

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

KIMBERLY EMANUELLI SANTIN

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS CONVENCIONAIS
CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES DO SOLO DE CASCAVEL – PR**

CASCAVEL - PR

2019

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

KIMBERLY EMANUELLI SANTIN

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS CONVENCIONAIS
CONSIDERANDO AS PROPRIEDADE DO SOLO DE CASCAVEL – PR**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador: Mestre Engenheiro Civil
Maycon André de Almeida.**

CASCAVEL - PR

2019

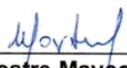
CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

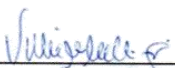
KIMBERLY EMANUELLI SANTIN

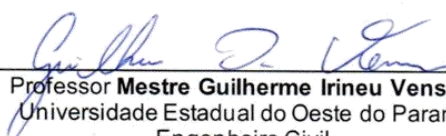
**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGENS CONVENCIONAIS
CONSIDERANDO AS PROPRIEDADES DO SOLO DE CASCAVEL – PR**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor Mestre Engenheiro Civil Maycon André de Almeida.

BANCA EXAMINADORA


Orientador Professor **Mestre Maycon André de Almeida**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil


Especialista Vanessa Wiebbelling
Engenheira Civil


Professor **Mestre Guilherme Irineu Venson**
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Engenheiro Civil

Cascavel, 09 de novembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial ao meu avô Mario Rojanski (in memoriam), que foi um grande exemplo de caráter, amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida, por iluminar o meu caminho, e ser o maior mestre e ponto de amparo durante os momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Marizete e Junior, que sempre me incentivaram e acreditaram que eu seria capaz de superar os obstáculos e por darem apoio financeiro e emocional, sendo os grandes responsáveis pela minha formação.

Ao meu irmão Lucas, pela amizade, por estar do meu lado e acreditar no meu potencial.

Ao meu namorado Thiago, por estar sempre presente, principalmente nos momentos difíceis com muita paciência, carinho e palavras de incentivo.

Ao professor e orientador, Mestre Engenheiro Civil Maycon André de Almeida, pela oportunidade, dedicação e paciência. Por sempre mostrar o caminho correto, contribuindo da melhor forma para a conclusão desta etapa.

A toda minha família e amigos, por todo o incentivo e momento de descontração.

Aos meus colegas de turma, pelo companheirismo ao longo desses anos de graduação.

A todos os professores que sempre transmitiram seus conhecimentos com muito profissionalismo e assim contribuíram com a minha formação acadêmica.

A todos vocês, o meu amor e minha eterna gratidão.

EPÍGRAFE

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo.

Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis."

José de Alencar.

RESUMO

O estudo de estabilidade de barragens é importante devido aos grandes riscos e danos que uma possível ruptura pode trazer a vidas humanas, aos animais e ao ambiente. Sendo assim, este trabalho apresenta fatores de segurança para barragens de terra, enrocamento e com uso de concreto considerando as propriedades do solo da cidade de Cascavel/PR, realizando uma avaliação da estabilidade de taludes a montante e jusante das barragens por meio do *software* GeoStudio, no módulo Slope/W, que determinou as superfícies críticas de ruptura pelo método do equilíbrio limite na condição de regime permanente. Para tal análise é necessário o conhecimento das características geotécnicas do local, assim como dos materiais empregados no corpo do maciço, tais dados foram extraídos do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz e de bibliografias, respectivamente, uma vez que o presente estudo não apresentou ensaios laboratoriais, as geometrias dos maciços foram adotadas conforme instruções de cálculos, adotando inclinações recomendadas pela Eletrobrás (2000) para os taludes. Com a análise dos fatores de segurança encontrados para a barragem de terra, sendo 3,53 a montante e 2,28 a jusante, apontando que é um modelo estável com um nível de segurança suficiente quando comparado com o fator mínimo de 1,50. Já a barragem de enrocamento apresentou fatores de 1,94 montante e 1,41 jusante, no caso a jusante ficou um pouco inferior do mínimo podendo ser modificado aumentando a inclinação. Por fim a barragem de concreto que apresentou valores de 1,77 a montante e 1,26 a jusante, verificando uma possível ruptura devido aos valores de jusante estarem próximos a 1,0, sendo o método não recomendado devido a estabilidade e também por fator econômico, uma vez que o concreto tem um custo maior comparado aos outros materiais.

Palavras-chave: Barragem de terra, enrocamento, concreto, equilíbrio limite, Slope/W, fator de segurança.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Função das barragens no Brasil.	17
Figura 2: Elementos básicos de uma barragem.	18
Figura 3: Modelo de barragem de solo compactado.	19
Figura 4: Modelo de barragem de enrocamento.	20
Figura 5: Modelo de barragem de concreto por gravidade.	21
Figura 6: Modelo de barragem com face de concreto.	22
Figura 7: Forças atuantes em uma fatia de uma superfície de deslizamento.	24
Figura 8: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Bishop.	25
Figura 9: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Spencer.	26
Figura 10: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Fellenius.	27
Figura 11: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Morgenstern - Price.	27
Figura 12: Curvas granulométricas do CEEF.	29
Figura 13: Índices de consistência do solo.	30
Figura 14: Parâmetros da argila.	32
Figura 15: Aba para escolha dos métodos.	36
Figura 16: Definição do nível de água.	37
Figura 17: Definição dos dados de entrada e saída.	37
Figura 18: Fator de segurança por meio da análise de Morgenstern-Price.	38
Figura 19: Relatório de diagrama da fatia pelo método de Morgenstern - Price.	38
Figura 20: Modelo barragem de terra.	39
Figura 21: Fatores de segurança críticos, barragem de terra.	40
Figura 22: Modelo barragem de enrocamento.	41
Figura 23: Fatores de segurança críticos, barragem de enrocamento.	42
Figura 24: Modelo barragem de concreto	43
Figura 25: Fatores de segurança críticos, barragem de concreto.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	31
Tabela 2: Parâmetros de resistência de enrocamentos de diferentes rochas.	33
Tabela 3: Parâmetros de resistência do enrocamento.....	34
Tabela 4: Fatores de segurança barragem de terra.	40
Tabela 5: Fatores de segurança barragem de enrocamento.	42
Tabela 6: Fatores de segurança barragem de concreto.....	44
Tabela 7: Comparativo dos fatores de segurança.	44

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Largura da crista.....	35
Equação 2: Base da barragem	35
Equação 3: Base do núcleo	35
Equação 4: Espessura da face de concreto.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CEEF	Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
FS	Fator de Segurança
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
PCHs	Pequenas Centrais Hidrelétricas
RBS	Relatório de Segurança em Barragens
UHE	Usinas Hidrelétricas de Energia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
1.1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.2.1 Objetivos específicos	14
1.3 JUSTIFICATIVA	14
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE	15
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
CAPÍTULO 2	17
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1.1 Barragens	17
2.1.2 Tipos de barragens	18
2.1.2.1 Barragem de terra	19
2.1.2.1 Barragem de enrocamento	20
2.1.2.3 Barragem concreto	21
2.1.3 Estabilidade global de barragens	22
2.1.3.1 Esforços atuantes	23
2.1.3.2 Tipo de fundação	23
2.1.4 Método de análise de estabilidade	24
2.1.4.1 Método de Bishop	25
2.1.4.2 Método de Spencer	25
2.1.4.3 Método de Fellenius	26
2.1.7.3 Método Morgenstern-Price	27
CAPÍTULO 3	28
3.1 METODOLOGIA	28
3.1.1 Tipo de estudo e local de pesquisa	28
3.1.2 Caracterização do solo	29
3.1.3 Caracterização dos materiais	31
3.1.3.1 Barragem de terra	31
3.1.3.2 Barragem de enrocamento	32
3.1.3.3 Barragem de concreto	34
3.1.4 Dimensionamento das barragens	34
3.1.5 Software Geostudio	36
CAPÍTULO 4	39

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
4.1.1 Modelagem numérica	39
4.1.1.1 Barragem de terra	39
4.1.1.2 Barragem de enrocamento	41
4.1.1.3 Barragem de concreto.....	42
4.1.2 Comparação dos fatores de segurança entre as barragens.....	44
CAPÍTULO 5.....	46
5.1 CONCLUSÕES.....	46
CAPÍTULO 6.....	48
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS	49
ANEXOS	51

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Uma barragem, segundo Costa (2012), é uma barreira artificial posta sobre o curso de um rio para represar suas águas, podendo ser utilizada de inúmeras formas como, por exemplo, em usinas hidrelétricas; no abastecimento de indústrias e cidades; na irrigação; no controle de secas e de enchentes; na piscicultura; e na disposição de rejeitos.

