



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

**CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE**

**NÚCLEO DE TECNOLOGIA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AIRTON CÉSAR TAVARES DE SOUZA**

**VERIFICAÇÃO DA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM SÃO BENTO  
DO UNA, PERNAMBUCO**

Caruaru

2019

AIRTON CÉSAR TAVARES DE SOUZA

**VERIFICAÇÃO DA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM SÃO BENTO  
DO UNA, PERNAMBUCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste – CAA, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, como requisito para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II.

**Área de concentração:** Geotecnia

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

S729v      Souza, Airton César Tavares de.  
Verificação da análise da estabilidade da barragem São Bento do Una, Pernambuco.  
/ Airton César Tavares de Souza. – 2019.  
55 f. il. : 30 cm.

Orientadora: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de  
Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.  
Inclui Referências.

1. Barragens - Avaliação. 2. Estabilidade. 3. Geotecnia. 4. Barragens - Segurança.  
I. Bello, Maria Isabela Marques da Cunha Vieira (Orientadora). II. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-069)

AIRTON CÉSAR TAVARES DE SOUZA

**VERIFICAÇÃO DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA BARRAGEM SÃO BENTO  
DO UNA, PERNAMBUCO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Engenharia Civil do Centro  
Acadêmico do Agreste - CAA, da  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE,  
como requisito para a disciplina Trabalho de  
Conclusão de Curso II.

Área de concentração: Geotecnia

A banca composta pelos professores abaixo, considera o aluno AIRTON CÉSAR  
TAVARES DE SOUZA, APROVADO COM NOTA \_\_\_\_\_.

Caruaru, 10 de Junho de 2019.

Banca examinadora:

Profª. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientadora)

Engenheiro Civil. Me. Alison de Souza Noberto \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Engenheiro Civil Me. Yago Ryan Pinheiro dos Santos \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos \_\_\_\_\_

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço:

- Aos meus pais (Joelma e Amauri), por sempre estarem do meu lado em todas decisões da minha vida e por sempre me ajudar em momentos em que eu precisei. Ao meu irmão Allyson, por ser uma criança tão alegre e que me traz muitos momentos de descontração. Amo vocês!;

- À minha namorada (Maria Alice), que fez uma enorme diferença, por me passar confiança e força para seguir em frente, por sempre me incentivar na minha rotina diária e por ser paciente e companheira em todo tempo;

- Aos meus amigos (Elyfas, Bandim e todos os outros que trilharam esse caminho por 5 anos ao meu lado), por dividir tantos momentos juntos, já que no curso passamos mais tempo do dia na universidade do que em casa;

- À minha orientadora (Isabela) por me ajudar através da orientação deste trabalho, do ensino em disciplinas obrigatórias, pela experiência compartilhada e por se mostrar presente sempre que eu a procurava;

- À Alison, que me deu dicas para implementar no meu trabalho;

- À UFPE, por me proporcionar um ensino de qualidade, por meio de professores bem-conceituados;

- E por fim, a todos que de alguma forma estiveram do meu lado para ser possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

O projeto de uma barragem deve pautar-se por princípios básicos de segurança e economia. Quanto à estabilidade dos taludes artificiais, existem três situações no tempo útil da barragem que requerem análises: no final de construção, em que se interessa analisar o talude à jusante, o mais íngreme; barragem em operação, com nível d'água em posição máxima, há vários anos; e abaixamento rápido do nível d'água, que pode levar alguns meses para ocorrer, mas que nem por isso deixa de “ser rápido”, diante da baixa permeabilidade do solo compactado, sendo crítico o talude a montante. A mesorregião do Agreste Pernambucano é uma das cinco mesorregiões do estado de Pernambuco, em que está situado o município de São Bento do Una, no qual será construída uma barragem para o acúmulo de água, com finalidade de abastecimento e auxílio no polo avícola, esse que precisa ser abastecido constantemente, dado que se trata de um dos polos mais ativos da região Nordeste, no momento, extremamente prejudicado pela falta de água. Esta pesquisa apresenta os resultados da análise de estabilidade da Barragem São Bento do Una, considerando as situações críticas e os compara com os resultados apresentados no relatório do Projeto Básico e com valores mínimos de referência. Uma vez determinado o arranjo de uma barragem, as dimensões da geometria transversal e as variações do nível d'água do reservatório; e determinado em laboratório, os parâmetros geotécnicos das fundações e dos materiais de construção, foi possível realizar a análise de estabilidade da mesma. Foi utilizado o programa SLOPE/W, empregando o método de Spencer para a determinação do coeficiente de segurança (FS). Os resultados da análise de estabilidade para todas as situações críticas consideradas, apresentaram-se satisfatórios, visto que todos os valores dos fatores de segurança foram atendidos, tanto no Projeto Básico, como na presente pesquisa. A geometria da barragem e os parâmetros geotécnicos dos materiais considerados em projeto para a construção, mostraram-se adequados. Todos os dados fornecidos pelo Projeto Básico foram obtidos por meio de ensaios geotécnicos de laboratório, sendo necessário o controle tecnológico desses parâmetros durante a execução da obra, garantindo a estabilidade da barragem.

**Palavras-chave:** Barragens. Estabilidade. Parâmetros geotécnicos. Fator de segurança.

## ABSTRACT

The design of a dam should be guided by basic principles of safety and economy. As for the stability of the artificial slopes, there are three situations in the useful time of the dam that require analysis: at the end of construction, where it is interesting to analyze the slope downstream, the steepest; dam in operation, with maximum water level for several years; and rapid lowering of the water level, which may take a few months to occur, but nonetheless does not stop being “fast”, due to the low permeability of the compacted soil, being the upstream slope critical. The Agreste Pernambucano mesoregion is one of the five mesoregions of the state of Pernambuco, in which the municipality of São Bento do Una is located, in which a dam will be built for the accumulation of water, with the purpose of supplying and assisting the poultry pole, which needs to be constantly supplied, since it is one of the most active poles in the Northeast region, which is currently extremely damaged by the lack of water. This research presents the results of the stability analysis of the São Bento do Una Dam, considering the critical situations and compares them with the results presented in the Basic Project report and with minimum reference values. Once the arrangement of a dam is determined, the dimensions of the transverse geometry and the variations in the water level of the reservoir; and determined in the laboratory, the geotechnical parameters of foundations and building materials, it was possible to perform the stability analysis of the same. The SLOPE/W program was used, using the Spencer method to determine the safety coefficient (FS). The results of the stability analysis for all the critical situations considered were satisfactory, since all the values of the safety factors were met, both in the Basic Project and in the present research. The geometry of the dam and the geotechnical parameters of the materials considered in design for the construction, were adequate. All the data provided by the Basic Project were obtained by means of geotechnical laboratory tests, and the technological control of these parameters is required during the execution of the work, guaranteeing the stability of the dam.

**Key-words:** Dams. Stability. Geotechnical parameters. Safety factor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos básicos de uma barragem. ....	15
Figura 2 - Barragem de terra-enrocamento: (a) com núcleo central, e (b) inclinado para montante. ....	16
Figura 3 - Esquema da câmara utilizada na realização dos ensaios triaxiais. ....	21
Figura 4 - Fatia genérica e Polígono de forças (Método de Spencer). ....	24
Figura 5: Gráfico para determinar o fator de segurança pelo método de Spencer. ....	24
Figura 6 - Área a ser alagada pela Barragem São Bento do Una. ....	27
Figura 7 - Mapa geológico do Município de São Bento do Una. ....	30
Figura 8 - Mapa de localização do eixo barrável de São Bento do Una. ....	32
Figura 9 - Seção que será utilizada nas análises desse estudo. ....	36
Figura 10 - Final de construção - Talude Jusante – GeoSlope. ....	41
Figura 11 - Final de construção - Talude Jusante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo. ....	42
Figura 12 - Final de construção - Talude Montante – GeoSlope. ....	43
Figura 13 - Final de construção - Talude Montante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo. ....	44
Figura 14 - Barragem em operação (NA MÁX Normal) - Talude Jusante - GeoSlope .....	46
Figura 15 - Barragem em operação (NA MÁX Normal) - Talude Jusante - Cunha de ruptura de maior potencial destrutivo. ....	46
Figura 16 - Barragem em operação (NA MÁX MÁX) - Talude Jusante - GeoSlope .....	48
Figura 17 - Barragem em operação (NA MÁX MÁX) - Talude Jusante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo. ....	48
Figura 18 - Rebaixamento rápido (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal) - Talude Montante - GeoSlope .....	50
Figura 19 - Rebaixamento rápido (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal) - Talude Montante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo. ....	50



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variantes dos métodos de equilíbrio-limite. ....	23
Tabela 2 - Coeficientes de segurança (avaliação estática). ....	25
Tabela 3 - Coeficientes de segurança mínimos que devem ser adotados. ....	26
Tabela 4 - Dados para o cálculo da estabilidade da barragem. ....	37
Tabela 5 - Pontos utilizados para desenhar a barragem no GeoSlope. ....	38
Tabela 6 - Pontos da linha piezométrica para o final da construção da barragem.....	40
Tabela 7 - Pontos da linha piezométrica - Barragem em operação (NA MÁX Normal).....	45
Tabela 8 - Pontos da linha piezométrica - Barragem em operação (NA MÁX MÁX) .....	47
Tabela 9 - Pontos da linha piezométrica - Rebaixamento rápido (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal) .....	49
Tabela 10 - Tabela resumo dos fatores de segurança. ....	52

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>12</b>
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos .....	12
<b>1.2 Motivação .....</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Justificativa .....</b>	<b>13</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>13</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Barragens .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Estabilidade de barragens .....</b>	<b>17</b>
2.2.1 Fim de construção .....	18
2.2.2 Fluxo em regime permanente com o reservatório cheio .....	18
2.2.3 Esvaziamento rápido do reservatório .....	18
<b>2.3 Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo .....</b>	<b>19</b>
2.3.1 Ângulo de atrito.....	19
2.3.2 Coesão.....	19
2.3.3 Peso específico .....	20
<b>2.4 Ensaio triaxiais .....</b>	<b>20</b>
<b>2.5 Métodos de análise de estabilidade.....</b>	<b>22</b>
2.5.1 Método de Spencer.....	23
<b>2.6 Valores do Fator de Segurança (FS) .....</b>	<b>25</b>
<b>2.7 GeoSlope .....</b>	<b>26</b>
<b>3. ASPECTOS GERAIS DO PROJETO DA BARRAGEM.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 Caracterização da área estudada .....</b>	<b>27</b>
3.1.1 Localização.....	28

3.1.2 Características da área de inserção da barragem.....	28
3.1.3 Geologia local .....	29
3.1.4 Local do eixo barrável .....	31
3.1.5 Considerações ambientais na implantação da barragem .....	32
<b>3.2 Programação dos serviços de geologia e geotecnia .....</b>	<b>33</b>
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Arranjo da barragem do rio Una .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Parâmetros geotécnicos utilizados.....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 Análise de estabilidade .....</b>	<b>37</b>
<b>5. ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Final de Construção – Talude Jusante .....</b>	<b>40</b>
<b>5.2 Final de construção – Talude Montante.....</b>	<b>42</b>
<b>5.3 Barragem em operação (NA MÁX Normal) – Talude Jusante .....</b>	<b>44</b>
<b>5.4 Barragem em operação (NA MÁX MÁX) – Talude Jusante .....</b>	<b>47</b>
<b>5.5 Rebaixamento rápido do reservatório (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal) – Talude Montante .....</b>	<b>49</b>
<b>5.6 Tabela Resumo e comparação com o Projeto Básico .....</b>	<b>51</b>
<b>6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....</b>	<b>53</b>
<b>6.1 Conclusão .....</b>	<b>53</b>
<b>6.2 Sugestões para futuras pesquisas .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>54</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo Caputo (1988), barragens são estruturas de contenção construídas em vales ou rios destinadas a fechá-los transversalmente, a fim de represar água, conforme a função do arranjo físico das barragens. Massad (2010) descreve barragem como sendo uma barreira artificial feita em cursos de água para retenção de grandes quantidades de água. Deve ser vista como: (a) um todo no tempo ou nas atividades que, apesar de subsequentes no tempo, devem ser encaradas como inseparáveis ou, no mínimo, interdependentes (projeto, construção, primeiro enchimento, que é o primeiro teste severo a que se submete uma barragem, e vistoria periódicas da barragem em operação, para garantir a sua segurança a longo prazo); e (b) uma unidade ou um todo orgânico no espaço, compreendendo: bacia da represa; terrenos de fundação, que são como um prolongamento da barragem em subsuperfície; estruturas anexas ou auxiliares (vertedouros, descarregadores de fundo, tomadas d'água, galerias, túneis, casas de força, etc.); instrumentos para observação de comportamento (piezômetros, medidores de recalque, etc.); e instalações de comunicação e manutenção. Pode ser destinada: a geração de energia, a irrigação, a navegação, ao abastecimento urbano e industrial, a recreação, ao controle de cheias, a regularização de vazão, dentre outros objetivos.

No Nordeste do Brasil, as barragens sempre tiveram uma importância vital no desenvolvimento das cidades, tendo a função de mitigar as consequências do período de estiagem. A mesorregião do Agreste Pernambucano é uma das cinco mesorregiões do estado brasileiro de Pernambuco, em que está situado o município de São Bento do Una, no qual será construída uma barragem para o acúmulo de água, inundando territórios dos municípios de São Bento do Una e Capoeiras, com finalidade de abastecimento humano e auxílio no polo avícola, esse que precisa ser abastecido constantemente, dado que se trata de um dos polos mais ativos da região do Nordeste, no momento, extremamente prejudicado pela falta de água. Segundo o G1 (2018), a barragem vai beneficiar mais de 72 mil moradores dos municípios de Capoeiras e São Bento do Una, no qual a ordem de serviço para o início das obras foi assinada em junho de 2018 e o prazo para a conclusão da obra é de 18 meses.

A Barragem do Una trata-se de uma barragem zoneada de enrocamento com vertedor em soleira livre, sendo esse tipo escolhido otimizando os aspectos tecnológicos, hidráulicos e econômicos, considerando a seleção do material disponível nas jazidas das imediações da obra e nos resultados de ensaios de laboratório executados a partir do material extraído dessas jazidas. Sua capacidade de armazenamento é de  $17,77 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Como princípios de projeto, os carregamentos provenientes da barragem e a

distribuição desses esforços sobre as fundações não deverão causar deformações totais ou diferenciais excessivas ou causar ruptura da fundação por cisalhamento. Os taludes de montante e jusante da barragem e as ombreiras deverão ser estáveis sob todos os níveis de reservatório, bem como sob todas as condições de operação.

Na análise da estabilidade dos taludes da barragem, devem ser verificados os casos críticos, em que os mesmos serão postos as maiores solicitações: final da construção (analisando o talude de montante e de jusante, sabendo que o caso mais crítico seria o de jusante que é mais íngreme), no regime permanente excepcional (que é analisado o talude de jusante, visto que o talude de montante está submerso) e o no caso de rebaixamento rápido do reservatório após a cheia máxima (verificado o talude de montante). O método de Spencer normalmente é empregado para a determinação do coeficiente de segurança (FS), visto que é um método rigoroso e possui um nível confiável quanto ao seu resultado.

