



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAMILA FURTADO RODRIGUES

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM ARMANDO RIBEIRO
GONÇALVES - AÇU/RN, NA CONDIÇÃO DE FINAL DE CONSTRUÇÃO**

FORTALEZA

2022

CAMILA FURTADO RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM ARMANDO RIBEIRO
GONÇALVES - AÇU/RN, NA CONDIÇÃO DE FINAL DE CONSTRUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como exigência parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R612a Rodrigues, Camila Furtado.

Avaliação da estabilidade da barragem Armando Ribeiro Gonçalves - Açu/RN, na condição de final de construção / Camila Furtado Rodrigues. – 2022.
62 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

1. Estabilidade de barragens. 2. Elementos finitos. 3. Barragem de Açu. 4. Final de construção. I. Título.
CDD 620

CAMILA FURTADO RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM ARMANDO RIBEIRO
GONÇALVES - AÇU/RN, NA CONDIÇÃO DE FINAL DE CONSTRUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como exigência parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 28/11/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Ícaro José Fernandes Santos Bastos.
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus Pais, Fátima e Chagas, por sempre apoiarem as minhas escolhas e por me darem a motivação necessária para atravessar os cinco anos de graduação.

Ao Professor Rosiel, pela disponibilidade desde o início, pela paciência e pela capacidade de ensinar em todas as etapas do desenvolvimento desse trabalho.

A minha irmã, Kauane, que sempre esteve comigo em todos os momentos, mesmo que em alguns à distância, sempre entendeu minhas escolhas e me ajudou em todas.

Aos meus amigos de graduação, no qual dividi momentos de felicidade e tensão ao longo dessa trajetória, em especial ao Abcael, Gustavo, Ronis e Sinara.

A Banca Examinadora pela disponibilidade de contribuir com o trabalho, por meio de avaliações e sugestões de melhorias.

A Professora Verônica e a Turma da disciplina de Graduação, por todos os importantes comentários feitos ao longo do ano, que permitiram a melhoria do trabalho desenvolvido.

RESUMO

Barragens são estruturas utilizadas há muito tempo pela humanidade, no Brasil e principalmente no Nordeste foi importante como uma das principais medidas de combate a escassez de água. Devido a sua importância, nos últimos anos grandes construções deste tipo foram realizadas, demandando um estudo mais preciso para que seja realizado de forma mais eficiente. Estas estruturas têm um grande risco potencial, dado que o rompimento pode causar perda de diversos recursos, incluindo vidas humanas, nesse sentido, o estudo de segurança de barragens se torna item fundamental para a construção de obras de barramento. Este trabalho tem como objetivo avaliar o rompimento de uma barragem de terra em final de construção por meio do método dos Elementos Finitos (MEF) e por Métodos convencionais de Equilíbrio Limite (*Morgenstern-Price*), tomando como objeto de estudo a Barragem de Açú, barragem esta, que é considerada a maior obra de barramento do Rio Grande do Norte e que sofreu um rompimento ainda na fase construtiva. As análises foram divididas em seis casos, com variação no método (MEF ou Métodos convencionais de Equilíbrio Limite), condições da argila, incorporação do parâmetro RU e otimização da superfície, além de um caso que avalia a proposta de uma seção estável para a barragem. A partir das análises foi possível obter a superfície de ruptura e o fator de segurança de cada um dos casos estudados, nos casos em que argila foi considerada como não drenada obteve-se uma representação mais eficiente do material do núcleo da barragem obtendo fatores de segurança unitários, como esperado devido ao rompimento, enquanto o parâmetro RU não causou consideráveis interferências nos resultados. Os métodos comparados obtiveram resultados de fator de segurança semelhantes, 1,03 para o método de *Morgenstern-Price* e 1,01 para o MEF, no entanto, notou-se que o MEF forneceu a melhor representação da geometria do rompimento ocorrido, além disso a nova proposta de seção que promove a desconexão entre o núcleo e o *cut off* foi considerada segura, fornecendo um fator de segurança maior que o mínimo.

Palavras Chaves: Estabilidade de Barragens; Elementos Finitos; Barragem de Açú; Final de Construção

ABSTRACT

Dams are structures used for a long time by humanity, in Brazil and especially in the Northeast, it was important as one of the main measures to combat water scarcity. Due to its importance, in recent years large constructions of this type have been carried out, demanding a more precise study to be carried out more efficiently. These structures have a great potential risk, given that the rupture can cause loss of several resources, including human lives, in this sense, the study of dam safety becomes a fundamental item for the construction of dam works. This work aims to evaluate the failure of an earth dam at the end of construction using the Finite Element Method (FEM) and conventional Limit Equilibrium Methods (Morgenstern-Price), taking the Açú Dam as object of study, this dam, which is considered the largest dam work in Rio Grande do Norte and which suffered a break still in the construction phase. The analyzes were divided into six cases, with variation in the method (MEF or conventional Limit Equilibrium Methods), clay conditions, incorporation of the RU parameter and surface optimization, in addition to a case that evaluates the proposal of a stable section for the dam. From the analyzes it was possible to obtain the rupture surface and the safety factor of each of the studied cases, in the cases where clay was considered as not drained a more efficient representation of the dam core material was obtained obtaining safety factors units, as expected due to the disruption, while the RU parameter did not cause considerable interference in the results. The compared methods obtained similar safety factor results, 1,03 for the Morgenstern-Price method and 1,01 for the MEF, however, it was noted that the MEF provided the best representation of the geometry of the rupture that occurred, in addition the new section proposal that promotes the disconnection between the core and the cut off was considered safe, providing a safety factor greater than the minimum.

Keywords: Stability of Dams; Finite elements; Açú Dam; End of Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de uma Barragem de Terra Zoneada.....	18
Figura 2 – Elementos que compõem uma Barragem em Terra	19
Figura 3 – Representação da construção de Barragem de Terra	20
Figura 4 – Representação do Rebaixamento Rápido.....	23
Quadro 1 – Descrição dos Grupos dos Solos para caracterização do Parâmetro RU.....	25
Figura 5 – Curvas típicas de Variação do Parâmetro RU em Função do Grupo de Solo.....	27
Figura 6 – Representação dos tipos de superfícies de ruptura.....	29
Figura 7 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Morgenstern-Price	32
Figura 8 – Vista superior da Barragem de Açu - RN	33
Figura 9 – Áreas de Empréstimo	34
Figura 10 – Projeto da seção da barragem construída antes do rompimento	36
Figura 11 – Vista superior da ruptura da Barragem de Açu em 1981	37
Figura 12 – Representação do escorregamento do talude de montante.....	37
Figura 13 – Seção Reconstruída após a ruptura	38
Figura 14 – Seção da barragem de Açu com cotas.....	39
Figura 15 – Seção completa da barragem modelada para as análises	39
Figura 16 – Região de Pesquisa.....	45
Figura 17 – Distribuição de superfícies potenciais de ruptura ao longo da seção.....	45
Figura 18 – Malha para Elementos Finitos utilizada nas análises	46
Figura 19 – Caso 1 (Morgenstern-Price, Argila Drenada e Superfície Circular).....	50
Figura 20 – Caso 2 (Morgenstern-Price, Argila não Drenada e Superfície Circular)	51
Figura 21 – Caso 3 (Morgenstern-Price, Argila não drenada e Superfície Otimizada).....	52
Figura 22 – Caso 4 (Método dos Elementos Finitos, Argila não drenada e Superfície Circular)	53
Figura 23 – Caso 4 (Método dos Elementos Finitos, Argila não drenada e Superfície Otimizada)	54
Figura 24 – Distribuição de 9.438 Superfícies de Ruptura, Caso 4 (Método dos Elementos Finitos, Argila não drenada)	55
Figura 25 - Distribuição de Poropressão na seção antes do rompimento.....	55
Figura 26 – Caso 6 - Nova Geometria para a seção	58
Figura 27 – Caso 6: Análise da nova seção proposta pelo método de Morgenstern-Price.....	59
Figura 28 – Caso 6: Análise da nova seção proposta pelo método de Elementos Finitos.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores Mínimos Admissíveis do Fator de Segurança (FS)	30
Tabela 2 – Propriedades geotécnicas dos solos de empréstimo	35
Tabela 3 – Descrição dos materiais da seção	40
Tabela 4 – Valores de coesão e ângulo de atrito para o núcleo argiloso (Região 3)	41
Tabela 5 – Módulo de Elasticidade dos solos da Barragem	42
Tabela 6 – Quadro resumo dos parâmetros das Regiões da Barragem	43
Tabela 7 – Distribuição de condições em 6 Casos para as análises	48
Tabela 8 – Fator de Segurança em função do Parâmetro RU	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.2 Problema de Pesquisa e Questões Motivadoras.....	14
<i>1.2.1 Questões Motivadoras.....</i>	<i>14</i>
1.3 Objetivos.....	15
<i>1.3.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>15</i>
<i>1.3.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>15</i>
1.4 Estrutura do Trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Conceitos Gerais sobre Barragens	17
2.2 Aspectos Geométricos de Barragens de Terra.....	18
<i>2.2.1 Seção Transversal.....</i>	<i>18</i>
2.3 Aspectos construtivos de Barragens de Terra	19
<i>2.3.1 Controle Tecnológico – Instrumentação</i>	<i>20</i>
<i>2.3.2 Controle de Compactação</i>	<i>21</i>
2.4 Situações consideradas para análise de Estabilidade.....	22
<i>2.4.1 Final de Construção</i>	<i>22</i>
<i>2.4.2 Regime de Operação.....</i>	<i>23</i>
<i>2.4.3 Rebaixamento Rápido.....</i>	<i>23</i>
2.5 Parâmetros utilizados nas Análises.....	24
<i>2.5.1 Parâmetro RU.....</i>	<i>24</i>
<i>2.5.1.1 Valores típicos de RU.....</i>	<i>25</i>
<i>2.5.2 Condição de Drenagem da Argila.....</i>	<i>27</i>
2.6 Estabilidade de Talude de Barragens	28
<i>2.6.1 Causas gerais de instabilidade</i>	<i>28</i>
<i>2.6.2 Tipos de Superfície de escorregamento</i>	<i>29</i>
<i>2.6.3 Fator de Segurança</i>	<i>30</i>
2.7 Métodos de Avaliação de Estabilidade	31
<i>2.7.1 Métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade</i>	<i>31</i>
<i>2.7.2 Método dos Elementos Finitos.....</i>	<i>32</i>
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Materiais utilizados para a análise	33
<i>3.1.1 Aspectos Geológicos</i>	<i>34</i>

3.1.2 Aspectos Construtivos.....	35
3.1.3 Rompimento.....	36
3.2 Coleta de Dados da Barragem de Açu.....	38
3.3 Seção Modelada para as Análises	39
3.4 Determinação dos parâmetros de uso nas Análises.....	40
3.4.1 Coesão e ângulo de atrito do núcleo.	40
3.4.2 Parâmetro RU.....	41
3.4.3 Parâmetros de Tensões.....	42
3.4.4 Parâmetros de todas as regiões analisadas.....	43
3.5 Análise Computacional	43
3.5.1 Modelagem pelo Método de Morgenstern-Price.	44
3.5.2 Modelagem pelo Método dos Elementos Finitos.....	46
3.5.3 Otimização da superfície	47
3.6 Condições adotadas para análise	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 Análises de Estabilidade.....	50
4.1.1 Caso 1 (Morgenstern-Price, Argila Drenada e Superfície Circular)	50
4.1.2 Caso 2 (Morgenstern-Price, Argila não Drenada e Superfície Circular)	51
4.1.3 Caso 3 (Morgenstern-Price, Argila não drenada e Superfície Otimizada)	52
4.1.4 Caso 4 (MEF e Argila Não Drenada).....	53
4.1.4.1 Distribuição de Poropressão na Seção	55
4.1.5 Caso 5 (Implementação do Parâmetro RU).....	56
4.1.6 Caso 6 (Proposição de uma nova seção estável)	57
5 CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Obras de barramento são amplamente utilizadas em todo o mundo devido a sua relevância para a solução de problemas econômicos, sociais ou ambientais. No cenário nacional, ganhou destaque como uma das principais medidas para melhorar a qualidade de vida da população que vive em locais com escassez de água. Neste sentido, observa-se a importância do estudo desse tipo de construção, para que seja possível garantir a sua segurança.

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA) (2021) existem barragens distribuídas em todo território nacional, os principais usos são para hidrelétricas, irrigações e defesa contra inundações. Neste mesmo relatório apresentado pela agência, é citado que o primeiro registro de uma barragem no Brasil consta de 1577, evidenciando que obras do tipo de barramento têm sido utilizadas no país ao longo dos anos com uma grande relevância, podendo então beneficiar a sociedade em diversas áreas.

Obras de barramento são por concepção construções com um risco potencial para desastres, dado que uma ruptura pode gerar prejuízos financeiros, ambientais e até perda de vidas humanas. Dado isto, é importante citar que apesar deste risco intrínseco, o estudo de barragens tem sido aprimorado ao longo dos anos, garantindo a segurança dessas construções, sendo possível construir obras com riscos bem avaliados e minimizados, ressaltando assim, a importância do desenvolvimento de estudos nessa área.

No Brasil existem diversos casos em que a segurança de barragens não foi atendida e que geraram consequências catastróficas. Um dos rompimentos mais notáveis e que ganhou destaque na mídia, foi o ocorrido na barragem de rejeitos em Brumadinho (Minas Gerais) em 2019, que causou graves consequências. De acordo com o Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (2022), a operação que completou 3 anos em janeiro de 2022, houve a perda de 270 vidas, além de contar com 6 pessoas que ainda seguem desaparecidas desde a data do acidente.

A barragem Engenheiro Armando Gonçalves (Barragem de Açu), instrumento de estudo deste trabalho, também apresentou rompimento em uma condição menos comum, ainda durante a fase de construção. Por isso toda a análise que será realizada neste trabalho utilizará as geometrias e condições de antes do rompimento. Apesar de não ter causado perda de vidas humanas, o rompimento da Barragem de Açu causou um prejuízo financeiro considerável, dado que a ruptura ocorreu na fase final de construção, quando se faltava apenas 5 metros para chegar à altura final de projeto. É importante citar que, em ambos os exemplos citados, os rompimentos geraram consideráveis transtornos, desta forma, ressalta-se a importância do estudo de barragens para garantir a segurança de todos os usuários.

Apesar do rompimento durante a construção da barragem ter ocorrido a mais de 30 anos, a barragem de Açú ainda é considerada um instrumento de estudo atualmente, dado que diversas pesquisas foram desenvolvidas tendo como base essa barragem. Desta forma, o estudo para avaliação de estabilidades de barragens por diferentes métodos é de fundamental importância para ampliar o acesso às informações fundamentadas nessa área de estudo, podendo contribuir para a ampliação de novas pesquisas nessa área, que demandam uma maior atenção.

Ao longo deste trabalho será realizada uma avaliação da estabilidade do talude da barragem de Açú utilizando o Método de Elementos Finitos, podendo assim ao final do estudo proporcionar uma nova visão do sentido de análise do rompimento ocorrido, sendo possível gerar uma comparação com outros métodos já analisados. Ao propor este método de avaliação da estabilidade, será possível avaliar, em uma barragem representativa (barragem de terra grande com características comuns a muitas barragens que podem ser construídas), o comportamento desta por meio de simulações em *softwares*.

1.2 Problema de Pesquisa e Questões Motivadoras

A barragem de Açú tem sido utilizada como objeto de estudo por diversos autores, dentre eles, Rocha (2003), Silva Filho & Futai (2006), Vilhete (2017) e Souza (2017) são alguns dos que se dedicaram a estudar a estabilidade do talude desta barragem, evidenciando a relevância desta obra para essa área de estudo. Nesse contexto o presente trabalho se propõe a realização de um estudo com a finalidade de avaliar a estabilidade dessa barragem considerando diferentes fatores, contribuindo para o estudo de segurança de barragens.

