

Análises de Percolação e Estabilidade de Taludes em Uma Barragem de Terra Homogênea Sob a Perspectiva de Segurança de Barragens

Percolation and Slope Stability Analysis In a Homogeneous Earth Dam From a Dam Safety Perspective

Aniele Lacerda Moreira¹, Ilana Borges de Azevedo², Isabella Christine de Paula Santos³

Resumo

As barragens são estruturas com finalidades diversas, como por exemplo, o armazenamento de água. Podem ser de diversos tipos, sendo a barragem de terra a mais utilizada no Brasil pela abundância de materiais disponíveis para sua construção. Como são estruturas que geralmente são robustas, devem ser projetadas adequadamente para que não corram o risco de sofrer ruptura, pois estas podem ser catastróficas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é identificar os principais tópicos relacionados à segurança das barragens de terra, no que diz respeito ao seu dimensionamento e realizar análises de percolação de água e estabilidade dos taludes. Para isso, utilizou-se o *software* Geostudio 2019 versão estudantil (pacotes Seep/W e Slope/W) para executar tais análises, considerando a existência e a inexistência de elementos de controle de percolação no maciço e na fundação da barragem. Observou-se, com isso, a importância de se dimensionar este tipo de estrutura seguindo critérios de segurança. A geometria adotada nas modelagens atendeu, com segurança, aos critérios de projeto geométrico e de análise de estabilidade estabelecidos na literatura; a utilização de um sistema de drenagem interno no maciço e de um *cut-off* na fundação se mostraram importantes, pois contribuem para o controle de percolação água pelo maciço e favorecem a segurança da barragem, aumentando sua estabilidade.

Palavras-chave: Análise de percolação. Análise de estabilidade de taludes. Barragens de terra homogênea. Segurança de Barragens. Modelagem numérica.

1. Introdução

Barragens são estruturas construídas com a finalidade de obstruir um curso d'água, formando assim um reservatório, com o objetivo de armazenar a água para diversos fins, tais como: abastecimento de cidades, suprimento à irrigação e produção de energia elétrica (CAPUTO, 2017). Dentre os diversos tipos, podem-se destacar as barragens convencionais (barragens de terra, de enrocamento e de concreto), sendo que as Barragens de Terra são

¹ anielelacerda@hotmail.com, Graduanda, Discente, Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

² ilana-borgesa@hotmail.com, Graduanda, Discente, Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

³ isabellasantos@unirv.edu.br, Mestre, Docente, Universidade de Rio Verde, Faculdade de Engenharia Civil.

as mais comumente utilizadas no Brasil, devido a disponibilidade de material e pelas condições topográficas do país (MASSAD, 2010).

A barragem, independentemente do tipo, como qualquer outra estrutura, é suscetível a falhas. Por essa razão, é importante levar em consideração aspectos que abrangem desde o projeto até a operação da barragem, visando à segurança da mesma (GUTIÉRREZ, 2003). Em função do fato de as barragens serem uma estrutura grandiosa, a sua ruptura geralmente é catastrófica, o que causa perdas irreversíveis de bens materiais, de vidas e danos ambientais.

De acordo com Costa (2012), para realizar a concepção de uma barragem, devem ser realizados estudos criteriosos, que podem ser divididos em quatro etapas (inventário, estudos de viabilidade, projeto básico e projeto executivo), nos quais são analisadas todas as características intrínsecas à região onde se pretende construir a barragem e à própria estrutura da mesma. Com isso, são levantados dados sobre as condições topográficas locais; a geologia e geotecnia local; as condições hidrológicas e climáticas; e a infraestrutura regional.

Antigamente, as barragens de terra eram projetadas por métodos empíricos por meio de estimativas, e por isso se tem na literatura casos de rupturas e acidentes em algumas dessas barragens. Os procedimentos racionais para projetar esse tipo de estrutura só surgiram por volta de 1907, e atualmente tais procedimentos permitem construções de barragens com mais de 150 m de altura (CHIOSSI 2013).

A evolução da informática possibilitou que essas análises sejam realizadas por meio de *softwares*, facilitando sua difusão e utilização. A qualidade desse método depende dos parâmetros que alimentam o programa, que devem ser fidedignos às características dos materiais que serão utilizados em campo e às situações de carregamento que a obra irá ser submetida. Além de auxiliar no dimensionamento geométrico, os *softwares* permitem realizar análises relativas à estabilidade e segurança das barragens, tais como, análise de percolação e de estabilidade de taludes.

Segundo a Oliveira, et al. (1998), a análise de estabilidade de uma barragem abrange um conjunto de procedimentos, que visa a determinação de um índice ou de uma grandeza capaz de quantificar o quão próximo de uma ruptura o talude da mesma está. Durante os estudos, podem ser identificados problemas, que podem ser solucionados ainda na fase de projeto, minimizando, com isso, as chances de ruptura e aumentando a segurança da barragem.

Caputo (2014) afirma que é importante fazer a análise da estabilidade de talude de uma barragem, já que a maioria dos acidentes em barragens se dá pela falta de estabilidade. Mecanismos potenciais de ruptura devem ser previamente e adequadamente definidos, em função da geometria da barragem, das propriedades geotécnicas dos materiais do maciço da

barragem, e da provável condição de fluxo de água ao longo do maciço da barragem. Estabelecido os mecanismos potenciais de ruptura, a estabilidade deve ser analisada, enquanto a análise de percolação visa antecipar pressões e vazões piezométricas que venham a acontecer ao longo da vida da barragem, para realização do dimensionamento dos sistemas de vedação (CRUZ 1996).

Para realizar o dimensionamento de uma barragem de terra, é necessário que sejam obedecidos alguns critérios de projetos, como por exemplo, proteção e inclinação de taludes adequados, utilização de um sistema eficiente de drenagem interna e existência de borda livre, nos quais são consideradas a segurança quanto à estabilidade da estrutura e contro.

Com isso, levando-se em consideração que duas causas frequentes de rupturas de barragens de terra são as infiltrações e os escorregamentos (CAPUTO 2014), nota-se a importância de se realizar um estudo acerca da estabilidade e percolação de água nas mesmas, tanto pelo maciço, quanto pela fundação. Se as pressões da percolação se tornarem excessivas, podem acarretar o carreamento de partículas finas do solo, provocando a ocorrência de erosão interna, pela qual se forma um orifício dentro do corpo da barragem, levando a uma conseqüente ruptura (CAPUTO 2014). Esse fenômeno é denominado de erosão regressiva ou *piping*, e pode comprometer seriamente a estabilidade e, portanto, a segurança da barragem.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é identificar os principais tópicos relacionados à segurança das barragens de terra, no que diz respeito ao seu dimensionamento e realizar análises de percolação de água e estabilidade dos taludes.

1.2 Objetivos específicos

- 1- Propor uma geometria hipotética para uma barragem de terra homogênea, em função das diretrizes de projetos encontradas na literatura e baseando-se em um projeto de uma barragem de terra localizada no município de Pontalina/GO.
- 2- Realizar análises de percolação de água ao longo do maciço e da fundação da barragem, em sua fase de operação.
- 3- Avaliar a estabilidade dos taludes de montante e jusante da barragem nas fases de final da construção e operação da barragem.

2. Considerações iniciais

Ao realizar o estudo para desenvolver o projeto de uma barragem, é necessário se atentar às características do local e dos materiais disponíveis na região para a execução da

mesma. Segundo Costa (2012), a identificação dos materiais constituintes é um processo que evolui de acordo com as etapas de estudo de uma barragem. Parte-se da ideia de que os princípios básicos de projeto de uma barragem são economia e segurança.

Massad (2010) afirma que a segurança da barragem é o princípio básico e principal que deve ser garantida quanto ao transbordamento, e que se não levado em consideração, pode abrir brechas no corpo da barragem; ao *piping* (erosão regressiva), que provoca o carreamento de partículas e pode levar à ruptura da barragem; ao fenômeno de areia movediça, provocado pelo fluxo ascendente de água em solos arenosos, provocando a perda de resistência da massa de solo; à ruptura dos taludes de montante e jusante; ao efeito das ondas formadas pela ação dos ventos, que se quebram no talude de montante, podendo provocar erosão; e do efeito erosivo das águas das chuvas sobre os taludes de jusante, o que faz com que o mesmo deva ser protegido.

