



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Faculdade da Agricultura

Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural

Tema: Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Monografia apresentada e defendido como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

Discente:

Pedro Eugénio Macuvele

Código:

2014528

Tutor: Mário Matangue (PhD)

Chókwé, Agosto de 2019



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE GAZA

Projecto de Licenciatura sobre avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir apresentado ao Curso de Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural na Divisão de Agricultura do Instituto Superior Politécnico de Gaza, como requisito para obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural.

Tutor: Mário Matangue (PhD)

Chókwè, Agosto de 2019

Índice

1.INTRODUÇÃO.....	1
1.1.Problema e justificação.....	2
1.2.Objectivos.....	2
1.2.1.Geral:.....	2
1.2.2.Específicos:.....	2
1.3.Hipótese de estudo.....	2
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1.Caracterização do distrito de Massingir.....	3
2.2.Caracterização climática e hidrográfica do distrito.....	3
2.3.Historial da Barragem de Massingir.....	3
2.4.Tipos de Barragens.....	5
2.4.1.Barragem de concreto.....	5
2.4.2.Barragens de enrocamento.....	6
2.4.3.Barragem de terra.....	6
2.5.Taludes.....	7
2.5.1.Força da água sobre os taludes.....	8
2.6.Acção da subpressão no macio de uma barragem.....	9
2.7.Percolação em barragens de terra.....	9
2.8.Controlo de percolação em barragens de terra.....	10
2.8.1.Trincheira de vedação ou “cut-off”.....	10
2.8.2.Poços de alívio.....	11
2.9.Instrumentação em Barragens.....	11
2.9.1.Piezómetros.....	12
2.10.Permeabilidade dos solos.....	13
2.11.Coefficiente de permeabilidade dos solos.....	13
2.12.Vazão.....	14
2.13.Vazões aceitáveis pela fundação de uma barragem de terra.....	14
2.14.Métodos de determinação da vazão que percola pela fundação de uma barragem.....	14
2.14.1.Sem dispositivo de controlo de percolação.....	14
2.14.2.Com dispositivo de controlo de percolação (poços de alívio).....	15
2.15.Método de determinação da eficiência do método de poços de alívio.....	16
3.METODOLOGIA.....	17
3.1.Descrição da área do estudo.....	17
3.2.Determinação da vazão da percolação na fundação.....	18
3.3.Comparação das vazões máximas de água que saem dos poços de alívio registadas em diferentes níveis de albufeira.....	22
3.4.Determinação da eficiência (E) do método de poços de alívio no controlo da vazão de percolação na fundação do DD.....	22

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1.Vazão que percola pela fundação	23
4.2.Comparação das vazões máximas dos poços de alívio registadas em diferentes níveis de albufeira.	25
4.3.Eficiencia do método de poços de alívio na redução da vazão.	28
5.CONCLUSÃO.....	29
6.RECOMENDAÇÕES.....	30
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
8.ANEXOS	32

Índice de Tabelas:

Tabela 1: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade	13
Tabela 2: Valores aceitáveis de vazão na fundação de uma barragem.....	14
Tabela 3: Piezómetros que definem a secção I do DD	34
Tabela 4: Piezómetros que define a secção II do DD	34
Tabela 5 Piezómetros que definem a secção III do DD	34
Tabela 6 Piezómetros que definem a secção IV do DD	34
Tabela 7: Piezómetros que definem a secção V do DD	34
Tabela 8: Piezómetros que definem a secção VI do DD	35
Tabela 9: Poços de alívio da secção I.....	35
Tabela 10: Poços de alívio da secção II.....	35
Tabela 11: Poços de alívio da secção III	35
Tabela 12: Poços de alívio da secção IV	36
Tabela 13: carga hidráulica na secção I.....	36
Tabela 14: carga hidráulica na secção II	36
Tabela 15: carga hidráulica na secção III	36
Tabela 16 carga hidráulica na secção IV	37
Tabela 17: Vazão de percolação na fundação do DD sem poços de alívio	39
Tabela 18: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção I.....	39
Tabela 19: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção II	39
Tabela 20: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção III.....	39
Tabela 21: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção IV.....	39
Tabela 22: Vazões máximas dos poços de alívio da secção I	39
Tabela 23: Vazões máximas dos poços de alívio da secção II	40
Tabela 24: Vazões máximas dos poços de alívio da secção III.....	40
Tabela 25: Vazões máximas dos poços de alívio da secção IV.....	40

Índice de Figuras

Figura 1: Perfil B (DD) - esquema de reabilitação.....	4
Figura 2: Barragem de terra homogenia	7
Figura 3: Barragem de terra zonada	7
Figura 4: Barragem com cut-off	11
Figura 5: Barragem com poços de alívio.....	11
Figura 6: Piezómetro de tubo aberto	13

Figura 7: Secção IV do DD	18
Figura 8: DD sem poços de alívio	19
Figura 9: DD com poços de alívio.....	21
Figura 10: Perfis transversais - tipos de aterros da barragem de Massingir.....	32
Figura 11: Órgãos hidráulicos da barragem de Massingir.....	32
Figura 12: planta da barragem de Massingir	32
Figura 13: Secção transversal do DD	33
Figura 14: Medição da vazão dos poços de alívio.....	33
Figura 15: Anomalias causadas pela vazão de percolação: aparecimento da água no paramento montante da vala de drenagem no pé da jusante do DD (A), poço com fuga de água e ma drenagem de água (B), aparecimento de água que sai do piezómetro (C).	33
Figura 16: Verificação da carga hidráulica.....	33
Figura 17: Representação esquemática da carga hidráulica na secção I do DD.....	37
Figura 18: Representação esquemática da carga hidráulica na secção II do DD	38
Figura 19: Representação esquemática da carga hidráulica na secção III do DD.....	38
Figura 20: Representação esquemática da carga hidráulica na secção IV do DD.....	39

Índice de Equações:

Equação 1	14
Equação 2.....	15
Equação 3.....	15
Equação 4.....	16
Equação 5	19
Equação 6	20

Lista de Abreviaturas

ΔH - diferença de carga hidráulica

B- largura da base

CBDB- Comitê Brasileira de Barragens

CIABM- Comissão do Inquérito ao Acidente da Barragem de Massingir

D- espessura

DD- Dique Direito

E -eficácia do sistema;

K- permeabilidade

MAE- Ministério de Administração Estatal

NAA- Nível de água na albufeira

PNL- Parque Nacional do Limpopo

Q_f - vazão percolada pela fundação

Q-vazão

R- metade da distância

r- raio

t –tempo

V-volume



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.

Chokwe, _____ de _____ de _____

(Pedro Eugénio Macuvele)

DEDICATÓRIA

Dedico a este trabalho a minha querida avô materna, por ter sido a alicerce da minha dedicação, e pela Mãe maravilhosa e especial que me deu.

Resumo

Barragens são obras muito importantes e fundamentais no contexto de uma exploração hídrica sustentável, sendo as barragens de terra as mais usadas, porém, são as mais susceptíveis ao colapso devido a sua vulnerabilidade de sofrer problemas de erosão interna quando a percolação na fundação da barragem não é controlada. A barragem de Massingir dispõe de um método composto por estruturas denominados poços de alívio para controlar a percolação na fundação do seu DD, sendo que, uma parte destas estruturas encontram-se num estado problemático quanto a sua funcionalidade. O objectivo deste trabalho é de avaliar o desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir. O método de poços de alívio foi avaliado tendo em conta a vazão que percola pela fundação sem e com o funcionamento do método, aplicando-se duas equações distintas, olhando-se para diferentes secções da barragem. Os resultados mostraram que o método de poços de alívio reduziu a vazão da percolação dos 57,5 l/min/m que registava-se sem o método à uma vazão de 8,5 l/min/m para as secções I e II; 9,7 l/min/m para a secção III e 13,1 l/min/m para a secção IV do DD já com o funcionamento do método, porém, esta redução não foi eficiente pois não atingiu os padrões da vazão da percolação aceitável na fundação de uma barragem, tendo atingido apenas os padrões médios ($5 \leq Q_f \leq 14$ l/min/m), o que segundo Cruz e Silveira (citado por Oliviera, 2008) também não é admissível. Contudo, o método serve como medida preventiva ao colapso do DD, e o aumento do número de poços de alívio é crucial na garantia da longevidade do empreendimento.

Palavras- Chaves: Barragens, Eficácia, Fundações Permeáveis, Percolação, Poços de alívio.

Abstract

Dams are very important and fundamental works in the context of sustainable water exploitation. Dams are the most commonly used, but they are the most susceptible to collapse due to their vulnerability to internal erosion problems when percolation in the dam foundation is not controlled. The Massingir Dam has a method composed of structures called relief wells to control the percolation in the foundation of its DD, and some of these structures are in a problematic state as to their functionality. The objective of this work is to evaluate the performance of the percolation control method adapted in the foundation of the right dike of the main valley in the Massingir dam. The relief wells method was evaluated taking into account the flow rate that percolates through the foundation without and with the operation method, applying two distinct equations, looking at different sections of the dam. The results showed that the relief well method reduced the percolation flow rate of 57 l/min/m that was recorded without the method at a flow rate of 8,5 l/min/m for section I and II; 9,7 l/min/m for section III and 13,1 l/min/m for section IV of DD as the method worked, but this reduction was not efficient as it did not reach percolation flow standards acceptable at the foundation of a dam, having reached only the average standards ($5 \leq Q_f \leq 14$ l/min/m), which according to Cruz and Silveira (cited by Oliveira, 2008) is also not admissible. However, the method serves as a preventive measure for the collapse of DD, and increasing the number of relief wells is crucial in ensuring the longevity of the project's useful life.

Keywords: Dams, Effectiveness, Permeable Foundations, Percolation, Relief Wells.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

1.INTRODUÇÃO

Segundo Sousa, (2013), a conscientização em relação a limitação dos recursos hídricos, aliada a crescente demanda dos mesmos, tem levado a sociedade a uma exploração mais sustentável. Os estudos desenvolvidos para a implantação de barragens, avaliando os possíveis aproveitamentos da água das bacias hidrográficas, é uma ferramenta fundamental neste contexto.

De acordo com Sousa, (2013), barragens são estruturas construídas transversalmente em um rio com a finalidade de se obter a elevação do seu nível de água e é composta por: corpo da barragem, bacia de represa, terrenos de fundação, estruturas anexas (vertedouros, tomada de água, galerias, túneis, casa de força, descarga de fundo), instrumentos de auscultação (piezómetros, medidores de recalque, células de tensão total, etc.) e instalações de comunicação e manutenção.

Este tipo de obra pode ser construído em diferentes tipos de materiais, tais como: concreto, enrocamento e terra dependendo das condições geológicas do local, envolvendo variadas áreas da engenharia (CBDB, 2011).

Segundo Caldeira (Citado por Figueiredo 2017), as barragens de aterro podem ser construídas sobre fundações brandas, compressíveis ou permeáveis devido à sua possibilidade de adaptação a grandes deformações sem ruptura. Praticamente metade dos acidentes em barragens de aterro em operação (48,7%) ficam a dever-se a problemas de percolação excessiva ou erosão tubular (piping) no aterro ou fundação. No decorrer dessa situação é necessária a implementação de dispositivos que controlem a percolação. Na barragem de Massingir, o problema de segurança está em grande parte relacionado com situações de erosão na fundação de formações aluvionares, com arraste de finos, devido a altas vazões de percolação, que se traduzem ainda em gradientes de saída elevados, assim como em pressões elevadas a jusante.

Segundo Sandroni (2012), as barragens de terra são as que mais contemplam estudos geotécnicos devido a sua fraca rigidez e susceptibilidade a acidentes de natureza geotécnica causados pela percolação de água no corpo e na fundação da barragem. O estudo de controlo

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

de percolação se dá em três aspectos, que são: percolação em aterros, percolação pelas fundações e percolação em interfaces.

O foco deste trabalho será baseado na avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação pela fundação do dique direito (DD) do vale principal na barragem de Massingir, que é realizado através do método de poços de alívio.

1.1.Problema e justificação

Os poços de alívio controlam a vazão da percolação que regista-se na fundação do DD aliviando as subpressões impostas pela carga hidráulica da albufeira. Este método tem contribuído desta forma por muitos anos desde 2006 na garantia da estabilidade do dique direito, porém, nos tempos presentes, observa-se em alguns pontos no pé do talude da jusante do DD anomalias que ilustram uma vazão excessiva no interior do DD e alguns poços no estado de deterioração. Portanto, gera-se uma dúvida em relação ao desempenho destas estruturas no controlo da vazão de percolação. Contudo, não há registos disponíveis de estudo sobre a contribuição que estas estruturas apresentam.

