



Centro Universitário de Brasília – UNICEUB
Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas – FATECS
Curso: Engenharia Civil

VÍTOR GUILHERME DE SOUSA FONTENELE

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RUPTURA APLICADA A UMA BARRAGEM DE
ENROCAMENTO COM NÚCLEO DE ARGILA**

Brasília
2018

VÍTOR GUILHERME DE SOUSA FONTENELE

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RUPTURA APLICADA A UMA BARRAGEM DE
ENROCAMENTO COM NÚCLEO DE ARGILA**

Trabalho de Curso apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Prof. Leticia Pereira de Moraes, MSc.

Brasília
2018

VÍTOR GUILHERME DE SOUSA FONTENELE

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DE RUPTURA APLICADA A UMA BARRAGEM DE
ENROCAMENTO COM NÚCLEO DE ARGILA**

Trabalho de Curso apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Prof. Leticia Pereira de Moraes, MSc.

Brasília, 06 de dezembro de 2018.

Banca Examinadora

Prof. Leticia Pereira de Moraes, MSc.
Orientadora

Prof. Jairo Furtado Nogueira, MSc.
Examinador Interno

Eng^a. Civil: Ana Carolina Loyola Caetano Rios, MSc.
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Francisco e Divina, que sempre apoiaram independentemente da situação.

À minha irmã, Poliana, que está sempre disposta a conversar e ajudar no que for preciso, e que tenho bastante orgulho, torço muito para conseguir seus sonhos.

À minha orientadora Leticia Pereira e todos os outros professores do UniCEUB, pelos ensinamentos que foram passados.

E por fim, agradeço a todas as pessoas, amigos e familiares, que acrescentaram algo em minha vida tanto pessoal quanto acadêmica e fizeram parte de alguma maneira para que esse momento fosse possível.

RESUMO

A importância das barragens em um contexto atual é indiscutível. Diversas atividades socioeconômicas são atribuídas a essas grandes estruturas. Em contrapartida, suas construções causam um considerável impacto ao meio ambiente e possuem um grande potencial de danos em caso de ruptura. Além do prejuízo financeiro, também pode ocorrer a perda de vidas humanas. Neste contexto, para um bom projeto é importante o estudo do comportamento dos solos, geometria do barramento, materiais, local, interferências externas, entre outras questões. Este trabalho tem como objetivo analisar o risco de ruptura de forma probabilística com o método First Order Second Moment (FOSM), ou seja, além de considerar os métodos mais utilizados como é o caso dos determinísticos, serão consideradas as incertezas dos diferentes tipos de materiais que compõem uma barragem de enrocamento com núcleo de argila. A análise de risco está inserida em um modelo de gestão de risco, que tem objetivo de quantificar o risco de ruptura. Neste trabalho serão analisados dois estágios: final de construção e regime permanente de operação da barragem. Além da análise probabilística do talude como um todo, será analisado a transferência de tensão no material de transição, ou seja, o comportamento das tensões nessas zonas. Esse arqueamento de tensões pode causar fissuras internas ou externas no corpo da barragem, devido as diferenças dos módulos de rigidez dos materiais adjacentes ao material de transição, que, conseqüentemente, geram deslocamentos diferentes e aumentam as tensões cisalhantes. A análise consistirá em variar o módulo de elasticidade para poder observar os diferentes indicadores de tensão-deformação, através do software GeoStudio 2012, que é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Apesar de ocorrer o arqueamento de tensões com o aumento da rigidez do material de transição, observou-se pouca influência dele na estabilidade da barragem, sendo o enrocamento, o material mais influente a ser analisado quanto a estabilidade.

Palavras-chave: Barragem de enrocamento. Probabilidade de ruptura. FOSM. Arqueamento de tensões. Análise de risco.

ABSTRACT

The importance of dams in a current context is indisputable. Various socio-economic activities are attributed to these large structures. On the other hand, its construction cause a considerable impact on the environment and have a great potential for damage in case of disruption. Besides of the financial loss, can also occur loss of human life. In this context, a good project is important to the study of the properties of soils, geometry, materials, location, external interference, among others. This study aims to analyze the risk of rupture of a dam using probabilistic analysis with the First Order Second Moment (FOSM) method, that is, besides considering the most used methods such as deterministic, will be considered the uncertainties of different types of materials that make up a rockfill dam with clay core. The risk analysis is inserted in a risk management model, which aims to quantify the risk of rupture. In this paper will be analyzed two stages: the end of a construction and permanent regime of operation of the dam. Aside from the probabilistic analysis of the slope as a whole, will be examined the transfer of stress in the material transition, in other words, the conduct of the stress in these areas. This concentration of stresses can cause internal or external fissures in the dam body, due to the differences of the rigidity of materials adjacent to the transition zone, that, consequently, generate different displacements and increase the shear stresses. The analysis will consist in the variety of the elastic modulus to be able to observe the different stress-strain indicators, through GeoStudio 2012 software, which is based on the Finite Element Method (FEM).

Keywords: Dam Rockfill. Rupture probability. FOSM. Transfer stress. Risk analysis.

SUMÁRIO

2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Conceitos básico sobre barragens.....	13
3.1.1 Barragem de enrocamento com núcleo de argila	15
3.2 Arqueamento de Tensões	16
3.3 Segurança de Barragem	18
3.3.1 Princípio do controle de fluxo.....	18
3.3.2 Princípio da estabilidade.....	18
3.3.3 Princípio da compatibilidade das deformações.....	20
3.4 Métodos determinísticos	20
3.4.1 Resistência ao cisalhamento	21
3.4.2 Critérios de ruptura	21
3.4.3 Fator de segurança.....	22
3.4.4 Método do equilíbrio limite	23
3.5 Gestão e análise de risco.....	25
3.5.1 Métodos qualitativos	28
3.5.2 Métodos quantitativos	28
3.6 Conceitos básicos sobre estatística e probabilidade.....	29
3.6.1 Tendência central	30
3.6.2 Medidas de Dispersão	30
3.6.3 Distribuição de probabilidade.....	32
3.7 Métodos de Análise Probabilística	33
3.7.1 FOSM	34
4 METODOLOGIA.....	36
4.1 Características da barragem.....	36
4.1.1 Dimensões da barragem.....	36
4.1.2 Parâmetros dos materiais	37
4.2 Análise paramétrica do arqueamento de tensões	38
4.2.1 Principais indicadores do estado de tensão-deformação.....	39
4.3 Análise probabilística no final de construção	40
4.4 Análise probabilística no regime permanente	41
5 RESULTADOS	42

5.1 Resultado do arqueamento de tensões no final de construção	42
5.1.2 Comparação da tensão principal menor em diferentes alturas	47
5.1.3 Comparação da tensão cisalhante em diferentes alturas	49
5.1.4 Comparação da tensão principal maior e o peso próprio atuante em diferentes alturas	51
5.1.5 Comparação do deslocamento vertical (δ_y) em diferentes alturas	53
5.2 Resultado do método FOSM do final de construção	55
5.3 Resultado no regime permanente de operação	63
6 CONCLUSÕES GERAIS.....	66
6.1 Sugestões para pesquisas futuras	67
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água de qualidade é uma das principais práticas socioeconômicas necessárias no mundo, atribuindo bastante importância às barragens. Por outro lado, em caso de falhas, as barragens podem causar enormes prejuízos econômicos e ambientais além de perdas de vidas humanas. A devida importância deve ser refletida na concepção, construção e funcionamento de uma barragem, cumprindo de maneira econômica e eficaz os requisitos técnicos, administrativos e ambientais.

De modo geral, as barragens de regularização convencionais podem ser de terra, zoneada, concreto ou enrocamento, sendo esta última o foco desta monografia. As barragens de enrocamento, são aquelas em que há predominância de material rochoso na sua seção. Em geral, sua impermeabilização pode ser feita com membrana externa impermeável, como o concreto, ou com núcleo impermeável interno, como a argila. A escolha depende, dentre outros fatores, dos materiais de construção disponíveis e seus respectivos custos, observando sempre o aproveitamento e otimização do projeto.

Para garantir a segurança necessária em todos os processos relacionados à barragem, devem ser levados em conta alguns fatores como: seção da barragem, características geotécnicas do terreno, clima da região, tempo para construção, entre outros. As melhorias na estrutura final do solo e de algumas propriedades dos materiais como cisalhamento e deformabilidade, dependem do controle de compactação, considerando a umidade, número de passadas e espessura da camada de compactação.

Em barragens compostas por diferentes tipos de materiais, é importante analisar as particularidades de cada solo. Os diferentes comportamentos em relação aos materiais adjacentes podem influenciar na estabilidade do talude. Para que não ocorra o contato direto do enrocamento com o aterro por exemplo, os materiais de transição, são necessários por ter granulometrias intermediárias com o objetivo de não atingir gradientes elevados, além de impedir o carreamento dos materiais mais finos através dos de maior diâmetro. É importante também analisar a relação de rigidez da transição com o núcleo que pode gerar arqueamento de tensões. A influência de algumas

propriedades como o módulo de elasticidade, podem variar os valores das tensões principais na região das transições, conseqüentemente essas variações de tensões na superfície de diferentes materiais facilitam a ocorrência de recalques diferenciais, que por sua vez podem causar fissuras no talude. De acordo com Volkmer (2009), materiais com maiores valores de rigidez tenderão a suportar maiores valores de tensão e, assim, o efeito final do zoneamento da barragem produz uma distribuição diferenciada de tensões, que em alguns casos pode produzir efeitos negativos na estabilidade global da barragem.

Muitas análises e estudos foram feitos ao longo dos anos objetivando o aumento eficiente da segurança de barragens antes mesmo de sua construção. Na fase de projeto existem dois métodos de avaliação em relação às estimativas de risco: determinístico e probabilístico. O primeiro é um sistema baseado em um fator de segurança (FS), cujo o cálculo é estabelecido por parâmetros fixos dos materiais obtidos por ensaios e que não leva em consideração a variabilidade do solo, fato que interfere diretamente na qualidade dos resultados. O segundo método leva em consideração o grau de incerteza em relação às variáveis utilizadas, decorrentes da variabilidade natural de solos e rochas. Os métodos probabilísticos podem ser utilizados para quantificar a análise de risco que geralmente está inserida em um modelo de gestão de risco, que tem como objetivo controlar e avaliar os riscos e conseqüências que envolvem uma barragem. Por não abranger as conseqüências da falha, esta monografia apesar de ser uma análise de risco, não engloba um cálculo de risco como um todo, focando nas probabilidades de falhas, ocorrência de algum problema indesejável que leva a ruptura.

No Brasil, os métodos probabilísticos são pouco explorados na literatura, sendo os determinísticos mais utilizados. Na engenharia geotécnica, projetos envolvendo barragens foram um dos primeiros a adotar a análise probabilística como método de avaliação de segurança. Para avaliar a influência das variáveis envolvidas na estabilidade da barragem são utilizadas ferramentas estatísticas, utilizando um determinado fator de segurança médio e suas variâncias para calcular a probabilidade de ruptura do talude.

Neste trabalho, para a análise probabilística, será utilizado o Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FOSM), que será aplicado na análise de estabilidade de uma barragem de enrocamento com núcleo de argila em duas etapas: final de

construção e regime permanente de operação. O objetivo será encontrar a probabilidade de ruptura, ou seja, probabilidade do fator de segurança ser menor que um. Serão variados os parâmetros de entrada que, conseqüentemente, retornarão resultados diferentes para o fator de segurança.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da rigidez do material de transição na estabilidade do talude de uma barragem de enrocamento.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Revisar conceitos estatísticos e sobre barragens;
- Estudo do método probabilístico FOSM e do Software GeoStudio;
- Realizar um estudo de caso inspirado na seção de uma barragem real, utilizando o Software GeoStudio 2012.
- Realizar um estudo paramétrico da rigidez do material de transição, e como ele altera o campo de tensão-deformação da barragem.
- Aplicar o método FOSM em dois estágios de carregamento: final de construção e regime permanente de operação, para avaliar a probabilidade de falha da barragem;

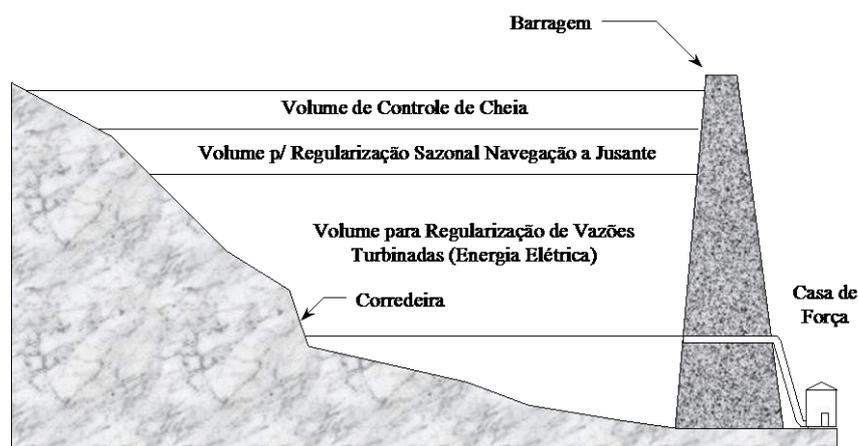
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos básicos para o entendimento da análise probabilística de ruptura de um talude. Serão abordadas definições sobre barragens e arqueamento de tensões no material de transição, formas de gerir e analisar o risco de falha relacionado a barragens, conceitos básicos referentes a estatística e probabilidade e definição do método probabilístico utilizado para o cálculo de probabilidade de ruptura de uma barragem: First Order Second Moment (FOSM).

3.1 Conceitos básico sobre barragens

As barragens são obstáculos com condições de reter e também controlar a passagem de água, rejeitos, detritos ou qualquer outro líquido. De acordo com Assis (2003), dentro do contexto hídrico, tem-se que barragens são estruturas comumente construídas em vales, considerando-se principalmente as condições topográficas locais, de uma margem à outra com o objetivo de elevar o nível de água até determinada altitude pré-estabelecida. Podem ser destinadas ao abastecimento urbano e industrial, controle de cheias, regularização de vazão, irrigação, geração de energia, navegação, dentre outras finalidades, podendo ter mais de um objetivo, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Reservatório de finalidade múltipla, controle de cheias, navegação e produção de energia elétrica

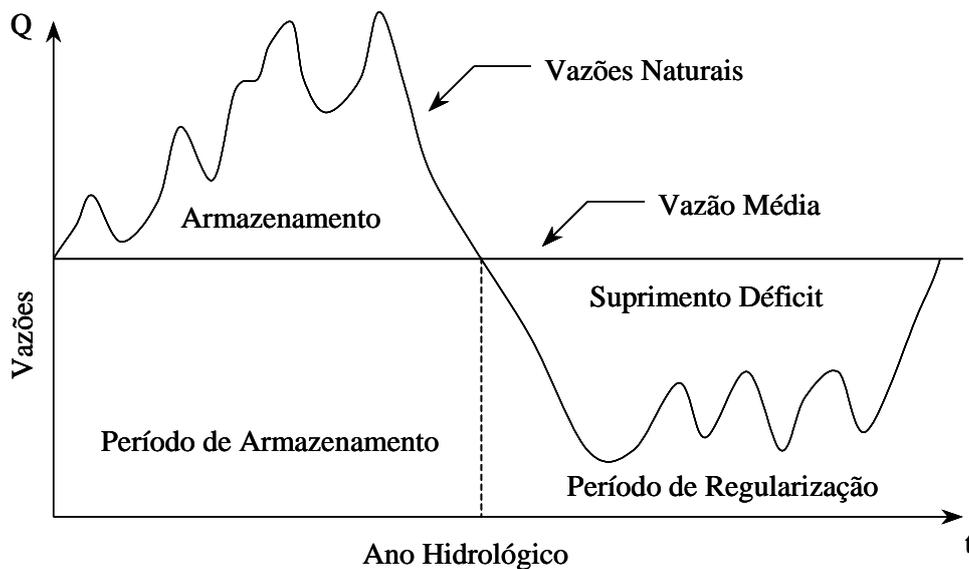


Fonte: Assis, 2003

Assis (2003) define os grupos como barragens de regularização e barragens de retenção. O conjunto de barragens de regularização é destinado ao armazenamento de água em períodos de estiagem, mantendo a vazão suficiente em todos os períodos,

ou seja, equilibrando a demanda com o consumo de água como mostra a Figura 2. As barragens de retenção são utilizadas basicamente para amortecimento de cheias, evitando inundações, retenção de sedimentos e resíduos industriais, como os de mineração, por exemplo. Além dessas, outra finalidade é o aproveitamento hidroelétrico devido ao desnível da estrutura, transformando a energia potencial hidráulica em energia elétrica.

Figura 2 – Balanço de regularização



Fonte: Assis, 2003

Além da classificação quanto a finalidade, Assis (2003) classificou as barragens pelo seu material constituinte (barragens de terra, enrocamento, concreto e associações entre esses materiais), que dependerá, principalmente, da disponibilidade de solo ou rocha no local escolhido, natureza das fundações e condições climáticas.

As barragens geotécnicas são constituídas de materiais menos resistentes, quando comparados ao concreto, e os tipos mais comuns são as barragens de terra com seção homogênea ou zoneada. O processo executivo (compactação) deve ser rigoroso, pois ocorrendo falhas, terá sua estrutura comprometida resultando em infiltrações, exigindo manutenções frequentes tanto preventivas quando corretivas.

As barragens de enrocamento são caracterizadas predominantemente pelo material rochoso no espaldar, que podem ter como elemento de vedação face de concreto, núcleo argiloso, membranas impermeáveis e materiais de transição, que serão vistos adiante.

As estruturas de barramento como um todo, exigem estudos prévios no local do barramento e certos cuidados durante a construção dos elementos que a compõe. Como descrito por Souza (2013), entende-se por barragem toda a unidade que é composta por:

- a) corpo da barragem
- b) bacia da represa
- c) terrenos de fundação
- d) estruturas anexas: vertedouros, tomada d'água, galerias, túneis, casa de força, descarga de fundo, etc.
- e) instrumentos de auscultação: piezômetros, medidores de recalque, células de tensão total, etc.
- f) instalações de comunicação e manutenção

Segundo Fernandes (2007), vários aspectos devem ser considerados para a escolha do tipo de barragem como, o planejamento em relação a utilização dos materiais locais disponíveis, logística considerando o transporte de certos materiais relacionando com a distância, estudos geológico-geotécnico para o projeto de uma barragem, dentre outros.

No próximo item serão apresentados conceitos sobre Barragem de enrocamento com núcleo de argila, seção da Barragem em estudo neste trabalho.

3.1.1 Barragem de enrocamento com núcleo de argila

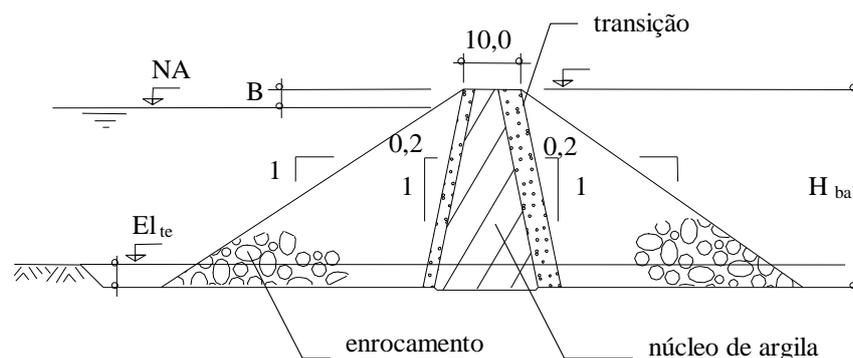
Segundo Assis (2003) o enrocamento como material de construção está sendo utilizado na maioria dos grandes projetos hidrelétricos brasileiros atuais, apresentando grandes vantagens do ponto de vista de facilidade construtiva e aspectos econômicos. As principais características do material de enrocamento é o elevado ângulo de atrito e a condição de livre drenagem. Apesar disso, por utilizar materiais mais resistentes, sua fundação precisa suportar os esforços transmitidos e ter baixa compressibilidade.

