



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos

Aluna: Laryssa Cortes Santos

Matrícula: 11421ECV026

Orientadora: Profa. Dra. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia, 2019

AGRADECIMENTO

A minha família e amigos por todo o apoio e incentivo.

A minha orientadora Giovana Bizão por todo o suporte.

A todos que direta ou indiretamente participaram da minha formação académica.

À empresa Solobrasil, pelas informações disponibilizadas e por toda a ajuda prestada.

RESUMO

As barragens, independentemente de sua função e composição, são estruturas de comportamento complexo cuja falha traz prejuízos imensuráveis à população, à economia e ao meio ambiente. Após episódios catastróficos de rupturas de barragens de rejeitos no país, tem-se ressaltado ainda mais a importância de um acompanhamento eficiente e confiável da situação de segurança dessas estruturas. O principal mecanismo de acompanhamento do desempenho de barragens é a instrumentação do maciço. Neste contexto, este trabalho trata do estudo sobre diversos tipos de instrumentação em barragens, a instalação em uma barragem de terra e sua utilização em uma barragem de rejeitos que sofreu rompimento. Inicialmente são apresentados os aspectos gerais sobre barragens, histórico de barragens no Brasil e Lei de Segurança de Barragens. Apresenta-se então a importância da instrumentação de barragens e os principais instrumentos utilizados. Caracteriza-se e explica-se sobre o uso de instrumentos diversos, tais como medidores de nível d'água, piezômetros, inclinômetros, entre outros. O primeiro caso estudado trata-se da instrumentação de uma barragem em reforma no interior de Goiás. Neste caso são apresentadas as localizações dos instrumentos, projeto de instrumentação, bem como o processo de instalação executado no local. O segundo caso apresenta a barragem de Fundão. Neste item é apresentado o histórico de acidentes na barragem e um estudo sobre as possíveis causas do rompimento em novembro de 2015. São apresentadas também informações sobre os instrumentos presentes na barragem, suas localizações, leituras e relação com o acidente. Destaca-se, por fim, a importância de se manter um monitoramento constante da instrumentação para a segurança de barragens.

Palavras-chave: Barragens. Instrumentação. Instalação. Monitoramento.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Barragem de Cedros.....	11
Figura 2: Mapa interativo das hidrelétricas brasileiras.....	12
Figura 3: Esquema de um medidos de nível de água	18
Figura 4: Esquema de um piezômetro de tubo aberto.....	20
Figura 5: Esquema de um piezômetro hidráulico	21
Figura 6: Instalação típica de um piezômetro de corda vibrante	23
Figura 7: Esquema de um piezômetro pneumático	25
Figura 8: Instalação de marcos superficiais	26
Figura 9: Esquema de um medidor de recalque de tubos telescópicos.....	27
Figura 10: Diferentes direções de instalação de inclinômetros.....	28
Figura 11: Sonda de um inclinômetro.....	29
Figura 12: Croqui de uma célula de tensão total.	31
Figura 13: Esquema indicador de nível de água padrão	36
Figura 14: (a) Perfuração do furo de sondagem; (b) Descida da célula de indicador de nível d'água	37
Figura 15: Indicador de nível d'água conforme construído	39
Figura 16: (a) Descida do tubo; (b) Instalação finalizada	40
Figura 17: Piezômetro conforme construído.....	41
Figura 18: Instalação do piezômetro finalizada	42
Figura 19: Modelo de instalação de marco topográfico	43
Figura 20: Marco superficial instalado	43
Figura 21: Estruturas principais do Complexo de Germano	44
Figura 22: Imagens de satélite antes e depois do rompimento	45
Figura 23: Dique 1A e drenos na cota 826 m	46
Figura 24: Largura da praia nos anos 2011 a 2013.....	47
Figura 25: Rachaduras na ombreira esquerda em 2014	49
Figura 26: Localizações dos piezômetros e dos medidores de nível de água	51
Figura 27: Seções AA e BB.....	53
Figura 28: Localização dos marcos superficiais.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dimensionamento da equipe de leituristas.	32
Tabela 2: Frequências usuais de leituras	33
Tabela 3: Locação dos instrumentos.	35
Tabela 4: Deslocamentos dos marcos superficiais.....	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. Barragens no Brasil	10
3.1.1. Breve histórico.....	10
3.1.2. Lei de segurança de barragens	12
3.2. Instrumentação	13
3.2.1. Breve histórico.....	13
3.2.2. Importância.....	14
3.2.3. Seleção dos instrumentos	16
3.2.4. Medidores de nível d'água.....	17
3.2.5. Piezômetros	18
3.2.6. Marco superficial	25
3.2.7. Medidores de recalque com tubos telescópicos	26
3.2.8. Inclinômetros	27
3.2.9. Célula de tensão total.....	30
3.2.10. Frequência de leituras.....	31
4. CASO DE INSTALAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA.....	34
4.1. Apresentação da barragem.....	34
4.2. Metodologia executiva	35
4.2.1. Indicadores de nível d'água.....	36
4.2.2. Piezômetros	39
4.2.3. Marcos superficiais.....	42
5. CASO DA BARRAGEM DE FUNDÃO	44
5.1. Apresentação da barragem.....	44
5.2. O rompimento	45

SUMÁRIO

5.3. Instrumentação da barragem de rejeitos.....	49
5.3.1. Piezômetros e indicadores de nível de água	50
5.3.2. Marcos superficiais	52
5.3.3. Inclinômetros	55
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXO.....	60

1. INTRODUÇÃO

São classificadas como barragens estruturas destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos. Existem atualmente 5081 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, o SNISB (SNISB, 2019). Neste sistema, as barragens são classificadas de acordo com o seu Dano Potencial Associado, ou seja, os prejuízos que podem causar caso venham a se romper.

Os rompimentos de barragens trazem prejuízo imensuráveis à população, à economia e ao meio ambiente, e ressaltam a importância de um acompanhamento eficiente e confiável da situação de segurança dessas essas estruturas. Em 2010, foi criada a Lei Nº 12.334 (BRASIL, 2010), que “Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens...”. Esta Lei tem entre seus objetivos garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes, regulamentar as ações de segurança a serem adotadas em diversas fases da barragem, promover o monitoramento e o acompanhamento de ações de segurança, estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público, entre outros.

Recentemente alguns rompimentos de barragens atingiram cidades mineiras e causaram perdas enormes. O rompimento da barragem da Mina de Mariana em novembro de 2015 está no topo dos maiores acidentes em barragens de acordo com O Globo (2015). Foram despejados 45 milhões de metros cúbicos de lama e rejeitos com o rompimento das barragens de Santarém e Fundão. Três anos depois, em 2018, ocorreu o rompimento de uma barragem em Brumadinho (Barragem de Córrego Feijão), que assim como em Mariana era depósito de rejeitos de beneficiamento de minério de ferro. Foram despejados mais de 12 milhões de metros cúbicos de rejeito.

Aparte do método construtivo dessas barragens, apontados como o principal fator de risco de ruptura, muitos rompimentos e falhas localizadas em maciços de barragens de rejeitos, terra ou enrocamento poderiam ser evitados por meio de instrumentação adequada e devido acompanhamento.

Desta forma, fica clara a importância da instrumentação adequada das barragens, em termos de quantidade e localização estratégica, bem como do acompanhamento de suas medições. Este monitoramento visa analisar de forma sistêmica os dados relevantes de modo a adotar medidas preventivas e corretivas em tempo hábil, de forma a reduzir riscos. Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso trata da instrumentação de barragens de terra em seu aspecto de instalação e monitoramento.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivos realizar um levantamento bibliográfico sobre instrumentação de barragens, com foco nos tipos de instrumentos e suas principais características de funcionamento; analisar informações de instalação de instrumentos de monitoramento de barragens; bem como enfatizar a importância do acompanhamento de suas medições no contexto da segurança de barragens. Para isso são utilizados dados de uma barragem de terra do interior do estado de Goiás e de um relatório técnico sobre o rompimento da barragem rejeitos de Fundão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Barragens no Brasil

Barragens são estruturas que tem por objetivo a formação de um reservatório artificial, para acumular água, elevar seu nível ou acumular rejeitos. Geralmente são construídas transversalmente à direção do escoamento de um curso d'água.

As barragens podem ser construídas com diferentes elementos, podendo ser de terra, rochas ou enrocamento, alvenaria, rejeitos, concreto ou mistas. A escolha do tipo de material a ser utilizado varia com as condições geotécnicas e do relevo de cada local, bem como com a finalidade da barragem a ser construída. Os usos de uma barragem podem ser diversos, tais quais: produção de energia elétrica, controle de enchentes e regularização de vazões, navegação, abastecimento doméstico, irrigação, recreação, acumulação de resíduos industriais, entre outros.

No Brasil, devido aos vastos cursos d'água, existe uma grande quantidade de barragens visando seu aproveitamento. O SNISB faz um levantamento sobre a situação de barragens localizadas em rios sob o domínio da União, exceto aquelas destinadas à geração de energia elétrica. Estão presentes no levantamento as barragens que obedecem aos seguintes critérios: altura maior ou igual a 15 m; capacidade total do reservatório maior ou igual a 3 hm³; reservatórios que contenham resíduos perigosos, conforme técnicas aplicáveis; e dano potencial associado médio ou alto. No sistema estão cadastradas cerca de 5000 barragens, sendo destas, cerca de 4% classificadas como categoria de alto risco.

3.1.1. Breve histórico

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (2011), a mais antiga barragem brasileira que se tem registros foi construída no Nordeste do Brasil, região onde hoje é a área urbana de Recife. A construção é do século XVI e foi mapeada pelos holandeses em 1577, onde aparece com o nome Açude Apipucos, nome tupi que significa "onde os caminhos se encontram". A barragem foi alagada e mais tarde deu lugar a uma importante via de acesso a Recife. Ainda nesta cidade, existem referências também a um dique construído em 1644, no rio Afogados. Estima-se que

o reservatório possuía cerca de 2 km de extensão e 3 metros de altura. O dique entrou em colapso em ocasião de um transbordamento.

Após uma grande seca no Nordeste em 1877, surgiram no Brasil muitas obras de barragem a fim de sanar o problema de falta de água. A partir daí teve início o planejamento e projeto de grandes barragens em nosso país. A barragem pioneira foi Cedros, situada no Ceará, concluída em 1906, que pode ser observada na Figura 1. (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011).

Figura 1: Barragem de Cedros.



Fonte: Comitê Brasileiro de Barragens (2011)

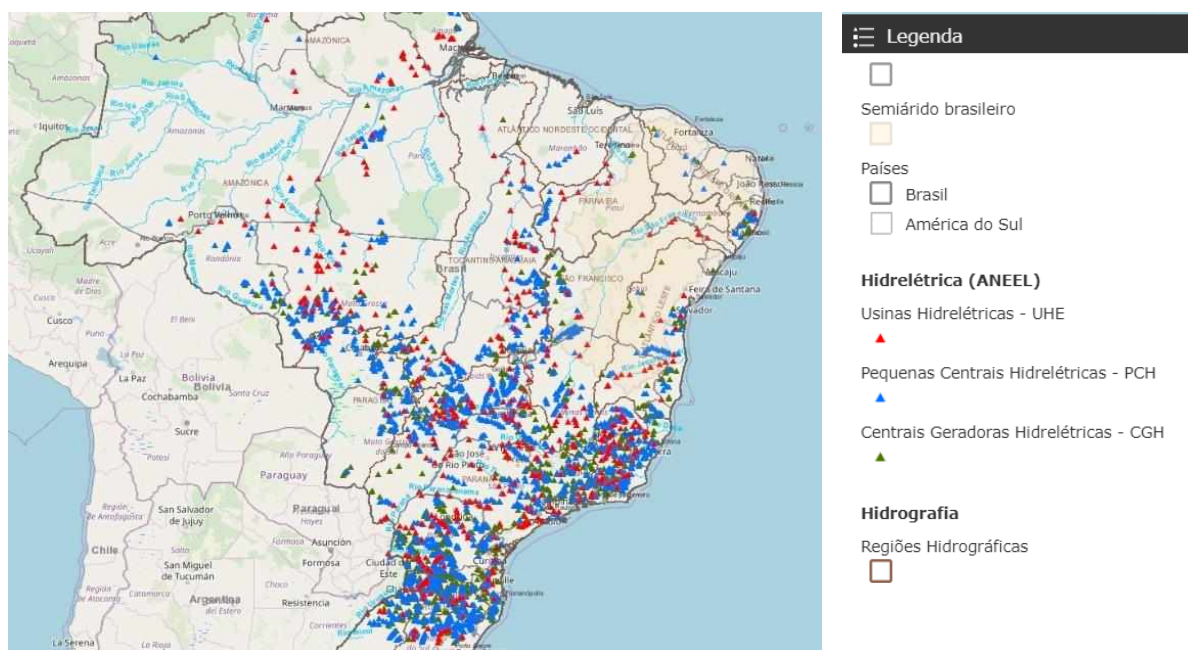
Seguindo um caminho oposto à região nordeste, as barragens nas regiões sul e sudeste iniciaram-se com o propósito de geração de energia elétrica. De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens de Barragens (CBDB) o início da implantação de pequenas usinas de suprimentos de cargas se deu no século XIX. Na cidade de São Paulo, a primeira usina da rede de fornecimento de energia elétrica Light entrou em operação em 1901. A usina foi construída no rio Tietê e, quando inaugurada, tinha 12,5 m de altura, em uma barragem feita em alvenaria de pedra. Desde então a construção de barragens para fins de geração de energia se tornou cada vez mais comum.

A usina hidrelétrica de Itaipu é hoje a maior barragem brasileira (ITAIPU, 2019). Com quase 8 km de comprimento de barragem e 196 m de altura, seu reservatório de 170 km de extensão abriga um volume de 29 bilhões de m³ de água. No território nacional

existem inúmeros empreendimentos hidroelétricos, sendo que dentre as doze regiões hidrográficas brasileiras, a Região Hidrográfica Amazônica possui o maior potencial hidrelétrico do Brasil. De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), os rios Tocantins, São Francisco, Grande, Paraná, Iguaçu e Paranaíba são os que possuem a maior capacidade instalada e em operação de usinas hidrelétricas.

