

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS:  
COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES POR MÉTODOS DE  
EQUILÍBRIO LIMITE E ELEMENTOS FINITOS**

**MATHEUS HENRIQUE BENATTI BARBOSA**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS**

**PROJETO FINAL**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS:  
COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES POR MÉTODOS DE  
EQUILÍBRIO LIMITE E ELEMENTOS FINITOS**

**MATHEUS HENRIQUE BENATTI BARBOSA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD**  
**(ORIENTADOR)**

---

**RENATO SANTOS PAULINELLI RAPOSO, MSc.**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**JAIR OCHOA VALDERRAMA, MSc.**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 05 de dezembro de 2019.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

BARBOSA, MATHEUS HENRIQUE BENATTI: Estabilidade de Taludes de Barragens: Comparação entre Análises por Métodos de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos [Distrito Federal] 2019.

ix, 49 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019).

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Barragens      2. Equilíbrio Limite

3. Projeto        4. Elementos Finitos

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

BARBOSA, M. H. B. (2019). Estabilidade de Taludes de Barragens: Comparação entre Análises por Métodos de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos, Publicação G.PF-AA004/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Matheus Henrique Benatti Barbosa

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estabilidade de Taludes de Barragens: Comparação entre Análises por Métodos de Equilíbrio Limite e Elementos Finitos

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Matheus Henrique Benatti Barbosa

70683-665 - Brasília/DF – Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela vida e amor incondicional a cada instante.

À Universidade de Brasília, seu corpo docente e administração pelo curso oferecido, oportunidades criadas e todo o esforço a fim de oferecer um ensino de alta qualidade.

Ao meu orientador, professor André Assis, pelo suporte, apoio e correções ao longo da elaboração desse trabalho. Também agradeço toda energia e empenho com que ele ministrou cada aula que tive o privilégio de assistir.

Aos meus pais, pela escolha de se mudar para Brasília apenas para me oferecer o melhor estudo possível e por terem enfrentado todas as dificuldades desse período. Obrigado também pelo amor, paciência e lições ao longo de todo esse tempo.

Ao meu irmão, pelo companheirismo, pela amizade e por sempre conseguir me fazer rir e me divertir ao longo de todo o período de curso. Por mais que eu não merecesse seu apoio em alguns momentos, ele continuou sendo meu melhor amigo.

À minha namorada, pelo amor e paciência ao longo dos períodos complicados a cada final de semestre e pelos diversos momentos de alegria desfrutados nesses anos juntos.

Aos amigos, pelas risadas, conversas e almoços os quais ajudaram a descontrair um pouco o ambiente acadêmico e fizeram das minhas vindas à faculdade uma grande felicidade.

# **ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS: COMPARAÇÃO ENTRE ANÁLISES POR MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE E ELEMENTOS FINITOS**

## **RESUMO**

Entre as mais diversas obras da engenharia civil, as barragens ocupam papel de destaque, devido à grande complexidades e importância que envolvem essas construções. As barragens geotécnicas, em especial exigem estudos geotécnicos aprofundados quanto aos materiais e geometrias utilizadas. Durante o projeto de uma barragem de aterro devem ser feitas análises visando garantir a estabilidade dos taludes que serão executados. Para o estudo desse assunto, é apresentado aqui primeiramente uma visão geral de barragens e a importância dessas estruturas para o mundo. A seguir, o presente trabalho traz uma revisão bibliográfica de métodos tradicionais de equilíbrio limite e métodos de elementos finitos, os quais são métodos mais recentes e menos consolidados na prática usual de projetos atualmente, aplicados à análise de estabilidade de taludes de barragens. Além disso, é apresentado uma comparação entre os resultados dessa análises para diferentes seções de barragens em condição de operação com o reservatório cheio. Conclui-se que ambos os métodos têm suas limitações e vantagens, e os resultados sugerem que o método de elementos finitos podem ser mais conservadores, isto é, apresentaram fatores de segurança nos taludes apresentados menores no taludes avaliados do que os métodos de equilíbrio limites, acrescido ao fato de que o método de elementos finitos encontra a superfície crítica de ruptura de forma natural, diferentemente dos métodos de equilíbrio limite, nos quais tem-se a necessidade de pressupor essa superfície.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 ESCOPO.....	2
2 BARRAGENS.....	3
2.1 IMPORTÂNCIA .....	3
2.2 HISTÓRIA .....	4
2.3 BARRAGENS DE ATERRO .....	7
2.3.1 FUNDAÇÃO .....	7
2.3.2 TALUDES .....	8
2.3.3 NÚCLEO .....	9
2.4 TIPOS DE BARRAGEM DE ATERRO.....	11
2.4.1 BARRAGEM HOMOGÊNEA .....	11
2.4.2 BARRAGEM ZONADA .....	12
2.5 CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO .....	12
3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS.....	14
3.1 MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	15
3.1.1 MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE .....	17
3.1.2 MÉTODO DE SPENCER.....	22
3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	23
3.2.1 MODELO ADOTADO PARA ESTABILIDADE DE TALUDES.....	24
3.2.2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA.....	25
3.3 ESTUDO SIMILAR.....	27
4 METODOLOGIA.....	32
4.1 BARRAGEM 1 .....	32
4.2 BARRAGEM 2 .....	35
4.3 BARRAGEM 3 .....	36
5 RESULTADOS .....	38
5.1 RESULTADOS DA BARRAGEM 1.....	38
5.2 RESULTADOS DA BARRAGEM 2.....	40
5.3 RESULTADOS DA BARRAGEM 3.....	42
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	45
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	47

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Hoover Dam (AAA International Relations, 2019).....	6
Figura 2.2 - Seção de barragem com núcleo central e núcleo inclinado (Costa, 2012) .....	9
Figura 2.3 - Seção Homogênea Típica (Assis, 2003) .....	12
Figura 2.4 – Seção Zonada .....	12
Figura 4.1 - Forças normais e de corte em uma fatia genérica (Silva, 2011) .....	16
Figura 4.2 – Forças atuantes por fatia no Método de Morgenstern-Price (Fine Civil Engineering Software, 2019) .....	18
Figura 4.3 – Exemplo de Função Meio-seno (Fine Civil Engineering Software, 2019).....	19
Figura 4.4 - Geometria da Análise Similar 1 (Hamdhan, 2019).....	28
Figura 4.5 - Mecanismo de falha para um talude homogêneo com uma camada de fundação usando o método dos elementos finitos (Hamdhan, 2019).....	28
Figura 4.6 - Método de Morgenstern & Price para uma inclinação homogênea com uma camada de fundação (Hamdhan, 2019).....	28
Figura 4.7 - Geometria da Análise Similar 2 (Hamdhan, 2019).....	29
Figura 4.8 - Análise pelo método de Morgenstern & Price rebaixamento lento (Hamdhan, 2019) .....	30
Figura 4.9 - Análise pelo método de elementos finitos para rebaixamento lento (Hamdhan, 2019).....	30
Figura 5.1 - Geometria da barragem 1 .....	33
Figura 5.2 – Malha de elementos finitos da barragem 1 no Plaxis.....	34
Figura 5.3 - Malha de elementos finitos da barragem 1 no GeoStudio .....	34
Figura 5.6 – Geometria da barragem 2 .....	35
Figura 5.7 – Malha de elementos finitos da barragem 2 no Plaxis.....	36
Figura 5.8 – Malha de elementos finitos da barragem 2 no GeoStudio .....	36
Figura 5.11 – Geometria da barragem 3 .....	36
Figura 5.12 – Malha de elementos finitos da barragem 3 no Plaxis.....	37
Figura 5.13 – Malha de elementos finitos da barragem 3 no GeoStudio .....	37
Figura 5.4 - Linha freática da barragem 1 no Plaxis .....	38
Figura 5.5 - Linha freática da barragem 1 no GeoStudio .....	38
Figura 6.1 - Resultado do método de Morgenstern-Price para barragem 1.....	39
Figura 6.2 - Resultado do método de Spencer para barragem 1 .....	39

Figura 6.3 - Resultado do método de elementos finitos para barragem 1 .....	40
Figura 5.9 - Linha freática da barragem 2 no Plaxis .....	40
Figura 5.10 - Linha freática da barragem 2 no GeoStudio .....	40
Figura 6.4 - Resultado do método de Morgenstern-Price para barragem 2.....	41
Figura 6.5 - Resultado do método de Spencer para barragem 2.....	41
Figura 6.6 - Resultado do método de elementos finitos para barragem 2 .....	42
Figura 5.14 - Linha freática da barragem 3 no Plaxis .....	42
Figura 5.15 - Linha freática da barragem 3 no GeoStudio .....	43
Figura 6.7 - Resultado do método de Morgenstern-Price para barragem 3.....	43
Figura 6.8 - Resultado do método de Spencer para barragem 3.....	43
Figura 6.9 - Resultado do método de elementos finitos para barragem 3 .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Taludes preliminares para diversos tipos de solos (Cruz, 1996).....	9
Tabela 3.1 - Fatores de Segurança por Condição de Carregamento (ELETROBRÁS, 2003) .	13
Tabela 4.1 - Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite não rigorosos (Silva, 2011).....	17
Tabela 4.2 - Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite rigorosos (Silva, 2011) .....	17
Tabela 4.3 - Parâmetros do Solo para modelo Mohr Coulomb (Hamdhan, 2019).....	27
Tabela 4.4 - Fatores de segurança para rebaixamento lento (Hamdhan, 2019).....	31
Tabela 5.1 - Parâmetros de materiais da barragem 1.....	34
Tabela 5.2 - Parâmetros de permeabilidade da barragem 1.....	34
Tabela 5.3 - Parâmetros de materiais da barragem 2.....	35
Tabela 5.4 - Parâmetros de permeabilidade da barragem 2.....	35
Tabela 6.1 - Síntese de fatores de segurança obtidos .....	38
Tabela 6.1 - Comparação de redução de FS da barragem 2 para a barragem 3 .....	44

# **1 INTRODUÇÃO**

Com o constante aumento de populações ao redor do mundo, obras de infraestrutura se mostram cada dia mais necessárias e pujantes na realidade de países que buscam seu desenvolvimento. Nesse contexto se inclui o Brasil, no qual, com o anseio de fomentar esse crescimento, pontes, viadutos e barragens são de suma importância para o atendimento de pessoas, entregando maior conforto ao consumidor comum e oportunidades aos empreendedores.

É papel fundamental do engenheiro civil conceber, projetar, executar e dar suporte à manutenção dessas estruturas, de forma a garantir sua segurança à população. Dessa forma, os engenheiros estão submetidos a grandes responsabilidades para com a sociedade em que estão inseridos.

Durante o projeto de barragens geotécnicas, deve-se fazer a análise de estabilidade dos taludes que compõem a barragem. As primeiras ferramentas que surgiram para essa análise foram os Métodos de Equilíbrio Limite, por meio dos quais o projetista deve assumir formas de superfícies de ruptura e calcular o Fator de Segurança daquela geometria proposta. Com o surgimento dos Elementos Finitos por volta da década de 50 do século XX tem-se a possibilidade de fazer uma análise mais generalizada por meio da distribuição de tensões no solo e sua comparação com a resistência dos materiais e as deformações ocorridas.

Dessa forma, é interessante entender as vantagens e desvantagens de cada uma das alternativas. Para isso, será levantado um panorama geral do tema, dando foco ao uso dos elementos finitos no problema de estabilidade de taludes em barragens de aterro e ao final serão realizadas análises para que se possa discutir e comparar resultados dos dois métodos, bem como apontar as possíveis complicações e dificuldades no uso de cada uma das ferramentas avaliadas.

## **1.1 OBJETIVOS**

Define-se como objetivo geral avaliar e comparar os métodos tradicionais de equilíbrio limite com o método de elementos finitos aplicado ao problema de análise de estabilidade de taludes em barragens geotécnicas. Essa comparação será feita apenas para a condição de reservatório cheio da barragem e fluxo permanente estabelecido.

Os objetivos específicos incluem:

- Registrar uma revisão teórica dos dois métodos de cálculo de estabilidade de taludes;
- Comparar a aplicabilidade dos dois métodos em diferentes seções geotécnicas de barragens;
- Formular recomendações quanto às vantagens e desvantagens de cada método.

## **1.2 ESCOPO**

Para atingir os objetivos propostos, o presente trabalho traz no Capítulo 2 uma visão geral de barragens, de forma a introduzir o leitor ao assunto com um breve histórico do assunto, uma abordagem sobre os principais componentes que formam uma barragem e os principais tipos de barragens geotécnicas atuais.

O Capítulo 2.5 define as principais condições de carregamento às quais uma barragem é submetida ao longo de sua vida útil e como essas solicitações devem ser tratadas na perspectiva do projeto dessa obra.

O Capítulo 3, por sua vez, ilustra e detalha aspectos dos métodos a serem usados nas análises, de forma a mostrar e explicar o funcionamento desses métodos, bem como algumas de suas principais particularidades.

O Capítulo 4 define a metodologia adotada para as análises feitas no trabalho, isto é, apresenta a geometria das barragens avaliadas, os parâmetros dos materiais considerados, cita os programas utilizados e os demais detalhes pertinentes às análises que foram elaboradas.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos das análises e faz pequenos comentários para chamar atenção a pontos que são de grande importância nesses resultados.

O Capítulo 6 traz a conclusão do autor a respeito do assunto estudado e os resultados obtidos. A partir disso são feitas nesse capítulo recomendações para trabalhos futuros que envolvam o tema aqui exposto.

Por fim, o último Capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas na elaboração do presente trabalho.

## **2 BARRAGENS**

### **2.1 IMPORTÂNCIA**

Nos tempos antigos, as barragens eram construídas com o único objetivo de fornecer água ou irrigar plantações. À medida que as civilizações se desenvolvem, há uma maior necessidade de abastecimento de água, irrigação, controle de enchentes, navegação, qualidade de água, controle de rejeitos e energia. Nesse contexto, barragens são a peça chave no aproveitamento e gerenciamento de recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. Barragens com múltiplas funções são projetos muito importantes para países em desenvolvimento, uma vez que a população recebe benefícios nas atividades cotidianas e na economia a partir de um único investimento (ICOLD, 2019).

A demanda por água está aumentando constantemente em todo o mundo. Não há vida na Terra sem água, o recurso mais importante além do ar e da terra. Nos últimos três séculos, a quantidade de água retirada dos recursos de água doce aumentou em um fator de 35 vezes, enquanto a população mundial em um fator de apenas 8 vezes. Com a população mundial atual de 7,7 bilhões crescendo a uma taxa de cerca de 90 milhões por ano, e com suas expectativas legítimas de padrões de vida mais altos, a demanda global por água deverá aumentar mais 2-3% ao ano nas próximas décadas (ICOLD, 2019).

Mas os recursos de água doce são limitados e distribuídos de maneira desigual. Nos países de alto consumo, com ricos recursos e uma infraestrutura técnica altamente desenvolvida, as muitas maneiras de conservar, reciclar e reutilizar a água podem ser mais ou menos suficientes para conter o crescimento da oferta. Em muitas outras regiões, no entanto, a disponibilidade de água é crítica para qualquer desenvolvimento futuro acima do nível insatisfatoriamente baixo atual. Nessas regiões, o homem não pode renunciar à contribuição de barragens e reservatórios para o aproveitamento dos recursos hídricos (ICOLD, 2019).

Variações sazonais e irregularidades climáticas no fluxo também impedem o uso eficiente do escoamento de rios, com inundações e secas causando problemas de proporções catastróficas. Por quase 5.000 anos, as barragens têm servido para garantir um suprimento adequado de água, armazenando a água em tempos de excesso e fornecendo-a em tempos de escassez, também evitando assim inundações (ICOLD, 2019).

Com sua atual capacidade agregada de armazenamento de cerca de 6.000 km<sup>3</sup>, as barragens contribuem claramente para o gerenciamento eficiente dos recursos hídricos finitos, desigualmente distribuídos e sujeitos a grandes flutuações sazonais (ICOLD, 2019).

A maioria das barragens é de uso único, mas agora existe um número crescente de barragens polivalentes. Usando a publicação mais recente do Registro Mundial de Barragens, observa-se que a irrigação é de longe o objetivo mais comum das barragens. Entre as barragens de uso único, 48% são para irrigação, 17% para hidrelétricas, 13% para abastecimento de água, 10% para controle de enchentes, 5% para recreação e menos de 1% para navegação e piscicultura (ICOLD, 2019).

Dessa forma, percebe-se a grande importância das barragens para as civilizações atuais, de maneira que mesmo com os acidentes recentes, como os acontecidos em Mariana e Brumadinho, ambas cidades localizadas em Minas Gerais, é imperativo que novas barragens continuem a ser construídas. Deve-se, portanto, buscar conhecimentos que possam melhorar as análises hoje disponíveis, a fim de garantir obras ainda mais seguras para a sociedade que confia suas vidas aos conhecimentos e competências dos engenheiros civis.