1.2.Objectivos

1.2.1.Geral:

- Avaliar o desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

1.2.2.Específicos:

- Determinar a vazão de água que percola na fundação do DD;
- Comparar as vazões máximas de água que saem dos poços de alívio registadas em diferentes níveis de albufeira;
- Determinar a eficiência do método de poços de alívio no controlo da vazão de percolação na fundação do DD.

1.3.Hipótese de estudo

O método de poços de alívio apresenta um bom desempenho no controlo da percolação na fundação do DD da barragem de Massingir.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.Caracterização do distrito de Massingir

De acordo com MAE (2014), o distrito de Massingir localiza-se na região sul de Moçambique, concretamente a Noroeste da Província de Gaza, sendo limitado a Norte pelo distrito de Chicualacuala, a Sul pelo distrito de Magude (da província de Maputo), a Este pelos distritos de Mabalane e Chókwé e a Oeste pela República da África do Sul, com cerca de 5 698 km² de superfície.

2.2.Caracterização climática e hidrográfica do distrito

De acordo com MAE (2014), no distrito predomina o clima do tipo semiárido seco, registando-se temperaturas médias anuais de 30° C e precipitação de 600 mm.

É atravessado por Rio dos Elefantes e Mazimulhope (de caudal permanente) e Chingedzi, Machapane, Benhuca, Zambalala, Chivambalane, Nhamvotso, Nhapombe e Inhatcozoane (de caudal temporário). Existem, ainda, 10 lagoas, nomeadamente, Chileusse, Vele, Dzendzenfu, Inhaphessane, Malopane, Furene, Pumbe, Nhavalungo, Nhatindzau e Namagungo.

2.3.Historial da Barragem de Massingir

A barragem de Massingir é uma obra hidráulica localizada no distrito de Massingir, construída sobre o rio dos Elefantes, principal afluente do rio Limpopo, com o objectivo principal de permitir a expansão da área de rega do regadio de Chókwé e de Baixo Limpopo, atendendo à quase nula capacidade de regularização de escoamentos da barragem de Macarretane, e para regularização de grandes cheias. O seu projecto inicial era de uma barragem com altura, comprimento e capacidade de armazenamento inferiores que a actual barragem apresenta, a sua grande extensão foi condicionada pela grave seca que registou-se na bacia do Limpopo já numa fase avançada do seu projecto, na década de 1960, situação esta que levou o projectista a considerar uma barragem com muita maior capacidade de armazenamento, e como consequência disto foi construído um longo dique na margem direita do vale principal (CIABM, 2008).

Segundo CIABM (2008), o seu primeiro enchimento teve início em 31 de Outubro de 1977. Como as comportas ainda não tinham sido instaladas, o NPA, em vez de 125 m, ficou

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

limitado a 115 m, nível que corresponde à cota da soleira do descarregador de cheias. Deste modo a capacidade da albufeira ficou reduzida a menos de 50%. Apesar disso, durante o primeiro enchimento ocorreram logo 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”. Algumas situações anómalas reveladoras da possibilidade de erosão interna na fundação foram: pequenas ressurgências na zona do vale principal e grandes ressurgências com arrastamento de finos no pé do talude de jusante e surgimento da superfície de percolação na face jusante do DD. Fazendo um paralelo com esta situação é de fácil entendimento a ocorrência da vazão de percolação excessiva por baixo do aterro, Plünnecke (citado por Figueiredo 2017).

Segundo Plünnecke (citado por Figueiredo 2017), para mitigar o problema acima referido, foram feitos alguns estudos para averiguar as possíveis causas, sendo possível que, em resultado de alterações na cota do NPA que ocorreram já na fase de projecto, os estudos requeridos para a zona da margem direita não tenham sido efectuados com o necessário detalhe. Da análise dos problemas até então ocorridos e das suas causas, foi decidido efectuar-se actividades de reabilitação profunda que decorreram de Abril de 2004 a Dezembro de 2006, tais como; Construção de 77 poços de alívio espaçados de 25 m e uma Vala de drenagem ao longo do pé da jusante do DD, Construção de uma banquetta estabilizadora no talude da jusante do DD, Cortina de injeções de cimento em diversos troços da fundação, Construção de um parapeito de betão sobre o coroamento, do lado montante, para aumentar a segurança em relação às cheias extremas e Alteamento de 1m da crista, conforme ilustra a figura 1.

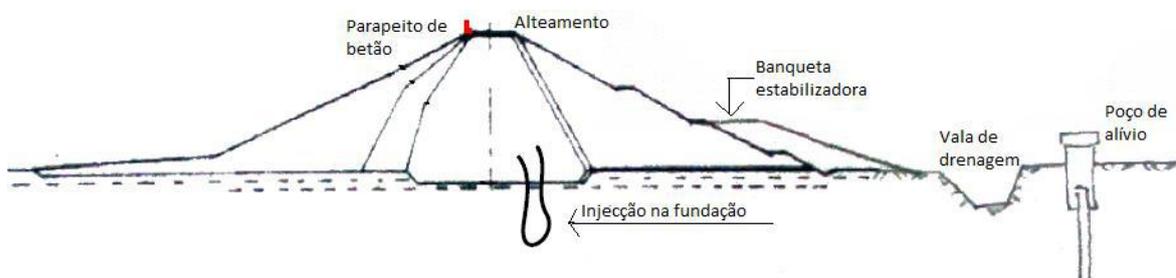


Figura 1: Perfil B (DD) - esquema de reabilitação

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

2.4. Tipos de Barragens

Como já foi referenciado no primeiro deste trabalho, barragens podem ser classificadas em diferentes tipos, de acordo com o tipo de material empregado na sua construção, a referir, concreto, terra e enrocamento.

2.4.1. Barragem de concreto

As barragens de concreto subdividem-se em três grupos, sendo:

- **Gravidade**

Segundo Sousa, (2013), as barragens de concreto gravidade podem ser maciças ou vazadas, para resistir ao empuxo horizontal de água. Os materiais mais comumente utilizados neste tipo de barragem são: concreta massa (concreto convencional), ciclópico ou CCR (concreto compactado a rolo: concreto com consistência e trabalhabilidade tal que permite sua compactação através de rolos compactadores).

Os cálculos de dimensionamento desse tipo de barragem devem contemplar análise de segurança quanto à flutuação, deslizamento, tombamento e tensões na fundação. Como as barragens de concreto não podem sofrer muitas deformações, estas são indicadas para locais cujo terreno de fundação é composto de rocha com elevada rigidez. É comum também o uso de poços drenantes nas fundações dessas barragens para reduzir a subpressão na base.

- **Com contrafortes**

Segundo Sayão, (citado por Sousa, 2013), neste caso, a barragem é formada por uma laje impermeável a montante, apoiada em contrafortes verticais, exercendo compressão na fundação maior do que na barragem de concreto gravidade. Sendo assim, a fundação onde será apoiada uma barragem de concreto com contrafortes deve ser rocha com elevada rigidez se comparada com as barragens de gravidade, as principais vantagens são: menor volume e menor subpressão na base. No entanto, as barragens com contrafortes exigem um projecto estrutural mais complexo e o uso de um número maior de formas na execução dos contrafortes.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

- **Em arco**

Segundo Sayão, (citado por Sousa, 2013), esta estrutura possui um pequeno volume e o empuxo da água é transmitido em arqueamento horizontal para as ombreiras. As pressões exercidas na fundação são elevadas, e portanto, requer ombreiras e fundação, ambas, em rocha sã com alta resistência e rigidez, maior que nos outros tipos de barragem. E o concreto armado utilizado na estrutura deve ser de alta resistência.

As barragens em arco são indicadas para regiões com vales estreitos e profundos, onde a barragem ficará “encaixada”.

2.4.2. Barragens de enrocamento

De acordo com Sousa, (2013), é formada por um núcleo argiloso, que proporciona a função de vedação à barragem, e enrocamento, que são fragmentos de rocha ou cascalho que garantem a resistência necessária à estrutura. Este tipo de barragem permite a construção de taludes mais íngremes e a fundação deve ser mais estanque que a fundação das barragens de terra, pois nestas o caminho de percolação é maior.

2.4.3. Barragem de terra

De acordo com Mendonça (citado por Sousa, 2013), este tipo de barragem deve ser feita em vales muito largos e ombreiras suaves, necessitando de grandes extensões de crista, ao mesmo tempo em que se dispõe abundantemente de solo. Por não ser uma estrutura rígida estas barragens permitem ser assentes em fundações mais deformáveis, transmitindo esforços baixos para as fundações se comparadas com as barragens citadas anteriormente. Elas são indicadas para fundação de qualquer tipo de solo ou rocha.

De acordo com Mendonça (citado por Sousa, 2013), para a construção desse tipo de barragem há a necessidade de grande quantidade de material para a elaboração do núcleo (material argiloso), espaldares, filtros e drenos. Sendo assim, precisa-se analisar a disponibilidade de materiais adequados nas proximidades do local de instalação da barragem. Sendo que subdividem-se em dois grupos:

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

- **Homogéneas**

Composto de uma única espécie de material, excluindo-se a protecção dos taludes. Sendo que, o material necessita ser suficientemente impermeável, para formar uma barreira adequada contra a água, e os taludes precisam ser relativamente suaves, para uma estabilidade adequada.

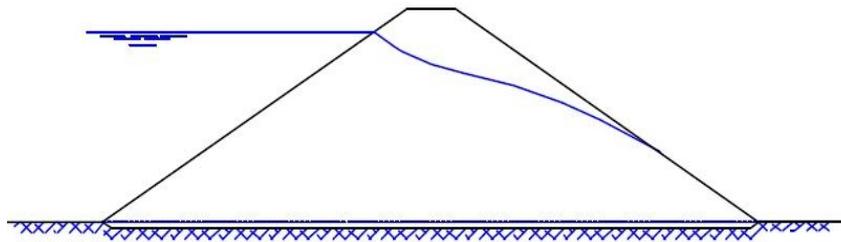


Figura 2: Barragem de terra homogenia

- **Zonada**

Esse tipo é representado por um núcleo central impermeável, envolvido por zonas de materiais consideravelmente mais permeáveis. Essas zonas suportam e protegem o núcleo, e consistem de areias, cascalho ou fragmentos de rochas, ou uma mistura desses materiais.

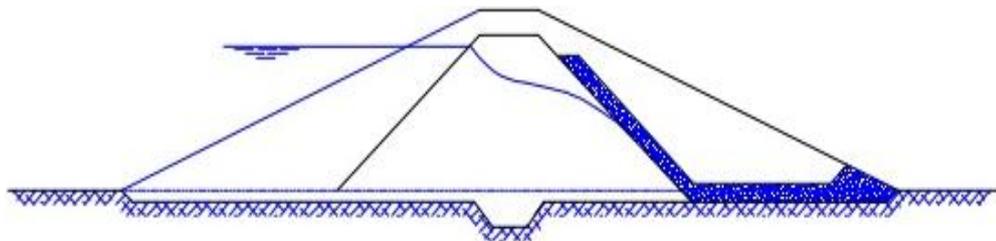


Figura 3: Barragem de terra zonada

2.5. Taludes

Os taludes garantem a estabilidade de uma barragem de terra. A lateral que ficará em contacto com a água represada é chamada de talude de montante, e a outra lateral, que é a frente da barragem, é chamada de talude de jusante. Os taludes de uma barragem de terra deverão ser inclinados, basicamente, por duas razões. A primeira se deve ao fato de que a água represada exercerá esforços sobre o talude de montante da barragem, sendo estes menores na altura da

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

lâmina d'água e próximos da sua base (fundo da represa). "Por essa razão, as barragens devem ser construídas mais largas na parte de baixo e mais estreita na parte superior". (LOPES, 2017)

2.5.1. Força da água sobre os taludes

O esforço resultante que a água exerce sobre o talude de montante é obtido pela soma vectorial de duas forças, uma no sentido horizontal e outra no vertical. A força exercida no sentido vertical, contribui para uma maior estabilidade da barragem, pois este esforço favorece a compactação do solo utilizado na construção do corpo da barragem. Por outro lado, a força exercida pela água no sentido horizontal do maciço de terra poderá, ao longo do tempo, provocar o arrombamento da barragem. Portanto, a situação ideal é aquela em que a força exercida pela água no sentido horizontal do corpo da barragem seja a menor possível e a força no sentido vertical seja a maior possível. Para que essa condição aconteça, será necessário que o talude de montante tenha uma inclinação menor que a do talude de jusante, (LOPES, 2017)

