

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA - UNIFACCAMP
ENGENHARIA CIVIL**

**METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E PROJETO DE REFORMA
ESTRUTURAL DE BARRAGEM APRESENTANDO PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO
TALUDE JUSANTE**

GABRIEL AUGUSTO GUIMARÃES DE ALMEIDA

**Campo Limpo Paulista - SP
Junho – 2020**

GABRIEL AUGUSTO GUIMARÃES DE ALMEIDA

**METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E PROJETO DE REFORMA
ESTRUTURAL DE BARRAGEM APRESENTANDO PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO
TALUDE JUSANTE**

*Trabalho de conclusão apresentado ao
Centro Universitário Campo Limpo
Paulista – UNIFACCAMP, como requisito
para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.*

**Orientador: Prof. Dr. Paschoal Perdão Junior
Prof. Francisco Coelho de Oliveira**

**Campo Limpo Paulista - SP
Junho – 2020**

CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA - UNIFACCAMP
ENGENHARIA CIVIL

METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA E PROJETO DE REFORMA
ESTRUTURAL DE BARRAGEM APRESENTANDO PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NO
TALUDE JUSANTE

RA 26094 Gabriel Augusto Guimarães de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Paschoal Perdão Junior

Banca Examinadora:

Prof.
Convidado

Prof. Dr. Paschoal Perdão Junior
Orientador

Prof. Dr. Paschoal Perdão Junior
Coordenador

Campo Limpo Paulista - SP
Junho – 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que buscam por conhecimentos de engenharia relacionados a barragens. Com este trabalho, além do intuito técnico envolvido, busco por trazer de forma clara e tácita, o processo de investigação geotécnica de uma barragem, além de apresentar uma solução corretiva para o problema constatado.

AGRADECIMENTO

Primeiramente gostaria de agradecer meus mestres, em especial Professor Paschoal e Francisco, por toda orientação técnica e conhecimento disponibilizado, pessoas de sumária importância e significância na minha graduação. Gostaria de agradecer minha tia Ana, por todo esforço e apoio, que carinhosamente tornou possível de que eu cursasse a faculdade.

Gostaria de agradecer aos engenheiros Hudson, Marcelo e Carlos, por toda experiência e conhecimento gentilmente transmitidos, pessoas importantíssimas para a conclusão de minha graduação.

Gostaria de agradecer a meus pais, por todo incentivo, esforço e trabalho e educação, para que fosse possível de que eu chegasse até aqui.

Gostaria de agradecer especialmente a minha amada esposa Silvana, por toda compreensão durante o período de conclusão deste trabalho, pessoa ímpar para que eu me tornasse engenheiro civil.

Gratidão a todos!

EPÍGRAFE

“você é o único autor de sua própria sorte...”

autoria desconhecida

RESUMO

Neste trabalho foi realizado a investigação geotécnica de uma barragem fictícia, denominada Barragem X, objetivando verificar a condição de segurança, devido a ocorrência de percolação de água pelo talude jusante. O método utilizado na investigação, foi através da simulação de ensaios SPT, obtendo informações sobre a composição de solo, índice de compactação e altura do lençol freático na barragem, possibilitando a criação de seções geológico-geotécnicas. Com o auxílio do Software GeoStudio, foi calculado o coeficiente de segurança de cada seção. Como resultado, apesar de ter sido obtido um coeficiente de segurança global acima do valor exigido em norma, constatou-se que o solo no interior do maciço está saturado devido à falta de drenagem. Portanto, como solução, foi proposto a aplicação de um sistema de drenagem, além da regularização do relevo do talude jusante.

Palavras chaves: barragem, talude, coeficiente de segurança, estabilidade, drenagem, investigação geotécnica.

LISTA DE SIGLAS

C.S	Coeficiente de Segurança
F _x	Forças no eixo X (horizontal)
F _y	Forças no eixo Y (vertical)
MG	Estado de Minas Gerais, Brasil
SPT	Standard Penetration Test
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
S.I	Solo impenetrável (base rochosa)
N.A	Nível da água (nível da represa)
Alt (m)	Altura em relação ao nível do mar
Pf (m)	Profundidade no interior do solo da barragem
Solo 1	Solo tipo 1 da Barragem X
Solo 2	Solo tipo 2 da Barragem X

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Exemplo de construção de barragem .	19
Figura 2	Exemplificação dos esforços que ocorrem em uma barragem .	21
Figura 3	Diagrama simplificado de forças que ocorrem em um barramento.	21
Figura 4	Afloramento da linha piezométrica.	22
Figura 5	Correto funcionamento da linha piezométrica.	22
Figura 6	Vista lateral da Barragem X, considerando que as dimensões indicadas nas cotas, estão em metros.	24
Figura 7	Vista superior da Barragem X, considerando que as dimensões indicadas nas cotas, estão em metros.	24
Figura 8	Modelo tridimensional para a Barragem X, considerando as dimensões indicadas nas Figuras 6 e 7.	25
Figura 9	Ilustração para a percolação de água cuja está ocorrendo no pé do talude jusante da Barragem X.	25
Figura 10	Levantamento planialtimétrico elaborado para a Barragem X. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.	27
Figura 11	Mapa de alocação dos pontos de sondagens SPT para a Barragem X. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.	28
Figura 12	Mapa de identificação e alocação das seções geológico-geotécnicas para a Barragem X. Detalhe que as dimensões e indicadas estão na unidade de metros.	29
Figura 13	Processo utilizado para criação do perfil de elevação para as seções da barragem. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.	33
Figura 14	Legenda para as informações disponíveis nas seções geológico-geotécnicas. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.	34
Figura 15	Tipos de solos e respectivas propriedades escolhidas.	35

Figura 16	Seção geológico-geotécnica, referente a "Seção A" da Figura 12.	35
Figura 17	Seção geológico-geotécnica, referente a "Seção B" da Figura 12.	36
Figura 18	Seção geológico-geotécnica, referente a "Seção C" da Figura 12.	36
Figura 19	Seção geológico-geotécnica, referente a "Seção D" da Figura 12.	36
Figura 20	Seção geológico-geotécnica, referente a "Seção E" da Figura 12.	37
Figura 21	Seção geológico-geotécnica, referente a "Seção F" da Figura 12.	37
Figura 22	Logo da empresa GeoSlope.	39
Figura 23	Linha vermelha é a delimitação da região de análise.	39
Figura 24	Legenda para coloração e respectivos tipos de solo.	40
Figura 25	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção A", considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,658$.	40
Figura 26	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção B", considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,503$.	41
Figura 27	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção C", considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,456$.	41
Figura 28	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção D", considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,448$.	42
Figura 29	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção E", considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,543$.	42
Figura 30	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção F", considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,645$.	43
Figura 31	Tabela 8 da NBR 11682 de 1991, sobre estabilidade de taludes. Fonte: www.licenciadorambiental.com.br , acessado em 24/05/2020.	44

Figura 32	Projeto de Reforma e Reforço Estrutural proposto para a Barragem X. Detalhe que todas as medidas indicadas, estão na unidade de metros.	46
Figura 33	Detalhe para os materiais e métodos que aplicados no projeto.	47
Figura 34	Modelo tridimensional para a barragem de acordo com o projeto de reforma e reforço estrutural.	48
Figura 35	Detalhe para o antigo perfil de elevação e linha piezométrica.	48
Figura 36	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção A", considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de $CS = 1,929$.	50
Figura 37	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção B", considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de $CS = 1,698$.	50
Figura 38	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção C", considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de $CS = 1,663$.	51
Figura 39	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção D", considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de $CS = 1,631$.	51
Figura 40	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção E", considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de $CS = 1,804$.	52
Figura 41	Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a "Seção F", considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de $CS = 1,779$.	52

LISTA DE TABELAS / GRÁFICOS

Tabela 1	Resultados para índice de quantidade de golpes de sondagem SPT.	30
Tabela 2	Resultado de sondagem SPT, para nível de água no solo na Barragem X	31
Tabela 3	Resultado de sondagem SPT, para composição de solo na Barragem X	32
Tabela 4	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de segurança.	43
Tabela 5	Avaliação de atendimento aos critérios de segurança mínimo exigido para cada seção analisada.	45
Tabela 6	Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de segurança.	53
Tabela 7	Comparação e avaliação dos resultados obtidos, após cálculo dos novos coeficientes de segurança de acordo com o projeto de reforma e reforço.	53

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	Objetivo geral.....	15
1.1.1.	Objetivos específicos.....	15
1.2.	Problema.....	15
1.3.	Justificativa.....	16
1.4.	Metodologia.....	16
1.4.1.	Metodologia do projeto.....	16
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1.	Cenário.....	18
2.2.	Construção de Barragens.....	19
2.3.	Taludes de barragens.....	20
2.4.	Linha piezométrica em barragens.....	22
3.	ESTUDO DE CASO.....	23
3.1.	Situação Problema.....	23
3.2.	Análise Técnica.....	26
3.3.	Solução.....	46
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho, foi elaborado um processo de investigação geotécnica, ou retro análise estrutural, em uma barragem fictícia, qual foi denominada como “Barragem X”.

Foi proposto o cenário da ocorrência de percolação de água pelo talude jusante, qual configura o aparecimento de uma manifestação patológica, sendo pretexto para realizar a investigação, de modo a aferir a condição de segurança da barragem, através da determinação dos coeficientes de segurança.

Para ser possível aferir o estado de segurança, a metodologia utilizada na investigação, baseou-se na construção de seções geológico-geotécnicas para a barragem, que junto a utilização de software computacional, foi possível determinar o coeficiente de segurança de cada seção.

Para a construção das seções, foram simulados ensaios de sondagem SPT, obtendo informações sobre a composição de solo, índice de compactação e altura do lençol freático na barragem, possibilitando a criação das seções geológico-geotécnicas.

Como resultado, apesar de ter sido obtido um coeficiente de segurança global para a barragem, acima do valor exigido em norma, constatou-se que o solo no interior do maciço está saturado devido à falta de drenagem.

Visando retratar a realidade de uma barragem qual não há histórico técnico, foi suposto que não se tem conhecimento sobre a presença de sistema de drenagem instalado na barragem. Logo, o motivo pelo qual estaria ocorrendo a percolação, foi atribuída à elevada altura do nível freático no maciço, causada justamente pela deficiência de drenagem no maciço.

Portanto, como solução, foi proposto a aplicação de um sistema de drenagem, visando o rebaixamento do nível freático, além da regularização do relevo do talude jusante. Solução qual colocou o coeficiente de segurança de todas as seções analisadas, em valor superior ao exigido em norma.

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é de criar um cenário fictício, no qual será analisado, a condição de segurança de uma barragem, qual começou a apresentar percolação de água no talude jusante.

Portanto será elaborado, de forma fictícia, o projeto de uma barragem, de modo a realizar um processo de investigação geotécnica, que neste caso, trata-se de uma retro análise estrutural, objetivando determinar a condição de segurança da barragem.

De acordo com o resultado obtido, será elaborado uma solução corretiva, qual seja capaz de sanar os problemas encontrados, além de enquadrar a barragem dentro do padrão de segurança estabelecido em norma.

1.1.1. Objetivos específicos

O objetivo específico deste trabalho, é de realizar uma investigação geotécnica, especificamente um retro análise estrutural, objetivando verificar a condição de estabilidade de uma barragem qual está apresentando manifestações patológicas, através do cálculo dos coeficientes de segurança de cada seção geológico-geotécnica traçada.

Para isso, será elaborado, de forma fictícia, todos os dados e informações, de forma não tendenciosa, quais posteriormente serão utilizados no processo de investigação, conclusão e solução.

1.2. Problema

O problema envolvido neste trabalho, é justamente, como determinar a condição de estabilidade do maciço terroso de uma barragem? Além disso, também há o ponto de como sanar, através de técnicas de engenharia, a suposta instabilidade geotécnica de um barramento? Portanto, como e qual método de engenharia deve ser utilizado para sanar o problema constatado?

1.3. Justificativa

Um acidente como o rompimento de uma barragem, independentemente do material qual a barragem armazena, nunca é um simples acidente, sendo agravado quando ocorre com barragens de grande porte.

O rompimento de barragem, sempre trará consequências, quais podem ser altamente danosas, em termos de risco a vida, perdas financeiras e danos associados.

Devido à importância e seriedade envolvida no âmbito de barragens, coloco neste trabalho o intuito demonstrar e instruir, de forma simples e objetiva, um exemplo de investigação geotécnica e solução mitigadora, em uma barragem qual está apresentando indevidas manifestações patológicas.

Assim, podendo oferecer às pessoas, conhecimentos de como atuar de forma corretiva, de modo a evitar o rompimento de barragens, objetivando evitar a ocorrência de acidentes.

1.4. Metodologia

Este trabalho será inteiramente realizado dentro de uma conjectura teórica, sendo que não haverá qualquer desenvolvimento dentro do campo da prático. Serão utilizados, técnicas e métodos de engenharia, de modo que seja possível simular condições reais de uma barragem com problemas geotécnicos.

1.4.1. Metodologia do projeto

Para atingir o objetivo específico proposto para este trabalho, será utilizado a seguinte metodologia:

- 1º. Elaborar projeto fictício de uma barragem, através da elaboração de fictício levantamento planialtimétrico.
- 2º. Elaborar mapa de alocação de sondagens SPT, além de também elaborar os resultados das sondagens.