Na Figura 2, é apresentado um mapa com todas as barragens hidrelétricas do Brasil. O mapa é interativo, e está disponível no site da ANA, onde é possível também consultar dados específicos sobre uma barragem, como proprietário e rio onde se encontra.

Figura 2: Mapa interativo das hidrelétricas brasileiras.



Fonte: Agência Nacional de Águas (2019)

3.1.2. Lei de segurança de barragens

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais (BRASIL, 2010). Além disso, essa mesma lei é responsável pela criação do Sistema

Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, já citado anteriormente. Esta lei aplica-se a barragens que atendam a pelo menos um dos seguintes quesitos: altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a quinze metros; capacidade total do reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos; reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis; ou categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

A Política Nacional de Segurança de Barragens tem entre seus objetivos a redução da possibilidade de acidente e suas consequências, a regulamentação de ações de segurança, o monitoramento e acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis, coligir informações e estabelecer conformidades de natureza técnica.

De acordo com a lei, o empreendedor da barragem obriga-se em prover os recursos necessários à garantia de segurança da barragem, bem como informar ao respectivo órgão fiscalizador qualquer alteração que possa acarretar redução da capacidade de descarga da barragem ou que possa comprometer sua segurança. Desta forma, fica clara a responsabilidade do empreendedor em instrumentar a barragem a fim de controlar as condições de estabilidade da mesma.

3.2. Instrumentação

3.2.1. Breve histórico

O uso mais antigo de instrumentos para monitorar movimentos de terra é datado de 1853, quando medições topográficas foram realizadas na barragem em Cantaria de Grosbois, na França, para observação de deslocamentos da crista. Alguns anos mais tarde, piezômetros foram empregados na Índia, com o intuito de estudar a percolação na fundação de barragens destinadas à irrigação. De 1917 em diante, piezômetros passaram a ser empregados nos Estados Unidos em barragens de terra. As células de pressão surgiram de modificações e alterações dos piezômetros. (SILVEIRA, 2006)

Silveira (206), aponta como um importante marco no campo da instrumentação quando em 1931, na França, André Coyne obteve patente para um sensor de corda vibrante. Ainda na França surgiu o primeiro grande programa de auscultação, no qual 78 extensômetros foram instalados no corpo da barragem de Maréges, e outros 40 nas ombreiras.

De acordo com o Boletim final da Comissão de Auscultação e Instrumentação de barragens no Brasil, de 87 barragens de terra e enrocamento instrumentadas no Brasil até a década de 1990, 84% foram construídas a partir de 1950. Isso se deu pela grande quantidade de usinas hidrelétricas construídas neste período, empregando-se estruturas maiores e localizadas em locais com grande diversidade e complexidade geológica, exigindo assim projetos mais elaborados e maiores cuidados com instrumentação.

Na década de 1970, institutos como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e o Laboratório Central da Companhia Energética de São Paulo (CESP) passaram a desenvolver uma diversidade de instrumentos para auscultação de barragens de terra, o que permitiu a substituição de muitos instrumentos que antes eram importados, e possibilitou a instrumentação, dentro de bons padrões de qualidade, de muitas barragens construídas na época.

3.2.2. *Importância*

A instrumentação de barragens é um dos recursos utilizados para avaliar a segurança da obra ao longo de sua vida útil. De acordo com Cruz (2004), são três os objetivos da instrumentação: verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados em projeto; verificar a adequação de métodos construtivos; e verificar as condições de segurança das obras. A segurança de uma barragem está diretamente ligada ao seu projeto e sua construção, sendo assim a instrumentação não aumenta a segurança da obra, mas é um meio importante para obtenção de dados e, a partir daí a tomada de decisões e reparos, caso sejam necessários.

Conforme abordado por Cruz (2004), o engenheiro responsável pela instalação dos instrumentos deve elaborar um programa de instrumentação. Para a elaboração deste programa o responsável deve estar ciente das condições da obra, tais como o tipo de empreendimento, a estrutura, as propriedades dos materiais utilizados, o método de construção planejado, entre outras. Conforme Fonseca (2003), um programa de instrumentação tende a garantir a acurácia, bem como fornecer parâmetros relacionados à confiabilidade das leituras e à compatibilidade em relação às metodologias construtivas e às premissas do projeto.

De acordo com Silveira (2006), os parâmetros a serem monitorados incluem a pressão da água nos poros, a pressão da água na rocha de fundação, as pressões totais, os recalques, os deslocamentos horizontais, as cargas e a tensão nos elementos estruturais, a temperatura, as vazões de drenagem, etc. Usualmente existem várias partes responsáveis pelo sucesso da instalação e acompanhamento da instrumentação. De forma geral são responsáveis o proprietário, o consultor do projeto, um especialista em instrumentação e a empresa construtora. A interpretação e análise dos dados, por exemplo, devem ser responsabilidade direta do proprietário, do consultor de projeto ou do especialista em instrumentação.

Apesar de ser de grande valia, a instrumentação apresenta limitações que podem ser referentes ao próprio instrumento ou à leitura. Algumas dessas limitações são listadas por Cruz (2004): a medição de tensões pode ser alterada significativamente caso a instalação do instrumento seja conduzida de forma equivocada; os instrumentos indicam o comportamento médio dos maciços, e não os extremos (que são de grande importância); alguns medidores não apresentam forma cabível de verificar seu funcionamento após a instalação; ao apresentar comportamentos inesperados um instrumento pode ser considerado erradamente como defeituoso, bem como existe a possibilidade de assumir erradamente o comportamento adequado de um maciço e na realidade o instrumento estar apresentando uma falsa indicação de situação normal, por estar danificado; determinados tipos de instrumentos, como os piezômetros de tubo e os inclinômetros, estão suscetíveis a danos irreparáveis de atravessarem uma zona submetida a deslocamentos concentrados; um plano de instrumentação deve ser acompanhado da existência de medidas reparadoras viáveis, para serem aplicadas para sanar eventuais deficiências detectadas; considerando que

alguns acidentes de barragens de terra estão associados a fenômenos que os instrumentos não conseguem identificar, fica reduzida a probabilidade de detectar, através de instrumentação, de forma incipiente a ocorrência de condições adversas à segurança. Desta forma, fica clara a importância não só da escolha dos instrumentos como da adequada instalação, manuseio e análise dos dados dos mesmos.

3.2.3. *Seleção dos instrumentos*

A seleção dos instrumentos deve ter como etapa predecessora o programa de instrumentação. É importante que sejam feitas previsões dos campos de variação das medidas, de forma a escolher melhor os instrumentos a serem instalados. Uma estimativa do valor máximo previsto a ser medido, ou do valor máximo de interesse, conduz à seleção de uma determinada categoria de instrumentos. Enquanto isso, a estimativa do valor mínimo de interesse conduz à seleção da sensibilidade ou precisão do instrumento. De acordo com Silveira (2006) se as medidas de controle de barragem envolvem questões de segurança, uma predeterminação dos valores numéricos deve ser feita para que possam indicar necessidade de ações corretivas. Esses valores numéricos são expressos em termos de taxa de alteração, ao invés de valores absolutos.

O uso da instrumentação deve atender às necessidades durante a construção da barragem bem como as que surgirão no decorrer da vida útil da mesma. Desta forma, pode ser que existam critérios diferentes de escolha de instrumentos, e instrumentos diferentes, em cada uma das duas fases.

Quanto à localização de cada instrumento na barragem, Silveira (2006) aponta que a seleção do local deve envolver três passos básicos: a identificação de áreas de risco (carregamentos mais intensos, áreas estruturalmente frágeis, etc.), se não há tais áreas ou serão instalados instrumentos em mais de um local, é feita a seleção de áreas. Geralmente são seções transversais, nas quais o comportamento previsível é considerado representativo do comportamento geral do protótipo. Essas seções fornecem dados de desempenho geral, devendo haver no mínimo duas. Como a

seleção de áreas representativas pode estar incorreta, a instrumentação deve ser instalada também em outras seções para servir como comparação de comportamento. A SNISB (2010) recomenda que a seção de maior altura é importante de ser instrumentada, em função das maiores tensões internas à barragem, assim como da maior pressão hidrostática. Outras seções, com anomalias geológicas na fundação, também devem ser instrumentadas. As locações, idealmente, devem ser selecionadas de modo que os dados possam ser obtidos o mais cedo possível durante o processo de construção. Sendo assim, a locação dos instrumentos fica a critério do projetista.

Quanto aos tipos de instrumentos, entre os principais utilizados estão os medidores de nível de água, os piezômetros, a célula de tensão total, os medidores de deslocamento, medidores de vazão e instrumentos para auscultação sísmológica. Os usos, características, especificações técnicas e manuseio destes equipamentos serão apresentados.

3.2.4. Medidores de nível d'água

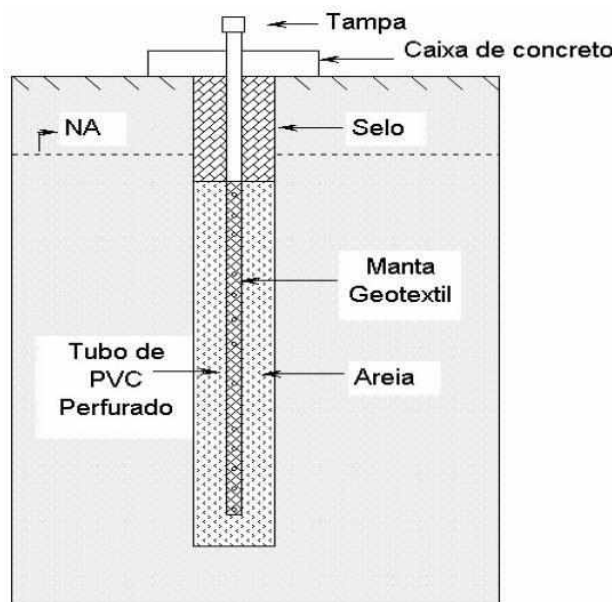
Os medidores de nível d'água são os instrumentos mais simples utilizados nas barragens. Conforme o próprio nome sugere, têm como função principal indicar o nível do lençol freático em maciços de terra ou rocha. Em termos simplificados, basta a execução de um furo de sondagem ou poço com a correspondente determinação da cota do nível d'água.

De acordo com Cruz (2004), para que não ocorra o colapso das paredes do furo e a consequente perda do instrumento, a boa técnica, para uso permanente, considera a utilização de um tubo de PVC perfurado e envolto por um material filtrante e outro drenante. Para completar o instrumento, é utilizado um “selo” para vedar o espaço entre o furo e o tubo próximo à superfície do terreno, e um sistema de proteção contra eventual vandalismo, colocado externamente como um marco de concreto. Um esquema de um medidor de nível d'água é apresentado na Figura 3.

Usualmente a medição do nível d'água é feita por cabo graduado dotado de um sensor elétrico na extremidade inferior e um emissor sonoro ou luminoso na superfície. O

sensor é introduzido no tubo e, ao atingir o nível d'água, a água fecha o circuito elétrico. A leitura é referida à extremidade superior do tubo, através de trena ou metro de madeira.

Figura 3: Esquema de um medidor de nível de água.



Fonte: Fonseca (2003).

São apresentadas como principais vantagens destes instrumentos a confiabilidade, simplicidade e a possibilidade de verificação do seu desempenho através de ensaios de equalização. Cruz (2004) aponta como principais causas para os medidores ficarem inoperantes as seguintes: obstrução do tubo por queda de objetos em seu interior; obstrução do tubo por cisalhamento no interior do maciço; e colmatação dos orifícios do tubo ou do material drenante, com conseqüente aumento do tempo de resposta.

3.2.5. Piezômetros

Os piezômetros têm por objetivo determinar as pressões neutras em maciços de terra ou de rocha. Estão entre os instrumentos mais importantes para a segurança de barragens, de forma que apresentam inúmeros tipos, para que o mais adequado para cada circunstância seja escolhido. Entre os principais modelos, estão o piezômetro de

tubo aberto, o pneumático, o hidráulico, o elétrico de resistência e o elétrico de corda vibrante.

A escolha do tipo de piezômetro depende de inúmeros fatores tais quais as medidas estáticas ou dinâmicas, a localização do instrumento em relação ao terminal de leitura, a necessidade de medida de pressões neutras negativas, a disponibilidade do instrumento no mercado, entre outras. Desta forma, não é possível estabelecer um tipo ideal de piezômetro sem conhecer as necessidades específicas do projeto.

3.2.5.1. *Piezômetro de tubo aberto*

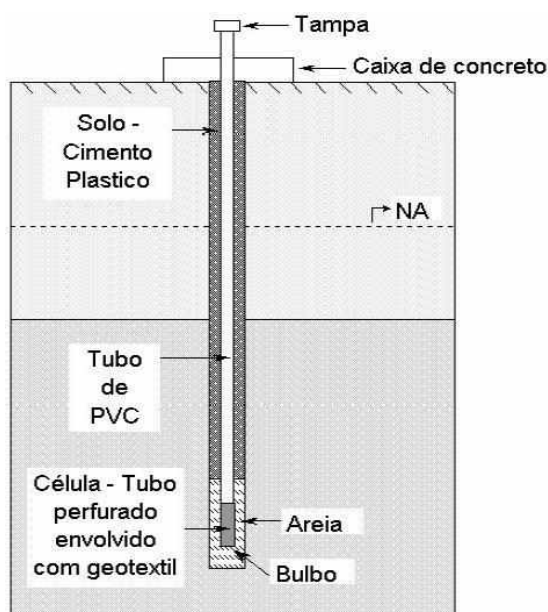
Os piezômetros de tubo aberto são também conhecidos como piezômetros de Casagrande ou piezômetros *standpipe*. Cruz (2004) difere este instrumento do medidor de nível d'água, em termos construtivos, no comprimento do trecho perfurado e na extensão do trecho do furo preenchido com material drenante, limitados usualmente a poucos metros. Podem ser instalados dois ou mais instrumentos em um mesmo furo de sondagem em função do diâmetro do furo de sondagem. Neste caso, os piezômetros são instalados em diferentes alturas.