Alguns fatores influenciam na resistência e na deformabilidade dos enrocamentos. Assis (2003) destaca a mineralogia, a resistência da rocha, o fraturamento dos blocos,

índice de vazios, o tamanho dos blocos, a velocidade de aplicação das cargas e a magnitude das pressões aplicadas.

A barragem de enrocamento com núcleo de argila, como mostra na Figura 3, é definida pela existência de um núcleo argiloso como sistema de vedação. Ela é composta predominantemente por fragmentos de materiais rochosos compactados em seus espaldares, proporcionando maior estabilidade e podendo ser mais íngreme quando comparada a barragem de terra. Entre o material vedante e o resistente é importante ter um material de transição, objetivando compatibilizar as deformações e evitar uma concentração muito alta de tensões, arqueamento de tensões, que podem levar a fissuras. Além disso, o material de transição evita o carreamento do material fino para o interior do enrocamento.

Figura 3 – Seção típica de barragem de enrocamento com núcleo de argila vertical



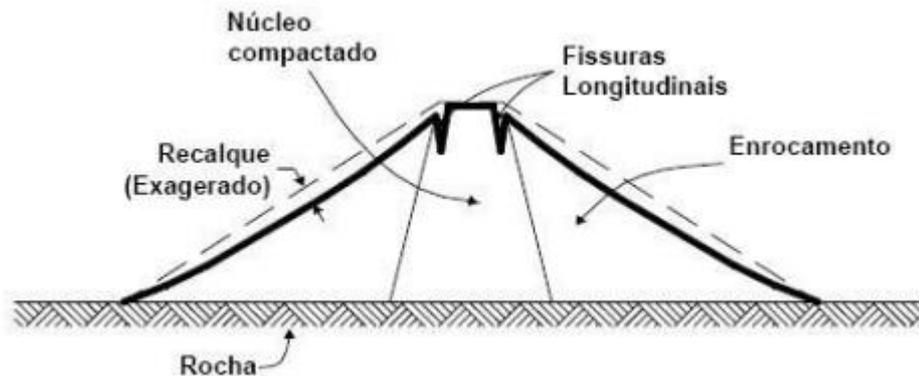
Fonte: Assis, 2003

3.2 Arqueamento de Tensões

O arqueamento ou transferência de tensões está relacionando tanto a geometria quanto às características dos materiais. Normalmente ocorre quando os núcleos são mais compressíveis e os espaldares pouco deformáveis. As pressões são concentradas nas transições e espaldares enquanto no núcleo são reduzidas, assim, as deformações diferenciais entre os materiais acabam provocando maiores riscos de ruptura hidráulica. Segundo Matheus (2006), solos menos resistentes e mais compressíveis favorecem o uso do núcleo inclinado, uma vez que o material fica apoiado sobre o espadar de enrocamento, diminuindo a ocorrência de arqueamento se tensões.

As deformações diferenciais devido a concentração elevada de tensões na região de contato entre materiais de diferentes compressibilidades poderão resultar em formações de fissuras longitudinais ou transversais como mostram as Figuras 4 e 5.

Figura 4 – Fissuras Longitudinais

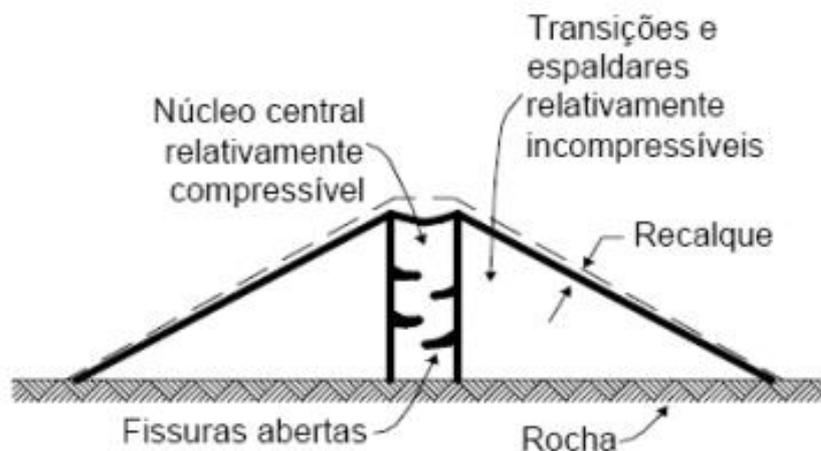


Fonte: Volkmer 2009 modificada, Sherard, 1963

Segundo Volkmer (2009), as fissuras mais perigosas ocorrem transversalmente ao núcleo, Figura 5, pois formam um caminho preferencial de fluxo por onde um processo erosivo tem maior potencial para ser iniciado. A ocorrência de fissuras internas é perigoso por impossibilidade de observação.

A análise do arqueamento de tensões é importante pois sua consequência pode influenciar diretamente na estabilidade da barragem, fazendo parte do processo de segurança de barragem.

Figura 5 – Fissuras Transversais



Fonte: Volkmer 2009 modificada, Sherard, 1963

3.3 Segurança de Barragem

A segurança de uma barragem está diretamente atrelada às características dos materiais a serem utilizados, escolha da geometria da seção, qualidade da execução, escolhas da instrumentação/inspeção, operação e manutenção. Para garantir o máximo de segurança são necessárias investigações geotécnicas de qualidade durante a fase de projeto e monitoramentos, através de instrumentações, durante as fases executiva e operacional. Estes fatores terão grande influência no desempenho da estrutura.

De acordo com Cruz (1996), deve-se obedecer a três princípios básicos de segurança relacionados à estabilidade interna e externa: Princípio de controle de fluxo, princípio de estabilidade e princípio da compatibilidade das deformações.

3.3.1 Princípio do controle de fluxo

O objetivo fundamental das barragens, é concentrar a maior quantidade de água possível dentro do projeto a montante e ao mesmo tempo facilitar a drenagem ao máximo à jusante. Deve-se utilizar meios de vedação no eixo, com núcleos feitos por materiais menos permeáveis e de menor granulometria. O controle de drenagem a jusante deve levar em consideração a diminuição da pressão d'água na base do talude, objetivando aumentar a sua estabilidade.

3.3.2 Princípio da estabilidade

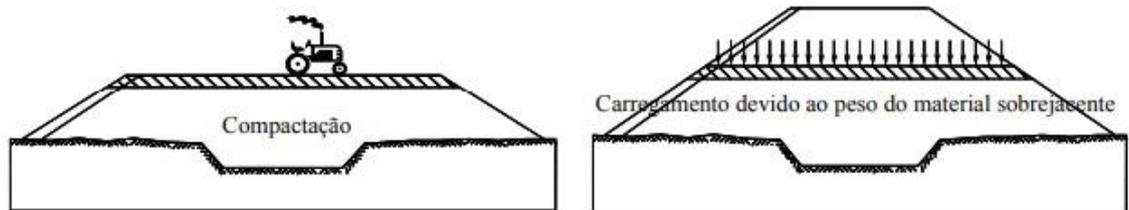
Para garantir estabilidade do talude e compatibilização entre a estrutura de barramento e a fundação, os espaldares devem ter a resistência como uma de suas principais características. O talude de uma barragem está sujeito a vários esforços e para que haja equilíbrio, ou seja, para que não ocorra deslocamentos de massa de solo devido à ruptura em determinada área, a resistência do talude deve ser maior que os esforços atuantes para que haja estabilidade, levando em consideração principalmente as características do solo, tipo de barragem e geometria.

Assis (2003) diz que a estabilidade do conjunto barragem-fundação deve ser efetiva em cada uma das fases de carregamento da barragem, que são:

- a) Final de construção – Fase onde a barragem encontra-se finalizada, porém, antes do enchimento a montante, ou seja, sem a carga hidráulica exercida sobre o talude (Figura 6).

A cada camada de aterro lançada e compactada, a velocidade da construção e o estado de tensões influenciarão nos resultados das pressões neutras que a água exerce e das deformações na estrutura e fundação. Os carregamentos que atuam sobre a barragem são influenciados pela velocidade da construção, tipo de solo utilizado, teor de umidade adotado, pressões neutras atuantes e o próprio peso do solo.

Figura 6 – Fases de carregamento: Final de construção



Fonte: Assis, 2003

- b) Regime permanente de operação – Fase onde a barragem encontra-se em funcionamento, ou seja, enchimento de água a uma altura prevista no reservatório a montante. É quando as pressões neutras e os fluxos de percolação são estabelecidos e as deformações no conjunto barragem-fundação são estabilizadas. Segundo Pereira (2005), para uma análise confiável da estabilidade recomenda-se fazer uma boa avaliação das pressões neutras atuantes no barramento devido a sua importância na resistência ao cisalhamento do solo (Figura 7).

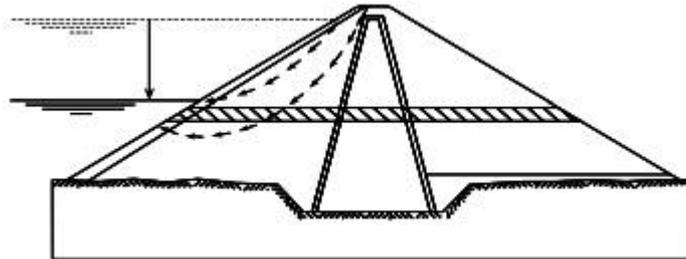
Figura 7 – Fases de carregamento: Regime permanente de operação



Fonte: Assis, 2003

- c) Rebaixamento do reservatório – Fase situacional em que ocorre o rebaixamento do nível de água do reservatório numa velocidade incomum, surgindo pressões capazes de desestabilizar a estrutura (Figura 8).

Figura 8 – Fases de carregamento: Rebaixamento do reservatório



Fonte: Assis, 2003

3.3.3 Princípio da compatibilidade das deformações

O quanto cada tipo de solo deforma depende especialmente do seu estado inicial, comportamento específico de cada tipo de material e dos aumentos de tensões aplicadas. A fim de obter uma estimativa das tensões e deformações nas estruturas de terra, é necessário o conhecimento das equações que constituem os solos e sua distribuição geométrica.

Segundo Cruz (1996), as barragens que são constituídas por seções com materiais distintos, devem ter a compressibilidade compatibilizada por zonas adicionais de transição com o objetivo de reduzir os recalques diferenciais e totais que podem prejudicar o desempenho dos sistemas de drenagem, seja pelas trincas ou pela inversão dos gradientes de fluxo.

3.4 Métodos determinísticos

Os métodos determinísticos são uma das ferramentas utilizadas para determinação da segurança de uma barragem. Os projetistas geralmente adotam um fator de segurança conservador visando incorporar a heterogeneidade do solo ao projeto. Além disso, os parâmetros utilizados para os materiais são obtidos por ensaios. Pelos métodos determinísticos não levarem em consideração as incertezas inerentes ao material, a experiência e o entendimento do profissional influencia bastante na escolha

de um fator de segurança que garanta a estabilidade, o que pode tornar os projetos mais onerosos.

Estes métodos estão divididos em dois grandes grupos. O primeiro grupo é baseado em análise de deslocamentos, que considera as relações tensão deformação dos materiais, envolvendo técnicas numéricas com auxílio computacional, representados pelo Método dos Elementos Finitos. O segundo grupo é baseado na análise de equilíbrio limite, que é dividido em três subgrupos: métodos que consideram a massa rompida como um corpo único; métodos que dividem essa massa rompida em cunhas e métodos que dividem a massa rompida em fatias.

Nos próximos itens serão apresentados alguns conceitos necessários para o entendimento do Método do equilíbrio limite, empregado para as análises desta monografia, pois será utilizado um software (GeoStudio 2012) baseado nesse método.

3.4.1 Resistência ao cisalhamento

Segundo Das e Sobhan (2015), a resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área específica que essa massa pode oferecer para resistir a rupturas e a deslizamentos ao longo de qualquer plano em seu interior.

Os movimentos de massa podem acontecer basicamente quando os esforços atuantes são majorados, ou seja, acontece o aumento da sollicitação devido à sobrecarga ou pressões em geral. As características geotécnicas dos materiais também influenciam na redução ou aumento da resistência e, conseqüentemente, também podem ser um fator deflagrador de movimentos de massa

3.4.2 Critérios de ruptura

A teoria de Mohr (1900) afirma que um material se rompe em decorrência da combinação entre as tensões normal e de cisalhamento. Coulomb (1776) assume que a tensão de cisalhamento no plano de ruptura é uma função linear da tensão normal, representada pela equação:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \Phi' \quad (3.1)$$

onde:

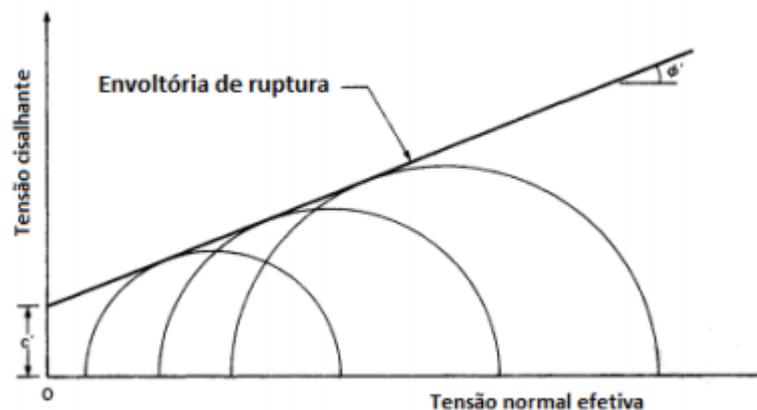
c' : coesão efetiva;

Φ' : ângulo de atrito efetivo;

σ' : tensão normal efetiva desenvolvida ao longo da potencial superfície de ruptura.

O gráfico representativo da Equação 3.1 pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Critérios de Mohr – Coulomb – solos saturados



Fonte: Rios 2015 modificada, Fredlund, 1993

Por serem fundamentos análogos, originou-se o critério de ruptura Mohr – Coulomb, onde o solo se rompe quando o estado de tensões no plano (círculo de Mohr) toca a envoltória de resistência ao cisalhamento.

Os parâmetros c' e Φ' necessários para a aplicação desse método são obtidos através da correlação empírica, ensaios de laboratórios, Cisalhamento Direto e Ensaio Triaxial.

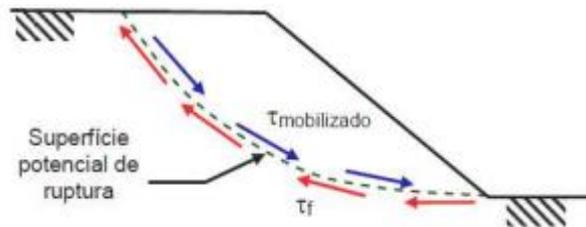
3.4.3 Fator de segurança

Existem fatores internos que influenciam na diminuição da resistência ao cisalhamento e fatores externos que geram o aumento das tensões de cisalhamento. As duas condições favorecem a tendência de um talude ao deslizamento, que é contido quando as tensões cisalhantes mobilizadas são iguais ou menores que a resistência de cisalhamento na superfície de ruptura, como mostra a Figura 10.

O fator de segurança pode ser entendido como o valor numérico da relação entre a resistência ao cisalhamento disponível do solo e a resistência ao cisalhamento mobilizada para garantir o equilíbrio do corpo deslizante, sob efeitos dos esforços

atuantes. Na teoria, quando o valor do FS for menor que um, significa falha. O valor do FS mínimo admissível adotado em projeto dependerá de alguns fatores como: bibliografia adotada, experiência do projetista, consequência para vidas humanas e prejuízos financeiros.

Figura 10 – Tensões e resistências mobilizadas na superfície de ruptura



Fonte: Gerscovich, 2008

O fator de segurança é definido numericamente como:

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (3.2)$$

onde:

FS_s : Fator de Segurança;

τ_f : Média da resistência de cisalhamento do solo obtida pela Equação 3.1;

τ_d : Média da tensão de cisalhamento desenvolvida ao longo da potencial superfície de ruptura.

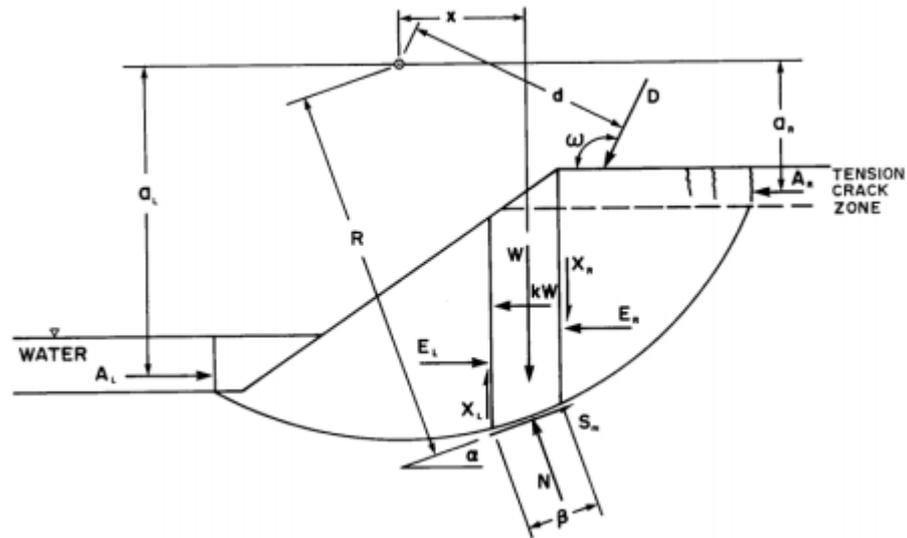
3.4.4 Método do equilíbrio limite

Os métodos baseados no equilíbrio limite são caracterizados pela divisão do talude em fatias e utilização das equações de equilíbrio, ou seja, o somatório das forças verticais, horizontais e momentos são iguais a zero. São descritos pelo manual do Slope/W (2004) as seguintes hipóteses que sustentam os métodos:

- É definido o tipo de superfície de deslizamento para realização dos cálculos.
- O material pode ter sua resistência descrita pelo modelo de Mohr-Coulomb.
- O fator de segurança ao longo da superfície potencial de ruptura é único.

A Figura 11 mostra a forma de cunha formada pela divisão de fatias e seus esforços atuantes:

Figura 11 – Método das fatias



Fonte: Geo-Slope, 2004

onde:

W: Peso total da fatia;

N: Força normal na base da fatia;

S_m : Força de cisalhamento na base da fatia;

X: Força vertical entre fatias;

E: Força normal horizontal entre fatias;

D: Carga externa, aplicada sob uma inclinação ω ;

kW: Carga sísmica horizontal aplicada no centroide da fatia;

R: Raio da superfície de ruptura;

A: Força devida à pressão externa da água;

α : Ângulo de inclinação da tangente que toca o centro da base de cada fatia.

Ao aplicar as três equações de equilíbrio e o critério de ruptura de Mohr-Coulomb em uma fatia, o número de incógnitas é superior ao número de equações disponíveis para

determina-las. Para buscar a solução deste problema, diversos métodos surgiram com simplificações, alguns negligenciam a atuação das forças cisalhantes verticais entre as fatias, como o método de Bishop Simplificado, enquanto outros são mais rigorosos e estimam estes esforços, como o método de Morgenstern-Price (1965).

3.5 Gestão e análise de risco

Juntamente com os grandes benefícios que as barragens trazem, a necessidade de segurança avaliando os riscos faz-se necessária devido às grandes consequências de um rompimento. Para Fontenelle (2007), o risco de rompimento de uma barragem depende principalmente das suas características e dimensões, qualidade de projeto, construção e operação.

