



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA
FACULDADE AGRICULTURA
CURSO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA AGRÍCOLA E ÁGUA RURAL

Monografia científica

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DE MASSINGIR
POR MEIO DA INSTRUMENTAÇÃO

Autor: Milton José Massingue

Tutor: Moisés José Buduio

Co-tutor: João Massicame

Lionde, Setembro de 2019



AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DE MASSINGIR POR MEIO DA INSTRUMENTAÇÃO

Tutor: Eng. Moisés José Buduio¹

Co-tutor: Eng. João Massicame²

¹Instituto Superior Politécnico de Gaza – ISPG – Lionde, Chókwè

²Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul) – Barragem de Massingir - Massingir



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Projecto de licenciatura de monografia científica sobre Avaliação da Estabilidade da Barragem de Massingir por meio da Instrumentação ao Curso de Engenharia Hidráulica, Agrícola e Água Rural, Faculdade de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para o início de actividades de investigação no âmbito do Trabalho de Culminação do Curso em forma de Monografia em Engenharia Hidráulica, Agrícola e Água Rural.

Monografia defendida e aprovada no dia 14 de Agosto de 2019

Júri

Supervisor Moisés José Buduio
(Eng. Moisés José Buduio)

Avaliador 1 Mário Tauzene Afonso Matangue
(Eng. Mário Tauzene Afonso Matangue, PhD)

Avaliador 2 Ezar Alfredo Nharreluga
(Eng. Ezar Alfredo Nharreluga)

Lionde, Setembro de 2019



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Declaração

Declaro por minha honra que este Trabalho de Culminação do Curso é resultado da minha investigação pessoal e das orientações dos meus tutores, o seu conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final.

Declaro ainda que este trabalho não foi apresentado em nenhuma outra instituição para propósito semelhante ou obtenção de qualquer grau académico.

Lionde, 12 de Setembro de 2019

Milton José Massingue

(Milton José Massingue)

ÍNDICE

ÍNDICE DE IMAGENS	vii
ÍNDICE DE TABELAS.....	viii
DEDICATÓRIA	ix
AGRADECIMENTOS	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
I. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objectivos.....	1
1.1.1. Geral:.....	1
1.1.2. Específicos:	1
1.2. Problema e Justificativa	2
II. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	3
2.1. Segurança da barragem	3
2.2. Auscultação	3
2.3. Instrumentação	3
2.3.1. Quantidade da instrumentação	4
2.4. Fase de Planeamento e Projecto	4
2.4.1. Fase de Construção	5
2.4.2. Fase do primeiro enchimento.....	5
2.4.3. Fase de Operação	6
2.5. Instrumentação da Barragem de Massingir	6
2.5.1. Piezómetros.....	6
2.5.2. Poços de alívio	8
2.5.3. Medidores de vazão	9
2.5.4. Drenos de galeria	9
2.6. Colecta, análise e Processamento de dados.....	10
2.7. Manutenção	10
2.8. Análise dos dados de instrumentação e valores limites para o controle dos instrumentos de auscultação	11
2.8.1. Valores de atenção	12

2.8.2.	Valores de alerta	12
III.	METODOLOGIA	13
3.1.	Descrição da Bacia do Limpopo	13
3.1.1.	Localização e Superfície da barragem de Massingir	13
3.1.2.	Principais características da barragem	14
3.1.3.	Descrição da fundação da barragem	15
3.1.4.	Instrumentação e Monitorização.....	16
3.2.	Materiais Utilizados	18
3.3.	Procedimentos	18
3.3.1.	Colecta de dados dos instrumentos de auscultação.....	19
3.3.2.	Análise e processamento de dados.....	20
IV.	RESULTADOS OBTIDOS	23
4.1.	Piezómetros	23
4.1.1.	Piezómetros do Corpo da Barragem	23
4.1.2.	Piezómetros da margem esquerda e margem direita.....	25
4.1.3.	Piezómetros do descarregador auxiliar	26
4.1.4.	Piezómetros da vala de drenagem.....	28
4.2.	Poços de alívio	30
4.3.	Análise conjunta dos poços e piezómetros da vala de drenagem.....	31
4.4.	Medidores de vazão.....	31
4.5.	Drenos da galeria.....	31
4.6.	Inspecção visual	32
V.	ANÁLISE OU DISCUSSÃO	33
VI.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
VII.	RECOMENDAÇÕES	38
VIII.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
	ANEXOS	41

ÍNDICE DE IMAGENS

Figura 1. Esquema do Piezómetro Eléctrico.....	7
Figura 2. Esquema do Piezômetro de Tubo Aberto ou Casagrande.	8
Figura 3. Mapa de localização da barragem de Massingir	13
Figura 4. Barragem de Massingir	14
Figura 5. Planta da Barragem Massingir	17
Figura 6. Balde de 10l.....	18
Figura 7. Cronómetro.....	18
Figura 8. Sonda Manual	18
Figura 9. Gancho.....	18
Figura 10. Binóculos.....	18
Figura 11. Leitura piezométrica.....	19
Figura 12. Poço de alívio	19
Figura 13. Representação de limites de controle num piezómetro de tubo aberto	21
Figura 14. Mínimas Leituras Anuais, de 2006 a 2018, dos Piezómetros do corpo da barragem comparados aos valores limites de atenção e de alerta	23
Figura 15. Representação dos piezómetros do primeiro grupo: Dados resultantes das leituras do PP01B, nos anos de 2006 a 2018, comparados aos valores limites de atenção e de alerta	24
Figura 16. Representação dos piezómetros do segundo grupo: Dados resultantes das leituras do PP02, nos anos de 2006 a 2018, comparados aos valores limites de atenção e de alerta	25
Figura 17. Mínimas Leituras Anuais dos Piezómetros da Margem Esquerda.....	26
Figura 18. Variação dos níveis piezométricos dos piezómetros do descarregador auxiliar em relação a cota da albufeira.....	27
Figura 19. Mínimas Leituras Anuais dos Piezómetros da Vala de Drenagem comparadas aos valores de limites de atenção e de alerta.....	28
Figura 20. Comportamento dos níveis piezométricos dos novos piezómetros, no ano de 2018, com a variação do nível de água da albufeira.....	29

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Características da albufeira associada à barragem.	15
Tabela 2. Instrumentos de auscultação da barragem de Massingir	22
Tabela 3. Comparação dos valores limites de atenção e de alerta com as máximas e mínimas anuais dos piezómetros do descarregador auxiliar	27

LISTA DE ABREVIATURAS

NAA Nível de água na albufeira

PA Poços de alívio

PVD Piezómetros da vala de drenagem

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, Massingue, especialmente, a duas grandes mulheres que estiveram sempre presentes na minha vida, minha mãe Clementina F. Ouana e minha irmã Elsa José Massingue.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Primeiramente à Deus pelo dom da vida, por dar-me forças e coragem para enfrentar e superar as barreiras que a vida coloca, principalmente na vida académica. Por dar-me saúde e energia para continuar firme nesta difícil e longa caminhada e por ter-me dado uma família.

À minha mãe por ser muito presente, me apoiando em momentos de difíceis e comemorando as minhas conquistas.

À todos que directo ou indirectamente contribuíram na realização deste trabalho, principalmente aos meus supervisores (e/ou revisores) Moisés Buduio e Mário Matangue pelo apoio e acompanhamento incondicional dados na realização deste trabalho, contribuindo na melhoria do mesmo. Sem esquecer de mencionar o meu amigo, Nordino Paluluane que contribuiu bastante na realização deste trabalho, dando algumas noções básicas sobre o uso do software Excel. E a ARA-Sul por ter-me dado Espaço e ferramentas necessárias para a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos, Jefre, Pestânia, Elsa, Flávia, Felismina e Ernesto, por acreditarem em mim, me apoiando sempre que necessário, e por me ajudarem a concretizar todos os meus sonhos e aos meus familiares, principalmente aos meus sobrinhos, primos e a minha avo, que directa e/ou indirectamente contribuíram para a minha formação.

À família Muvale, especialmente, ao meu cunhado Emídio Bango e a sua irmã Culminoca Bango, por me terem ajudado de diversas maneiras sempre que era preciso e por desempenharem um papel muito importante na minha vida estudantil e à família Chipanga por ter-me acolhido em sua casa durante a época do estágio rural e pelas diversas lições dadas.

E por fim, aos meus amigos, Ivan, Abel, Sérgio, Clinton e outros não menos importantes, pela confiança e pelo suporte dado e aos meus colegas, principalmente, ao Jaime Mazuze, Ôquer Munhame, António Mabunda, Emcédio Nhaduate, Wilson Chipa, Adelina Mulhovo, Leocádia Chiau, Denilson Vilanculos e Milton Income pois sem eles eu não teria conseguido alcançar os meus objectivos. Eu lhes chamo família, pois com eles aprendi muita coisa, e a mais importante é que amigo verdadeiro é aquele que cuida.

O meu muito obrigado!

RESUMO

Vários factores podem colocar uma barragem em risco. A perda progressiva da estabilidade provocada por algum tipo de anomalia pode levar esta estrutura ao colapso, provocando inúmeros e enormes danos a população ao seu redor. Em barragens de terra, como no caso de Massingir, uma falha poderia ser ocasionada por um escoamento espontâneo de água no interior da estrutura, causando rupturas e, até mesmo colapso, provocando inundações rápidas a jusante. Para que haja controlo deste processo que é inevitável, são instalados na fundação e no corpo da barragem instrumentos que possibilitam controlar a percolação da água no interior da barragem podendo assim avaliar a estabilidade da mesma. Este trabalho teve como principal objectivo avaliar a estabilidade da barragem de Massingir através da instrumentação estabelecendo comparações entre dados actuais relativos dos instrumentos de auscultação que monitoram o comportamento da água subterrânea que percola em diversos pontos de uma barragem, bem como ao longo do maciço da construção e as respectivas vazões de percolação que variam com o nível de água do reservatório, com os dados do projecto inicial de modo a verificar as condições de segurança da barragem. Constatou-se que cerca de 26% dos 238 instrumentos instalados no corpo e na fundação da barragem de Massingir encontram-se avariados. Destes instrumentos 131 são piezómetros de tubo aberto, dos quais 37 servem como drenos de galeria e estes aliviam as pressões com eficácia. Dos outros 94 piezómetros de tubo aberto, 60 estão instalados na vala de drenagem, na margem direita, e 8% deles encontram-se avariados e dos 92%, que equivale a 55 piezómetros, apenas 97% registram leituras que ultrapassam os limites de atenção, o que significa que as pressões exercidas pela água na fundação superam as máximas pressões admissíveis para manter o factor de segurança da barragem nas suas condições normais de exploração. Por outro lado, que o tratamento com poços de alívio mostrou-se ineficiente para reduzir de forma eficaz as subpressões a jusante da barragem.

Palavras-chave: *Segurança, Verificação da Estabilidade, Barragem e Instrumentação,*

ABSTRACT

Several factors can put a dam at risk. The progressive loss of stability caused by some kind of anomaly can cause this structure to collapse, causing numerous and huge damage to the surrounding population. In earth dams, as in the case of Massingir, a failure could be caused by a spontaneous flow of water inside the structure, causing disruptions and even collapse, causing rapid downstream flooding. For there to be control of this inevitable process are installed on the foundation and on the dam body instruments that make it possible to control the percolation of water inside the dam thus evaluate its stability. The main objective of this work was to evaluate the Massingir dam stability through instrumentation establishing comparisons relative current data from the listening instruments that monitor the behavior of the groundwater that percolates at various points of a dam as well as along the massif construction and the respective percolation flow rates that vary with the water level of the with the initial design data to verify the safety conditions of the tank. dam. About 26% of the 238 instruments installed on the body and foundation were found Massingir dam are damaged. Of these instruments 131 are piezometers of standpipe, of which 37 serve as gallery drains and these effectively relieve pressures. Of the other 94 standpipe piezometers, 60 are installed in the drainage ditch on the 8% of them are broken and of the 92%, which is 55 piezometers, only 97% record readings that exceed the limits of attention, which means that the pressures exerted by water in the foundation exceed the maximum allowable pressures to maintain the safety factor dam under normal operating conditions. On the other hand, that treatment with relief wells proved inefficient to effectively reduce downstream dam.

Keywords: *Security, Stability Check, Dam & Instrumentation.*

I. INTRODUÇÃO

Barragem pode ser definida como sendo um elemento estrutural, construída transversalmente à direcção de escoamento de um curso de água, destinada a criação de um reservatório artificial de acumulação de água (MARANGON, 2004).

As barragens de terra são os tipos mais comuns de barragens, devido a sua construção envolver a utilização de material facilmente obtido em localidades próximas. Todavia, esse tipo de estrutura possui a desvantagem de sofrer com a percolação de água no interior de seu maciço. Na maioria dos casos, sua construção é executada sem a utilização de dados obtidos em ensaios de campo e laboratório, ou mesmo a realização de análises de estabilidade, acarretando assim um grande número de rupturas, aparecimento de fissuras, problemas de infiltrações, escavação de taludes, recalques acentuados, dentre outros (ROJAS & FONINI, 2006).

As barragens têm certo potencial de risco, o qual não deve ser menosprezado ou ignorado. Este trabalho tem como principal objectivo avaliar a estabilidade da barragem de Massingir através da instrumentação, estabelecendo comparações entre os valores limites de controle e os dados actuais relativos dos instrumentos de auscultação que monitoram o comportamento da água subterrânea que percola em diversos pontos da barragem, bem como ao longo do maciço da construção e as respectivas vazões da percolação que variam com o nível de água do reservatório de modo a verificar as condições de segurança.

A realização deste trabalho contribui com uma nova base de dados sobre a actual situação da estabilidade da barragem. Ademais, esta pesquisa contribuirá para a tomada de certas medidas, se necessário, com vista a evitar danos económicos ou até catastróficos resultantes da percolação da água.

1.1. Objectivos

1.1.1. Geral:

- ✓ Avaliar a estabilidade da barragem de Massingir por meio da instrumentação.

1.1.2. Específicos:

- ✓ Colectar dados de todos os instrumentos de auscultação;
- ✓ Analisar e comparar os dados obtidos com os do projecto da barragem;
- ✓ Realizar um diagnóstico técnico de segurança; e
- ✓ Apontar algumas medidas de mitigação

1.2. Problema e Justificativa

Desde o primeiro enchimento da barragem até aos dias actuais, observaram-se vários fenómenos que colocam em risco a estrutura da barragem de Massingir e, conseqüentemente, o ecossistema e toda a biodiversidade ao seu redor. Em barragens de terra, como no caso de Massingir, uma falha poderia ser ocasionada por um escoamento espontâneo de água no interior da estrutura, causando rupturas e, até mesmo, colapso de uma estrutura, provocando inundações rápidas a jusante.

Um dos factores que ameaçam a estabilidade e a segurança da barragem de Massingir é a percolação da água no interior da própria barragem e este movimento de água no interior da barragem pode culminar num fenómeno denominado Piping, fenómeno que causa acidentes de barragens levando-as ao colapso devido erosão interna. Com efeito, as características de locação, quantidade e qualidade da água de percolação ao longo da barragem ou da sua fundação e, particularmente, variações bruscas destas características, podem indicar problemas associados à obstrução dos drenos, erosão interna e aumento de poropressões. Isto é, particularmente, evidente na fase operacional, a partir da caracterização dos valores de referência das vazões de percolação (FONSECA, 2003).

Para garantir que haja segurança e estabilidade da barragem de Massingir houve uma grande necessidade de se instalar uma série de dispositivos que ajudassem a controlar ou monitorar o desempenho e o estado da estrutura. A instrumentação desempenha um papel muito importante na segurança e estabilidade da barragem, por isso é imprescindível que todos os instrumentos estejam a funcionar devidamente bem e que a informação por eles fornecida seja analisada cuidadosamente a tempo recorde e documentada.

II. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Segurança da barragem

A segurança da barragem é aqui definida como a sua “capacidade para satisfazer as exigências de comportamento necessárias para evitar incidentes e acidentes”, distinguindo-se incidente do acidente consoante a gravidade da anomalia, no segundo caso com a possibilidade de conduzir a uma situação de ruptura e conseqüente onda de cheia (ALMEIDA).

A segurança de uma barragem está intimamente relacionada aos aspectos de projecto, construção, instrumentação/inspecção, operação e manutenção (PEDROTHA, 2007).

2.2. Auscultação

FLORINI (2003), define auscultação sendo um conjunto de métodos de observação do comportamento de uma determinada obra de engenharia, com o objectivo de controlar as suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculo utilizados no projecto, verificar a necessidade da utilização de medidas correctivas, fornecer subsídios para a elaboração de novos critérios de projecto e pode ser feita por: Instrumentação e Inspeções Visuais.

Uma vez que o projecto e construção adequados são fundamentais, mas não suficientes para garantir a continuidade da operação segura das barragens, deve ser estabelecido um processo de acompanhamento e avaliação permanentes do desempenho destas estruturas. Este processo é usualmente denominado de auscultação de barragens, e engloba as actividades de observação, detecção e caracterização de eventuais deteriorações que possam aumentar o potencial de risco de uma estrutura (FONSECA, 2003).

2.3. Instrumentação

Refere-se ao conjunto de dispositivos instalados nas estruturas em suas fundações com objectivo monitorar o seu desempenho através de medições de parâmetros cujos resultados, devidamente, analisados e interpreta-los, servirão para avaliar suas condições de segurança (FONSECA, 2003).

A principal função da instrumentação é fornecer os valores colectados durante as inspeções aos responsáveis pela auscultação da barragem, de forma que esses parâmetros sejam comparados com as hipóteses consolidadas no projecto, ou seja, mecanismos de maior

requisito para avaliação do desempenho da estrutura (SALGADO, CERQUEIRA, HENRIQUES, & FILHA, 2016).

2.3.1. Quantidade da instrumentação

A quantidade de instrumentos a ser instalado em uma barragem está condicionada principalmente aos seguintes aspectos básicos: comprimento da barragem, altura máxima, características geológicas da fundação, característica das matérias utilizados no corpo da barragem e etapas construtivas (VICTORINO, GEHLING, & RAMIRES, 2003) citando (DUNNICLIFF, 1988).

Segundo a Lei 12.334, artigo 4º, inciso I, citada por (ZUCULIN, 2012) temos que:

“A segurança de uma barragem deve ser considerada nas suas fases de planeamento, projecto, construção, primeiro enchimento, primeiro vertimento, operação, desactivação e de usos futuros”. Afirmando assim que, em cada fase, o comportamento da barragem deverá ser monitorado. A instrumentação para monitoramento depende da dimensão da barragem, de seu objectivo, características do local onde está construída e dos aspectos construtivos e operativos.

2.4. Fase de Planeamento e Projecto

Segundo FLORINI (2008), para qualquer barragem, durante o planeamento e projecto, é possível e necessário, conhecermos: características geotécnicas e geológicas do local da barragem; materiais para construção; investigações e ensaios de campo; estudos hidrológicos e hidráulicos; estudos de sedimentação; estudos de estabilidade; tratamentos das fundações e do concreto e as condições sociais e ambientais de sua inserção.

A partir destes parâmetros, vamos definir o tipo e o arranjo da barragem e a partir destes, quais as principais grandezas que deverão ser monitoradas pela instrumentação, que, segundo (LUZ 1993 apud MATOS 2002) também citado em (ZUCULIN, 2012) são:

- ✓ Deslocamentos;
- ✓ Deformações e tensões;
- ✓ Temperatura;
- ✓ Níveis piezométricos em fundações;
- ✓ Pressões de água;
- ✓ Vazões.

2.4.1. Fase de Construção

Na fase de construção podemos resumir os objectivos da instrumentação sem se limitar a (ZUCULIN, 2012):

- ✓ Avaliar eventos não previstos e detectar anomalias no comportamento da barragem, de outras estruturas, ou de condições que as possam favorecer;
- ✓ Prever novas zonas de risco;
- ✓ Fornecer informações mais realistas e representativas sobre os materiais e sobre a fundação;
- ✓ Aferir soluções técnicas adoptadas na fase de projecto e possibilitar revisões com uso de soluções menos conservadoras.

2.4.2. Fase do primeiro enchimento

Segundo ZUCULIN (2012), nesta fase o monitoramento assume um papel importante, pois permite um diagnóstico preciso da obra, comparando os dados com os limites de projecto. Há o controle de parâmetros como: deslocamentos horizontais e verticais, movimentos de algumas juntas, temperatura e deformação do concreto, para prevenir ruptura ou fissuramento excessivo durante esse primeiro enchimento. Ele ainda acrescenta que sempre que possível, o enchimento deve ocorrer de forma lenta e gradual, para a adaptação da estrutura com as novas condições criadas. É de salientar que a maioria dos acidentes em barragens, ocorre durante o primeiro enchimento porque é nesta fase em que as acções das forças começam a surtir efeito bem como as primeiras infiltrações na estrutura da barragem, arrastando consigo as partículas de solo da fundação, situação que ao prevalecer pode levar ao colapso da barragem.