Silveira (2006) destaca como principais vantagens do uso deste piezômetro: confiabilidade; durabilidade; sensibilidade; possibilidade de verificação do seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do nível d'água; estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo onde se encontra instalado o instrumento. Além disso, este piezômetro apresenta vantagens econômicas e facilidade na instalação.

Fonseca (2003) aponta algumas desvantagens de tal instrumento, como o alto tempo de resposta para materiais de baixo valor de permeabilidade; interferência na praça de construção; não é adequado para a determinação das poro-pressões no período de construção; não permite a medição de pressões negativas; restrições de localização à montante da linha d'água e maiores dificuldades de acesso aos terminais de leitura em relação a outros tipos de instrumento.

A Figura 4 apresenta um esquema de piezômetro de tubo aberto, que são constituídos por uma célula acoplada a um tubo de PVC. Esta célula fica inserida em um bulbo de material drenante e confinada num trecho limitado (de 1,0 a 1,5 m) por uma camada selante. A água dos poros passa através do filtro do bulbo drenante do instrumento até atingir o equilíbrio com a poro-pressão. Esta corresponde à altura da água acima do bulbo do instrumento.

Figura 4: Esquema de um piezômetro de tubo aberto.



Fonte: Fonseca (2003).

O nível da coluna d'água no interior do tubo do piezômetro é medido por um pio elétrico ou por uma trena. O sensor opera eletricamente mostrando no mostrador digital o instante em que a ponteira atinge o nível d'água.

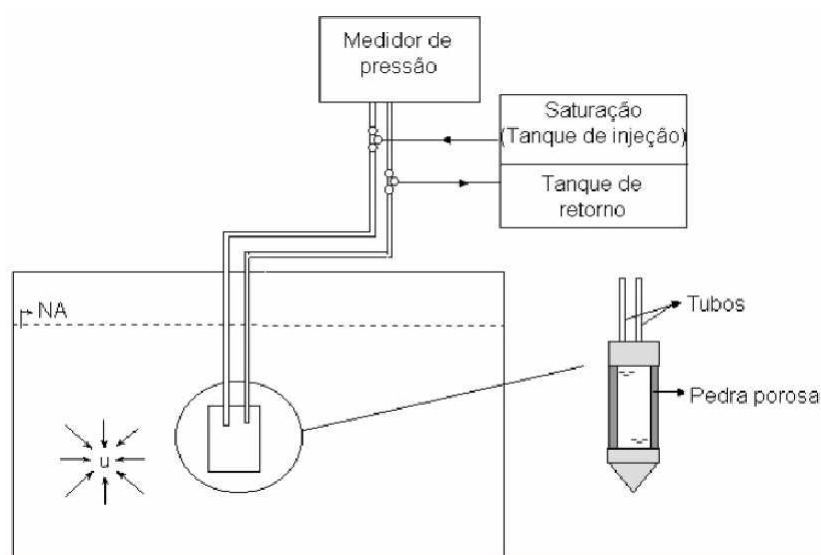
3.2.5.2. Piezômetros hidráulicos

Os piezômetros hidráulicos são conhecidos também como piezômetros do tipo inglês ou piezômetro hidráulico fechado. Eles foram desenvolvidos para instalação na fundação e no aterro de barragens de terra durante a construção. De acordo com Cruz (2004), estes piezômetros são considerados por vários engenheiros como sendo o mais indicado para medidas de poro-pressão, tanto na fase construtiva quanto na de enchimento e de operação do reservatório.

Constituem os piezômetros uma pedra porosa conectada a um painel de leitura externo por meio de dois tubos flexíveis de nylon revestidos de polietileno, que são completamente saturados com água destilada e deaerada. O esquema é apresentado na Figura 5.

Estando saturados com água o painel e os tubos, a leitura é efetuada abrindo, um por vez, os registros que conectam cada um dos dois tubos provenientes do piezômetro no manômetro de leitura, aguardando a estabilização do ponteiro. A saturação das tubulações é obtida através da circulação de água destilada e deaerada, por meio de equipamento específico (Cruz, 2004).

Figura 5: Esquema de um piezômetro hidráulico.



Fonte: Fonseca (2003).

De acordo com Ortigão (*apud* FONSECA, 2003), ainda que a deaeração seja uma premissa na fase de instalação dos instrumentos e mesmo utilizando pedras porosas muito finas, é praticamente impossível garantir a condição de saturação do sistema ao longo de toda a vida útil do medidor. Assim, leituras diferentes de pressão em ambos os tubos constituem claro sinal da presença de ar e a necessidade de trabalhos de deaeração *in situ*. Este fato consiste em uma vantagem do piezômetro hidráulico frente a outros tipos deste instrumento.

De acordo com Cruz (2004), algumas das vantagens deste instrumento são a simplicidade, confiabilidade, bom tempo de resposta mesmo em solos de baixa permeabilidade, técnica de construção relativamente simples, entre outras. Cruz (2004) aponta como limitações: não é indicado para locais onde a leitura envolve pressão subatmosférica; não é indicado para cotas de instalação muito maiores que a do terminal de leitura, entre outras.

3.2.5.3. *Piezômetro de corda vibrante*

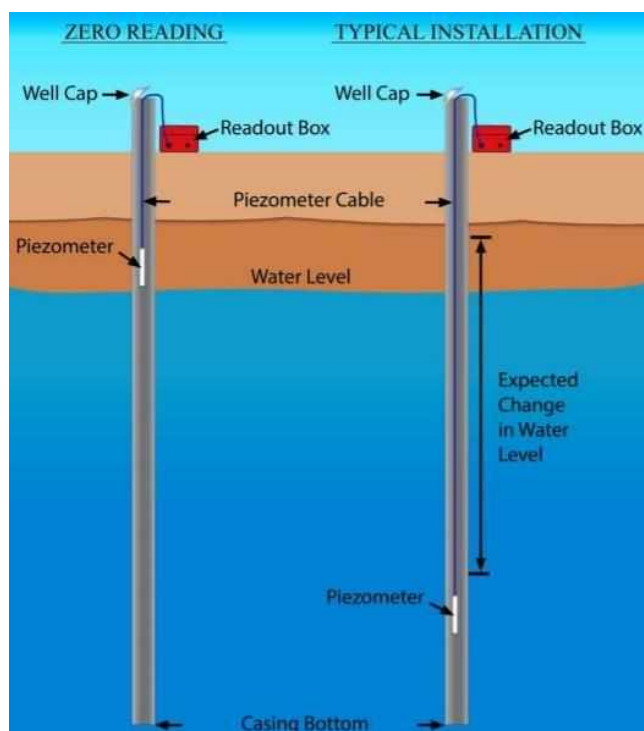
Piezômetros de corda vibrante são piezômetros elétricos que têm como base de funcionamento a medição da pressão intersticial da água que passa por uma pedra porosa para um diafragma interno, em que um transdutor mede a deflexão. Existem diversos modelos de piezômetros de corda vibrante, e a escolha do mais adequado deve considerar o alcance da pressão que o sensor deve medir quando instalado, sabendo que quanto maior o alcance do sensor, maior o erro sistemático nas leituras. De acordo com Cerqueira (2017), o uso de piezômetros de corda vibrante vem substituindo o de piezômetros de Casagrande.

Existem diferentes modos de instalação destes piezômetros no furo, entre eles o método convencional, em que o sensor fica instalado em uma célula de areia idêntica a do piezômetro de Casagrande, e o método completamente grauteado, onde o sensor é grauteado com o restante do furo de sondagem. Cerqueira (2017), apresenta a sequência de instalação para estes dois tipos. Segundo a qual, no método convencional o sensor de corda vibrante é posicionado e envolto em areia lançada a partir da boca do furo, de forma que o parâmetro a ser medido é a poro-pressão equalizada na célula de areia. Já a instalação do piezômetro pelo método completamente grauteado consiste no preenchimento total do furo de sondagem, do sensor piezométrico e do seu cabo até a boca do furo, com uma mistura de cimento, água e bentonita. Neste tipo de instalação o parâmetro medido é a poro-pressão equalizada do bulbo adjacente à ponta do sensor.

O manual de instruções da Geokon para piezômetros da série 4500, um dos mais utilizados no Brasil, apresenta um esquema para o posicionamento de piezômetros em tubos ou poços, que pode ser observado na Figura 6. Simplificadamente, os passos a serem seguidos são:

1. Estabelecimento de uma referência inicial para as demais leituras, através da saturação da pedra porosa; marcação no cabo da profundidade que desejada para o piezômetro;
2. Marcação no cabo a profundidade que deseja que o piezômetro atinja;
3. Descida do piezômetro no tubo;
4. Certificação de que o cabo está devidamente preso na profundidade correta.

Figura 6: Instalação típica de um piezômetro de corda vibrante.



Fonte: Geokon (2014).

De acordo com Silveira (2006) representantes da empresa suíça Maihak, que atuam na fabricação de instrumentos como o piezômetro de corda vibrante, definiram alguns cuidados necessários na instalação dos instrumentos. Entre estes cuidados estão: emprego de cabos com blindagem de cobre; aterramento da blindagem dos cabos junto às cabines de leitura; blindagem das caixas seletoras de leitura dos instrumentos junto às cabines de leitura; e instalação de um dispositivo de proteção para evitar que

a sobretensão atinja a parte delicada do transdutor. A necessidade de blindagem se dá para reduzir interferências de campos magnéticos.

Entre as vantagens dos piezômetros de corda vibrante está o volume extremamente reduzido de água necessário para que apresentem leituras eficientes, apresentando assim respostas praticamente instantâneas.

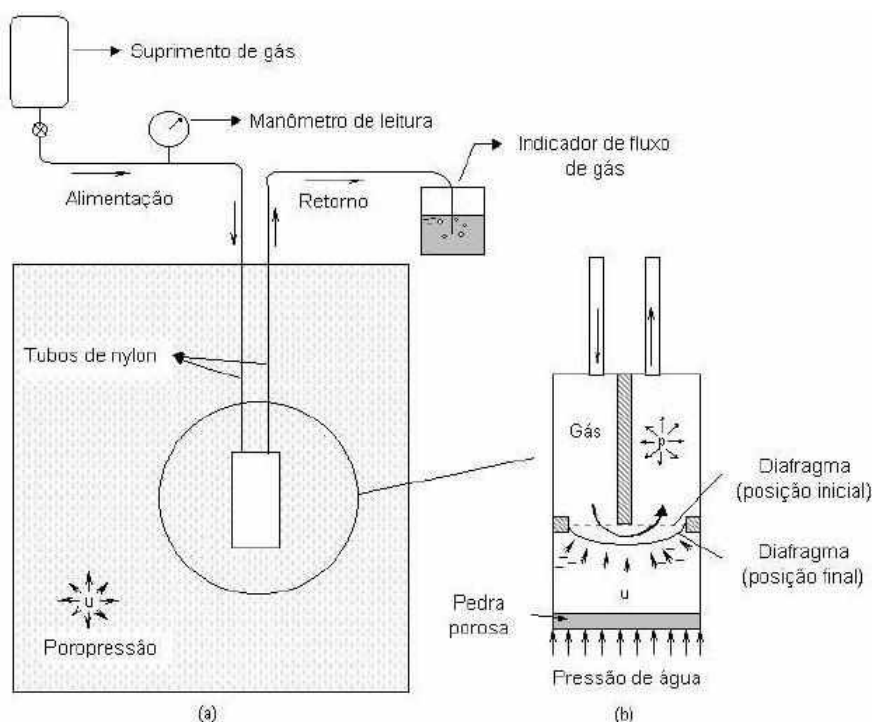
3.2.5.4. *Piezômetros pneumáticos*

Cruz (2004) descreve o funcionamento dos piezômetros pneumáticos como o equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível, em que de um lado atua a água cuja pressão se deseja medir e do outro lado atua um gás cuja pressão é variável e conhecida. A leitura da pressão, de acordo com Silveira (2003), é feita da seguinte forma: aplica-se uma pressão crescente, através da tubulação de alimentação e mede-se a intensidade de pressão na tubulação de retorno, momento em que a pressão se iguala à pressão intersticial do solo. Quando a pressão na tubulação de retorno atinge zero, é possível determinar exatamente a pressão exercida pela água que passa através da pedra porosa, em equilíbrio com a água intersticial.

O detalhamento deste tipo de piezômetro é apresentado na Figura 7. A composição deste instrumento consiste em uma ampola de suprimento de gás, um manômetro de leitura, uma pedra porosa e um indicador de fluxo de gás.

Tem-se como vantagens do uso deste instrumento, apontadas por Cruz (2004): não interferência dos recalques sofridos pelos instrumentos sobre as medidas, inexistência das limitações quanto à localização do instrumento, insensibilidade a descargas atmosféricas, tempo de resposta relativamente pequeno, entre outras. Como limitações, tem-se a necessidade de recarregamento periódico das ampolas de gás comprimido e a menor confiabilidade para medidas de pressões neutras negativas.

Figura 7: Esquema de um piezômetro pneumático.



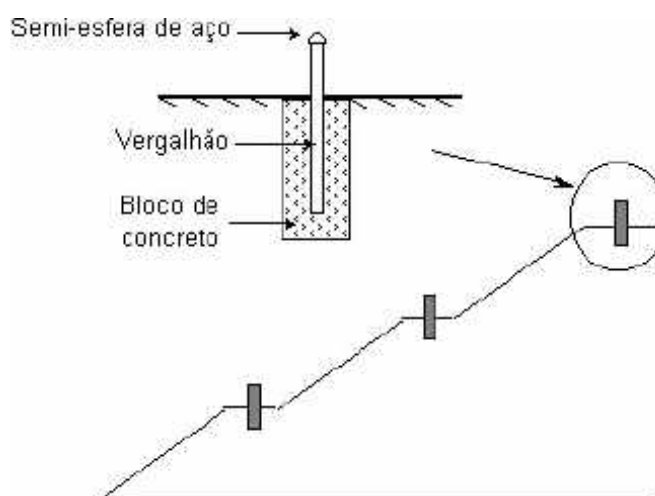
Fonte: Fonseca (2003).

