



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL DE OLIVEIRA CAVALCANTE

**AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA
COM TAPETE IMPERMEÁVEL: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM OLHO
D'ÁGUA.**

FORTALEZA

2021

GABRIEL DE OLIVEIRA CAVALCANTE

**AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA
COM TAPETE IMPERMEÁVEL: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM OLHO
D'ÁGUA.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C364a Cavalcante, Gabriel de Oliveira.

Avaliação hidráulica da fundação de uma barragem de terra com tapete impermeável:
estudo de caso da barragem Olho d'água / Gabriel de Oliveira Cavalcante. – 2021.
53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro
de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

1. Olho d'água. 2. Fundação permeável. 3. Percolação. I. Título.

CDD 620

GABRIEL DE OLIVEIRA CAVALCANTE

**AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA
COM TAPETE IMPERMEÁVEL: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM OLHO
D'ÁGUA.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 03/09/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Fabiola Costa de Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Rubens e Kênia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de ter encontrado e convivido com pessoas maravilhosas até aqui.

Aos meus pais, Rubens e Kênia, por todo o apoio e amor durante esses 24 anos. Sem eles não teria conquistado o que já alcancei nessa vida.

Ao meu orientador professor Dr. Rosiel Ferreira Leme que, com toda sua paciência e dedicação, foi fundamental na construção dessa monografia.

Aos meus amigos Felipe, Larissa, Yuri, Mariana, Tereza, que fizeram meu tempo nesse curso ser tão especial.

RESUMO

Segundo Cedergren (1989) no passado, quando era comum os projetistas confiarem em intuição ou regras para tomar decisões sobre um projeto exposto a processos erosivos da água, falhas e imperícias eram muito comuns. Por meio do desenvolvimento dos métodos experimentais e racionais por pesquisadores como Casagrande e Terzaghi, os projetistas começaram a ter um melhor entendimento das propriedades do solo e das fundações de terra, dessa forma podendo projetar obras de engenharia mais econômicas e seguras. Mesmo com a evolução de ensaios e estudos na área, ainda é possível observar a ocorrência de seleção de projetos inadequados e uso materiais drenantes insatisfatórios. Conforme o exposto, o seguinte trabalho mostra exemplos de barragens do âmbito estadual que apresentam problemas nas suas estruturas por conta do fluxo d'água mal controlado, citando algumas falhas apresentadas nas estruturas e intervenções por parte dos gestores das mesmas. Esta pesquisa buscou ainda investigar os problemas na barragem Olho D'água localizada no município de Várzea Alegre, a qual apresentou duas alternativas na sua fase de projeto, sendo que o projeto escolhido não teve um funcionamento satisfatório, identificando vários problemas de fluxo. Após a construção, a barragem precisou ser submetida a uma obra de manutenção corretiva, realizada pela COGERH a fim de controlar o fluxo e diminuir o gradiente no pé de talude. Com o objetivo de avaliar as propostas de estruturas da barragem e a intervenção nela feita, foi gerado modelos dos projetos executivos e da seção alterada pela COGERH no software Geostudio 2021, o qual serviu para analisar o fluxo, e a estabilidade de talude em regime de operação. Foi observado que o modelo original, primeiro projeto executivo desenvolvido pela empresa AGUASOLOS, apresentou um bom comportamento hidráulico, além de uma excelente estabilidade. Já o segundo projeto executivo desenvolvido pela CEC Engenharia, o que foi posto em prática na construção, apresentou altos valores de gradiente na saída e um fator de segurança a deslizamento de talude bem próximo do mínimo de 1,5 recomendado. Por fim, o modelo com a intervenção da COGERH, apresentou resultados satisfatórios, indicando que a intervenção teve efeitos positivos.

Palavras-chave: Olho D'água; fundação permeável; percolação.

ABSTRACT

According to Cedergren (1989) in the past, when it was common for designers to rely on intuition or rules to make decisions about a project exposed to erosive water processes, failures and malpractices were very common. Through the development of experimental and rational methods by scientists such as Casagrande and Terzaghi, designers began to have a better understanding of the properties of soil and earth foundations, thus being able to design more economical and safer engineering works. Even with the evolution of tests and studies in the area, it is still possible to observe the occurrence of selection of inadequate projects and the use of unsatisfactory draining materials. As explained above, the following work shows examples of statewide dams that present problems in their structures due to poorly controlled water flow, citing some flaws in the structures and interventions by their managers. This research also sought to investigate the problems in the Olho D'água dam located in the Várzea Alegre city, which presented two alternatives in its design phase, and the chosen project did not have a satisfactory operation, identifying several flow problems. After construction, the dam had to undergo intervention work by COGERH in order to control the flow and reduce the gradient at the foot of the slope. In order to evaluate the proposed dam structures and the intervention made therein, models of the executive projects and the section altered by COGERH in the Geostudio 2021 software were generated, which served to analyze the flow and slope stability under operating regime. It was observed that the original model, the first executive project developed by the company AGUASOLOS, presented good hydraulic behavior, in addition to excellent stability. On the other hand, the second executive project developed by CEC Engenharia, which was put into practice during construction, presented high output gradient values and stability very close to the recommended minimum of 1.5. Finally, the model with the intervention of COGERH, showed satisfactory results, indicating that the intervention had positive effects.

Keywords: Olho D'água; permeable foundation; percolation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Percentual de causas de rupturas de barragens.	16
Figura 2 — Talude de Jusante da barragem Jaburú I com ressurgência.	18
Figura 3 — Barragem com filtro em estado de funcionamento normal.	19
Figura 4 — Barragem com filtro colmatado.	19
Figura 5 — Processo de formação de pipping.	20
Figura 6 — Seção máxima da barragem Carão.	21
Figura 7 — Seção com materiais da barragem Jaburú I.	22
Figura 8 — Histórico de intervenções na barragem Jaburú I.	23
Figura 9 — Trincheira com total barramento da feição permeável.	24
Figura 10 — Diafragma vista em seção de uma barragem.	25
Figura 11 — Painéis alternados.	26
Figura 12 — Trincheira com barramento parcial da feição permeável.	27
Figura 13 — Tapete impermeável.	28
Figura 14 — Tapete drenante.	29
Figura 15 — Poço de alívio.	30
Figura 16 — Localização geográfica Município de Várzea Alegre.	31
Figura 17 — Vista da barragem Olho D'água.	32
Figura 18 — Seção Máxima barragem Olho D'água.	34
Figura 19 — Projeto Executivo Aguasolos: Seção da barragem Olho D'água.	35
Figura 20 — Projeto Executivo CEC Engenharia: Seção barragem Olho D'água.	37
Figura 21 — Revência em área à jusante da barragem.	37
Figura 22 — Reparos na barragem Olho D'água.	38
Figura 23 — Modelagem da alternativa da Aguasolos no software.	40
Figura 24 — Modelagem da alternativa da CEC Engenharia no software.	41
Figura 25 — Modelagem da alternativa da COGERH no software.	41
Figura 26 — SLOPE/ W gerando as superfícies de deslizamento.	42
Figura 27 — Exibição de todas as superfícies de deslizamento críticas válidas.	42
Figura 28 — Comparativo de uma superfície de ruptura otimizada e uma superfície de ruptura circular tradicional.	43
Figura 29 — Detalhe dos vetores de velocidade do fluxo pela fundação da barragem olho d'água (AGUASOLOS).	44

Figura 30 — Isolinhas de gradientes hidráulicos (AGUASOLOS).....	45
Figura 31 — Estabilidade do talude de jusante em regime de operação (AGUASOLOS).	46
Figura 32 — Detalhe dos vetores de velocidade do fluxo pela fundação da barragem olho d'água (CEC Engenharia).....	47
Figura 33 — Isolinhas de gradientes hidráulicos (CEC Engenharia).....	47
Figura 34 — Estabilidade do talude de jusante em regime de operação (CEC Engenharia).....	48
Figura 35 — Isolinhas de gradientes hidráulicos (COGERH).....	49
Figura 36 — Estabilidade do talude de jusante em regime de operação (COGERH).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Quadro resumo barragem Olho D'água.....	33
Tabela 2 — Parâmetros Geotécnicos.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Estrutura Organizacional do Trabalho	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Anomalias Geradas por Percolação em Barragens	16
2.1.1	Saturação	17
2.1.2	<i>Piping</i>	19
2.2	Barragens que Apresentam Problemas de Percolação	20
2.2.1	Barragem Carão	21
2.2.2	Barragem Jaburú I	22
2.3	Tipos de Fundação de uma Barragem por Interceptação Total	24
2.3.1	Trincheira de Vedação <i>Cut-off</i>	24
2.3.2	Parede Diafragma	25
2.4	Tipos de Fundação de uma Barragem por Interceptação Parcial	26
2.4.1	Trincheira de Vedação Parcial	27
2.4.2	Tapete Impermeável a Montante	28
2.5	Dispositivos Drenantes	28
2.5.1	Tapetes Drenantes	29
2.5.2	Poços de Alívio	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Estudo de caso barragem Olho D'água	31
3.1.1	Localização da Barragem Olho D'água	31
3.1.2	Descrição da Obra	31
3.1.3	Dados da Barragem	32
3.2	Pesquisa Bibliográfica	35
3.3	Alternativas de projeto da barragem Olho D'água	35
3.4	Parâmetros Geotécnicos	38
3.5	Modelagem Numérica	40
3.5.1	Modelo para Análise de Fluxo	40
3.5.2	Modelo para Análise de Estabilidade	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44

4.1	Projeto Executivo AGUASOLOS.	44
4.2	Projeto Executivo CEC Engenharia.	46
4.3	Projeto Intervenção COGERH	49
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

Segundo Massad (2010) barragens de terra são construções antigas, sendo que um dos registros mais antigos é de uma barragem de 12 metros de altura, construída no Egito, há aproximadamente 6,8 mil anos, e que rompeu por transbordamento. Naquela época, as barragens de terra eram “homogêneas”, com o material transportado manualmente e compactado por pisoteamento, de animais ou de homens. Com o passar dos anos foram-se adicionando novas tecnologias como núcleos de argila (1820), enrocamento (1850) e compactação mecânica (início século XX), até chegar nas estruturas que temos hoje.

As barragens são de fundamental importância para o desenvolvimento socioeconômico do país. Das 24.092 barragens registradas no Brasil, 69% atendem a finalidades ligadas ao agronegócio (irrigação, aquicultura e dessedentação de animais), 3% servem como contenção de rejeitos de mineração, e um número pequeno, mas que desconsidera volume, de 890 barragens (3,7%) que estão ligadas a geração de energia hidrelétrica (AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2018). Dessa forma, as barragens estão ligadas diretamente a três setores centrais para a geração de riqueza no país, sendo o agronegócio, a mineração e a geração de energia elétrica.

A segurança de barragens é um tema que vem sendo trazido com força no Brasil na década de 2010, principalmente após desastres ambientais seríssimos como os que ocorreram na barragem de Mariana (2015) e na de Brumadinho (2019).

Barragens bem planejadas e bem executadas são menos prováveis de apresentar anomalias, evitando também gastos com intervenções e preocupações com sua segurança e de seus arredores. Essas estruturas são extremamente onerosas para seus construtores, mas seus benefícios são ainda maiores, seja por fins de abastecimento humano e animal, geração de energia ou outros fatores. Já a ruptura de uma barragem trás danos graves para a comunidade que a utilizava, podendo chegar a tornar inabitável o local. Por isso, nunca é demais se precaver e estudar melhores soluções ainda na fase de projeto.

Um dos principais pontos para se pensar durante um projeto de uma barragem é o fluxo através do maciço e da sua fundação, visto que o barramento não se trata de uma obra impermeável, de forma que o fluxo por meio do maciço pode

acarretar em processos erosivos como o fenômeno também conhecido como *piping*. De acordo com Kovács (1981), o *piping* é um fenômeno de erosão interna que ocorre paulatinamente nas barragens de terra, começado com o carreamento de partículas finas pela água. Tal fenômeno inicia-se quando a força de percolação na região de saída da água no barramento excede a resistência de arraste das partículas do solo, sendo, portanto, função das condições de fluxo, da estrutura e características granulométricas do solo constituinte do barramento. Dessa forma um quesito para definirmos uma barragem bem projetada é uma fundação com capacidade de controle de fluxo d'água, pois esta evita fluxos mais intensos responsáveis pelo carreamento de material, contornando os problemas erosivos já citados.

Além disso, existem diversas soluções para a fundação de uma barragem, mas poucas seriam as realmente viáveis, seja por motivo técnicos, econômicos ou construtivos. Nos custos totais de construção a fundação tem um peso bastante considerável, visto a necessidade de escavação que costuma ser um serviço bastante oneroso, e uma vez escavado e construída a estrutura de vedação da base, não será mais viável uma mudança de solução, acarretando num possível mal funcionamento durante toda a vida útil daquela represa.

Nesse estudo serão apresentados casos de barragens cearenses que possuem problemas na sua operação por conta do fluxo d'água, necessitando de intervenções de seus gestores a fim de manter sua segurança. As barragens são Jaburú I, Carão e Olho D'água, a qual será o caso de estudo desse trabalho.

O açude Olho D'Água está localizado no município de Várzea Alegre e funciona como fonte de abastecimento da população da cidade e também para a irrigação do vale aluvionar do riacho e para piscicultura.

Desde o início de operação da barragem Olho D'água que a estrutura tem apresentado diversas anomalias hidráulicas pela fundação, necessitando de inúmeras intervenções por parte da COGERH com o objetivo de atenuar os problemas identificados. Diante das inúmeras ocorrências históricas, existe a possibilidade de que a barragem tenha sido construída com um projeto ineficiente, colocando em risco a integridade da estrutura e a sociedade local a jusante do barramento na cidade de Várzea Alegre.