A instrumentação usada nesta fase deve:

- ✓ Alertar sobre a ocorrência de anomalias que possam colocar em risco a segurança das estruturas de barramento;
- ✓ Possibilitar uma avaliação do desempenho estrutural das obras de barramento, através de comparações entre grandezas medidas “in situ” e aquelas consideradas no projecto, visando verificar a adequação aos critérios de projecto.

2.4.3. Fase de Operação

ZUCULIN (2012), diz que esta é a fase, de operação, que engloba toda a vida útil da barragem.

A instrumentação nesta fase, objectiva:

- ✓ Acompanhar o atendimento aos critérios de projecto;
- ✓ Monitorar o desempenho geral da barragem, da fundação e das estruturas associadas, como: deslocamentos, tensões internas, subpressão, vazões de drenagem, e outras;
- ✓ Observar com detalhe, o desempenho de áreas e situações críticas e prever possíveis zonas de risco;
- ✓ Caracterizar o comportamento das estruturas, após algum tempo de operação e reavaliar suas condições de segurança.

2.5. Instrumentação da Barragem de Massingir

Segundo a RSB (1993) citada por FIGUEIREDO (2017) a segurança da barragem de Massingir é um motivo de preocupação, assim como as demais barragens existentes, pelas consequências que podem advir de uma rotura, embora este tipo de situações constituía, por regra, uma possibilidade remota. O objectivo do controle e acompanhamento da barragem é permitir principalmente monitorizar e detectar ocorrências de eventuais anomalias, por forma a ser possível tomar medidas que minimizem as suas consequências.

Em Massingir são feitas inspecções visuais de rotina à barragem e ao sistema de monitorização composto por diversos instrumentos. O processo de aquisição de dados faz-se por realização de leituras directas dos instrumentos instalados em várias partes da barragem, que são nomeadamente: Piezómetros e medidores de vazão, Poços de alívio e Drenos de galeria (FIGUEIREDO, 2017).

2.5.1. Piezómetros

Segundo a FONSECA (2003), piezómetros são instrumentos convencionalmente utilizados para a medida de poropressões em obras geotécnicas. Estes instrumentos podem ter diferentes naturezas e princípios de funcionamento, compreendendo tanto a medição directa das poropressões (expressa, por exemplo, pela altura da coluna de água no interior de um tubo de pequeno diâmetro, nos chamados piezómetros de tubo aberto ou de Casagrande) como a medição indirecta através da correlação com medidas de outras grandezas (por exemplo,

através das medidas das deformações de uma membrana elástica inserida no interior de um elemento poroso, nos chamados piezômetros de membrana).

De acordo com PEDROTHA (2007), o valor da leitura fornecido é a cota piezométrica, que é a soma da carga de elevação mais a carga de pressão no ponto de instalação. Ou seja, é fornecida a carga total no ponto de instalação, em relação ao nível do mar.

Existem vários tipos de piezômetros, destacando-se mais: hidráulico, eléctrico, pneumático, de corda vibrante e standpipe (ou Casa-grande ou tubo aberto). Estes têm como principal função fornecer a carga de pressão no ponto em que foi instalado.

Piezômetros Eléctricos - são piezômetros constituídos por um diafragma de aço inoxidável no qual são fixados extensómetros eléctricos de resistência, oferecendo os mais baixos tempos de resposta entre os piezômetros de membrana (FONSECA, 2003).

Estes piezômetros, cujo esquema está representado na figura 1, medem a pressão de água através da deformação de um diafragma interno, cuja deflexão é medida por um sensor de corda vibrante instalado perpendicularmente ao plano do diafragma, (SILVEIRA 2006) citado por (PEDROTHA, 2007).

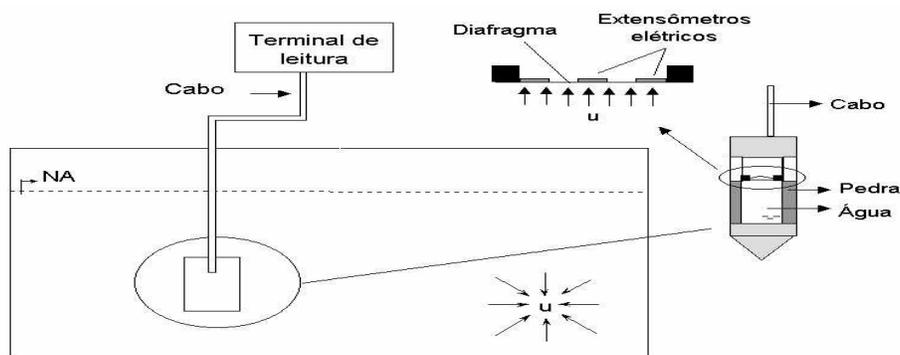


Figura 1. Esquema do Piezômetro Eléctrico. Fonte: (FONSECA, 2003).

Piezômetros de Tubo Aberto (Tipo Casa-grande) - Estes piezômetros são constituídos por um tubo de PVC em cuja extremidade inferior é acoplada uma célula (trecho perfurado de tubo envolvido com geotêxtil) (FONSECA, 2003).

Segundo RAPHAEL EDUARDO (2014) citado por SALGADO, CERQUEIRA, HENRIQUES, & FILHA (2016) a leitura do *piezômetro de tudo aberto*, normalmente é feita com um fio eléctrico, que é uma trena com uma ponteira eléctrica que emite som assim que

entrar em contacto com a água. Dessa forma, mede-se a distância entre a boca do tubo e o nível de água. Como a distância entre o bolbo e a boca do tubo é conhecida, por subtracção encontra-se a altura de coluna de água sobre o bolbo. De posse da altura de coluna de água sobre o ponto de instalação, soma-se a mesma à cota de instalação, obtendo-se a cota piezométrica, em metros sobre o nível do mar. A figura 2 ilustra o esquema de um piezômetro de Tubo Aberto.

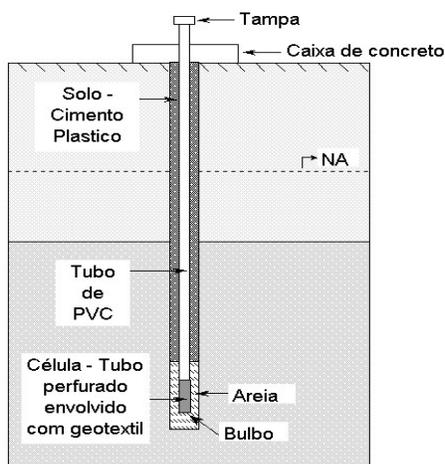


Figura 2. Esquema do Piezômetro de Tubo Aberto ou Casagrande. **Fonte:** (FONSECA, 2003)

2.5.2. Poços de alívio

Para TEIXEIRA (2017), poços de alívio são dispositivos utilizados para reduzir as subpressões desenvolvidas pela percolação de água nos estratos permeáveis da fundação.

A FR21788 (2017) defende poços de alívio como furos de drenagem abertos no terreno, com o objectivo de reduzir as subpressões desenvolvidas pela percolação de água na fundação.

Os diâmetros mais usuais dos poços de alívio variam entre 75 e 150 mm. Quando abertos em rocha sã, não devem ser preenchidos com qualquer material, mas deixados livres. Quando abertos em solo e rocha alterada, devem ser preenchidos por material que dê estabilidade ao furo e que sirva de filtro, permitindo o fluxo da água e impedindo o carreamento de partículas do solo da fundação. Os materiais de preenchimento podem ser materiais granulares, telas, geotêxtis, etc. e tubos perfurados (50 a 100 mm), para aumentar a área de escoamento da água e, conseqüentemente as vazões drenadas (FR21788, 2017).

Os poços de alívio devem ser executados em uma só linha e com espaçamento médio de 3,0 m, com uma profundidade definida de acordo com as condições da fundação da barragem. Geralmente são construídos sob o dreno de pé, mas podem ser construídos à montante deste,

até a base do filtro em chaminé. Também podem ser construídos à jusante da barragem, quando são detectadas subpressões excessivas durante o enchimento do reservatório (Gaioto, 2003) citado em (FR21788, 2017).

Reduzem com eficiência a subpressão na barragem → Pressões na vizinhança do poço equivalente a carga hidráulica do topo do mesmo; também podem ser construídos a jusante da barragem, quando são detectadas subpressões excessivas durante o enchimento do reservatório; apresentam custos relativamente baixos; requerem inspecções e manutenções para garantia da eficiência (TEIXEIRA, 2017).

2.5.3. Medidores de vazão

Medidores de vazão são instrumentos instalados em pontos estratégicos das diversas estruturas da barragem, com o intuito de quantificar isoladamente as vazões percoladas pela fundação e aterro (FONSECA, 2003).

Segundo AZEVEDO NETTO & ALVAREZ (1977) citados por FONSECA (2003), o medidor Parshall é constituído por um dispositivo para a medição de vazões em canais abertos. Esse medidor é composto por três partes: uma seção convergente, uma seção estrangulada intermediária e uma seção divergente, obedecendo a relações geométricas padronizadas e tendo o nível do fundo do canal na secção convergente mais alto do que o nível na secção divergente.

2.5.4. Drenos de galeria

As galerias de drenagem quando construídas objectivam permitir a execução de serviços de drenagem e/ou injeção, durante e após a construção da barragem. De acordo com TEIXEIRA (2017), actualmente, a solução do controle de percolação é basicamente governada pelo valor económico da água percolada através do barramento e pela necessidade de se trabalhar com mais de uma linha de defesa, para a segurança da barragem. E o sistema de drenagem interna constitui o elemento vital na segurança de uma barragem de terra deve ser dimensionado de modo a atingir os seguintes objectivos:

- ✓ Reduzir a pressão neutra na área de jusante da barragem e, portanto, aumentar a estabilidade de jusante contra o deslizamento;
- ✓ Controlar a percolação da água na face de jusante da barragem de tal modo que a água não carregue partículas do maciço, isto é, que não se desenvolva o fenómeno de "piping".

2.6. Colecta, análise e Processamento de dados

A previsão do comportamento de barragens a longo prazo em geral envolve a análise de uma quantidade considerável de dados, provenientes das leituras da instrumentação ao longo de grandes períodos de tempo, cuja interpretação é executada através de métodos estatísticos e/ou probabilísticos (PEDROTHA, 2007).

Segundo a UGBU (2005) citada por DA SILVA (2008), o primeiro trabalho consisti na avaliação do tipo de documentos necessários para o sistema de tratamento dos dados e resultados, tendo-se identificado os seguintes elementos:

- ✓ **Plantas e cortes** – Plantas com a localização dos perfis instrumentados (poços de alívio, piezómetros e drenos das galerias); perfis transversais com a representação dos níveis máximos e mínimos nos piezómetros abertos, a representação dos valores máximos e mínimos dos níveis de água nos poços de alívio; e perfis longitudinais com a representação das subpressões medidas nos drenos das galerias e com a representação dos caudais drenados nas galerias.
- ✓ **Tabelas** – balanço hídrico da albufeira; ficha de inspecção visual de rotina; tensões neutras nos piezómetros eléctricos; cotas piezométricas nos tubos de inclinómetro; cota piezométrica nos piezómetros abertos; caudais drenados; níveis de água nos poços de alívio; caudais nos drenos das galerias; cotas piezométricas dos drenos das galerias; cotas piezométricas nos piezómetros das galerias;
- ✓ **Gráficos** – evolução das cotas piezométricas nos piezómetros eléctricos; deslocamentos horizontais nos inclinómetros; evolução das cotas piezométricas nos piezómetros abertos; valores máximos e mínimos dos níveis de água nos poços de alívio; evolução dos caudais drenados nas galerias. Outrora, o armazenamento

A análise e o processamento de dados visam verificar com rapidez e agilidade a qualidade dos dados e a possível necessidade de manutenção de uma estação de monitoramento a partir do comportamento dos dados. Bem como permitem a inspecção dos mesmos por meio dos relatórios gerados automaticamente após o processamento dos dados, directamente (FREITAS, BARBOSA, & ALMEIDA, 2015).

2.7. Manutenção

Durante a vida útil da barragem, são necessárias obras periódicas de manutenção com a finalidade de preservar em bom estado as várias estruturas, assegurar superfícies hidráulicas

satisfatórias e garantir a operacionalidade dos equipamentos electromecânicos e dos instrumentos de auscultação. No caso de barragens de enrocamento, as obras de manutenção mais usuais são (LUIS, 2004):

- ✓ Limpeza de caleiras de drenagem, de caixas de dissipação e poços de saída do sistema de drenagem interna.
- ✓ Conservação do *rip-rap* e dos gramados de protecção dos taludes.
- ✓ Tratamento das ressurgências de água junto ao pé do talude de jusante.
- ✓ Tratamento de trincas na superfície dos taludes ou na crista da barragem.
- ✓ Recomposição do enrocamento de pé quando da ocorrência de erosões provocadas por condições extremas de operação do vertedouro.
- ✓ Limpeza e manutenção dos instrumentos de auscultação.

2.8. Análise dos dados de instrumentação e valores limites para o controle dos instrumentos de auscultação

Juntamente com todas as descrições dos instrumentos, devem estar suas leituras iniciais, limites de projecto, dados e requisitos para sua calibração, faixas normais de operação e níveis de “alarme”, valores para os quais uma revisão detalhada das leituras é necessária. Responsabilidades devem ser atribuídas para leituras rotineiras dos instrumentos, mudanças de leituras iniciais, calibração e interpretação dos resultados (CASTRO, 2001).

LUIS (2004), acrescenta que, a previsão do comportamento de barragens a longo prazo em geral envolve a análise de uma quantidade considerável de dados, provenientes das leituras da instrumentação ao longo de grandes períodos de tempo, cuja interpretação é mais convenientemente executada através de métodos estatísticos e/ou probabilísticos.

Para o melhor controle do bom funcionamento e confiabilidade dos instrumentos de auscultação, os valores obtidos a partir das leituras da instrumentação, devem ser processados, analisados e confrontados, cuidadosamente, com os valores limites de controle das leituras da instrumentação estabelecidos no Manual de Operação e Controle de Instrumentos de Auscultação (ARA-Sul, 2016).

Segundo a ARA-Sul (2016), os valores de controle das leituras da instrumentação da barragem de Massingir foram divididos, em: valores de atenção e valores de alerta.

2.8.1. Valores de atenção

Segundo a ARA-Sul (2016), os valores de atenção correspondem as pressões máximas admissíveis na fundação para manter um factor de segurança de 1.5 nas condições normais de exploração da Barragem (cota normal da albufeira – regime permanente).

As leituras dos instrumentos, que resultam em valores abaixo dos valores de atenção, indicam que o comportamento da estrutura deve ser considerado normal e concorda com os critérios do projecto de reabilitação.

Para os maciços terrosos, caso da barragem em causa, os valores de atenção foram fixados tendo como referência os valores de piezometria e de vazão do caudal de infiltração. Caso as leituras de determinado instrumento superem os valores de atenção, porem ainda sem atingir os valores de alerta, a frequência de leitura do referido instrumento deverá ser dobrada em relação a frequência pré-estabelecida (ARA-Sul, 2016).

2.8.2. Valores de alerta

Os valores de alerta indicam os valores máximos aceitáveis para cada instrumento, a partir dos quais deverão ser realizadas análises detalhadas, uma vez que as condições mínimas aceitáveis de segurança podem estar sendo comprometidas. Indicam também a necessidade de implementação de medidas correctivas ou de mitigação de eventuais problemas que possam afectar a estrutura em questão. Estes valores (em metro da carga de água) podem ser negativos, o que significa que manómetros deverão ser instalados nos piezómetros para medição da pressão (ARA-Sul, 2016).

III. METODOLOGIA

3.1. Descrição da Bacia do Limpopo

3.1.1. Localização e Superfície da barragem de Massingir

A bacia hidrográfica do Limpopo foi construída sob o rio dos Elefantes e é partilhada por quatro Estados da região da SADC, nomeadamente África do Sul, Botswana, Zimbabwe e Moçambique, confinando-se a norte com a bacia do Save, a Sul com Incomáti e a este com Govuro. Esta Bacia tem uma área de cerca 412.100km², corre em Moçambique, Africa do Sul, Botswana e Zimbabwe. Os seus principais afluentes na margem direita são os Rios Matablas, Pongole, Sand (na Africa do Sul), Pafuri e Elefantes (em Moçambique) e na margem esquerda são os rios Notuane, Maclotsie, Tule, Unzinguane, Boby, Nwanetse (no Zimbabwe) e Changane (Nasce e conflui com o Limpopo no território nacional) (VAZ et al., 2008). A figura 2 ilustra o mapa da localização da Barragem de Massingir.

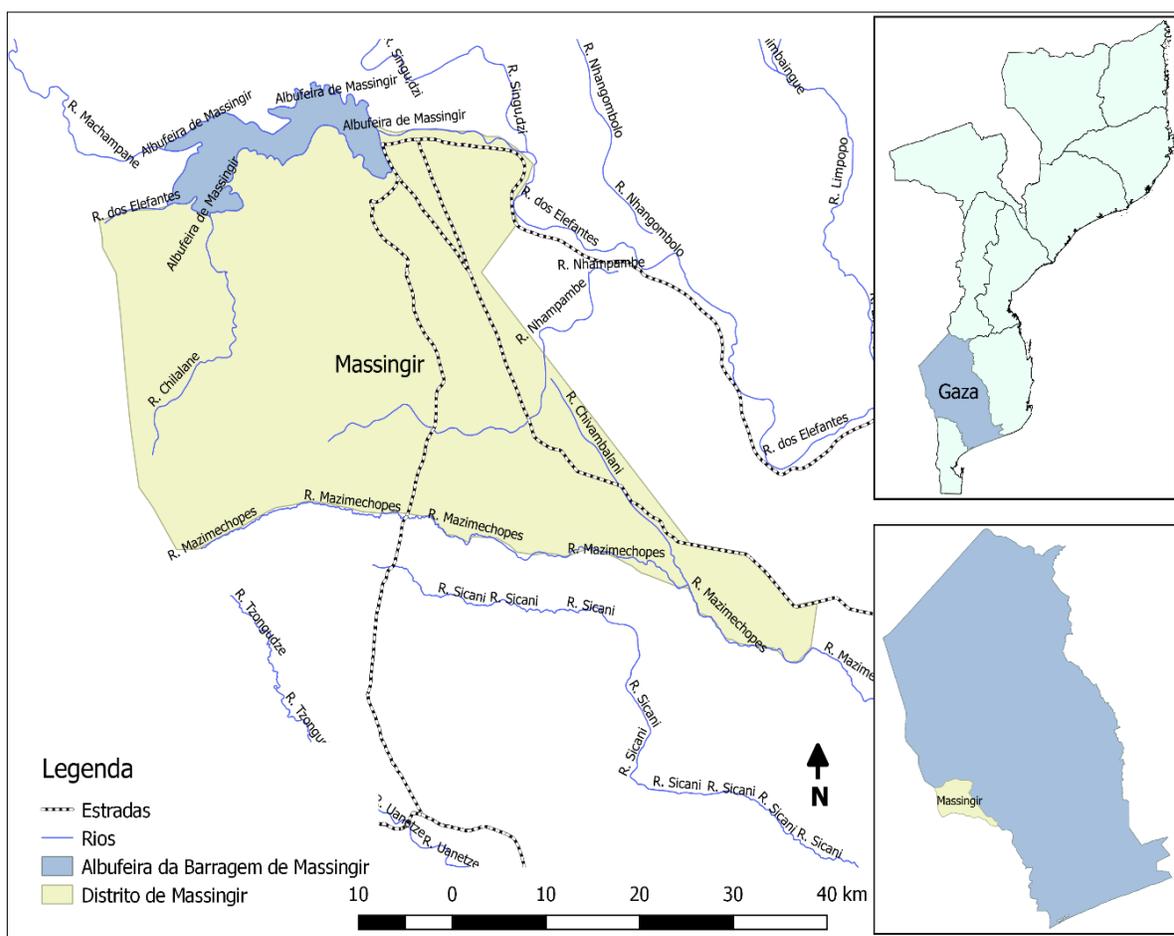


Figura 3. Mapa de localização da barragem de Massingir

O estudo para a construção da Barragem de Massingir foi iniciado em 1924, mas, a sua construção teve lugar entre os anos de 1972 a 1977, ela foi projectada para irrigar cerca de 90.000 ha dos quais apenas 39.000ha estão a ser explorados, sendo 30.000 ha no sistema de regadio do Chókwe e 9.000 ha no sistema de Regadio Do Baixo Limpopo. Para além da irrigação, a Barragem de Massingir tem a finalidade de controlar a intrusão salina no Baixo Limpopo, amortização das cheias e geração de energia eléctrica com capacidade para produzir 40MW (a central ainda não foi construída) (VAZ et al., 2008).