## **2.2 HISTÓRIA**

Historicamente as barragens estão presentes ao longo do desenvolvimento das mais diversas civilizações, possuindo grande importância em diversos âmbitos, desde o lazer até o armazenamento de água para consumo e a geração de energia. De acordo com Almeida (2010), um dos primeiros registros de barragens aponta para o Egito há cerca de 6800 anos, sendo essas estruturas muito arcaicas ainda.

Segundo Helms (1975), a primeira barragem que se tem registros mais concretos de sua construção é a barragem de Jawa, na Jordânia. Os romanos, altamente considerados por seus avanços na engenharia hidráulica, tiveram bastante destaque na construção de barragens durante o auge do império. Além da vasta rede de aquedutos, os romanos construíram uma infinidade de represas de gravidade. As mais notáveis e curiosas das barragens foram as de Subiaco, que foram construídas por volta de 60 dC para criar um lago de lazer para o imperador Nero. As barragens de Subiaco eram uma série de três represas de gravidade no rio Aniene em Subiaco, Itália, a maior das quais tinha 165 m de altura e detinha a honra de ser a barragem mais alta do mundo até sua destruição em 1305.

Culturas asiáticas também contribuíram para a engenharia de barragens. Já em 400 aC, os asiáticos construíram represas de argila para armazenar água para as cidades de Ceilão, ou o atual Sri Lanka. No século V dC, os cingaleses construíram várias represas para formar reservatórios para capturar as chuvas de monção devido ao seu intrincado sistema de irrigação, e muitos desses reservatórios ainda estão em uso atualmente (Garbrecht, 1986).

O Japão e a Índia também contribuíram para o início da engenharia de barragens, com muito sucesso. De fato, cinco das dez barragens mais antigas ainda em uso estão localizadas nesses dois países. A barragem operacional mais antiga do mundo, a represa de Lake Homs, na Síria, foi construída por volta de 1300. A barragem de gravidade em alvenaria tem mais de um quilômetro e meio de comprimento e 7 m de altura e cria o Lago Homs, o qual ainda fornece água atualmente (Bazza, 2019).

Durante a idade média, como quase todas as áreas na Europa, a construção de barragens quase parou, tendo seu reinício por volta do século 15 dC. Durante esse período, não foram feitas grandes contribuições para a engenharia de barragens, e a maioria das barragens construídas na Europa, onde as chuvas são abundantes e regulares, eram estruturas modestas sem grandes avanços (Bazza, 2019).

Foi na década de 1850 que houve então um salto nesse desenvolvimento, quando o professor de engenharia civil William John Macquorn Rankine, da Universidade de Glasgow, demonstrou uma melhor compreensão da mecânica dos solos, que a engenharia de barragens avançou a passos largos. De fato, o trabalho de Rankine foi tão inovador que contribuiu para a aceitação da engenharia civil como um assunto universitário válido e melhorou o status dos engenheiros civis. Desde Rankine, as contribuições científicas geológicas, hidrológicas e estruturais têm sido extensivas, e o entendimento da engenharia de barragens melhorou significativamente como resultado (J. Guthrie Brown, 2019).

Os principais avanços no projeto de barragens de concreto foram feitos de 1853 a 1910 por engenheiros britânicos e franceses. Durante esse tempo, a compreensão da relação entre o peso específico e o perfil das barragens de gravidade e o empuxo horizontal da água aumentaram extensivamente. Em 1910, novos avanços foram feitos à medida que os engenheiros começaram a adotar uma abordagem mais tridimensional para a engenharia de barragens, examinando o efeito de tensões e desvios individuais em múltiplos pontos e não na estrutura como um todo. Reconhecendo a complexidade da estrutura e entendendo sua

interconectividade, os engenheiros puderam fazer avanços na engenharia de barragens. Como resultado dessa compreensão aprimorada, técnicas de modelo foram implementadas neste momento. Originalmente construído em borracha, gesso, plasticina ou concreto, a modelagem atualmente é feita digitalmente, permitindo testes multifacetados e abrangentes (J. Guthrie Brown, 2019).

As maiores e mais complexas barragens do mundo foram construídas no último século, devido à engenharia e aos avanços tecnológicos. Além de fornecer água e controlar inundações, as barragens modernas são construídas para produzir energia hidrelétrica. A Represa Hoover, uma barragem de gravidade em arco construída no Black Canyon do Rio Colorado em 1936, é um excelente exemplo dos grandes avanços feitos na engenharia de barragens. A barragem, que ocupa o Lago Mead, tem uma altura de mais de 200 m (J. Guthrie Brown, 2019).



Figura 2.1 - Hoover Dam (AAA International Relations, 2019)

Além disso, de acordo com Massad (2003), o primeiro tipo de seção típica a surgir foram as barragens homogêneas, de forma que seções mais modernas como a com o núcleo argiloso surgiram já no século XIX. Do ponto de vista histórico, o desenvolvimento de barragens de enrocamento se mostra também muito curioso, uma vez que essas barragens passaram a ser executadas em atividades de mineração nos Estados Unidos devido à pouca disponibilidade de material terroso e excesso de rochas trituradas acumuladas no processo de mineração. Por conta das circunstâncias, passou-se a, por tentativa e erro, construir barragens por meio do empilhamento de rochas no leito do rio. Essa maneira arcaica de construção resultou no rompimento sucessivo de diversas estruturas na época, mas também motivou diversos estudos e pesquisas nessa área, em especial do exército americano, para desenvolver tecnologias que possibilitassem essa construção com segurança.

Sob uma ótica nacional, o Nordeste brasileiro foi a região pioneira na construção de barragens, devido ao clima da região que exige alternativas para o abastecimento de água das populações no período de seca. Entretanto, foi no estado do Rio de Janeiro que se deu início ao uso de técnicas de projeto e construção mais modernas no país, ganhando destaque a Barragem Terzaghi, construída na década de 1930, a qual ganha destaque por ter sido a primeira barragem do mundo a fazer uso do Filtro Vertical em seu Núcleo e até hoje faz parte do sistema de abastecimento de água da cidade do Rio de Janeiro (CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens, 2011).

Outra época que merece destaque na construção de barragens no Brasil é a partir do primeiro governo de Juscelino Kubitschek e a década de 1960, anos de grande movimento e atividade de pesquisa e construção de barragens no país, dando-se nesse momento o início de projetos e construção das primeiras chamadas Grandes Barragens Brasileiras. Assim, foi durante o Governo Militar que foram inauguradas algumas das mais importantes barragens nacionais, como Itaipu, Xingó e Emborcação (CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens, 2011).

## **2.3 BARRAGENS DE ATERRO**

Os materiais componentes da barragem podem ser os mais diversos possíveis. Na escolha do tipo de barragem deve-se atentar para dois elementos fundamentais: a parte vedante e a parte que confere estabilidade. Um fator determinante, no entanto, é a disponibilidade de materiais de construção nas proximidades do local de implantação da barragem (Cruz, 1996).

Para atender esses dois elementos fundamentais, as barragens geotécnicas normalmente são compostas de três componentes: fundação, taludes (montante e jusante) e núcleo. Dependendo da barragem, podem ser adicionados elementos para permitir que os componentes básicos funcionem com maior eficiência como filtros, paredes diafragmas, cortinas de injeção, entre outras alternativas. Nesse tópico do trabalho é realizada uma revisão desses componentes de uma barragem.

### **2.3.1 FUNDAÇÃO**

A fundação de uma barragem é o meio de suporte que resiste às forças verticais e horizontais, garantindo que a estrutura não apresente deslocamentos excessivos nessas direções. Dependendo do material de fundação, isto é, seja solo ou rocha, a fundação pode favorecer ou resistir o fluxo de água. Fundações em rocha são, em geral, melhor material de fundação, desde

que estejam livres de numerosas falhas, juntas ou junções de argila ou xisto macio, o que pode acarretar a necessidade de custosos procedimentos de tratamento dessa fundação. De acordo com Cruz (2016) a fundação condiciona de maneira marcante a escolha da seção típica da barragem.

De maneira geral a escolha do tipo de barragem, isto é, se ela é de terra, enrocamento ou concreto está intimamente ligada ao tipo de fundação presente. Segundo Assis (2003) quanto maior a competência da fundação, pode-se optar pelas geometrias que resultam em distribuições de tensões à fundação mais elevadas, o que faz com que barragens de concreto, as quais transmitem as tensões mais elevadas ao solo estão sempre associadas a fundações em boas rochas, ao passo que barragens de terra normalmente são construídas sobre fundações menos competentes, como maciços de solos.

Areias e cascalhos também fornecem um bom suporte para barragens, mas medidas adequadas devem ser tomadas para controlar a percolação nesses meios. Areias finas com densidades relativas inferiores a 65% devem ser compactadas por vibração para evitar a liquefação da camada suporte. As fundações de argila apresentam sérios problemas de estabilidade e recalques excessivos, a menos que sejam tomadas medidas para acelerar o adensamento ou, em casos extremos opta-se pela substituição completa do material disponível (Assis, 2003).

### **2.3.2 TALUDES**

Os taludes fornecem estabilidade à estrutura e protegem o núcleo. Todos os materiais relativamente permeáveis que não são propensos a sofrerem trincas se expostos às condições atmosféricas normais são adequados para essa camada, desde que suas propriedades não permitam a passagem de materiais do núcleo por eles (pipping) e ofereçam resistência satisfatória para a estabilidade da estrutura (Cruz, 1996).

Ainda de acordo com Cruz (1996) os taludes não devem ultrapassar uma inclinação de 1,5(H) : 1,0(V), mesmo que a fundação seja competente e a análise de estabilidade aponte essa inclinação como estável. Essa limitação ocorre devido ao aspecto executivo da construção do talude, uma vez que inclinações superiores aos valores citados impossibilitariam a execução da barragem. A fim de orientar melhor a concepção inicial de inclinações dos taludes de barragens, Cruz (1996) apresenta uma tabela de inclinações preliminares de tais. Essa tabela está reproduzida na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Taludes preliminares para diversos tipos de solos (Cruz, 1996).

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 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)
Solos Compactados Siltosos	3,5(H):1,0(V)	3,0(H):1,0(V)
Enrocamentos **	1,3(H):1,0(V)	1,3(H):1,0(V)
	1,6(H):1,0(V)	1,6(H):1,0(V)

\*No caso de barragens com pequenas oscilações de N.A., os taludes de montante podem ser os mesmo de jusante.  
 \*\*Os taludes mais íngremes referem-se a rochas sãs, e desde que a largura de base do enrocamento seja no mínimo igual à altura da barragem.

Dessa forma, os taludes a montante e a jusante de uma barragem devem ser decididos com base na disponibilidade de material na obra, especialmente aqueles provenientes de escavações obrigatórias, condição da fundação, altura e tipo de barragem e a seguir deve-se realizar as Análises de Estabilidade desses taludes para a condição de Final de Construção. As condições de solicitação serão mais bem explicadas no Capítulo 2.5.

### 2.3.3 NÚCLEO

O núcleo atua como uma barreira impermeável e é um dos principais elementos que atuam a fim de evitar a infiltração livre de água pelo corpo da barragem, de forma a possibilitar um talude à jusante livre da presença de água. Com base na disponibilidade de material, na topografia do terreno e em considerações de construção, o núcleo pode ser posicionado central ou inclinado a montante, conforme a Figura 2.2.

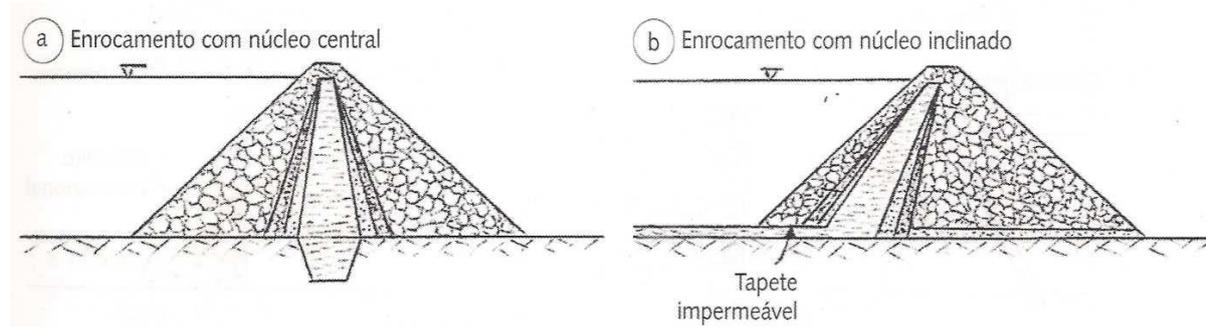


Figura 2.2 - Seção de barragem com núcleo central e núcleo inclinado (Costa, 2012)

Segundo Cruz (1996) há duas principais vantagens quanto à inclinação do núcleo à montante. A primeira delas é mecânica, uma vez que essa geometria minimiza o efeito de arqueamento de tensões em torno do núcleo o que ocorre de forma mais acentuada na geometria com núcleo central devido à rigidez muito elevada na direção vertical, o que faz com que as

transições do núcleo tenha um comportamento que se assemelha à um pilar, recebendo muita tensão vertical do restante do maciço. A segunda vantagem dessa inclinação à montante do núcleo é pelo aspecto executivo, uma vez que essa conformação permite a liberação de maiores praças de compactação na região do talude de jusante, o que pode representar um grande diferencial no cronograma de execução da obra.

De acordo com Assis (2003) o nível superior do núcleo deve ser fixado a 1 m acima do nível máximo da água. Esta condição é imposta para evitar percolação por sifonagem capilar. Por fim, a espessura superior mínima do núcleo deve ser de 3 m, e a espessura final deve ser decidida com base nos seguintes critérios basicamente:

- (i) disponibilidade de material natural adequado;
- (ii) vazão de projeto que se permite percolar;
- (iv) disponibilidade de outros materiais para impermeabilização, filtração etc.

As equações (2.1) e (2.2) a seguir são recomendações quanto a largura mínima, em metros, do núcleo feitas por Cruz (1996) para barragens de terra-enrocamento de forma a controlar erosões e possibilitar boa compactação no processo construtivo:

$$b = 6 + 0,2 * \Delta h \quad (\text{Solos Argilosos}) \quad (2.1)$$

$$b = 6 + 0,3 * \Delta h \quad (\text{Solos Siltosos}) \quad (2.2)$$

onde:

b= largura do núcleo em qualquer elevação

$\Delta h$ = diferença de carga dos pontos a montante e jusante do plano considerado

Além do núcleo outras soluções podem ser adotadas com o propósito de aumentar a estanqueidade da estrutura projetada, como injeções de calda de cimento nas fundações, *cut-off*, paredes diafragmas ou tapetes. Esse nível de estanqueidade varia de projeto para projeto, dependendo principalmente do objetivo final de utilização da obra. Por exemplo, uma barragem de controle de cheias pode admitir uma vazão de percolação maior do que uma barragem que

visa o fornecimento de água. Cabe à equipe técnica responsável pelo projeto definir a vazão máxima aceitável e encontrar soluções a fim de atingir o critério estabelecido.

## 2.4 TIPOS DE BARRAGEM DE ATERRO

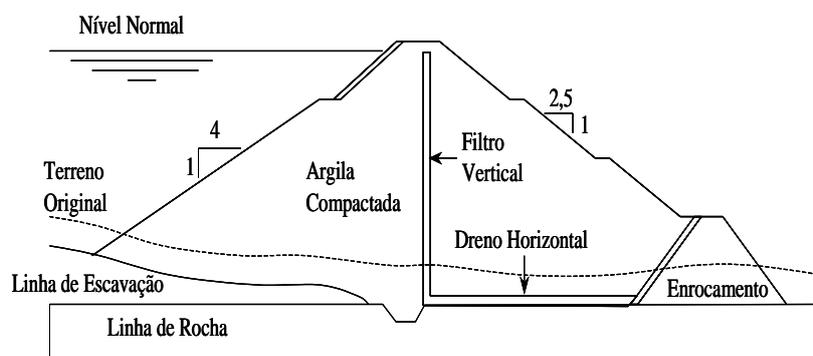
Barragens de aterro são construídas de materiais naturais os quais são dispostos em camadas e compactados com o uso de equipamentos específicos para essa finalidade. Nesse contexto, a maior subdivisão é quanto ao material predominante na construção, podendo ser ele argila compactada ou rochas fragmentadas e devidamente compactadas, o chamado enrocamento.