No Brasil, a construção de barragens teve início visando o armazenamento de água, como medida de prevenção depois de uma severa seca que atingiu a região nordeste do país no final do século XIX. Na mesma época, no sudeste brasileiro, eram construídas as primeiras barragens destinadas ao uso hidrelétrico. Atualmente, o Brasil está entre os países com o maior número de barragens construídas devido ao grande potencial hidrelétrico, além de inúmeras obras destinadas aos demais usos.

Apesar dos inúmeros benefícios oriundos da construção de uma barragem, deve-se também levar em conta os grandes riscos que ela pode gerar, considerando que em um possível caso de ruptura da estrutura as consequências serão catastróficas, gerando danos ambientais, econômicos e até mesmo para a vida humana. Devido a isso, é de suma importância aprofundar cada vez mais, o estudo de segurança e estabilidade em barragens.

Se tratando da análise de estabilidade de uma barragem é necessário conhecer as características geotécnicas do local e os índices físicos dos materiais que serão empregados, visto que tais dados são utilizados para obter um fator de segurança, podendo assim assegurar a estabilidade de uma barragem, caso os fatores encontrados forem iguais ou superiores a valores referenciados.

Devido a problemática gerada pela ruptura do corpo de uma barragem, o estudo teve como objetivo analisar o fator de segurança para os três métodos construtivos mais usuais, sendo eles de solo compactado, enrocamento e concreto, para isso considerou-se os dados do solo do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz e de bibliografias para a situação de enrocamento e de concreto, assim verificou-se a diferença entre os fatores de segurança, apontando o método mais seguro.

1.2 OBJETIVO GERAL

Comparar a estabilidade de barragens construídas pelos três métodos convencionais, sendo eles, solo compactado, concreto e enrocamento, de modo que possa verificar qual é o método mais seguro e estável, considerando a análise geotécnica do solo da cidade de Cascavel – PR.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Pesquisar em bibliografias características dos materiais construtivos utilizados na construção de barragens de concreto, solo e de enrocamento.
- b) Realizar modelagem numérica de barragens no *software* Geoslope, verificando o fator de segurança para cada método construtivo.
- c) Avaliar a melhor solução considerando estabilidade.

1.3 JUSTIFICATIVA

Barragens adequadamente projetadas, construídas e conservadas contribuem significativamente para atender necessidades de fornecimento de água e energia. Para constatar a crescente demanda dessas estruturas, somente do estado do Paraná, e considerando apenas com âmbito para geração de energia e abastecimento, foi liberada em 2018, a construção de 14 usinas hidrelétricas no estado, sendo pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e usinas hidrelétricas de energia (UHE), que variam desde pequenas centrais privadas para atender o consumo de empresas, até empreendimentos para abastecer milhares de residências.

Porém, além dos inúmeros benefícios, problemas envolvendo barragens infelizmente tornaram-se assunto recorrente em noticiários, devido a casos de rompimento dessas estruturas. O fato mais recente de rompimento ocorreu em janeiro de 2019 em uma barragem de rejeitos da Vale, em Brumadinho – MG, que de acordo com nota divulgada até o dia 1 de fevereiro já haviam confirmado 110 mortes e 238 pessoas desaparecidas, além da perda de vidas humanas, teve 147,38 hectares de área de vegetação impactada, morte de animais e o rio Paraopeba também foi atingido, afetando a qualidade da água.

A agência nacional de águas (ANA) reúne anualmente dados para a realização do relatório de segurança em barragens (RSB), o qual apresentou nos últimos anos uma média de três acidentes a cada ano envolvendo rompimento de barragens. Além dos acidentes, são compilados números de incidentes que são caracterizados por pequenos problemas no funcionamento das barragens, que se não controlados podem levar a danos catastróficos, segundo o relatório, tais incidentes apresentam uma média de sete por ano.

Desta forma, é necessário, cada vez mais, aprofundar-se nos estudos de estabilidade de barragens, a fim de garantir a máxima eficiência da estrutura a fim de evitar acidentes futuros. Atualmente, o avanço no aperfeiçoamento de programas computacionais tem garantido estudos de modelos numéricos para hipóteses de fatores de segurança nos diferentes tipos de barragem.

Devido a essa problemática, este trabalho por meio de uma modelagem numérica em *software*, avaliou os fatores de segurança para barragens de concreto, enrocamento e solo compactado, a fim de apresentar o método com coeficiente mais seguro e melhor relação custo/benefício, considerando dados reais do solo da cidade de Cascavel - PR.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Considerando as características de resistência ao cisalhamento do solo de Cascavel – PR, assim como do solo compactado, do enrocamento e do concreto, qual método construtivo apresenta maior segurança para a construção de barragens?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

A estabilidade de uma barragem está diretamente ligada ao fator de segurança, sendo este fator um valor numérico que estima o quanto a resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura supera aos esforços solicitantes. O fato de cada tipo de material apresentar propriedades e índices diferentes, faz com que os esforços solicitantes não sejam sempre os mesmos, assim variando também o fator de segurança. Desta forma é necessário analisar as características de cada material, para assegurar se o tipo de solo é capaz de suportar tal estrutura.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

No estudo de barragens é possível abranger inúmeras variáveis, dentre as principais estão a topografia; hidrologia; geotecnia; disponibilidade dos materiais; e aspectos econômicos; que segundo relatório da Eletrobrás (2000) são os fatores de maior importância para a escolha do tipo de estrutura e material a ser empregado na obra.

O ponto principal deste estudo foi a comparação de estabilidade de barragens convencionais de maiores utilizações, limitou-se assim, em um estudo geotécnico, com a caracterização dos índices físicos dos materiais empregados através de dados referenciados e da análise global geotécnica do solo da cidade de Cascavel – PR.

Com os dados de resistência ao cisalhamento do solo e dos materiais, por meio de modelagem em *software*, verificou-se o fator de segurança para cada modelo, desta forma identificou-se uma variação do fator de segurança entre os modelos adotados e apontando o método mais seguro e estável.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1 Barragens

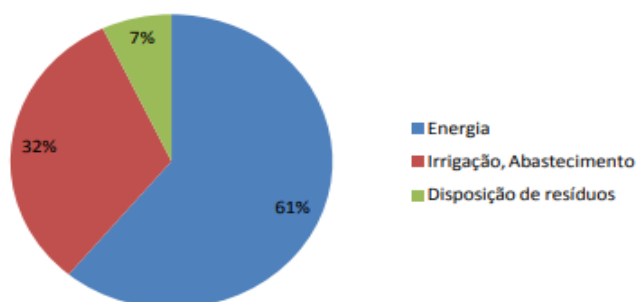
Barragem pode ser definida como um elemento estrutural, construída transversalmente na direção do escoamento da água, criando um reservatório artificial de acumulação de água (COSTA, 2012).