Esta pesquisa apresenta os resultados da análise de estabilidade da Barragem São Bento do Una, considerando os casos críticos, e os compara com os resultados já apresentados no relatório do Projeto Básico e valores mínimos de referência, considerando os parâmetros geotécnicos dos materiais que constituem o corpo da barragem, obtidos em ensaios de laboratório.

## **1.1 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desta pesquisa é realizar a verificação da análise de estabilidade da Barragem São Bento do Una através do software GeoSlope, fazendo uma comparação com os resultados apresentados no relatório do Projeto Básico da barragem e valores mínimos de referência.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar o fator de segurança mínimo no GeoSlope, considerando os casos críticos: fim de construção, fluxo em regime permanente com o reservatório cheio e esvaziamento rápido do reservatório;
- Comparar e discutir os resultados da análise de estabilidade obtidos na pesquisa com os resultados do Projeto Básico e com os valores mínimos de referência;
- Avaliar as cunhas de rupturas mais críticas e globais da barragem.

## 1.2 Motivação

A região em estudo fica em Pernambuco, que abrange regiões que podem sofrer mais com a estiagem, como é o caso do agreste, como também outras que sofrem mais com cheias, que é o caso do litoral. Uma solução para esses problemas é a construção de barragens, que possuem o objetivo de acumular água.

As barragens possuem uma área de influência bastante considerável, no qual devem ser bem projetadas, pois se acontecer algum problema, como por exemplo, o rompimento da barragem, terá diversas consequências negativas para a região. Visto a grande relevância do tema, é de fundamental importância a realização da análise de estabilidade de uma barragem nos seus estados mais críticos.

## 1.3 Justificativa

De acordo com Castro (2017), o Brasil possui um dos maiores potenciais de recursos hídricos do planeta. Devido a essa alta disponibilidade hídrica são construídas diversas barragens em sua área. Essas barragens exigem bastante conhecimento técnico e adaptações, visto que são obras complexas, desde a fase de projeto até a construção. Ainda segundo o mesmo autor, o país é reconhecido pelo alto padrão tecnológico de suas barragens, no qual sempre se busca verificar as suas características para otimizar a segurança, economia e prazos de construção.

É preciso realizar um estudo para analisar a estabilidade da barragem, para que quando seja construída não tenha problemas com efeitos inesperados. Com isso, o engenheiro tem a segurança de que o seu projeto pode ser tocado em frente. Para essa análise ser feita de forma correta, é preciso analisar a barragem nos seus estados mais críticos, já que se ela manter sua estabilidade nesse caso, os outros casos serão suportados.

## 1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está subdividido em 6 capítulos, distribuídos da seguinte maneira:

- *CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO*

Apresenta a introdução, na qual se tem uma visualização geral do trabalho desenvolvido, incluindo as considerações iniciais, os objetivos e a estrutura do trabalho.

- *CAPÍTULO 2. REFERENCIAL TEÓRICO*

Apresenta uma revisão da literatura sobre conceitos de barragens e análise de estabilidade, bem como os parâmetros geotécnicos necessários para esta análise (ângulo de atrito, coesão e peso específico), detalhamento dos ensaios triaxiais e métodos de análise de estabilidade.

- *CAPÍTULO 3. ASPECTOS GERAIS DO PROJETO DA BARRAGEM*

Apresenta os aspectos gerais do projeto da barragem São Bento do Una, com completa caracterização da área estudada e o programa de serviços geológico-geotécnicos. Todos os dados deste capítulo foram obtidos do Relatório do Projeto Básico.

- *CAPÍTULO 4. METODOLOGIA*

Apresenta a metodologia utilizada nesta pesquisa, o arranjo da barragem zoneada de enrocamento e a seção em estudo, os parâmetros que foram utilizados e os fatores de segurança admissíveis.

- *CAPÍTULO 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS*

Apresenta a análise e interpretação dos resultados da análise da estabilidade da seção típica da barragem estudada.

- *CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS*

Apresenta as principais conclusões da presente pesquisa e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre conceitos de barragens e análise de estabilidade, bem como os parâmetros geotécnicos necessários para esta análise (ângulo de atrito, coesão e peso específico), detalhamento dos ensaios triaxiais e métodos de análise de estabilidade.

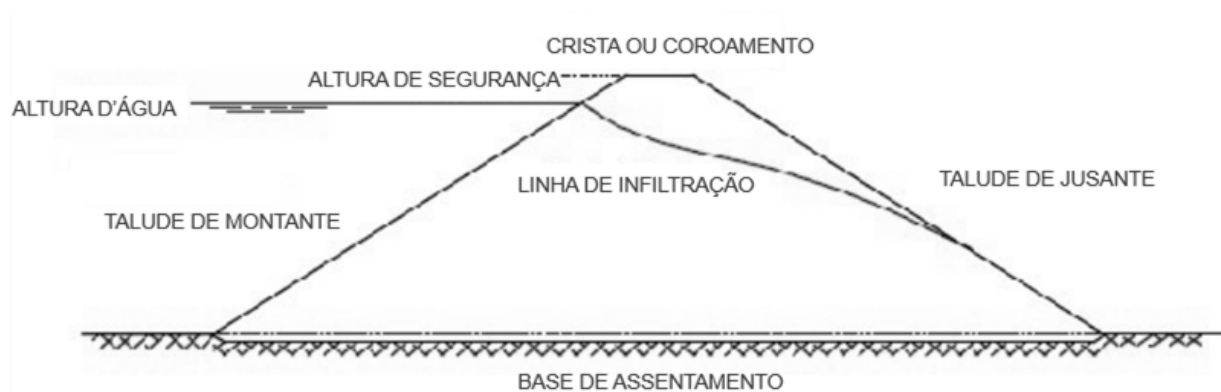
### 2.1 Barragens

Segundo Marangon (2004), pode-se definir barragem como sendo um elemento estrutural que é destinada a implantação de um reservatório, criado pelo homem, de acumulação de água, sendo construído transversalmente à direção do fluxo do rio. Os objetivos da construção de uma barragem são múltiplos, nos quais se destacam: controle de cheias, regularização de vazão do rio para se ter um nível adequado para navegação, aproveitamento hidrelétrico e em sistemas de irrigação.

De acordo com Meirelles (2015), os maciços das barragens são constituídos pelos seguintes elementos básicos: talude de montante, talude de jusante, crista ou coroamento, base de assentamento ou fundação e linha de infiltração (Figura 1).

Segundo Marangon (2004), o dimensionamento do talude de jusante deve ser feito analisando a situação em que as pressões neutras se desenvolvam no maciço até o fim de sua construção, já o dimensionamento do talude de montante deve ser feito com base na situação em que ocorra o rebaixamento instantâneo do reservatório. Esses casos citados, são os casos críticos de cada situação.

Figura 1 - Elementos básicos de uma barragem.



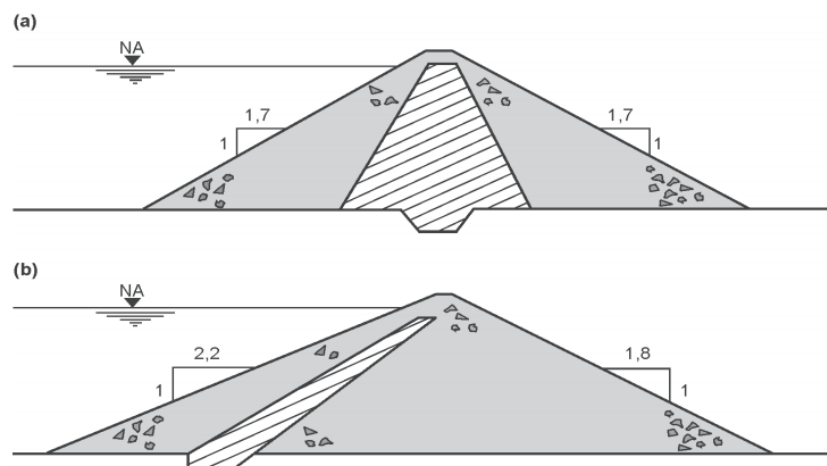
Fonte: Meirelles, 2015.



Massad (2010) entende como barragem de grande porte, aquelas que possuem uma altura maior que 15 metros ou então que tenha entre 10 e 15 metros e atenda os seguintes fatores: reservatório com volume total superior a 1.000.000 m<sup>3</sup>, vertedouro com capacidade superior a 2000 m<sup>3</sup>/s, comprimento de crista igual ou superior a 500 metros, barragem com projeto não convencional e barragens com condições difíceis de fundações.

De acordo com Massad (2010), os tipos básicos de barragens são: barragem de concreto gravidade, barragem de concreto estrutural com contrafortes, barragem de concreto em arco de dupla curvatura, barragem de terra homogênea, barragem de terra-enrocamento, barragem de enrocamento com membrana de concreto e barragem em aterro hidráulico. A barragem de terra-enrocamento apresenta o material de enrocamento (pedras) com um elevado ângulo de atrito, melhorando a estabilidade dos taludes de montante e jusante, mesmo se eles forem íngremes. O núcleo da barragem é constituído por argila, que permite o represamento de água, pelo fato de que esse material ocasiona a estanqueidade à barragem. Esse núcleo pode ser central ou inclinado (Figura 2).

Figura 2 - Barragem de terra-enrocamento: (a) com núcleo central, e (b) inclinado para montante.



Fonte: Massad, 2010.

Massad (2010) relata que na primeira metade do século XX, várias barragens foram construídas com enrocamento, sendo que algumas apresentavam desempenho insatisfatório, devido à ocorrência de vazões excessivas e de grandes deformações após o período de construção. Suspeitava-se que os problemas eram relacionados aos períodos de enchimento do reservatório, quando ocorria uma espécie de lubrificação do contato entre blocos de rocha, e

consequente redução do atrito. Em 1960, Terzagui provou que a molhagem não influenciava a redução do ângulo de atrito, mas podia provocar queda de resistência dos blocos de rochas, ocasionando quebra dos grãos.

Quanto aos materiais utilizados no núcleo, Bordeaux (1982) cita quatro características necessárias: (a) baixa permeabilidade para garantir pequenas vazões; (b) boa resistência contra erosão, para evitar o carreamento de finos, (c) alta deformabilidade para aceitar as deformações previstas sem fissurar; e (d) boa resistência ao cisalhamento.

## **2.2 Estabilidade de barragens**

O projeto de uma barragem deve pautar-se por dois princípios básicos: segurança e economia. A barragem, ao longo de suas fundações e ombreiras, deve possuir estabilidade adequada para suportar com segurança os carregamentos extremos, bem como as cargas normais de projeto. A seleção do critério de segurança para carregamentos extremos, deve-se basear nas consequências da ruptura da barragem.

Para fazer uma análise da estabilidade de uma barragem é necessário listar todos os esforços que estão sendo submetidos. Gusmão (2006) apresenta esses esforços da seguinte maneira: forças verticais V (dirigidas para baixo), forças verticais U (dirigidas para cima), forças dinâmicas, forças de expansão, esforços horizontais, esforços em todas as outras direções, momentos verticais e momentos horizontais.

Dentre os esforços verticais V estão o peso próprio, o peso da coluna de água a montante e o peso da coluna de água a jusante. Os esforços verticais U são constituídos de subpressão. A pressão da coluna de água e o empuxo resultante de material decantado causam esforços horizontais. As forças dinâmicas são compostas por altura das ondas e terremotos, por exemplo. Essas cargas irão atuar na barragem, provocando momentos pelos seus braços de alavanca, podendo ser de dois tipos, que são: momento resistente e momento atuante. Através de uma relação desses momentos é concluído se uma barragem possui uma boa estabilidade.

Marangon (2004) afirma que durante e após o primeiro enchimento do reservatório e durante e após a construção, a barragem é solicitada por diversos carregamentos que variam com o tempo, dessa forma é importante analisar se o fator de segurança está dentro do limite para a situação encontrada. As três situações mais críticas de uma barragem são: fim de construção, fluxo em regime permanente com o reservatório cheio e esvaziamento rápido do reservatório.

### 2.2.1 Fim de construção

De acordo com Massad (2010), no período de construção de uma barragem, a pressão total em um nível determinado vai aumentando à medida em que são colocadas e compactadas as novas camadas. Devido à compressibilidade do maciço e o seu baixo coeficiente de permeabilidade, o aumento da pressão gera pressões intersticiais. Dessa forma, para uma declividade do talude, os esforços solicitantes são provocados pelo peso da barragem e de consequentes pressões neutras, que são dependentes do teor de umidade do solo colocado, do tipo de solo e do ritmo que está sendo construída a barragem.

Neste caso, interessa analisar o talude de jusante, o mais íngreme. Os ensaios triaxiais para medida de resistência têm de ser do tipo rápido, isto é, sem drenagem (UU).

### 2.2.2 Fluxo em regime permanente com o reservatório cheio

Segundo Massad (2010), quando concluída a construção da barragem, chega o momento do primeiro enchimento do reservatório, no qual são estabelecidos fluxos de percolação, que forma, gradualmente, uma rede de fluxo permanente. A pressão de percolação é desfavorável à estabilidade do talude de jusante e favorável à estabilidade do talude de montante, visto que a água percola no sentido de montante para jusante.

Para uma barragem em operação, funcionando em carga (N.A. máximo), durante cinco anos, houve tempo suficiente não só para que a rede de fluxo se instalasse no maciço, como o processo de adensamento do solo compactado, a montante e a jusante, tenha terminado. O ensaio triaxial mais adequado, nesta condição, é o Lento (CD), no qual a fase de adensamento do corpo de prova ocorre após a aplicação da pressão de câmara, que demora um dia.

### 2.2.3 Esvaziamento rápido do reservatório

De acordo com Massad (2010), a situação de um rebaixamento rápido do nível da água do reservatório gera uma situação crítica para o bloco de montante da barragem, visto que é o que possui o contato direto com a água, provocando assim uma retirada de solicitações dessa parte da barragem. A rede de fluxo que se instala gera forças de percolação praticamente paralelas ao talude na direção, portanto, de um eventual escorregamento. O ensaio triaxial deve ser o consolidado não drenado (CU), no qual espera-se que a pressão neutra seja dissipada após a aplicação da pressão confinante e não é feita a drenagem durante a execução do ensaio.

## 2.3 Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo

Massad (2010) apresenta que a resistência ao cisalhamento do solo depende de fatores, tais como: (a) o valor da tensão normal efetiva; (b) as condições de drenagem; (c) a trajetória de tensões (sequência de carregamento); (d) a história de tensões (pressão de pré-adensamento); (e) a estrutura e outras características do solo.

Para definir a máxima pressão que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, é necessário se ter alguns parâmetros geotécnicos do solo em estudo para realizar a verificação de resistência ao cisalhamento. Esses parâmetros são o ângulo de atrito e a coesão. Outro parâmetro de importância para esse estudo, é o peso específico natural do solo, que serve para calcular as tensões efetivas.

### 2.3.1 Ângulo de atrito

De acordo com Faro (2016), o atrito ocorre na região de contato quando há uma interação entre duas superfícies. Esse atrito gera uma resistência ao deslizamento (T) que é proporcional a força normal N (Equação 1). Para o caso dos solos, a tensão de cisalhamento é igual a tensão normal vezes a tangente do ângulo de atrito interno do solo.

$$T = N \times \phi \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde  $\phi$  é o coeficiente de atrito entre os dois materiais.