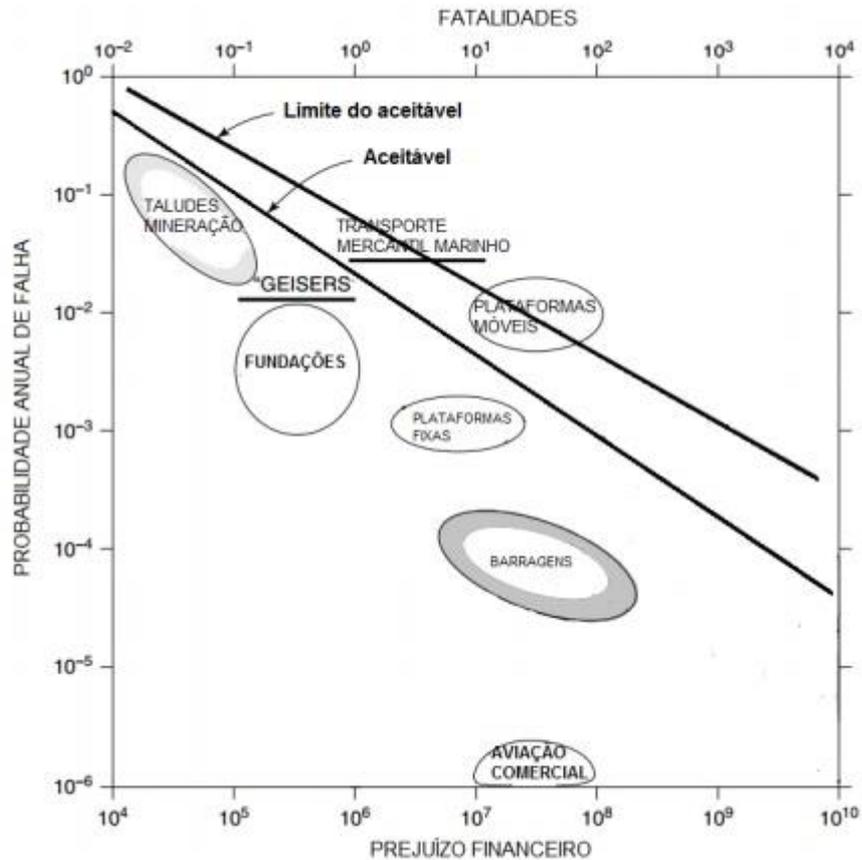
Existem também fatores associados ao meio ambiente, tais como a ocorrência de sismos e cheias, clima e capacidade de armazenamento. A etapa onde ocorre a verificação da tolerância dos riscos existentes leva em consideração principalmente fatores humanos e econômicos, como a população e instalações existentes a jusante do barramento.

Na engenharia, o risco é comumente definido como o produto da probabilidade de ocorrência de um evento pelas consequências desse evento, caso ele ocorra. A Figura 12 faz uma comparação de alguns empreendimentos, projetos e serviços potencialmente danosos economicamente e fatalmente ao seres humanos, mostrando resultados das análises de riscos e limites aceitáveis.

De acordo com Silveira (2007), os objetivos básicos desse processo sistemático de análise de risco no campo da segurança de barragens são:

- a) Identificar os riscos em potencial e os modos de ruptura;
- b) Proceder a uma estimativa estatística de risco;
- c) Avaliar a tolerabilidade de risco;
- d) Avaliação do potencial de redução de risco, através de medidas corretivas eventualmente necessárias;
- e) Estabelecimento de uma estratégia de atenuação de risco.

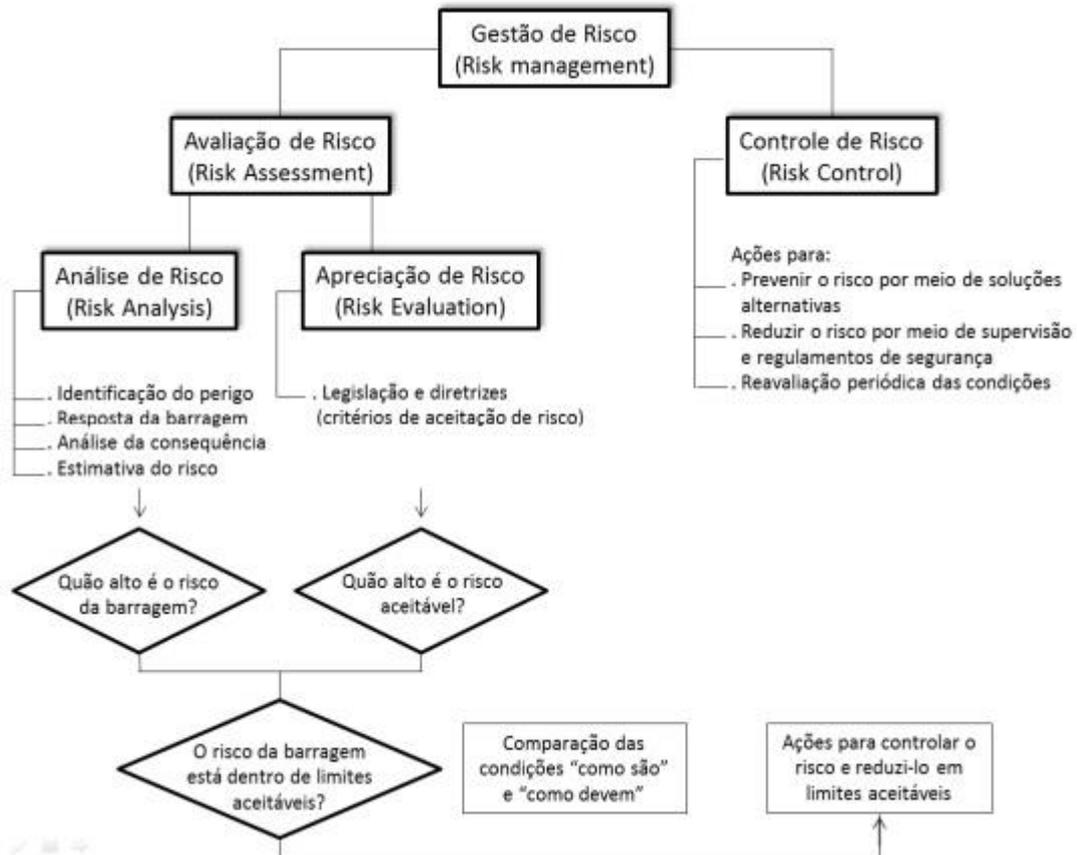
Figura 12 – Gráfico F-N de Baecher para diversos serviços e construções



Fonte: Rios 2015 modificada, Baecher e Christian, 2003

Estes fatores são considerados gestão do risco, conceitos atuais alcançados pela consciente demanda da sociedade devido às consequências que a ruptura de uma barragem pode causar. Segundo Melo (2014), na abordagem tradicional, que é centrada na segurança, a incerteza é levada em consideração, resultando em medidas bastantes conservadoras em relação aos carregamentos, resistência e fatores de segurança adotados. A Figura 13 mostra um modelo de atividades fundamentais de gestão de risco.

Figura 13 – Atividades fundamentais da gestão de risco



Fonte: Melo 2014 modificada, Kreuzer, 2000

Segundo Perini (2009), a análise de risco pode ser realizada de forma *qualitativa* ou *quantitativa*, ou variações destas, o qual irá depender do nível de detalhamento. As escolhas dos riscos estudados, objetivo da análise e todos os tipos de informações, são necessários para um levantamento mais completo possível a respeito da barragem a ser analisada.

Foi escolhido um método probabilístico aproximado para esta monografia, denominado FOSM (First Order Second Moment), utilizado de forma quantitativa como um dos componentes da análise de risco: obter a probabilidade de ruptura de uma barragem de enrocamento com núcleo de argila.

3.5.1 Métodos qualitativos

Os métodos *qualitativos* são descrições ou escalas com uma ordem numérica, descrevendo as consequências e grandezas de probabilidade sem precisar recorrer a métodos matemáticos ou estatísticos. Este método é bastante afetado pela experiência profissional avaliativa, que por não ser objetiva, é baseada no conhecimento e informações disponíveis. O método de Análise dos Modos de Falha e efeitos (FMEA) é um exemplo qualitativo que pode ser empregado tanto em barragem quanto em outras diversas indústrias e atividades sociais.

Segundo Caldeira (2008) este método indutivo permite:

- a) Avaliar os efeitos e a sequência de acontecimentos provocada por cada modo de falha relacionado aos requisitos operacionais, de manutenção ou ambientais do sistema;
- b) Determinar a importância de cada modo de falha sobre as condições normais de desempenho do sistema;
- c) Avaliar o impacto sobre a confiabilidade e a segurança do sistema considerado
- d) Classificar os modos de falha estudados, de acordo com a facilidade associada à sua detecção.

3.5.2 Métodos quantitativos

Os métodos *quantitativos* são baseados em valores numéricos, objetivando quantificar as incertezas dos danos e probabilidade dos eventos ocorrerem. No ponto de vista de Caldeira (2008), estes métodos não devem ser vistos como substituição das abordagens filosóficas tradicionais de segurança, mas como uma ferramenta avaliativa adicional, melhorando e racionalizando as decisões relativas à situação.

Para a identificação dos eventos que podem levar a falha, é recomendável utilização de um sistema de gestão de risco como ferramenta. Após os fatores problemáticos encontrados é necessário fazer a análise de risco para cada item, avaliado da forma mais conveniente, quantificando ou classificando sua probabilidade de ocorrência.

Em um contexto relacionado a barragem como é o caso deste trabalho, os principais itens que podem levar a ruptura são listados pela Agência Federal de Gestão de Emergências dos Estados Unidos – FEMA (2018):

- a) Transbordamento causado por inundações que excedem a capacidade da represa;
- b) Atos deliberados de sabotagem;
- c) Falha estrutural de materiais utilizados na construção de barragens;
- d) Movimento e/ou falha da fundação que apoia a barragem;
- e) Recalque e fissuração de barragens;
- f) Ocorrência de piping e erosão interna no solo;
- g) Fiscalização e manutenção inadequadas.

Nesta monografia, será utilizado um método probabilístico aproximado, com o objetivo de definir a probabilidade de falha estrutural dos materiais utilizados na construção da barragem, que é determinada quando o valor do fator de segurança (FS) é menor que “um”, ou seja, essa situação é o ponto crítico tendendo a falha. Os parâmetros do solo determinam os esforços resistentes e o estado de carregamento os esforços atuantes, sendo o FS uma relação destes.

Será realizada a análise de tensão deformação de uma barragem de enrocamento com núcleo de argila utilizando o software GeoStudio. O software utiliza o Método dos Elementos Finitos, para resolver a equação de equilíbrio e obter a distribuição das tensões na Barragem. Além disso, o software calcula o Fator de Segurança da barragem a partir do estado de tensões. Com os resultados obtidos será analisado a probabilidade de ruptura utilizando o FOSM.

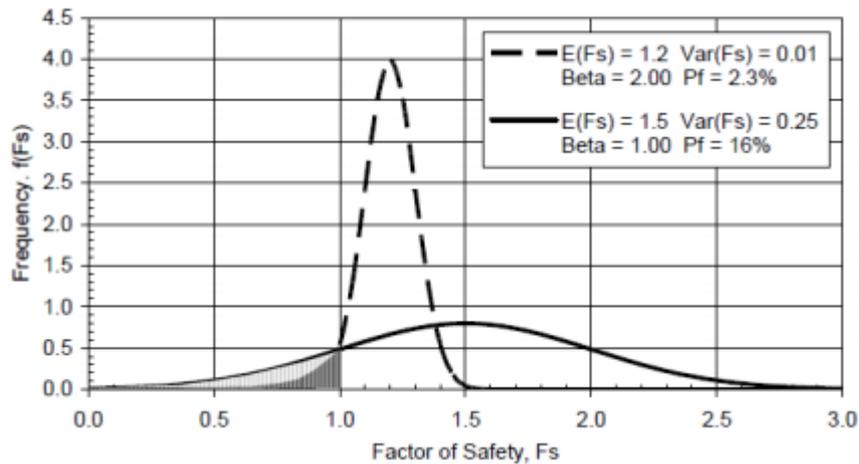
3.6 Conceitos básicos sobre estatística e probabilidade

A abordagem determinística leva em consideração os parâmetros obtidos por ensaios específicos para cada tipo de parâmetro (ângulo de atrito, peso específico, coesão, entre outros), e por mais aproximados os resultados destes ensaios, não devem ser considerados os únicos indicativos para uma boa avaliação de projeto. Devido as incertezas dos solos, é importante considerar a variabilidade dos parâmetros em cada tipo de material, e as análises probabilísticas são ferramentas que podem ser utilizadas para este objetivo.

São necessários conceitos básicos sobre estatística e probabilidade para entendimento da abordagem probabilística. Esta, na geotecnia, está ganhando seu espaço de forma complementar à determinística pois leva em consideração a variabilidade natural de solos e rochas, variando os parâmetros. O gráfico

apresentando na Figura 14 representa dois taludes, sendo um com FS de 1,2 e probabilidade de ruptura de 2,3% e o outro o valor do FS de 1,5, porém a probabilidade de ruptura é de 16%, valor consideravelmente maior mesmo tendo um FS superior.

Figura 14 – Função distribuição de probabilidade do FS e probabilidade de ruptura



Fonte: Gitirana Jr., 2005

Esta seção tem como objetivo apresentar os conceitos básicos sobre estatística e probabilidade, utilizados para compreensão do método probabilístico FOSM.

3.6.1 Tendência central

São formas utilizadas para resumir as principais características dos conjuntos de dados, as mais comuns são a média aritmética, a mediana e a moda. A média de um conjunto de “n” dados $x = \{x_1, \dots, x_n\}$, denominado “ \bar{X} ”, é a média aritmética

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.3)$$

3.6.2 Medidas de Dispersão

São medidas de variação que determinam a quantidade de dispersão dos dados, representando o quanto os valores do conjunto se distanciam da média. A variância (σ_s^2), o desvio padrão (σ_s) e o coeficiente de variação (CV) são as medidas mais comuns utilizadas para determinar a dispersão média em torno da média amostral. Essas medidas são definidas como:

- Variância (σ_s^2): é a média das diferenças ao quadrado entre cada parâmetro a ser observado e sua média aritmética. Para uma amostra contendo n observações, calcula-se de acordo com a equação:

$$\sigma_s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (3.4)$$

onde:

σ_s^2 : Variância;

X_i : Parâmetro;

\bar{X} : Média aritmética do parâmetro;

n : Número de elementos da amostra.

- Desvio padrão (σ_s): é a raiz quadrada da variância dado por:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_s^2} \quad (3.5)$$

onde:

σ_s : Desvio Padrão;

σ_s^2 : Variância.

- Coeficiente de variação (CV): é definido como o desvio padrão dividido pela média do parâmetro dado por:

$$CV = \frac{\sigma_s}{\bar{X}} \quad (3.6)$$

onde:

CV: Coeficiente de variação;

σ_s : Desvio padrão;

\bar{X} : Média aritmética do parâmetro.

3.6.3 Distribuição de probabilidade

A relação de cada valor de uma variável aleatória com a probabilidade de ocorrência, é representado pela distribuição de probabilidade. Existem várias distribuições publicadas na literatura, tais como a normal, log-normal, Poisson, exponencial, binomial e outras.

Também conhecida como distribuição de Gauss, a distribuição normal é uma das mais utilizadas em problemas geotécnicos e será utilizada neste trabalho. Sua função é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.7)$$

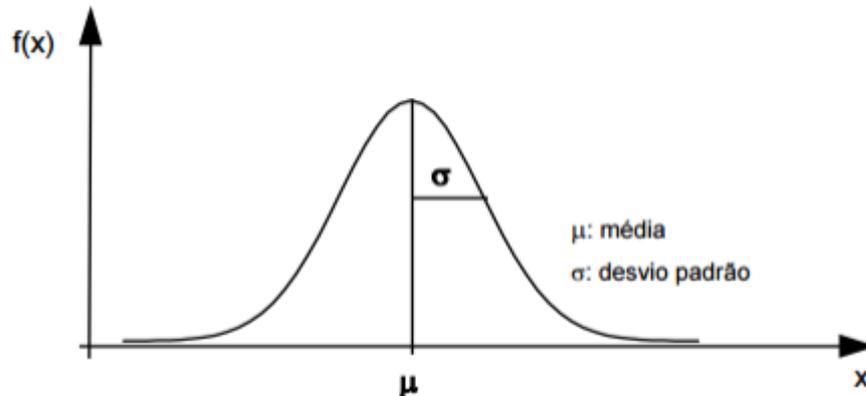
onde:

σ : Desvio Padrão, $\sigma > 0$;

μ : Média Aritmética, $-\infty < \mu < \infty$.

Algumas características da distribuição normal são a simetria e o formato de sino. Suas medidas de tendência central são iguais (média, mediana, moda), sua dispersão média é igual a 1,33 do desvio padrão e sua variável aleatória associada possui um intervalo infinito: $-\infty < \mu < \infty$. A Figura 15 mostra a representação de cada parâmetro no gráfico.

Figura 15 – Curva de distribuição normal



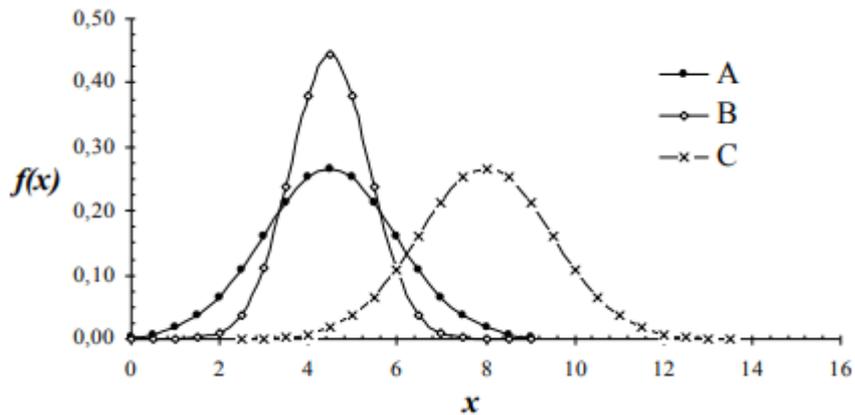
Ao analisar a Equação 3.7, as probabilidades da variável “x” dependem somente de dois parâmetros da função, ou seja, da média (μ) e do desvio padrão (σ). Uma distribuição normal diferente é gerada todas as vezes que for especificado uma determinada combinação entres os dois parâmetros. Na Figura 16 é possível observar três distribuições normais diferentes, A, B e C. Observa-se que as distribuições A e B possuem a mesma média (μ), porém desvio padrão (σ) diferentes, A e C possuem o mesmo desvio padrão (σ), porém média (μ) diferentes e B e C possuem ambos parâmetros diferentes.

3.7 Métodos de Análise Probabilística

Os métodos probabilísticos levam em consideração a variabilidade do solo como mencionado anteriormente, apresentando um resultado mais realista quando comparado somente aos resultados dos métodos determinísticos. Os métodos mais utilizados para quantificar as incertezas são:

- a) Método exato: Método de Monte Carlo;
- b) Método das Estimativas Pontuais (Rosenbleuth, 1975)
- c) Aproximações da Séria de Taylor da variável dependente: Método FOSM;

Figura 16 – Distribuições normais com parâmetros variados



Fonte: Levine *et al.*, 1998

As distribuições estatísticas dos parâmetros do solo (variáveis independentes) influenciam diretamente o valor do fator de segurança (variável dependente) definido por uma função matemática, possibilitando a obtenção da probabilidade de ocorrer a ruptura de um talude com os métodos supracitados. Os métodos também podem revelar quais os parâmetros que mais contribuem para a incerteza.

Nesta monografia será utilizado o método FOSM com o objetivo de obter a probabilidade de ruptura de um talude, assumindo como critério de falha, o valor do fator de segurança menor que um.