Nota-se, com isso, que uma das maiores preocupações de projetistas de barragens é a percolação de água pelo maciço e pela fundação de forma descontrolada, devendo ser adotadas medidas que controlem a percolação de água, de forma a evitá-la ou reduzi-la. Cruz (1996) destaca que, dentre os requisitos de segurança de uma Barragem, a estanqueidade é fundamental, sendo que a propriedade de estanqueidade em uma barragem é o impedimento da percolação de água da montante para a jusante, pelo maciço e pela fundação, o que segundo Costa (2012) é impossível em função dos elevados custos para os efeitos esperados.

Dessa forma, uma solução encontrada para resolver tal problema, é a estanqueidade parcial, ou seja, a redução da percolação a níveis aceitáveis em função da segurança da obra. Deve-se atender a segurança quanto a percolação, pois a mesma pode causar erosão interna, podendo ocasionar o colapso da estrutura. Além disso, fugas excessivas de água podem comprometer o volume de água armazenado no reservatório, o que não é benéfico para algumas finalidades de barragens, tais como, navegação e abastecimento de cidades.

Em relação à estabilidade dos taludes, devem ser feitas análises em função do carregamento da construção, com isso, tais análises devem ser realizadas considerando as fases de final da construção; de operação; de rebaixamento rápido (rebaixamento do nível do reservatório, que pode ser total ou parcial); e quanto aos efeitos de sismo.

3. Materiais e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido utilizando o *software* GeoStudio 2019, versão estudantil, para realização de análises de percolação e de estabilidade de taludes nas fases de operação e construção de uma barragem, por meio dos pacotes Seep/w e Slope/w.

Para isso, foi estabelecida uma seção típica para uma barragem de terra homogênea, baseando-se em diretrizes de projetos de barragens encontradas na literatura. Tal

dimensionamento foi baseado também em dados de laudos de sondagem de um terreno localizado próximo à cidade de Pontalina/GO (Anexo A), no qual foi executada uma barragem de terra de pequeno porte, com 11 m de altura, e com a finalidade de turismo. Propôs-se, com isso, uma seção hipotética para a realização do estudo.

Foram realizadas análises considerando a existência e inexistência de elementos de controle de percolação, para melhor visualização da importância de tais componentes na segurança da barragem.

3.1. Programa GeoStudio

O programa GeoStudio é um programa baseado no método dos elementos finitos, no qual é possível fazer análises de estabilidade de taludes, de percolação, de tensão e deformação, de sismos e liquefação, dentre outras.

O GeoStudio *Student Edition* é uma versão simplificada do *software*, destinada a desenvolver análises geotécnicas, porém com algumas restrições (GEOSLOPE, 2019). Foram utilizados os pacotes, Slope/W para a análise de condições de estabilidade de taludes, e o Seep/W para análise de infiltração de água, a Figura 1 apresenta a interface de entrada do programa, na qual, entra-se com dados da geometria da barragem e com os parâmetros dos materiais utilizados na mesma.

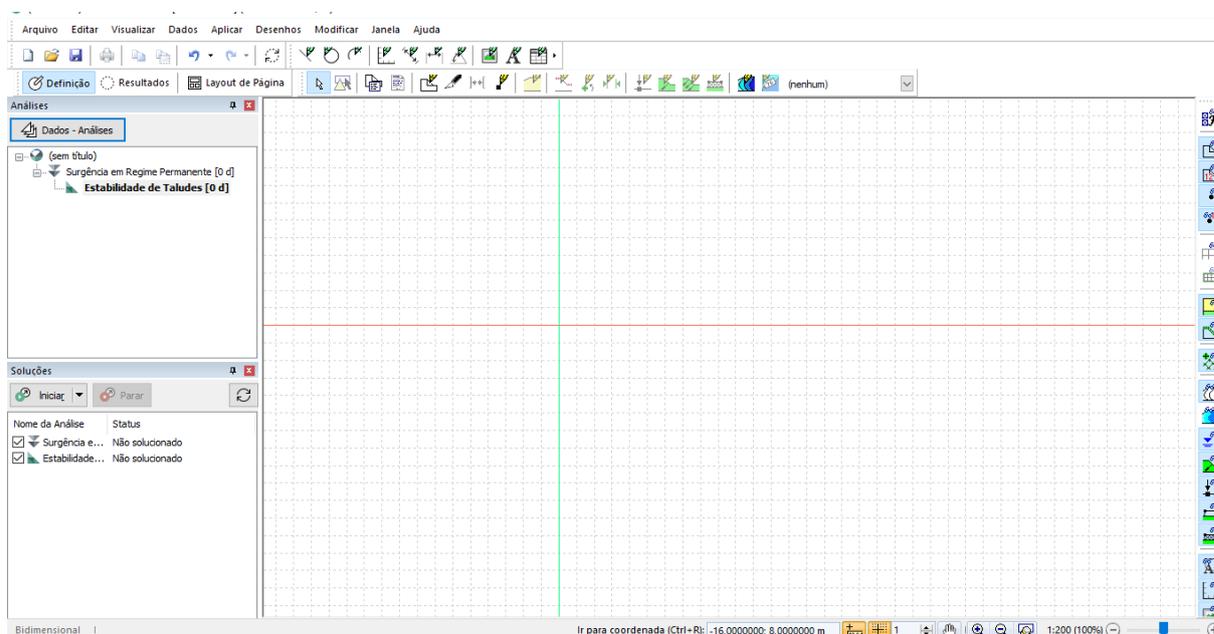


Figura 1 – Interface do programa GeoStudio.

Fonte: Próprios Autores (2019)

A realização da modelagem inicia-se com a aplicação das coordenadas dos pontos, para então gerar as regiões, e assim ser feita a seleção do tipo de material para cada região.

O programa permite que se proponha como propriedades do material, o peso específico, permeabilidade, porosidade, coesão, propriedades hidráulicas, e etc. Os dados de entrada para a análise de percolação no Seep/W são o tipo de material e as propriedades do mesmo, a geometria do problema, as condições de contorno, e a permeabilidade dos materiais; e os do Slope/W são peso específico, ângulo de atrito interno e coesão.

Dentre os possíveis métodos existentes no programa para se avaliar a estabilidade dos taludes, adotou-se neste trabalho o método de *Fellenius*, que é baseado no Método do Equilíbrio Limite.

3.2. Geometria adotada para Barragem

Considerou-se a altura da barragem igual a 11 m, pelo fato da barragem observada ter sido construída com esta altura. Ressaltando-se que para determinar esta altura, o projetista da mesma levou em consideração a topografia do terreno e a área de alagamento do reservatório.

A inclinação dos taludes foi determinada baseando-se em dados encontrados na literatura, sendo que de acordo com Cruz (1996), os taludes preliminares para uma barragem de terra de um maciço de solo argiloso compactado, pode variar de 2,0(H):1,0(V) até 3,0(H):1,0(V), no talude de montante, e de 2,0(H):1,0(V) até 2,5(H):1,0(V), no caso do talude de jusante. Dessa forma, neste trabalho, optou-se por adotar a mesma inclinação para os dois taludes de 2,5(H):1,0(V), sendo um valor localizado entre os dois.