Dessa forma esse projeto tem como objetivo estudar a percolação pela fundação da barragem fazendo um comparativo dos projetos executivos (pois nesses

apresentam sérias mudanças quanto ao dimensionamento da solução), além de comparar com a intervenção feita pela gestora.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a percolação pela fundação da barragem Olho d'água para avaliar a ineficiência hidráulica da fundação da obra.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Investigar possíveis erros do projeto executivo da barragem Olho d'água.
2. Avaliar soluções que poderiam ter sido implementadas na fase de projeto, com o intuito de atenuar as anomalias de percolação identificadas durante o período operacional da barragem Olho d'água.

1.3 Estrutura Organizacional do Trabalho

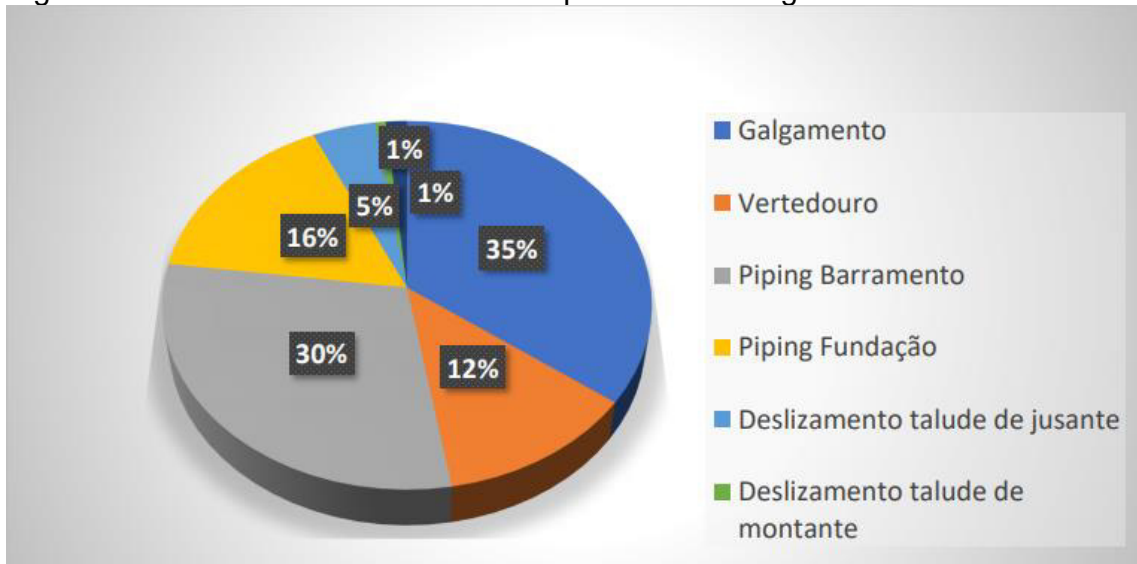
Este projeto está dividido em 5 capítulos, sendo que o presente capítulo apresenta uma introdução sobre o trabalho, descrevendo brevemente o tema e como este será abordado, além dos objetivos que norteiam o trabalho. No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica, na qual apresenta conteúdos que serão base para o entendimento desse estudo, além de esclarecer sobre conceitos sobre tipos de fundações de barragens e seus dispositivos de vedação. Na terceira seção é descrito a parte de materiais e métodos, onde é apresentado o objeto de estudo desse projeto, no caso a barragem Olho D'água. Também nesse capítulo é apresentada a forma como as modelagens foram realizadas, a fim de demonstrar como tais resultados foram obtidos. No capítulo 4, são apresentados e analisados os resultados da pesquisa. Por fim, no quinto capítulo é realizada a conclusão desse trabalho e propostas para futuros projetos relacionados ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Anomalias Geradas por Percolação em Barragens

Diversas são as anomalias geradas pela percolação da água pelo solo, causando problemas estruturais em barragens, comprometendo sua estabilidade. Segundo um estudo de Foster *et al.* (1998), em um levantamento total de 11192 barragens, as estatísticas mostram que houve 171 rupturas de barragens com altura de maior que 15 metros até o ano de 1986, como mostrado na Figura 1 abaixo.

Figura 1 — Percentual de causas de rupturas de barragens.



Fonte: Foster *et al.*, 1998.

Ao analisar o gráfico, pode-se fazer uma distinção de problemas causados por questões estruturais e de dimensionamento e outro por influência de saturação e percolação. Causas como galgamento (35%) e vertedouro (12%) costumam ser causados por um subdimensionamento de cheias, acarretando em mais água do que a estrutura pode barrar. No caso dos vertedouros também é comum à sua erosão pela passagem da água. Já na questão da saturação e percolação, percebe-se no gráfico que *piping* é o responsável por quase metade dos casos de rupturas (46%), sendo pelo barramento 30% e pela fundação 16%. Outra causa de rupturas ligado a esse ponto é a questão da saturação de taludes, visto que ela é a principal responsável pelo deslizamento dessas encostas, seja o de jusante (5%) ou o de montante (1%).

Problemas com *piping* e saturação são causados pela penetração da água na massa de solo podendo causar instabilidade e se não forem amenizados podem causar, como já citado, o colapso da estrutura. As duas anomalias serão explanadas nos próximos tópicos.

2.1.1 Saturação

A saturação de um solo ocorre por diversos fatores, sendo um desses a pressão causada por uma coluna d'água sobre o maciço, o que faz a água se movimentar e preencher seus vazios. Outro fator é a capilaridade, que é um fenômeno no qual a água adentra na massa solo através de micro "tubos" formados pelos espaços entre os grãos, nas quais forças de adesão entre o grão do solo e a molécula da água, faz com que esta se movimente preenchendo o maciço.

Segundo Ortigão (2007), alguns solos formados em ambientes muito secos e os denominados solos porosos (porosidade provocada por lixiviação, isto é, solubilização de compostos pela água de chuva) apresentam deformações volumétricas acentuadas quando encharcados. O fenômeno da colapsibilidade ocorre quando a lixiviação provoca uma alteração estrutural por dissolução ou alteração do material de ligação entre grãos. É comum em regiões áridas e semiáridas onde uma estação chuvosa se alterna com períodos muito secos.

A saturação do maciço pode gerar instabilidade nos taludes comprometendo a segurança de barragens como apresentado por Souza *et al.* (2005), no qual realizou-se um estudo sobre avaliação da saturação do maciço da barragem do Jaburú I, localizada no município de Tianguá-CE. Essa barragem apresentava ressurgência pelo talude de jusante (figura 2), e com água de coloração avermelhada, um indicativo de carreamento de material. Esse processo de carreamento poderia gerar um problema chamado entubamento ou *piping*, que nada mais é do que a formação de um tubo que passa o material retido por meio da barragem. Esse assunto será debatido no próximo tópico.

Figura 2 — Talude de Jusante da barragem Jaburú I com ressurgência.

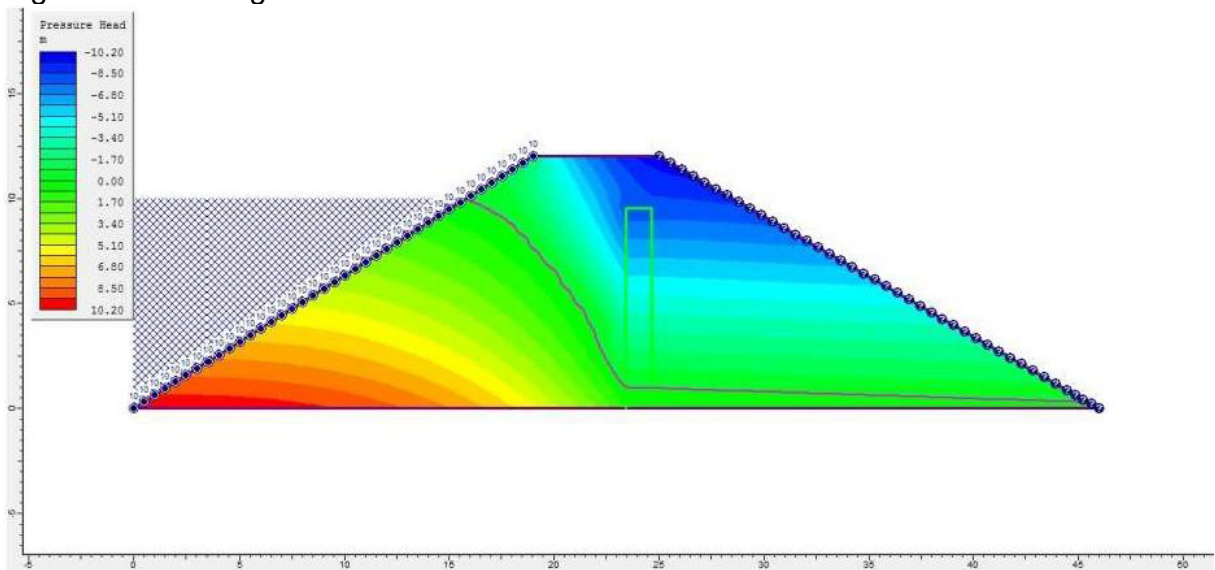


Fonte: Souza *et al.*, 2005.

Nesse estudo Souza *et al.* (2005) chegou à conclusão de que a ineficiência do sistema de drenagem interna da barragem Jaburú I foi devido a colmatação do filtro promovendo a saturação parcial do espaldar de jusante, e conseqüentemente reduzindo a estabilidade do talude. São citados como possíveis causas de acidentes, caso não houvesse qualquer intervenção, o surgimento de uma erosão regressiva através do aterro compactado ou escorregamento de terra do talude de jusante.

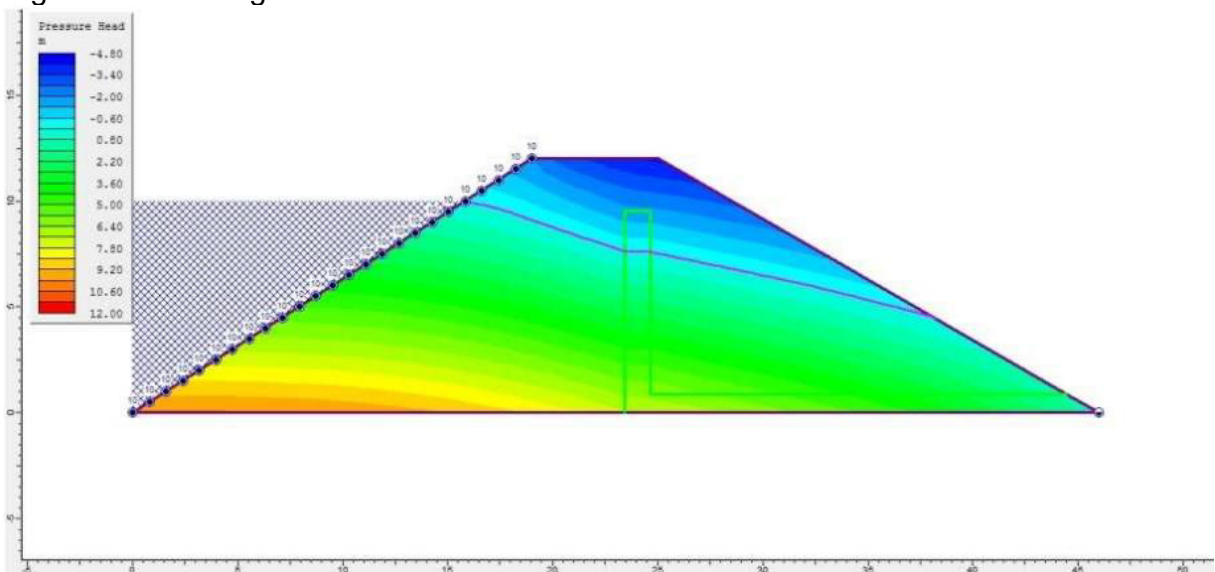
Leme *et al.* (2011) descreve em sua pesquisa como o nível de colmatação de um sistema de drenagem de uma barragem, no caso a de Pesqueiros (Capistrano - CE), influencia na sua estabilidade. Na pesquisa, seus realizadores mostraram que a colmatação do sistema de drenagem foi responsável pela redução do fator de segurança da barragem. Na Figura 3 a seguir, é mostrado um esquema de como seria a questão da poropressão na barragem Pesqueiros supondo o bom funcionamento de seu sistema de drenagem. Nota-se que as pressões são baixas no talude de jusante, aumentando sua segurança. A Figura 4, a seguir, mostra a mesma seção, porém com o filtro colmatado. Nota-se que a pressão no talude de jusante aumentou, como consequência aumentando risco de *piping* e deslizamento do talude.

Figura 3 — Barragem com filtro em estado de funcionamento normal.



Fonte: Leme *et al.* (2011).

Figura 4 — Barragem com filtro colmatado.



Fonte: Leme *et al.* (2011).

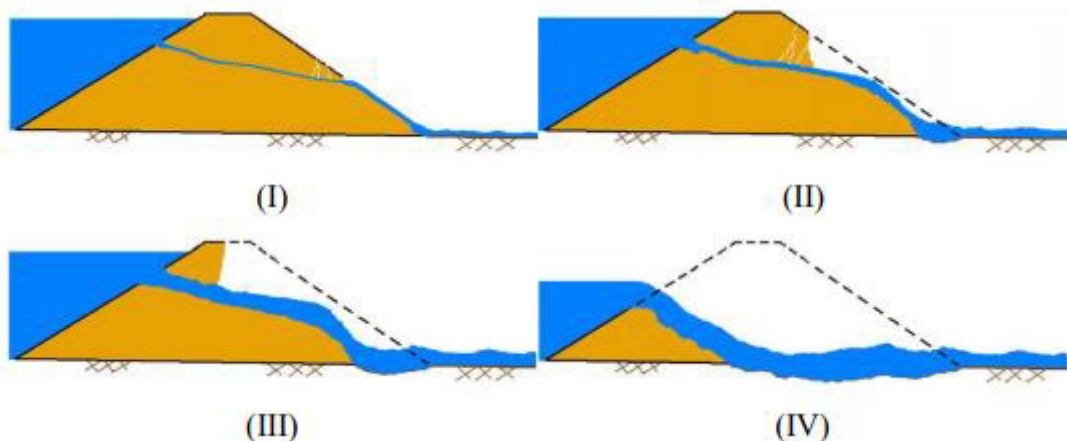
2.1.2 Piping

Segundo Massad (2010) um dos problemas que mais preocupam o projetista é a erosão regressiva tubular ou *piping*, no próprio corpo da barragem ou nas suas fundações. O fenômeno consiste no carreamento de partículas de solo pela água em fluxo, numa progressão de jusante para montante (Figura 5), daí o termo “regressivo” empregado para descrevê-lo. Com o passar do tempo, forma-se um tubo

de erosão, que pode evoluir para cavidades relativamente grandes no corpo das barragens, levando-as ao colapso.

