

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

GUSTAVO ALBERNAZ QUEIROZ

**ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE FLUXO EM UMA
BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Giovana Bizão Georgetti

UBERLÂNDIA

2021

ANÁLISE DE CONDIÇÕES DE FLUXO EM UMA BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA

Gustavo Albernaz Queiroz¹

Giovana Bizão Georgetti²

RESUMO

A análise das condições de fluxo em uma barragem de terra é de suma importância e está diretamente ligada a segurança desta estrutura, visto que estuda a percolação da água, ou de qualquer outro fluido, por meio da estrutura e este fenômeno é responsável pelo maior número de acidentes em barragens deste tipo. O presente trabalho apresenta análises de fluxo em uma pequena barragem de terra homogênea que abrangeram quatro variáveis: a condutividade hidráulica saturada da fundação e do solo do maciço, a anisotropia da condutividade hidráulica do solo do maciço e a altura do nível de água. Para cada variável foi analisada a influência desses parâmetros na condição de fluxo percolado no maciço. Nas análises onde foi variada a altura do nível d'água, verificou-se também a influência da mesma nas poropressões atuantes no maciço. Concluindo-se a proporcionalidade entre a condutividade hidráulica e a taxa de fluxo, a relação entre a altura do nível d'água e as poropressões atuantes e a baixa influência da anisotropia na condição de fluxo no maciço. Outra análise realizada foi referente às condições de estabilidade do maciço da barragem a partir das variações da altura do nível d'água, na qual verificou-se a ocorrência de um alto fator de segurança para as condições analisadas, o que condiz com o esperado devido a pequena dimensão da barragem e a inclinação dos seus taludes à montante e à jusante. Ao fim das análises citadas, atingiu-se o objetivo deste trabalho, constatando-se a influência das variáveis citadas nas condições de fluxo de uma pequena barragem de terra.

Palavras-chave: Barragem de terra. Fluxo. Condutividade hidráulica.

ABSTRACT

The analysis of the flow conditions on a earth dam is very important and is directly linked with the security of this structure, since that studies the water seepage, or any other fluid, throught the structure and this phenomem is responsible for a large number of accidents on this type of dams. This paper presents flow analyses on a small homogeneous earth dam that comprise four variables that were ranged: the saturated hydraulic conductivity of the foundation and of the soil mass, the anisotropy of the hydraulic conductivity of the soil mass and the water level . In each case, the influence of the parameters on the flow condition was analysed. In the analyses that the height of water level was varied, itsinfluence on the porepressures was also checked. It was concluded that there is a proportionality between the hydraulic conductivity and the flow rate, the relation between the height of water level and the porepressures and a low influence of the anisotropy on the flux condition in the soil mass. Another analysis was about the stability conditions on the dam mass from the variation of the height of water level, in which a high safety factor was found for all conditions analysed. This was expected due the small dimension of the dam and the slope angles upstream and downstream. In the end of the cited analyses, this paper objective was achieved, determining the influence of all the cited variables on the flow conditions of a small earth dam.

Keywords: Earth dam. Flow. Hydraulic conductivity.

¹Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: gustavoalbernaz1106@hotmail.com

²Professora da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. E-mail: ggeorgetti@ufu.br

1 INTRODUÇÃO

Construídas de forma natural ou artificial sobre córregos, rios ou canais, as barragens têm a função de reter e/ou controlar o fluxo de água ou rejeitos (GAMELEIRA; AMARAL, 2018). Os reservatórios formados pelas barragens podem ter várias finalidades: abastecimento de água, geração de energia, irrigação, controle de enchentes, perenização de rios, piscicultura e lazer, dentre as utilizações mais comuns. (OLIVEIRA, 2014)

Sobre a sua constituição, a barragem de terra é o tipo mais comum e é facilmente encontrada devido à disponibilidade de material terroso no Brasil. Pode ser construída sobre fundações com resistência mais baixa, apoiada sobre solos moles, sendo esta uma considerável vantagem quando comparada com as barragens de concreto. (GAMELEIRA; AMARAL, 2018)

Considerando o grande número de barragens de terra de pequeno porte destinadas à reserva de água existente no Brasil, é importante que se conheçam os fatores que condicionam o fluxo nestes maciços e como esses fatores afetam a segurança das barragens. Neste contexto, o trabalho de conclusão de curso aqui exposto abordou alguns aspectos que afetam o fluxo de água em uma barragem de terra de pequeno porte e, por consequência, afetam sua estabilidade, com o objetivo de contribuir com o conhecimento sobre o assunto. Para isso, foi realizado um estudo paramétrico acerca das condições de fluxo em uma barragem de terra homogênea, adotando-se uma geometria fixada. A análise paramétrica será desenvolvida a partir de uma simulação de fluxo em regime permanente utilizando o software SEEP/W, que utiliza o método de elementos finitos e, posteriormente, uma análise de estabilidade da mesma utilizando o método de Bishop simplificado conforme apresentado no programa SLOPE/W.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Barragens de terra

As barragens de terra são um tipo muito antigo de construção. Um dos registros mais antigos é de uma barragem de 12 m de altura, construída no Egito, há aproximadamente 6,8 mil anos, e que rompeu por transbordamento. As barragens de terra eram “homogêneas”, com o material transportado manualmente e compactado por pisoteamento, por animais ou homens. (MASSAD, 2010)

As primeiras barragens de terra brasileiras foram construídas no Nordeste, no início do século XX, dentro do plano de obras de combate à seca, e foram projetadas tendo como base o empirismo. A barragem de Curema, erguida na Paraíba em 1938, contava com novos conhecimentos da Mecânica dos Solos. Mas somente em 1947, com a barragem do Vigário, atual Barragem Terzaghi, localizada no estado do Rio de Janeiro é que se inaugurou o uso de da moderna técnica de projeto e construção de barragens de terra no Brasil. Foi também um marco, pois pela primeira vez Terzaghi empregou o filtro vertical ou chaminé como elemento de drenagem interna de barragens de terra. (VARGAS, 1977)

No Brasil, até setembro de 2014, foi registrada a existência de cerca de 15 mil barragens. Quanto ao uso, 89% são empreendimentos de usos múltiplos da água, como abastecimento humano, irrigação e geração de energia quando esse não é o uso preponderante. Em relação à dimensão, dentre as barragens cadastradas, verifica-se que 81% ainda estão sem informação suficiente para classificá-las quanto à dimensão, 10% foram cadastradas como pequenas e 9% como grandes. Entre as barragens com informação, predominam aquelas de terra, com altura inferior a 10 m e volume inferior a 3 hm³. Há de se supor que grande parte das barragens sem informação são pequenas barragens de uso múltiplo. (PERSECHINI et al., 2015)

As principais vantagens envolvidas na construção de barragens de terra são a utilização de materiais naturais locais; a simplicidade dos procedimentos de projeto; a menor exigência de requisitos para as fundações em comparação a outros tipos de barragens; e a maior resistência deste tipo de barragem em relação ao assentamento e a movimentos. Já as desvantagens são a maior facilidade em ser danificada ou destruída pela água corrente, passando sobre ou batendo contra ela; a necessidade de acompanhamento e fiscalização quanto à compactação adequada para que a estrutura não apresente pontos preferenciais de infiltração, diminuindo sua integridade estrutural; e a necessidade de manutenção contínua para evitar erosão, crescimento de árvores, sedimentação, infiltração e danos provocados por animais. (FAO, 2011)

2.2 Fatores que interferem no desempenho hidráulico das barragens de terra

Dentre os diversos fatores que interferem no desempenho hidráulico das barragens de terra destacam-se neste estudo: nível de água, tipo e grau de compactação do solo e do material constituinte do aterro, condutividade hidráulica saturada e não saturada, anisotropia na condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica saturada é uma das propriedades de maior relevância para estudos de movimento de água, substâncias químicas e solutos, e se trata de

uma das propriedades do solo de mais alta variabilidade (PINHEIRO; NUMMER; RAUBER, 2017).

