

Thaís Teixeira Menezes

ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Palmas - TO

2019

Thaís Teixeira Menezes

ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e
apresentado como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro
Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA)

Orientador: Prof. MSc. Edivaldo Alves dos Santos

Palmas - TO

2019

Thaís Teixeira Menezes


ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO EM BARRAGEM DE TERRA PELO MÉTODO DOS
ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) II elaborado e
apresentado como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro
Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA)

Orientador: Prof. MSc. Edivaldo Alves dos Santos

Aprovado em: 09/12/2019

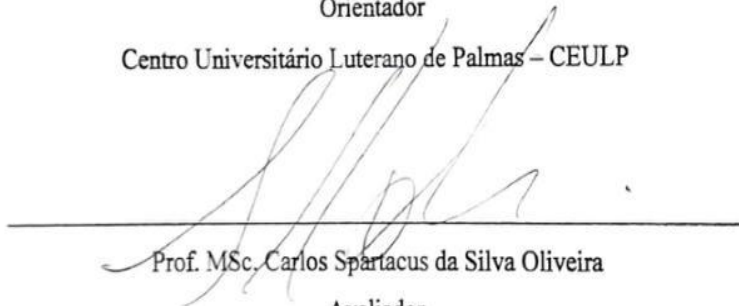
BANCA EXAMINADORA



Prof. MSc. Edivaldo Alves dos Santos

Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. MSc. Carlos Spartacus da Silva Oliveira

Avaliador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP



Prof. MSc. Kenia Parente Lopes Mendonça

Avaliador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2019

Dedico esse trabalho à minha família, que não mediu esforços nem palavras de apoio durante esses anos para que eu trilhasse o caminho do conhecimento e do sucesso.

AGRADECIMENTOS

A instituição divina que é meu corpo que apesar dos contratempos causados por uma sociedade tóxica se fez todo poderoso diante das provações e se manteve firme no decorrer deste percurso.

A minha saúde mental que não cedeu à minha personalidade negativa, aquela que sempre disse que somente “ser eu” não é o bastante, que tudo que eu faço não é o suficiente, que é bem melhor desistir do que perder tempo, para no final ser um fracasso. A essa entidade eu agradeço por estar presente em todo momento, seja o bom ou o ruim, sempre entendendo meus surtos e me aceitando, me impedindo de pular do prédio todas as vezes que tive uma chance.

Aos meus pais, minha irmã, meus tios, tias e primos, por terem os melhores abraços, os melhores ensinamentos, as melhores palavras de apoio e conforto e por sempre terem acreditado em mim e na minha capacidade, mesmo eu não tendo tanta certeza sobre. São e sempre serão o melhor marketing que eu tenho.

A todos os amigos que passaram pela minha vida, deixaram sua marca, sua sabedoria, sua alegria e que de alguma forma me ajudaram a crescer e me tornar quem sou hoje.

A instituição e seu corpo de funcionários que proporcionou o aprendizado que me capacitou, os encontros que me socializaram e os debates que me conscientizaram.

Por fim, gostaria de deixar o meu profundo agradecimento a todos os professores pelos anos de conselhos e palavras capacitadas, pelo empenho e prazer em ensinar, por me fazer acreditar que tudo pode melhorar.

Em especial, ao meu orientador, o mestre Edivaldo Alves dos Santos que com sua paixão em passar seus conhecimentos e com o sorriso de prazer ao ver que seus alunos o entendiam, me fez amar a área de geotecnia e realizar esse trabalho.

“Vi Veri Veniversum Vivus Vici: Pelo poder da verdade, eu enquanto vivo, conquistei o universo.” (V de Vingança)

RESUMO

MENEZES, Thaís Teixeira. **Análise de percolação em barragem de terra pelo método dos elementos finitos**. 2019. 48f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas – TO, 2019.

O presente trabalho propõe uma análise de percolação através do método dos elementos finitos (MEF) em uma barragem de terra hipotética com o intuito de estabelecer a linha freática no maciço e os caminhos de fluxo na fundação. Tendo em vista que o comportamento da água tende a ser imprevisível e pode gerar instabilidade da estrutura, podendo gerar o colapso, causando perdas inestimáveis. Diante de tal problema, foi feita pesquisa teórica, norteadora na elaboração de uma situação problema a ser analisada e solucionada - a partir dos princípios estudados e relatados neste trabalho; posteriormente, foi utilizado o software SEEP/W GeoStudio da GeoSlope, para aplicação do MEF e o SLOPE/W como extensão para análise de estabilidade da estrutura. O resultado dessa pesquisa reforça que estudos de percolação devem ser amplamente difundidos e obrigatórios, pois antecipam situações caóticas, podendo ser solucionadas de forma econômica, viável e segura.

Palavras-chave: Análise. Percolação. MEF. Barragem. SEEP/W

ABSTRACT

MENEZES, Thaís Teixeira. **Water flow analysis in an earth dam through finite elements method.** 2019. 48p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas – TO, 2019.

This present paper proposes a water flow analysis through Finite Element Method (FEM) in a hypothetical earth dam to establish the water table in the soil and the flow paths in the foundation. Given that water behavior tends to be unpredictable and can generate structure instability that may collapse and cause invaluable losses. Faced with this problem, extensive theoretical research was conducted, guiding the elaboration of a problem situation to be analyzed and solved - based on the principles studied and reported in this work; Subsequently, GeoSlope's SEEP/W software was used to apply the MEF and SLOPE/W was used as an extension for structural stability analysis. The result of this research reinforces that percolation studies should be widely disseminated and mandatory, as they anticipate chaotic situations and can be solved in an economical, viable and safe manner.

Keywords: Analysis. Water flow. FEM. Dam. SEEP/W

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Disposição de uma malha de elementos finitos	17
Figura 2 – Análise de fluxo de água em barragem de terra.	18
Figura 3 – Vetores de fluxo.	19
Figura 4 – Curvas características solo-água para os diferentes tipos de solo.....	24
Figura 5- Zonas correspondentes a curva característica solo-água	25
Figura 6 – Seção típica da barragem.	36
Figura 7 – Aplicação das condições de contorno para primeira análise.....	38
Figura 8 – Seção típica da barragem com dreno de pé.	39
Figura 9 - Aplicação das condições de contorno para segunda análise.....	39
Figura 10 – Página de abertura do GeoStudio.	40
Figura 11 – Configurações iniciais da análise SEEP/W	40
Figura 12 – Adicionando análise SLOPE/W.....	41
Figura 13 – Configurações iniciais da análise SLOPE/W.....	41
Figura 14 – Configurações da superfície de pesquisa.	42
Figura 15 – Ferramenta linhas.....	43
Figura 16 – Configuração dos materiais.....	43
Figura 17 – Configuração da função do teor de umidade volumétrico.	44
Figura 18 – Curva da função do teor de umidade volumétrico.	44
Figura 19 – Configuração da função de condutividade hidráulica.....	45
Figura 20 – Curva da função de condutividade hidráulica.....	45
Figura 21 – Configurações da superfície de pesquisa.	46
Figura 22 – Aplicando materiais as regiões.....	47
Figura 23 – Aplicando condições de contorno na geometria.	47
Figura 24 – Propriedades da malha.	48
Figura 25 – Vetores de fluxo e linha freática sem dreno.....	49
Figura 26 – Distribuição das pressões neutras sem dreno.	50
Figura 27 – Análise de estabilidade, método de Bishop, primeira condição.....	50
Figura 28 - Vetores de fluxo e linha freática com dreno.	51
Figura 29 – Distribuição das pressões neutras com dreno.....	52
Figura 30 - Análise de estabilidade, método de Bishop, segunda condição.....	52

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Valores típicos do Coeficiente de Permeabilidade (K)	23
Quadro 2 – Variação da porosidade conforme solo	25
Quadro 3 - Altura da borda livre (m), para barragens com altura ≤ 10 m.	29
Quadro 4 – Taludes preliminares para diversos tipos de solo	30
Quadro 5 – Propriedades geotécnicas e físicas dos materiais envolvidos na análise.	37

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
FEM	<i>Finite Elements Method</i>
FS	Fator de Segurança
H	Altura
MEF	Método dos Elementos Finitos
N.A	Nível de gua
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
Q	Vazão
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SUCS	<i>Sistema Unificado de Classificação dos Solos</i>
SWCC	<i>Soil-Water Characteristic Curve</i>
USBR	<i>US Bureau of Reclamation</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo Geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 DEFINIÇÃO E TIPOS DE BARRAGENS.....	15
2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	16
2.2.1 Lei de Darcy e as equações de fluxo bidimensional.....	19
2.2.2 Equação básica dos elementos finitos.....	21
2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	22
2.3.1 Funções de condutividade hidráulica e umidade volumétrica.....	23
2.4 CRITÉRIOS DE PROJETO.....	26
2.3.1 Seção Típica.....	26
2.3.2 Condicionantes da Fundação.....	27
2.3.3 Condicionantes do Maciço.....	28
2.3.4 Critérios Geométricos.....	29
2.4 VERIFICAÇÃO DO PROJETO.....	30
2.4.1 Estabilidade de Taludes.....	30
2.4.2 Controle de Fluxo.....	32
2.4.3 Compatibilidade de Deformações.....	32
2.5 SISTEMA INTERNO DE DRENAGEM E PROTEÇÃO DE TALUDE.....	33
3 METODOLOGIA.....	35
3.1 GEOMETRIA DA SEÇÃO.....	35
3.1.1 Seção típica da barragem.....	36
3.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	36
3.2.1 Propriedades dos materiais.....	37
3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	37
4.1.3 Condições de Contorno.....	37
3.4 ANÁLISE DE FLUXO E ESTABILIDADE.....	38
3.5 ANÁLISE COM DRENO DE PÉ.....	39
3.6 CONFIGURANDO O SEEP/W E O SLOPE.....	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49

4.1 PRIMEIRA ANÁLISE – SEM ELEMENTO DRENANTE.....	49
4.2 SEGUNDA ANÁLISE – COM ELEMENTO DRENANTE.....	51
5 CONCLUSÕES	53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
APÊNDICES.....	57

1 INTRODUÇÃO

No contexto em que vivemos hoje, as barragens têm grande importância econômica, ambiental e social no país, tendo em vista a ampla gama de aplicações que sua construção proporciona como aproveitamento hidrelétrico, regularização de vazões de rios, controle de inundações, abastecimento urbano e irrigação, entre outras aplicações.

As barragens de terra são as mais comuns pelo país, segundo Massad (2010), devido a topografia dos vales, disponibilidade de materiais apropriados em localidades próximas a construção e por permitir fundações mais deformáveis. Porém, esse tipo de estrutura sofre com a percolação de água no interior de seu maciço e caso o gradiente hidráulico seja muito alto há possibilidade de ocorrer erosão interna prejudicando sua estabilidade (CRAIG, 2007).

Rupturas de barragens têm sido causadas, principalmente, pelo fator água que extravasa e provoca erosão nos taludes ou por uma percolação excessiva que carrega partículas de solo da fundação. A ação hidráulica não controlada diminui a resistência efetiva do solo compactado, favorece o escorregamento da massa por se transformar em uma componente de força, provoca carregamento de material ao ter gradientes muito altos.

Aparece então a necessidade de controlar o fluxo de água no conjunto maciço-fundação, a fim de evitar uma movimentação que ocasiona na instabilidade da estrutura. Para isso é preciso o conhecimento do caminho preferencial da água e suas possíveis alterações quando a estrutura é submetida a situações diversas de carregamento. Compreendendo o comportamento da barragem diante dessas condições, aumentam as possibilidades de prever soluções para os cenários de ruptura.

Ao fazer uma análise de percolação obtém-se subsídios para esse controle, como vazões de descarga e os caminhos de fluxo, valores de poropressão para aplicar em análises de estabilidade e análise de deformação. Encontrar tais subsídios é o propósito do trabalho a seguir.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar a influência dos drenos em barragem de pequeno porte por análise de percolação através do software SEEP/W™ da GeoSlope Company.

1.1.2 Objetivos Específicos

Apresentar caminhos de fluxo;

Apresentar valores de pressão neutra;

Analisar a estabilidade de talude.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DEFINIÇÃO E TIPOS DE BARRAGENS

A Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), define barragem como “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”. A estrutura é construída transversalmente à direção de escoamento de um curso d’água e usualmente classificada pelo tipo de material de sua seção, podendo ser de concreto, enrocamento ou terra.

As barragens de concreto gravidade resistem aos esforços que são aplicados pela água através do peso próprio da estrutura. Requer fundações em rocha, pela necessidade de capacidade de suporte elevada. Se comparadas com barragens de aterro, têm custo elevado. (MARANGON, 2004). As barragens de concreto em arco, com dupla curvatura, são limitadas pela relação entre o comprimento e altura dessas estruturas, o que exige sua construção em vales fechados com material capaz de suportar os esforços.

As barragens de enrocamento são as mais estáveis dentre as barragens de aterro (MASSAD, 2010). Utilizam-se blocos de rocha, que apresentam ângulo de atrito elevado e não são facilmente desintegradas e material de núcleo argiloso que garante o represamento de água. O local adequado para tal estrutura deve possuir disponibilidade de material rochoso, o vale deve ser estreito na cota da crista para um volume menor de construção, o local deve ser acessível para a construção e as fundações e ombreiras devem ser resistentes e estanques.

As barragens de terra são as mais utilizadas no Brasil. Constituídas de materiais naturais, como solo e rocha, são recomendadas para locais onde há disponibilidade de solo argiloso, areno-argiloso ou areno-siltoso, onde a topografia seja suavemente ondulada e permite localização apropriada do vertedouro. São estruturas com seção transversal trapezoidal que toleram qualquer tipo de fundação, seja da mais compacta a mais deformável.

Esse tipo de barragem pode apresentar seção homogênea ou zoneada, a depender da qualidade e quantidade dos materiais no local, dos processos construtivos possíveis e dos solos que constituem a fundação (MEIRELLES, 2013).

A barragem homogênea é constituída praticamente por um único material, suficientemente impermeável que permita os níveis aceitáveis de percolação, a inclinação dos taludes de montante e jusante devem ser diferentes e suaves para atender a estabilidade durante a vida útil da barragem.

Do tipo zoneada é constituída por materiais menos permeáveis no núcleo central ou a montante da seção e materiais mais permeáveis que suportam e protegem o núcleo. De acordo com Massad (2010), tal estrutura é uma otimização para aproveitar as características do solo seco onde se deseja mais resistência e do solo úmido onde procura-se por estanqueidade.

Há ainda barragens em que o aterro é construído pelo transporte do solo pela água, por meio de tubulações até o local da construção, são conhecidas como barragens de aterro hidráulico. O material segrega-se, a areia forma os espaldares do aterro e os finos constituem o núcleo da barragem. É uma técnica com alta capacidade construtiva, permite execução de aterros submersos, permite a construção em solos colapsáveis e os mecanismos de construção são simples quando comparados aos métodos tradicionais. Porém, leva a grande desgaste da tubulação e dos equipamentos por atrito e exige cuidados específicos pelo risco de liquefação.

A escolha do tipo de barragem é influenciada por fatores locais como o material de empréstimo disponível na região ponderada para a obra, a natureza da fundação, aspectos geológicos-geotécnicos, hidrologia e topografia.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Ao se projetar uma barragem, conhecer e controlar o fluxo pelo maciço, fundação e ombreiras são requisitos fundamentais para a segurança da obra. A importância do estudo da percolação da água no solo se apoia nas estatísticas que apresentam a movimentação da água como fator de causa de muitos problemas práticos, como drenagem superficial, controle de águas subterrâneas, cálculo de vazões, análise de recalques, estabilidade de taludes etc.

Os métodos numéricos, como método das diferenças finitas e métodos dos elementos finitos, passaram a ser usados em decorrência da dificuldade de se resolver problemas de fluxo em meios porosos. Eles transformam a equação diferencial parcial do fluxo em equações integrais e, no caso de MEF, fazem a discretização do domínio dos elementos.

Os programas para essa análise fornecem soluções com aproximação eficiente do real e soluções rápidas. E vem sendo utilizados amplamente na prática. A credibilidade dos resultados depende das condições de contorno impostas e dos parâmetros adotados. As abordagens que

têm por base o MEF permitem determinar em diversos pontos do maciço e da fundação o estado de tensão que se desenvolve.