3.7.1 FOSM

O método First Order Second Moment (FOSM) é um truncamento da derivada de primeira ordem da série de Taylor, utilizando valores médios e desvios padrão como dados de entrada e de saída. É um método simples quando comparado aos outros métodos probabilísticos pois não é necessário o conhecimento da função de distribuição de probabilidade de cada variável e os cálculos necessários são simples, porém, exigem requisitos matemáticos referente às derivações.

Este método consiste basicamente em obter a variância do fator de segurança. São necessárias $n + 1$ análises de FS, para n variáveis independentes (parâmetros do solo). Para realizar as análises é necessário variar os valores de cada parâmetro, atribuindo valores médios aos demais parâmetros. Considera-se como o valor médio do FS a análise que utiliza todos os parâmetros com seu respectivo valor médio. Após a obtenção do fator de segurança para cada análise, é possível calcular a variância

do FS (σ^2_{FS}) considerando uma distribuição de probabilidade normal, de acordo com a equação:

$$\sigma^2_{FS} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial FS}{\partial x_i} \right)^2 \sigma^2_{x_i} \quad (3.8)$$

onde:

σ^2_{FS} : Variância do FS;

$\sigma^2_{x_i}$: Variância da variável independente;

x_i : Variável independente.

Para uma boa análise desse método, é importante observar o comportamento da função obtida através de cada variável independente. Recomenda-se este método quando o FS é uma função linear de acordo com a variação de cada parâmetro. Isso irá gerar uma melhor aproximação, pois a variância do FS (σ^2_{FS}) é obtida a partir da derivada do FS em relação a cada parâmetro.

4 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os critérios utilizados nas análises da barragem. Inicialmente foi realizada uma análise paramétrica variando o módulo de Elasticidade do material de transição. A partir dessas análises, será feita a escolha do módulo de elasticidade mais crítico. Este será utilizada como parâmetro médio nas análises probabilidade de ruptura de uma barragem e no final de construção e regime permanente.

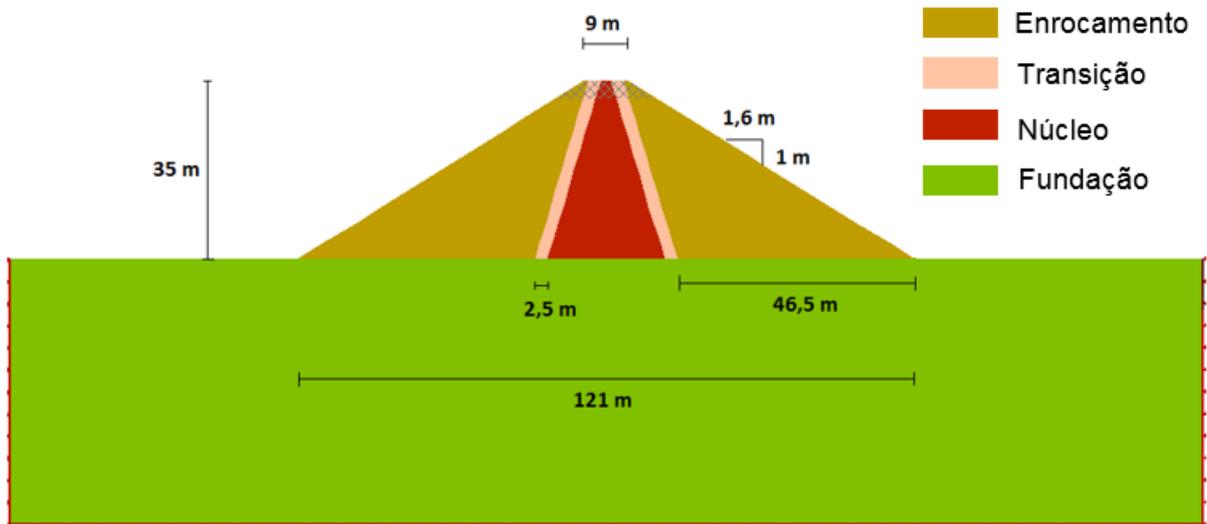
4.1 Características da barragem

As análises foram feitas baseadas em uma versão simplificada de uma barragem de enrocamento com núcleo de argila real, utilizando o programa GeoStudio 2012 para simulação. Foram desconsiderados alguns detalhes que não seriam relevantes para as análises que serão feitas nessa monografia e arredondados as dimensões com valores decimais. Os parâmetros médios do solo serão baseados no trabalho de Volkmer (2009).

4.1.1 Dimensões da barragem

A seção da barragem analisada é representada pela Figura 17. A barragem é formada por 3 zonas sendo, os espaldares de enrocamento, a transição de areia e o núcleo de argila. Foi considerado um único tipo de material para cada zona.

Figura 17 – Seção da barragem simulada no GeoStudio 2012.



A barragem possui as dimensões indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões da barragem de enrocamento com núcleo de argila.

Componentes	Dimensões
Largura da crista	9 m
Largura das zonas de transição	2,5 m
Largura da base do núcleo	23 m
Largura de cada lado do espaldar	46,5 m
Inclinação do espaldar	1,6H: 1V
Inclinação do núcleo	0,3H: 1V
Largura total	121 m
Altura total	35 m

Em relação as dimensões da fundação, são atribuídos valores suficientes para não interferirem na análise da barragem, por ser um material rochoso e muito rígido.

4.1.2 Parâmetros dos materiais

Volkmer (2009) fornece os parâmetros médios que serão utilizados nessa monografia para a análise no GeoStudio. Para a análise paramétrica, variou-se o módulo de elasticidade de 75.000 kPa à 300.000 kPa, para observar a influência da rigidez da transição, considerando os parâmetros apresentados na Tabela 2. Após esta análise, será feita a probabilidade de ruptura da barragem, sendo utilizado como valor médio

na análise probabilística de ruptura, o módulo de elasticidade que for referente ao fator de segurança (FS) mais crítico encontrado a partir da variação supracitada.

Tabela 2 - Parâmetro considerados para os materiais de enrocamento, transição núcleo e fundação.

Parâmetro	Enrocamento	Transição	Núcleo	Fundação
γ_{nat} (KN/m ³)	20	20	16	27
γ_{sat} (KN/m ³)	21	21	18	27
c' (kPa)	0	0	30	30
ϕ' (°)	45	40	30	28,5
E (MPa)	60	75 a 300	40	150
ν	0,25	0,35	0,3	0,35
k (m/s)	10^{-1}	10^{-4}	10^{-8}	10^{-8}

Para as análises probabilísticas, serão utilizados os mesmos valores médios dos parâmetros da Tabela 2. Para a escolha do parâmetro médio do módulo de elasticidade (E) que não foi especificado anteriormente, será escolhido o mais crítico, ou seja, o valor referente ao menor FS encontrado nas análises ao variar o módulo em 75.000, 150.000, 200.000 e 300.000 kPa.

Nas análises paramétricas é esperado uma maior concentração de tensões nas zonas de transição ao aumentar sua rigidez, dessa forma, poderá ocorrer a diminuição do FS devido as diferentes compressibilidades dos materiais adjacentes ao material de transição, dificultando a compatibilização ao concentrar maiores tensões.

4.2 Análise paramétrica do arqueamento de tensões

As análises serão feitas variando o módulo de elasticidade (E) em 75.000 kPa, 150.000 kPa, 200.000 kPa e 300.000 kPa, a fim de obter diferentes estados de tensão baseados no regime elastoplástico. Além disso, será observado a influência do E no arqueamento de tensões. As simulações para análise de tensões serão feitas

utilizando o programa SIGMA/W, que faz parte do pacote GeoStudio 2012 e é baseado no Método dos Elementos Finitos.

4.2.1 Principais indicadores do estado de tensão-deformação

Para as análises de estados de tensões e deslocamentos que ocorrem no interior da barragem, serão apresentados abaixo os principais indicadores do estado-deformação:

- ✓ Tensão principal maior (σ_1): Tensão vertical para verificação da concentração de tensões.
- ✓ Tensão principal menor (σ_3): Tensão horizontal para avaliar o fraturamento hidráulico ao comparar com a pressão hidrostática atuante, quando for feita a análise de fluxo no regime permanente de operação.
- ✓ Tensão cisalhante (τ_{xy}): Apresenta as regiões com maiores solicitações devido aos recalques diferenciais, que ocorre devido aos diferentes módulos de deformação dos materiais adjacentes.
- ✓ Tensão vertical atuante (σ_v): Tensão devido ao peso próprio para determinada altura ($\gamma \cdot h$). O coeficiente obtido através da divisão $\frac{\sigma_1}{\gamma \cdot h}$, segundo Matheus (2006), a fim de avaliar o fenômeno de transferência de tensões, os valores inferiores a 1,0 indicam que as transferências ocorreram do núcleo para as transições e espaldares e quando maior que 1,0 dos espaldares e transições para o núcleo.
- ✓ Deslocamento vertical (δ_y) e horizontal (δ_x): São os deslocamentos que acontecem ao longo da barragem, devido as tensões atuantes e seus diferentes parâmetros referentes a cada material. É importante analisar os deslocamentos, pois os recalques diferenciais influenciam os valores das tensões de cisalhamento.
- ✓ Zona de plastificação: É quando a resistência mobilizada atinge a resistência máxima do solo, ou seja, é referente ao FS local de valor igual a 1, representada pela razão entre essas tensões. $FS_{local} = \frac{\tau_{exis}}{\tau_{mob}} = 1$

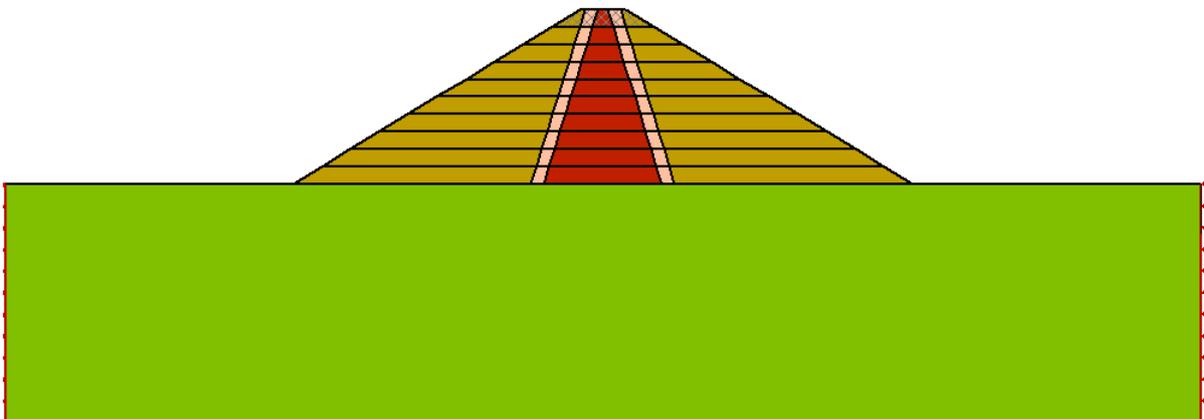
Nas análises é esperado que as tensões sejam aliviadas no núcleo e ocorram marcantes concentrações nas zonas de transição. Os indicadores de estado de

tensão-deformação serão analisados a 7 m, 14 m e 24,5 m de altura a partir da fundação.

4.3 Análise probabilística no final de construção

Utilizando o programa SIGMA/W, foi escolhido o número de 10 camadas sobrepostas para simular a construção da barragem, a fim de aprimorar os resultados de tensão-deformação como mostra Figura 18. As análises de tensões foram feitas para a análise de arqueamento de tensões, e serão exportadas para o Slope/W para a análise de estabilidade e obtenção das variações do FS.

Figura 18 – Seção por camadas da barragem.



Para análise de estabilidade do talude será utilizado o programa SLOPE/W, que faz parte do pacote GeoStudio 2012. O auxílio do programa é essencial para obtenção dos diferentes valores atribuídos ao fator de segurança que são necessários para análise probabilística. Será utilizado o método FOSM objetivando quantificar a análise de risco com a análise probabilística, também será possível avaliar a influência de cada parâmetro (E e ϕ) em relação ao fator de segurança.

Existem outros parâmetros como coesão e peso específico que são abordados em outras monografias como a de Rios (2015), porém as influências na probabilidade de ruptura são insignificantes quando comparados ao do ângulo de atrito. Nesse trabalho será levado em consideração o módulo de elasticidade (E) mesmo não sendo esperado grande influência na probabilidade de ruptura da barragem em geral, porém, espera-se que na análise de arqueamento de tensões apresente a importância desse parâmetro na influência de fissuras que podem ser internas ou externas, devido aos distintos comportamentos de tensões em diferentes materiais adjacentes, e que podem provocar maiores problemas.

Para utilização do método é necessário o desvio padrão (σ_s) dos parâmetros a serem analisados, a Tabela 3 apresenta os coeficientes de variação (CV) fornecidos pela literatura. Não foi encontrado um CV específico para o enrocamento, estipulando o valor de 5%, que está entre o CV do ângulo de atrito geral encontrado em outra literatura.

Tabela 3 – Coeficientes de variação.

Parâmetro	CV (%)	CV adotado (%)	Fonte
Ângulo de atrito ϕ (geral)	2 - 13	5	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Ângulo de atrito ϕ (areia)	5 - 15	10	Baecher e Christian (2003)
Ângulo de atrito ϕ (argila)	12 - 56	20	Baecher e Christian (2003)
Módulo de Elasticidade (E)	2 - 42	30	Baecher e Christian (2003)

4.4 Análise probabilística no regime permanente

Será utilizado o programa SEEP/W para a análise de fluxo, que permite a obtenção da Carga Total e Poropressão. Para definir as propriedades dos solos, é considerado a parte não saturada ao estimar curvas características do solo a partir de valores médios, correspondente a relação entre a sucção mátrica e o volume de conteúdo de água no solo. São definidas também as permeabilidades nos estados saturados e não saturados.

Para a análise probabilística de regime permanente de operação, as configurações utilizadas no SEEP/W serão importadas para o SLOPE/W, a fim de obter os fatores de segurança a cada simulação. Quando comparadas às análises de final de construção, é esperado influência à montante da barragem, devido as poropressões e o peso de água do reservatório.

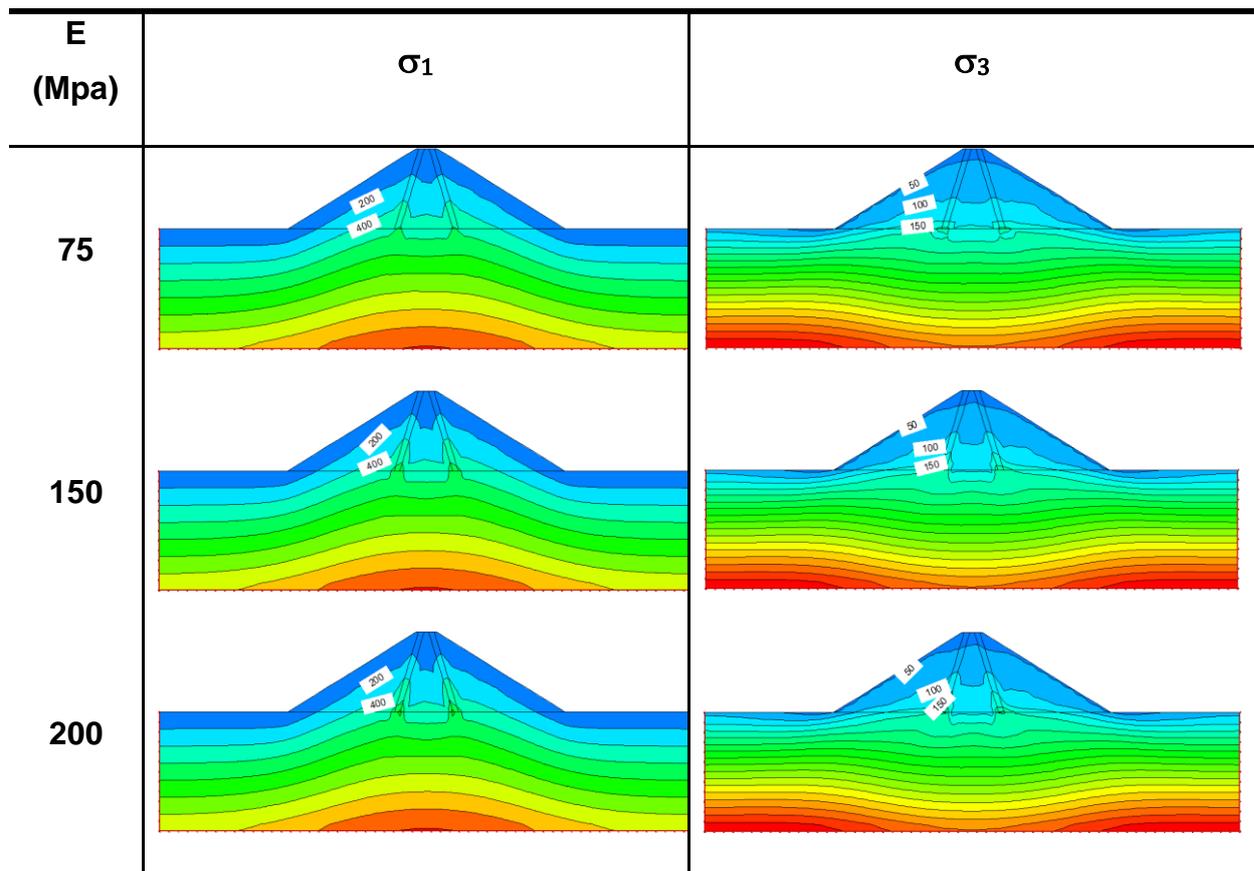
5 RESULTADOS

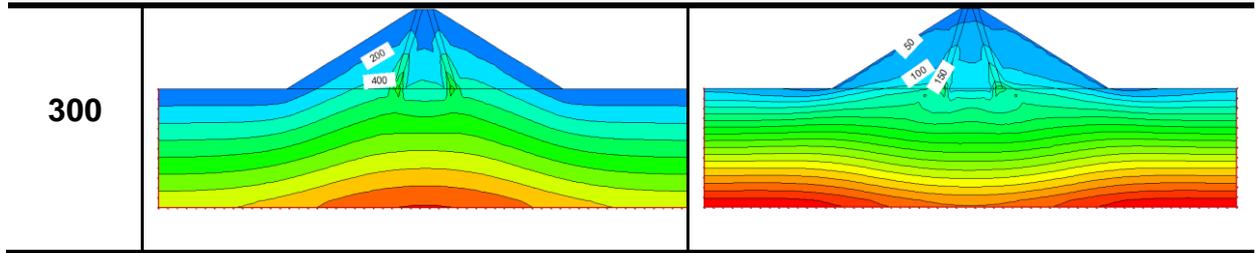
5.1 Resultado do arqueamento de tensões no final de construção

As análises paramétricas do arqueamento de tensões foram baseadas no trabalho de Volkmer (2009). Na barragem analisada, de enrocamento com núcleo de argila, variou-se a rigidez do material de transição em 75.000 kPa, 150.000 kPa, 200.000 kPa e 300.000 kPa, tornando possível verificar a influência da rigidez desse material.

Observa-se na Tabela 4 um alívio relevante na região do núcleo e maior concentração nas transições tanto das tensões principais maiores (σ_1) quanto das tensões principais menores (σ_3), a medida que o valor do módulo de elasticidade (E) aumenta.