A condutividade hidráulica é o coeficiente de proporcionalidade da lei de Darcy. Em 1850, Darcy verificou experimentalmente como os diversos fatores geométricos influenciavam a vazão da água, expressando a equação que ficou conhecida pelo seu nome: (PINTO, 2006)

$$Q = k \cdot \frac{h}{L} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: Q = vazão; k = coeficiente de condutividade hidráulica; h = carga que se dissipa na percolação; L = distância ao longo da qual a carga se dissipa.

Os valores de k dependem de vários fatores: viscosidade do fluido, distribuição de tamanho dos poros, distribuição granulométrica, índice de vazios, rugosidade das partículas minerais e grau de saturação do solo (DAS, 2007). Seu valor máximo é atingido quando o solo se encontra saturado. A partir da condutividade hidráulica saturada e utilizando modelos matemáticos, pode-se determinar a condutividade hidráulica não saturada.

Quanto à distribuição granulométrica, valores típicos de coeficientes de condutividade hidráulica para os solos sedimentares foram apresentados por Pinto (2006) e estão na Tabela 1.

Tabela 1: Valores típicos de condutividade hidráulica

argilas	$< 10^{-9}$ m/s
siltos	10^{-6} a 10^{-9} m/s
areias argilosas	10^{-7} m/s
areias finas	10^{-5} m/s
areias médias	10^{-4} m/s
areias grossas	10^{-3} m/s

Fonte: Pinto, 2006

A compactação dos solos influencia de modo direto a distribuição de tamanho de poros e o índice de vazios. No que se refere à distribuição de tamanho de poros, a condição inicial de umidade do solo para compactação influencia em suas características finais. Por exemplo, amostras de um mesmo solo com mesmo índice de vazios tenderão a apresentar permeabilidades diferentes em função da estrutura. A amostra no estado disperso terá uma permeabilidade menor que a amostra de estrutura floculada. Este fator é marcante porque, geralmente, quando compactados no ramo seco, os solos apresentam uma disposição de partículas (estrutura floculada) que permite maior passagem de água do que quando

compactados mais úmidos (estrutura dispersa), ainda que com o mesmo índice de vazios. (MACHADO; MACHADO, [s.d.]

Outro fator que interfere na permeabilidade de um solo é a anisotropia. Geralmente, o solo não é isotrópico em relação à permeabilidade. Solos sedimentares costumam apresentar maiores coeficientes de condutividade hidráulica na direção horizontal do que na vertical. Isso decorre do fato de as partículas tenderem a ficar com suas maiores dimensões orientadas na posição horizontal e, principalmente, porque as diversas camadas decorrentes da sedimentação apresentam permeabilidades diferentes. O mesmo ocorre com solos compactados. Coeficientes médios de condutividade hidráulica na direção horizontal 5, 10 ou 15 vezes maiores do que na vertical são comuns. (PINTO, 2006)

2.3 Fluxo bidimensional

Com muita frequência, a água ocupa a maior parte ou a totalidade dos vazios do solo. Submetida a diferenças de potenciais, a água desloca-se no seu interior. O estudo da percolação da água nos solos é importante porque intervém em problemas práticos como o cálculo das vazões, a análise de recalques e o estudo de estabilidade. (PINTO, 2006)

Em muitos casos, a água não percola através do solo em apenas uma direção, nem é uniforme ao longo de toda a área perpendicular ao fluxo. Nessas situações, a percolação da água do lençol freático geralmente é calculada por meio de redes de fluxo, cujo conceito tem como base a equação da continuidade de Laplace, que define a condição de percolação em regime permanente em determinado ponto na massa de solo. (DAS, 2007)

A equação diferencial de fluxo é a base para o estudo da percolação bi ou tri dimensional. Tomando um ponto definido por suas coordenadas cartesianas (x,y,z), considerando o fluxo através de um elemento infinitesimal em torno deste ponto, e assumindo a validade da lei de Darcy, solo homogêneo, solo e água incompressíveis, é possível deduzir a equação tridimensional do fluxo em meios não-saturados: (MARANGON, 2018)

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{e+1} \cdot \left(e \cdot \frac{\partial S}{\partial t} + S \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (Eq. 2)$$

Onde: k_j = permeabilidade na direção j; h = carga hidráulica total; S = grau de saturação; e = índice de vazios; t = tempo.

Quando se tem um fluxo permanente ou estacionário em solo saturado, no qual o índice de vazios e o grau de saturação não variam com o tempo, tem-se a seguinte equação:

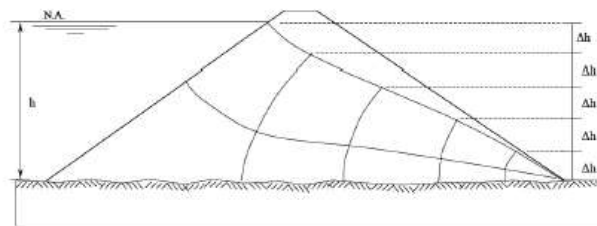
$$k_x \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

Quando se considera um meio isotrópico, tem-se a equação da continuidade de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Eq. 4})$$

A solução da equação diferencial de Laplace é constituída por dois grupos de funções, as quais podem ser representadas dentro da zona de fluxo em estudo, por duas famílias de curvas ortogonais entre si que formam um reticulado chamado Rede de Fluxo. Dentre os métodos utilizados para se resolver a equação de Laplace, há o método gráfico por tentativas, exemplificado na figura 1. Há também soluções utilizando métodos numéricos em programas computacionais, tal como nos trabalhos de Gameleira e Amaral (2018) no qual foi utilizado, também, o software SEEP/W e Oliveira (2014) que utilizou o software GEO5-MEF, ambos baseados no método dos elementos finitos.

Figura 1: Rede de fluxo em uma barragem de seção homogênea



Fonte: Oliveira, 2014

2.4 Estabilidade de barragens de terra

Durante o projeto de uma barragem de terra, dois aspectos são preponderantes: economia e segurança. A segurança da barragem deve ser garantida quanto ao transbordamento, que pode abrir brechas no corpo de barragens de terra; à erosão interna e ao fenômeno de areia movediça; à ruptura dos taludes artificiais e naturais; ao efeito das ondas formadas pela ação dos ventos; e ao efeito erosivo das águas das chuvas sobre o talude de jusante. (MASSAD, 2010)

Para garantir a estabilidade dos taludes, os métodos convencionais de análise baseiam-se na hipótese de existir equilíbrio em uma massa de solo, onde um fator de segurança (F_s) é definido através da relação entre a resistência ao cisalhamento do solo (s) e a tensão cisalhante atuante (τ) no estudo da estabilidade de taludes de barragem de terra e naturais (MASSAD, 2010). Usualmente utilizam-se F_s maiores ou igual a 1,5 para o final da construção e

reservatório no nível máximo de operação, e a partir de 1,2 para rebaixamento rápido do nível do reservatório. (MEIRELLES, 2013)

Um dos métodos convencionais utilizados para o estudo de estabilidade é o método de Bishop, que, segundo Silva (2013), foi o primeiro método menos rigoroso capaz de analisar superfícies potenciais de ruptura com forma circular. E, a partir deste método, foi desenvolvido o método de Bishop Simplificado, o qual considera que as forças de interação entre as fatias são horizontais e se anulam, desconsiderando as forças tangenciais entre elas. Sendo, este segundo, utilizado pelo software SLOPE/W do presente trabalho.