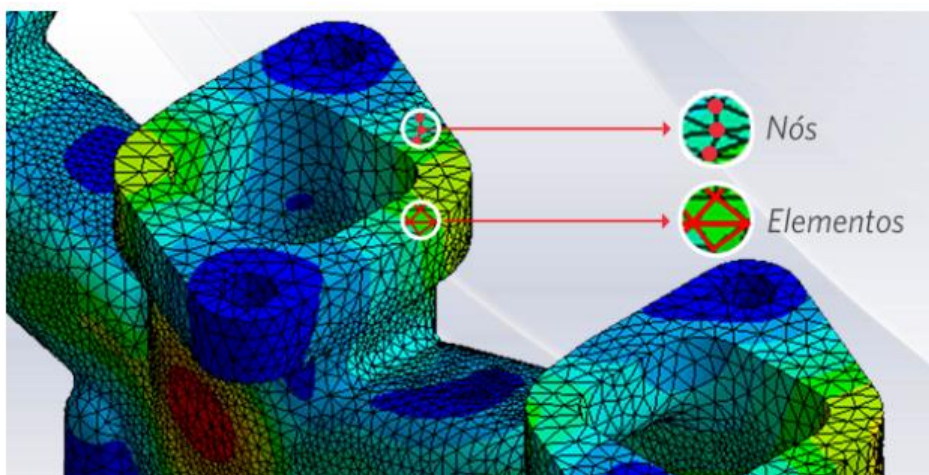
Sobre o Método dos Elementos Finitos, Massad (2010) explica:

“O método dos elementos finitos consiste [...] na substituição do meio contínuo por elementos discretos, de tal forma que os elementos adjacentes tenham alguns pontos em comum (nós externos); [...] Aos nós estão associados potenciais, que passam a ser as incógnitas procuradas. A discretização é completada admitindo-se que o potencial de um ponto qualquer é uma função das suas coordenadas; [...] Passa-se para a segunda etapa do método, que é a minimização da função, na região ocupada pelo meio. Com isso chega-se a um sistema de equações lineares, em que as incógnitas são os potenciais nos nós, cuja solução deve ser obtida por meio de computadores, levando-se em conta as condições de contorno.”

Entende-se que há uma geometria submetida a carregamentos e restrições, tal figura é subdividida em pequenas partes que passam a representar o domínio contínuo do problema. Essa divisão permite a substituição de um problema complexo com variáveis desconhecidas por um número limitado de elementos com comportamento definido e formas conhecidas como triângulos, hexaedros, tetraedros, entre outras.

Esses elementos são conectados entre si por nós, como pode ser visto na figura 1, formando uma malha, eles são descritos por equações diferenciais que podem ser resolvidas por modelos matemáticos encarregados por esses elementos individualmente para depois “unir” todos eles e obter um total.

Figura 1- Disposição de uma malha de elementos finitos

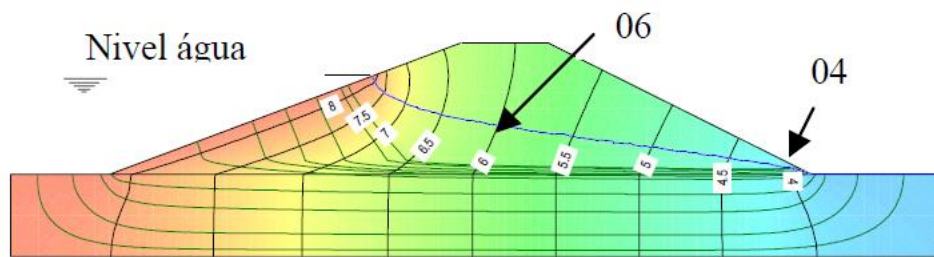


Fonte: Giuseppe Miralisenna, ESSS (2016)

A não exatidão da solução por esse método é função dessas subdivisões da geometria e, portanto, a precisão dos resultados depende da quantidade de nós, do tamanho e dos tipos de elementos da malha.

A análise dos elementos gera resultados em uma escala de cor em que os maiores valores da unidade são representados por cores mais quentes (vermelho) e os menores em tons mais frios (azul), como pode ser visto na figura 2, que apresenta linhas equipotenciais e linhas de fluxo de uma barragem de terra analisada pelo programa SEEP/W.

Figura 2 – Análise de fluxo de água em barragem de terra.

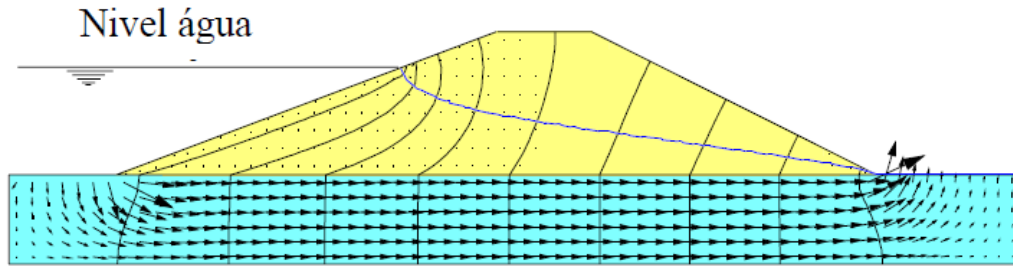


Fonte: Jiménez Rojas e Fonini (2006)

O programa computacional SEEP/W da GeoSlope Company, segundo o site da companhia, “analisa o fluxo de águas subterrâneas em material poroso. Sua formulação permite análises variando do mais simples estado de saturação até os mais sofisticados problemas de saturação-não saturação temporalmente.”.

O software admite uma variação de opções de condições de contorno, bem como faz a determinação de hidrográficos, flutuações de reservatório, ciclos de precipitação de chuvas, dependendo das relações funcionais que o usuário insira, bem como mostra os vetores de fluxo no interior da barragem, mostrando assim o caminho da água (figura 3). Há também uma integração com outro software da empresa, o SLOPE/W, que analisa a estabilidade de taludes naturais ou construídos sujeitos a mudanças de poropressão.

Figura 3 – Vetores de fluxo.



Fonte: Jiménez Rojas e Fonini (2006)

Para a utilização do SEEP/W é preciso ter bem definido e compreendido a Lei de Darcy, o efeito da sucção (poropressão negativa) na condutividade e permeabilidade, a capacidade do solo de reter água entre seus poros, definição de carga total, equação básica dos elementos finitos, além de definir uma geometria, ter as propriedades dos materiais, saber condições de contorno e, para o caso de fluxo transiente, o tempo.

2.2.1 Lei de Darcy e as equações de fluxo bidimensional

A lei de Darcy estabelece que, em uma dimensão, a água flui através de um solo completamente saturado:

$$q=kiA \quad (1)$$

Em que q é o volume de água que flui por unidade de tempo, A é a área da seção transversal de solo correspondente ao fluxo, k é o coeficiente de permeabilidade ou condutividade e i é o gradiente hidráulico (perda de carga total por unidade de comprimento).

Para entender a teoria da percolação, admite-se inicialmente um solo homogêneo e isotrópico no que diz respeito a permeabilidade. No plano x-y, a lei de Darcy pode ser escrita de forma geral, com a carga total h diminuindo nas direções x e y:

$$v_x=ki_x=-k\frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

$$v_y=ki_y=-k\frac{\partial h}{\partial y} \quad (3)$$

Ao admitir que o solo, embora homogêneo, seja anisotrópico em relação à permeabilidade, temos a forma geral da lei de Darcy:

$$v_x = k_x i_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (4)$$

$$v_y = k_y i_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (5)$$

A equação geral de fluxo (equação diferencial parcial), admitindo um fluxo permanente em que a vazão que entra é a vazão que sai, é a junção das equações 4 e 5 com a taxa de variação correspondente a cada eixo, somado a Q que corresponde ao nó da malha que se deseja saber as informações, tudo isso igual a taxa de variação da umidade volumétrica do solo num tempo determinado. Como podemos ver na equação 6:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (6)$$

As barragens de terra apresentam fluxo bidimensional, sob regime permanente, não havendo variações volumétricas e se admitir que o solo é isotrópico obtemos a equação de Laplace, muito usada para traçados das linhas de fluxo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

Quando o fluxo está sob regime transiente, a vazão que entra mais ou menos o armazenamento em um determinado tempo é igual a vazão que sai, logo há variação volumétrica e a equação diferencial parcial passa a ser a expressa na equação 8.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (8)$$

Em que m_w está ligado ao coeficiente de compressibilidade, γ_w é o peso específico da água e $\frac{\partial H}{\partial t}$ é a taxa de variação de carga total em um tempo determinado.

“Em princípio, para a solução de um problema prático de percolação as funções potenciais e funções de fluxo devem ser encontradas para as condições de contorno pertinentes” (CRAIG, 2011).

A solução para a equação de Laplace constitui dois grupos de funções que são curvas ortogonais entre si: as linhas equipotenciais e as linhas de fluxo. A equação da primeira específica, para cada valor constante de Φ , curvas nas quais, para cada, a carga total (h) é constante.

$$\Phi(x,z) = -kh(x,z) + C \quad (9)$$

A equação da segunda, advinda da equação de fluxo mostrada anteriormente, especifica a direção da velocidade de descarga, ao admitir que há valor constante de Ψ e que $d\Psi=0$, em qualquer ponto tangente à curva tem-se:

$$\Psi(x,z) = \Psi \quad (10)$$

Para a solução da equação de fluxo bidimensional é necessário determinar condições de contorno, diretamente ligadas à geometria da barragem. A percolação através de barragens de terra tem o fluxo definido como não confinado, onde as condições de contorno geralmente encontradas são:

- Superfície impermeável: quando os valores de permeabilidade entre dois meios têm diferença significativa a ponto de o menos permeável formar uma barreira impermeável, obrigando o fluxo a ocorrer no meio mais permeável. É uma linha de fluxo;
- Superfície em contato com o líquido: é uma linha equipotencial, já que em todos os pontos a carga total é constante (u/γ_w), mesmo com z variando de um ponto para outro a somatória permanece constante;
- Linha freática: muito importante para o fluxo não-confinado. A carga piezométrica ao longo dessa linha é nula e constitui uma linha de fluxo. A carga total é igual a altimétrica e há intervalos iguais entre as interseções entre equipotenciais e a linha de fluxo superior;
- Superfície livre de fluxo: é a superfície de descarga, para onde se dirigem os canais de fluxo e constitui uma equipotencial para carga total zero.

As soluções para fluxos podem ser obtidas por diversos métodos, como: analíticos, analógicos, gráficos, mas o enfoque deste trabalho é no método numérico.

2.2.2 Equação básica dos elementos finitos

Como foi dito, o MEF transforma a equação diferencial parcial em equações integrais. Para o regime permanente, o primeiro termo é uma matriz que indica propriedades dos materiais e seu volume ou área; o segundo termo, é um vetor de carga total nos nós e o último é um vetor de quantidade de fluxo atravessando o domínio.

$$[K] \{H\} = \{Q\} \quad (11)$$

Entenda que não se pode inserir os valores de H e Q. Há a possibilidade de inserir H e o programa irá computar Q e vice-versa, mas nunca ambos.

Para o regime transiente têm-se a equação 12, onde o primeiro termo é a matriz de propriedades porém em função de uma variação de tempo; o segundo e quinto termo, é uma matriz que indica volume ou área de armazenamento vezes o coeficiente de compressibilidade; o terceiro termo é o vetor de carga total no tempo final estabelecido; após o sinal de igualdade o quarto termo representa um vetor de fluxo no tempo final estabelecido, também em função de uma variação de tempo e o último é um vetor de carga total na condição de início da análise.

$$\Delta t [K] + [M] \{H_1\} = \Delta t \{Q_1\} + [M] \{H_0\} \quad (12)$$

2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Para Cruz (1996), a permeabilidade pode ser definida como sendo a facilidade/dificuldade que o solo oferece à passagem de fluído através dele, enquanto a condutividade descreve a facilidade que um meio confinado oferece ao fluxo.

Apesar da diferença em conceitos, nesse trabalho será usado o termo: condutividade hidráulica para empregar indistintamente as duas definições, tanto para meios porosos como para feições descontínuas.

Se um meio é pouco permeável ele oferta uma dificuldade à passagem do fluído, enquanto uma permeabilidade elevada ofereceria facilidade de movimentação do fluído. A energia gasta para vencer esse atrito entre o fluído e os grãos de solo gera uma perda de carga, tal diferença de potencial é responsável por manter o escoamento de água através do solo.

O grau de condutividade, expresso numericamente pelo coeficiente K, varia em uma gama de valores e é função de diversos fatores, dentre os quais podemos citar o índice de vazios, temperatura, estrutura do solo, grau de saturação e estratificação do terreno. É um parâmetro quase imensurável e o máximo que se consegue conhecer, em vários casos, é sua ordem de grandeza, como segue na imagem.

Quadro 1 - Valores típicos do Coeficiente de Permeabilidade (K)

	Permeabilidade	Tipo de solo	K (m/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	> 10e-03
	Alta	Areias	10e-03 a 10e-05
	Baixa	Siltes e argilas	10e-05 a 10e-7
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argila	10e-7 a 10e-9
	Baixíssima	Argila	< 10e-9

Fonte: Vargas (1977)

Em solos estratificados, com camadas, a permeabilidade não é a mesma para ambas as direções (horizontal e vertical), assim há uma condição de anisotropia.

Convenciona-se que o coeficiente de permeabilidade, correspondente a um fluxo que atravessa uma série de camadas de solo, é a média geométrica dos coeficientes correspondentes às componentes do fluxo em duas direções ortogonais (podem ser vertical e horizontal):

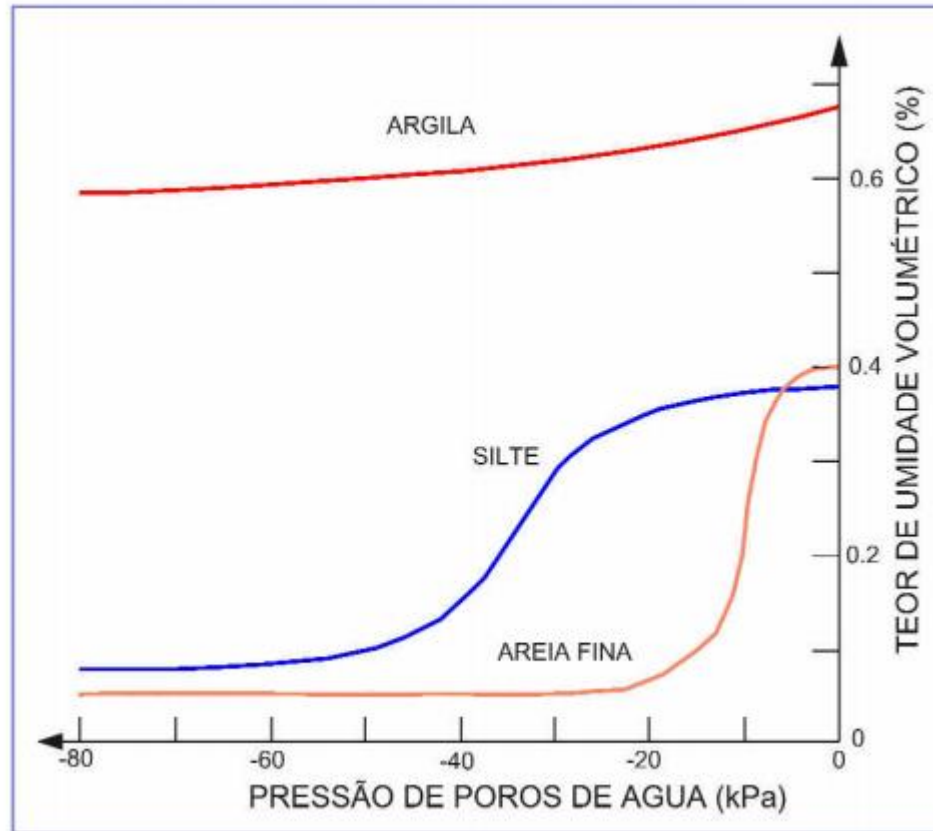
$$k = \sqrt{k_v * k_h} \quad (13)$$

Porém, neste trabalho não será levado em consideração a anisotropia por falta de ensaios que possam estabelecer essa condição corretamente.

