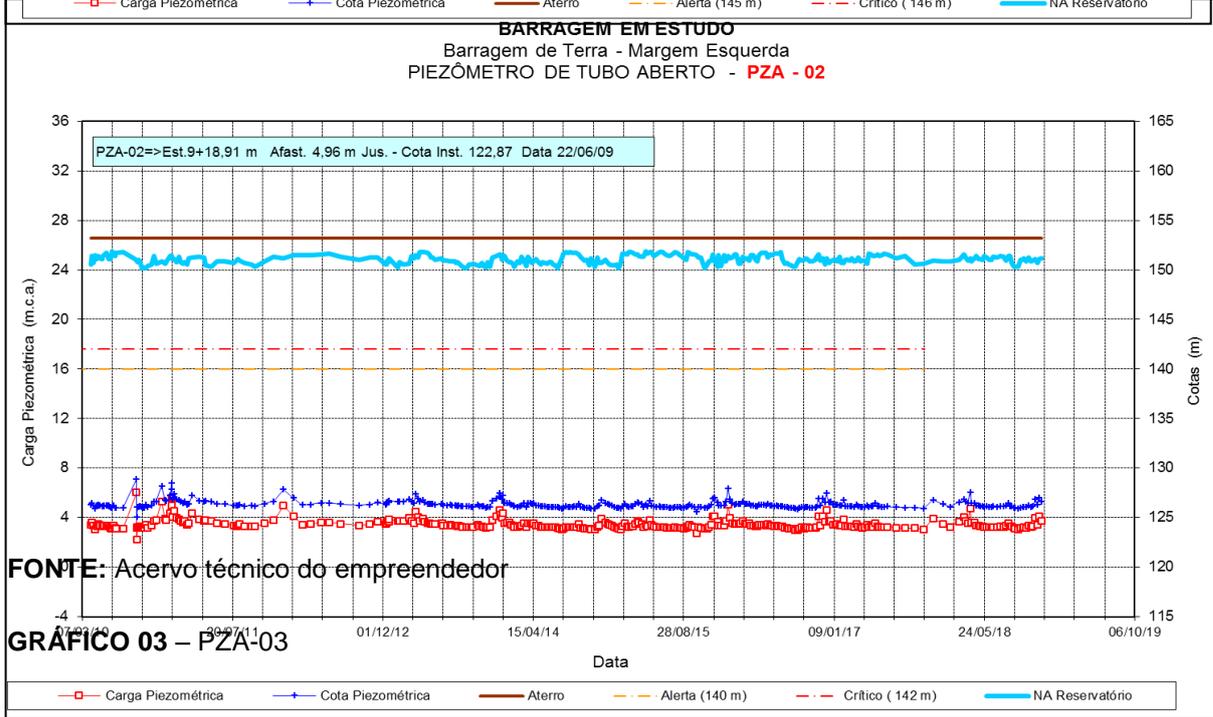
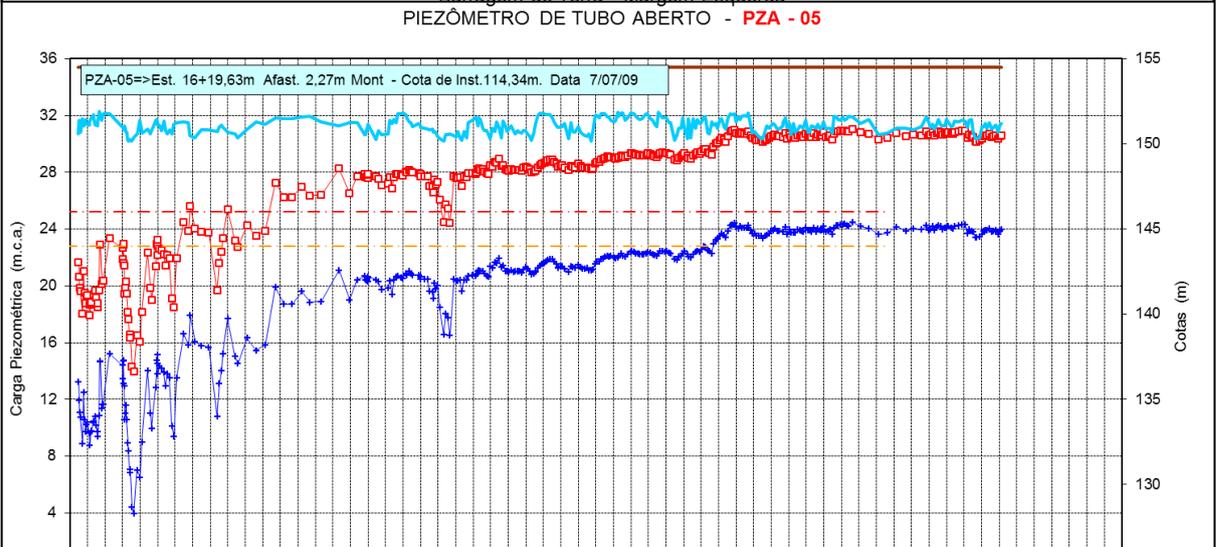
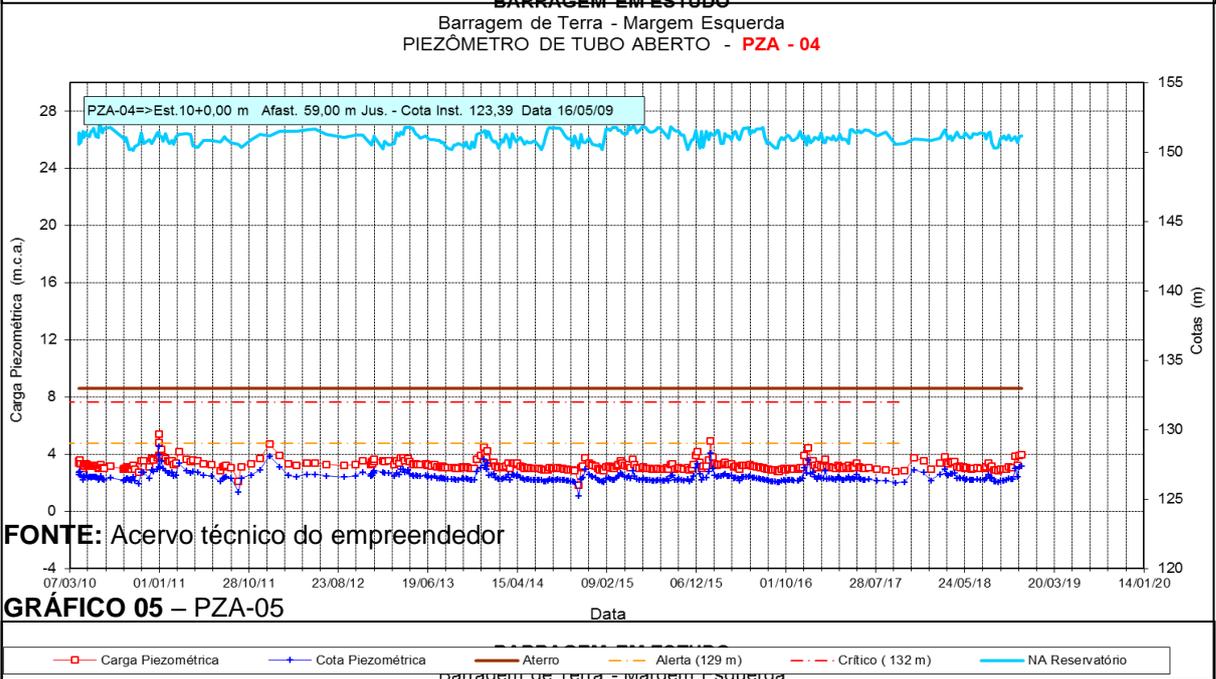
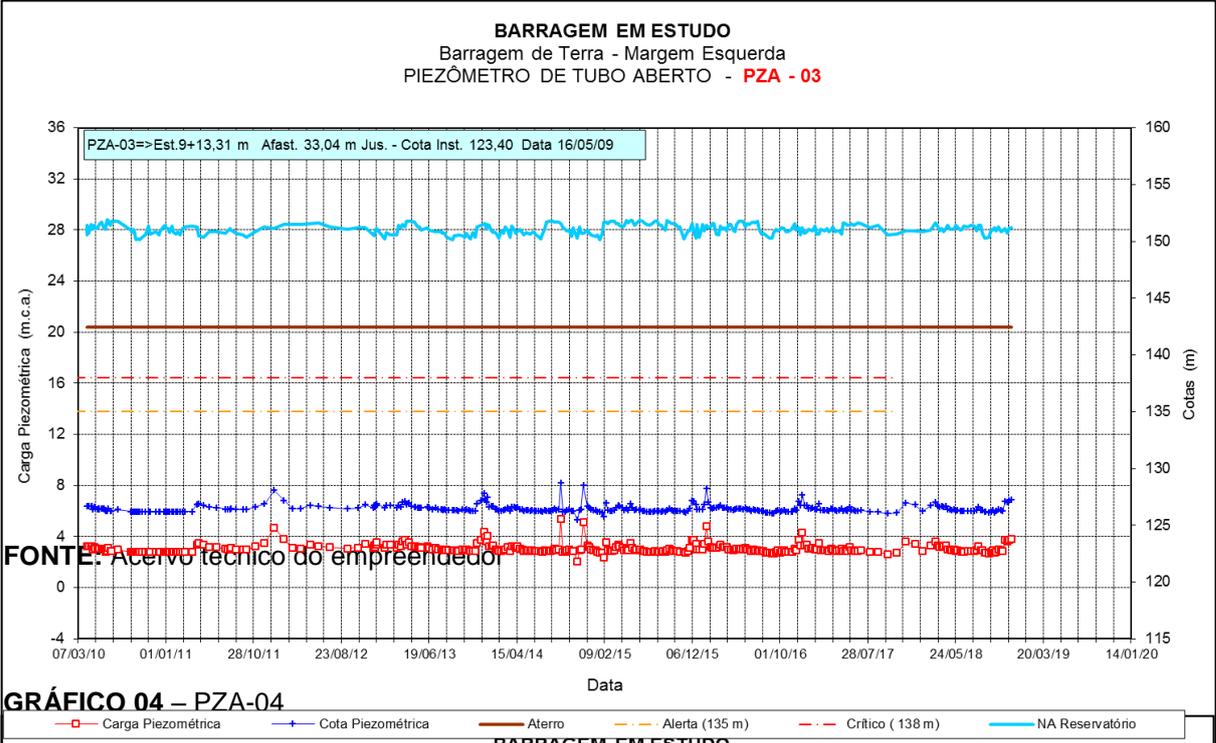