3.2.6. Marco superficial

Os marcos superficiais são instrumentos dedicados à determinação dos deslocamentos verticais e horizontais dos maciços de terra e enrocamento. São constituídos de vergalhões de aço CA-50 com 1,1 m de comprimento e diâmetro de meia polegada. No topo do vergalhão é alocada uma semiesfera. A estrutura é então chumbada com um bloco de concreto com 0,3 m de diâmetro e 1,2 m de profundidade, nas regiões de crista, bermas e talude de jusante (FONSECA, 2003).

Neste tipo de instrumento, os deslocamentos são medidos através de levantamentos topográficos periódicos, em relação a marcos de referência fixos, que devem ser instalados em locais fora da região de influência da barragem. O esquema de instalação dos marcos é apresentado na Figura 8. Entre as vantagens desta instrumentação estão os baixos custos e as leituras com precisões satisfatórias.

Figura 8: Instalação de marcos superficiais



Fonte: Fonseca (2003).

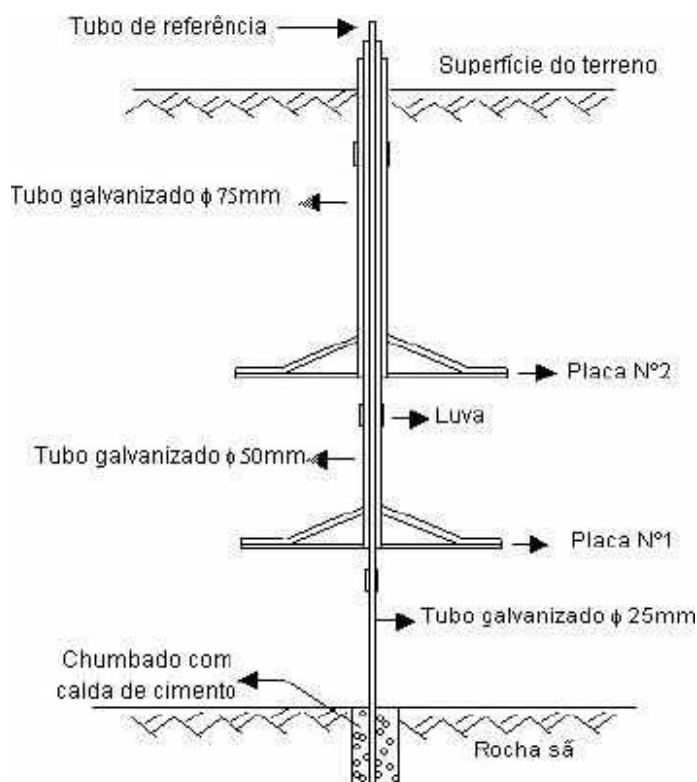
3.2.7. Medidores de recalque com tubos telescópicos

Os medidores de recalque têm por objetivo averiguar os deslocamentos verticais que ocorrem nos maciços e na fundação. Existem diversos tipos de instrumentos deste tipo, entre eles os de tubo telescópicos, os tipo USBR, Km e magnético, entre outros.

De acordo com Fonseca (2003), os medidores tipo tubo telescópicos desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), são os mais utilizados no país. São constituídos de uma série de placas acopladas a hastes ou tubos rígidos de forma que o deslocamento das mesmas fornece referências para as medidas dos recalques. Um esquema de um medidor de recalque é apresentado na Figura 9.

Os recalques são medidos em relação ao tubo de referência interno, solidário à rocha de fundação. Os medidores podem ser utilizados para medição de deslocamentos verticais em diferentes pontos dos maciços, em locais específicos de maior interesse.

Figura 9: Esquema de um medidor de recalque de tubos telescópicos.



Fonte: Fonseca (2003).

De acordo com Cruz (2003), a leitura é realizada da seguinte maneira: punciona-se a extremidade superior de cada tubo, a leitura de cada placa em uma determinada data é obtida ajustando um compasso metálico com pontas secas nas punções dos tubos de referência e do tubo acoplado à placa a qual se refere a leitura. Mede-se então a distância entre as pontas deste compasso, por meio de uma escala milimetrada.

3.2.8. *Inclinômetros*

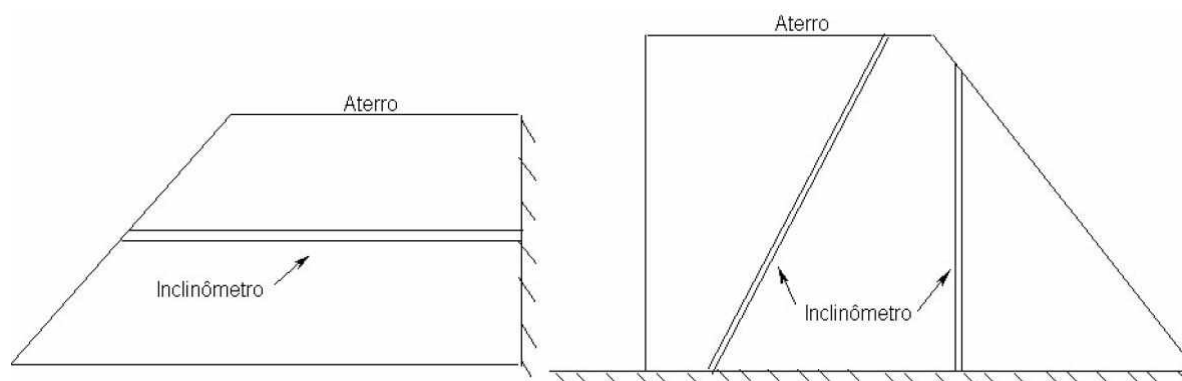
Os inclinômetros são medidores de deslocamentos horizontais. Estes instrumentos são utilizados em diversas obras de engenharia, tais quais obras rodoviárias, escavações a céu aberto, obras de mineração etc. Seu emprego consiste na avaliação da estabilidade de taludes, sendo assim, é extensivamente utilizado também em barragens. Silveira (2006), descreve estes instrumentos, de forma simplificada, como sendo um torpedo à prova d'água, dotado de um pêndulo interno, o qual é abaixado

dentro de um tubo-guia aproximadamente vertical, medindo os deslocamentos angulares a intervalos igualmente espaçados e segundo direções preestabelecidas.

A variação horizontal é determinada da seguinte forma: a inclinação do torpedo é convertida em desvio horizontal de deslocamento (por meio da multiplicação da altura indicada pelo ângulo de inclinação). Comparando-se com a leitura realizada imediatamente após a instalação, é possível observar a variação dos deslocamentos horizontais no período. Os torpedos ficam dentro de tubos guias, que podem ter diferentes diâmetros. Durante a instalação destes tubos é importante atentar-se para que eles sejam instalados o mais verticalmente possível, a fim de tornarem-se mais confiáveis.

O tubo guia pode ser instalado na vertical (inclinado ou não) e na horizontal, fornecendo o mesmo tipo de dados. O que diferenciará será a forma como a leitura é feita. As diferentes instalações podem ser observadas na Figura 10. A sonda de um inclinômetro pode ser observada na Figura 11.

Figura 10: Diferentes direções de instalação de inclinômetros.

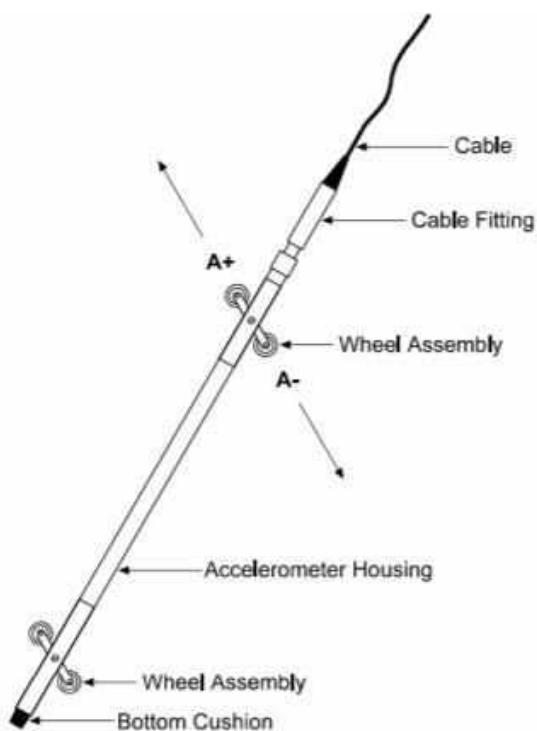


Fonte: Fonseca (2003).

No processo de monitoramento, as rodas guiam o torpedo ao longo das ranhuras do tubo. Em cada ponto de medição estima-se o recalque com base na integração dos deslocamentos calculados a partir de leituras das deflexões dadas pelos acelerômetros, em relação à horizontal e a um ponto fixo. São utilizados instrumentos de medida que adentram os tubos para a realização de leituras, estes são conhecidos como aranha e pescador. Quando o tubo-guia é instalado na vertical, utiliza-se o

pescador para medir o recalque. Já a aranha é utilizada quando o tubo-guia for instalado num plano inclinado, apresentando as mesmas funções do pescador.

Figura 11: Sonda de um inclinômetro.



Fonte: Geokon (2014)

Neste tipo de equipamento é importante que todas as emendas sejam cobertas com manta geotêxtil, de forma a evitar a entrada de solo, que pode vir a ser arrastado pela água em percolação. São utilizados também uma combinação de cimento, solo e bentonita para evitar a entrada de solo durante a fase de compactação do aterro.

De acordo com Fonseca (2003), esses instrumentos começam a ser instalados logo no início da construção do aterro, fixando-se o primeiro tubo guia em um ponto considerado indeslocável, como uma rocha sã, por exemplo. Os tubos podem ser instalados também ao final da construção do aterro, neste caso são alocados em um furo de sondagem estando fixados também em um ponto considerado indeslocável.

3.2.9. Célula de tensão total

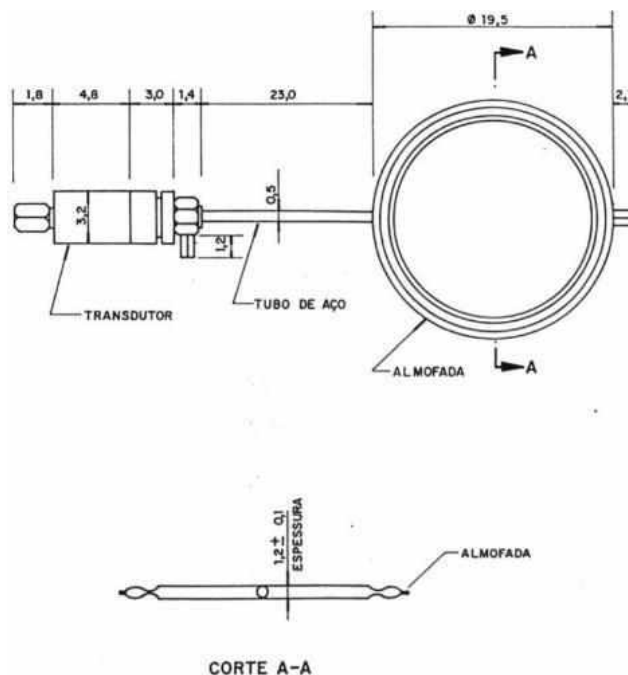
As tensões totais são comumente medidas na interface entre o maciço compactado e a estrutura de concreto e consistem nos esforços que os maciços de terra exercem sobre o concreto. Podem ser medidas também no encontro de outros materiais diversos, como entre o aterro e a fundação, ou aterro e ombreiras, por exemplo. Para que essas tensões sejam medidas, utilizam-se as células de tensão total.

As células de tensão total são, basicamente, uma almofada metálica, que pode assumir formatos circulares ou retangulares, saturadas com óleo e conectada a um piezômetro pneumático que afere a pressão do óleo. O esquema de uma célula de pressão total é apresentado na Figura 12. Estas almofadas podem ser dotadas também de outros sensores internos, como os extensores elétricos e de corda vibrante. No caso das almofadas constituídas de piezômetros pneumáticos, inicialmente a pressão do óleo deve estar a 50 kPa (condição de ausência de carga externa), assim, à medida em que ela é submetida a cargas distribuídas, a leitura passa a superar este valor previamente estabelecido.

Usualmente as células de pressão total são instaladas na posição horizontal, para que a medição seja feita na base das barragens. As células de pressão são particularmente recomendadas para regiões de barragem suscetíveis a processos de arqueamento, como nos núcleos das barragens de enrocamento, no interior de *cut-offs* mais profundos, nas paredes verticais dos muros de ligação em concreto etc. (Silveira, 2006)

Cruz (2004) aponta que tais instrumentos deixaram muito a desejar nas primeiras obras onde foram instalados no Brasil (Ilha Solteira, Capivara e Água Vermelha), apresentando grande dispersão de resultados, tornando difícil a adoção de valores médios representativos.

Figura 12: Croqui de uma célula de tensão total.



Fonte: Fonseca (2003)

3.2.10. *Frequência de leituras*

A frequência de leitura de cada um dos instrumentos varia de acordo com a fase em que o empreendimento se encontra. São recomendadas frequências mínimas de leituras, que devem ser reconsideradas em situações extraordinárias, tais como enchentes superando o nível máximo normal do reservatório, rebaixamento rápido do reservatório, sismos e quaisquer outros eventos que resultem em uma mudança drástica do enchimento da estrutura.