Para atender adequadamente ao princípio de estabilidade, os taludes de montante e de jusante por regra são diferentes. A pressão de percolação é favorável a estabilidade do talude de montante para jusante e desfavorável ao talude de jusante, devido ao sentido de percolação da água. (MEIRELLES, 2013)

3 METODOLOGIA

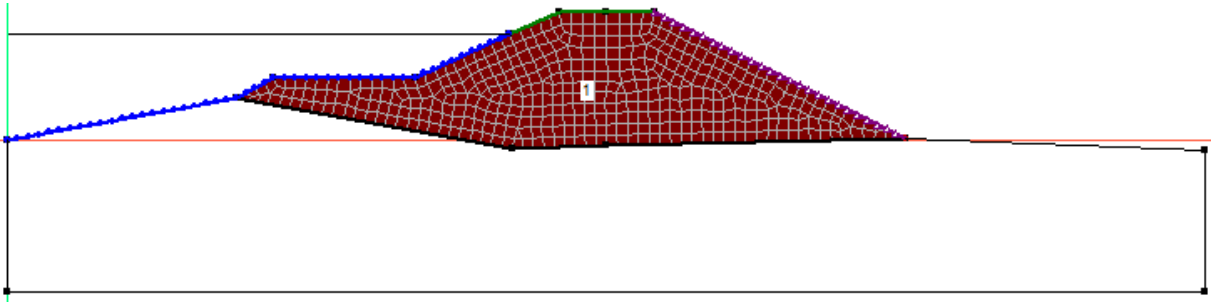
Com o objetivo de analisar a influência de fatores como condutividade hidráulica, altura do nível d'água do reservatório e anisotropia do solo nas condições de fluxo e na estabilidade em um maciço de uma pequena barragem de terra, foram realizadas simulações utilizando os softwares SEEP/W e SLOPE/W. O primeiro com objetivo de avaliar a variação provocada pelos parâmetros citados nas condições de fluxo no maciço da barragem e, o segundo para analisar a influência dos mesmos nas condições de estabilidade deste maciço.

Para a análise de fluxo desenvolvida neste trabalho, o regime de fluxo adotado foi o permanente e fixou-se a condição de carga constante, sendo o valor definido em função da elevação do nível d'água do reservatório.

3.1 Os softwares SEEP/W e SLOPE/W

De acordo com a desenvolvedora SEEQUENT, o SEEP/W é um software de elementos finitos para modelar o fluxo de água subterrânea em meios porosos. Na sua versão Estudante, a qual foi utilizada neste trabalho, pode-se modelar problemas no regime permanente de fluxo, em estruturas compostas por até três materiais diferentes e com uma malha de até 500 elementos. Neste trabalho foi utilizada uma malha, mostrada na figura 2, com 425 elementos de tamanho global aproximado do elemento de 0,45m. São elementos triangulares e quadriláteros, totalizando 507 nós ao final.

Figura 2: Malha de elementos finitos utilizada no trabalho



Fonte: Autor, 2021

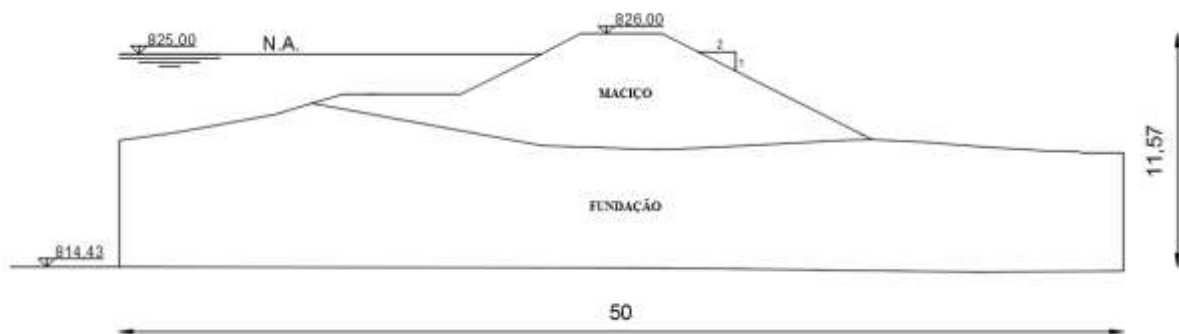
O software SEEP/W possui um modelo matemático que simula o processo físico real da água fluindo por entre as partículas do solo, através do método dos elementos finitos e da Lei de Darcy. (GAMELEIRA; AMARAL, 2018)

SLOPE/W é um componente de um grupo de produtos geotécnicos chamado GeoStudio. Uma das funcionalidades mais poderosas desse software é a possibilidade de análises muito mais amplas e uma gama mais complexa de problemas, incluindo o uso de elementos finitos considerando poropressões e tensões em uma análise de estabilidade. Não somente este software amplia as análises as possibilidades de análises, mas também auxilia na resolução de algumas limitações do uso simplesmente da teoria do equilíbrio limite. (GEO-SLOPE, 2012)

3.2 Geometria da barragem e parâmetros do solo

A geometria da seção da barragem foi definida com base em um trabalho desenvolvido por SANTOS (2019), que corresponde a uma pequena barragem de terra situada no sudeste de Goiás e é esquematizada na Figura 3. O terreno de fundação onde se encontra a barragem é predominantemente composto de silte argiloso.

Figura 3: Seção transversal da barragem de terra e suas dimensões (medidas em metros)



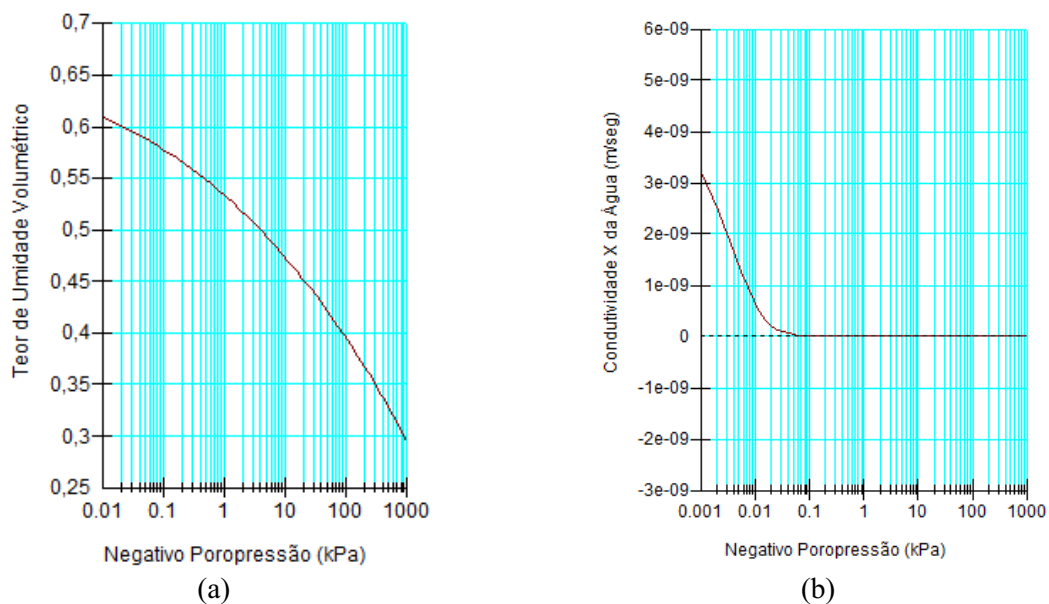
Fonte: Autor, 2021

O solo utilizado no aterro do maciço teve suas características pautadas pelos trabalhos de Carminati (2018) e Willemann (2020). Tal combinação de dados para a definição dos materiais a serem utilizados neste trabalho se deu com o intuito de gerar uma aproximação da situação aqui abordada, pequenas barragens de terra, contextualizando com um tipo de solo de ocorrência na região de Uberlândia. Trata-se de um solo laterítico argiloso compactado na energia Proctor normal.

Com os dados extraídos dos trabalhos citados anteriormente partiu-se para a identificação do material do maciço no software SEEP/W. Inicialmente, foi definida a condição de saturação do material que, para este trabalho, foi considerada como saturação parcial. Depois, foram adicionados os parâmetros relacionados à curva de retenção, a qual o SEEP/W calcula baseado no modelo de Fredlund e Xing (1994), a saber, a , n , m e *teor de umidade volumétrica saturada* (TUV_{sat}), sendo que os três primeiros são parâmetros de ajuste da curva. Os parâmetros para o solo do maciço foram obtidos ajustando o modelo aos dados experimentais de Carminati (2018) para sucções até 1200 kPa, sendo gerada a curva de retenção mostrada na Figura 4(a).