Segundo Ramos (2009), as barragens podem ser divididas quanto a sua finalidade em dois grupos, as de regularização e as de retenção, definidas pelo autor da seguinte forma:

- Barragens de regularização visam regularizar o regime hidrológico, reduzindo a vazão dos rios com o armazenamento de água nos períodos de cheia e aumentando a vazão em épocas de seca de forma que o nível da água seja constante. Tais barragens podem ser aplicadas em usinas hidrelétricas, para o abastecimento de água, irrigação, navegação e até mesmo para o turismo.
- Barragens de retenção tem a função de controlar inundações, podendo ocorrer uma retenção temporária de cargas e sua liberação posterior por escoamento de forma que se tenha um controle da vazão evitando danos. Essas barragens são usadas para proteção contra cheias e retenção de sedimento ou resíduos industriais.

As barragens surgiram, inicialmente, para uso dos recursos hídricos para consumo humano e combate as secas, sendo hoje utilizadas para fins diversos. Sayão (2009) cita que devido ao grande potencial hidrelétrico, a maioria das barragens construídas no Brasil atualmente, são destinadas à geração de energia, conforme Figura 1.

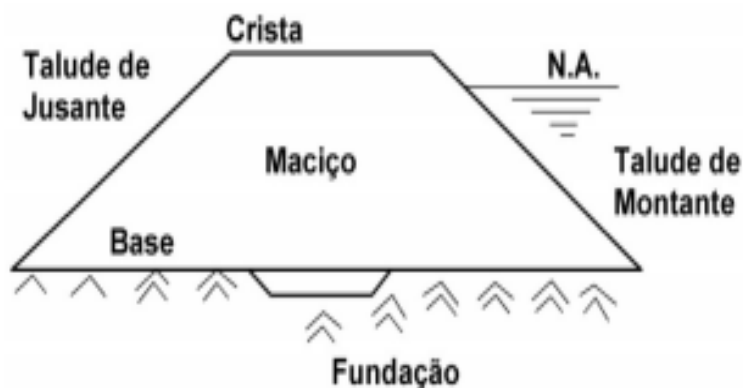
Figura 1: Função das barragens no Brasil.



Fonte: Sayão (2009).

Segundo Costa (2012), as barragens de terra possuem elementos básicos que as constituem como um todo, sendo eles: talude jusante, crista, talude montante, maciço, base e fundação. Estes elementos podem ser considerados em quase todos os modelos de barragens e são representados pela Figura 02.

Figura 2: Elementos básicos de uma barragem.



Fonte: Adaptado por Marangon (2004).

2.1.2 Tipos de barragens

Costa (2012) divide os tipos de barragens em dois grandes grupos, as convencionais e as não convencionais. O método de barragens convencionais apresenta mecanismo de construção com amplo conhecimento, sendo o método mais antigo e utilizado, fazendo parte deste grupo as barragens de solo; de enrocamento; as de concreto; e mistas que apresentam diferentes materiais ao longo da seção. No segundo grupo estão as não convencionais que são de pouca utilização, porém, estão sendo desenvolvidas com a evolução tecnológica, sendo o principal exemplo as barragens de gabião, utilizadas para obras de pequeno porte.

A prática atual de projetos tem adotado, de preferência, os seguintes tipos de barragens (ELETROBRÁS, 2000):

- Barragem de terra com seção homogênea em solo;
- Barragem de enrocamento com núcleo impermeável;
- Barragem de concreto convencional ou compactado a rolo (CCR) em seção do tipo gravidade;

Segundo Sayão (2009), as barragens mais comuns no Brasil são as de terra e enrocamento, correspondendo a 82%, onde nos 18% restantes encaixam-se as demais barragens, principalmente as de concreto. Devida a maior utilização desses tipos de barragens,

foi fator relevante na escolha da abordagem neste estudo, sendo assim os itens a seguir têm o intuito de descrever as principais características dos modelos selecionados.

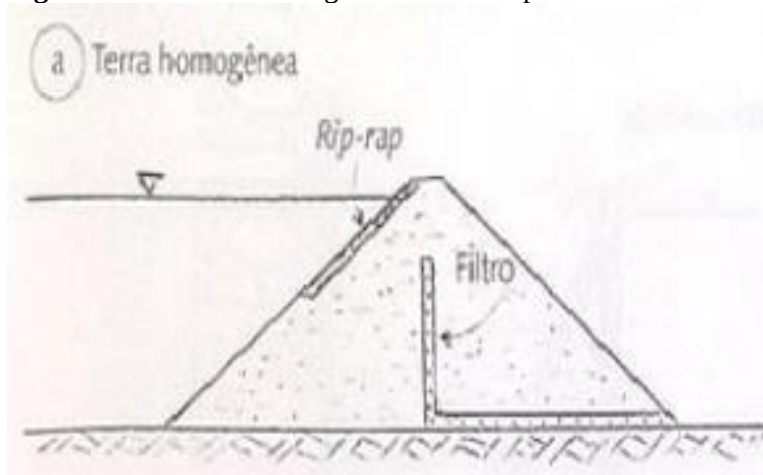
2.1.2.1 Barragem de terra

As barragens de terra apresentam o método construtivo mais antigo, um dos primeiros registros é de uma barragem construída no Egito há aproximadamente 6.800 anos, com 12 metros de altura, que se rompeu por transbordamento. As barragens de terra eram homogêneas, o transporte do material era manual e a compactação feita por pisoteamento (MASSAD, 2013).

Ainda de acordo com Massad (2013), as barragens de solo compactado são as mais utilizadas no Brasil, devido à disponibilidade do material, as condições de relevo e o tipo de solo. Além disso, o autor cita que a escolha desse tipo de barragem é favorecida por poderem ser construídas sobre solos moles e permitem fundações mais deformáveis quando comparadas a outras barragens.

Segundo Costa (2012), uma barragem de terra é homogênea quando tem predominância de um único material, na maioria das vezes de característica argilosa, e podem apresentar alguns materiais como filtros, *rip-rap*, como pode ser verificado na Figura 03.

Figura 3: Modelo de barragem de solo compactado.



Fonte: Costa (2012).

Pelo fato das barragens de solo compactado serem construídas, na grande maioria, com a utilização de apenas um tipo de material, há necessidade de que os taludes apresentem

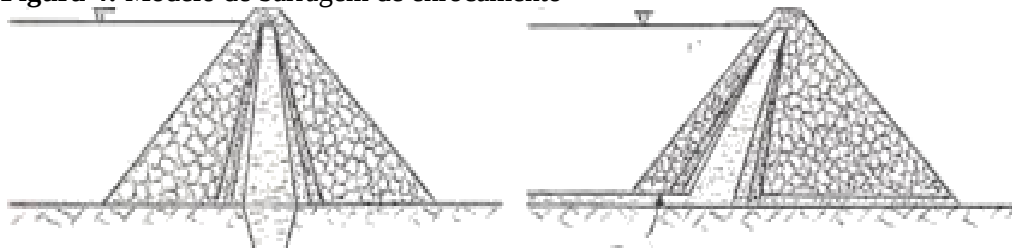
uma inclinação suave, permitindo maior controle de estabilidade. Stephens (2011) cita que essa inclinação é recomendável que seja de 1:3 a montante e 1:2 a jusante.