O problema em relação ao fluxo pelo maciço é que se gera uma tendência de diminuição da interação dos grãos do material, reduzindo a coesão aparente entre eles. Segundo Pinto (2006) quando a perda de resistência no solo ocorre de maneira pontual, ocorre erosão, o que tende a aumentar o fluxo no local. Com o aumento do gradiente, esse furo progride para o interior do solo, acarretando no fenômeno de *piping* ou erosão progressiva. Dessa forma, o fenômeno *piping* ocorre em pontos onde o gradiente hidráulico alcança altos valores, muito próximos do gradiente crítico, e com baixas tensões confinantes. Por isso, o pé de talude a jusante é o local mais crítico de uma barragem.

Figura 5 — Processo de formação de *piping*.



Fonte: Gomes (2019) *apud* USACE (2014).

Alguns dos tipos de anomalias mais comuns em barragens são as relacionadas com percolação, a qual pode gerar diversos problemas como saturação, *piping*, redução da estabilidade, colmatagem dos filtros e ressurgência. Dessa forma, caso os problemas persistam e ameacem a segurança da barragem, será necessário o uso alguns mecanismos de controle de percolação, no qual os principais e mais utilizados são drenos internos e poços de alívio, o qual será descrito no tópico 2.5.2.

2.2 Barragens que Apresentam Problemas de Percolação

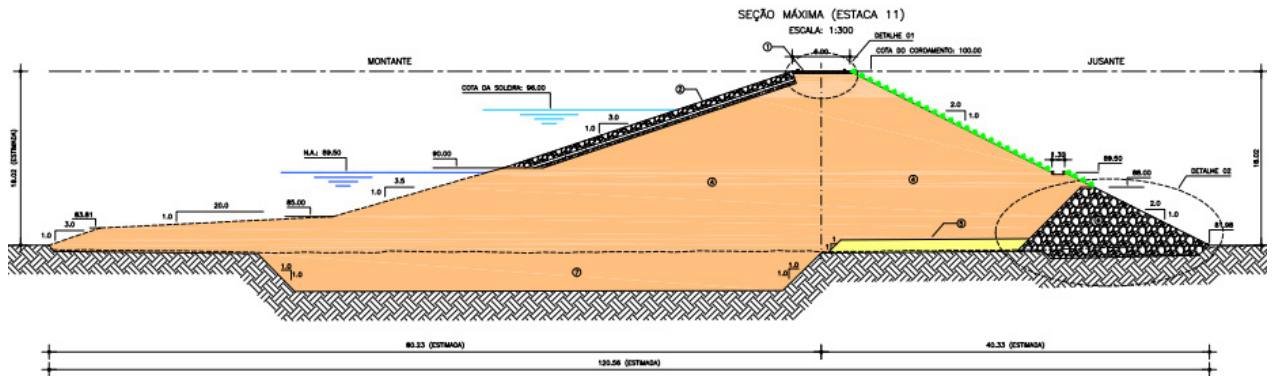
Inúmeras barragens ao longo da história apresentaram e ainda apresentam problemas relacionados à percolação, os quais são os mais comuns nessas estruturas

e também os principais causadores de acidentes. A seguir serão apresentados casos de barragens que apresentam problemas devido à percolação.

2.2.1 Barragem Carão

A barragem Carão barra o rio Acaraú no município de Tamboril, Estado do Ceará. Possui um reservatório com volume de acumulação de $23,23 \times 10^6 \text{ m}^3$, constituindo-se em uma fonte essencial de água para o abastecimento humano e animal da localidade de Tamboril, funcionando ainda, como controladora dos picos de cheias nos invernos rigorosos, além de permitir uma agricultura irrigada e piscicultura.

Figura 6 — Seção máxima da barragem Carão.



Fonte: COGERH - Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM (2008).

A barragem do Carão apresenta um comprimento de coroamento de 336 m e largura de 6,0 m também no coroamento. A altura máxima da barragem é de 18,02 m. A barragem possui um tapete impermeabilizante de 35,50 m.

De acordo com Silva Filho (1991, p. 98),

Estudos realizados no local do barramento permitiram a descrição do sítio geotécnico:

De maneira geral a fundação possui uma camada superficial constituída por areia grossa com pedregulhos - solo sedimentar recentemente transportado ao local por agentes fluviais ou de gravidade, seguida por uma camada de origem sedimentar de deposições pretéritas, constituída por areias argilosas e siltosas, sob a qual define-se o solo residual de gnaiss, constituída por areias argilosas com pedregulhos.

No perfil geotécnico correspondente ao eixo da barragem, observa-se que a camada permeável superior a quem se subordinam em primeira escala os fluxos subsuperficiais, apresenta-se ao longo de 100 m (DNOCS, 1982).

Como a barragem iria se apoiar sobre uma camada de aluvião permeável de espessura razoável quando comparada com a dimensão da obra, dispositivos de controle de percolação foram projetados para a obtenção da redução da vazão e garantir segurança da obra.

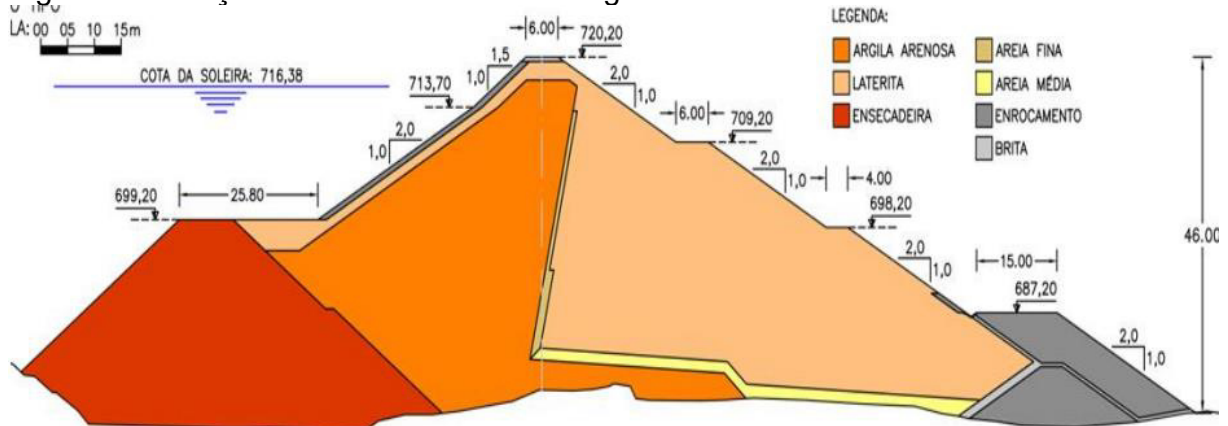
Estudos realizados pelos projetistas da barragem demonstraram que a penetração total na aluvião teria um custo elevado pela necessidade da realização do rebaixamento do lençol freático. Optou-se assim, pela construção de um tapete impermeável a montante, em conjunto com um “cut-off” parcial com aproximadamente um terço de penetração no estrato permeável.

2.2.2 Barragem Jaburú I

A barragem Jaburu I localiza-se entre os municípios de Ubajara e Tianguá, no noroeste do Ceará. A estrutura (Figura 7) é de terra zoneada com núcleo em areia argilosa e espaldar de jusante em solo do tipo latreira, com altura de de 46 m e comprimento de 770 m. (SOUSA, 2014).

A barragem foi construída no período 1981-1983, tendo o seu reservatório atingido, já em 1983, sua capacidade máxima. Desde então, esta obra tem apresentado problemas que têm requerido sucessivas intervenções objetivando a melhoria de suas condições estruturais e garantia de sua segurança.

Figura 7 — Seção com materiais da barragem Jaburú I.



Fonte: COGERH (2010). Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – TOMO I.

Segundo Sousa (2014), a barragem do Jaburu passou por diversas ocorrências desde sua criação até 2013. A seguir será relatado brevemente o que ocorreu em algumas delas:

- No ano de 1998, foi detectado uma fuga de água pela ombreira esquerda. Na ocasião as vazões chegaram a 47 L/s, voltando a gerar problemas em dezembro de 2009 e agosto de 2011.

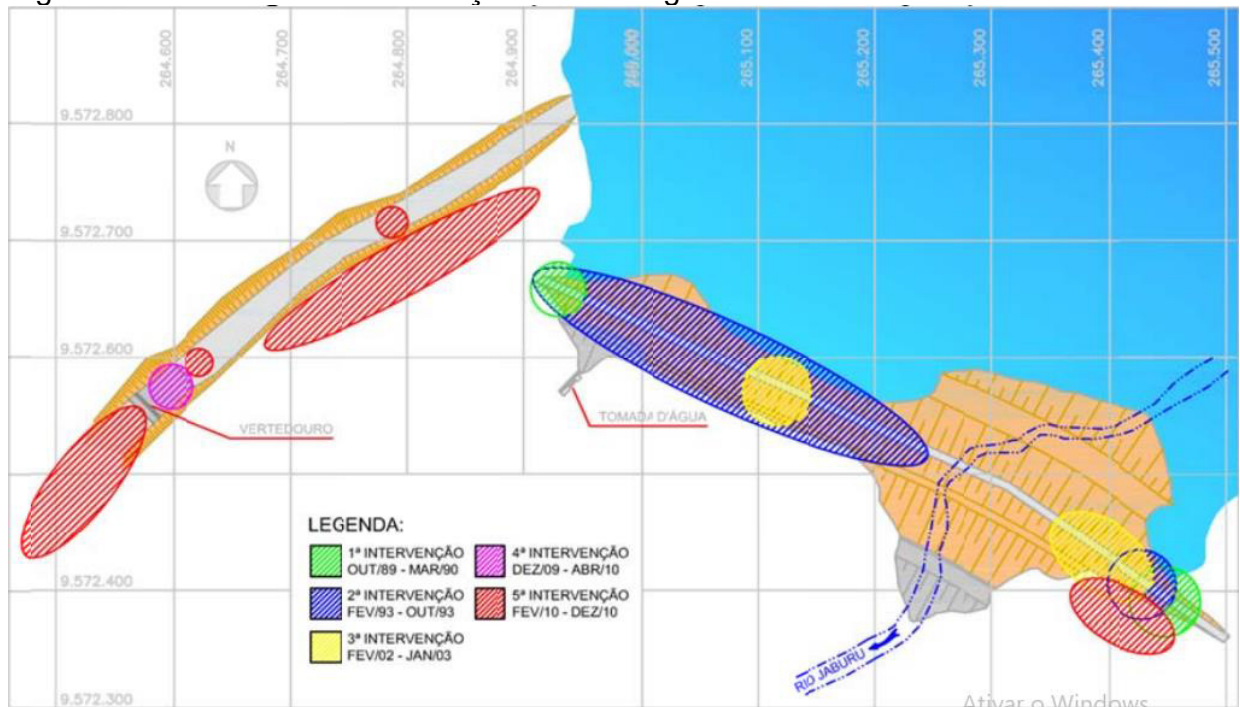
- A região afetada dessa vez foi a ombreira direita, nas proximidades da região de tomada d'água. Foram detectadas quatro insurgências com vazão aproximada de 26 L/s.

- Em 1997, foi identificado um ponto do talude de jusante, 10 metros acima do enrocamento de pé, bastante saturado. Mesmo com intervenção, este ponto voltou a deformar e fraturar, formando um sumidouro.

Dessa forma, vemos que a principal e mais grave anomalia existente na barragem é a percolação pela ombreira esquerda, a qual, mesmo com várias intervenções, continuou a apresentar um fluxo elevado nesse ponto da barragem.

Por conta dessas diversas ocorrências foram feitas intervenções em forma de campanhas coordenadas pelo Governo do Estado do Ceará nos anos de 1989, 1992, 2003, 2009 e 2010 (Figura 8). (SOUSA, 2014).

Figura 8 — Histórico de intervenções na barragem Jaburu I.



Fonte: COGERH (2010). Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – TOMO I.

2.3 Tipos de Fundação de uma Barragem por Interceptação Total

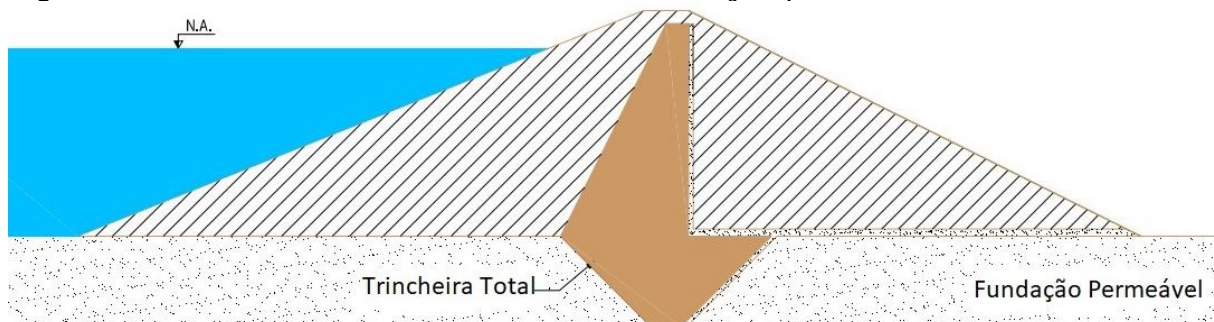
Antes da construção de uma barragem, devem ser feitos estudos no solo sobre o qual a estrutura será construída, sendo o estudo de permeabilidade um dos mais usuais. Como já foi citado antes, a infiltração e fluxo de água no solo pode gerar problemas na sua estrutura, comprometendo a estabilidade de qualquer obra construída sobre este. Dessa forma, ao construir sobre solos muito permeáveis, devem ser estudadas técnicas de diminuir fortemente a vazão de água pela fundação.