3.1.2. Principais características da barragem

A figura 3 ilustra o aproveitamento de Massingir que consta de uma barragem de terra, barrando o leito maior do rio e dois terraços, um muito extenso, na margem direita, e outro de menor extensão, na margem esquerda, de um evacuador de cheias de superfície, de uma tomada de água atravessada por um dique direito dentro da fundação, de duas condutas de descarga de fundo sendo cada equipada de uma comporta de protecção e uma de regulação, de um descarregador de cheias auxiliar e de duas galerias. A tomada de água está fechada a montante por uma comporta e o tubo para a futura central esta por cima das descargas de fundo a jusante do dique (MARECELO, *et al*, 2011).



Figura 4. Barragem de Massingir

A margem direita prolonga-se, num comprimento superior a 3 km, a cotas inferiores à cota 110,00 m, com uma portela à cota 99,00 m, com um desenvolvimento de quase 2 km. Este planalto cessa bruscamente contra o pé das Colinas, que se elevam rapidamente até à cota 130,00 m. Na margem direita, entre o degrau topográfico que constitui as colinas e o patamar à cota 104,00 m a 107,00 m, existem aluviões argilosas ou siltosas cuja espessura, em certos pontos, é de cerca de 30 m. Na margem esquerda, a subida do terreno é regular, atingindo, a uma distância inferior a 1 km, a cota 125,00 m. O vale principal é preenchido com aluviões arenosos, por vezes com níveis ou lentículas mais grosseiros, com seixo e mesmo calhau ou, pelo contrário, com horizontes ou passagens mais finas, por vezes siltes e argilas. No vale principal, o "bed-rock" encontra-se a cerca de 26 m de profundidade. Os terrenos da margem esquerda e parte dos da margem direita tem uma estrutura semelhante formada por cascalheira de espessura variável e de carácter mais ou menos grosseiro ou silto-argiloso, assente sobre o complexo de grés argiloso e margas com bancadas calcárias (MARECELO, *et al*, 2011).

Segundo MARECELO, *et al*, (2010), este complexo encontra-se mais ou menos meteorizado à superfície. A espessura da cascalheira está compreendida entre 0,50 m e 3,50 m, e a profundidade de alteração do grés argiloso poderá atingir 2 m a 3 m. Estão referidos na tabela 1 as principais características da albufeira associada à barragem.

Tabela 1. Características da albufeira associada à barragem.

Nível de Mínima Exploração (NME)	90m
Nível de Pleno Armazenamento (NPA)	125m
Nível de Máxima Cheia (NMC)	128,5m
Volume de Albufeira	2570x10 ⁶ m ³
Área inundada	140,5km ²
Folga	5m

Fonte: MARECELO *et al*, (2010)

3.1.3. Descrição da fundação da barragem

As fundações da barragem estão constituídas por aluviões do quaternário, argila-siltoso na camada superior, areia de granulometria variada com alguns calhaus em baixo. Esses alúvios cobrem as formações rochosas do terciário, grés (arenitos) de grão fino, cimento calcário com

alguns estratos de arenitos, os quais constituem as fundações das descargas de fundo e do descarregador de superfície. Algumas zonas das fundações aluvionares têm permeabilidade bastante elevadas (MARECELO, *et al*, 2011).

A barragem está protegida das infiltrações por:

- Um tapete impermeável a montante da barragem principal no vale central;
- Um filtro inclinado entre o núcleo e o maciço de jusante;
- Um tapete filtrante abaixo do maciço de jusante.

3.1.4. Instrumentação e Monitorização

Em Massingir são feitas inspeções visuais de rotina à Barragem e ao sistema de monitorização composto por diversos instrumentos. O processo de aquisição de dados faz-se por realização de leituras directas dos 257 instrumentos instalados em várias partes da Barragem (ARA-Sul, 2016).

O sistema de observação implementado após a reabilitação (em 2006) visa a medição dos deslocamentos superficiais, das pressões intersticiais no corpo do aterro e fundação e das pressões da água e dos caudais drenados pela vala do dique da MD.

É de salientar que da instrumentação inicial, há apenas 1 piezómetro operacional referenciado como P4D, cujos desenhos de implantação não foram fornecidos.

Na Barragem os instrumentos destinados à monitorização do comportamento hidráulico são:

- Drenos de galeria;
- Piezómetros abertos;
- Piezómetros eléctricos;
- Medidor de Vazão; e
- Poços de alívio.

Na figura 4, está representada a planta parcial da barragem, mostrando apenas a instrumentação da margem direita da barragem, sendo possível observar a sua distribuição e a disposição. Nesta planta, os pontos pretos simbolizam os poços de alívio, os pontos vermelhos simbolizam os piezómetros da vala de drenagem e os pontos azuis representam os piezómetros do corpo da barragem. É de referir que consta do anexo II a planta completa da barragem e do anexo V o mapa piezométrico da descarga de cheias auxiliar



Figura 5. Planta da Barragem Massingir

3.2. Materiais Utilizados

- O Balde de 10 litros de volume, (figura 6) – usado na determinação do volume de descarga dos poços de alívio em função do tempo;
- O Cronómetro, (figura 7) – usado na determinação do tempo de enchimento do balde nos poços de alívio;



Figura 6. Balde de 10l



Figura 7. Cronómetro

- O Gancho, (figura 8) – usado na abertura de poços e piezómetros;
- Os Binóculos, (figura 9) – utilizados para fazer leituras do nível da albufeira
- A Sonda manual, (figura 10) – utilizado nos piezómetros de tubo aberto para a obtenção do nível da água no núcleo e na fundação.



Figura 8. Sonda Manual



Figura 9. Gancho



Figura 10. Binóculos

3.3. Procedimentos

A realização deste trabalho consistiu na execução de actividades de campo, a fim de se fazer colecta de dados da instrumentação instalada em diferentes pontos da barragem através de leituras diárias, em consultas literárias de diferentes manuais, documentos técnicos e artigos que fazem abordagens de assuntos relacionados ao tema em estudo e na consulta oral dos

técnicos da área do estudo através de questionários que eram feitos ao longo do período da colecta de dados.

Com o objectivo de avaliar a estabilidade da barragem de Massingir por meio da instrumentação, foram levantados vários aspectos comportamentais dos instrumentos instalados na barragem através das inspecções visuais (técnica de observação/ estudos observatórios) realizadas no campo e da interpretação dos dados obtidos.

3.3.1. Colecta de dados dos instrumentos de auscultação

As leituras piezométricas, nos piezómetros de tubo aberto, foram feitas semanalmente com o auxílio de uma sonda manual (figura 11), que é uma trena com uma ponteira eléctrica, tipo IPT, que era introduzida no interior do tubo do piezómetro emitindo um som ao entrar em contacto com a água, medindo-se, desta forma, a distância entre a boca do tubo e o nível de água (subtracção) com precisão de + 1,0 cm.



Figura 11. Leitura piezométrica

As leituras dos poços de alívio (figura 12) foram feitas de 15 em 15 dias utilizando-se um balde com volume de 10 litros e um cronómetro, obtendo-se o volume drenado pelos poços em função do tempo, de modo a controlar o fluxo de água que infiltra sob a barragem.



Figura 12. Poço de alívio

É de mencionar que nem todos os instrumentos encontravam operativos, sendo que alguns apresentavam avarias, com isso, as leituras só eram feitas nos instrumentos que se

encontravam num bom estado e em funcionamento. Na tabela 2 estão apresentados todos os instrumentos de auscultação lidos, sua localização, função e estado de funcionamento.

3.3.2. Análise e processamento de dados

Todas as leituras eram registradas em fichas específicas (anexo 1), onde, posteriormente, eram comparadas às leituras anteriores, de modo a verificar se houve ou não uma mudança brusca no comportamento. Os mesmos dados eram organizados e processados em um software denominado Microsoft Excel.

Para melhor controlo da segurança estrutural da barragem por meio da instrumentação, foram definidos valores limites de atenção e de alerta, assim como as respectivas acções a tomar.

O processamento e a análise de dados consistiam na produção de gráficos que ilustram o comportamento dos dados obtidos através de leituras feitas dos instrumentos da auscultação da barragem nos últimos 13 anos (2006 a 2018) em relação aos valores limites adaptados no Manual de Operação e Controle dos Instrumentos de Auscultação da Barragem de Massingir. Também foram feitas correlações entre as variações dos níveis de água da albufeira com a variação do nível piezométrico (para o caso dos piezómetros) e com débito escoado pelos poços de alívio. Para situações em que os valores limites de controlo de alguns piezómetros não se encontravam disponíveis, fez-se apenas a análise e interpretação dos dados das leituras feitas.

No processo de produção dos gráficos foram usadas diferentes cores, sendo que a cor amarela foi usada na representação gráfica dos valores de atenção, a vermelha, no limite de alerta e outras cores para mostrar a variação das leituras obtidas ao longo dos anos. É de salientar que em alguns casos houve sobreposição de gráficos devido a baixa variação dos dados obtidos e que para todos os instrumentos que encontravam-se sem dados ou inoperativos, foi atribuído o valor zero (0) para evitar interrupções dos gráficos.

O esquema apresentado na figura 13 representa um piezómetro de tubo aberto, e deste esquema constam duas linhas imaginárias de cores amarela e vermelha e estas linhas representam os limites de controle para cada piezómetro.

Importa referir que na análise do comportamental dos piezómetros de tubo aberto foram usadas as mínimas leituras anuais, isso porque a medição do nível de água era feita a partir da cabeça do tubo a fundação, ou seja, as leituras eram feitas em função da profundidade e

porque usando as mínimas é mais fácil identificar as zonas com maiores pressões visto que menor leitura significa maior pressão hidrostática. Visto que, cada dispositivo tem os seus valores limites, da relação entre estes valores e os dados obtidos é possível obter diferentes resultados, em alguns casos os dados piezométricos foram divididos e organizados em grupos segundo as pressões por eles registradas.

Para poços de alívio, foi feita a soma dos caudais, os totais eram comparados a débito máximo admissível, também estabelecido no manual de controle da instrumentação da barragem. A partir da análise dos resultados obtidos, fez-se uma relação entre os poços de alívio e os PVD's de modo a verificar a eficiência dos poços na redução da percolação da água na fundação da barragem.

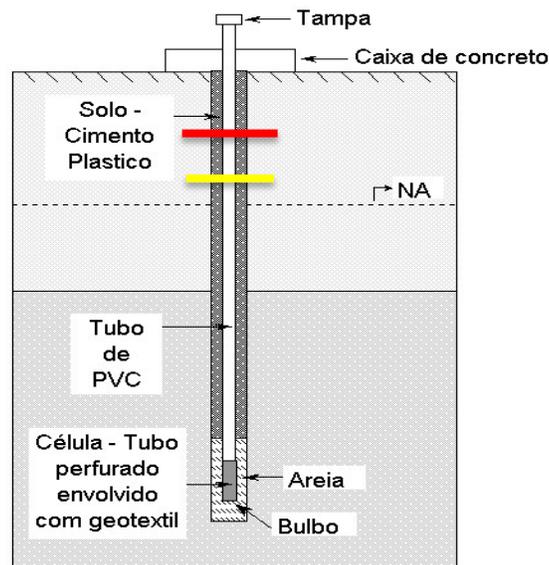


Figura 13. Representação de limites de controle num piezômetro de tubo aberto

Tabela 2. Instrumentos de auscultação da barragem de Massingir

Ref. Instrumento	Localização	Função	Operacional	Avariado	Observação
Piezómetros Abertos	Vala de drenagem	Medir as pressões hidrostáticas	55	05	PVD 6B, 11, 21 e 32 (danificados)
	Corpo da barragem		14	06	PP01, PP4, PP6, - (danificados) PP1B, PP13, PP14, PP17 Não tem Leituras
	Margem esquerda e direita		01	06	P3D, P'4 e P5 (Cima) P5D, P5 Baixo e P'5 Baixo
	Descarregador Auxiliar		06	01	SP6 Seco
Piezómetros Eléctricos	Corpo da barragem (Talude e coroamento)	Medir as pressões hidrostáticas	-	18	Avariados
	Descarregador Auxiliar		-	03	Avariados
Poços de Alívio	Vala de drenagem	Medir as vazões de percolação	69	8	PA 25, 50, 63 e 74 estão danificados PA 26, 27, 29, e 31 estão submersos.
	Vale Principal		-	9	Secos
Drenos de Galeria	Galeria	Controlar a percolação da água e Reduzir a pressão neutra	32	05	D01 bloqueado, D12, 13, 27, 30 fuga na tubagem

IV. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Piezómetros

Em condições normais do funcionamento piezométrico, com as variações do nível de água na albufeira, há ocorrência de variadas pressões piezométricas.

4.1.1. Piezómetros do Corpo da Barragem

Estes piezómetros encontram-se organizados e divididos em 8 secções (PK 0+450, PK 0+600, PK 0+800, PK 1+050, PK 1+300, PK 2+000, PK 3+050 e PK 3+300), o que facilita a sua identificação e localização. Constam do anexo III, figuras que ilustram a sua disposição. A figura 14 que se segue, ilustra o comportamento dos dados piezométricos registrados nos anos de 2006 a 2018 e os valores limites de alerta e de atenção para cada piezómetro instalado no corpo da barragem.

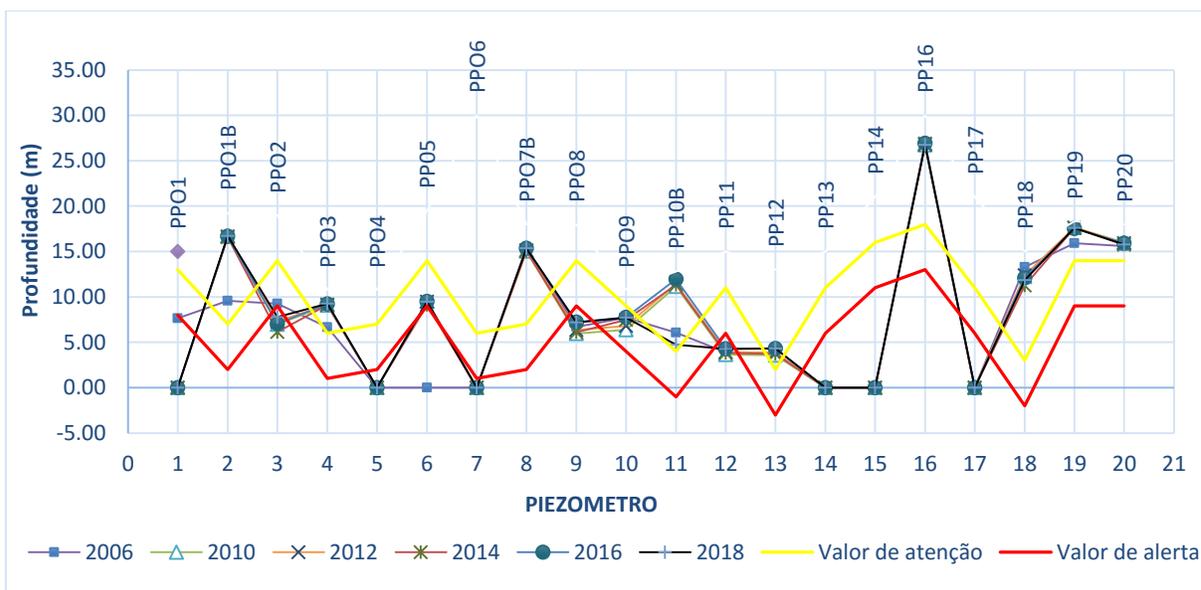


Figura 14. Mínimas Leituras Anuais, de 2006 a 2018, dos Piezómetros do corpo da barragem comparados aos valores limites de atenção e de alerta

Da análise dos gráficos da figura 14 observaram-se três possíveis resultados, e para uma fácil interpretação dos dados foram criados três grupo sendo que:

O primeiro grupo, é composto pelos piezómetros PP01B, PP03, PP07B, PP10B, O PP12, PP16, PP18, PP19 e PP20, e representa os piezómetros que sempre registraram baixas pressões, ou seja, piezómetros que operam no lado de segurança. Os piezómetros PP01B e PP03 estiveram sempre fora da área de atenção e alerta. O piezómetro PP07B, localizado na secção PK 1+300 registrou ao longo dos anos pressões muito baixas, sendo que as leituras

por ele registradas não apresentam oscilações. Na secção PK 2+000 estão instalados 3 piezómetros, PP10B, PP11 e PP12. Nesta secção o piezómetro, PP10B, instalado na fundação sempre registrou baixas pressões, mas no último ano apresentou uma mudança no comportamento dos dados, tendendo a atingir o limite de atenção o que pode vir a ser um motivo de preocupação, pois a pressão da água neste ponto aumenta com o passar do tempo. O PP12 situado no maciço de jusante em alinhamento com PP10B, apresentou um comportamento similar ao do piezómetro PP10B. Assim como os piezómetros mencionados neste parágrafo, os piezómetros PP16, PP18, PP19 e PP20 registram pressões muito baixas, quase insignificantes, o que é bom para a segurança estrutural da barragem. A figura 15 ilustra o comportamento das leituras feitas no PP01B ao longo dos anos e representa os piezómetros do primeiro grupo, cujas leituras encontram-se fora da área dos limites de controle.

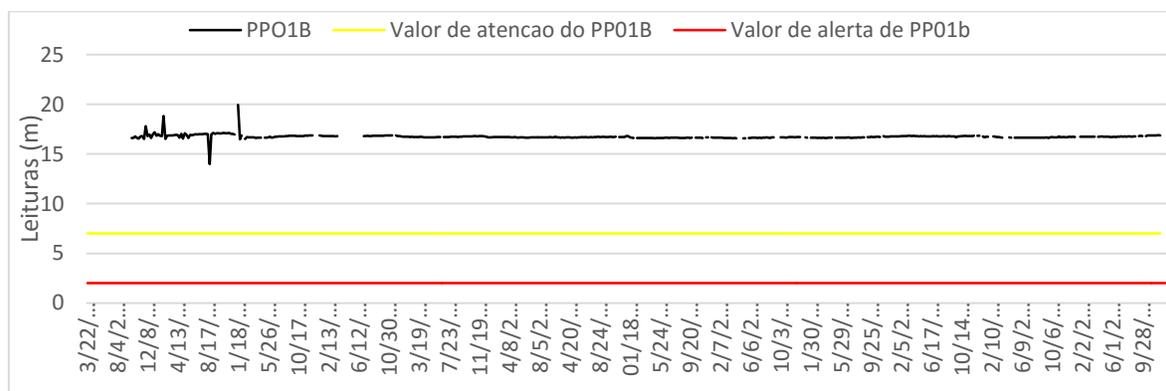


Figura 15. Representação dos piezómetros do primeiro grupo: Dados resultantes das leituras do PP01B, nos anos de 2006 a 2018, comparados aos valores limites de atenção e de alerta

O segundo grupo representa os piezómetros cujas leituras mínimas anuais oscilam entre os limites de atenção e de alerta, sendo que estes carecem de uma especial atenção pois registram pressões que ameaçam a segurança estrutural da barragem. O piezómetro PP02, esteve sempre no estado crítico pois as leituras mínimas anuais atingiram o limite de alerta, sendo que o pico se registrou no ano de 2011 atingindo cerca de 3m acima do valor estabelecido como limite de alerta e isso significa altas pressões na zona da sua instalação. No geral de todos os dados obtidos a partir das leituras deste piezómetro (PP02) encontram-se acima dos limites estabelecidos como pode ser observado na figura 16. O PP05, situado no PK0+800, instalado entre o aterro e a fundação, encontrou-se sempre a funcionar num estado crítico assim como o PP02, os valores das suas leituras oscilaram entre os limites de controle ao

longo dos anos, chegando a atingir o limite de alerta. O PP09 instalado na mesma vertical que o PP07B, quase entre o contacto da fundação com o aterro, também, encontrou-se entre os limites de atenção e de alerta. O piezómetro PP08, situado no contacto entre o aterro e a fundação, exhibe uma variação da carga de cerca de 3m acima do limite de alerta.

A figura 16 mostra a representação gráfica dos piezómetros do 2º grupo, cujas leituras atingem os limites de controle sendo necessário a aplicação de medidas de mitigação de modo a reduzir o impacto da pressão que se faz sentir no local da sua instalação.