1.2.1 Questões Motivadoras

- a) É possível obter resultados numéricos mais realistas para a ruptura de uma barragem em final de construção, utilizando o método de estabilidade, no qual se avalia a estabilidade do maciço, com base nas tensões que ocorrerem durante a construção?
- b) Qual a precisão do Método dos Elementos Finitos para estabilidade de taludes quando comparado aos métodos convencionais de equilíbrio limite?
- c) Qual a influência dos parâmetros de RU e condição da argila nas análises?

- d) Para o caso da barragem Açú, é possível obter alternativas de projeto estáveis e econômicas para a geometria do problema?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o rompimento da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (Barragem de Açú) durante o período final de construção.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar a estabilidade do talude de montante da Barragem de Açú pelos métodos dos Elementos Finitos e do Equilíbrio Limite;
- b) Comparar os resultados obtidos pelo método dos Elementos Finitos com os resultados obtidos pelo Método do Equilíbrio Limite e com o rompimento ocorrido;
- c) Avaliar a influência do parâmetro RU e da condição da argila nos estudos de estabilidade;
- d) Propor uma solução de seção estável para a Barragem de Açú.

1.4 Estrutura do Trabalho

O Trabalho está dividido em 5 capítulos além da seção de referências. O primeiro Capítulo traz uma noção geral sobre o tema de barragens e sua importância no âmbito nacional, além de apresentar os objetivos e motivações para o estudo a ser desenvolvido.

O Capítulo 2 está relacionado com a apresentação de conceitos e referências fundamentais para o trabalho, apresentando justificativas e explicações para os conceitos que serão utilizados. No Capítulo 3 serão apresentados os materiais e a metodologia que será utilizada, além da definição dos modelos a serem implementados nos programas computacionais utilizados.

O Capítulo 4 traz os parâmetros e os resultados de cada análise realizada, além de apresentar discussões e comparações com a literatura. No Capítulo 5 serão apresentadas as

conclusões de acordo com os objetivos especificados inicialmente e as sugestões para futuros trabalhos.

Finalmente na seção de referências estará presente todas as referências citadas ao longo do desenvolvimento do corpo desse trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento do estudo que será realizado.

2.1 Conceitos Gerais sobre Barragens

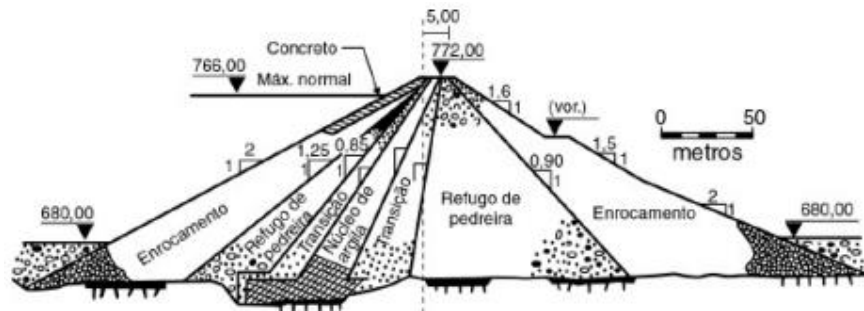
De acordo com Caputo (2015) barragens são estruturas construídas em vales e destinadas a fechá-los transversalmente, proporcionando assim um represamento de água. Essas estruturas são amplamente utilizadas em todo o mundo, ganhando destaque no Brasil por ser um dos instrumentos mais eficientes para a melhoria da qualidade de vida da população, principalmente das que vivem em regiões que enfrentam longos períodos com escassez de água.

As barragens podem ser classificadas de acordo com o seu material de construção, a maioria se divide em obras feitas em concreto ou em obras feitas em terra. De acordo com Souza (2017) as barragens de terra são as mais comuns no Brasil, em virtude das condições topográficas, com vales abertos, e pela disponibilidade de material terroso, dado isto, tais barragens se adaptam melhor a deslocamentos nas fundações, quando comparadas com as de concreto.

As Barragens de Terra podem ser classificadas em Homogêneas (construída com um único material) ou Zoneadas (construída a partir da divisão de zonas que podem usar materiais diferentes ou com parâmetros diferentes). Como a estrutura da barragem não impede completamente o fluxo de água, barragens do tipo Zoneadas tornam-se importantes e concedem estabilidade ao conjunto, no geral, de forma mais eficiente. A barragem considerada como estudo principal desse trabalho, tem sua região central definida como uma barragem construída em terra e é classificada como zoneada, devido a distribuição de diferentes tipos de solos ao longo de sua seção.

A Figura 1 apresenta um exemplo de barragem de terra Zoneada, em que é possível notar um dos principais fatores que fazem esse tipo de barragem fornecerem uma maior estabilidade, a distribuição de solos feitas ao longo da seção, evidenciando o núcleo de argila impermeável que pode garantir a estanqueidade da barragem.

Figura 1 – Representação de uma Barragem de Terra Zoneada



Fonte: Caputo (2015)

2.2 Aspectos Geométricos de Barragens de Terra

A seção de uma barragem varia de acordo com a necessidade de implementação do projeto, mesmo para problemas iguais é possível adotar diferentes soluções para a sua construção. Como citado, as barragens de terra zoneadas são mais eficientes para a maioria das finalidades, garantindo uma eficiência estrutural e econômica. Desta forma, é de extrema importância conhecer os aspectos e componentes deste tipo de seção.

2.2.1 Seção Transversal

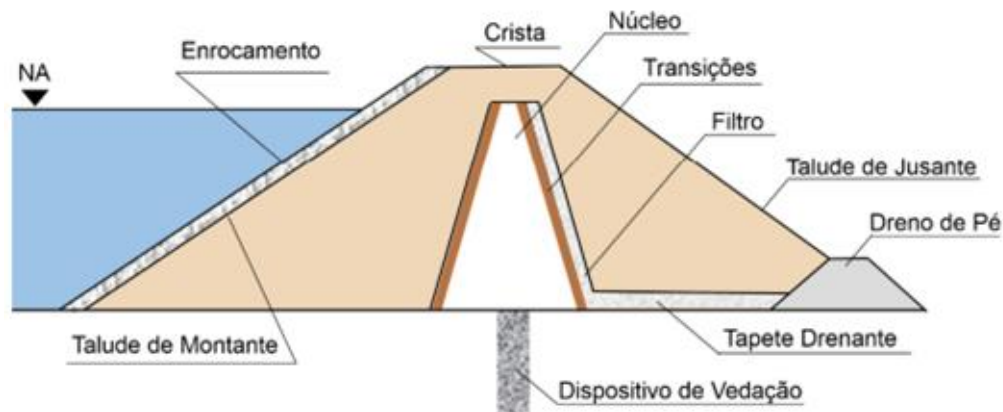
A Figura 2 apresenta um exemplo de geometria de barragens de terra, com alguns elementos básicos citados. A geometria da seção transversal de uma barragem de terra zoneada é composta fundamentalmente por:

- núcleo feito em material impermeável, como argila;
- dispositivo de vedação, considerado como fundação, também em material impermeável (argiloso);
- sistema drenante, composto por filtros em material granular;
- composição de aterro para constituir o restante da geometria proposta em projeto (taludes de montante e jusante).

O dispositivo de vedação é um dos componentes que mais podem variar em função das características construtivas da barragem que será construída. Um caso particular, que é a situação da barragem que será estudada nas posteriores análises desse trabalho, é a construção de barragens em regiões na qual existe um grande aluvião permeável, nesses casos, é necessário garantir a estanqueidade da barragem para evitar a percolação de água pela fundação. Uma das medidas adotadas nessas situações é a construção de uma trincheira de vedação, chamada

também de *cut off*, que consiste em uma escavação fora do eixo da barragem no sentido de montante, e tem como principal vantagem além da impermeabilização da base, a possibilidade de construção em paralelo com a seção principal da barragem, tornando a construção mais rápida, sendo fundamental em obras que precisam de grandes movimentações de terra.

Figura 2 – Elementos que compõem uma Barragem em Terra



Fonte: Souza (2017)

2.3 Aspectos construtivos de Barragens de Terra

A escolha do tipo e geometria de uma barragem é influenciada por diversos fatores, Massad (2010) cita como os principais: Fatores geológico-geotécnico; Fatores hidrológico-hidráulico e topográfico; Disponibilidade e acessibilidade de materiais de empréstimo; Estimativas e necessidades de custos e prazos; Fatores climáticos.

Considerando tais fatores, o processo construtivo varia de acordo com o método adotado, para barragens construídas em Terra, a etapa construtiva, em sua maioria, pode ser dividida em:

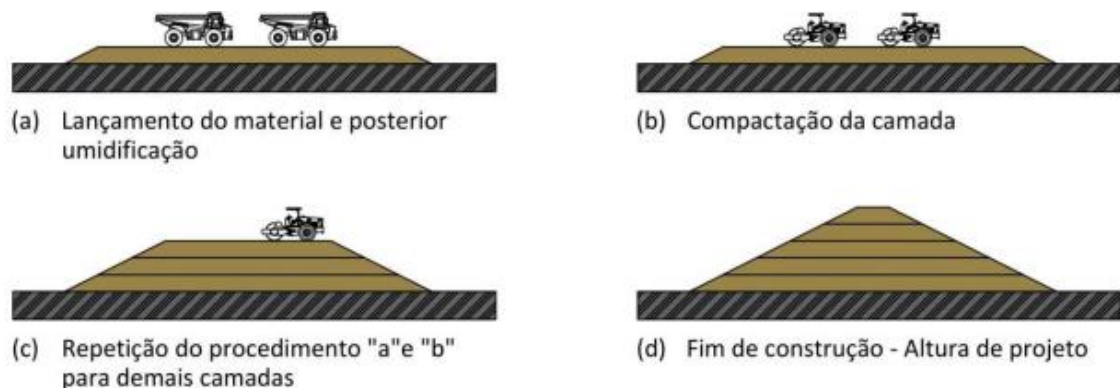
- a) estudos preliminares (Bacia Hidrográfica, Topografia, Jazidas, entre outros fatores complementares);
- b) movimentações de terra;
- c) construção de estruturas auxiliares;
- d) serviços complementares.

A etapa de Movimentação de Terra é a responsável pela construção da parte principal de uma barragem de terra, de forma geral, a construção das seções das barragens são feitas a partir do posicionamento de camadas de solo, verticalmente sequenciadas. Nesta etapa construtiva não há presença de carregamentos externos, logo, os únicos esforços são causados

pela poropressão e pelo acréscimo gradativo das cargas de solo. A Figura 3 representa a construção de uma barragem em terra por meio de execução de camadas.

Por meio da Figura 3 é possível notar que devido à construção ser feita por meio de camadas, ocorre um aumento gradativo de poropressões internas à seção da barragem, a intensidade desse aumento de pressões depende basicamente da velocidade e da composição da seção da barragem. Devido a essa característica da construção de barragens de terra, esta pode se tornar instável ainda durante o processo construtivo, podendo causar também o colapso da estrutura.

Figura 3 – Representação da construção de Barragem de Terra



Fonte: Santos (2021)

De acordo com Massad (2010) em geral, a barragem leva alguns meses para ser construída, portanto não há tempo para as pressões neutras se dissiparem, por causa da baixa permeabilidade do solo compactado, desta forma, é importante haver (já em período construtivo) instrumentações que sejam capazes de verificar a variação desta tensão interna, garantindo assim a segurança dessa estrutura. Em barragens com núcleo argiloso há uma concentração maior de poropressão na superfície do núcleo, dado que a permeabilidade dessa camada é menor, não permitindo que haja espaço para o alívio desta poropressão.

2.3.1 Controle Tecnológico – Instrumentação

Além dos estudos preliminares, é importante para a segurança de barragens entender o comportamento desta estrutura ao longo dos anos, durante a construção e após a sua construção, para isso, são instalados ao longo da barragem (longitudinalmente e transversalmente) dispositivos que são capazes de aferir parâmetros de diferentes tipos. A partir

dos resultados obtidos por meio dessa instrumentação é possível produzir relatórios e acompanhar o desempenho desta estrutura.

Os principais instrumentos utilizados em barragens de terra estão apresentados a seguir, as descrições estão de acordo com as definições de Fusaro (2007):

- a) medidor de nível de água: utilizado para verificar a posição da linha freática;
- b) piezômetro: utilizado para verificar as pressões neutras em maciços de terra, talude e fundações, podem ser do tipo tubo aberto, hidráulico, pneumático, elétricos ou de fibra ótica;
- c) célula de tensão total: utilizado para verificar as tensões totais no maciço de solo;
- d) medidores de deslocamento: são utilizados para verificar o deslocamento vertical, o deslocamento horizontal e a variação de inclinação no maciço de solo.

2.3.2 Controle de Compactação

De acordo com Das (2007) a compactação aumenta a resistência dos solos, o que, por sua vez, aumenta a resistência das fundações construídas sobre sua superfície. Em obras de terra, como barragens, esse aumento de resistência é fundamental para a garantia da segurança desta estrutura. Desta forma, garantir a efetividade desta compactação é etapa fundamental para a construção de barragens, dado que cada uma das camadas construídas precisa ser compactada seguindo as instruções de projeto.

De acordo com Massad (2010) controlar a compactação significa verificar a adequação do equipamento compactador, se os parâmetros como a espessura da camada solta, o número de passadas, a velocidade e entre outros, estão de acordo com o especificado. Esse controle de compactação pode ser verificado a partir dos parâmetros de Grau de Compactação (GC) e Desvio de Umidade (Δh), no qual os valores desses parâmetros precisam estar de acordo com os que foram estabelecidos pelo projeto da estrutura a ser construída.

O Desvio de Umidade pode ser definido como a diferença entre a umidade do aterro e a umidade ótima (definida em projeto), esse valor pode ser estimado por equações que relacionam os pesos específicos do aterro. O outro parâmetro fundamental para verificação da compactação, o Grau de Compactação, é definido pela Equação 1.

$$GC = \frac{\gamma_{ua}}{\gamma_{uc\text{máx}}} \quad (1)$$

Em que:

γ_{ua} : Peso específico natural, ou peso específico úmido do aterro, determinado pelo processo do funil de areia.

$\gamma_{ucm\acute{a}x}$: Peso específico úmido (convertido para a umidade do aterro) máximo, valor este, determinado em laboratório.

2.4 Situações consideradas para análise de Estabilidade

A avaliação da estabilidade de uma barragem é realizada considerando diferentes condições de funcionamento, dado que em cada uma destas existem considerações específicas a serem realizadas. De acordo com Cruz (1996) as barragens podem ser avaliadas em três condições, que são:

- a) final de construção, incluindo todo o estágio de construção;
- b) regime de operação com a máxima capacidade do reservatório na cota da crista do vertedouro;
- c) rebaixamento rápido.

No entanto, apesar das três situações consideradas serem eficientes ao avaliar a estabilidade da barragem, alguns autores e instituições sugerem a análise da estabilidade em casos de abalos sísmicos. Para este trabalho será desenvolvido um estudo tomando como base a etapa de final de construção da Barragem de Açú, ou seja, etapa em que ainda não há presença de pressão causada pela água do reservatório.

2.4.1 Final de Construção

A análise feita durante a construção considera alguns parâmetros diferentes para avaliar a estabilidade. Nesta etapa, por ainda não existir o esforço solicitante causado pela pressão da água do reservatório, a barragem fica sujeita apenas as pressões internas, ou seja, essa tensão aumenta gradativamente de acordo com a construção por camadas.

Como não há pressão suficiente para a dissipação da poropressão é necessário garantir que a barragem seja capaz de suportar as solicitações, mesmo durante a construção, para que seja evitado o rompimento desta ainda durante o processo construtivo.

De acordo com Lima *et al.* (2017) a barragem deve ser analisada levando em consideração as sobrecargas atuantes no meio, devido a estas tensões neutras provocadas pela lenta expulsão da água dos poros do solo úmido. Portanto, nota se que quanto mais

impermeável a região, maior a concentração dessas pressões, evidenciando uma região mais frágil para rompimentos que acontecem ainda durante o processo construtivo.