Além disso, após o represamento da água, mesmo utilizando-se solo de boa qualidade na construção da barragem, sempre ocorrerá um pequeno e contínuo fluxo de água que se formará através da barragem. Este fluxo causará, a partir da sua base, o humedecimento de uma parte do maciço de terra. A altura máxima do humedecimento que se formará no interior da barragem determinará uma linha chamada linha de saturação. Linha de saturação é, portanto, a linha abaixo da qual o maciço de terra estará sempre humedecido. Ela é determinada pela altura máxima do humedecimento que se formará no maciço de terra da barragem, (LOPES, 2017)

Se a base da barragem for estreita e, ou se a compactação não tiver sido feita correctamente, a linha de saturação poderá cair fora da barragem, provocando, pouco a pouco, pequenos desmoronamentos, a partir da base do talude de jusante, que comprometerão a estabilidade da barragem. Por outro lado, se a base for larga o suficiente e, tendo sido a compactação do solo bem-feita, a linha de saturação cairá dentro do corpo da barragem, eliminando assim os riscos de desmoronamentos. Portanto, esta será mais uma razão para que o talude de montante tenha menor inclinação em relação ao de jusante, (LOPES, 2017)

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Em geral, nas barragens bem construídas, ou seja, aquelas em que se utilizou solo adequado (mais argiloso e com pouca percentagem de areia) a declividade média da linha de saturação será em torno de 4:1. Isso quer dizer que, a partir do ponto onde a lâmina d'água toca na barragem, a cada quatro metros, medidos na horizontal, a linha de saturação descerá um metro dentro do maciço de terra, (LOPES, 2017)

Mesmo tomando-se as devidas providências, se depois de um certo tempo que a barragem estiver construída, for observado que a linha de saturação está caindo fora da mesma, e estiver surgindo desmoronamentos na base do talude de jusante é possível corrigir este problema. Para isso, será necessário fazer uma raspagem na base jusante da barragem até aproximadamente 25% da sua altura e, no local onde a terra foi retirada, será necessário colocar camadas de pedra. A substituição de parte do aterro por pedras, que formará uma camada de material inerte e poroso, garantirá a estabilidade da barragem, evitando a continuidade dos desmoronamentos, (LOPES, 2017).

2.6. Acção da subpressão no macio de uma barragem

Segundo Oliveira (2008), subpressão pode ser entendida como o esforço ascendente, exercido na base de obras hidráulicas, provocada pela água que percola através do seu maciço de fundação. Ela atua no alívio do peso da estrutura, de forma a reduzir a sua resistência ao deslizamento e levar a estrutura a uma condição menos segura.

De acordo com Sherard (citado por Oliveira 2008), a subpressão pode causar dois tipos de ameaça para a segurança de uma barragem: a pressão da água ao longo da fundação pode se aproximar ou igualar ao peso do maciço da barragem comprometendo a estabilidade contra o deslizamento e, situação extrema, poderia, teoricamente, levantar camadas superiores da fundação, e a vazão de percolação pode causar uma ruptura da barragem por piping.

2.7. Percolação em barragens de terra

De acordo com Castro (citado por Almeida, 2008), entende-se por percolação o movimento descendente da água dentro do solo, como resultado da pressão hidráulica que actua nas partes externas desse referido solo.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Segundo Sandroni, (citado por Sousa, 2013), a percolação de certa quantidade de água na fundação, assim como no aterro de uma barragem de terra é inevitável e, até certo ponto, aceitável, sendo assim, deve-se criar condições para garantir que esta mesma percolação não coloque em risco a segurança da barragem. Este fenómeno se não controlado pode originar diversas anomalias no empreendimento, tais como: efeito piping (carregamento de partículas sólidas ou material em solução), gradientes elevados, vazões excessivas e poro pressões, culminando em uma “erosão interna” na barragem.

2.8. Controlo de percolação em barragens de terra

O controlo de percolação na fundação e no corpo de uma barragem de terra é feito através de um sistema de drenagem interna adequada, que consiste na utilização de drenos verticais ou inclinados, e horizontais. Os drenos verticais (ou inclinados) interceptam o fluxo que passa dentro do corpo da barragem, enquanto os horizontais interceptam o fluxo da fundação e encaminham o fluxo do corpo da barragem até o pé do talude de jusante, (MASSAD, 2003).

Segundo Cruz (2004), a maioria dos casos de ocorrência de piping se deu nas fundações das barragens. Sendo assim, o controle de percolação pela fundação é de extrema importância em um projecto de barragem e é realizado através de obras de tratamento das fundações. Além de evitar o piping, esse tratamento contribuí para redução da vazão pela fundação, a redução das poropressões e a redução dos gradientes de saída. O procedimento de tratamento adoptado varia de acordo com as características do terreno de fundação. Os tratamentos constituem-se, basicamente, em métodos para reduzir a permeabilidade das fundações e/ou aumentar o caminho de percolação. Pode-se dividir os tipos de tratamento de fundação em dois grandes grupos: tratamento para fundação em solo e tratamento para fundação em rocha. Para as fundações em solo temos os seguintes tratamentos mais utilizados:

2.8.1. Trincheira de vedação ou “cut-off”

Consiste na escavação de uma parte do terreno de fundação e a sua substituição por um material muito menos permeável (geralmente material argiloso), visando aumentar o caminho de percolação do fluxo na fundação e conseqüentemente diminuindo a vazão pela fundação e o gradiente de saída.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

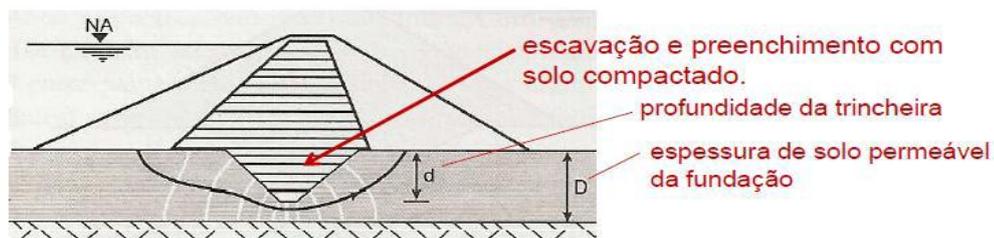


Figura 4: Barragem com cut-off (MASSAD, 2003)

2.8.2. Poços de alívio

Segundo Cruz (citado por Oliveira), poços de alívio são dispositivos com o objectivo de drenar as águas que fluem através do maciço da fundação de uma barragem e aliviar as subpressões impostas pela carga hidráulica da albufeira. A vantagem dos poços de alívio é a facilidade com o qual eles podem ser adicionados se o projecto inicial for insuficiente para o controlo do fluxo, e estes, só serão eficazes se a permeabilidade do material de preenchimento for, pelo menos, dez vezes maior que a permeabilidade do material da fundação.

De acordo com Cedergren (citado por Sousa, 2013), o diâmetro dos poços deve variar de 20 a 50 cm, espaçados entre 2 a 3 m com uma penetração total ou parcial na camada permeável da fundação. A vantagem destes dispositivos é a facilidade com a qual eles podem ser adicionados se o projecto inicial for insuficiente para controlar o fluxo. Segundo Cruz (1996), os poços de alívio só serão eficazes se a permeabilidade do material de preenchimento for, pelo menos, dez vezes maior do que a permeabilidade do material da fundação.

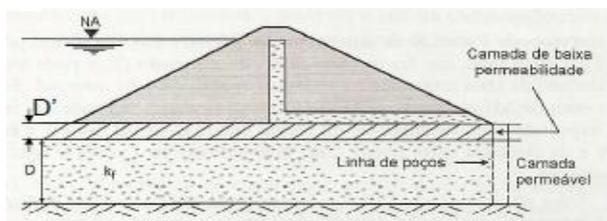


Figura 5: Barragem com poços de alívio, (MASSAD, 2003)

2.9. Instrumentação em Barragens

Segundo Saré (2003) citado por Oliveira (2008), os principais objectivos da instrumentação de barragens são: verificação das hipóteses e parâmetros adoptados em projectos; verificação da adequação dos métodos construtivos; e verificação das condições de segurança. A

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

instrumentação pode, ainda, viabilizar o aprimoramento de determinado projecto, visando obter condições mais económicas e seguras.

As grandezas medidas por instrumentos em barragens são basicamente: nível de água, subpressão, deslocamentos, tensão total, vazão e sismos. Os sistemas de aquisição de dados podem ser: mecânicos, hidráulicos, pneumáticos, (OLIVEIRA, 2008)

2.9.1. Piezómetros

Os piezómetros têm como finalidade a medição de subpressões e podem ser instalados em diversas posições na barragem (maciço, sistema de drenagem e fundação). A variação dos registos piezómetros pode ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições: aumento da vazão de percolação; elevação do nível de água de montante ou jusante; aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezómetro; redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezómetro. (OLIVEIRA, 2008)

Existem diversos tipos de piezómetros com características diferentes, sendo que neste trabalho será abordado apenas um tipo, o mais usado na barragem de Massingir.

- **Piezómetro de tubo aberto**

Segundo Cruz (citado por Oliveira 2008), é o mais simples e o mais utilizado de todos os piezómetros, provavelmente devido a facilidade de execução, baixo custo e bons resultados. O equipamento consiste basicamente em um tubo, geralmente de PVC, instalado no interior de um furo de sondagem ou poço. Na zona do bolbo, o tubo é perfurado e envolto por um material filtrante e outro drenante. No restante do tubo, no espaço entre o furo e o tubo, é executado um selo com material de baixa permeabilidade para evitar a contribuição de águas superficiais. Tem como vantagem a confiabilidade, durabilidade, sensibilidade e possibilidade de verificação do seu funcionamento através de ensaio de recuperação do nível de água, e sendo uma das desvantagens o de tempo de resposta, isto é, dependendo do tipo de solo, o tempo de resposta pode variar de alguns minutos até semanas. Para barragens de terra, um

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

tempo de resposta de até uma semana não apresenta maior consequência de ordem pratica.

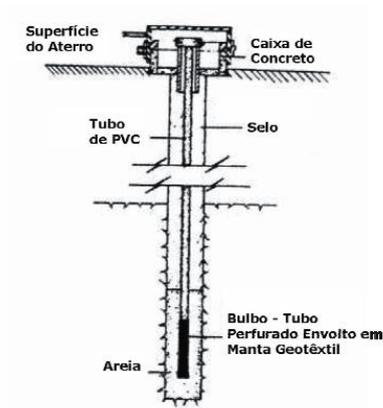


Figura 6: Piezômetro de tubo aberto, (OLIVEIRA, 2008)

2.10. Permeabilidade dos solos

Segundo Tonin (2013), permeabilidade é a propriedade que o solo tem de permitir o escoamento de água através dele, influenciado pelos seguintes factores: granulometria, índice de vazios, composição mineral, estrutura, fluido, macro-estrutura e temperatura. O seu estudo é bastante relevante em projectos de barragens, pois possibilita a estimativa da vazão que percolará através do maciço na fundação desse tipo de obras. Pode ser determinada através de ensaios laboratoriais ou ensaios “*insitu*”.

2.11. Coeficiente de permeabilidade dos solos

De acordo com Tonin (2013), os valores de coeficiente de permeabilidade deferem em função dos tipos de solo. E são ilustrados na tabela 1.

Tabela 1: Valores típicos de coeficiente de permeabilidade

Permeabilidade		Tipo de solo	K (cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$>10^{-3}$
	Alta	Areia	10^{-3} a 10^{-5}
	Baixa	Silte e argila	10^{-5} a 10^{-7}
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argila	10^{-7} a 10^{-9}
	Baixíssima	Argila	$<10^{-9}$

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

2.12. Vazão

De acordo com Carvalho (2008), entende-se a vazão ou caudal como sendo o volume de água que passa numa determinada secção transversal, por unidade de tempo, e é expressa comumente no sistema internacional (SI) de medidas em m³/s.

Cálculo da vazão com base no volume e tempo, é dado pela Equação 1.