Silveira (2006) recomenda que cada instrumento de auscultação instalado na barragem seja lido, preferencialmente na mesma hora do dia. Sendo assim, os instrumentos devem ser agrupados de modo que a leitura possa ser feita em um mesmo dia, programadas em uma determinada sequência e com itinerário fixo.

É importante lembrar que os maiores interessados na eficácia e na precisão das leituras são dos donos do empreendimento, cabendo a eles a adequada contratação de equipes de leitura confiáveis e qualificadas. A manutenção dos mesmos leituristas

tende a assegurar melhor precisão nas leituras, de forma que a mudança constante de mudança de leituristas deve ser evitada. De acordo com Silveira (2006), em casos de substituição recomenda-se que o substituto acompanhe os leituristas experientes por um período mínimo de duas campanhas de leituras.

Cruz (2004) apresenta uma sugestão de tempos médios despendidos na leitura dos instrumentos mais usuais em barragens de grande porte, a fim de auxiliar na estruturação da equipe de leituristas. Os tempos sugeridos estão na Tabela 1. O tempo médio de leitura não é um valor absoluto, podendo variar de acordo com a barragem e/ou equipe selecionada.

Tabela 1: Dimensionamento da equipe de leituristas.

Instrumento	Tempo para leitura (min)	Equipe mínima
Medidor de nível d'água	5	1
Medidor de vazão-vasilha	3	1
Medidor de vazão-vertedouro	4	1
Medidor de vazão Parshall	4	1
Piezômetro de tubo aberto	4	1
Piezômetro pneumático	4	1
Piezômetro hidráulico	10	1
Piezômetro elétrico	3	1
Medidor de recalques telescópico	8	1
Medidor de recalques KM	10	1
Medidor de recalques magnético	40	2*
Inclinômetros	2/m	2*
Célula de tensão total	4	1
Extensômetro de hastes	5	1

*Dos dois empregados assinalados, basta um com boa qualificação; o outro atua como ajudante, precisando, entretanto, saber ler e escrever.

Fonte: Cruz (2004)

A frequência ideal para leituras costuma ser divergente entre autores, mas é consenso que estas frequências se alteram de acordo a período em que a barragem se encontra. Alguns autores como Silveira (2006) dividem a vida da obra em quatro fases: período construtivo, enchimento do reservatório, período inicial da operação e período de operação. Já outros autores como Cruz (2004) divide em meses. A Tabela 2 apresenta as sequências usuais de leituras para alguns instrumentos, de acordo com Cruz (2004).

Tabela 2: Frequências usuais de leituras

Instrumento	Construção	Enchimento +3 meses	4º ao 6º mês	7º ao 12º mês	13º ao 36º mês	37º mês em diante
Medidor de nível d'água	Semanal	2/semana	2/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal
Medidor de vazão	Semanal	3/semana	3/semana	2/semana	Semanal	Quinzenal
Piezômetros de fundação	Semanal	2/semana	2/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal
Piezômetros de maciço	Semanal	1/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal
Medidores de recalques	Semanal	2/semana	Semanal	Quinzenal	Mensal	Bimestral
Inclinômetros	Quinzenal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal	Mensal	Trimestral
Célula de tensão total	Semanal	2/semana	Semanal	Semanal	Quinzenal	Quinzenal
Extensômetro de hastes	Semanal	3/semana	2/semana	Semanal	Quinzenal	Quinzenal

Fonte: Cruz (2004)

Silveira (2006) reitera que, se após quatro ou cinco anos de operação a barragem e suas fundações atingem uma situação geral de aparente estabilidade, procede-se, então, a partir desse período, a uma ampliação dos intervalos entre leituras, independentemente da aparente estabilidade de cada um dos instrumentos em si, mas desde que as inspeções visuais continuem a ser executadas periodicamente.

4. CASO DE INSTALAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA

4.1. Apresentação da barragem

A instalação de instrumentos em barragens pode ser feita em diferentes momentos. O ideal é que eles estejam previstos em projeto e sua instalação seja feita simultaneamente como a construção da barragem, porém nem sempre é assim que ocorre. Pode ser que a instalação seja feita posteriormente, quando o proprietário percebe a demanda ou quando instrumentos já instalados deixam de funcionar.

Será analisada nesta seção a instalação de instrumentos em uma pequena barragem de terra e enrocamento situada no sudeste de Goiás. Trata-se de um barramento, que está passando por reforma, com finalidade de reservar água para uma empresa privada.

O terreno onde se encontra a barragem é predominantemente composto de silte argiloso. Sobre ele foi construído o maciço da barragem, que é um maciço de terra com proteção de enrocamento no talude de montante, com 20 cm de espessura. O talude de jusante é revestido por vegetação. A inclinação dos taludes é de 1V:2H, sendo a altura próxima a 7 m. A crista da barragem tem 4 m de largura e inclinação de 2%. A área do lago é de cerca de 90.000 m². Antes da reforma, existiam dois extravasores, um na ombreira direita e um na ombreira esquerda, ambos foram destruídos e substituídos por um extravasor central. O local dos antigos extravasores foi reaterrado e reconformado.

Nesta barragem foram instalados três tipos de instrumentos: indicadores de nível de água (INA), piezômetros tipo Casagrande (PZ) e marcos superficiais (MS). A instalação foi realizada por uma empresa especializada no serviço, a Solobrasil, que se baseou nas normas ABNT NBR 6484:2001 e ABNT NBR 15495:2007 para a sondagem e instalação da instrumentação, respectivamente.

A Tabela 3 apresenta as coordenadas de locação dos elementos conforme projeto, bem como algumas de suas características. A locação dos instrumentos em planta pode ser observada no Anexo 1, onde também se encontra parte do projeto executivo.

Tabela 3: Locação dos instrumentos.

INSTRUMENTO	COORDENADAS		ELEVÇÃO DE REFERÊNCIA (m)	ELEVÇÃO DO BULBO (m)	COMPRIMETO TOTAL (m)	PROFUNDIDADE DO FURO (m)	COMPRIMENTO DO TRECHO EM ARGAMASSA DE CIMENTO E AREIA (m)	COMPRIMENTO DO TRECHO EM SELO DE BENTONITA (m)	COMPRIMENTO DO TRECHO EM AREIA LAVADA (m)	COMPRIMENTO DO FILTRO (m)
	LESTE	NORTE								
INA-1	685.371,31	8.019.171,90	826	821,30	5,80	5,0	1,10	1,00	3,50	3,00
INA-2	685.472,28	8.019.217,17	826	820,30	6,80	6,0	1,10	1,00	4,50	4,00
PZ-1	685.399,45	8.019.184,51	826	818,30	8,80	8,0	1,60	6,10	1,40	0,60
PZ-2	685.450,26	8.019.207,30	826	819,30	7,80	7,0	1,60	5,10	1,40	0,60
MS-1	685.374,05	8.019.173,13	826	Não se aplica.						
MS-2	685.402,00	8.019.185,66	826							
MS-3	685.453,00	8.019.208,53	826							
MS-4	685.475,00	8.019.218,41	826							

Fonte: Solobrasil (2019).

Os instrumentos foram locados na crista da barragem em quatro seções, sendo duas à direita e duas à esquerda do novo vertedouro. Cada seção possui um marco superficial e um piezômetro ou indicador de nível d'água. Os piezômetros foram instalados na fundação em silte argiloso, aproximadamente 1 m abaixo da base do maciço da barragem. Já os indicadores de nível d'água foram instalados no corpo de barragem de terra a uma profundidade aproximada de 1 m acima do contato com a fundação.

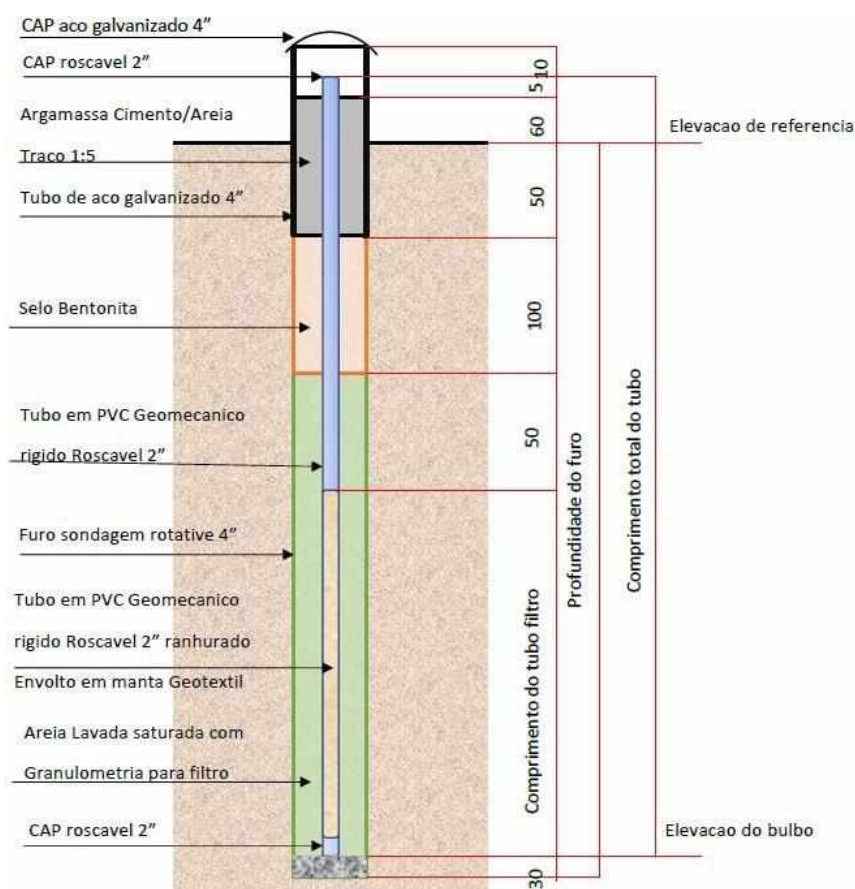
4.2. Metodologia executiva

A metodologia descrita a seguir teve como base o relatório de instalação da Empresa Solobrasil (SOLOBRASIL, 2019). Para este trabalho, não se teve acesso ao projeto de instrumentação da barragem nem a dados de monitoramento.

4.2.1. Indicadores de nível d'água

O esquema do indicador de nível d'água instalado, com seus componentes e dimensões características pode ser observado na Figura 13. Foram dois instrumentos instalados (INA-1 e INA-2), cujas dimensões variáveis entre eles, como a profundidade do furo por exemplo, constam na Tabela 3.

Figura 13: Esquema indicador de nível de água padrão.



Fonte: Solobrasil (2019).

O processo de instalação foi dividido em nove etapas, que são melhor descritas a seguir: pré-furo; coluna da tubulação; perfuração da tubulação; proteção do trecho perfurado; selagem; posicionamento da coluna de tubulação; lançamento da areia; preenchimento do topo do furo e acabamento e proteção.

Na etapa de pré-furo o solo foi perfurado no ponto especificado em projeto, segundo o procedimento de sondagem, até atingir a profundidade alvo. Este processo pode ser

observado na Figura 14a. As observações de fatores como nível de água encontrado, umidade, resistência das camadas, materiais e plasticidade foram devidamente registrados.

Com esta primeira etapa concluída, a coluna do tubo a ser inserida no furo de sondagem foi montada, obedecendo o diâmetro de projeto. A tubulação usada foi do tipo rosqueável, com tubos de PVC com ranhuras efetuadas no local. No caso de furos, estes foram feitos com uma furadeira, enquanto que as ranhuras foram feitas com auxílio de um arco de serra. Tanto os furos quanto as ranhuras seguiram especificações de projeto para atender a ABNT NBR 12212:2017.

Figura 14: (a) Perfuração do furo de sondagem; (b) Descida da célula de indicador de nível d'água.



Fonte: Solobrasil (2019).

A ABNT NBR 12212:2017 estabelece diretrizes para o dimensionamento e construção do filtro: a velocidade de entrada de água no filtro deve ser ficar entre 0,03 m/s e 0,08 m/s; o diâmetro interno do filtro deve ser compatível com o tubo liso, porém a

velocidade vertical máxima não deve exceder 1,5 m/s; o dimensionamento da abertura dos filtros (ranhuras) é estabelecido com base na granulometria do aquífero e do pré-filtro (célula de areia); o filtro deve reter no mínimo 85% do material do pré-filtro.

O trecho que foi perfurado ou ranhurado foi envolto em tela geotêxtil de malha especificada em projeto de forma a reduzir a colmatação pela passagem de grãos de areia ou outros materiais.

A coluna de tubulação previamente preparada foi posicionada no furo de sondagem utilizando um sistema de elevação da perfuratriz para desce-la ao longo do furo revestido, conforme observado na Figura 14b. Nesta etapa atentou-se para que a base do tubo ficasse no nível especificado em projeto. As etapas a seguir aconteceram de forma simultânea com a retirada do revestimento da sondagem.