2.1.2.1 Barragem de enrocamento

Segundo Costa (2012), barragens de enrocamento empregam-se blocos de rochas de vários tamanhos juntamente com uma membrana impermeável na face do talude ou um núcleo impermeável. Geralmente, essa obra é comum em regiões com alto custo para obtenção de concreto, falta de materiais terrosos e fácil obtenção de rochas. O tipo de fundação que tolera estas obras nem sempre tolera obras de concreto.

O modelo mais comum de barragem de enrocamento é o que apresenta um núcleo argiloso, onde segundo Costa (2012) prevalece o material rochoso e a vedação da água é feita pelo núcleo de argila, sendo separado do enrocamento por uma zona de transição evitando o carregamento de materiais finos, tal método pode ser com o núcleo centralizado ou inclinado a montante, como mostra a Figura 04.

Figura 4: Modelo de barragem de enrocamento



Fonte: Costa, 2012.

O uso do enrocamento em barragens iniciou-se devido à carência de materiais terrosos. Nas primeiras construções os blocos de rochas eram apenas empilhados sem nenhuma compactação, por consequência, muitas barragens sofreram recalques no primeiro enchimento devido à saturação. Atualmente, são utilizados rolos compactadores vibratórios, obtendo assim uma ligação entre o material rochoso (MASSAD, 2003).

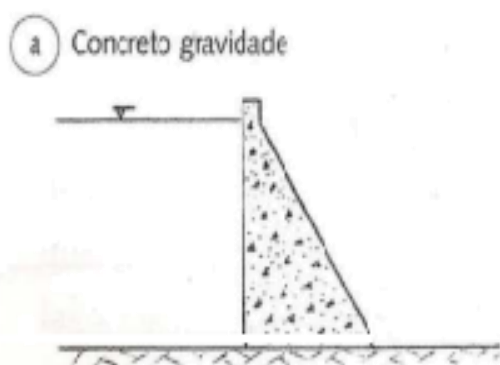
A utilização de materiais rochosos neste tipo de barragem possibilita a construção de taludes mais íngremes, diferentemente do que acontece em barragens de solo homogêneo que devem apresentar taludes relativamente planos.

Segundo Costa (2012), tanto a barragem de terra como a enrocamento exibem um comportamento semiplástico e a pressão exercida em uma ponta da fundação depende da espessura da barragem nesse ponto.

2.1.2.3 Barragem concreto

O modelo de barragem de concreto mais comum é o de gravidade (Figura 05). Segundo Moliterno (1995), tem sua estabilidade assegurada pelo peso próprio da estrutura, sendo que o mesmo deve ser superior aos esforços que a estrutura esteja submetida, assim garantida a sua função de barrar uma grande massa de água.

Figura 5: Modelo de barragem de concreto por gravidade.



Fonte: Costa (2012).

O perfil de uma barragem de gravidade é essencialmente triangular, deste modo evita sobrecargas e garante a estabilidade. Porém, algumas barragens podem apresentar suaves curvas no plano por razões hidráulicas e econômicas, e sem ferir a estabilidade da estrutura (NOVAK *et al*, 2004).

Segundo Costa (2012), a barragem de gravidade funciona como uma estrutura monolítica, rígida e coesa, de forma que as pressões que ocorrem ao longo de toda a fundação são em função do peso total distribuído ao longo dela.

Mas ainda existem outros modelos, como o de gravidade aliviada tendo estrutura mais leve a fim de imprimir menor pressão as fundações e economizar concreto; as de contraforte que são ainda mais leves que as de gravidade aliviada, concentrando os esforços causados pela pressão hidrostática em uma pequena área da fundação; as de arco, onde as curvaturas ocorrem em duplo sentido com parte das pressões hidráulicas transmitidas para as ombreiras; e as de concreto rolado ou compactado, sendo uma barragem de gravidade em que o concreto é espalhado por trator de esteira e depois compactado.

Se tratando das características do concreto a ser empregado em barragens de gravidade, na maioria dos casos não é necessário utilizar um concreto com resistência tão alta

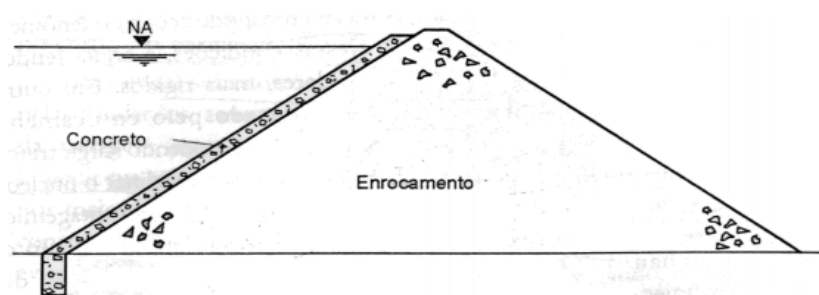
como em outras construções, pelo fato das barragens apresentarem grandes bases em relação à altura. Com isso os tipos de concreto mais usados nessas estruturas são o ciclópico e concreto compactado a rolo (CCR) (MILANI FILHO, 2003).

Milani Filho (2003), relata que o CCR tem basicamente as mesmas características do concreto convencional, com diferença na dosagem por ter menos água do que o traço tradicional, sendo mais seco e com consistência que possibilita a sua compactação por máquina.

Segundo o mesmo autor, no que diz respeito a resistência do concreto, o CCR apresenta uma resistência de até 30% maior. O CCR apresenta uma massa específica ligeiramente maior do que a do concreto convencional. Tal método tem sido o mais utilizado devido ao baixo consumo de cimento e mais rapidez na construção.

O concreto pode ser empregado também, em barragens com apenas uma face de concreto, comumente utilizado no Brasil, como enrocamento com face de concreto, conforme mostra a figura 6, tal método teve um grande impulso na década de 70, sendo uma barragem segura a longo prazo, principalmente ao que diz respeito a sismos intensos, prova disso é a BEFC de Zipingpu com 156 metros de altura concluída em 2006 na província de Sichuan (China), onde em maio de 2008 foi registrado um abalo sísmico de 8,0 na escala Richter, com epicentro cerca de 20 km da barragem, apesar dos danos na laje e na crista da barragem, sua estrutura permaneceu estável (CRUZ, 2014).

Figura 6: Modelo de barragem com face de concreto.



Fonte: Costa (2012).

2.1.3 Estabilidade global de barragens

Costa (2012), cita que a estabilidade de uma barragem deve ser verificada e mantida em três fases solicitantes, sendo elas ao final da construção, ao regime permanente de

operação e ao rebaixamento do reservatório. A estabilidade estará assegurada sempre que fatores de segurança obtidos nas análises forem iguais ou superiores a valores referenciais definidos com base em estudos de situações reais.

2.1.3.1 Esforços atuantes

As forças atuantes em barragens são: empuxos horizontais, empuxos verticais e peso próprio da estrutura. Calcula-se a estabilidade de barragens principalmente aos esforços de escorregamento, tombamento e cisalhamento.

A estabilidade ao tombamento considera o somatório de todos os momentos atuantes em relação ao pé da barragem, adotando um coeficiente de segurança próximo a 2. No caso do escorregamento calcula-se as forças de atrito entre barragem e o solo e analisa a somatória das forças horizontais, em geral tem um coeficiente de segurança próximo a 1,5. Por fim, no caso de cisalhamento ao longo da base, com coeficiente de segurança próximo a 1,3.