2.4.2 Regime de Operação

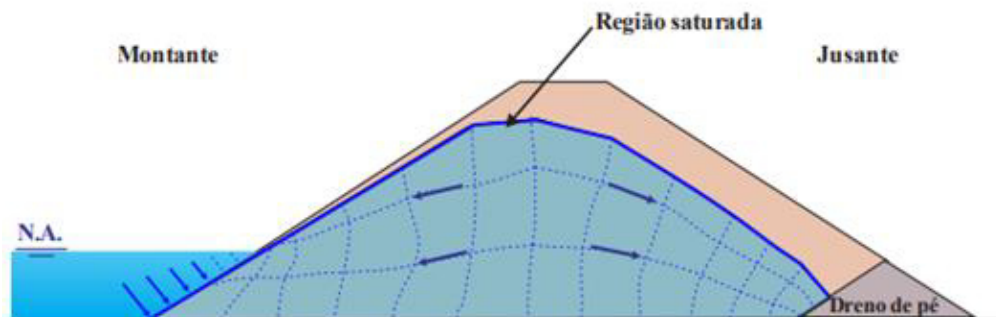
O regime de operação considera que a barragem está operando em sua cota máxima, ou seja, com o valor máximo de pressão causado pela água do reservatório. Este regime é considerado o mais crítico, dado que a barragem estará sujeita as máximas pressões possíveis.

De acordo com Lima *et al.* (2017) esta situação é talvez a mais importante dentre todas as situações a serem estudadas, isto por conta de que a barragem pode vir a estar submetida a este tipo de solicitação por várias vezes durante a sua vida útil.

2.4.3 Rebaixamento Rápido

O Rebaixamento rápido é uma condição em que pode existir um acúmulo de pressões internas a barragem, desta forma é considerado uma das situações mais críticas para barragens. De acordo com Ayala (2018) tal fenômeno pode acontecer devido à elevação do nível de água provocado pela cheia, e o nível freático manter-se elevado durante um certo período, de forma que após o nível da água da cheia sofre o rebaixamento, este processo pode ocorrer. A Figura 4 representa a distribuição das poropressões devido ao rebaixamento. Nesta é possível notar uma região saturada ao centro da barragem.

Figura 4 – Representação do Rebaixamento Rápido



Fonte: Ayala (2018)

2.5.4 Abalos Sísmicos

Uma situação a ser considerada para análise de barragens é a consideração de eventos pontuais, como os Abalos Sísmicos. De acordo com Ayala (2018) as poropressões atuantes no maciço são as mesmas desenvolvidas na hipótese de “regime de operação”, com o fluxo no estado estacionário. Desta forma, a análise dos esforços atuantes é realizada a partir da introdução de um coeficiente majorador dos esforços horizontais e verticais, ainda de acordo com Ayala (2018) esses valores são de 10% e 5% respectivamente, além de admitir que o reservatório esteja em regime de operação.

2.5 Parâmetros utilizados nas Análises

Para a realização das análises de estabilidade além da definição da geometria será necessário realizar a caracterização do material de forma eficiente para obter resultados coerentes. Alguns destes parâmetros já são inicialmente definidos e consolidados como valores fixos, no entanto outros parâmetros que podem exercer função importante das análises tem uma variabilidade maior, como o Parâmetro RU e a condição de drenagem da argila. Desta forma, a inclusão e variação destes parâmetros nas análises que serão realizadas é de extrema importância.

2.5.1 Parâmetro RU

O parâmetro RU relaciona as pressões neutras com a tensão vertical para cada ponto em um maciço de solo ou talude, a partir desse parâmetro é possível descrever análises mais precisas para regiões em que a o acúmulo de poropressões pode causar danos, como em núcleos argilosos de barragens de terra.

Esse parâmetro foi proposto inicialmente por Bishop & Morgenstern (1960), e pode ser calculado pela Equação 2, apresentada a seguir.

$$Ru = \frac{u}{\sigma_v} \quad (2)$$

Em que:

u: Pressão Neutra no ponto avaliado

σ_v : Tensão Vertical no ponto avaliado

Esse parâmetro é frequentemente incluído nas rotinas de cálculos dos principais *softwares* de análise de taludes, no entanto, é importante observar que esse parâmetro pode variar de ponto a ponto, então considerá-lo constante em situações inadequadas podem causar erros de cálculo.

Tendo em vista a importância da definição correta das cargas piezométricas na estimativa do fator de segurança, avaliar a estabilidade com base em um único valor de ru pode resultar numa avaliação incorreta das condições de estabilidade, porque, dependendo das condições de distribuição de poropressão, é praticamente impossível definir um valor constante, válido para todo o talude. (GERSCOVICH, 2016)

De acordo com Sandroni (1986) *apud* Vilhete (2017) nenhuma barragem, em processo construtivo, com inclinações normais, apresenta ruptura sem ser causado por geração de excesso de poropressão. Logo, ao considerar uma análise de estabilidade no final de construção, em que há predominância de poropressão, ressalta-se a importância de inserir um parâmetro que seja capaz de caracterizar as poropressões ponto a ponto nas análises a serem desenvolvidas.

2.5.1.1 Valores típicos de RU

Os valores do parâmetro RU são dados em formato percentual e são inseridos nos programas de avaliação de barragens com números que variam de zero a um. Santos (2021) desenvolveu um estudo no qual avalia o valor desse parâmetro em amostras de solo, e por meio deste, assim como indica outros autores, a poropressão varia de acordo com a tensão exercida no ponto, e essa variação tende a ser linearmente dependente.

Cruz (1996) desenvolveu uma análise a partir de diversas amostras com o intuito de caracterizar as poropressões de diferentes materiais. Para isso, ele definiu 4 grandes grupos de solos e percebeu que o comportamento desses materiais seguia um padrão de acordo com a classificação definida. O Quadro 1, apresenta a descrição dos grupos.

Quadro 1 – Descrição dos Grupos dos Solos para caracterização do Parâmetro RU

Grupo	Descrição	Continua
Grupo I	Solos lateríticos argilosos, também denominados solos residuais maduros e/ou colúvios. São solos argilosos, e que podem ter sido muito ou pouco transportados. São formados essencialmente devido aos processos de	

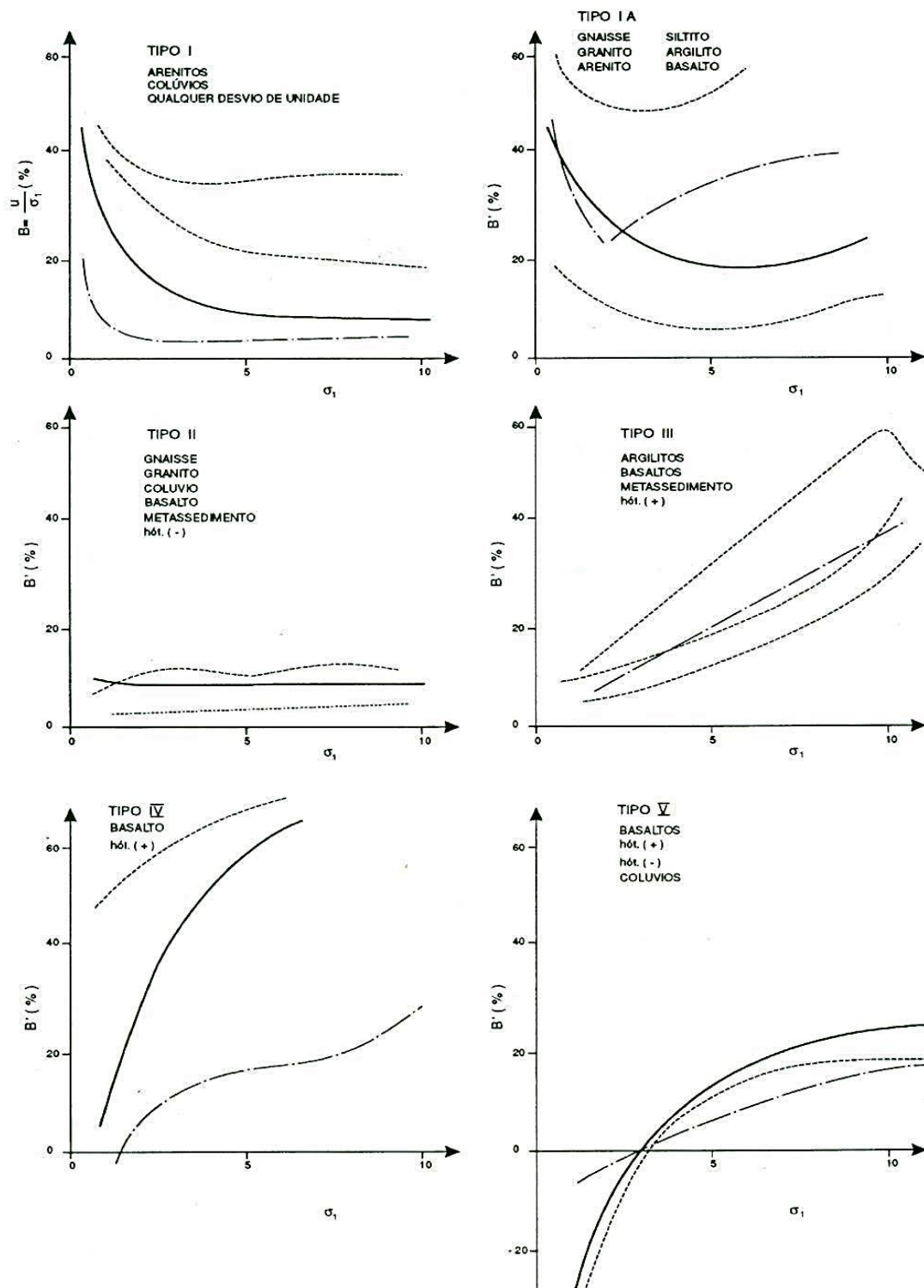
Grupo	Descrição	Continuação
	intemperismo, tanto de rochas ígneas intrusivas e extrusivas como de rochas metamórficas.	
Grupo II	Solos saprolíticos (às vezes chamados solos residuais jovens), que sofreram pouca ou nenhuma ação do processo de laterização. São compactos, frequentemente heterogêneos, mais siltosos em algumas formações, e possuem alta umidade natural. São originários das mesmas rochas dos solos do Grupo I e resultam do intemperismo <i>in situ</i> da rocha matriz.	
Grupo III	Solos lateríticos arenosos, às vezes identificados como colúvios. São solos mais transportados que os do Grupo I, e é comum encontrá-los misturados a outros solos. Este é o caso de solos originados do intemperismo de arenitos, mas que contêm uma fração argilosa proveniente de basalto ocorrente na área. São formados por materiais originados de rochas sedimentares, principalmente arenitos, ou de areias cenozoicas.	
Grupo IV	Solos transportados, em algumas áreas identificados como solos coluviais, originários, de sedimentos. Dependendo de sua origem, podem ser mais ou menos argilosos, siltosos ou arenosos, e muito ou pouco afetados pelos processos de laterização. Solos originários de outras rochas sedimentares, tais como argilitos, xistos, siltitos e arenitos, ou de rochas metamórficas, como filitos e micaxistos, dependendo do grau de intemperismo e laterização, podem ser enquadrados nos Grupos I, II e III.	

Fonte: Cruz (1996) modificado pela Autora.

Após a definição do grupo em que o material se encontra é possível analisar os valores típicos do parâmetro RU de acordo com os gráficos apresentados na Figura 5. Os gráficos apresentam valores obtidos a partir de ensaios e descrevem a variação do parâmetro de acordo com as tensões.

O eixo vertical representa o parâmetro RU nomeado no gráfico como "B'" e o eixo horizontal representa a tensão em kg/cm². A classificação de tipos segue a classificação de grupo apresentada no Quadro 1, além de adicionar dois grupos complementares que são descritos na própria Figura.

Figura 5 – Curvas típicas de Variação do Parâmetro RU em Função do Grupo de Solo



Fonte: Cruz (1996)

2.5.2 Condição de Drenagem da Argila

De acordo com Clemente *et al.* (2019) a resistência não drenada ocorre na prática quando um carregamento externo é aplicado a uma velocidade mais rápida do que a velocidade

em que a poropressão é dissipada, podendo ser determinada através de ensaios de campo e de laboratório. Em uma barragem em processo construtivo o carregamento externo é dado pelo incremento de carga causado pela implementação da própria barragem, logo devido a esse carregamento o solo pode chegar à condição não drenada.

A condição não drenada tende a ter uma maior influência em solos argilosos devido a sua menor permeabilidade quando comparado a outros solos arenosos, como exemplo. Quando a argila se encontra nessa condição, observa-se a tendência de diminuição do coeficiente de atrito, podendo chegar ao limite nulo desse parâmetro, desta forma esse solo tende a ter uma resistência ao atrito menor, diminuindo assim, sua resistência global.

Desta forma, ao incorporar essa condição às análises é possível determinar uma condição menos estável para a seção, além disso, se as análises que considerem a argila não drenada fornecerem valores de Fator de Segurança unitário, logo pode ser possível inferir que existe algum acúmulo de tensão que causou essa condição a esse material, que em barragens em final de construção é dado pela poropressão.

2.6 Estabilidade de Talude de Barragens

De acordo com Gerscovich (2016) o objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Desta forma, nota-se que esta avaliação é de extrema importância para garantir a segurança de barragens, dado que o deslizamento de taludes é um dos principais problemas que podem acontecer em obras de barramento.

2.6.1 Causas gerais de instabilidade

Segundo a NBR 11682 ABNT (1991) a instabilidade de taludes pode ser induzida por processos erosivos ou por processos devidos à liquefação de solos superficiais. Ainda de acordo com a Norma, existem cinco processos próprios de instabilidade, que são:

- a) instabilidade superficial;
- b) instabilidade interna;
- c) instabilidade de grandes massas;
- d) instabilidade devida à particularidade geológica local;
- e) colapsos ou deficiência de obras de estabilização.

Projetar uma barragem com elementos que sejam capazes de garantir a estabilidade para todas as causas citadas anteriormente é fundamental para garantir a segurança dessa estrutura, para isso é importante compreender quais processos a barragem em estudo estará submetida.

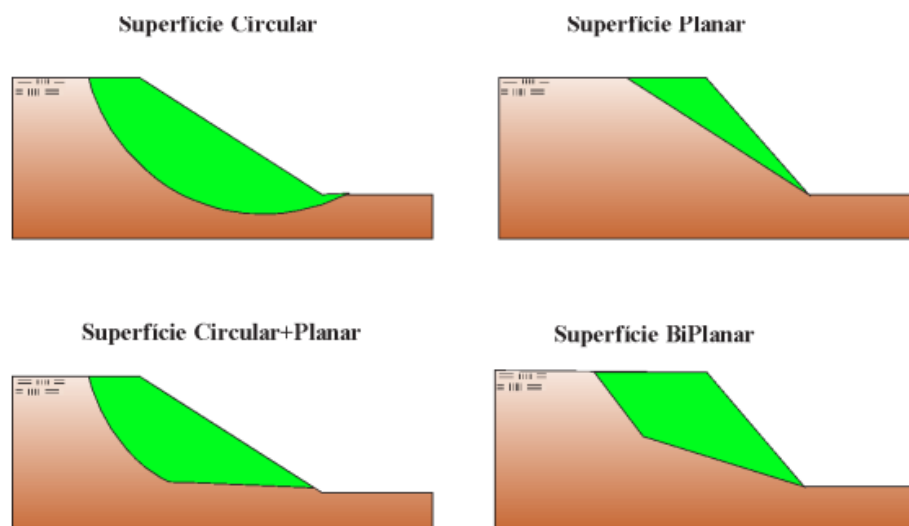
2.6.2 Tipos de Superfície de escorregamento

De forma geral, quando o talude da barragem se encontra instável o rompimento acontece por meio de um escorregamento da massa de solo que se localiza acima da superfície de ruptura. De acordo com Gerscovich (2016) os escorregamentos são movimentos de massa rápidos, com superfície de ruptura bem definida, a deflagração do movimento ocorre quando as tensões cisalhantes mobilizadas na massa de solo atingem a resistência ao cisalhamento do material.

De acordo com Gerscovich (2016) conforme as condições geomorfológicas, as superfícies de ruptura podem ser planares, circulares, em cunha, ou uma combinação de formas (circular e plana), denominadas superfícies mistas. A Figura 6 representa algumas dessas superfícies citadas, cabe ressaltar que o formato da ruptura está diretamente relacionado com os esforços atuantes e as condições do material.