Além da curva de retenção, outra curva necessária para a caracterização do material é a curva de condutividade hidráulica, que também é baseada no modelo de Fredlund e Xing (1994) e o parâmetro solicitado pelo software para a confecção da curva é a condutividade hidráulica horizontal saturada ($k_{x,sat}$) que foi obtido em Willemann (2020) para o solo em questão e gerou a curva mostrada na Figura 4(b).

Figura 4: (a) Curva de retenção e (b) curva de condutividade hidráulica do solo do maciço pelo modelo de Fredlung-Xing (1994)



Fonte: Autor, 2021

Por fim, o último dado de entrada para a caracterização é a relação (k_y/k_x), que é a relação entre a condutividade hidráulica vertical e horizontal do solo e foi obtida, também, do trabalho de Willemann (2020) e possui valor de 0,65 para o solo considerado no maciço da barragem deste trabalho.

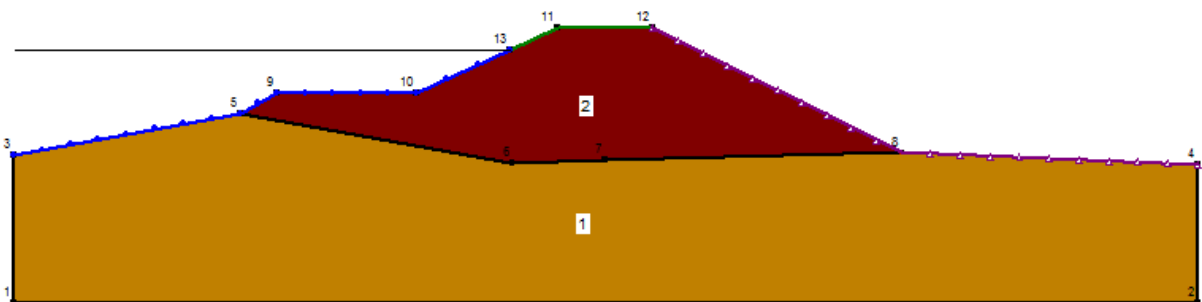
Para o material constituinte da fundação da barragem, um silte argiloso, foi usado como base o trabalho de Sampaio et al. (2006) que, para uma amostra de mesma classificação granulométrica, apresentaram permeabilidade igual a 4×10^{-6} m/s e teor de umidade volumétrico saturado equivalente a 43%. A condição de saturação do material da fundação da barragem em questão foi admitida considerando um material totalmente saturado, visto que toda sua extensão se localiza abaixo da linha freática de fluxo.

3.3 Análise paramétrica

3.3.1 Condição inicial

A figura 5 ilustra a configuração inicial de análise, com os dados apresentados no item 3.2.

Figura 5: Configuração inicial da barragem



Fonte: Autor, 2021

Após caracterizados os materiais, foi necessário determinar as condições de contorno da barragem. Na região de montante (linha azul), cargas de pressão foram prescritas nos nós, reproduzindo a pressão de água no reservatório. Inicialmente, definiu-se uma superfície com carga hidráulica de 4,3 m em função do nível d'água (NA) do reservatório. Na região de jusante da barragem (linha roxa), delimitou-se uma faixa com condição de contorno de superfície livre.

3.3.2 Variáveis analisadas

Para o solo da fundação, considerou-se um valor de condutividade hidráulica isotrópica (k_x) de $3,22 \times 10^{-9}$ m/s para a análise 1, $k_x = 4,0 \times 10^{-6}$ m/s para a análise 2 e $k_x = 1,0 \times 10^{-30}$ m/s para a condição de controle e demais análises, simulando uma condição de camada impermeável para a fundação.

Como exposto anteriormente, para a configuração inicial do maciço da barragem utilizou-se um valor de condutividade hidráulica (k_{x0}) de $3,22 \times 10^{-9}$ m/s (configuração de controle) que, posteriormente, foi variado para $k_{x3} = 1,0 \times 10^{-8}$ m/s (análise 3) e $k_{x4} = 1,0 \times 10^{-10}$ m/s (análise 4). Os valores foram estabelecidos com base na faixa de variação de condutividade hidráulica encontrada na literatura para solos argilosos.

Para a condição inicial de análise deste trabalho, o NA do reservatório foi fixado a uma altura (h_0) de 4,3 m (configuração de controle) e, em seguida, variou-se esse parâmetro para $h_5 = 4,8$ m (análise 5) e $h_6 = 3,8$ m (análise 6). Os limites definidos para essa variável foram função da altura do talude de montante, que é de 5,3m e da borda livre, que é originalmente de 1,0 m. Para cada mudança do NA, a carga hidráulica era modificada, para que o primeiro nó coincidissem com esse nível.

Para o solo do maciço da barragem, levou-se em conta a anisotropia na condutividade hidráulica, ou seja, a relação entre os coeficientes de condutividade hidráulica vertical e horizontal. Para a condição inicial, essa relação ($k_{y/x0}$) foi fixada em 0,65 (configuração de controle) e, posteriormente, variou-se para $k_{y/x7} = 0,325$ (análise 7) e $k_{y/x8} = 1,0$ (análise 8), variação essa que buscou analisar a influência da redução da condutividade hidráulica em y (direção vertical) em 50% do valor inicial e da condição isotrópica, respectivamente.

Porém, antes de ser realizar a análise da condição inicial apresentada no item anterior, foi verificada uma condição na qual fundação e maciço da barragem apresentassem os mesmos parâmetros, somente para uma calibração inicial do software.

As configurações adotadas neste trabalho para análises de fluxo são resumidas na tabela 2.

Tabela 2: Variáveis para cada análise

Análise	Parâmetros variados			
	Condutividade hidráulica saturada do maciço ($k_{x,sat}$) [m/s]	Nível d'água do reservatório (N.A.) [m]	Anisotropia do solo do maciço (k_y/k_x)	Condutividade hidráulica da fundação (k_x) [m/s]
Controle	3,22E-09	4,3	0,65	1,00E-30
1	3,22E-09	4,3	0,65	3,22E-09
2	3,22E-09	4,3	0,65	4,00E-06
3	1,00E-08	4,3	0,65	1,00E-30
4	1,00E-10	4,3	0,65	1,00E-30
5	3,22E-09	4,8	0,65	1,00E-30
6	3,22E-09	3,8	0,65	1,00E-30
7	3,22E-09	4,3	0,325	1,00E-30
8	3,22E-09	4,3	1,00	1,00E-30

Fonte: Autor, 2021

Uma outra variável importante que condiciona o fluxo em barragens de terra é a presença de filtro e suas características de geometria e composição. Porém, considerando as dimensões da barragem em estudo, a presença de filtro não se fez necessária.

3.3.3 Análise de estabilidade

Para a análise de estabilidade do maciço da barragem foi utilizado o software SLOPE/W. Para a caracterização do solo do maciço da barragem foram requeridos pelo software o peso específico saturado do solo (γ_w), a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito do mesmo (ϕ) que, para este trabalho, foram extraídos de Carminati (2018) e assumiram os valores: $\gamma_w = 18,2\text{kN/m}^3$, $c' = 38\text{kPa}$ e $\phi = 31^\circ$. Já para a caracterização do solo da fundação foi usado como base o trabalho de Oliveira e Almeida (2018) e Oliveira (2019) com os valores de $\gamma_w = 16,0\text{kN/m}^3$, $c' = 11,5\text{kPa}$ e $\phi = 30^\circ$.

Nesta condição variou-se a altura do nível d'água a fim de verificar a influência do mesmo na estabilidade do talude de jusante do maciço da barragem.