### 2.3.2 Coesão

Caputo (1988), classifica a coesão em dois tipos, que são: a coesão verdadeira e a coesão aparente. A coesão verdadeira é causada pelas forças eletroquímicas de atração das partículas de argila e o seu estudo engloba mais a parte que envolve a física dos solos e a química coloidal, sendo assim ela depende de vários fatores. A coesão aparente atua como se fosse uma pressão externa, sendo ela resultado da pressão capilar da água contida nos solos.

Quando é considerada apenas as pressões efetivas mobilizando a resistência ao cisalhamento, temos a seguinte equação:

$$Tr = c + (\sigma - u)tg\phi \quad \text{(Equação 2)}$$

onde:

Tr - resistência ao cisalhamento;

c - coesão;

$\sigma$  - tensão total;

u - pressão neutra da água;

$\varphi$  - ângulo de atrito.

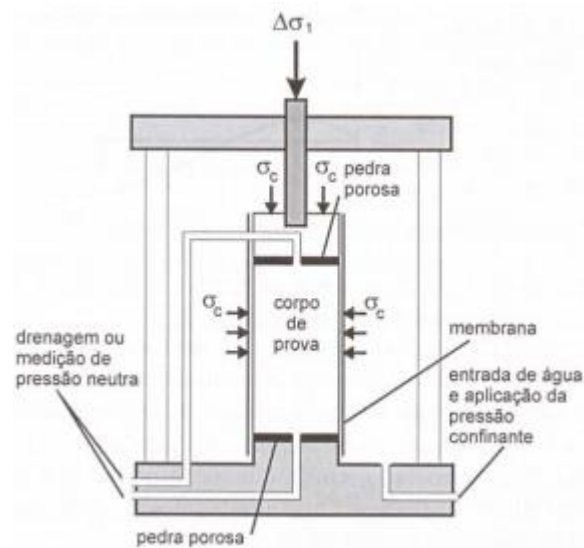
### 2.3.3 Peso específico

De acordo com Pinto (2006), o peso específico natural é o resultado da razão entre o peso total do solo e seu volume. Também pode ser chamada por “peso específico” do solo e é representado pela expressão  $\gamma_n$ . O peso específico natural é determinado moldando-se um cilindro do solo, no qual é possível encontrar esse volume e a partir disso pesa o solo desse molde. A relação peso total dividido pelo volume, é o peso específico. É possível também encontrar o peso específico quando o corpo é moldado em corpos irregulares, mas para isso é preciso cobrir o corpo de prova com uma envoltória de parafina para se obter o volume por meio do peso imerso na água.

## 2.4 Ensaios triaxiais

O ensaio triaxial consiste na aplicação de um carregamento axial e de um estado hidrostático sobre um corpo de prova cilíndrico de solo. Esse corpo de prova é colocado dentro de uma câmara que é cheia de água e que será utilizada para aplicar uma pressão confinante no solo em todas as direções. Já o carregamento axial é aplicado no solo através de forças no pistão que penetra na câmara (Pinto, 2006). A figura 3 apresenta o esquema da câmara utilizada.

Figura 3 - Esquema da câmara utilizada na realização dos ensaios triaxiais.



Fonte: Pinto, 2006.

Os ensaios triaxiais convencionais são divididos em três tipos: ensaio adensado drenado (CD), ensaio adensado não drenado (CU) e ensaio não adensado não drenado (UU).

O ensaio não adensado não drenado (UU) é realizado ao final da construção da barragem. O corpo de prova será submetido a uma pressão confinante e uma carga axial sem que ocorra drenagem. Não irá ocorrer variação de volume, caso o corpo de prova esteja saturado e o teor de umidade permaneça constante. Esse ensaio não precisa de um intervalo de tempo grande, mas a rapidez do carregamento pode afetar o resultado.

O ensaio adensado não drenado (CU) é realizado quando ocorre o rebaixamento rápido do nível do reservatório. O corpo de prova adensa sob pressão confinante e em seguida carrega-se axialmente sem drenagem. Neste ensaio, é deixado dissipar as pressões neutras correspondentes a pressão confinante. O seu resultado é a resistência não drenada em função da tensão de adensamento.

O ensaio adensado drenado (CD) é realizado quando o reservatório está cheio. A pressão confinante é aplicada e é aguardado que a pressão neutra se dissipe, que é quando o corpo de prova adensa. Durante todo o carregamento a pressão neutra é quase nula, sendo as tensões efetivas que estão ocorrendo indicadas pelas tensões totais. Esse ensaio é mais lento, pelo fato de que é preciso esperar até que ocorra a dissipação das pressões neutras e não pela velocidade de carregamento.

## 2.5 Métodos de análise de estabilidade

Os métodos para análise de estabilidade de taludes, atualmente em uso, baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada por um corpo rígido-plástico, na eminência de entrar em um processo de escorregamento. Daí a denominação de “métodos de equilíbrio-limite”. Com base no conhecimento das forças atuantes, determinam-se as tensões cisalhantes induzidas, por meio das equações de equilíbrio. A análise termina com a comparação dessas tensões com a resistência ao cisalhamento do solo em questão (Massad, 2010).

A observação dos escorregamentos na natureza levou as análises a considerar a massa de solo como um todo (Método do Círculo de Atrito), ou subdividida em lamelas (Método Sueco), ou em cunhas (Método das Cunhas). Em 1916, motivados pelo escorregamento que ocorreu no cais de Stigberg, em Gotemburgo, os suecos desenvolveram os métodos de análise hoje em uso, baseado no conceito de “equilíbrio-limite”. Constataram que as linhas de ruptura eram aproximadamente circulares e que o escorregamento ocorria de tal modo que a massa de solo instabilizada se fragmentava em fatias ou “lamelas”, com faces verticais. O conceito de círculo de atrito e a divisão da massa do solo em lamelas já era praticada naquela época. Na década de 30, Fellenius estendeu a análise para levar em conta também a coesão na resistência ao cisalhamento do solo, além de considerar casos de solos estratificados.

No estudo da estabilidade de taludes naturais, e de taludes de barragens de terra, costuma-se definir o coeficiente ou fator de segurança (FS) como a relação entre a resistência ao cisalhamento do solo ( $s$ ) e a tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada ( $\tau$ ), esta última obtida por meio das equações de equilíbrio.

$$FS = s / \tau \quad \text{(Equação 3)}$$

$s$  em termos de tensões efetivas, é dada por:

$$s = c' + \bar{\sigma} . tg \emptyset \quad \text{(Equação 4)}$$

Massad (2010) relata que evidentemente, não se conhece a posição da linha de ruptura ou da “linha crítica”, isto é, da linha à qual está associado o coeficiente de segurança mínimo, o qual se consegue por tentativas. Atualmente, essa tarefa é facilitada graças aos

recursos de computação eletrônica disponíveis.

Os métodos de equilíbrio limite partem dos seguintes pressupostos:

- a) O solo se comporta como material rígido-plástico, isto é, rompe-se bruscamente, sem se deformar.
- b) As equações de equilíbrio estático são válidas até a eminência da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico.
- c) O coeficiente de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Na classe de métodos de equilíbrio limite existem diversas variantes, conforme verificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Variantes dos métodos de equilíbrio-limite.

<b>EQUILÍBRIO LIMITE</b>	Método do Círculo de Atrito	
	Método Sueco	Método de Fellenius
		Bishop Simplificado
		Morgenstern-Price
		Spencer
	Método das Cunhas	

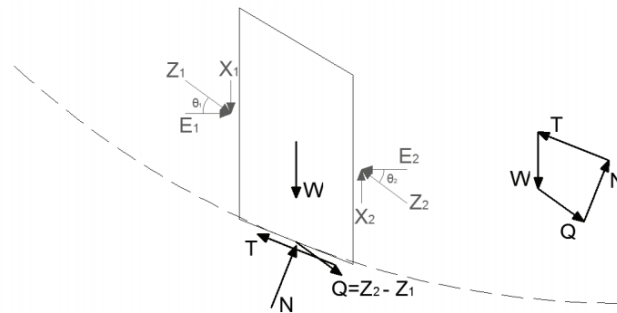
Fonte: Massad, 2010.

### 2.5.1 Método de Spencer

O método de Spencer satisfaz todas as equações de equilíbrio (momentos e forças). As forças de interação entre fatias são representadas por uma resultante  $Q$  que assume uma inclinação constante  $\theta$  com a horizontal, em cada fatia (Figura 4). Spencer entendeu válida a hipótese da relação entre forças cisalhantes ( $X$ ) e forças normais ( $E$ ) ser constante. Essa resultante é aplicada na base da fatia e no ponto intermediário da mesma. A reação normal  $N$  é obtida pelo equilíbrio de forças na direção paralela e perpendicular à base das fatias. O fator de segurança pode ser obtido por duas formas: somatório de momentos em relação a um ponto ou somatório de forças na direção horizontal ou paralela à base das fatias. O método prevê o cálculo de FS para os dois ângulos, correspondentes aos dois lados das fatias (Fredlund, 1977).



Figura 4 - Fatia genérica e Polígono de forças (Método de Spencer).



Fonte: Fredlund, 1977.

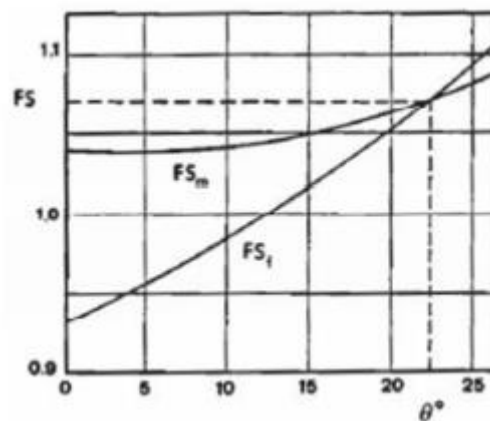
A partir da manipulação das equações de equilíbrio, é possível chegar a uma expressão para Q.

$$Q = \frac{\frac{c' \times l}{FS} + \frac{(W \times \cos \alpha - u \times l) \times \tan \phi'}{FS} - W \times \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \times \left[ 1 + \frac{\tan \phi' \times \tan(\alpha - \theta)}{FS} \right]}$$

(Equação 5)

Nesse método, o fator de segurança varia em função do  $\theta$ , no qual são traçadas duas curvas para o fator de segurança, uma para o equilíbrio de forças (FSr) e outra para o equilíbrio de momentos (FSm). Logo, o ponto de encontro dessas curvas é fator de segurança que é desejado encontrar, como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Gráfico para determinar o fator de segurança pelo método de Spencer.



Fonte: Freitas, 2011.

## 2.6 Valores do Fator de Segurança (FS)

A Tabela 2 resume os valores dos fatores mínimos de segurança que são normalmente aceitáveis para os cálculos de estabilidade de taludes (Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, 2002). Valores inferiores podem ser eventualmente admissíveis em certos casos, desde que justificados (por exemplo, quando um bom desempenho é demonstrado, com base em medidas da movimentação ou em análises mais sofisticadas). Os coeficientes de segurança obtidos e aceitos para os taludes devem levar em conta a confiabilidade dos dados utilizados nas análises de estabilidade, a adequabilidade e as limitações das análises selecionadas, as magnitudes das deformações toleráveis e as consequências da ruptura em potencial.

Tabela 2 - Coeficientes de segurança (avaliação estática).

<b>CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO</b>	<b>COEFICIENTE MÍNIMO DE SEGURANÇA (FS)</b>	<b>TALUDE</b>
Percolação permanente com reservatório na cota máxima normal	1,5	Jusante
Esvaziamento rápido	de 1,2 a 1,3	Montante
Término da construção antes do enchimento do reservatório	de 1,25 a 1,3	Jusante e Montante

Fonte: Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, 2002.

A Tabela 3 apresenta os coeficientes de segurança mínimos que devem ser adotados em uma análise de estabilidade de barragens, conforme apresentado no Manual da Eletrobrás (2003), que apresenta critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.

Tabela 3 - Coeficientes de segurança mínimos que devem ser adotados.

CONDIÇÃO DE SOLICITAÇÃO		COEFICIENTE DE SEGURANÇA	TALUDE ANALISADO
Final de construção		1,2	Talude Montante
		1,2	Talude Jusante
Regime Permanente Excepcional		1,3	Talude Jusante
Rebaixamento rápido	NA MÁX MÁX =>	1,0	Talude Montante
	NA MÍN Normal		
	NA MÁX MÁX =>	1,0	Talude Montante
	Soleira do vertedouro		

Fonte: Eletrobrás, 2003.

## 2.7 GeoSlope

Existem vários softwares para fazer análises de estabilidade de taludes, entre eles podem ser destacados o GeoSlope o GEO5 e o Slide. O SLOPE/W faz parte do pacote GeoStudio, que possui vários módulos de análises. O SLOPE/W faz uma análise de estabilidade de taludes, o SEEP/W de infiltração de água, o SIGMA/W de tensão e deformação, o QUAKE/W trabalha com dinâmica de terremotos, o TEMP/W faz análises geotérmicas, o CTRAN/W analisa o transporte de contaminantes e o AIR/W estuda o comportamento de correntes de ar.

O SLOPE/W possui diversos tipos de análises de estabilidade, destacando-se o de Spencer, Morgenstern-Price, Janbu, Bishop e Fellenius. Nesse estudo foi utilizado o GeoStudio 2019, no qual foi utilizado uma licença plena do software disponibilizada para um período de testes.

Para se fazer uma análise de estabilidade nesse software, deve-se seguir os seguintes passos:

- Introduzir os pontos do problema, para desenhar o seu contorno;
- Definir os parâmetros dos solos e aplicá-los a cada região;
- Definir o método de análise;
- Desenhar a linha piezométrica;
- Desenhar a superfície de pesquisa (raios e grades);
- Salvar o problema implementado, resolver e interpretar os resultados obtidos.