Nas análises que serão realizadas autores como Vilhete (2017), Souza (2017) e Rocha (2003), sugerem que a ruptura da Barragem de Açú tende a ser uma ruptura não circular, devido a sua tendência de horizontalização na região central plana do núcleo da barragem.

Figura 6 – Representação dos tipos de superfícies de ruptura



Fonte: Lima *et al.* (2017)

2.6.3 Fator de Segurança

De acordo com a NBR 11682 (1991) Fator de Segurança (FS) é definido como a relação entre os esforços resistentes e os esforços atuantes para determinado método de cálculo adotado. Teoricamente quando esse fator se iguala a 1, a ruptura do talude ocorre nos pontos que ficam sobre a superfície potencial de ruptura, desta forma, para garantir a segurança esse valor deve ser sempre superior a 1.

O fator de segurança admissível, de acordo com a ABNT, a ser utilizado em cada projeto, varia em função do grau de segurança necessário ao local, de acordo com a NBR 11682 (1991) esse valor pode variar entre 1,50 para grau de segurança mais alto a 1,15 para grau de segurança mais baixo. Apesar da precisão do Fator de Segurança dado pela NBR é notório que o valor é definido em função do grau de segurança, não considerando as diferentes situações a serem analisadas, assim como propostas na seção 2.4.

Carvalho (1983) *apud* Santos (2021) propõe valores para o Fator de Segurança em função da condição adotada, definindo assim os valores admissíveis a serem utilizados ao longo desse trabalho, a Tabela 1 relaciona a condição analisada com o Fator de Segurança admissível. Apesar de ser um parâmetro que representa a segurança do talude, é importante ressaltar que além do Fator de Segurança deve ser avaliado a estrutura da barragem por meio de instrumentação durante a utilização e construção desta obra.

Tabela 1 – Valores Mínimos Admissíveis do Fator de Segurança (FS)

Condição de Análise	FS Mínimo Admissível	Taludes Considerados
Final de Construção	1,4	Montante e Jusante
Regime de Operação	1,5	Jusante
Abalo Sísmico	1,0	Jusante
Rebaixamento Rápido	1,1	Montante

Fonte: Carvalho (1983) *apud* Santos (2021)

De acordo com Gerscovich (2016),

um aspecto fundamental a ser observado é que, independentemente da forma de estabelecer o grau de segurança de um talude, é sempre recomendável, além das investigações geotécnicas, a instalação de instrumentação de campo, com o objetivo de acompanhar as movimentações horizontais e verticais do talude e os níveis piezométricos. Esse monitoramento deve ser feito durante ou após a execução da obra. De posse dessas informações, o projetista tem condições de avaliar as premissas de projeto e/ou sugerir correções no modelo original.

Como citado a segurança geral de uma barragem não pode ser determinada apenas pelo seu fator de segurança, no entanto, esse parâmetro serve como base inicial para a verificação da estabilidade nas condições analisadas, desta forma, em análises de taludes esse fator é a melhor alternativa para classificação da estabilidade da seção estudada.

2.7 Métodos de Avaliação de Estabilidade

A avaliação da estabilidade pode ser realizada por diversos métodos, no entanto, os mais utilizados nos meios computacionais existentes são o Método do Equilíbrio Limite e o Método dos Elementos Finitos.

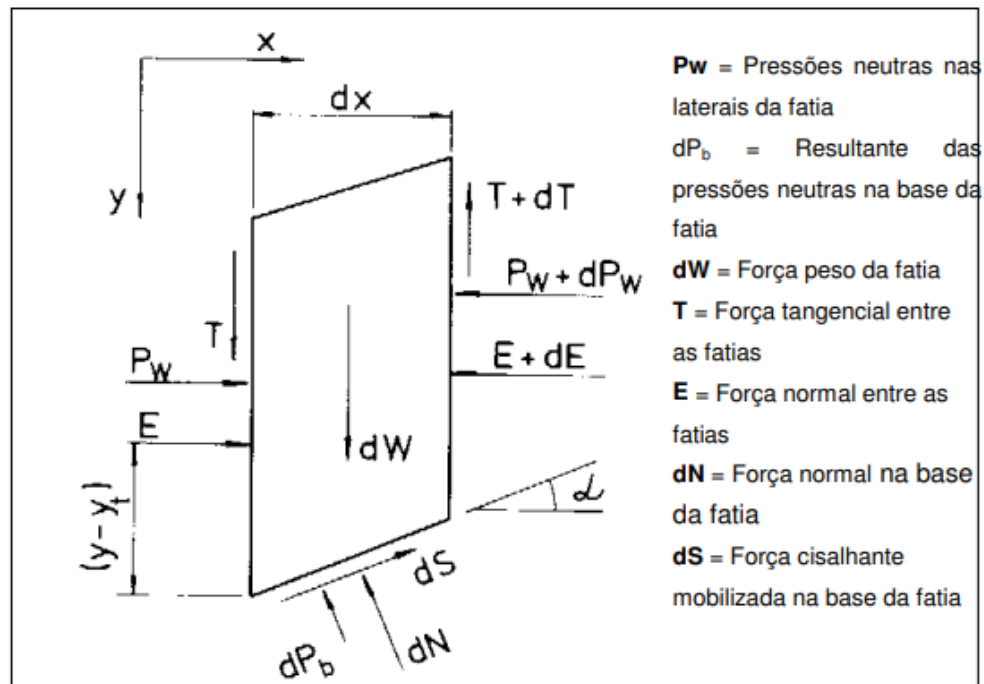
2.7.1 Métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade

O método do equilíbrio limite é o mais utilizado para avaliar a estabilidade de taludes, de acordo com Vilhete (2017) os métodos que têm como base o equilíbrio limite são populares devido à simplicidade e ao reduzido número de parâmetros que estes requerem, de forma geral, são necessários apenas os seguintes parâmetros para que ocorra a avaliação por esse método: geometria, topografia, geologia, cargas estáticas e dinâmicas, parâmetros geotécnicos e condições hidrogeológicas.

A teoria do método do equilíbrio limite se baseia no equilíbrio da massa de solo (definido anteriormente por meio de uma superfície) em relação aos esforços solicitantes, esse método considera o solo como material rígido plástico e que o rompimento ocorre sem deformação do material. Partindo do método de equilíbrio limite, é possível propor diferentes métodos com suas hipóteses adotadas, que são: *Bishop*, *Fellenius*, *Spencer* e *Morgenstern-Price*.

No estudo a ser realizado será utilizado o método de *Morgenstern-Price*, proposto inicialmente em 1965, esse método é considerado como um dos mais rigorosos, quando utiliza-se o método do equilíbrio limite, dado que sua aplicação é condicionada a métodos computacionais. De acordo com Fabrício (2006) sua formulação faz com que as condições de estabilidade satisfaçam simultaneamente todas as condições de equilíbrio de forças e de momentos. A Figura 7 apresenta a distribuição dos esforços existentes na fatia.

Figura 7 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de *Morgenstern-Price*



Fonte: Fabrício (2006)

2.7.2 Método dos Elementos Finitos

Apesar dos métodos de análise de estabilidade via equilíbrio limite serem eficientes e utilizadas de forma ampla, esses métodos fornecem algumas limitações quando ao seu uso e aos resultados obtidos. Para isso, o Método dos Elementos Finitos (MEF) quando aplicado com análises de tensão *versus* deformação podem fornecer valores mais precisos, pois fazem menos aproximações nos cálculos dos esforços solicitantes em cada uma das fatias da seção potencial de ruptura avaliada.

Souza (2017) cita que o MEF é regido por equações matemáticas que simulam a relação entre o esforço atuante e a deformação sofrida pelo solo, através de modelos constitutivos. A precisão do método e o tempo de processamento está diretamente ligado a escolha da malha para as análises, para isso é necessário analisar qual malha se enquadra para a necessidade do estudo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise da estabilidade da barragem será feita por meio de *softwares* utilizados para a avaliação de taludes baseado no método dos elementos finitos, além da incorporação de outros métodos para permitir possíveis comparações.

3.1 Materiais utilizados para a análise

Devido ao estudo proposto se tratar de uma análise computacional de taludes de barragens em processo construtivo, o principal material de estudo é a Barragem de Açú, mais especificamente o talude de montante, da região central, que foram propostos para a construção antes do rompimento, que serão descritos a seguir.

A barragem Engenheiro Armando Gonçalves, Figura 8, popularmente conhecida por Barragem de Açú, foi construída sobre o leito do rio Piranhas-Açú, localizada na cidade de Açú – RN. Foi projetada com a finalidade de atender o suprimento de água do Projeto de Irrigação do Baixo Açú. De acordo com o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) (2022) a barragem teve sua construção iniciada em maio de 1979 e sua conclusão em abril de 1983, o reservatório tem capacidade de acumulação de $2,4 \times 10^9 \text{ m}^3$ e é considerado o maior reservatório de água no Rio Grande do Norte e até o ano de sua construção foi o maior reservatório construído pelo DNOCS.

Figura 8 – Vista superior da Barragem de Açú - RN



Fonte: Andrade (2018)

3.1.1 Aspectos Geológicos

A descrição geológica da região e dos materiais utilizados estão de acordo com os dados apresentados nos trabalhos de Rocha (2003), Souza (2017) e Vilhete (2017).

A formação rochosa da região é composta por um complexo granítico migmatítico cinza, com características xistosas, com a presença de pontos bastantes alterados. Na região sobre o substrato rochoso do leito do rio há a presença de uma camada de 26 metros de espessura de sedimentos aluvionares, com compacidade de fofa a pouco compacta e altos valores de permeabilidade.

Os materiais de empréstimo para a construção da seção da barragem foram extraídos de 4 áreas de empréstimo que ficam entre 2 km e 5 km do local de construção da barragem, apresentado na Figura 9. Os materiais foram divididos em 2 grupos, o Grupo I é formado pelos materiais extraídos da área de empréstimo 1 e correspondem aos solos residuais do Arenito do Açú, já o Grupo II é formado pelos materiais das áreas de empréstimos 2, 3 e 4 e consistem em depósitos aluvionares.

Figura 9 – Áreas de Empréstimo



Fonte: Rocha (2003) *apud* Souza (2017)

A partir dos dois grupos, foram encontrados 5 tipos de solos nas áreas de empréstimos, sendo eles: Areia Argilosa, de granulação variada, avermelhada com pedregulhos finos (IA); Pedregulho com areia de granulação variada, argiloso, avermelhada (IB); Pedregulho areno siltoso e areia, avermelhada, de granulação variada, siltosa, com pedregulhos (IC); Siltes argilo arenosos e argilas silto arenosas de coloração escura (IIA); Areia de

granulação variada com pedregulhos finos de coloração clara (IIB). As propriedades geotécnicas desses materiais são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades geotécnicas dos solos de empréstimo

Tipo de Solo	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (graus)	Coefficiente de Permeabilidade (m/s)
IA	30	30	$\approx 10^{-9}$
IB	30	30	$\approx 10^{-9}$
IC	30	28	Elevado
IIA	50	15	Entre 10^{-8} e 10^{-9}
IIB	20	20	$\approx 10^{-9}$

Fonte: Rocha (2003) modificado pela autora

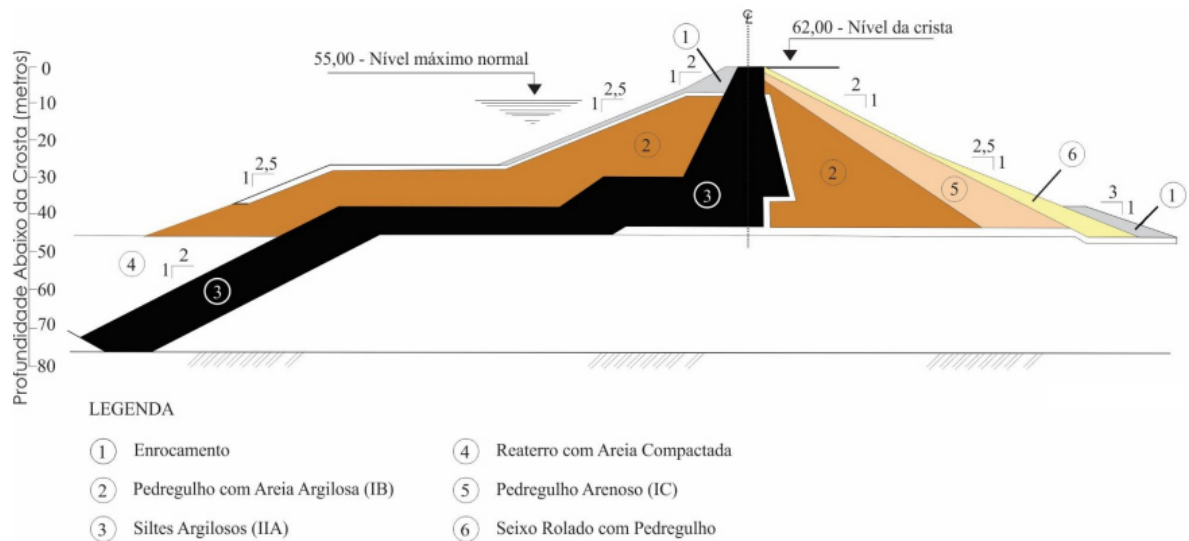
3.1.2 Aspectos Construtivos

A Barragem de Açú conta com três seções ao longo de sua extensão, uma para a ombreira direita, uma para a ombreira esquerda e uma para a região central que fica sobre a principal faixa do leito do rio. O estudo a ser realizado ao longo desse trabalho tomará como base a seção central, dado que foi a região que sofreu o rompimento.

O primeiro projeto proposto era de uma barragem de seção zoneada com diferentes tipos de solos, havendo a presença de um núcleo argiloso e um *cut off* de formas isoladas. O *cut off* foi adotado como uma solução para a grande camada de aluvião de alta permeabilidade sob a fundação da barragem, dado que a execução dessa trincheira de vedação tende a evitar a percolação de água sob a barragem.

Ainda durante a construção foi proposta uma mudança na seção da barragem, propondo a interligação do núcleo e do *cut off*, ambos construídos com o mesmo material argiloso (IIA). A Figura 10 mostra uma representação das alturas e dos materiais utilizados para a construção da seção da barragem.

Figura 10 – Projeto da seção da barragem construída antes do rompimento



Fonte: Rocha (2003) modificado pela autora

3.1.3 Rompimento

O projeto inicial tinha a conclusão das obras previstas para fevereiro de 1982, no entanto em dezembro de 1981, quando faltava aproximadamente 5 metros para a altura final da seção da barragem, o talude de montante sofreu uma ruptura. De acordo com Vilhete (2017) a ruptura se iniciou com o aparecimento de uma pequena fissura não contínua na crista e se desenvolveu na forma de uma trinca contínua com aproximadamente 600 metros de extensão.

Rocha (2003), Souza (2017) e Vilhete (2017) citam que a ruptura fez com que mais de 800.000 m³ de solo fossem mobilizados, além disso o nível do maciço ficou 15 metros abaixo da cota de aterro não envolvido no deslizamento, os materiais do pé do talude deslocaram-se horizontalmente cerca de 25 metros. A Figura 11 apresenta a ruptura ocorrida na barragem, na qual é possível notar a grande mobilização de material que esse acidente causou.