Essas barragens geotécnicas são especialmente competitivas e atrativas em locais onde não há disponibilidade de uma fundação competente o suficiente para suportar barragens de concreto. Dessa forma, em geral quando não se tem uma fundação em rocha ou material muito duro, opta-se pela construção de barragens de aterro, uma vez que essas transmitem à fundação menores esforços do que as barragens de concreto.

Além disso, as barragens podem ter em sua composição tanto terra quanto enrocamento, as chamadas barragens mistas de aterro, as quais distribuem ao longo de seu corpo diferentes regiões de terra e enrocamento, buscando sempre uma relação de custo-benefício maximizada.

### 2.4.1 BARRAGEM HOMOGÊNEA

De acordo com Assis (2003) essa denominação se dá a barragens compostas majoritariamente por apenas um material de construção, apesar de não ser toda a barragem de um único material, uma vez que sempre haverá a necessidade da associação de materiais especialmente na região do núcleo de maneira a propiciar uma boa condição de drenagem à estrutura. A Figura 2.3 traz uma representação típica de uma seção de barragem homogênea.



## 2.4.2 BARRAGEM ZONADA

Segundo Assis (2003) esse tipo de barragem está normalmente relacionado com a disponibilidade de materiais diversificados na região da barragem, de forma que sua construção visa aproveitar as propriedades mais interessantes de cada material, promovendo uma associação entre os materiais componentes sem que haja a predominância de ou protagonismo de apenas um. A Figura 2.4 ilustra o que seria uma seção típica dessa modalidade de concepção.

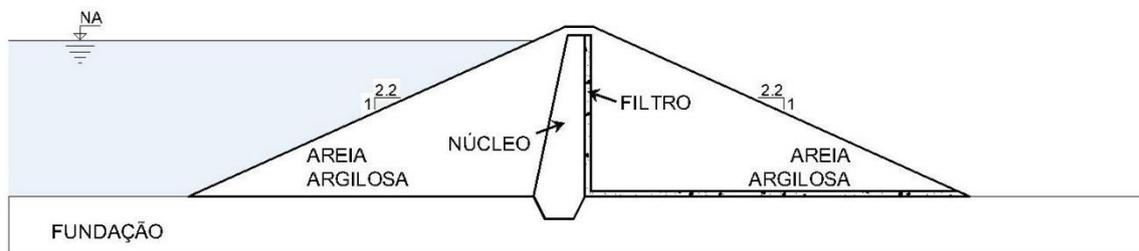


Figura 2.4 – Seção Zonada

## 2.5 CONDIÇÕES DE SOLICITAÇÃO

O projeto de uma barragem passa por algumas fases de desenvolvimento até que se possam ser elaborados os projetos executivos para sua construção. Entre essas fases, uma fase crucial que precisa ser feita é a verificação da Estabilidade dos Taludes que se está pretendendo executar. Essa verificação deve ser feita para todos os momentos que esses taludes deverão manter sua estabilidade, isto é, desde a sua construção até suas diversas possibilidades de carregamento ao longo de sua vida útil.

De acordo com Cruz (1996) deve ser verificada a estabilidade dos taludes pelo menos para as três seguintes condições de solicitação: final de construção, regime permanente de operação e rebaixamento do reservatório. O manual de projetos de barragens elaborado pela Eletrobrás (2003) acrescenta ainda uma quarta condição de solicitação: sísmica. A Tabela 2.2 a seguir é uma reprodução de uma tabela presente no manual citado que define os Fatores de Segurança aceitáveis para cada condição de carregamento.

Tabela 2.2 - Fatores de Segurança por Condição de Carregamento (ELETROBRÁS, 2003)

<b>Caso</b>	<b>Coefficiente de Segurança</b>	<b>Observações</b>
<b>Final de Construção</b>	1,3 (a)	Taludes Montante e Jusante
<b>Rebaixamento Rápido</b>	1,1 a 1,3 (b)	Valor mínimo para solos dilatantes Valor máximo para solos que contraem no cisalhamento Taludes Montante e Jusante
<b>Percolação Estável (Regime permanente de operação)</b>	1,5	Talude Jusante
<b>Análise Sísmica</b>	1,0	Talude Montante e Jusante

(a) Para barragens acima de 15 m de altura sobre fundações relativamente fracas, usar fator de segurança mínimo de 1,4.

(b) Nos casos em que o rebaixamento ocorre com frequência, considerar o coeficiente 1,3.

Um fato que chama atenção na tabela acima é o coeficiente de segurança mais elevado para a condição de Percolação Estável o qual se justifica pela ótica de que a barragem vai operar durante praticamente toda a sua vida útil nessa condição de carregamento. Vale destacar também que esses coeficientes de segurança são cálculos de acordo com os Métodos de Equilíbrio Limite que serão abordados no capítulo 3.

### **3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS**

Conforme exposto anteriormente uma área de grande pesquisa e atenção no projeto de uma barragem geotécnica é a análise de estabilidade dos taludes que a compõe. Tal destaque se dá pela necessidade e busca por construir as barragens com os taludes o mais íngreme possível com os materiais disponíveis para a construção, uma vez que isso gera economia na obra, posto que o volume de material a ser depositado é menor se o talude adotado for mais inclinado.

Assim, para se determinar qual essa inclinação máxima que se pode adotar garantindo a segurança da estrutura faz-se necessário a adoção de um modelo que tente retratar ou prever o comportamento dessas estruturas na realidade. Para isso, independentemente da abordagem escolhida, são feitas simplificações do problema para que se possa analisar a estabilidade da barragem. Busca-se nesse capítulo investigar os métodos de análise de estabilidade de taludes disponíveis atualmente.

Existe uma infinidade de modelos matemáticos para tratar do problema de estabilidade de taludes. De maneira geral, pode-se dividi-los em dois grandes grupos: Métodos de Equilíbrio Limite e Métodos de Elementos Finitos. A maioria das análises de estabilidade de taludes realizadas na prática utilizam os Métodos Tradicionais de Equilíbrio Limite.

O Método do Elementos Finitos, entretanto, representa uma abordagem alternativa para análise de estabilidade de taludes que é precisa, versátil e requer menos, a priori, suposições em relação ao mecanismo de ruptura da estrutura. Segundo Cavalcante (1997) é nesse ponto que o Método dos Elemento Finitos pode levar alguma vantagem na análise, uma vez que a falha do modelo ocorre naturalmente através das zonas nas quais a força de cisalhamento do solo é insuficiente para resistir às tensões de cisalhamento, sem que seja necessário informar onde se espera que isso ocorra ou em qual geometria ocorrerá a ruptura.

Ainda de acordo com o trabalho de Cavalcante (1997) é muito interessante perceber que, em suas análises comparando os Métodos de Equilíbrio Limite com os Métodos de Tensão-Deformação, o autor foi capaz de identificar na barragem de mineração estudada uma região de instabilidade a qual não representava problema ao analisar o problema apenas pelos Métodos de Equilíbrio Limite.

Outro ponto interessante nessa discussão de qual o melhor modelo a ser adotado foi levantado por Cruz (1996), o qual cita uma situação em um congresso em que foi feito um

desafio aos engenheiros participantes para que eles prevessem o comportamento de amostras de solo em alguns ensaios, cujos resultados seriam entregues após as tentativas de representações. O que se constatou na ocasião é que tanto modelos extremamente complexos quanto modelos muito simples foram capazes de se aproximar dos resultados reais e o oposto também aconteceu, isto é, tanto modelos muito elaborados, quanto simplificados cometeram erros muito grandes de previsão do comportamento. A conclusão que o autor chegou nesse teste é que um fator determinante para o sucesso dessas simulações era a experiência dos engenheiros que usavam os modelos, ou seja, não existia um modelo perfeito, mas era muito importante que o engenheiro que o usasse fosse capaz de julgar a coerência dos resultados. Como o próprio Cruz afirma: “Afinal, Engenharia é Bom Senso”.

Portanto, a estabilidade de taludes representa uma área de análise geotécnica em que uma abordagem por Elementos Finitos pode oferecer bons resultados de previsão de tensão-deformação das estruturas, desde que o engenheiro disponha de dados confiáveis, o que resultaria em uma análise de estabilidade relevante. As capacidades gráficas dos programas com Elementos Finitos podem permitir uma diferente compreensão dos mecanismos de ruptura que podem ocorrer no talude, assim pode ser indispensável a investigação detalhada de tensão-deformação em um talude para evitar outros possíveis mecanismos de ruptura.

### **3.1 MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE**

Os métodos de Equilíbrio Limite são hoje os métodos mais usuais para a análise de estabilidade de taludes de barragens devido a sua simplicidade e maior tempo desde que foram desenvolvidos, de maneira que seu conhecimento foi mais difundido e está sedimentado entre os projetistas no mercado convencional atual. Além disso, esses métodos têm menor demanda computacional, de forma que essas análises são feitas em um tempo menor do que análises com elementos finitos com maior grau de detalhamento dos elementos.

Segundo Griffiths et al. (1999) uma crítica em relação a todos os Métodos de Equilíbrio Limite é que eles são baseados no pressuposto de que a massa de solo falida pode ser dividida em fatias. Estas, por sua vez, exigem mais suposições relativas às forças atuantes entre as fatias, com conseqüente implicações para o equilíbrio. A suposição feita sobre as forças laterais é uma das características que distingue um método de equilíbrio limite de outro.

Esses métodos se baseiam em fazer a decomposição do problema em análise em forças ou momentos que atuam a favor ou contra o deslizamento ou ruptura do maciço e por meio do

somatório dessas componentes tem-se o resultado de se o problema estaria em equilíbrio ou não naquela conformação estudada. O resultado desses métodos é um Fator de Segurança para cada superfície de ruptura avaliada. Esse fator de segurança é dado pela proporção de o quanto maiores são as forças resistentes em relação às forças solicitantes, ou seja, a divisão entre elas. Por fim, são testadas diversas superfícies de ruptura, a fim de determinar qual é a crítica, isto é, aquela que possui menor fator de segurança e atribui-se ao talude o fator de segurança igual ao de sua superfície crítica.

Os métodos de equilíbrio limites mais comuns são os de Morgenstern-Price, Spencer, Bishop e Jambu. As principais diferenças entre esses métodos estão nas superfícies de ruptura assumidas por cada um dos métodos e os parâmetros necessários para fazer o cálculo das forças envolvidas nas análises. Além disso, os dois primeiros são Métodos Numéricos, enquanto os dois últimos são Métodos Analíticos.

De maneira geral, os Métodos de Equilíbrio Limite apresentam as variáveis apresentadas na Figura 3.1. A Tabela 3.1 e a Tabela 3.2 apresentam características dos Métodos de Equilíbrio Limite. Segundo Silva (2011), de acordo com o número de equações de equilíbrio consideradas no cálculo, o método é classificado como rigoroso ou não rigoroso.

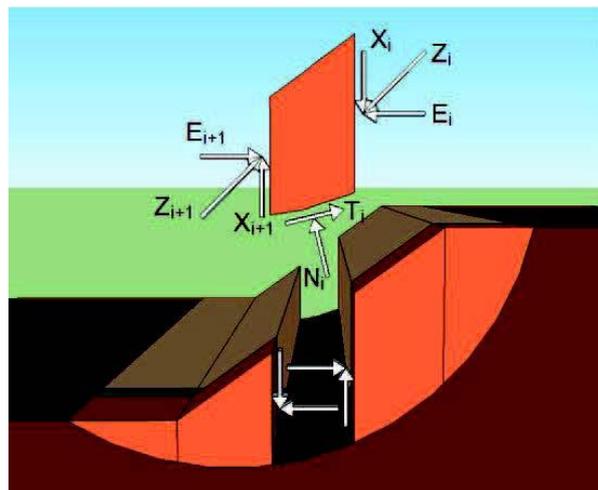


Figura 3.1 - Forças normais e de corte em uma fatia genérica (Silva, 2011)

Tabela 3.1 - Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite não rigorosos (Silva, 2011)

<b>Métodos</b>	<b>Superfície</b>	$\Sigma M_o=0$	$\Sigma F_h=0$	$\Sigma F_v=0$	<b>Força E</b>	<b>Força X</b>	<b>Z</b>
<b>Fellenius</b>	Circular	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não existe
<b>Bishop Simplificado</b>	Qualquer	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Horizontal
<b>Janbu Simplificado</b>	Qualquer	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Horizontal

Tabela 3.2 - Resumo das características dos métodos de equilíbrio limite rigorosos (Silva, 2011)

<b>Métodos</b>	<b>Superfície</b>	$\Sigma M_o=0$	$\Sigma F_h=0$	$\Sigma F_v=0$	<b>Força E</b>	<b>Força X</b>	<b>Z</b>
<b>Spencer</b>	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
<b>Morgenstern-Price</b>	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável
<b>Janbu Modificado</b>	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

Para o presente estudo serão usados os métodos de Morgenstern-Price e Spencer, uma vez que entre os métodos disponíveis esses são os que apresentam melhores resultados, pois consideram mais variáveis no cálculo, o que gera uma maior dificuldade de cálculo, entretanto os cálculos serão efetuados por Softwares, de forma que essa maior complexidade não acarreta em muito mais tempo de processamento. Dessa forma as duas seções seguintes irão explicar detalhadamente o funcionamento de cada um dos métodos de equilíbrio limite a serem utilizados no trabalho.

### 3.1.1 MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

Esse é um método desenvolvido por Morgenstern e Price (1965) com base no Equilíbrio Limite o qual se baseia na estabilidade de fatias, isto é, deve-se dividir o talude em fatias para fazer seu cálculo. Ele se trabalha na ideia de satisfazer equações de equilíbrio de forças e momentos atuando em cada um dos blocos individuais. As fatias de análise do método são

formadas ao se dividir o sólido em camadas verticais até a superfície de ruptura arbitrada. As forças que são consideradas nesse cálculo estão dispostas na Figura 3.2.

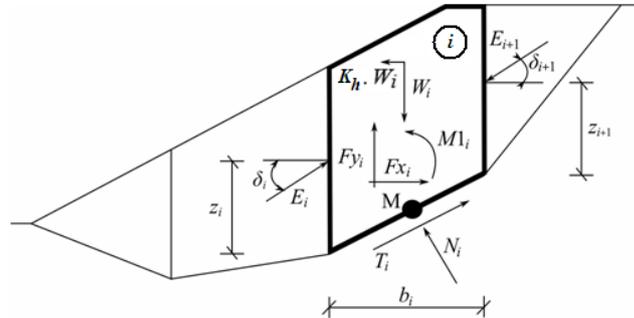


Figura 3.2 – Forças atuantes por fatia no Método de Morgenstern-Price (Fine Civil Engineering Software, 2019)

As seguintes considerações devem ser feitas para se calcular o equilíbrio de forças e momentos em cada um dos blocos individuais:

- Os planos de divisão entre blocos são sempre verticais;
- A linha de ação do Peso do bloco ( $W_i$ ) passa pelo centro do segmento da superfície de ruptura (ponto M no desenho);
- A força Normal ( $N_i$ ) atua no centro do segmento da superfície de ruptura (ponto M);
- Inclinação das forças  $E_i$  ( $\delta_i$ ) que atua entre blocos é diferente a cada encontro de blocos e igual a  $0^\circ$  nos pontos finais da superfície de ruptura.

Um dos pontos mais difíceis desse método é a escolha da inclinação do ângulo  $\delta_i$  e essa é a única diferença entre os métodos de Morgenstern-Price e Spencer. No caso de Morgenstern-Price esse ângulo é definido com o uso de uma função meio-seno. A Figura 3.3 apresenta um exemplo gráfico do comportamento desse tipo de função. A forma da função escolhida pouco influencia nos resultados do método, entretanto a escolha de uma função que se encaixe melhor ao caso em análise pode melhorar a convergência do método, ou seja, pode promover uma convergência mais rápida.