Por essa razão foram criadas técnicas de interceptação total na fundação de uma barragem, sendo algumas descritas a seguir.

2.3.1 Trincheira de Vedação *Cut-off*

Nesta técnica de vedação, trincheiras são escavadas na fundação permeável, interceptando integralmente essa feição, e preenchidas com solo de baixa permeabilidade, geralmente sob o núcleo do maciço. Essa solução costuma ser usada em fundações permeáveis de pequena profundidade (OLIVEIRA, 2008).

Figura 9 — Trincheira com total barramento da feição permeável.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

A vedação total é a única que pode ser considerada eficaz em comparação com a vedação parcial, que será explicada mais à frente (CRUZ, 2004).

As vantagens dessa solução são:

- Utilização de equipamentos tradicionais de escavação e terraplenagem;
- Possibilidade de inspeção superficial das paredes e fundo da escavação;
- A trincheira será preenchida com materiais selecionados e compactados sob controle dos construtores.

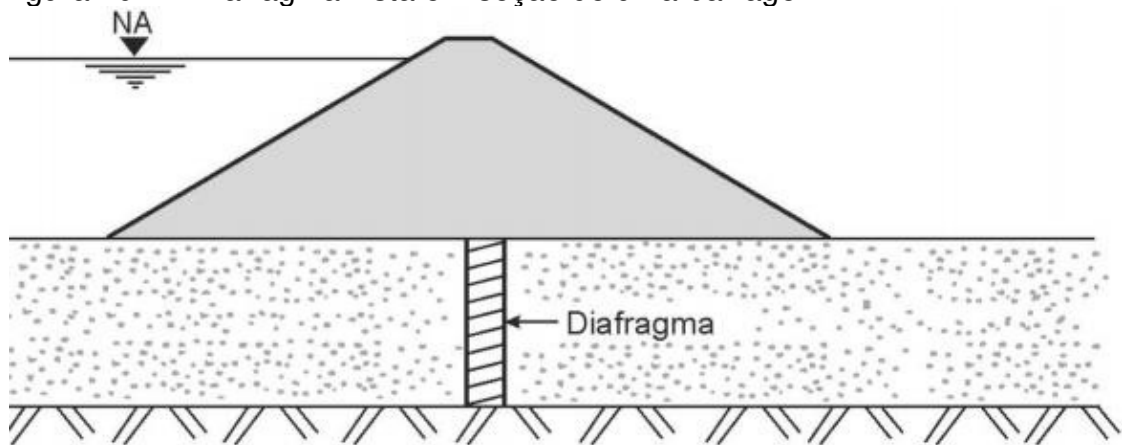
- Possibilita um melhor preparo da superfície da base da trincheira (Assis *et al.*, 2003).

De acordo com Assis *et al.* (2003) a principal dificuldade da trincheira de vedação costuma ser quando existem níveis elevados do lençol freático, o que acaba exigindo drenagem para a execução da escavação (poços de bombeamento, ponteiras, trincheiras de drenagem, etc). Outra grande dificuldade costuma ser a questão da escavação, que costuma ser profunda devido as largas camadas permeáveis de solo, o que eleva consideravelmente os custos da obra, uma vez que quanto mais profundo, mais difícil é de escavar o solo, mais tempo será gasto com a operação e mais material precisará ser transportado.

2.3.2 Parede Diafragma

De acordo com Massad (2010) trata-se de uma solução que consiste na escavação de uma vala estreita, tendo seu preenchimento com concreto (diafragma rígido) ou com uma mistura de solo cimento (diafragma plástico), conforme a Figura 10. A escavação é feita com equipamento mecânico apropriado, até o substrato impermeável, com o uso de lama bentonítica, para manter a estabilidade das paredes da vala. A ferramenta de escavação (*Clam-Shell*) é que dita as dimensões da vala, que é feita em painéis.

Figura 10 — Diafragma vista em seção de uma barragem.



Fonte: Massad (2010).

Segundo Massad (2010) é usual trabalhar com painéis de 0,80 m de espessura e com extensão de alguns metros (3 m), que são escavados salteados, primeiramente os de números pares e, após a cura, os ímpares (Figura 11). Tubos circulares retiráveis delimitam o painel durante sua produção. Pode-se também escavar os painéis sequencialmente e instalar juntas de vedação entre painéis.

Figura 11 — Painéis alternados.



Fonte: Massad (2010).

Uma das principais vantagens das paredes diafragma plásticas com relação às rígidas é a melhor capacidade de adequação às deformações do maciço da barragem, tornando-a menos susceptível ao trincamento. (OLIVEIRA, 2008).

Conforme Cruz (2004), diafragmas rígidos, plásticos, colunas secantes de concreto, colunas injetadas, dentre outras soluções, têm sido consideradas eficientes no controle de fluxo em formações arenosas e em cascalho. O mesmo alerta para a pouca experiência brasileira na construção destas soluções, as quais devem ser avaliadas com bastante cuidado.

2.4 Tipos de Fundação de uma Barragem por Interceptação Parcial

Uma fundação feita com interceptação parcial significa que o material escolhido para reduzir a vazão não irá restringir o fluxo por meio de toda sua feição permeável, apenas dificultá-lo em uma parte, geralmente com o aumento caminho de percolação.

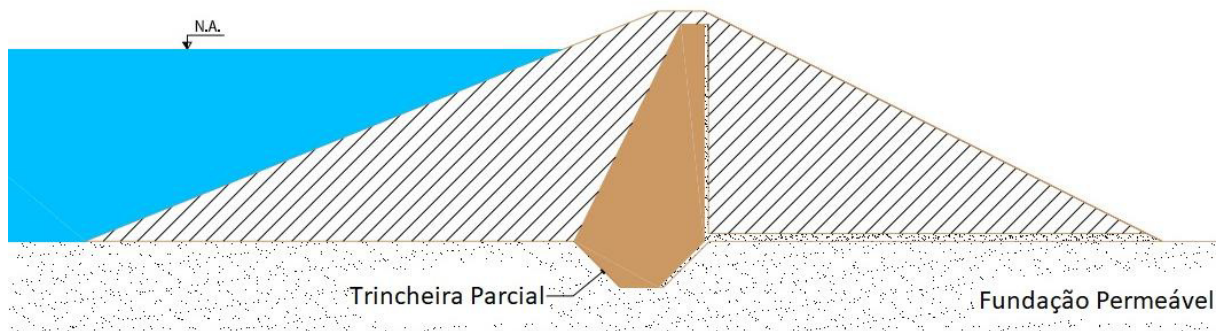
Diversos são os problemas que podem dificultar a escavação de uma fundação de barragem até a feição impermeável, tornando-a cada vez mais onerosa, sendo este um dos motivos de se escolher por uma vedação parcial. Dentre esses problemas o nível d'água e os custos com drenagem para rebaixá-lo é um dos mais comuns. Outro problema não tão comum, mas que causa sérias dificuldades é a existência de matacão.

A seguir serão apresentados os principais tipos de construção de fundação por interceptação parcial.

2.4.1 Trincheira de Vedação Parcial

De descrição idêntica à trincheira de vedação total, exceto pelo fato de que nesta solução a trincheira não é escavada até o final da feição permeável, e sim por apenas uma parte dela. O objetivo desta solução é aumentar o caminho de percolação da água, conseqüentemente aumentando a perda de carga e diminuindo a subpressão.

Figura 12 — Trincheira com barramento parcial da feição permeável.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

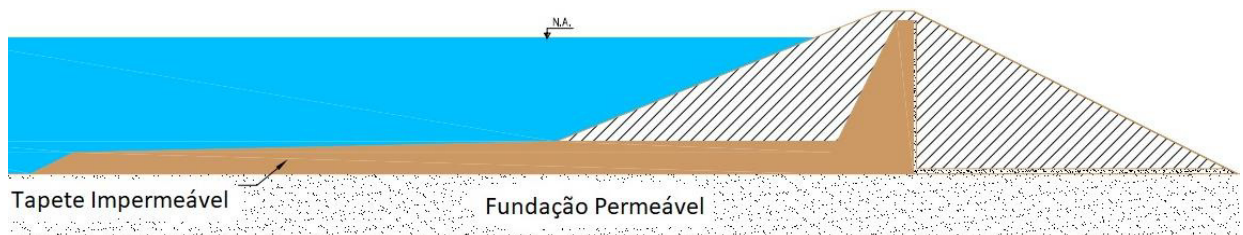
Se a permeabilidade do solo da fundação da barragem em todas as direções for semelhante, sem que ela decresça com a profundidade, a trincheira de vedação parcial como solução para problemas com vazão e subpressão será pouco eficaz. A teoria e a prática mostram que para se ter resultados apreciáveis em solos homogêneos permeáveis seria necessário penetrar cerca de 95% da espessura total da camada (ASSIS *et al.*, 2003).

De acordo com Cedergren (1989), uma trincheira que se estende até 50% da camada permeável da fundação da barragem reduzirá em apenas 15% a vazão. Para uma trincheira que chegue a 80% de penetração, a vazão será reduzida para algo entorno de 50%. Logo, a eficácia dessa solução é muito baixa, considerando o esforço necessário para produzi-la (escavação, transporte de material, compactação). Assim, não é muito recomendada a sua utilização como estrutura de controle de fluxo.

2.4.2 Tapete Impermeável a Montante

Esta solução consiste em uma camada de solo de baixa permeabilidade compactada (aterro) executado à montante da barragem combinado com o sistema de drenagem à jusante. É comumente adotado quando as camadas de solo permeável da fundação possuem considerável profundidade e sua permeabilidade é moderadamente baixa (OLIVEIRA, 2008).

Figura 13 — Tapete impermeável.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Da mesma forma que a trincheira de vedação parcial, sua finalidade é aumentar o caminho de percolação da água, aumentando a perda de carga e diminuindo a subpressão.

A espessura do tapete pode ser calculada por meio do traçado das redes de fluxo ou por meio de formulações matemáticas (ASSIS *et al.*, 2003).

A desvantagem da utilização de tapetes como solução para problemas de percolação está no fato de, durante a fase construtiva, pode-se gerar trincas por ressecamento ou por deformações diferenciais por conta do enchimento do reservatório, dessa forma reduzindo substancialmente sua eficácia (ASSIS *et al.*, 2003).

Segundo Cruz (2004), os tapetes vedantes constituem uma solução “barata” para o controle de fluxo pela fundação da barragem, no entanto, é passível de não ser eficiente se não for executada com cuidados especiais.

2.5 Dispositivos Drenantes

Tanto trincheiras quanto poços de alívio são dispositivos dispostos à jusante da vedação profunda, no qual seu principal objetivo é drenar a água que fluem

através do maciço e aliviar as subpressões geradas pela carga hidráulica do reservatório (OLIVEIRA, 2008).

De acordo com Cruz (2004), trincheiras e poços de alívio serão eficazes apenas se a permeabilidade do material de enchimento for 10 vezes ou mais permeável do que o material de fundação.

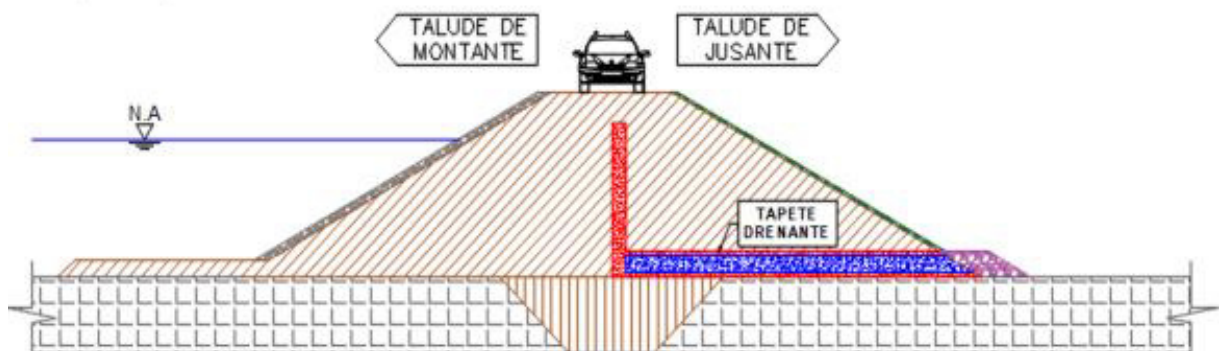
Uma das principais vantagens das trincheiras e poços de alívio é a praticidade com que podem ser adicionadas em caso do projeto inicial ser insuficiente para o controle do fluxo. Mas Cruz (2004) alerta para o fato de que esses dispositivos nunca devem ser utilizados como principal ferramenta de controle de fluxo e sim como “uma segunda linha de defesa”.

2.5.1 Tapetes Drenantes

Segundo Silva Filho (1991), os tapetes drenantes (Figura 14) são construídos a jusante de barragens assentadas sobre fundações permeáveis. Este dispositivo é executado de forma a possuir materiais de permeabilidade e peso suficientes para desempenhar as funções de filtragem e de drenagem.

O tapete drenante deve possuir permeabilidade suficiente para não realizar resistência considerável ao fluxo e peso suficiente para estabilizar as subpressões. Uma possibilidade de construção desse dispositivo é com uma gradual redução de sua espessura, visto que, ao se afastar do pé de jusante da barragem, tem-se uma tendência de redução do gradiente de saída. Os critérios de filtragem devem ser seguidos a fim de que não ocorra arrastamento de material da fundação podendo gerar o já citado problema de *piping*.

Figura 14 — Tapete drenante.