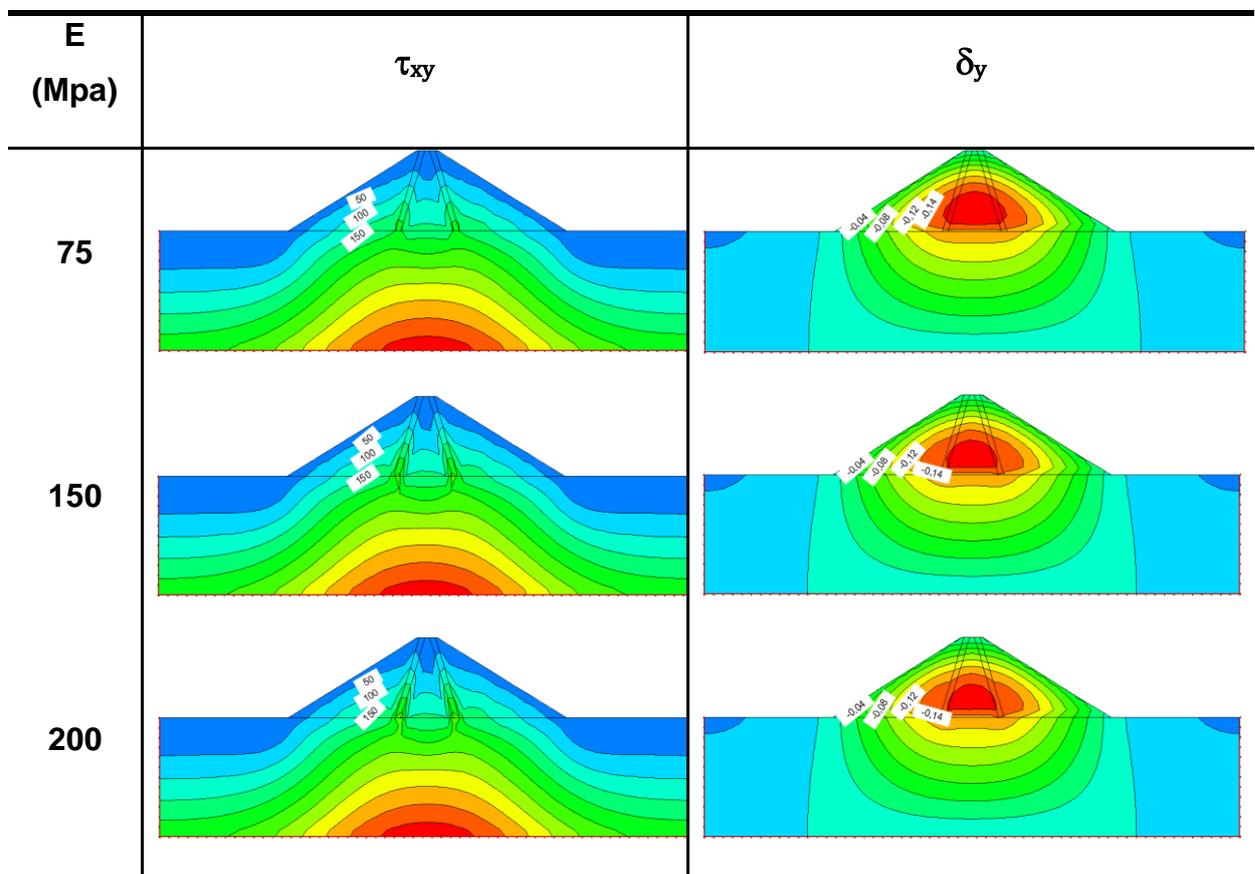
Tabela 4 – Comparação dos resultados das tensões principais maior e menor variando o módulo de elasticidade das transições.

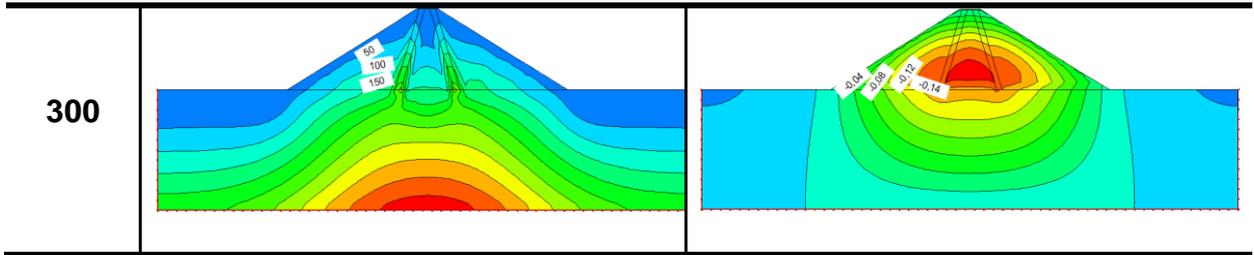




Observa-se na Tabela 5 que as tensões de cisalhamento tendem a manter o mesmo comportamento das tensões principais, uma maior concentração de tensões nas zonas de transição e alívio no núcleo. Essa concentração das tensões cisalhantes é causada pela diferença de deslocamento vertical que ocorre entre os materiais adjacentes por seus módulos de elasticidade (E) serem diferentes. Pode ser observado também que com o aumento do módulo do material da transição, ocorre um aumento das tensões cisalhantes na transição.

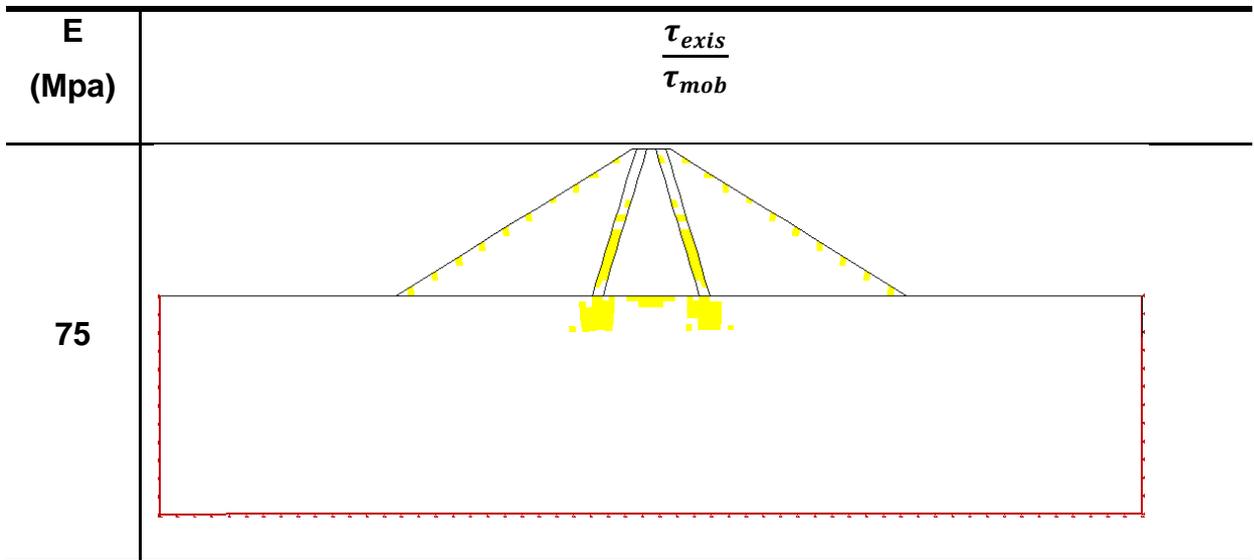
Tabela 5 – Comparação dos resultados das tensões cisalhantes e deslocamentos verticais variando o módulo de elasticidade das transições.

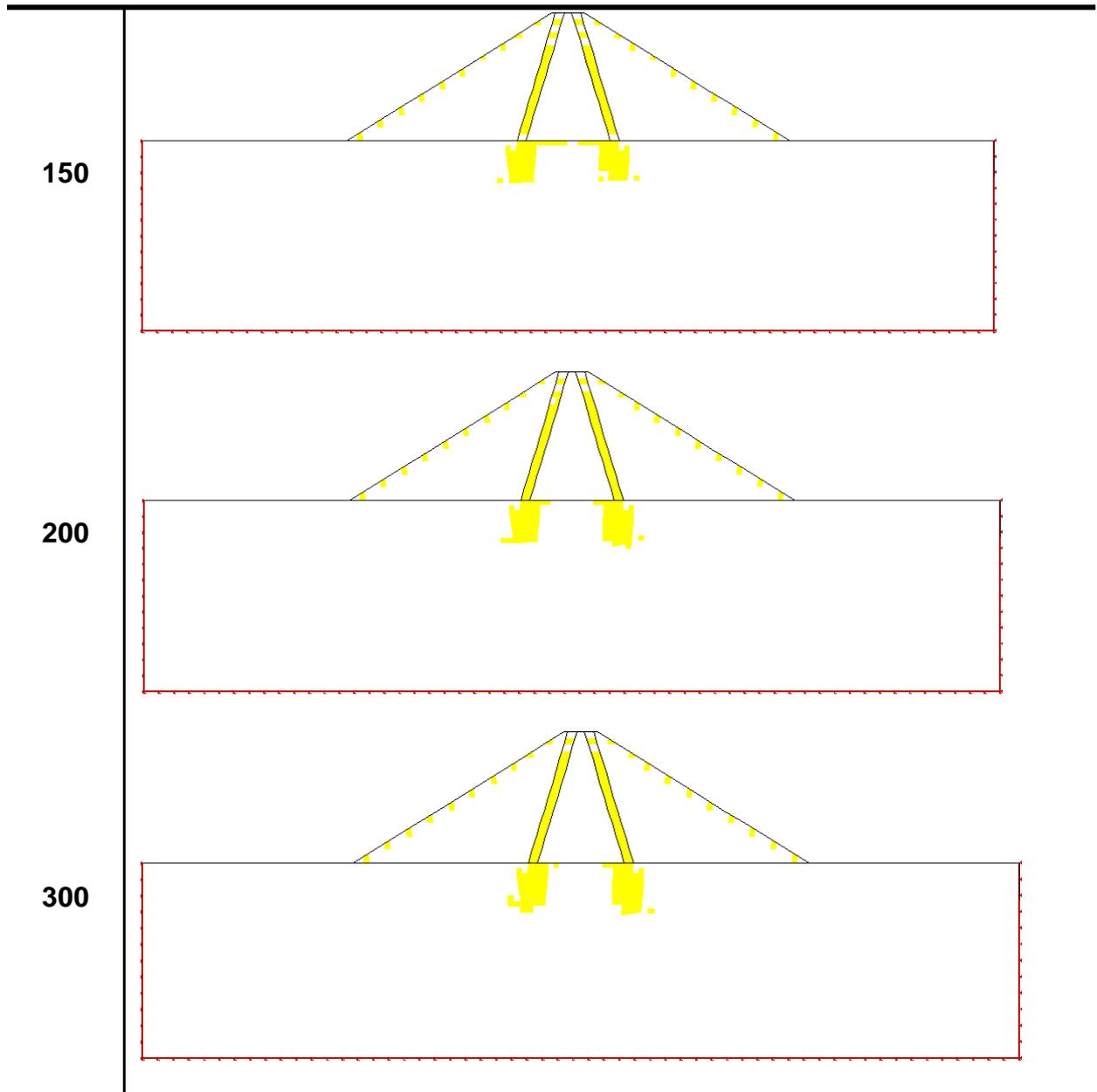




Observa-se na Tabela 6 que nas zonas de plastificação, não houve uma grande diferença devido as mudanças de rigidez. As zonas plastificadas se mantem somente nas transições mesmo com as variações dos módulos de elasticidade (E). É observado, entretanto, que, a zona de plastificação para módulos maiores ocupam todo o comprimento da transição, enquanto para módulos menores a plastificação ocorre na região inferior da transição. Além disso, na superfície do enrocamento acontece plastificação devido à baixa coesão do material de enrocamento, simulando o efeito de “casca”.

Tabela 6 – Comparação dos resultados das zonas de plastificação variando o módulo de elasticidade das transições.





A partir dos resultados, observa-se que com o aumento da rigidez nas zonas de transição, as tensões se concentram nessa região e a transferência de tensões para a fundação ocorre de forma mais concentrada.

Vale ressaltar que como não houve plastificação no núcleo dessa barragem, significa que não ocorreu fissuras, no entanto, é importante a utilização de tratamentos na fundação da barragem devido a plastificação na região em contato com o material de transição.

5.1.1 Comparação da tensão principal maior em diferentes alturas

As Figuras 19, 20 e 21 trazem o comportamento da tensão principal maior (σ_1) em 7 m, 14 m e 24,5 m de altura ao longo da seção da barragem, partindo da base da fundação. As quatro curvas referentes aos diferentes módulos de elasticidade são apresentadas em conjunto.

Figura 19 – Comparação da tensão principal maior (σ_1) a 7 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

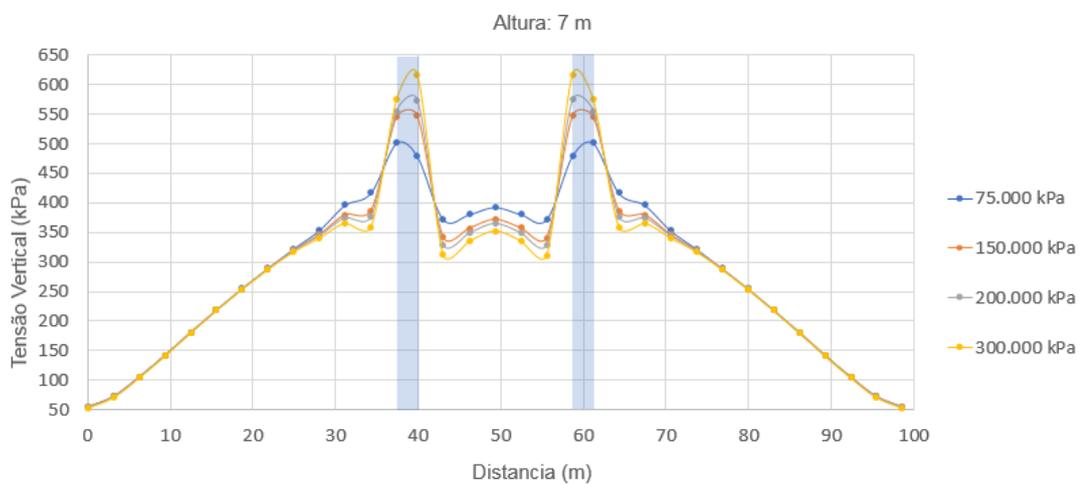


Figura 20 – Comparação da tensão principal maior (σ_1) a 14 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

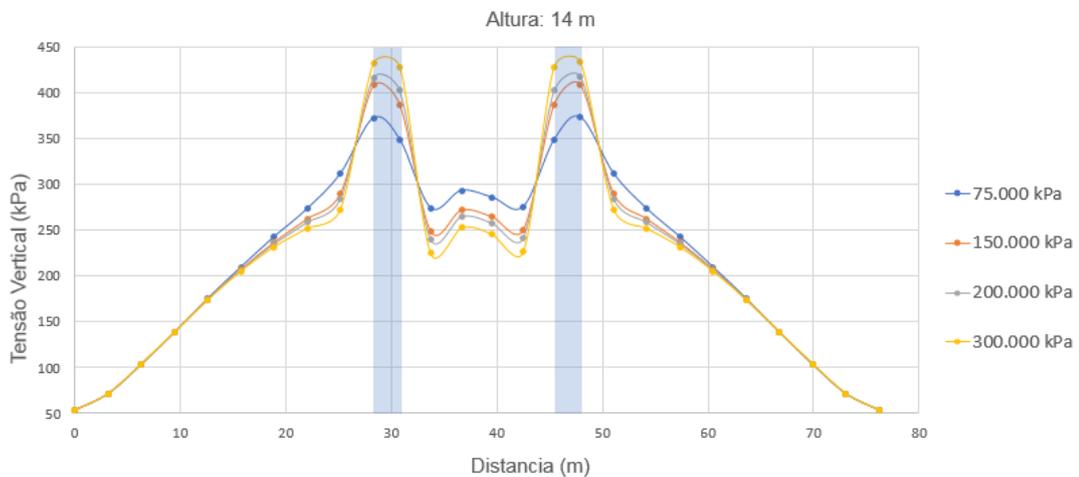
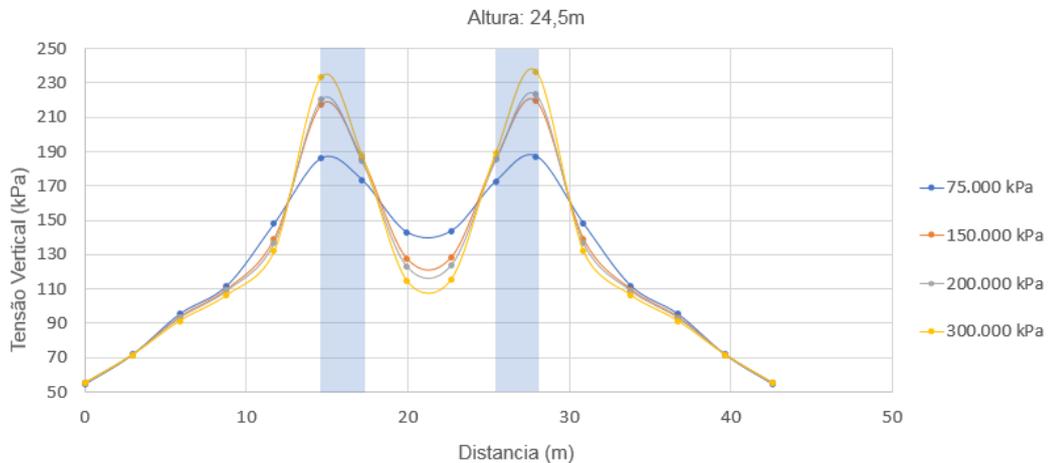


Figura 21 – Comparação da tensão principal maior (σ_1) a 24,5 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.



Observa-se que nas três alturas, a diferença de rigidez entre os materiais provoca uma concentração de tensões na região das transições e um alívio no núcleo, um comportamento já esperado.

5.1.2 Comparação da tensão principal menor em diferentes alturas

As Figuras 22, 23 e 24 trazem o comportamento da tensão principal menor (σ_3) em 7 m, 14 m e 24,5 m de altura ao longo da seção da barragem, partindo da base da fundação. As quatro curvas referentes aos diferentes módulos de elasticidade são apresentadas em conjunto.