- 3º. Com resultados das sondagens, serão construídas as seções geológico-geotécnicas.
- 4º. Calcular o coeficiente de segurança para cada seção criada.
- 5º. Analisar tecnicamente os resultados, verificando a condição de segurança da barragem, além de identificar a causa dos problemas detectados.
- 6º. De acordo com os resultados obtidos, caso necessário propor solução corretiva.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cenário

Barragem, é uma estrutura construída de modo a interromper o fluxo natural de um curso d'água, objetivando o armazenamento de líquidos. São estruturas frequentemente utilizadas no armazenamento de água para abastecimento público, irrigação e produção de energia elétrica. (CAPUTO, 1987; LOPES e LIMA, 2008)

A fundamentação da utilização de barragens para casos de abastecimento público, surge da necessidade hídrica qual a população solicita. Em vários momentos, a capacidade de produção de água limpa das bacias hidrográficas, é inferior a necessidade de consumo da população, portanto, surge a necessidade de armazenamento de água potável para abastecimento. A solução que atualmente existe para criar um reservatório de água limpa, são as barragens, pois se trata de uma alternativa relativamente simples, que em termos de custo-benefício acaba sendo altamente recomendável. (LOPES e LIMA, 2008; OLIVEIRA e BRITO. *et al*, 1998)

Ao construir uma barragem, automaticamente ocorre a elevação do nível do curso d'água, além do armazenando de uma gigantesca quantidade de água. Ao associar a uma quantidade de água a uma certa altura, com a ação da gravidade, surge uma grande energia armazenada, que em conceitos físicos pode ser definida como energia potencial gravitacional. No momento de rompimento de uma barragem, a energia armazenada é liberada conforme a água escoar, criando uma onda de choque, que na maioria dos casos possui um gigante potencial destruidor. (LOPES, LIMA, 2008; CAPUTO, 1987)

O rompimento de uma barragem nunca é um evento simples e irrelevante, está quase sempre associado a sérias consequências. Por exemplo, no caso do rompimento de uma barragem, qual é utilizada para o total abastecimento público de água de uma cidade, além das consequências como inundações, destruição de

patrimônio, degradação da natureza, até mesmo vidas, há também as consequências como a falta de água para o abastecimento público. (LOPES, LIMA, 2008)

Uma barragem não é uma obra extremamente rápida de ser executada. Se a barragem que abastece uma cidade se rompe, é fácil dizer que facilmente essa cidade pode chegar a ficar por vários dias sem água para abastecimento público. Pois, além da construção da barragem, há o tempo necessário que a bacia hidrográfica leva para abastecer a represa de modo a chegar em um nível suficiente funcionar o abastecimento público. (CAPUTO, 1987; CRUZ, 1996)

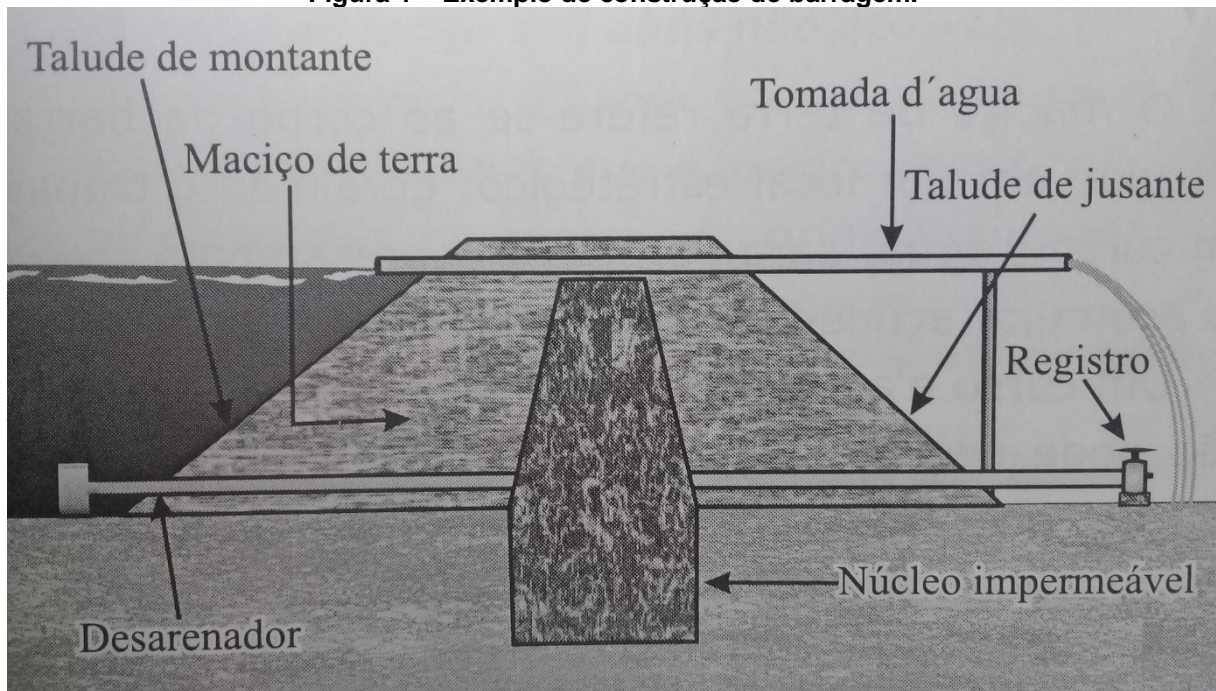
Há grandes complicações em um rompimento de uma barragem, portanto, toda perícia, técnica, cuidado e prevenção deve ser aplicado através da engenharia, para que uma barragem possa ser uma obra e estrutura segura para a população. (COSTA, 2012; OLIVEIRA e BRITO. *et al*, 1998)

2.2. Construção de Barragens

A concepção de uma barragem parte da ideia de criar um maciço terroso, criando uma estrutura que funcione através do peso próprio, que em muitos casos pode ser feita somente com solo compactado, sem adição de materiais como cimento. (CRUZ, 1996; LOPES, LIMA, 2008)

Uma barragem é composta pela base (fundação) e crista, os elementos que unem a base á crista, são os taludes da barragem. A base da barragem deve ser preparada para receber todas as cargas e esforços solicitante advindos da barragem. A crista da barragem, quase sempre possui uma largura maior que 3 metros e em muitos casos é utilizada como passagem de veículos, até estrada. A Figura 1, demonstra um exemplo de construção de uma barragem. (CRUZ, 1996; LOPES, LIMA, 2008)

Figura 1 – Exemplo de construção de barragem.



Fonte: (LOPES, LIMA, 2008, p.37)

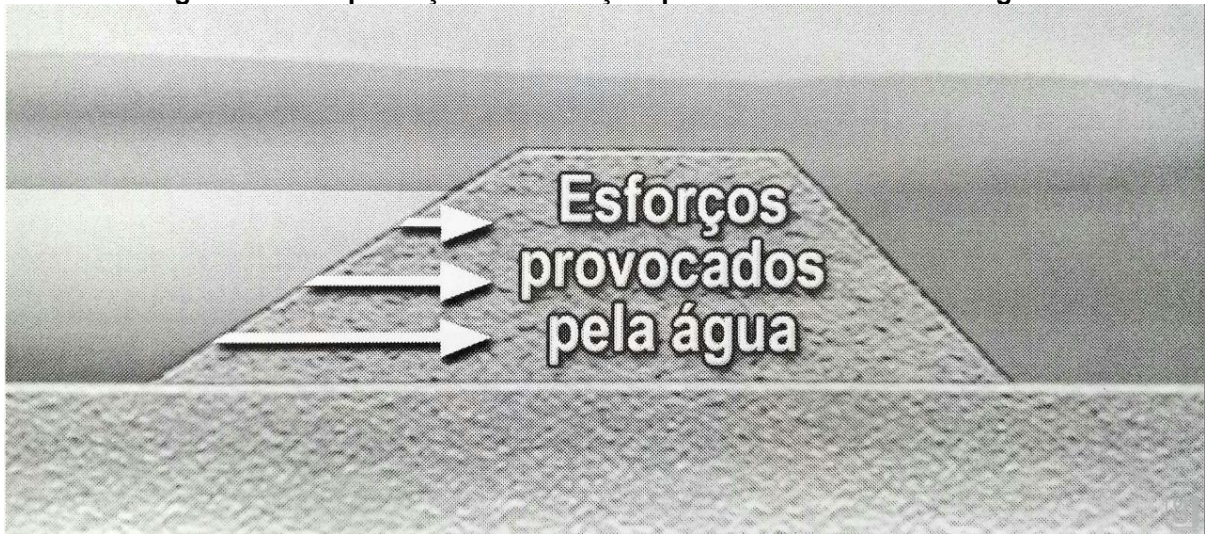
Para definir a altura de uma barragem deve ser considerado vários elementos como a quantidade de armazenamento que deve ser criada, as condições técnicas do local qual vai ser instalado a barragem, além de prever dos fatores de volume de cheia de enchente em épocas de grande intensidade de precipitação. Ressaltando que não deve haver transbordamento de água sobre a crista da barragem. (CRUZ, 1996; CAPUTO, 1987; LOPES, LIMA, 2008)

2.3. Taludes de barragens

Em uma barragem existem duas faces de taludes, sendo que somente uma dessas faces terá contato com a água. O talude que não possui contato com a água da represa, no caso de maciços terrosos, é construído em forma de angulada justamente para o projeto do barramento se tornar mais barato. (CAPUTO, 1987; LOPES, LIMA, 2008)

Os taludes que possuem contato com a água, são o princípio do funcionamento da barragem. A Figura 2, demonstra os esforços que a inclinação do talude gera na fundação da barragem. (CAPUTO, 1987)

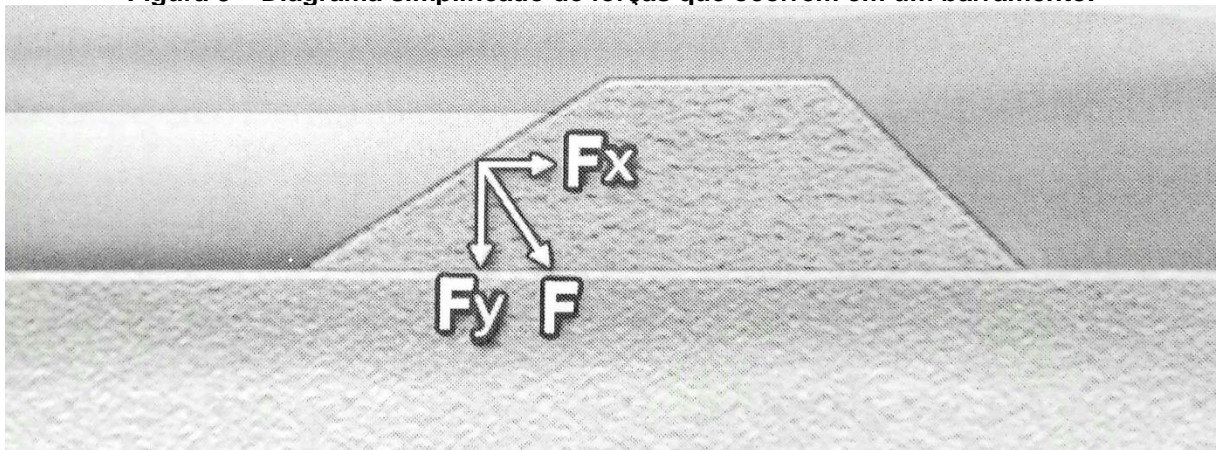
Figura 2– Exemplificação dos esforços que ocorrem em uma barragem.



Fonte: (LOPES e LIMA, 2008, p. 43)

O fato do talude ser inclinado, faz que uma certa quantidade de água se aloque sobre ele. Através do princípio do funcionamento de estruturas fixadas pelo peso próprio, a parcela de água que se aloca em cima do talude, gera uma série de esforços que são distribuídos de acordo com a estrutura encontrada na Figura 3. (LOPES, LIMA, 2008; OLIVEIRA e BRITO. *et al*, 1998)

Figura 3 – Diagrama simplificado de forças que ocorrem em um barramento.



Fonte: (LOPES e LIMA, 2008, p. 45)

Ao analisar a Figura 3, é possível notar que surgem forças no sentido horizontal, que seriam forças de “rompimento” da barragem. Surgem também forças verticais, que são as forças que fixam a barragem no solo. (LOPES, LIMA, 2008)

Na Figura 3, a força F , é justamente a resultante entre a F_x e F_y . Essa força representa o principal sentido de forças que ocorrem em uma barragem. Dessa força se derivam estudo para rompimento e estabilidade de barragens. (CAPUTO, 1897)

2.4. Linha piezométrica em barragens

Em toda barragem, com maciço feito de solo sem impermeabilização, qual é muito comum. Mesmo aplicando as melhores técnicas e materiais, sempre haverá um acúmulo de água na barragem. (CRUZ, 1996)

A água acumulada no maciço da barragem, tende a saturar o solo, causando percolação no talude jusante, efeito qual pode causar sérios danos a estrutura. A Figura 4, demonstra um caso problemático de afloramento da linha piezométrica. (COSTA, 2012)

Figura 4 – Afloramento da linha piezométrica.

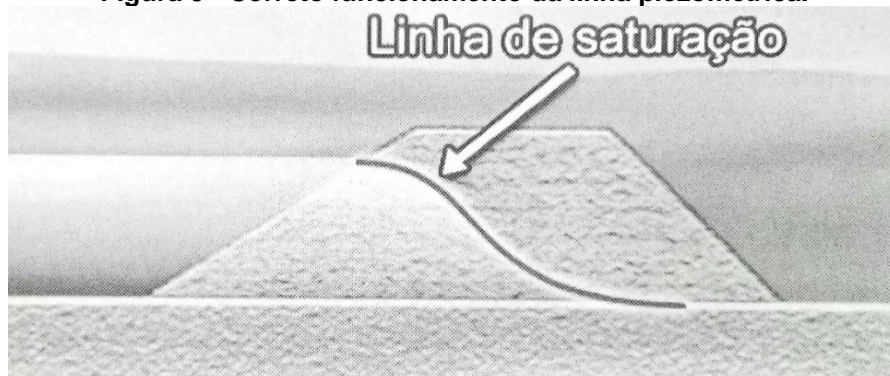


Fonte: (LOPES, LIMA, 2008, p. 47)

Na região em que se encontra a linha piezométrica do solo, deve-se lembrar que o solo está saturado por excesso de água, desse modo acaba perdendo várias de suas propriedades de resistência originais. (COSTA, 2012)

Na Figura 5, podemos observar um esquema correto de localização para a linha piezométrica. (LOPES, LIMA, 2008)

Figura 5 - Correto funcionamento da linha piezométrica.



Fonte: (LOPES, LIMA, 2008, p. 47)

3. ESTUDO DE CASO

3.1. Situação Problema

Neste item será criado uma situação problema, visando atender o objetivo proposto para este trabalho, que é de fazer uma retro análise estrutural de uma barragem.