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

Q= vazão (m³/s)

V = volume (m³)

t = tempo (s)

2.13. Vazões aceitáveis pela fundação de uma barragem de terra

De acordo com Sandroni (2012), baseado em um estudo associando as vazões de barragens e o desempenho das mesmas, pode-se aceitar um certo padrão de valores de vazão, quando esta for uniforme ao longo da fundação da barragem, referidos na tabela 2:

Tabela 2: Valores aceitáveis de vazão na fundação de uma barragem (SANDRONI, 2012)

Vazão (l/min/m)	Classificação
Menor que 5	Vazão pequena (aceitável)
De 5 a 14	Vazão média
Maior que 14	Vazão alta (excessiva)

2.14. Métodos de determinação da vazão que percola pela fundação de uma barragem

2.14.1. Sem dispositivo de controlo de percolação

Para Ambraseys (citado por Oliveira, 2008), a vazão que percola pela fundação de uma barragem, sem dispositivos de controlo, é determinada pela Equação 2

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

$$Q_o = \left(\frac{\frac{\Delta H_o * k_o}{0,88 + B}}{D} \right) \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

Q_o = vazão inicial, sem dispositivos de controlo ($m^3/s/m$);

ΔH_o = diferença de carga hidráulica inicial ao longo da camada de baixa permeabilidade., sem dispositivos de controlo (m);

K_o =permeabilidade da camada de baixa permeabilidade (m/s);

B = largura da base do maciço da barragem (m);

D = espessura do extracto permeável (m).

2.14.2.Com dispositivo de controlo de percolação (poços de alívio).

Segundo Cedergren (citado por Sousa, 2013), a vazão que percolará pela fundação com poços de alívio é dada pela Equação 3:

$$Q_f = \left(\frac{\pi * k * D * \Delta H}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \right) \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde:

Q_f : vazão pela fundação na largura $2R$, sendo $2R$ o espaçamento entre os poços de alívio ($m^3/s/m$).

k : permeabilidade da camada de baixa permeabilidade (m/s)

D : espessura da camada permeável (m)

R : metade da distância do espaçamento entre os poços (m)

r : raio dos poços de alívio (m)

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

ΔH : diferença de carga hidráulica ao longo da camada de baixa permeabilidade (m).

Nas duas equações acima considera-se que o coeficiente de permeabilidade do extracto da fundação é constante em todas as direcções, ou seja, o maciço da fundação é isotrópico com relação a permeabilidade.

2.15. Método de determinação da eficiência do método de poços de alívio

Segundo Sousa, (2013) para conhecer a eficácia do método de poços de alívio no controlo da percolação pela fundação, é preciso determinar a vazão que percola pela fundação usando parâmetros da barragem sem e com estes dispositivos instalados. Para tanto é empregue a seguinte equação 4:

$$E = 1 - \frac{Q_f}{Q_o} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

E = eficácia do sistema;

Q = vazão percolada pela fundação de uma secção transversal com dispositivo de controlo ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);

Q_o = vazão percolada pela fundação sem dispositivo de controlo ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$).

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

3.METODOLOGIA

3.1.Descrição da área do estudo

A barragem de Massingir está dividida em três perfis, nomeadamente, Perfil A- (vale principal), Perfil B- (margem direita), Perfil C (margem esquerda), conforme ilustra a figura 10 nos anexos. O coroamento foi fixado à cota 130 m, tendo sido adoptada uma folga de 5 m, com uma altura máxima de 46 m com largura da crista de 12 m.

Os dois descarregadores de cheias (principal e auxiliar) situam-se na margem esquerda da barragem, o principal tem a crista da soleira à cota 115 m e o topo das comportas à cota 125 m e o auxiliar com crista da soleira a cota 120 m. O desvio provisório do rio para a construção da barragem foi feito na margem direita do vale principal, conforme ilustra a figura 11 nos anexos.

O DD corresponde uma parcela de 3 km dos aproximadamente 5 km do comprimento total da barragem, e divide-se em 6 secções designados PK, tais como: secção I (PK 0+450), secção II (PK 0+800), secção III (PK 1+300), secção IV (2+000), secção V (PK 3+050), secção VI (PK 3+300). Ao longo do seu pé do talude de jusante estão instalados dispositivos de controlo de percolação pela fundação (poços de alívios) espaçados a 25 m, com diâmetro de 0,25 m, e profundidade variando entre 16 a 24 m, intercalados com piezómetros de tubo aberto, e a posterior destes encontra-se a vala de drenagem, conforme ilustra a figura 12 no anexos.

O método de poços de alívio intercepta o fluxo de água que percola pela fundação, proveniente da água da albufeira que infiltra através dos pontos mais sensíveis do DD, e descarrega na vala de drenagem, reduzindo o fluxo de água na fundação do DD. O DD é dotado de duas banquetas as cotas 109 e 116 no talude de jusante, e foram instaladas nestas banquetas piezómetros de tubo aberto, conforme mostra a figura 13.

Os piezómetros de tubo aberto instalados nas duas banquetas definem as 6 secções do DD, e encontram-se perfilados em três transversalmente ao DD em cada secção. A figura 7 ilustra a secção IV do DD, onde observa-se com mais detalhes na imagem A, com a representação esquemática do perfil transversal do talude da jusante do DD com os seus respectivos piezómetros instalados nas duas banquetas, e pode-se observar que o piezómetro mais a

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

montante (PP11) encontra-se no aterro, à cota 116 m, piezómetro PP12 na fundação e o piezómetro PP10B no aterro, ambos à cota 109 m. Todos os piezómetros estão instalados a jusante do núcleo.

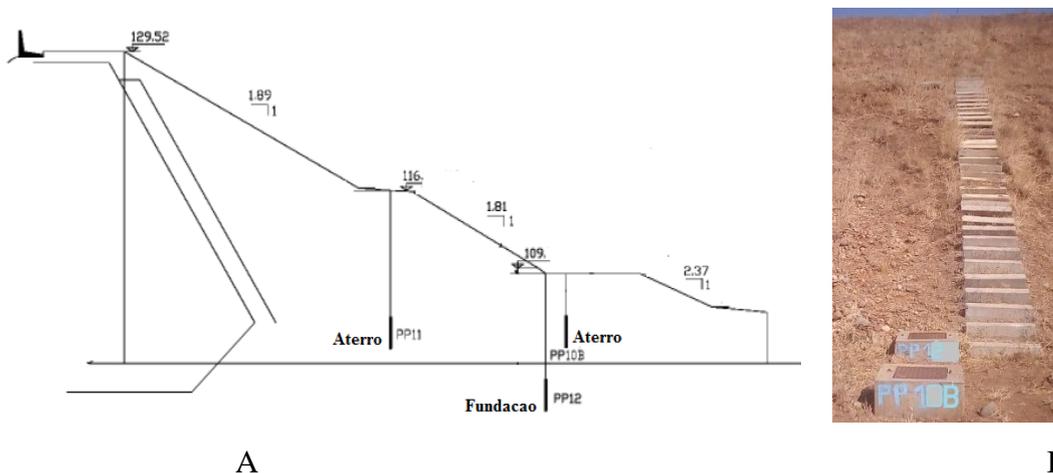


Figura 7: Secção IV do DD

3.2. Determinação da vazão da percolação na fundação

A determinação da vazão da percolação na fundação do DD, foi possível através das equações 2 e 3, descritas acima neste trabalho, propostas por Ambraseys e Cedergren respectivamente, que deram a possibilidade de conhecer a vazão que percola pela fundação do DD sem e com dispositivo de controlo de percolação.

Sem dispositivos de controlo de percolação

Nesta situação do DD foi aplicada a equação 2 de Ambraseys. Primeiramente foi esquematizada a secção transversal do DD sem poços de alívio, onde ilustra-se o fenómeno de ressurgência no talude da jusante originado pela elevação da linha de saturação, e a posição de cada parâmetro da equação. No ponto a, encontra-se a diferença de carga hidráulica inicial ao longo da camada de baixa permeabilidade (ΔH_0), ponto b, permeabilidade da camada de baixa permeabilidade (k_0), ponto c, largura da base do maciço da barragem (B) e ponto d, espessura da camada permeável (D). De referir que antes da instalação dos poços, não havia os piezómetros que definem as secções do DD, conforme ilustra a figura 8.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

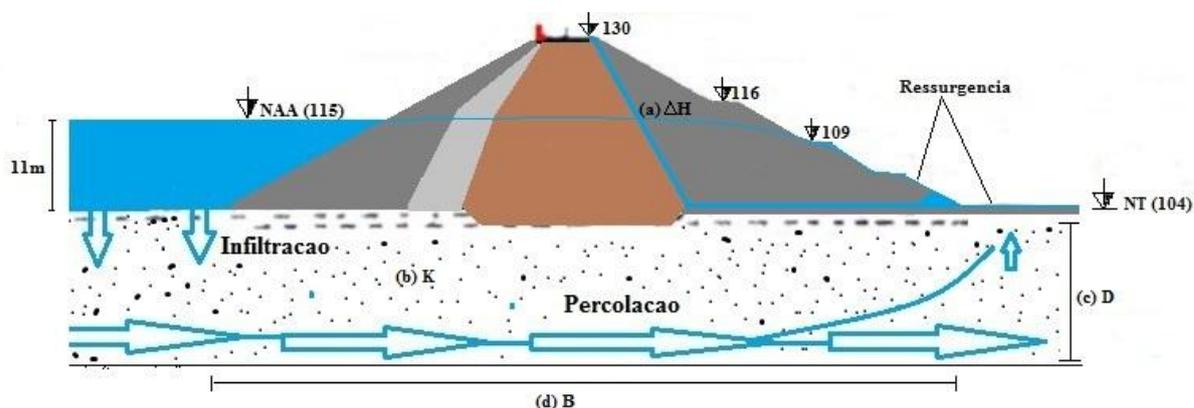


Figura 8: DD sem poços de alívio

a) Diferença de carga hidráulica inicial ao longo da camada de baixa permeabilidade (ΔH_0)

De acordo com a CIABM, o NAA máxima que poderia ser atingida antes da instalação dos poços de alívio era de 115 m, sendo o NT encontrando-se a cota 104 m.

$$\Delta H_0 = NAA_{\max} - NT \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

NAA = Nível de água na albufeira (m)

NT = Nível do terreno ou base do DD

De referir que para este cálculo considerou-se que a carga hidráulica não varia ao longo da camada de baixa permeabilidade.

b) Permeabilidade da camada de baixa permeabilidade (k_0)

O DD está assente em material argi-siltoso, e de acordo com Tonin (2013), os solos com essa textura são considerados solos permeáveis, estando na categoria de índice de permeabilidade baixa (10^{-5} a 10^{-7} cm/s), porém, de acordo com Gaito (citado por Oliveira, 2008), o acréscimo do grau de saturação de um solo resulta na perda de resistência deste mesmo solo, sendo assim, uma vez que a camada de baixa permeabilidade constituída por material argi-siltoso encontrava-se saturada devido a elevada carga hidráulica assume-se que este material reduziu

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

a sua resistência, aumentando a sua permeabilidade para a categoria de permeabilidade alta (10^{-3} a 10^{-5} cm/s), e foi usada a 10^{-3} cm/s para o calculo.

Largura da base do maciço da barragem (B)

Para este parâmetro foi aplicado a seguinte expressão:

$$B = b + 3H + 2,5H \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

b = largura da crista da barragem (m)

H = altura máxima da barragem (m)

A barragem de Massingir apresenta a largura da crista de 12 m e altura máxima de 46 m.

c) Espessura da camada permeável (D)

De acordo com Figueiredo, (2017), o bedrock ocorre a 25m abaixo da base do DD, sendo o local entre estes considerado a camada permeável. Deste modo foi adoptado uma espessura de 25 m para a camada permeável.

Com dispositivos de controlo de percolação (poços de alívio).