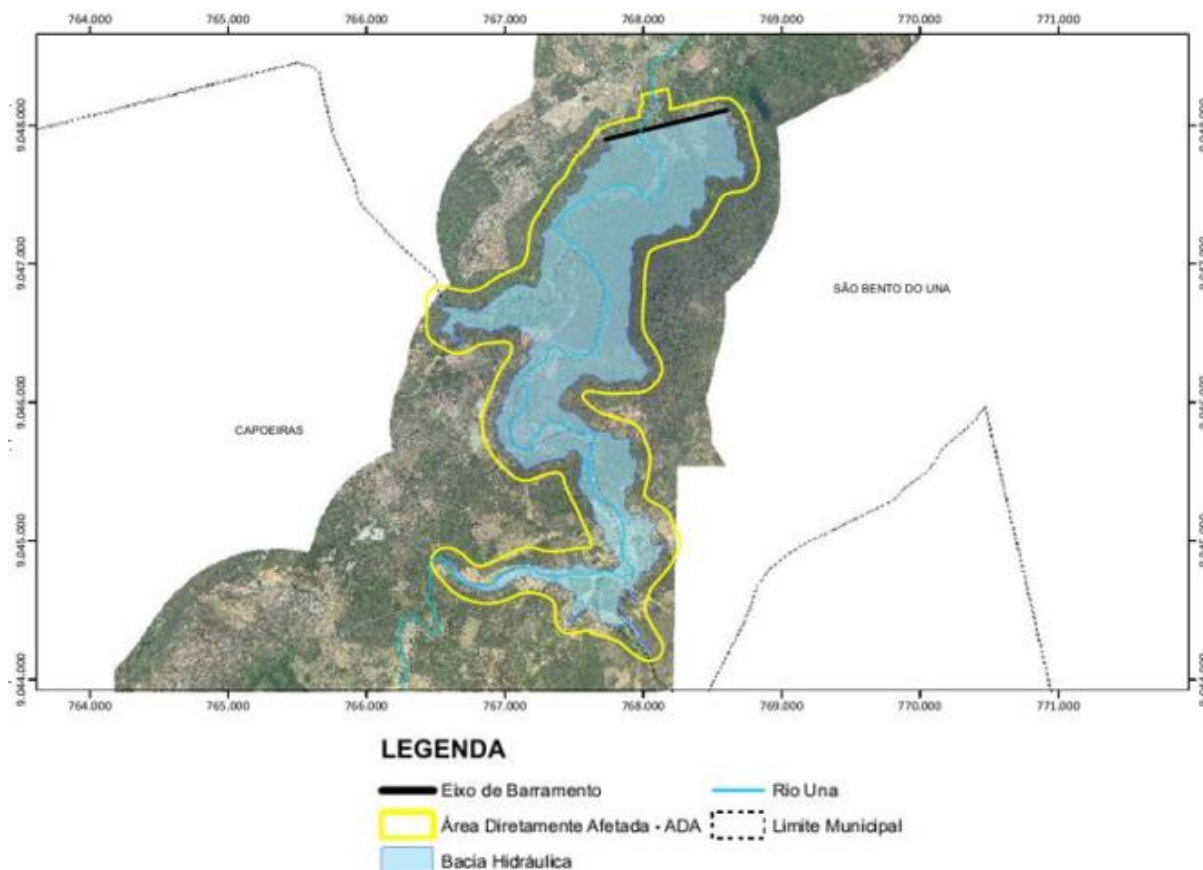
### 3. ASPECTOS GERAIS DO PROJETO DA BARRAGEM

Neste capítulo são apresentados os aspectos gerais do projeto da barragem São Bento do Una, com completa caracterização da área estudada e do programa dos serviços geológico-geotécnicos, finalizando com o arranjo da barragem zoneada de enrocamento. Todos os dados deste capítulo foram obtidos do Relatório do Projeto Básico.

#### 3.1 Caracterização da área estudada

De acordo com o ITEP (2015), a área que será construída essa barragem possui características físico-naturais e antrópicas bem particulares, que são: regime hidrológico deficiente, insuficiência de água para atividades da cadeia produtiva local, regime climático seco e limitações ao crescimento socioeconômico da área. Estas características influenciam a ocorrência dessa região ser uma zona que predomina a caatinga, como também influenciam para que o uso das terras seja voltado para a pecuária de corte e leite e criação de aves. A Figura 6 apresenta a área que será alagada com a construção da barragem.

Figura 6 - Área a ser alagada pela Barragem São Bento do Una.



Fonte: ITEP, 2015.

Diante da proposta de prestar serviços de abastecimento de água de forma sustentável, a Secretaria de Infraestrutura – SEINFRA, juntamente com a COMPESA têm sofrido bastante com problemas de escassez de água para atendimento em várias regiões do Estado, seja devido à falta de chuvas associadas às altas taxas de evapotranspiração, característica da região do Agreste de Pernambuco, seja pela dificuldade de investimentos na infraestrutura necessária à ampliação dos sistemas para atendimento da população.

Com a busca da universalização dos serviços de abastecimento de água, a SEINFRA está investindo no projeto para implantação da Barragem São Bento do Una, localizada no município de São Bento do Una/PE, com o objetivo de possibilitar o atendimento à demanda de água do mesmo. A água desta barragem terá como principal finalidade abastecer o município de São Bento do Una, tanto para regularização de abastecimento humano, como para auxílio do polo avícola, dado que se trata de um dos polos mais ativos da região do Nordeste, no momento extremamente prejudicado pela falta de água. Posteriormente, com a implantação da adutora do agreste, a oferta hídrica desse manancial poderá ser inteiramente demandada por outras atividades consuntivas, excetuando-se o abastecimento de água.

### 3.1.1 Localização

A área do projeto está situada no Município de São Bento do Una, localizado na mesorregião do Agreste, na Microrregião Vale do Ipojuca e na Região de Desenvolvimento Agreste Central do Estado de Pernambuco, limitando-se a norte com Belo Jardim, a sul com Jupi, a este com Garanhuns e a oeste com Alagoinha.

A barragem São Bento do Una, a ser projetada sobre o rio Una, está localizada a cerca de 17 km a sudoeste da cidade de São Bento do Una. O acesso ao local da obra, a partir da cidade de São Bento do Una, é feito pela PE-193, no sentido da cidade de Capoeiras, por cerca de 12,3 km até uma estrada carroçável situada a direita, dali percorre-se cerca de 5 km até o local onde será implantada a futura barragem.

### 3.1.2 Características da área de inserção da barragem

O município de São Bento do Una ocupa uma área total de 726,96 km<sup>2</sup>, representando 0,74% da área total de Pernambuco, estando inserida na mesorregião do Agreste, na Microrregião Vale do Ipojuca e na região de desenvolvimento Agreste Central do Estado de Pernambuco, no entorno das coordenadas geográficas de latitude – 8°31'22" Sul e longitude – 36°26'40" Oeste, com altitude média de 650 metros.

Os principais acessos à região estão representados por rodovias federais e estaduais, que ligam o município à capital do estado, com rodovias pavimentadas e não pavimentadas.

De São Bento do Una a Recife, o trajeto mais curto tem aproximadamente 204,8 km, seguindo pela PE-180 até a cidade de Belo Jardim, totalizando 20 km; e pela BR-232, passando pelas cidades de Tacaimbó, São Caetano, Caruaru, Bezerros, Gravatá, Pombos, Vitória de Santo Antão, até Recife, totalizando 184 km.

O município é interceptado por duas estradas principais, a PE-180 que liga Belo Jardim e Lajedo, e pela PE-193, que liga o município a Capoeiras; a PE-180 converge para a BR-232. Apesar do eixo barrável estar situado no rio Una, a região em que o município de São Bento do Una está inserido corresponde à área de duas bacias hidrográficas: rio Ipojuca (10,8%) e rio Una (89,2%).

### 3.1.3 Geologia local

O município de São Bento do Una tem seu território repartido entre as unidades geológicas de Terrenos de Domínio Externo e Ortognaisses Mesoproterozoicos. Encontra-se inserido, geologicamente, na Província Borborema, sendo constituído pelos litotipos da Suíte Serra de Taquaritinga dos complexos Cabrobó e Belém do São Francisco e da Suíte Intrusiva Leucocrática Peraluminosa.

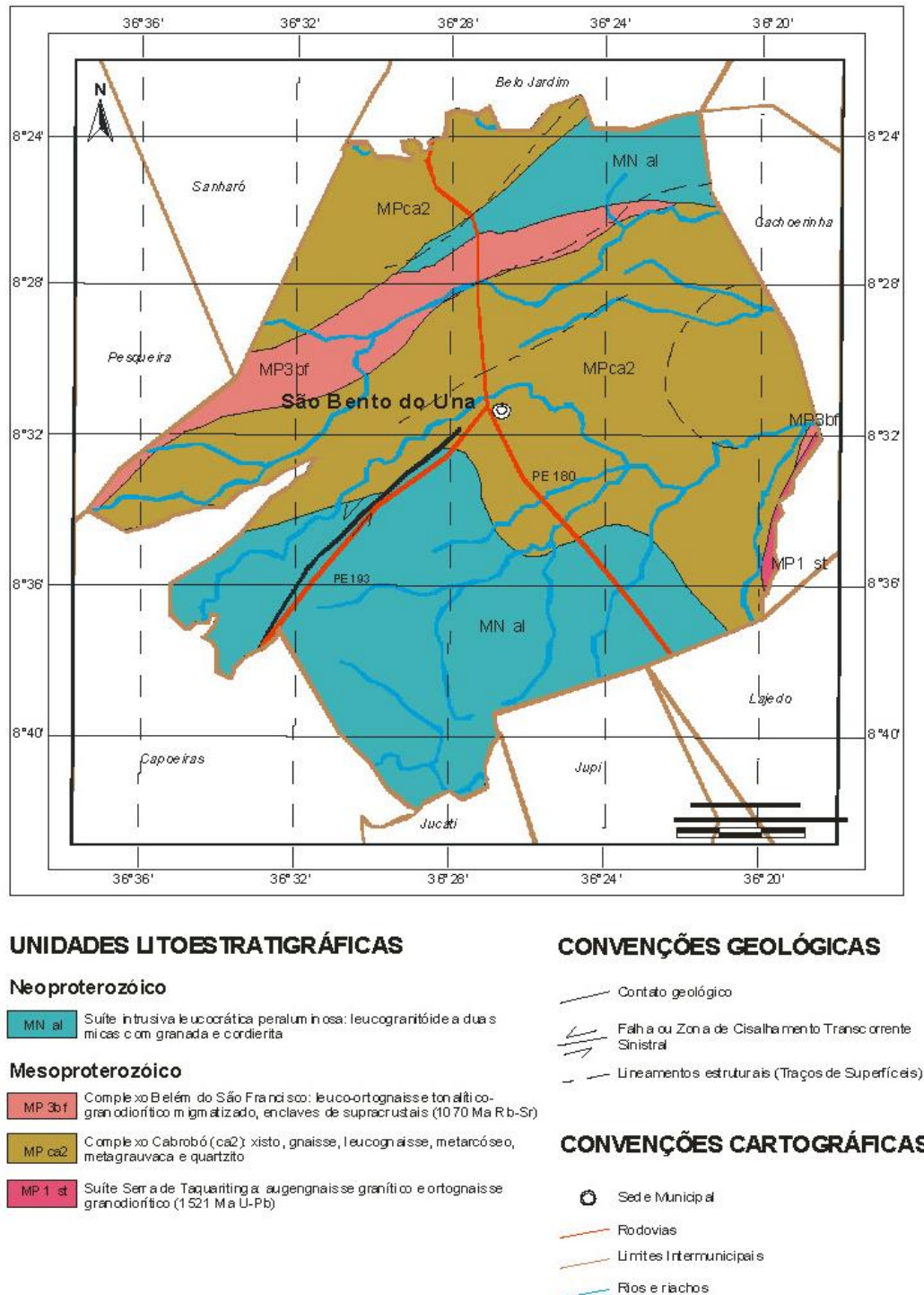
A Província Borborema está situada geograficamente no nordeste brasileiro compreendendo uma área de aproximadamente 450.000 km<sup>2</sup>. Geologicamente, corresponde a porção oeste de uma extensa faixa orogênica Brasileira/Pan-Africana formada a partir da convergência dos crátons Amazônico, São Luís – Oeste Africano e São Francisco – Congo.

O Complexo Cabrobó é determinado por sequências metassedimentares: biotita gnaisses quartzo-feldspáticos (às vezes com granada), mica-xistos, muscovita gnaisses, metagrauvas, paragnaisses (algumas vezes migmatitizados) e migmatitos. Apresentando também lentes de quartzitos, anfibolitos e mármore e meta-arcósios com níveis quartzíticos. Ocorrem em sequência metavulcano-sedimentar: paragnaisses com frequentes lentes de metamáficas /anfibolitos. As lentes de quartzito ocorrentes nesse Complexo representam uma sequência continental de metarcóseos/metaterígenos, denominadas Formação Garanhuns.

O Complexo de Belém de São Francisco é constituído por rochas compostas de uma associação granítico-migmatítica que apresenta biotita ortognaisses tonalíticos a granodioríticos, leucocráticos de cor cinza, migmatitizados e migmatitos com mesossoma quartzo diorítico/tonalítico a anfibólio e/ou biotita, além de porções anfibolíticas. Apresenta

também ortognaisses metaluminosos a peraluminosos leucocráticos de granulação fina a grossa, exibindo-se em alguns casos migmatitizados, bem como, augen gnaisses metaluminosos. Além disso, exibem-se neste Complexo, relíquias de rochas paraderivadas do Complexo Cabrobó, tais como: quartzitos, mármore e rochas cálcio-silicáticas. A Figura 7 apresenta o mapa geológico do município de São Bento do Una.

Figura 7 - Mapa geológico do Município de São Bento do Una.



Fonte: Projeto Básico, 2014.

### 3.1.4 Local do eixo barrável

O eixo barrável São Bento do Una está localizado a cerca de 17 km a sudoeste da cidade de São Bento do Una, cujas coordenadas em relação ao sistema de referência cartográfica SIRGAS 2000 UTM 24S são 9.047.889,721 N e 767.689,900 E, para a ombreira esquerda e 9.048.114,744 N e 768.623,155 E, para a ombreira direita.

O referido boqueirão permite a construção de uma barragem com altura de barramento estimada em 35 metros, correspondendo a esta altura uma cota de coroamento de 691 metros e uma extensão de 980 metros. Foi observado que a bacia hidráulica tem uma boa capacidade de acumulação.

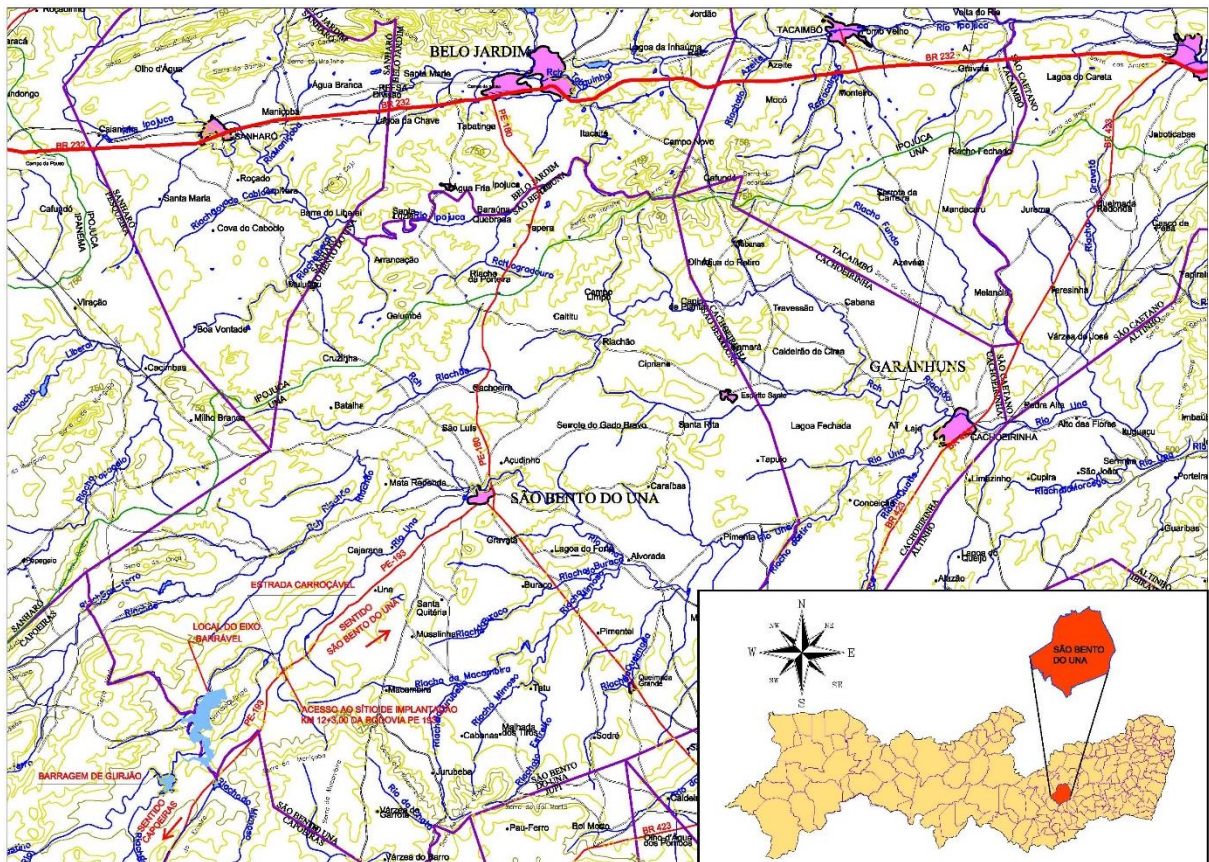
O acesso ao local da obra, a partir da cidade de São Bento do Una, é feito pela PE-193, no sentido da cidade de Capoeiras, por cerca de 12,3 km até uma estrada carroçável situada à direita; dali percorre-se cerca de 5 km até ao local onde será implantada a futura barragem. A montante do eixo adotado existe a barragem do Gurjão, com uma capacidade de armazenamento de  $3,8 \times 10^6$  m<sup>3</sup>. Trata-se de uma barragem de porte menor, que claramente terá influência no estudo hidrológico da barragem São Bento do Una.