O material utilizado no maciço foi argila siltosa e o da fundação uma areia siltosa, considerando-se que estes materiais se comportam de acordo com a teoria de mecânica dos solos saturados, não levando, em conta os efeitos da sucção, e os parâmetros geotécnicos dos solos utilizados se encontram no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros dos solos utilizados no estudo

Material	Parâmetros	Valores	Referências
Argila Siltosa	Peso específico	17 kN/m ³	Cintra <i>et al.</i> , (2011)
	Condutividade hidráulica	1x10 ⁻⁸ m/s	Pinto (2006)
	Coesão efetiva	37,5 kPa	Cruz (1996)
	Ângulo e atrito interno	30°	Moraes (1976)
Areia Siltosa	Peso específico	20 kN/m ³	Cintra <i>et al.</i> , (2011)
	Condutividade hidráulica	1x10 ⁻⁵ m/s	Pinto (2006)
	Coesão efetiva	1 kPa	Cruz (1996)
	Ângulo e atrito interno	35°	Moraes (1976)

Fonte: Próprios autores (2019).

Para realizar o estudo avaliando a existência de elementos de controle de percolação, adotou-se um sistema de drenagem interno no maciço da barragem, ou seja, filtros (drenos) na vertical e na horizontal, e *cut-off* na fundação, devido ao fato da fundação ser constituída de um material permeável (areia siltosa) (figura 3).

Como o material do maciço é um material menos permeável (argila siltosa), o sistema de drenagem interno da barragem deve ser constituído por um material mais permeável do que o utilizado no maciço, considerou-se que o material do filtro seria o mesmo da fundação, pois notou-se que na região adotada como referência havia abundância de esse tipo de solo. E em função da limitação do programa GeoStudio versão estudantil, considerou-se que a fundação da barragem seria constituída por um perfil de solo homogêneo, sendo composta por uma areia siltosa.

Considerou-se o mesmo solo nos filtros e na fundação da barragem, devido a disponibilidade do mesmo, no entanto em um projeto de barragem deve ser analisado os critérios de filtro de Terzaghi, quanto à permeabilidade, à ocorrência de *piping* e de erosão interna para evitar o carreamento de partículas.

Cruz (1996) estabelece que a espessura mínima para o filtro vertical deve ser de 0,80 m, por conta dos equipamentos utilizados e pelo método construtivo, e a espessura máxima do filtro horizontal deve ser de 2m, por motivos de economia. Com isso, neste trabalho foi adotado o valor de 0,8 m em ambos os filtros pelo fato de ser uma barragem de pequeno porte.

Na análise de percolação, é necessário aplicar condições de contorno ao longo da barragem, sendo que, na fase de operação, no talude de montante, considerou-se o nível de água máximo do reservatório com carga total da água igual a 9 m. Na fase de final da construção da barragem, considerou-se a carga total de água igual a zero, pois o reservatório ainda não foi enchido. Para o talude de jusante, a condição de contorno escolhida foi a *drenage*, a qual permite que a água saia do domínio se a pressão se exceder a 0 kPa.

Quanto ao número de nós e elementos utilizados nas modelagens dos problemas, a versão estudantil possui uma limitação com 500 elementos. Com isso, as modelagens foram executadas com um total de 484 (figura 2) e 466 (figura 3) elementos do tipo quadrangulares e triangulares, e 580 (figura 2) e 559 (figura 3) nós, com o tamanho de 1,7 m dos elementos.

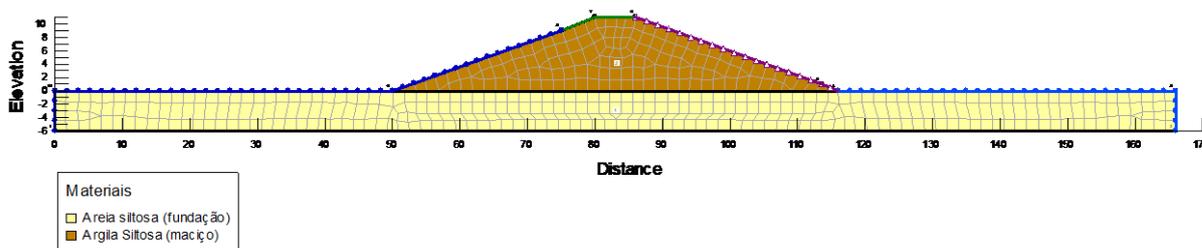


Figura 2 – Malhas na barragem sem sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios Autores (2019)

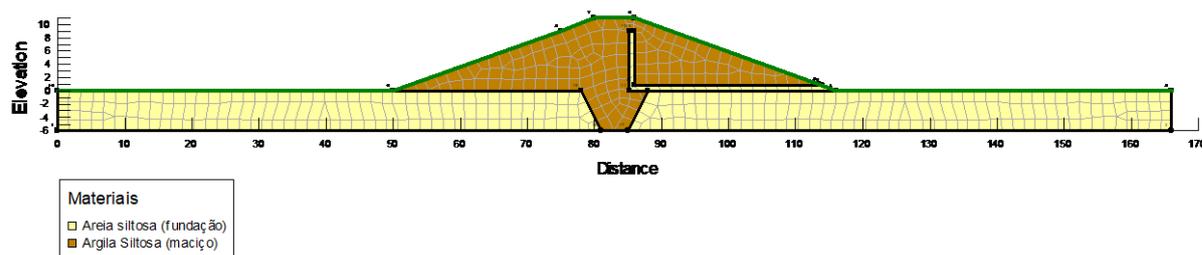


Figura 3 – Malhas na barragem com sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios Autores (2019)

3.3. Análise de percolação

As Figuras 4 e 5 apresentam as modelagens da barragem sem considerar e considerando a existência dos elementos de controle de percolação, respectivamente.

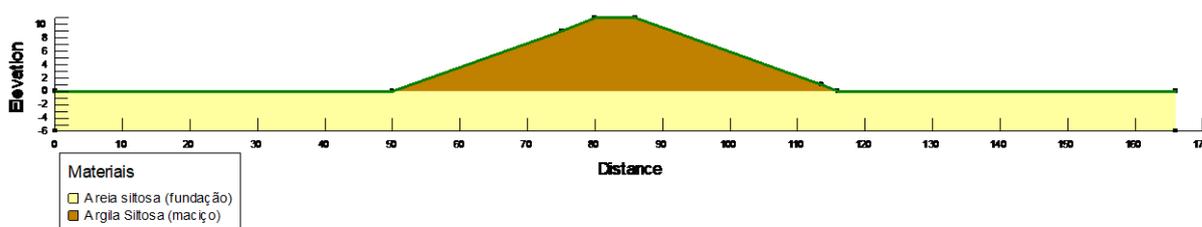


Figura 4 – Seção da barragem sem sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios Autores (2019).

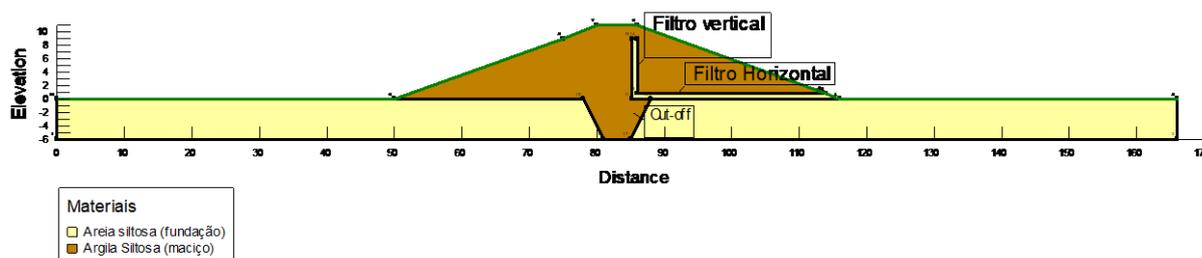


Figura 5 - Seção da barragem com sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios Autores (2019).

Quanto à permeabilidade, levou-se em consideração que a perda de d'água através da fundação não deve ser excessiva e que as pressões d'água na base do talude de jusante não devem ser elevadas, pois reduzem consideravelmente a estabilidade deste talude e gradientes de saída elevados podem provocar.

Neste trabalho, adotou-se como método de controle de percolação o uso de filtro vertical, que foi levado até a cota do nível de água máximo (N.A.máx) do reservatório; filtro horizontal, ao longo de todo o comprimento do talude de jusante; e na fundação o *cut-off* total, ou seja, com espessura igual à espessura da fundação.