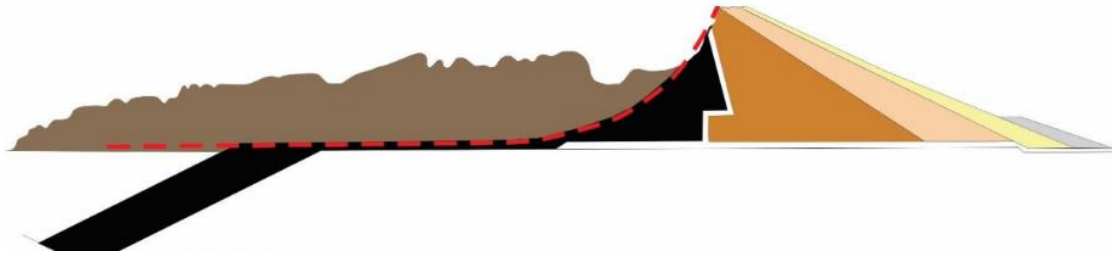
Após estudos realizados a fim de identificar a possível causa da ruptura, observou-se a existência de uma superfície de ruptura curva próximo ao núcleo e que próximo ao trecho que liga o *cut off* ao núcleo, a superfície permaneceu plana horizontalmente, como é apresentado na Figura 11. A partir dessa superfície, apresentada na Figura 12, notou-se que a superfície se desenvolveu ao longo da região que comportava o material do grupo IIA (Siltes e Argilas Arenosas).

Figura 11 – Vista superior da ruptura da Barragem de Açú em 1981



Fonte: Rocha (2003) modificado pela Autora.

Figura 12 – Representação do escorregamento do talude de montante.

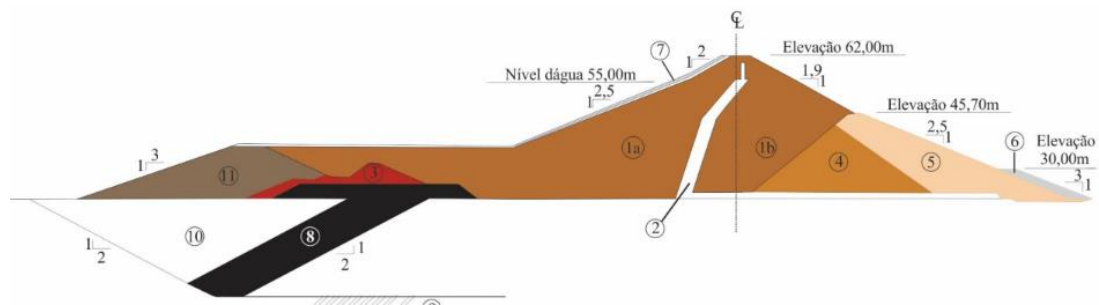


Fonte: Rocha (2003) apud Vilhete (2017)

Rocha (2003), Souza (2017) e Vilhete (2017) citam que a partir das investigações, o material do grupo IIA apresentava-se visualmente bastante plástico, com laminação intensa, e com teor de umidade superior ao ótimo. Esses fatores evidenciam que existiu um grande aumento da poropressão nessa região, sendo a principal causa da ruptura da barragem ainda em período construtivo. Cruz (1996) cita que apesar das poropressões excessivas, se o equipamento de compactação fosse leve, a laminação não ocorreria e a água ocuparia os vazios de forma mais uniforme, minimizando possíveis danos.

Para a reconstrução foram mantidas as partes que não foram atingidas pelo escorregamento e houve a remoção do material mobilizado, na nova região da seção da barragem passa a ser do tipo homogênea e passa a não existir mais a ligação entre o núcleo e o *cut off*, como é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Seção Reconstruída após a ruptura



Fonte: Rocha (2003) *apud* Vilhete (2017) modificado pela Autora.

3.2 Coleta de Dados da Barragem de Açú

A análise que será realizada considera a seção da barragem que estava construída antes do rompimento, logo as fontes de dados são da década de 80, ou seja, não existem projetos digitais de fácil acesso, existindo apenas estudos e relatórios técnicos sobre essa barragem. Desta forma, serão utilizados dados de artigos publicados em seminários nacionais, artigos publicados em revista internacionais, além de materiais de livros e trabalhos acadêmicos.

De Mello (1982) desenvolveu um estudo denominado *A case history of a major construction period dam failure* (Em tradução livre: Um histórico de caso de uma grande falha de barragem no período de construção), em que faz uma análise sobre a barragem de Açú. A partir desse estudo foi possível obter dados da geometria que estava construída antes do rompimento, além de parâmetros de projeto dos solos utilizados na construção. A Figura 14 apresenta a seção da barragem com inclinações e dimensões equivalentes.

Outras fontes de dados para os parâmetros do solo da barragem serão extraídas dos estudos de Rocha (2003), Vilhete (2017) e Souza (2017), além destes, os dados apresentados na Tabela 2 serão incorporados a análise que será realizada. Carvalho *et al.* (1981) publicaram um artigo no Seminário Nacional de Grandes Barragens em 1981, no qual traz informações, como as justificativas das escolhas de projeto adotadas, além de informações completas da geometria da barragem que complementarão os dados apresentados na Figura 14.

A descrição dos materiais, de acordo com a numeração das regiões está descrita na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição dos materiais da seção

Numeração	Descrição
1	Fundação de Sedimentos Aluvionares (Aluvião) de alta permeabilidade
2	Sistema de Filtros de Areia
3	Núcleo Silto Argiloso (Material IIA da Tabela 2)
4	Pedregulho com Areia Argilosa (Material IB da Tabela 2)
5	Pedregulho Arenoso (Material IC da Tabela 2)
6	Seixo Rolado com Pedregulho
7	Enrocamento

Fonte: Elaborada pela autora

3.4 Determinação dos parâmetros de uso nas Análises

Nesta seção serão apresentados os parâmetros utilizados nas análises a serem realizadas. Cabe ressaltar que o material argiloso do núcleo da barragem apresenta diferença em seus valores de coesão e ângulo de atrito para condições diferentes, de acordo com a literatura.

3.4.1 Coesão e ângulo de atrito do núcleo.

Como citado na seção 3.1.3 o rompimento da barragem ocorreu na área do núcleo com o material argiloso, desta forma torna importante conhecer os parâmetros mais precisos desta região para que a análise possa ser realizada. O núcleo é composto pelos materiais extraídos da Jazida de Grupo II e é formado por materiais do tipo Silto Argiloso (IIA), os valores de projeto para esse solo, de acordo Rocha (2003), são de coesão igual a 50 kPa e ângulo de atrito de 15°.

No entanto, de acordo com Penman (1985) após o rompimento tomou-se amostras para que fossem realizados ensaios, então percebeu-se que o valor do ângulo de atrito dessa região estava nulo. O estudo de De Mello (1982) mostra que a coesão e o ângulo de atrito variam de acordo com a tensão confinante, isso ocorre pois os altos níveis de pressão nas regiões

da argila comprimem o ar, e causam uma maior saturação nesse solo, fazendo com que este esteja em condições não drenadas. Logo, como as tensões na região da argila eram muito elevadas devido ao peso próprio da barragem é coerente perceber que o ângulo de atrito tende a se alterar.

Autores como Penman (1985) e Sandroni (1986) realizaram retroanálises na seção antes do rompimento da barragem, e obtiveram valores de Ângulo de Atrito nulo e Coesão em torno de 48 kPa.

Vilhete (2017) desenvolveu um estudo de retroanálise a partir de uma abordagem determinística e obteve valores de coesão igual a 47,1 kPa e Ângulo de Atrito nulo, para o momento do rompimento. Desta forma, por se tratar de um estudo que envolve mais avaliações e que incorpora dados de outros autores citados, esse será o valor a ser considerado para avaliar a argila em condição não drenada. Por haver diferença entre os parâmetros de projeto e os parâmetros determinados no momento do rompimento, a análise será feita considerando as duas condições diferentes, drenada e não drenada, os dados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de coesão e ângulo de atrito para o núcleo argiloso (Região 3)

Condição	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (Graus)
Drenada	50,0	15
Não-Drenada	47,1	0

Fontes: Rocha (2003) e Vilhete (2017)

3.4.2 Parâmetro RU

Como citado no item 2.5.1 os valores do parâmetro RU variam de acordo com a tensão confinante, desta forma, para definir os valores é necessário caracterizar o material de acordo com os grupos citados.

Cruz (1996) apresenta que os valores mais consideráveis e variáveis do parâmetro RU ocorrem em materiais argilosos, logo, para a análise será considerado os valores de RU apenas para os solos do núcleo (Região 3 da Figura 15) e para a maior porção de espaldar (Região 4 da Figura 15). A seguir os parâmetros de RU dos solos serão definidos a partir da caracterização do solo que está apresentada no item 3.1.1.

O solo do núcleo (Região 3) é constituído por depósitos sedimentares e tem sua composição em siltes, argilas e areias. Utilizando a caracterização em grupos apresentada por Cruz (1996) percebe-se que o solo se encaixa no Grupo III. De acordo com a geometria a região

mais solicitada do núcleo tem uma tensão média de 800 kPa, representando a tensão causada pelo peso próprio da barragem no ponto mais profundo da região. Desta forma, utilizando o gráfico do Tipo III, apresentado na Figura 5, é possível definir que os valores típicos de poropressões desse material, para a faixa de tensão citada, está entre 20% e 55%.

O solo da Região 4 é constituído por materiais residuais do arenito de Açú e tem sua composição como pedregulho com areia de granulação variada. Utilizando a caracterização em grupos percebe-se que o solo se encaixa no Grupo I. Seguindo a geometria é notório que a região mais solicitada dessa camada tem uma tensão média de 500 kPa, representando a tensão causada pelo peso próprio da barragem no ponto mais profundo da região. Desta forma, utilizando o gráfico do Tipo I apresentado na Figura 5 é possível definir que os valores típicos de poropressões desse material, para a faixa de tensão citada, está entre 10% e 35%.

3.4.3 Parâmetros de Tensões

Para as análises pelo Método dos Elementos Finitos, além dos parâmetros de caracterização do solo também será necessário a inclusão de parâmetros de caracterização para estudo de tensões no solo, como o coeficiente de Poisson e o Módulo de elasticidade.

Souza (2017) considera o coeficiente de Poisson como 0,334 para todos os solos utilizados na seção da barragem estudada. Esse valor a ser considerado está coerente com a literatura dado que esse parâmetro de acordo com Texeira & Godoy (1996) varia de 0,3 a 0,4 para os solos empregados na construção da Barragem de Açú. Souza (2017) também desenvolveu uma análise a partir dos dados de Rocha (2003) e determinou o módulo de elasticidade dos materiais utilizados na seção da barragem, os únicos materiais em que o módulo de elasticidade não foram explicitados são os das regiões 5 e 6 (Figura 15), no entanto, por se tratar de materiais com características semelhantes à da região 4 e por serem extraídos do mesmo grupo de materiais, optou-se por espelhar os valores. A Tabela 5 apresenta os valores do Módulo de Elasticidade para cada região da barragem definida anteriormente na Figura 15.

Tabela 5 – Módulo de Elasticidade dos solos da Barragem

Região	1	2	3	4	5	6	7
Módulo de Elasticidade (MPa)	120	90	14	20	20	20	100

Fonte: Souza (2017)

3.4.4 Parâmetros de todas as regiões analisadas.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos parâmetros utilizados para a análise, além dos parâmetros já discutidos nos itens 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 a tabela incorpora dados das demais regiões. Os dados da Região 1 foram obtidos pelo estudo de Vilhete (2017), os dados das Regiões 2, 6 e 7 foram obtidos a partir do estudo de De Mello (1982) enquanto os dados das regiões 3, 4 e 5 seguem os valores apresentados na Tabela 2, tendo como fonte Rocha (2003). Os valores de RU considerados são apenas os que já foram citados, logo apenas as regiões 3 e 4 consideram esse parâmetro.

Tabela 6 – Quadro resumo dos parâmetros das Regiões da Barragem

Região	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (graus)	Peso Específico (KN/m³)	Parâmetro RU (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefficiente de Poisson
1	0	30	19	-	120	0,334
2	0	35	19	-	90	
3	50	15	19	20 - 55	14	
	47,1*	0*				
4	30	30	20	10 – 35	20	
5	30	28	20	-	20	
6	0	35	20	-	20	
7	0	38	20	-	100	

Fontes: De Mello (1982), Rocha (2003), Souza (2017), Vilhete (2017) e a Autora.

*Condição Não-Drenada

3.5 Análise Computacional

Partindo da seção modelada e com os parâmetros dos solos definidos, é possível realizar análises para verificar a estabilidade da barragem, além de poder verificar a influência de outros parâmetros na modelagem, como a incorporação do parâmetro RU e a avaliação das condições da argila do núcleo.

As modelagens foram realizadas utilizando o *Software GeoStudio*, um programa desenvolvido pela empresa *Seequent Limited* em 1977 e teve sua versão mais atual com novos recursos a partir de 2016, foi escolhido como ferramenta para a execução desse trabalho por se

tratar de um programa com uma interface intuitiva, com geração de resultados de fácil interpretação e com um tempo de análise coerente para as pesquisas realizadas.

No *GeoStudio* é possível realizar análises a partir de 7 módulos instalados no próprio programa, nesse estudo serão utilizados dois destes, sendo eles o *SLOPE/W* e o *SIGMA/W*. O primeiro é utilizado em avaliações de estabilidade geral, no qual é possível gerar dados de Fator de Segurança e a Superfície Potencial de Ruptura, esse módulo baseia-se na metodologia do Equilíbrio Limite para a avaliação das fatias em estudo, nesse módulo é possível inserir análises de poropressão incluindo o parâmetro RU. Já o segundo, será utilizado para avaliações de Tensão *versus* Deformação para o estudo por meio do Método dos Elementos Finitos.

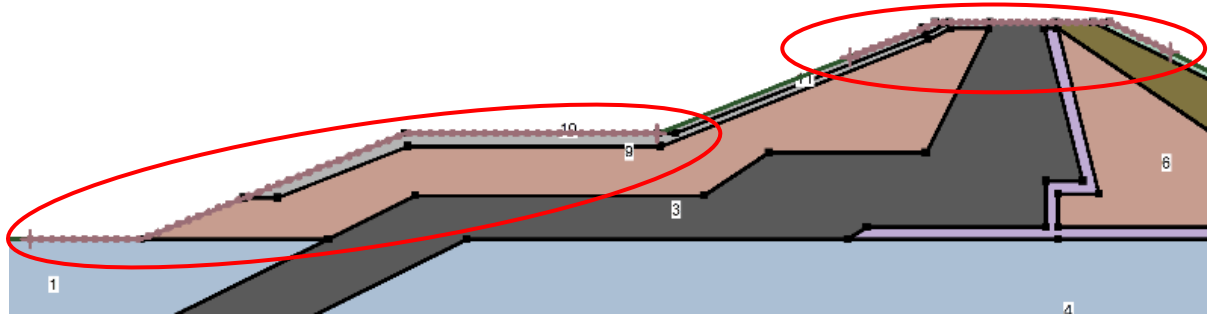
3.5.1 Modelagem pelo Método de Morgenstern-Price.

A modelagem pelo método de *Morgenstern-Price* segue a metodologia do estado do Equilíbrio Limite, devido a sua precisão, foi o método utilizado para as análises de equilíbrio limite. Sua precisão é oriunda da rigidez dos cálculos e da quantidade de interações para atingir a convergência, por isso, é mais eficiente seu uso em programas computacionais. O método é aplicado no módulo *SLOPE/W* que utiliza a discretização das regiões de estudo para verificar cada uma das superfícies potenciais de ruptura, determinando qual o Fator de Segurança e apresentando a superfície com o menor valor, ou seja, a mais instável.

Partindo da seção já modelada e com os parâmetros inseridos, o processo de análise inicia-se a partir da definição da região de entrada e saída para a investigação da estabilidade de cada uma das superfícies estudadas. No exemplo da Figura 16 é possível perceber a definição dessa região, na qual é feita na área em que se espera que a superfície crítica deva estar.

Um dos parâmetros de precisão do método parte da quantidade de pontos em que as regiões serão definidas, no exemplo apresentado existem 40 pontos da superfície de entrada e 60 pontos na superfície de saída, além de 30 divisões no raio de pesquisa. A discretização dessa região é um dos responsáveis pela precisão do estudo, no entanto também é responsável pelo tempo de processamento do estudo no *Software*. A região marcada em vermelho superior representa a região de entrada e a inferior a região de saída.