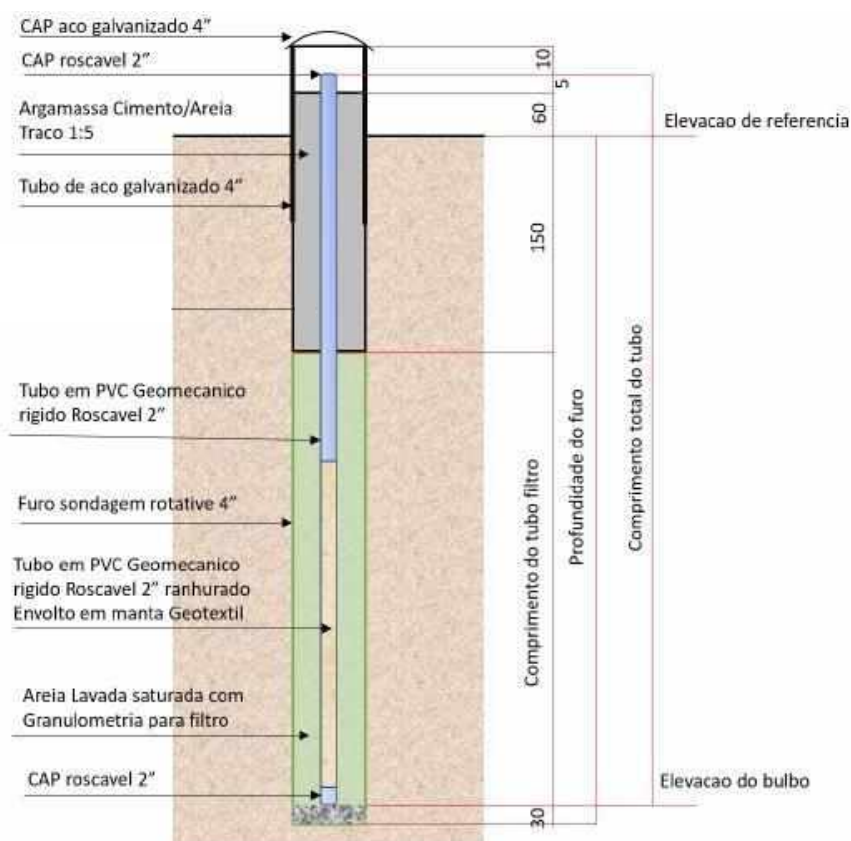
A célula deve ser revestida por uma célula de areia, ou pré-filtro. Para isso, a areia foi cuidadosamente lançada a partir da boca do furo. A altura do preenchimento de areia e sua granulometria devem estar de acordo com o especificado em projeto. A ABNT NBR 12212:2017 estabelece algumas diretrizes para o dimensionamento e construção do pré-filtro, tais como: o material adotado deve ser de constituição quartzosa, com granulometria tal que 70% sejam retidos na peneira de abertura entre 4 e 6 vezes a que reteria 70% do material friável e coeficiente de uniformidade inferior a 2,5.

A selagem ou preenchimento do topo do furo de sondagem foi feita com uma mistura de água, cimento e bentonita na proporção especificada em projeto. A mistura foi injetada, por meio de um conjunto de mangueiras, de baixo para cima em baixa pressão até que se atinja a cota especificada em projeto.

No projeto em questão, foi acordado entre as partes (proprietário da barragem e prestadores de serviço), a não utilização do selo de bentonita, de forma a simplificar e acelerar a execução dos trabalhos. Esta exclusão promoveu também uma maior vedação entre as camadas de transição. Apesar disso, essa execução não está de acordo com a Norma. Utilizou-se uma manta geotêxtil não-tecida, com espessura de 15 cm entre ambas para criar uma camada de transição entre essas

duas camadas. O esquema do indicador de nível d'água conforme foi construído é apresentado na Figura 15.

Figura 15: Indicador de nível d'água conforme construído.



Fonte: Solobrasil (2019).

Um tubo metálico de 4" foi instalado sobre a boca do furo para proteção dos tubos de PVC, visando aumentar a durabilidade e viabilizar a confortável leitura manual do instrumento. A colocação do tubo pode ser observada na Figura 16a. Uma base de concreto foi empregada no engaste do tubo metálico com a superfície do terreno. O elemento finalizado, pronto para uso, pode ser observado na Figura 16b.

4.2.2. Piezômetros

Os piezômetros instalados (PZ-1 e PZ-2) foram do tipo Casagrande, que apresentam como vantagens uma constituição simples e econômica, uma instalação também simples, durabilidade e a não necessidade de calibração.

Figura 16: (a) Descida do tubo; (b) Instalação finalizada.



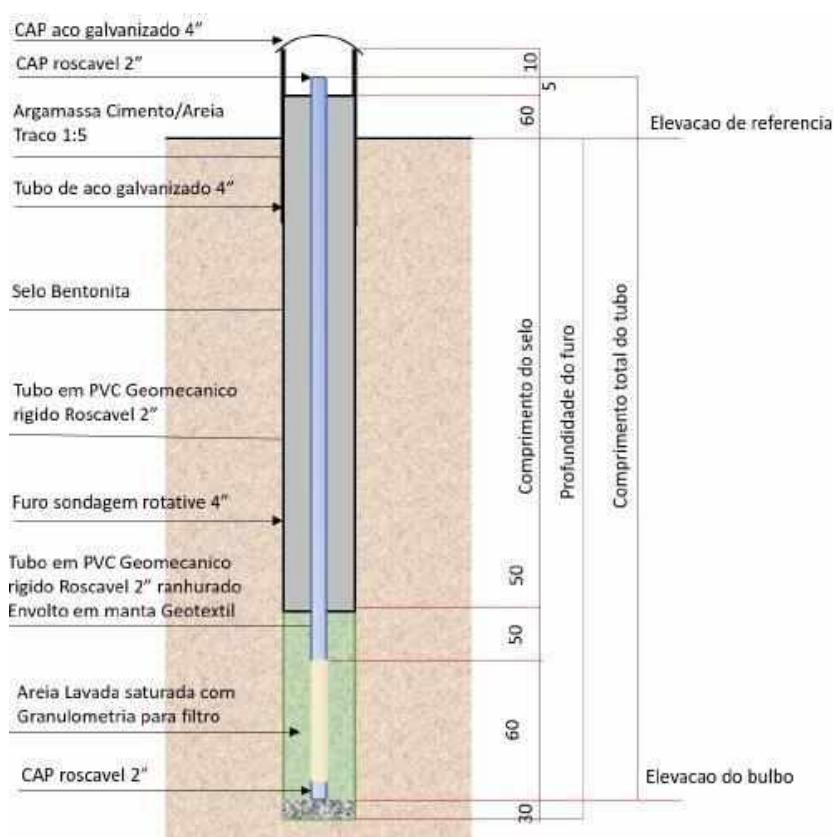
Fonte: Solobrasil (2019).

O método mais adequado para a instalação do piezômetro é o emprego da coluna de tubulação, por se tratar de um instrumento que oferece a medida de carga piezométrica atuante na camada alvo e precisar de uma célula de areia local para equalizar as variações de subida e descida da carga piezométrica. A sequência de instalação de um piezômetro Casagrande é muito parecida com o procedimento de instalação do indicador de nível d'água, exposto anteriormente.

As diferenças na instalação do piezômetro de Casagrande em relação aos medidores de nível de água são referentes à perfuração da tubulação e à selagem do furo de sondagem. No piezômetro o trecho perfurado do tubo é bem menor que o trecho perfurado no indicador de nível d'água.

Na selagem dos piezômetros a confecção do selo pode ser feita de forma que a bentonita seja simplesmente lançada a partir da boca do furo em forma de lascas ou pelotas, ou diluída em água e conduzida por meio de mangotes até o nível correto do selo. A espessura do selo deve seguir a especificada em projeto. Assim como no indicador de nível de água, parte da selagem de bentonita foi extinta a fim de simplificar o trabalho. Nesta instalação também foi utilizada a manta geotêxtil para criar uma transição entre as camadas filtrantes. O esquema do piezômetro conforme construído é mostrado na Figura 17 e fotos de um elemento finalizado podem ser observadas na Figura 18.

Figura 17: Piezômetro conforme construído



Fonte: Solobrasil (2019).

Figura 18: Instalação do piezômetro finalizada.



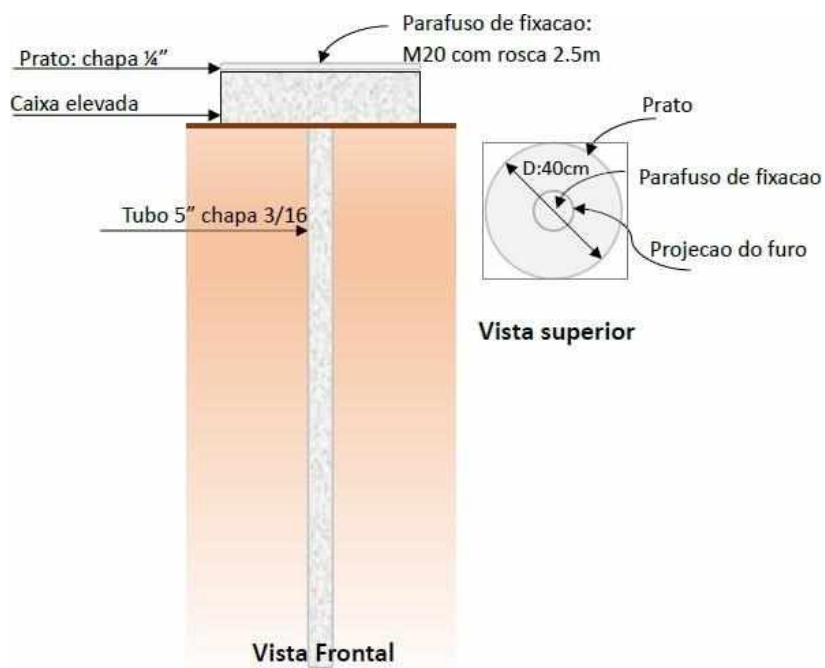
Fonte: Solobrasil (2019).

4.2.3. Marcos superficiais

Com o objetivo de se construir marcadores fixos dos pontos referenciáveis, os marcos superficiais (MS-1 a MS-4) foram constituídos por tubos galvanizados cravados ao solo com involucro de concreto de traço 1:2:4. Foram executados furos de 2,2 metros de profundidade, introduzindo-se em sequência um tubo de aço galvanizado 4''3/16 no fuste do furo. A Figura 19 exemplifica o modelo de instalação que foi seguido.

Foram acopladas placas de aço às estruturas, contendo referências de posicionamento geográfico colhidas em UTM, de forma a guiar análises de deslocamento lateral ou vertical do maciço (Figura 20). A SNISB (2010) recomenda como cuidado na instalação, o controle topográfico do nível de instalação das placas e do topo do tubo de referência, para assegurar que este tubo esteja fixo e que não haja perda dos recalques medidos.

Figura 19: Modelo de instalação de marco topográfico.



Fonte: Solobrasil (2019).

Figura 20: Marco superficial instalado.



Fonte: Solobrasil (2019).

5. CASO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

5.1. Apresentação da barragem

A barragem de Fundão é parte do Complexo Germano da empresa Samarco. É uma barragem de contenção de rejeitos da exploração de ferro no distrito Bento Rodrigues, região de Mariana, estado de Minas Gerais. A barragem de Fundão foi levantada com método à montante, de forma que a posição da crista da barragem se move progressivamente a montante à medida em que a barragem é elevada. A drenagem adequada da areia que compõe o fundo do reservatório é a chave para que este tipo de concepção seja viável. Um esquema das principais estruturas do complexo é apresentado na Figura 21.

Figura 21: Estruturas principais do Complexo de Germano.



Fonte: Morgenstern et al., (2016).

5.2. O rompimento

O rompimento da barragem do Fundão ocorreu em 5 de novembro de 2015 e foi amplamente divulgado na mídia, dado seu impacto social, ambiental e econômico. A barragem continha um volume de rejeito aproximadamente igual a 62 milhões de metros cúbicos. As imagens de satélite da barragem antes e depois do rompimento podem ser observadas na Figura 25.

Figura 22: Imagens de satélite antes e depois do rompimento.



Fonte: O Globo (2015).

Os dados aqui apresentados referem-se a um relatório desenvolvido por autoridades em geotecnia, engenharia e sismologia, intitulado “Painel de revisão da barragem de rejeitos de Fundão – Relatório sobre as causas imediatas da falha da barragem de Fundão” (MORGENSTERN et al., 2016). O objetivo do relatório foi diagnosticar as causas do rompimento da barragem, e os autores se guiaram por três perguntas principais: “Porque o deslizamento ocorre?”; “Porque o deslizamento ocorreu onde ocorreu?”; e “Porque o deslizamento ocorreu quando ocorreu?”. Para desenvolver o relatório, foi feita uma reconstituição virtual da barragem e suas propriedades, a compilação de dados de instrumentação, a síntese de entrevistas com testemunhas oculares, estudos analíticos e estudos sismológicos.

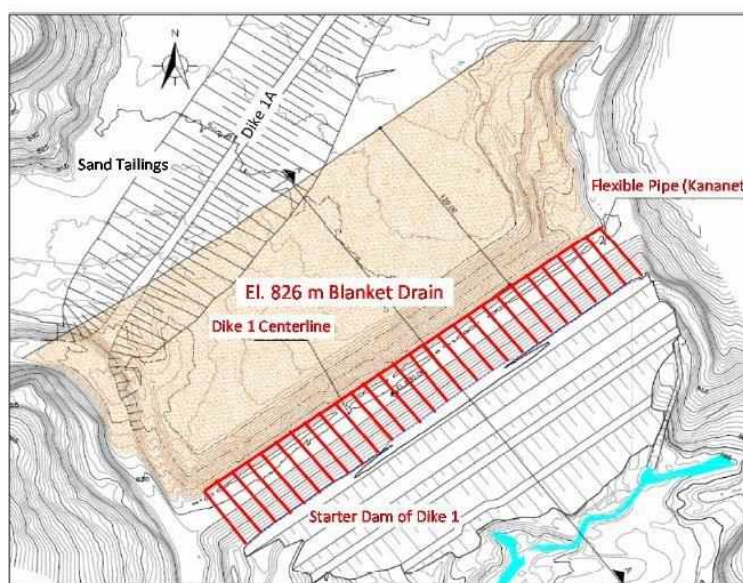
De acordo com o relatório, existiam dois tipos de rejeito, ambos produzidos em forma de lama: os rejeitos de areia, que eram uma mistura de areia com sedimentos mais

finos e, quando saturadas, liquefaziam e fluíam; e os limos, material argiloso e muito fino.

O relatório aponta que o rompimento de 2015 foi precedido por três episódios anteriores, o primeiro em 2009 e o segundo em 2011 e 2012 e o terceiro no final de 2012, estendendo-se até 2014. Os acontecimentos em cada uma dessas datas são sintetizados aqui.