GRÁFICO 03 – PZA-03



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

GRÁFICO 06 – PZA-06

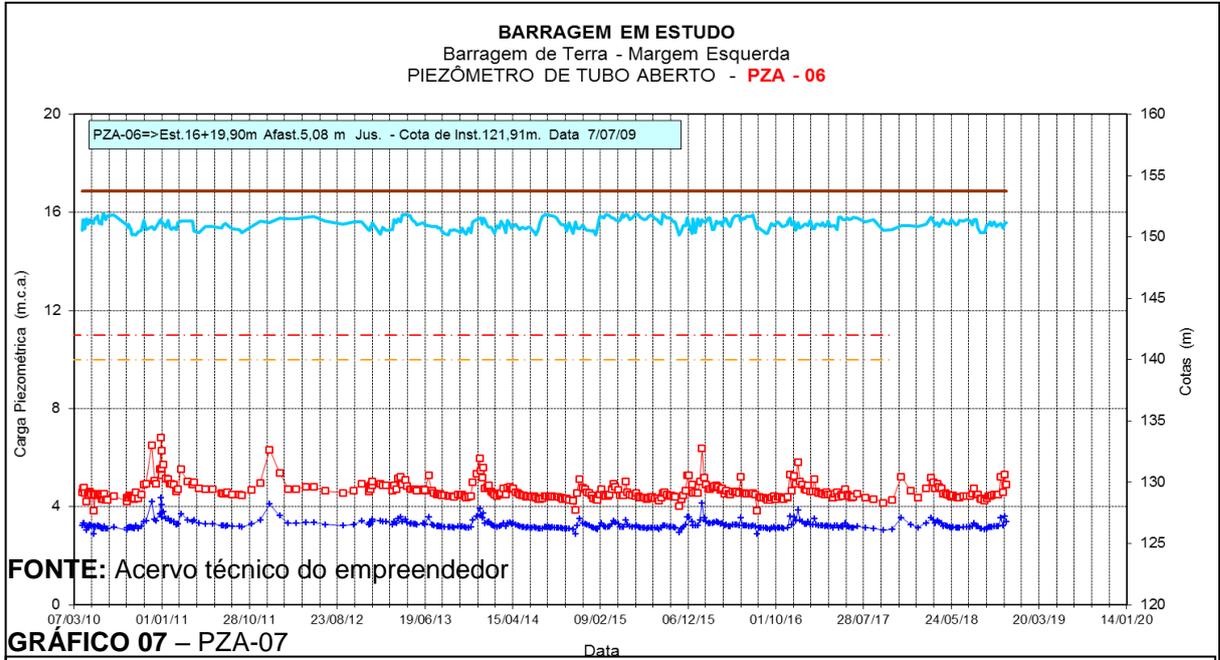


GRÁFICO 07 – PZA-07

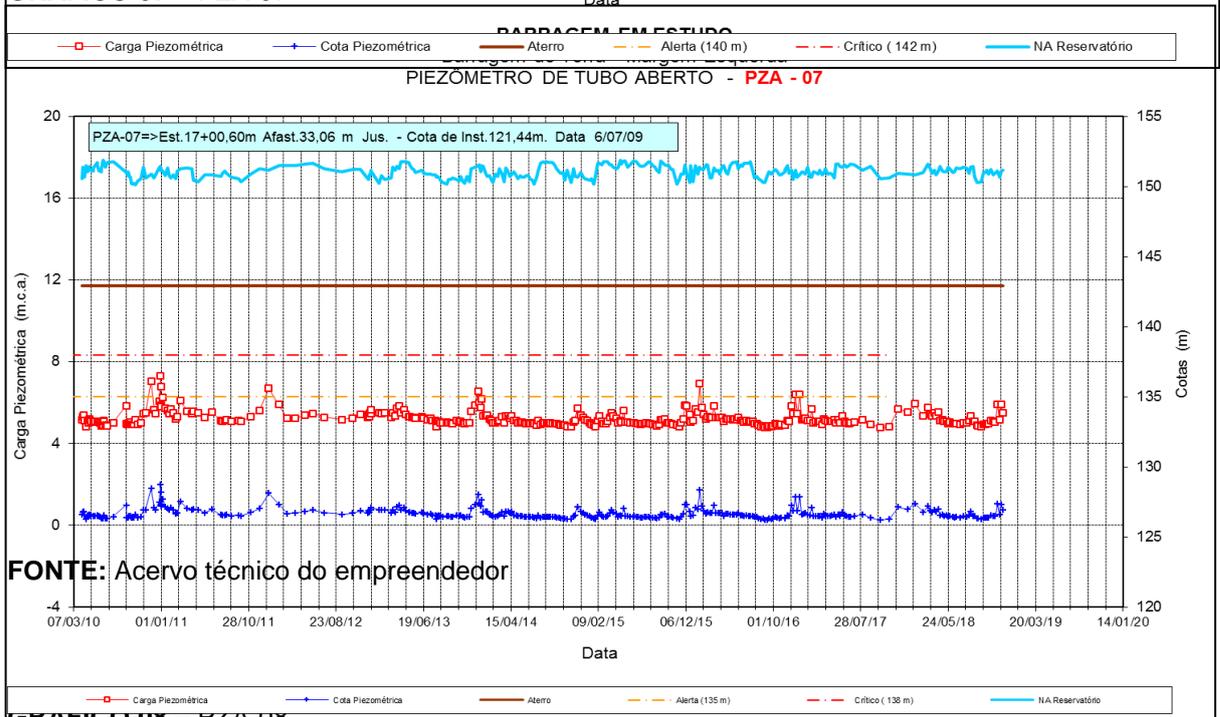
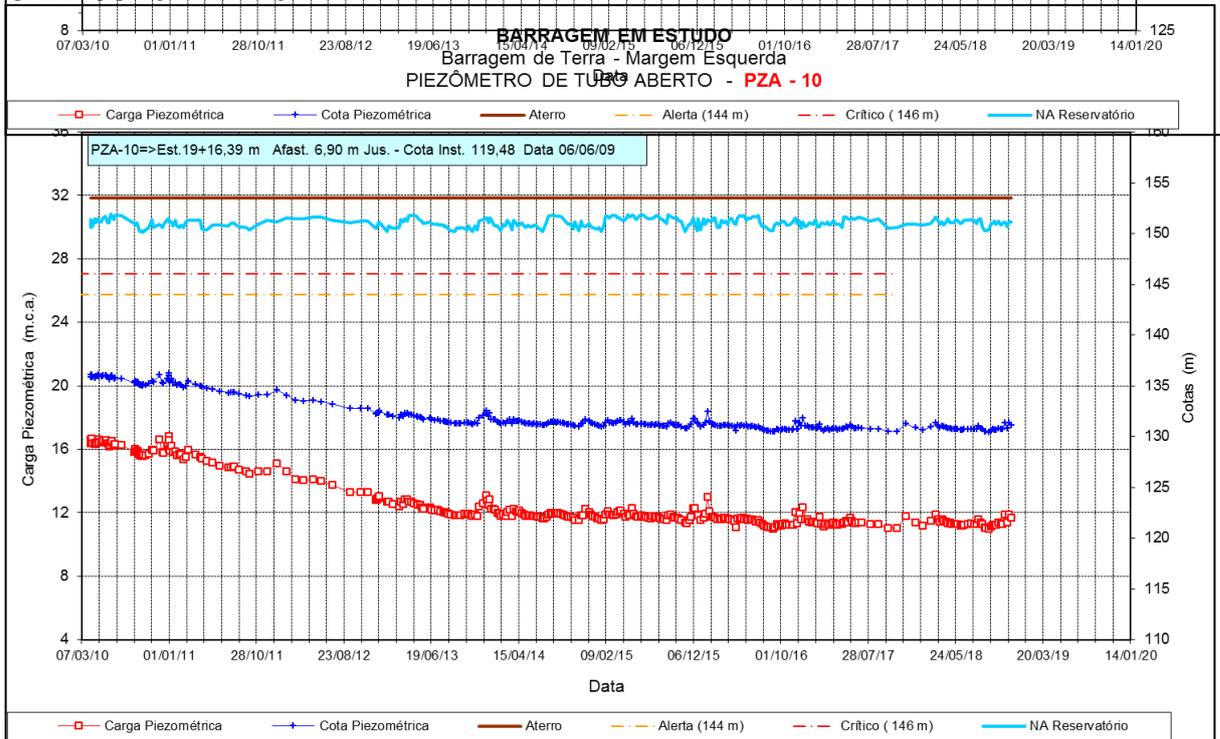
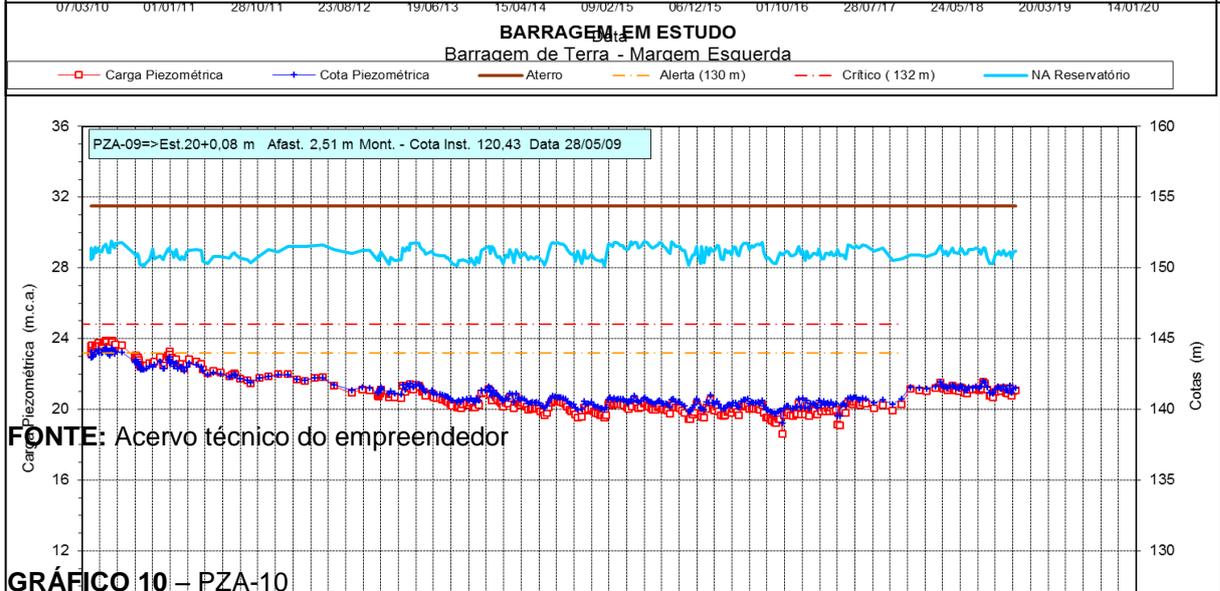
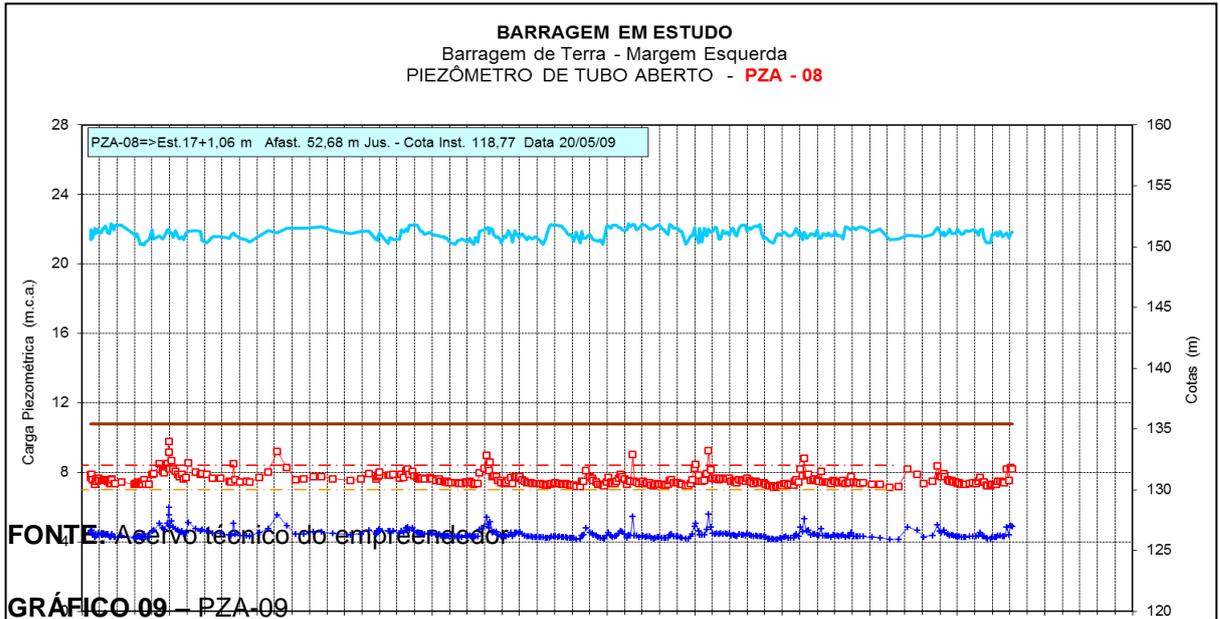
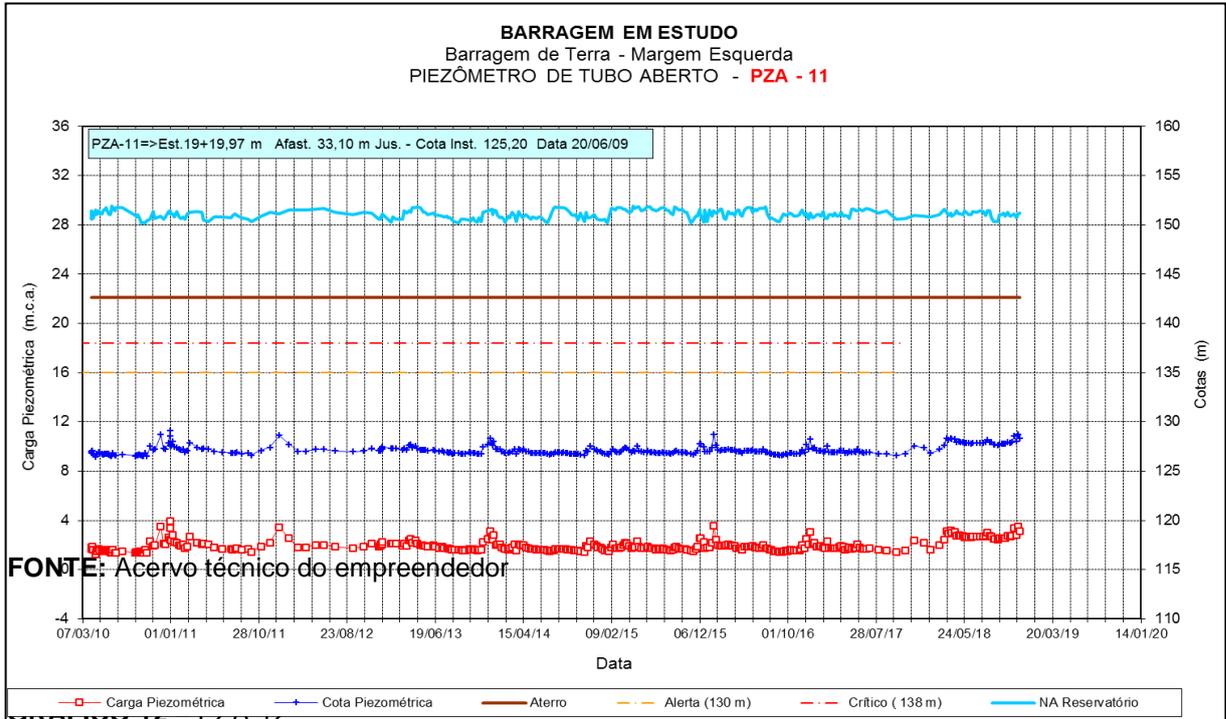