As análises foram realizadas considerando estado de regime permanente, pois não é possível fazer análise de fluxo transiente, que é a vazão que atravessa uma dada seção por unidade de tempo, na versão estudantil do programa GeoStudio.

3.4. Análise de estabilidade de taludes da barragem

Adotou-se o fator de segurança (FS) contra a ruptura do solo como sendo o critério de avaliação da estabilidade dos taludes da barragem, nas fases de operação e final da construção, sendo que o FS é definido como a razão entre as forças estabilizadoras e as forças desestabilizadoras (MASSAD, 2010).

Dessa forma, considerou-se como referência os valores indicados no Manual da Eletrobrás, sendo que na fase de construção, a barragem é projetada para ficar com fator de segurança (FS) mínimo de 1,3; e na fase de operação, o FS a ser atendido é de 1,5 (ELETROBRÁS, 2003).

Na fase final da construção, considera-se que o maciço acabou de ser construído e o reservatório ainda não foi enchido, enquanto que na fase de operação, está sendo considerada a barragem durante sua vida útil, em situação estacionária. O reservatório já está cheio, a água já está percolando.

Avaliou-se apenas as fases de operação e final da construção da barragem, devido a limitação da versão estudantil do programa GeoStudio, que não permite realizar análise em regime transiente e considerando situações de terremotos, com isso, não é possível realizar análises de rebaixamento rápido do reservatório e nem de sismos.

4. Resultados e discussão

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nas análises.

4.1. Análise de percolação

Para analisar a percolação de água pelo maciço e fundação da barragem, considera-se que a barragem está em operação, o que provoca o fluxo de água. Nas Figuras 7 e 9 são apresentadas as análises sem considerar e considerando a existência dos elementos de percolação.

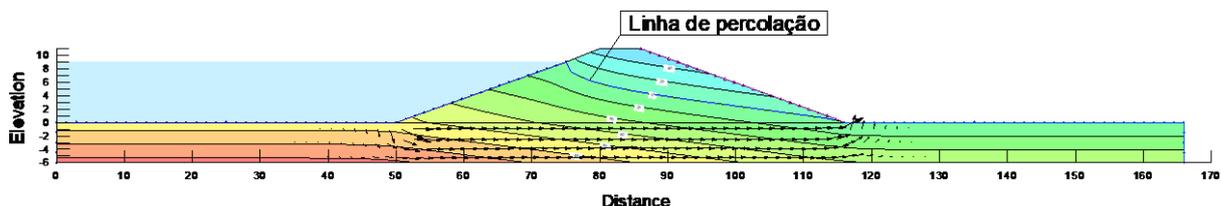


Figura 6 - Análise de percolação da barragem sem sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios Autores (2019).

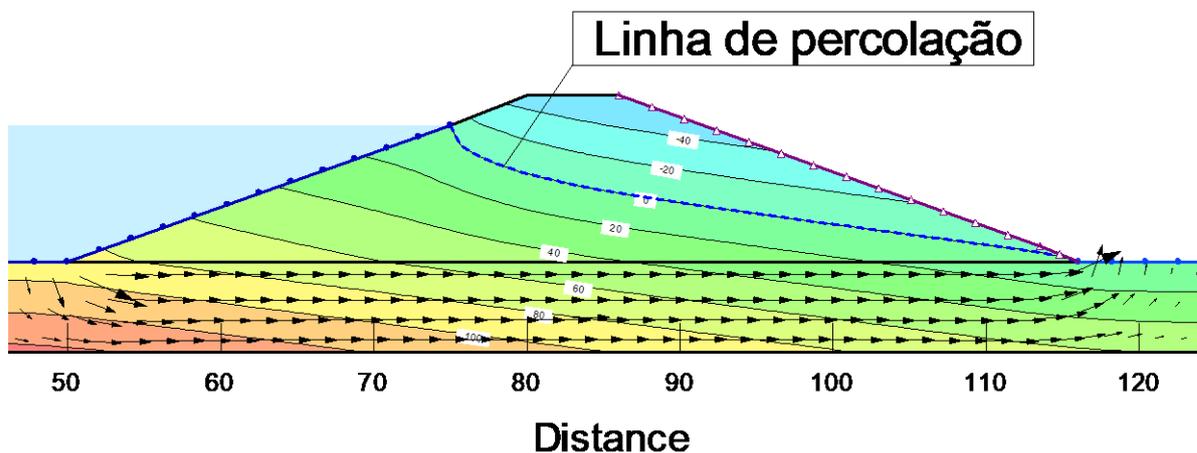


Figura 7 – Ampliação da análise de percolação da barragem sem sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios Autores (2019).

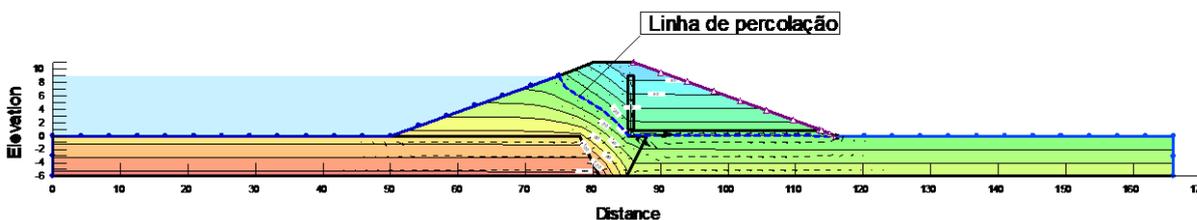


Figura 8 – Análise de percolação da barragem com sistemas de controle de percolação
Fonte: Próprios Autores (2019).

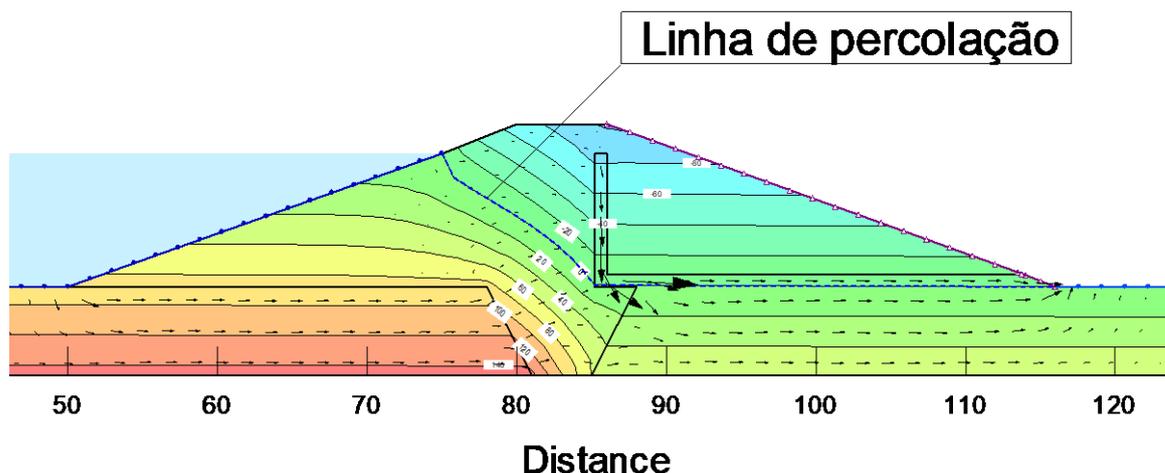


Figura 9 – Ampliação da análise de percolação da barragem com sistemas de controle de percolação
Fonte: Próprios Autores (2019).

Pelas Figuras 7 e 9, é possível notar que os vetores de fluxo indicam o sentido da percolação, que vai da montante para a jusante, tanto no maciço, quanto na fundação. Além disso, é possível observar, que a linha de percolação, que infiltra no maciço na altura do N.A._{máx} do reservatório, na Figura 7 segue ao longo de todo o maciço, podendo aflorar no talude de jusante, enquanto que na Figura 9, nota-se que a linha de percolação é interceptada pelo conjunto de filtros. Isso mostra que os filtros se tornam o caminho preferencial para a percolação da água, pois a areia siltosa possui uma permeabilidade maior do que o material do maciço.