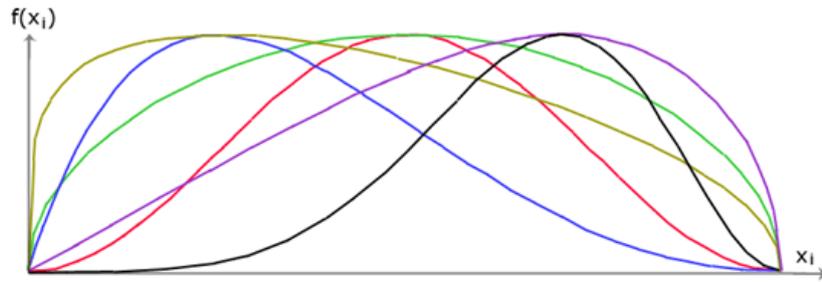


Figura 3.3 – Exemplo de Função Meio-seno (Fine Civil Engineering Software, 2019)

A solução do método se dá pelas equações abaixo:

$$N_i = N'_i + U_i \quad (\text{Solos Argilosos}) \quad (3.1)$$

onde:

$N_i$  = é a força normal efetiva agindo no centro da base da fatia

$N'_i$  = é a força normal atuante no centro da base da fatia

$U_i$  = é a poropressão atuante na base da fatia

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + \frac{c_i b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + \frac{c_i b_i}{\cos \alpha_i} \quad (3.2)$$

onde:

$T_i$  = é a força de cisalhamento atuante ao longo da base da fatia

$\varphi_i$  = é o ângulo de atrito interno do solo no segmento da superfície de deslizamento

$c_i$  = é a coesão do solo no segmento da superfície de deslizamento

$b_i$  = é a largura da fatia

$\alpha_i$  = é a inclinação do segmento da superfície de deslizamento

$$N'_i + U_i - W_i \cdot \cos \alpha_i + K_h \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i + Fy_i \cdot \cos \alpha_i - Fx_i \cdot \sin \alpha_i + E_{i+1} \cdot \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (3.3)$$

onde:

$W_i$ = é o peso da fatia

$K_h$ = é o coeficiente de empuxo

$Fy_i$ = é a força vertical de equilíbrio

$Fx_i$ = é a força horizontal de equilíbrio

$E_{i+1}$ = é a força atuante entre a fatia e a próxima fatia a ser calculada

$\delta_{i+1}$ = é a inclinação de atuação de  $E_{i+1}$

$E_i$ = é a força atuante entre a fatia e a fatia calculada anteriormente

$\delta_i$ = é a inclinação de atuação de  $E_i$

$$N'_i \cdot \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \cdot \sin \alpha_i - K_h \cdot W_i \cdot \cos \alpha_i + Fy_i \cdot \sin \alpha_i + Fx_i \cdot \cos \alpha_i - E_{i+1} \cdot \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (3.4)$$

onde:

$FS$ = é o Fator de Segurança ao deslizamento do talude

$$E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1} \left( z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \cdot \sin \delta_{i+1} \cdot \frac{b_i}{2} - E_i \cdot \cos \delta_i \left( z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \cdot \sin \delta_i \cdot \frac{b_i}{2} + Ml_i - K_h \cdot W_i (y_M - y_{gi}) = 0 \quad (3.5)$$

onde:

$z_{i+1}$ = é a distância vertical da base da fatia até o ponto de atuação de  $E_{i+1}$

$z_i$ = é a distância vertical da base da fatia até o ponto de atuação de  $E_i$

$Ml_i$  = é o momento de equilíbrio

$y_M$  = é a altura do ponto do centro de gravidade da fatia

$y_{gi}$  = é a altura de atuação da força  $F_{yi}$ .

A Equação (3.1) é a relação entre valor efetivo e total da força normal atuando na superfície de deslizamento. A Equação (3.2) é responsável por correlacionar condição entre a força normal atuante e a tensão cisalhante atuante na superfície de deslizamento. A Equação (3.3) representa a equação de equilíbrio de forças na direção Normal em relação ao segmento da superfície de deslizamento. A Equação (3.4) faz o equilíbrio das forças na direção paralela à superfície de deslizamento. Vale destaque na Equação (3.4) os fatores FS correspondentes à fatores de segurança responsáveis por reduzir os parâmetros do solo. Por fim, a equação (3.5) representa os momentos das forças atuantes em relação ao ponto M (Fine Civil Engineering Software, 2019).

A partir das Equações (3.3) e (3.4), determina-se a Equação (3.6) de fundamental importância à resolução do método.

$$E_{i+1} = \frac{[(W_i - Fy_i) \cdot \cos \alpha_i - (K_h \cdot W_i - Fx_i) \cdot \sin \alpha_i - U_i + E_i \cdot \sin(\alpha_i - \delta_i)] \cdot \frac{(\tan \varphi_i)}{FS}}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan \delta_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_i)} + \frac{\frac{c_i}{FS} \cdot \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - (W_i - Fy_i) \cdot \sin \alpha_i - (K_h \cdot W_i - Fx_i) \cdot \cos \alpha_i + E_i \cdot \cos(\alpha_i - \delta_i)}{\sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) \cdot \frac{\tan \delta_i}{FS} + \cos(\alpha_i - \delta_i)} \quad (3.6)$$

A Equação (3.6) permite calcular todas as forças  $E_i$  que atuam entre blocos para dados valores de  $\delta_i$  e FS. Essa solução assume que na origem da superfície de ruptura o valor do E no lado esquerdo é igual a 0 (Fine Civil Engineering Software, 2019).

Outra equação utilizada numericamente no método é a Equação (3.7), oriunda da equação de equilíbrio de momentos (Equação (3.5)).

$$z_{i+1} = \frac{\frac{b_i}{2} \cdot [E_{i+1} \cdot (\sin \delta_{i+1} - \cos \delta_{i+1} - \cos \delta_{i+1} \cdot \tan \alpha_i) + E_i \cdot (\sin \delta_i - \cos \delta_i \cdot \tan \alpha_i)]}{\frac{E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1}}{E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1}} + \frac{E_i \cdot z_i \cdot \cos \delta_i - Ml_i + K_h \cdot W_i \cdot (y_M - y_{gi})}{E_{i+1} \cdot \cos \delta_{i+1}}} \quad (3.7)$$

Essa Equação (3.7) permite o cálculo para um dado valor de  $\delta$  todos os comprimentos  $z$  de força agindo entre blocos.

A partir dessas equações abordadas, o fator de segurança é determinado ao se implementar o seguinte processo iterativo:

- 1) O valor de  $\delta$  é tomado igual a 0;
- 2) O Fator de Segurança para um dado valor de  $\delta$  é obtido da Equação (3.6), assumindo-se valor de  $E_{n+1} = 0$  ao final da superfície de ruptura;
- 3) O valor de  $\delta$  é obtido pela Equação (3.7) usando-se os valores de  $E_i$  determinado no passo anterior com a necessidade de possuir momento em torno de  $M$  no último bloco igual a 0;

Os passos 2 e 3 são repetidos até que o valor de  $\delta$  pare de alterar.

Além disso, algumas verificações adicionais precisam ser feitas a fim de se evitar soluções instáveis. Uma das instabilidades a serem evitadas ocorrem nos pontos onde ocorre divisão por 0 nas Equações (3.6) e (3.7). Para se evitar esses casos, deve-se evitar os casos em que  $\delta = 90^\circ$  ou  $\delta = -90^\circ$ .

A segunda checagem para evitar instabilidade numérica é a verificação do parâmetro  $m_a$ , de acordo com a Equação (3.8).

$$m_a = \cos \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \cdot \tan \varphi_i}{FS} > 0,2 \quad (3.8)$$

### 3.1.2 MÉTODO DE SPENCER

O método de Spencer, 1967, segue exatamente o mesmo raciocínio matemático do Método de Morgenstern-Price por isso não será novamente explicado nesse trabalho. O motivo, entretanto para seu uso está na adoção do valor inicial de  $\delta$  o qual se dá no método de Morgenstern-Price com o uso da função meio-seno, o que tende a auxiliar em uma convergência mais rápida das interações, ao passo que no método de Spencer, esse valor é tomado variando-se o ângulo a partir de  $0^\circ$  indiscriminadamente. Entretanto, se tomadas as precauções quantos

às soluções instáveis, espera-se que ambos os métodos apresentem resultados muito próximos ou idênticos. Como esses são os métodos de equilíbrio limite hoje mais reconhecidamente precisos, as comparações com o Método dos Elementos Finitos serão realizadas em relação a eles.

### **3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

O desenvolvimento da mecânica do solo e das rochas influencia o desenvolvimento de análises de estabilidade de taludes na engenharia geotécnica. Avaliar a estabilidade de taludes projetados e naturais é um desafio comum para teóricos e profissionais. O equilíbrio das encostas naturais pode ser interrompido pelo homem ou pela natureza, causando problemas de estabilidade. As encostas naturais, por sua vez, podem ser estáveis por muitos anos e falharem repentinamente devido a alterações na topografia, sismicidade, vazão das águas subterrâneas, perda de resistência ao cisalhamento, mudança de tensão ou intemperismo (Abramsom, et al., 2002).

Duncan (1996) mostrou que o método dos elementos finitos pode ser usado para analisar a estabilidade e as deformações de taludes. Griffiths e Lane (1999) ilustraram que o método dos elementos finitos representa um método alternativo poderoso para a análise da estabilidade de taludes, mais do que isso, concluíram que é preciso, adaptável e requer menos pressupostos, especialmente no que diz respeito ao mecanismo de falha. Os mecanismos de falha no método dos elementos finitos se desenvolvem naturalmente nas regiões em que a resistência ao cisalhamento do solo não é suficiente para resistir às tensões de cisalhamento.

Sob o ponto de vista de modelos adotados, o método dos elementos finitos consiste na discretização dos objetos em análise em pedaços muito pequenos os quais devem interagir entre si como se fosse uma estrutura formada por diversos pedaços pequenos. Assim, no caso de simulação de barragens, os elementos finitos promovem a resolução de diversas equações de equilíbrio ao redor de cada elemento que recebe carregamento e descarrega à elementos próximos. Numericamente essas equações de equilíbrio são resolvidas de maneira a se garantir o equilíbrio de cada elemento individualmente e, por consequência, o equilíbrio do todo em que esses elementos estão inseridos.

Dessa forma, o primeiro passo para essa análise é a adoção de um modelo físico que represente satisfatoriamente o problema em análise. Feitas essas considerações, deve-se

adequar ainda um modelo matemático para traduzir em números e resultados o comportamento esperado.

A análise de estabilidade de um talude por meio de elementos finitos consiste em fazer a modelagem da barragem (materiais, geometria e definição da malha de análise) em um programa de elementos finitos. Para essa análise deve-se fornecer a essa ferramenta as condições de contorno (carregamentos, condições iniciais de poropressão etc.) e fazer o cálculo iterativo de equilíbrio acima explicado. A partir disso, será fornecido pelo programa para cada elemento finito uma condição de carregamento à qual aquele ponto está submetido. O passo seguinte é avaliar, com base nas características do material que se está usando se ele é capaz de suportar os carregamentos atuantes sem que ocorra o colapso local da estrutura. Dessa forma, se a tensão atuante superar a resistência do material em algum ponto de análise, considera-se que o elemento finito foi rompido e, portanto, ocorre a falha da estrutura global.

As vantagens de uma abordagem por elementos finitos para uma análise de estabilidade de taludes em relação aos métodos de equilíbrio limite tradicionais podem ser resumidos da seguinte forma (Baba, et al., 2012):

(i) Nenhuma suposição precisa ser feita antecipadamente sobre a forma ou localização da falha superfície. A falha ocorre naturalmente por regiões da massa do solo em que a resistência ao cisalhamento é inferior às tensões de cisalhamento atuantes;

(ii) Como não há conceito de fatias no modelo do método, assim não há necessidade de suposições sobre as forças entre as fatias;

(iii) Se estiverem disponíveis dados realistas sobre a compressibilidade do solo, as soluções fornecerão dados sobre deformações em níveis de solicitações de serviço;

(iv) O método dos elementos finitos é capaz de monitorar falhas globais e/ou locais na estrutura.

### **3.2.1 MODELO ADOTADO PARA ESTABILIDADE DE TALUDES**

Os programas utilizados neste trabalho baseiam-se na análise de deformação plana bidimensional elástico e solos perfeitamente plásticos com falha de Mohr-Coulomb. Serão testadas diferentes geometrias de elementos para a malha de nós a ser implementadas, de forma a se escolher aquela que apresentar resultados mais coerentes, isto é, sem regiões de

distribuições de tensões com ângulos vivos, ou seja, regiões lisas e fluidas de distribuição de tensões. Inicialmente, o solo é considerado elástico e o modelo gera tensões de cisalhamento em todos os pontos de Gauss dentro da malha. Estas tensões são comparadas com o critério de falha de Mohr-Coulomb. Estresses produzidos são redistribuídos através da malha. A falha global de cisalhamento ocorre quando uma superfície apresenta um número de pontos de Gauss rompidos suficiente para permitir um mecanismo de deslizamento de toda uma massa de solo.

### 3.2.2 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

A determinação de um Fator de Segurança (FS) pelo método dos elementos finitos pode causar muita discussão quanto a sua veracidade e representatividade. No presente trabalho será adotado o FS obtido por meio da redução dos parâmetros coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) do solo, conforme explicação mais detalhada a seguir.

Na visão clássica de mecânica dos solos, o fator de segurança é a razão entre a resistência ao cisalhamento  $\tau_f$  no plano da falha potencial e a tensão de cisalhamento  $\tau$  atuante no mesmo plano, conforme a Equação (3.9) abaixo (Ledesma, et al., 2016).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} \quad (3.9)$$

onde:

$FS=$  é o Fator de Segurança do problema

$\tau_f=$  é a resistência ao cisalhamento no plano potencial de ruptura

$\tau=$  é a tensão de cisalhamento atuante no plano potencial de ruptura

Para o critério de Mohr-Coulomb, a Equação (3.9) se lê:

$$FS = \frac{c + \sigma_n \tan(\phi)}{\tau} \quad (3.10)$$

onde:

$c=$  é a coesão estimada do solo

$\sigma_n =$  é a tensão normal ao plano potencial de ruptura

$\phi =$  é o ângulo de atrito do solo

Ainda de acordo com Ledesma, Mendive, & Sfriso (2016), no âmbito da geomecânica computacional, a aplicação de Equação (3.10) não é possível, pois o conceito de plano de falha não se aplica, uma vez que tem-se uma abordagem mecânica contínua do solo. Por conta disso, a técnica de redução de parâmetros é empregada. Dessa forma, para o modelo de Mohr–Coulomb, um conjunto reduzido de parâmetros de material  $c^*$  e  $\phi^*$  é calculado, conforme as Equações (3.11) e (3.12).

$$c^* = \frac{c}{F_n} \quad (3.11)$$

onde:

$c^* =$  é a coesão reduzida do solo

$F_n =$  é o fator de redução de parâmetros

$$\tan(\phi^*) = \frac{\tan(\phi)}{F_n} \quad (3.12)$$

onde:

$\phi^* =$  é o ângulo de atrito reduzido

O equilíbrio do problema é então resolvido usando esse conjunto de parâmetros de material reduzidos, mantendo todos os outros parâmetros inalterados. Se a convergência for obtida, o valor  $F_n$  é aumentado e o problema é resolvido novamente. O maior  $F_n$  que não possibilita o equilíbrio da estrutura é declarado como o fator de segurança do problema (Ledesma, et al., 2016).

Vale destacar que existem outros métodos de obtenção do fator de segurança pelo método de elementos finitos, como o aumento gradativo da gravidade até o momento que seja possível obter o equilíbrio global da estrutura. Entretanto, o programa computacional de MEF que será utilizado no estudos desse trabalho utiliza o método de redução de parâmetros  $\phi/c$ , de acordo

com os procedimentos elucidados acima. Para validação do método escolhido, o capítulo seguinte traz estudos semelhantes aos pretendidos no trabalho e que comparam os resultados do método de redução de parâmetros  $\phi/c$  com análises de equilíbrio limite tradicional.

### 3.3 ESTUDO SIMILAR

O presente capítulo tem por função apresentar ao leitor um estudo similar ao pretendido de ser desenvolvido neste trabalho, de forma a orientar linhas de trabalho e contribuir com resultados esperados semelhantes aos obtidos no estudo a seguir.

O material estudado foi elaborado por Indra Noer Hamdhan, estudante de doutorado na universidade de tecnologia de Graz, Áustria. Hamdhan (2019) buscou uma forma de fazer a análise de estabilidade de taludes empregando os Elementos Finitos com o objetivo de obter um fator de segurança segundo o critério de diminuição de parâmetros, conforme explicado no item 3.2.2 do presente estudo. Além disso, Hamdhan (2019) comparou os fatores de segurança obtidos com resultados de análise de equilíbrio limite pelo método de Morgenstern & Price para as mesmas condições geotécnicas e geometria para cada caso estudado.

Hamdhan (2019) fez cinco análises diferentes para comparar os métodos, variando as condições de carregamento hidráulico e a geometria do talude. Serão apresentadas apenas as análises mais relevantes ao presente trabalho. No caso, será mostrado uma análise de talude sem a presença de água e uma análise que considerava carga hidráulica no talude e seu rebaixamento, como uma análise de rebaixamento de reservatório de uma barragem.

Os parâmetros de solo usados por Hamdhan (2019) estão na Tabela 3.3 e a geometria do talude avaliado está mostrada na Figura 3.4.