Foi possível conhecer esta vazão através da aplicação da equação 3 de Cedergren. Atendendo e considerando que com a operação dos poços há uma variação das condições internas do DD em termos da carga hidráulica, achou-se mais conveniente determinar-se a vazão em cada secção do DD, portando, considerou-se apenas as secções que encontram-se dentro do comprimento total da linha de poços, a destacar, secções (I;II;III;IV). Foram determinados os parâmetros: ponto a, Permeabilidade da camada de baixa permeabilidade (k), ponto b, Metade da distância do espaçamento entre os poços e o raio entre os poços de alívio (R, r), ponto c, Diferença de carga hidráulica ao longo da camada de baixa permeabilidade (ΔH), conforme ilustra a figura 9.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

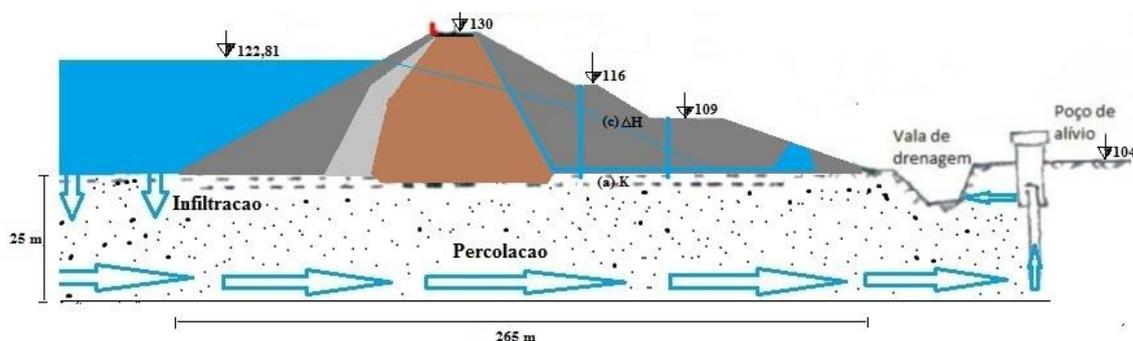


Figura 9: DD com poços de alívio

a) Permeabilidade da camada de baixa permeabilidade (k)

Assume-se que com a operação dos poços de alívio, houve uma redução da carga hidráulica no DD, e a camada de baixa permeabilidade constituída por material argi-siltoso tenha-se mostrado mais resistente a percolação podendo apresentar uma permeabilidade baixa (10^{-5} a 10^{-7} cm/s). Deste modo levou-se em consideração uma permeabilidade de 10^{-6} cm/s para o cálculo.

b) Metade da distância do espaçamento entre os poços e o raio entre os poços de alívio (R, r)

Estes parâmetros foram obtidos através das medições realizadas no trabalho de campo no local de estudo, com recurso a uma fita métrica.

c) Diferença de carga hidráulica ao longo da camada de baixa permeabilidade (ΔH)

Foi determinado este parâmetro em cada secção das 4 analisadas, e para o efeito, dependeu-se dos piezómetros instalados ao longo do corpo do DD obedecendo um perfil transversal, sendo estes, os que definem as secções. O procedimento de observação consistiu primeiramente na obtenção das características estruturais e topográficas dos piezómetros, tendo sido extraídos do mapa do registo das leituras dos níveis de água nos piezómetros, deste modo, foi possível conhecer a designação de cada piezómetro, as cotas da elevação do topo e as suas profundidades (Y). Em seguida foram observados os níveis de água nos piezómetros registados ao longo do tempo desde o ano 2006 (início da operação), que foi possível com o uso da sonda eléctrica, conforme mostra a figura 16.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

De referir que, para melhor estudo tomou-se em consideração as lecturas observadas na situação de maior cota do NAA.

3.3.Comparação das vazões máximas de água que saem dos poços de alívio registadas em diferentes níveis de albufeira.

A vazão de saída dos poços de alívios foi determinada aplicando-se a equação 1, baseada no volume (v) e no tempo (t), em que o procedimento para determinação destes parâmetros consistiu no controlo de tempo para o enchimento de um recipiente de um volume conhecido com água captada através da boca do poço de alívio, usando-se um balde de 10 l e um cronómetro, conforme ilustra a figura 14 nos anexos.

Foram analisadas os dados das vazões registadas desde 2006-2017 fornecidos pela Ara-Sul, sendo que, para melhor ilustração, a análise foi realizada dividindo-se o número de poços em secções do DD, e tomou-se em consideração as vazões máximas já registadas em cada poço com o NAA acima da cota 115 m para o melhor diagnóstico da influência do mesmo na vazão dos poços.

3.4.Determinação da eficiência (E) do método de poços de alívio no controlo da vazão de percolação na fundação do DD.

Para a determinação da eficiência foi aplicada a equação 4, recomendada pelo Oliveira (2013), e dependeu-se dos valores das vazões que percolam pela fundação do DD das duas situações (sem e com poços de alívio), e o cálculo foi efectuado usando o Microsoft Excel.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1.Vazão que percola pela fundação

Sem dispositivos de controlo de percolação (poços de alívio).

Para uma secção típica do DD sem dispositivos de controlo de percolação considerando-se uma carga hidráulica constante ao longo da camada de baixa permeabilidade (11m), foi obtida uma vazão de 0,96 l/s/m, o equivalente a 57,5 l/min/m. Esta vazão do ponto de vista do Sandrone (2012) encontra –se no padrão que é considerado perigoso para a estabilidade do DD, estando na categoria da vazão excessiva (≥ 14 l/min/m), conforme ilustra o gráfico 1.

De referir que, os pormenores do calculo desta vazão encontram-se na tabela 17 nos anexos.

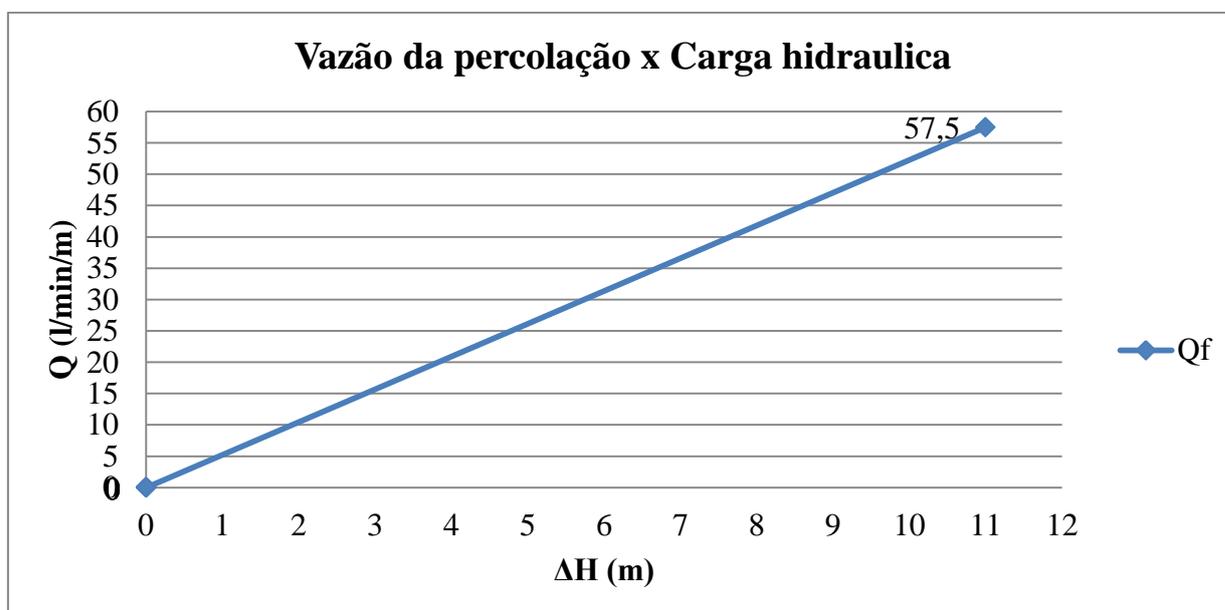


Gráfico 1: Vazão da fundação do DD sem poços de alívio

Com isso pode-se afirmar que o problema de infiltração e ressurgências no DD que ocorreu na primeira fase do enchimento da barragem tenha sido causado por altas vazões de percolação, resultado da ausência de um dispositivo que reduz a carga hidráulica na fundação do DD, o que culminou na elevada linha de saturação no interior do DD.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Com dispositivos de controlo de percolação (poços de alívio).

Considerando o funcionamento do método de controlo de percolação foi obtida uma carga hidráulica de 7,1 m, dando origem a uma vazão de 0,14 l/s/m, o equivalente a 8,5 l/min/m para as primeiras duas secções, sendo que na terceira secção teve-se uma carga hidráulica de 8,02 m, tendo-se originado uma vazão de 0,16 l/s/m, o equivalente a 9,7 l/min/m e na quarta secção uma carga hidráulica de 10,9 m com vazão de 0,22 l/s/m, o equivalente a 13,1 l/min/m. Com esta situação, segundo Sandrone (2012) as vazões das quatro secções obedecem a expressão ($5 \leq Q_f \leq 14$ l/min/m), sendo esta, a categoria da vazão media, conforme pode-se observar no gráfico 2.

Pormenores do calculo nas tabelas: 18, 19, 20, 21.

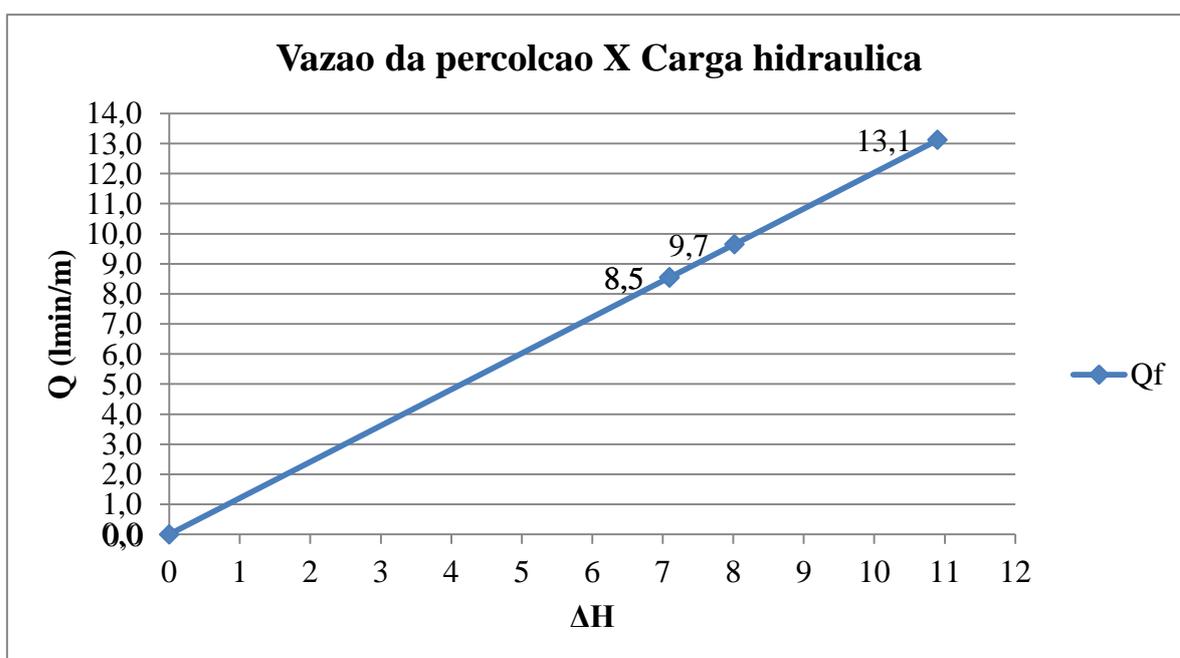


Gráfico 2: Vazão na fundação do DD com poços de alívio

Os dois gráficos ilustram uma relação directa entre a vazão e carga hidráulica, ou seja, na medida que o método de poços de alívio vai eliminando o fluxo de água oriunda da fundação do DD regista-se uma diminuição da altura da carga hidráulica tornando menor a vazão da percolação na fundação.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Em termos da redução da vazão que percolava na fundação do DD sem o método (caso A), observa-se que houve uma redução considerável já com o funcionamento do método (caso B), tendo reduzido 57,5 l/min/m para um intervalo de 8,5 a 13,1 l/min/m nas quatro secções (I,II,III,IV), com mais ênfase na I e II secção, conforme pode-se observar no gráfico

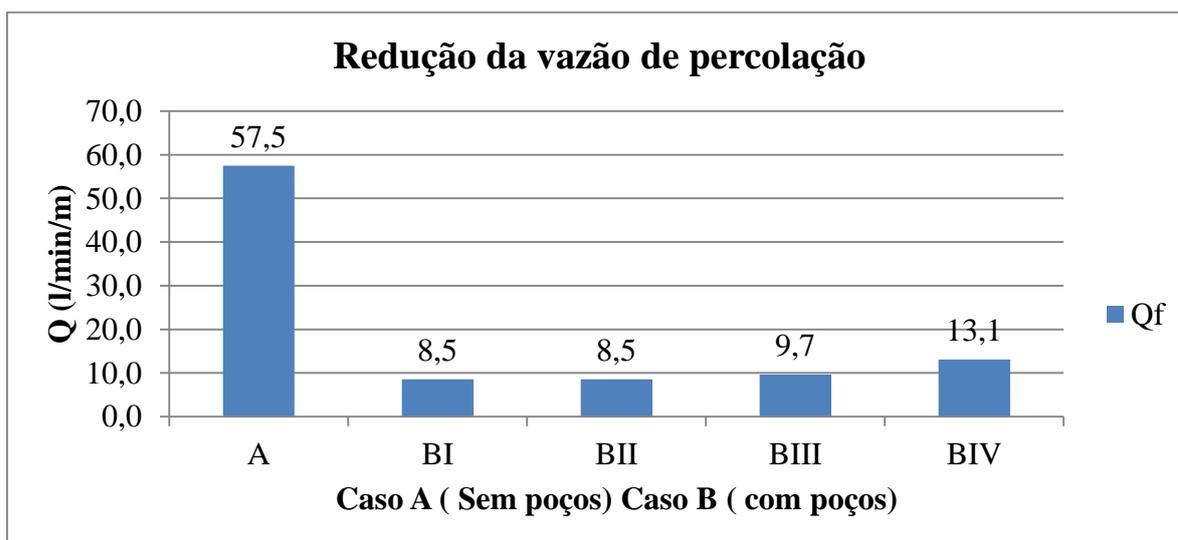


Gráfico 3: Redução da vazão

4.2. Comparação das vazões máximas dos poços de alívio registadas em diferentes níveis de albufeira.

Os resultados obtidos no cálculo da vazão de saída dos poços de alívio em todas secções analisadas mostraram que nem sempre há uma relação directa entre os níveis da albufeira e as vazões dos poços de alívio.