Portanto, foram elencadas algumas asserções, que norteiam o cenário do estudo de caso deste trabalho:

- 1- Considerou-se o cenário de uma barragem supostamente antiga, utilizada para o barramento de um curso d'água, visando o armazenamento de água doce.
- 2- Considerou-se que não há conhecimento sobre o histórico de manutenção da barragem, sendo que visualmente verificam-se sinais de falta de manutenção, como por exemplo o relevo do talude irregular, a presença de pequenas erosões, e falhas na vegetação de proteção do talude (grama).
- 3- Considerou-se que não há histórico técnico sobre da barragem, ou seja, não há informações sobre a ocorrência de problemas técnicos anteriores. Somente há a constatação de que recentemente começou haver percolação água em região próxima ao pé do talude jusante.
- 4- Foi considerado que não há conhecimento técnico sobre a barragem, portanto não há informações como ante projeto, projeto executivo, métodos de construção, ano da construção, sistema de drenagem, falhas ou problemas estruturais anteriores.
- 5- Foi suposto de que a barragem não possui vertedouro de fundo e superfície, pois trabalha com vertedouro lateral em estrutura não anexa ao maciço da barragem.
- 6- Foi considerado que a barragem está apoiada sobre solo impenetrável (base rochosa).

7- O motivo pelo qual será feito o processo de retro análise estrutural, é justamente pelo quase total desconhecimento sobre a barragem, somado ao fato de ter começado a ocorrer percolação pelo talude jusante. Portanto, visando evitar um provável rompimento, a barragem será investigada de modo a determinar sua condição de segurança.

8- De acordo com o resultado da investigação, será proposta uma solução capaz de solucionar os problemas constatados.

Logo, de acordo com as asserções acima supracitadas, foi idealizado uma barragem modelo, qual foi denominada como “Barragem X”.

Nas Figura 6 e Figura 7, podem ser observados os croquis com as dimensões e formato da Barragem X, sendo que as dimensões indicadas estão em metros.

Figura 6 – Vista lateral da Barragem X, considerando que as dimensões indicadas nas cotas, estão em metros.

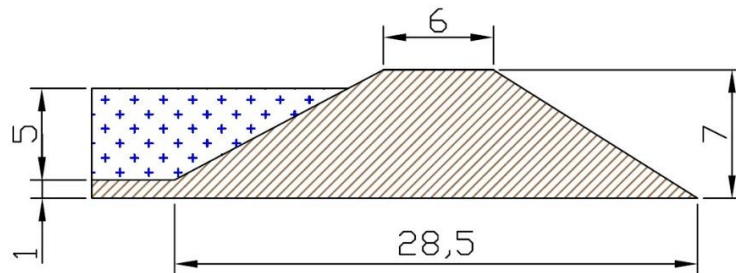
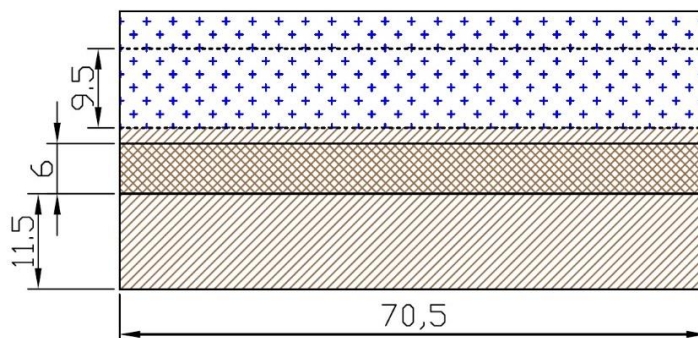
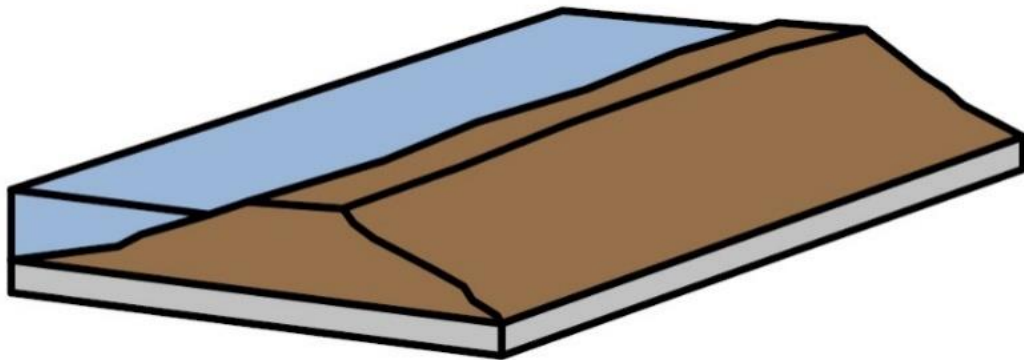


Figura 7 – Vista superior da Barragem X, considerando que as dimensões indicadas nas cotas, estão em metros.



De acordo com as dimensões listadas na Figura 6 e Figura 7, foi elaborado um modelo tridimensional para a barragem, qual pode ser observado na Figura 8.

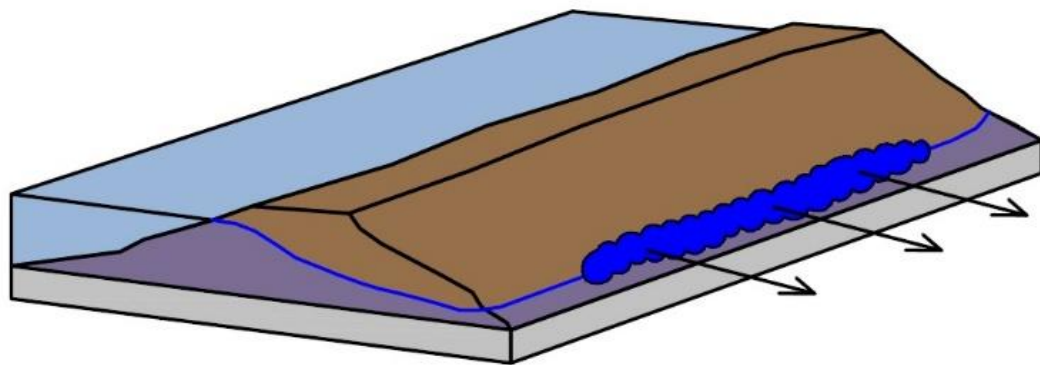
Figura 8 – Modelo tridimensional para a Barragem X, considerando as dimensões indicadas nas Figuras 6 e 7.



Analisando a Figura 8, pode notar que na Barragem X, não há a presença de vertedouro ou monge (vertedouro de fundo), pois foi considerado que a barragem trabalha com sistema de vertedouro lateral de superfície, localizado de forma não anexa ao maciço da barragem.

Como situação problema para este trabalho, foi escolhido o efeito que pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Ilustração para a percolação de água cuja está ocorrendo no pé do talude jusante da Barragem X.



Analisando a Figura 9, nota-se que está ocorrendo a percolação de água no pé da barragem, logo, fica caracterizado a situação problema, ou seja, o estudo de caso deste trabalho, cuja possui o objetivo de investigar e sanar o problema reportado.

3.2. Análise Técnica

Com o intuito de aproximar o estudo de caso deste trabalho à situação mais próxima possível da realidade, para a análise técnica, foi adotado uma metodologia de acordo com o item 1.4.1 deste trabalho, qual contempla o fator de total desconhecimento técnico sobre a barragem, conforme os procedimentos a serem seguidos:

- 1º. Elaborar fictício levantamento planialtimétrico para a Barragem X, de acordo com as dimensões listadas nas Figuras 6 e 7.
- 2º. Elaborar mapa de alocação de sondagens SPT, além de também elaborar os resultados das sondagens.
- 3º. Com resultados das sondagens, serão construídas as seções geológico-geotécnicas.
- 4º. Calcular o coeficiente de segurança para cada seção criada.
- 5º. Analisar tecnicamente os resultados, verificando a condição de segurança da barragem, além de identificar a causa dos problemas detectados.
- 6º. De acordo com os resultados obtidos, caso necessário propor solução corretiva.

Visando sanar o problema reportado na Figura 9, será feita uma investigação geotécnica, objetivando encontrar o motivo da surgência de água, além de determinar a condição de estabilidade do maciço terroso da barragem.

Ou seja, partiu-se do pressuposto, que a partir da constatação da surgência de água, efeito que em termos de manifestação patológica, evidencia um grave problema geotécnico na barragem, deu-se início a retro análise estrutural.

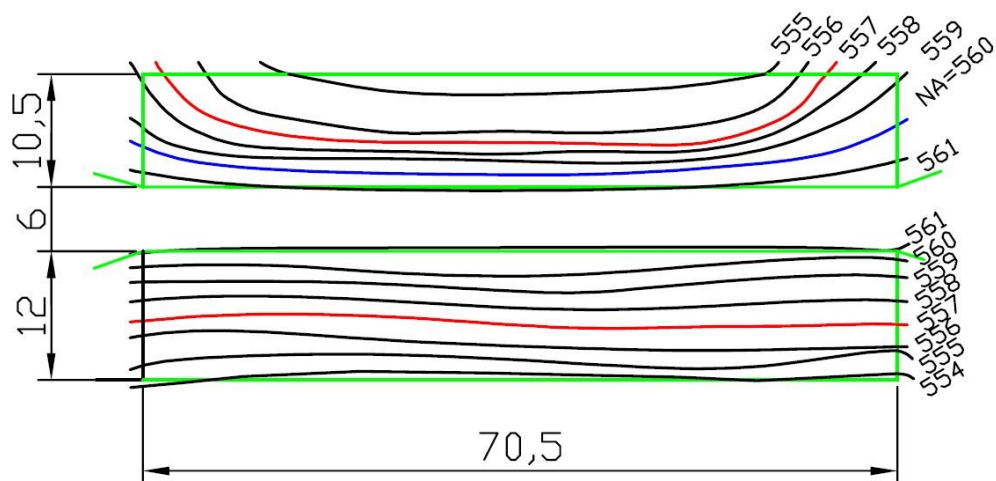
Portanto, considerou-se a ausência de informações como tipo de solo, grau de compactação, nível de umidade no solo, nível de água no solo, sistema de drenagem, tipo de fundação e sistema de enrocamento.

O projeto ilustrado na Figura 6 e Figura 7, não será considerado como o objeto de estudo, pois partindo do pressuposto adotado sobre o total desconhecimento técnico sobre a barragem, visando retratar a realidade de uma barragem antiga, o referido projeto foi somente utilizado como “base” para a elaboração do levantamento planialtimétrico da Barragem X.

Logo, o primeiro passo para dar início a investigação geotécnica, é justamente realizar o levantamento planialtimétrico, objetivando encontrar as atuais e reais informações sobre as dimensões e relevo da barragem.

Na Figura 10, pode ser observado o resultado do levantamento planialtimétrico elaborado para a Barragem X.

Figura 10 – Levantamento planialtimétrico elaborado para a Barragem X. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.

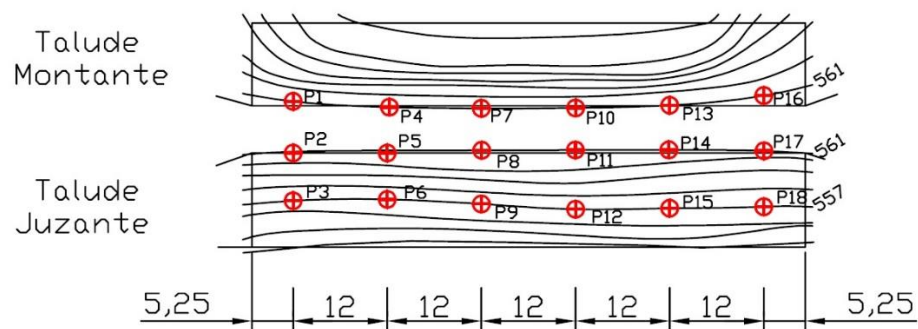


Com o levantamento em mãos, o próximo passo da investigação é de realizar os ensaios SPT, com o objetivo de obter informações como altura do nível d'água no solo, tipo de solo, grau de compactação, tipo de fundação e zonas de saturação do solo.

Logo, torna-se necessário elaborar um projeto de alocação dos pontos de sondagem, de modo em os pontos sejam dispostos de modo a ser possível obter informações concisas sobre o solo do maciço.

Na Figura 11, é possível observar o projeto de alocação dos pontos de sondagem SPT.

Figura 11 – Mapa de alocação dos pontos de sondagens SPT para a Barragem X. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.



Analisando a Figura 11, podemos observar a presença de dezoito pontos de sondagem, dispostos alinhados em seis linhas de sondagem, possibilitando a criação de seis seções geológico-geotécnicas da barragem.

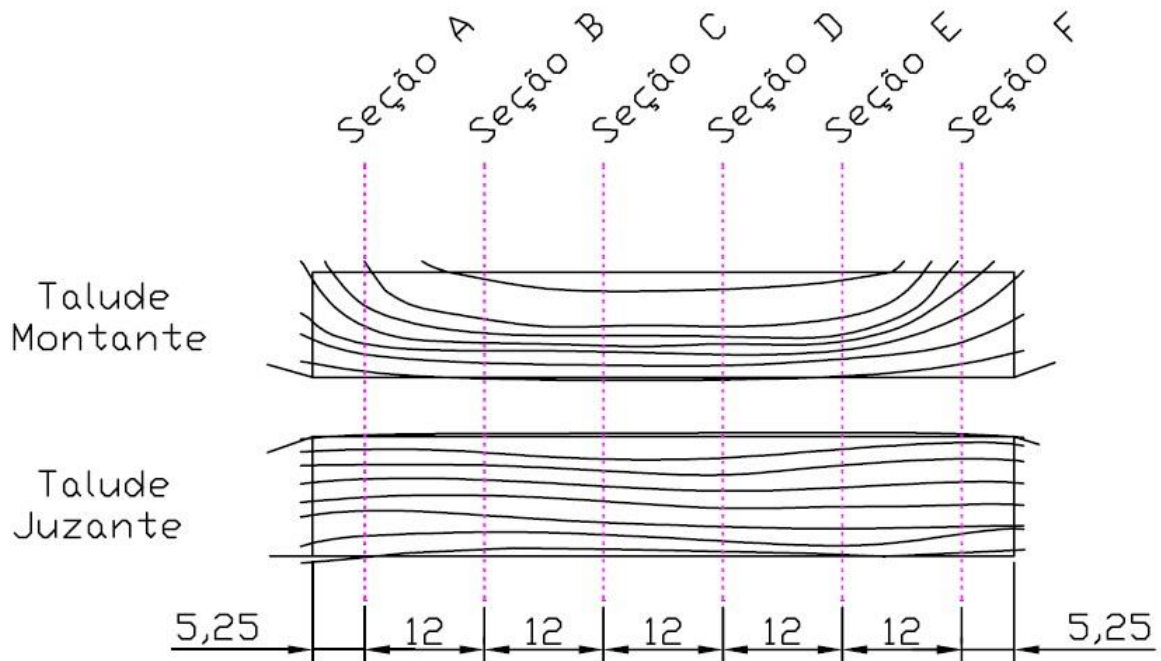
As seções geológico-geotécnicas possibilitam que informações advindas das sondagens SPT, sejam compiladas junto aos dados do levantamento topográfico, criando uma visão estratigráfica do interior do solo do maciço terroso

Com a criação das seções, será possível identificar zonas de saturação do solo, entender as camadas de aterro, verificar o nível de compactação do maciço e principalmente identificar zonas de instabilidade geotécnica na barragem.