Figura 16 – Região de Pesquisa

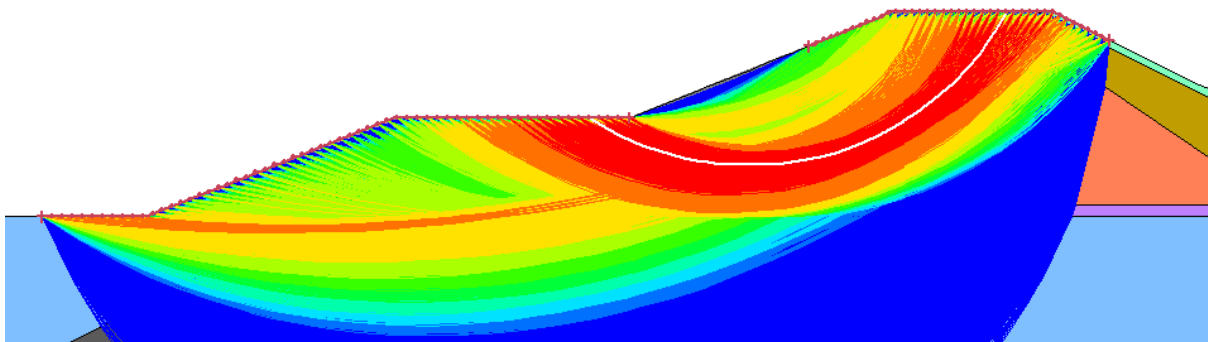


Fonte: Elaborada pela autora

Após a definição da superfície de entrada e saída, define-se as configurações gerais do modelo, escolhendo o método a ser utilizado e quais variáveis analisar, logo após inicia-se a obtenção de resultados. Para o exemplo citado anteriormente o programa pesquisou mais de 77 mil superfícies e autoselecionou a superfície mais crítica, obtendo como resultados o Fator de Segurança e a Geometria desta superfície.

O resultado pode ser apresentado de algumas formas, de acordo com os parâmetros selecionados. A Figura 17 mostra um exemplo de saída possível, no qual nota-se todas as superfícies de pesquisa analisadas, a cor representa o grau de instabilidade da seção, dado que em vermelho apresentam-se as superfícies com menor Fator de Segurança.

Figura 17 – Distribuição de superfícies potenciais de ruptura ao longo da seção



Fonte: Elaborada pela autora

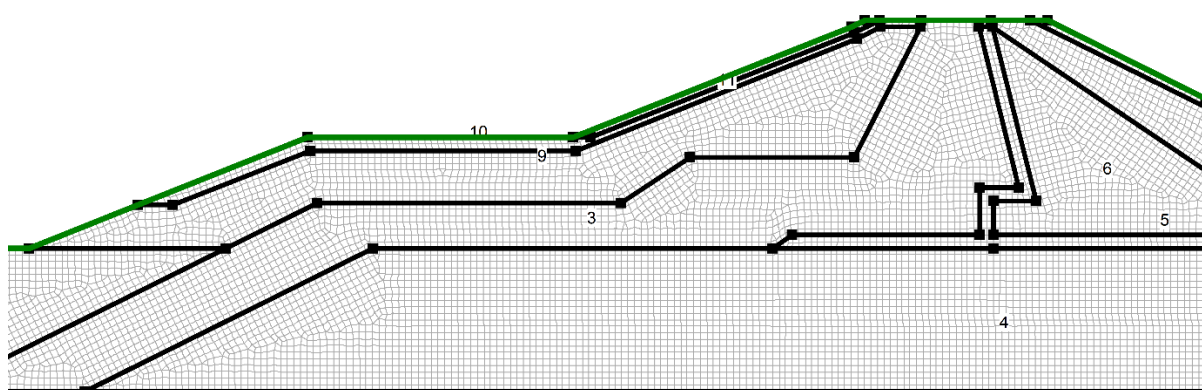
A partir dessa distribuição das superfícies de ruptura é possível identificar regiões mais críticas e que demandam mais atenção do projetista, a forma de distribuição dessas superfícies depende fundamentalmente dos parâmetros utilizados, do método e do grau de discretização utilizado nas análises.

3.5.2 Modelagem pelo Método dos Elementos Finitos

A modelagem pelo método dos elementos finitos é feita no módulo *SIGMA/W* e considera a relação entre tensão e deformação para calcular o fator de segurança e os outros resultados para a geometria da barragem.

Após a definição da geometria e dos parâmetros necessários para a análise, inicia-se a definição da malha do modelo, o *software* oferece diferentes opções de discretização da malha. Para o estudo a ser realizado, optou-se por utilizar uma malha de tamanho métrico unitário, esta malha foi suficiente para atender a análise com um tempo computacional eficiente. Silva Filho & Futai (2006) utilizam elementos triangulares em suas análises com pontos secundários, enquanto esta análise utiliza elementos considerados como quadriculares com a incorporação de pontos secundários, logo um elemento com 4 pontos passa a ter 8, aumentando a precisão do estudo a ser realizado. A Figura 18 apresenta a discretização que será utilizada no modelo.

Figura 18 – Malha para Elementos Finitos utilizada nas análises



Fonte: Elaborada pela autora

Por se tratar de uma análise por meio de Tensão *versus* Deformação as condições de contorno gerais do problema serão dadas por limitação dos deslocamentos (apoios), desta forma, adotou-se que a parte inferior ao aluvião não permite deslocamentos horizontais e verticais, enquanto as laterais proíbem apenas os deslocamentos horizontais. Após a definição da malha, dos parâmetros dos materiais e definição das condições de contorno, realiza-se a primeira análise, sendo essa para gerar parâmetros de distribuição de tensão nos pontos estudados.

Após a análise inicial com o método de Tensão *versus* Deformação, adiciona-se uma análise ligada a análise anterior, por meio do $SLOPE/W$, utilizando o mesmo procedimento exposto na seção 3.5.1, é possível determinar a superfície de ruptura e o fator de segurança, diferenciando do apresentado anteriormente por usar como base de cálculos os dados da análise via Elementos Finitos. Logo essa análise de estabilidade tende a ser mais precisa, por utilizar um método com menos aproximações que o método do equilíbrio limite.

3.5.3 Otimização da superfície

As superfícies estudadas nos métodos apresentados anteriormente levam em consideração uma superfície circular, e a apesar de representar bem a superfície de ruptura, existe uma forma de tornar a superfície mais precisa por meio da otimização, que gera uma superfície não-circular, essa otimização tende a diminuir ou manter o valor do Fator de Segurança.

Essa otimização será empregada em alguns dos casos a serem estudados, o *software* realiza uma análise a partir do método escolhido e tende a otimizar a superfície mais crítica (com menor Fator de Segurança). Na otimização também existe parâmetros de precisão, desta forma, quanto mais interações mais chance de encontrar uma superfície mais crítica. Cabe ressaltar que essa é uma das funções que existem apenas para análise computacional, devido a sua complexidade e da quantidade de interações necessárias. Com isso, a introdução dessa otimização pode deixar o resultado da análise mais demorado, por demandar mais capacidade computacional.

3.6 Condições adotadas para análise

Para a avaliação da estabilidade serão propostos 5 casos a serem estudados, todos os casos tomarão como base a Barragem de Açú e variação estará no método e nos parâmetros adotados, com o objetivo de gerar discussões e comparações acerca das considerações feitas. Além disso, haverá um 6º caso, que é descrito como a análise de uma possível alternativa para a barragem, ou seja, uma seção estável para a obra.

A barragem representada nos 5 primeiros casos foi modelada com 5 metros a menos da altura final, com a finalidade de representar o momento preciso do rompimento. Por se tratar de uma retroanálise, sabe-se a altura em que ocorreu o rompimento, logo espera-se que as análises mais precisas cheguem a valores aproximadamente unitários de Fator de Segurança.

A Tabela 7 apresenta a distribuição de casos, o método utilizado e as considerações feitas em cada um destes.

Tabela 7 – Distribuição de condições em 6 Casos para as análises

Caso	Método de Análise	Condição Argila	Tipo de Superfície	Observações
1	Morgenstern-Price	Drenada	Circular	Método que a literatura indica com o maior valor de Fator de Segurança
2	Morgenstern-Price	Não Drenada	Circular	De acordo com outros estudos indica como a melhor representação da argila para o caso de rompimento no período construtivo
3	Morgenstern-Price	Não Drenada	Não Circular	Otimização da superfície do Caso 2
4	Elementos Finitos	Não Drenada	Não Circular	Aplicação do método dos Elementos Finitos apresentado na seção 5.3.2
5	Morgenstern-Price	Não Drenada	Não Circular	Implementação do parâmetro RU à análise do Caso 3
6	Morgenstern-Price	Não Drenada	Não Circular	Análise de uma nova proposta de seção da barragem a partir das análises anteriores
	Elementos Finitos			

Fonte: Elaborada pela autora

Os 4 primeiros casos trata-se de aplicação do método já apresentado anteriormente e a partir dos resultados será possível gerar discussões acerca da análise de estabilidade dessa barragem no período construtivo. O 5º caso refere-se a análise implementando o parâmetro RU e avaliar a sua influência nas análises, no entanto, como não há um valor único determinado pela literatura para esse parâmetro, nesta barragem, será feita uma análise partindo da variação deste parâmetro dentro dos limites de cada um dos solos estudados. Desta forma, por retroanálise, os pares de valores de RU (espaldar e núcleo) que obtiverem o Fator de Segurança mais próximo de um valor unitário, poderá ser considerado como o valor no momento do rompimento.

Já o 6º Caso refere-se à proposição de uma geometria que fosse estável durante o período construtivo, para a proposição dessa geometria será utilizado os resultados obtidos nos casos anteriores, identificando possíveis causas de instabilidade. Para fins de análise, a nova seção será avaliada pelos dois métodos expostos na seção 3.5.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia explicitada no capítulo anterior. Além dos resultados também serão apresentadas discussões pertinentes sobre o assunto além de comparações e equivalências entre os resultados.

4.1 Análises de Estabilidade

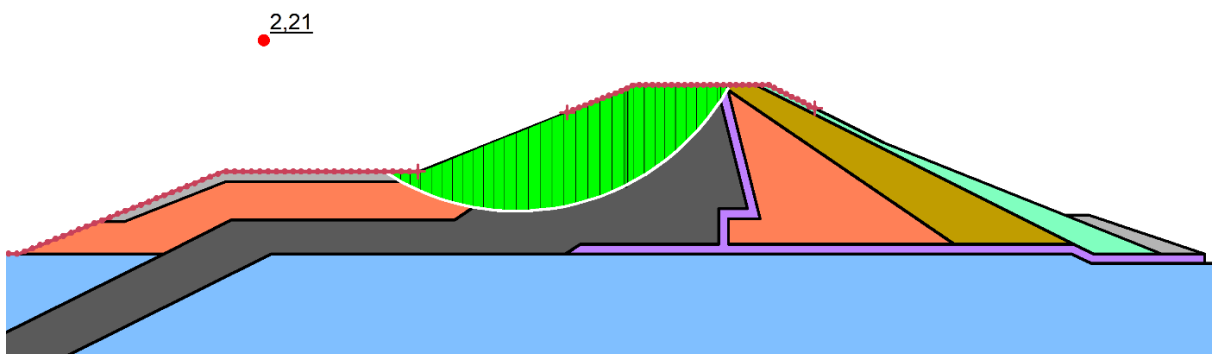
A seguir serão apresentados os resultados e discussões para as condições de análises citadas na seção 3.6. Todos os casos utilizarão os dados de parâmetros do materiais apresentados na Tabela 6 e os 5 primeiros casos utilizarão a seção proposta na Figura 15.

4.1.1 Caso 1 (*Morgenstern-Price, Argila Drenada e Superfície Circular*)

O primeiro caso a ser estudado utiliza o método de Equilíbrio Limite de *Morgenstern-Price*, considera a argila na condição drenada e utiliza a superfície circular como resultado para a representação da superfície mais crítica. Os parâmetros para a região de pesquisa foram definidos com 40 divisões para a região de entrada e 60 divisões para a região de saída, além de considerar 30 divisões do raio de pesquisa, esses valores foram capazes de descrever a região estudada com uma precisão eficiente para o estudo.

A análise foi realizada utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 6, considerando a condição da argila como drenada, ou seja, coesão de 50 kPa e ângulo de atrito de 15°. A partir dessa análise obteve-se um valor de Fator de Segurança de 2,21, a geometria da seção potencial de ruptura é exposta na Figura 19.

Figura 19 – Caso 1 (*Morgenstern-Price, Argila Drenada e Superfície Circular*)



Fonte: Elaborada pela autora

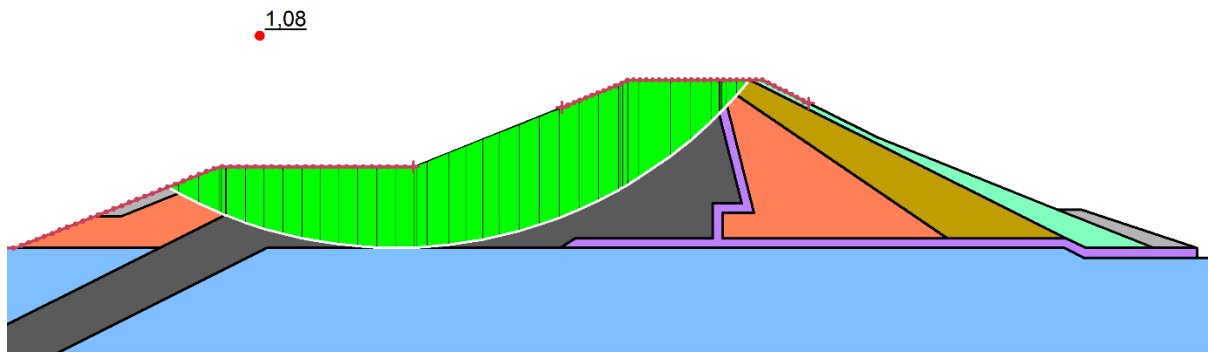
De acordo com essa análise, a barragem estaria estável e não viria a romper, o que não condiz com a realidade, desta forma, a discrepância entre os valores de Fator de Segurança encontrado evidencia a não eficácia dos parâmetros adotados nessa análise. Outra questão a se observar seria o não desenvolvimento de uma superfície de ruptura ao longo do material argiloso, pois de acordo a literatura o rompimento ocorreu principalmente na região de argila que interliga o núcleo ao *cut off*.

4.1.2 Caso 2 (*Morgenstern-Price, Argila não Drenada e Superfície Circular*)

O segundo caso também utiliza o método de *Morgenstern-Price* e a superfície de pesquisa circular, no entanto nesse caso a argila da região 3 é considerada com não drenada. Os intervalos de pesquisa são os mesmos utilizados no Caso 1.

Neste caso, os parâmetros dos materiais foram considerados da Tabela 6 para a condição não drenada, em que a coesão igual é a 47,1 kPa e o ângulo de atrito é igual a 0°. Por meio dessa análise obteve-se um Fator de Segurança igual a 1,08 e a superfície mais crítica desse caso é apresentada na Figura 20.

Figura 20 – Caso 2 (*Morgenstern-Price, Argila não Drenada e Superfície Circular*)



Fonte: Elaborada pela Autora

Neste caso, já é possível observar uma redução no Fator de Segurança de mais de 50% quando considera a argila como condição não drenada, além da aproximação com o valor unitário (valor esperado). Além disso a geometria da superfície condiz com o que ocorreu na realidade, em que a maior parte da ruptura ocorreu na parte da Região 3.