Figura 22 – Comparação da tensão principal menor (σ_3) a 7 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

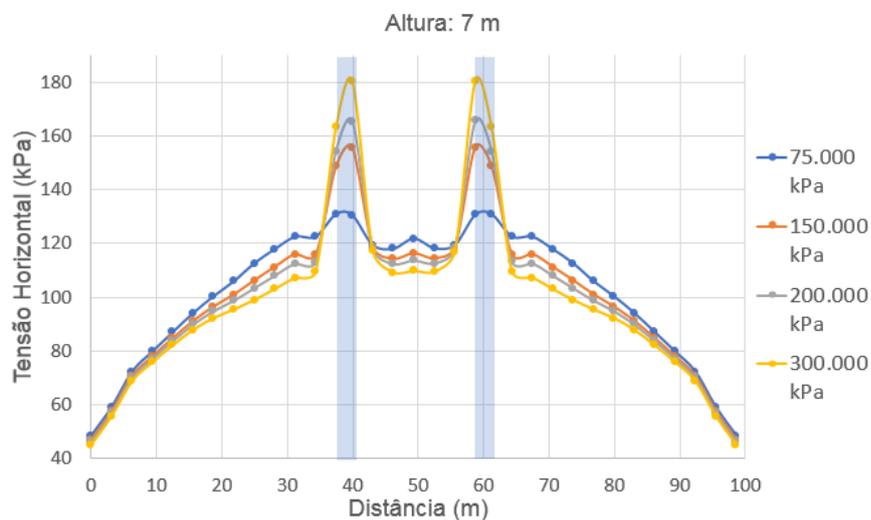


Figura 23 – Comparação da tensão principal menor (σ_3) a 14 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

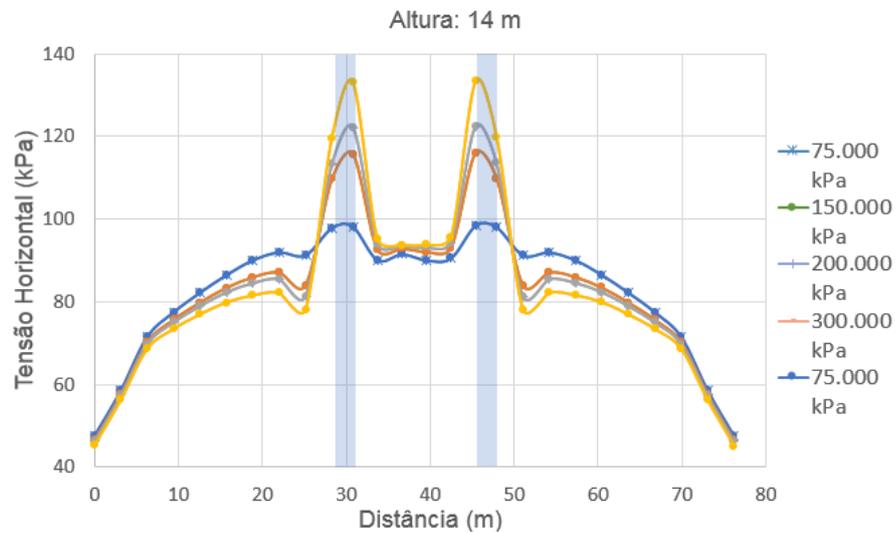
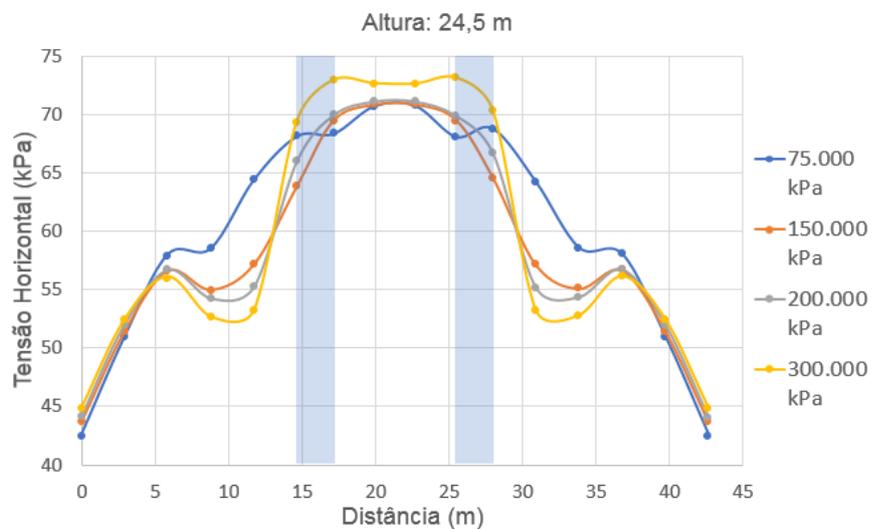


Figura 24 – Comparação da tensão principal menor (σ_3) a 24,5 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.



Observa-se que nas alturas 7 m e 14 m ocorre um comportamento bastante parecido com as tensões principais maiores (σ_1), a diferença de rigidez entre os materiais provoca uma concentração de tensões na região das transições e um alívio no núcleo, um comportamento já esperado. Na altura de 24,5 m, pela tensão ser bem menor não existe uma diferença relevante entre a transição e o núcleo.

Comparando com as tensões principais maiores (σ_1), além as tensões serem menores, as diferenças entre as tensões nas zonas de transição e no núcleo também são menores.

5.1.3 Comparação da tensão cisalhante em diferentes alturas

As Figuras 25, 26 e 27 trazem o comportamento da tensão cisalhante (τ_{xy}) em 7 m, 14 m e 24,5 m de altura ao longo da seção da barragem, partindo da base da fundação. As quatro curvas referentes aos diferentes módulos de elasticidade são apresentadas em conjunto.

Figura 25 – Comparação da tensão cisalhante (τ_{xy}) a 7 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

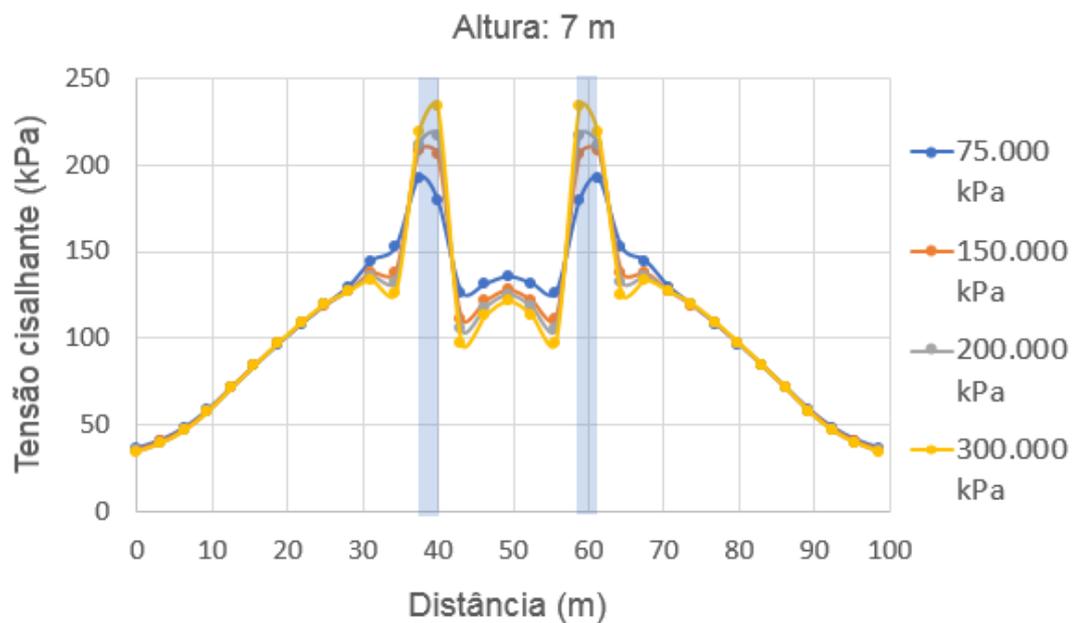


Figura 26 – Comparação da tensão cisalhante (τ_{xy}) a 14 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

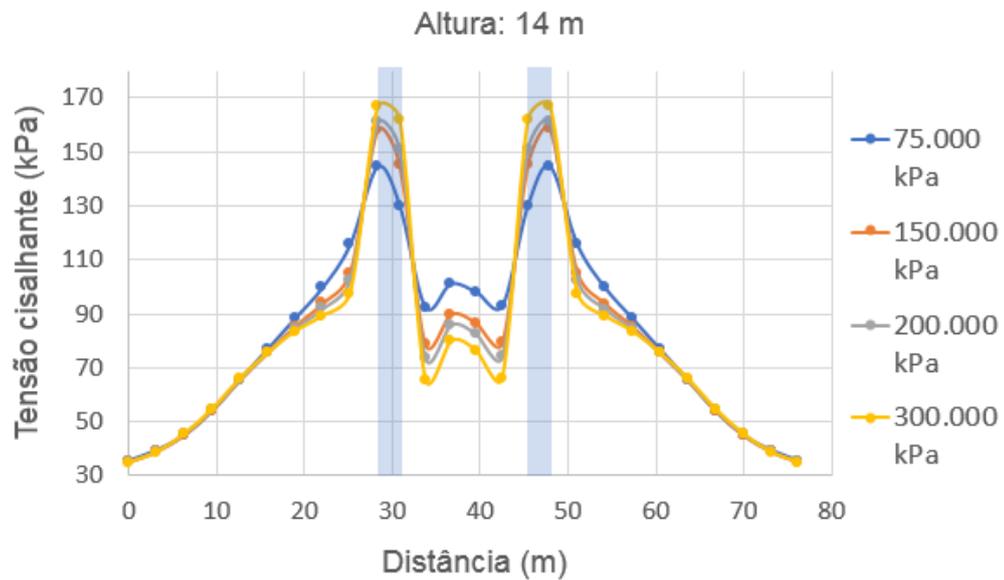
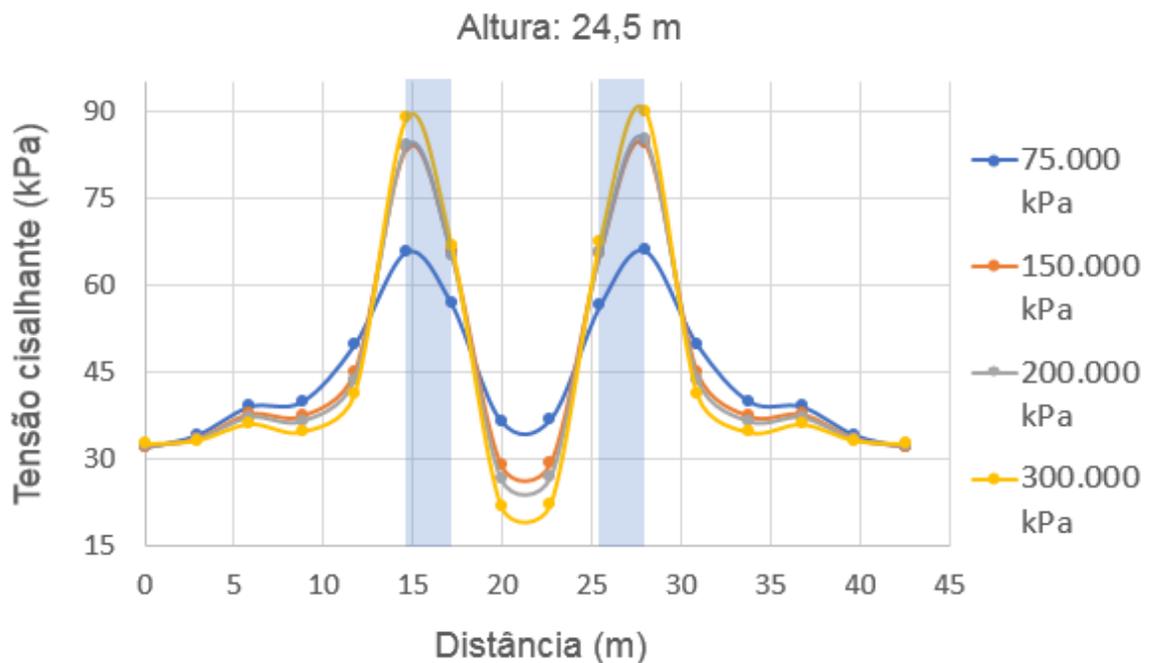


Figura 27 – Comparação da tensão cisalhante (τ_{xy}) a 24,5 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.



Observa-se que nas três alturas, a diferença de rigidez entre os materiais provoca uma concentração de tensões na região das transições e um alívio no núcleo, um comportamento já esperado.

5.1.4 Comparação da tensão principal maior e o peso próprio atuante em diferentes alturas

As Figuras 28, 29 e 30 trazem o comportamento da relação entre a tensão principal maior (σ_1) e o peso próprio atuante ($\gamma \cdot h$) em 7 m, 14 m e 24,5 m de altura ao longo da seção da barragem, partindo da base da fundação. As quatro curvas referentes aos diferentes módulos de elasticidade são apresentadas em conjunto. Essa comparação tem como objetivo um aprimoramento das análises.

Figura 28 – Comparação da relação da tensão principal maior (σ_1) e o peso próprio atuante ($\gamma \cdot h$) a 7 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

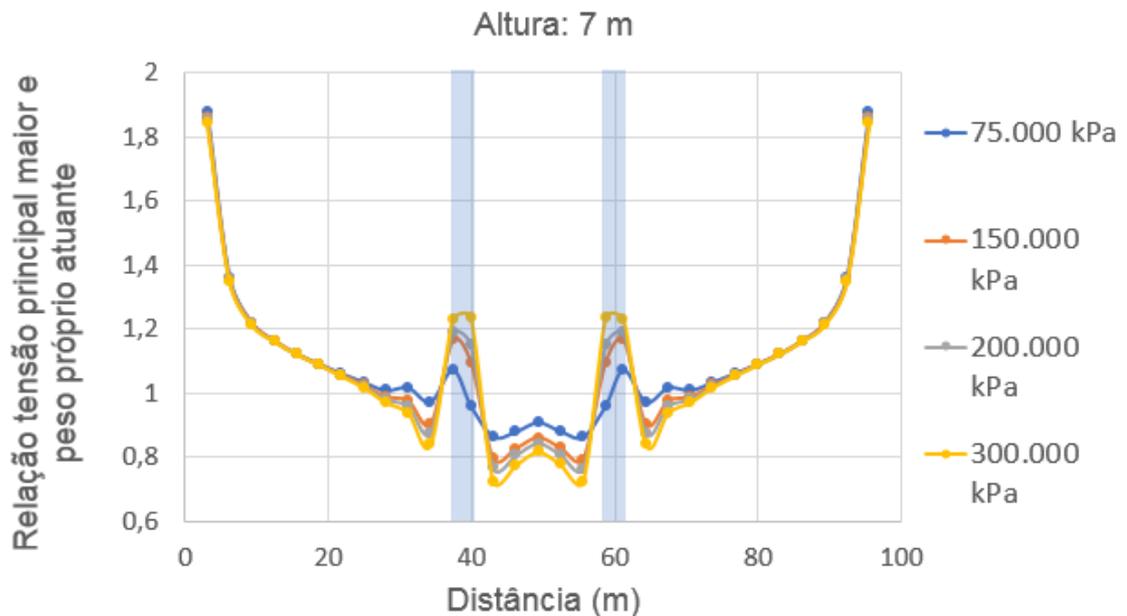


Figura 29 – Comparação da relação da tensão principal maior (σ_1) e o peso próprio atuante ($\gamma \cdot h$) a 14 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição

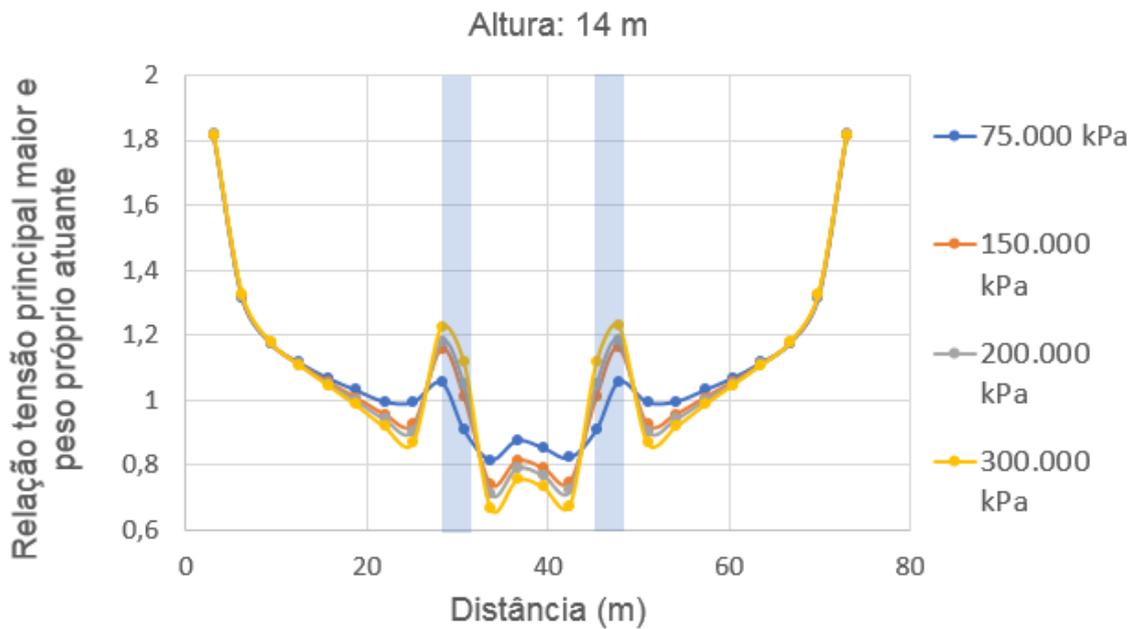
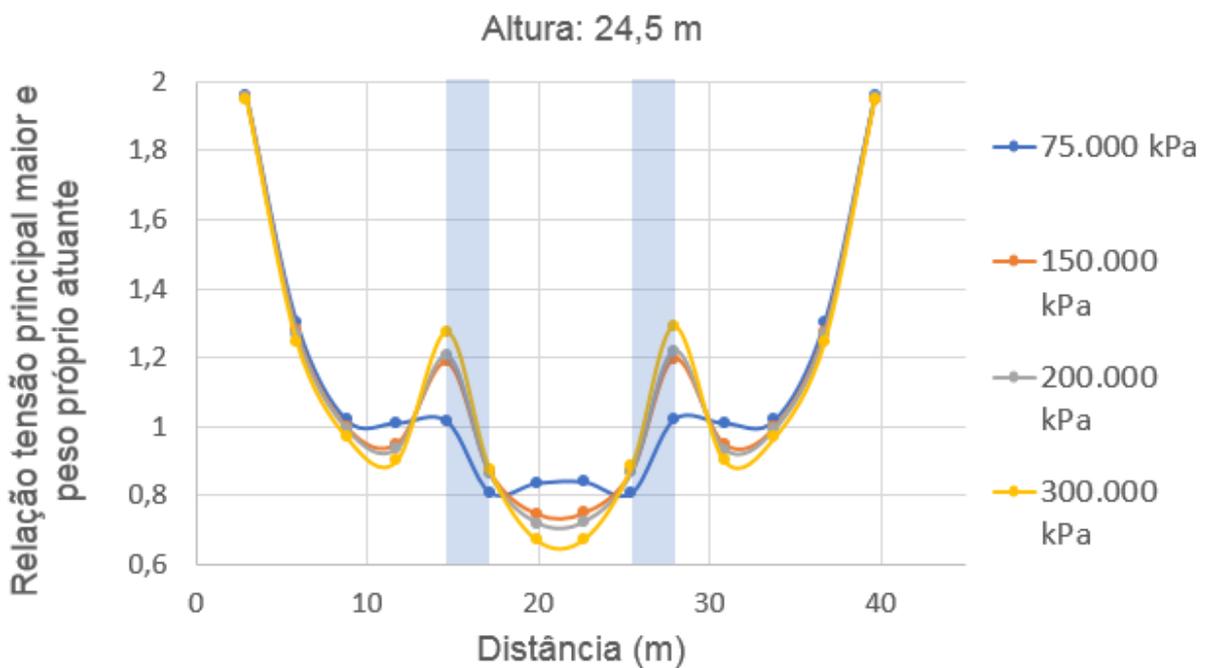


Figura 30 – Comparação da relação da tensão principal maior (σ_1) e o peso próprio atuante ($\gamma \cdot h$) a 24,5 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.



O coeficiente analisado é obtido através da divisão $\frac{\sigma_1}{\gamma \cdot h}$. De acordo com Matheus (2006), é importante ressaltar que o valor ideal seria próximo de 1 para não ser uma taxa de transferência de tensões muito expressiva. Nas alturas de 7 m e 14 m, na região do núcleo no centro da barragem, esses valores ficaram numa faixa de 0,8 a 0,9, indicando a transferência de tensões não muito expressivas do núcleo para a transição e espaldares, já na altura 24,5 m essa taxa ficou mais expressiva, chegando a 0,6.

Observa-se uma marcante concentração de tensões na zona de transição quando comparado aos materiais adjacentes. Essa região consegue concentrar grande parte das tensões pois o limite de resistência do material de transição não foi atingido.

5.1.5 Comparação do deslocamento vertical (δ_y) em diferentes alturas

As Figuras 31, 32 e 33 trazem o comportamento do deslocamento vertical (δ_y) em 7 m, 14 m e 24,5 m de altura ao longo da seção da barragem, partindo da base da fundação. As quatro curvas referentes aos diferentes módulos de elasticidade são apresentadas em conjunto.