A Figura 8 apresenta a localização e acesso da Barragem São Bento do Una. Foi observado na visita técnica, que a área da barragem se caracteriza por um forte relevo nas duas margens do rio.

Em toda a área são comuns os afloramentos da rocha na superfície, com mais frequência nas proximidades ao vale do rio. As ombreiras do eixo apresentam essencialmente solo de alteração de rocha e afloramento de rocha sã. O terreno apresenta uma geologia uniforme, quando comparando os locais dos dois eixos, existindo apenas uma ligeira diferença na espessura do material aluvionar, que se apresenta um pouco superior no local do novo eixo.



Figura 8 - Mapa de localização do eixo barrável de São Bento do Una.



Fonte: Projeto Básico, 2014.

### 3.1.5 Considerações ambientais na implantação da barragem

Por conta da degradação ambiental, a cobertura vegetal do município de São Bento do Una vem diminuindo ao longo dos anos, de modo a que este tenha passado a pertencer à listagem de municípios das Áreas Semiáridas das Áreas Susceptíveis à Desertificação (ASD) do Estado de Pernambuco, segundo o Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca. Esta ausência de vegetação favorecerá o incremento das erosões e consequentemente do assoreamento da futura barragem. Medidas de proteção deverão ser tomadas, como a implantação de mata ciliar em torno do futuro reservatório, que além de proteger as águas acumuladas diminuirão os efeitos das erosões e assoreamentos. Na região de implantação da barragem não há registro de unidades de conservação ambiental.

Como os principais materiais de construção situam-se nas proximidades do eixo barrável, em área de pouca vegetação e sem nenhuma característica ambiental digna de nota, senão a acentuada degradação ambiental sobretudo de natureza antrópica, pode concluir-se

que o local é bastante adequado à implantação de barramento, com poucos impactos ambientais.

Nas proximidades do sítio barrável, foram apenas observados depósitos de areia grossa e afloramento de rocha gnáissica, com excelente qualidade para utilização em construção, contudo não se identificaram jazidas de solo, sendo, portanto, necessário uma nova visita destinada à procura desses materiais na proximidade do eixo barrável, a fim de determinar qual a solução mais viável. Tendo em conta que a barragem Gurjão, existente na proximidade, se trata de uma barragem de terra, talvez essa seja a solução mais viável também para a barragem São Bento do Una, contudo essa alternativa só poderá ser avaliada depois de se realizar a pesquisa de materiais de empréstimo.

### **3.2 Programação dos serviços de geologia e geotecnia**

A programação dos serviços geotécnicos, baseou-se na realização de prospecções geotécnicas no sítio da barragem (sondagens mistas e rotativas) com localizações e profundidades baseadas em informações visuais de campo, nos mapas geológicos existentes e nos ensaios de laboratório para caracterização dos materiais construtivos (jazidas) e de fundação.

A partir da realização das prospecções e ensaios geotécnicos foi elaborado o levantamento geológico-geotécnico de superfície e a elaboração do perfil geológico-geotécnico do eixo da barragem que integrarão o projeto básico da barragem. Após a definição da alternativa tecnológica selecionada e da própria campanha dos serviços executados, poderá ser necessária uma nova campanha de ensaios.

Os serviços programados, baseiam-se nos offsets de duas alternativas tecnológicas para barramento do eixo de São Bento do Una, consideradas mais adaptáveis às condições topográficas e geológico-geotécnicas verificadas no campo:

- A construção de uma barragem de terra homogênea em toda extensão do eixo;
- A construção de uma barragem de terra/enrocamento (enrocamento com núcleo de argila) em toda extensão do eixo.

Foi estudado qual solução para a construção da barragem (terra ou terra e enrocamento), levando em conta vários resultados dos ensaios nas jazidas. Foram pesquisadas as seguintes ocorrências de materiais, com a qualidade requerida e na quantidade necessária:

- Solos, para utilização nas obras de terra;
- Areia, para utilização nos filtros;
- Rocha, para utilização em enrocamentos, transições e agregados graúdos (brita) para filtro (este material não será estudado nesta pesquisa).

## 4. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada nesta pesquisa para realização da análise de estabilidade da barragem, arranjo da barragem zoneada de enrocamento estudada, os parâmetros que foram utilizados e os fatores de segurança admissíveis.

### 4.1 Arranjo da barragem do rio Una

Uma vez determinado o arranjo de uma barragem, as dimensões da geometria transversal, variações do nível d'água do reservatório, e determinado em laboratório, os parâmetros geotécnicos das fundações e dos materiais de construção, é possível realizar a análise de estabilidade da mesma.

A barragem do Rio Una foi concebida por um maciço zoneado de enrocamento, definido este arranjo do maciço em função das disponibilidades dos materiais naturais no sítio da barragem e aproveitamento das escavações obrigatórias do canal lateral do vertedor, que se caracteriza com grandes volumes de materiais pétreos.

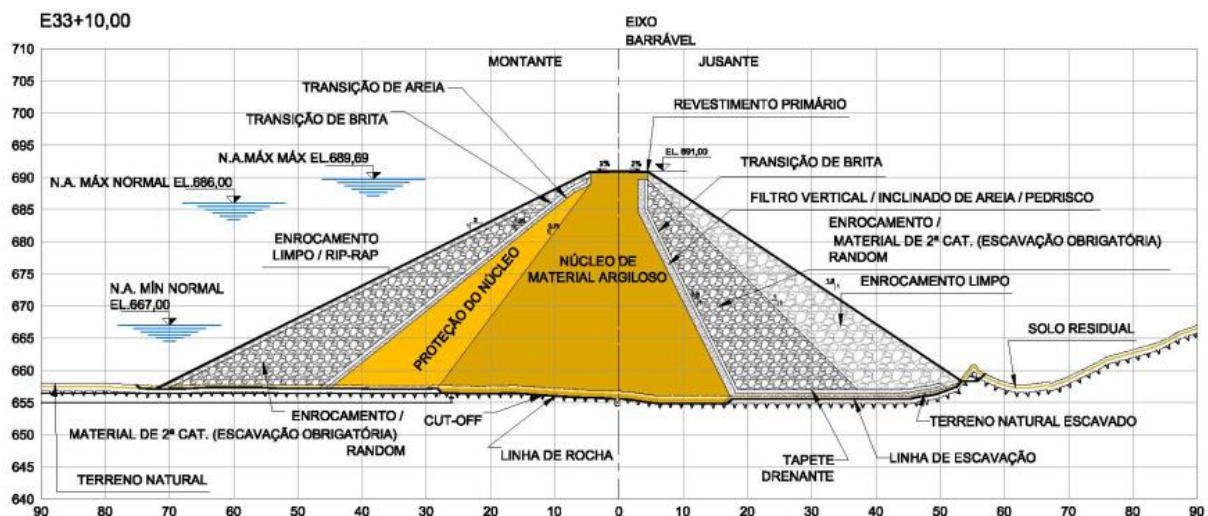
A geometria transversal apresenta as seguintes dimensões: crista com largura de 9,00 m na cota 691,00; espaldar de montante em talude de 1,00V : 2,00H, sendo a este incorporado a ensecadeira de montante; seguindo para jusante o espaldar de montante em enrocamento atravessa uma faixa de terra de proteção do núcleo até encontrar o talude do núcleo com geometria 1,00V : 0,75H; para o talude de jusante do núcleo é aplicado a geometria de 1,00V : 0,50H, sendo este delimitado pelo filtro vertical/inclinado; em seguida a geometria transversal da barragem atravessa uma faixa de enrocamento sujo atingindo a faixa de enrocamento limpo no espaldar de jusante com talude de 1,00V : 1,50H.

Mesmo sendo conformado por enrocamento o maciço da barragem, é previsto um sistema de drenagem interno, prevenindo a percolação no interior do enrocamento sujo de jusante, evitando a lavagem dos finos deste material com carreamento para jusante da barragem. Será inserido um filtro vertical/inclinado de mistura de areia/pedrisco, seguido por um tapete drenante, composto pelo mesmo material, com espessura para ambos os filtros de 1,00 m (geometria transversal - Figura 9).

A barragem deve ser apoiada em solo residual com resistência mínima equivalente ao SPT de 10 golpes, e permeabilidade inferior a  $1,00 \times 10^{-4}$  cm/s, sendo para conferir a este critério apenas necessário o expurgado em uma camada de solo de 0,50 m, sobre quase a totalidade da fundação, ocorrendo em alguns trechos, devido a capa de solo rasa e afloramento de rocha, a barragem se apoia em substrato de maciço de fundação pétreo.

Devido à baixa competência dos horizontes rochosos da fundação, quanto a permeabilidade, e por apresentar uma capa de solo estreita, será implementado ao barramento um sistema de vedação composto pela escavação de um cut-off, que deve atingir o topo rochoso da fundação, sendo previsto injeções de impermeabilização de primeira e segunda ordem que deverão atingir a profundidade mínima de 8,00 m ou metade da subtração entre a cota do NA máximo normal e a cota da boca do furo.

Figura 9 - Seção que será utilizada nas análises desse estudo.



Fonte: Projeto Básico, 2014.

A barragem tem um perfil zoneado, sendo composta pelos seguintes elementos:

- Espaldares zoneados, com material proveniente de escavação obrigatória (enrocamento / material de 2ª categoria), de jazida de material pétreo (enrocamento limpo) e de material de jazida de solos (proteção do núcleo);
- Cut-off a ser executado na projeção inferior do núcleo sendo escavado até o topo rochoso;
- Núcleo de material proveniente de jazidas de solos;
- Filtro vertical/inclinado de areia/pedrisco ao longo do eixo longitudinal, com transição de brita, na sua face de jusante;
- Tapete horizontal sob o espaldar de jusante composto por filtro horizontal de areia/pedrisco e transição de brita;
- Transições de areia e brita na face de montante;
- Proteção do talude de montante composta por enrocamento/rip-rap;
- Proteção da crista com revestimento primário.

## 4.2 Parâmetros geotécnicos utilizados

Para esse tipo de análise são necessários alguns parâmetros de entrada, que são: a coesão, o ângulo de atrito e o peso específico natural.

Todos os dados necessários para realização da análise de estabilidade da presente pesquisa estão apresentados nos estudos geológico-geotécnicos que fazem parte do Relatório dos Estudos Básicos da Barragem do Rio Una (2014).

A Tabela 4 apresenta os materiais que compõe o maciço da barragem e a fundação, com os respectivos parâmetros geotécnicos.

Tabela 4 - Dados para o cálculo da estabilidade da barragem.

TIPO DE MATERIAL		TRIAXIAL			PESO	
		COESÃO		$\phi$ (°)	ESPECÍFICO ( $\gamma$ )	
		(kPa)	(t/m <sup>2</sup> )		(t/m <sup>3</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )
Maciço	Proteção do núcleo	13	1,33	32	1,87	18,34
	Núcleo / Cut-off	13	1,33	32	1,87	18,34
	Filtro vertical / Tapete horizontal	0	0	30	1,84	18
	Transição de brita	0	0	30	1,84	18
	Enrocamento / Material de 2ª categoria	0	0	41,4	2,08	20,42
	Rip-Rap / Enrocamento	0	0	45	2,04	21
Fundação	Rocha sã	Impenetrável (BedRock)				

Fonte: Projeto Básico, 2014.

## 4.3 Análise de estabilidade

Na análise da estabilidade dos taludes da Barragem do Una, foram considerados os casos críticos:

- Final da construção (analisando o talude de montante e de jusante sabendo que o caso mais crítico seria o de jusante que é mais íngreme);
- Regime permanente excepcional (que é analisado o talude de jusante, visto que o talude de montante está submerso);
- Rebaixamento rápido do reservatório após a cheia máxima (verificado o



talude de montante).

Foi utilizado o programa SLOPE/W, empregando o método de Spencer para a determinação do coeficiente de segurança (FS), visto que é um método rigoroso e possui um nível confiável quanto ao seu resultado.

Para o desenho da barragem no software, foi colocado o perfil mostrado na Figura 10 no AutoCAD Civil 3D e desenhada toda a barragem em escala. Logo após, foi exportado esse desenho para o Qgis, através de um shapefile para ser extraído todos os nós encontrados. Sendo assim, o resultado do Qgis, que foi uma planilha com todos os pontos da barragem necessários para esta pesquisa, foi transferido para o GeoSlope e foram implementadas todas as regiões através deles. Os pontos utilizados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Pontos utilizados para desenhar a barragem no GeoSlope.

<b>ID</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>	<b>ID</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>
1	186,07	640,06	22	25,74	657,44
2	5,37	640,16	23	88,71	688,99
3	5,37	657,44	24	91,15	690,08
4	23,85	657,44	25	88,90	687,91
5	90,94	690,94	26	68,88	671,96
6	95,65	691,19	27	50,97	657,56
7	100,30	690,99	28	145,58	657,45
8	148,84	658,20	29	141,11	656,54
9	186,07	658,20	30	114,03	656,53
10	50,48	657,56	31	99,72	684,86
11	67,68	657,56	32	99,70	689,72
12	91,15	688,98	33	132,75	657,09
13	100,30	689,72	34	100,18	684,99
14	98,69	689,72	35	114,22	657,07
15	98,64	684,52	36	141,35	657,10
16	113,02	655,57	37	145,65	658,02
17	141,52	655,62	38	147,15	657,05
18	146,59	656,67	39	67,83	656,50
19	49,22	657,55	40	81,40	656,46
20	83,76	685,05	41	101,14	655,02
21	80,87	685,02	42	112,52	655,02

Fonte: Do autor, 2019.

A linha piezométrica varia de posição na medida em que se alternava as análises de estabilidade. Os níveis máximos foram determinados por estudos hidrológicos vinculados a curva cota x área x volume apresentados no Relatório dos Estudos Básicos da Barragem do

Rio Una (2014).