2.1.3.2 Tipo de fundação

De acordo com as características predominantes dos materiais presentes no maciço da fundação, os estudos de estabilidade de uma barragem podem ser divididos em três grupos:

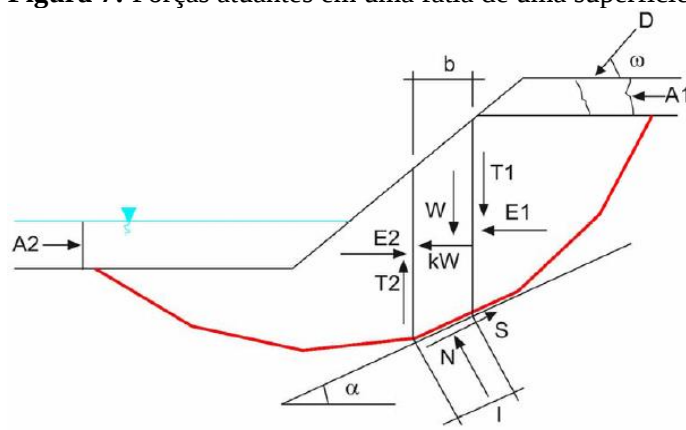
1. Fundações em rochas, as quais não apresentam, em geral, problemas graves.
2. Fundações em solos permeáveis (solos arenosos ou com pedregulhos): nesse caso, deve-se considerar dois aspectos principais: quantidade de água perdida por percolação e grandeza das forças de percolação; esse último aspecto assume especial importância nos casos de fundações constituídas por areias limpas e saturadas (geralmente finas e uniformes) de baixa compacidade.
3. Fundações em solos impermeáveis (solos essencialmente argilosos), onde os principais problemas são associados à estabilidade contra a ruptura por cisalhamento e aos assentamentos excessivos.

2.1.4 Método de análise de estabilidade

Massad (2003), cita que os métodos analíticos para estudo de estabilidade atualmente em uso, baseiam-se no método de equilíbrio limite. Tal método permite a determinação do fator de segurança, usando dados como resistência do solo e propriedades do maciço. As análises constituem em determinar se existe resistência suficiente para suportar as tensões de cisalhamento.

De acordo com Usace (2003), a maioria dos métodos de equilíbrio limite divide a estrutura em diversas fatias verticais e aplica as equações de equilíbrio para cada uma isoladamente. Esse processo caracteriza o método das fatias que parte da definição de uma superfície de deslizamento para a massa de talude, essa superfície é dividida em um número de fatias verticais, conforme Figura 7, a qual mostra as forças que agem em uma fatia genérica.

Figura 7: Forças atuantes em uma fatia de uma superfície de deslizamento.



Fonte: GeoSlope.

Onde:

W : peso da fatia

kW : força horizontal para incorporar efeitos sísmicos

N : força normal à base da fatia

S : força tangencial à base da fatia ($S = \tau l$)

$E1, E2$: componente horizontal das forças entre as fatias

$T1, T2$: componente vertical das forças entre as fatias

D : força aplicada na superfície

b : largura da fatia

l : comprimento da base da fatia

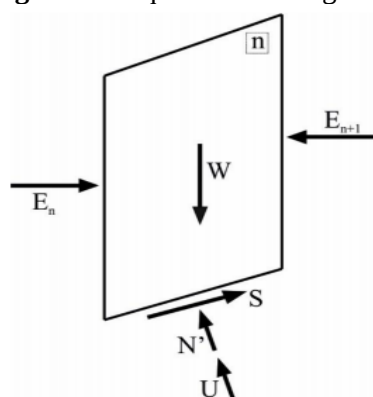
$A1, A2$: forças hidrostática

Dentre os principais métodos desenvolvidos, pode-se citar Fellenius (1927), Bishop simplificado (1995), Spencer (1967) e Morgenstern-Prince (1965). De acordo com GEO-SLOPE (2008) estes métodos são bastante similares, as diferenças entre eles dependem de: quais as equações estáticas são consideradas e satisfeitas; quais as forças entre fatias são incluídas e qual a relação considerada entre as forças cisalhante e normal entre as fatias. Dentre os mais rigorosos estão o Spencer e Morgenstern-Prince.

2.1.4.1 Método de Bishop

Este método inclui os esforços normais de interação, mas ignora os esforços cisalhantes entre fatias. Ele considera a resultante das forças interlamelares horizontal, entretanto considera as forças cisalhantes entre lamelas como nulas, apresentada na Figura 8.

Figura 8: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Bishop.



Fonte: Vilhete (2017)

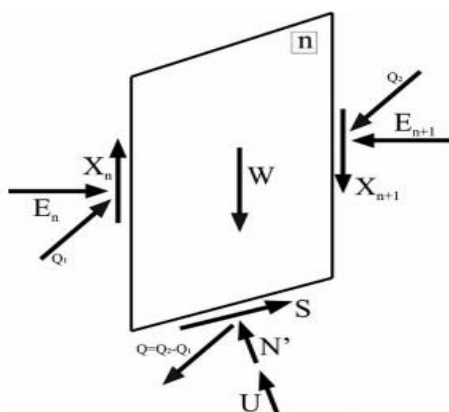
Whitman (1967) e Wright (1975) citam a ocorrência de problemas com esse método, quando a superfície de ruptura apresenta uma inclinação acentuada próxima ao pé do talude. Apesar disso, este método apresenta valores próximos dos valores mais rigorosos como Spencer e Morgenstern - Price

2.1.4.2 Método de Spencer

Este método é classificado como o mais rigoroso, pois considera todas as equações de equilíbrio de forças e momentos, tomando como paralelas as resultantes das forças de interação aplicadas a cada fatia, o esquema genérico da fatia está demonstrado na Figura 9.

Este método foi criado para rupturas circulares, e mais tarde adaptado para outros tipos de superfícies.

Figura 9: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Spencer.



Fonte: Vilhete (2017).

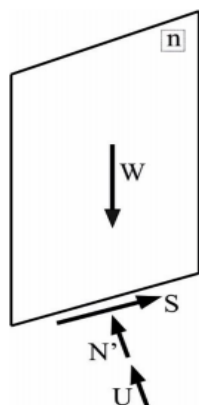
Horst (2007) relata que para ter o resultado do FS final, os cálculos devem se repetir até que o equilíbrio de forças e momentos seja efetuado para todas as fatias, se tornando um valor único. O método Spencer é considerado o mais complexo e por isso perde espaço na área de engenharia, onde se opta por um método mais simples, porém, preciso também, como por exemplo, o método de Bishop simplificado.

2.1.4.3 Método de Fellenius

Segundo Gerscovich (2016) trata-se de um método conservador e descrito como o mais simples dentre os métodos mais utilizados, pelo fato de determinar o fator de segurança através de uma equação linear, não sendo necessário processo iterativo como ocorre nos outros métodos.

O método foi desenvolvido por Fellenius (1922) a partir de uma análise estática do volume dividido em fatias de um certo material, que deve estar situado acima de uma superfície que poderia escorregar sua seção circular. O peso em cada fatia é decomposto nas direções normal e tangencial à superfície de ruptura, como esquematizado na Figura 10, e o fator de segurança é calculado pelo equilíbrio de momentos.

Figura 10: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Fellenius.



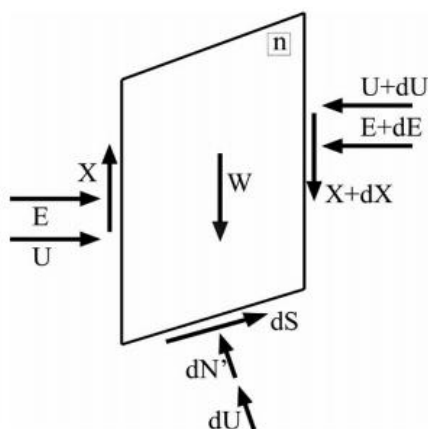
Fonte: Vilhete (2017).