A conclusão da barragem de partida ocorreu em outubro de 2008. Logo após o início da descarga em grande escala de rejeitos e areia, em 2009, fluxos de infiltração apareceram na encosta a jusante, condição sintomática do processo de erosão interna ou “*piping*”. Diante da situação foi colocado em prática um plano de ação de emergência: o reservatório foi rebaixado e foram construídas bermas sobre a parte afetada da encosta da barragem. Investigações mostraram sérias falhas nos drenos de fundo, que se tornaram inoperantes. Neste momento o equilíbrio entre areias e limos foi alterado, o preenchimento do dique 2 começou mais cedo do que o previsto, tornando seus níveis de lodo mais altos. Foi necessário então a construção de um terceiro dique, entre os diques 1 e 2, o dique 1A. Os diques 1 e 1A podem ser vistos na Figura 23.

Figura 23: Dique 1A e drenos na cota 826 m.



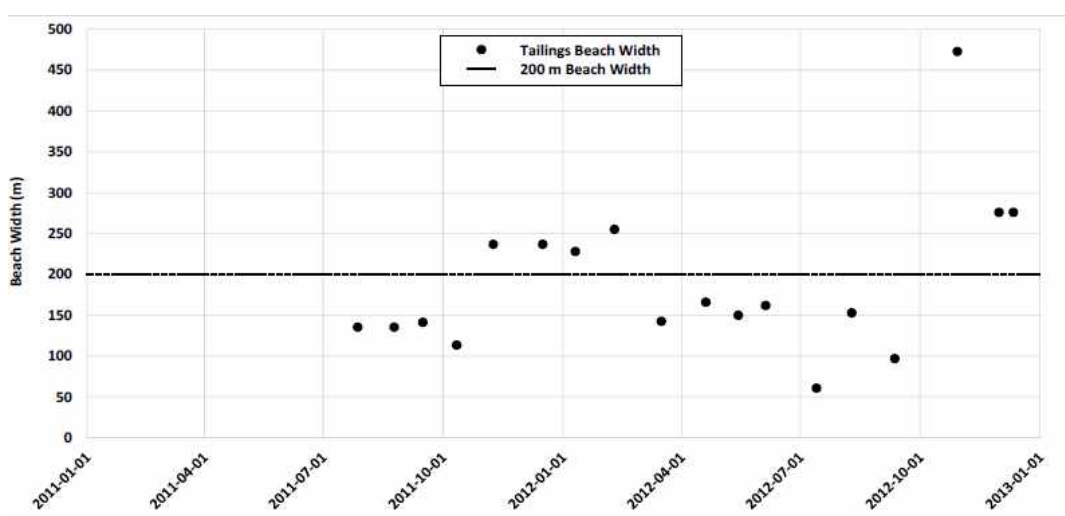
Fonte: Morgenstern et al., (2016).

Um projeto revisado para elevar o dique 1 ao nível 920 m foi descrito pela primeira vez no Manual de Operações de 2011, atualizado na versão de 2012 quando a barragem atingiu a crista com nível 845 m. O recurso para controlar o nível elevado da barragem foi a adição de um colchão drenante (nível 826 m) na superfície dos rejeitos, para substituir o dreno de base inoperante. O objetivo deste dreno era interceptar infiltrações que poderiam surgir no talude e reduzir sua estabilidade. O dreno continha tubos com fendas chamados “Kananets”. O esquema de instalação do dreno pode ser observado na Figura 24.

Apesar da instalação deste dreno, as areias abaixo dele permaneciam saturadas, assim como grande parte dos rejeitos, já que o dreno de base estava inoperante. Um requisito de projeto era que a areia não tivesse impedimento para drenagem e por isso a lama (de baixa permeabilidade) não deveria ser depositada na zona destinada à areia.

Uma largura mínima de praia de rejeitos de 200 m havia sido especificada no Manual de Operações, mas esse critério não foi alcançado de maneira consistente, chegando a apenas 60 m, como pode ser observado na Figura 24. A areia e o lodo já não eram separados fisicamente.

Figura 24: Largura da praia nos anos 2011 a 2013.



Fonte: Morgenstern et al., (2016).

Desde 2010 foi observada a entrada de água e rejeito na ombreira esquerda. As inspeções revelaram rachaduras e danos estruturais de assentamentos de fundação e defeitos de construção. Em 2011 aconteceu um processo de rejuntamento a jato para recuperar a galeria principal. Condições semelhantes foram descobertas para a galeria secundária, onde também se recorreu ao rejuntamento a jato. Em julho de 2012 ficou evidente que o rejuntamento não havia resolvido. No mesmo ano apareceram rejeitos na galeria secundária. Foram feitos planos para fechar as duas galerias, preenchendo com concreto a fim de evitar seu colapso.

Em 2012 descobriu-se que a galeria secundária não suportava rejeitos acima do nível 845 m, nível 10 m abaixo do qual os rejeitos já se encontravam na época. Como solução temporária decidiu-se realinhar a barragem na ombreira esquerda, movendo a crista de volta para trás da parte da galeria e preenchendo com concreto, para que o aterro pudesse continuar. O preenchimento da galeria secundária foi concluído em 2013.

Em fevereiro de 2013 a modelagem tridimensional de infiltração mostrou que drenos adicionais seriam necessários. Infiltrações, saturação e rachaduras começaram a aparecer em vários locais na ombreira esquerda. Infiltrações aconteceram em março e em junho, drenos foram construídos. Uma terceira infiltração em novembro resultou em uma queda na encosta, outro dreno foi fornecido para esta demanda. Em dezembro houveram mais infiltrações e rachaduras na ombreira esquerda. Neste momento tornou-se evidente que o dreno instalado a 826 m não era mais suficiente. Desenvolveu-se então um plano de um projeto inteiramente novo para o aumento da barragem em 20 m, com um sistema de drenagem independente.

Em agosto de 2014 surgem rachaduras muito extensas, que podem ser observadas na Figura 25, tonando-se primordial a estabilização da encosta. Neste momento a construção de um novo dreno na ombreira esquerda ainda estava em andamento.

Figura 25: Rachaduras na ombreira esquerda em 2014.



Fonte: Morgenstern et al., (2016).

Em outubro de 2015, a crista da barragem estava sendo elevada para o nível 900 m e em 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem. Depoimentos de testemunhas oculares apontam que a falha teve origem na ombreira esquerda.

5.3. Instrumentação da barragem de rejeitos

Nesta seção comenta-se sobre a instrumentação existente na barragem, cujos dados foram usados nas análises sobre as causas da ruptura, sem a intenção de se realizar uma avaliação de suas medidas, dada a expertise necessária para isso.

A barragem de Fundão era monitorada por diferentes tipos de instrumentos. De acordo com o relatório de monitoramento de dados de campo da barragem, disponível na página virtual do Relatório, os instrumentos instalados no Dique 1 foram piezômetros Casagrande e de corda vibrante, indicadores de nível de água, marcos superficiais e estações de monitoramento de vazão. Os instrumentos instalados no Dique 2 não estão presentes no relatório já que não foram utilizados nas análises de percolação ou estabilidade.

As leituras dos piezômetros tipo Casagrande e dos indicadores de nível de água foram registradas por seções transversais. Em 2014 haviam nove seções transversais, designadas como AA, BB, DD, FF, HH, JJ, LL, MM e NN, partindo de oeste a leste (Figura 26). Depois do incidente ocorrido em 2014, foram acrescentados piezômetros no recuo, organizados em três novas seções, 01 (oeste), 02 (centro) e 03 (leste).

Piezômetros adicionais com finalidades específicas foram instalados em três grupos. O grupo Vertedouro foi instalado em 2015, na ombreira direita, para monitorar os níveis piezométricos na área dos drenos superficiais na elevação 860 m e 855 m. O grupo Pé foi instalado para monitorar as pressões artesianas a jusante do dreno, a uma elevação de 792 m. Por fim o grupo Ombreira Esquerda, com um único piezômetro, foi instalado ao mesmo tempo que os piezômetros no recuo a leste da seção 03.

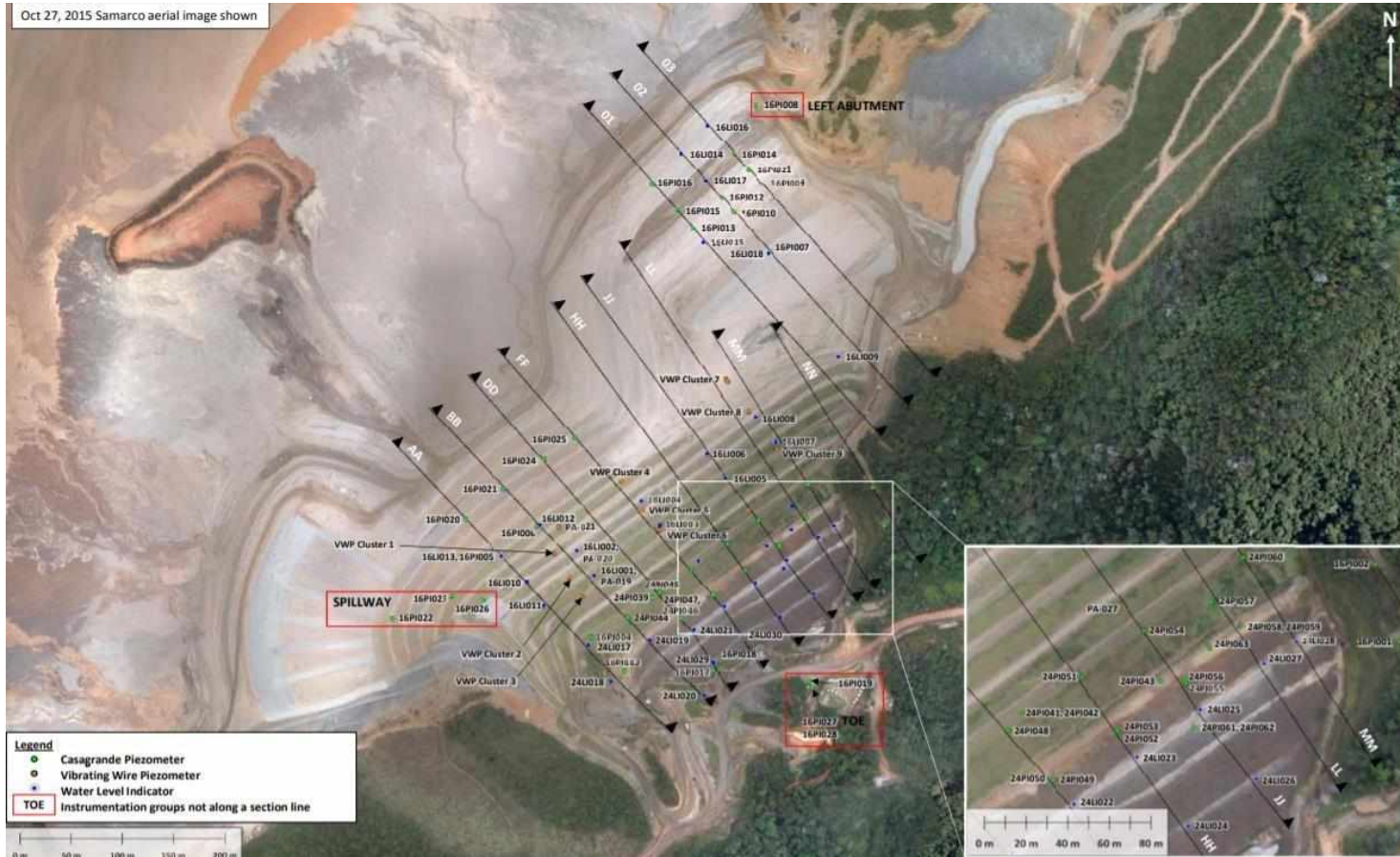
Dados de monitoramento da vazão do tapete drenante de elevação 826 m e dos tubos Kananets foram obtidos utilizando uma calha localizada na extremidade do canal de concreto. As vazões de outros cinco locais da barragem também eram monitoradas semanalmente.

Os marcos superficiais foram instalados na ombreira esquerda da barragem após o incidente de agosto de 2014. Marcos também foram instalados no Dique de Partida.

5.3.1. Piezômetros e indicadores de nível de água

Foram analisados pelo Comitê dados dos relatórios mensais de instrumentação da Samarco, que incluem gráficos para cada piezômetro ao longo da seção e leituras dos piezômetros de corda vibrante. No total foram 47 piezômetros Casagrande, 30 indicadores de nível de água e 39 piezômetros tipo corda vibrante. Com esses dados eram monitoradas a superfície freática no corpo da barragem e sobrepressões em pontos estratégicos.

Figura 26: Localizações dos piezômetros e dos medidores de nível de água.



Fonte: Morgenstern et al., (2016).

O conjunto mais completo de dados antes da ruptura da barragem são do dia 26 de outubro de 2015, quando todos os piezômetros em operação, tanto do tipo manual quanto automático, foram lidos. As leituras de 22 piezômetros Casagrande e indicadores de nível de água eram automáticas e o restante dos instrumentos era lido manualmente. Entre 2 e 5 de novembro de 2015, os piezômetros automáticos estavam passando por manutenção, assim não há nenhuma leitura automática para esse período.

As seções AA e BB, com leituras de outubro e novembro de 2015, são apresentadas na Figura 27. Os instrumentos com as letras “LI” no nome se referem a indicadores de nível de água, os instrumentos com as letras “PI” são piezômetros tipo Casagrande e os piezômetros tipo corda vibrante são chamados “PA”.

5.3.2. Marcos superficiais

Dados de 12 marcos superficiais localizados no recuo da ombreira esquerda foram também disponibilizados no relatório e analisados pelo Comitê. Os marcos foram instalados em 2014, depois do incidente, para monitorar os movimentos de talude. Os marcos enumerados de P01 a P09 estavam localizados em três bancadas do recuo e 3 marcos adicionais estão localizados a jusante dos primeiros nove instrumentos, tendo estes um período de registro muito mais curto.