GRÁFICO 08 – PZA-08

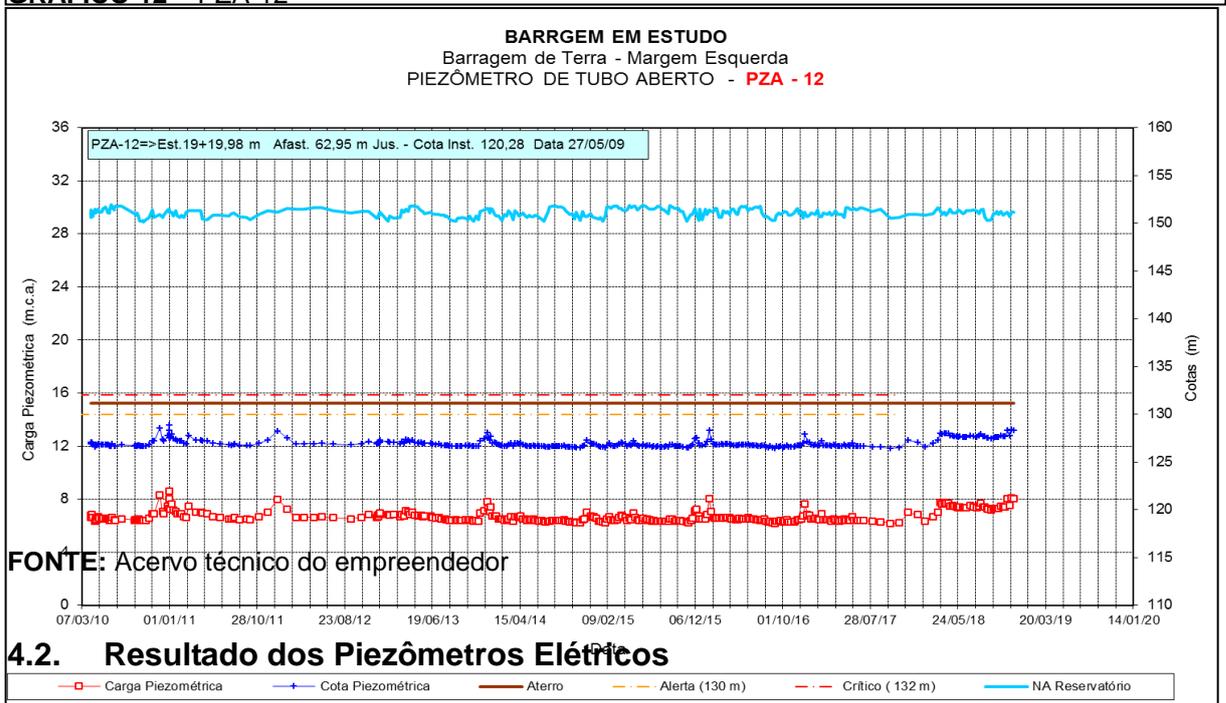


FONTE: Acervo técnico do empreendedor

GRÁFICO 11 – PZA-11



FONTE: Acervo técnico do empreendedor



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

4.2. Resultado dos Piezômetros Elétricos

A Tabela 06 indica os dados de instalação e a última leitura de novembro de 2018 para os Piezômetros Elétricos (PZE).

TABELA 06 – Resumo dos dados dos PZE e leitura atual

Instrumento	Localização (Projeto)	Cota de Instalação (Projeto) El. (m)	Leitura atual El. (m)
PZE			
01	Contato c/estr de concreto (*)	149,70	150,31
02	Contato c/estr de concreto (*)	140,00	146,05
03	Contato c/estr de concreto (*)	129,94	143,86
04	Contato c/estr de concreto (*)	124,80	148,67
05	Solo compactado	144,60	147,9
06	Solo compactado	136,22	142,27
07	Topo Rochoso	122,77	136,56
08	Topo Rochoso	122,56	135,49
09	Solo compactado	144,10	145,63
10	Solo compactado	134,54	139,92
11	Topo Rochoso	122,81	129,29
12	Topo Rochoso	122,60	140,53

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

As leituras do PZE-07 indicam uma elevação abrupta na pressão piezométrica entre os dias 13/11/2012 e 10/12/2012, da EL. 131,00m para EL.135,00m. após esta data, não houve registro de sobrelevação abrupta, mas sim, estabilização com pequena tendência de ganho de carga piezométrica nos últimos 5 anos. As leituras anteriores ao dia 10/12/2012 não representam a pressão neutra esperada nesta região, indicando um possível erro de leitura do instrumento.

O PZE-08, instalado a jusante do PZE-07, apresenta leituras estabilizadas logo após o enchimento do reservatório, indicando cota piezométrica na EL.132,00m, compatível com o esperado. A leitura do PZE-08 corrobora com a hipótese de erro nas leituras do PZE-07 anteriores ao dia 10/12/2012, pois estas indicariam um fluxo de jusante para montante, incompatível com o comportamento esperado. As leituras atuais do PZE-07 indicam nível piezométrico compatível com o esperado.

Na reavaliação da instrumentação, realizada pela projetista em 2013, foi indicada a análise dos piezômetros elétricos como instrumentos complementares, tal como feito para os PZA-01, 05 e 09. Desta forma, os PZE-01, PZE-02, PZE-03, PZE-04, PZE-05, PZE-06, PZE-07, PZE-08, PZE-09, PZE-10, PZE-11 e PZE-12, todos instalados a montante do filtro vertical, no aterro compactado e na fundação, optou-se por monitorar a evolução das leituras ao longo do tempo.

Abaixo são apresentados graficamente os resultados dos piezômetros elétricos –

Gráficos 13 a 23. Embora após esta análise da projetista, os limites estipulados na fase de projeto não sejam mais usados na análise, manteve-se a plotagem dos limites para fim comparativo.