As seções são elemento primordial na retro análise estrutural, pois para cada uma será calculado o respectivo coeficiente de segurança, possibilitando obter uma ideia global do real estado de segurança da barragem.

Na Figura 12 pode ser observado um croqui com a demarcação e nomeação das seções geológico-geotécnicas utilizadas na retro análise.

Figura 12 – Mapa de identificação e alocação das seções geológico-geotécnicas para a Barragem X. Detalhe que as dimensões e indicadas estão na unidade de metros.



Detalhe que o procedimento utilizado para a criação das seções geológico-geotécnicas, está de acordo com as diretrizes da NBR 11682, que trata sobre questões de estabilidade de taludes e investigação geotécnica.

Para a construção das seções, será necessário obter informações sobre o perfil de elevação de cada seção apontadas na Figura 10 e Figura 12, além das informações que as sondagens SPT irão fornecer.

Visando não distorcer, forçar, ou induzir qualquer forma de resultado final para este trabalho, os resultados para as sondagens foram elaborados, baseando-se na experiência prática informada pelo Engenheiro Civil Hudson Silvestre da Silva (CREA 5063793764/D), em reunião realizada no dia 02/04/2020.

Sendo que a experiência prática, foi informada baseando-se nas asserções listadas no item 3.1 e dimensões da Barragem X, considerando a ampla experiência do Eng. Hudson em obras de terra e contenção, ponderada por uma vasta gama de resultados de sondagens SPT reais, em condições muito próximas a deste trabalho, de projetos realizados por ele.

Na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3, estão informados os resultados escolhidos.

Tabela 3 – Resultado de sondagem SPT, para composição de solo na Barragem X.

PERFIL GEOLÓGICO										
alt (m)	pf (m)	Seção "A"			Seção "B"			Seção "C"		
		P 01	P 02	P 03	P 04	P 05	P 06	P 07	P 08	P 09
561,0	0,0	S1	S1	-	S1	S1	-	S1	S1	-
560,5	0,5									
560,0	1,0									
559,5	1,5									
559,0	2,0	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	S2	
558,5	2,5									
558,0	3,0									
557,5	3,5									
557,0	4,0									
556,5	4,5									
556,0	5,0									
555,5	5,5									
555,0	6,0	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I		
554,5	6,5									
554,0	7,0									
553,5	7,5	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	
553,0	8,0									
alt (m)	pf (m)	Seção "D"			Seção "E"			Seção "F"		
		P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	P 16	P 17	P 18
561,0	0,0	S1	S1	-	S1	S1	-	S1	S1	-
560,5	0,5									
560,0	1,0									
559,5	1,5									
559,0	2,0									
558,5	2,5	S2								
558,0	3,0		S2							
557,5	3,5							S2		
557,0	4,0					S2			S2	
556,5	4,5			S2	S2		S2			S2
556,0	5,0									
555,5	5,5									
555,0	6,0									
554,5	6,5									
554,0	7,0									
553,5	7,5	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I	S.I
553,0	8,0									
LEGENDA:										
alt (m): altitude em relação ao nível do mar					pf (m): profundidade no solo.					
Pontos de Sondagem: P 01 até P 18, com respectiva classificação do tipo de solo, de acordo com a profundidade, até o ponto de encontro com região impenetrável.										
Seção "A" até "D": seções geológico geotécnicas.					S.I: solo impenetrável (base rochosa).					
S1: solo tipo 1 (18KN/m³ - 10 Kpa - 30°)					S2: solo tipo 2 (20 KN/m³-15 Kpa-20°)					

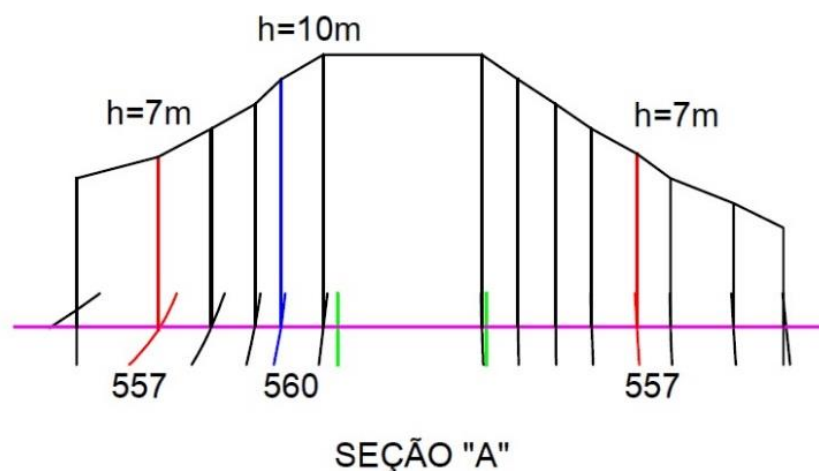
Portanto, com os resultados das sondagens, o próximo passo é de realizar a construção das seções geológico-geotécnicas.

Na Figura 13, há uma ilustração do processo utilizado para a criação da geometria das seções, onde foram utilizados os dados disponibilizados pelo levantamento planialtimétrico, junto a localização de cada seção.

Na figura, a linha de coloração rosa representa a linha da seção (Figura 12) e, as linhas coloridas que cruzam a linha rosa, significam cada curva de nível do levantamento topográfico.

Detalhe que, para cada cruzamento que ocorre na linha rosa, é criado uma linha com a altura correspondente a curva de nível, processo qual cria o relevo da barragem. Por exemplo, na Figura 13, é demonstrado o processo realizado para a Seção A.

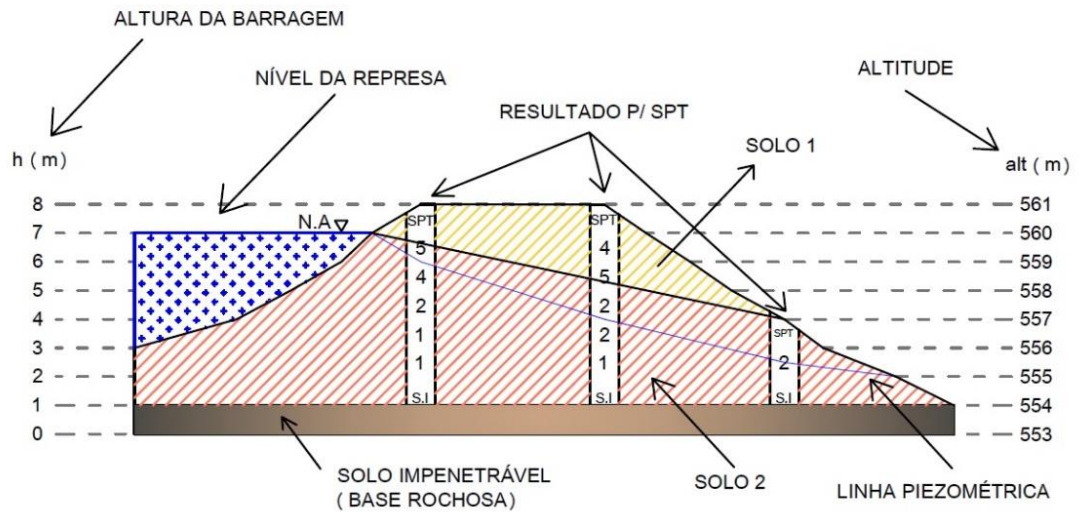
Figura 13 – Processo utilizado para criação do perfil de elevação para as seções da barragem. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.



Com os perfis de elevação traçados, o próximo passo é a construção das seções geológico-geotécnicas.

Na Figura 14, está presente uma explanação, com a indicação e significância de cada item que compõe as seções.

Figura 14 – Legenda para as informações disponíveis nas seções geológico-geotécnicas. Detalhe que as dimensões e altitudes indicadas estão na unidade de metros.



Conforme a premissa de que não há conhecimento sobre a existência ou não de sistema de drenagem instalado na barragem e, mediante a supracitada percolação constatada, considerou-se para efeito de análise que a barragem não possui sistema de drenagem.

Portanto, para a elaboração das seções, os critérios técnicos, foram ponderados e escolhidos, de modo a gerar o cenário de saturação do solo no interior do maciço, motivo pelo qual estaria ocorrendo a anormal percolação de água em região próxima ao pé da barragem.

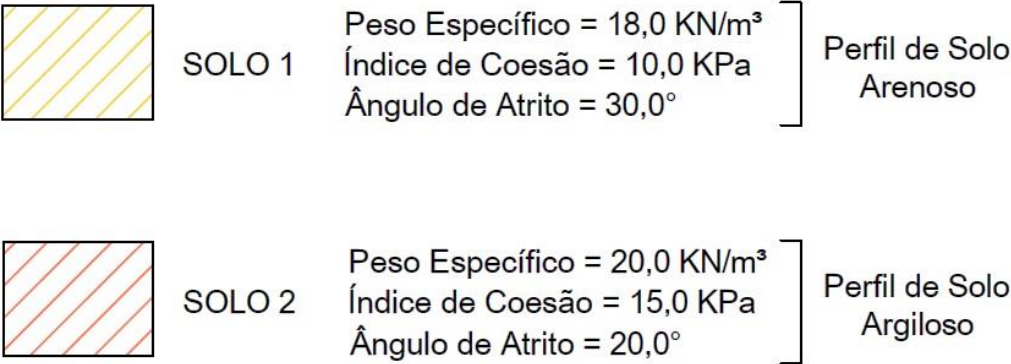
Logo, os resultados das sondagens SPT foram propositalmente escolhidos, de modo a criar um cenário de saturação do solo em região inferior a linha piezométrica. Ou seja, em região acima da linha, observa-se um bom padrão de compactação do solo e, quando abaixo da linha, nota-se uma grande diminuição da quantidade de golpes (SPT), indicando regiões onde está ocorrendo a saturação do solo por excesso de água.

A altura do nível da água na barragem, foi propositalmente escolhida como relativamente alta, de modo a ficar um metro abaixo da cota máxima do maciço. Efeito qual cria uma elevação do fluxo de água no interior do maciço, contribuindo para a elevação da altura da linha piezométrica, favorecendo o efeito de saturação do solo.

O tipo de solo escolhido para a composição da barragem, foi propositalmente pensado para favorecer a condição de saturação do solo, portanto para a parte inferior do maciço, foi escolhido um tipo de solo bastante argiloso, quando na parte superior foi considerado um solo do tipo bastante arenoso.

As propriedades dos solos como peso específico, índice de coesão e ângulo de atrito de atrito, foram arbitrariamente escolhidas, além de estarem listadas na Figura 15.

Figura 15 – Tipos de solos e respectivas propriedades escolhidas.



Com todas as informações necessárias em mãos, foram traçadas as seis seções geológico-geotécnicas (A, B, C, D, E e F), quais os resultados podem ser observados na Figuras 16 a Figura 21.

Figura 16 – Seção geológico-geotécnica, referente a “Seção A” da Figura 12.

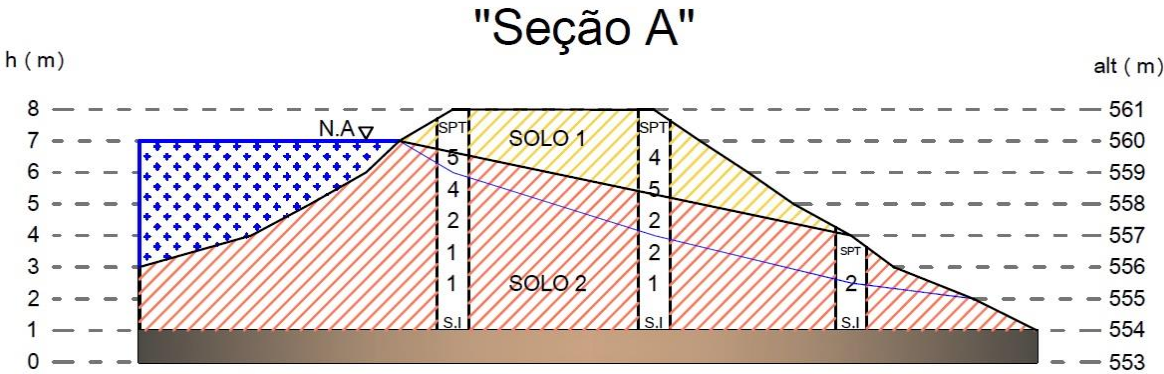


Figura 17 – Seção geológico-geotécnica, referente a “Seção B” da Figura 12.

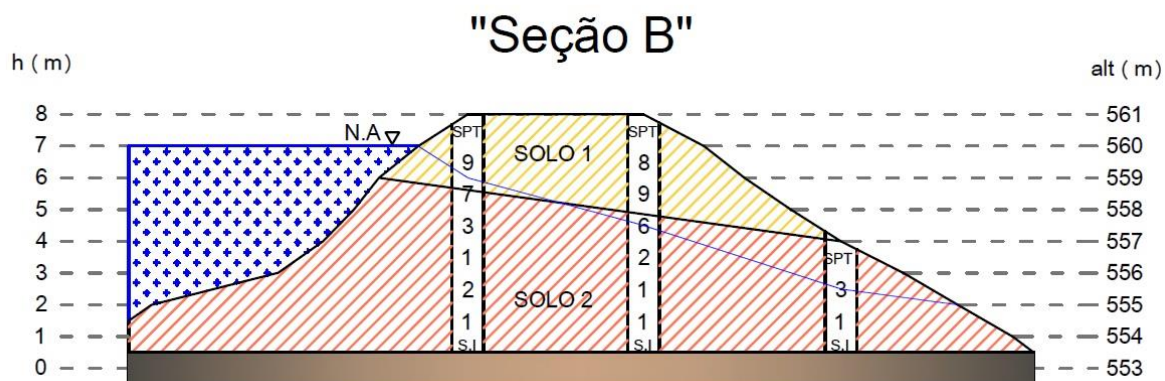


Figura 18 – Seção geológico-geotécnica, referente a “Seção C” da Figura 12.