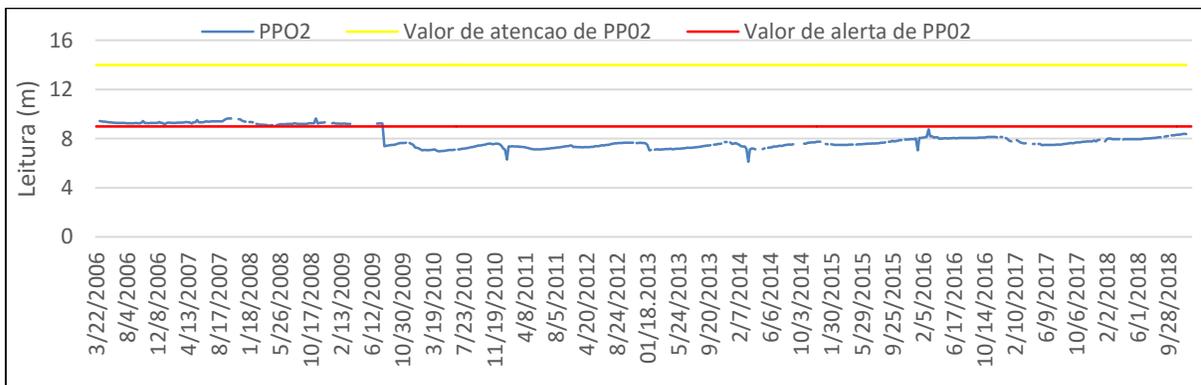


Figura 16. Representação dos piezómetros do segundo grupo: Dados resultantes das leituras do PP02, nos anos de 2006 a 2018, comparados aos valores limites de atenção e de alerta

E o terceiro grupo é dos que não se registra nenhuma leitura por se encontrarem danificados, ou seja, inoperacionais.

O piezómetro PP01 encontra-se danificado e sua última leitura registou-se no ano 2006 depois de ter atingido o nível de alerta. Os piezómetros PP04 e PP06, ambos localizados no PK 0+800, encontravam-se bloqueados sendo impossível realizar leituras devido a vegetação. Na secção PK 3+050 não há registro de dados, pois os piezómetros PP13 e PP14, instalados no maciço a jusante, estão avariados. O piezómetro PP17 também se encontra na mesma situação.

4.1.2. Piezómetros da margem esquerda e margem direita

Na margem esquerda estão instalados 7 piezómetros de tubo aberto, referenciados como P3D, P'4, P4D, P5D, P5 (Cima), P5 (Baixo) e P'5 (Baixo), sendo que actualmente apenas um encontra-se em funcionamento. O piezómetro P3D, cujo comportamento não consta na figura 17, nunca apresentou uma leitura se quer, devido a algumas falhas técnicas tidas no momento da sua instalação. É de salientar que tanto os desenhos de implementação assim como os valores limites de controlo destes piezómetros não foram disponibilizados, o que dificultou

a análise comparativa dos dados resultantes das leituras desses dispositivos com os limites de controle, mas a partir da base de dados disponíveis foi possível obter os resultados ilustrados na figura, 17, que se segue:

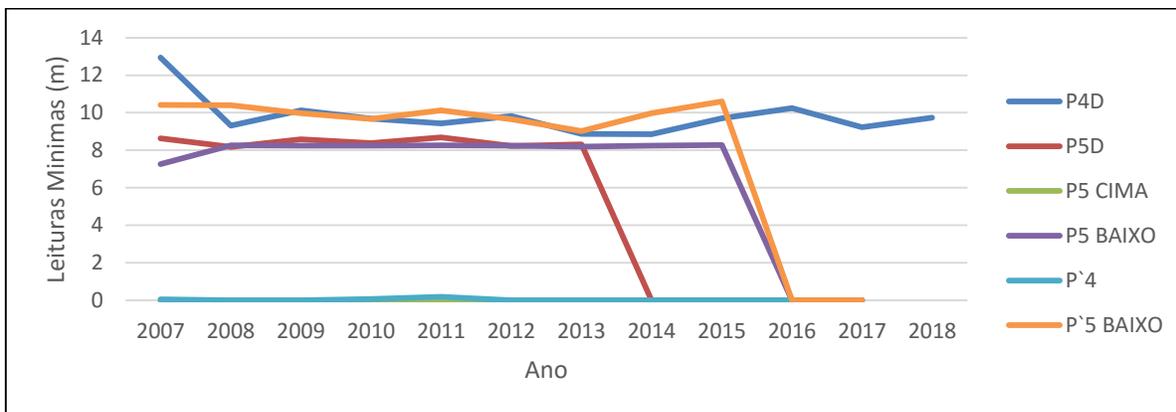


Figura 17. Mínimas Leituras Anuais dos Piezômetros da Margem Esquerda

Da observação dos gráficos apresentados na figura 18, pode-se verificar que os piezômetros P3D, P'4 e P5 (Cima) não apresentaram dados de leitura por estarem danificados. Por outro lado, os piezômetros P5D, P5 Baixo e P'5 Baixo já estiveram em funcionamento e registravam baixas pressões, sendo que a última leitura do P5D foi registrada no ano de 2014 e as últimas leituras dos piezômetros P5 e P'5 Baixo, foram em 2016.

O piezômetro P4D apresentou um ótimo comportamento, ou seja, sempre registrou baixas pressões de água no local da sua instalação, sendo que os valores das suas leituras sempre estiveram entre 8 a 11m, tendo atingido o pico em 2007, com aproximadamente 14 m de profundidade.

4.1.3. Piezômetros do descarregador auxiliar

No descarregador de cheias auxiliar encontram-se instalados 7 piezômetros de tubo aberto, cada um deles ligado a uma estrutura de betão. A figura 18 ilustra o comportamento dos piezômetros do descarregador auxiliar e da cota da albufeira ao longo dos anos, e a partir deste gráfico é possível verificar que os valores dos níveis piezométricos se aproximam a cota da albufeira, todos com uma tendência linear.

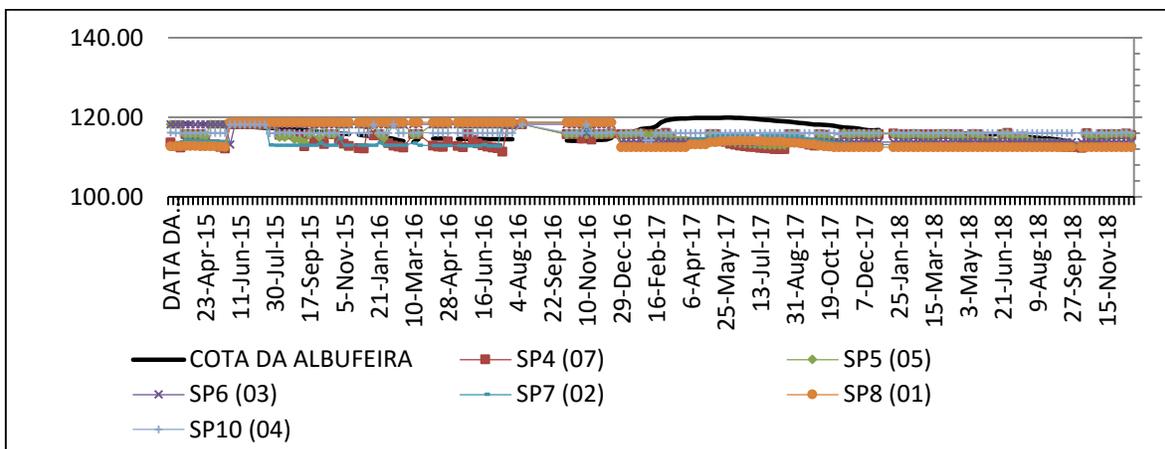


Figura 18. Variação dos níveis piezométricos dos piezômetros do descarregador auxiliar em relação a cota da albufeira

No âmbito da colecta de dados observou-se que estes piezómetros apresentavam oscilações bruscas de dados factor que pode ter diversas origens, e segundo os técnicos do sector da auscultação, estes sofrem influências de alguns factores externos como a precipitação. A fim de se verificar a até que ponto a variação do nível de água na albufeira pode influenciar no nível piezométrico, fez-se uma relação entre estes dois níveis, e constatou-se que estes apresentam um coeficiente de correlação muito menor, o que pode significar que a variação do nível piezométrico não depende só da variação do nível de água na albufeira. É de mencionar que constam do anexo IV o mapa dos piezómetros da descarga auxiliar e gráficos resultantes da correlação do nível piezométrico com o NAA.

Contudo, comparando os valores das leituras destes piezometros com os limites de controle estabelecidos para verificar a estabilidade da estrutura, foi de constatar que estes piezómetros se encontram do lado de segurança, ou seja, abaixo dos limites de controle. Os resultados dessa comparação estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Comparação dos valores limites de atenção e de alerta com as máximas e mínimas anuais dos piezómetros do descarregador auxiliar.

Piezómetro	Valor de Atenção	Valor de Alerta	2015		2016		2017		2018	
			Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Max.	Min.
SP4 (07)	0.55	0.33	5.42	6.08	2.46	4.7	6.24	2.44	5.78	2.13
SP5 (05)	0.55	0.33	3.14	Seco	3.43	Seco	5.18	2.19	5.18	2.32
SP6 (03)	0.55	0.33	Seco							
SP7 (02)	0.55	0.33	5.42	Seco	5.76	Seco	5.93	3.24	5.87	5.56
SP8 (01)	0.55	0.33	Seco	Seco	Seco	Seco	6.23	4.57	6.23	6.23

SP9 (06)	0.55	0.33	5.81	Seco	2.45	Seco	5.84	2.41	5.84	2.41
SP10 (04)	0.55	0.33	2.13	2.14	2.12	2.15	2.5	2.12	2.16	2.12

4.1.4. Piezómetros da vala de drenagem

A partir da análise dos gráficos apresentados no esquema abaixo, é possível fazer a confrontação das variações de leituras piezométricas dos piezómetros hidráulicos da vala drenante com os dados limites de controle de cada piezómetro ao longo dos anos de 2006 a 2018.

Segundo os gráficos da figura 19, cujos dados constam nos anexos, os piezómetros da vala de drenagem estão instalados na fundação e grande parte deles apresentam leituras que se encontram acima do limite de atenção. A partir da interpretação dos dados apresentados nos gráficos desta figura, é certo assumir que a pressão da água que se registra na fundação está acima do desejável. Nota-se que a maioria dos piezómetros apresentam um comportamento independente em relação aos outros, ou seja, as leituras variam de piezómetro para piezómetro, sem que haja interferência do outro.

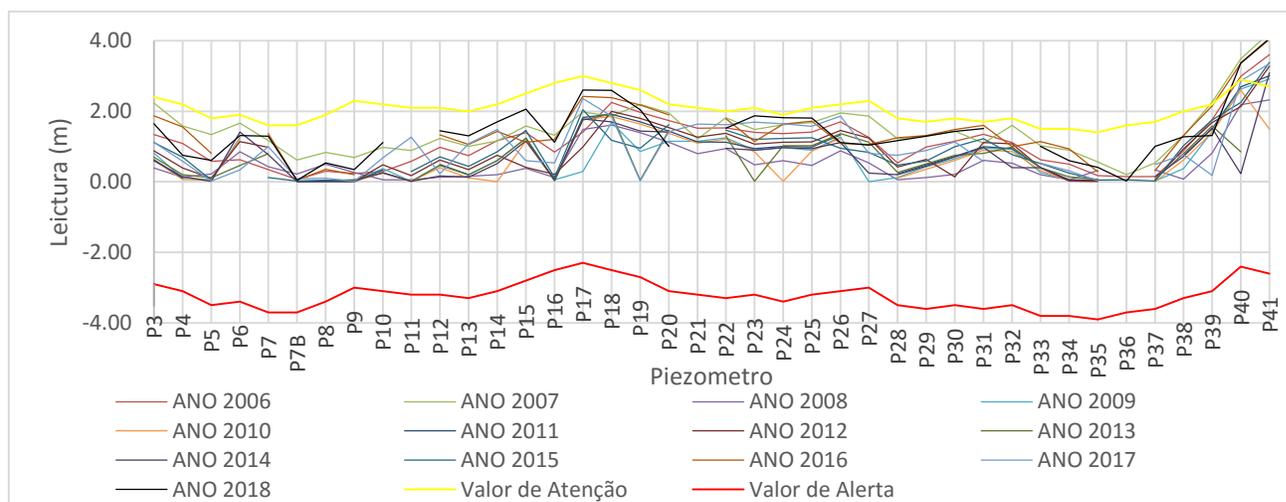


Figura 19. Mínimas Leituras Anuais dos Piezómetros da Vala de Drenagem comparadas aos valores de limites de atenção e de alerta

Ao longo dos anos, verifica-se que a maioria dos piezómetros, quase todos, registram leituras que ultrapassam os limites de alerta sendo que alguns, como no caso dos piezómetros P7B, 8, 9, 10, 34 e 37 a água chega a transbordar. Nestes piezómetros as máximas leituras registradas foram, 1.85m, 1.90m, 2.3m, 2.2 m, 2.92m e 1.6 m, respectivamente. É de salientar que todas as leituras máximas foram registradas em 2007, como mostrado no anexo 4.

Os piezómetros que se encontram instalados mais a esquerda, 40 e 41, sempre apresentaram leituras que se encontram do lado de segurança, pois segundo os dados obtidos, a pressão é menor nestes pontos, comparativamente aos pontos de instalação dos restantes piezómetros. Até 2018, as leituras eram feitas em 40 piezómetros da vala de drenagem, mas a partir dos finais de Fevereiro do mesmo ano este número aumentou para 60, ou seja, entraram em operação mais 20 piezómetros recentemente instalados para o melhor controle das subpressões que actuam sob a barragem na zona fundação, cujos valores limites não se encontraram disponíveis, facto que limita a interpretação dos seus resultados. A figura 20, mostra o comportamento dos níveis piezométricos dos novos PVD's, no ano de 2018, com a variação do nível de água da albufeira, sendo possível notar que todos apresentam poucas variações dos valores observados o que pode indicar um bom funcionamento dos mesmos, excepto o piezómetro 11 que se encontra danificado, cuja última leitura foi feita no dia 04 de Junho do mesmo ano.

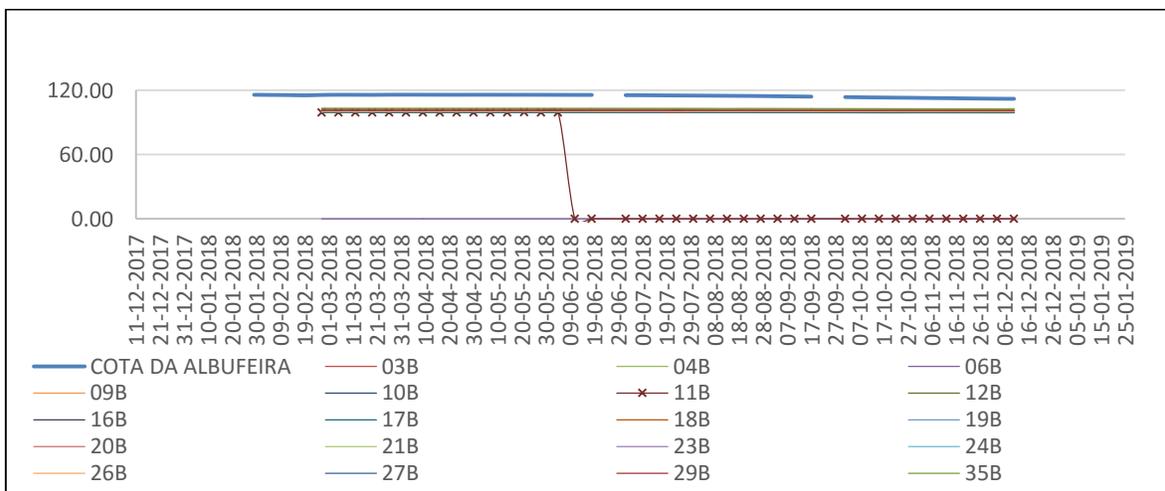


Figura 20. Comportamento dos níveis piezométricos dos novos piezómetros, no ano de 2018, com a variação do nível de água da albufeira

Para melhor se entender as variações da pressão piezométrica dos piezómetros da vala de drenagem, recorreu-se a confrontação das variações do NAA com as variações das cotas piezométricas a fim de se verificar possível correlação entre as duas grandezas, de modo a confirmar a fiabilidade das pressões lidas.

Desta confrontação, obteve-se a seguinte equação geral 1 para se fazer uma aproximação da fiabilidade das pressões obtidas a partir das leituras piezométricas:

$$Y = aNAA + b \tag{1}$$

Onde:

NAA: nível de água na albufeira,

a, b: são constantes, sendo que cada piezômetro apresenta os seus próprios constantes.

No anexo V ilustram-se os gráficos dos diversos modelos testados em todos os piezômetros da vala de drenagem, e estão apresentados os coeficientes (constantes) de cada modelo e a respectiva correlação (R^2). Através desta correlação pode se observar que grande parte dos piezômetros têm uma tendência polinomial, devido a dispersão dos dados obtidos, tendo uma tendência meio linear nas primeiras leituras que mais tarde apresentam uma oscilação brusca dos dados.

4.2. Poços de alívio

Ate o ano de 2018, na barragem de Massingir encontravam-se instalados cerca de 86 poços de alívio, 9 na vala principal e 77 na vala de drenagem, no mesmo alinhamento com os PVD, onde os PA 25, 50, 63 encontravam-se danificados e PA 26, 27, 29 e 31 submersos.

De modo a avaliar a fiabilidade dos dados colhidos através dos poços e a determinar o fluxo total de água na fundação, fez-se as somas parciais dos caudais descarregados pelos poços ao longo dos anos de 2006 a 2018 e os resultados estão ilustrados no gráfico a abaixo.



Figura 21. Comparação dos débitos totais das leituras com o débito máximo admissível

Salienta-se que na representação dos caudais, colocou-se um limite de $2\text{m}^3/\text{s}$, entendendo-se, portanto, que leituras superiores a esta vêm afectadas de um erro elevado. Da leitura do gráfico, observou-se que os caudais descarregados se encontram muito abaixo do limite estabelecido, ou seja, os poços operam no lado de segurança.

No anexo VI, constam gráficos que fazem a relação entre cada poço com a cota da albufeira e da análise destes gráficos constatou-se que a maioria dos Poços apresentavam um coeficiente de correlação muito baixo.

4.3. Análise conjunta dos poços e piezómetros da vala de drenagem

Como foi mencionado anteriormente, entre os poços de alívio do dique da margem direita estão intercalados 60 piezómetros de tubo aberto para monitorizar a eficiência da drenagem. Embora não se tenha feito a correlação entre os dados obtidos a partir dos poços de alívio e dos piezómetros da vala de drenagem, da observação piezométrica e da análise da concepção dos sistemas de drenagem verifica-se uma relação directa entre as duas grandezas medidas nestes dispositivos.

Realizando-se uma análise conjunta, em termos de observações das pressões registradas nos piezómetros instalados nos intervalos dos poços de alívio e os caudais medidos nesses poços, verifica-se que os piezómetros registram pressões que se encontram acima dos limites de atenção e que poços não conseguem aliviar essas pressões, ou seja, são ineficientes na redução da percolação excessiva da água na fundação da barragem.

4.4. Medidores de vazão

Quanto aos dados resultantes da medição de vazão, foram considerados os totais das vazões colectados pelos poços de alívio e o caudal máximo durante o período em referência foi o de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e o médio de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$.

4.5. Drenos da galeria

Na galeria, as medições das subpressões são efectuadas a partir de 37 piezómetros hidráulicos de tubo aberto, afastados entre si de 10 em 10 m, com a função de diminuir a pressão ascensional que se desenvolve de baixo para cima nas fundações da barragem devido à pressão intersticial da água na rocha de fundação.

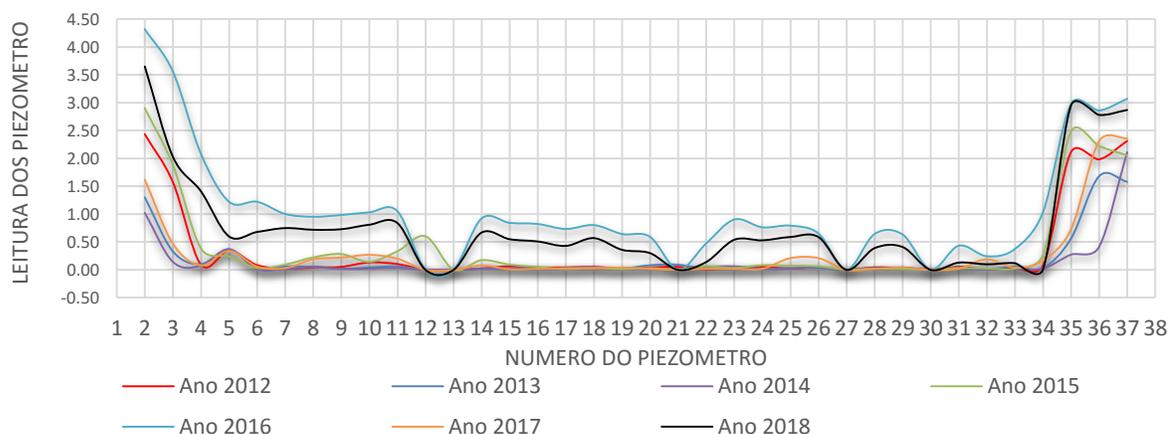


Figura 22. Mínimas leituras anuais dos Piezómetros da Galeria

Não havendo disponibilidade dos valores limites destes drenos por parte do projecto de instalação, tornou-se difícil entender com exactidão, a dinâmica do funcionamento destes dispositivos hidráulicos. Mas da observação do gráfico pode-se notar que as pressões que se fazem sentir na zona de instalação destes dispositivos é elevada e que estes aliviam as pressões de um eficazmente sendo que sua principal função.