GRÁFICO 13 – PZE-01

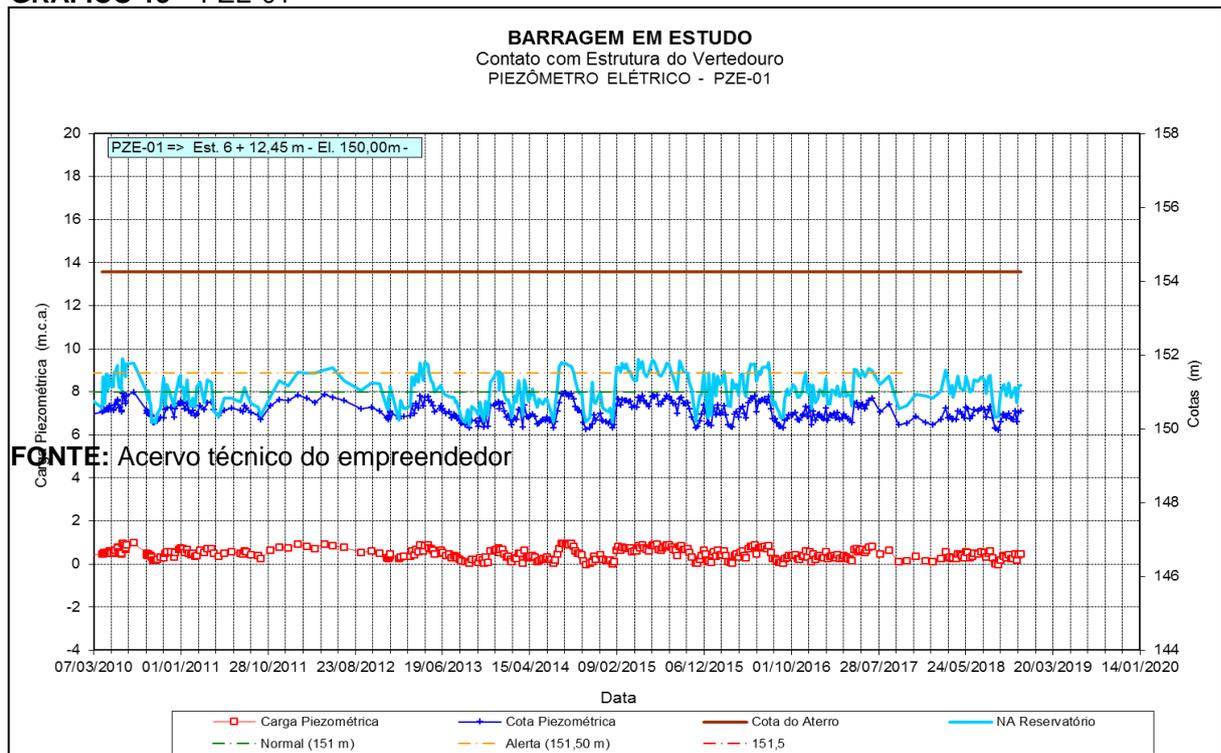


GRÁFICO 14 – PZE-02

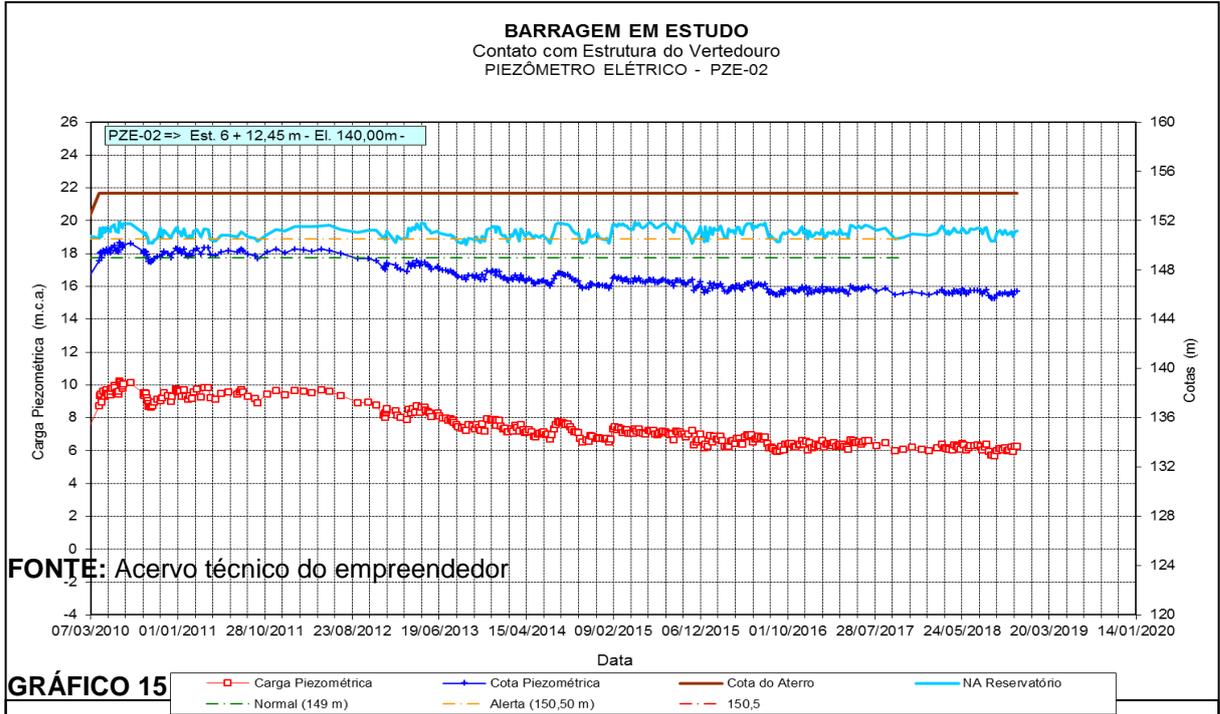


GRÁFICO 15

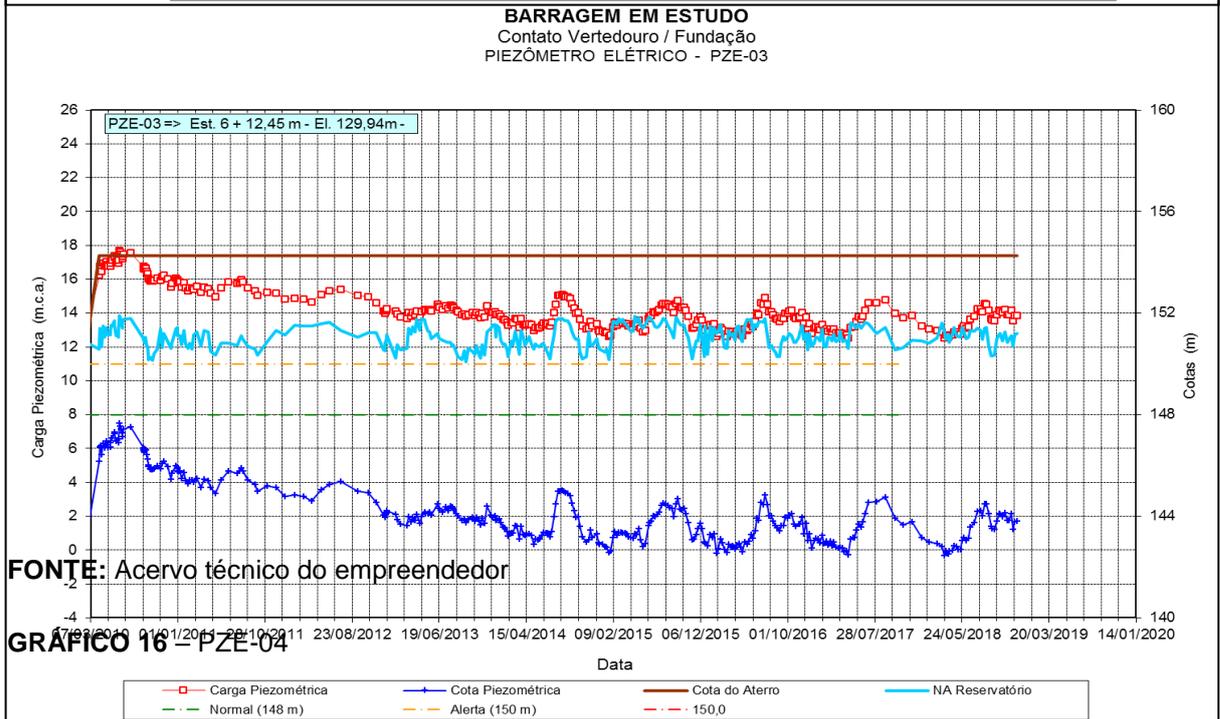


GRÁFICO 16 – PZE-04

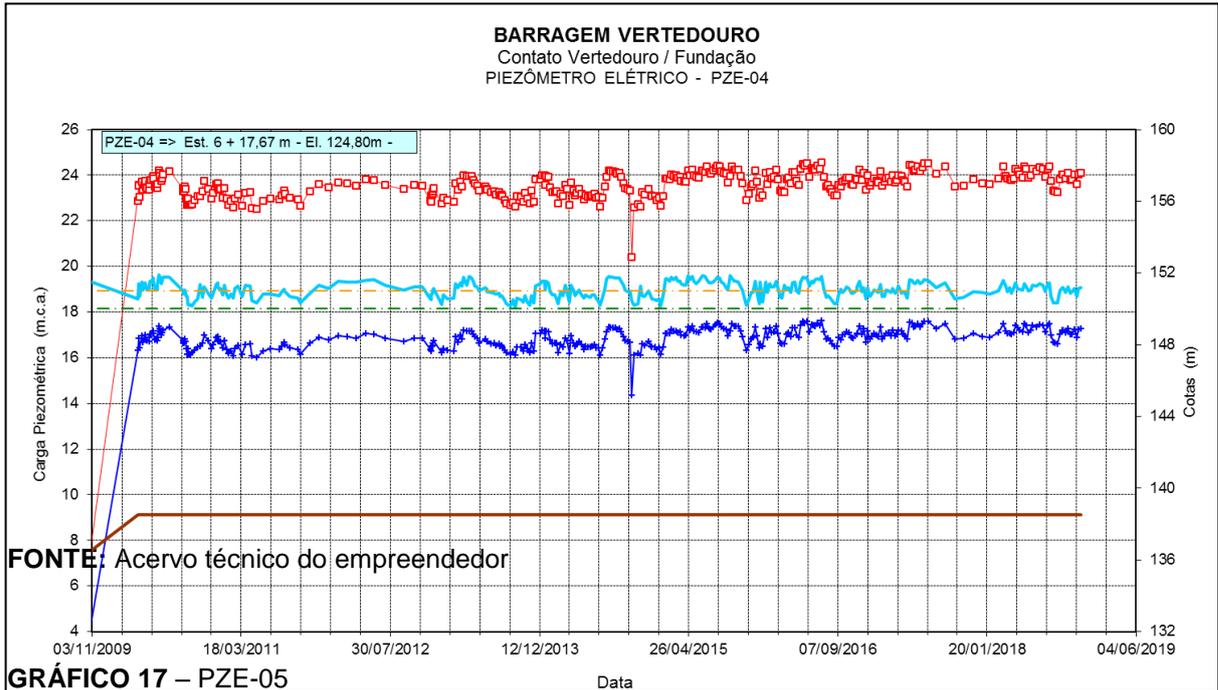


GRÁFICO 17 – PZE-05

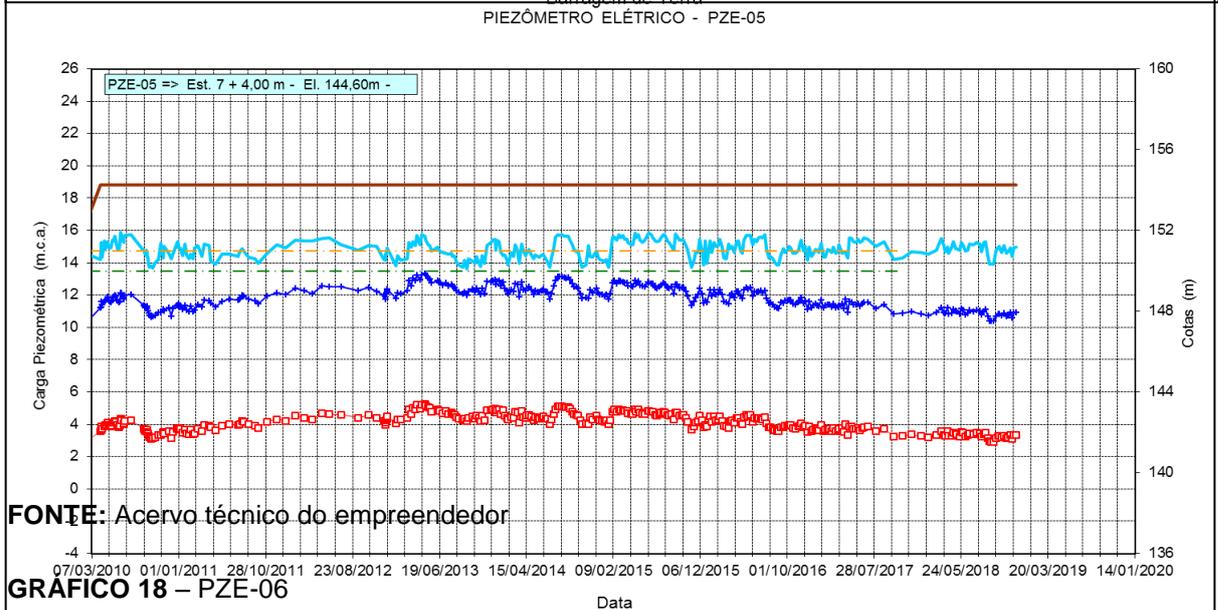
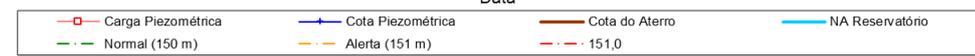
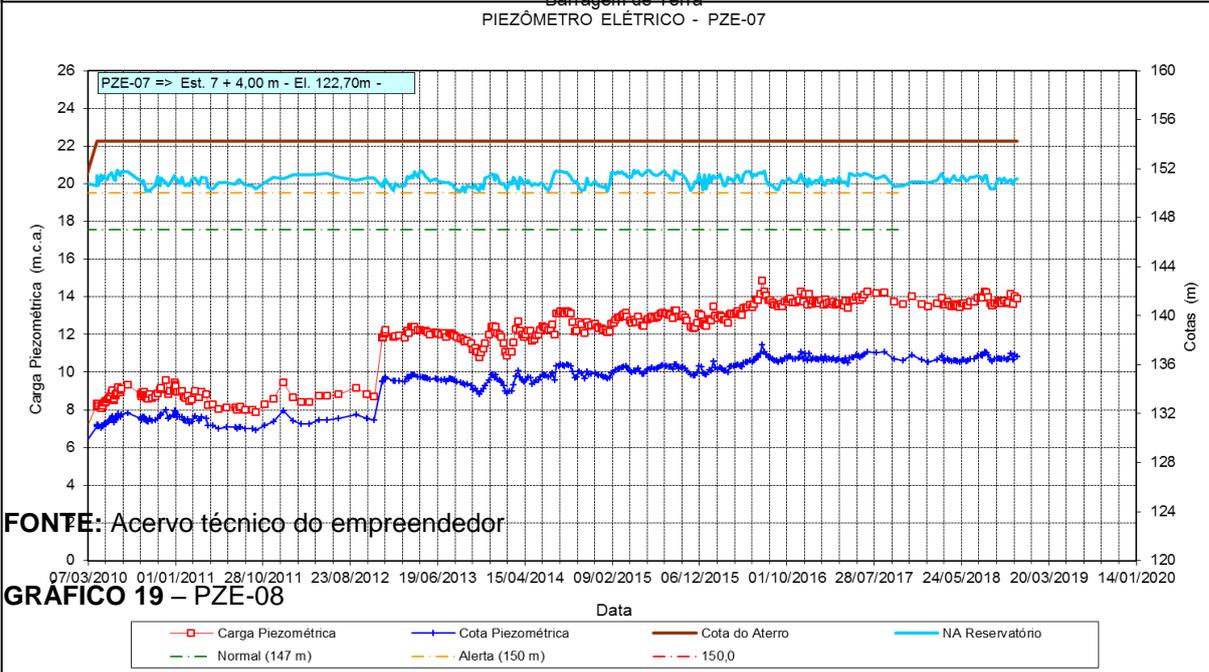
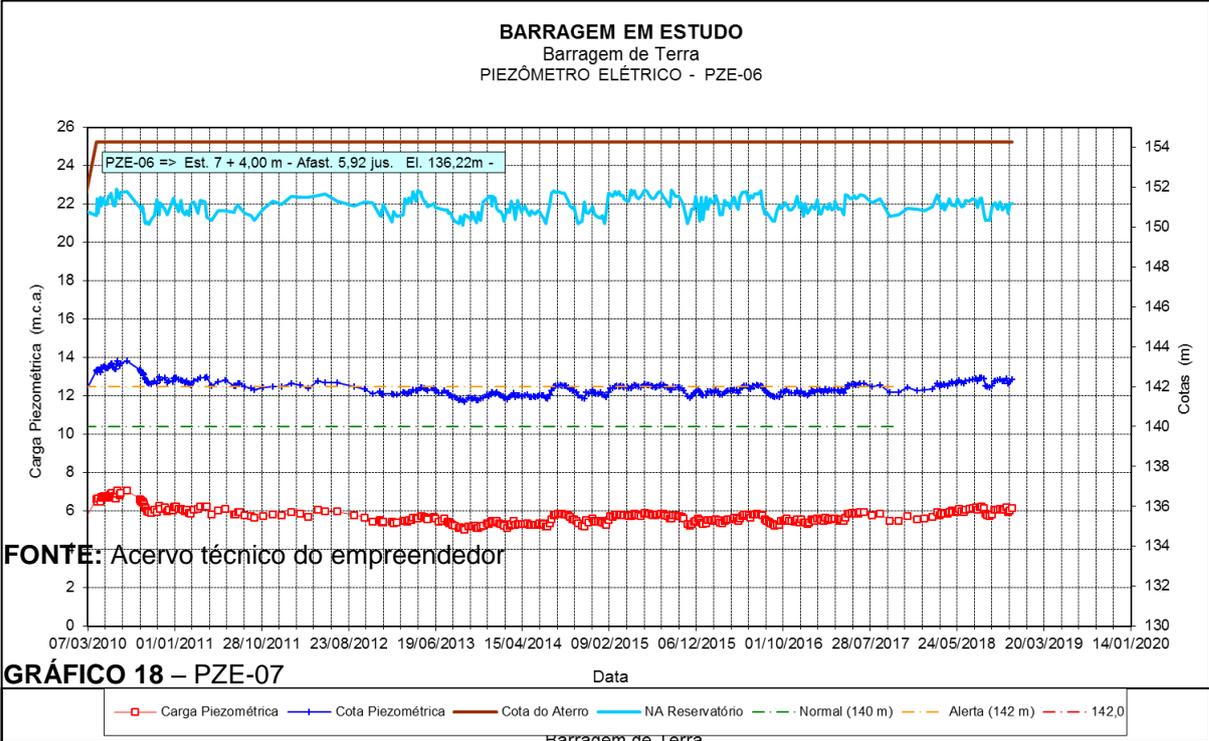
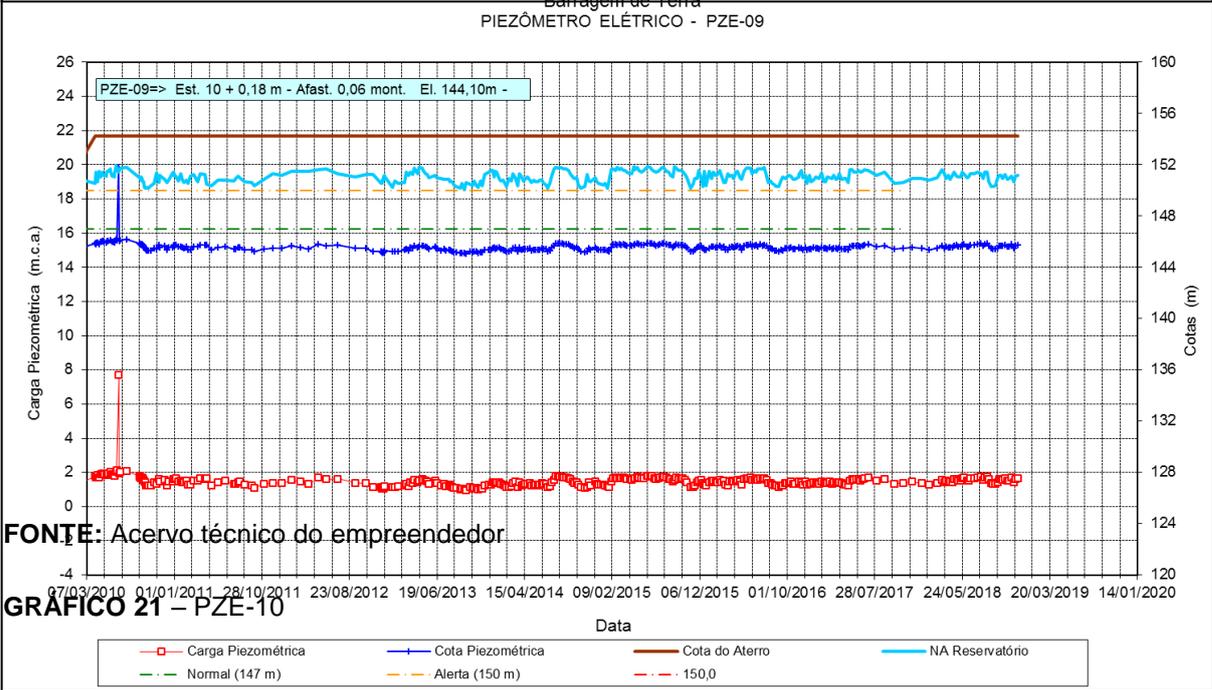
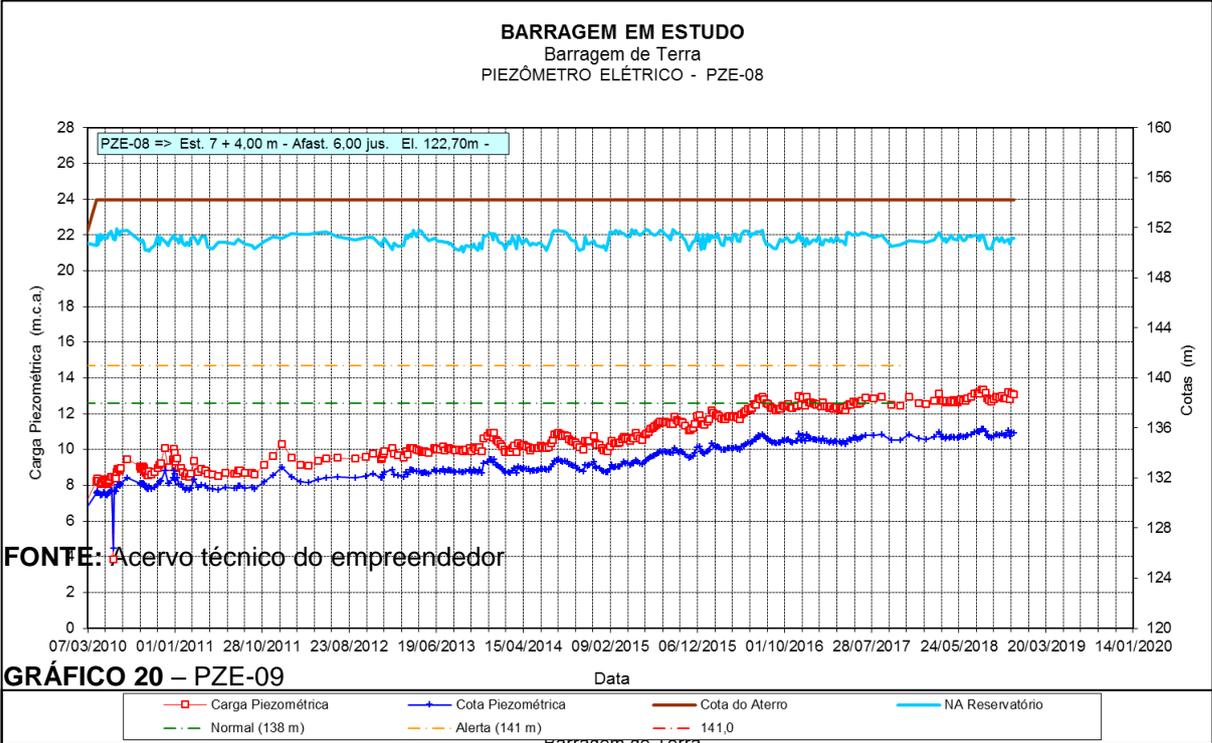