Duncan e Wright (1980) afirmam que esse procedimento que satisfaz apenas uma condição de equilíbrio, pode chegar a apresentar um fator de segurança até 50% menor que o valor correto em casos de encostas verticais com poropressão alta.

2.1.7.3 Método Morgenstern-Price

É um método considerado rigoroso que admite superfície de ruptura qualquer e satisfaz todas as condições de equilíbrio de forças e momentos, sendo considerado o método mais geral de equilíbrio limite. A determinação dos cálculos deve ser feita apenas por programas computacionais, pois este método necessita de um grande número de iterações. A massa de solo é subdividida em fatias infinitesimais e os esforços atuantes em cada fatia estão representados na Figura 11.

Figura 11: Esquema de fatia genérica utilizada pelo método de Morgenstern - Price.



Fonte: Vilhete (2017).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

Nesse capítulo está descrito o roteiro de pesquisa, apresentando tipo e local onde ela aconteceu, descrição dos dados utilizados e os critérios para análise.

3.1.1 Tipo de estudo e local de pesquisa

Este trabalho consiste em uma abordagem quantitativa, devido à utilização de dados encontrados em bibliografias, fazendo uma simulação numérica em *software* considerando os três modelos de barragens.

Um estudo pode ser caracterizado quanto ao seu tipo de abordagem, sendo qualitativa, quantitativa ou até mesmo um misto dos dois métodos. Segundo Bogdan e Biklen (2003), o método qualitativo envolve a obtenção de dados descritivos, obtidos no contato direto do pesquisador com a situação estudada, enfatiza mais o processo do que o produto e se preocupa em retratar a perspectiva dos participantes, entre as várias formas que pode assumir uma pesquisa qualitativa, destacam-se a pesquisa do tipo etnográfico e o estudo de caso. Já a pesquisa quantitativa busca a validação das hipóteses mediante a utilização de dados estruturados, com análise de casos representativos, recomendando um curso final da ação. Ela quantifica os dados e generaliza os resultados da amostra para os interessados.

A abordagem qualitativa proporciona uma melhor visão e compreensão do contexto do problema, enquanto a quantitativa procura quantificar os dados e aplica alguma forma da análise. A pesquisa qualitativa pode ser usada também, para explicar os resultados obtidos pela pesquisa quantitativa (MALHOTRA, 2001).

Cascavel é uma cidade do Oeste do Paraná, que segundo o portal do município, a sua ocupação efetiva se iniciou em 1910, tendo hoje, segundo IBGE, cerca de 325 mil habitantes. É uma cidade de destaque como polo econômico da região, com referência na prestação de serviços, por abranger um grande número de comércios, além de grande força no setor de indústria e agronegócio. Cascavel está entre as 10 cidades que mais geram empregos no estado do Paraná.

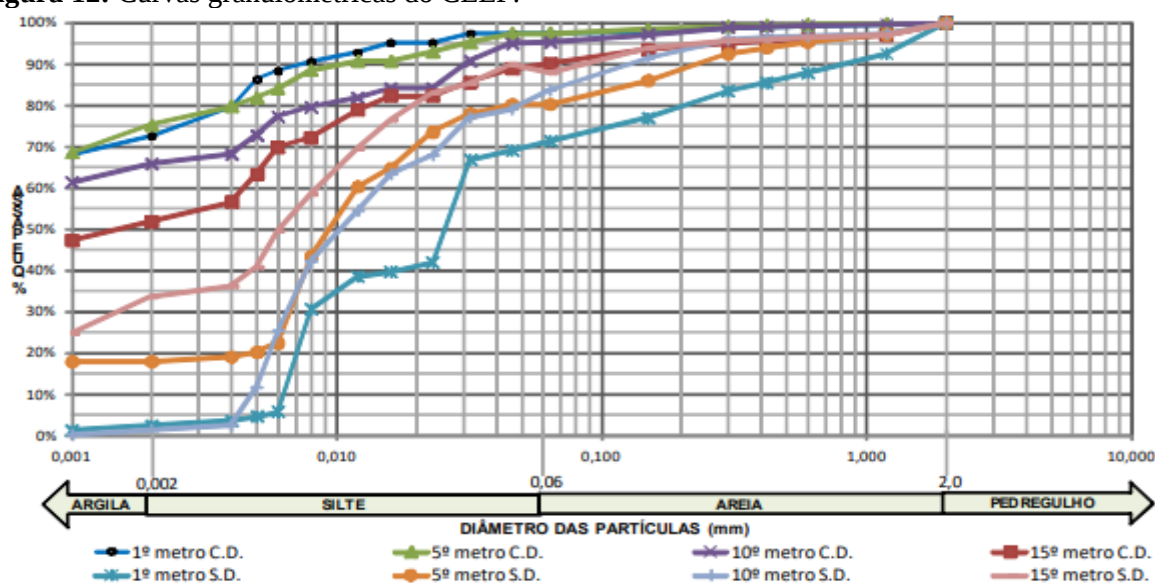
Atualmente, existem inúmeras barragens de pequeno porte sendo construídas próximas a cidade, tanto para irrigação no setor da agricultura, assim como para o abastecimento de residências e indústrias, como é feito em grandes cidades do Sudeste, tendo como exemplo, a construção da CGH Folha Verde, que fara uso das águas do rio Tormenta, na divisa entre as cidades de Cascavel e Catanduvas, também pode-se verificar o uso de barragem para o lazer e turismo como é encontrado no lago municipal de Cascavel.

3.1.2 Caracterização do solo

Para realização deste estudo, se fez uso de dados do solo da pesquisa feita por Zen e Almeida (2018), no Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz (CEEF), ao longo de 15 metros de profundidade, por meio de um poço de inspeção e ensaios laboratoriais.

Para a caracterização do solo, Zen e Almeida (2018) realizaram ensaio de granulometria conjunta ao longo das camadas, onde os resultados estão apresentados na Figura 12. Com eles os autores puderam concluir que houve uma dispersão de partículas, ocorrendo assim uma flocculação das mesmas, devido a existência de oxido de ferro no solo, fato presente em solos lateriticos, bem como a grande quantidade de finos e porosidade elevada.

Figura 12: Curvas granulométricas do CEEF.

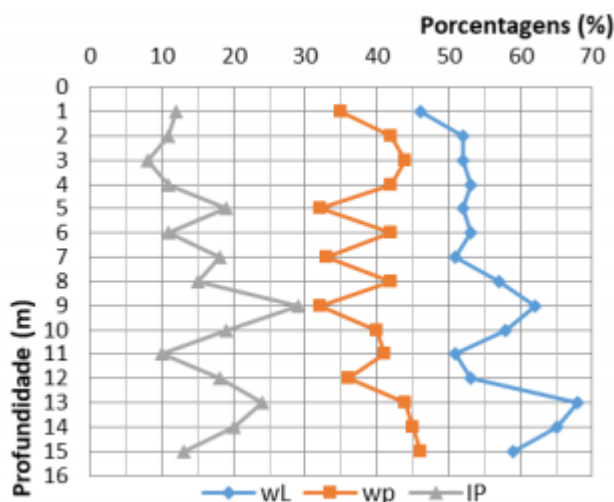


Fonte: Zen e Almeida (2018).

Zen e Almeida (2018) classificaram o solo com uma argila siltosa, devido à quantidade de argila e silte presente no solo, cerca de 71,86% e 25,47%, respectivamente. Assim percebe-se excesso de finos e ausência de material granular no solo, prejudicando o contato entre os grãos e consequentemente sua resistência, tornando-o naturalmente mal graduado. Porém, apresenta boa estabilidade quando submetido a escavações, por apresentar uma boa coesão, ser um solo laterítico e ter presença de minerais com propriedades cimentícias.