Figura 31 – Comparação do deslocamento vertical (δ_y) a 7 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

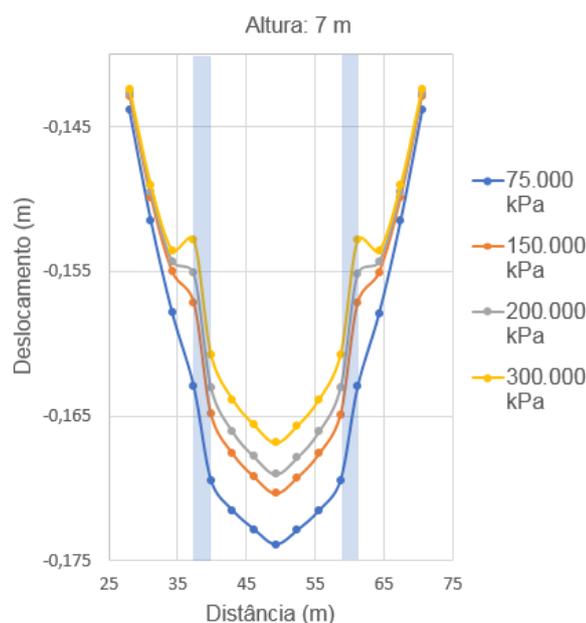


Figura 32 – Comparação do deslocamento vertical (δ_y) a 14 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

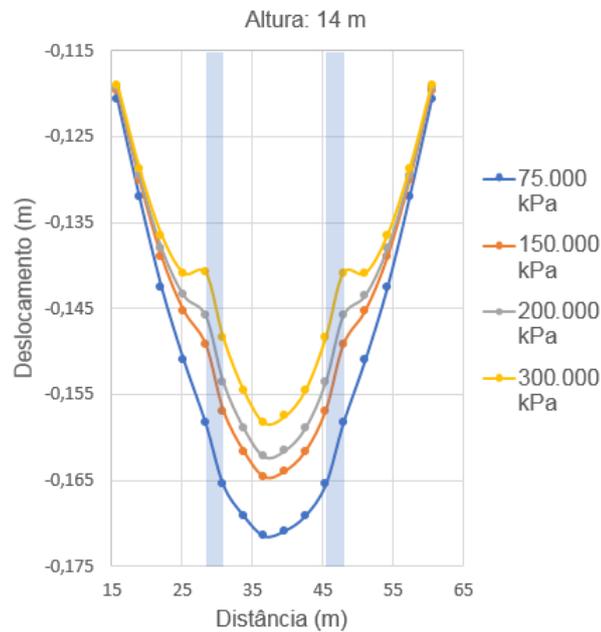
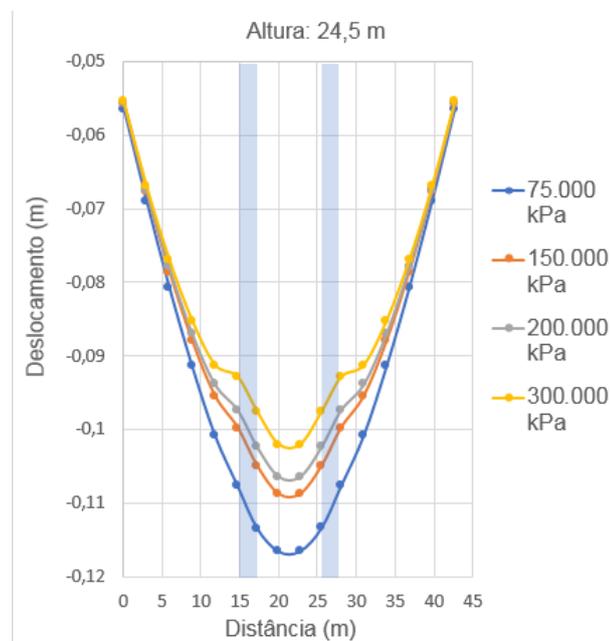


Figura 33 – Comparação do deslocamento vertical (δ_y) a 24,5 m para diferentes módulos de elasticidade (E) no material de transição.

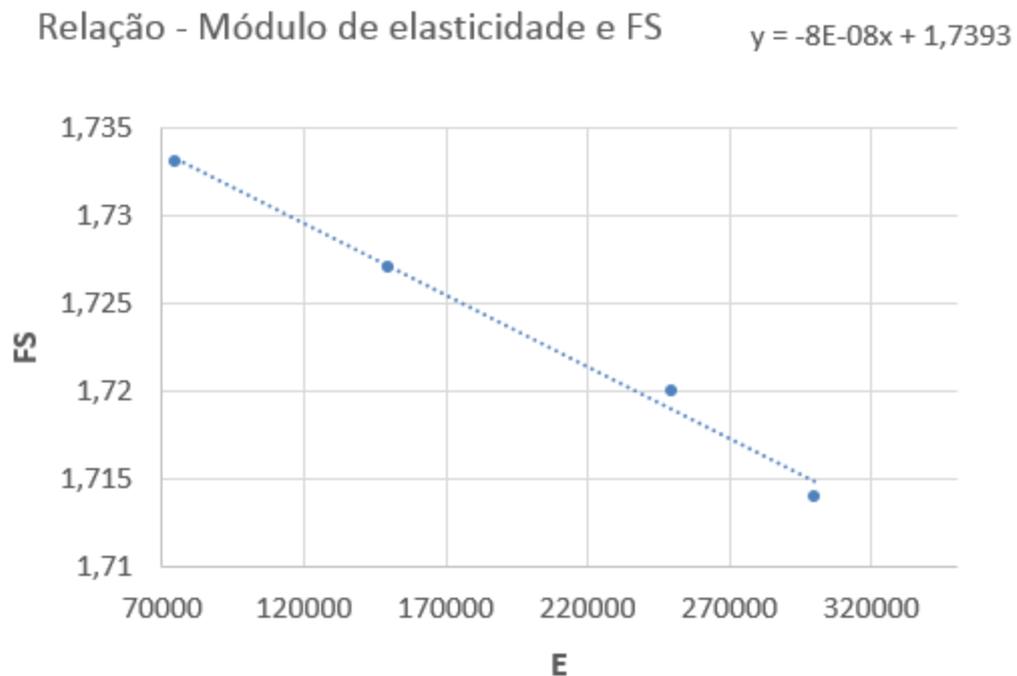


Observa-se que os maiores deslocamentos verticais acontecem no núcleo da barragem mesmo em altura diferentes e quanto menor o módulo de elasticidade do material de transição (E) menor a rigidez e consequentemente maiores deslocamentos.

5.2 Resultado do método FOSM do final de construção

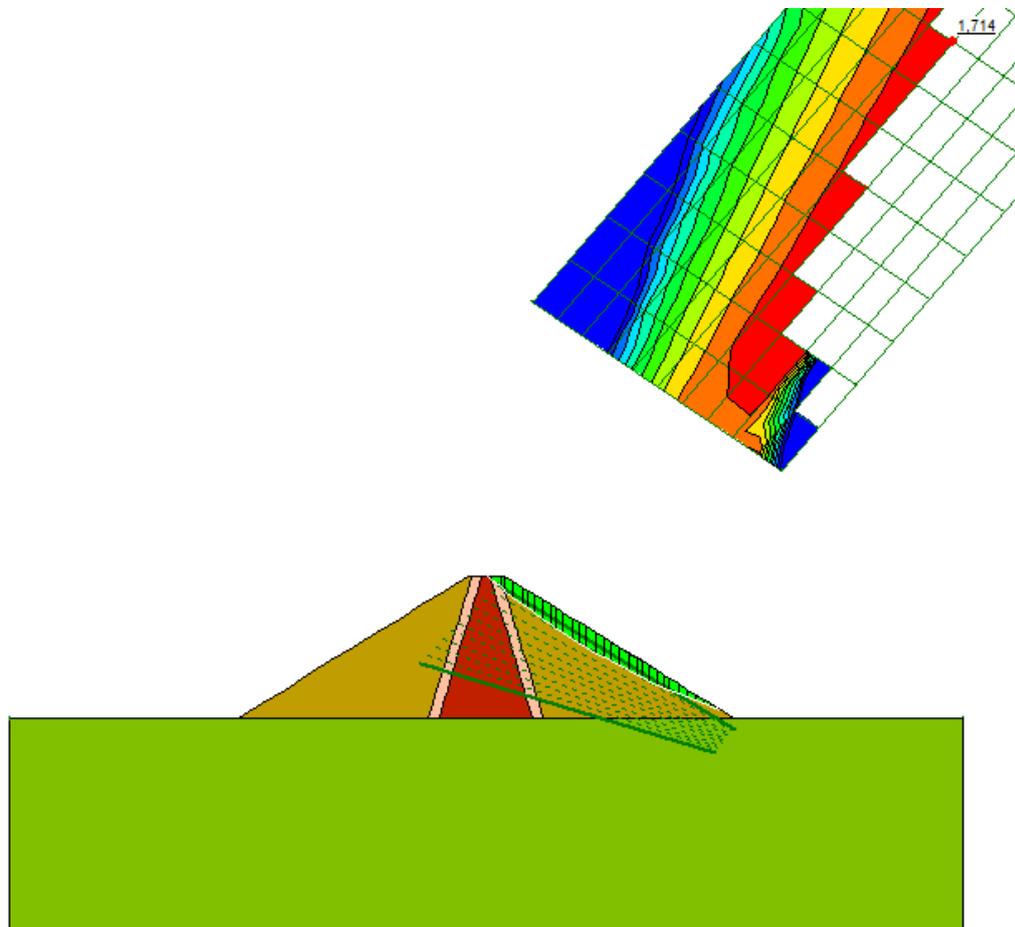
A escolha do módulo de rigidez médio do material de transição, a ser utilizado para a análise probabilística, pode ser avaliada pela Figura 34. Onde mostra linearmente que, quanto maior o E, menor o FS, ou seja, o FS médio que será utilizado para análise probabilística é o mais crítico: 300.000 kPa.

Figura 34 – Relação entre o módulo de elasticidade (E) e o fator de segurança (FS).



Será utilizado o programa SLOPE/W, também do pacote GeoStudio 2012, para obter a análise de estabilidade de talude da barragem no final de construção. Foram totalizadas 30 simulações somente para encontrar as funções em relação ao FS. A Figura 35 mostra uma análise de estabilidade de talude da barragem, com seu fator de segurança crítico e superfície de ruptura.

Figura 35 – Superfície de ruptura a jusante com os valores médios dos parâmetros e FS médio de 1,714.



Para o método FOSM, como já dito, é necessário o desvio padrão (σ_s) de cada parâmetro a ser variado, a Tabela 7 apresenta os cálculos dos valores utilizado.

Tabela 7 – Cálculo do desvio padrão dos parâmetros.

Parâmetros	Material	Média	CV (%)	σ_s
φ	Enrocamento	45	5	2,3
	Transição	40	10	4,0
	Argila	30	20	6,0
E	Enrocamento	60000		18.000,0
	Transição	300000	30	90.000,0
	Argila	40000		12.000,0

As análises foram feitas variando os valores dos parâmetros médios de cada material: enrocamento transição e argila. Essa variação é feita da seguinte forma: a partir da média, varia-se 50% e 100% do desvio padrão para valores inferiores e 50% e 100% para valores superiores, um total de 5 simulações para obter 5 FS diferentes. Caso os resultados apresentem um comportamento linear, é possível encontrar a equação da variação do FS com o parâmetro analisado, que é necessária para a obtenção das derivadas utilizadas no método FOSM. As figuras 36 a 41 apresentam os resultados obtidos variando o módulo e ângulo de atrito dos materiais da barragem.

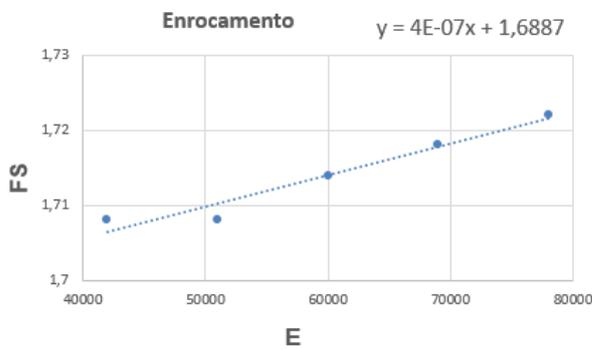


Figura 36 – FS x módulo de elasticidade do enrocamento.

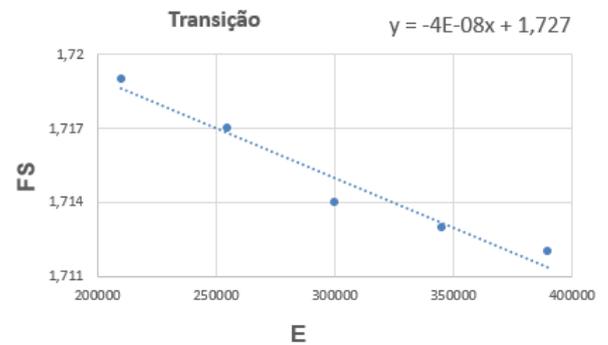


Figura 37 – FS x módulo de elasticidade da transição.

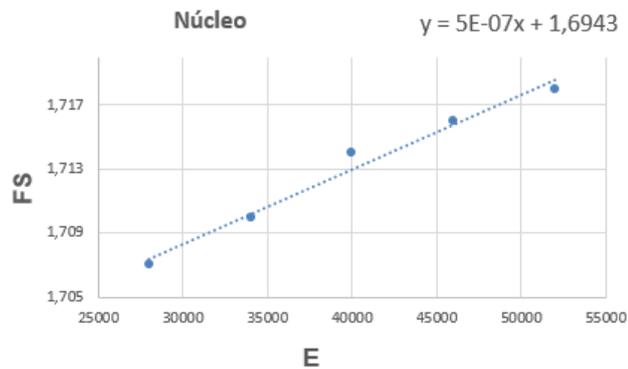


Figura 38 – FS x módulo de elasticidade do núcleo.

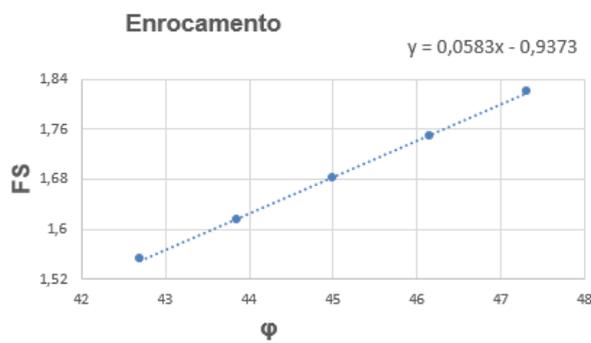


Figura 39 – FS x ângulo de atrito do enrocamento.

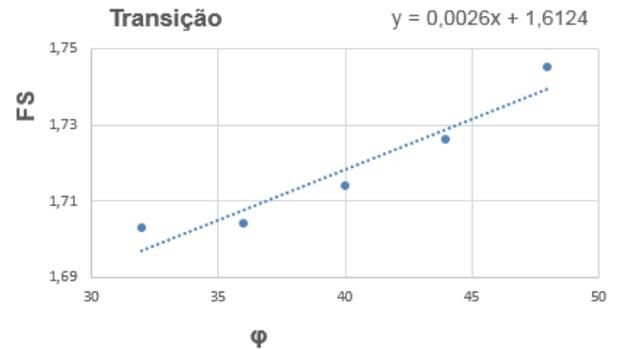


Figura 40 – FS x ângulo de atrito da transição.

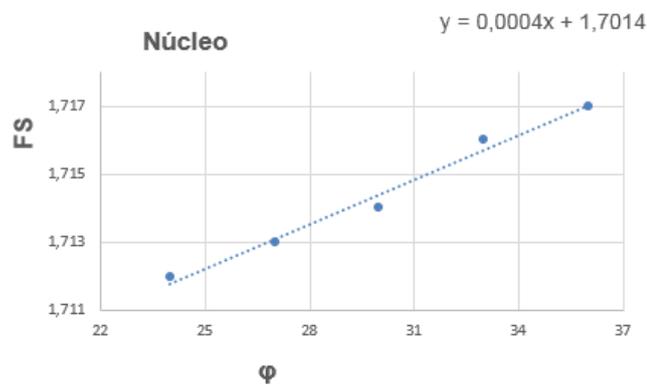


Figura 41 – FS x ângulo de atrito do núcleo.

Observa-se que as funções do FS variando os parâmetros foram lineares, o que é um dos requerimentos para a utilização do método FOSM, podendo obter as derivadas parciais. A Tabela 8 mostra o cálculo das derivadas parciais.

Tabela 8 – Derivadas parciais do FS em relação aos parâmetros.

Parâmetros	Material	Derivadas
d FS / dφ	Enrocamento	0,0583
	Transição	0,0026
	Argila	0,0004
d FS / dE	Enrocamento	4,00E-07
	Transição	-4,00E-08
	Argila	5,00E-07

Com os valores do desvio padrão e derivadas parciais obtidos já é possível aplicar o método FOSM. Os cálculos e resultados estão apresentados nas tabelas abaixo:

Tabela 9 – Cálculo da probabilidade de falha do talude.

Parâmetros	Material	Derivada	desvio	derivada ² x desvio ²	Influência de cada variável
φ	Enrocamento	0,0583	2,3	0,01798012810	98,8199%
	Transição	0,0026	4,0	0,00010816000	0,5945%
	Argila	0,0004	6,0	0,00000576000	0,0317%
E	Enrocamento	4,00E-07	18.000,0	0,00005184000	0,2849%
	Transição	-4,00E-08	90.000,0	0,00001296000	0,0712%
	Argila	5,00E-07	12.000,0	0,00003600000	0,1979%

Tabela 10 – Resultado da probabilidade de falha do talude.

Resultados	
Var (FS)	0,0181948481
Desvio (FS)	0,1348882800
Pr(F)	2,44E-06
Pr(F) em %	0,0002436%

Para o cálculo da probabilidade de falha é necessário o desvio padrão do FS. Para obter o desvio padrão do FS é utilizado a Equação 3.8, que consiste em multiplicar o quadrado das derivadas parciais pelo quadrado dos desvios parciais, logo em seguida é preciso somar esses resultados, o que representa a variância (Var(FS)) do fator de segurança e o desvio padrão do FS é a raiz da variância: 0,13488.

O FS médio obtido pelo SLOPE/W é de 1,714, com esses dados já é possível aplicar a função de densidade normal, Equação 3.5, utilizando a seguinte fórmula no Excel:

“DIST.NORM.N(x; média; desv_padrão; cumulativo)”

onde:

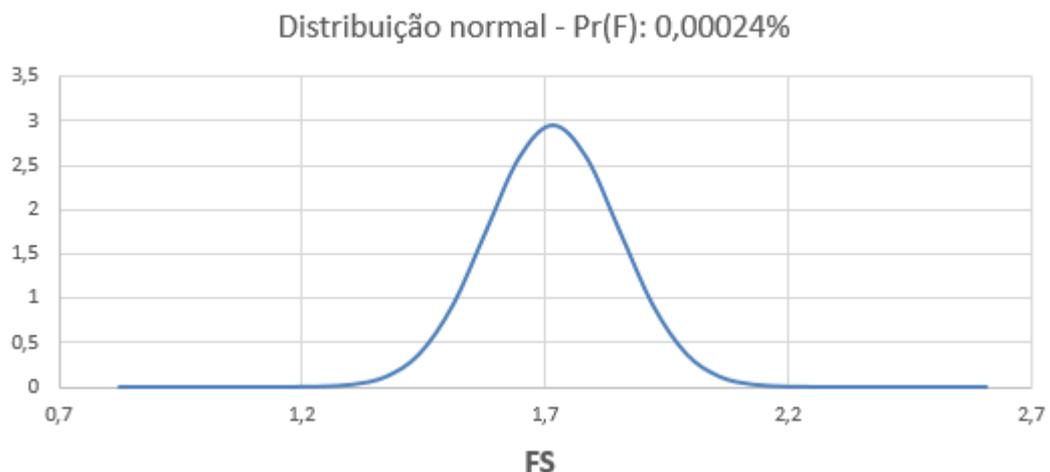
x: Valor da distribuição (no caso seria igual a 1, ou seja, a probabilidade do FS ser menor que 1, que é referente a falha da estrutura);

média: FS médio;

desv_padrão: Desvio padrão do FS.