Os fatores de segurança obtidos na análise foram comparados com os coeficientes de segurança mínimos adotados no Manual da Eletrobrás, que apresenta critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ver Tabela 3, Capítulo 2).



## 5. ANÁLISE DE RESULTADOS

No presente capítulo estão apresentados os resultados das análises de estabilidade da seção de maior altura da barragem. Nas análises foram considerados os casos críticos, que a barragem está submetida, para assegurar a confiabilidade do projeto.

### 5.1 Final de Construção – Talude Jusante

Para essa etapa, foi desenhada a geometria da barragem no software e adicionados os tipos de materiais (filtro, enrocamento, núcleo argiloso, etc.) e respectivos parâmetros geotécnicos, correspondente a cada região. Nesse caso, o reservatório está vazio, logo a linha piezométrica coincide com o nível do terreno da fundação da barragem. Os pontos da linha piezométrica utilizados estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Pontos da linha piezométrica para o final da construção da barragem.

ID	X (m)	Y (m)
1	5,37	22,44
2	23,85	22,44
3	25,74	22,44
4	49,22	22,55
5	50,48	22,56
6	50,97	22,56
7	67,68	22,56
8	67,83	21,50
9	81,40	21,46
10	101,14	20,02
11	112,52	20,02
12	113,02	20,57
13	141,52	20,62
14	146,59	21,67
15	147,15	22,05
16	148,84	23,20
17	186,07	23,20

Fonte: Do autor, 2019.

A linha piezométrica nessa análise foi considerada como  $R_u$ , que é o parâmetro de pressão neutra no maciço compactado da barragem. Esse parâmetro é calculado da seguinte forma:

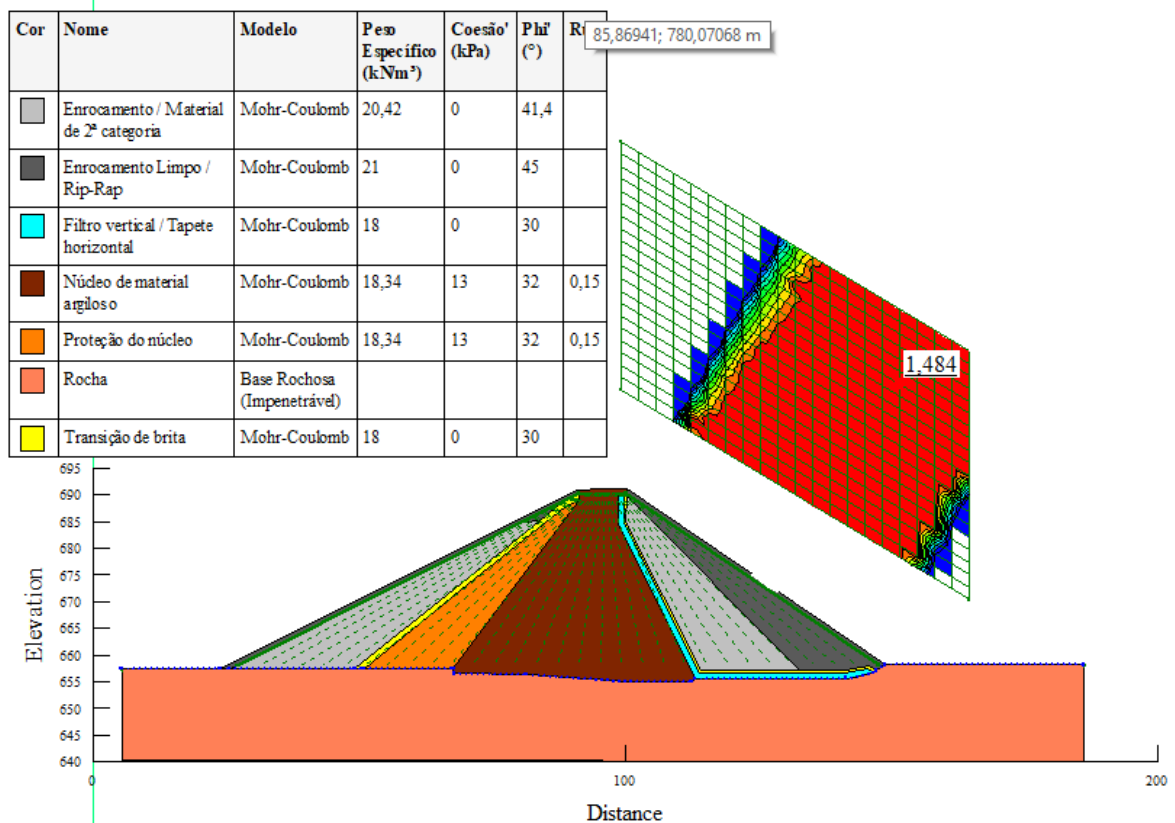
$$Ru = \frac{u}{\gamma t * Hs} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:  $u$  é a poropressão,  $\gamma t$  é o peso total e  $Hs$  é o peso da coluna de solo.

Porém esse valor de  $Ru$  varia ao longo do tempo, sendo uma dificuldade definir um valor para o mesmo. Para esta situação foi considerada o valor adotado em projeto, com base em valores empíricos, de 0,15, que é para a situação de areia argilosa, sendo utilizado na região da proteção do núcleo, no núcleo e no cut-off.

Para essa análise foi considerada uma superfície de pesquisa com grade 20x20 e com 30 raios. O fator de segurança encontrado para essa situação foi de 1,484, sendo maior que o fator de segurança mínimo de 1,2 apresentado na Tabela 3. Logo, está mostrado que neste caso a barragem é estável. A figura 10 apresenta a situação analisada no GeoSlope com o respectivo fator de segurança.

Figura 10 - Final de construção - Talude Jusante – GeoSlope.



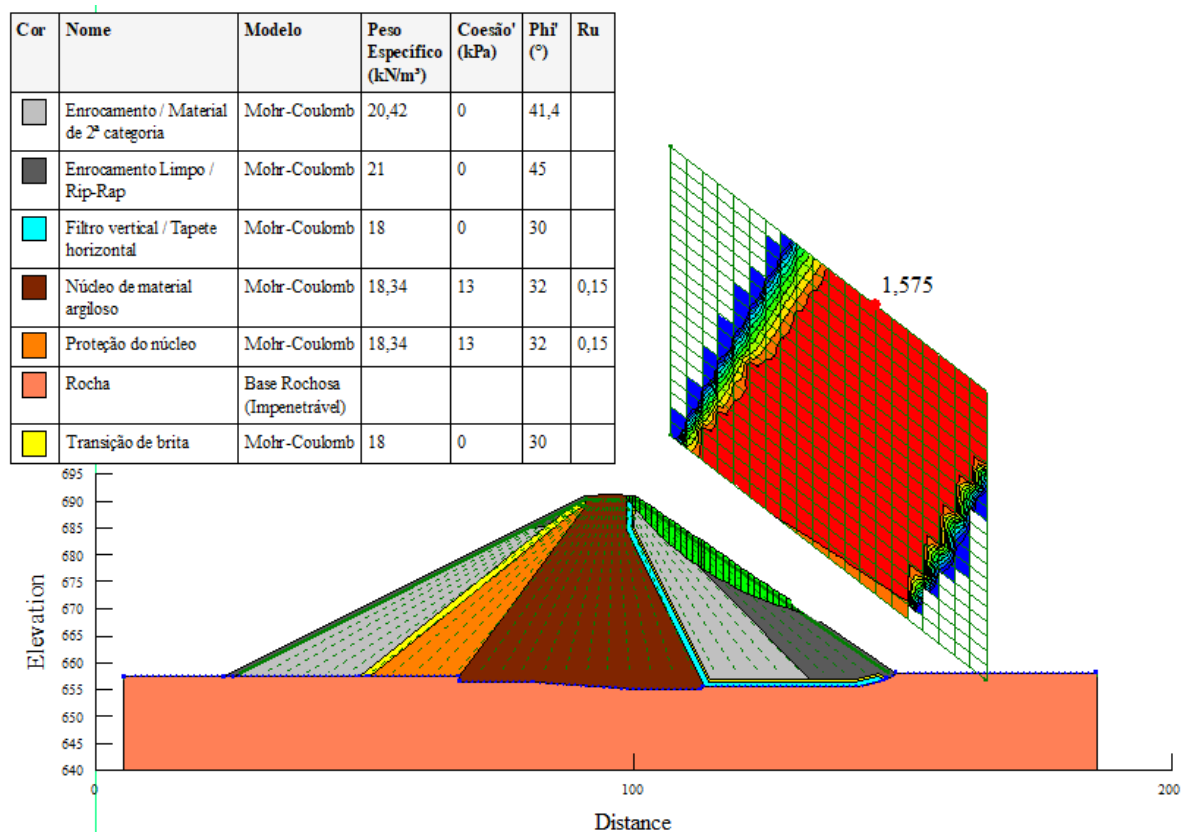
Fonte: Do autor, 2019.

Como pode ser observado, a cunha de ruptura do talude foi bem superficial para o menor fator de segurança, sendo assim provavelmente seria necessário apenas um reparo

superficial da região danificada.

Esse caso crítico não chegaria a danificar tanto a barragem, sendo assim foi também analisado o caso de se ter uma cunha de ruptura maior, mesmo que o seu fator de segurança tenha sido maior. Quando se tem uma cunha de ruptura maior, ocorre maiores problemáticas para a barragem, visto que vai ser gerado um movimento de massa muito grande, podendo ocasionar até mesmo o colapso da barragem. Na figura 11, está apresentado a cunha de ruptura maior, seguido do seu fator de segurança de valor 1,575. Esta situação pode ser explicada pelos parâmetros geotécnicos do material do talude jusante (enrocamento limpo / rip-rap), estes com a função de proteção do talude contra erosão causada pela chuva, também contribuindo para que essa região possua uma boa resistência a ruptura.

Figura 11 - Final de construção - Talude Jusante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo.



Fonte: Do autor, 2019.

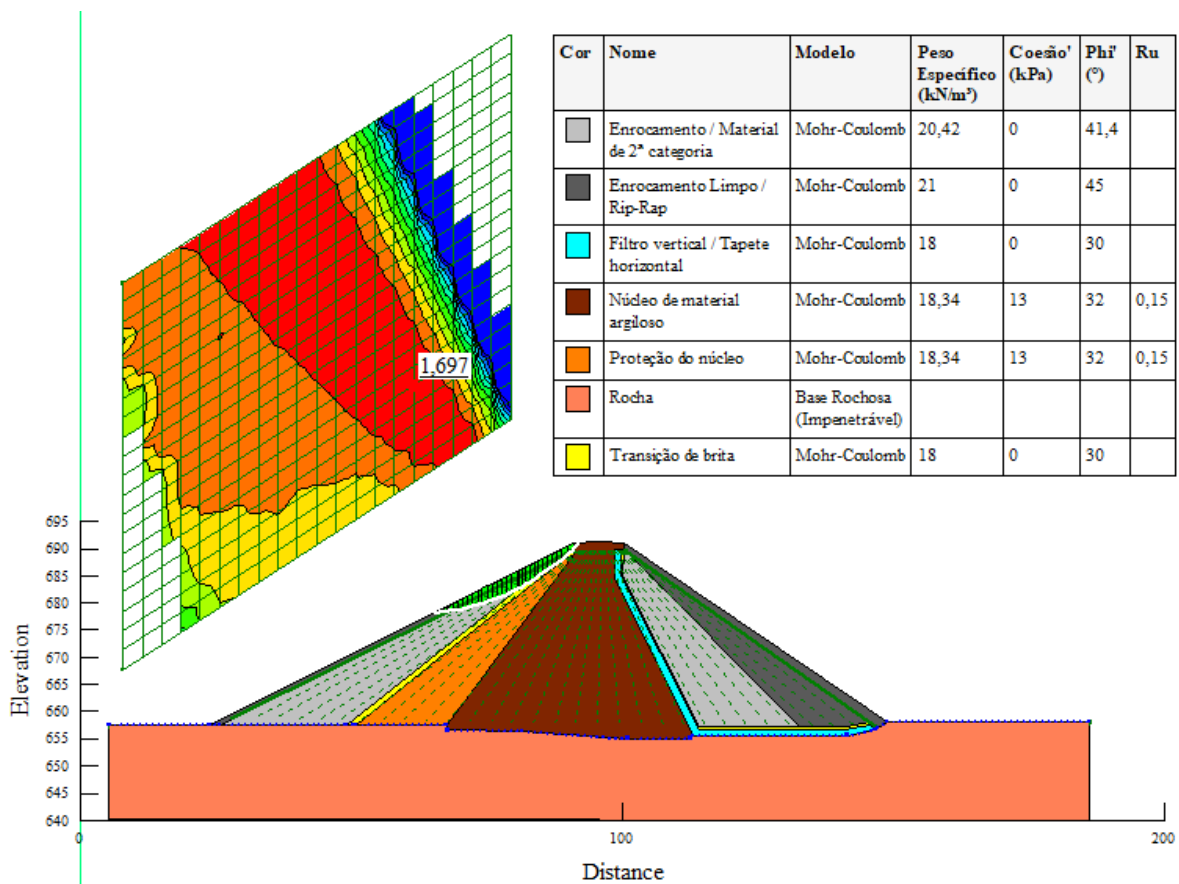
## 5.2 Final de construção – Talude Montante

Essa análise segue praticamente o mesmo padrão que a anterior, considerando a linha piezométrica coincidindo com o terreno da fundação e também considerando o fator Ru no

cálculo. Os pontos da linha piezométrica utilizados foram os apresentados na Tabela 6. Porém dessa vez a superfície de pesquisa será alterada para o talude de montante, o que fará com que seja preciso alterar nas configurações que a direção do movimento se dará da direita para à esquerda, seguindo o padrão raio => grade.

Nessa análise também foi considerada uma superfície de pesquisa com grade 20x20 e 30 raios. O fator de segurança encontrado para essa situação foi de 1,697, sendo maior que o fator de segurança mínimo de 1,2 apresentado na Tabela 3. Logo, está mostrado que neste caso a barragem é estável e que realmente o talude jusante é o caso mais crítico para o final da construção. A figura 12 apresenta a situação analisada no GeoSlope com o respectivo fator de segurança.

Figura 12 - Final de construção - Talude Montante – GeoSlope.