GRÁFICO 18 – PZE-06







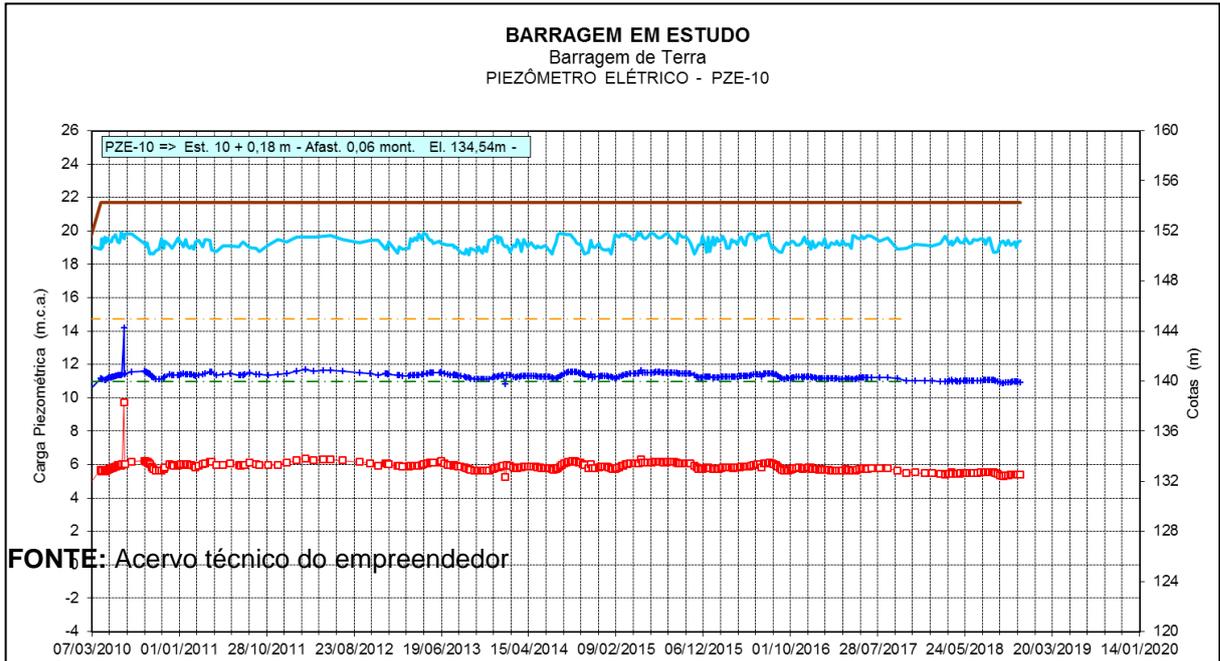


GRÁFICO 22 – PZE-11

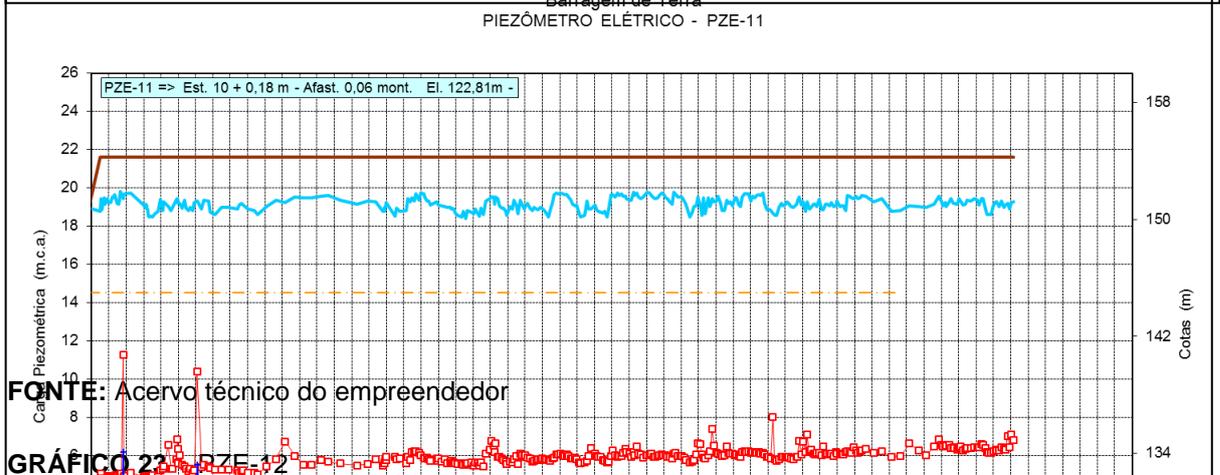
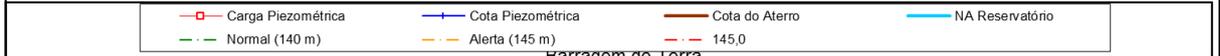
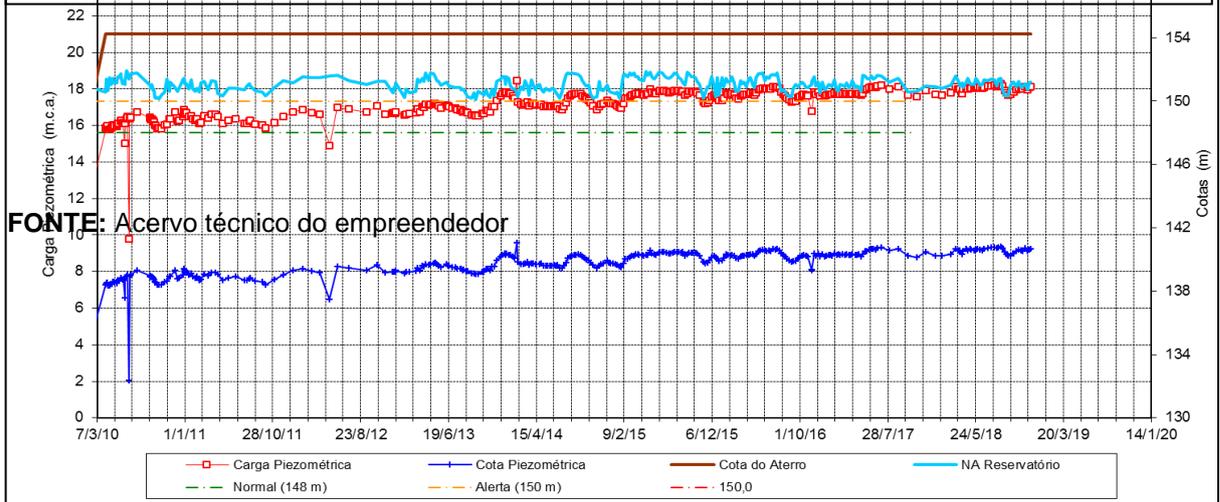
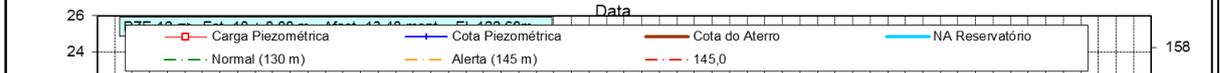
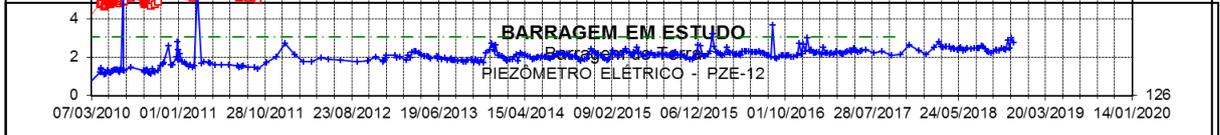


GRÁFICO 23 – PZE-12



4.3. Resultado dos Indicadores de Nível D'água

Estes instrumentos não possuem níveis de referência para monitoramento determinados pela projetista, sendo as suas leituras utilizadas na interpretação global da auscultação. A Tabela 07 apresenta o resumo dos dados dos INA.

TABELA 07 – Resumo dos dados de instalação dos INA

INSTRUMENTO	LOCALIZAÇÃO	COTA DE INSTALAÇÃO EL. (m)	DISTÂNCIA DO EIXO (m)
INA			
01	Ombreira esquerda	145,02	7,05
02	Ombreira esquerda	135,03	42,01
03	Ombreira esquerda	120,40	74,21
04	Núcleo barragem de enrocamento	143,91	-1,48
05	Maciço de solo compactado	144,06	0,04
06	Maciço de solo compactado	142,96	0,04
07	Maciço de solo compactado	143,26	0,04

FONTE: Acervo técnico do empreendedor

As leituras dos INA-01 e INA-02, instalados na ombreira esquerda apresentam leituras próximas da cota de instalação e não indicam variações significativas, portanto podem ser considerados secos. Apenas o INA-03, instalado na ombreira esquerda, respondeu ao enchimento do reservatório apresentando nível de água estabilizado em torno da EL.129,20 m, aproximadamente 3 metros acima do nível piezométrico registrado no filtro horizontal da barragem, indicando a contribuição de fluxo no sentido da ombreira para o filtro horizontal. O nível registrado no INA-03 pode estar relacionado com a camada de rocha alterada mais permeável interceptada por este instrumento. Há uma surgência de água no talude da ombreira, corroborando com a constatação de nível freático elevado nesta região.

As leituras dos demais INAs, instalados no eixo do barramento no maciço de solo compactado, mostram uma perda de carga de aproximadamente 5 mca em relação ao reservatório, indicando comportamento homogêneo e adequado do maciço de solo compactado. O nível d'água registrado no INA-04, próximo ao N.A. do reservatório, é compatível com o núcleo esbelto da barragem de enrocamento junto ao muro.

Os gráficos mostrados a seguir, 25 a representa os dados dos medidores de nível d'água numerados de INA-01 a INA-07.