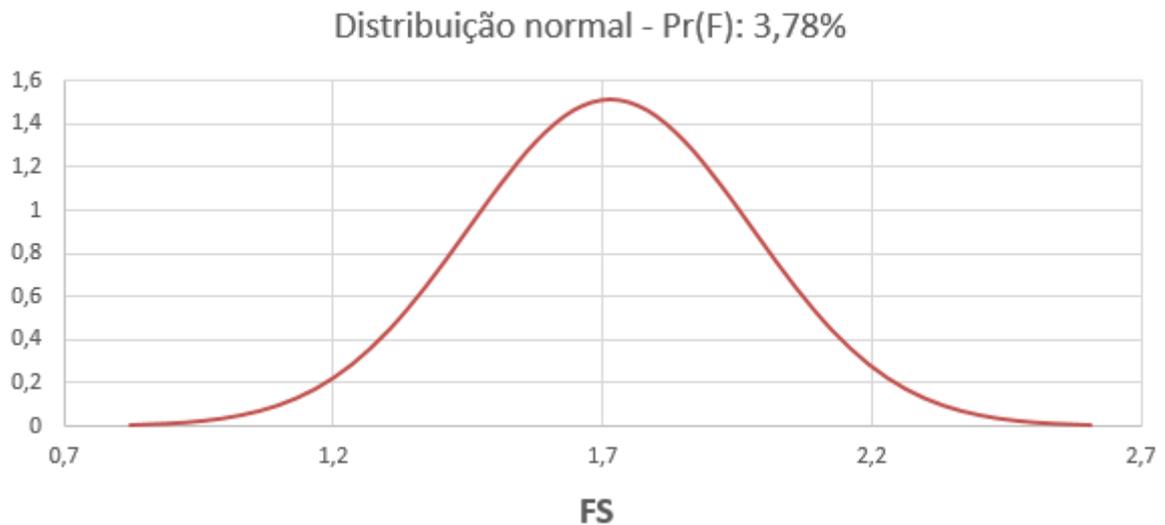
Ao aplicar a fórmula da função de densidade normal no Excel, é retornado o valor da probabilidade de o FS ser menor que 1, o que pode ser melhor observado na Figura 42, que mostra a curva de distribuição da análise probabilística. Basicamente a área é obtida integrando até o “x” da fórmula que no nesse caso é 1, resultando no valor da probabilidade de falha nesse caso, ou seja, a integração de 0 até 1 retorna o valor da área até esse ponto que é o resultado da probabilidade: aproximadamente 0,00024% de probabilidade de ruptura e FS médio de 1,714 para a barragem de enrocamento com núcleo de argila que foi analisada.

Figura 42 – Curva de distribuição normal aplicada a análise probabilística de uma barragem de enrocamento om núcleo de argila, Pr(F): 0,00024%.



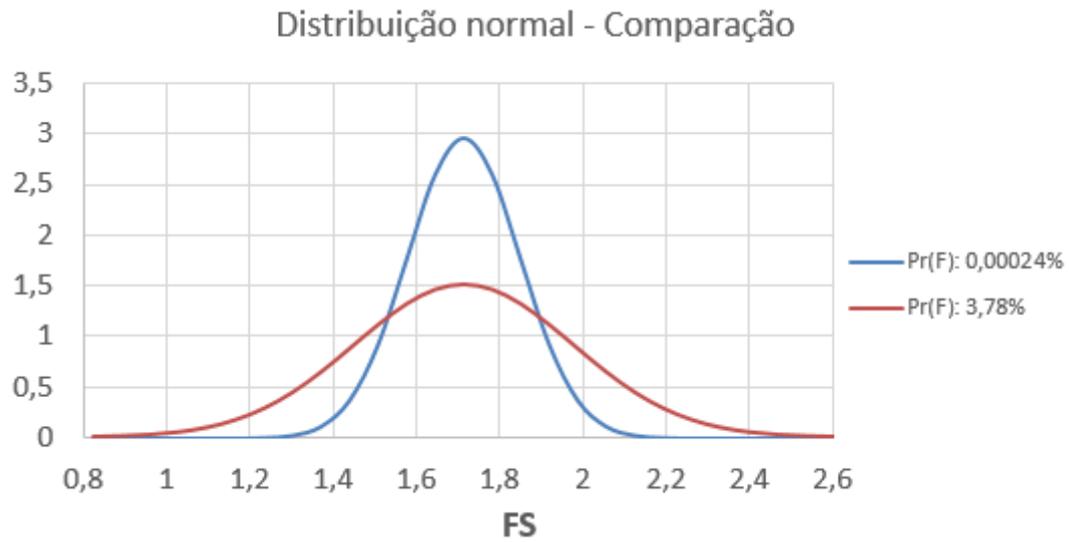
Devido à grande influência do ângulo de atrito do material de enrocamento no resultado da probabilidade de ruptura, e pelo fato de não ter sido encontrado um valor específico para o CV na literatura, foi feito novamente os cálculos utilizando o valor de 10%. A Figura 43 mostra a curva de distribuição normal.

Figura 43 – Curva de distribuição normal aplicada a análise probabilística de uma barragem de enrocamento com núcleo de argila, $\Pr(F)$: 3,78%.



Com o objetivo de comparar os resultados entre dois valores intermediários entre a faixa de 2% a 13%, conclui-se que existe uma diferença bastante significativa em relação a probabilidade de falha ao alterar o CV do material de enrocamento. Em razão do desvio padrão ser quase o dobro, passando de 0,1349 para 0,2628, o resultado final para a probabilidade de falha com o mesmo fator de segurança médio é de 3%. A Figura 44 mostra as funções de distribuição normal em um mesmo intervalo, ilustrando a diferença de comportamento das duas funções.

Figura 44 – Curva de distribuição normal aplicada a análise probabilística de uma barragem de enrocamento com núcleo de argila, Pr(F): 3,78%.



A fim de ter como base valores que podem ser utilizados para determinar a segurança da estrutura, o US Army Corps of Engineers (USACE, 1999) apresenta o nível de desempenho esperado de acordo com os valores de confiabilidade e de probabilidade de falha da barragem, apresentado na Tabela 11. A fórmula do índice de confiabilidade é:

$$\beta = \frac{(E[FS]-1)}{\sigma[FS]} \quad (3.7)$$

onde:

β : Índice de confiabilidade;

$E[FS]$: FS médio;

$\sigma[FS]$: Desvio padrão do FS.

Tabela 11 – Índices de confiabilidade e probabilidade de falha admissíveis (USACE, 1999).

Nível de desempenho esperado	β	Pr(F)
Alto	5,0	3×10^{-7}
Bom	4,0	3×10^{-5}
Acima da média	3,0	3×10^{-3}
Abaixo da média	2,5	6×10^{-3}

Pobre	2,0	$2,5 \times 10^{-2}$
Insatisfatório	1,5	7×10^{-2}
Perigoso	1,0	$1,6 \times 10^{-1}$

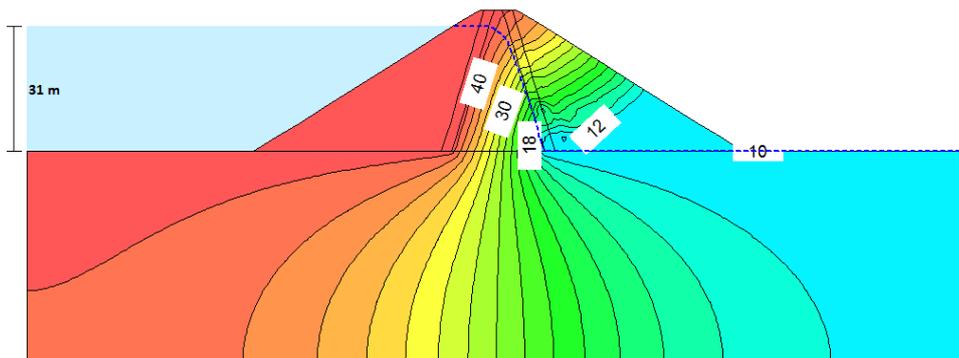
De acordo com a classificação apresentada na Tabela 11 e os resultados obtidos neste trabalho, pode-se dizer que o nível de desempenho do barramento pode ser considerado alto na primeira análise, com índice de confiabilidade igual a 5,29 e $Pr(F)$ igual a $2,4 \times 10^{-6}$, e na segunda análise pode ser considerado pobre com o valor de 2,7 para o índice de confiabilidade e $3,78 \times 10^{-2}$ o valor de $Pr(F)$.

5.3 Resultado no regime permanente de operação

Para a análise no regime permanente no programa SEEP/W, foram inseridos os parâmetros de permeabilidade (k) de cada material (Tabela 2) nos estados saturados e não saturados. Considerou-se para uma análise mais completa, a parte não saturada do solo, ou seja, uma curva característica que corresponde a relação entre a sucção mátrica e o volume de conteúdo de água no solo.

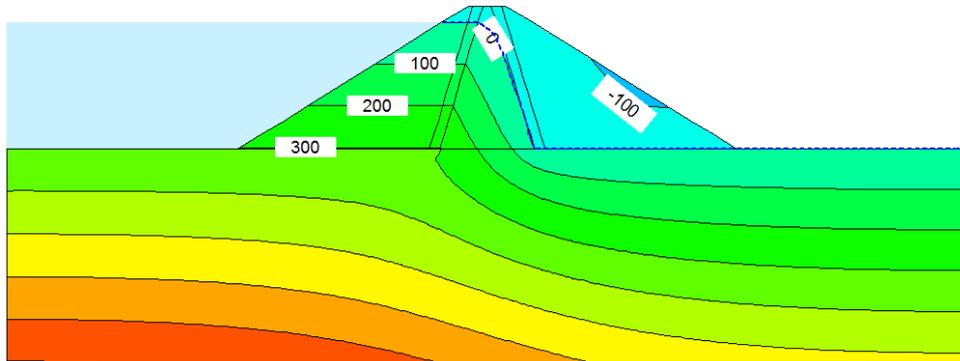
O nível de água adotado é de 31 m de altura em relação a fundação. Na figura abaixo é possível observar a linha freática tracejada em azul e os valores da carga total em metros. Observa-se que a perda de carga ocorre ao longo da seção do barramento, sendo satisfatório esse comportamento.

Figura 45 – Carga total no regime permanente de operação.



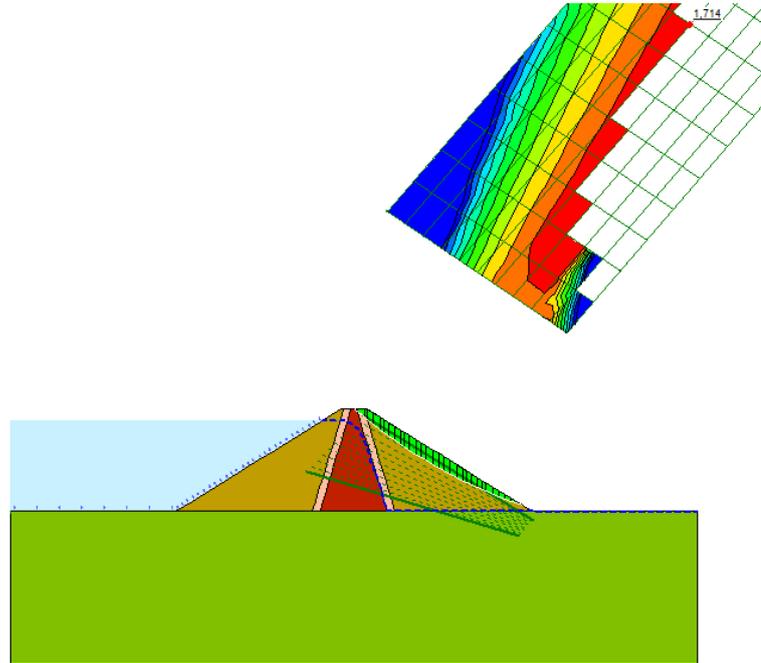
A Figura 46 apresenta os valores das poropressões em kPa ao longo da seção do barramento, que também vai diminuindo. É importante observar que no núcleo ocorre perdas de carga significativas devido a permeabilidade do material adotado ser muito baixa.

Figura 46 – Poropressões no regime permanente de operação.



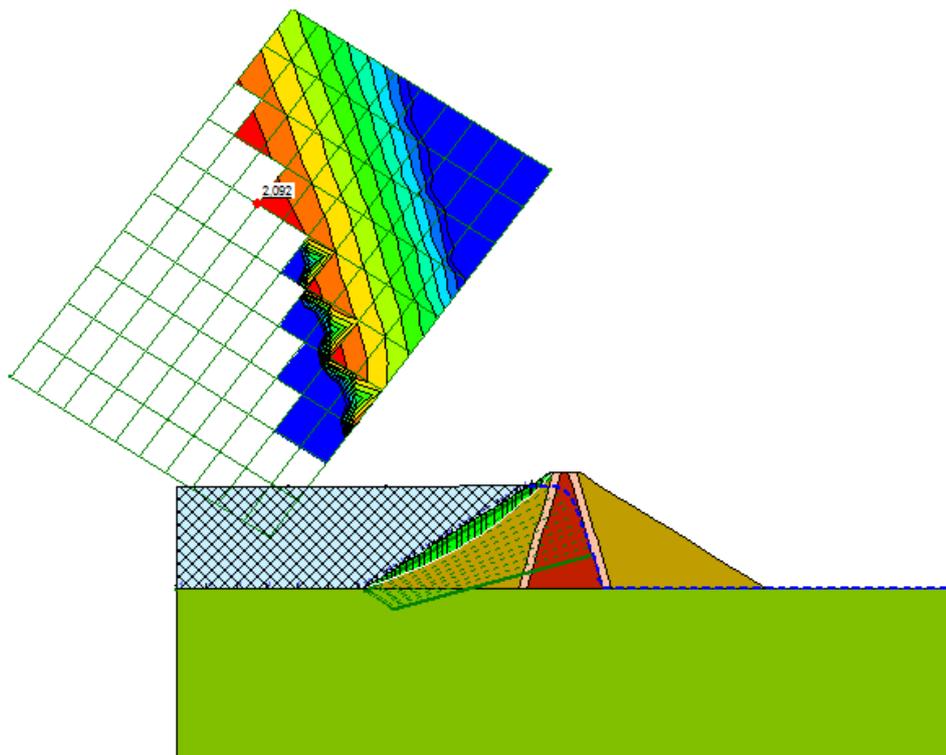
Para a análise de estabilidade no regime permanente de operação, os mesmos parâmetros foram utilizados, porém, como esperado, não teve nenhuma influência no fator de segurança a jusante quando comparado aos resultados do estágio de final de construção. Como os valores do FS foram exatamente os mesmos ao variar o ângulo de atrito e o módulo de elasticidade de cada material como mostra a Figura 47, não foi necessário refazer os mesmos procedimentos para o método FOSM, sendo considerado os mesmos resultados para a probabilidade de falha. A figura abaixo mostra a superfície de ruptura no regime permanente e a linha freática (tracejada em azul).

Figura 47 – Superfície de ruptura a jusante no regime permanente de operação



A Figura 48 apresenta a análise de estabilidade do talude a montante utilizando o Método Morgenstern-Price, onde observa-se um aumento considerável do FS, de 1,714 para 2,092. A presença de água no estágio de fluxo permanente aumentou a estabilidade da barragem devido ao peso da água do reservatório.

Figura 48 - Superfície de ruptura a montante no regime permanente de operação



6 CONCLUSÕES GERAIS

Esse trabalho teve como objetivo avaliar a influência da rigidez do material de transição na estabilidade de uma barragem real. A análise é pertinente pois durante a fase de projeto de uma barragem isso não é avaliado. Além disso, durante a fase de investigação geotécnica, esse material não é caracterizado mecanicamente, ou seja, não há informação sobre parâmetros como módulo e deformabilidade desse material.

Foram realizadas simulações paramétricas para observar os efeitos da variabilidade dos módulos de elasticidade (E), no campo de tensão-deformação da barragem. Foram obtidos resultados mostrando o arqueamento de tensões assim como a plastificação do material de transição. Conclui-se que ao aumentar a rigidez do material de transição, mantendo os materiais adjacentes os mesmos, ocorre uma intensificação no arqueamento de tensões, conforme o esperado. Além disso, foi observado que quanto maior o arqueamento, menor o FS obtido para a estabilidade do talude da barragem.

No processo e construção da barragem, quanto maior o valor de rigidez do material, ocorre uma distribuição diferenciada de tensões, que podem influenciar negativamente futuros problemas associados a fissuras, devido aos diferentes deslocamentos de cada material. Os resultados do fator de segurança mostraram que ao variar o módulo de elasticidade não houve uma grande influência na estabilidade do talude da barragem.

Os resultados obtidos através do método probabilístico FOSM tanto no estágio de final de construção quanto no regime permanente de operação foram satisfatórios, ou seja, pequena probabilidade de falha desde que se tenha um valor mais próximo da realidade possível do CV do ângulo de atrito do material de enrocamento. Por não terem informações suficientes na literatura, são necessários estudos mais aprofundados acerca das particularidades deste material.

6.1 Sugestões para pesquisas futuras

Sugere-se para o desenvolvimento de futuros trabalhos:

- Estudo mais aprofundado sobre os materiais de enrocamento
- Análise probabilística de ruptura no estágio de rebaixamento rápido para a barragem desta monografia

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, A. P., Hernandez H. M. & Colmanetti, J. P. (2003). Apostila de Barragens. Publicação Interna. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 179 p.
- CALDEIRA, L. M. M. S. (2008). Análises de riscos em Geotecnia: aplicação a barragens de aterro. Lisboa: LNEC, 248 p.
- CRUZ, P.T. 100 Barragens Brasileiras - Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996, 647 p.
- DAS, B. M.; SOBHAN K. Fundamentos de engenharia geotécnica. Tradução de Noveritis do Brasil. 8ª ed. Cengage Learning Edições Ltda., 2015. 612 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Disponível em <<http://www.fao.org/3/a-ba0081o.pdf>>. Acessado em Setembro de 2018.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency). Disponível em <<https://www.fema.gov/why-dams-fail>>. Acessado em Setembro de 2018.
- FERNANDES, A. R. D. (2007). Relato – Tema 100 – Construções de Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens, XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belém, PA, 33 p.
- FONTENELLE, A. S. (2007). Proposta Metodológica de Avaliação de Riscos em Barragens do Nordeste Brasileiro – Estudo de Caso: Barragens do Estado do Ceará. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 p.
- MATHEUS, I. C. (2006). Proposta de Metodologia para Dimensionamento da Espessura de Núcleos Argilosos em Barragens Baseada em Ensaios Pinhole. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM-147/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160 p.
- MELO, A. V. (2014). Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 168 p.

ORSINI, B. (2017). Inovação em Análise de Risco e Tomada de Decisão em Escavações de Túneis. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-279/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p.

PEREIRA, D.A. (2005). Previsão de Poropressão Construtiva em Barragens Via Simulação Numérica. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-134/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112 p.

PERINI, D. S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Publicação G. DM-180/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128 p.

RIOS, A.C. (2015). Análise Probabilística Aplicada em Barragem de Enrocamento com Núcleo de Argila. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 43 p.

SILVEIRA, J.F.; CARNEIRO, E. F.; PÍNFARE J. C. (2007). O Grande Potencial Apresentado pela Análise de Risco de Usinas Hidrelétricas – A Experiência da CESP. XXVII Seminário Nacional De Grandes Barragens, Belém, PA, 17 p.

SOUZA, M. M. (2013). Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC. Projeto de Graduação, UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 129 p.

VOLKMER, M. V. (2009). Análise de Percolação em Fundações Rochosas e seus Efeitos na Estabilidade de Barragens Tipo Gravidade. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-199/2011, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.