4.6. Inspeção visual

Durante a inspeção visual não observou-se situações anómalas na barragem ou fundação, mas foi de se observar que na ocupação da jusante havia ocorrência de erosões (arraste de partículas) nos taludes, causado pela precipitação, o que culminou na obstrução das caleiras que fazem colecta das águas pluviais e na geração de novos caminhos de água na superfície dos taludes (anexo VII). Por vezes, devido a difícil acesso, alguns poços ou piezómetros não são lidos, e há falta de manutenção de alguns dispositivos, a exemplo disso estão os PVD 11, 21 e 32 (danificados), o PP1, 4 e 6 (danificados) e PP1, 13, 14 e 17 (não têm nenhuma leitura registrada), os PA 25, 50, 53 e 74 (danificados), os PA 26, 27, 29 e 31 que encontram-se submersos, e alguns piezómetros na galeria que apresentam fugas na tubagem (D12, 13, 27, 30).

Os piezómetros eléctricos instalados ao longo da barragem encontram-se inoperacionais devido a avarias, bem como alguns de tubo aberto que se encontram instalados tanto na margem esquerda como na margem direita.

Alguns poços e/ou piezómetros são afogados ou artesianos o que dificulta as suas leituras devido a falta de um manómetro de pressão que poderia ser usado para esse efeito.

Em nosso entender, por falta de conhecimento sobre a importância da barragem, em particular dos dispositivos de auscultação, a população que circula sob a zona do pé de jusante da barragem com intuito de buscar água para consumo doméstico e os pastores do gado, acabam destruindo a protecção e danificando os instrumentos.

V. ANÁLISE OU DISCUSSÃO

De acordo com o RSB (1993), durante o primeiro enchimento de uma barragem ocorrem alguns incidentes, ou seja, “anomalias susceptíveis de afectar, a curto ou longo prazo, a funcionalidade da obra e que implicam a tomada de medidas correctivas”.

No caso de Massingir, segundo PLÜNNECKE (2014), na sequência do primeiro enchimento foram detectadas anomalias ao nível da fundação, com mais ênfase na margem direita.

Verificando-se a constante ocorrência destes problemas e das suas causas, decorreu em Abril de 2004 a Dezembro de 2006 um processo de reabilitação, considerando-se como solução o controlo da percolação, a fim de reduzir as processo sobrepressões no pé de jusante da barragem. Segundo (FIGUEIREDO, 2017), o projecto de reabilitação proposto pela empresa WAPCOS englobava várias medidas como: colocação das seis comportas no descarregador de cheias; construção de mais 85 poços de alívio espaçados de 25 m ao longo do dique da margem da direita (77) e no corpo principal (8); vala de drenagem a jusante do dique da margem direita; alteamento de 1m da crista; cortina de injeções de cimento em diversos troços da fundação, para melhorar a impermeabilização (PK1+800 a 2500, PK3+000 a 3200 e PK3+400 a PK3+800); construção de uma banquetta estabilizadora a jusante, no dique da margem direita; e reparação do *riprap* na zona de montante.

Da análise dos dados obtidos a partir das leituras feitas entre os anos de 2006 a 2018 (após a reabilitação), verifica-se que grande parte dos piezómetros, em particular os piezómetros da vala de drenagem, encontram-se acima do limite de atenção, o que significa que as pressões exercidas pela água na fundação, superam as máximas pressões admissíveis para manter o factor de segurança da barragem nas suas condições normais de exploração.

Segundo MACHADO (2007), quando vários instrumentos da mesma secção ou região instrumentada apresentam valores fora dos limites de preformasse, mas ainda abaixo do limite do projecto, isso indica um problema potencial no comportamento da barragem e este problema deverá ser investigado de imediato e com a necessária profundidade.

É de salientar que os piezómetros da vala de drenagem encontram-se instalados na margem direita, e esta tem-se mostrado pouco segura e vulnerável a actuação das subpressões.

Os resultados obtidos por MARECELO, *et al*, (2011) ao comportamento da fundação do dique da margem direita, mostraram que esta zona da barragem não apresenta ainda o comportamento necessário para que se considere a barragem como segura. Facto que se deve

ao fluxo excessivo e não devidamente controlado e aos caudais elevados recolhidos nos poços de alívio, o que indica a ocorrência de velocidades de percolação elevadas na fundação. O LNEC (2011) ainda acrescenta que a albufeira na zona do dique da margem direita não é impermeável, facto provavelmente agravado pela eventual exploração de manchas de empréstimo muito próximas da barragem. Porém, as aluviões da fundação, muito permeáveis (coeficiente de permeabilidade - k da ordem de 10^{-1} cm/s) e heterogéneas, são difíceis de tratar, nomeadamente através de injeções.

De acordo com RUBINI (2014), as cortinas de injeção não têm qualquer efeito em terrenos pouco permeáveis ($k < 10^{-6}$ cm/s). A existência da cortina (que se destina essencialmente a controlar o caudal) é pouco eficaz no controlo da pressão, o que nesta fundação também é importante, e pode apenas redireccionar o caudal percolado para as zonas não tratadas, como parece estar a acontecer no caso de Massingir (MARECELO, *et al*, 2010).

Excluindo a hipótese da aplicação de cortinas de injeção como solução, pode-se recorrer a incorporação de dispositivos na fundação (paredes moldadas e poços de alívio) ou a implementação de tapetes, banquetas ou diques sobre a fundação.

A execução de uma parede moldada na fundação é um dos sistemas mais eficientes. A parede pode ser feita através do maciço montante ou através do núcleo. Nos dois casos a escavação é executada da superfície da barragem até à camada impermeável da fundação, que é retirada e substituída por betão. No pressuposto que a parede é enrizada numa camada impermeável, o caudal que atravessa é reduzido. A COBA em 1983, propôs esta solução que nunca chegou a ser implementada, o que pode estar relacionado ao aspecto económico aliado a dimensão da barragem (FIGUEIREDO, 2017).

A outra solução possível é a implementação de um tapete impermeável a montante, construído para adicionar peso à estrutura (e ajudar a aliviar a pressão intersticial na secção jusante do aterro) o que virá a promover um aumento do percurso de percolação, o que faz com que os gradientes hidráulicos diminuam, reduzindo a probabilidade de erosão. Embora esta seja uma possível solução, é de difícil implementação porque pode causar instabilidade mecânica sem esquecer que economicamente é dispendiosa pela quantidade do material necessário, devido à extensão da barragem e pelo rebaixamento do nível da albufeira, para implementar o tapete da soleira do reservatório (FIGUEIREDO, 2017).

Segundo FIGUEIREDO (2017), uma solução bastante plausível para a barragem em questão é a implementação de uma banquetta estabilizadora a jusante sobre um dreno. A água que percola pela fundação passará a ser colectada pelo dreno que encaminhará a água para longe do pé de jusante onde o gradiente é menor. A berma tem peso próprio o que ajuda a contrariar as forças de percolação verticais ascendentes, para além de proteger o dreno e estabilizar o paramento jusante.

Outra solução possível e também plausível é a implementação de um aterro a jusante, com um reservatório entre as duas estruturas. Neste caso, o pé de jusante, que é a zona crítica, fica submerso e os problemas de erosão na fundação deixam praticamente de existir, devido à variação de carga mais gradual, os gradientes no pé de jusante tendem a diminuir. O peso da água do reservatório sobre a fundação previne eventos de levantamento hidráulico (FIGUEIREDO, 2017).

Embora os valores das leituras registradas pela maioria dos piezómetros estejam acima do limite de atenção, o que implica pequenas alterações no coeficiente de segurança, os instrumentos ainda se encontram em seu funcionamento normal e desejável, pois apresentam uma resposta rápida e registram com precisão as pequenas e grandes variações das sobpressões com as variações dos Níveis de Água na Albufeira. HANNA (2003), diz que um piezometro está em bom funcionamento quando acusa com precisão as pressões neutras e suas variações (positivas ou negativas) e quando os erros estão dentro dos limites tolerados pelo projecto; quando a colocação do piezómetro no solo causa um mínimo de interferência no local; quando apresenta um tempo de resposta rápido a qualquer variação do nível de água; quando seja resistente, de boa construção e permaneça estável pelo período de tempo necessário a investigação; e quando as leituras são feitas de uma forma contínua ou intermitente, conforme a necessidade do projecto.

De acordo com TEIXEIRA (2017), a subpressão e a percolação de água através da estrutura são as principais causas de instabilidade potencial de parte ou da totalidade das estruturas hidráulicas. A subpressão age no sentido ascendente, aliviando o peso da estrutura, reduzindo sua resistência ao deslizamento e levando a barragem a uma condição menos segura.

Sendo o principal objectivo dos drenos de galeria a redução das subpressões que se fazem sentir na fundação e na protecção do revestimento da estrutura, estes mostraram-se eficientes.

Segundo RUBINI (2014), a eficiência dos drenos de galeria esta associada à grande

superfície das galerias, pois quanto maior essa superfície, maior a actuação local na drenagem das águas de infiltração e conseqüentemente, maior alívio da subpressão.

Da análise comportamental dos poços de alívio, observou-se que os caudais descarregados encontram-se muito abaixo do limite estabelecido, ou seja, os poços operam no lado de segurança. Segundo o manual de operação e controle dos instrumentos de auscultação da barragem de Massingir (ARA-Sul, 2016), o caudal máximo admissível não deve ser superior a $2\text{m}^3/\text{s}$ e o caudal máximo resultante da soma dos caudais descarregados pelos poços ao longo dos anos de 2006 a 2018 foi de $0.5\text{m}^3/\text{s}$.

Foi de constatar que os poços não aliviam com eficácia as pressões da água na fundação, contudo aumentar o número de poços não seria uma solução, pois a instalação de mais poços poderia condicionar a percolação, aumentando a velocidade do fluxo da água e conseqüentemente potenciar a erosão interna.

Segundo PLÜNNECKE (2014), a implementação de poços de alívio como solução de redução da percolação água é também descartável, pois no estudo por ele feito, concluiu-se que os poços de alívio não influenciavam o comportamento do fluxo na zona crítica, por estarem instalados demasiado longe da zona de saída do caudal, isto é, demasiado a jusante. Deste modo a possibilidade de instalar mais poços de alívio, desta vez mais próximos, iria aumentar a velocidade do fluxo e, eventualmente, potenciar a erosão, pelo que não seria uma boa solução.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Acompanhando as actividades de campo e avaliando o pessoal técnico responsável pelo monitoramento dos instrumentos de auscultação da barragem, foi de se notar que mantém uma vigilância apertada sobre à barragem, fazendo leituras diárias e registrando cada anomalia ou mudança comportamental da instrumentação encontrada no campo.

A execução de análises de comportamento dos dados obtidos através das leituras piezométricas, e a interpretação dos resultados da respectiva observação foi de extrema importância pois no âmbito da análise e interpretação de dados, e da mesma foi observado que algumas variações bruscas de pressões nos piezómetros não estavam associadas as variações dos níveis da água na albufeira, o que pode significar uma variação brusca no funcionamento hidráulico a jusante desse aparelho indicando uma zona de ruptura no aterro. Após feita a análise comportamental dos dados obtidos a partir da instrumentação, pode se observar que o tratamento com poços de alívio mostrou-se eficiente para reduzir de forma eficaz as subpressões a jusante da barragem. Embora os poços não alivem com eficácia as pressões de água na fundação, os piezómetros apresentaram uma oscilação brusca dos dados, registrando na sua maioria elevadas pressões nas locais onde foram instalados ameaçando a segurança estrutural da barragem.

Visto que boa parte dos piezómetros encontram-se inoperáveis devido a falta de manutenção e que a maioria dos piezómetros que encontram num bom estado registram elevadas pressões, conclui-se que a barragem não apresenta, ainda, um comportamento necessário para que se considere como segura pois, existem fortes indícios de que o fenómeno de fluxo excessivo pela fundação ainda não se encontra controlado.

VII. RECOMENDAÇÕES

A barragem de Massingir recomenda-se:

- Que se dobre a frequência das leituras de modo a monitorar cada mudança comportamental dos dados e que se apliquem medidas de mitigação de modo a reduzir o impacto das subpressões;
- Que se usem manómetros, em piezómetros artesanais, de modo a se ter dados precisos sobre as pressões que se fazem sentir na zona da sua instalação;
- Que se façam manutenções da instrumentação que se encontra inoperativo devido a fugas, crescimento da vegetação, vandalizações e/ou bloqueio;
- Que se organizem aulas de sapiência de modo a sensibilizar a população no geral e aos pastores de gados a não fazer actos de vandalismo;
- Que se façam mais estudos relacionados a estabilidade estrutural da barragem de Massingir;
- Que nos próximos estudos se olhe mais nos factores externos que condicionam as oscilações ou variações bruscas dos dados das leituras;
- Que se implemente uma das soluções sugeridas pelo autor no capítulo V.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, J. d. (s.d.). *Um Projecto para a Segurança das Barragens Portuguesas*.
2. APLIMA. (2004). *Certificação Digital N°0115476*.
3. ARA-Sul. (2016). *Barragem de Massingir - Manual de Operação e Controle de Instrumentos de Auscultação*. Maputo.
4. ARA-Sul. (2017). *Pela Água, Vida e Desenvolvimento*.
5. CASTRO, F. D. (2001). *Guia Básico de Segurança de Barragens*.
6. CIABM. (2008). *Relatório do inquérito ao acidente da barragem de Massingir*. Maputo.
7. Da Silva, J. M. (2008). *Sistema de observação da barragem dos Pequenos Libombos*.
8. *Desenvolvimento de Software em Excel para Análise de Dados e Auxílio na Manutenção de Bacias Hidrográficas*. (2015).
9. FIGUEIREDO, L. I. (2017). *Soluções de Estabilização Hidráulica na barragem de Massingir*.
10. FLORINI, A. S. (2003). *Mini curso de Barragem*.
11. FLORINI, A. S. (2008). *Minicurso de Segurança barragens - Simpósio de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas*.
12. FONSECA, A. D. (2003). *Auscultação por Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento para Geração de Energia Elétrica – Estudo de*.
13. FR21788. (2017). *Barragens de terra - pocos de alivio*.
14. FREITAS, E. d., BARBOSA, L. R., & ALMEIDA, C. d. (2015). *Desenvolvimento de Software em Excel para Análise de Dados e Auxílio na Manutenção de Bacias Hidrográficas*.
15. HANNA. (2003). *Análise do subsolo - sondagem*.
16. KUPERMAN, S. C., MORETTI, M. R., CIFU, S., CELESTINO, T. B., RE, G., ZOELLNER, K., . . . REIGADA, R. P. (2003). *Critérios para Fixação de Valores Limites da Instrumentação Civil de Barragens de Concreto e de Terra*.
17. LUIS, J. (2004). *Instrumentação e Segurança de Barragens*.
18. MARANGON, M. (2004). *Barragens de Terra e Enrocamento*.
19. MARCELINO, J. S., PORTUGAL, J. C., SOUSA, O., & SIBIA, O. (2011). *Modelação do comportamento Observado da Barragem de Massingir*. NBOA.

20. MARCELO, J., CALDEIRA, L., PORTUGAL, J. C., & Da SILVA, J. M. (2010). *Inspecção anual de segurança das barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane - Barragem de Massingir – Relatório intercalar de interpretação dos dados de observação.*
21. NBOA, N. d. (2011). *Inspecção anual de Segurança das Barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane - Barragem de Massingir.*
22. OLIVEIRA, A. M. (2015). *Estudo da Percolação da água em Maciços Rochosos para o Projecto de Grandes Barragens.*
23. PEDROTHA. (2007). *Certificação Digital No0510750/CA.*
24. PLÜNNECKE, C. (2014). *Rehabilitation Concept for the Massingir Embankment Dam, Mozambique.* Technische Universität Braunschweig.
25. RIJO, M. (2007). *Estruturas Hidráulicas - Barragens.*
26. ROJAS, J. W., & FONINI, A. (2006). *Análise de Percolação em Barragem de Terra Utilizando o Programa SEEP/W.* Porto Alegre.
27. RSB. (1993). *Regulamento de Segurança de Barragens: Normas para barragens de aterro.*
28. RUBINI, L. (2014). *Estudo de Alternativas de Projecto de Vertedouro com A. Florianópolis .*
29. SALGADO, E. N., CERQUEIRA, G. S., HENRIQUES, L., & FILHA, C. A. (2016). *Auscultação de Barragem de Terra.*
30. SILVA, D. S. (2016). *Estudo de Filtro Aplicado ao Controle de Erosão Interna em Barragens .*
31. SMIDERLE, C. D. (2014). *Segurança de Barragem - Instrumentação da Barragem.*
32. TEIXEIRA, S. H. (2017). *Sistemas de Vedação e de Drenagem Interna.*
33. VAZ, Á. C., GONZALEZ, R., ALFREDO, B., QUADROS, C., & ZUCULE, I. (2008). *Comissão de Inquérito ao Acidente da Barragem de Massingir.*
34. VICTORINO, D., GEHLING, W. Y., & RAMIRES, M. C. (2003). *Piezômetro e Medidor de Nível D'água em Pistas Experimentais da Ufrgs.*
35. YOMURA, D., & VOGT, V. (2011). *Introducao ao Geostudio/Geoslope.*
36. ZUCULIN, S. (2012). *MÓDULO 2: Inspenção e Auscultação de Barragens; UNIDADE 2: Instrumentanção de barragens.*

ANEXOS

ANEXO I. Exemplar das fixas usadas para registrar leituras dos piezômetros do corpo da barragem.

ANEXO II. Mapa da barragem de Massingir

ANEXO III. Distribuição dos Piezômetros do corpo da barragem e dados usados na produção de gráficos que ilustram que comportamento dos piezômetros do corpo da barragem

Tabela 1. Mínimas (Min.) leituras anuais dos piezómetros do corpo da barragem e valores limites de controlo de cada piezómetro.