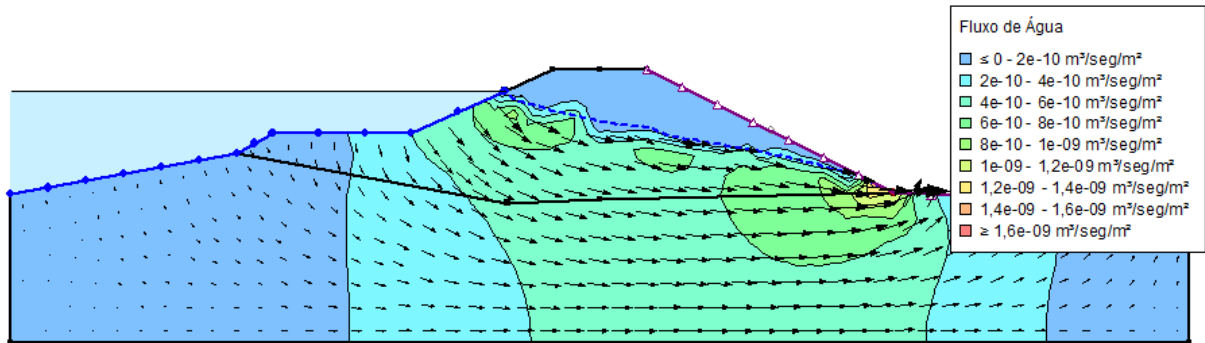
4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste tópico serão abordados os resultados das análises de fluxo e de estabilidade realizadas nos softwares SEEP/W e SLOPE/W, bem como a análise e interpretação dos resultados encontrados.

4.1 Permeabilidade da fundação

A análise 1 realizada no software, descrita em 3.3.2, retornou o resultado mostrado na figura 6.

Figura 6: Fluxo de água considerando fundação e maciço com os mesmos parâmetros (análise 1)

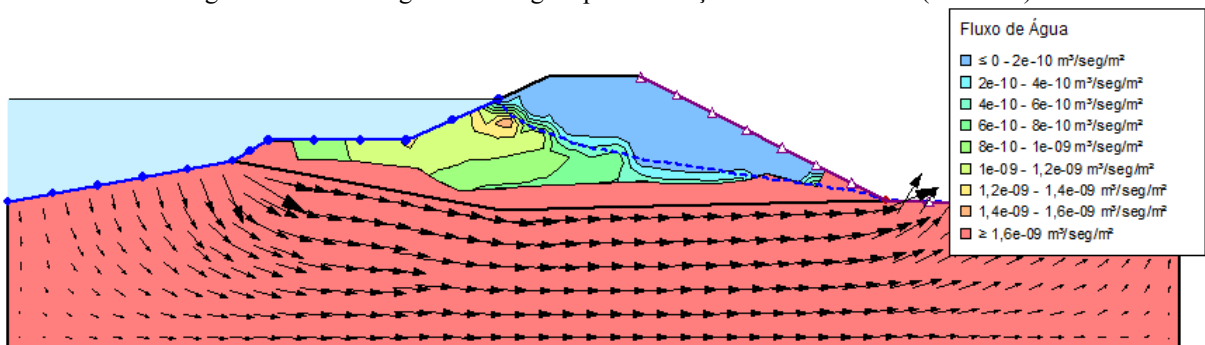


Fonte: Autor, 2021

Conforme esperado, para esta configuração, o software retornou uma condição de fluxo uniforme entre maciço e fundação, já que ambos são constituídos por materiais com os mesmos parâmetros.

A análise 2 apresentada em 3.3.1, retornou o resultado mostrado na figura 7. A ocorrência de fluxo predominantemente pela fundação corrobora a observação de Gameleira e Amaral (2018): “Em geral, as vazões que percolam através das fundações são superiores as que percolam através do aterro, devido a fundação se encontrar em seu estado natural e o aterro ser construído com material compactado.”

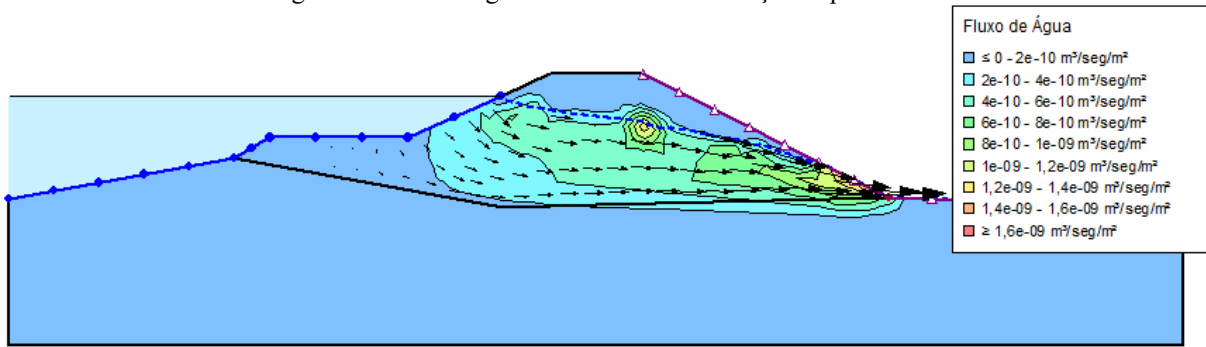
Figura 7: Fluxo de água na barragem para fundação com solo siltoso (análise 2)



Fonte: Autor, 2021

Com o resultado indicado pela figura 7, referente à análise 2, no qual o fluxo caminha predominantemente pela fundação da estrutura e, como o objetivo deste trabalho é realizar a análise das condições de fluxo no maciço de uma pequena barragem de terra, optou-se por prosseguir as análises considerando a fundação da barragem como uma camada impermeável, adotando-se um valor de condutividade hidráulica consideravelmente baixo, na ordem de 10^{-30} m/s. O resultado é mostrado na figura 8.

Figura 8: Fluxo de água considerando a fundação impermeável



Fonte: Autor, 2021

A partir da análise dos resultados mostrados nas figuras 6, 7 e 8 pôde-se realizar algumas comparações. Nota-se a mudança da posição da linha freática, a qual, no centro da crista, atinge uma profundidade de 2,20 m na configuração em que solo e maciço possuem os mesmos parâmetros, 3,03 m na condição de fundação é formada em solo siltoso, e 1,80 m na situação em que a fundação foi impermeável. Deste modo, a linha freática ficou mais baixa na barragem quanto maior foi a permeabilidade da fundação.

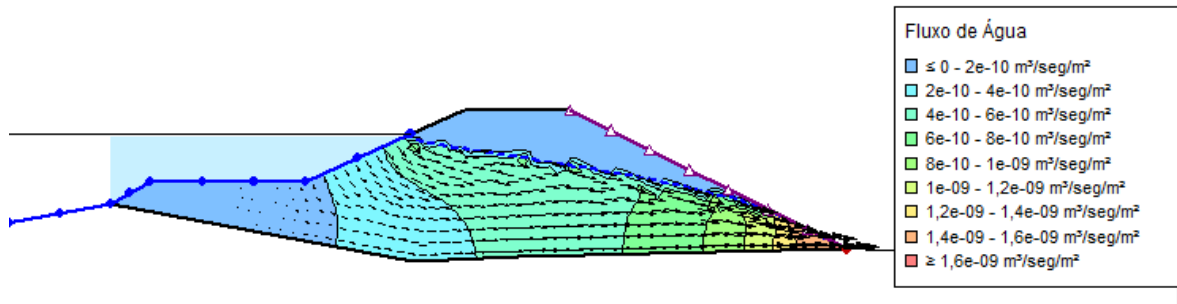
Além disso, foi observada a mudança na altura que o nível freático atinge o talude de jusante. Essa altura, utilizando-se como ponto de referência o pé da barragem, tem o valor de 0,47 m para a primeira situação, 0,0 m para a segunda situação, e 1,31 m para a última. Podendo-se assim, estabelecer também uma relação entre a permeabilidade da fundação e a altura que o nível freático atinge o talude de jusante.

Nos três casos há uma concentração de fluxo no pé do maciço da barragem. Porém há uma variação na ordem de grandeza do fluxo percolado em cada caso. Nos casos das figuras 6 e 8, o fluxo teve valores máximos de $1,49 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}^3$ e $1,63 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}^2$ respectivamente, valores esses que estão compreendidos em uma mesma ordem de grandeza. Já no caso da figura 7, teve-se como valor máximo de fluxo $7,11 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{seg}/\text{m}^2$, que é um valor da ordem de 100 vezes maior que o dos demais casos. Fato esse que é compreensível e se deve ao fator da condutividade hidráulica da fundação, que é por onde o fluxo percola majoritariamente neste caso, também ser consideravelmente maior em comparação aos demais casos.