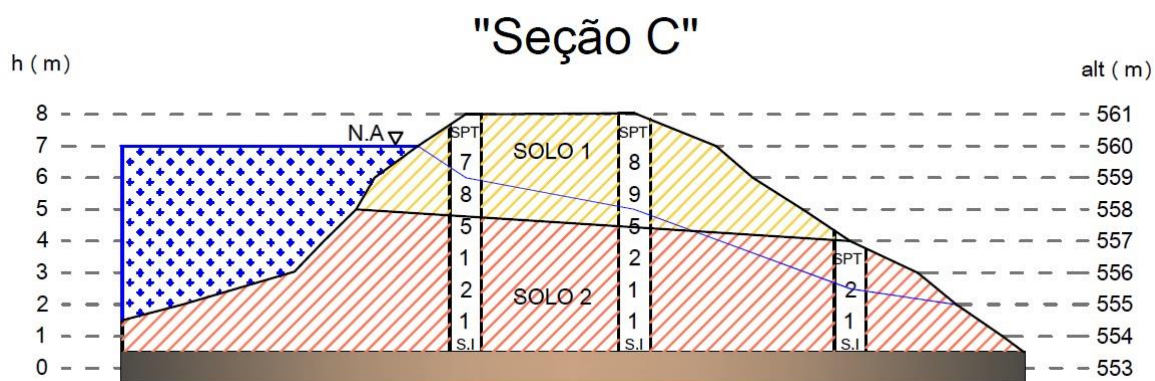


Figura 19 – Seção geológico-geotécnica, referente a “Seção D” da Figura 12.

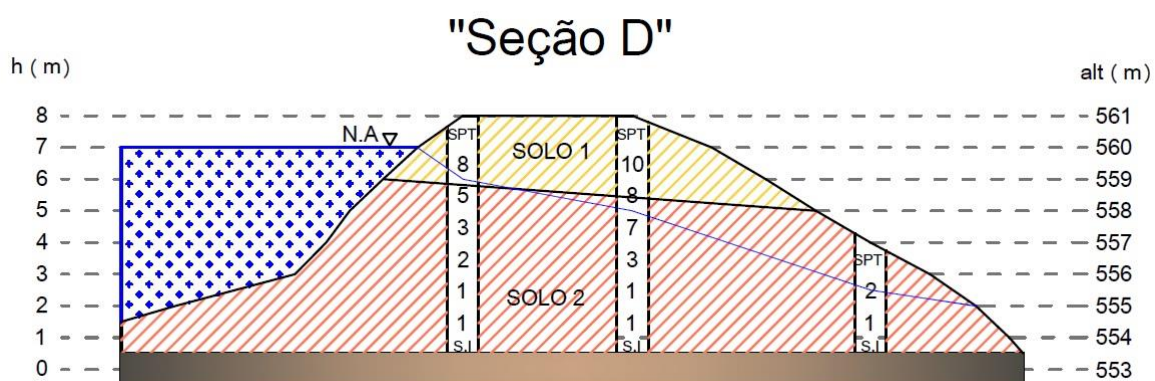


Figura 20 – Seção geológico-geotécnica, referente a “Seção E” da Figura 12.

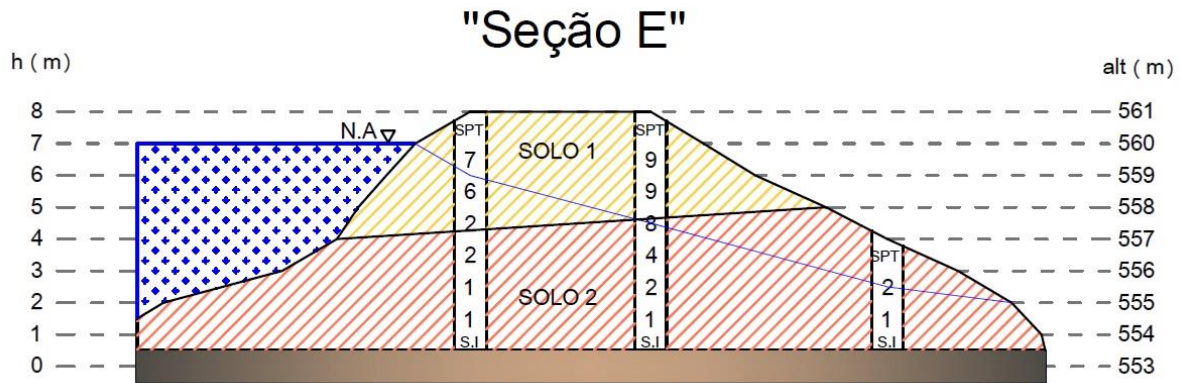
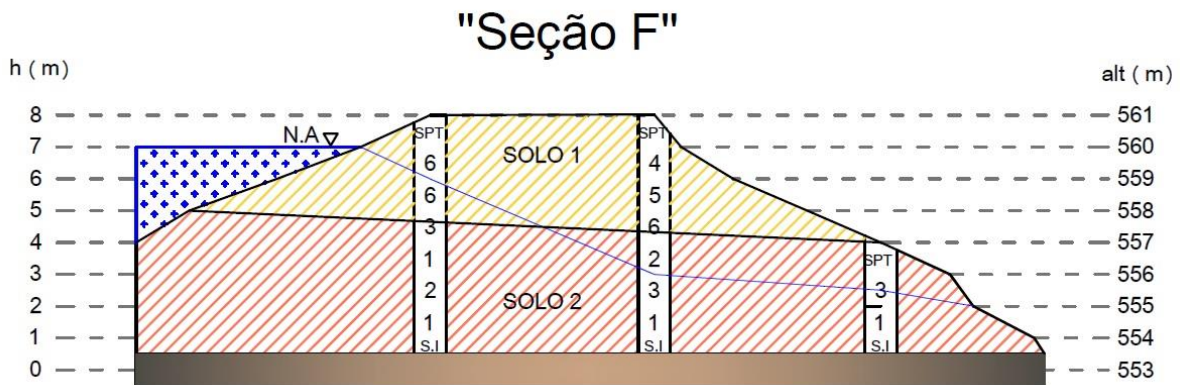


Figura 21 – Seção geológico-geotécnica, referente a “Seção F” da Figura 12.



Com as seções prontas, o próximo passo é analisar os resultados obtidos, de modo a tirar algumas conclusões sobre o estado geral da barragem.

Foi constatado que a parte inferior do maciço, é composto por solo com características argilosas (SOLO 2), detalhe qual favorece a saturação do solo, devido a resistência a drenagem característica do tipo do solo.

Pode-se notar que a linha piezométrica, apresenta um comportamento “alto”, ou seja, está em um nível alto quando dentro de regiões constituídas pelo SOLO 2, mais uma vez evidenciando a falta de drenagem no maciço.

Analisando os resultados obtidos para a quantidade de golpes (SPT), nota-se que em região superior (SOLO 1), os resultados foram bastante positivos (SPT entre 4 a 10 golpes), demonstrando que a barragem quando construída, teve o solo devidamente compactado por equipamentos adequados.

Na parte inferior do maciço (SOLO 2), observa-se uma brusca queda no índice de compactação do solo logo após o nível d'água, efeito qual caracteriza o problema de saturação do solo.

Sempre há diminuição do índice de SPT (quantidade de golpes) quando há a presença de água no solo, em relação ao mesmo solo, porém em condição de baixa umidade relativa. Neste caso, a redução percebida é demasiadamente acentuada, pois em região superior chegou-se a índices de 10 golpes, caindo para regiões inferiores com índices de 1 golpe, sinalizando total acometimento e saturação do solo.

Nota-se que em todas as seções, é notada a indevida percolação de água, na altura da cota de elevação de 555 metros. Efeito qual seria evitado com a escolha de um tipo de solo mais adequado para a construção de barramentos, além da aplicação de um eficiente sistema de drenagem.

Observa-se que as sondagens indicaram de forma unânime, que na cota de elevação de 553 m, há a presença de solo impenetrável. Foi considerado que a jazida local da área em que a barragem foi construída, possui a característica de uma base rochosa, não muito profunda.

Considerando que a barragem foi construída diretamente sob a referida base, logo, o sistema de fundação da barragem é a própria base rochosa.

Após a análise das seções, com o diagnóstico da saturação do solo, o próximo passo da investigação é de verificar a condição de estabilidade do maciço da barragem.

Portanto, para cada seção geológico-geotécnica, será calculado o respectivo coeficiente de segurança, baseado no método do equilíbrio limite, cuja visa identificar a relação de segurança existente entre os esforços solicitantes e a resistência mecânica da barragem.

Para isso será utilizado um software computacional geotécnico, qual permite realizar de forma bastante avançada e precisa os cálculos necessários, de modo a determinar o coeficiente de segurança de cada seção.

O software escolhido, foi o GeoStudio 2020, da Empresa GeoSlope International, que em atitude muito elegante, disponibiliza uma versão de licenciamento estudantil (gratuita) para o software.

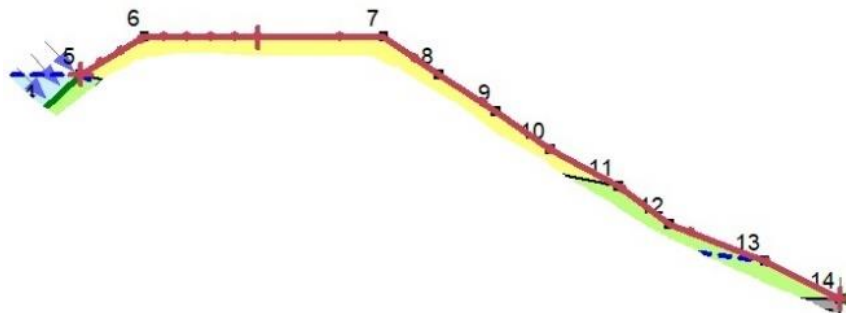
Figura 22 – Logo da empresa GeoSlope.



O software foi utilizado na versão estudantil, na opção de análise SLOPE/W (opção para modelagem de escorregamento de encostas), considerando poropressão de linha piezométrica, sentido de análise da esquerda para a direita e metodologia de análise Morgenstern-Price. Detalhe que as demais configurações para a análise foram utilizadas os padrões do software.

Como critério de intervalo de área de análise, foi considerado a distância entre o ponto mais alto de encontro da água com a barragem, até o ponto mais baixo do maciço da barragem, de modo que as seções foram analisadas inteiriçamente, conforme o exemplo presente na Figura 23.

Figura 23 – Linha vermelha é a delimitação da região de análise.



As informações presentes nas seções geológico-geotécnicas como dimensões da barragem, propriedades dos solos, linha piezométrica, base rochosa, foram imputadas no software, criando a modelagem para as seis seções.

Entre as Figura 25 e Figura 30, estão listados a modelagem geotécnica e o resultado da análise de estabilidade para cada seção.

Na parte superior das figuras, está localizada a modelagem geotécnica, quando na parte inferior está o resultado do cálculo de estabilidade, com o respectivo coeficiente de segurança obtido.

Detalhe que o tipo de análise utilizado, busca pela pior curva de ruptura (ou escorregamento) global para a seção analisada, logo, o coeficiente de segurança obtido é sempre baseado no pior cenário possível.

Na Figura 24, há uma legenda para a identificação do tipo de solo, de acordo com a coloração.

Figura 24 – Legenda para coloração e respectivos tipos de solo.



Figura 25 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção A”, considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,658$.

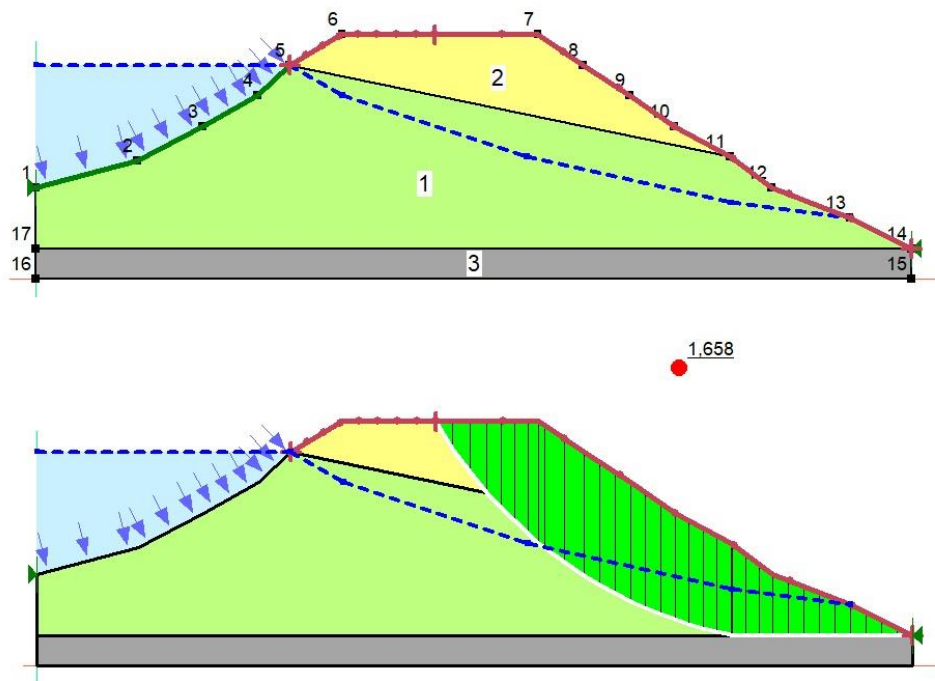


Figura 26 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção B”, considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,503$.