Designação	PK (secção)	Valor de atenção	Valor de alerta	Ano												
				2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
				Min.												
PP01	0+450	13	8	7.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PP01B		7	2	9.57	13.99	16.5	16.78	16.68	16.65	16.64	16.59	16.57	16.61	16.68	16.62	16.71
PP02		14	9	9.25	9.16	9.04	7.38	6.97	6.31	7.29	7.05	6.13	7.48	7.04	7.47	7.77
PP03		6	1	6.67	7.78	6.44	7.1	9.07	9.15	9.15	9.12	9.12	9.17	9.23	9.2	9.24
PP04	0+800	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PP05		14	9	0	9.87	9.22	9.55	9.49	9.45	9.45	9.42	9.12	9.42	9.49	9.48	9.45
PP06		6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PP07B	1+300	7	2	15.3	15.4	14.14	15.18	15.04	14.97	15.12	15.06	15.06	15.15	15.36	15.2	15.35
PP08		14	9	6.68	7.13	4.3	6.09	5.96	6.13	6.34	6	6.1	6.19	7.23	6.78	7.2
PP09		9	4	7.72	7.82	7.48	7.63	6.37	7.51	6.79	7.42	7.47	6.76	7.73	7.09	7.72
PP10B	2+000	4	-1	6.08	11.96	10.44	11.17	11.15	11.29	11.48	11.22	11.33	11.59	11.94	11.54	4.72
PP11		11	6	3.9	4.26	3.25	3.74	3.66	3.79	3.92	3.81	3.83	4.01	4.26	3.88	4.28
PP12		2	-3	3.81	4.3	2.8	3.59	3.58	3.69	3.86	3.65	3.71	3.9	4.31	3.93	4.31
PP13	3+050	11	6	0	14.82	14.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PP14		16	11	0	10.05	10.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PP16	3+300	18	13	26.84	26.77	26.67	26.81	26.76	26.81	26.8	26.85	26.88	27	26.92	26.69	26.74
PP17		11	6	0	19.59	19.96	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PP18		3	-2	13.28	13.32	12.25	12.39	12.24	12.29	12.38	12.21	11.25	11.94	12.08	11.78	11.86
PP19	0+600	14	9	15.9	17.7	17.07	17.68	17.65	17.63	17.63	17.61	17.61	15.9	17.52	17.55	17.6
PP20	1+050	14	9	15.6	13.71	15.96	16.1	15.97	15.93	15.9	15.8	15.73	15.58	15.9	15.61	15.79

Tabela 2. Resumo dos dados de instalação dos piezómetros do corpo da barragem

<i>Data de instalação</i>	<i>PK</i>	<i>Designação</i>	<i>Profundidade (m)</i>	<i>Cota terreno (m)</i>	<i>Ponteira</i>
2005-04-21		PPO1 (INOP)	15	125,1	Filtro jusante
2005-10-05		PPO1B	10	109,1	Fundação
2005-04-13	0+450	PPO2	20,4	116,9	Contacto aterro fundação
2005-12-04		PPO3	19,23	109,4	Contacto aterro fundação
2005-05-11	0+600	PP19	18,23	116,9	Contacto aterro fundação
?		PP04	Obstruído		
2005-04-14	0+800	PP05	19,5	116,7	Contacto aterro fundação
2005-04-19		PP06	Obstruído	109,5	Fundação
2005-05-12	1+050	PP20	18,14	116,4	Contacto aterro fundação
2005-09-05		PP07B	18,15	109,0	Fundação
2005-04-13	1+300	PP08	18,92	116,5	Contacto aterro fundação
2005-10-04		PP09	8,1	109,0	Aterro
2005-05-13		PP10B	12,8	109,3	?
2005-04-25	2+000	PP11	15	116,7	?
2005-05-15		PP12	13	109,3	?
2005-05-17	3+050	PP13	14,7	121,9	Aterro
2005-04-26		PP14	9,91	116,6	Aterro
2005-05-28		PP16	30	115,9	Fundação
2005-04-05	3+300	PP17	19,83	108,62	Fundação
2005-05-05		PP18	14,82	100,89	Fundação

ANEXO IV. Dados usados na produção de gráficos que ilustram que comportamento dos piezômetros da margem esquerda e direita

Tabela 3. Mínimas e máximas leituras anuais dos piezômetros da margem esquerda/margem direita

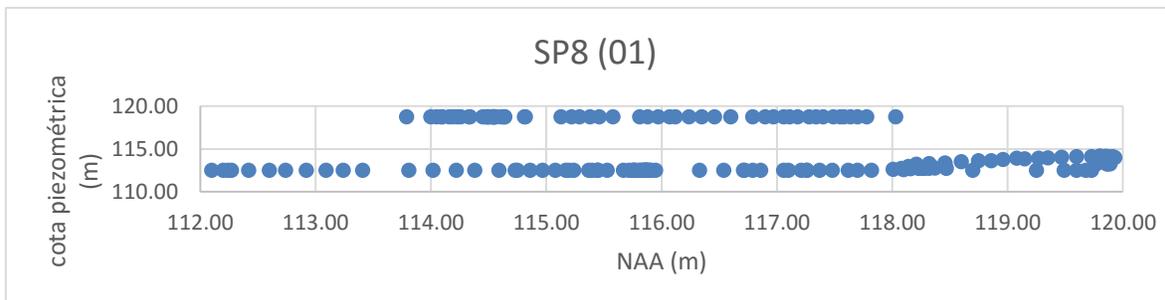
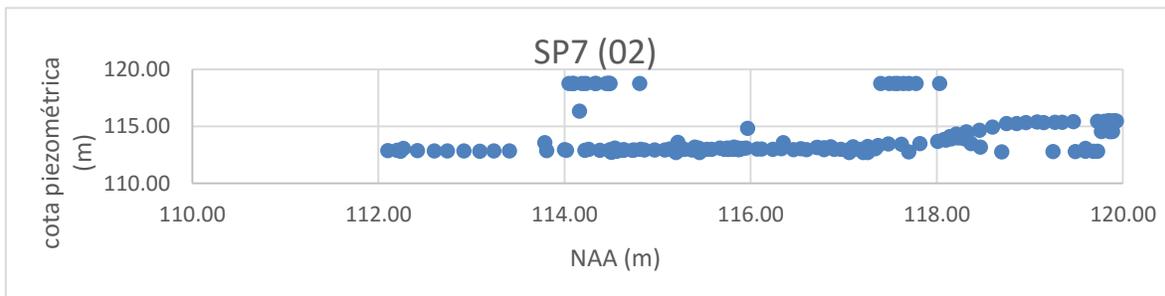
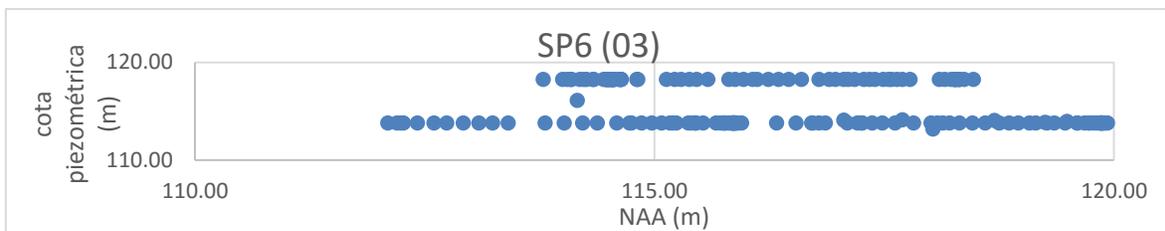
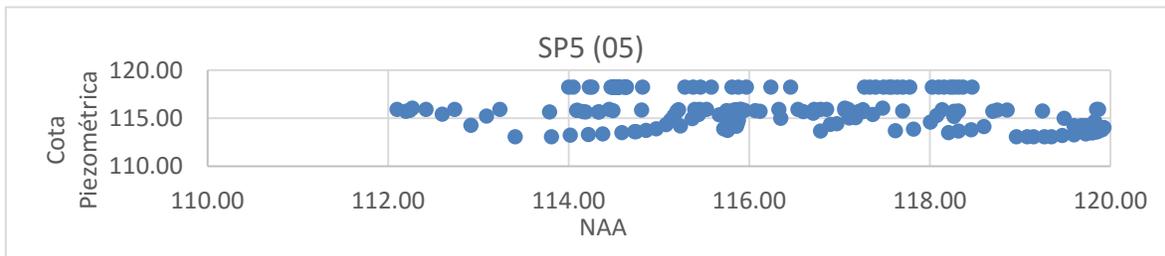
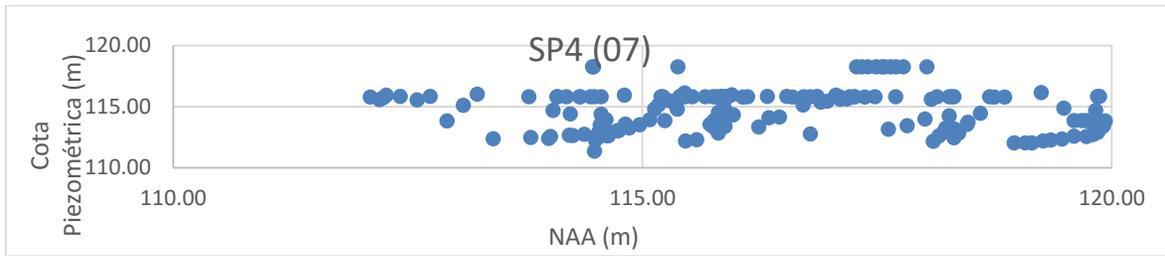
		ANO											
	PIEZOMETRO	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
MAXIMO	P4D	13.21	12.59	10.98	10.47	10.21	10.27	10.14	10.11	10.15	10.69	10.41	10.63
MAXIMO	P5D	10.29	10.2	9.66	8.98	8.87	8.93	8.92	8.91	0.00	0.00	0.00	0.00
MAXIMO	P5 CIMA	0	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAXIMO	P5 BAIXO	8.6	10.03	9.13	8.46	8.56	10.34	8.42	8.5	8.43	8.35	0	0
MAXIMO	P`4	0.31	0.89	0.71	0.18	0.28	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MAXIMO	P`5 BAIXO	13.84	12.7	1078	10.83	10.9	20.55	10.52	10.46	10.55	11.11	0	0
MINIMO	P4D	12.94	9.32	10.13	9.69	9.43	9.83	8.88	8.86	9.71	10.24	9.23	9.73
MINIMO	P5D	0	8.64	8.17	8.59	8.38	8.69	8.23	8.32	0.00	0.00	0.00	0.00
MINIMO	P5 CIMA	0	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MINIMO	P5 BAIXO	8.28	7.26	8.26	8.25	8.25	8.26	8.24	8.2	8.24	8.28	0	0
MINIMO	P`4	0.21	0.06	0.01	0.01	0.08	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MINIMO	P`5 BAIXO	13.13	10.41	10.4	9.97	9.67	10.12	9.66	9.03	9.97	10.6	0	0

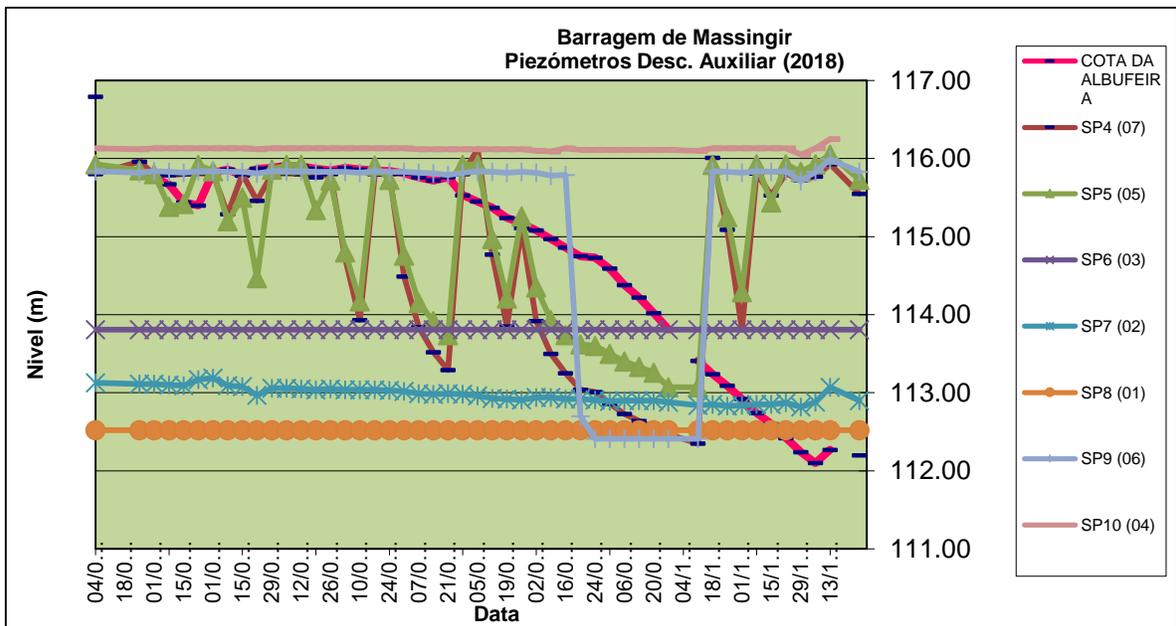
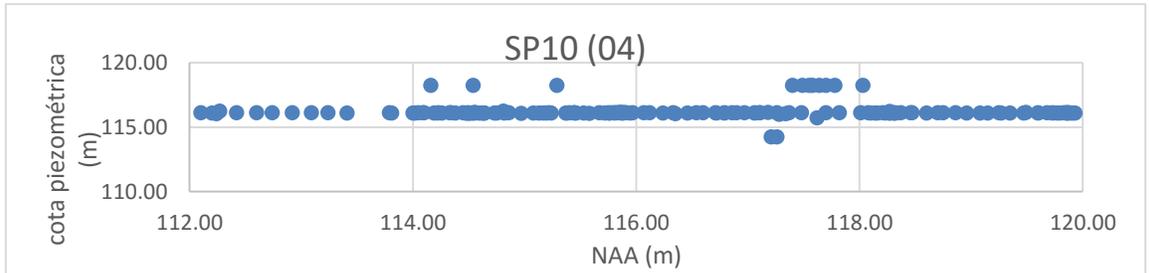
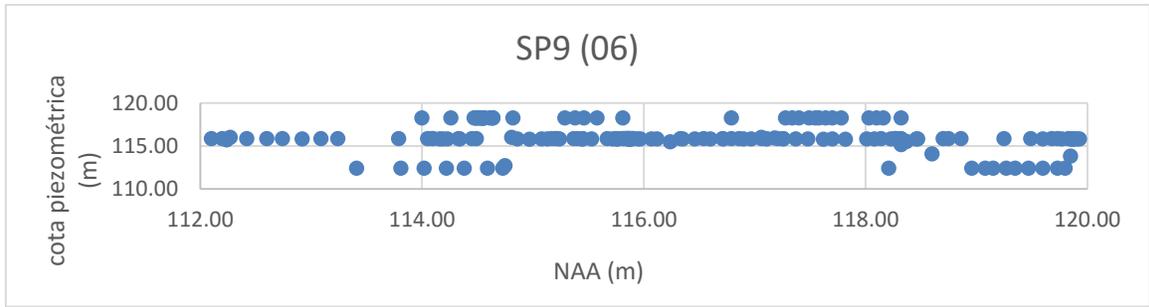
ANEXO V. Mapa e gráficos de correlação entre o nível de água na albufeira e o nível piezométrico (Piezómetros do descarregador auxiliar)



Figure 1. Mapa piezometrico do descarregador auxiliar

Gráficos resultantes da correlação entre o nível de água na albufeira (x) e a cota piezométrica (y) dos piezômetros do descarregador auxiliar.



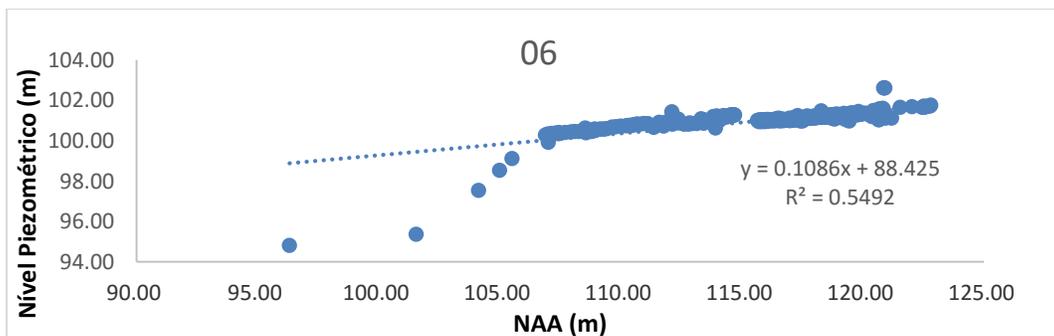
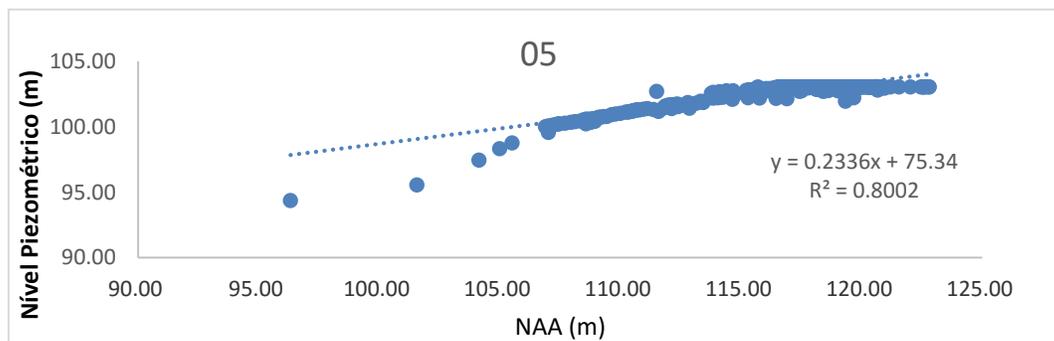
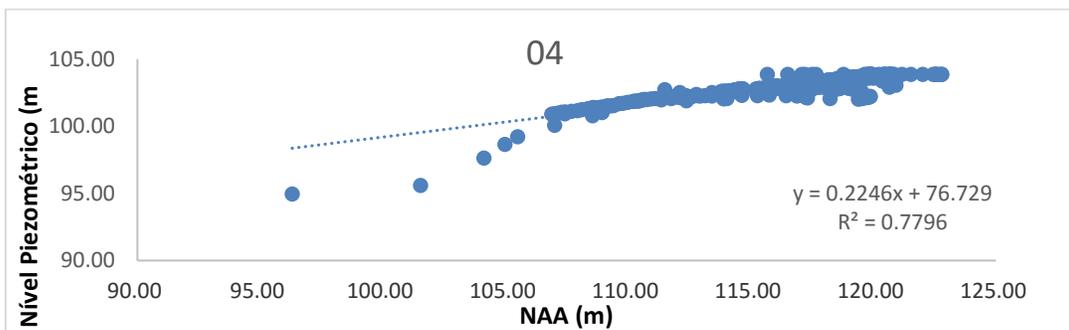
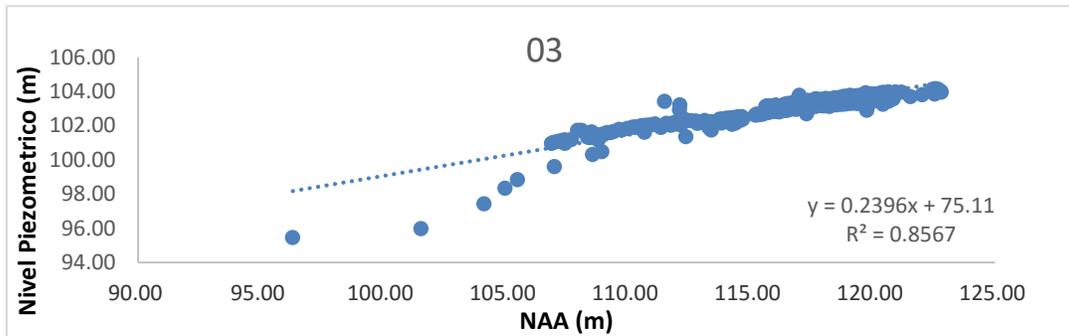


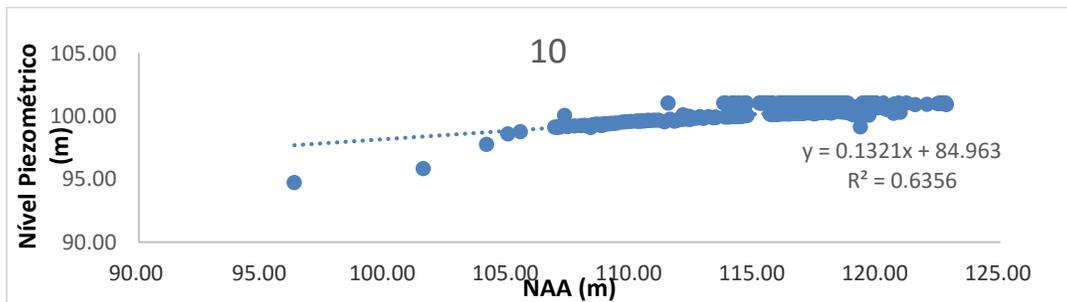
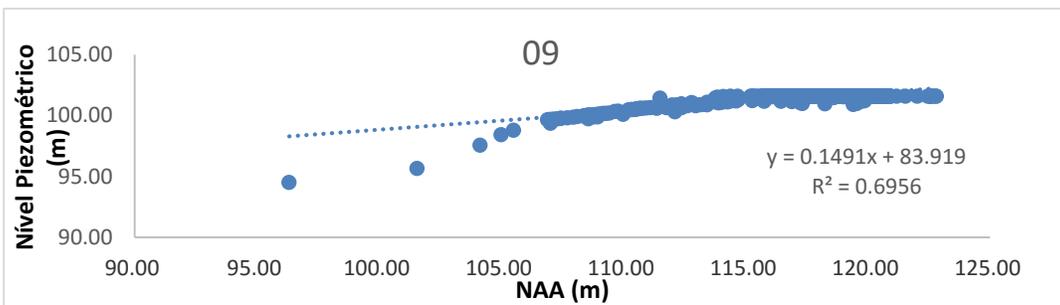
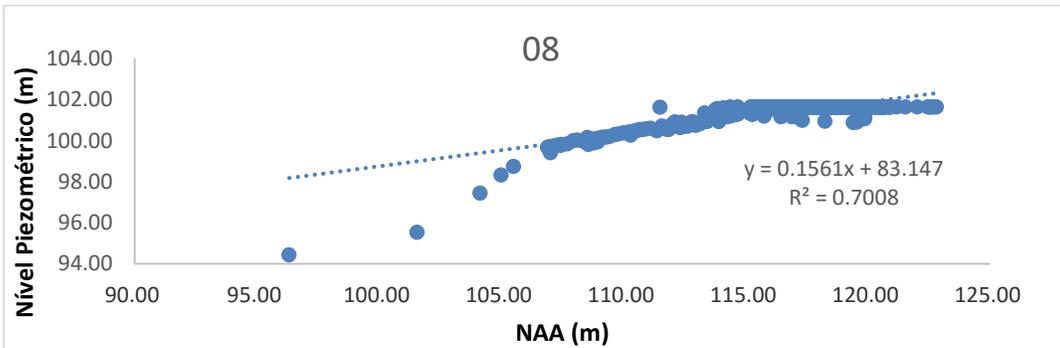
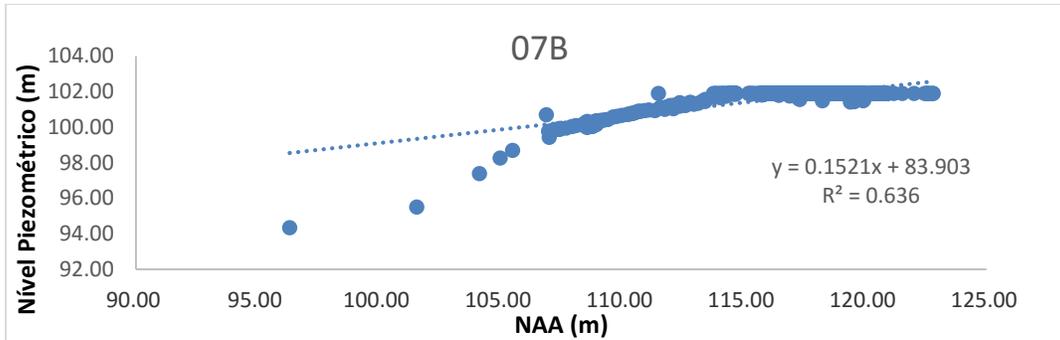
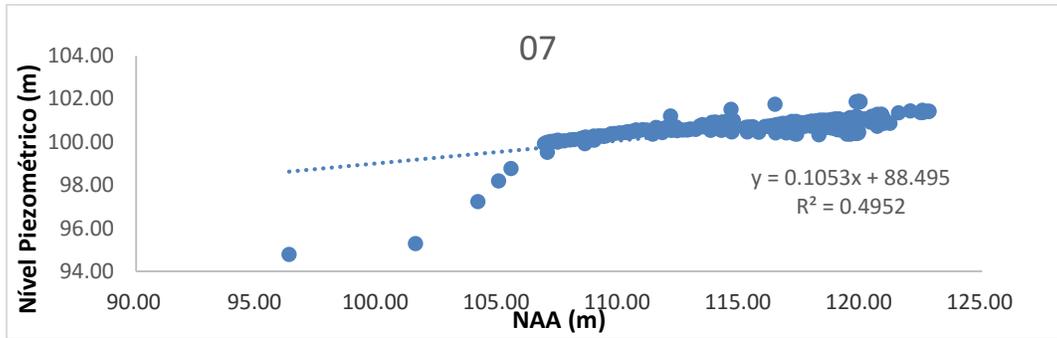
ANEXO VI. Dados usados na produção de gráficos que ilustram que comportamento dos piezômetros da vala de drenagem; gráficos da correlação entre o NAA e o nível piezométrico de cada piezômetro e gráficos de correlação entre o NAA e o caudal descarregado pelos PA.