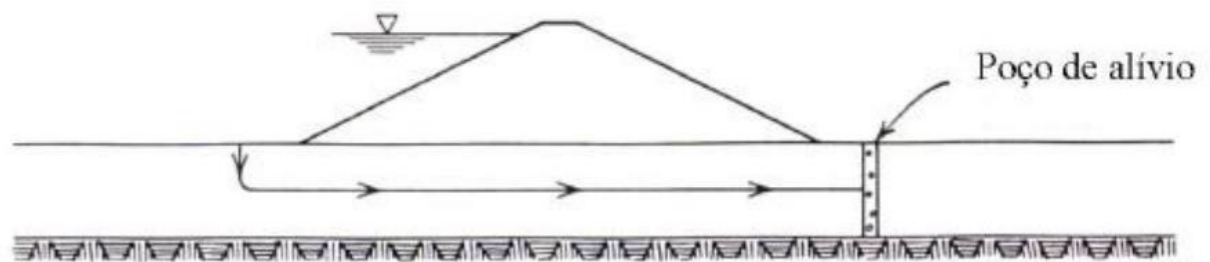
Fonte: Cordeiro (2017).

2.5.2 Poços de Alívio

Poços de alívio são poços abertos preenchidos com material drenante, com o objetivo de controlar e direcionar o fluxo de água. Com esse dispositivo, intercepta-se a saída d'água, impedindo a erupção dessa água próximo ao pé de talude jusante, o que pode acarretar o fenômeno de areia movediça ou ao levantamento do solo (MASSAD, 2010).

Segundo Massad (2010), costuma-se trabalhar com poços de 20 a 50 centímetros de diâmetro e espaçamentos de seus centros de 2 a 4 metros, podendo atingir o comprimento de toda a camada permeável ou apenas parte dela.

Figura 15 — Poço de alívio.



Fonte: Figueiredo (2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Estudo de caso barragem Olho D'água

3.1.1 Localização da Barragem Olho D'água

A barragem Olho D'água está localizada a cerca de 8 quilômetros a montante da cidade de Várzea Alegre, ao sul do estado do Ceará (Figura 14). Ela pertence ao sistema sub-bacia do rio Jaguaribe e tem como função a regularização do rio Machado, possibilitando a criação de um reservatório com $21 \times 10^6 \text{ m}^3$ para fins de abastecimento de municípios vizinhos.

Figura 16 — Localização geográfica Município de Várzea Alegre.



Fonte: COGERH - Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM (2008).

3.1.2 Descrição da Obra

O presente estudo tem como propósito avaliar o fluxo pela fundação da barragem Olho D'água (Figura 15), que por um longo período passou por inúmeras anomalias de natureza hidráulica, as quais serão descritas no item 3.4.

Figura 17 — Vista da barragem Olho D'água.



Fonte: COGERH - Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM (2008).

A elaboração do projeto da barragem teve início com a ordem de serviços emitida pelo DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas, em junho de 1988, sendo feito pela empresa Aguasolos – Consultora de Engenharia Ltda. A construção foi realizada pelo 3º Batalhão de Engenharia de Construção, começando em outubro de 1993 e sendo concluídas em março de 1998 (COGERH, 2008).

Atualmente, a manutenção e a operação do empreendimento ficam a cargo da COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Esse órgão é responsável por manter um agente local com a finalidade de realizar serviços de zeladoria, operação de estruturas hidromecânicas e aferição de dispositivos de medição, como réguas limnimétricas por exemplo (COGERH, 2008).

3.1.3 Dados da Barragem

A barragem apresenta uma extensão máxima pelo coroamento de 381,00 metros, sendo 6,00 m de largura no mesmo (Tabela 1), como apresentado na Figura 18. A barragem é bastante robusta apresentando uma espessura máxima de 310,00

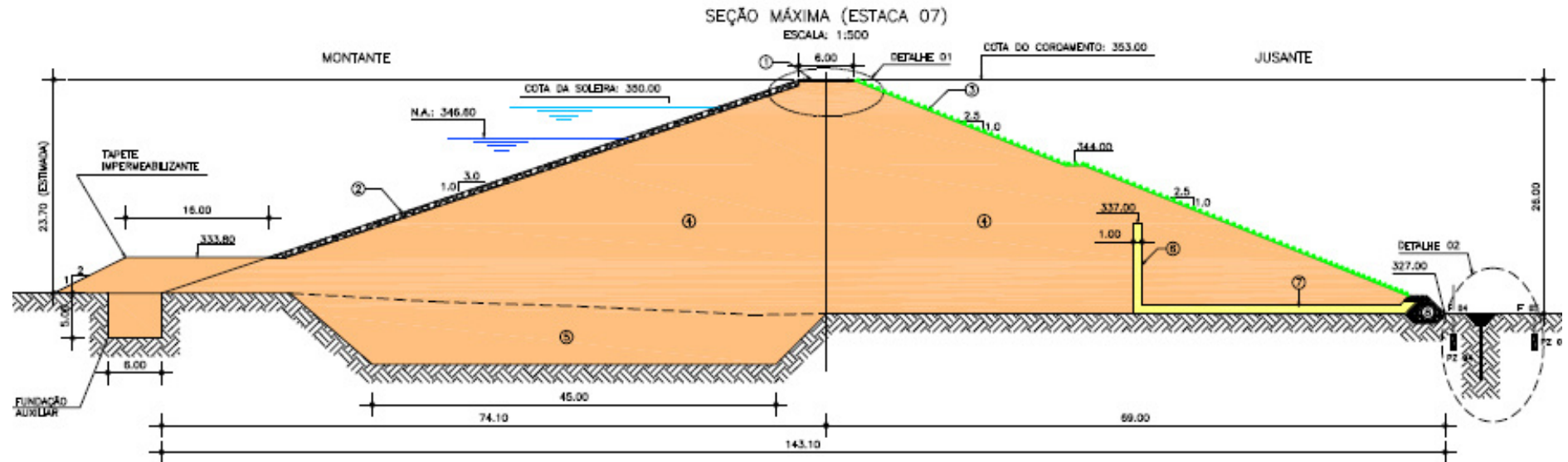
metros. A estrutura apresenta um tapete impermeabilizante com comprimento de 16,00 metros, além de um *cut-off* de 45,00 de comprimento na parte inferior, com profundidade de aproximadamente 8,5 metros.

Tabela 1 — Quadro resumo barragem Olho D'água.

Nome	Olho D'água
Município	Várzea Alegre
Rio	Riacho Machado
Data de Construção	Início: outubro 1993; Fim: Março 1998
Coordenadas	458.750 W 9.249.600 S
Volume de Acumulação (m ³)	21X10 ⁶
Volume Afluente (m ³)	11,09 X10 ⁶
Vazão Regularizada (m ³ /s)	0,12
Tipo	Terra Zoneada
Cota de Coroamento (m)	353,00
Largura da Crista (m)	6,00
Altura Máxima (m)	26,00
Inclinação Taludes (m)	Montante; 1:3,0; Jusante: 1:2,5; com uma berma de 2,0 m na cota 343,00.
Vertedouro	Canal Escavado em Rocha
Largura Vertedouro	50,00

Fonte: O autor (2021).

Figura 18 — Seção Máxima barragem Olho D'água.



Fonte: COGERH (2008) - Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM.

3.2 Pesquisa Bibliográfica

Para realização deste trabalho de conclusão de curso foram utilizados os projetos originais da barragem, além de relatórios de inspeções que ocorreram ao longo dos anos, disponíveis no acervo físico da COGERH.

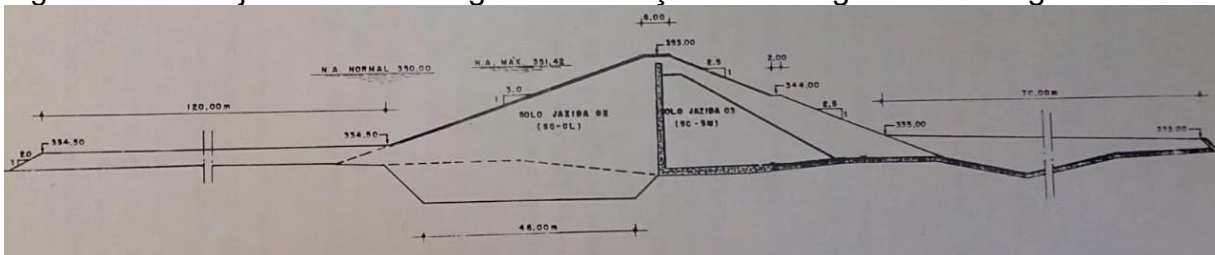
3.3 Alternativas de projeto da barragem Olho D'água

Ao longo da fase de projeto, a barragem Olho D'água passou por algumas mudanças, não só estruturais, mas também de empresas responsáveis pelo seu dimensionamento. Dessa forma, foi produzido mais de uma versão de alternativa de dessa estrutura, as quais serão descritas no decorrer desta seção.

a) Alternativa Aguasolos (1988).

No projeto da empresa Aguasolos, a qual foi a primeira a gerar uma solução para a barragem, foram escolhidos diversos dispositivos de controle de fluxo d'água com a finalidade de manter a estabilidade e conseqüentemente a segurança da estrutura. Foi proposto em construir um tapete impermeabilizante a montante na ordem de 120 metros (Figura 19), sendo esta solução pertinente devido à grande disponibilidade na região de solos de baixa permeabilidade. Além disso, a jazida se encontrava a apenas 1,35 km da obra e esse tapete pode ser construído com equipamentos tradicionais de terraplenagem, o que implica em vantagens econômicas e de prazo.

Figura 19 — Projeto Executivo Aguasolos: Seção da barragem Olho D'água.



Fonte: Aguasolos (1988).

A jusante foi projetado um tapete drenante, com cerca de 70 metros, com a função de drenar, filtrar e prover uma sobrecarga na região do pé de talude. O tapete na sua função drenante-filtrante terá a função de captar as águas que percolariam pela fundação, conduzindo-as ordenadamente para fora da região da obra, além de evitar o carreamento das partículas finas da fundação. Na questão da sobrecarga, foi considerado devido a existência de uma camada superficial argilosa sobrejacente a camadas arenosas, pressões hidráulicas provenientes do fluxo por camadas mais permeáveis poderão atuar sobre a camada impermeável agindo no sentido de levantá-la (efeito *blow-up*), assim o tapete deverá exercer um peso maior que a pressão, combatendo o fenômeno descrito.

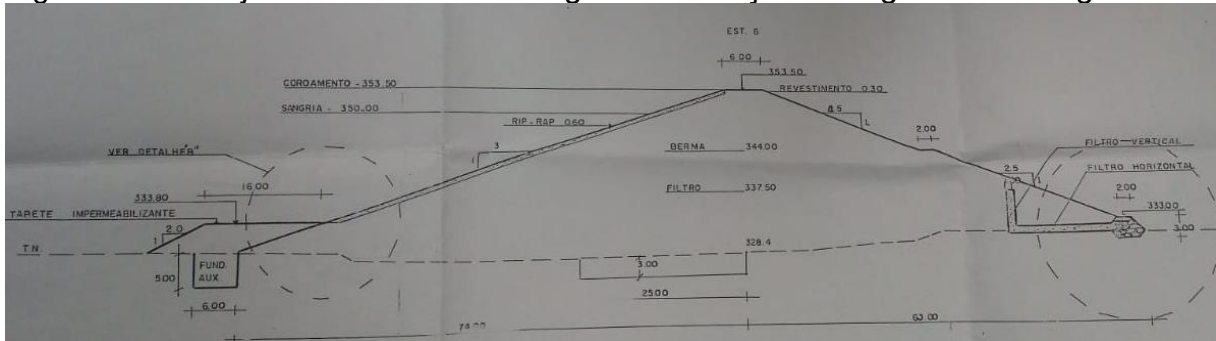
Como dispositivo de drenagem interna foi projetado um dreno do tipo chaminé, posicionado no eixo da seção transversal, no qual o eixo horizontal possui uma largura de 1,00 metro, enquanto o vertical possui a espessura de 1,50 metro. Esta solução tem como objetivo interceptar o fluxo que possa ocorrer através de qualquer fissuramento do maciço que eventualmente ocorra devido a recalques diferenciais nas zonas de passagem do plano aluvionar para as ombreiras.

Além desses dispositivos de controle de fluxo, também foi planejado a execução de um *cut-off* trapezoidal de 46,00 metros de extensão da base menor. Os projetistas reconhecem a baixa eficácia para o controle de fluxo da solução no cenário em que ela se encontra, onde há uma camada com baixa permeabilidade na parte superior e uma camada permeável abaixo desta. A escolha para a solução foi justificada apenas para se ter certeza de uma continuidade de material argiloso homogêneo e bem compacto na camada superior. Essa atitude do projeto tem objetivo de prevenção e não de solução para controle do fluxo pela fundação.

b) Alternativa CEC Engenharia

O projeto executivo da empresa CEC Engenharia, por sua vez, possui um tapete impermeabilizante de 16,00 metros (Figura 20), cujo a razão da drástica diminuição foi a estrutura gerada para a água percorrer um maior caminho de percolação visto que o dreno foi recuado do centro da barragem em direção a jusante. Além disso, o projeto apresenta um *cut-off* que, como o tapete impermeabilizante, também foi reduzido e foi escolhido uma estrutura de 25,00 metros de comprimento com 3,00 metros de profundidade.

Figura 20 — Projeto Executivo CEC Engenharia: Seção barragem Olho D'água.



Fonte: CEC Engenharia (1994)

c) Alternativa da COGERH

A barragem Olho D'água já apresentava problemas desde seus primeiros anos de operação, necessitando de intervenções imediatas pela COGERH a fim de manter sua segurança. A estrutura já apresentava problemas como fuga d'água a jusante e erosão no talude como mostra a Figura 21. Além disso, foi registrado que a barragem apresentava vazões de percolação muito elevadas, chegando a atingir 25,46% da vazão regularizável, com isso, o órgão fiscalizador chegou à conclusão que o tapete impermeabilizante construído não reduziu a percolação na magnitude desejada. (COGERH, 2007).