2.3.1 Funções de condutividade hidráulica e umidade volumétrica

A função de armazenamento, também conhecida como curva característica solo-água (SWCC), descreve o relacionamento entre a umidade volumétrica e a sucção. Está diretamente ligada a granulometria e a estrutura do solo, portanto a razão umidade e sucção varia conforme o tipo de material (figura 4).

Figura 4 – Curvas características solo-água para os diferentes tipos de solo.



Fonte: Ho (1979) *apud* Huertas (2006)

A função de uma curva característica solo-água ou teor de umidade volumétrico descreve o comportamento de solos não saturados, o que é de grande valia para a análise de percolação em barragem de terra, pois permite também determinar permeabilidade e resistência ao cisalhamento do solo conforme muda as condições volumétricas do solo.

Vários métodos foram propostos para descrever tal curva e cada um desses métodos depende de um valor como a entrada de ar ou a umidade residual ou até o coeficiente da curva. No SEEP/W, é pedido o valor da porosidade e a especificação do material.

Quadro 2 – Variação da porosidade conforme solo

Descrição do solo	Porosidade
Areia grossa	0,26 – 0,43
Areia fina	0,29 – 0,46
Areia Siltosa	0,25 – 0,49
Areia Argilosa	0,15 – 0,37
Pedregulho	0,23 – 0,38
Argila/Argila siltosa/Argila arenosa; pouca plasticidade	0,29 – 0,41
Argila siltosa/Argila arenosa	0,20 - 0,64

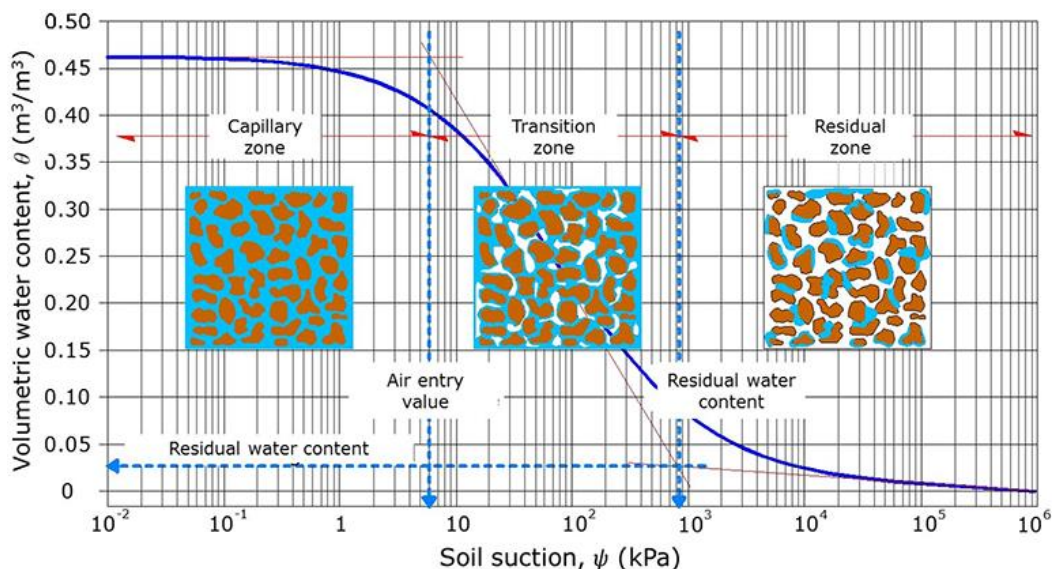
Fonte: SUCS *apud* Geotechdata.info (2013)

Para interpretar tal curva é preciso entender que ela está relacionada a três zonas que descrevem o processo de dessaturação.

Em um solo saturado a água precisa de menos energia para percorrer os vazios, que no momento estão cheios de água, temos então a zona capilar. Assim que o ar entra no solo, pelo fenômeno de sucção (poropressão negativa) começa a dificultar a passagem, necessitando de mais energia, temos uma zona de transição; conforme a sucção aumenta, a água fica presa entre partículas de sólido e partículas de ar, como pode-se ver na figura 5, tendo assim a zona residual.

Quando a poropressão é zero, a umidade volumétrica é igual a porosidade; assim que ar começa a entrar a umidade começa a cair a um coeficiente que depende da granulometria, como dito acima e também da compressibilidade do material, ao atingir a zona residual, obtemos a umidade residual no solo, que para essa análise será admitido ser um valor de 10% da porosidade.

Figura 5- Zonas correspondentes a curva característica solo-água



Fonte: LOPEZ E MENDONZA (2016)

Entende-se também que se há sucção a condutividade não é constante, portanto, a SWCC é utilizada para estimar a função de condutividade hidráulica.

O programa SEEP/W pede o método de estimação, o escolhido é Van Genuchten (1980), a SWCC do material, o K_{sat} que é a permeabilidade do material quando a poropressão é 0 e o teor de umidade residual, adota-se 10% da porosidade.

2.4 CRITÉRIOS DE PROJETO

Ao projetar uma barragem é preciso considerar todas as condicionantes locais que influenciam na escolha do perfil da obra, a geometria, o custo e a segurança, como: as condições climáticas, hidrológicas e geológicas; material de empréstimo disponível na área; o tipo de fundação; a topografia. Como tais condicionantes são variáveis, há diversas combinações possíveis de projeto, situações problemas que requerem soluções específicas, experiência e bom senso do engenheiro.

Ainda que não haja um modelo genérico para projetar obra como tal, há critérios para as condicionantes citadas que auxiliam na escolha da seção da barragem, fixação dos elementos de vedação e drenagem, análises de estabilidade, proteção de taludes e detalhes construtivos (CRUZ, 1996).

2.3.1 Seção Típica

Como visto anteriormente, há vários tipos de barragens de terra e escolher entre uma seção depende do tipo de vale que o local apresenta, a condição climática e principalmente da disponibilidade do material de construção nas proximidades do local de implantação.

Quando se olha para o custo, todo material da área, inclusive os provenientes de escavações obrigatórias já previstas e vindos de estruturas provisórias, pode ser considerado para a composição da seção da barragem, mesmo que seu volume seja pequeno. Essa reutilização, por assim dizer, diminui o valor de transporte, obtenção, tratamento e compactação da movimentação de terra necessária para a construção.

Portanto, se a barragem será homogênea, onde o material de construção deve apresentar características vedantes e resistência; ou zoneada, com zonas da seção constituídas de materiais permeáveis e impermeáveis, deve ser uma escolha tomada em função dos materiais disponíveis e das características da fundação.

2.3.2 Condicionantes da Fundação

As fundações devem desempenhar resistência e estanqueidade suficiente para suportar os carregamentos provenientes da barragem sem que haja deformações excessivas, ruptura por cisalhamento e erosão interna regressiva. Algumas fundações apresentam restrições ao cumprimento desses critérios a serem desempenhados e precisam de intervenções. Cruz (1996), após análise de várias barragens brasileiras, apresentou algumas dificuldades associadas aos tipos de fundação:

- Em Rocha – aquelas com feições descontínuas de baixa resistência e folhelhos, apresentam problemas de permeabilidade, onde valores superiores a $5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ devem ser reduzidos;
- Em Areias Finas Uniformes – se o índice de vazios é superior ao crítico, estão sujeitas a liquefação quando saturadas, devido a choques e vibrações. É preferível a remoção do material como fundação;
- Em Areias Grossas/ Pedregulhos – estabilidade e deformação não são problemas, porém o problema de estanqueidade é crítico. É necessário intervenções para controlar a vazão pela fundação e verificar a estabilidade levando-se em conta as redes de fluxo estabelecidas na fundação;
- Em Aluviões – pedem por soluções para controlar os gradientes de saída no pé da barragem. Atentar-se também para a curva granulométrica, em caso de seus materiais não serem filtros um do outro deve ser providenciado um *cut-off*;
- Em Solo Coluvionar – os problemas são relacionados à resistência ao cisalhamento, aos deslocamentos verticais, tendo que verificar a colapsividade do material, e à permeabilidade, que deve ser verificada a diversos níveis de tensões, principalmente onde as tensões verticais são baixas;
- Em Solos Residuais – apresentam valores de permeabilidade da mesma ordem de grandeza do material do maciço e pedem por análises quanto à estabilidade global do conjunto;
- Em solos Saprolíticos e Saprólitos – mesmas recomendações para os solos residuais com o adicional da importância da caracterização de horizonte da rocha matriz.

Em termos gerais, fundações em solos permeáveis requerem atenção especial a perda de água e grandeza das forças de percolação e em solos impermeáveis os problemas são associados à assentamentos excessivos e ruptura por cisalhamento.

O comportamento maciço-fundação deve ser analisado, conforme Meirelles (2013), considerando as características geotécnicas e geológicas de tais materiais submetidos a diferentes situações, verificando a deformação da fundação devido ao peso da barragem e se há percolação de água do reservatório através da fundação para definir as intervenções necessárias.

O fluxo pela fundação é majoritário em relação ao fluxo pelo maciço, portanto o sistema de drenagem interna juntamente com a vedação é de vital importância para o controle do fluxo. Os principais sistemas de vedação são as trincheiras, tapetes impermeáveis e injeções de cimento.

2.3.3 Condicionantes do Maciço

Segundo Meirelles (2013), se tratando do comportamento geotécnico, as estruturas de aterro devem apresentar resistência ao cisalhamento, incompressibilidade, ausência de contração quando seca, plasticidade, aderência, mínimo de rastejo, mínimo de permeabilidade e erodibilidade.

Têm-se preferência pelo material encontrado *in loco* por questões econômicas, portanto é preciso garantir que os comportamentos citados acima sejam satisfatórios utilizando-se da compactação adequada das camadas de solo, das inclinações que garantam a estabilidade e do controle da percolação.

As barragens de terra apresentam zonas de baixa permeabilidade que garantem a estanqueidade, reduzindo e controlando o fluxo de água pelo corpo da barragem. Essa parte vedante da seção deve ser centralizada no eixo da barragem e pode ser construída com a maioria dos solos compactados, exceto pedregulhos e areias sem presença de finos.

E há zonas mais permeáveis, onde deve-se garantir o direcionamento do fluxo para jusante, garantindo a estabilidade do espaldar ao diminuir as tensões neutras de percolação.

Nos locais de passagem de um material para o outro, em toda interface, deve-se sempre verificar se o material de jusante da direção do fluxo é filtro do material a jusante, pois se for verificado que não, transições devem ser incorporadas para evitar o *piping*. (CRUZ, 1996). A espessura mínima de um elemento de transição deve ser de 30 cm em qualquer barragem, à exceção as de enrocamento.

2.3.4 Critérios Geométricos

Elementos básicos para o projeto são subsidiados pelo levantamento planialtimétrico, que juntamente com os estudos geotécnicos e hidrológicos, fornecem informações para o pré-dimensionamento da estrutura, que eventualmente podem sofrer modificações ao passarem por análises de percolação e de estabilidade.

A altura da barragem depende do nível máximo a ser armazenado, que é definido pela topografia e hidrologia local, também por fatores econômicos e impactos sociais, e depende da altura de segurança (borda livre) do maciço, segundo Eletrobrás (2000), essa borda está em função do N.A. máximo operacional, da extensão da superfície do reservatório e do vento sobre a superfície da água, gerando ondas que não podem ultrapassar o maciço.

Quadro 3 - Altura da borda livre (m), para barragens com altura ≤ 10 m.

Nível de Água Máximo Em operação (m)	Extensão do Espelho d'Água do Reservatório - L (km)						
	0,20	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
$N.A \leq 6,00$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,05	1,15	1,25
$6,00 < N.A \leq 10,00$	1,00	1,00	1,00	1,05	1,15	1,25	1,35

Fonte: Eletrobrás (2000)

Para barragens com altura maior que 10 m, a Eletrobrás (2000) recomenda que seja usado os critérios do *US Bureau of Reclamation* (USBR) para a estimativa da borda livre.

Outro elemento básico é a largura mínima da crista, onde para muitos é dada como 3,5 metros, mas pode ser calculada em função da altura máxima da barragem (H), de acordo com o USBR (1967) *apud* Meirelles (2013), pela equação:

$$L = \frac{H}{5} + 3 \quad (14)$$

Quando previsto tráfego na crista é recomendado a largura de 10 m (CRUZ, 1996).

Tendo definido o material de construção, o tipo de fundação e a altura da barragem, caracteriza-se a inclinação dos taludes de montante e jusante por um coeficiente de inclinação que indica a proporção entre projeção horizontal e vertical.

A Cruz (1996), apresenta na tabela 2 os valores preliminares de coeficiente de inclinação quando o material de fundação é mais resistente que o maciço compactado.

Quadro 4 – Taludes preliminares para diversos tipos de solo

Tipo de Material	Montante	Jusante
Solos Compactados	2,5(H):1,0(V)	2,0(H):1,0(V)
	3,0(H):1,0(V)	
Solos Compactados Siltosos	3,5(H):1,0(V)	3,0(H):1,0(V)
Solos Compactados Argilosos	2,0(H):1,0(V)	2,0(H):1,0(V)
	3,0(H):1,0(V)	2,5(H):1,0(V)
Enrocamento	1,3(H):1,0(V)	1,3(H):1,0(V)
	1,6(H):1,0(V)	1,6(H):1,0(V)

Fonte: Cruz (1996)

Em casos que a fundação é menos resistente, Cruz (1996) recomenda um abatimento dos coeficientes mostrados no quadro 4, que devem passar por análise de estabilidade, onde se deve fixar as superfícies de ruptura mais evidentes.

Por fim, para completar a geometria da seção, obtém-se a base da barragem em função da soma da largura da crista com a multiplicação do somatório dos coeficientes de inclinação pela altura da barragem.

2.4 VERIFICAÇÃO DO PROJETO

“A arte de projetar uma barragem está ligada à arte de controlar o fluxo de água pelo conjunto barragem-fundação. A estabilidade externa (taludes) e interna (barragem-fundação) deve atender aos requisitos básicos de segurança estabelecidos.” (CRUZ, 1996).

Para atender os requisitos de segurança é obrigatório atender aos princípios básicos de segurança do projeto de barragem: princípio do controle de fluxo, princípio da estabilidade e princípio da compatibilidade das deformações.

2.4.1 Estabilidade de Taludes

Os taludes da barragem de terra devem ser construídos de forma a garantir a estabilidade do corpo da barragem, bem como ser compatibilizado com a fundação para a estabilidade do conjunto e devem resistir as três condições de carregamento:

- Final de construção: Hipótese admitindo a barragem concluída, porém sem carga hidráulica do reservatório. Considera-se os esforços atuantes em função do peso do solo, das pressões neutras induzidas pela compactação do material e da velocidade da construção;

- N.A máximo de operação: Hipótese correspondente a operação normal da barragem, onde admite-se que as deformações estejam estabilizadas e uma rede de fluxo permanente estruturada para qual a pressão de percolação favorece a estabilidade do talude de montante e desfavorece o de jusante;
- Rebaixamento do reservatório: Hipótese na qual admite-se um rebaixamento rápido do reservatório no N.A máximo para o N.A mínimo de operação ou até o N.A atingível mais baixo, essa análise considera uma alteração nas condições de poropressão vistas na condição anterior. A carga que ajudava na estabilização do talude de montante diminui.

A verificação da estabilidade deve considerar as tensões efetivas e ser feita através do método do equilíbrio limite que melhor se equivale aos mecanismos de ruptura potenciais definidos.

A resistência efetiva da estrutura é obtida através dos parâmetros geotécnicos dos materiais de construção e da fundação que são relevantes para cálculo, como ângulo de atrito, coesão, tensão máxima efetiva e o desenvolvimento da pressão neutra naquele tipo de solo.

“A estabilidade estará assegurada sempre que fatores de segurança obtidos nas análises forem iguais ou superiores a valores referenciais definidos com base em estudos de situações reais.” (MEIRELLES, 2013).