Na secção I, foi verificado que os 10 poços analisados registam vazões abaixo dos 11 l/s, sendo que a maior parte destes debitam suas maiores vazões em situação de menor NAA comparativamente com o maior NAA já registado desde a instalação dos poços (122 m), tendo-se verificado maior vazão no poço 16 com 10,75 l/s com NAA na cota 120 m, conforme pode-se observar na tabela 22 nos anexos e no gráfico 4.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

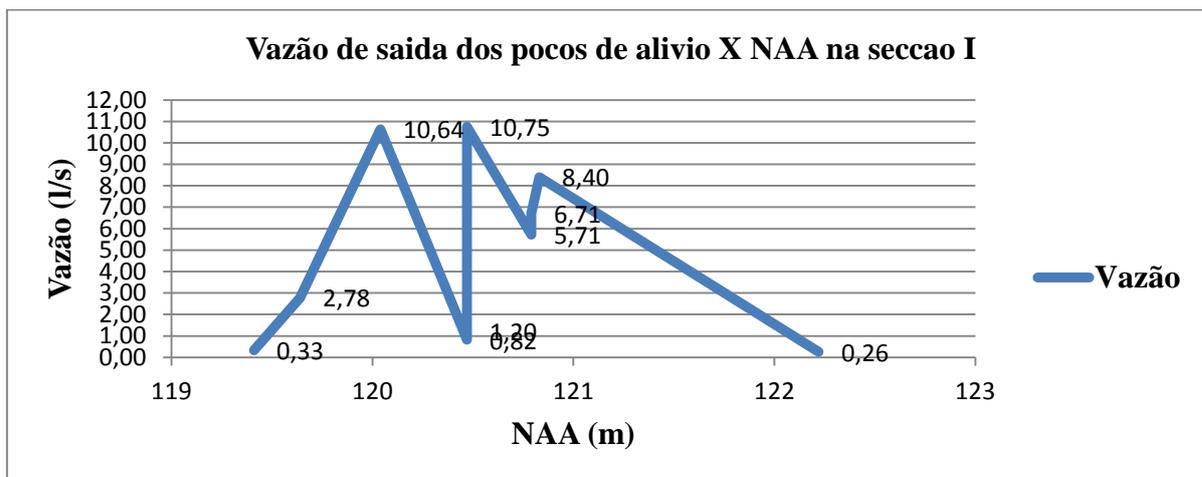


Gráfico 4: Vazão de saída dos poços de alívio da secção I

Na secção II, foi analisado o mesmo número de poços que os da secção I e observou-se que registam vazões abaixo dos 10 l/s, e foi verificado maior vazão no poço 31 com 9,01 l/s com NAA na cota 120 m, conforme pode-se observar na tabela 23 nos anexos e no gráfico 5.

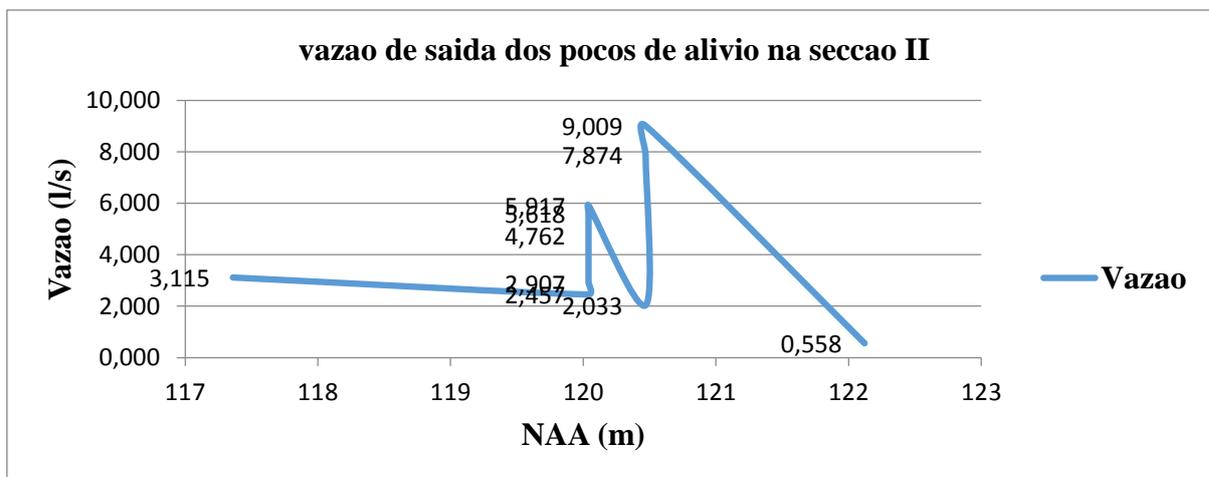


Gráfico 5: Vazão de saída dos poços de alívio da secção II

Na secção III, o maior número dos 20 poços que caracterizam a secção, registam quase o dobro das vazões que são registados pelo poço das secções I e II. Nesta secção observa-se uma ligeira influencia do NAA no aumento da vazão dos poços, o que pode ser observado nos poços 47, 51, 52, 53, que registaram suas maiores vazões com maior NAA (cota 122 m), porem, o fenómeno não é representativo, por que, em contra partida, observa-se que maior quantidade de poços registou suas maiores vazões com NAA abaixo da maior cota, tendo-se

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

verificado maior vazão no poço 41 com 34,48l/s com o NAA a cota 120 m, conforme pode-se observar na tabela 24 nos anexos e no gráfico 6.

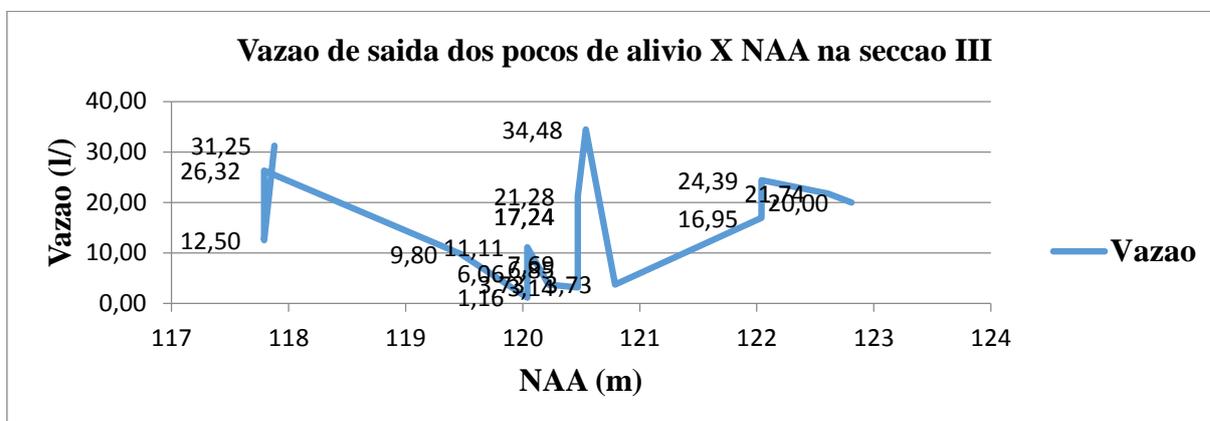


Gráfico 6: Vazão de saída dos poços de alívio da secção III

Na secção IV, foi verificado como sendo a secção que apresenta maior número de poços com maiores vazões, e há maior numero de poços que registaram suas maiores vazões em situação de maior cota do NAA já registada (122 m), isto é, os resultados da vazão de maior numero de poços nesta secção ilustram uma relação directa significativa entre a cota do NAA e a vazão dos poços de alívio, tendo-se verificado maior vazão no poço 55 com 27,03 l/s com o NAA a cota 122 m, conforme pode-se observar na tabela 25 nos anexos e no gráfico 7.

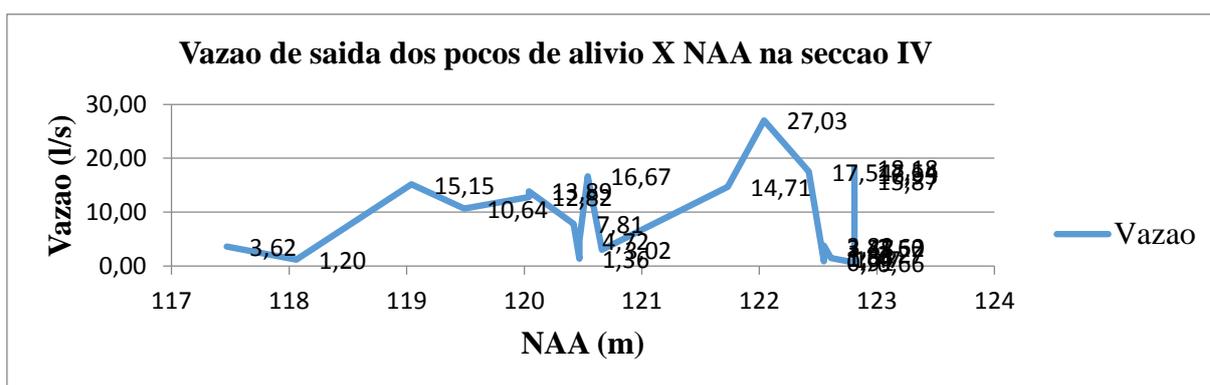


Gráfico 7: Vazão de saída dos poços de alívio da secção IV

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

4.3. Eficiência do método de poços de alívio na redução da vazão.

Os resultados do cálculo da eficiência do método de poços de alívio na redução da vazão apresentaram maior percentagem na secção I e II em 85%, sendo que, nas secções III e IV a percentagem foi de 83% e 77%, respectivamente, conforme pode-se observar no gráfico 8.

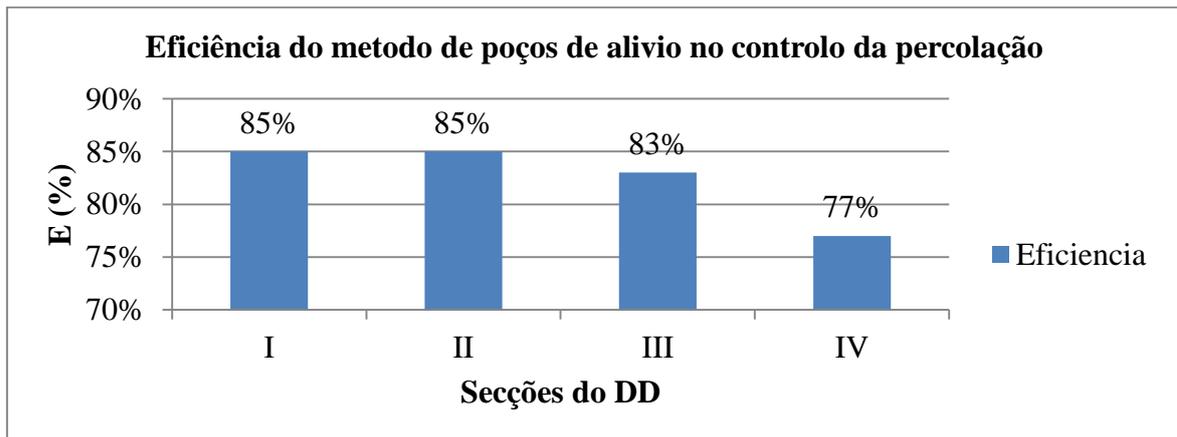


Gráfico 8: Eficiência do método

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

5.CONCLUSÃO

Do estudo realizado observou-se que o método de poços de alívio respondeu positivamente no que tange a drenagem da água oriunda da fundação, o que permitiu uma diminuição da carga hidráulica no interior do DD e conseqüentemente na redução da vazão de percolação mitigando a possibilidade de um desmoronamento da talude da jusante do DD. Porém, o método não permitiu uma redução da vazão de percolação até aos padrões aceitáveis na fundação de uma barragem que é de 5 l/min/m, tendo reduzido para uma categoria de vazões medias ($5 \leq Q_f \leq 14$ l/min/m) segundo Sandoni (2012), portanto, autores como Cruz e Silveira (citados por Oliveira 2008), descartam a possibilidade de uma barragem estar segura mesmo nos padrões da vazão media. Contudo, defendendo o pensamento do Cruz e do Silveira, com os resultados obtidos de vazão de percolação com o método de poços de alívio conclui-se que o método de poços de alívio não apresenta um desempenho satisfatório no controlo da percolação na fundação do DD.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

6.RECOMENDAÇÕES

Aumentar-se o número poços de alívio para permitir que haja mais diminuição do fluxo no interior do DD, isso será uma boa medida preventiva ao colapso do DD, podendo-se aumentar o tempo de vida útil da barragem na expectativa de que haja mais estudos de soluções de estabilização hidráulica.