GRÁFICO 25 – INA-01

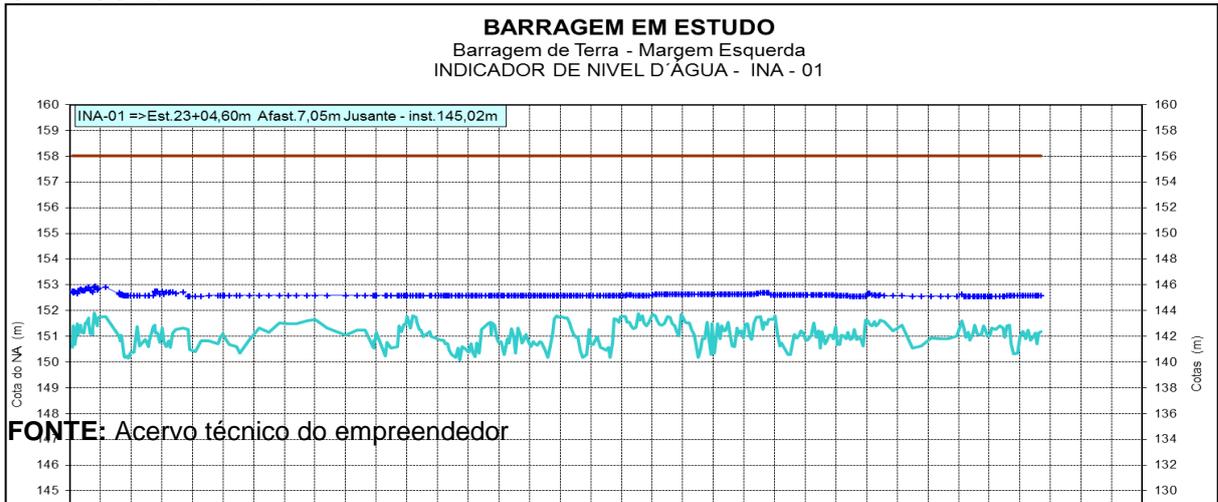


GRÁFICO 26 – INA-02

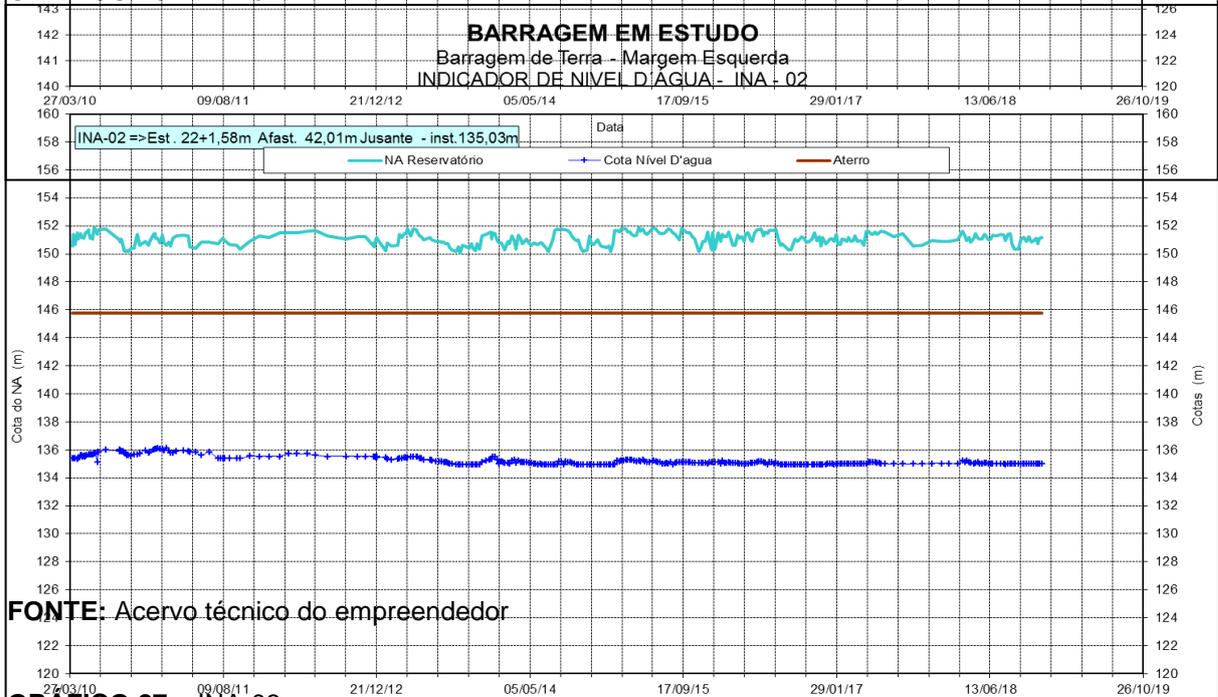
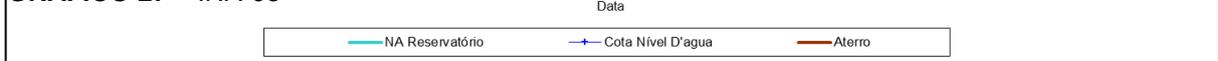
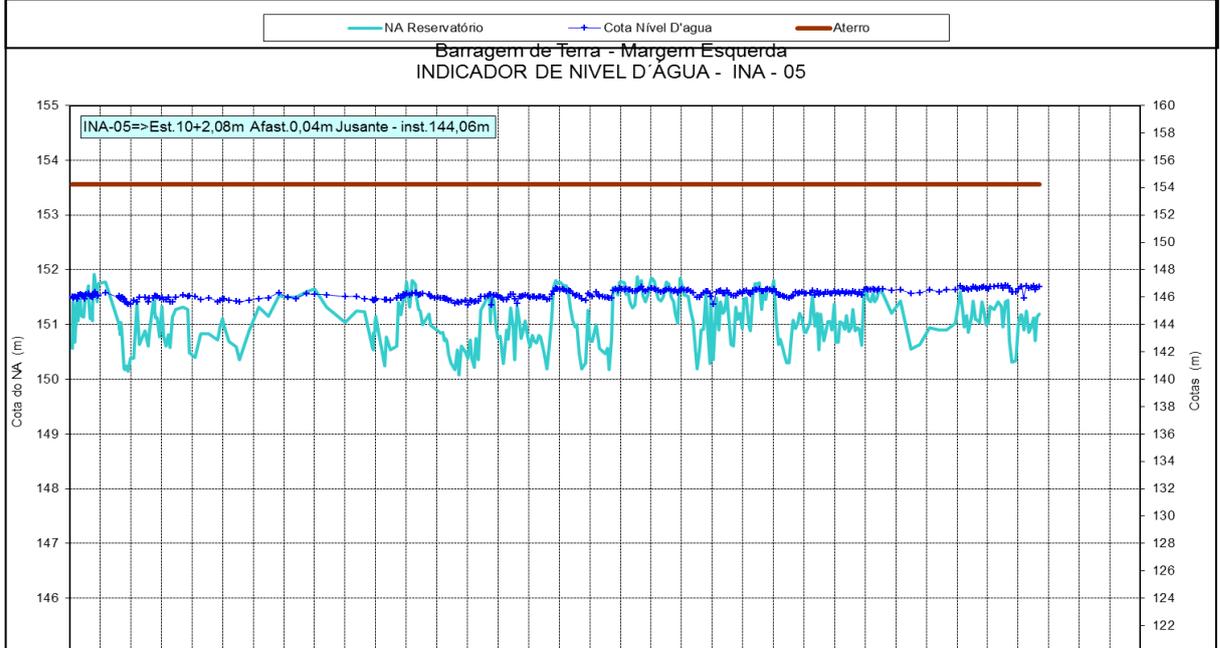
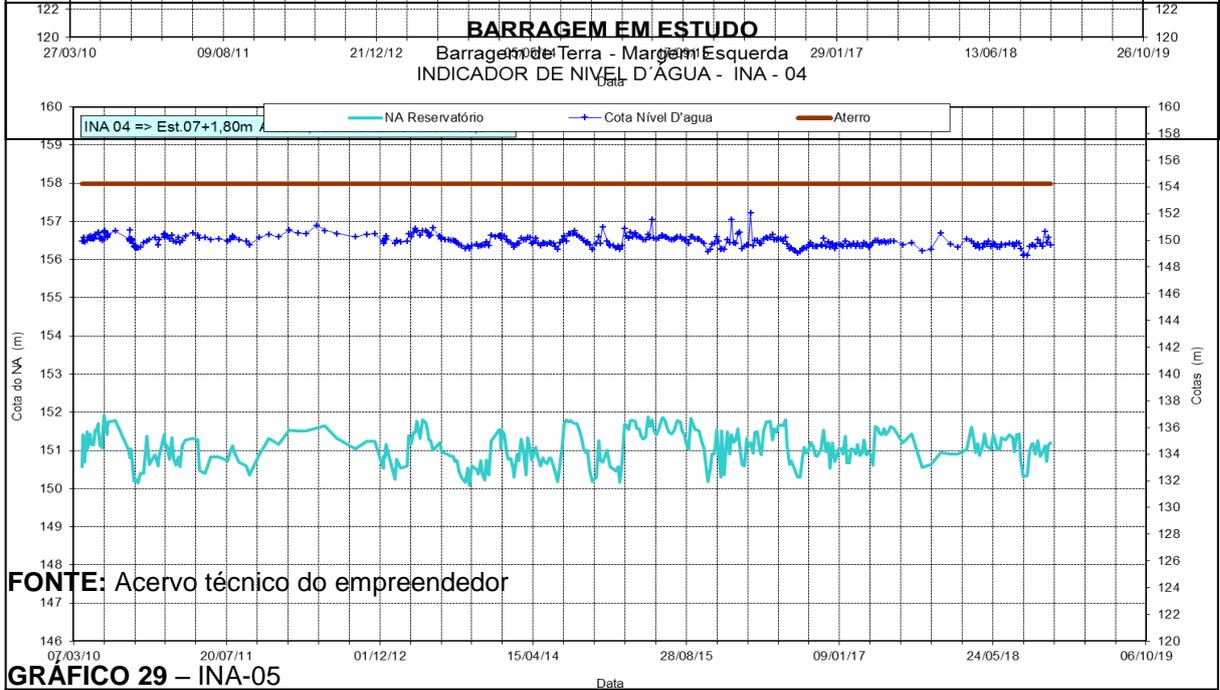
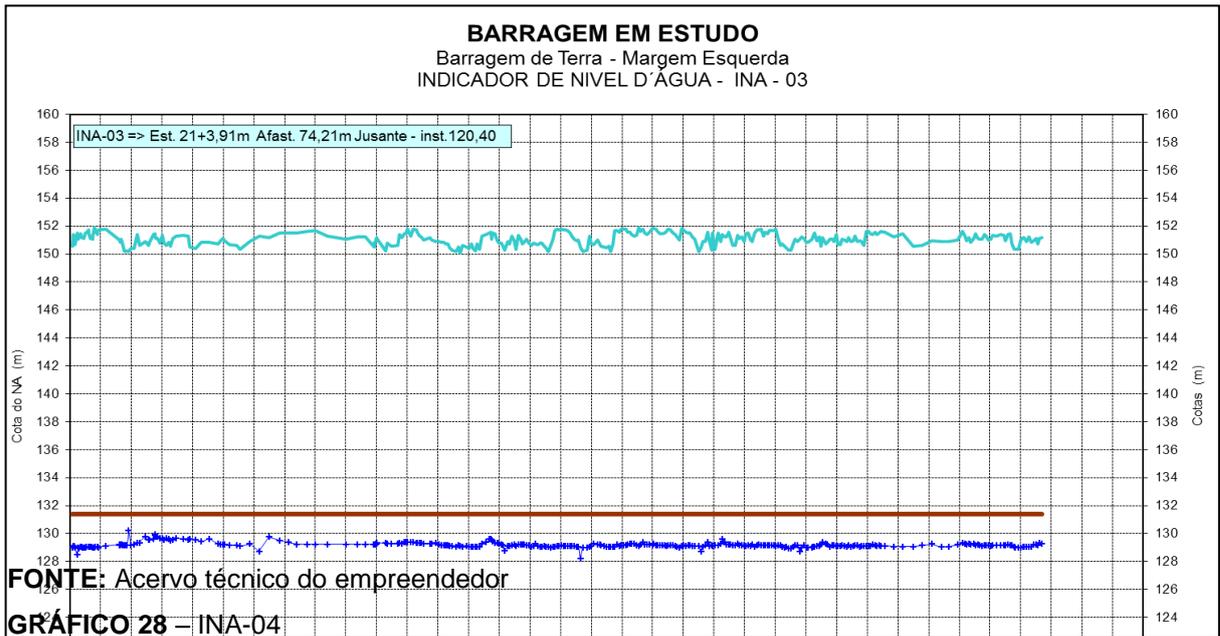