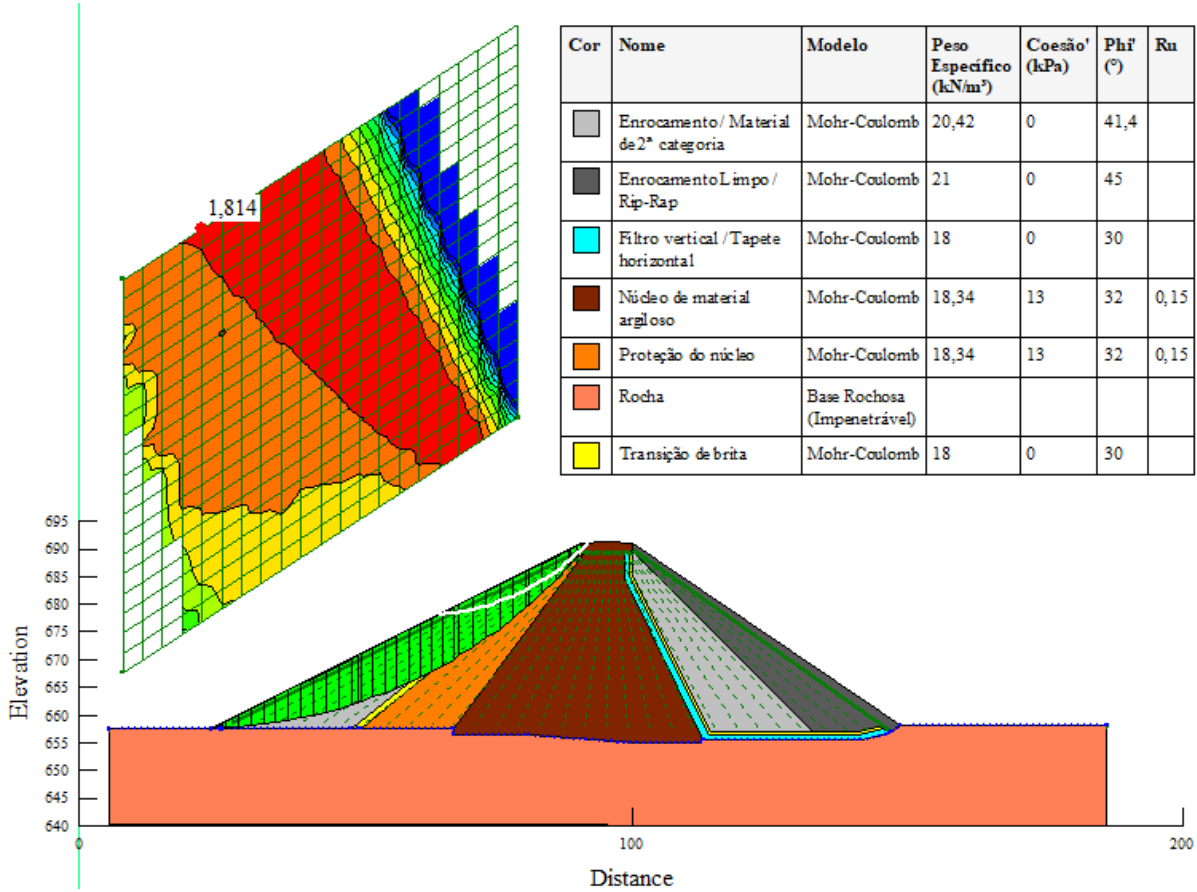


Fonte: Do autor, 2019.

A cunha de ruptura do caso crítico já apresenta tamanho considerável, podendo ocasionar danos a construção. Analisando também o caso em que a cunha de ruptura é maior, é possível observar que no talude montante os danos podem ser bem maiores, porém,

felizmente, o fator de segurança da barragem é maior (FS = 1,814). Esse comportamento pode ser constatado na Figura 13.

Figura 13 - Final de construção - Talude Montante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo.



Fonte: Do autor, 2019.

Nesta situação a cunha de ruptura chega até a região da proteção do núcleo, no qual se viesse acontecer, iria deixar a barragem bastante fragilizada.

Essa análise foi realizada para mostrar que o fator de segurança dessa situação é maior que a situação anterior. Sendo assim, na prática não era necessária, pois o talude crítico no final da construção é o de jusante, pois ele é mais íngreme.

5.3 Barragem em operação (NA MÁX Normal) – Talude Jusante

Essa situação será feita para verificar que o seu fator de segurança será menor que o caso em que o nível de água da barragem está no caso excepcional. Os materiais de cada região da barragem foram considerados no caso mais crítico em que se apresentavam

saturado, sendo assim não foi preciso dividir os materiais em zonas saturadas e não saturadas. Nessa condição a linha piezométrica utilizada, foi a apresentada no Projeto Básico da barragem e os seus pontos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Pontos da linha piezométrica - Barragem em operação (NA MÁX Normal)

ID	X (m)	Y (m)
1	5,20	686,00
2	81,31	686,00
3	86,53	686,00
4	93,80	677,00
5	102,10	668,50
6	112,10	657,00
7	147,10	657,00
8	148,84	658,20
9	186,07	658,20

Fonte: Do autor, 2019.

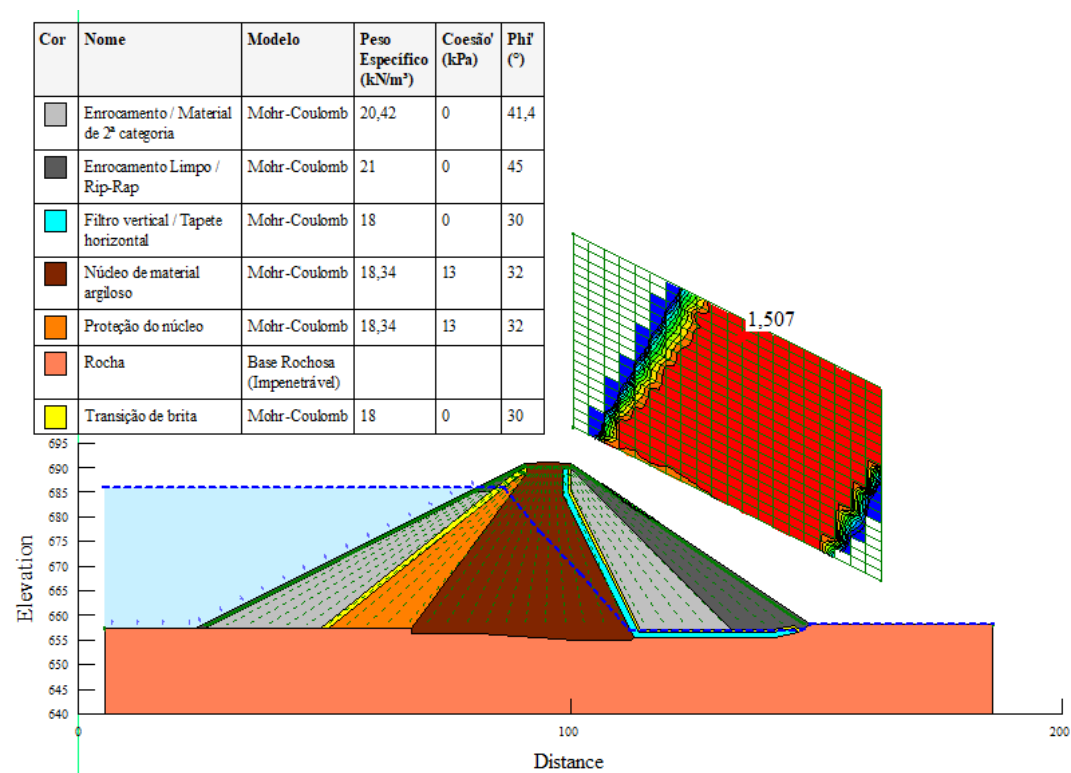
O reservatório encontra-se em regime permanente nesta análise, em que o nível do reservatório está em seu valor normal de operação. Logo, a água fica tempo suficiente para percolar no maciço e deixar uma parte saturada. Também é considerado que a percolação se estabilizou e que o maciço já está adensado.

Nessa análise também foi considerada uma superfície de pesquisa com grade 20x20 e 30 raios. O fator de segurança encontrado para essa situação foi de 1,507, sendo maior que o fator de segurança mínimo de 1,30 apresentado na Tabela 3. Logo, está mostrado que neste caso a barragem é estável. A figura 14 apresenta a situação analisada no GeoSlope com o respectivo fator de segurança.

Neste caso, a cunha de ruptura se apresentou bem superficial, fazendo com que seja preciso reparos locais, podendo não trazer tanto impacto para a obra. Sabendo disso, foi analisada também a cunha de ruptura que se estendia ao máximo no talude, para verificar as situações de rupturas irreparáveis. Para essa situação a maior cunha de ruptura encontrada foi a apresentada na Figura 15, com fator de segurança igual a 1,60.

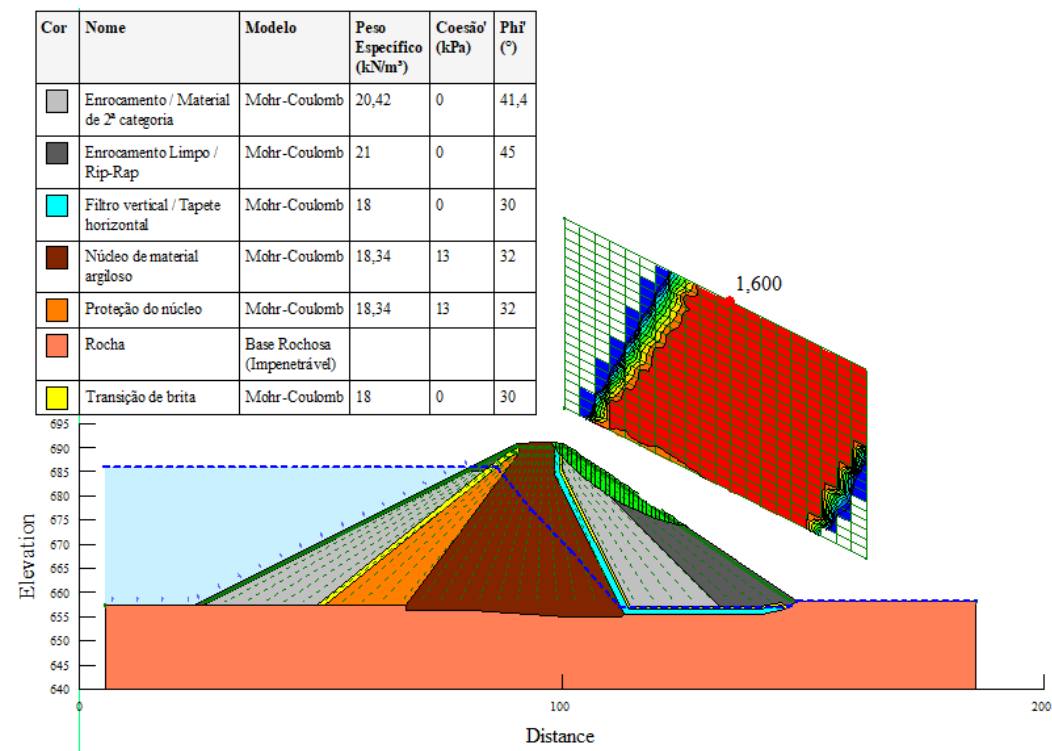
Conforme já comentado anteriormente, como no talude de jusante os materiais possuem uma maior resistência (enrocamento / rip-rap), a cunha de ruptura não foi tão grande.

Figura 14 - Barragem em operação (NA MÁX Normal) - Talude Jusante - GeoSlope



Fonte: Do autor, 2019.

Figura 15 - Barragem em operação (NA MÁX Normal) - Talude Jusante - Cunha de ruptura de maior potencial destrutivo.



Fonte: Do autor, 2019.

#### 5.4 Barragem em operação (NA MÁX MÁX) – Talude Jusante

Esta é a situação crítica a que está submetida a barragem quando está em operação, visto que é o caso excepcional, em que ocorre uma situação de cheia, no qual esse nível máximo é determinado por estudos hidrológicos vinculados a curva cota x área x volume da barragem. Como essa situação só ocorre em caso de cheia e tem curta duração, como também pelas características dos materiais utilizados na barragem, não se formará linhas de fluxo definidas. Logo, a linha piezométrica foi determinada para um fluxo transiente. Os pontos da linha piezométrica utilizados na análise estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Pontos da linha piezométrica - Barragem em operação (NA MÁX MÁX)

ID	X (m)	Y (m)
1	5,20	689,90
2	88,48	689,90
3	91,15	689,90
4	92,11	689,00
5	107,96	665,70
6	137,74	665,70
7	186,07	665,70

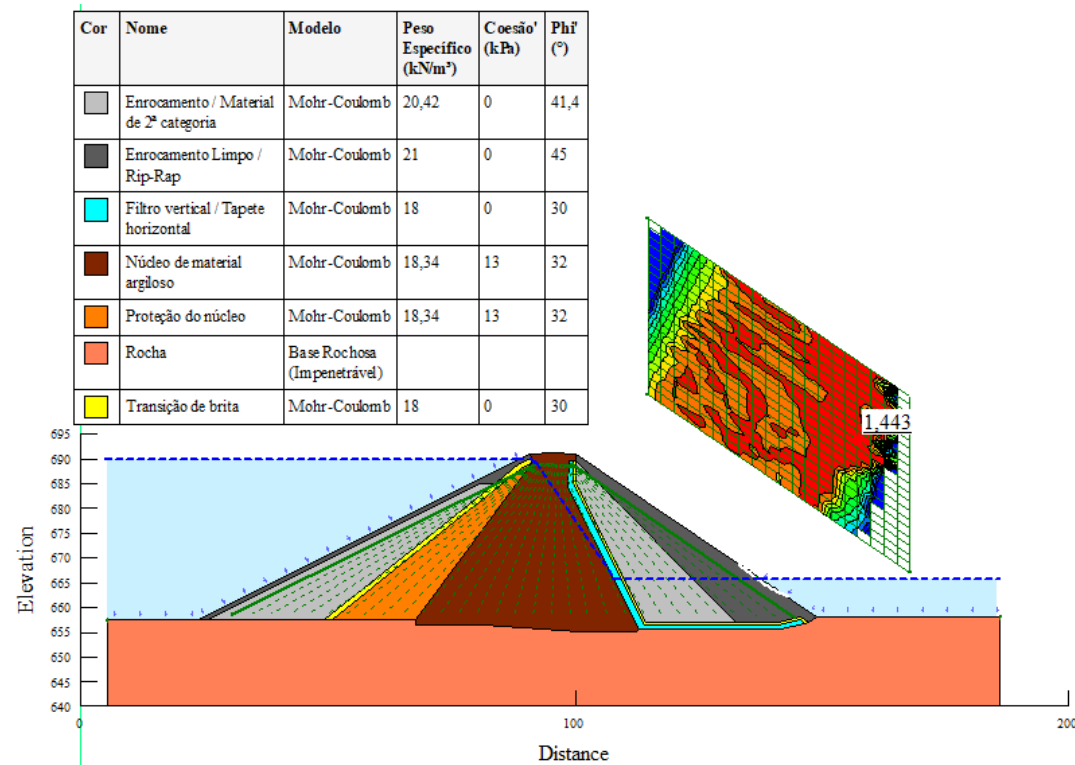
Fonte: Do autor, 2019.

Nessa análise também foi considerada uma superfície de pesquisa com grade 20x20 e 30 raios. O fator de segurança encontrado para essa situação foi de 1,443, sendo maior que o fator de segurança mínimo de 1,30 apresentado na Tabela 3. Logo, está mostrado que neste caso a barragem é estável. A figura 16 apresenta a situação analisada no GeoSlope com o respectivo fator de segurança.

Para o caso crítico, a cunha de ruptura ficou no nível da água a jusante. Também foi analisado o caso de maior cunha de ruptura, no qual foi encontrada uma cunha que movimentou boa parte do enrocamento limpo e o enrocamento de 2ª categoria. Dentre as análises do talude jusante, essa foi a que apresentou a maior cunha de ruptura. O valor do fator de segurança foi de 1,565. Essa situação pode ser verificada na Figura 17.