Outros aspectos importantes para a caracterização do solo são os resultados obtidos pelos ensaios de limite de liquidez (WL) e limite de plasticidade (WP). Neles, os autores, observaram que os valores se mantiveram estáveis e uniformes, com apenas uma variação no 9º metro, conforme apresenta a Figura 13, possivelmente devido a uma mudança de solo nesta cota.

Figura 13: Índices de consistência do solo.



Fonte: Zen e Almeida (2018).

Zen e Almeida (2018) definiram o solo quanto a sua plasticidade como solo de média Plasticidade, apresentando um valor elevado de limite de liquidez indicando que o solo é altamente compressível e que quando submetido a carregamentos pode sofrer adensamento, característica comum em solos lateríticos.

Com os resultados de granulometria conjunta, limite de liquidez e plasticidade e o índice de plasticidade, os autores classificaram o solo pelo Sistema Rodoviário (T.R.B.) sendo definido com A-7-6 que são solos com aplicação de regular a má para pavimentação devido grande quantidade de finos. Também classificaram pelo Sistema Unificados dos Solos (SUCS) definido como solo argiloso muito compressível.

Zen e Almeida (2018), determinaram a envoltória de resistência por meio de ensaios triaxiais realizados por Molina e Gandin (2015), com amostras indeformadas coletadas ao longo de 5 metros de profundidade, com tal envoltória pode-se determinar o ângulo de atrito e o intercepto da coesão, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Profundidade (m)	Intercepto coesão (kN/m²)	Ângulo de atrito (°)
1	2,0	14,5
2	2,0	15,5
3	12,8	17,4
4	11,8	16,4
5	11,8	20,2
Média	8,04	16,7

Fonte: Zen e Almeida (2018).

Os autores analisaram que os valores de coesão foram baixos e próximos aos citados por Alonso (2010) para solos argilosos e os ângulos de atrito tiveram pouca dispersão entre eles e valores baixos devido ao baixo atrito entre partículas de argila não saturadas.

3.1.3 Caracterização dos materiais

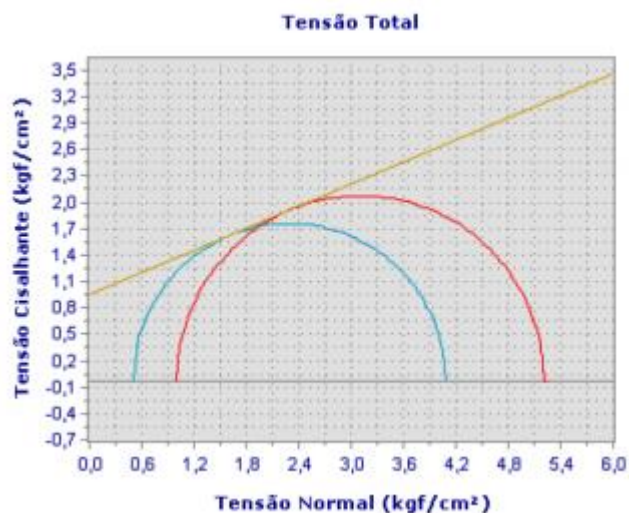
3.1.3.1 Barragem de terra

A barragem considerada de terra, é constituída basicamente de um único material de característica argilosa compactada. Os parâmetros geomecânicos da argila foram caracterizados por Volpato (2015), por meio de ensaios de compactação proctor e de compressão triaxial.

Volpato (2015) realizou os ensaios utilizando solo retirado do primeiro metro do CEEF, que é classificado como argila siltosa e quanto a sua origem é classificado como residual proveniente da decomposição de rocha basalto e com comportamento laterítico.

Os resultados dos ensaios de compactação proctor apresentaram umidade ótima de 26%, peso específico natural de 1,631 g/cm³ e peso específico aparente seco de 1,295 g/cm³. Já os resultados do ensaio triaxial são mostrados na Figura 14, com os valores de ângulo de atrito e coesão.

Figura 14: Parâmetros da argila.



Fonte: Volpato (2015).

3.1.3.2 Barragem de enrocamento

A modelagem da barragem de enrocamento, é composta por material rochoso com um núcleo argiloso. O núcleo argiloso apresenta os mesmos parâmetros da barragem demonstrada anteriormente, com parâmetro de resistência retirados de bibliografia de Volpato (2015).

Já os parâmetros de resistência ao cisalhamento do material rochoso foram escolhidos analisando as pesquisas de Maia (2001) considerando valores de ensaios realizados por diversos autores, conforme apresenta Tabela 2, e Ribeiro (2015) que considera valores típicos encontrados na bibliografia (Cruz, 2004).

Vale ressaltar que Maia (2001) esclarece que o enrocamento não é um material coesivo, desta forma os valores apresentados de c' são apenas da imposição de uma reta que tangencia a envoltória real da curva.

Tabela 2: Parâmetros de resistência de enrocamentos de diferentes rochas.