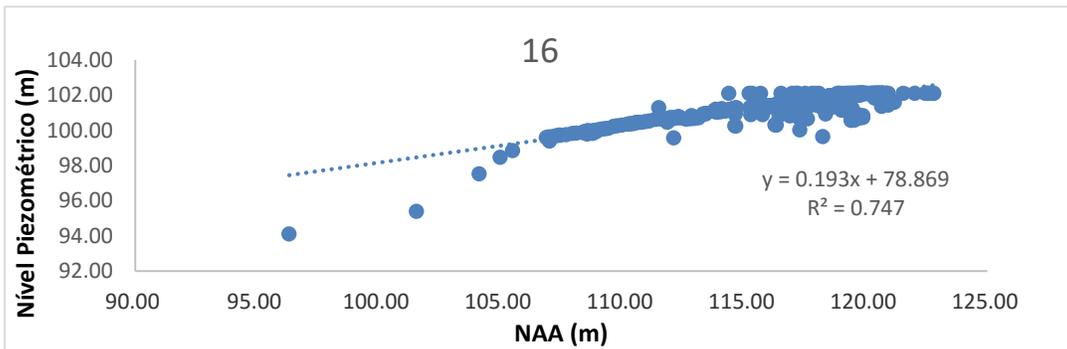
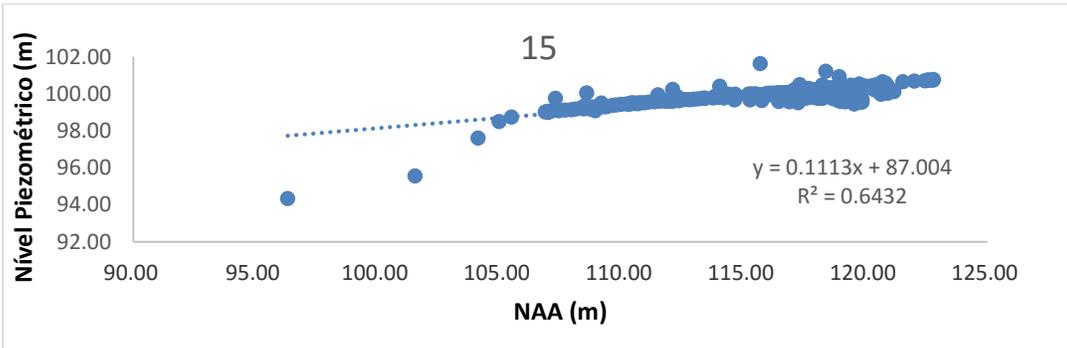
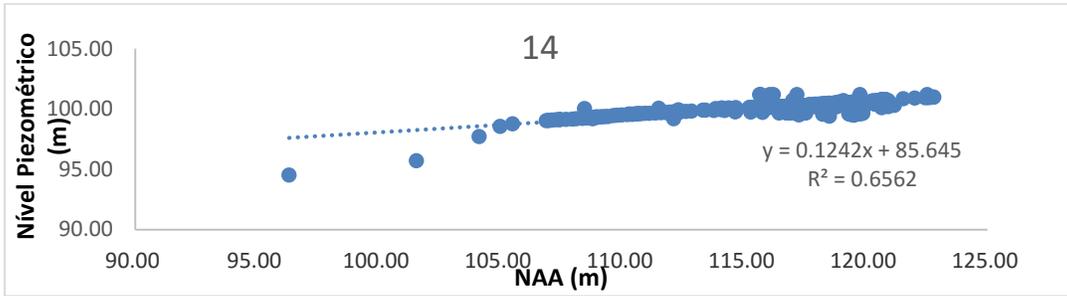
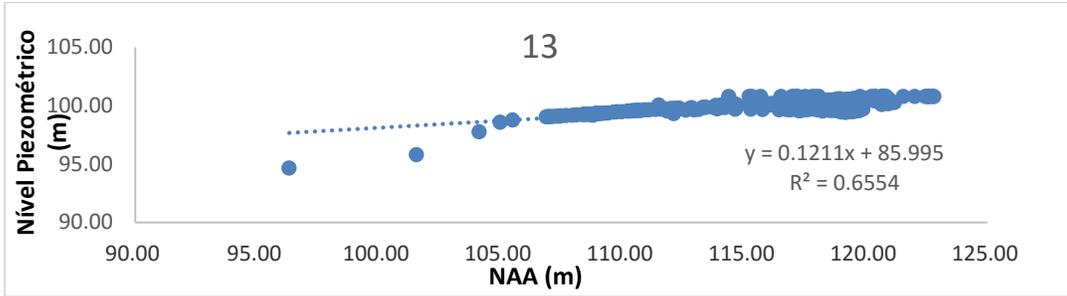
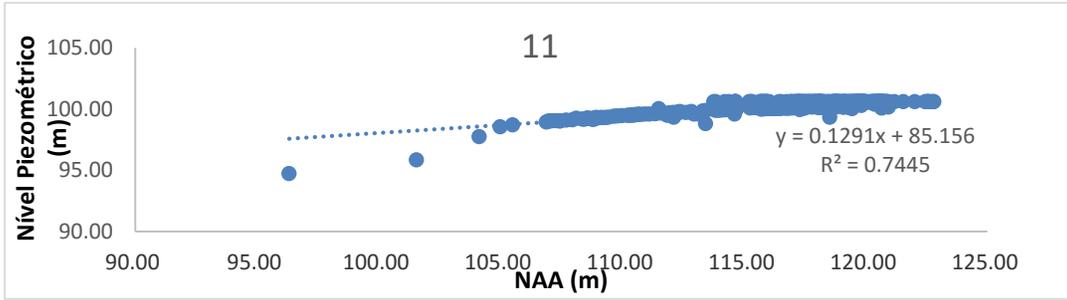
Tabela 4. Mínimas (Min) leituras anuais e valores limites de controle usados na produção de gráficos dos piezômetros da Vala de Drenagem

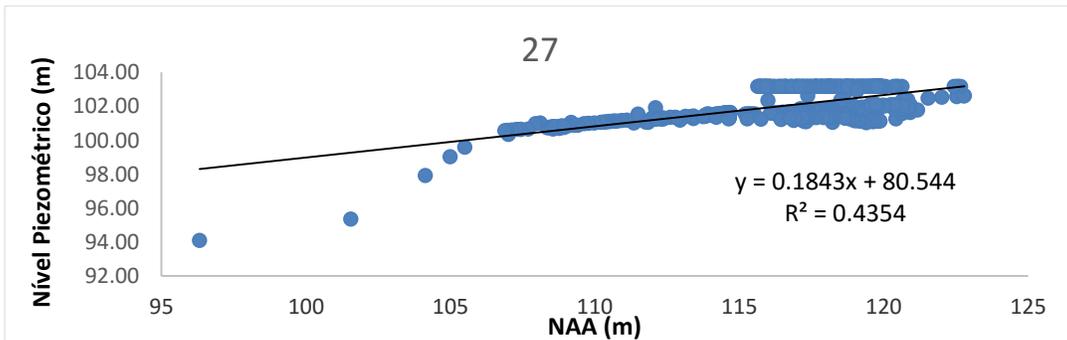
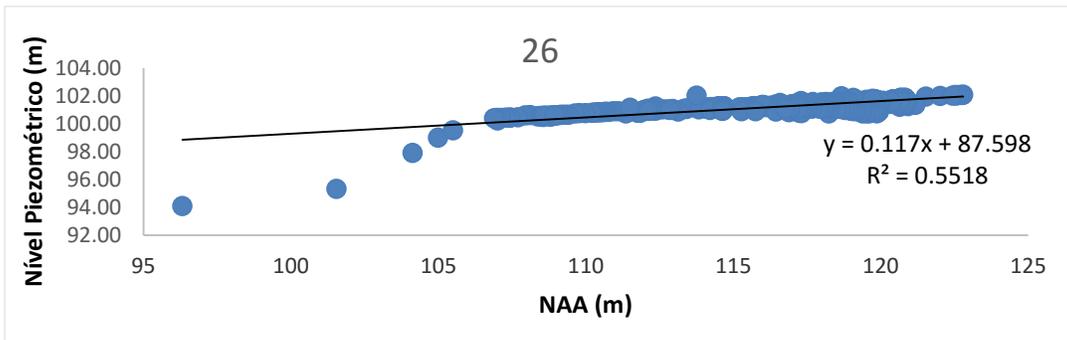
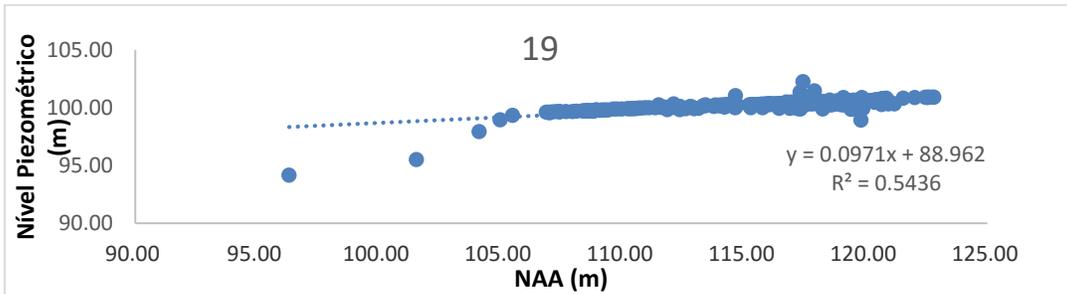
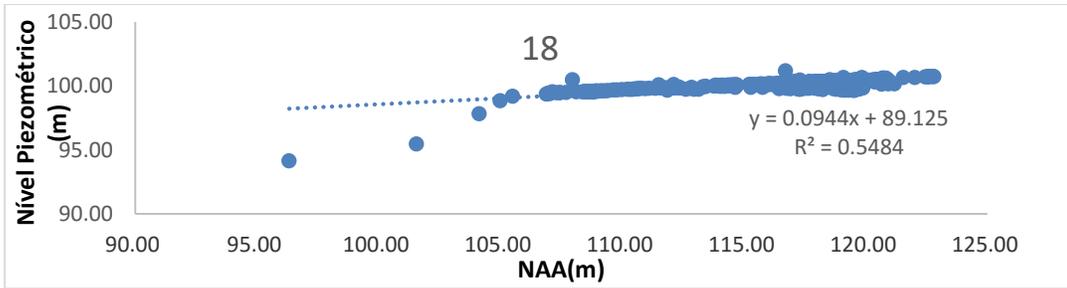
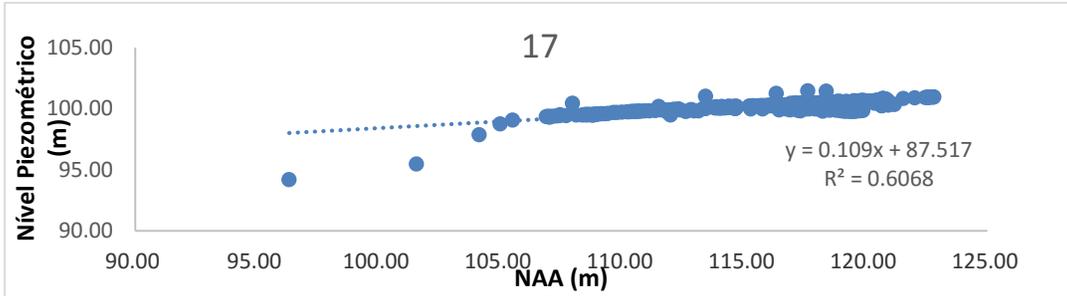
Prof.	Valor de Atenção	Valor de Alerta	ANO												
			2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
			Min	Min											
P3	2.4	-2.9	1.34	2.23	0.39	0.82	0.61	0.63	0.88	0.7	0.6	1.11	1.87	1.12	1.65
P4	2.2	-3.1	1.09	1.58	0.13	0.1	0.07	0.1	0.39	0.2	0.15	0.7	1.56	0.58	0.75
P5	1.8	-3.5	0.58	1.34	0.22	0.06	0.04		0.1	0.11	0.01	0.05	0.81	0.02	0.61
P6	1.9	-3.4	0.63	1.66	0.85	1.25	1.21	0.51	1.14	0.46	1.41			0.34	1.31
P7	1.6	-3.7	0.35	1.17	0.43				0.98	0.8	0.77	0.12	1.37	1	1.29
P7B	1.6	-3.7	0.07	0.62	0.22	0	0	0			0	0.02	0.04	0.09	0.04
P8	1.9	-3.4	0.3	0.83	0.5	0	0	0	0.03	0.04	0.02	0.05	0.36	0.1	0.54
P9	2.3	-3	0.24	0.69	0.27	0.04	0.01	0	0.01	0.06	0.04	0.02	0.2	0.01	0.35
P10	2.2	-3.1	0.29	0.98	0.06	0.37	0.25	0.34	0.48	0.26	0.26			0.68	1.11
P11	2.1	-3.2	0.58	0.89	0.06	0.01	0.02		0.18	0.01	0.01	0.29		1.27	
P12	2.1	-3.2	0.98	1.23	0.13	0.48	0.4	0.49	0.62	0.46	0.17	0.71	1.33	0.23	1.45
P13	2	-3.3	0.74	1.01	0.16	0.19	0.11	0.2	0.35	0.2	0.13	0.44	1.06	1.08	1.3
P14	2.2	-3.1	1.17	1.16	0.2	0.61	0		0.75	0.6	0.52	0.85	1.43	1.48	1.7
P15	2.5	-2.8	1.39	1.58	0.38	1.22	1.16	1.24	0.41	1.24	1.16	1.46	1.12	0.6	2.06
P16	2.8	-2.5	0.84	1.32	0.12	0.06	0.04	0.03	0.21	0.03	0.07	0.12	1.2	0.54	1.12
P17	3	-2.3	1.41	1.98	1.48	0.29	1.76	1.83	0.99	1.75	1.78	2.04	2.42	2.36	2.6
P18	2.8	-2.5	2.25	1.86	1.61	1.68	1.85	1.92	2	1.93	1.7	1.18	2.39	1.86	2.59
P19	2.6	-2.7	1.97	2.2	1.39	0.86	1.64	1.7	1.8	0.05	1.44	0.95	2.18	0.02	2.04
P20	2.2	-3.1	1.74	1.95	1.12	1.15	1.38	1.44	1.54	1.46	1.41	1.62	1.9	1.42	1.01
P21	2.1	-3.2	1.52	1.21	0.8	1.15	1.1	1.13	1.27					1.64	
P22	2	-3.3	1.53	1.82	0.94	1.25	1.21	1.12	1.38	1.3	0.95	1.47	1.79	1.62	1.52
P23	2.1	-3.2	1.4	1.48	0.48	0.9	0.85	0.94	1.07	0.01	0.9	1.2	1.14	1.69	1.87
P24	1.9	-3.4	1.37	1.62	0.6	0.97	0.01	1.01	1.12	1.02	0.97	1.23	1.64	1.65	1.82
P25	2.1	-3.2	1.41	1.68	0.46	0.9	0.87	0.99	1.13	1.02	0.94	1.25	1.72	1.57	1.81
P26	2.2	-3.1	1.7	1.95	0.88	1.27	1.24	1.33	1.46	1.37	1.11	0.95	1.09	1.86	1.11
P27	2.3	-3	1.26	1.86	0.54	0			1.24	1.12	0.25	0.83	1.06	0.81	1.04
P28	1.8	-3.5	0.54	1.22	0.06	0.12	0.1	0.22	0.42	0.27	0.2	0.47	1.25	0.75	1.17
P29	1.7	-3.6	0.99	1.29	0.12	0.43	0.36	0.48	0.64	0.51	0.45	0.59	1.31	0.89	1.29
P30	1.8	-3.5	1.15	1.44	0.21	0.65	0.61	0.72	0.14	0.75	0.71	1	1.48	1.13	1.43
P31	1.7	-3.6	1.35	1.1	0.61	0.95	0.9	1	1.11	0.81	0.98	1.22	1.6	0.58	1.51
P32	1.8	-3.5	1.11	1.6	0.53	0.92	0.86	0.94	1.08	0.99	0.4	0.77	1		
P33	1.5	-3.8	0.63	1.02	0.2	0.27	0.32	0.4	0.4	0.4	0.4	0.52	1.14	0.53	1.01
P34	1.5	-3.8	0.5	0.9	0.06	0.05	0.03	0.06	0.02	0.14	0.06	0.25	0.93	0.31	0.6
P35	1.4	-3.9	0.18	0.56	0.32	0.04	0		0.01	0.07	0.05	0.05	0.28	0.03	0.41
P36	1.6	-3.7	0.15	0.2								0.06			0.02
P37	1.7	-3.6	0.15	0.54	0.34	0.02	0		0.06	0.07	0.14	0.02	0.32	0.49	1.01
P38	2	-3.3	0.88	1.3	0.08	0.37	0.62	0.74	0.93	0.8	0.72	1.02	1.31	0.77	1.28
P39	2.2	-3.1	1.76	2.26	0.82	1.42	1.39	1.5	1.68	1.58	1.52	1.75	2.15	0.18 3	1.31
P40	2.9	-2.4	2.99	3.49	2.19	2.63	2.6	2.69	2.13	0.85	0.23	2.25	3.36	2.86	3.37
P41	2.7	-2.6	3.6	4.23	2.32	2.92	1.49	3.01	3.28	3.16	3.09	3.39	4.04	3.35	4.06