O fato da água poder aflorar no talude de jusante, no caso em que não há um sistema de drenagem interno, é alarmante, pois no caso de haver alguma fissura no maciço ou até mesmo devido a força de percolação da água, pode ocorrer a formação do fenômeno *piping*, o que compromete a segurança da barragem.

Os gráficos 1 e 2, apresentam a distribuição da poropressão (pressão neutra) na estrutura da barragem de terra a partir do pé do talude montante até o pé do talude jusante, e os gráficos 3 e 4, os gráficos de distribuição das pressões neutras ao longo da fundação.

Dessa forma, percebe-se que a tendência da poropressão ao longo da barragem é de diminuição de seus valores, o que pode ser atribuído a dificuldade da água percolar, em função da baixa permeabilidade do material do maciço (Gráficos 1 e 2). No gráfico 2, é ilustrado que o valor da pressão neutra tem uma redução rápida quando se aproxima do filtro vertical, passando a ser quase nula, o que confirma a hipótese de que o sistema de drenagem interno controla o fluxo de água pelo maciço, fazendo com que a linha freática não passe pelo talude a jusante, o que o deixa mais estável.

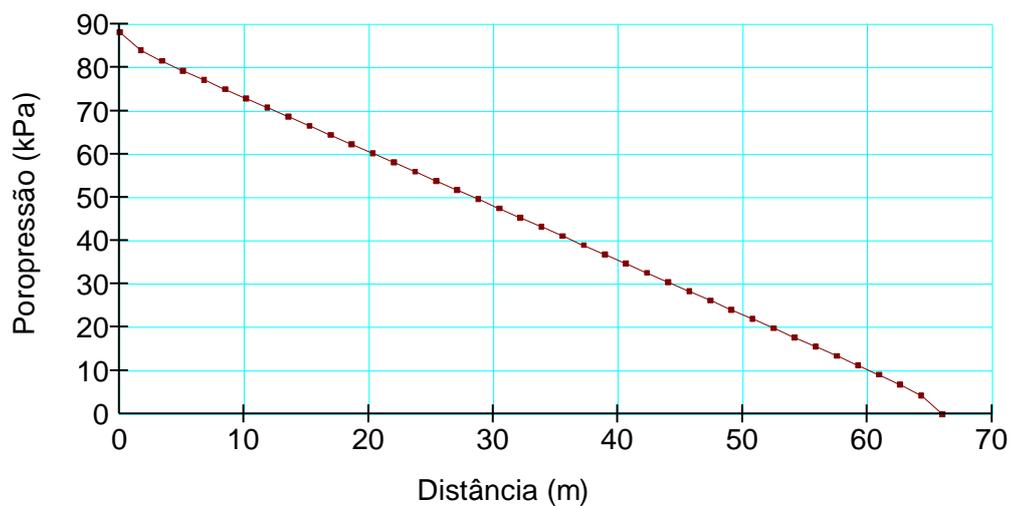


Gráfico 1 – Poropressão ao longo do maciço da barragem sem sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios autores (2019).

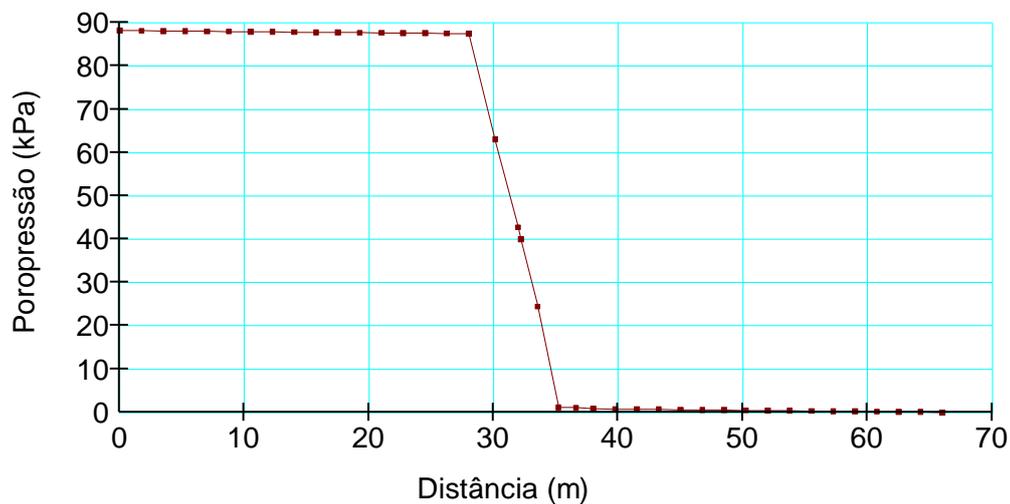


Gráfico 2 – Poropressão ao longo do maciço da barragem com sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios autores (2019).

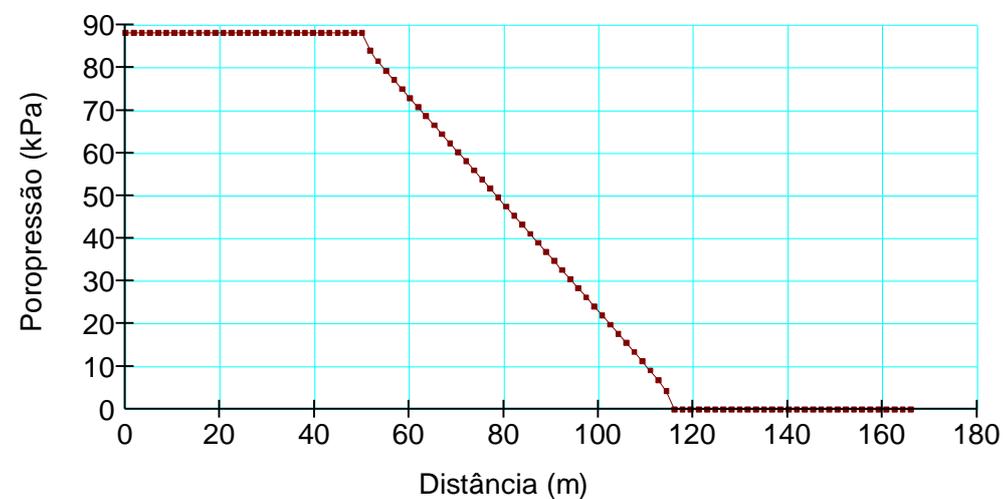


Gráfico 3 – Poropressão ao longo da fundação da barragem sem sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios autores (2019).

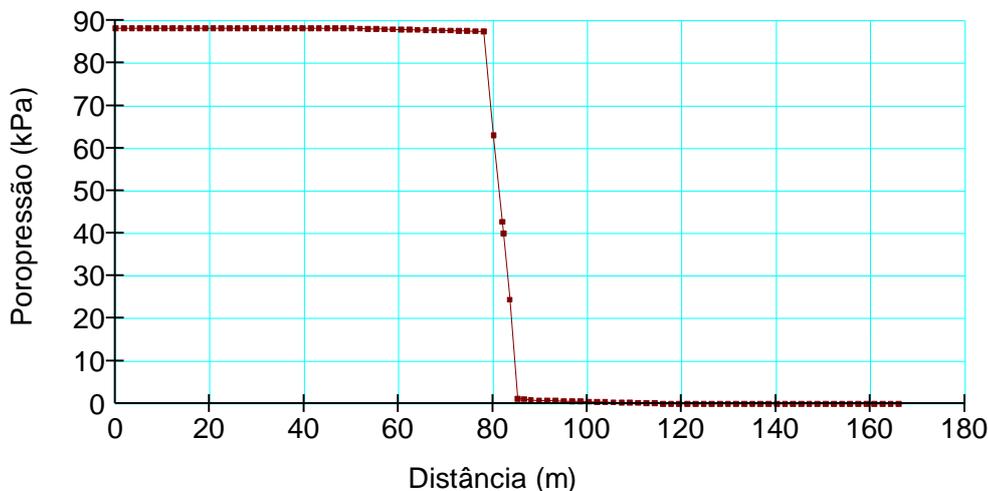


Gráfico 4 – Poropressão ao longo da fundação da barragem com sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios autores (2019).