Realizar-se frequentemente a manutenção e reabilitação dos poços de alívio e da vala de drenagem que recebe a água dos poços para tornar-se e manter-se a descarga e o desaguamento facilitado e o método tenha mais desempenho.

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARA-SUL, A. R. (2003). *Descricao do procedimento de observacao dos intrumentos de auscultacao da Barragem de Massingir*. Massingir.

Carvalho, T. (2008). *Tecnicas de Medicao de Vazao por meios Convincionais e nao Convencionais* . Revista Brasileira de Geografia Fisica, Vol 01, n 01.

CBDB, C. B. (2011). *A História das Barragens no Brasil nos Séculos XIX, XX e XXI. 50 Anos do Comitê Brasileiro de Barragens*. Rio de Janeiro.: Sindicato nacional dos editores de livros,.

CIABM, C. d. (2008). *RELATÓRIO DO INQUÉRITO AO ACIDENTE DA BARRAGEM DE MASSINGIR*. Maputo.

COBA. (1969). *Projecto da Barragem de Massingir*. Ministerio do Ultramar. Vols. 1 a 5.

CRUZ, P. (2004). *100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos*. São Paulo.: Oficina de Textos, 2ª Edição.

FIGUEIREDO, L. I. (2017). *Solucoes de estabilizacao hidraulica na barragem de Massingir* . Faculdade de Ciencias e Tecnologia : Universidade Nova de Lisboa .

LOPES, J. D. (2017). *Pequenas Barragens de Terra*. Aprenda Facil.

MAE. (2014). *Perfil do districto de Massingir provincia de Gaza*. Maputo-Mocambique.

MARCELINO, J. (2012). *Monitoring the behaviour of Massingir dam in Mozambique*. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Lisboa: LNEC.

MASSAD, F. (2003). *Obras de Terra – Curso Básico de Geotecnia*. São Paulo, : editora Oficina de Texto.

OLIVEIRA, A. G. (2008). *Analise da Eficacia dos Dispositivos de Vedacao e Drenagem Utilizados em Fundacoes Permeaveis de Barragens de Terra*. Sao Carlos-Brasil.

SANDRONI, S. (2012). *Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento*. Rio de Janeiro.: Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ.

SOUZA, M. M. (2013). *Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC*. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica.

TONIN, F. (2013). *Mecanica dos solos*. FSP-Avare-Brasil.

XITIZAP. (2016). *Obtido de http://zapper.xitizap.com/xitizap%2039/index_files/Page351.htm*

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

8.ANEXOS

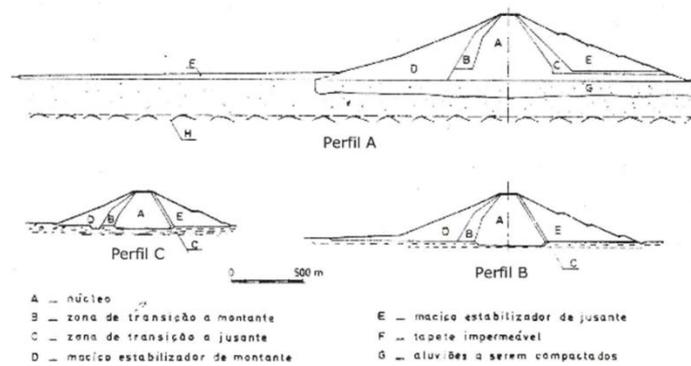


Figura 10: Perfis transversais - tipos de aterros da barragem de Massingir (COBA, 1969).



Figura 11: Órgãos hidráulicos da barragem de Massingir (Marcelino, 2012)

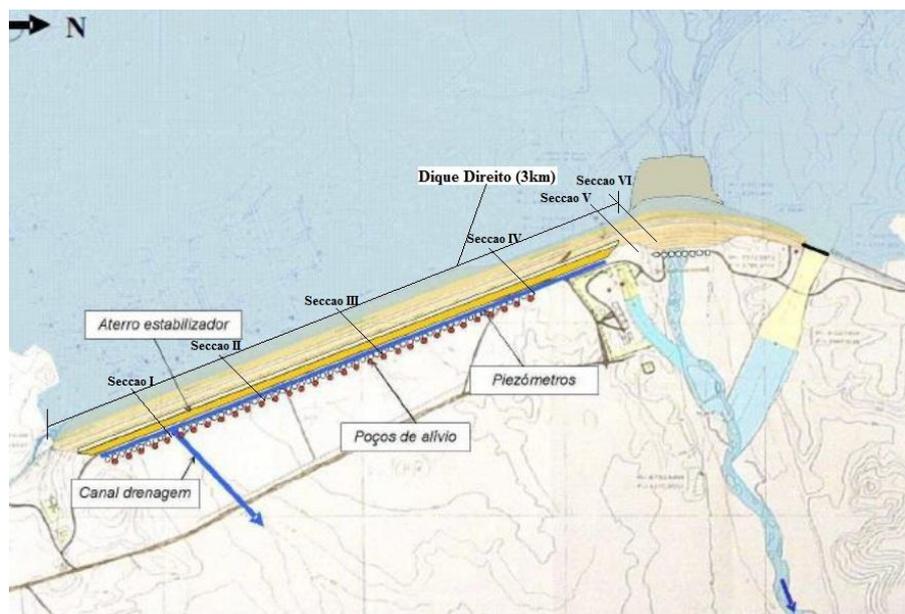


Figura 12: planta da barragem de Massingir, (XITIZAP, 2016)

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

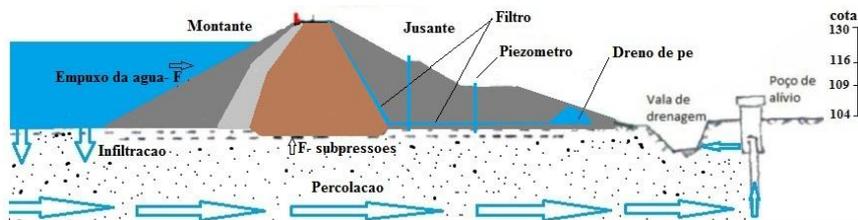


Figura 13: Secção transversal do DD



Figura 14: Medição da vazão dos poços de alívio



Figura 15: Anomalias causadas pela vazão de percolação: aparecimento da água no paramento montante da vala de drenagem no pé da jusante do DD (A), poço com fuga de água e má drenagem de água (B), aparecimento de água que sai do piezómetro (C).



Figura 16: Verificação da carga hidráulica

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Tabela 3: Piezómetros que definem a secção I do DD

SECÇÃO I				
N/PIEZOMETRO	PPO1	PPO1B	PPO2	PPO3
PK	0+450	0+450	0+450	0+450
PROF. (m)	15	10,8	19	10,8
COTA (m)	125	109	116	109

Tabela 4: Piezómetros que define a secção II do DD

SECÇÃO II			
N/PIEZOMETRO	PPO4	PP05	PPO6
PK	0+800	0+800	0+800
PROF. (m)	10,8	19,5	30
COTA (m)	109	116	109

Tabela 5 Piezómetros que definem a secção III do DD

SECÇÃO III			
N/PIEZOMETRO	PPO7B	PPO8	PPO9
PK	1+300	1+300	1+300
PROF. (m)	18	18	10,8
COTA (m)	109	116	109

Tabela 6 Piezómetros que definem a secção IV do DD

SECÇÃO IV			
N/PIEZOMETRO	PP10B	PP11	PP12
PK	2+000	2+000	2+000
PROF. (m)	12,8	15	13
COTA (m)	109	116	109

Tabela 7: Piezómetros que definem a secção V do DD

SECÇÃO V			
N/PIEZOMETRO	PP13	PP14	PP16
PK	3+050	3+050	3+300
PROF. (m)	15	10	30
COTA (m)	121	116	115

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Tabela 8: Piezómetros que definem a secção VI do DD

SECÇÃO VI		
N/PIEZOMETRO	PP17	PP18
PK	3+300	3+300
PROF. (m)	21	15
COTA (m)	108	100

Tabela 9: Poços de alívio da secção I

DES.	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
PK (0+)	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450
Y. (m)	21	19	19	19	16	21	18	20	17	17	21
Z (m)	104	104	104	103	103	103	102	102	102	102	101
Ø(mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

Tabela 10: Poços de alívio da secção II

DES.	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
PK(0+)	475	500	525	550	575	600	625	650	675	700	725	750	775	800
Y(m)	18	18	17	21	21	21	21	21	21	21	20	20	20	20
Z(m)	101	101	101	101	101	101	100	100	101	101	101	101	102	101
Ø(mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

Tabela 11: Poços de alívio da secção III

DES.	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
PK(0+)	825	850	875	900	925	950	975	1000	1025	1050	1075	1100	1125
Y(m)	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Z(m)	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102
Ø(mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

47	48	49	50	51	52	53
1150	1175	1200	1225	1250	1275	1300
21	21	21	21	21	21	21
103	102	102	102	102	102	102
250	250	250	250	250	250	250

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Tabela 12: Poços de alívio da secção IV

DES.	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
PK(0+)	1325	1350	1375	1400	1425	1450	1475	1500	1525	1550	1575	1600	1625
Y(m)	21	21	21	21	21	21	21	21	24	24	24	24	24
Z(m)	102	103	103	103	103	103	102	103	103	103	103	103	103
Ø(mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
1650	1675	1700	1725	1750	1775	1800	1825	1850	1875	1900	1925	1950	1975
24	21	21	21	21	21	21	21	21	24	21	21	21	21
103	103	103	103	103	103	103	103	105	105	104	104	105	105
250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250

81	82	83	84	85
2000	2025	2050	2075	2100
21	24	21	21	21
106	106	107	108	108
250	250	250	250	250

Tabela 13: carga hidráulica na secção I

NAA	Data Med.	Desig. Piez.	Cota	Y. Piez	Lectura Máxima	ΔH	ΔH _{media}
122,81	18-04-2008	PP02	116	19	9,09	9,91	7,13
		PP03	109	10,8	6,46	4,34	

Tabela 14: carga hidráulica na secção II

NAA	Data Med.	Desig. Piez.	Cota	Y. Piez	Lectura Maxima	ΔH	ΔH _{media}
122,81	18-04-2008	PP05	116	19,5	9,64	9,86	7,1
		PP04	109	10,8	6,46	4,34	

Tabela 15: carga hidráulica na secção III

NAA	Data Med.	Desig. Piez.	Cota	Y. Piez	Lectura Maxima	ΔH	ΔH _{media}
122,81	18-04-2008	PP08	116	18	5,28	12,72	8,02
		PP09	109	10,8	7,49	3,31	

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Tabela 16 carga hidráulica na secção IV

NAA	Data Med.	Desig. Piez.	Cota	Y. Piez	Lectura Maxima	ΔH	ΔH_{media}
122,81	18-04-2008	PP11	116	15	3,3	11,7	10,9
		PP12	109	13	2,91	10,09	