Os valores mínimos de coeficiente de segurança são definidos pela NBR 11682 (2009) de acordo com o grau de segurança contra danos ambientais e materiais e grau de segurança contra danos a vidas humanas, o que configura um coeficiente de 1,5 para os taludes de uma barragem. Meirelles (2013), afirmou que usualmente são usados os fatores de segurança maiores ou iguais a 1,5 para as duas primeiras condições e maiores ou iguais a 1,2 para a terceira condição.

Porém Cruz (1996), esclarece que a solicitação dominante é a do N.A máximo de operação, portanto o coeficiente de 1,5 é determinado para tal, enquanto para a condição de final da construção se adota 1,3 e para o rebaixamento do reservatório adota-se 1,1.

2.4.2 Controle de Fluxo

Para o controle de fluxo é preciso vedar ao máximo a barragem e sua fundação, a montante do eixo, por outro lado têm-se que facilitar a saída da água a jusante do eixo, de forma controlada com os sistemas de drenagem no maciço e na fundação.

Estima-se a vazão pelo maciço e fundação por meio de redes de fluxo. Essa estimativa permite verificar se os sistemas de vedação adotado foi o suficiente para o controle da percolação a níveis considerados satisfatórios, bem como verificar se os sistemas de drenagem estão funcionando corretamente e definir os gradientes de saída pelas fundações a jusante.

Um fator importante no controle é a transição interna de material: maciço-fundação, maciço-ombreiras, maciço e outras estruturas adjacentes. Ou seja, qualquer interface em que os materiais apresentam granulometria diferente e há risco de carreamento de grãos.

Além disso, deve-se verificar o gradiente hidráulico máximo na seção e confrontá-lo com o gradiente hidráulico crítico, para que não haja a possibilidade da formação de *piping* que se inicia por uma perda de resistência pontual, ocasionando na erosão interna do ponto/local.

O gradiente crítico vem da relação entre peso específico submerso do solo (γ_{sub}), que é o peso específico natural (γ_{nat}) menos o peso específico da água (γ_w), pelo peso específico da água. Relação apresentada pela equação 15:

$$i_{crít} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{(\gamma_{nat} - \gamma_w)}{\gamma_w} \quad (15)$$

Assim, o valor do gradiente de saída não deve ser maior que o valor crítico

2.4.3 Compatibilidade de Deformações

Os materiais de fundação e do maciço compactado sofrem deformações em função das tensões atuantes o que pode gerar problemas de recalques diferenciais, transferência de tensões e contrastes de deformabilidade.

O princípio da compatibilidade das deformações dita que a compressibilidade das zonas da barragem deve ser compatibilizada por zonas de transição, reduzindo os problemas gerados pelas tensões atuantes que prejudicam o desempenho da estrutura.

Por ser uma verificação dos estados de tensão e deslocamentos trabalhosa e que gera parcelas desprezíveis de acidentes, não é uma preocupação principal dos engenheiros, a menos que sejam barragens de enrocamento com núcleos delgados, barragens sobre areia sem

trincheira de vedação e barragens sobre folhelhos, pois esses casos apresentam problemas preocupantes.

Acima foram citados os três princípios para verificação de projeto. Nota-se que para as três análises o conhecimento do comportamento da água na estrutura é de suma importância, vide que com o estudo de percolação conseguimos obter os valores da distribuição da pressão neutra para cálculo de estabilidade e da análise de deformação; conseguimos verificar o fluxo de água e também os valores de descarga sendo esses parâmetros para controlar o fluxo e dimensionar os dispositivos de drenagem.

2.5 SISTEMA INTERNO DE DRENAGEM E PROTEÇÃO DE TALUDE

Os projetos de estruturas para o controle de percolação têm como objetivos principais à redução da quantidade de percolação, minimização ou controle dos gradientes de saída e, redução da linha de saturação no espaldar de jusante e nível de sub-pressões na fundação.

Segundo, Assis *et. al* (2003), existem dois tipos de soluções:

- a) Drenagem: filtros inclinados ou verticais, filtros drenos horizontais, poços de alívio, trincheiras de drenagem;
- b) Impermeabilização: tapetes impermeáveis, trincheiras de vedação, diafragmas plásticos, paredes diafragma, cortinas de injeção.

Como regra geral as soluções de impermeabilização devem ser apenas consideradas à montante e as de drenagem à jusante.

A função básica dos filtros é prevenir a erosão regressiva ocasionados por forças de percolação internas, rupturas hidráulicas e trincas ocasionadas por deformações diferenciais no corpo da barragem.

Devem satisfazer os critérios para piping, os vazios no filtro devem ser pequenos o suficiente para impedir as partículas do solo de carrear, e permeabilidade, os vazios devem ser grandes o suficiente para permitirem a passagem de fluxo, controlando subpressões.

No sistema de drenagem interna o filtro-dreno horizontal, tem papel fundamental. Sua função basicamente é não só impedir carregamentos do material de fundação, bem como promover a drenagem das águas de percolação através da fundação e do maciço compactado.

As trincheiras de vedação constituem-se na estrutura de redução das vazões de percolação mais utilizadas nas barragens brasileiras em casos de fundação em solo. O principal inconveniente que as trincheiras de vedação apresentam é quando existem níveis de água altos, o que exige utilização de drenagem para a execução da escavação (ponteiras, poços de bombeamento e trincheiras de drenagem etc.).

A largura na base das trincheiras deve ser da ordem de $0,10$ a $0,30H$, onde H é a carga hidráulica total do reservatório. Cuidados especiais devem ser tomados na base (cut-off parciais) e nas paredes de jusante da trincheira para evitar-se carregamento do material de preenchimento da trincheira para a fundação, uma vez que os gradientes hidráulicos no “cut-off” são elevadíssimos por ser este um trecho de concentração de perdas de carga.

3 METODOLOGIA

Para que o presente trabalho fosse elaborado, com embasamento teórico e prático de profissionais na área de barragens e afim de atingir os objetivos aqui elencados, foi feita uma extensa consulta em livros, artigos científicos, manuais e trabalhos acadêmicos.

É importante destacar como principal norteador o trabalho de Paulo Teixeira da Cruz: “100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.”, cujas informações extraídas sobre projeto, comportamento dos materiais, percolação de água, medidas de segurança e sua avaliação e problemas decorrentes em barragens foram de grande serventia.

Se tratando de barragens, a principal preocupação, quanto a boa operação dela, é criar mecanismos de controle de percolação da água, impedindo que efeitos como piping, liquefação e instabilidade dos maciços ocorram.

A análise a ser feita, auxiliada por software e pesquisa citada acima, visa obter os parâmetros poropressão e fluxo de água para futuras análises de estabilidade e dimensionamento dos sistemas de vedação e drenagem. Portanto, serão feitas nas condições de regime permanente e regime transiente, sendo essas, respectivamente, relativas a N.A máximo de operação e rebaixamento do reservatório.

Ao estabelecer a geometria da estrutura e os sistemas de vedação e drenagem julgados adequados, as vazões são estimadas. Tais estimativas permitem verificar se os sistemas adotados são o suficiente para o controle das vazões a níveis considerados satisfatórios. Pode-se também definir os gradientes de saída a jusante.

Para a execução de uma análise no SEEP/W, é preciso ter bem definido a geometria da barragem de terra; as propriedades dos materiais: porosidade, condutividade hidráulica e sua anisotropia; as condições de contorno e o tempo para análise transiente.

3.1 GEOMETRIA DA SEÇÃO

Para a execução das análises computacionais, é necessário a determinação da seção da barragem de terra a ser simulada e analisada.

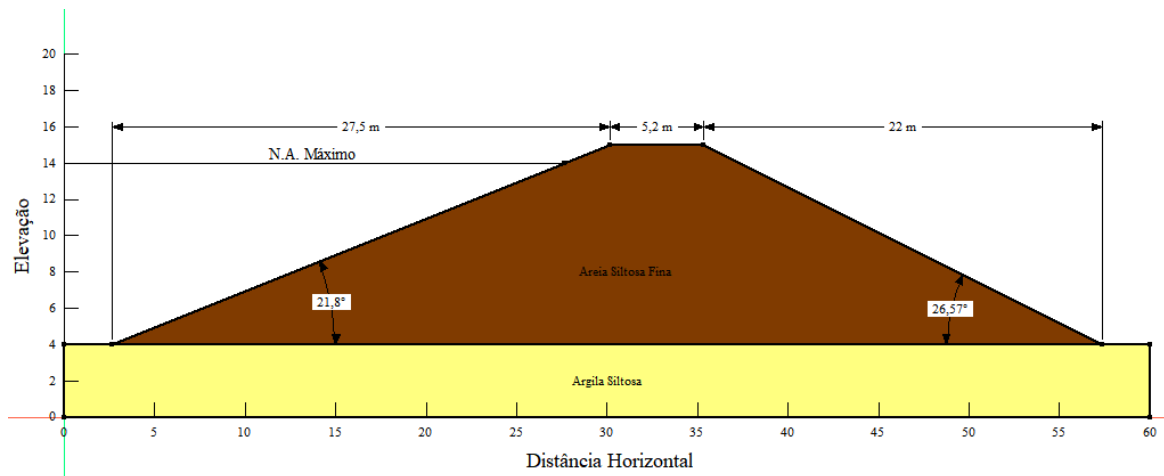
- a) Seção típica e nível de água: escolhida uma seção do livro de Cruz (1996) e adaptada de forma a simplificar a análise;

- b) Borda livre: arbitrado um valor de 1,0 metro pois não há subsídios para utilizar o quadro 3 do referencial teórico;
- c) Cota da crista: somatório do N.A da barragem e da borda livre;
- d) Largura da crista: largura definida pela equação 14 do referencial teórico;
- e) Inclinação inicial dos taludes: de acordo com o material de construção do maciço, as inclinações iniciais são dadas pelo quadro 4 do referencial teórico;
- f) Base da seção: soma da largura da crista com a multiplicação do somatório dos coeficientes de inclinação pela altura da barragem.

3.1.1 Seção típica da barragem

É uma barragem homogênea, cujo maciço é areia siltosa fina e a fundação em argila siltosa. A inclinação do talude de montante é de 1:2,5 (V:H) e do talude de jusante 1:2,0 (V:H). A cota do nível de água máximo é de 14 m com uma borda livre de 1 m, sendo a cota da crista de 15 m. A largura da crista é de 5,2 m, definido pela equação 13, onde H é igual a 11. A base da seção é de 54,7 m. Conforme figura 6.

Figura 6 – Seção típica da barragem.



Fonte: Autor (2019)

3.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

As propriedades necessárias para análise de fluxo, como dito anteriormente, são:

- a) Porosidade: arbitrado um valor típico conforme quadro 2 do referencial teórico;

- b) Condutividade hidráulica: arbitrado um valor típico conforme quadro 1 do referencial teórico, levando em consideração as características dos materiais, por exemplo: um silte argiloso é menos permeável que um silte arenoso, portanto, entre os valores da tabela, não podem ser utilizado os mesmos para materiais diferentes;
- c) Condição de anisotropia: é determinado por Cruz (1996) que em maciços compactados com alturas menores que 20 m, seja usado uma relação de $k_y/k_x = 0,11$ e de acordo com o ângulo de inclinação do talude.

Para a análise rápida de estabilidade, em que podemos ver se os gradientes hidráulicos estão causando instabilidade na estrutura, os parâmetros geotécnicos de coesão, ângulo de atrito e peso específico para uma análise através do método de Bishop, são obtidos do livro base deste trabalho o “100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto”, no qual há um capítulo dedicado a geotecnia de solos brasileiros.

3.2.1 Propriedades dos materiais

Os materiais da barragem que são necessários para as análises aqui realizadas estão descritos no quadro a seguir:

Quadro 5 – Propriedades geotécnicas e físicas dos materiais envolvidos na análise.

Material	Porosidade (m³/m³)	KxSat (m/s)	P. Específico (kN/m³)	Coesão (kPa)	Ângulo Atrito (°)
Areia Siltosa Fina	0,35	1e-04	17,5	5	31
Argila Siltosa	0,28	1e-06	27,2	15	25
Areia Fina	0,45	1e-04	15,8	4,5	32,2

Fonte: Autor (1996)

3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As conhecidas são a superfície impermeável, que são os dispositivos de vedação; E a superfície em contato com o líquido o talude de montante e parte de cima da fundação. A desconhecida é a linha freática e a superfície de descarga será variável e serão os parâmetros a serem calculados/demonstrados pelo software.

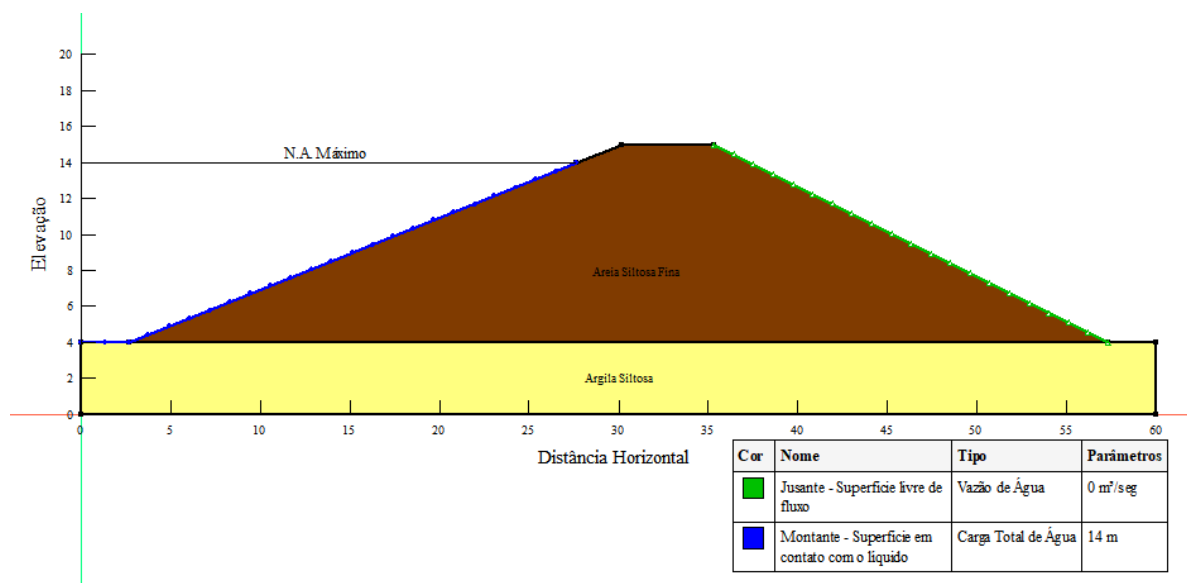
4.1.3 Condições de Contorno

Para a análise em regime permanente, as condições usadas foram:

- Superfície em contato com o líquido: face de montante da barragem do tipo carga total de água num nível constante de 14 m;
- Superfície livre de fluxo: face de jusante da barragem do tipo vazão de água, determinado para verificar a possibilidade de linha freática;
- Superfície de pressão 0: elementos de vedação, tipo carga total de água num nível constante de 0 m.

A designação das condições de contorno pode ser vista na figura 7, a seguir:

Figura 7 – Aplicação das condições de contorno para primeira análise.



Fonte: Autor (2019)

3.4 ANÁLISE DE FLUXO E ESTABILIDADE

Após a determinação da seção hipotética inicial e dos parâmetros geotécnicos necessários são executadas as análises de percolação de água na barragem, para determinação das linhas freáticas, vazões no interior do maciço e fluxo na fundação e poropressão, com o software da Geo-Slope Company, SEEP/W integrado com o SLOPE.