Tabela 3.3 - Parâmetros do Solo para modelo Mohr Coulomb (Hamdhan, 2019)

<b>Descrição</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
<b>Peso específico</b>	$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	20
<b>Módulo de Young (efetivo)</b>	$E'$	[kPa]	100000
<b>Coefficiente de Poisson (efetivo)</b>	$\nu'$	[-]	0,3
<b>Coesão (não-drenada)</b>	$c_u$	[kPa]	10
<b>Ângulo de atrito (não-drenado)</b>	$\phi_u$	[°]	20

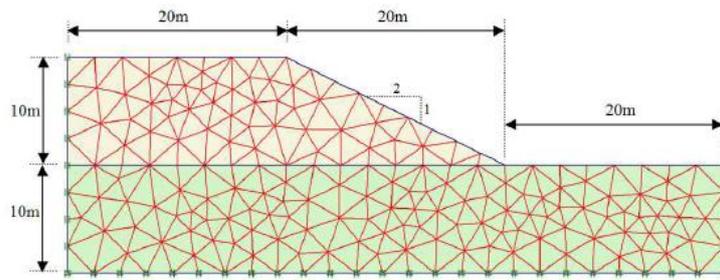


Figura 3.4 - Geometria da Análise Similar 1 (Hamdhan, 2019)

A Figura 3.5 e a Figura 3.6 apresentam os fatores de segurança obtidos pelo método dos elementos finitos e pelo método de equilíbrio, respectivamente, além das possíveis superfícies de ruptura.

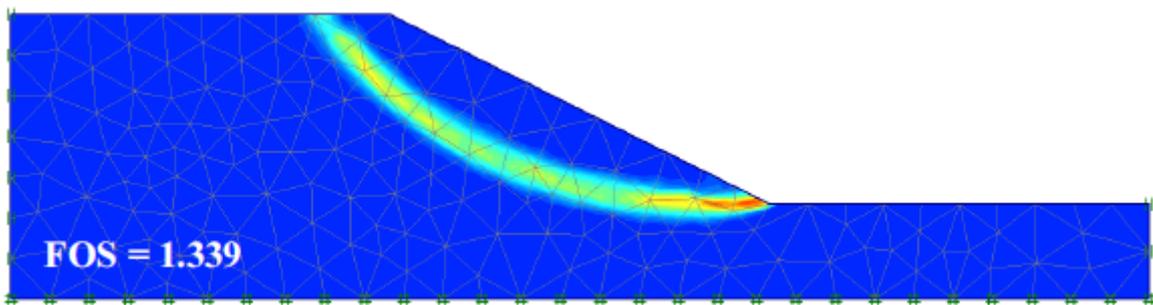


Figura 3.5 - Mecanismo de falha para um talude homogêneo com uma camada de fundação usando o método dos elementos finitos (Hamdhan, 2019)

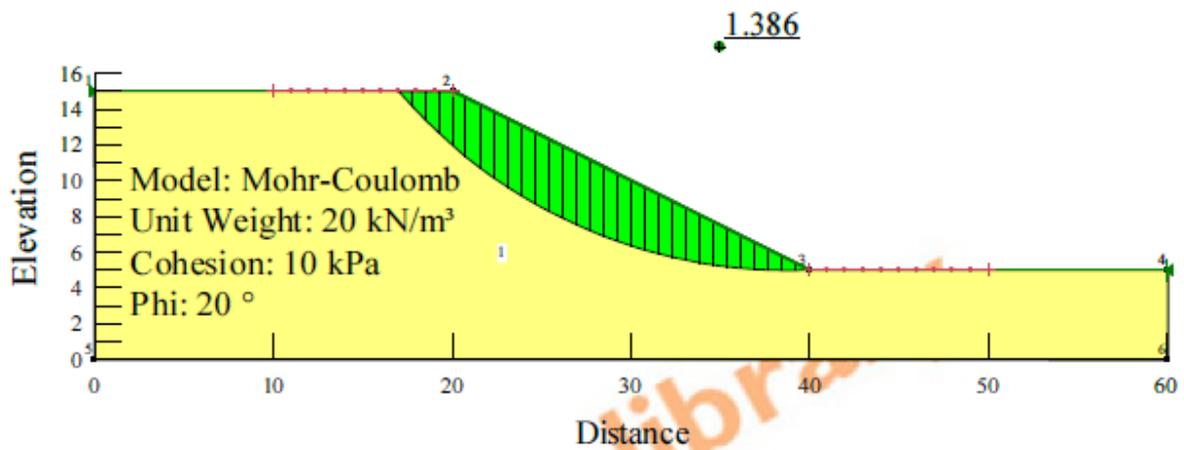


Figura 3.6 - Método de Morgenstern & Price para uma inclinação homogênea com uma camada de fundação (Hamdhan, 2019)

A diferença de fator de segurança entre o método dos elementos finitos e o método de equilíbrio limite é de apenas 3,5% e o mecanismo de falha calculada é semelhante (Hamdhan, 2019).

A segunda análise do estudo de Hamdhan (2019) a ser relatado consistiu numa análise de rebaixamento de reservatório. A geometria de análise está apresentada na Figura 3.7.

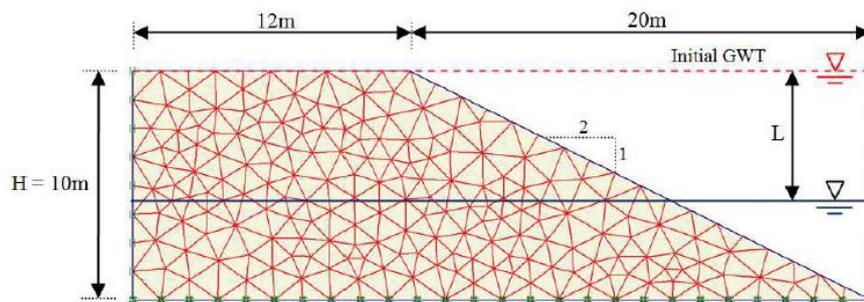


Figura 3.7 - Geometria da Análise Similar 2 (Hamdhan, 2019)

Os parâmetros do solo utilizado são os mesmos da Tabela 3.3. Hamdhan simulou o rebaixamento lento do reservatório para 6 alturas diferentes do reservatório, abaixando a cada 2 m o reservatório e fazendo a análise de estabilidade do talude para cada condição de carregamento. As análises de estabilidade de taludes pelo método de Morgenstern & Price estão apresentadas na Figura 3.8 e as análises pelo método dos elementos finitos estão apresentadas na Figura 3.9.

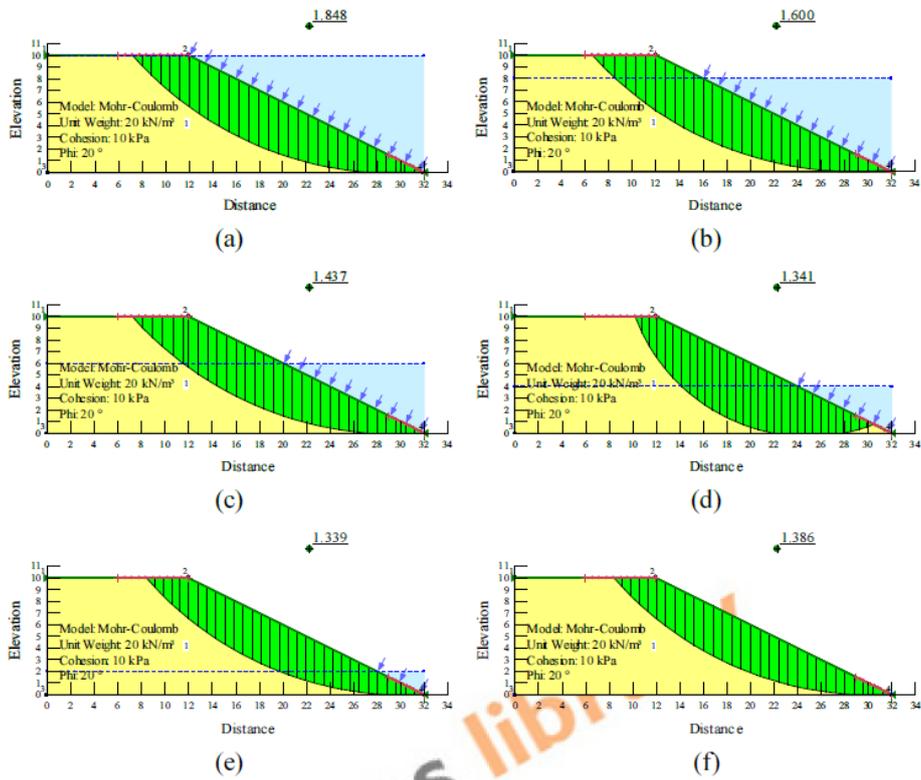


Figura 3.8 - Análise pelo método de Morgenstern & Price rebaixamento lento (Hamdhan, 2019)

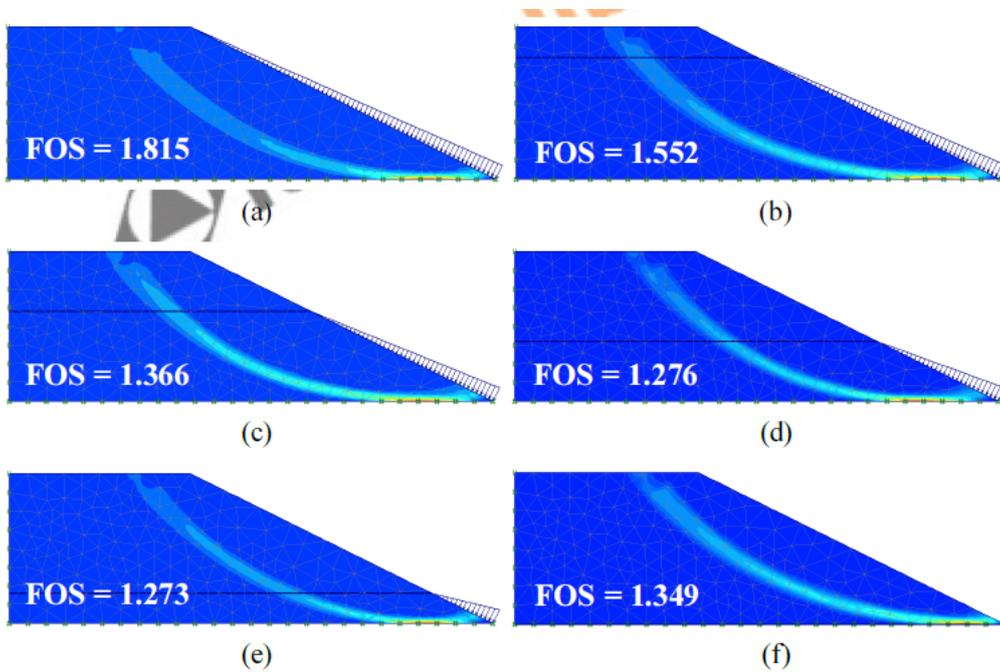


Figura 3.9 - Análise pelo método de elementos finitos para rebaixamento lento (Hamdhan, 2019)

Os fatores de segurança podem ser consultados de forma compilada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Fatores de segurança para rebaixamento lento (Hamdhan, 2019)

<b>Altura do Reservatório</b>	<b>FS Método Morgenstern &amp; Price</b>	<b>FS Método de Elementos Finitos</b>
<b>10,0</b>	1,848	1,815
<b>8,0</b>	1,600	1,552
<b>6,0</b>	1,437	1,366
<b>4,0</b>	1,341	1,276
<b>2,0</b>	1,339	1,273
<b>0,0</b>	1,386	1,349

Foi escolhido apresentar essa análise de rebaixamento lento porque no estudo citado a única análise que envolvia presença de água com o uso de reservatório foi a apresentada.

Mais análises semelhantes foram realizadas no mesmo estudo, variando as condições de geometria da análise e parâmetros do solo. De maneira geral, todas as análises apresentaram fatores de segurança próximos, em sua maioria com o método de elementos finitos resultando em um menor coeficiente de segurança.

Por fim, Hamdhan (2019) concluiu que o método dos elementos finitos em combinação com um plástico perfeitamente elástico (Mohr-Coulomb) demonstrou ser adequado para análises de estabilidade de taludes. Em casos simples, fatores de segurança e mecanismos de falha semelhantes são obtidos segundo as duas abordagens comparadas. No entanto, em condições mais complexas, o método dos elementos finitos é mais versátil, pois não há premissas, a priori, sobre o formato do mecanismo de falha.

## **4 METODOLOGIA**

A expectativa a partir desse estudo preliminar é que se tenha uma análise mais precisa com o Métodos dos Elementos Finitos, mas uma mais rápida e prática com os Métodos de Estabilidade Limite, de forma que talvez o ideal seja encontrar uma forma de aliar as duas abordagens em diferentes estágios de análise dos projetos.

Conforme os assuntos abordados, o escopo do trabalho consiste em uma comparação de resultados de análises de estabilidades de taludes entre Métodos de Equilíbrio Limite (Morgenstern-Price e Spencer) e o Método de Elementos Finitos. Para essa análise serão usados os *Softwares* Plaxis 2D e o GeoStudio.

Serão avaliadas três barragens de diferentes concepções (uma homogênea e duas zonada), para que se tenha uma visão de o quanto cada método pode oferecer no sentido de praticidade de análise e precisão dos resultados. Por fim, pretende-se compilar as conclusões para que possa fazer recomendações quanto aos casos estudados da importância de usar um método ou outro, suas vantagens e desvantagens e principais pontos de atenção no caso de adoção de cada uma das soluções.

### **4.1 BARRAGEM 1**

A primeira seção típica genérica avaliada foi uma barragem homogênea de argila com filtro central vertical e horizontal sob o talude de jusante (tapete drenante), conforme a Figura 4.1. Os parâmetros dos materiais adotados estão dispostos na

Tabela 4.1.

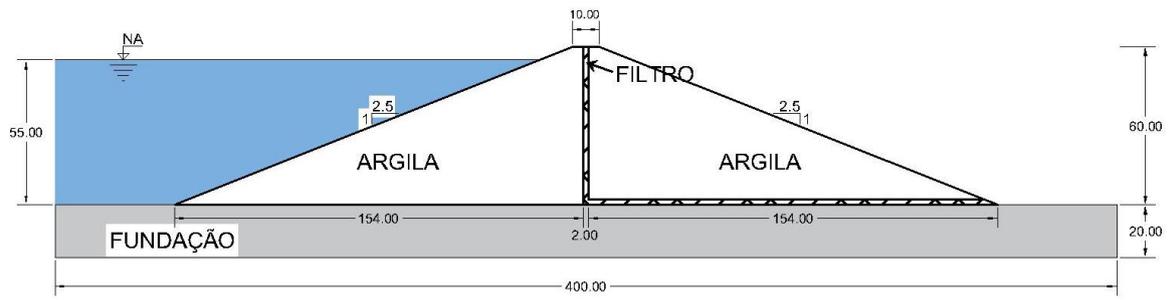


Figura 4.1 - Geometria da barragem 1

Tabela 4.1 - Parâmetros de materiais da barragem 1

Material	$\gamma_D$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_u$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	c [kPa]	$\phi$ [°]
<b>Argila</b>	18,0	20,0	50,0	0,35	20,0	26,0
<b>Filtro</b>	18,0	20,0	100,0	0,35	0,00001	33,0
<b>Fundação</b>	16,0	18,0	40,0	0,35	5,0	30,0

Além dos parâmetros acima relacionados, foi necessário informar os dados de permeabilidade de cada material para que fosse feita a análise de percolação para fluxo permanente de operação. Os coeficientes de permeabilidade foram ajustados de forma a se obter uma linha freática que gerasse um talude de jusante seco, isto é, o filtro deveria ser capaz de exercer sua função de forma satisfatória e manter o talude de jusante livre da presença de água. Dessa forma, os coeficientes de permeabilidade adotados estão apresentados na Tabela 4.2

Tabela 4.2 - Parâmetros de permeabilidade da barragem 1

Material	$k_x$ [m/s]	$k_y$ [m/s]
<b>Argila</b>	$1,04 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$
<b>Filtro</b>	$2,31 \times 10^{-3}$	$2,31 \times 10^{-3}$
<b>Fundação</b>	$1,16 \times 10^{-6}$	$1,16 \times 10^{-6}$

As malhas de elementos finitos utilizados nos *softwares* Plaxis e GeoStudio estão apresentadas, respectivamente, na Figura 4.2 e na Figura 4.3.