Figura 21 — Revência em área à jusante da barragem.



Fonte: COGERH – Relatório Anual Segurança de Barragens – Riscos e Inspeções 2006 (2007).

A fim de reduzir os danos ocorridos na estrutura e aumentar a sua segurança, foram realizadas algumas obras em maio de 2006, destacando-se a parte de serviços preliminares, instrumentação e drenagem. No que se refere a instrumentação foi realizada a instalação de piezômetros e medidores de nível d'água. Com relação a drenagem foram construídos poços de alívio, trincheiras de drenagem (Figura 22) e caixas de medição de vazões de percolação. (COGERH, 2007).

Figura 22 — Reparos na barragem Olho D'água.



(a) Poço de alívio vista lateral



(b) Poço de alívio vista superior

Fonte: COGERH – Relatório Anual Segurança de Barragens – Riscos e Inspeções 2006 (2007).

3.4 Parâmetros Geotécnicos

De acordo com Aguasolos (1988), na região da fundação ocorre um depósito superficial, com cerca de 3,0 a 4,5 metros de espessura, de solo argilo-arenoso de consistência mole a muito rija, com permeabilidade média de 10^{-6} cm/s e com ângulo de atrito interno igual a $40,5^\circ$.

Abaixo da camada argilosa ocorrem depósitos de solos areno-argilosos, ou siltosos, de textura fina a média, e nas camadas mais profundas areias grossas surgem próximos ao contacto com a alteração a rocha. Esse depósito arenoso tem espessura média de 25,0 metros com permeabilidade variando entre $1,4 \times 10^{-5}$ a $1,1 \times 10^{-3}$ cm/s (utilizou-se a média desses valores para fins de cálculo). O ensaio de cisalhamento direto mostrou uma coesão nula e um ângulo de atrito interno próximo de 32° (Tabela 2). (AGUASOLOS, 1988).

A cerca de 25,0 metros de profundidade encontram-se o contato com o gnaiss decomposto, com baixa recuperação e baixo poder de infiltração. Por fim o substrato rochoso não foi encontrado em sondagens até 30,0 metros de profundidade. (AGUASOLOS ,1988).

Para a construção do maciço da barragem foram estudadas três jazidas e selecionadas duas delas por questões de custos e qualidade do material.

Na Tabela 2 encontra-se os parâmetros dos solos utilizados para a construção da barragem. Das três jazidas estudadas dos estudos básicos, apenas duas apresentaram viabilidade técnica e econômica, no caso elas eram denominadas de jazida 02 e jazida 03. Desse documento foram retidos os valores para o solo de fundação, maciço compactado e núcleo.

Por sua vez, para os itens de tapete a jusante, filtro de areia e enrocamento, foi utilizado valores da literatura, visto que algumas partes dessa estrutura não chegaram a serem construídas, como o tapete drenante.

Tabela 2 — Parâmetros Geotécnicos.

Zona	Y (Kn/m ³)	K (m/s)	c' (Kpa)	φ' (°)	$\frac{ky'}{kx'}$
Fundação	19,5	$5,6 \times 10^{-6}$	0	32	0,05
Enrocamento	21,0	1×10^{-3}	0	40	1,00
Filtro de Areia	19,5	$1,4 \times 10^{-3}$	0	32	1,00
Maciço Compactado	20,2	$5,6 \times 10^{-8}$	33	27,3	0.11
Núcleo	20,2	$2,2 \times 10^{-8}$	33	27,3	0.11
Tapete a jusante	20,0	$1,4 \times 10^{-3}$	0	30	1,00

Fonte: O autor (2021).

Para os parâmetros de coesão e ângulo de atrito, foram realizados dois ensaios de cisalhamento direto no solo da jazida 02, um na umidade natural e outro saturado, obtendo-se resultados distintos. Para fins de segurança foram adotados os menores valores para ambos parâmetros.

Na jazida 03, não foi realizado ensaio de cisalhamento, visto que seu material fica confinado dentro do núcleo da barragem, dessa forma apenas foi repetido

os valores dos parâmetros coesão e ângulo de atrito da jazida 02, visto que os solos das duas localidades apresentam características bastante semelhantes.

3.5 Modelagem Numérica

Com o intuito de investigar as condições de segurança da barragem de terra em função do fluxo d'água através da sua fundação e sua influência na estabilidade dos taludes, foi utilizado o software GeoStudio 2021, desenvolvido pela GEOSLOPE International Ltd, mais precisamente em seus módulos "SEEP/W" para a análise de fluxo e "SLOPE/W" para a análise de estabilidade dos taludes.

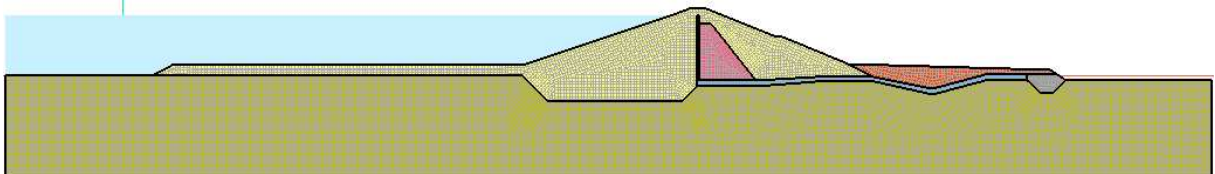
3.5.1 Modelo para Análise de Fluxo

A geometria analisada neste trabalho corresponde a seção máxima da barragem Olho D'água, situada na estaca 07, de acordo com Plano de Operação e Manutenção da mesma. Foram utilizadas as três variantes da seção, sendo a de Aguasolos (Figura 23), CEC (Figura 24) e COGERH (Figura 25).

Pronta a geometria da barragem, foram inseridos no modelo os materiais correspondentes às diferentes regiões existentes, como fundação, corpo da barragem, filtro, núcleo da barragem, e no caso do projeto da Aguasolos tapete impermeabilizante e drenante.

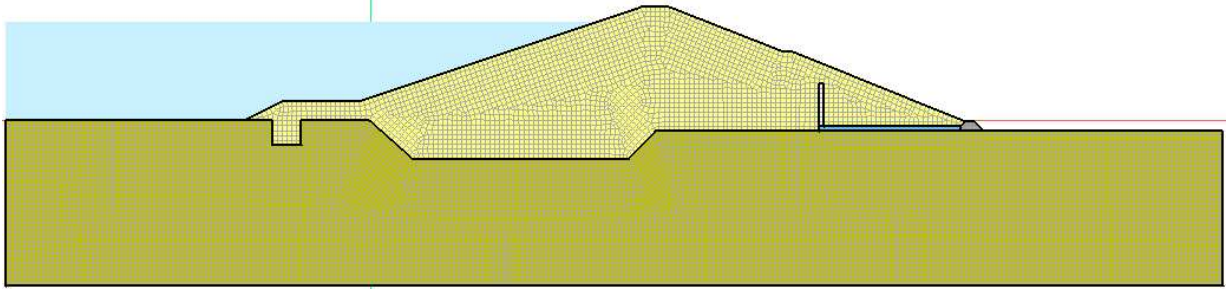
Em relação às condições de contorno, em ambas simulações foi considerado o fluxo em regime permanente, com uma carga hidráulica de 20,4 metros, que está na cota do vertedouro (336,2 m), ou seja, o reservatório estaria operando no seu limite máximo.

Figura 23 — Modelagem da alternativa da Aguasolos no software.



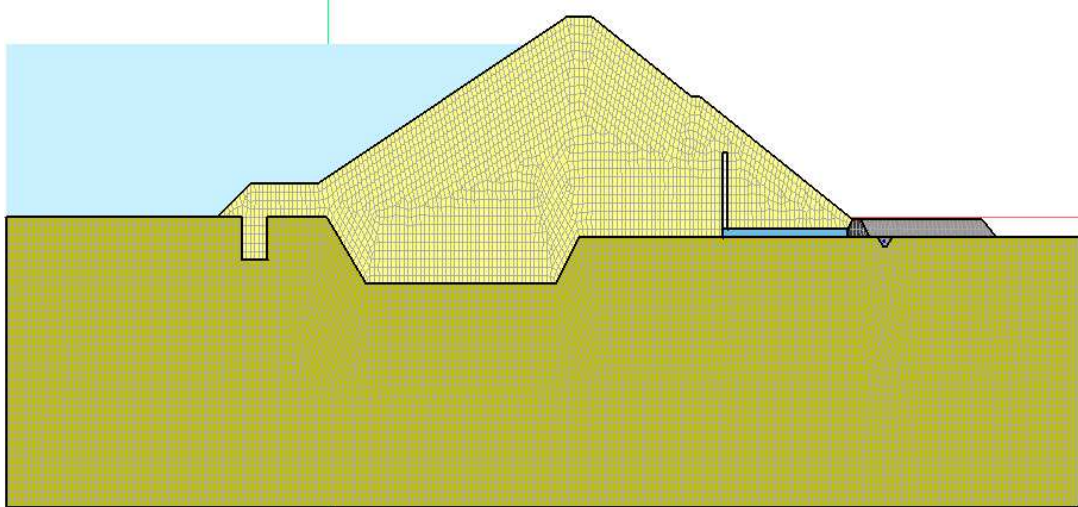
Fonte; O autor (2021).

Figura 24 — Modelagem da alternativa da CEC Engenharia no software.



Fonte: O autor (2021).

Figura 25 — Modelagem da alternativa da COGERH no software.



Fonte: O autor (2021).

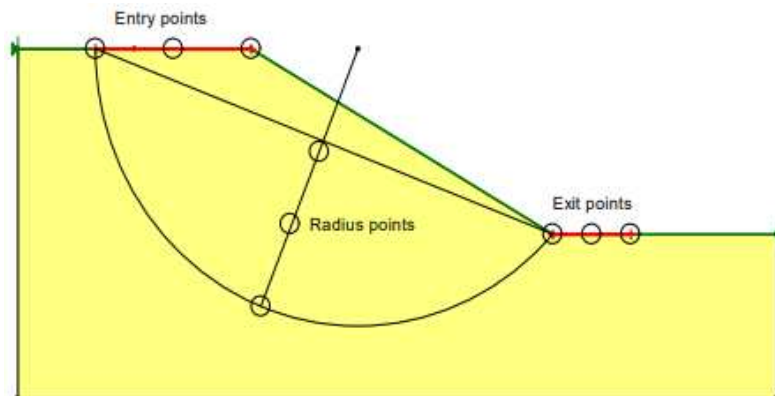
3.5.2 Modelo para Análise de Estabilidade

O SLOPE/W é um programa comercial, desenvolvido pela Geo-slope international Ltd, no qual utiliza a teoria do equilíbrio limite para calcular o Fator de Segurança de taludes em solo ou rochas. Desta forma, a deformação do material não é levada em consideração, e a condição de equilíbrio é normalmente satisfeita pelo equilíbrio de forças e momentos.

No *software* SLOPE/W, foi utilizado o método de Morgenstern-Price (1965) no cálculo do fator de segurança. Este método de cálculo é um dos mais rigorosos de análises de estabilidade, e segundo Vecci (2018) as condições de estabilidade satisfazem todas as condições de equilíbrio de momentos e de forças simultaneamente. A massa de potencial deslizamento é dividida em fatias infinitesimais, necessitando-se do auxílio de um computador para realização dos cálculos. Nele são consideradas as forças normais e cisalhantes entre fatias.

No método de entrada e saída, o SLOPE / W conecta um ponto ao longo da área de entrada com um ponto ao longo da área de saída para formar uma linha. No ponto médio desta linha de conexão, o programa cria uma linha perpendicular, na qual pontos de raio são criados ao longo de seu comprimento para formar o terceiro ponto necessário de um círculo. Este ponto de raio junto com os pontos de entrada e saída são usados para formar a equação de um círculo (Figura 26).

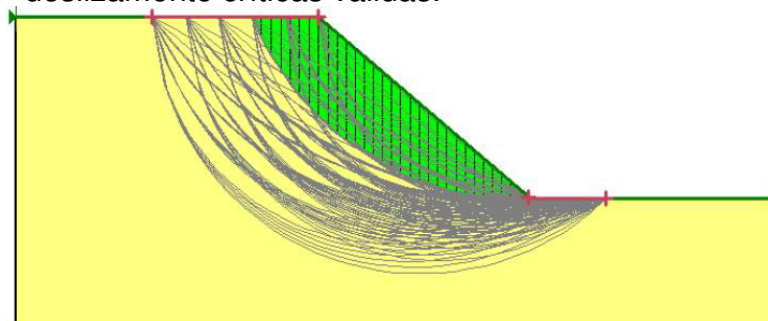
Figura 26 — SLOPE/ W gerando as superfícies de deslizamento.



Fonte: GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD (2017).

A equação de um círculo fornece o centro e o raio do círculo, a superfície de deslizamento de teste é então tratada da mesma maneira que o método convencional de grade e raio e, como resultado, o método de entrada e saída é apenas uma variação do outro. Vale ressaltar que o número de incrementos de raio também é uma variável especificada. Dessa forma, são geradas diversas superfícies de deslizamento como é apresentado na Figura 27. (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2017)

Figura 27 — Exibição de todas as superfícies de deslizamento críticas válidas.