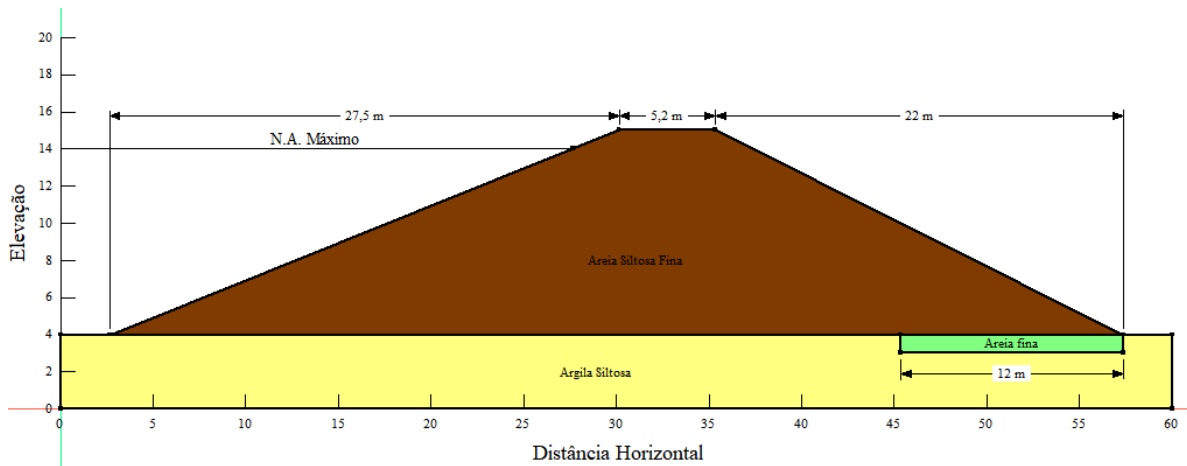
Em seguida, é feita a análise de estabilidade pelo método de Bishop para determinar se é necessário dispositivos de controle de fluxo. É preciso entrar com valores de peso específico, coesão e ângulo de atrito de cada solo presente na seção, para que a análise de estabilidade seja realizada. O fator de segurança é determinado pelo referencial teórico.

No advento dos dispositivos serem necessários, nova seção é adicionada a análise, com o sistema de drenagem dimensionado a partir das instruções obtidas no livro acima citado.

3.5 ANÁLISE COM DRENO DE PÉ

O dreno de pé é feito de material permeável, areia fina, a fim de que a linha freática se contenha no elemento e não na face de jusante. Tem 1 metro de espessura e 12 m de comprimento. A seção com o dreno pode ser vista na figura 8.

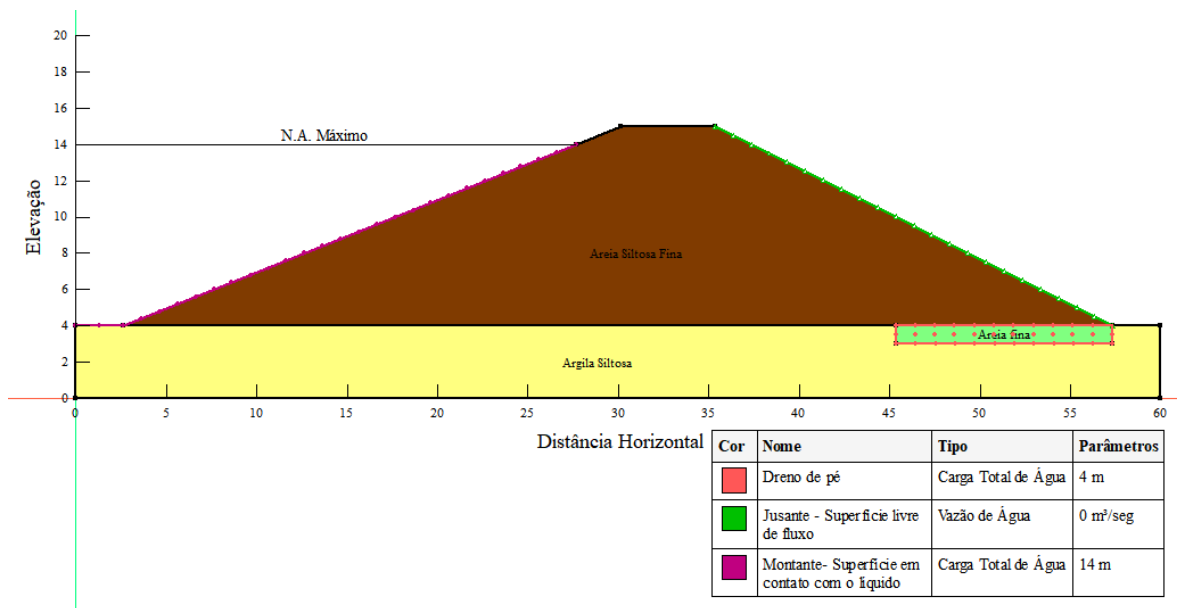
Figura 8 – Seção típica da barragem com dreno de pé.



Fonte: Autor (2019)

Para essa segunda análise há elemento de drenagem, portanto as condições de contorno são as mesmas da análise anterior, adicionando uma condição de carga total igual a 4 metros na região do dreno, como pode-se ver na figura 9.

Figura 9 - Aplicação das condições de contorno para segunda análise.

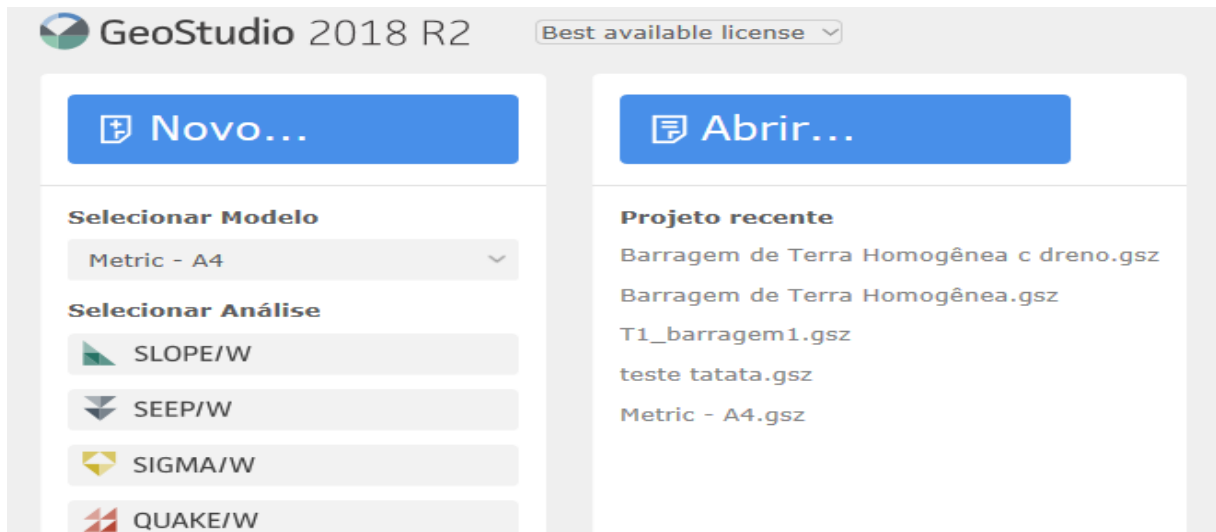


Fonte: Autor (2019)

3.6 CONFIGURANDO O SEEP/W E O SLOPE

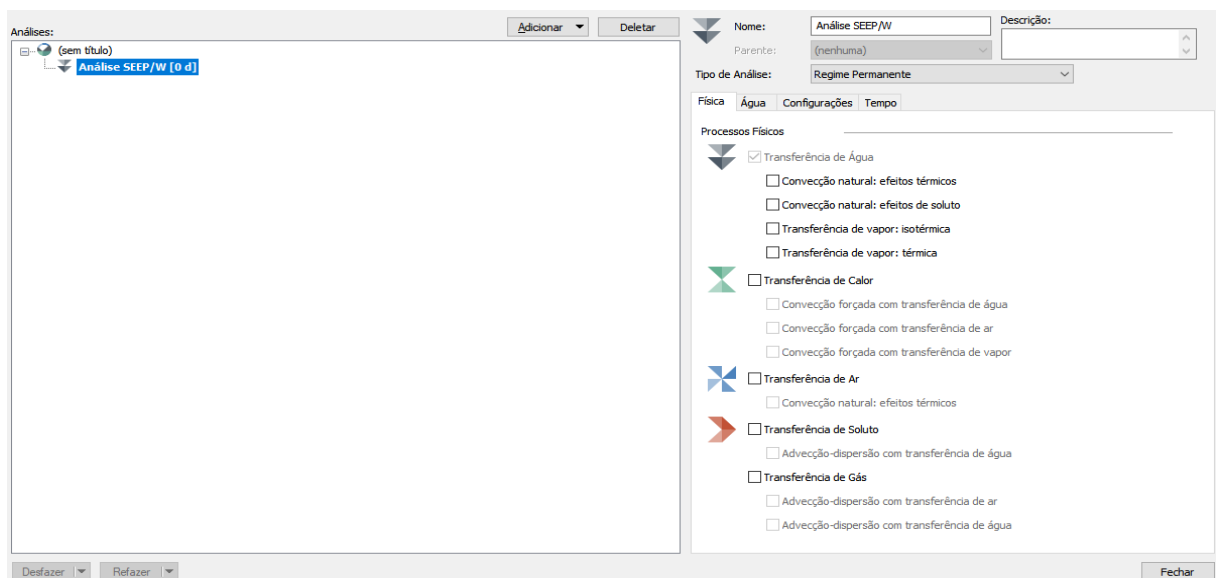
Primeiramente, abre-se o programa e na tela inicial (figura 10) seleciona as configurações iniciais: modelo de papel e análise SEEP/W. Abre-se então uma aba em que se renomeia o documento, escolhe a análise em regime permanente e se mantém todas as outras configurações nas abas “Física”, “Água”, “Configurações” e “Tempo” (figura 11).

Figura 10 – Página de abertura do GeoStudio.



Fonte: Autor (2019)

Figura 11 – Configurações iniciais da análise SEEP/W

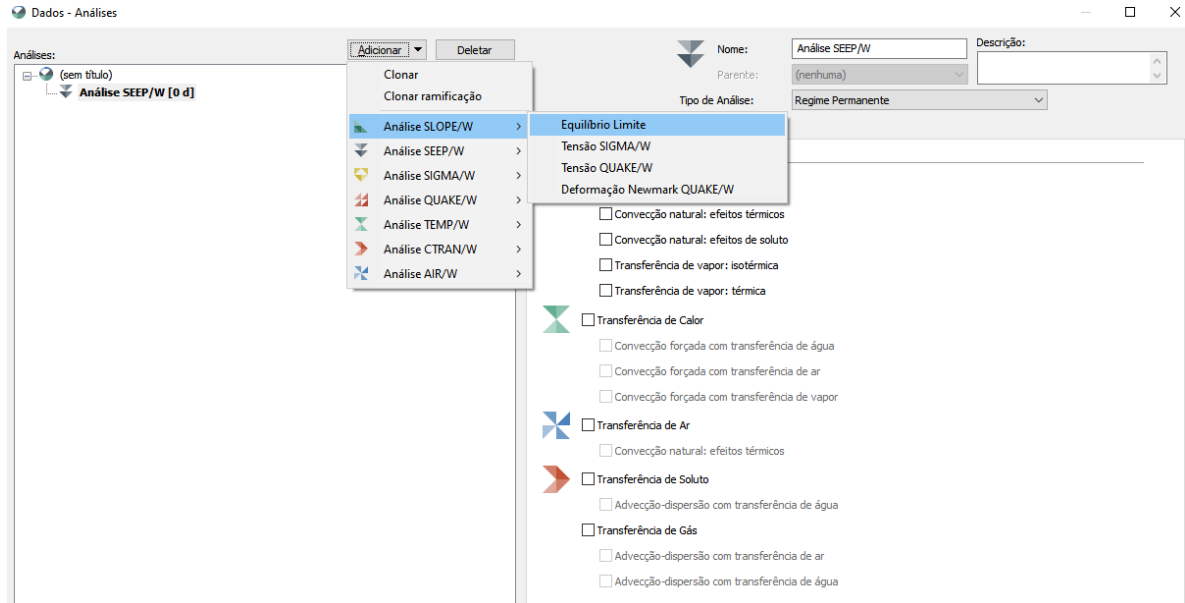


Fonte: Autor (2019)

Para incluir a análise de SLOPE/W adiciona uma análise de equilíbrio limite, como mostrado na figura 12. Onde abrirá uma aba de configurações, onde pode renomear a análise,

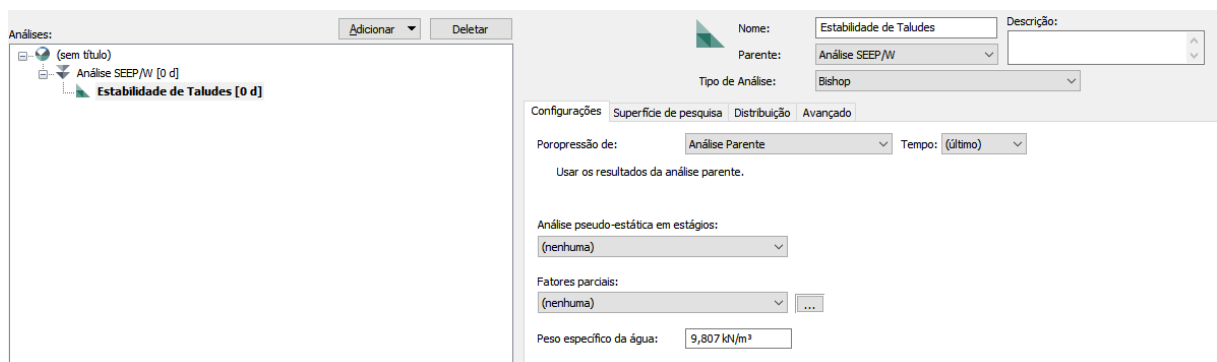
escolher o método de Bishop e determinar que a análise será feita para uma seção determinada pela análise parente, sendo essa a SEEP/W (figura 13)

Figura 12 – Adicionando análise SLOPE/W.



Fonte: Autor (2019)

Figura 13 – Configurações iniciais da análise SLOPE/W.



Fonte: Autor (2019)

Na aba superfície de pesquisa (figura 14), seleciona-se a direção do movimento da esquerda para direita, pois o talude a ser analisado é o de jusante.

Figura 14 – Configurações da superfície de pesquisa.

The image shows a software configuration window for a search surface. At the top, there are three input fields: 'Nome:' with the value 'Estabilidade de Taludes', 'Parente:' with a dropdown menu showing 'Análise SEEP/W', and 'Descrição:' with an empty text box. Below these is a 'Tipo de Análise:' dropdown menu set to 'Bishop'. The main area has four tabs: 'Configurações', 'Superfície de pesquisa', 'Distribuição', and 'Avançado'. The 'Superfície de pesquisa' tab is selected.