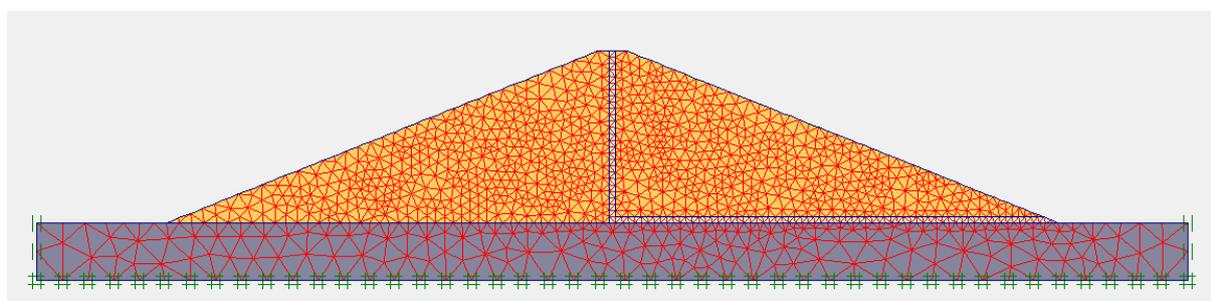


Figura 4.2 – Malha de elementos finitos da barragem 1 no Plaxis

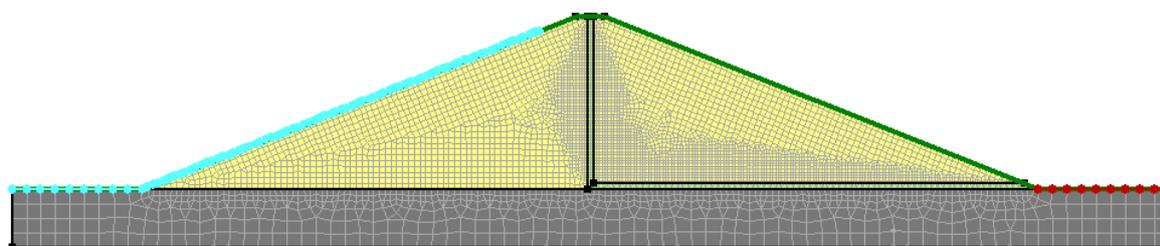


Figura 4.3 - Malha de elementos finitos da barragem 1 no GeoStudio

## 4.2 BARRAGEM 2

A segunda seção típica genérica avaliada foi uma barragem zonada de argila com núcleo central argiloso impermeável, *cut-off* e filtro central vertical e horizontal sob o talude de jusante (tapete drenante), conforme a Figura 4.4. Os parâmetros iniciais dos materiais adotadas estão dispostos na Tabela 4.3.

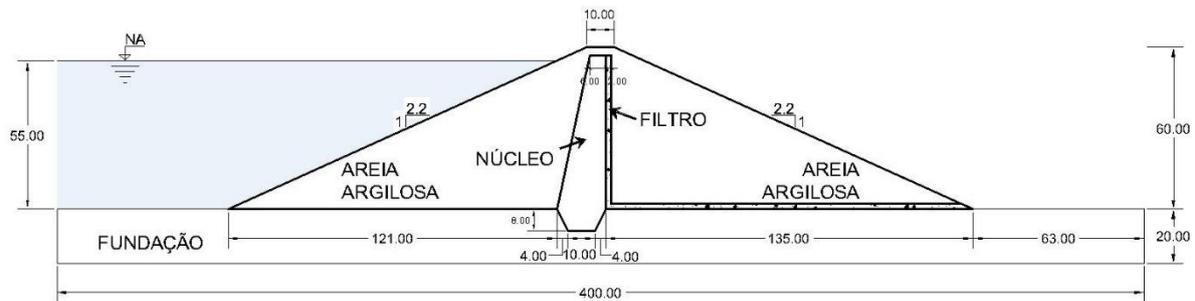


Figura 4.4 – Geometria da barragem 2

Tabela 4.3 - Parâmetros de materiais da barragem 2

Material	$\gamma_D$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_u$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]	c [kPa]	$\phi$ [°]
Argila	18,0	20,0	50,0	0,35	10,0	32,0
Núcleo	19,0	21,0	35,0	0,35	20,0	26,0
Filtro	18,0	20,0	100,0	0,35	0,00001	33,0
Fundação	16,0	18,0	40,0	0,35	5,0	30,0

Os coeficientes de permeabilidade dos materiais foram ajustados de acordo com critérios iguais aos explicados para a barragem 1 e devido às mesmas necessidades. Os valores de coeficiente de permeabilidade utilizados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros de permeabilidade da barragem 2

Material	$k_x$ [m/s]	$k_y$ [m/s]
Argila	$1,04 \times 10^{-6}$	$1,04 \times 10^{-6}$
Núcleo	$1,16 \times 10^{-9}$	$1,16 \times 10^{-9}$
Filtro	$2,31 \times 10^{-3}$	$2,31 \times 10^{-3}$
Fundação	$1,16 \times 10^{-6}$	$1,16 \times 10^{-6}$

As malhas de elementos finitos utilizados nos *softwares* Plaxis e GeoStudio estão apresentadas, respectivamente, na Figura 4.5 e na Figura 4.6.

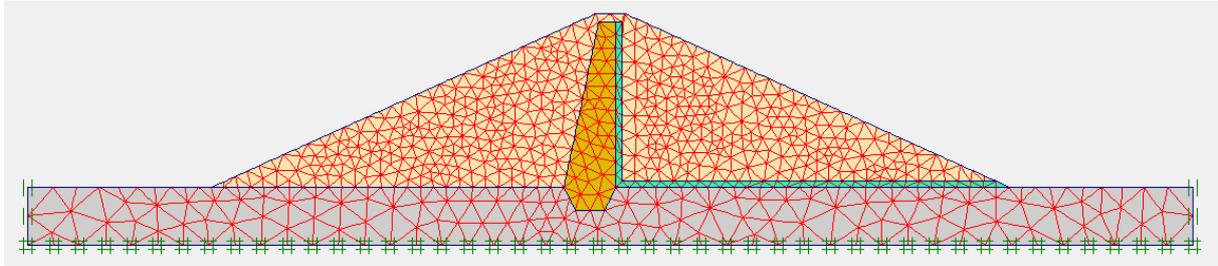


Figura 4.5 – Malha de elementos finitos da barragem 2 no Plaxis

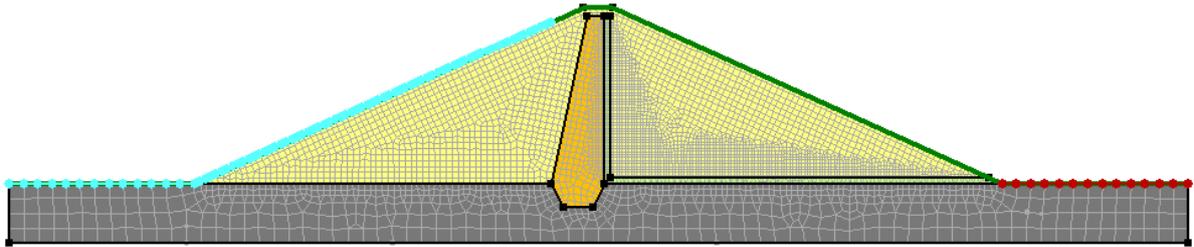


Figura 4.6 – Malha de elementos finitos da barragem 2 no GeoStudio

### 4.3 BARRAGEM 3

A terceira barragem avaliada é uma variação da barragem 2. As diferenças são que a camada de fundação foi aumentada de 20 m para 40 m e os taludes de montante e jusante foram alterados, passando de 1 : 2,2 para 1 : 2,0. Os parâmetros dos materiais foram mantidos inalterados. Espera-se conseguir com essas modificações superfícies de ruptura mais profundas do que as obtidas na barragem 2. A Figura 4.7 apresenta a geometria adotada para a barragem 3.

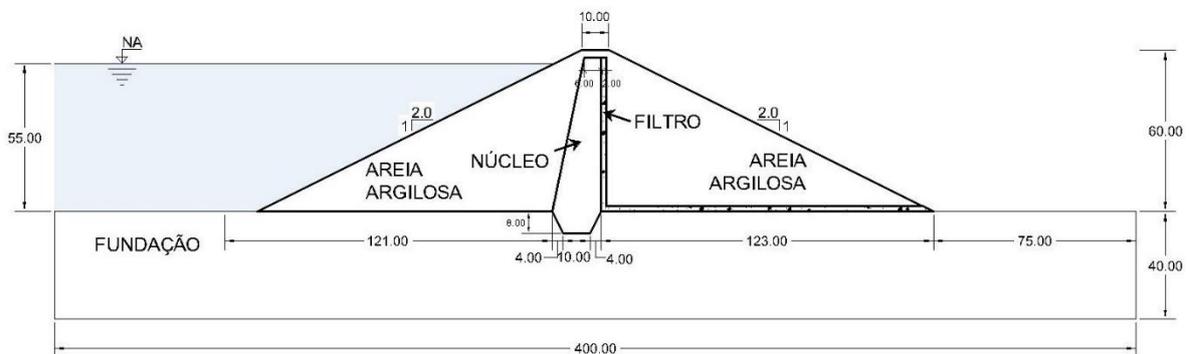


Figura 4.7 – Geometria da barragem 3

As malhas de elementos finitos utilizados nos *softwares* Plaxis e GeoStudio estão apresentadas, respectivamente, na Figura 4.8 e na Figura 4.9.

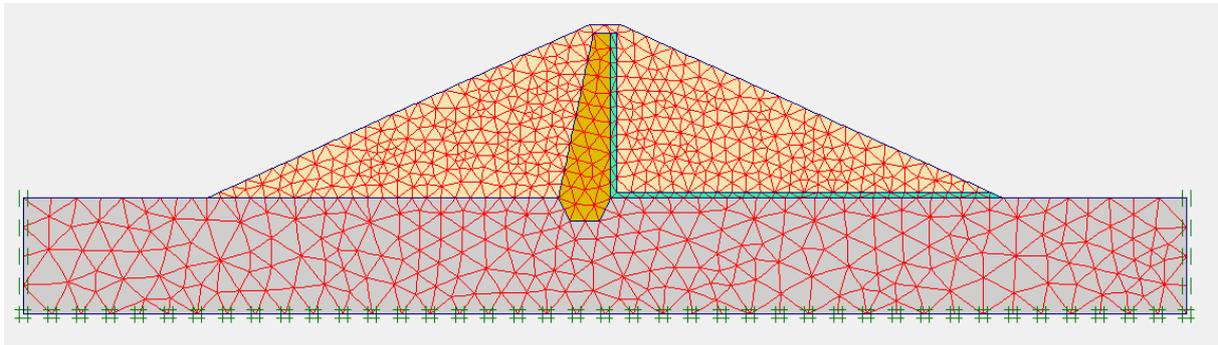


Figura 4.8 – Malha de elementos finitos da barragem 3 no Plaxis

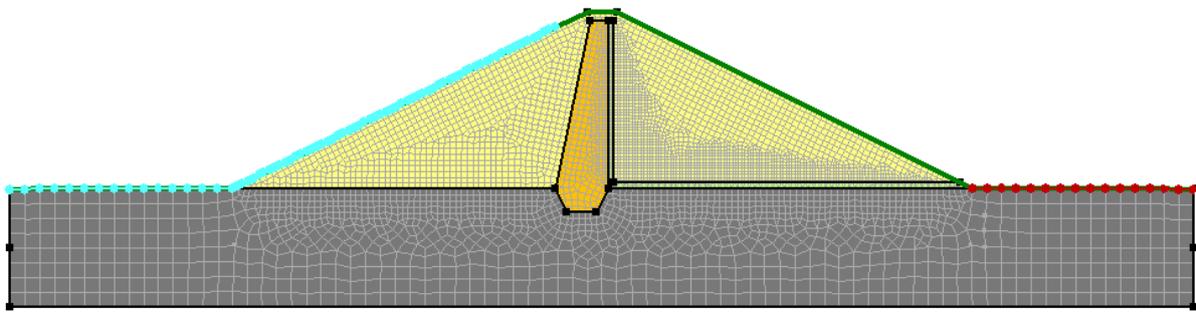


Figura 4.9 – Malha de elementos finitos da barragem 3 no GeoStudio

## 5 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos das análises de estabilidade dos taludes das três barragens apresentadas no Capítulo 4, além de discorrer brevemente sobre os dados que forem apresentados.

A Tabela 5.1 traz uma síntese dos fatores de segurança obtidos por cada um dos métodos na avaliação das três barragens.

Tabela 5.1 - Síntese de fatores de segurança obtidos

Método	FS Barragem 1	FS Barragem 2	FS Barragem 3
Morgenstern-Price	1,524	1,521	1,435
Spencer	1,523	1,522	1,440
Elementos finitos	1,22	1,42	1,30

### 5.1 RESULTADOS DA BARRAGEM 1

A linha freática resultante pelo *software* Plaxis está apresentada na Figura 5.1 e a linha freática segundo o GeoStudio está apresentada na Figura 5.2.

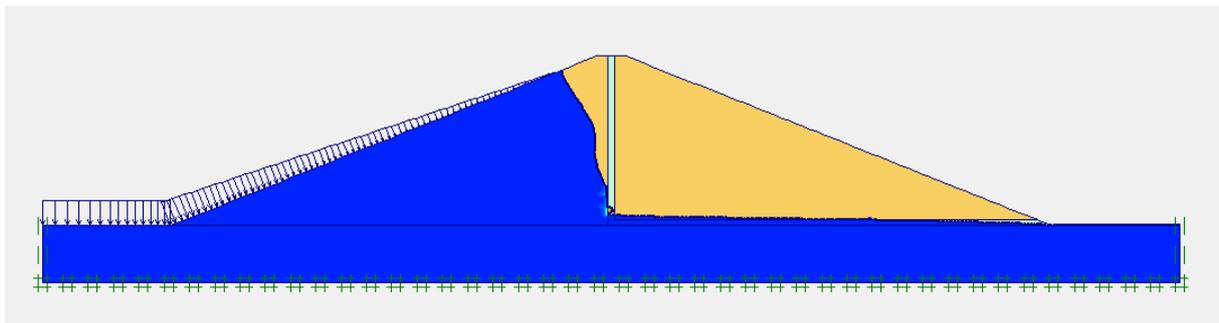


Figura 5.1 - Linha freática da barragem 1 no Plaxis

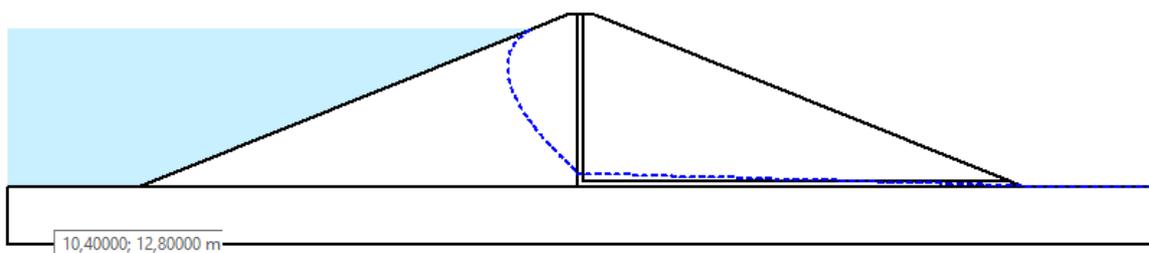


Figura 5.2 - Linha freática da barragem 1 no GeoStudio

A Figura 5.3 e a Figura 5.4 abaixo apresentam as superfícies de ruptura crítica e o fator de segurança encontrado pelo método de Morgenstern-Price e Spencer, respectivamente.