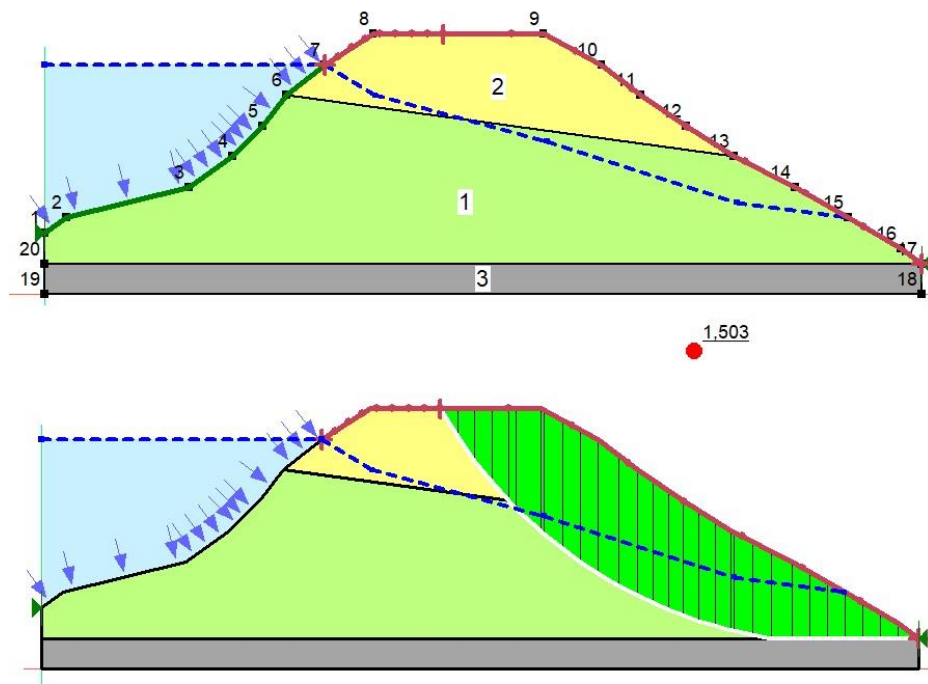


Figura 27 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção C”, considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,456$.

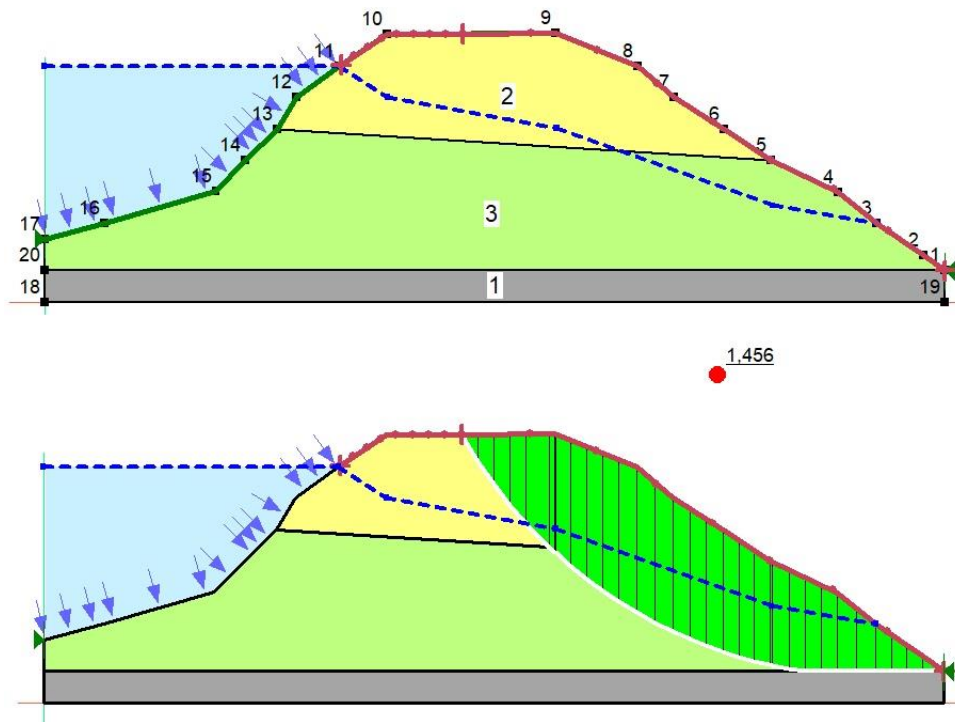


Figura 28 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção D”, considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,448$.

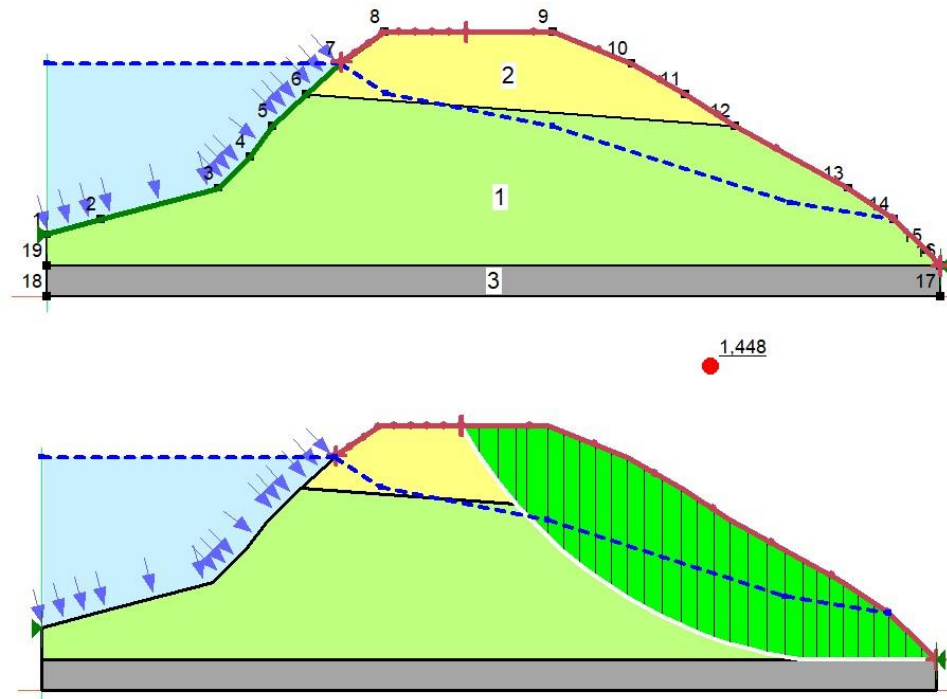


Figura 29 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção E”, considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,543$.

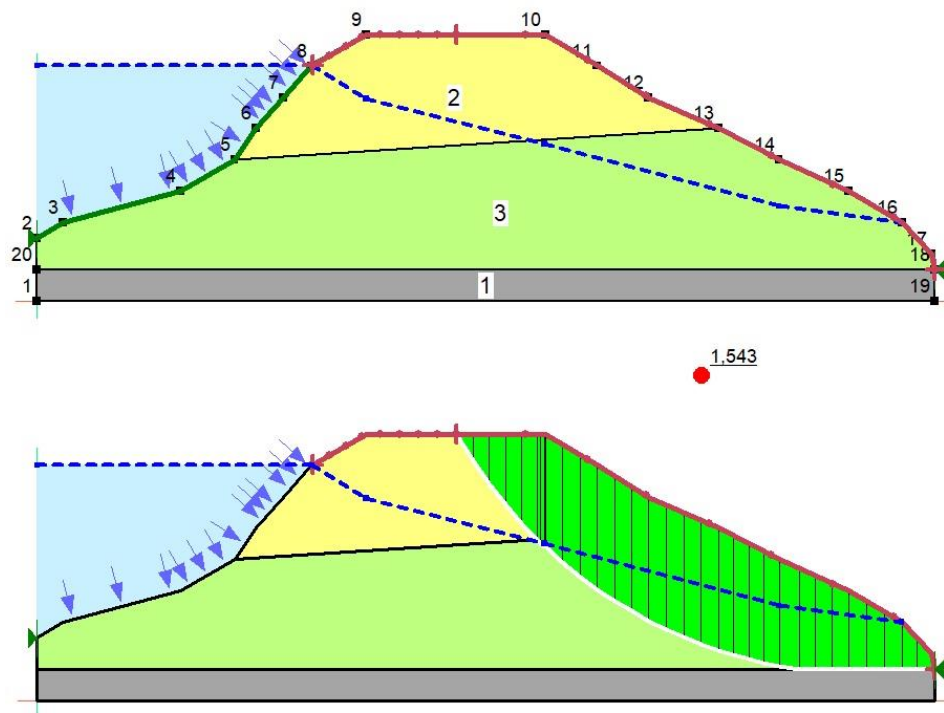
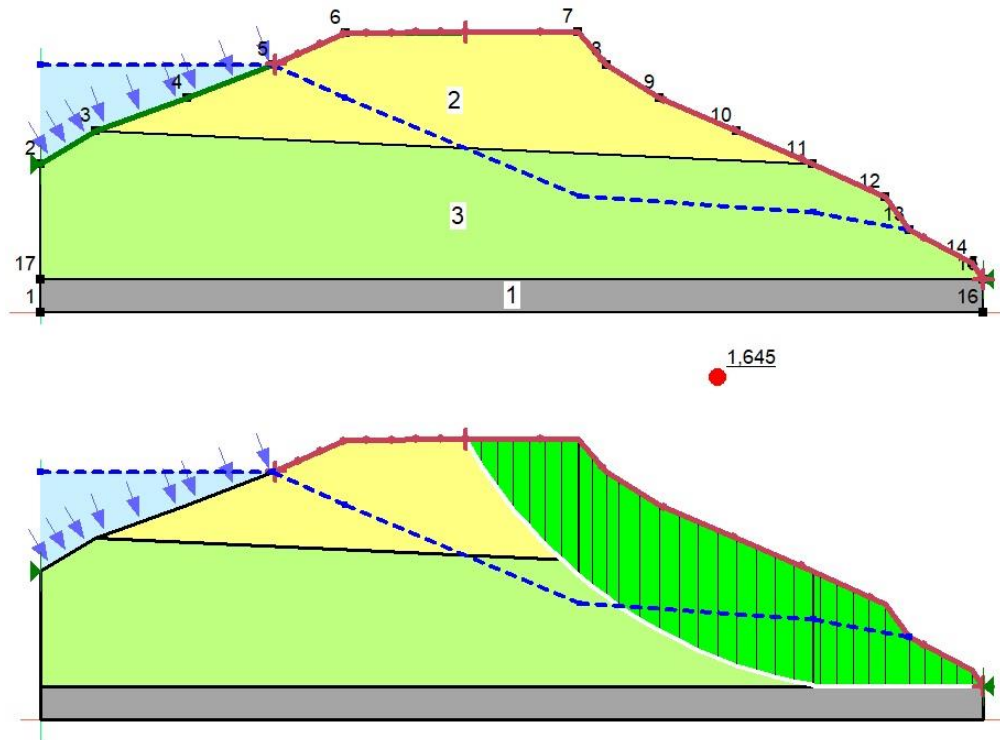


Figura 30 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção F”, considerando que o coeficiente de estabilidade obtido foi de $CS = 1,645$.



Afim de analisar os resultados obtidos, na Tabela 4 estão reunidos os dados obtidos para os coeficientes de segurança.

Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de segurança.

Seção	C.S
A	1,658
B	1,503
C	1,456
D	1,448
E	1,543
F	1,645

Analisando a Tabela 4, nota-se que as seções das extremidades (A, B, E, F) possui um desempenho superior em termos de segurança, quando comparadas as seções centrais (C e D).

Ou seja, podemos concluir que a zona central da barragem está sendo mais solicitada, em relação as regiões das extremidades, logo, em uma situação extrema, a tendência de ruptura do maciço, é justamente na zona central.

Conforme pode ser observado entre as Figuras 25 e Figura 30, em todas as análises, a curva de ruptura, entra em contato com a fundação da barragem. Isso demonstra que há certa tendência de escorregamento do maciço naquela região.

Pois, o fato de a barragem ter sido construída sob uma base rochosa, faz que praticamente não haja fluxo de água pela fundação da barragem, ou seja, a água não tem outro caminho a não ser fluir de forma jusante, forçando que a água percole em região próxima ao pé do talude, trazendo consequências extremamente negativas ao maciço terroso que compõe a barragem.

De acordo com a NBR 11682 (Norma Brasileira Regulamentadora) de 1991, o coeficiente mínimo exigido para a barragem é de 1,5, conforme pode ser observado na tabela da Figura 31.

Figura 31 – Tabela 8 da NBR 11682 de 1991, sobre estabilidade de taludes. Fonte: www.licenciadorambiental.com.br, acessado em 24/05/2020.

Tabela 8 - Utilização de modelos matemáticos

Grau de segurança necessário ao local	Métodos baseados no equilíbrio-limite	Tensão-deformação
	Padrão: fator de segurança mínimo ^(A)	Padrão: deslocamento máximo
alto	1,50	Os deslocamentos máximos devem ser compatíveis com o grau de segurança necessário ao local, à sensibilidade de construções vizinhas e à geometria do talude. Os valores assim calculados devem ser justificados.
médio	1,30	
baixo	1,15	

Portanto, considerando o valor mínimo de coeficiente de segurança (1,5), na Tabela 5 há uma avaliação para cada seção quanto o atendimento às exigências de segurança.

Tabela 5 – Avaliação de atendimento aos critérios de segurança mínimo exigido para cada seção analisada.

Seção	C.S	Avaliação
A	1,658	OK
B	1,503	OK
C	1,456	Não OK
D	1,448	Não OK
E	1,543	OK
F	1,645	OK
MÉDIA	1,542	OK

Como não há o conhecimento sobre o sistema construtivo da barragem, considerando a grave manifestação patológica constatada, além do considerável tamanho e capacidade da barragem, foi determinado, de acordo com a tabela presente na Figura 31, que o grau de segurança necessário para a barragem é “alto”, portanto a justificativa para a utilização do coeficiente de segurança 1,5.

Analisando a Tabela 2, nota-se que as seções C e D (centrais), estão apontando para valores de CS em torno de 1,4. Fato qual não coloca a barragem em um estado de insegurança (abaixo de 1,3) ou mesmo insuficiência (abaixo de 1,0).

O valor médio geral encontrado para $CS = 1,542$, demonstra que a barragem, apesar de estar sofrendo com saturação do solo na parte inferior do maciço, ainda apresenta de um modo geral, uma boa qualificação e estado geral de segurança e eficiência no funcionamento.

Porém, as seções C e D, em termos de coeficiente de segurança, não estão atendendo aos requisitos exigidos, logo, surge a necessidade de realizar uma intervenção de engenharia, de modo a enquadrar a barragem dentro dos padrões exigidos.