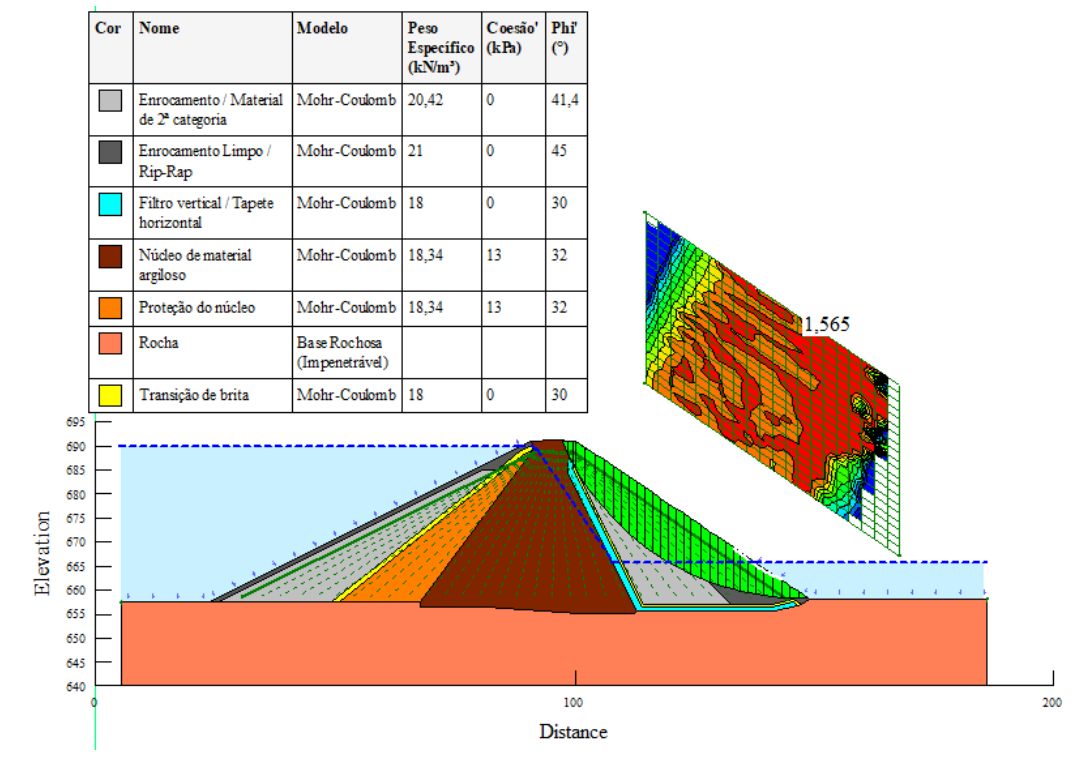


Figura 16 - Barragem em operação (NA MÁX MÁX) - Talude Jusante - GeoSlope



Fonte: Do autor, 2019.

Figura 17 - Barragem em operação (NA MÁX MÁX) - Talude Jusante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo.



Fonte: Do autor, 2019.

### 5.5 Rebaixamento rápido do reservatório (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal) – Talude Montante

Esta situação ocorre após uma cheia máxima, em que o nível de água será reduzido até o regime permanente normal. As análises de percolação do maciço foram realizadas em regime transiente no Projeto Básico, no qual os pontos encontrados para a linha piezométrica desse caso, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Pontos da linha piezométrica - Rebaixamento rápido (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal)

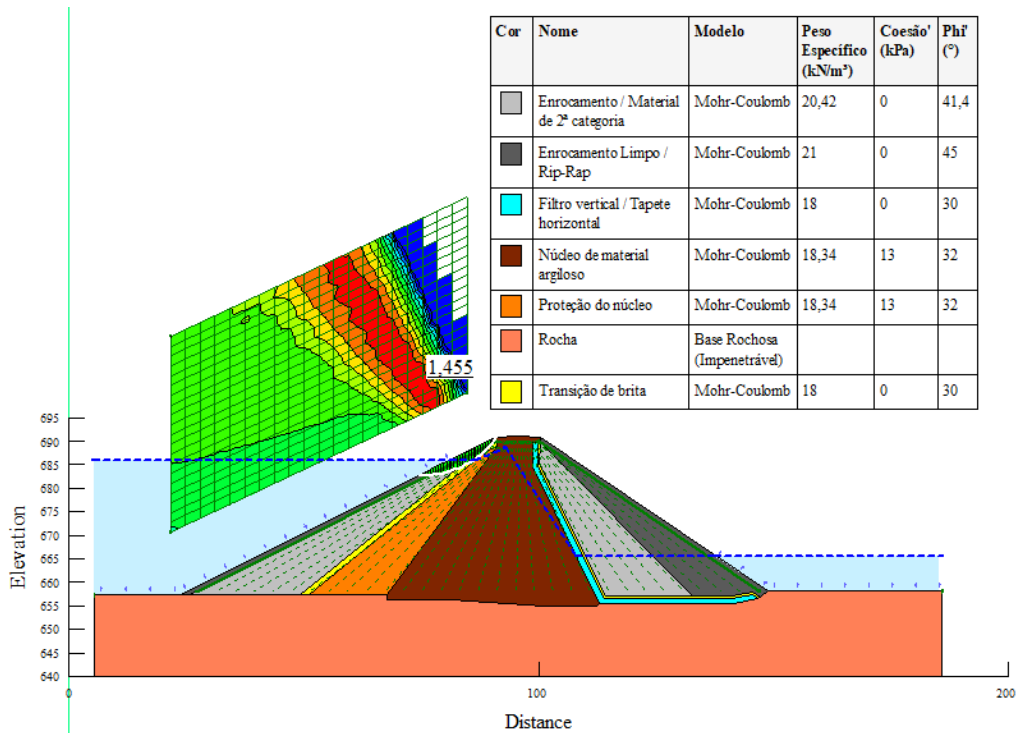
ID	X (m)	Y (m)
1	5,20	686,00
2	81,31	686,00
3	86,51	686,00
4	92,92	688,60
5	107,96	665,70
6	137,74	665,70
7	186,07	665,70

Fonte: Do autor, 2019.

Nessa análise também foi considerada uma superfície de pesquisa com grade 20x20 e 30 raios. O fator de segurança encontrado para essa situação foi de 1,455, sendo maior que o fator de segurança mínimo de 1,00 apresentado na Tabela 3. Logo, está mostrado que neste caso a barragem é estável. A figura 18 apresenta a situação analisada no GeoSlope com o respectivo fator de segurança.

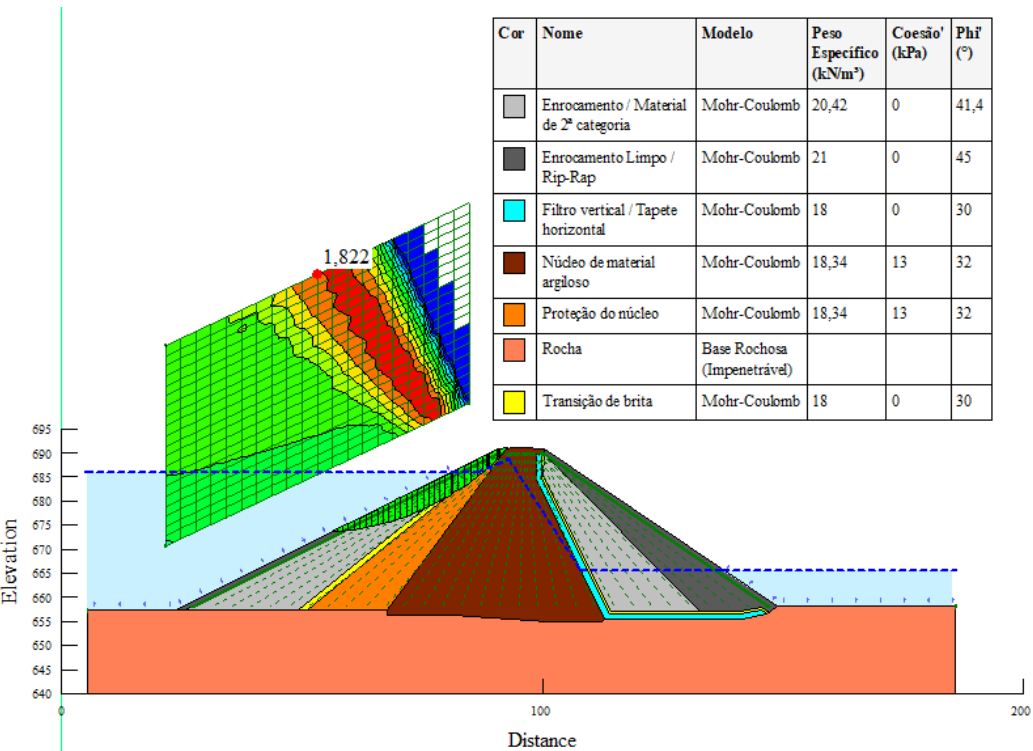
Para o caso crítico, a cunha de ruptura ficou no nível da água a montante. Também foi analisado o caso de maior cunha de ruptura, no qual foi encontrada uma cunha que apresenta movimentação até a parte da proteção do núcleo. Essa situação pode ser verificada na Figura 19.

Figura 18 - Rebaixamento rápido (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal) - Talude Montante - GeoSlope



Fonte: Do autor, 2019.

Figura 19 - Rebaixamento rápido (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal) - Talude Montante - Cunha de ruptura com maior potencial destrutivo.



Fonte: Do autor, 2019.

### **5.6 Tabela Resumo e comparação com o Projeto Básico**

A Tabela 10 apresenta para todas as situações analisadas, os resultados dos fatores de segurança determinados na presente pesquisa, os apresentados no Projeto Básico e também os valores dos fatores de segurança mínimos admissíveis. Os fatores de segurança dos casos de cunha de ruptura com maior potencial destrutivo foram colocados na tabela, embora os valores que devam ser comparados são os dos casos críticos (menor FS).

Verifica-se que a análise de estabilidade da barragem realizada nesta pesquisa, apresentou bons resultados. Os fatores de segurança encontrados nesta pesquisa ficaram bem próximos dos que foram apresentados no Projeto Básico.

Em todas as situações analisadas a barragem permaneceu estável, visto que os fatores de segurança encontrados ficaram sempre acima dos fatores mínimos admissíveis. A pequena variação encontrada pode ser explicada pelo fato de que os pontos utilizados foram aproximações, pois não se tinha precisamente os pontos da barragem, nem os pontos das linhas piezométricas de cada situação.

Tabela 10 - Tabela resumo dos fatores de segurança.

SITUAÇÕES ANALISADAS	FATOR DE SEGURANÇA (FS)			
	PRESENTE PESQUISA MENOR FS	CUNHA DE RUPTURA MAIOR	PROJETO BÁSICO	MÍNIMO ADMISSÍVEL
<b>1. Final de construção</b>				
Talude Jusante	1,48	1,58	1,52	1,20
Talude Montante	1,70	1,81	1,65	1,20
<b>2. Barragem em operação (NA MÁX Normal)</b>				
Talude Jusante	1,51	1,60	1,52	1,30
<b>3. Barragem em operação (NA MÁX MÁX)</b>				
Talude Jusante	1,44	1,56	1,37	1,30
<b>4. Rebaixamento rápido do reservatório (NA MÁX MÁX até o NA MÁX Normal)</b>				
Talude Montante	1,46	1,82	1,46	1,00

Fonte: Do autor, 2019.

## **6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

### **6.1 Conclusão**

Este trabalho apresentou a análise de estabilidade de taludes artificiais da Barragem São Bento do Una, localizada em São Bento do Una / Pernambuco, a partir dos dados de coesão, ângulo de atrito e peso específico natural, como também da seção da barragem e da linha piezométrica, que foram apresentadas no Projeto Básico da barragem. As análises foram feitas para o final da construção, para a situação em que a barragem está em operação e para o rebaixamento rápido em caso de cheia. Foram consideradas 5 situações de análise, tendo como resultados os fatores de segurança mínimos, fazendo uma comparação com o Projeto Básico da barragem e também foi analisado em cada situação o caso que apresentava maior cunha de ruptura.

Os resultados das análises, de maneira geral, demonstraram que os materiais que foram analisados estão aprovados para serem utilizados na construção da barragem. Uma questão a ser observada na execução da obra, é verificar se os materiais estão sendo utilizados seguindo os parâmetros em estudo, podendo ser verificado por controle tecnológico dos materiais. Todos os dados fornecidos pelo Projeto Básico foram obtidos por meio de ensaios geotécnicos de laboratório.

Portanto, pelas análises realizadas no GeoSlope em todas as situações críticas, pode-se concluir que a barragem pode ser construída, pois apresenta condições satisfatórias, visto que todos os fatores de segurança foram atendidos.

### **6.2 Sugestões para futuras pesquisas**

Como sugestão para o estudo da Barragem São Bento do Una, poderia ser feito o estudo das linhas de fluxo da barragem, analisando para cada caso como ela se comporta. Também poderia ser feito uma análise de tensão e deformação da barragem, utilizando o Sigma\W do software GeoStudio.

## REFERÊNCIAS

BORDEAUX, G.. **Barragens – Extensão Universitária**. FEFUMEC, 1982. Paginação personalizada. (Bibliografia depositada na Biblioteca da Escola de Engenharia de São Carlos).

BRASIL, Ministério da Integração Nacional. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Julho, 2002.

CASTRO, F. G.. **Construção e segurança em barragens brasileiras**. FGV Energia. 2017.

CAPUTO, H. P.. **Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos**. 6ª ed. Volume 1. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro, 1988.

ELETROBRÁS, CBDB. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Outubro de 2003.

FARO, V. P.. **Mecânica dos solos – TC 035**. UFPR. 2015. Disponível em: <[http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e5/TC\\_035Mec%C3%A2nica\\_dos\\_Solos\\_-\\_Aula\\_3\\_Resist%C3%A2ncia\\_ao\\_Cisalhamento.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e5/TC_035Mec%C3%A2nica_dos_Solos_-_Aula_3_Resist%C3%A2ncia_ao_Cisalhamento.pdf)>. Acesso em: 03 de dezembro de 2018.

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J.. **Comparison of slope stability methods of analysis**. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, páginas 429-439. 1977.

FREITAS, M. A. C.. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia**. Tese de dissertação de mestrado. FEUP – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. 2011.

G1. **Barragem com capacidade para 17 milhões de m³ de água será construída em São Bento do Una**. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/caruaru-regiao/noticia/barragem-com-capacidade-para-17-milhoes-de-m-de-agua-sera-construida-em-sao-bento-do-una.ghtml>>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

GUSMÃO FILHO, J.. **Desempenho de Obras Geotécnicas**. Recife: Editora Universitária, UFPE, 2006.

ITEP – Instituto de Tecnologia de Pernambuco. **Relatório de impacto ambiental - RIMA**. Recife, 2015.

MARANGON, M.. **Barragens de terra e enrocamento**. Apostila da disciplina Tópicos em

Geotecnia e Obras de Terra. Juiz de Fora: UFJF, 2004.

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

MEIRELLES, F. S. C.. **Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais**. Itaipu Binacional. ANA – Agência Nacional das Águas. 86 p. 2015.

PINTO, C. S.. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA, SEINFRA. **Elaboração do Relatório Técnico Preliminar (RTP) e Projeto Básico para Implantação da Barragem São Bento do Una, localizada no Município de São Bento do Una, no Estado de Pernambuco**. Relatório do Projeto Básico. Techne. Outubro, 2014.