Under the 'Superfície de pesquisa' tab, there are three main sections:

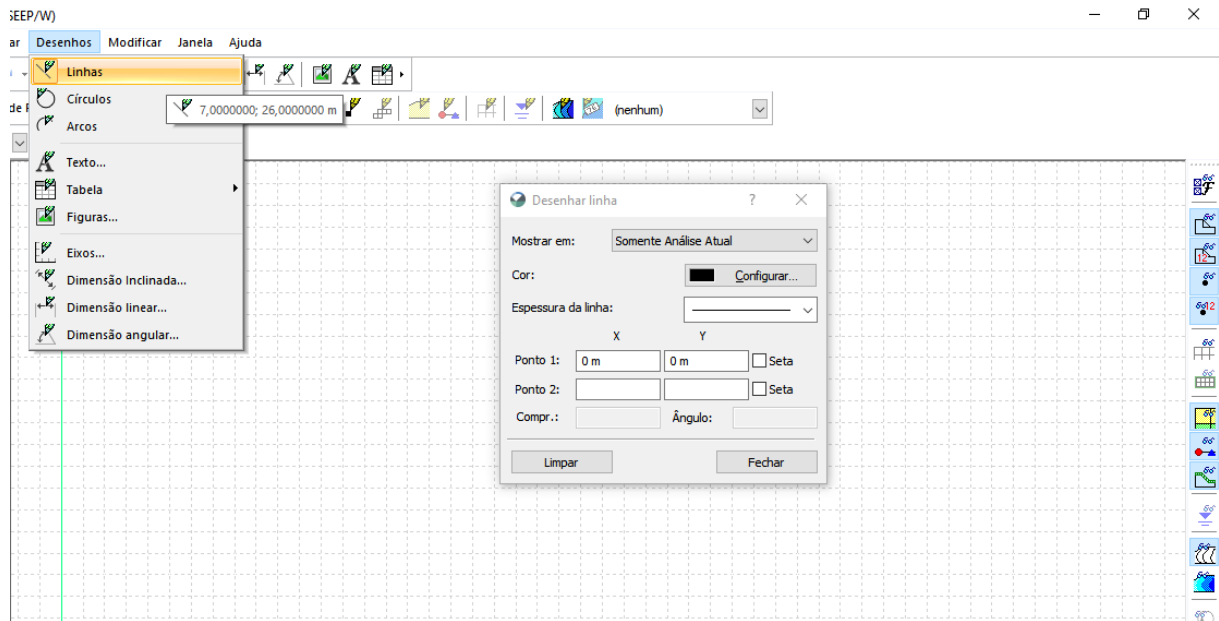
- Direção do Movimento:** Three radio buttons: 'Da esquerda p/ a direita' (selected), 'Da direita p/ a esquerda', and 'Usar modo passivo'.
- Opção de superfície de pesquisa:** A group of radio buttons and checkboxes. 'Entrada e saída' is selected. Other options include 'Especificar os raios', 'Grade e raios', 'Bloco especificado', 'Totalmente especificada', and 'Superfícies de:'. A checkbox 'Não cruzar as linhas das superfícies de pesquisa dos blocos' is also present. To the right, 'Núm. de sup. críticas a serem armazenadas:' is set to '1', and 'Otimizar a posição da superfície crítica' is a checkbox.
- Trinca de Tração:** Three radio buttons: 'Sem trinca de tração' (selected), 'Ângulo limite:', and 'Profundidade'. The 'Ângulo limite:' is set to '0°'. A sub-panel titled 'Presença de Água na Trinca de Tração' contains 'Preenchimento (0 a 1):' set to '0' and 'Peso esp. da água:' set to '9,807 kN/m³'.

Fonte: Autor (2019)

A primeira coisa a se fazer é inserir o perfil da barragem utilizando a ferramenta linhas e digitando os pontos (figura 15). Com a geometria definida, faz-se a configuração dos materiais (figura 16), adicionando um novo material e escolhendo a condição de material saturado/não saturado e enfim definindo as funções pedidas através dos métodos de estimativa oferecidos pelo software e baseados nas literaturas.

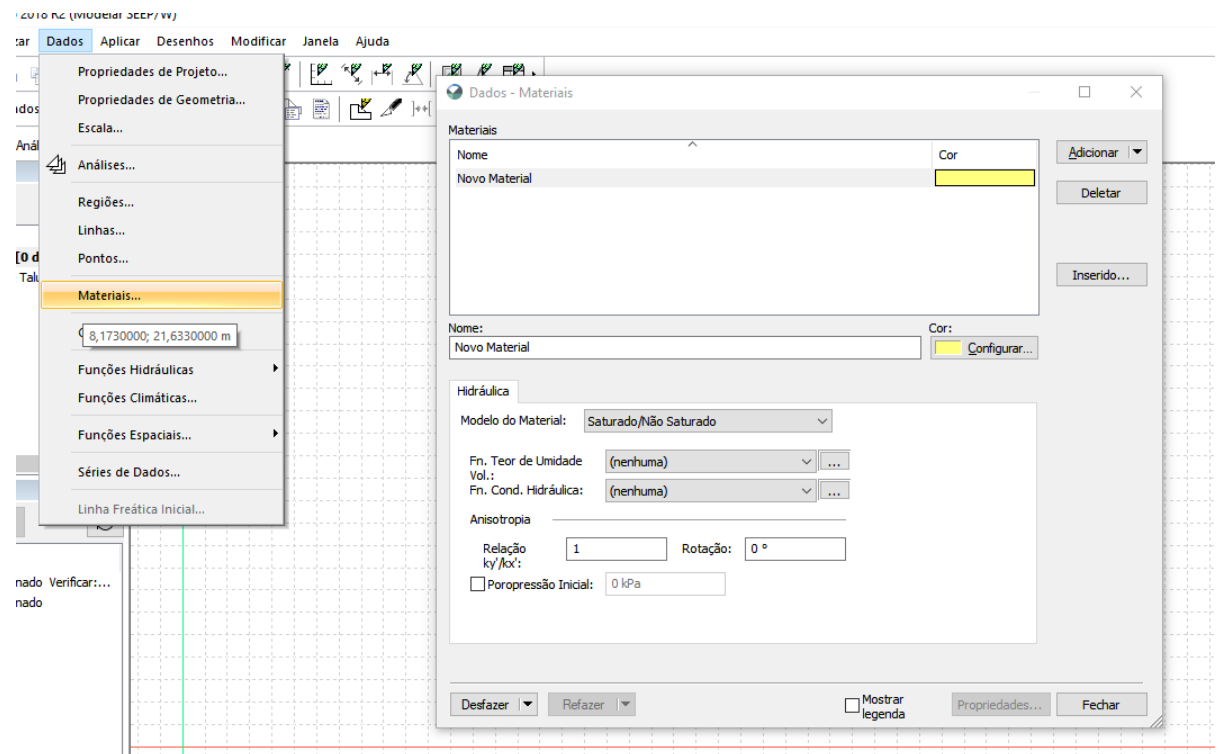
Para a função do teor de umidade volumétrico, clicar em adicionar, escolher o tipo “Função Dados Teor de Umid. Vol”, então clicar em estimar. Pede-se o teor saturado e o tipo de solo, como pode-se ver na figura 17. O primeiro, é o valor da porosidade quando o solo está totalmente saturado e a pressão é de 0 kPa. Ao clicar em ok, têm-se a curva característica solo-água daquele material definido (figura 18).

Figura 15 – Ferramenta linhas.



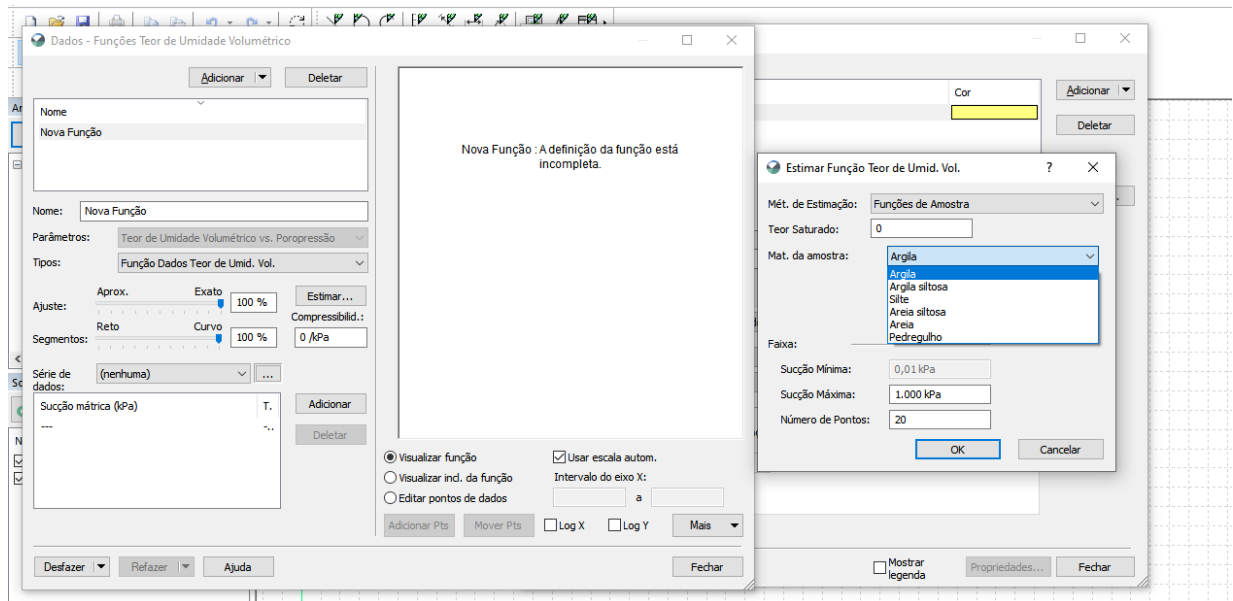
Fonte: Autor (2019)

Figura 16 – Configuração dos materiais.



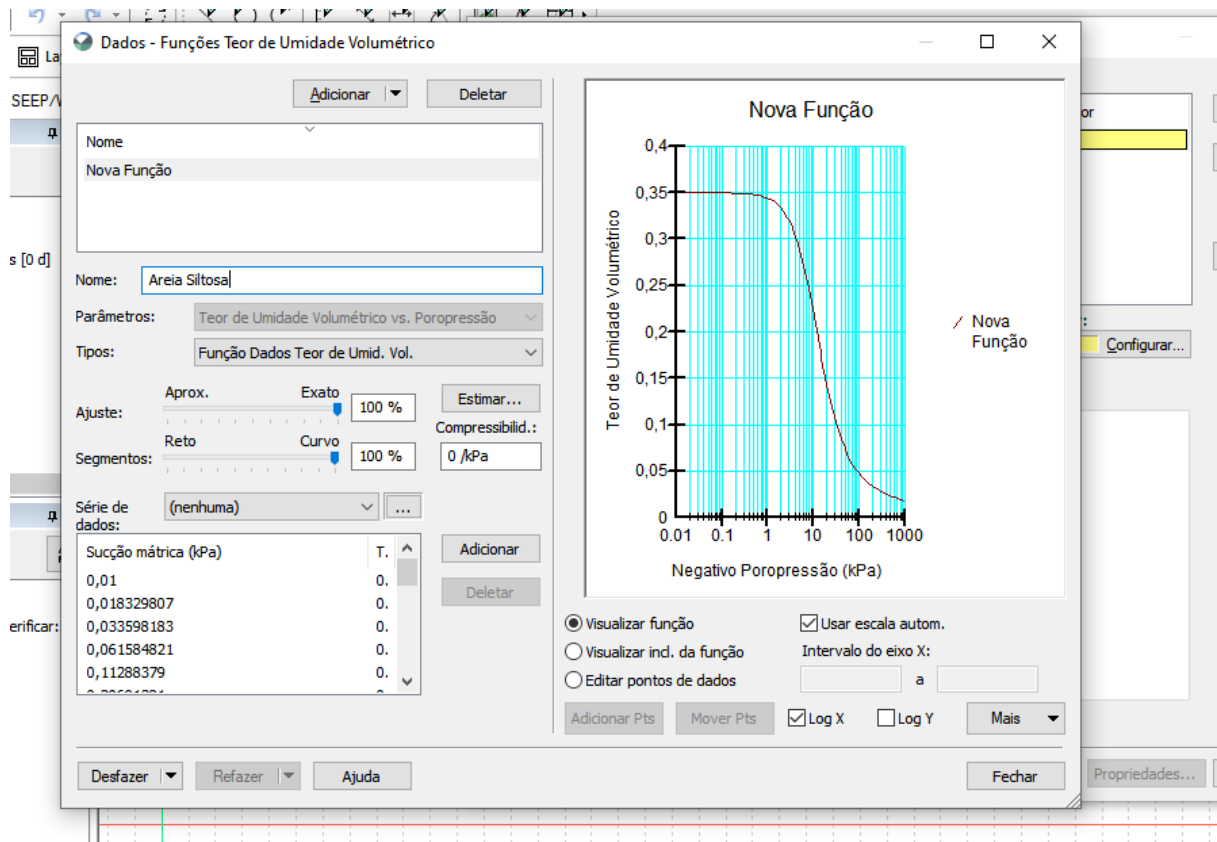
Fonte: Autor (2019)

Figura 17 – Configuração da função do teor de umidade volumétrico.



Fonte: Autor (2019)

Figura 18 – Curva da função do teor de umidade volumétrico.

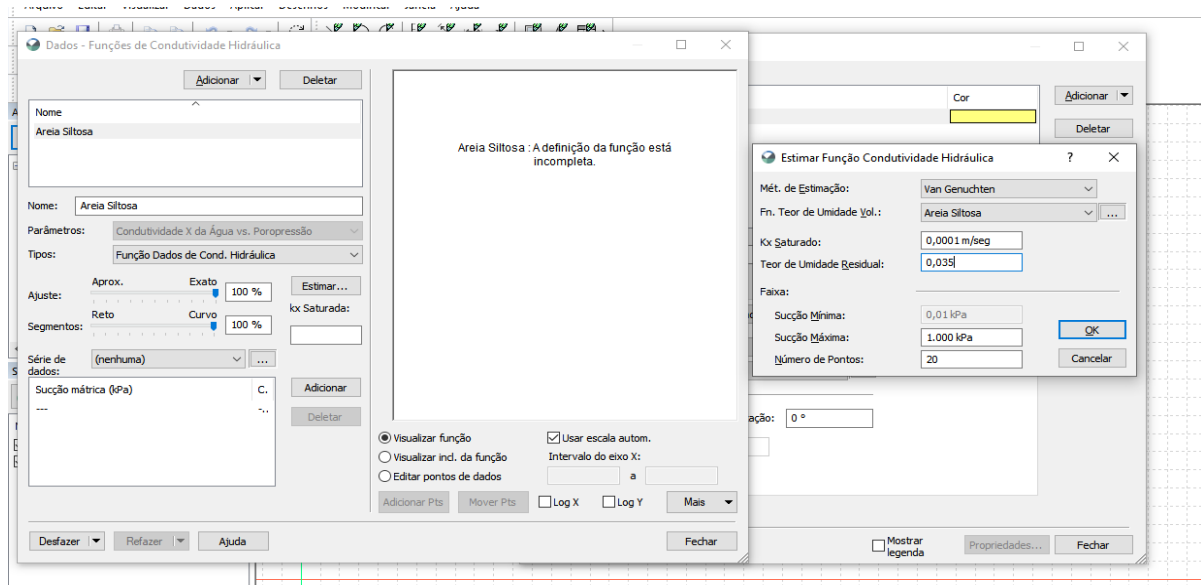


Fonte: Autor (2019)

Para a função da condutividade hidráulica, clicar em adicionar, escolher o tipo “Função Dados de Cond. Hidráulica”, então clicar em estimar. Pede-se o método de estimação que é o

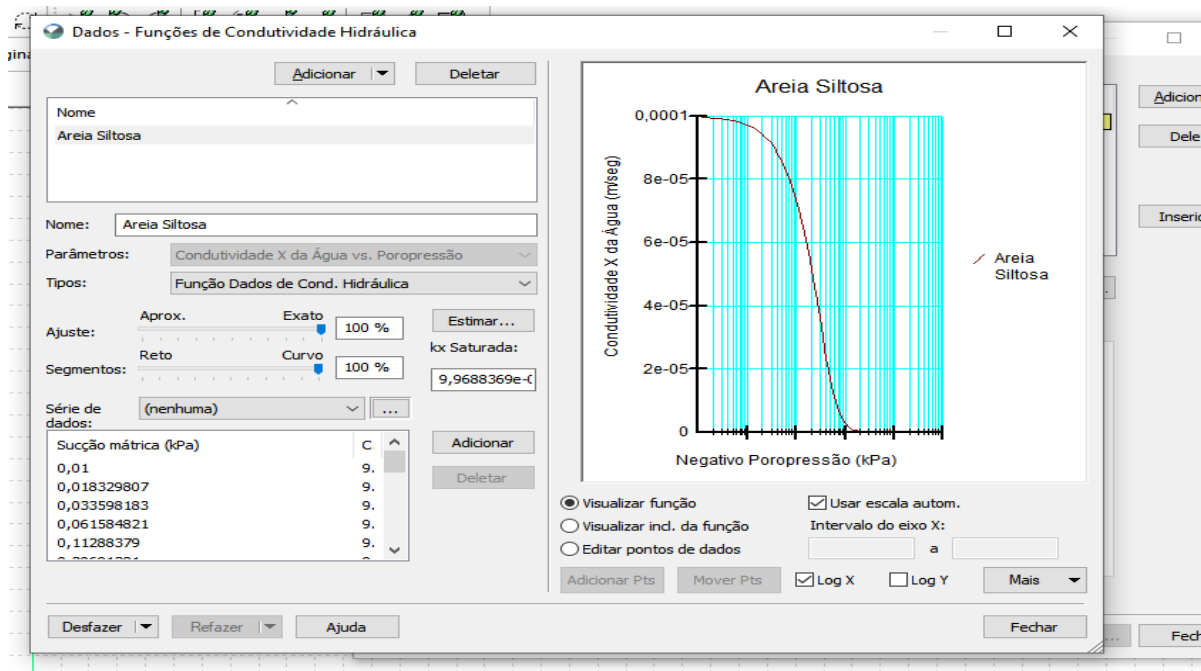
de Van Genuchten, pede-se a função do teor de umidade criado anteriormente, o coeficiente de permeabilidade/conductividade e o teor de umidade residual, como pode-se ver na figura 19, ambos definidos anteriormente. Ao clicar em ok, têm-se a curva da condutividade hidráulica do material definido (figura 20).