Devido à alta permeabilidade do material original da fundação combinada à limitação imposta pela versão estudante do software, optou-se por realizar as análises paramétricas considerando apenas o maciço da barragem, visto que esta parte é o enfoque do presente trabalho. Com isso, gerou-se a malha descrita no item 3.1.

Esta configuração gerou um resultado que servirá como controle para as discussões acerca das variações paramétricas que se desenvolveram neste trabalho e este resultado é mostrado na figura 9.

Figura 9: Resultados de fluxo e linha piezométrica da configuração de controle



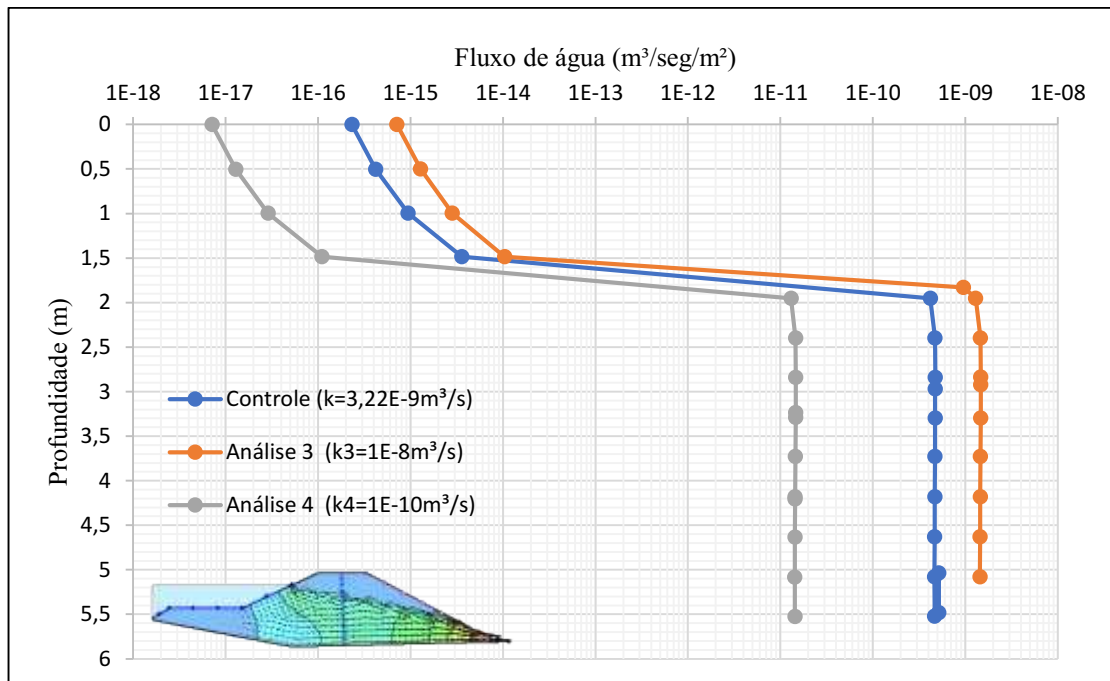
Fonte: Autor, 2021

O fluxo se distribuiu de maneira homogênea pelo maciço. No meio da crista da barragem a profundidade do nível freático foi de 1,80 m e no talude de jusante, este se encontrava a 1,41 m metros do pé do maciço.

4.2 Permeabilidade do maciço da barragem

Para as análises 3 e 4, foram mantidas as condições de altura de nível d'água e de anisotropia do solo do maciço e variou-se a condutividade hidráulica do mesmo para $1,0 \times 10^{-8}$ m/s e $1,0 \times 10^{-10}$ m/s respectivamente. A partir dos dados fornecidos pelo software, plotou-se um gráfico onde evidencia-se a relação entre fluxo e condutividade hidráulica saturada do solo. A região utilizada para a aferição dos dados se localiza no meio da crista da barragem para todas as análises realizadas.

Figura 10: Fluxo de água para diferentes condutividades hidráulicas



Fonte: Autor, 2021

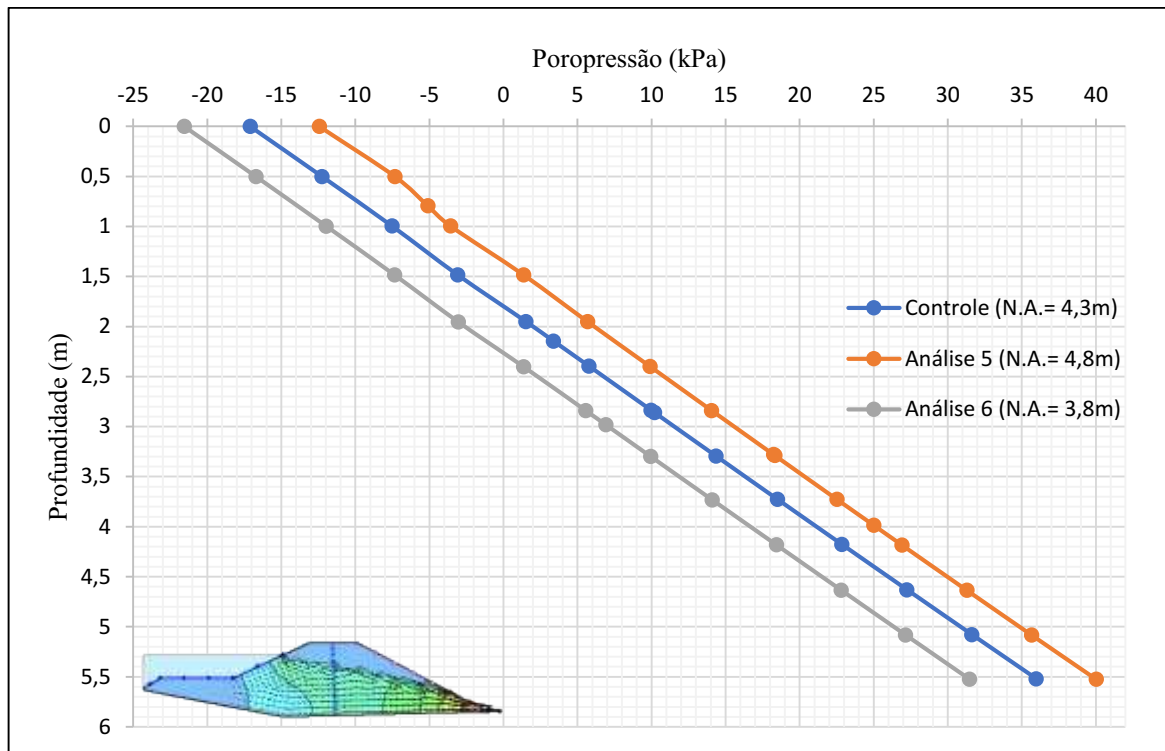
Pode-se observar que o fluxo ao longo da profundidade varia de uma maneira similar para diferentes valores de condutividade hidráulica saturada do maciço. A partir da profundidade 1,95m, onde se localiza a superfície freática, a taxa de fluxo se torna constante, já que o solo assume sua máxima permeabilidade.

Como esperado, para um valor maior de condutividade hidráulica tem-se um fluxo de água maior em todas as profundidades do maciço, sendo a relação fluxo/condutividade hidráulica uma constante.