4.2. Análise de estabilidade de taludes da barragem

As situações de carregamento consideradas nas análises de estabilidade dos taludes são fase de operação e de final da construção.

• Fase de final da construção

Nessa fase considera-se que o maciço acabou de ser construído, a poropressão é negativa, pois ainda não há pressão de água estabelecida pelo reservatório. Com o passar do tempo, começa a surgir poropressão positiva (poropressão construtiva), ou seja, a pressão neutra negativa começa a subir e pode virar poropressão positiva, pois são devidas ao carregamento.

Nas Figuras 10, 11, 12 e 13 são apresentados os resultados para as análises considerando e sem considerar elementos de controle de percolação, para os taludes de montante e jusante. No Quadro 2 pode ser vista uma comparação entre os FS obtidos nas modelagens e os valores especificados no manual da Eletrobrás.

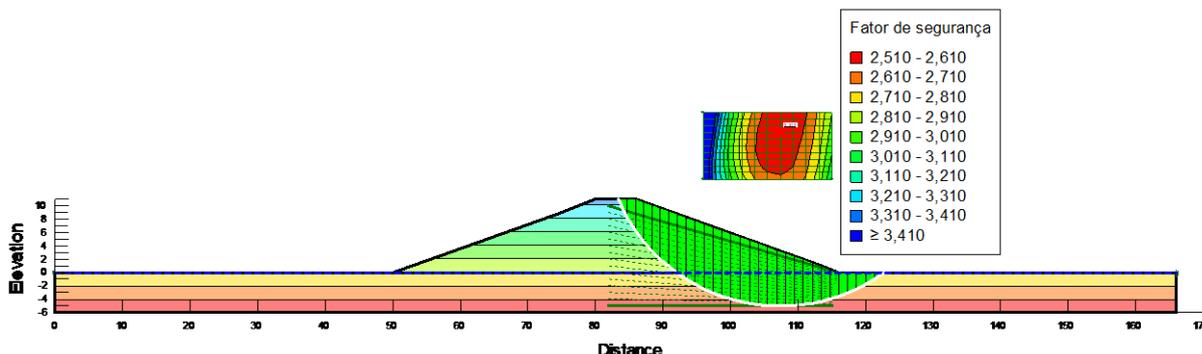


Figura 10 – Análise de estabilidade no talude de jusante na fase de final da construção - barragem sem sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios autores (2019).

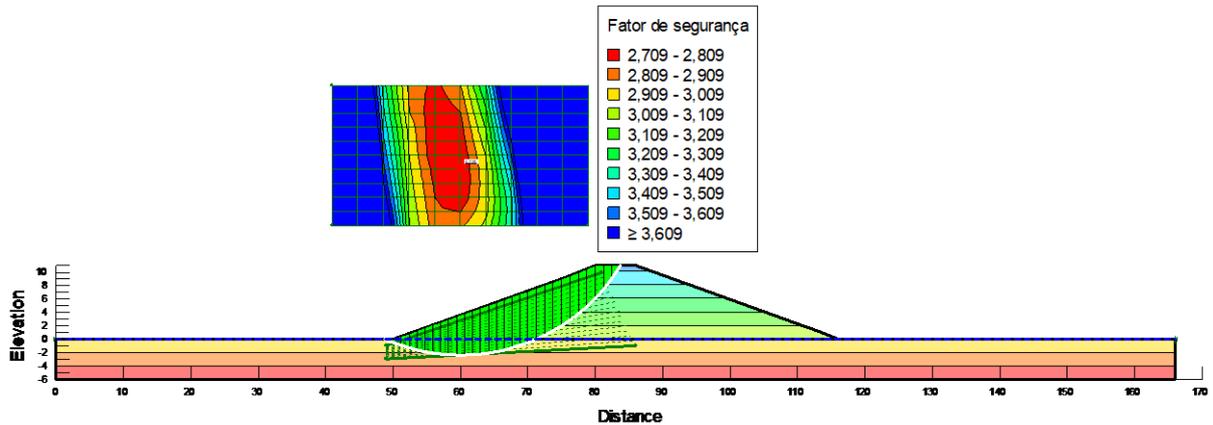


Figura 11 – Análise de estabilidade no talude de montante na fase de final da construção - barragem sem sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios autores (2019).

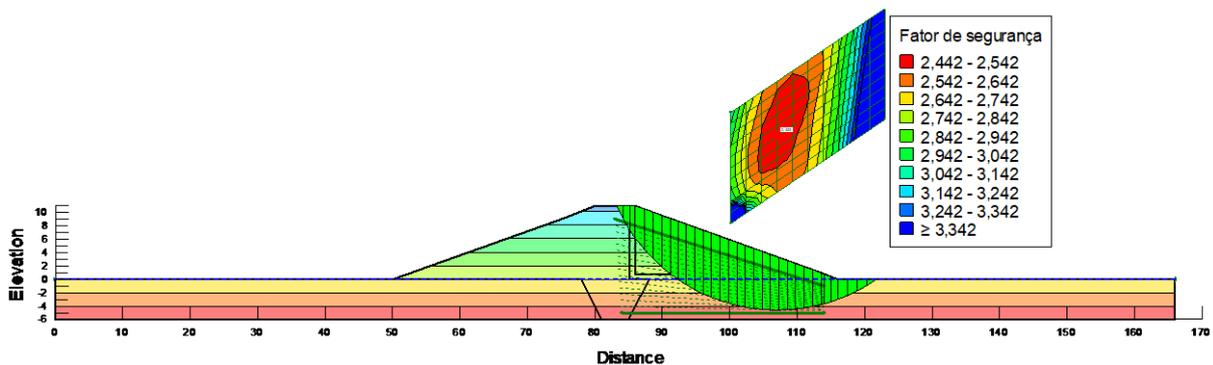


Figura 12 – Análise de estabilidade no talude de jusante na fase de final da construção - barragem com sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios autores (2019).

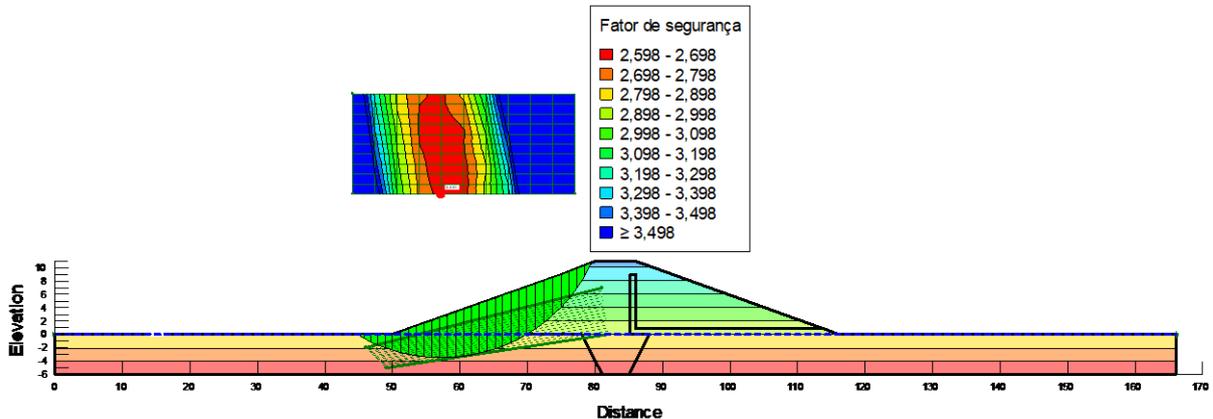


Figura 13 – Análise de estabilidade no talude de montante na fase de final da construção - barragem com sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios autores (2019).