A aproximação desse valor evidencia que a poropressão existente realmente alterou a condição da argila, evitando a drenagem de água desse material, fazendo com que o ângulo de atrito se zerasse e diminuindo a resistência dessa região, observa-se também a predominância

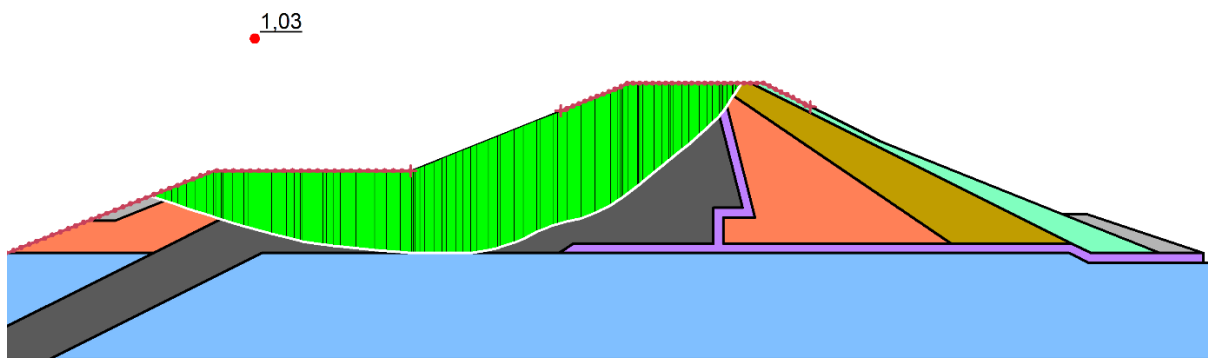
da área de ruptura sobre a argila do núcleo, evidenciando que a região mais crítica desse caso se encontra nessa região.

4.1.3 Caso 3 (*Morgenstern-Price, Argila não drenada e Superfície Otimizada*)

O terceiro caso estudado utiliza o método de *Morgenstern-Price* e a condição da argila não drenada e se diferencia no Caso 2 por considerar a otimização da superfície, sendo gerado então uma superfície não circular. Os intervalos de pesquisa são os mesmo utilizados no Caso 1 e no Caso 2. Os parâmetros para a otimização da superfície são definidos por: 10.000 interações, 40 pontos de pesquisa na superfície inicial e 60 pontos de pesquisa na superfície final.

Os parâmetros dos solos foram os mesmo utilizados no Caso 2, com a coesão de 47,1 kPa e ângulo de atrito de 0° para a região argilosa do núcleo. O Fator de Segurança encontrado foi de 1,03 e a superfície mais crítica é apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Caso 3 (*Morgenstern-Price, Argila não drenada e Superfície Otimizada*)



Fonte: Elaborada pela autora

Apesar da pequena redução de apenas 4,6% no Fator de Segurança quando comparada ao Caso 2, observa-se uma leve mudança na geometria da seção potencial de ruptura, dado que existem regiões menos circulares e descrevem melhor a geometria do rompimento. Uma mudança importante é uma maior verticalização da superfície próximo com o topo da barragem, essa é uma ação esperada pois existe uma divisão bem precisa e vertical entre o núcleo e as outras camadas da barragem. Além disso, observa-se uma horizontalização na região de saída, distanciando da região circular apresentada no Caso 2.

Apesar de leves, as mudanças sugerem que a superfície circular nem sempre representa a superfície mais crítica, e pontualmente, as superfícies otimizadas, conseguem

representar melhor a seção de rompimento do talude estudado. Além disso, a otimização torna a análise mais segura, dado que gerou uma diminuição do Fator de Segurança, que já era considerado como rompimento no Caso 2, e no Caso 3 agrava a situação de instabilidade. Desta forma, esse Caso 3 quando comparado aos Casos 1 e 2 é o que melhor representa o rompimento da barragem pelo método do Equilíbrio Limite de *Morgenstern-Price*.

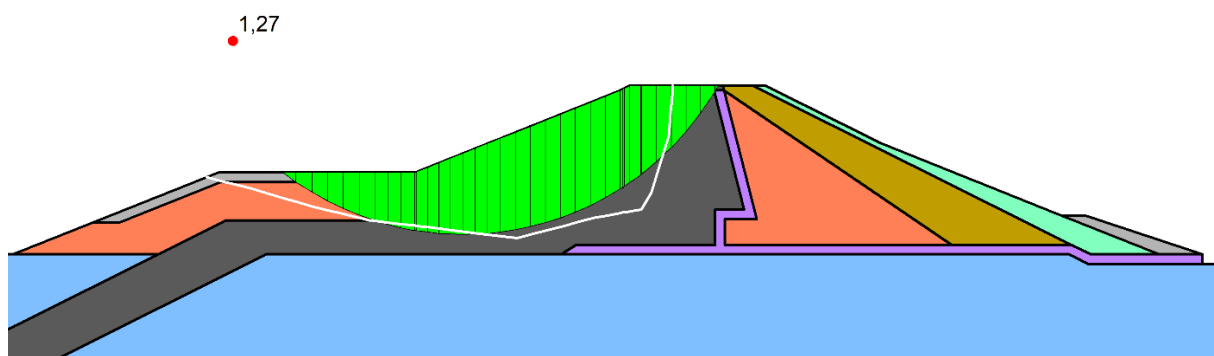
4.1.4 Caso 4 (MEF e Argila Não Drenada)

O quarto caso foi estudado pelo método dos Elementos Finitos por análise de Tensão *versus* Deformação, para o estudo a argila do núcleo foi considerada como não drenada tendo como valor de coesão de 47,1 kPa e Ângulo de Atrito igual a 0°. Além disso, foi efetuado análise com e sem otimização da superfície.

As condições de contorno e a malha utilizada são as mesmas apresentadas na seção 3.5.2. Desta forma, a malha de 1 metro é capaz de gerar valores satisfatórios com um tempo de operação computacional coerente. O modelo estudado foi discretizado em 11.825 elementos e 36.052 nós, obtido através da discretização pela malha citada.

Para a modelagem de Elementos Finitos é preciso adicionar como parâmetros dados de análises de tensão, como o Módulo de Elasticidade e o Coeficiente de Poisson, que estão descritos na Tabela 6. A análise, sem considerar a otimização, gerou um Fator de Segurança de 1,26 enquanto a otimização da superfície reduziu o Fator de Segurança para 1,01, essas análises são apresentadas nas Figuras 22 e 23 a seguir.

Figura 22 – Caso 4 (Método dos Elementos Finitos, Argila não drenada e Superfície Circular)



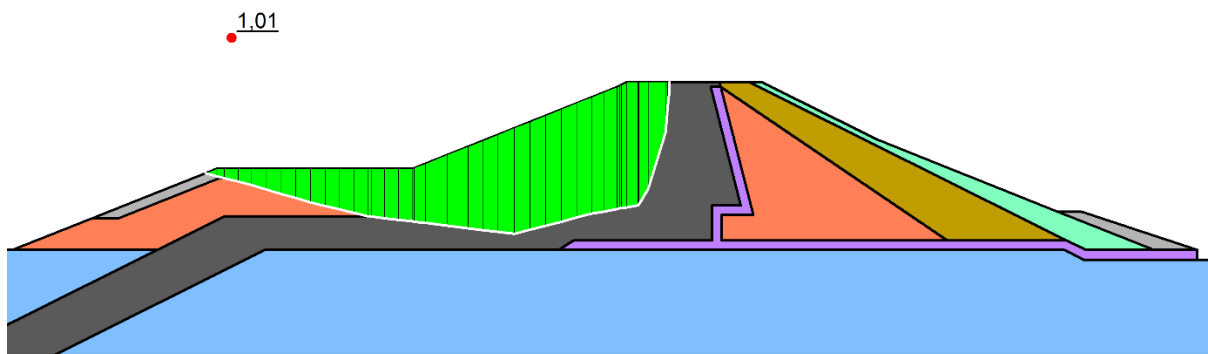
Fonte: Elaborada pela autora

A partir dessa análise é possível observar um maior rigor nos cálculos pelo Método dos Elementos Finitos, pois, com os mesmos parâmetros obteve-se um valor maior de Fator de

Segurança (no caso sem otimização, apresentado na Figura 22) quando comparado ao valor obtido pelo método do Equilíbrio Limite utilizado no Caso 3. Isso ocorre, pois, esse método tem cálculos mais precisos e consideram valores mais próximos do real, por isso conseguem calcular os esforços sem realizar grandes aproximações.

No entanto é preciso observar que o valor é 27% maior que o valor unitário esperado, uma das motivações é que o método sem a otimização ainda não é capaz de descrever de forma eficiente a ruptura.

Figura 23 – Caso 4 (Método dos Elementos Finitos, Argila não drenada e Superfície Otimizada)



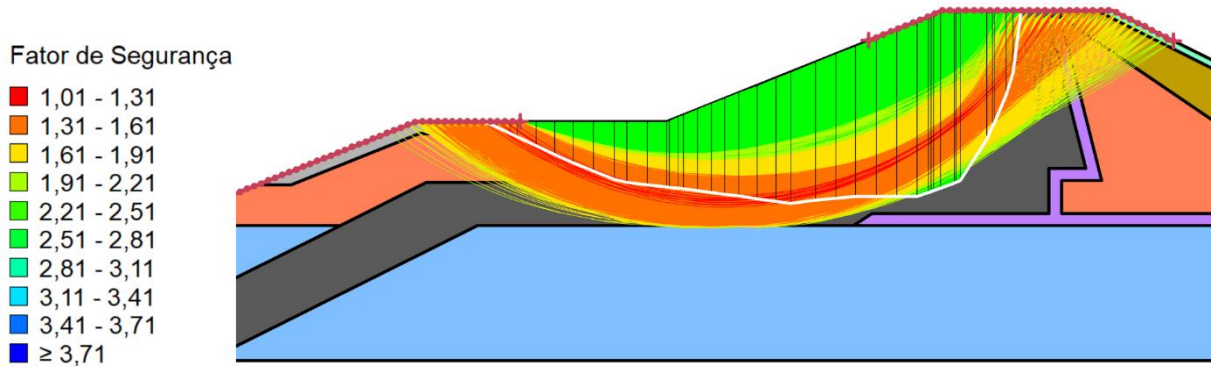
Fonte: Elaborada pela autora

Quando se considera a otimização da superfície, obtém-se um valor do Fator de Segurança 20% menor, quando comparada a análise sem otimização. Isso ocorre, pois, devido a discretização que o método propõe é possível considerar mais pontos de análises e fazer uma otimização mais precisa, fazendo com que seja a análise com a maior influência da otimização. Um dos fatores mais importantes a se observar é a proximidade do Fator de Segurança encontrado com o valor unitário, evidenciando a eficiência do método, além disso o formato da superfície otimizada é a que mais se aproxima com a realidade, pois gera uma verticalização na região central e está de acordo com a ruptura, dado que a região mais crítica é a região central.

Como o método faz uma avaliação de diversas superfícies e encontra a superfície com o menor valor de Fator de Segurança (superfície mais crítica) é possível gerar um gráfico de distribuição dessas regiões. Para o Caso avaliado foram pesquisadas 102.542 superfícies potenciais de ruptura e o programa encontrou convergência em 9.438 superfícies. A Figura 24 apresenta uma distribuição dessas regiões ao longo do talude estudado, a variação de cores indica o grau de instabilidade da região, quanto mais vermelho menor o Fator de Segurança, logo, mais instável. A partir dessa representação é possível notar que as regiões mais críticas

estão concentradas no núcleo argiloso, com predominância de valores que variam de 1,01 e 1,61, indicando regiões altamente instáveis ao longo do talude de montante da barragem.

Figura 24 – Distribuição de 9.438 Superfícies de Ruptura, Caso 4 (Método dos Elementos Finitos, Argila não drenada)

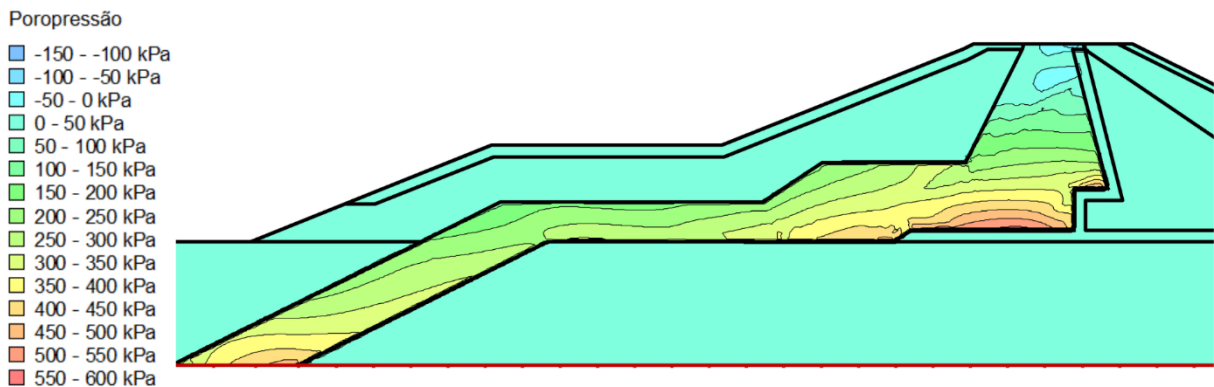


Fonte: Elaborada pela autora

4.1.4.1 Distribuição de Poropressão na Seção

A partir das análises feitas no Caso 4, por meio do Método dos Elementos Finitos, é possível definir uma distribuição de valores de poropressão ao longo da seção estudada. A Figura 25 apresenta a distribuição de poropressão para a seção construída no momento do rompimento, nessa distribuição é possível notar uma concentração de valores maiores principalmente ao longo da região argilosa da seção.

Figura 25 - Distribuição de Poropressão na seção antes do rompimento



Fonte: Elaborada pela autora

4.1.5 Caso 5 (Implementação do Parâmetro RU)

O quinto caso analisará a influência do Parâmetro RU nos estudos de estabilidade, assim como apresentado na seção 3.4.2 não foi encontrado na literatura valores únicos desse parâmetro para a Barragem de Açú. No entanto, foi possível classificar o solo e definir faixas para esse parâmetro, desta forma será feita uma variação dos valores desse parâmetro nas análises nas Regiões 3 e 4. Como a variação ocorrerá em duas regiões será necessário criar pares de valores, a geração desse pares serão de acordo com as seguintes premissas:

- a) os valores da Região 3 variam de 20% a 55%;
- b) os valores da Região 4 variam de 10% a 35%;
- c) em cada par, o valor da Região 3 deve ser superior ao da Região 4, dado que a primeira região é mais argilosa que a segunda;
- d) a variação deve ocorrer no intervalo de 5%.

Seguindo as premissas apresentadas serão gerados 48 pares, sendo descartado 10 de acordo com a terceira premissa. Para a avaliação será utilizado o método de *Morgenstern-Price*, condição da argila não drenada e superfície otimizada. Os parâmetros de otimização da superfície são iguais ao do Caso 3, já os parâmetros para a região de pesquisa foram definidos com 30 divisões para a região de entrada e 50 divisões para a região de saída, além de considerar 25 divisões do raio de pesquisa. A diminuição da quantidade de superfícies de pesquisa, quando comparado aos 4 casos anteriores, ocorre para otimizar o tempo computacional, dado a quantidade de análises a serem realizadas.

Os valores de Fator de Segurança para cada um dos pares estudados são apresentados na Tabela 8, no qual é possível notar uma baixa sensibilidade do modelo quando inclui o parâmetro RU nas análises, além disso ao implementar a variação do parâmetros nas regiões 3 e 4 não se observa uma mudança significativa nos valores do fator de segurança.

Desta forma, como todos os valores estão em torno do valor unitário e a variação entre o maior FS e o menor é de menos de 4%, então pode-se afirmar, que para a barragem analisada, a implementação desse parâmetro nas análises não mostra mudanças fortes, dado que as outras análises, sem o RU, já são capazes de obter valores coerentes.

Tabela 8 – Fator de Segurança em função do Parâmetro RU

Região 4 (%)	Região 3 (%)	FS	Região 4 (%)	Região 3 (%)	FS	Região 4 (%)	Região 3 (%)	FS
10	20	1,01	20	20	-	30	20	-
10	25	1,01	20	25	1,00	30	25	-
10	30	1,01	20	30	1,00	30	30	-
10	35	1,01	20	35	1,00	30	35	0,98
10	40	1,03	20	40	1,00	30	40	0,98
10	45	1,02	20	45	1,00	30	45	0,98
10	50	1,01	20	50	0,99	30	50	0,98
10	55	1,01	20	55	1,00	30	55	0,98
15	20	1,01	25	20	-	35	20	-
15	25	1,00	25	25	-	35	25	-
15	30	1,01	25	30	0,99	35	30	-
15	35	1,01	25	35	0,99	35	35	-
15	40	1,02	25	40	0,99	35	40	1,01
15	45	1,01	25	45	0,99	35	45	1,00
15	50	1,00	25	50	0,99	35	50	0,99
15	55	1,01	25	55	0,99	35	55	0,99

Fonte: Elaborada pela autora

4.1.6 Caso 6 (*Proposição de uma nova seção estável*)

O sexto caso avalia a estabilidade de uma nova seção proposta e que tem o objetivo de ser estável quanto ao rompimento durante o processo construtivo, para isso observou-se a partir das análises anteriores quais os principais problemas pontuais e como corrigi-los. A partir das análises realizadas notou-se um acúmulo de tensões na região que liga o núcleo ao *cut-off*, com um acúmulo de poropressão ao longo da grande camada de argila.