Figura 19 – Configuração da função de condutividade hidráulica.



Fonte: Autor (2019)

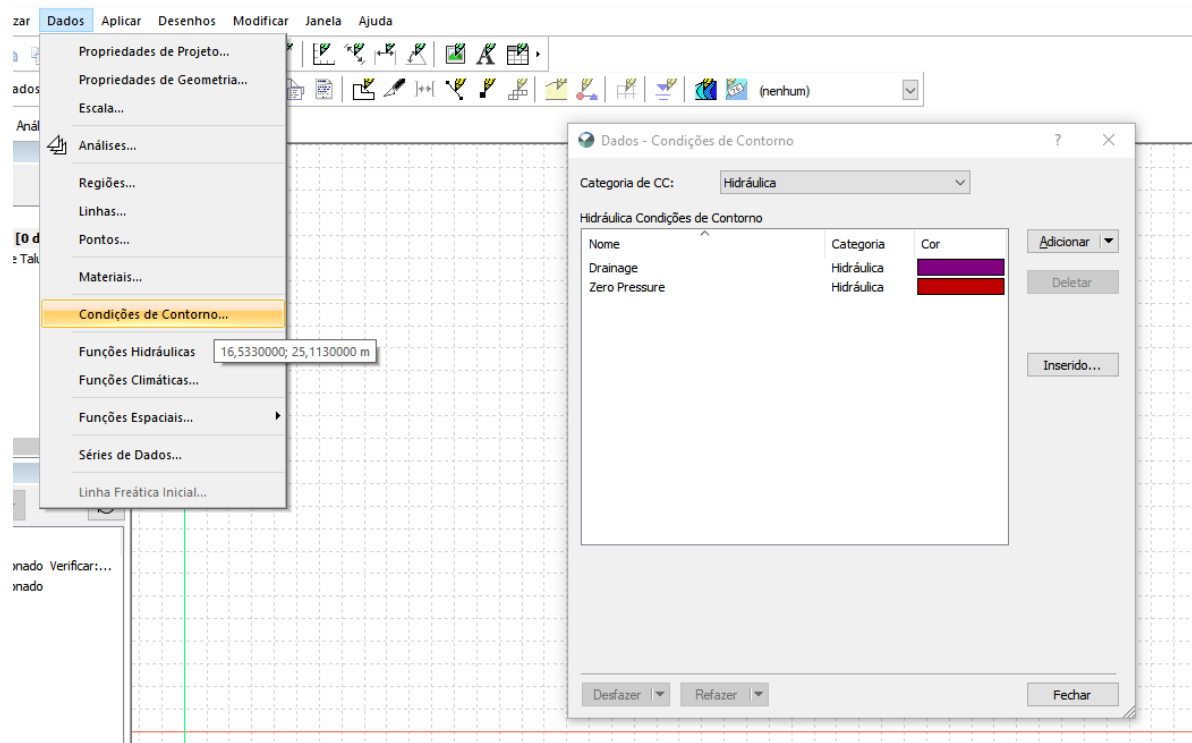
Figura 20 – Curva da função de condutividade hidráulica.



Fonte: Autor (2019)

Para configurar as condições de contorno, basta ir em dados, condições de contorno. O programa gera duas automaticamente (figura 21), basta deletá-las e adicionar as condições determinadas anteriormente.

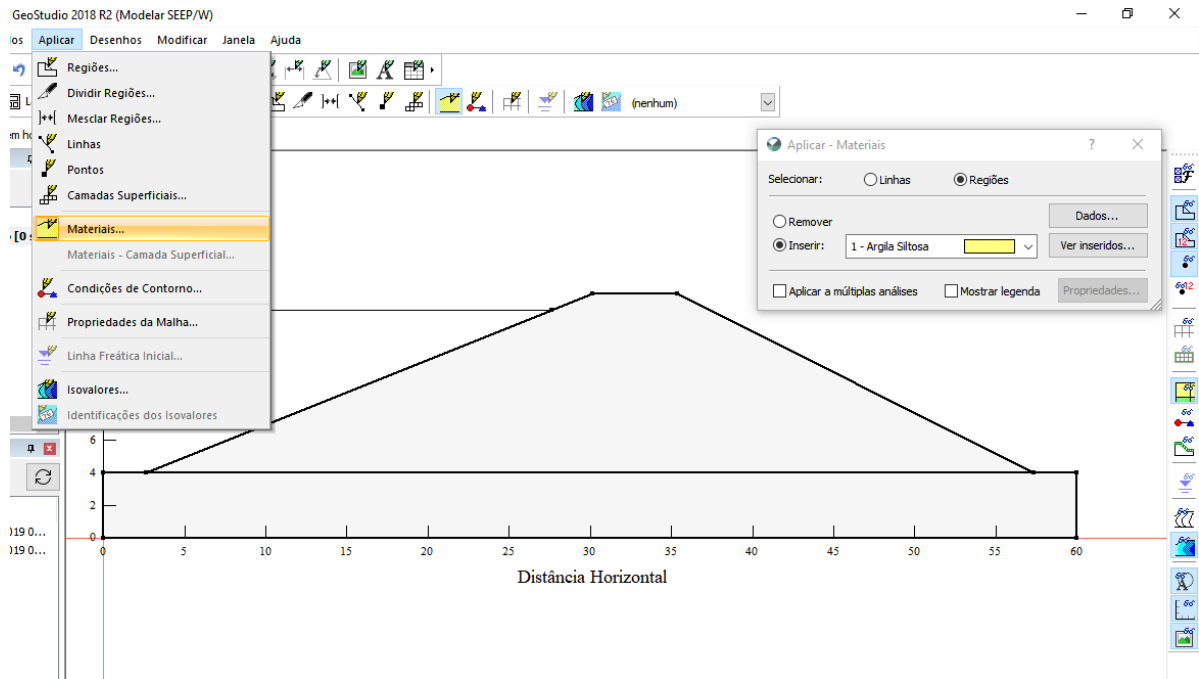
Figura 21 – Configurações da superfície de pesquisa.



Fonte: Autor (2019)

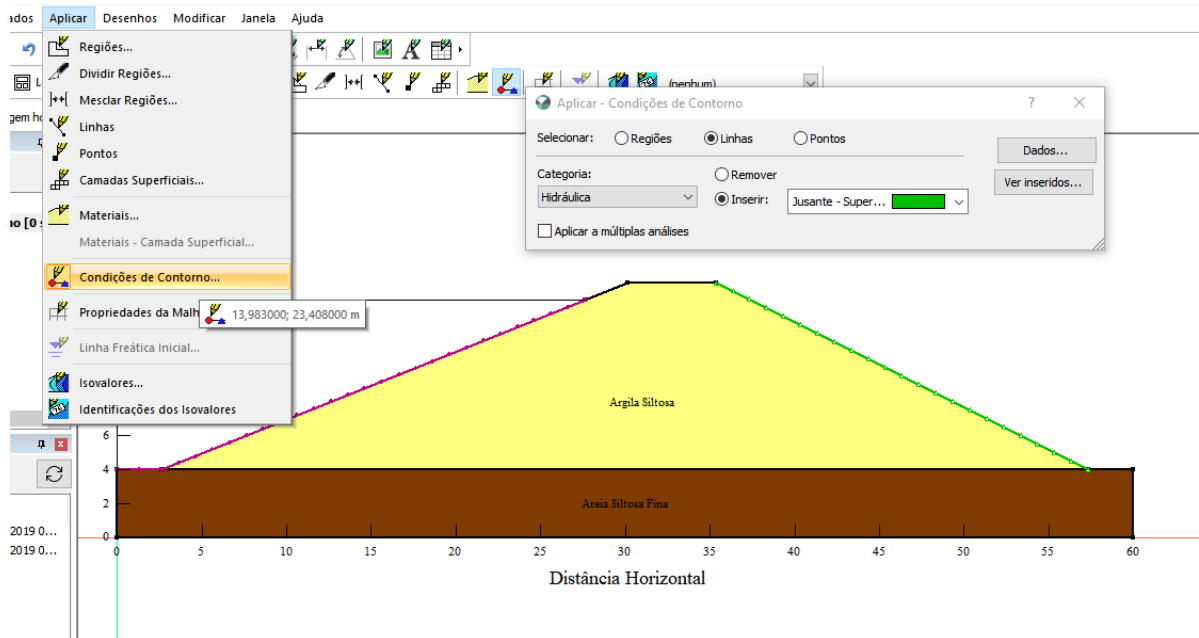
Com todos os dados configurados, basta aplicar os materiais nas regiões e as condições de contorno nas linhas ou regiões determinadas, conforme se pode ver nas figuras 22 e 23.

Figura 22 – Aplicando materiais as regiões.



Fonte: Autor (2019)

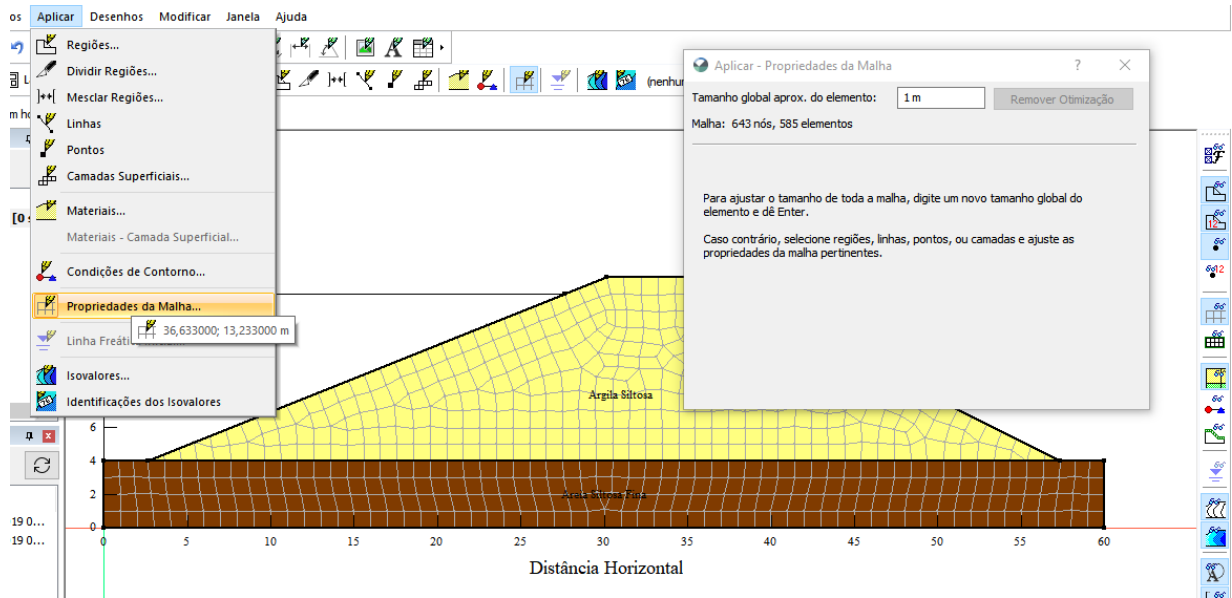
Figura 23 – Aplicando condições de contorno na geometria.



Fonte: Autor (2019)

Por fim se determina o tamanho da malha de elementos finitos, de acordo figura 24.

Figura 24 – Propriedades da malha.



Fonte: Autor (2019)

E então é só iniciar as análises.

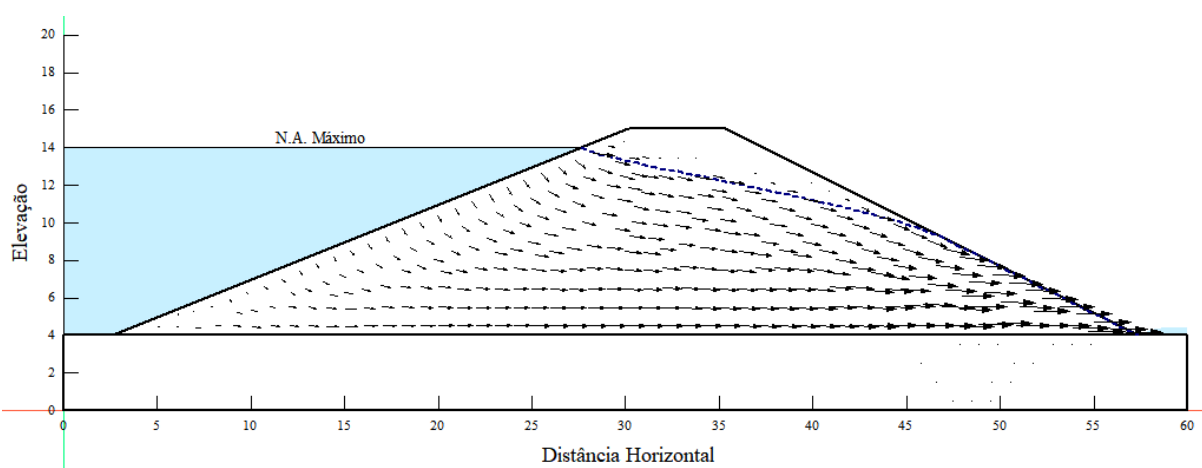
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PRIMEIRA ANÁLISE – SEM ELEMENTO DRENANTE

A análise foi gerada em uma malha de tamanho de elemento 1 m, apresentando 643 nós e 585 elementos.

Na primeira análise não havia nenhum elemento de drenagem e a linha freática foi calculada por uma possibilidade de surgência de uma pressão neutra de 0 kPa, dada pela condição de contorno citada acima. Pode-se ver o resultado na figura 25.

Figura 25 – Vetores de fluxo e linha freática sem dreno.

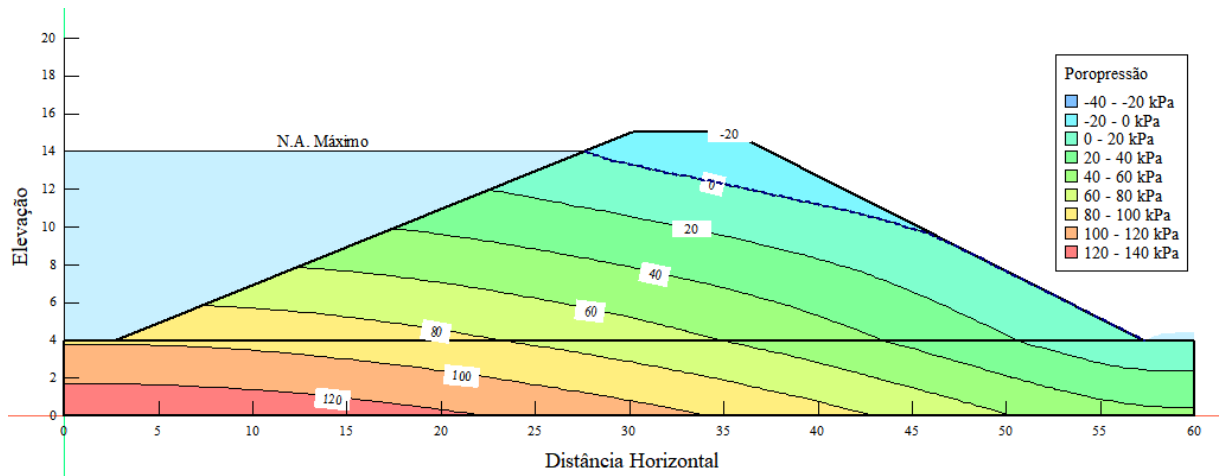


Fonte: Autor (2019)

Nota-se que os vetores de fluxo têm uma face preferencial na jusante e a água aflora no pé do talude, o software informou que a vazão de descarga naquele ponto era de aproximadamente $7,32e-06$ m³/s. A linha tracejada azul é a linha de saturação, acima dela há vetores de fluxo muito pequenos e que representam a água residual nos poros do solo. Na fundação também há vetores bem pequenos de fluxo pois a fundação é bastante impermeável, sendo um fluxo maior que na seção acima da linha de saturação.