Quadro 2 – Comparação de Fator de Segurança (FS) na fase de construção

Figuras	Análises	Valores obtidos pela análise	Valores referência – Eletrobrás (2003)
10	Análise de estabilidade no talude de jusante na fase de construção - barragem sem sistemas de controle de percolação.	2,510	1,3
11	Análise de estabilidade no talude de montante na fase de construção - barragem sem sistemas de controle de percolação	2,709	1,3
12	Análise de estabilidade no talude de jusante na fase de construção - barragem com sistemas de controle de percolação.	2,442	1,3
13	Análise de estabilidade no talude de montante na fase de construção - barragem com sistemas de controle de percolação.	2,598	1,3

Fonte: Próprios autores (2019).

Como observado, os fatores de segurança FS obtidos nas análises dos taludes a jusante e a montante atenderam aos valores estabelecidos no Manual da Eletrobrás (2003). Logo, a seção escolhida atende com segurança às condições de ruptura.

• Fase de operação

É a avaliação da barragem durante sua vida útil. Nesta fase, a poropressão atuante não é mais a construtiva, é a poropressão estabelecida na análise de percolação estacionária. Como indicado no manual da Eletrobrás (2003), esta análise é a mais conservadora, porque é a situação que vai predominar na vida útil da barragem.

Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 são apresentados os resultados das análises nos casos de não haver e havendo elementos de controle de percolação, para os taludes de montante e jusante.

No Quadro 3 é mostrada uma comparação entre os FS obtidos nas modelagens e os valores especificados no manual da Eletrobrás.

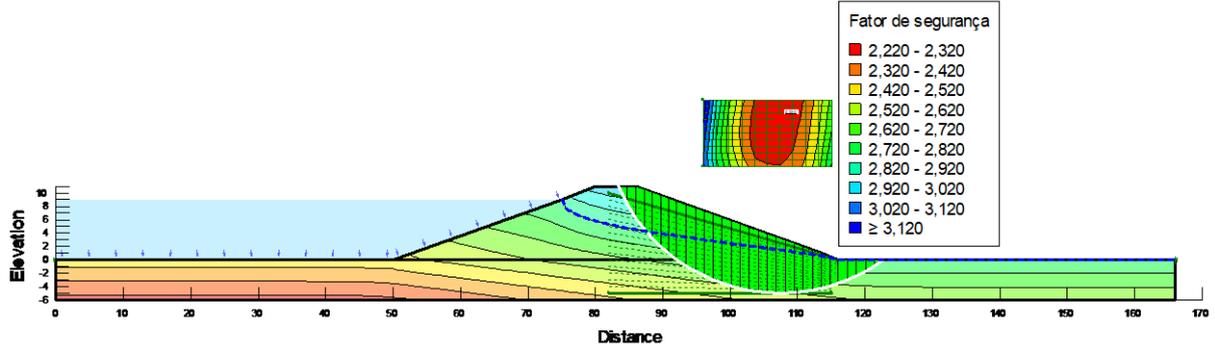


Figura 14 – Análise de estabilidade no talude de jusante (fase de operação) - barragem sem sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios Autores (2019).

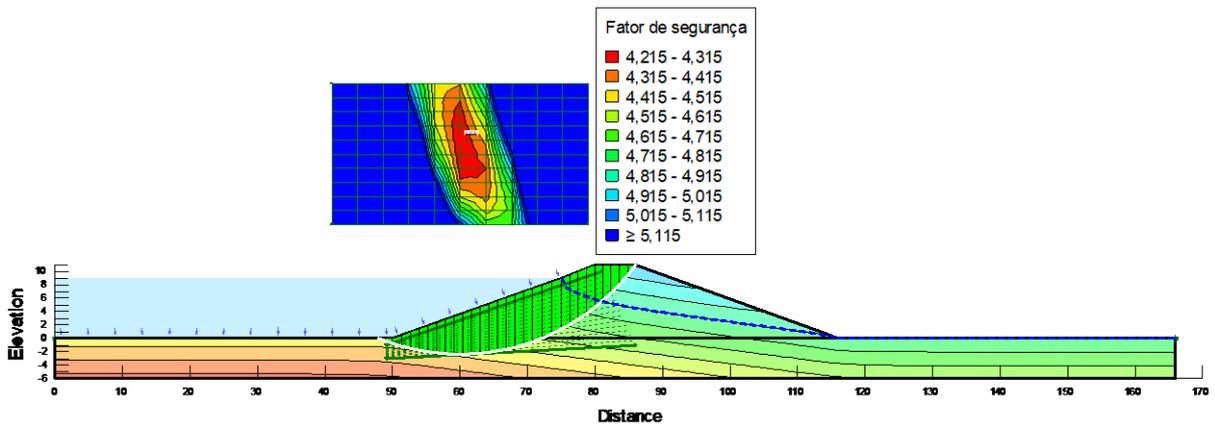


Figura 15 – Análise de estabilidade no talude de montante (fase de operação) - barragem sem sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios Autores (2019).

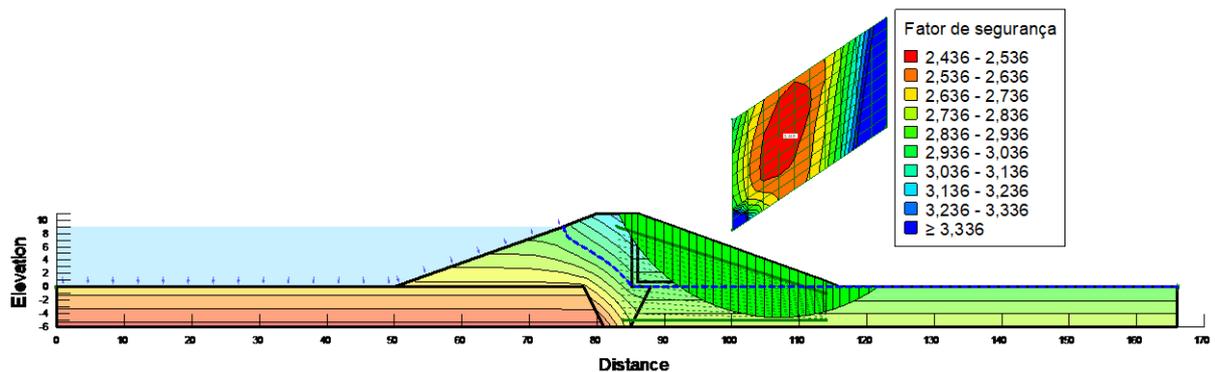


Figura 16 – Análise de estabilidade no talude de jusante (fase de operação) - barragem com sistemas de controle de percolação.
Fonte: Próprios autores (2019).

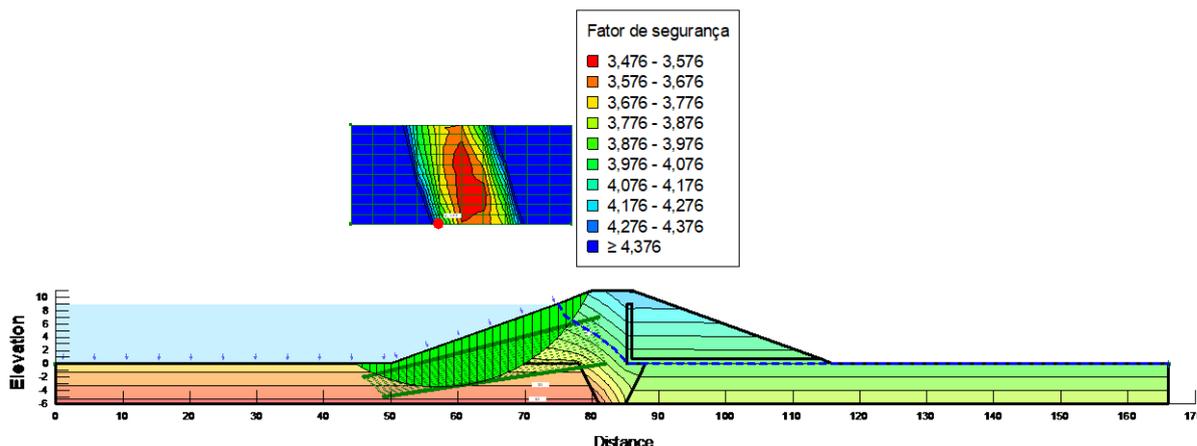


Figura 17 – Análise de estabilidade no talude de montante (fase de operação) - barragem com sistemas de controle de percolação.