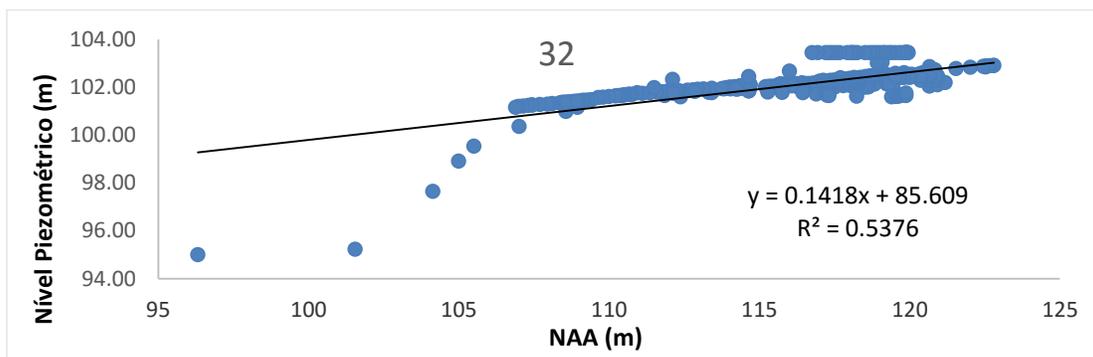
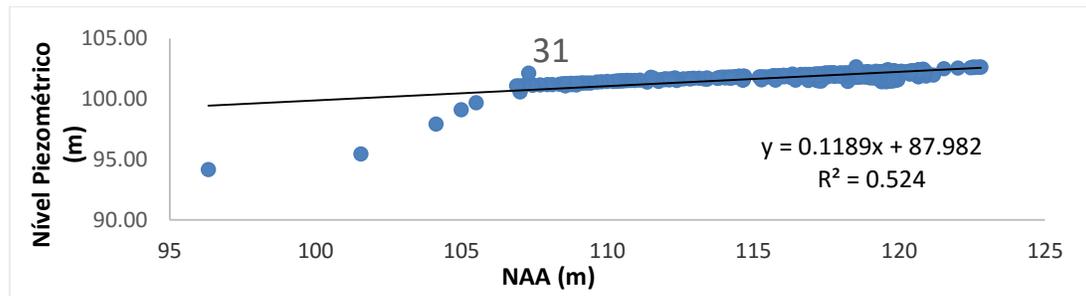
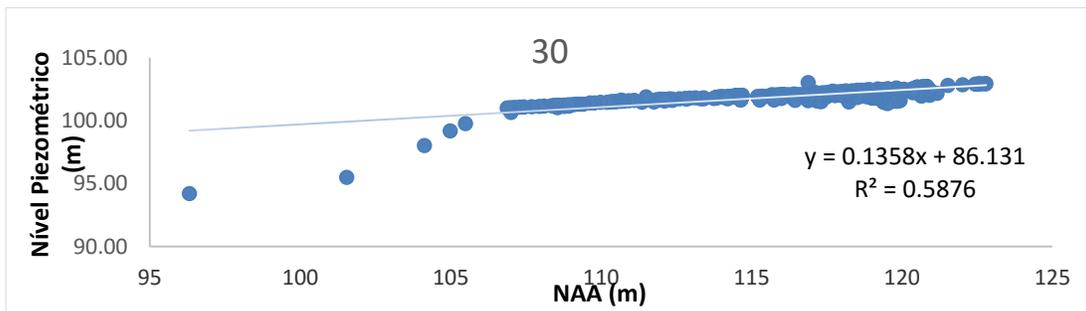
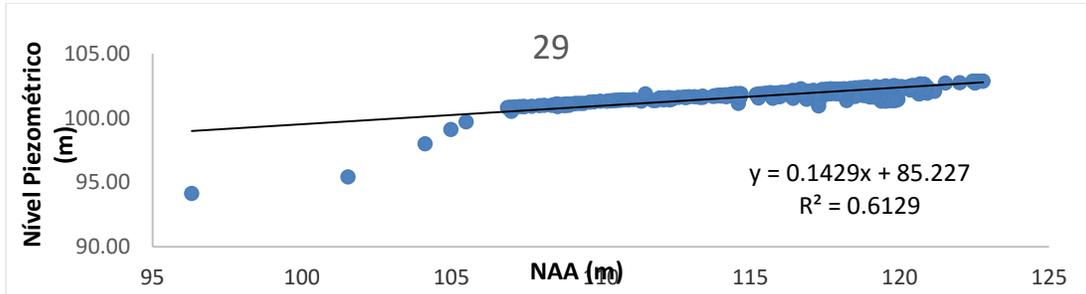
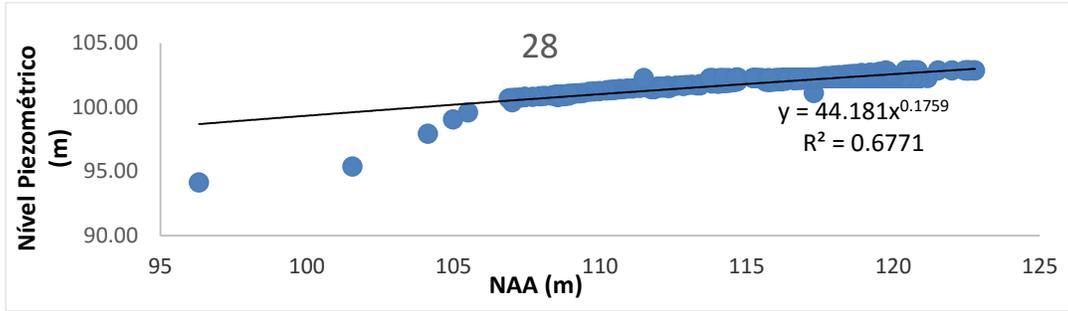
Gráficos de relação entre o nível de água na albufeira (eixo x) e o Nível Piezométrico (eixo y) dos PVD's

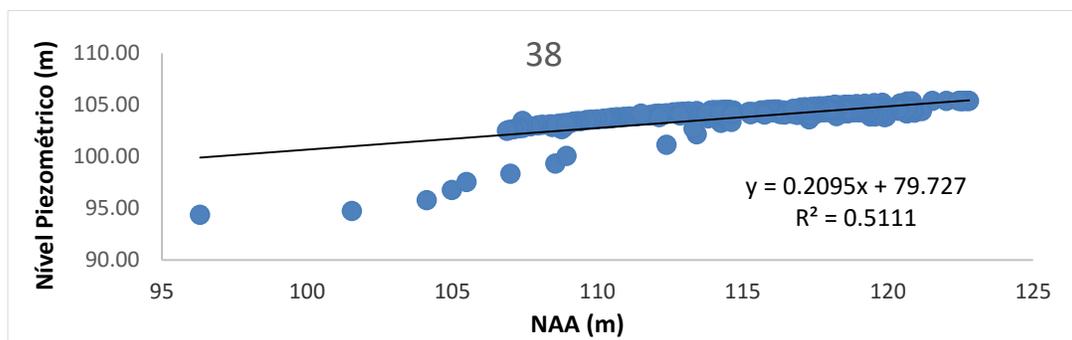
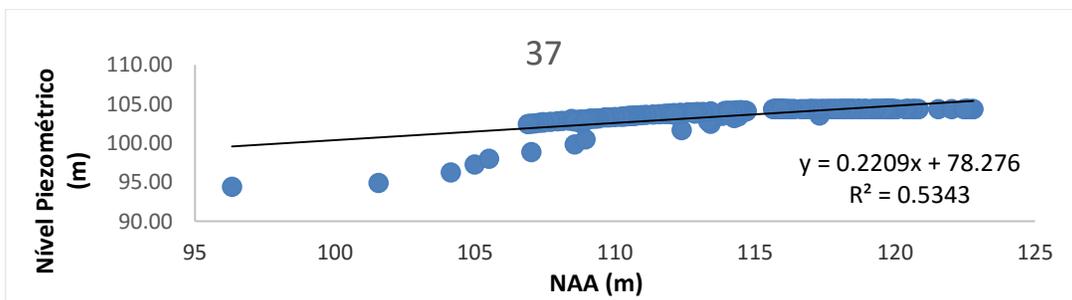
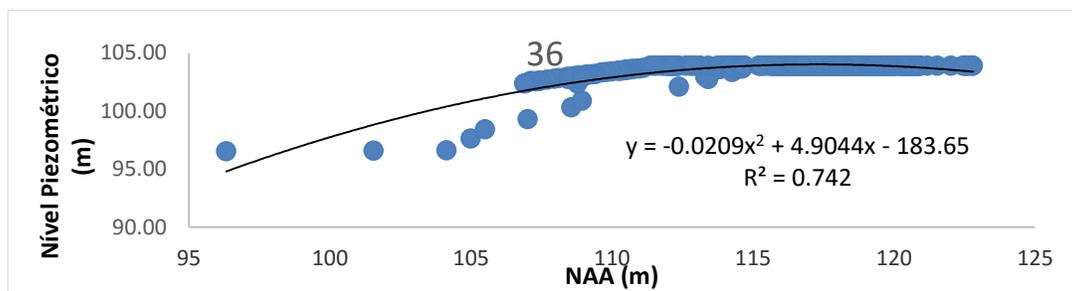
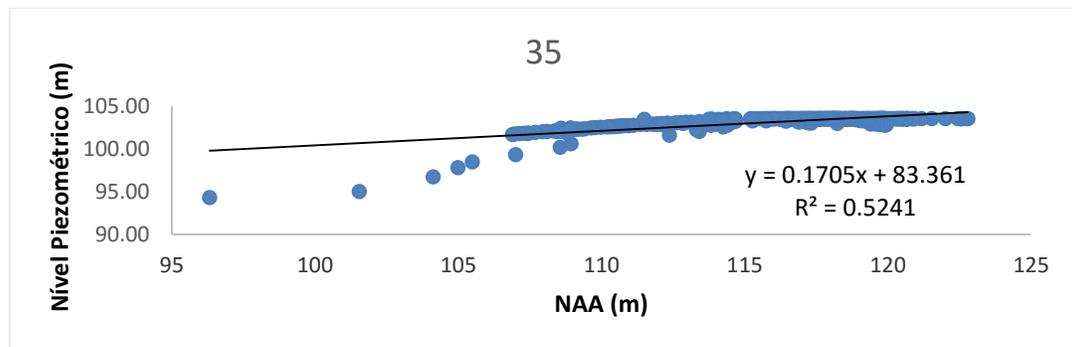
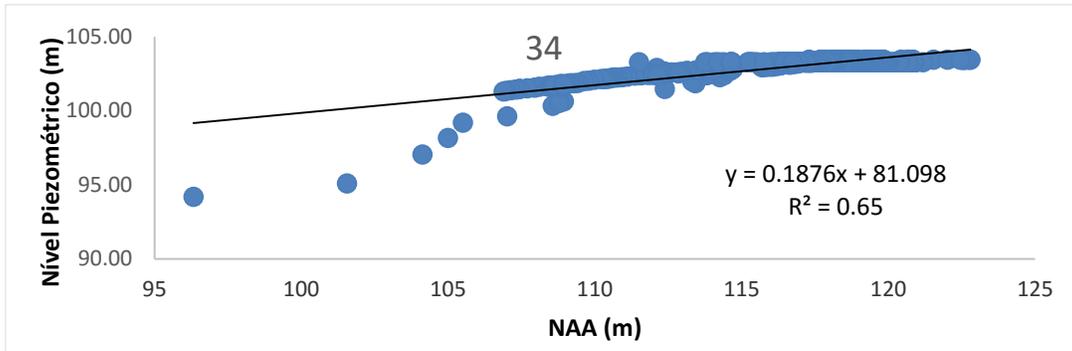


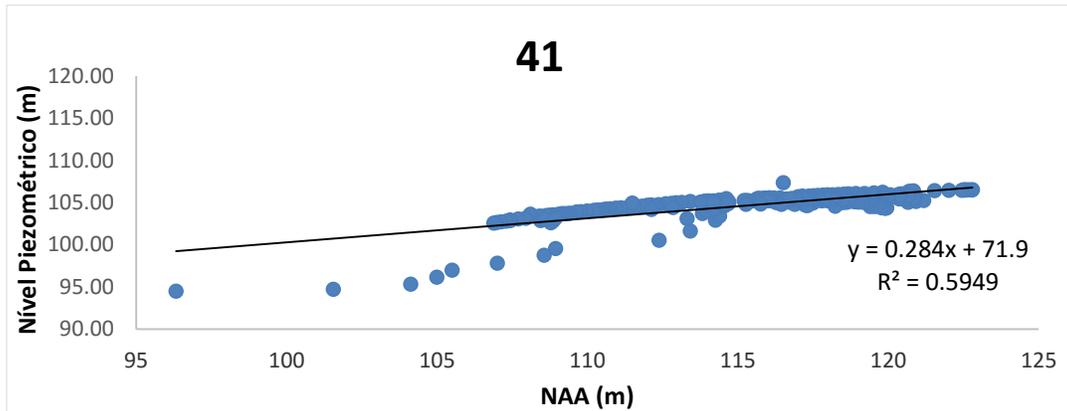
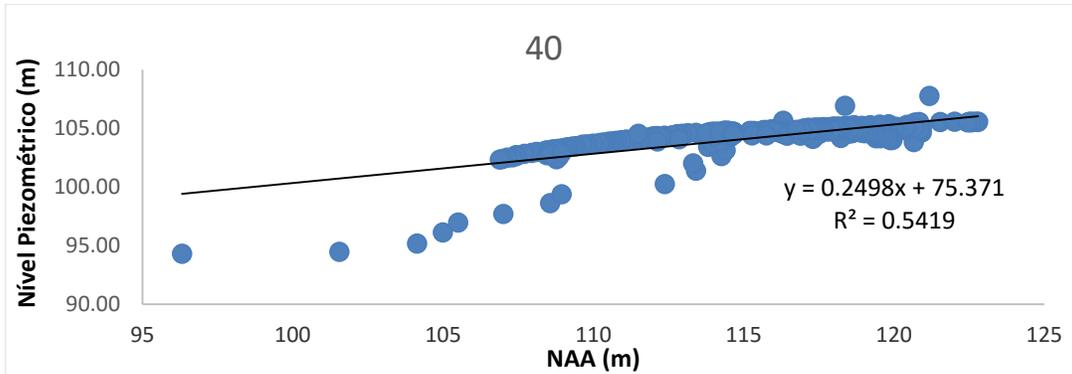
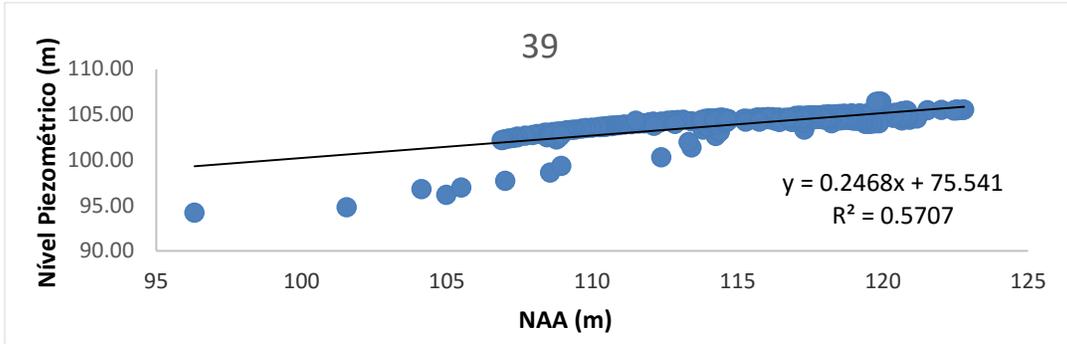




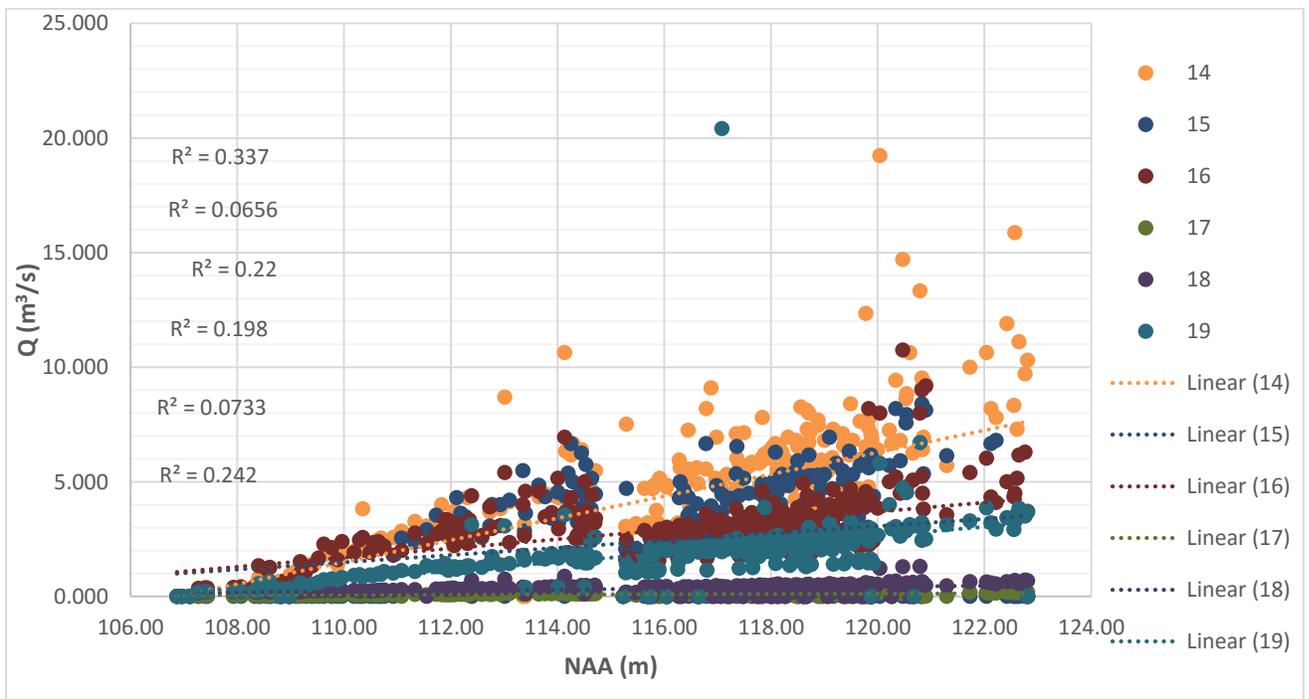
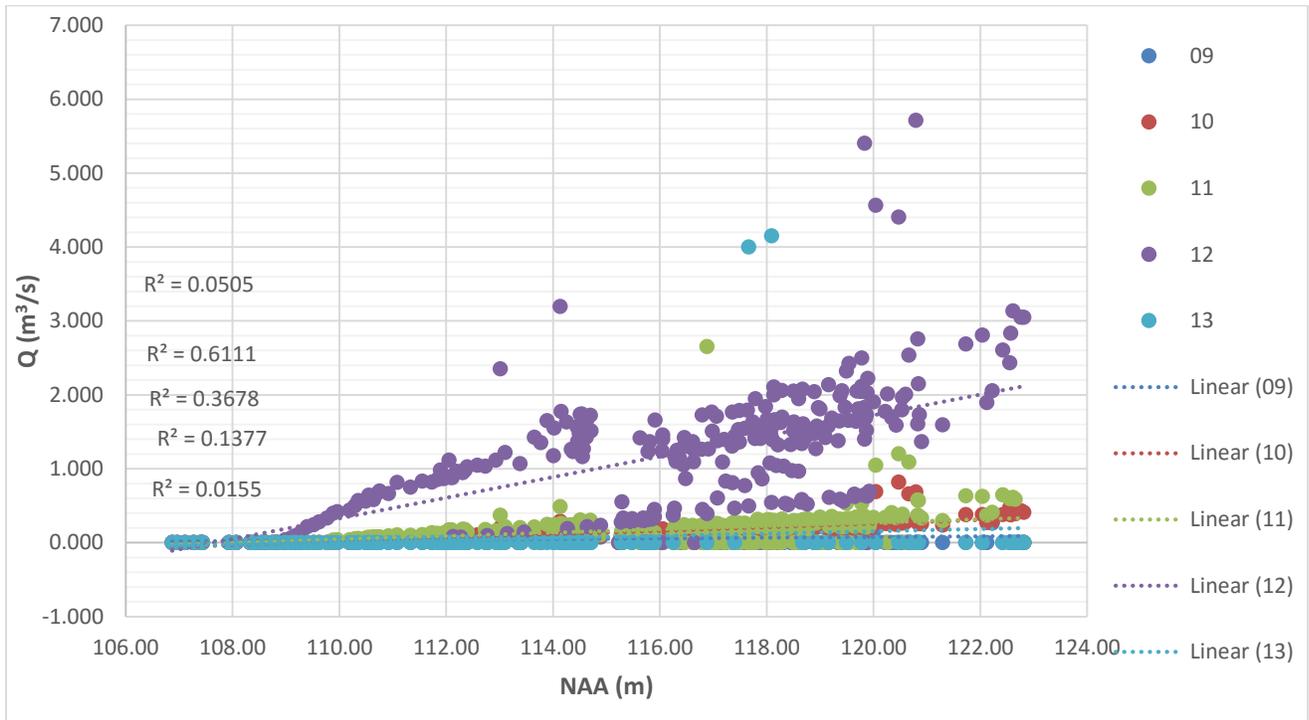








POCOS DE ALÍVIO – Gráficos representativos da relação entre o NAA (x) e o caudal descarregado pelos PA (y)



ANEXO VII. Imagens da ocupação jusante na barragem



Figura 1. A imagem a esquerda mostra crescimento de vegetação na vala principal de drenagem e a direita a obstrução das vias de acesso às banquetas de cima



Figura 2. Obstrução da vala principal e das caleiras devido a precipitação e criação de caminhos preferenciais da água na superfície dos taludes



Figura 3. Vandalização das proteções dos piezómetros