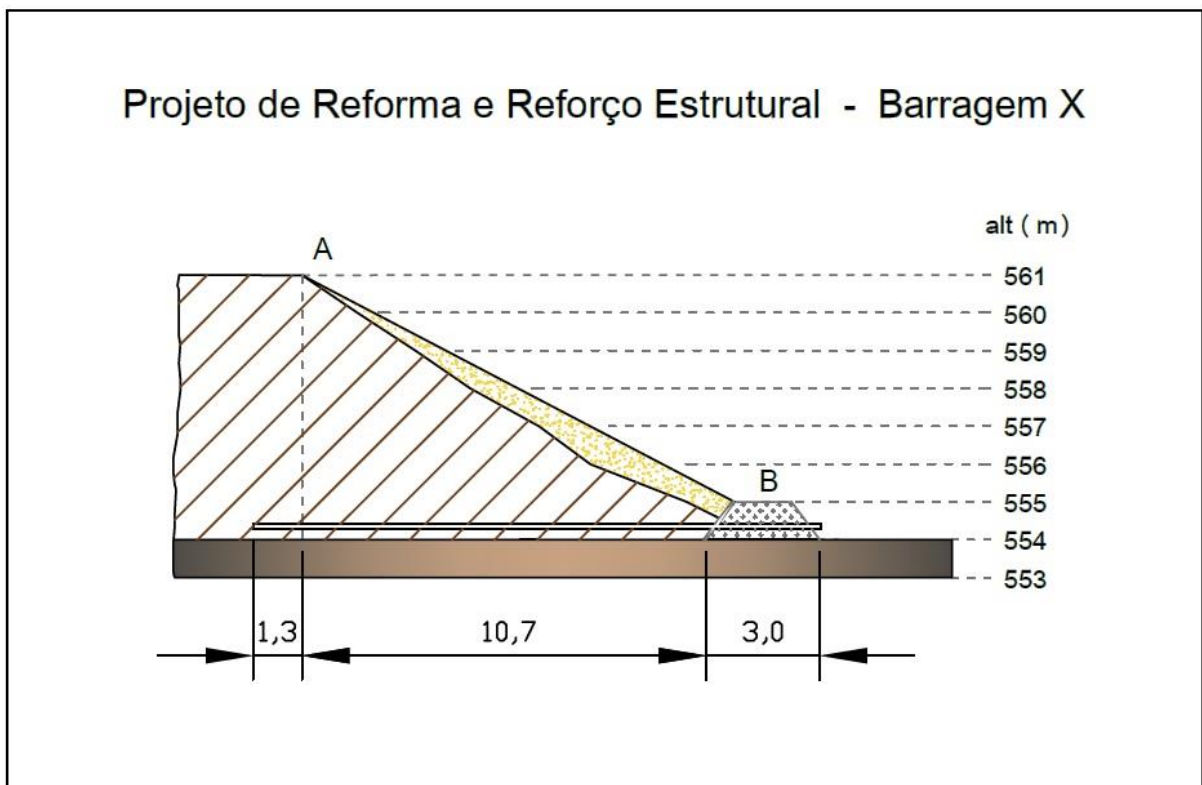
3.3. Solução

Conforme o analisado no item 3.2 deste trabalho, será proposta uma solução de engenharia, qual seja capaz, de elevar os coeficientes de segurança das Seções C e D, de modo a enquadrá-las dentro do padrão exigido.

A solução a ser adotada, também deve possibilitar, que seja solucionado a questão da saturação do solo, qual está causando a indevida percolação de água em região próxima ao pé do talude jusante.

Na Figura 32, há a imagem da proposta de projeto de reforma e reforço para a Barragem X.

Figura 32 – Projeto de Reforma e Reforço Estrutural proposto para a Barragem X. Detalhe que todas as medidas indicadas, estão na unidade de metros.



Analisando a Figura 32, nota-se que há a vista de um corte na barragem, onde há a indicação de dois pontos (A e B). O ponto A representa a cota de elevação de 561 metros e, o ponto B representa a cota de elevação 555.

Ou seja, o projeto prevê que em toda a extensão da barragem seja reproduzido o modelo indicado no projeto, onde será feita uma regularização do talude, ligando o ponto B ao ponto A.

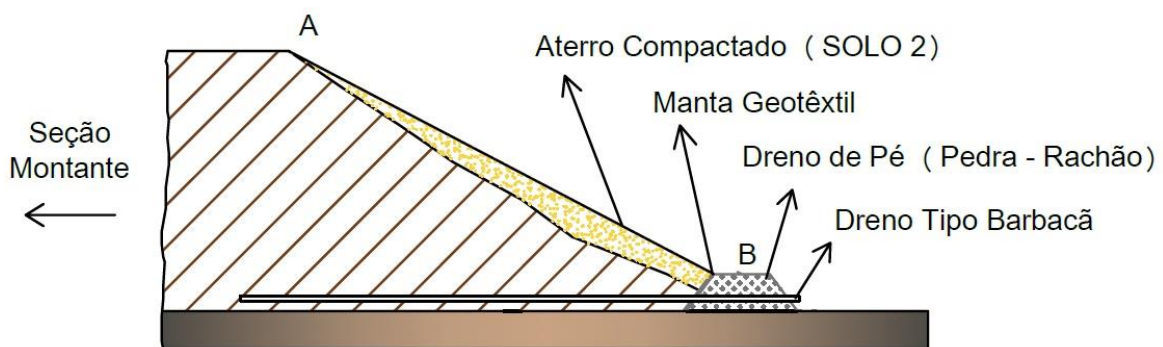
Afim de sanar o problema de falta de drenagem na barragem, foi elaborado um dreno de pé, qual deve ser executado em pedra rachão e cascalho, envolvido com manta geotêxtil.

Também devem ser instalados oito tubos de drenagem, do tipo barbacã, espaçados de cinco em cinco metros. Os tubos devem ser perfurados, envolvidos com manta geotêxtil.

O aterro deve ser compactado, constituído por solo da jazida local, considerando o perfil de solo argiloso. Após findada a execução, deve ser plantada grama em toda extensão do talude.

Na Figura 33, há uma breve explanação sobre os materiais e métodos supracitados para projeto.

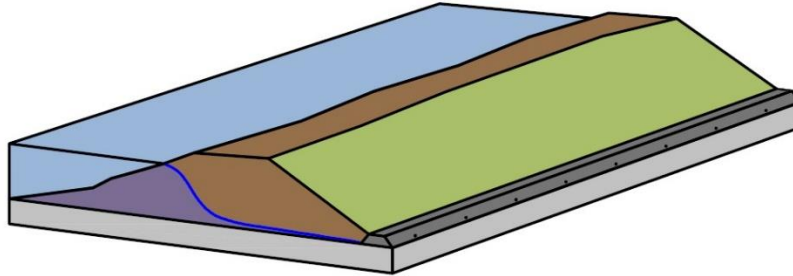
Figura 33 – Detalhe para os materiais e métodos que aplicados no projeto.



Como o aterro liga o Ponto B ao Ponto A, será criado no talude jusante da barragem, um perfil retificado, qual deve ser inteiramente gramado. Fato qual, em termos de inspeção, facilita a observação de qualquer manifestação patológica, qual a barragem venha apresentar.

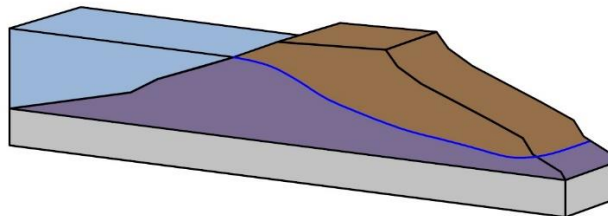
A Figura 34, ilustra o modelo tridimensional de como ficará o perfil jusante da barragem após concluída a execução da obra.

Figura 34 – Modelo tridimensional para a barragem de acordo com o projeto de reforma e reforço estrutural.



Detalhe que ao comparar a Figura 34, com a Figura 35, é possível visualizar um dos principais objetivos do projeto, cuja é de rebaixar o nível da linha piezométrica. Ressaltando que nas Figura 34 e 35, as linhas piezométricas demonstradas são ilustrações.

Figura 35 – Detalhe para o antigo perfil de elevação e linha piezométrica.



Afim de verificar a validade do projeto, foram realizados novos cálculos estruturais, repetindo o processo utilizado para obter os resultados reportados nas Figuras 26 a 31, porém considerando a aplicação do projeto de reforma nas seções geológico-geotécnicas.

Ressalta-se, que na versão estudantil do Software GeoSlope, somente é possível realizar simulações com até três tipos diferentes de materiais. Qual neste trabalho, foram utilizados Solo1, Solo 2 e base rochosa.

Portanto, para ser possível rodar as análises, para o dreno de pé, foi considerado o material da base rochosa (solo impenetrável). No caso do solo de aterro, foi considerado o mesmo material do Solo 1.

Para os novos cálculos, em termos de análise, não foram considerados critérios de rebaixamento do nível da linha piezométrica. Ou seja, a linha piezométrica foi considerada a de origem (solo saturado), além de também não considerar o efeito da aplicação dos drenos horizontais.

O fato de não ser contabilizado nos cálculos o rebaixamento da linha piezométrica, favorece a segurança do projeto e da análise, pois quanto mais drenado o solo estiver, mais alto será o coeficiente de segurança do talude.

Como critério de intervalo de área de análise, foi considerado a distância entre o ponto mais alto de encontro da água com o talude montante, até o ponto mais baixo do talude jusante, no fim do dreno de pé, de modo que as seções foram analisadas inteiramente.

Os critérios de análise considerando para o software, foram de a poropressão de linha piezométrica, o sentido de análise da esquerda para a direita e a metodologia de análise adotada foi a Morgenstern-Price. Ressaltando que as demais configurações, foram mantidos os padrões do software.

Logo, entre a Figura 36 e Figura 41, estão dispostos a modelagem geotécnica e o resultado da análise de estabilidade para cada seção, considerando a implementação do projeto de reforma e reforço. Detalhe que os tipos de materiais utilizados, seguem os mesmos padrões demarcados na Figura 25.

Figura 36 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção A”, considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de CS = 1,929.

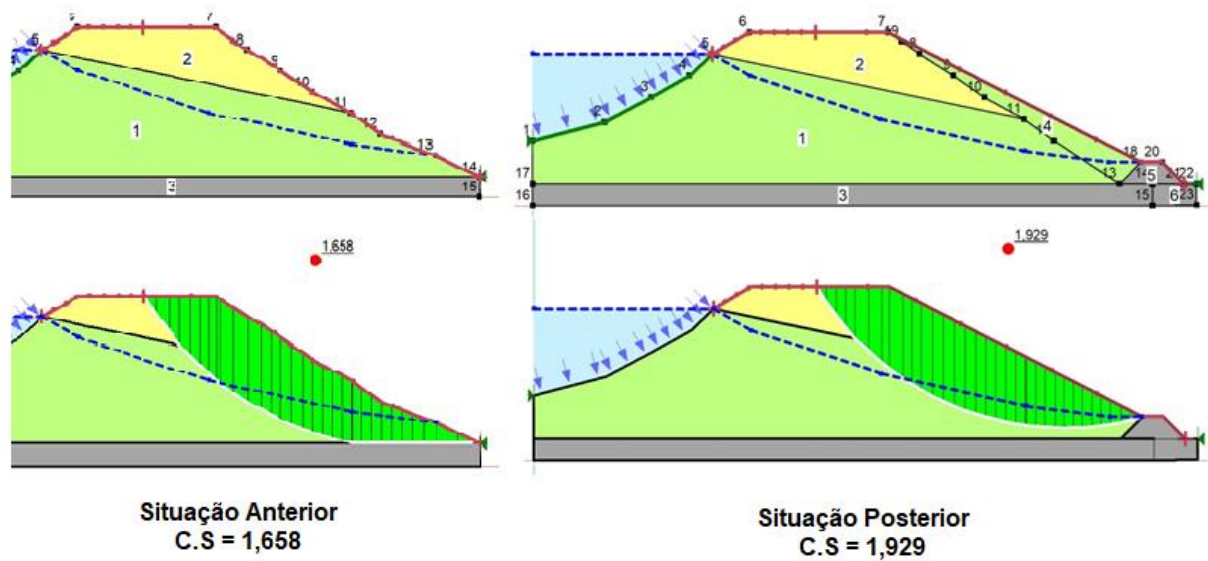


Figura 37 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção B”, considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de CS = 1,698.

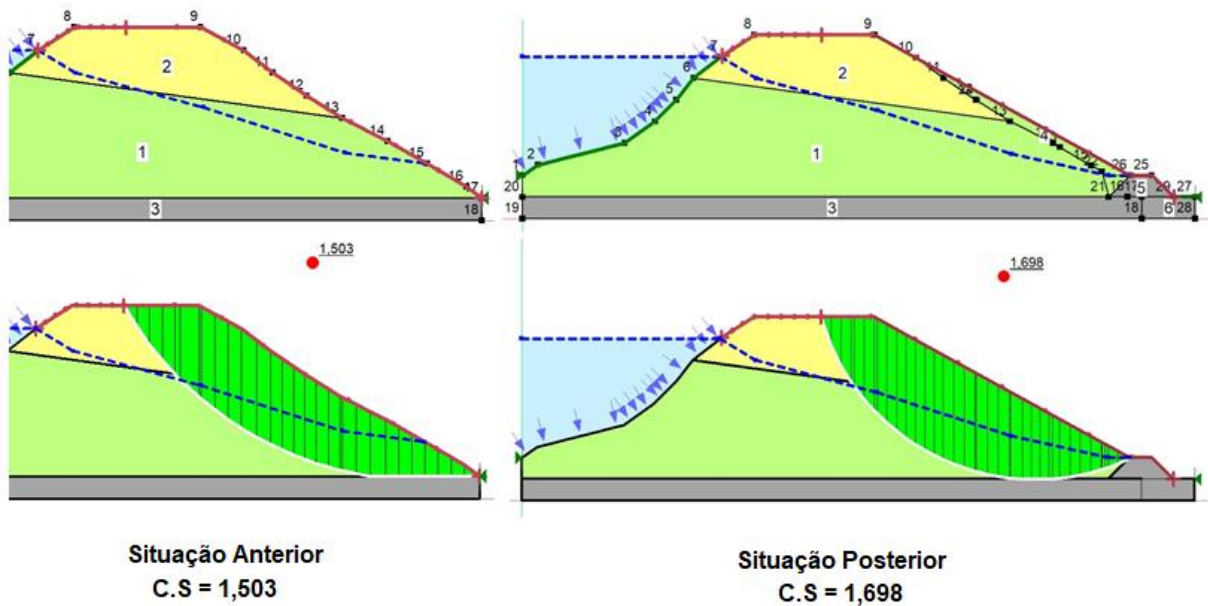


Figura 38 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção C”, considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de CS = 1,663.