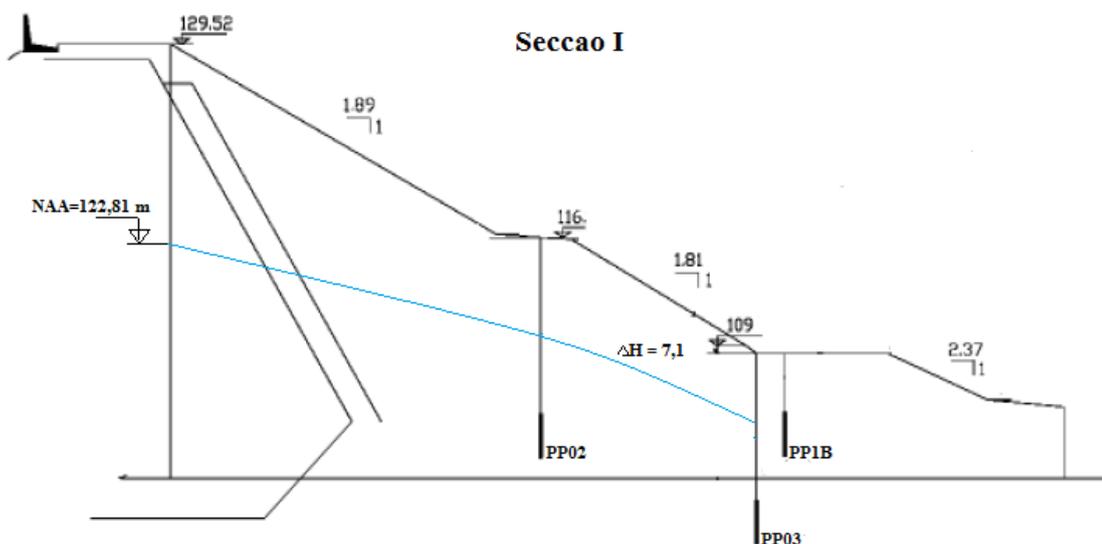
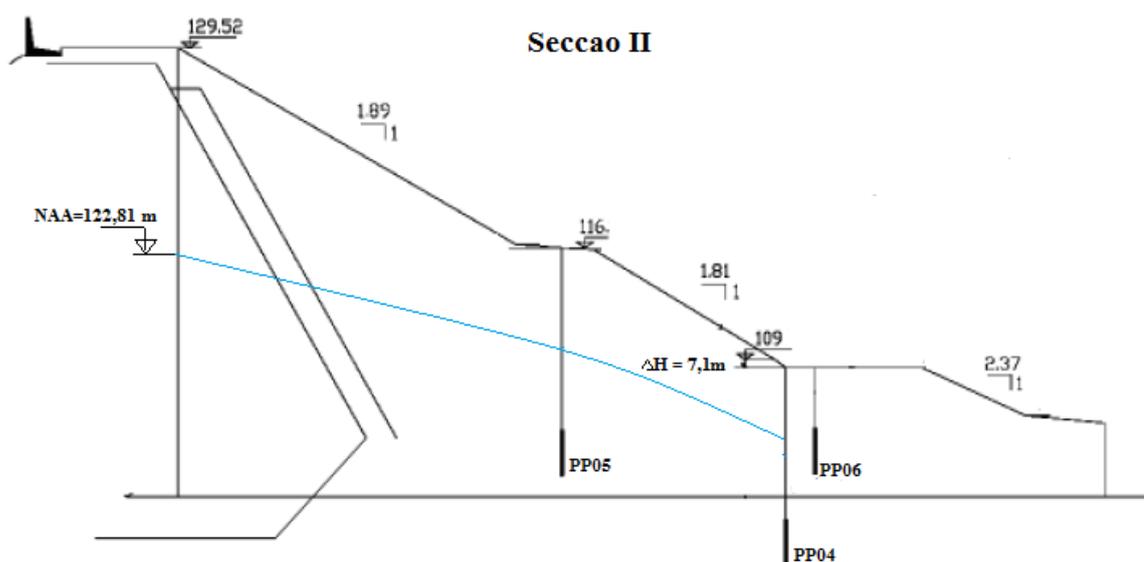


Figura 17: Representação esquemática da carga hidráulica na secção I do DD



Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Figura 18: Representação esquemática da carga hidráulica na secção II do DD

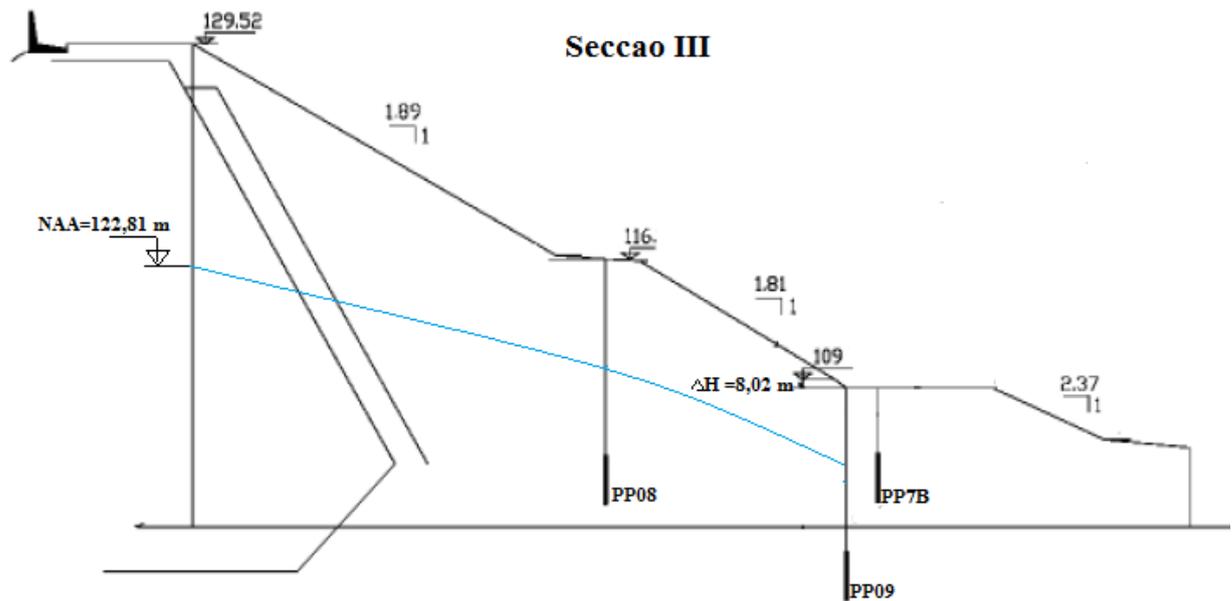
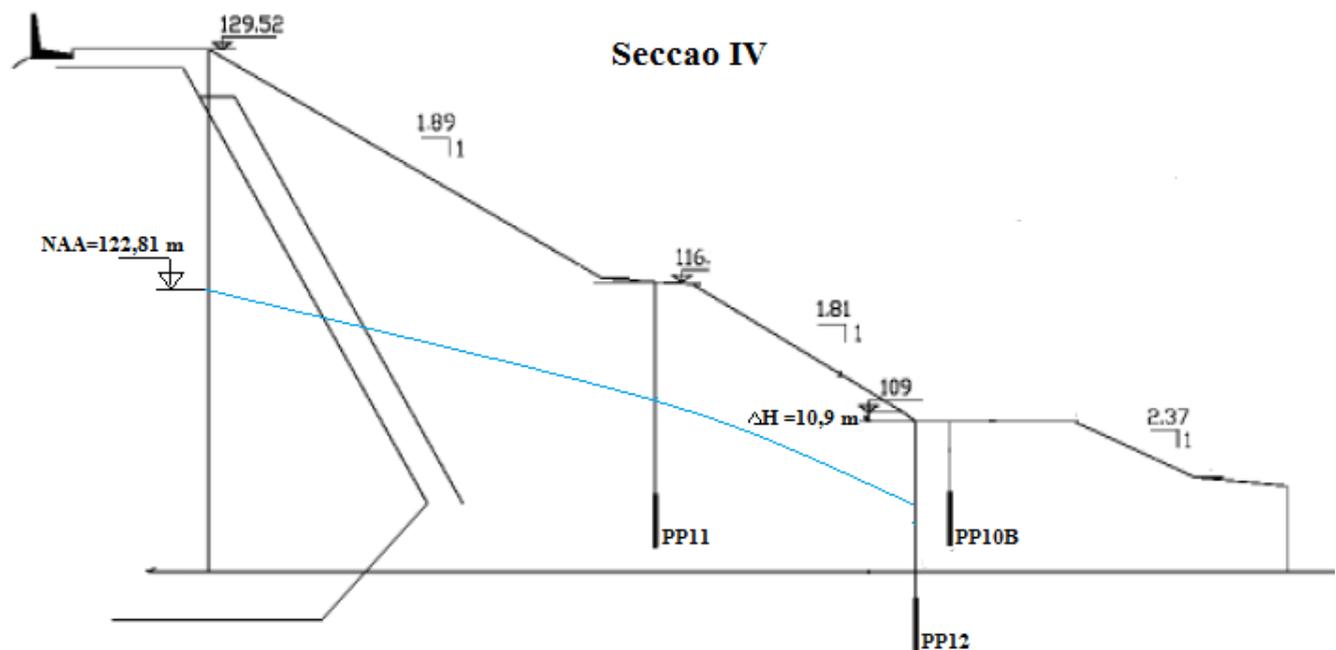


Figura 19: Representação esquemática da carga hidráulica na secção III do DD



Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

Figura 20: Representação esquemática da carga hidráulica na secção IV do DD

Tabela 17: Vazão de percolação na fundação do DD sem poços de alívio

ΔH_0 (m)	K_0 (cm/s)	B(m)	D(m)	Q_0 (m ³ /s/m)	Q_0 (l/s/m)	Q_0 (l/min/m)
11	10 ⁻³	265	25	0,00096	0,96	57,5

Tabela 18: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção I

π	K(cm/s)	D(m)	H(m)	ln(R/r)	Q_f (m ³ /s/m)	Q_f (l/s/m)	Q_f (l/min/m)
3,14	10 ⁻⁶	25	7,13	ln(12,5/0,25)	0,00014	0,14	8,5

Tabela 19: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção II

π	K(cm/s)	D(m)	H(m)	ln(R/r)	Q_f (m ³ /s/m)	Q_f (l/s/m)	Q_f (l/min/m)
3,14	10 ⁻⁶	25	8,02	ln(12,5/0,25)	0,00016	0,16	9,7

Tabela 20: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção III

π	K(cm/s)	D(m)	H(m)	ln(R/r)	Q_d (m ³ /s/m)	Q_f (l/s/m)	Q_f (l/min/m)
3,14	10 ⁻⁶	25	7,10	ln(12,5/0,25)	0,00014	0,14	8,5

Tabela 21: Vazão de percolação na fundação do DD com poços de alívio na secção IV

π	K(cm/s)	D(m)	H(m)	ln(R/r)	Q_f (m ³ /s/m)	Q_f (l/s/m)	Q_f (l/min/m)
3,14	10 ⁻⁶	25	10,90	ln(12,5/0,25)	0,00022	0,22	13,1

Tabela 22: Vazões máximas dos poços de alívio da secção I

Poço	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
NAA	122,22	120,47	120,47	120,79	-	120,04	120,83	120,47	120,47	119,41
Q (l/s)	0.26	0.81	1.20	5.71	-	10.64	8.40	10.75	0.78	2.78

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

19
120,79
6.71

Tabela 23: Vazões máximas dos poços de alívio da secção II

Poço	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
NAA	120,04	120,04	120,47	117,36	122,12	120,04	-	-	-	-	120,04	120,47
Q (l/s)	5.91	2.91	2.03	3.12	0.56	2.46	-	-	-	-	5.62	9.01

32	33
120,04	120,47
4.72	7.87

Tabela 24: Vazões máximas dos poços de alívio da secção III

Poço	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
NAA	120,04	120,04	120,47	120,47	120,79	117,79	120,47	120,54	120,47	117,79
Q (l/s)	6.06	1.16	3.15	7.70	3.73	12.50	21,28	34.48	25.64	26.32

44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
117,88	120,22	119,47	122,04	120,47	120,04	120,47	122,81	122,61	122,04
31,25	3.73	9.80	16.95	17.24	11.11	6.45	20.00	21.74	24.39

Tabela 25: Vazões máximas dos poços de alívio da secção IV

Poço	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
NAA	122,81	122,04	122,81	120,04	121,73	122,42	122,81	120,47	119,49	120,66
Q (l/s)	18.18	27.03	17.54	12.82	14.71	17.54	16.95	4.72	10.64	10.75

Avaliação do desempenho do método adoptado para controlo de percolação na fundação do dique direito do vale principal na barragem de Massingir.

64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
122,81	120,54	119,04	120,04	120,42	117,47	122,61	118,06	122,81	122,55
15.87	16.67	15,15	13.89	14.49	3.62	1.47	4.57	0.66	1.85

74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
122,55	120,47	122,81	122,81	122,81	122,55	122,55	122,55	122,55	-		-
0.91	1.36	2.27	3.59	3.52	3.36	1.64	3.82	3.48			