4.3 Altura do nível d'água

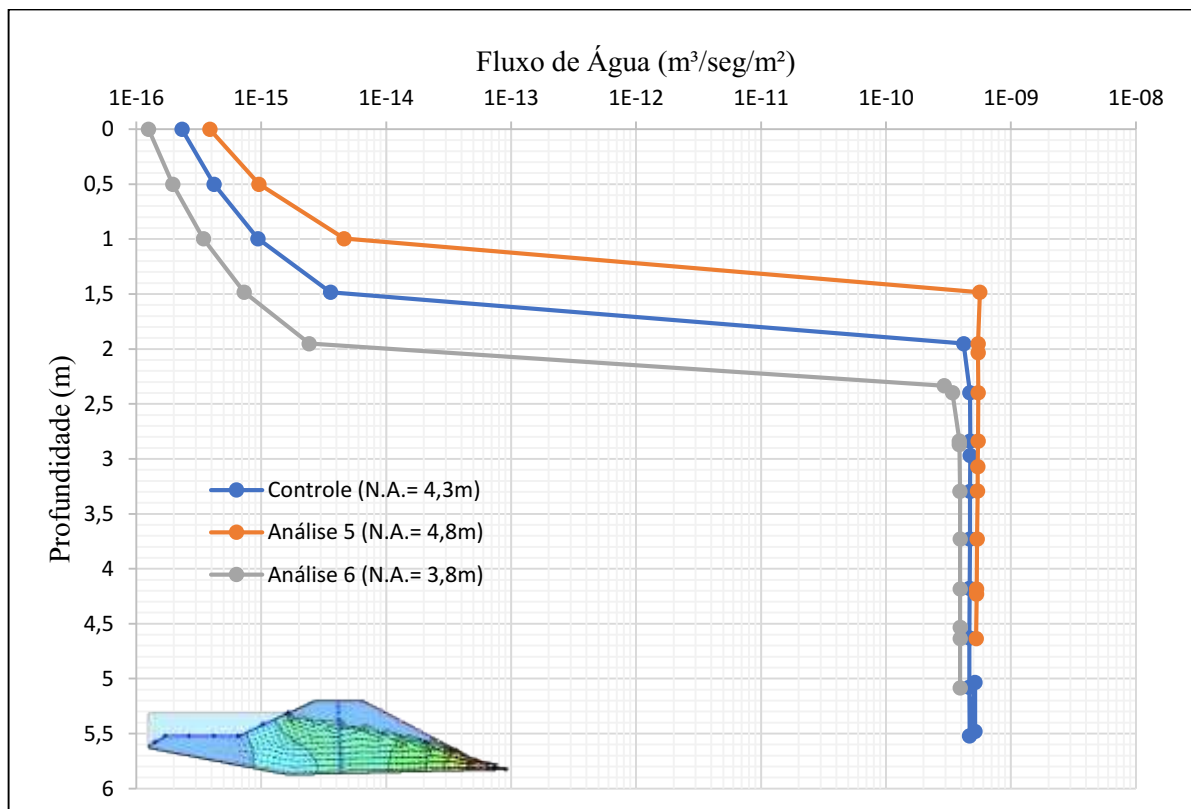
Para a quinta e sexta análises, foram mantidas as condições de condutividade hidráulica e de anisotropia do solo do maciço e variou-se a altura de nível d'água do mesmo para 4,8 m 3,8 m respectivamente. Os resultados podem ser observados nas figuras 11 e 12.

Figura 11: Poropressões para diferentes alturas de NA



Fonte: Autor, 2021

Figura 12: Fluxo de água para diferentes alturas de NA



Fonte: Autor, 2021

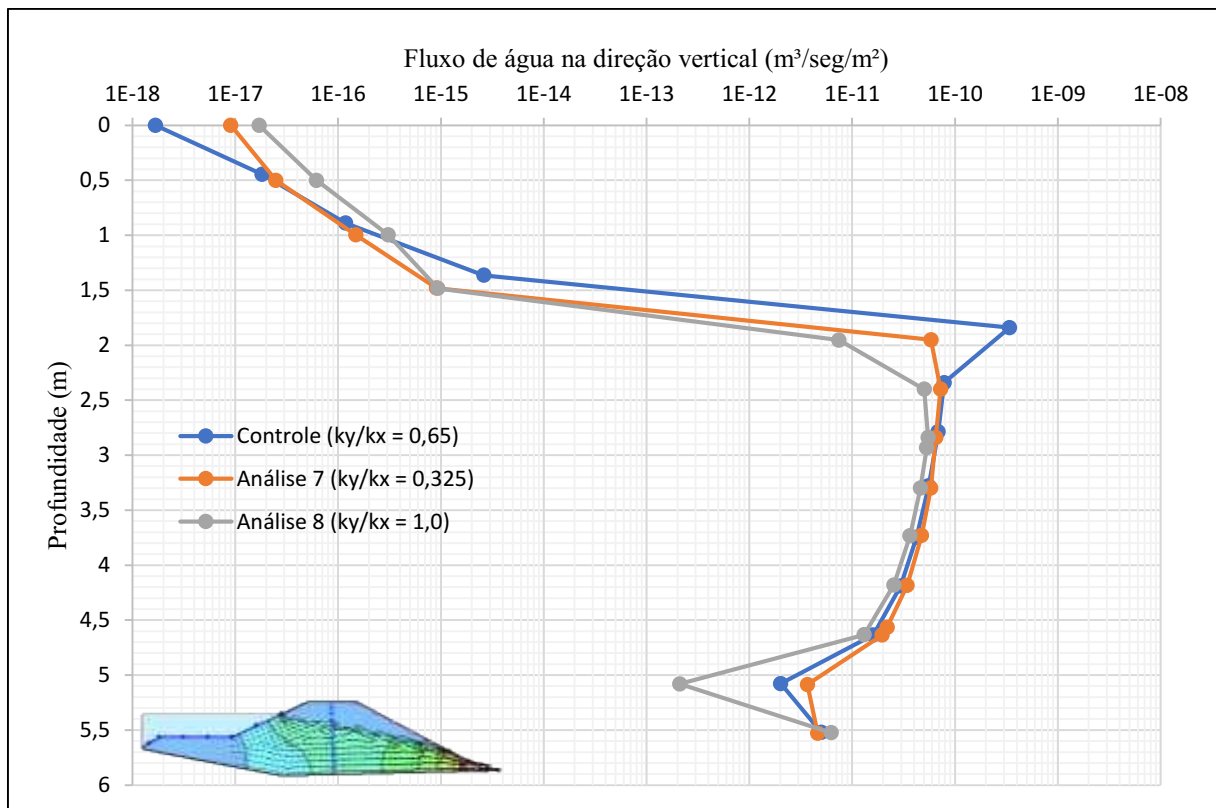
Verifica-se que, como esperado, houve uma variação da poropressão com as variações da altura do NA do reservatório, sendo o valor máximo obtido de 40 kPa. Este aumento da poropressão resulta em alívio de tensões e pode afetar a estabilidade do maciço. A variação da poropressão total ao longo da profundidade foi mais expressiva para maior cota do NA.

No que se refere à taxa de fluxo, a diferença observada para o maciço saturado, entre as análises com o NA igual a 3,8 m e 4,8 m, foi inferior a $1,62 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$, já para a região não saturada, na profundidade de 1,95m, a diferença foi desprezível.

4.4 Anisotropia da permeabilidade da barragem

Para a sexta e sétima análises, foram mantidas as condições de altura de nível d'água e de condutividade hidráulica do solo do maciço e variou-se a anisotropia do mesmo para uma relação (k_y/k_x) de 0,325 e 1,0 respectivamente. A Figura 13 mostra a comparação dos resultados destas análises em relação à condição de controle considerando a componente vertical de fluxo, já que a componente horizontal permanece constante para um mesmo k_y .