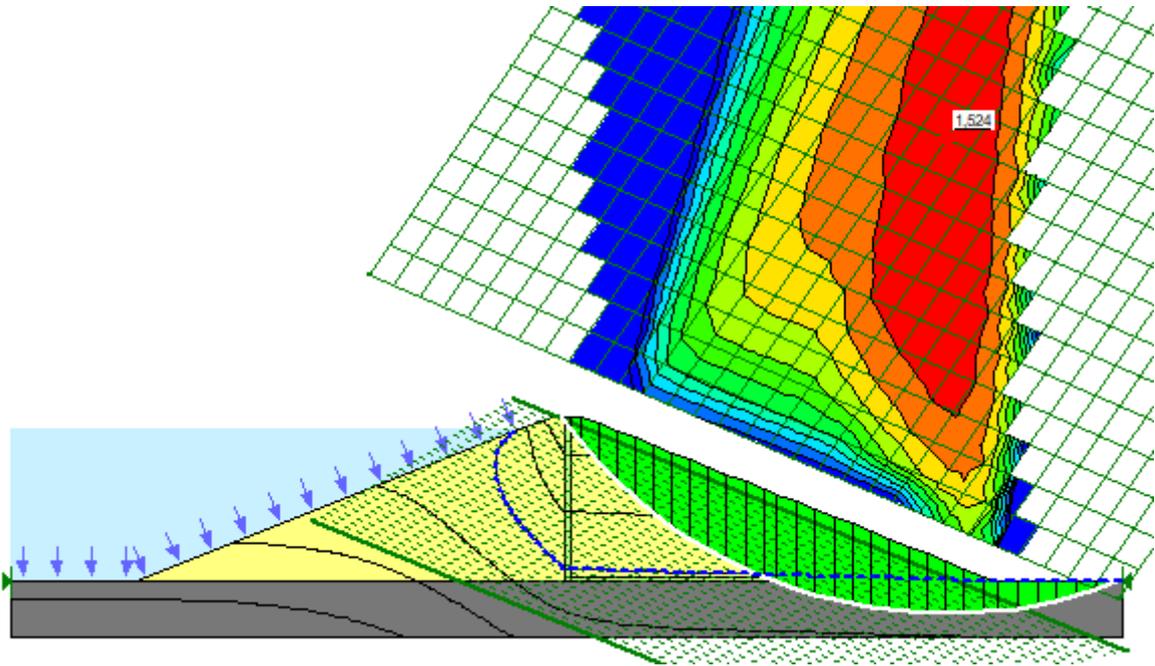


Figura 5.3 - Resultado do método de Morgenstern-Price para barragem 1

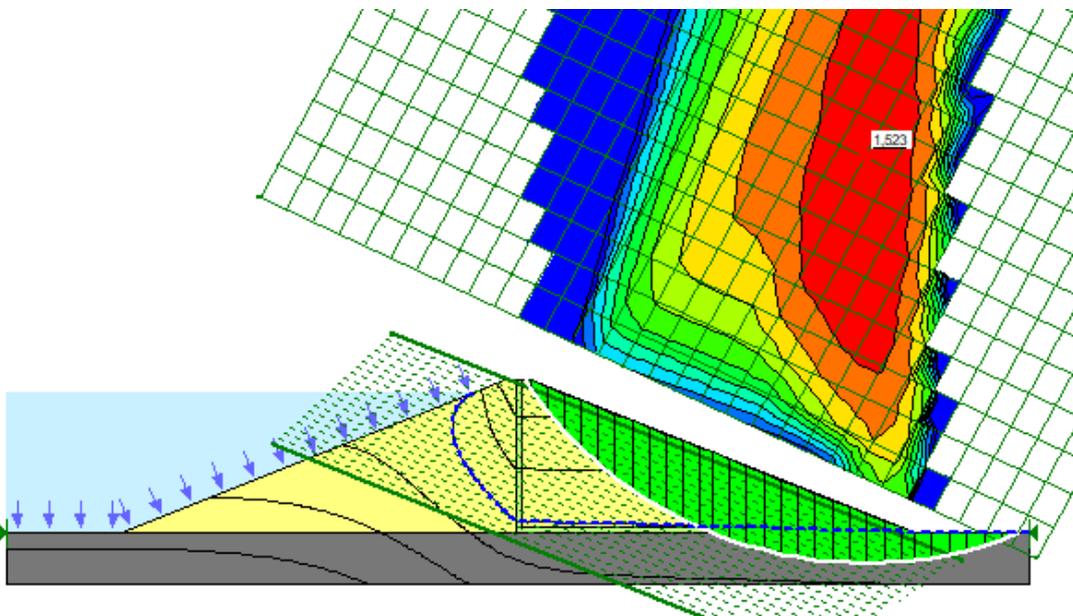


Figura 5.4 - Resultado do método de Spencer para barragem 1

A Figura 5.5 apresenta a deformação prevista para a barragem, a qual sugere consequentemente a provável superfície de ruptura da barragem pela análise segundo o método de elementos finitos e o fator de segurança obtido.

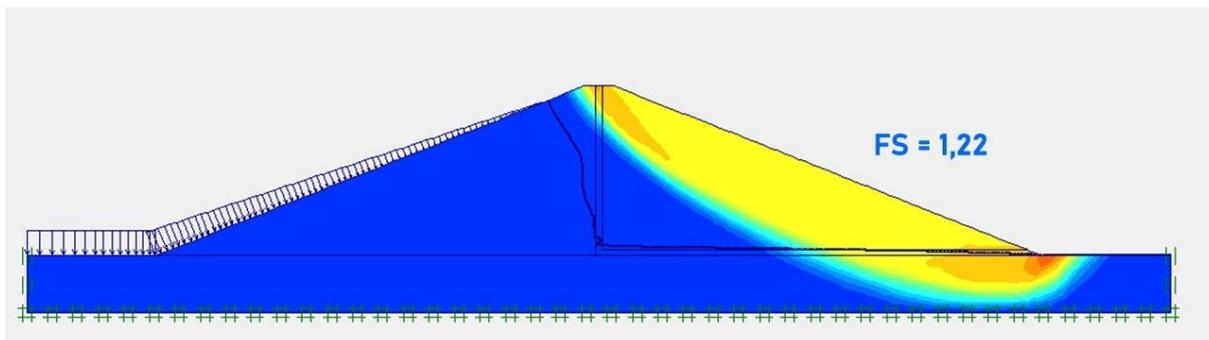


Figura 5.5 - Resultado do método de elementos finitos para barragem 1

Esse primeiro resultado apresentou um valor muito diferente entre os métodos, e uma superfície de ruptura também muito divergente. Do ponto de vista de conservadorismo, pode-se inferir que o método dos elementos finitos apresenta um resultado mais conservador, com um fator de segurança 25% menor que o obtido pelos métodos de equilíbrio limite.

## 5.2 RESULTADOS DA BARRAGEM 2

A linha freática resultante pelo *software* Plaxis está apresentada na Figura 5.6 e a linha freática segundo o GeoStudio está apresentada na Figura 5.7.

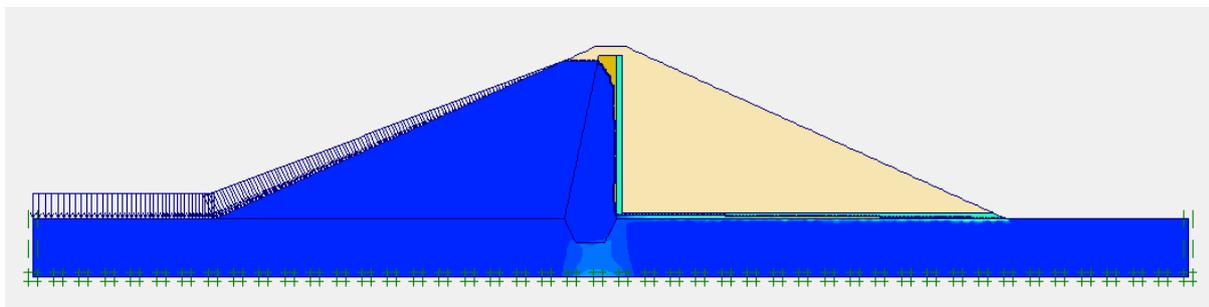


Figura 5.6 - Linha freática da barragem 2 no Plaxis

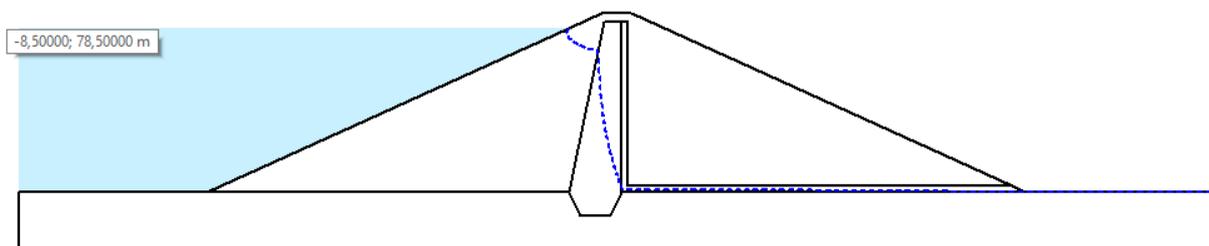


Figura 5.7 - Linha freática da barragem 2 no GeoStudio

A Figura 5.8 e a Figura 5.9 abaixo apresentam as superfícies de ruptura crítica e o fator de segurança encontrado pelo método de Morgenstern-Price e Spencer, respectivamente.

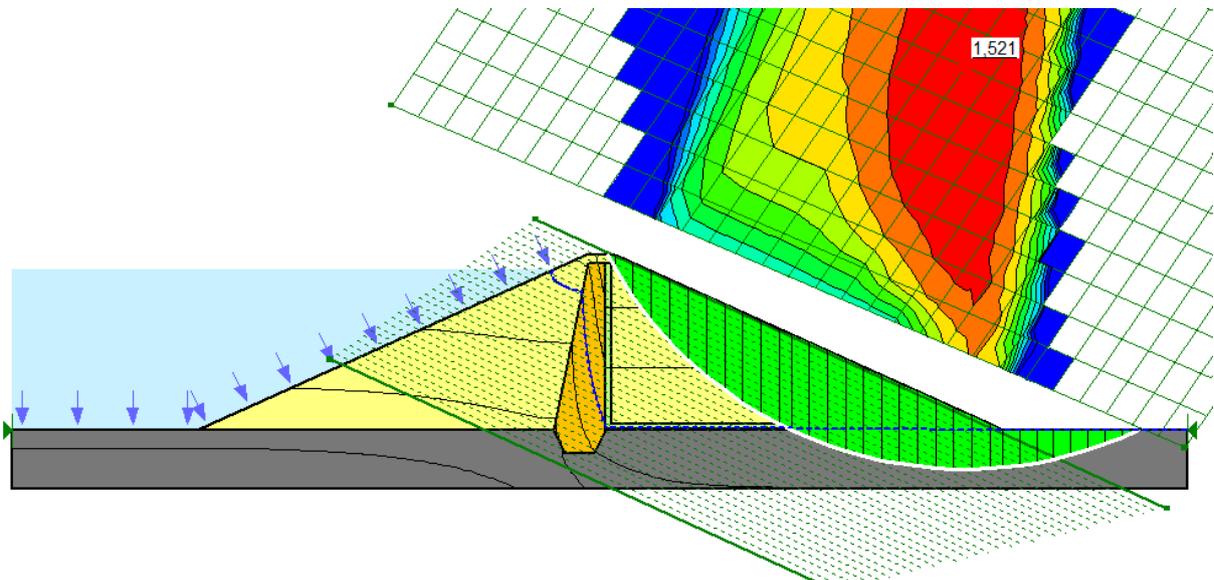


Figura 5.8 - Resultado do método de Morgenstern-Price para barragem 2

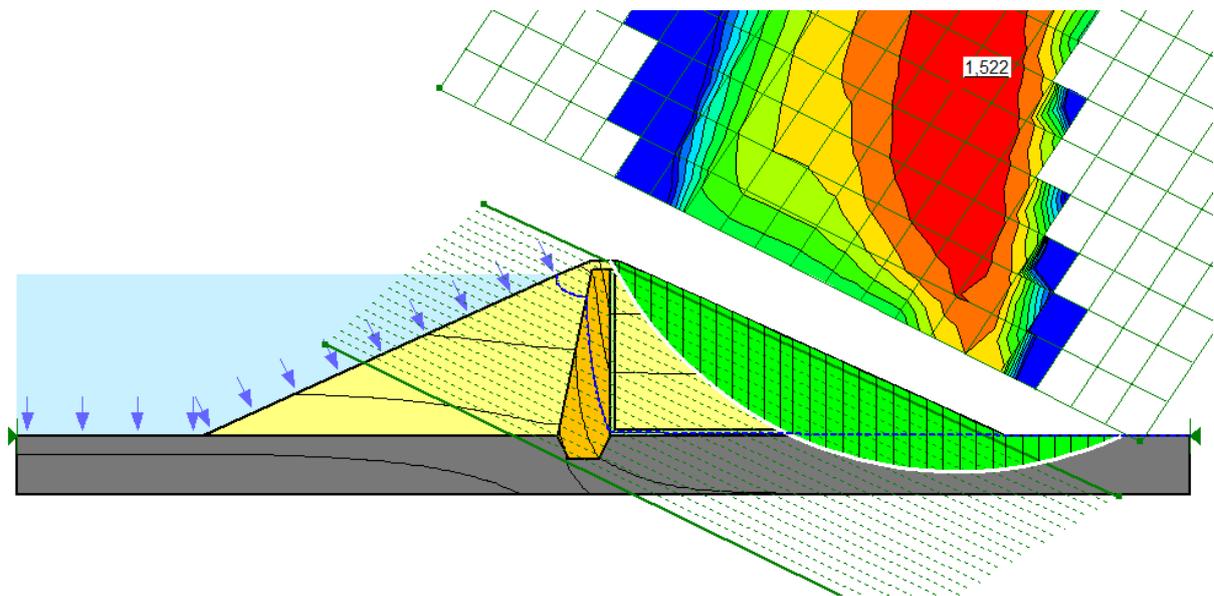


Figura 5.9 - Resultado do método de Spencer para barragem 2

A Figura 5.10 apresenta a deformação prevista para a barragem, a qual sugere consequentemente a provável superfície de ruptura da barragem pela análise segundo o método de elementos finitos e o fator de segurança obtido.

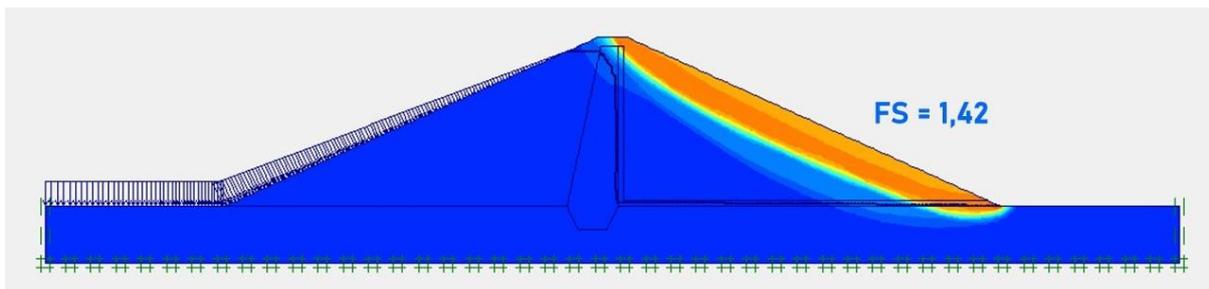


Figura 5.10 - Resultado do método de elementos finitos para barragem 2

No caso da barragem 2 continua a impressão do método de elementos finitos poder apresentar resultados a favor da segurança, uma vez que mais uma vez o fator de segurança obtido pelo método de elementos finitos também foi menor do que os métodos de equilíbrio limite, mas nesse caso o valor foi divergente em apenas 7%. Percebe-se novamente uma superfície preferencial de ruptura bastante diferente entre os métodos, mas nessa análise tem-se uma entrada da superfície em um local muito próximo em todos os métodos, o que pode ser um bom indício de coerência entre as análises.

### 5.3 RESULTADOS DA BARRAGEM 3

A linha freática resultante pelo *software* Plaxis está apresentada na Figura 5.11 e a linha freática segundo o GeoStudio está apresentada na Figura 5.12.

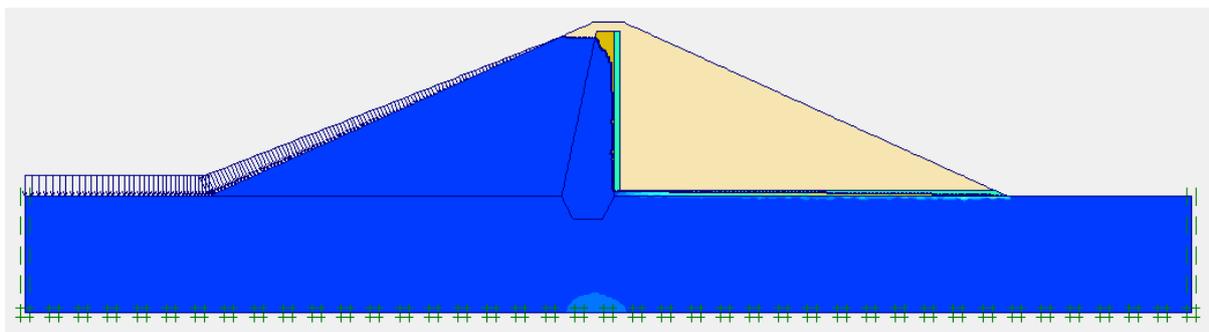


Figura 5.11 - Linha freática da barragem 3 no Plaxis

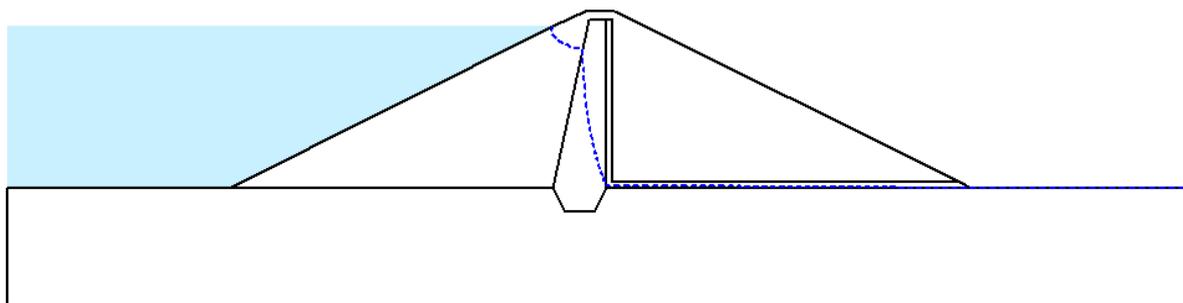


Figura 5.12 - Linha freática da barragem 3 no GeoStudio

A Figura 5.13 e a Figura 5.14 abaixo apresentam as superfícies de ruptura crítica e o fator de segurança encontrado pelo método de Morgenstern-Price e Spencer, respectivamente.