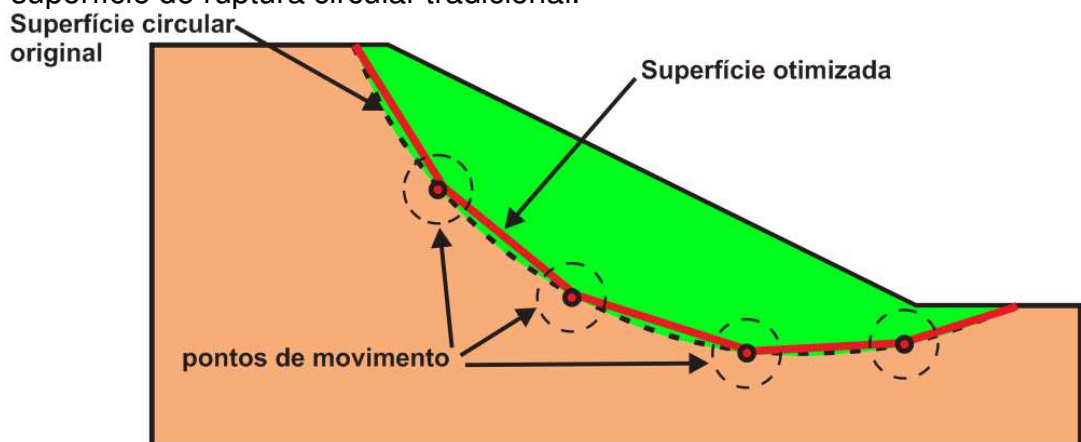
Fonte: GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD (2017).

O talude ao qual foi o estudo de estabilidade foi direcionado é o talude de jusante com uma inclinação de 1:2,5 e uma berma de 2 metros de largura na cota 343,00.

No referente à superfície potencial de ruptura (SPR), utilizou-se uma SPR “não circular”, obtida por meio de um processo de otimização através de uma sub-rotina do programa.

Além do método tradicional de cálculo, o programa também realiza melhorias na superfície de ruptura encontrada. O que ocorre é uma redução do coeficiente de segurança através de uma série de interações, nas quais a superfície é dividida em segmentos que sofrem alterações angulares por meio de um procedimento estatístico baseado no método de Monte Carlo. Dessa forma, a rotina é repetida até se adquirir uma superfície de ruptura não circular de menor coeficiente de segurança, como mostra a Figura 28.

Figura 28 — Comparativo de uma superfície de ruptura otimizada e uma superfície de ruptura circular tradicional.



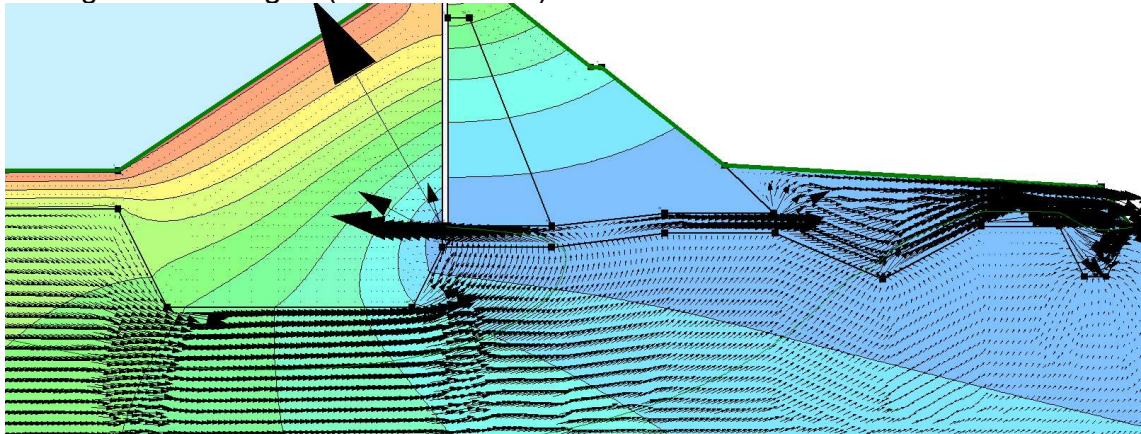
Fonte: Vetor Engenharia Ltda (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Projeto Executivo AGUASOLOS.

Com base nos resultados obtidos pelas modelagens de fluxo realizadas na alternativa de projeto da empresa AGUASOLOS, pode-se observar que a proposta apresenta um bom comportamento quanto a drenagem do fluxo que percola pela fundação, com este contornando ao longo tapete impermeável e sendo direcionado para o tapete drenante a jusante da barragem, como mostra a Figura 29 a seguir, no qual apresenta graficamente os vetores velocidades do fluxo.

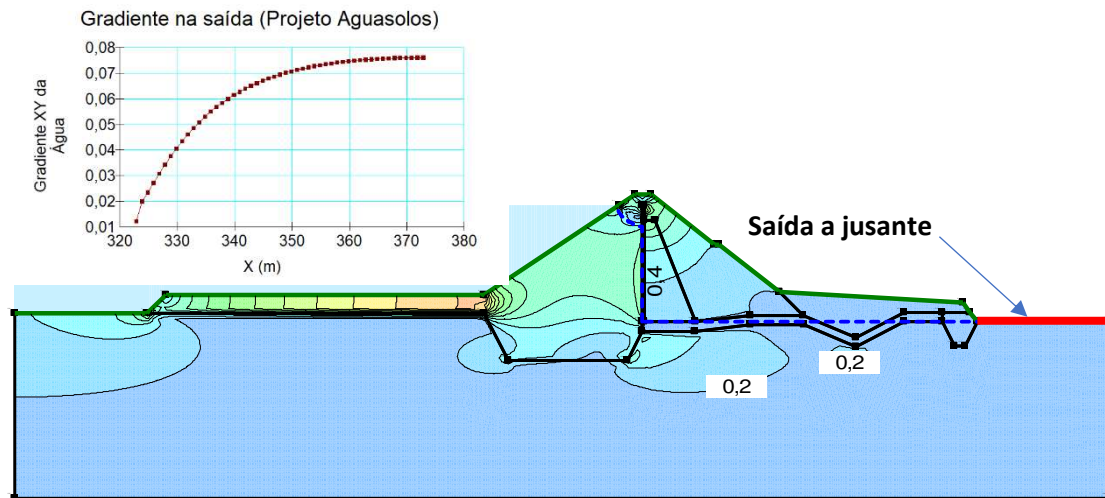
Figura 29 — Detalhe dos vetores de velocidade do fluxo pela fundação da barragem olho d'água (AGUASOLOS).



Fonte: O autor (2021).

Além da eficiência da drenagem do sistema projetado, podemos observar ainda que os gradientes hidráulicos desenvolvidos na proposta da alternativa da AGUASOLOS apresentaram valores relativamente baixos na saída no fluxo no sistema de drenagem a jusante, como mostrado na Figura 30 a seguir, no qual apresenta valores de gradiente inferiores a $i=0,08$ na saída do fluxo a jusante.

Figura 30 — Isolinhas de gradientes hidráulicos (AGUASOLOS).



Fonte: O autor (2021).

O gradiente crítico calculado para esse solo é de $i=0,99$. Utilizando um gradiente de saída $i=0,08$, calcula-se um fator de segurança hidráulico de $F_s=12,4$. É fácil observar que quanto ao gradiente hidráulico a obra apresenta-se bastante segura, uma vez que o fator segurança é elevado. Dessa forma, podemos concluir que o fluxo está controlado e que dificilmente a obra apresentaria um problema de *piping* pela fundação.

Os valores de gradiente hidráulica foram extremamente baixo devido a dois fatores:

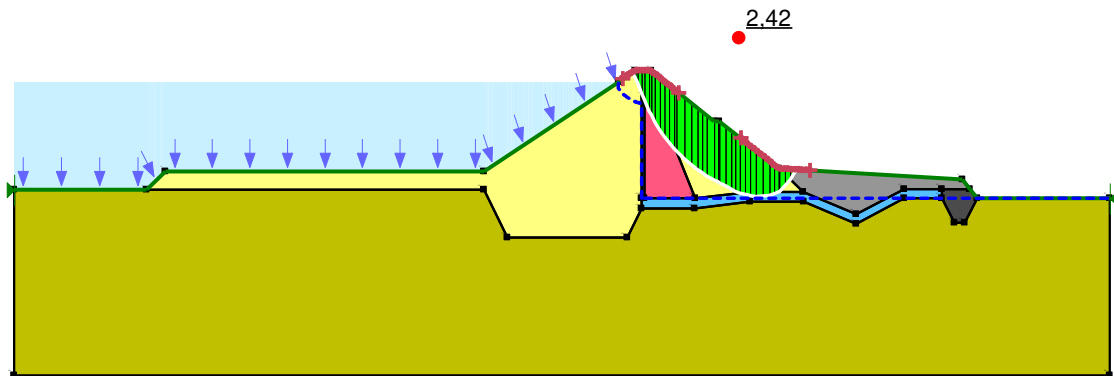
- primeiro em relação ao comprimento de percolação, alongado principalmente devido ao tapete impermeável e influenciado também pela trincheira *cut-off*, aumentando a dissipação do fluxo ao longo do caminho de percolação e minimizando os gradientes.
- O segundo ponto diz respeito ao tapete drenante a jusante, no qual mostrou satisfatório em relação ao comportamento em regime operacional garantindo gradientes hidráulicos na saída do fluxo a jusante com baixos valores inferiores a 0,1.

Além da avaliação do fluxo, optou-se por verificar a estabilidade do talude de jusante da barragem em regime operacional, para ter conhecimento quanto à segurança da alternativa proposta pela AGUASOLOS.

Os resultados do estudo de estabilidade mostraram que alternativa apresenta uma excelente segurança quanto a estabilidade do talude, com fator de

segurança acima do valor mínimo admissível para a hipótese estudada ($FS_{\text{operação}} \geq 1,50$) com o valor de $Fs=2,42$. A superfície potencial de ruptura – SPR bem como centro desta são apresentados na Figura 31.

Figura 31 — Estabilidade do talude de jusante em regime de operação (AGUASOLOS).



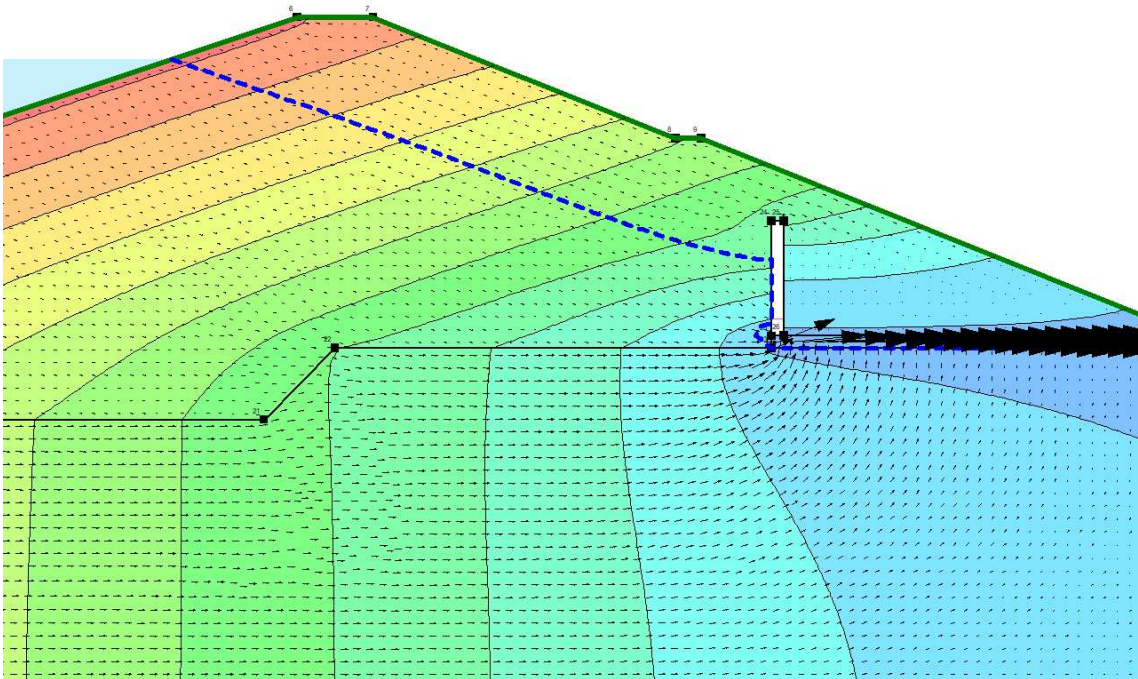
Fonte: O autor (2021).

Diante do que foi apresentado, podemos concluir que a alternativa proposta pela empresa AGUASOLOS para a barragem Olho d'água apresenta um bom comportamento hidráulico e uma excelente estabilidade em regime operacional, características importantes para um bom desempenho para obra projetada.

4.2 Projeto Executivo CEC Engenharia.

Os resultados da modelagem da solução da CEC Engenharia mostram que, na questão de fluxo d'água, ao recuar o dreno vertical da barragem para jusante o caminho de percolação cresce conforme foi a intenção do projetista. Percebe-se que, mesmo após passar o *cut-off* o líquido prossegue junto a intersecção barragem-fundação se dirigindo ao sistema de drenagem, como pode ser observado na Figura 32.

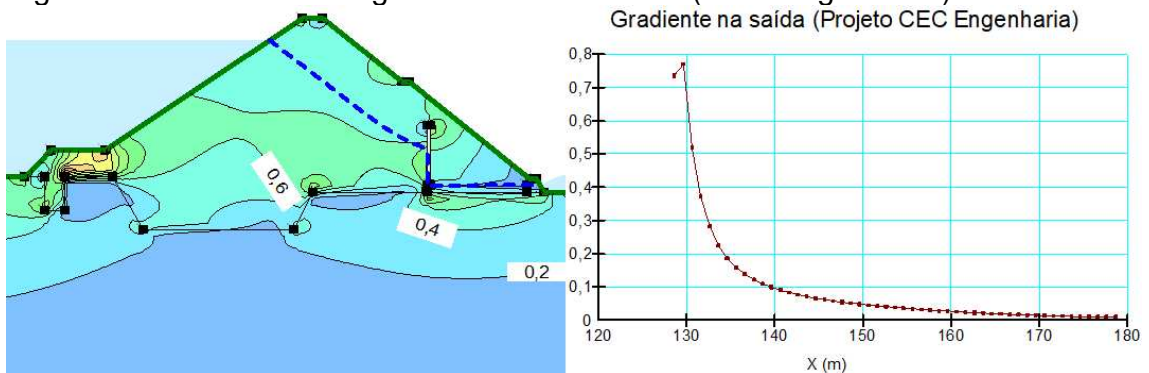
Figura 32 — Detalhe dos vetores de velocidade do fluxo pela fundação da barragem olho d'água (CEC Engenharia).