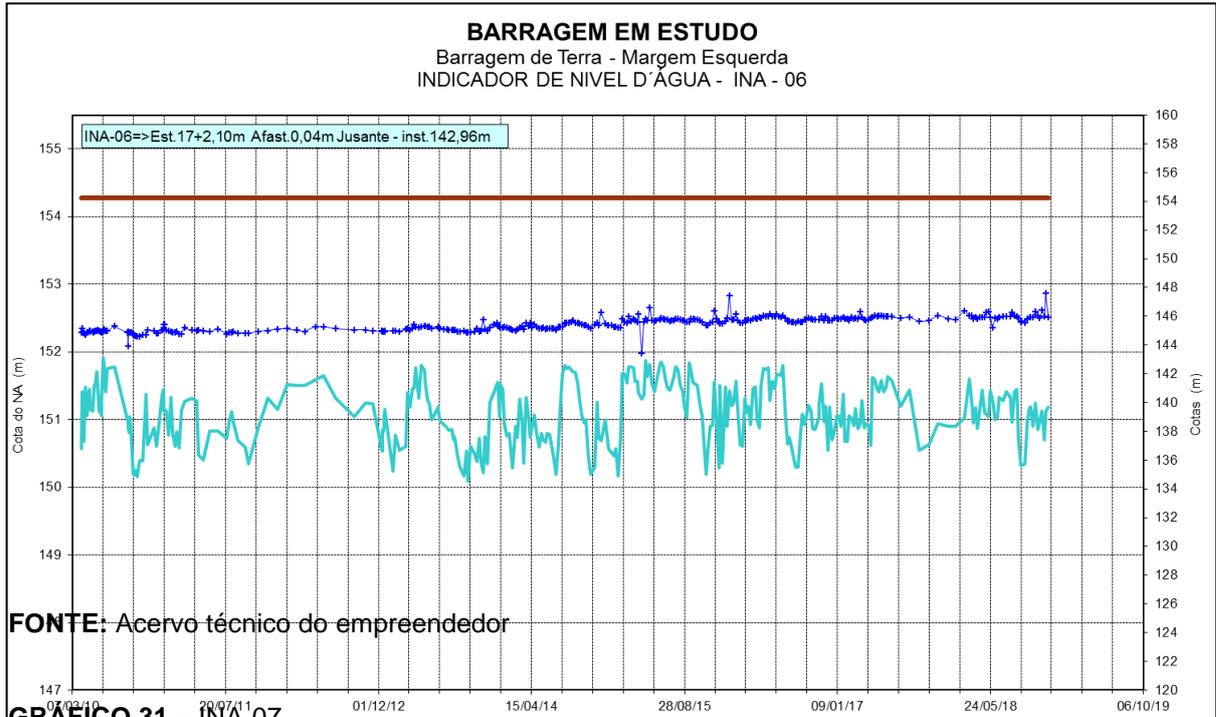
GRÁFICO 27 – INA-03





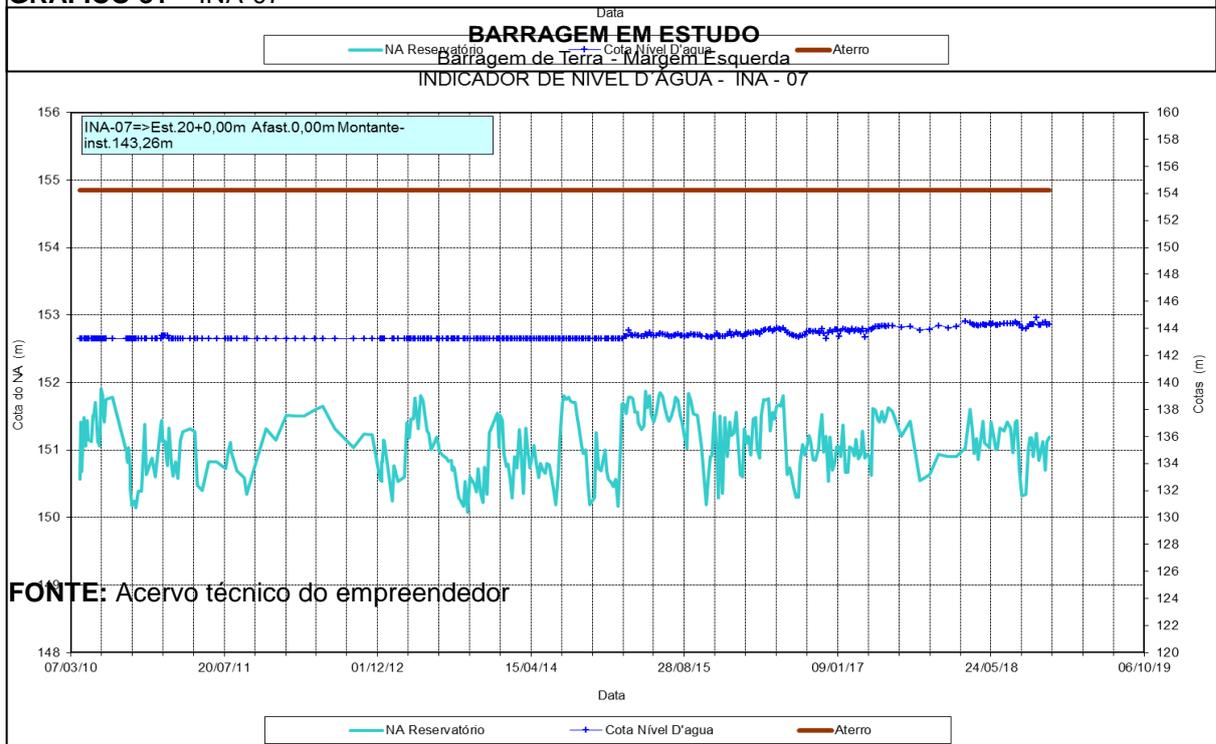
FONTE: Acervo técnico do empreendedor

GRÁFICO 30 – INA-06



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

GRÁFICO 31 – INA-07



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

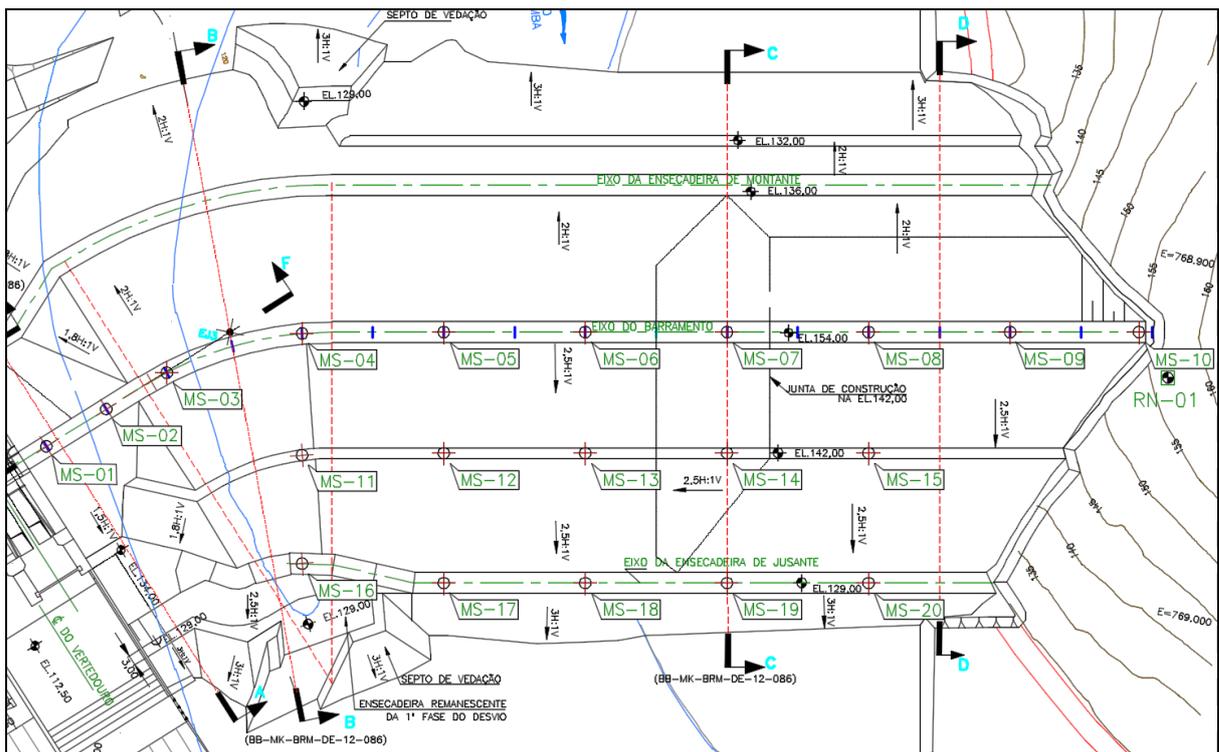
4.4. Resultado dos Marcos Superficiais

Há 20 marcos superficiais (MS) instalados na barragem em estudo entre crista, berma intermediária e berma inferior (eixo da ensecadeira de jusante - enrocamento lançado sobre fundação de solo residual / colúvio / aluvião).

A referência de nível, RN-01, está instalada na ombreira direita e permite a visada de todos MS's. O monitoramento é realizado a partir de nível topográfico da Leica Geosystems, Sprinter 100, por empresa terceirizada, especialista em serviços de topografia.

A Figura 35 indica a locação dos marcos superficiais por vista em planta da barragem deste empreendimento.

FIGURA 35 – Marcos superficiais em planta



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

A tabela 08 sumariza os valores de recalques limites indicados pela projetista e os valores registrados até o ano 2018.

TABELA 08 – Limites e dados dos marcos superficiais

MS	Cota Instalação E. (m)	Valores limites de recalque (cm)			Período 1		Período 2			Recalque total Período 1 + Período 2 (cm)	Recalque diferencial (cm)
		Normal	Alerta	Crítico	Última Leitura (m)	Recalque (cm)	Leitura zero para Período 2 (m)	Última Leitura (m)	Recalque (cm)		
		<i>Absoluto</i>	<i>Entre MS adj</i>			<i>Absoluto</i>			<i>Absoluto</i>		
1	153,93	14,17			153,809	-12,10	154,502	154,473	-2,90	-15,00	
2	153,94	16,37	4,00	40,00	153,824	-11,60	154,516	154,500	-1,60	-13,20	1,80
3	153,93	16,27	4,00	40,00	153,851	-7,90	154,538	154,517	-2,10	-10,00	3,20
4	153,98	14,99	4,00	40,00	153,899	-8,10	154,579	154,560	-1,90	-10,00	0,00
5	153,97	15,49	4,00	40,00	153,901	-6,90	154,598	154,568	-3,00	-9,90	0,10
6	153,95	16,68	4,00	40,00	153,877	-7,30	154,558	154,538	-2,00	-9,30	0,60
7	154,00	16,50	4,00	40,00	153,928	-7,20	154,613	154,581	-3,20	-10,40	-1,10
8	154,02	19,51	4,00	40,00	153,873	-14,70	154,550	154,506	-4,40	-19,10	-8,70
9	153,96	6,98	4,00	40,00	153,789	-17,10	154,471	154,398	-7,30	-24,40	-5,30
10	154,29	0,64	4,00	40,00	154,287	-0,30	154,974	154,968	-0,60	-0,90	23,50
11	141,92	9,46			141,889	-3,10	142,598	142,570	-2,80	-5,90	
12	141,95	9,97	4,00	40,00	141,915	-3,50	142,619	142,597	-2,20	-5,70	0,20
13	142,10	10,75	4,00	40,00	142,059	-4,10	142,767	142,732	-3,50	-7,60	-1,90
14	141,96	10,98	4,00	40,00	141,926	-3,40	142,618	142,591	-2,70	-6,10	1,50
15	141,78	10,19	4,00	40,00	141,755	-2,50	142,457	142,422	-3,50	-6,00	0,10
16	131,10	4,05			131,074	-2,60	131,814	131,783	-3,10	-5,70	
17	130,43	3,22	4,00	40,00	130,418	-1,20	131,143	131,124	-1,90	-3,10	2,60
18	130,21	4,11	4,00	40,00	130,195	-1,50	130,917	130,897	-2,00	-3,50	-0,40
19	130,30	5,15	4,00	40,00	130,279	-2,10	130,994	130,975	-1,90	-4,00	-0,50
20	130,45	3,22	4,00	40,00	130,427	-2,30	131,134	131,105	-2,90	-5,20	-1,20

FONTE: Consolidação de dados do empreendedor pelo Autor

O Período 1 compreende o período entre a instalação até 2010. A leitura era realizada nesta época, por empresa contratada pelo consórcio construtor. A última leitura realizada por esta empresa foi em agosto de 2010.

O Período 2 compreende o monitoramento realizado deste março de 2011 até 2018, com o empreendimento em operação. Este período inicialmente foi atendido por uma empresa terceirizada, registrando leituras iniciais, em média 0,60 m acima das cotas de instalação indicadas pela empresa do Período 1. Devido à qualidade dos serviços entregues, foi contratada outra empresa terceirizada para realizar o monitoramento. Esta terceira empresa também indicou leituras dos marcos superficiais em média 0,60 m acima das cotas de instalação indicadas, pois adotou a

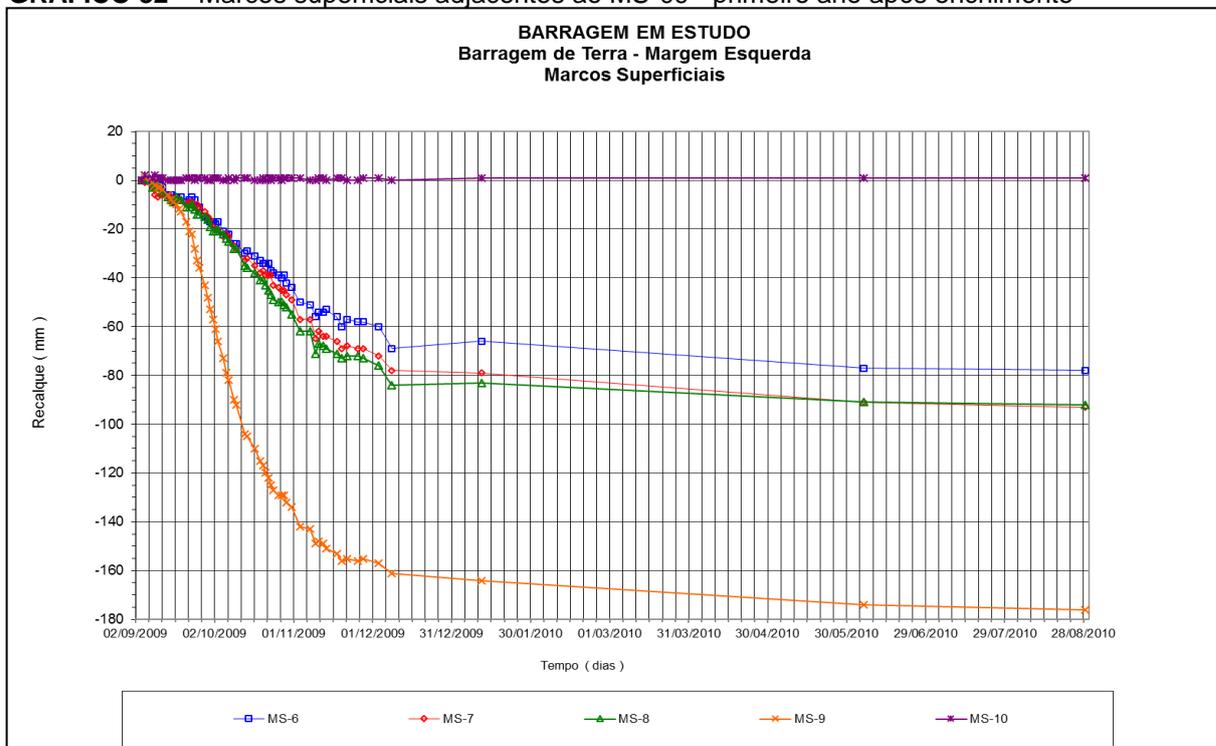
mesma elevação para o RN da empresa anterior.