Também foi possível obter a distribuição das pressões neutras ao longo da estrutura (figura 26).

Figura 26 – Distribuição das pressões neutras sem dreno.



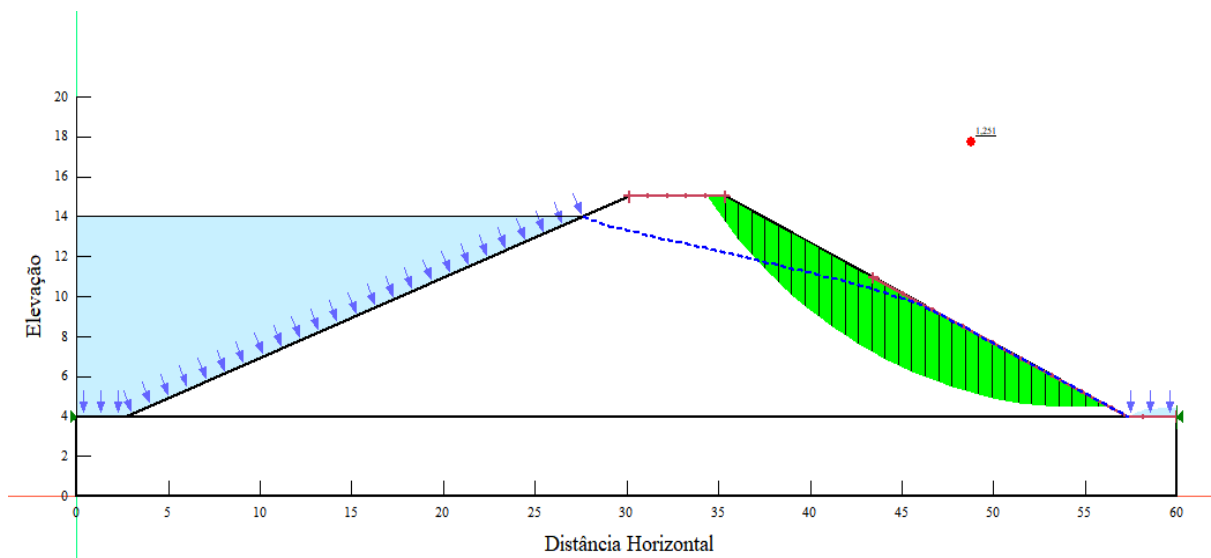
Fonte: Autor (2019)

Sendo importante salientar, que como a literatura simula, vemos que a linha freática está na linha de pressão de 0 kPa e todas as tensões acima dela são negativas, salientando que o solo não está saturado.

Como dito por Cruz (1996), a solicitação dominante é a do N.A máximo de operação, cujo talude mais solicitado é o de jusante, portanto a análise foi feita para essas condições a espera de um coeficiente resultante maior igual a 1,5.

Na figura 27, vemos que o FS encontrado foi de 1,251. Portanto a barragem é instável.

Figura 27 – Análise de estabilidade, método de Bishop, primeira condição.



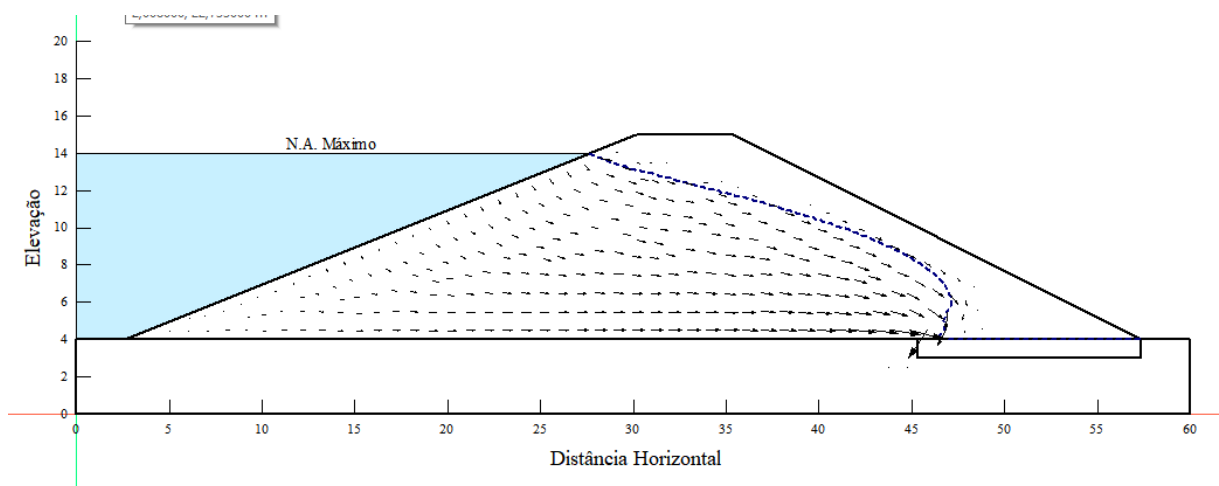
Fonte: Autor (2019)

4.2 SEGUNDA ANÁLISE – COM ELEMENTO DRENANTE

Como houve uma surgência de água no pé do talude, foi adicionado um dreno de pé sem trincheira, para verificar a estabilidade novamente e determinar se somente este elemento era suficiente.

Nessa segunda análise há elemento de drenagem, portanto as condições de contorno são as mesmas da análise anterior, adicionando uma condição de carga total igual a 4 metros na região do dreno. O resultado é mostrado na figura 28, onde conseguimos ver que a linha freática está contida no maciço e não chega na face de jusante.

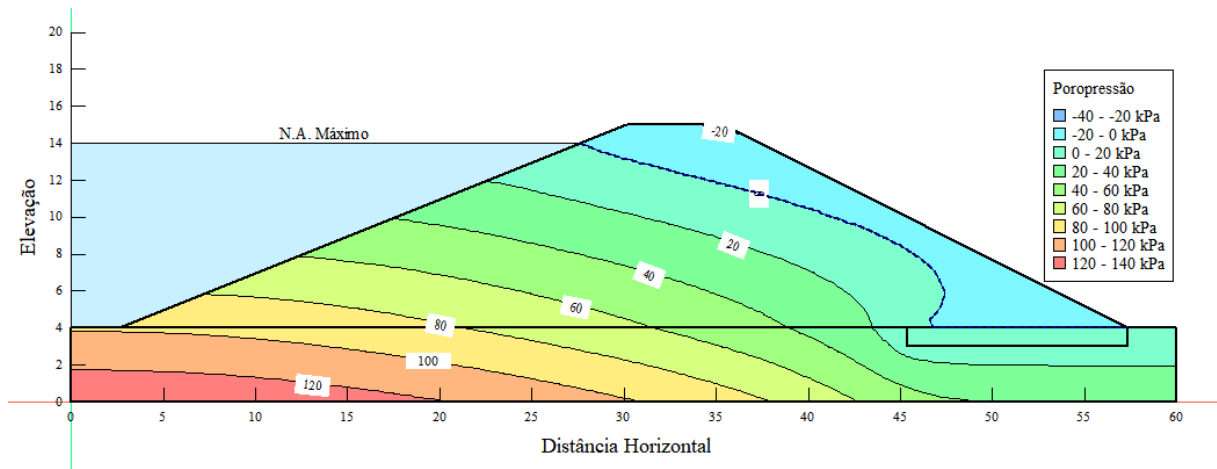
Figura 28 - Vetores de fluxo e linha freática com dreno.



Fonte: Autor (2019)

Na figura 29, pode-se ver que a pressão neutra na face de jusante passou a ser negativa. O software indicou uma diminuição na vazão de descarga para aproximadamente $1,41 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$, demonstrando assim a efetividade do elemento drenante como controlador de fluxo.

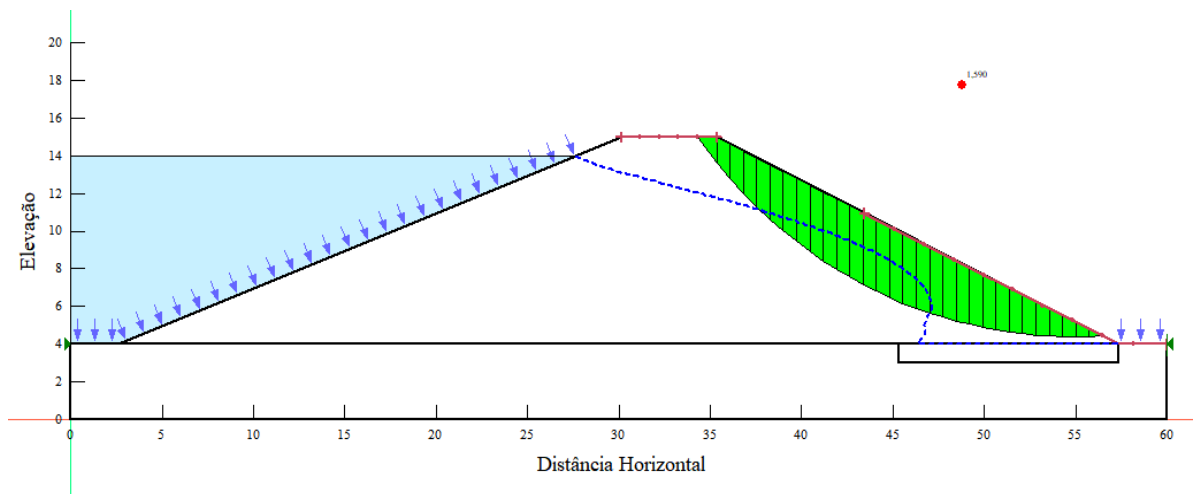
Figura 29 – Distribuição das pressões neutras com dreno.



Fonte: Autor (2019)

Por fim, para verificar se a adição do dreno afetou de forma significativa a estabilidade de taludes, fez-se uma análise pelo método de Bishop e obteve um fator de segurança de 1,59 como se pode ver na figura 30. Constatando a estabilidade da estrutura.

Figura 30 - Análise de estabilidade, método de Bishop, segunda condição



Fonte: Autor (2019)

5 CONCLUSÕES

Quando se opta por construir uma barragem de terra, a segurança deve ser sempre a prioridade, independente do uso a que se destina. Muitas vezes, essas estruturas acabam sendo negligenciadas quanto ao dimensionamento por puro desconhecimento ou pela dificuldade em achar parâmetros de materiais, por um exemplo. Talvez até por não utilizar as ferramentas disponíveis por puro conservadorismo.

Compreender o comportamento do material de construção, da fundação e da água nesse conjunto e entender os riscos envolvidos, são os primeiros passos para se evitar o rompimento destas estruturas. Neste trabalho, foi mostrado uma ferramenta bastante didática que ajuda na compreensão de alguns aspectos.

As análises confirmaram que a ausência do dreno, elemento quase que obrigatório em construções deste tipo, causa uma forte influência na linha de saturação.

Sem o dreno, a linha tem seu ponto no talude de jusante, o que vai contra as condições de segurança. Com o dreno composto de areia fina, a linha de saturação sofreu um rebaixamento, no qual teve seu ponto final levado para a base do maciço, reduzindo as pressões neutras, aumentando as tensões efetivas, deste modo aumentando a estabilidade dos taludes.

Conclui-se então, com a segurança estabelecida, que os resultados obtidos através das análises foram satisfatórios, indicando um comportamento adequado da barragem para a etapa de N.A máximo, conforme é especificado pela literatura.

Desta forma, para estudos futuros, é sugerido que se faça análises para diferentes materiais, investigando o comportamento deles submetidos a diferentes carregamentos; e que se faça análises para condição de regime transiente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. **NBR 11682**: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009. 33p.

BRASIL. Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. **Congresso Nacional**, Brasília, DF, 20 setembro 2010. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm> Acesso em 05 mar 2019

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2011, 365 p.

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

ELETROBRAS, Centrais Elétricas do Brasil. **Diretrizes para projetos de PCHs**, 2000.

GEOSLOPE INTERNATIONAL LTD. (org.). **GeoStudio 2018R2**: SEEP/W. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.geoslope.com/learning/downloads>. Acesso em: 17 abr. 2019.

GEOTECHDATA.INFO (Comp.). **Soil void ratio**. 2013. Disponível em: <<https://www.geotechdata.info/parameter/soil-porosity.html>>. Acesso em: 09 dez. 2019.

GIL, E. J. **Unidade 08: Aspectos geológicos e geotécnicos**. Curso Segurança de Barragens. Módulo I – Barragens: Aspectos legais, técnicos e socioambientais. Agência Nacional de Águas. 2013. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/110>> Acesso em 09 março 2019.

HUERTAS, Jackeline Rosemary C. **Modelagem numérica de fluxo 3d em meios porosos**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Puc-rio, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=9948@1>>. Acesso em: 09 dez. 2019.

JIMÉNEZ ROJAS, José Waldomiro; FONINI, Anderson. **Análise de Percolação em Barragem de Terra Utilizando o Programa SEEP/W**. 2006. TCC (Pós Graduação em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2006.

LOPEZ E MENDOZA, **Study of Unsaturated Soils by Coupled Numerical Analyses of Water Flow-Slope Stability**. Groundwater - Contaminant and Resource Management. IntechOpen, 2016 DOI: 10.5772/63903.

MARANGON, M. **Unidade 05 – Barragens de terra e enrocamento**. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. 2004. Disponível em: <http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/togot_unid05.pdf> Acesso em 05 março 2019.

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. com exercícios resolvidos. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MEIRELLES, F. S. C. **Unidade 09: Barragens de terra e enrocamento**. Curso Segurança de Barragens. Módulo I – Barragens: Aspectos legais, técnicos e socioambientais. Agência Nacional de Águas. 2013. Disponível em:
<<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/110>> Acesso em 05 março 2019.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método dos Elementos Finitos: O que é?**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 17 abr. 2019.

VARGAS M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo, SP: MCgraw-Hill, 1977. 510p.

USBR – Bureau of Reclamation, United States Department of Interior. **Diseño de Presas Pequeñas**. México, Compañía Editorial Continental, 1967.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Relatório de plágio

2019-2 TCC2 THAIS TEIXEIRA MENEZES.docx (11/12/2019):

Documentos candidatos

- [ufff.br/nugeo/files/... \[1,93%](#)
- [coursehero.com/file/... \[1,43%](#)
- [ufff.br/nugeo/files/... \[0,55%](#)
- [tumblr.com/tagged/vi... \[0,18%](#)
- [intechopen.com/books... \[0,18%](#)
- [pt.wikipedia.org/wik... \[0,15%](#)
- [pedroveiga.com/vi-ve... \[0,13%](#)
- [martinsfontespaulist... \[0,08%](#)

Arquivo de entrada: 2019-2 TCC2 THAIS TEIXEIRA MENEZES.docx (8112 termos)

Arquivo encontrado		Total de termos	Termos comuns	Similaridade (%)
ufff.br/nugeo/files/...	Visualizar	6730	282	1,93
coursehero.com/file/...	Visualizar	929	128	1,43
ufff.br/nugeo/files/...	Visualizar	1832	55	0,55
tumblr.com/tagged/vi...	Visualizar	617	16	0,18
intechopen.com/books...	Visualizar	5456	25	0,18
pt.wikipedia.org/wik...	Visualizar	518	13	0,15
pedroveiga.com/vi-ve...	Visualizar	714	12	0,13
martinsfontespaulist...	Visualizar	562	7	0,08
sciencedirect.com/to...	Visualizar	3600	6	0,05