Fonte: O autor (2021).

Quanto aos gradientes hidráulicos desenvolvidos na proposta da alternativa da CEC Engenharia, pode-se observar que apresentaram valores elevados chegando a atingir a casa de $i=0,77$ (Figura 33).

Figura 33 — Isolinhas de gradientes hidráulicos (CEC Engenharia).



Fonte: O autor (2021).

O gradiente crítico é o mesmo da alternativa analisada do projeto AGUASOLOS ($i=0,99$), gerando um fator de segurança hidráulico da estrutura de

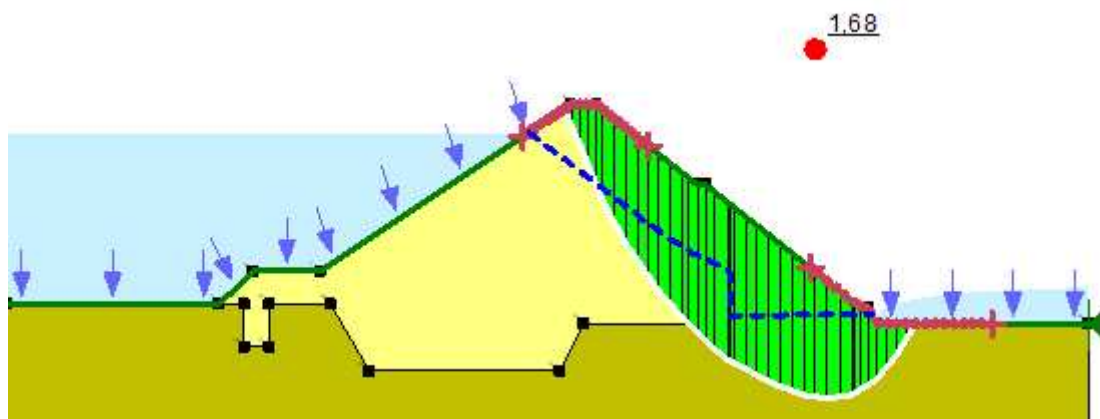
$F_s=1,29$. Segundo Caputo (2015), na prática, recomendam-se fatores de segurança da ordem de 4 a 5.

Observa-se que o fator de segurança obtido pela solução da CEC Engenharia é muito inferior ao obtido pela AGUASOLOS e que o recomendado, podendo-se concluir que com um fator de segurança tão baixo, a estrutura não apresenta um grau satisfatório de segurança quanto a problemas relacionados ao fluxo d'água.

O comportamento da obra nos primeiros anos em operação corrobora com os resultados obtidos no modelo numérico, visto que em campo foi registrado, como já citado anteriormente (Figura 21), um considerável acúmulo de água a jusante da barragem, algo que poderia ser previsto considerando os altos gradientes de saída obtidos através do programa.

Também foi realizado um estudo de estabilidade no talude de jusante, que apresentou um fator de segurança de $F_s=1,68$, que é superior ao mínimo exigido de $F_s=1,5$. A SPR bem como centro desta são apresentados na Figura 34. A segurança do talude da alternativa da CEC Engenharia inferior ao da AGUASOLOS, todavia ainda se encontra maior que o limite inferior exigido, portanto, não apresenta prejuízos a segurança da estrutura.

Figura 34 — Estabilidade do talude de jusante em regime de operação (CEC Engenharia).



Fonte: O autor (2021).

Com base nos dados já citados, conclui-se que a alternativa da CEC Engenharia não é satisfatória nas questões de operação e segurança, apresentando-

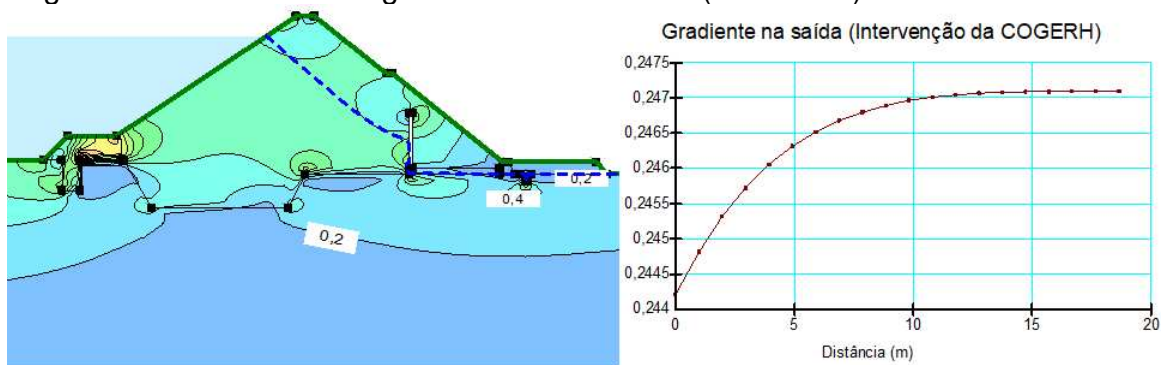
se uma solução com o comportamento hidráulico pela fundação muito inferior à proposta pela AGUASOLOS.

4.3 Projeto Intervenção COGERH

No Início da década de 2000, a COGERH determinou em campo na época que os valores de gradiente hidráulico se apresentaram altíssimos, por conta disso, optou-se por uma intervenção a fim de reduzir os problemas na barragem, utilizando-se de poços de alívio e tapetes drenantes.

O resultado dessa intervenção foi uma redução dos gradientes hidráulicos para menos de 0,25, como pode ser visto na Figura 35. Dessa forma, o novo fator de segurança será igual a $F_s=4,0$, atendendo o valor mínimo exigido na literatura.

Figura 35 — Isolinhas de gradientes hidráulicos (COGERH).

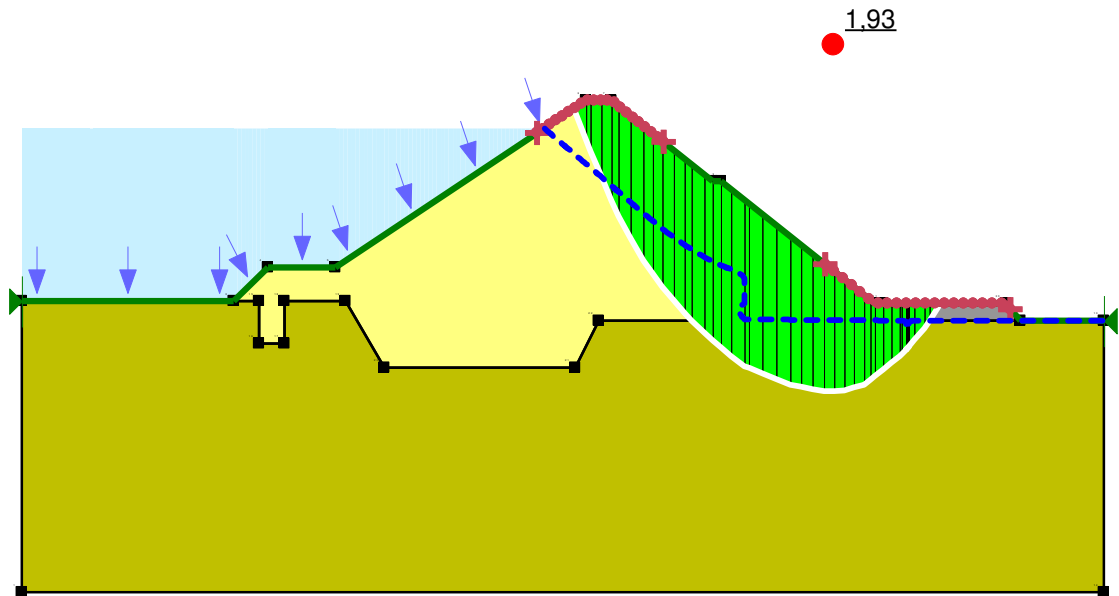


Fonte: O autor (2021).

Com esses dados conclui-se que, na questão de controle de fluxo, a intervenção da COGERH foi muito bem sucedida e realmente conseguiu aumentar o controle da percolação, gerando maior segurança a estrutura.

Na questão da estabilidade, a intervenção da COGERH aumentou a estabilidade do talude de jusante, mesmo que sua primeira intenção não fosse essa, e sim o controle do fluxo d'água. O fator de segurança saiu de 1,68 para 1,93 (Figura 36), uma mudança considerável, se afastando mínimo exigido e entrando em níveis mais aceitáveis de segurança de taludes.

Figura 36 — Estabilidade do talude de jusante em regime de operação (COGERH).



Fonte: O autor (2021).

Dessa forma, conclui-se que a intervenção da COGERH foi extremamente positiva, ampliando a eficiência hidráulica e aumentando a segurança contra ruptura hidráulica.

5 CONCLUSÃO

Na sua primeira concepção da barragem pela AGUASOLOS, analisando os resultados do item anterior, observa-se uma grande eficiência hidráulica, gerando-se assim uma estabilidade muito grande, que pode ser traduzida no fator de segurança hidráulico muito maior que o mínimo recomendado. Conclui-se que, caso esse fosse o projeto executado, é provável que a obra não apresentaria problemas como os gerados pela alternativa implementada. Essa solução não foi escolhida, muito provavelmente, por fatores econômicos, visto que é mais robusta e sua implementação provavelmente mais cara.

O projeto da CEC Engenharia é o mais problemático dos três apresentados. Como já mencionado nos tópicos anteriores, apresentou muitos problemas relacionados à percolação pela fundação, apresentando gradientes altíssimos muito próximos do valor crítico. Pode-se afirmar que a proposta do projeto de recuar o dreno vertical para aumentar o caminho de percolação é válida, porém insuficiente para redução do gradiente de saída. Dessa forma, a solução da CEC pode ser considerada insuficiente do ponto de vista de segurança hidráulica o que levou a técnicos da COGERH a fazerem uma intervenção na estrutura.

Por fim, temos a intervenção da COGERH, onde foram construídos poços de alívio e um tapete drenante a fim de reduzir os gradientes de saída. O resultado dessa empreitada foi muito bem sucedida visto que houve uma grande redução do gradiente de saída, o que conseqüentemente aumentou o fator de segurança hidráulico da obra. Um ponto interessante a ser tocado é que até mesmo a segurança do talude, apesar de já estar dentro dos padrões aceitáveis, aumentou com as intervenções na parte hidráulica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUASOLOS CONSULTORIA DE ENGENHARIA LTDA. **Açude Olho D'água – Projeto Executivo – Tomo I: Relatório Geral**: relatório técnico. Fortaleza, 1988.

AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório de segurança de barragens 2017**. Brasília-DF: Agência Nacional de Águas, 2018.

ASSIS, A. P. et al. **Apostila do curso de Barragens**. UnB, Brasília, DF, 170p, 2003.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: Vol. 2**. Livros Tecnicos e Cientificos Editora SA, 2015.

CEDERGREN, H. R. **Seepage, Drainage, and Flow Nets**. 3rd ed. Wiley-InterScience, John Wiley & Sons, New York, 1989.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Plano de Operação de Manutenção do Sistema de Água Bruta do Estado do Ceará - POM**. Fortaleza: COGERH, 2008.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Relatório da Execução dos Serviços de Recuperação da Barragem Jaburu I – Tomo I**. Fortaleza: COGERH, 2010.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. **Relatório Anual Segurança de Barragens - Riscos e Inspeções 2006**. Fortaleza: COGERH, 2007.

CORDEIRO, Guilherme Eduardo Marcondes. **ESTUDO DE FLUXO EM BARRAGENS DE TERRA**. 2017. 98 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

FIGUEIREDO, Laura Isabel Pinela de Sousa. **Soluções de estabilização hidráulica na barragem de Massingir**. 2017. Tese de Doutorado.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. **Analysis of embankment dam incidents**. UNICIV Report N° R-374 - UNSW, Sydney, Austrália, 1998.

GEO SLOPE (2002) - SLOPE/W Student Edition – <http://www.geo-slope.com>.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD (Canadá) (org.). **Stability Modeling with GeoStudio**. Calgary, 2017.

GOMES, Francisco Hiago de Siqueira. **Quantificação de risco de piping em barragens de terra via abordagens probabilística e fuzzy**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

KOVÁCS, G. **Developments in water science**. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. 1981.

LEME, R. F. *et al.* Determinação de níveis críticos de carga hidráulica em piezômetros de uma barragem de terra instrumentada. **XXVIII Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Rio de Janeiro – RJ. 28 de outubro de 2011.

MASSAD, Faïçal. **Obras de Terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

ORTIGÃO, JAR. **Introdução à mecânica dos solos no estado crítico**. 3 ed. Rio de Janeiro: Terratek. 2007.

OLIVEIRA, Antônio Gilberto Simões de. **Análise da eficácia dos dispositivos de vedação e drenagem utilizados em fundações permeáveis de barragens de terra**. 2008. 181 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 383 p.

RIBEIRO, Leonardo Gonçalves. **Otimização sequencial aproximada de estruturas de material com gradação funcional**. 2019. 109 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SILVA FILHO, Francisco Chagas da. **Tapetes impermeabilizantes a montante de barragens sobre aluviões permeáveis**. 1991. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SOUSA, Lucrécia Nogueira de. **Avaliação do comportamento da fundação de barragem em Rocha Arenítica: estudo de caso da Barragem Jaburu I**. 2014.

SOUZA, VAD et al. **Obras de Recuperação e Intervenções de Segurança efetuadas na Fundação e Aterro Compactado da Barragem Jaburu I**. XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia, 2005.

VECCI, A. N. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração**. 2018 82 f. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2018.

VETOR ENGENHARIA LTDA. **Estudo da estabilidade da barragem Jaburu I – município de Tianguá-CE**: relatório técnico. Eusébio, 2017.