Fonte: Próprios autores (2019).

Quadro 3 – Comparação de Fator de Segurança (FS) na fase de operação

Figuras	Análises	Valores obtidos pela análise	Valores referência – Eletrobrás (2003)
14	Análise de estabilidade no talude de jusante - barragem sem sistemas de controle de percolação	2,220	1,5
15	Análise de estabilidade no talude de montante - barragem sem sistemas de controle de percolação	4,215	1,5
16	Análise de estabilidade no talude de jusante - barragem com sistemas de controle de percolação	2,436	1,5
17	Análise de estabilidade no talude de montante - barragem com sistemas de controle de percolação	3,476	1,5

Fonte: Próprios autores (2019).

Conforme demonstrado, os valores obtidos pelas análises atendem aos critérios de FS propostos no Manual da Eletrobrás e mostram que a barragem, mesmo sem os sistemas de controle de percolação, apresenta segurança quanto à possibilidade de ocorrência de escorregamento.

4. Conclusões

Percebe-se pelas análises de percolação, que os elementos de controle de fluxo contribuem para a estabilidade, pois o fluxo é interceptado pelo conjunto de filtros, onde os mesmos se tornam um caminho preferencial, pelo seu material mais permeável.

Nota-se que a barragem sem o sistema de drenagem interno (filtros) possui o risco de ocorrência de *piping*, devido ao fato de a água poder aflorar à jusante caso ocorra alguma anomalia, o que compromete a segurança da mesma. Dessa forma, tem-se que os filtros (drenos) vertical e horizontal controlam o fluxo de água pelo maciço.

Das seções consideradas no estudo, quanto à análise de percolação, os filtros são mais adequados à perspectiva de segurança, pois os mesmos interceptam o fluxo de água, tornando-se o caminho preferencial da água. No entanto, pode-se dizer, que no caso pequenas barragens de terra homogêneas, caso tenham um bom controle de execução e compactação, com utilização de material em quantidade e qualidade adequados, pode-se dispensar o uso do sistema de drenagem interno. Quanto à estabilidade, as duas geometrias estudadas atendem aos fatores de segurança tidos como referência.

Pelas análises de estabilidade de taludes, percebe-se que a superfície de ruptura é profunda, passando pela fundação. Isso indica que a fundação é formada por um solo menos resistente do que o utilizado no maciço, e que ao projetar a barragem, este fato deve ser levado em consideração, pois a resistência da fundação influencia diretamente no comportamento dos taludes da barragem, afetando sua estabilidade.

Para eventuais estudos, é indicado a análise em situações de rebaixamento rápido, e em efeitos sísmicos, os quais não foram possíveis serem realizados devido à limitação da versão estudantil do *software* GeoStudio. Além disso, realizar análises em três dimensões (3D) também se torna válida, pois é possível se assemelhar mais às condições de campo.

Agradecimentos

À Deus pela sabedoria, fundamental para conclusão desse curso.

À nossa família que nos apoiou durante essa caminhada.

À nossa orientadora e amiga, Prof^a, Mestre Isabella, que nos deu todo suporte necessário para a realização desse trabalho.

E a todos que estiveram conosco, durante todo o tempo, torcendo pelo nosso sucesso.

Referências

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. v. 2. 6ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Arnaldo Negreiros; RODRIGUES, J. Martinho de A., **Mecânica dos solos e suas aplicações: mecânica das rochas, fundações e obras de terra**. v. 2, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

CHIOSSI, Nivaldo José. **Geologia de engenharia**. 3ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CINTRA, José Carlos A.; AOKI, Nelson; ALBIERO, José Henrique. **Fundações diretas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Texto, 2011. 136 p.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012, 352 p.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo, Oficina de Textos, 1996.

ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S. A.). **Critérios de projeto civil de Usinas Hidrelétricas**. CBDB, 2003. 278 p.

GEOSLOPE. **Opções de licenciamento**. Disponível em :
<<https://www.geoslope.com/products/geostudio/licensing>>. Acesso em 01 de novembro de 2019.

GUTIÉRREZ, José Luis Carrasco. **Monitoramento da instrumentação da barragem de Corumbá I por redes neurais e modelos de Box & Jenkins**. orientador: Celso Romanel – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2003.

MASSAD, Faiçal. **Obras e terra: curso básico de geotecnia**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MORAES, Marcello da Cunha. **Estruturas de Fundações**. São Paulo: Mcgraw Hill, 1976.

OLIVEIRA, A.M.S. BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 368 p.

ANEXO A

Laudos de sondagens utilizados como referência para a escolha dos tipos de solos utilizados nas modelagens.

Nível do L. Resultado Amostrado	Profund. (m)	PENETRAÇÃO: SPT - N Golpes/30cm					Amostra Nº	COTA DO FURO:						
		Nº DE GOLPES		GRÁFICO				LIMITE DA SONDAAGEM: 14.24m						
		1ª+2ª	2ª+3ª	10	20	30		40	50	NÍVEL D'ÁGUA INICIAL: Furo fechado aos 11.10m				
		Avanço							DATA DA SONDAAGEM: 20/06/2018					
									CLASSIFICAÇÃO					
	-1.00								00	ARGILA siltosa, MARROM.				
	-2.00	4	4						01	SILTE arenoso, fofo, MARROM.				
	-3.00	7	10						02	Areia siltosa, micácea, medianamente compacta, MARROM variegada.				
	-4.00	8	9						03					
	-5.00	13	17						04					
	-6.00	14	17						05					
	-7.00	18	22						06	Idem; compacta.				
	-8.00	20	23						07					
	-9.00	21	25						08					
	-10.00	25	26						09					
	-11.00	27	30						10					
	-12.00	27	31						11					
	-13.00	28	32	12										
	-14.00	32	36	13										
	-15.00	36	39/24	14	Idem; muito compacta.									
	-16.00			15										
	-17.00			16	Nota 1: Furo fechado aos 11,10 metros - presença de solo arenoso.									
	-18.00			17	Nota 2: O nível d'água poderá variar conforme a data da sua leitura.									
	-19.00			18										
	-20.00			19										



Nível do L. Freático L. Amostrado	Profund. (m)	PENETRAÇÃO: SPT - N Golpes/30cm					Amostra Nº	COTA DO FURO:
		Nº DE GOLPES		GRÁFICO				LIMITE DA SONDAGEM: 10.22m
		1ª+2ª	2ª+3ª	10	20	30		40
								DATA DA SONDAGEM: 22/06/2018
								CLASSIFICAÇÃO
	-1.00	Avanço					00	ARGILA siltosa, MARROM.
	-2.00	4	5				01	AREIA siltosa, micácea, pouco compacta, MARROM esverdeado
	-3.00	6	7				02	Idem; com pedregulhos finos diversos.
	-4.00	12	15				03	Idem; medianamente compacta.
	-5.00	14	18				04	
	-6.00	16	21				05	Idem; compacta.
	-7.00	20	24				06	
	-8.00	24	28				07	
	-9.00	27	31				08	
	-10.00	34	39/26				09	Idem; muito compacta.
	-11.00	38/22	20/07				10	
	-12.00						11	
	-13.00						12	Nota: O nível d'água poderá variar conforme a data da sua leitura.
	-14.00						13	
	-15.00						14	
	-16.00						15	
	-17.00						16	
	-18.00						17	
	-19.00						18	
	-20.00						19	