Os dados referentes aos marcos P01 a P09 estão agrupados na Tabela 4, enquanto que a Figura 29 mostra as posições dos marcos superficiais em planta e o deslocamento total para o período de registro. Os deslocamentos do recuo aconteceram predominantemente na direção sudoeste, afastando-se da ombreira esquerda, estes deslocamentos também podem ser observados na Figura 28. Segundo o relatório, todos os marcos nas bancadas da elevação 885 m e 880 m sofreram deslocamento vertical em 3 de agosto de 2015, sendo a razão desconhecida. Existe também uma lacuna nas leituras de dezembro de 2014 a junho de 2015, que corresponde a mais de 50% do período de registro, as leituras são, portanto, consideradas inconsistentes. Por fim, nota-se que nenhum dos 12 marcos estava ativo na época da ruptura.

Figura 27: Seções AA e BB.

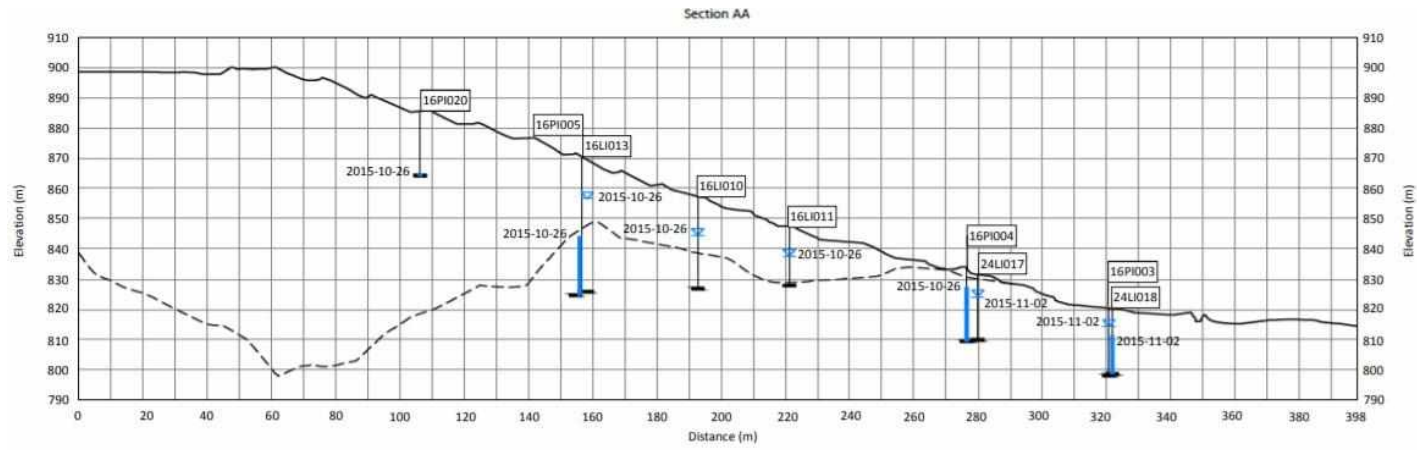


Figure E.E2-1 Section AA

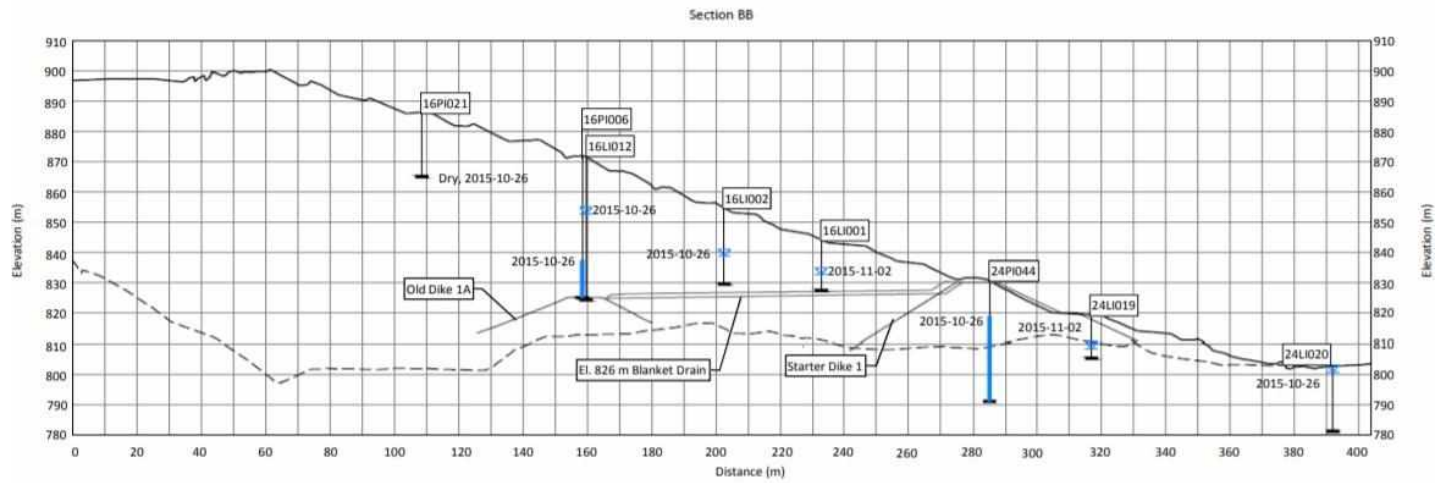


Figure E.E2-2 Section BB

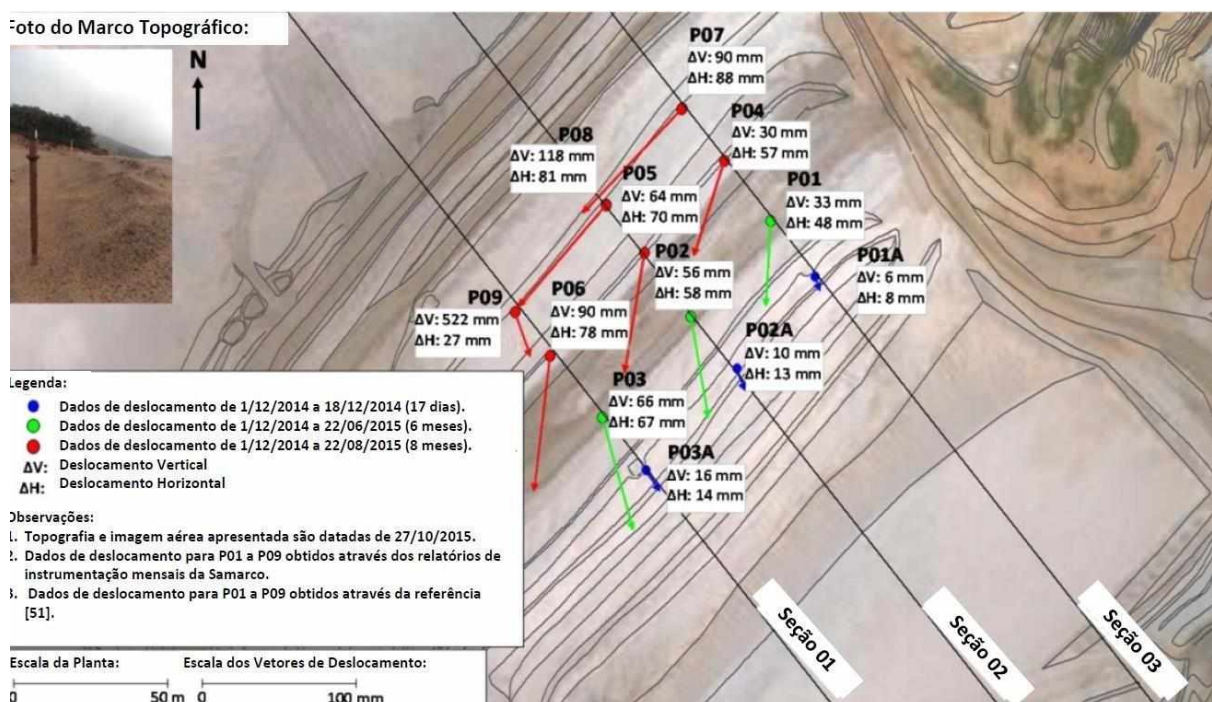
Fonte: Morgenstern et al., (2016).

Tabela 4: Deslocamentos dos marcos superficiais.

Elevação da Bancada	Nome	Deslocamento Vertical Total (mm)	Deslocamento Horizontal Total (mm)	Início da Leitura	Fim da Leitura	Motivo do Término da Leitura
870	P01A	6	8	01/12/2014	18/12/2014	Aterro do recuo
870	P02A	10	13	01/12/2014	18/12/2014	
870	P03A	16	14	01/12/2014	18/12/2014	
875	P01	33	48	01/12/2014	22/06/2015	Bancada alteada de 875 m a 877 m
875	P02	56	58	01/12/2014	22/06/2015	
875	P03	66	67	01/12/2014	22/06/2015	
880	P04	30	57	01/12/2014	22/08/2015	Preparação para alteamento do recuo
880	P05	64	70	01/12/2014	22/08/2015	
880	P06	90	78	01/12/2014	22/08/2015	
885	P07	522	88	01/12/2014	22/08/2015	
885	P08	118	81	01/12/2014	22/08/2015	
885	P09	522	27	01/12/2014	22/08/2015	

Fonte: Morgenstern et al., (2016).

Figura 28: Localização dos marcos superficiais.



Fonte: Morgenstern et al., (2016).

5.3.3. *Inclinômetros*

Os dados fornecidos sobre os inclinômetros são limitados. Apesar de previstos e alguns instalados, não existem informações suficientes a respeito das instalações e leituras.

Alguns inclinômetros que foram instalados no Dique de Partida foram destruídos durante o acidente de “*piping*” em 2009 e durante medidas subsequentes de reparação. Um funcionário da Samarco afirmou que nenhum inclinômetro foi instalado na barragem de Fundão depois que os instrumentos originais do Dique de Partida foram destruídos, em 2009.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão bibliográfica e nas informações apresentadas sobre instrumentação das barragens de terra e rejeitos, algumas considerações podem ser feitas:

- Sobre a responsabilidade de segurança de barragens, a legislação brasileira deixa a cargo do proprietário as medidas de segurança, dentre as quais se pode mencionar o monitoramento do comportamento das estruturas.
- Sobre os tipos de instrumentação e sua aplicação, a literatura consultada apresenta uma ampla gama de instrumentos que podem ser usados para monitoramento de posição do nível freático, pressão na água no corpo da barragem e na fundação, deslocamentos verticais e horizontais em superfície e em profundidade, e tensões, tanto em barragens de terra como de rejeitos. Estes instrumentos e seu princípio de funcionamento foram descritos na revisão bibliográfica.
- A literatura técnica também orienta sobre cuidados a serem tomados na interpretação das leituras dos instrumentos, que podem mascarar o mal funcionamento do próprio instrumento ou o comportamento anômalo das barragens.
- No caso da barragem de terra de pequeno porte, embora a instrumentação não tenha sido instalada na época da construção, que é indicada como a fase ideal, esta foi instalada de modo preventivo. A distribuição dos elementos foi feita na crista em 4 seções espaçadas no comprimento da barragem.
- Diferente disto, no caso da barragem de rejeitos, que tem a altura e posição da crista variando ao longo da vida útil, tem-se que a instrumentação foi predominantemente posicionada no dique de partida e em regiões nas quais se pretendia monitorar comportamentos anômalos observados previamente.

Alguns deles, como os marcos superficiais, tornavam-se inoperantes a medida que a construção da barragem avançava.

- Nos dois casos mostrados, os instrumentos usados para monitorar o comportamento das barragens foram medidores de nível d'água, piezômetros e marcos superficiais. No caso de Fundão, que se trata de uma estrutura de maior porte, inclinômetros e medidores de vazão também foram usados.
- Embora a principal função da instrumentação de barragens seja auxiliar no monitoramento das estruturas, junto com a inspeção visual, as leituras também têm sua utilidade para avaliação de fatores condicionantes de acidentes, como no caso de Fundão.
- Por fim, ressalta-se a importância do monitoramento por instrumentos e inspeção visual rotineiras em barragens, junto com a avaliação dos dados por pessoal capacitado para se possa prever o comportamento dessas estruturas que são tão numerosas no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Águas no Brasil: Hidroeletricidade**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/usos-da-agua/hidroeletricidade>. Acesso em: 16 set. 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12212: Projeto de poço tubular para captação de água subterrânea**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15495-1: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimentos com SPT-Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2017.

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

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil**. [S. l.], 2011. Disponível em: http://www.cbdb.org.br/documentos/A_Historia_das_Barragens_no_Brasil.pdf. Acesso em: 7 out. 2019.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens brasileiras**. 2. ed. [S. l.]: Oficina de textos, 2004.

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**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2003.

GEOKON. **Piezometers**: Model 4500 series. [S. l.]. Disponível em: https://www.geokon.com/content/manuals/4500_Piezometer.pdf. Acesso em: 5 nov. 2019.

ITAIPU BINACIONAL. **Itaipu em números**. [S. l.]. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/itaipu-em-numeros>. Acesso em: 23 out. 2019.

MORGENSTERN, Norbert R; VICK, Steven G; VIOTTI, Cássio B.; WATTS, Bryan D. **Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam**. [S. l.], 25 ago. 2016. Disponível em: <http://fundaoinvestigation.com/the-report/>. Acesso em: 13 nov. 2019.

O GLOBO. **Acidente em Mariana é o maior da História com barragens de rejeitos**. [S. l.], 17 nov. 2015. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/acidente-em-mariana-o-maior-da-historia-com-barragens-de-rejeitos-18067899>. Acesso em: 2 set. 2019.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1. ed. [S. l.]: Oficina de textos, 2006.

SNISB. **Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens**. [S. l.]. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>. Acesso em: 4 ago. 2019.

SOLOBRASIL. **Relatório de projeto executivo de adequação do maciço - REFERÊNCIA 0159/19**. Arquivo da empresa. 2019.

ANEXO