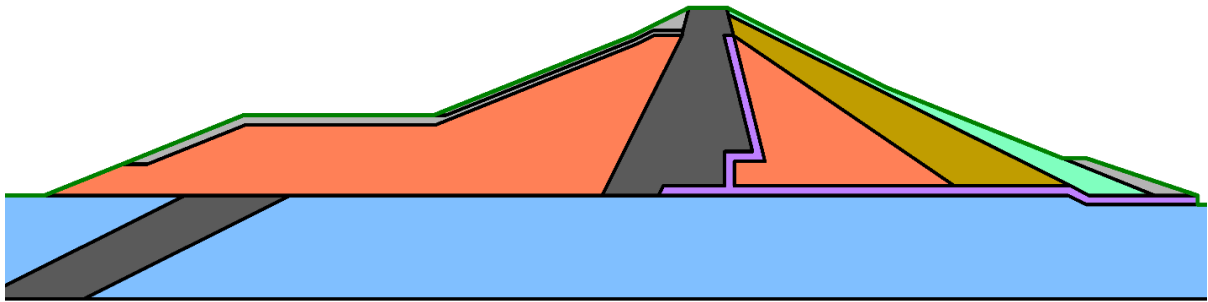
Carvalho *et al.* (1981) desenvolveram um artigo que explicitava a importância da ligação do núcleo ao *cut-off*, denominado, segundo eles, como “uma cortina impermeabilizante”, apesar de ser uma alternativa capaz de atender as necessidades de materiais disponíveis e a percolação pelo profundo aluvião altamente permeável, a estabilidade durante a construção foi comprometida, fazendo com que a barragem viesse a romper em 1982. A

literatura cita alguns fatores que podem ter influenciado o rompimento, no entanto, De Mello (1982), Penman (1985) e Cruz (1994) citam que o principal fator foi o acúmulo de poropressão, assim como é observado nos estudos realizados.

Desta forma, com o intuito de avaliar a estabilidade da barragem sem a interligação do núcleo com *cut-off*, pensou-se em uma alternativa que interrompesse essa conexão. A Figura 26 apresenta essa geometria proposta, com todas as mudanças realizadas com a finalidade de permitir a adequação com a nova configuração.

Cabe ressaltar que diferentemente das 5 análises anteriores, nessa será considerado a barragem completa e será adotado como parâmetro de segurança os valores de Fator de Segurança acima de 1,4, assim como é estabelecido por Carvalho (1983), apresentado na seção 2.6.3.

Figura 26 – Caso 6 - Nova Geometria para a seção



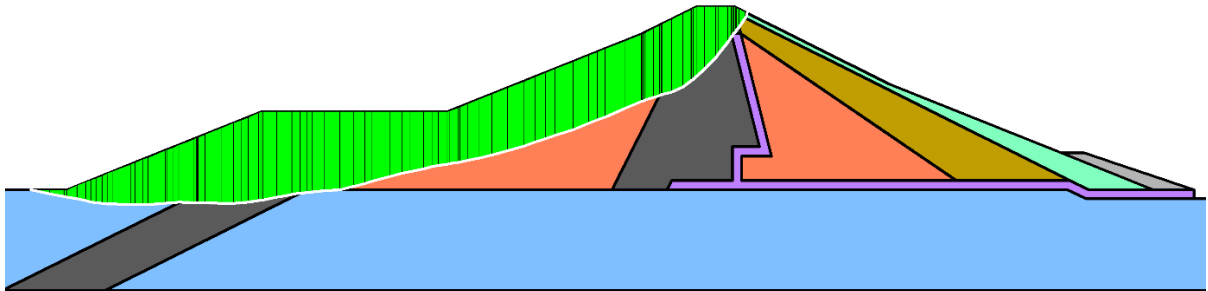
Fonte: Elaborada pela autora

A nova geometria para a seção segue a descrição de materiais da seção inicial construída, apresentada na Figura 15, seguindo a mesma orientação de cores e materiais utilizados, inclusive os mesmo parâmetros dos solos, tendo como única divergência a geometria, que como já citado, considera a desconexão entre o núcleo e o *cut-off*.

Para fins de verificação, será realizada a avaliação da estabilidade da nova seção utilizando os dois métodos estudados nos casos anteriores, Equilíbrio Limite (*Morgenstern-Price*) e Método dos Elementos Finitos. Para ambos os métodos serão considerados a argila em condição não drenada e a superfície otimizada, além disso os parâmetros de entrada e saída da superfície e os parâmetros de otimização serão iguais ao do Caso 3.

A Figura 27 apresenta a região mais crítica e o valor do Fator de Segurança encontrado para a seção analisada pelo método de *Morgenstern-Price*. A análise obteve um valor de Fator de Segurança de 2,09, logo a barragem é considerada estável, no final do período construtivo, de acordo com o valor mínimo estabelecido de 1,40 por Carvalho (1983).

Figura 27 – Caso 6: Análise da nova seção proposta pelo método de *Morgenstern-Price*

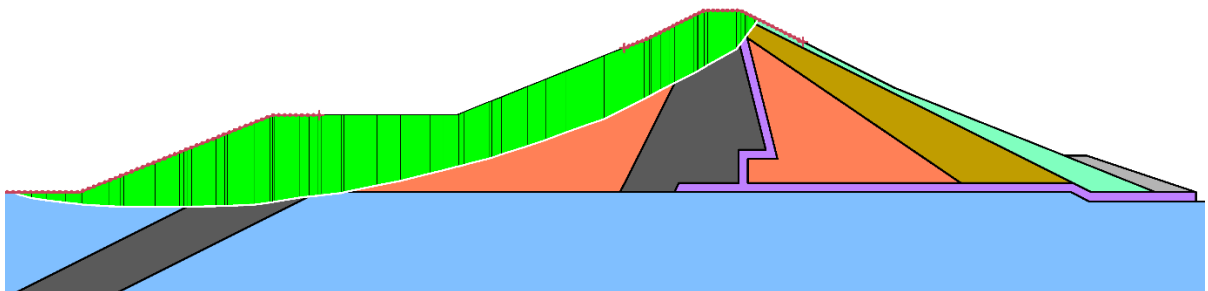


Fonte: Elaborada pela autora

A Figura 28 apresenta a mesma análise feita no Caso 4, sendo realizada considerando a nova geometria proposta para o Caso 6, considerando os mesmos parâmetros de análises por Método dos Elementos Finitos, obteve-se um valor do Fator de Segurança de 2,23, também considerado estável, dado o valor superior a 1,40.

O aumento do Fator de Segurança quando a seção é avaliada pelo Método dos Elementos Finitos ocorre devido a precisão dos cálculos do método no programa de análises, dado que esse método consegue considerar os valores mais próximos dos reais, desta forma, evitando possíveis majorações em cálculos. Apesar da variação observa-se que os dois métodos são coerentes para avaliar a seção, dado a proximidade da geometria da Superfície mais crítica.

Figura 28 – Caso 6: Análise da nova seção proposta pelo método de Elementos Finitos



Fonte: Elaborada pela autora

Considerando a análise via Elementos Finitos apresentados na Figura 28 e o estudo feito para a seção que estava construída no momento do rompimento é possível notar um aumento expressivo na estabilidade do talude, a variação, para o estudo de superfície otimizada, considerou um aumento de 120% no valor do Fator de Segurança, indicando um aumento considerável, ao promover a descontinuidade do núcleo ao *cut-off*.

5 CONCLUSÕES

Com o objetivo geral do trabalho de verificação da estabilidade da barragem é possível concluir após os resultados obtido que a barragem da forma como estava construída era instável, sendo coerente com o rompimento ocorrido. Uma das principais mudanças de uma análise de uma barragem após 40 anos de seu rompimento é a capacidade maior de análises, devido ao desenvolvimento computacional, logo por meio desse trabalho foi possível desenvolver análises considerando diversos fatores de forma prática, analisando, por exemplo, mais de 77.000 superfícies apenas para um caso, algo que seria menos viável na época de construção da barragem.

No trabalho foram utilizadas duas metodologias de avaliação de estabilidade, e apesar de ambas apresentarem valores de fator de segurança próximos ao valor unitário, indicando sua instabilidade, o Método de Elementos Finitos foi o mais preciso para a avaliação da geometria da superfície de ruptura, dado que a superfície por esse método obteve uma verticalização na região central do núcleo argiloso, como era esperado a partir do rompimento ocorrido. Desta forma, nota-se que apesar do tempo computacional do MEF ser mais elevado, existe uma maior precisão nos resultados, garantindo uma superfície de ruptura que, para a barragem estudada, está de acordo com o rompimento ocorrido.

Um dos pontos mais fundamentais do desenvolvimento desse estudo foi a implementação e variação de dois parâmetros fundamentais: condição da argila do núcleo e parâmetro RU. O primeiro parâmetro citado, foi a condição mais impactante nas análises, dado que ao considerar o solo drenado a barragem estaria estável, sendo um resultado incorreto, devido ao rompimento ocorrido. Desta forma, ao considerar a situação mais crítica do solo argiloso como não drenado entende-se que a condição não drenada foi causada devido ao acúmulo de poropressões. Já o segundo parâmetro analisado, não gerou uma influência considerável nas análises, dado que a variação do Parâmetro RU por meio de 38 pares causou uma variação máxima de 4%, logo entende-se que existe uma influência menor para essa barragem, desse parâmetro.

O último caso avaliado nos estudos realizados foi a proposição de uma nova seção que fosse estável, na condição final de construção. Por meio das análises obtidas nos 5 primeiros casos, principalmente no caso que considera o Método dos Elementos Finitos, observou-se uma maior concentração de poropressões ao longo da região que liga o núcleo ao *cut off*, desta forma a principal proposição seria a descontinuidade dessa ligação. Assim como é apresentado na Figura 26, a seção proposta conta com o *cut off* e o núcleo de formas independentes, compostos

pelo mesmo material. As análises dessa nova seção foram realizadas considerando os dois métodos já apresentados e obtiveram valores de 2,09 para *Morgenstern-Price* e 2,23 para o Método dos Elementos Finitos, evidenciando uma seção estável, com Fator de Segurança superior a 1,40, valor mínimo definido por Carvalho (1983).

Desta forma, conclui-se que os métodos avaliados foram eficientes para a análise da barragem proposta e tiveram comportamentos como esperado, ressaltando a maior precisão do MEF quando comparado a um dos métodos mais rigorosos de Equilíbrio Limite, o método de *Morgenstern-Price*.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Ministério do Desenvolvimento Regional. **Relatório de Segurança de Barragens 2020**. Brasília, 2021.

ANDRADE, Bruno. **Barragem Armando Ribeiro, maior reservatório de água do RN**. 2018. 1 fotografia. 391 x 202 pixels. Disponível em: [https://s2.glbimg.com/Rc6c-RTwY8un2UDqWAsUDLJa22Y=/0x0:1280x720/1000x0/smart/filters:strip_icc\(\)/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2018/f/j/YJ3MLhQ7qu2nAT4xmF6g/armandoribeiro-3.jpg](https://s2.glbimg.com/Rc6c-RTwY8un2UDqWAsUDLJa22Y=/0x0:1280x720/1000x0/smart/filters:strip_icc()/i.s3.glbimg.com/v1/AUTH_59edd422c0c84a879bd37670ae4f538a/internal_photos/bs/2018/f/j/YJ3MLhQ7qu2nAT4xmF6g/armandoribeiro-3.jpg). Acesso em 14 de novembro de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Taludes**. Rio de Janeiro, 1991.

AYALA, G. R. L. **Verificação da estabilidade do talude de montante em barragem de terra submetida a rebaixamento rápido realizada com ensaios em solos não saturados e modelagem numérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

BISHOP, A.W; MORGENSTERN, N. **Stability coefficients for earth slopes**. Géotechnique, v. 10. P 129-153. 1960.

CAPUTO, H. P; CAPUTO, A.N. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Volume 2, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 611 p.

CARVALHO, L. H. de; GUEDES, J. A; PAULA, J. R. **Açu: uma cortina impermeabilizante**. Anais do XIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Recife. CBGB, v.1. 1981

CARVALHO, L. H de. **Curso de barragens de Terra com vistas ao nordeste brasileiro**. Fortaleza: DNOCS, 1984. 184 p.

CLEMENTE, C. W; FARO, V. P. **Determinação da resistência não drenada através do método do Cone Sueco ou Fall Cone em solos marinhos**. XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, GEOSUL, Santa Catarina. ABMS, 2019.

CRUZ, P.T. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 1996. 548 p.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR – MINAS GERAIS. **Operação Brumadinho completa três anos**. Disponível em: <https://www.bombeiros.mg.gov.br/operacao-brumadinho-completa-tres-anos>. Acesso em 02 de maio de 2022.

DAS, B.M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6.ed. São Paulo: Thompson Learning, 2007. 562 p.

DE MELLO, V. F. B. **A case history of a major construction period dam failure**. Amici et Alumni Em. Prof E de Beer, 1040 Bruxelas, Bélgica. 1982. p. 63 – 78.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS (DNOCS). **Ficha Técnica da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves**. Disponível em: https://www.dnocs.gov.br/php/canais/recursos_hidricos/fic_tec_reservatorio.php?codigo_reservatorio=18&descricao_reservatorio=Barragem+Armando+Ribeiro+Gon%E7alves. Acesso em 05 de julho de 2022.

FABRÍCIO, J. V. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC), Rio de Janeiro, 2006.

FUSARO, T. C. **Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação e Piau**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica). Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 195 p.

LIMA, F. C; SILVA, F. E. A; LEME, R.F. **Estudo da avaliação da estabilidade da Barragem Jaburu I – Município Tianguá – CE**. Relatório Técnico, Vetor Engenharia Ltda. Eusébio, 2017.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

PENMAN, A. D. M. **Failure of Açu Dam**. Technical note. In: Proceedings of Symposium on Failures in Earthworks, Londres. 1985. p. 411 – 413.

ROCHA, V.O. **Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves: Histórico e avaliação do comportamento atual**. Dissertação (Mestrado - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Pós-graduação em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2003.

SANDRONI, S.S. **Aspectos geotécnicos de uma ruptura de maciço de barragem durante a construção**. Anais do VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Porto Alegre – RN, Vol. IV. 1986. p. 225 – 233.

SANTOS, M. M. **Avaliação do parâmetro “RU” de solos compactados em Barragens de Terra**. Monografia (Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2021.

SEQUENT LIMITED. **Geostudio**. Versão 2021.4. 2021. Disponível em: <https://www.geoslope.com/products/geostudio>. Acesso em 15 de setembro de 2022.

SILVA FILHO, F.C; FUTAI, M. M. **Análise do Escorregamento do Talude de Montante da Barragem do Açu por Elementos Finitos**. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Curitiba – PR. 2006

SOUZA, A. N. **Análise do comportamento da Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açu/RN – Durante sua construção, primeiro enchimento e operação do**

reservatório. 2017. 323 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

SOUZA, A. N; SILVA, R.S; SANTOS, O.F; FREITAS, O. **Settlement Analysis of Açú Dam, Brazil.** Technical Note. 2021.

TEXEIRA, A. H; GODOY, N. S. **Análise, projeto e execução de fundações rasas.** In: HACHICH, W. et al. (ed). *Fundações: Teoria e Prática.* São Paulo. PINI, Cap. 7, p. 227 – 264. 1996.

VILHETE, D. F. **Retroanálise da ruptura do talude de montante da Barragem de Açú no final do período construtivo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.