Figura 13: Fluxo de água na direção vertical em função da anisotropia



Fonte: Autor, 2021

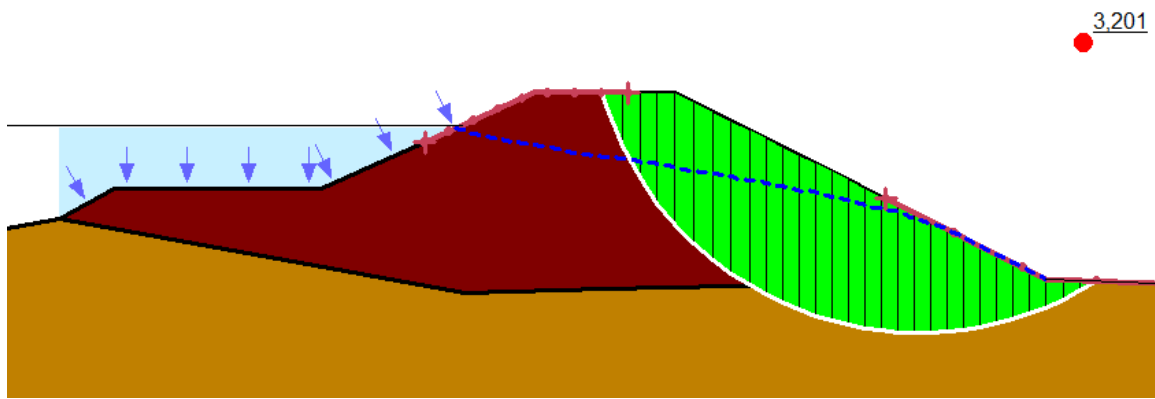
Com o valor de condutividade hidráulica adotado para a condição de controle não se identificou variações expressivas nos valores de fluxo de água na direção vertical, observando-

se quase que uma convergência nos gráficos das 3 análises. Logo, para o valor de condutividade hidráulica saturada em x (direção horizontal) adotado para a condição de controle não houve grande influência da anisotropia deste parâmetro no fluxo de água na direção vertical nas duas análises realizadas, em relação à condição de controle.

4.5 Análise de estabilidade

A condição de controle gerou como resultado um fator de segurança (FS) no valor de 3,201, como mostrado na figura 14.

Figura 14: Pesquisa da superfície potencial de ruptura para NA a 4,3 m



Fonte: Autor, 2021

A primeira variação se deu com altura de nível d'água de 4,8 m, o que retornou um FS de 3,158, que um pouco inferior ao anterior. Para uma altura do NA de 3,8m, o FS foi de 3,242. Deste modo, não se observou uma variação considerável no valor do fator de segurança, com este ficando sempre consideravelmente acima do valor de 1,5 citado em 2.5.

Pode-se citar como causa desse alto fator de segurança a pequena altura da barragem, que contribui com a estabilidade do maciço por gerar baixas tensões solicitantes. Além disso, segundo recomendação da FAO (2011), barragens homogêneas deverão ter taludes relativamente planos (1:3 a montante e 1:2 a jusante) como segurança contra possível instabilidade. No caso da barragem do presente trabalho, esta condição é satisfeita a jusante, porém, a montante a inclinação do talude é de 1:2,2. Mesmo com tal valor, o talude a montante possui, ainda, baixa inclinação ($24,4^\circ$) comparada com a inclinação de 1:3 ($18,4^\circ$) recomendada. Podendo-se, assim, dizer que tal inclinação dos taludes do maciço também é um fator contribuinte para o alto FS encontrado na análise realizada.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudadas a relação entre alguns parâmetros e a condição de fluxo em um maciço de uma pequena barragem de terra, além da influência da altura do nível d'água na estabilidade do talude de jusante deste mesmo maciço.

Os resultados indicaram que a condutividade hidráulica saturada tem influência direta nas condições de fluxo, confirmando-se a proporcionalidade entre fluxo e este parâmetro, visto que a variação da condutividade hidráulica resultou em significativa variação nos valores de fluxo nas profundidades analisadas.

Notou-se que a altura do nível d'água está diretamente ligada às condições de segurança de uma barragem, pois a altura do NA afeta diretamente as cargas de pressão de água e, conseqüentemente, a segurança do maciço.

Foi constatado, também, que a anisotropia do solo do maciço tem pouca influência sobre as condições de fluxo, variando em uma escala mínima o fluxo percolado em todas as profundidades analisadas.

Já nas análises de estabilidade, foi observada uma pequena variação no valor do fator de segurança da superfície potencial de ruptura do talude de jusante quando se variou a altura do nível d'água. Na condição inicial, ou de controle, desta barragem já se encontrava um fator de segurança consideravelmente acima do mínimo recomendado na literatura e, com as variações adotadas, este fator permaneceu na mesma ordem de grandeza, nunca inferior a 3,15, valor este bem acima do mínimo de 1,5 encontrado na bibliografia. E tal valor pode ser diretamente relacionado à pequena altura da barragem e à inclinação dos taludes do maciço.

Concluindo-se, assim, que dentre os parâmetros que afetam as condições de fluxo em barragens de terra homogênea se destacam a condutividade hidráulica do solo constituinte do maciço e a altura do nível d'água do reservatório. Tendo, a anisotropia na condutividade hidráulica, pouca influência sobre esta condição. Atingindo-se, então, o objetivo deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. A. de; OLIVEIRA, R. M. M. de. Estimativa do ângulo de atrito e coesão através de índices de resistência obtidos pela sondagem SPT em solo laterítico e colapsível característico da cidade de Cascavel no estado do Paraná. **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica**. Salvador, 2018.

CARMINATI, N. **Caracterização e classificação geotécnica de um solo de Uberlândia:** aspectos lateríticos e de retenção de água. Relatório Técnico - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

CARMINATI, N. **Influência da sucção na estabilidade de um aterro no campus Glória da UFU**. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Tradução da 6ª edição norte-americana, 2007.

STEPHENS, T. et al. **Manual sobre pequenas barragens de terra**. Roma: FAO, 2011.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, p. 14, 1994.

GAMELEIRA, E. L.; AMARAL, F. N. DA S. **Análise do fluxo de água no maciço de uma barragem de terra com filtro**. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia Civil, Centro Universitário Cesmac, Maceió, 2018.

MACHADO, S. L.; MACHADO, M. DE F. C. **Apostila de Mecânica dos Solos II**. Setor de Geotecnia - Universidade Federal da Bahia, Salvador, [200-?].

MARANGON, M. **Hidráulica dos solos - volume II**. Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

MASSAD, F. **Obras de terra - curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEIRELLES, F. S. C. **Curso Segurança de Barragens**. Foz do Iguaçu: Agência Nacional de Água (ANA), 2013.

OLIVEIRA, D. A. DE. **Análise do fluxo de água no maciço de uma barragem de terra com filtro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

OLIVEIRA, R. D. de. **Estudo e análise da estabilidade de um talude no município de Joiville/SC**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2019.

PERSECHINI, M. I. M. et al. **Segurança de Barragens, Engenharia a Serviço da Sociedade**. 1. ed. Brasília: BIRD - Banco Mundial, 2015.

PINHEIRO, R. J. B.; NUMMER, A. V.; RAUBER, A. C. Determinação da condutividade hidráulica das principais unidades geológico-geotécnicas de Santa Maria - RS. **Geociências**. São Paulo, v. 36, n. 2, p. 347-363, 2017.

PINTO, C. DE S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

ROMANINI, A. **Aula 03 - Fluxo no Solo - Fluxo não confinado**. Notas de Aula - Universidade do Estado de Mato Grosso, Sinop, 2018.

SAMPAIO, F. DE M. T. et al. Correlações entre a permeabilidade e os atributos físicos do solo da sub-bacia do córrego centenário da cidade de Lavras-Mg. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, p. 798–803, 2006.

SANTOS, L. C. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos**. Trabalho de Conclusão de Curso - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

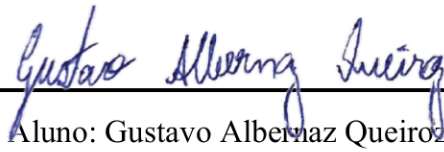
SEEPAGE Modeling with SEEP/W. Calgary: GEO-SLOPE International Ltda, 2012.

STABILITY Modeling with SLOPE/W. Calgary: GEO-SLOPE International Ltda, 2012.

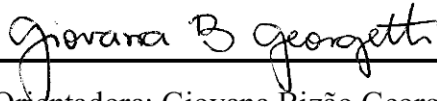
VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

WILLEMANN, V. M.; GEORGETTI, G. B. **Condutividade hidráulica de um solo laterítico argiloso compactado**. Relatório Técnico - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

FOLHA DE ASSINATURAS



Aluno: Gustavo Albernaz Queiroz



Orientadora: Giovana Bizão Georgetti