Por este motivo, para a análise, dividiu-se os dados entre esses dois períodos, com indicação do recalque absoluto para cada período. O recalque total está sendo considerado, portanto, a soma dos recalques dos dois períodos.

Conforme Tabela 08 acima, os MS-08 e MS-09 registraram recalques maiores no primeiro ano após o enchimento, conforme Gráfico 32, entretanto ainda dentro do limite normal. Entre 2010 e 2018, o MS-09 que já apresentava recalque negativo de 17,1 cm, registrou mais 7,3 cm de recalque, totalizando 24,4 cm, ultrapassando o limite normal, mas ainda dentro do limite crítico. O MS-08 apresenta até o ano de 2018 recalque total de -19,10 cm, ainda dentro do limite normal indicado pela projetista.

Devido a investigação realizada para elaboração do presente trabalho, pode-se constatar que a diferença entre os períodos é devido ao seguinte fato: a cota de topo do RN (Referência de Nível) utilizada pela empresa do Período 1 foi El. 155,31 m, e as empresas do Período 2 foi 156,00 m.

GRÁFICO 32 – Marcos superficiais adjacentes ao MS-09 - primeiro ano após enchimento



FONTE: Acervo técnico

Os demais marcos superficiais operaram abaixo da cota normal, representada no Gráfico 34. Todos gráficos são representações dos dados dos últimos 2 anos. Nos 8 anos anteriores, totalizando os 10 anos de operação desta barragem, nenhum destes marcos superficiais operou acima do limite normal indicado pela projetista da barragem.

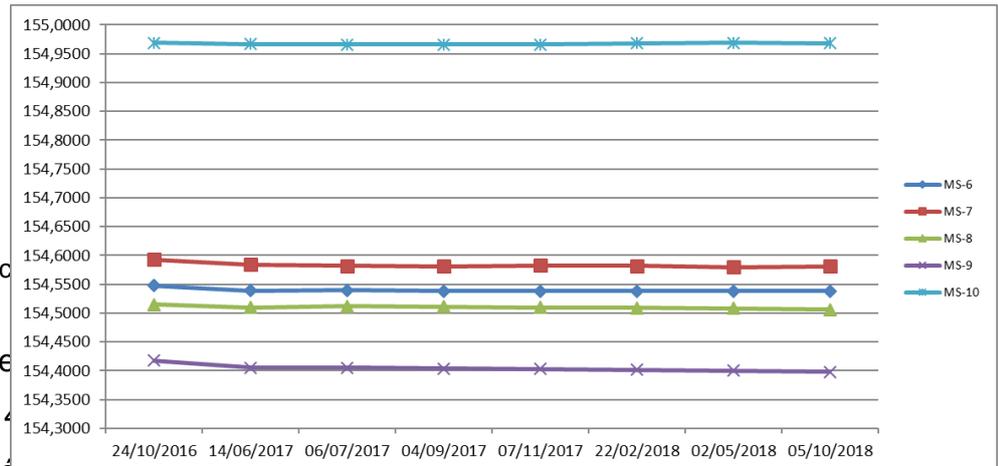
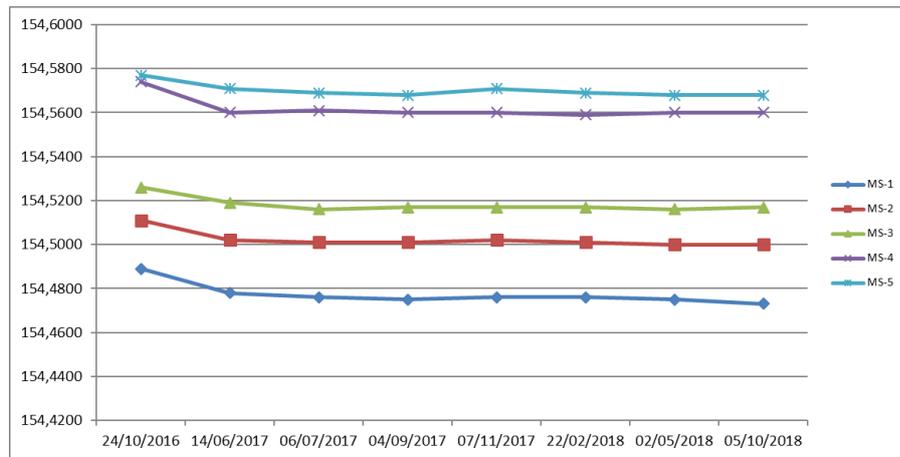
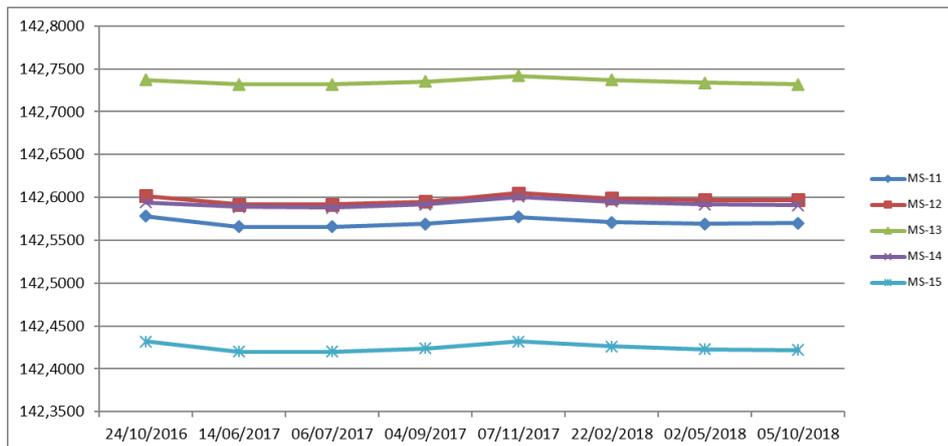


GRÁFICO 34 – Marcos superficiais da crista (2 últimos anos)



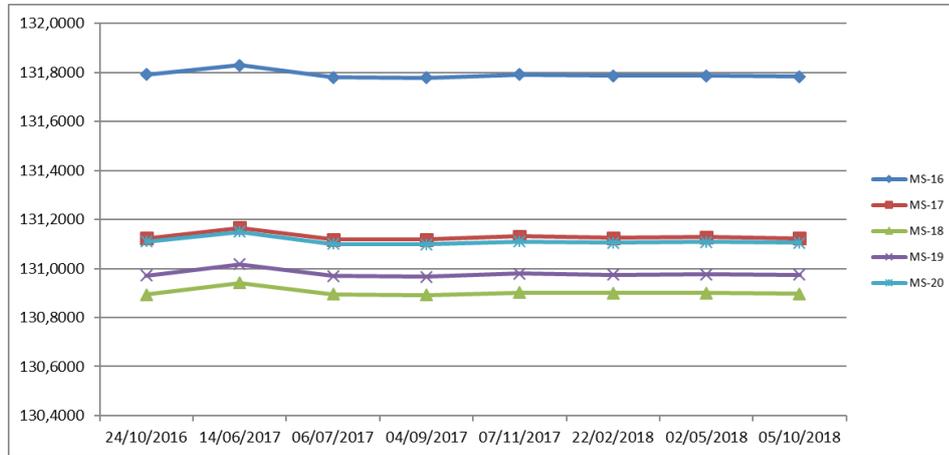
FONTE: Acervo técnico do empreendedor

GRÁFICO 35 – Marcos superficiais na Berma El. 142 m (2 últimos anos)



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

GRÁFICO 36 – Marcos superficiais na Berma El. 129 m (2 últimos anos)



FONTE: Acervo técnico do empreendedor

5. Conclusões

Os níveis de referência inicialmente previstos em projeto para os piezômetros de tubo aberto (PZA) e piezômetros elétricos (PZE), foram determinados tomando como critérios básicos as seguintes considerações: o fator de segurança atribuído a estabilidade dos taludes da barragem e a elevação dos níveis piezométricos decorrente da hipótese de colmatação do sistema de drenagem interna da barragem. Com o enchimento do reservatório e após 10 anos de observação por inspeção visual e através dos instrumentos instalados no filtro horizontal, PZA-02, PZA-03, PZA-04, PZA-06, PZA-07 e PZA-11, bem como os instrumentos instalados a jusante do filtro vertical na fundação do aterro compactado, PZA-08, PZA-10 e PZA-12, que apresentam leituras dentro do esperado, pode-se concluir de um do funcionamento satisfatório do sistema de drenagem interna da barragem, sem indicação de colmatação e por apresentarem cotas piezométricas semelhantes em torno da EL.126,40m, indicam também que este nível está sendo controlado pela vedação da ensecadeira de jusante e pelo nível d'água do rio na região.

Os piezômetros, PZA-05, PZA-09, instalados a montante do eixo do barramento, na camada de rocha alterada abaixo do solo de fundação, bem como os piezômetros PZE-03, PZE-06 e PZE-09 instalados no núcleo da barragem e no contato do aterro com a fundação, junto à estrutura de concreto, apresentam níveis piezométricos acima dos níveis previstos inicialmente em projeto. Uma provável zona de maior permeabilidade constituída de saprolito e rocha alterada na fundação da barragem, bem como o estreitamento do maciço de solo compactado junto à estrutura de concreto, podem ser a causa da elevação das pressões piezométricas nestas regiões.

As variações dos instrumentos da seção C-C e D-D em conjunto podem estar associadas de algum modo, não totalmente esclarecido. Uma hipótese seria que um aumento do fluxo no tapete na região da seção C-C, compatível com o elevado gradiente hidráulico indicado no local do PZA-05, teria 'puxado' o fluxo lateralmente e afetado o rebaixamento, o que em princípio é reforçado pela proximidade das datas em que a subida da freática ficou patente no PZA-05 e a descida no PZA-09 e PZA-10, todos eles na fundação da barragem.

Os resultados, quando analisados em conjunto na seção D-D, mostram que o comportamento da freática no interior do maciço da barragem requer uma atenção especial.

Tendo em vista que alguns dos piezômetros instalados na fundação e no maciço de solo compactado indicam valores acima dos níveis críticos de referência, mesmo sem a confirmação da hipótese de colmatção do sistema de drenagem interna, de fato, torna inadequada a interpretação destes piezômetros empregando os níveis de referência definido com base na hipótese de colmatção.

Com base nos resultados da auscultação apresentados, referente aos 10 anos de construção da barragem, corresponde ao período de 2008 a 2018, conclui-se que a barragem apresenta comportamento adequado em relação às premissas de projeto e indica estabilidade e operação dentro dos padrões de segurança de barragem.

REFERÊNCIAS

ANDRIOLO, Francisco R.; SGARBOZA, Bento C. – **Inspeção e Controle de Qualidade do Concreto**. São Paulo: Editora Loyola, 1993. 573p.

Capítulo 14, p. 437-465.

CHUQUIMUNI, Roberth Aguilar. **Análise Numérica do Alçamento de Barragens de Terra**; Orientador: Celso Romanel. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

DUNNICLIFF, J.; GREEN, G. E. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. New York: John Wiley & Sons; 1993.

ELETRÓBRÁS. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2003.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**; Orientador: Romero César Gomes. – Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas, 2003.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**, São Paulo. Edgard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo, 1976.

JORNAL DA UNICAMP. São Paulo: Unicamp, 2014. Semanal. Por barragens mais seguras. 8 a 14 de Setembro de 2014.

http://www.unicamp.br/unicamp/sites/default/files/jornal/paginas/ju_605_paginacor_05_web.pdf

ITAIPU. **Auscultação**. Disponível em <http://www.itaipu.gov.br/energia/auscultacao>.

Acessado em 20/11/2018.

KUPERMAN, S.L.; MORETTI, M.R.; CIFU, S.; CELESTINO, T.B.; RE, G.; ZOELLNER, K.; PÍNFIANI, J. C.; CARNEIRO, E. F.; ROSSETTO, S. L. G.; REIGADA, R. P. (2003) – **Critérios para a fixação de valores limites da instrumentação civil de barragens de concreto e de terra** – *Comitê Brasileiro de Barragens – XXV Seminário de Grandes Barragens*, Salvador-BA, pp-81-96.

MARANGON, Márcio. **Mecânica dos Solos**. Juiz de Fora: Apostila da disciplina Tópicos em Geotécnica e Obras de terra, 2004.

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2010. 215p.

MEK ENGENHARIA (2008). Memória de Cálculo de Estabilidade Da Barragem – BB-MK-BRM-MC-12-006-RA.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de Usinas Hidrelétricas passo a passo**. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 518p.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânicas dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355p.

SANTIAGO E CINTRA. São Paulo. Apresenta textos sobre Geo-tecnologias. Disponível em <https://www.santiagoecintra.com.br/blog/geo-tecnologias/qual-a-diferenca-entre-precisao-e-acuraciay>. Acesso em: 20/11/2018.

SEARA, Roberto Werneck. **Avaliação do desempenho da barragem da Usina hidrelétrica Governador Parigot de Souza – Capivari – Cachoeira**. Orientador: Jorge Felipe da Silva Filho. – Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO, 2010.

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J; GIZIENSKI, S. F.; CLEVINGER,W.A. (1963) – **Earth-Rock Dams** – Ed. John Wiley and Sons, p. 725;

SILVA, Dayana Santos. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens**. Orientador: Saulo Gutemberg Silva Ribeiro. – Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO, 2016.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

USACE, United States Corps of Engineers (2004). **Design manual EM-1110-2-2300 – General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams** – U.S.Corps of Engineers – Department of the Army – Washington, DC.

https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-2300.pdf - Site consultado em 17/11/2018.

VARGAS, Milton Vargas. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: MCgraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1978. 509p.

DRILL CENTER. **Medidor de Nível d'água MDN-200M**. Site acessado em 26/11/2018. <http://drillcenter.com.br/produto/430>