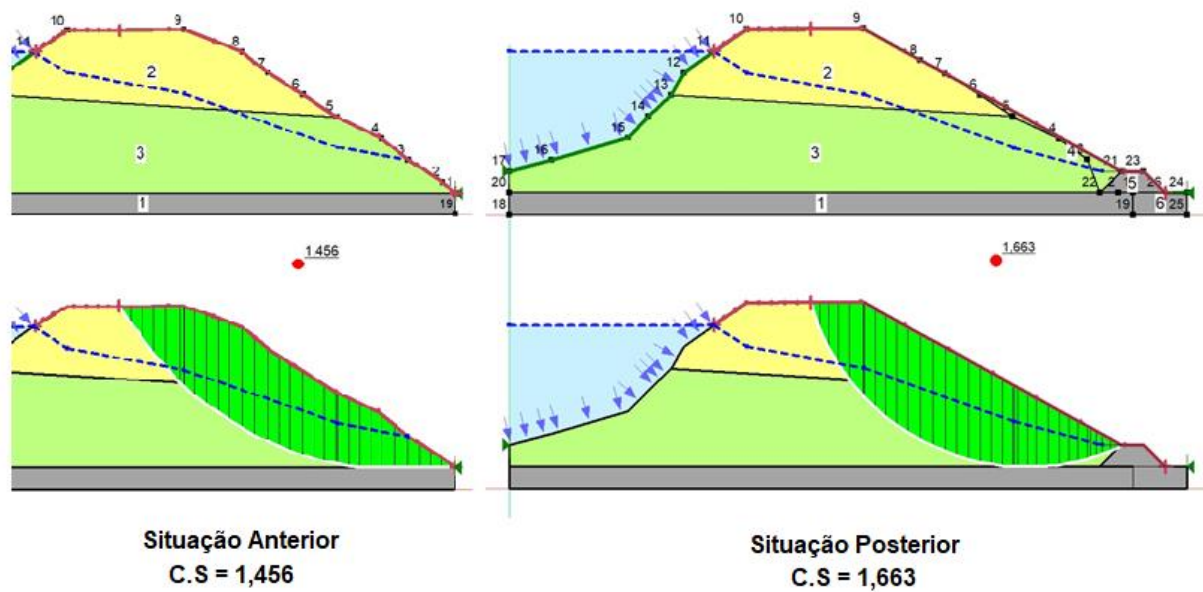


Figura 39 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção D”, considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de CS = 1,631.

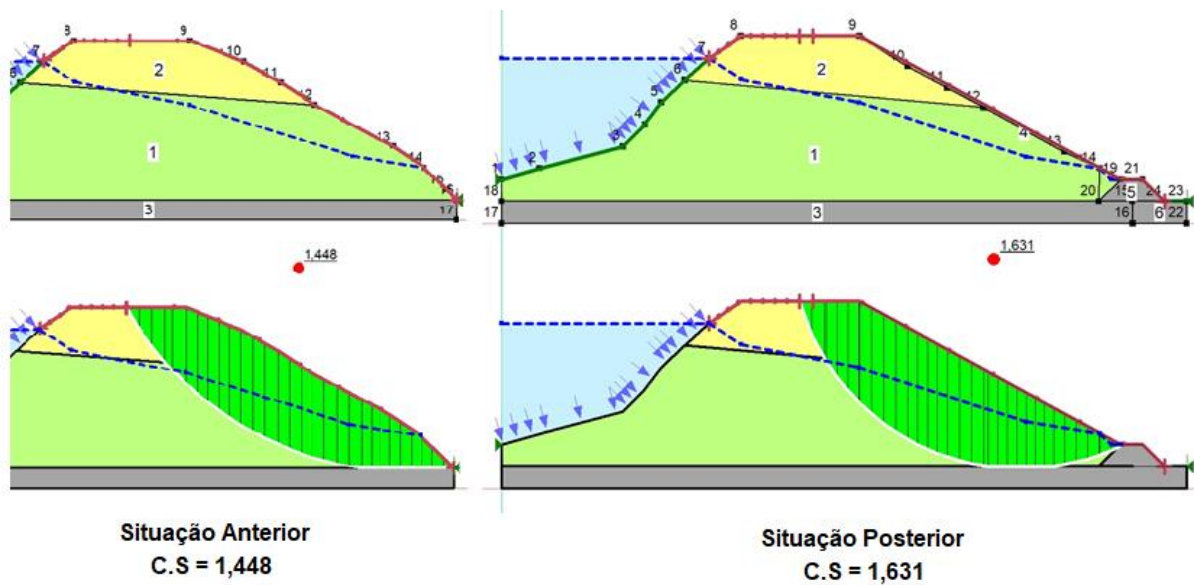


Figura 40 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção E”, considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de CS = 1,804.

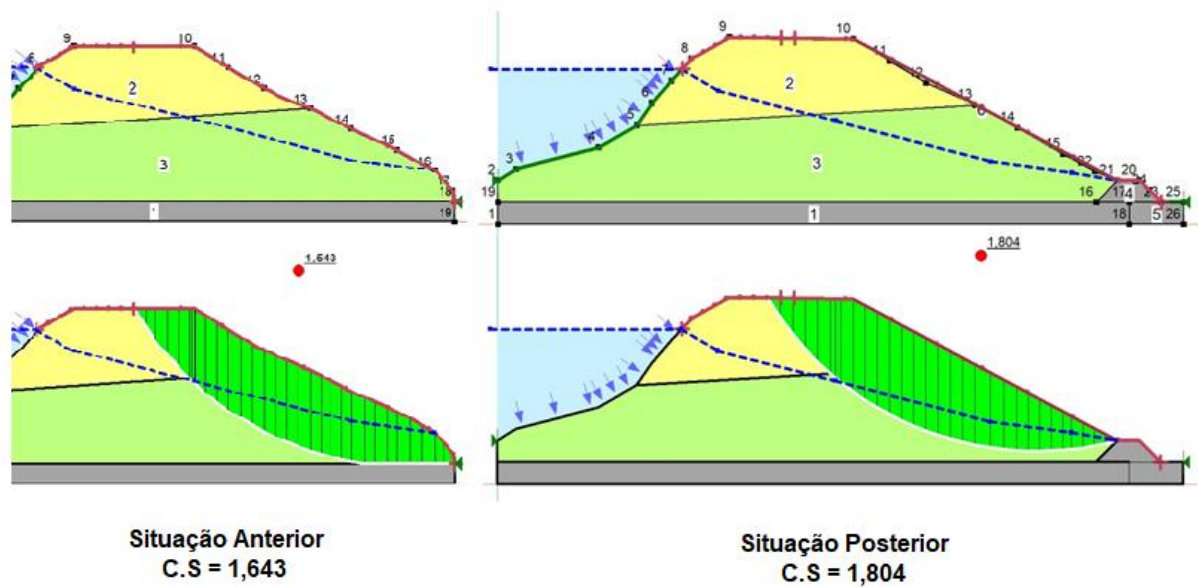
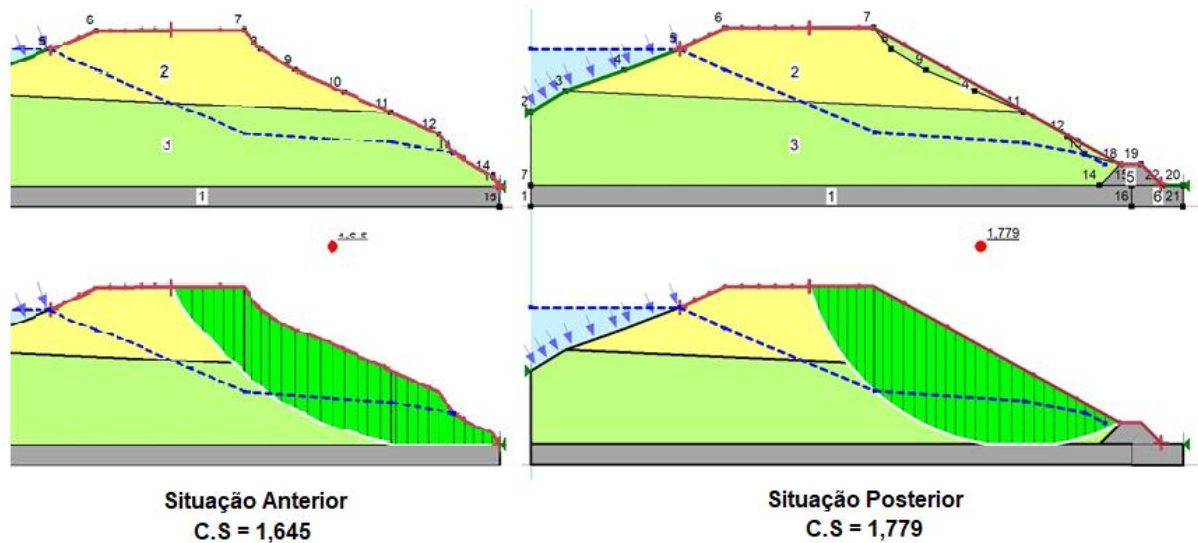


Figura 41 – Modelagem e resultado da análise de estabilidade para a “Seção F”, considerando o projeto de reforço proposto, obtendo o coeficiente de CS = 1,779.



Afim de analisar os resultados obtidos, na Tabela 6 estão reunidos os dados obtidos para os coeficientes de segurança.

Tabela 6 – Resumo dos resultados obtidos para os coeficientes de segurança.

Figura	Seção	C.S
36	A	1,929
37	B	1,698
38	C	1,663
39	D	1,631
40	E	1,804
41	F	1,779

Na Tabela 6, há uma comparação dos coeficientes de segurança obtidos nas análises anterior e posterior a aplicação do projeto de reforma.

Tabela 7 – Comparação e avaliação dos resultados obtidos, após cálculo dos novos coeficientes de segurança de acordo com o projeto de reforma e reforço.

Seção	C.S (antigo)	C.S (projeto)	Avaliação
A	1,658	1,929	OK
B	1,503	1,698	OK
C	1,456	1,663	OK
'D	1,448	1,631	OK
E	1,543	1,804	OK
F	1,645	1,779	OK
MÉDIA	1,542	1,750	OK

Analisando a Tabela 7, podemos constatar a consistência e validade do projeto proposto, pois o coeficiente de estabilidade encontrado para cada seção, foi superior à análise anterior.

Em termos de coeficiente de estabilidade médio global para barragem, chegou-se ao valor de $CS = 1,750$, configurando uma melhora de aproximadamente 13,5 %. Fato qual coloca a barragem em um patamar muito confortável em termos de segurança, estando praticamente 25,0% acima do padrão de segurança exigidos em norma.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o objetivo deste trabalho, foi elaborado o projeto fictício de uma barragem, cuja foi denominada como “Barragem X”.

Para o estudo de caso, foi pressuposto o total desconhecimento técnico sobre a referida barragem, objetivando retratar a realidade de um caso onde uma barragem apresenta manifestações patológicas.

Portanto, deu-se início a uma investigação geotécnica, qual baseou-se na investigação do solo do maciço, através de uma série de ensaios SPT.

Com os resultados das sondagens em mãos, junto as informações obtidas no levantamento planialtimétrico, foram traçadas as seções geológico geotécnicas, que ao serem analisadas, foi constatado que o solo da parte inferior do maciço, estava saturado pelo excesso de água, sendo o motivo pelo qual estaria ocorrendo a indevida percolação de água no talude jusante da barragem.

O próximo passo da investigação, foi de determinar o coeficiente de estabilidade de cada seção geológico-geotécnica, de modo a aferir a real condição de segurança da barragem. As análises foram feitas através da versão educacional do Software GeoStudio, da empresa GeoSlope.

Como resultado da análise, foi obtido como coeficiente global $CS = 1,542$, valor que apesar das manifestações patológicas constatadas, colocaria a barragem dentro do padrão de segurança exigido em norma (mínimo de $CS = 1,5$).

Porém, as seções C e D, cuja são as seções centrais da barragem, obtiveram resultados inferiores a $CS = 1,5$, configurando então a necessidade de intervenção de engenharia na barragem.

Portanto, foi elaborado um projeto de reforma e reforço estrutural da barragem, onde foi previsto a execução de dreno de pé, a aplicação de drenos do tipo barbacã, e a regularização do perfil do talude jusante, através da execução de aterro compactado e plantio de grama.

As modificações previstas no projeto, foram aplicadas nas seções geológico-geotécnicas, onde foram recalculados o coeficiente de segurança de cada seção.

Os resultados obtidos na reanálise, comprovaram a eficiência e validade da solução adotada no projeto, chegando ao resultado de $CS = 1,750$ como coeficiente de estabilidade médio global, valor qual afere para a barragem, uma margem de aproximadamente 25,0% acima do padrão de segurança exigido em norma.

Com a aplicação dos drenos, ocorrerá o rebaixamento da linha piezométrica, fato que somado a correta condução do fluxo de água no interior do maciço, será cessada a indevida percolação de água no talude jusante.

O talude jusante, passando pelo processo regularização, será beneficiado pela sobrecarga advinda do sobre aterro, fato que somada ao plantio de grama, evita a surgência de processos de erosão.

Com o talude regularizado e gramado, a inspeção visual da barragem, se torna muito mais eficiente e segura de ser realizada, pois o aparecimento de qualquer manifestação patológica, será facilmente constado.

Logo, conclui-se que a Barragem X, após passar por processo de reforma e reforço, estará pleno estado de segurança de funcionamento.

Detalhe que todos os desenhos e ilustrações presentes neste trabalho, foram elaboradas através do Software AutoCAD, considerando a utilização da versão estudantil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 barragens brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p. ISBN 978-85-7975-296-4

LOPES, José Demerval Saraiva; LIMA, Francisca Zenaide de. **Construção de pequenas barragens de terra**. Viçosa: CPT, 2008. 274 p. ISBN 85-7601-006-2.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: LTC, 2013. v. 2. ISBN 978-85-216-0525-6.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de (ed.). **Geologia de engenharia**. 1. ed. São Paulo: ABGE, 1998. 586 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**. Estabilidade de taludes. ABNT, 1991. Disponível em: www.licenciadorambiental.com.br. Acesso em: 24 maio 2020.

GEOSLOPE **Geo Studio 2020**. Versão 10.2.1.19666: GEOSLOPE International Ltd, 2020. Disponível em: www.geoslope.com. Acesso em: 08 maio 2020. (versão estudantil)

AUTODESK **AutoCAD 2018**. Versão 22.0.49.0: AUTODESK, 2018. Disponível em: www.autodesk.com.br Acesso em: 18 maio 2018. (versão estudantil)