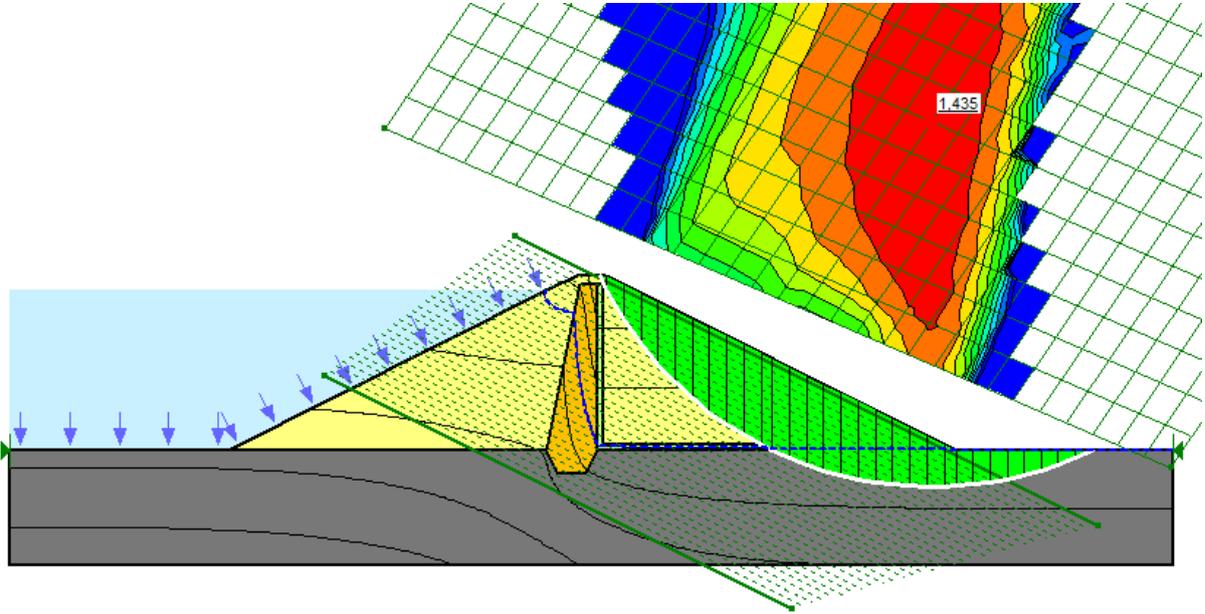


Figura 5.13 - Resultado do método de Morgenstern-Price para barragem 3

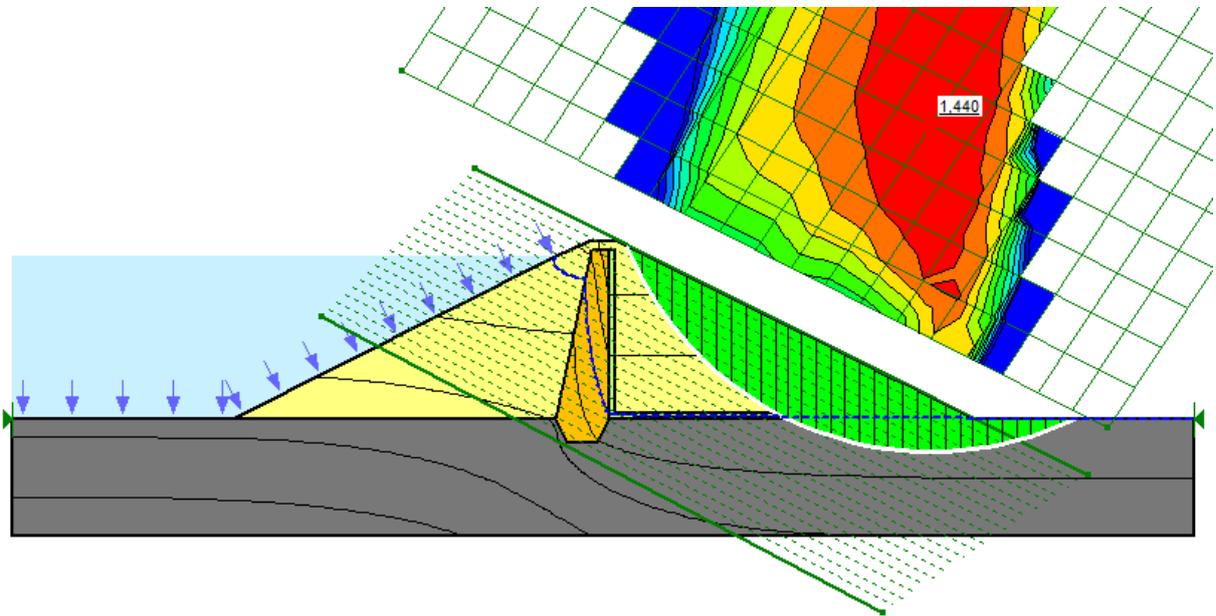


Figura 5.14 - Resultado do método de Spencer para barragem 3

A Figura 5.15 apresenta a deformação prevista para a barragem, a qual sugere consequentemente a provável superfície de ruptura da barragem pela análise segundo o método de elementos finitos e o fator de segurança obtido.

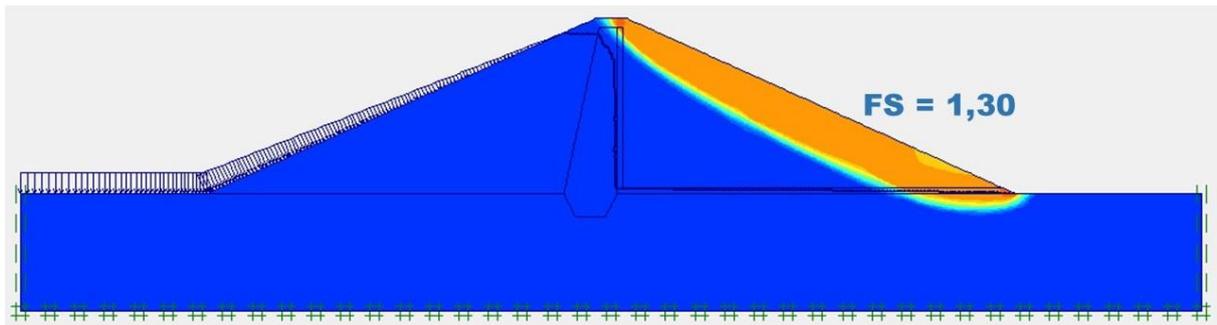


Figura 5.15 - Resultado do método de elementos finitos para barragem 3

Para uma melhor avaliação dos resultados dessa análise, elaborou-se a Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2 - Comparação de redução de FS da barragem 2 para a barragem 3

<b>Método</b>	<b>FS Barragem 2</b>	<b>FS Barragem 3</b>	<b>Redução FS</b>
<b>Morgenstern-Price</b>	1,521	1,435	5,6%
<b>Spencer</b>	1,522	1,440	5,4%
<b>Elementos finitos</b>	1,42	1,30	8,4%

Percebe-se que o método de elementos finitos teve uma maior sensibilidade nas alterações que foram testadas na barragem. Além disso, a redução do fator de segurança ocorreu de maneira coerente com a redução sofrida nos demais métodos, em uma ordem de grandeza compatível com a diminuição sofrida no fator de segurança dos demais métodos.

A superfície de ruptura resultante na barragem 3 também se mostrou um pouco divergente entre os métodos de elementos finitos e de equilíbrio limite, apesar de continuar retratando uma superfície com pequena passagem pela camada de fundação em todos os métodos. Por fim, uma última observação relevante diz respeito a tendência conservadora que o método dos elementos finitos continuou a mostrar na barragem 3, assim como ocorreu nas comparações anteriores, com o método apresentando um fator de segurança em torno de 10% menor.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Percebe-se que o método de elementos finitos apresentou resultados não muito discordantes em relação aos métodos de elementos finitos, o que corrobora com a possibilidade que essa abordagem mais moderna pode ter uma relevância quanto às análises de estabilidade de taludes, atuando como uma alternativa aos métodos tradicionais.

Os resultados mostram ainda que o método de elementos finitos, de fato, é promissor, apresentando uma superfície de ruptura coerente com a esperada de acordo com os métodos tradicionais de equilíbrio limite. O fator de segurança em geral bastante menor apresentado pela abordagem de elementos finitos pode ser apenas uma diferença de considerações, especialmente em função da consideração de construção da barragem em etapa única na análise por elementos finitos, o que pode ter resultado em uma análise de tensão-deformação não muito precisa em relação ao que se espera da realidade. Outra possibilidade de explicação para esse menor fator de segurança é que talvez a superfície encontrada de forma natural no método pode de fato apresentar um fator de segurança menor, o que seria uma clara vantagem para o método com elementos finitos, caso essa possibilidade fosse confirmada por estudos mais aprofundados.

Nota-se ainda uma tendência envolvendo todos os estudo similares encontrados de que os fatores de segurança encontrados pelo método do elementos finitos seja menor do que os obtidos pelos métodos de equilíbrio limite. Essa tendência é confirmada por Cavalcante (1997), Hamdhan (2019) e os resultados das análises produzidas para o presente trabalho. Assim, pode ser que de fato as superfícies, ou mecanismos de ruptura, encontradas pelo método de elementos finitos apresente um risco de ruptura maior do que os obtidos pelos métodos de equilíbrio limite.

De forma a complementar os estudos desenvolvidos no presente trabalho, sugere-se as seguintes abordagens em trabalhos futuros:

- Trabalhar com um modelo de percolação mais elaborado no GeoStudio, deixando de adotar um modelo de material apenas saturado para uma modelo saturado e insaturado, o que poderia apresentar uma linha freática mais condizente com o esperado na realidade e a partir dessa análise de fluxo refazer as análises de estabilidade de taludes, avaliando se isso poderia acarretar em uma diminuição do fator de segurança pelos métodos de equilíbrio limite, o que aproximaria os resultados em relação aos obtidos pela abordagem de elementos finitos;

- Comparação dos métodos em geometrias mais complexas e diferentes estados de carregamento da barragem, por exemplo durante um rebaixamento rápido. Além disso, pode ser interessante a comparação dos métodos para a análise de taludes de barragens de rejeitos construídas em fases sucessivas e sobre camadas de materiais mais deformáveis, de maneira a tentar identificar pelo método de elementos finitos diferentes mecanismos de ruptura dos apontados pelas análises tradicionais de equilíbrio limite;
- Avaliação da influência dos módulos de deformação dos materiais nas superfícies de ruptura, especialmente na abordagem por elementos finitos, por meio da variação desse parâmetro e avaliação quanto às superfícies de ruptura e fatores de segurança;
- Fazer uma análise de inclinações sucessivas maiores do talude, com o objetivo de encontrar a inclinação com fator de segurança igual a 1 para observar o comportamento dos dois métodos ao aproximar a inclinação dessa inclinação máxima e comparar esse comportamento nas proximidades do fator de segurança;
- Realizar a simulação da construção da barragem por meio de camadas e avaliar como essa nova consideração quanto à construção pode influenciar nas tensões-deformações atuantes na barragem e como isso pode interferir nos resultados de superfícies de ruptura e fatores de segurança;
- Realizar um estudo comparativo entre os métodos em diferentes condições de carregamento da barragem, em especial no rebaixamento rápido com a avaliação da estabilidade dos taludes tanto de montante quanto de jusante.

Dessa forma, os objetivos propostos foram atingidos e foi apresentado um panorama geral de comparação e familiarização dos métodos, de maneira a fomentar estudos e análises mais detalhadas futuramente acerca do assunto abordado.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**AAA International Relations. 2019.** *AAA International Relations*. [Online] 2019. <http://www.aaa.com/travelinfo/nevada/lake-mead-national-recreation-area/attractions/hover-dam-508990.html>.

**Abramsom, Lee W., et al. 2002.** *Slope stability and stabilization methods. Second Edition*. Canada : John Wiley & Sons, Inc., 2002.

**Almeida, Marínis Maria de. 2010.** *Estudo de Tensão Deformação de Barragem de Terra e Enrocamento*. Ouro Preto : UFOP, 2010.

**Assis, André P. 2003.** *APOSTILA DE BARRAGENS*. s.l. : Universidade de Brasília, 2003.

**Baba, Khadija, et al. 2012.** Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods Applied to a Railway in the Moroccan Rif. *Open Journal of Civil Engineering*, 2. 2012, pp. 27-32.

**Bazza, Mohamed. 2019.** Overview of the hystory of water resources and irrigation management in the near east region. <http://www.fao.org>. [Online] 2019. [Citado em: 10 de junho de 2019.] <http://www.fao.org/world/Regional/RNE/morelinks/Publications/%20English/HYSTORY-OF-WATER-RESOURCES.pdf>.

**Cavalcante, Rômulo Fontenele. 1997.** Análise de Estabilidade de Taludes de Mineração por Métodos do Equilíbrio Limite e Tensão-Deformação. *Dissertação de Mestrado*. Brasília : Universidade de Brasília, 1997.

**CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. 2011.** *A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens*. Rio de Janeiro : s.n., 2011.

**Costa, Walter Duarte. 2012.** *Geologia de Barragens*. São Paulo : Oficina de Textos, 2012.

**Cruz, Paulo Teixeira da. 1996.** *100 Barragens Brasileiras*. São Paulo : Oficina de Textos, 1996.

**Duncan, James Michael. 1996.** State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122. 1996, pp. 577-596.

**ELETROBRÁS. 2003.** *Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas*. 2003.

**Fine Civil Engineering Software. 2019.** Finesoftware. *www.finesoftware.eu*. [Online] 20 de Junho de 2019. <https://www.finesoftware.eu/help/geo5/en/morgenstern-price-01/>.

**Garbrecht, Günther. 1986.** *Wasserspeicher (Talsperren) in der Antike*. s.l. : Antike Welt, 1986.

**Griffiths, D. V. e Lane, P. A. 1999.** Slope stability analysis by Finite elements. *Géotechnique* 49. 1999, pp. 387-403.

**Hamdhan, Indra Noer. 2019.** Slope Stability Analysis with the Finite Element Method. *ithenas*. [Online] 21 de 10 de 2019. <http://lib.itenas.ac.id/kti/wp-content/uploads/2013/07/Slope-Stability-Analysis-with-the-Finite-Element-Method.pdf>.

**Helms, S.W. 1977.** *Jawa Excavations 1975. Third Preliminary Report*. s.l. : Levant, 1977.

**ICOLD. 2019.** icold-cigb. *International Commission On Large Dams*. [Online] 2019. [Citado em: 15 de 09 de 2019.] [https://www.icold-cigb.org/GB/dams/role\\_of\\_dams.asp](https://www.icold-cigb.org/GB/dams/role_of_dams.asp).

**J. Guthrie Brown, Donald C. Jackson. 2019.** <https://www.britannica.com>. *britannica*. [Online] 2019. [Citado em: 15 de maio de 2019.] <https://www.britannica.com/technology/dam-engineering>.

**Ledesma, Osvaldo, Mendive, Iñaki García e Sfriso, Alejo. 2016.** Factor Of Safety By The Strength-Reduction Technique Applied To The Hoek–Brown Model. *ENIEF*. 09 de Novembro de 2016, p. 24.

**Massad, F. 2003.** *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. São Paulo : Oficina de Textos, 2003.

**Morgenstern, N. R. e Price, V. E. 1965.** The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, 15. 1965, pp. 79-93.

**Silva, João Paulo Moreira da. 2011.** Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes. *Dissertação de Mestrado*. Porto, Portugal : s.n., 2011.

**Spencer, E. 1967.** A Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. *Géotechnique*, 17. 1967, pp. 11-26.