Tipo de rocha	Envoltória		Parâmetros de resistência para s'_j					
	a (kPa)	b	200 kPa		500 kPa		2000 kPa	
			f	c' (kPa)	f	c' (kPa)	f	c' (kPa)
Andesito ($g_s = 20\text{kN/m}^3$ e $w = 9\%$) ⁽¹⁾	2,67 a 2,91	0,83 a 0,86	43,2	65,77	39,4	137,98	37,5	201,70
Andesito ($g_s = 26\text{kN/m}^3$ e $w = 1\%$) ⁽¹⁾	1,85 a 1,52	0,91 a 0,97	42,0	31,97	39,7	72,17	38,6	109,62
Andesito quartzoso ⁽¹⁾	3,98 a 4,04	0,76 a 0,84	44,1	96,15	39,5	192,41	37,2	274,81
Anfibolito (<i>Oroville Dam</i>) ⁽⁴⁾	2,04	0,90	45,5	41,89	42,9	93,83	41,6	141,60
Ardósia ($g_s = 18\text{kN/m}^3$ e $w = 16\%$) ⁽³⁾	3,00	0,77	30,9	63,74	26,2	122,05	24,0	170,48
Ardósia ($g_s = 21\text{kN/m}^3$ e $w = 5\%$) ⁽³⁾	5,30	0,75	41,2	124,02	35,4	231,72	32,6	319,20
Areia com pedregulhos (<i>Zahorras</i>) ⁽²⁾	2,42	0,88	46,2	54,35	43,2	118,70	41,6	177,18
Arenito ⁽³⁾	6,80	0,67	32,0	126,97	25,7	215,72	22,8	283,69
Argilito (<i>Pyramid Dam</i>) ⁽⁴⁾	2,07	0,88	41,9	44,77	38,9	97,86	37,4	145,89
Basalto (Capivara) ^{(6) *}	2,43	0,87	44,3	55,33	41,1	119,46	39,4	177,16
Basalto (<i>San Francisco</i>) ⁽²⁾	3,50	0,82	44,3	85,89	39,9	174,81	37,6	251,56
Basalto ($g_s = 21\text{kN/m}^3$ e $w = 6,0\%$) ⁽³⁾	4,40	0,81	48,5	112,30	43,8	226,65	41,4	324,59
Basalto ($g_s = 26\text{kN/m}^3$ e $w = 4,8\%$) ⁽¹⁾	2,81 a 2,65	0,80 a 0,88	41,7	61,82	38,0	128,85	36,1	187,94
Basalto ($g_s = 27\text{kN/m}^3$ e $w = 2,5\%$) ⁽¹⁾	4,90 a 5,56	0,76 a 0,77	43,9	127,12	38,3	242,76	35,5	337,85
Brecha basáltica ⁽¹⁾	2,20	0,89	45,6	47,28	42,8	104,69	41,3	157,17
Basalto britado ⁽⁴⁾	2,40	0,87	44,0	54,52	40,7	117,65	39,1	174,45
Basalto semi-alterado ⁽¹⁾	3,47 a 3,78	0,79 a 0,83	43,3	87,83	38,8	177,39	36,5	254,17
Basalto vesicular/amigdalóide (Capivara) ^{(6) *}	2,47 a 3,97	0,83 a 0,78	39,0	71,85	34,6	143,44	32,4	204,47
Basalto ciclado (Capivara) ^{(6) *}	1,21	0,94	38,7	17,30	37,2	40,44	36,5	62,49
Brecha basáltica (Ilha Solteira) ^{(6) *}	1,95 a 2,31	0,86 a 0,83	35,8	46,95	32,2	98,06	30,5	143,11
Calcário brechoide denso ^{(7) *}	5,47 a 7,44	0,83 a 0,80	59,1	176,85	54,8	362,45	52,6	522,66
Calcário brechoide fofo ^{(7) *}	2,77 a 6,09	0,88 a 0,81	53,5	114,55	49,7	238,33	47,7	346,70
Conglomerado (<i>El Infiernillo Dam</i>) ⁽²⁾	2,57	0,85	41,9	59,83	38,2	126,01	36,3	184,50
Conglomerado (<i>Malpaso</i>) ⁽²⁾	3,84	0,81	44,8	95,00	40,1	191,27	37,8	273,60
Conglomerado (<i>Netzahualcoyotl</i>) ⁽²⁾	2,05	0,88	41,6	44,23	38,6	96,63	37,1	144,11
Diorito ⁽¹⁾	2,45 a 2,70	0,83 a 0,89	44,0	58,07	40,7	124,28	38,9	183,61
Diorito (<i>El Infiernillo Dam</i>) ⁽²⁾	1,99	0,87	38,9	43,22	35,7	93,08	34,1	137,89
Gabro ⁽¹⁾	2,65 a 2,97	0,83 a 0,88	44,9	64,53	41,4	136,74	39,5	200,90
Gabro verde ⁽¹⁾	2,43	0,85	40,4	55,80	36,7	117,47	34,9	171,94
Granito ⁽¹⁾	1,34 a 1,61	0,89 a 0,98	44,5	21,23	41,9	50,40	42,1	75,97
Riolito ($g_s = 22\text{kN/m}^3$ e $w = 7\%$) ⁽¹⁾	3,22 a 3,40	0,77 a 0,84	40,1	76,94	35,6	154,58	33,5	221,24
Riolito ($g_s = 24\text{kN/m}^3$ e $w = 2\%$) ⁽¹⁾	1,86 a 1,79	0,89 a 0,98	49,1	25,22	47,5	57,07	46,7	86,87
Riolito alterado ($g_s = 18\text{kN/m}^3$; $w = 13\%$) ⁽¹⁾	4,81 a 4,19	0,75 a 0,82	48,0	60,73	45,0	116,98	43,5	164,15
Riolito alterado ($g_s = 24\text{kN/m}^3$; $w = 3\%$) ⁽¹⁾	3,17	0,81	39,6	74,82	35,1	150,19	32,9	214,62
Sedimentar dura (bem graduada) ⁽⁵⁾	1,73	0,89	38,9	35,23	36,2	77,67	34,9	116,41
Sedimentar dura (mal graduada) ⁽⁵⁾	2,04	0,86	37,6	44,78	34,3	95,37	32,6	140,47

⁽¹⁾ Matsumoto e Watanabe (1987);⁽²⁾ Mello (1977);⁽³⁾ Charles e Watts (1980);⁽⁴⁾ Marachi *et al.* (1972);⁽⁵⁾ Indraratna *et al.* (1993);⁽⁶⁾ Cruz (1983);⁽⁷⁾ Cea (1998); g_s ... peso específico seco do enrocamento; w ... umidade inicial do corpo de prova;

Obs.: os resultados apresentados referem-se a ensaios de compressão triaxial exceto os indicados com *, obtidos de ensaios de cisalhamento direto.

Fonte: Maia (2001).

Analisando os resultados apresentados por Ribeiro (2015) na Tabela 3, observou-se que os parâmetros estão dentro dos indicados por Maia (2001) levando em conta a rocha

basalto, que é característica da região da cidade de Cascavel. Desta forma adotou-se os valores citados por Ribeiro (2015) para os materiais de enrocamento e de transição.

Tabela 3: Parâmetros de resistência do enrocamento.

Material	Peso específico (kN/m³)	Coesão (KPa)	Ângulo de atrito (°)
Enrocamento	21	0	40
Transição – não processada	19	0	34
Transição – brita 1	20	0	38
Transição - pedrisco	20	0	36

Fonte: Ribeiro (2015).

3.1.3.3 Barragem de concreto

Na barragem de concreto, considerou-se o modelo com face de concreto a montante, em vista que é um método bastante utilizado e que teve uma rápida aceitação no Brasil em relação a outros métodos com as de concreto por gravidade. O modelo de barragem de enrocamento com face de concreto tem como um dos principais exemplos a barragem de Foz do Areia, sendo a primeira barragem desse modelo construída no Brasil, inaugurada em 1980 na cidade de Pinhão – PR, e a maior do mundo no gênero da época com 160 metros de altura.

Além de apresentar maior aceitação, a barragem de enrocamento com face de concreto é um modelo mais econômico comparando com os outros métodos construtivos de barragens de concreto, devido ao menor consumo de concreto na fase de construção. Desta forma, optou-se por adotar o modelo de barragem com face de concreto para desenvolvimento do estudo. Os parâmetros do enrocamento foram os mesmos dos apresentados anteriormente, já o concreto foi considerado com material de alta resistência com peso específico indicado por norma para concreto armado de 25 kN/m³.

3.1.4 Dimensionamento das barragens

O boletim 99 (ICOLD, 1995) mostra números de rupturas pela altura das barragens, constatando que a maioria dos problemas é com barragens de pequenas alturas ($H < 30\text{m}$), sendo eles decorrentes não da altura em si, mas pela pouca percepção dos riscos em estruturas menores, caracterizando projeto e execução de qualidade inferior. Desta forma optou-se por adotar uma altura de 15 metros para as três modelagens.

A Atlas das Águas de Minas apresenta um roteiro de dimensionamento de barragens, sendo que para barragens. Citando que na inexistência de tráfego na crista, a largura da mesma pode ser determinada pela Equação 1, levando em conta a altura da barragem (H).

(1)

$$C = \frac{H}{5} + 3$$

Já a base da barragem é a projeção da crista e dos taludes a montante e jusante sobre o terreno, dando o comprimento da base do maciço, podendo ser calculado pela Equação 2.

(2)

$$B = C + (Z_m + Z_j)H$$

Onde:

C = largura da crista (m)

Z_m = projeção horizontal do talude a montante

Z_j = projeção horizontal do talude a jusante

H = altura da barragem (m)

Para barragens de terra a Eletrobrás (2000) cita uma inclinação para barragens com mais de 10 metros de 2,5:1 a montante e de 2:1 para jusante. Nas barragens de enrocamento acima de 10 metros o valor mínimo de inclinação é 1,65:1, podendo-se adotar a mesma inclinação das barragens de terra e no núcleo a inclinação é de 0,5:1

O dimensionamento da crista e da base na barragem de enrocamento foi o mesmo que da barragem de terra e a base do núcleo é dada por 1/3 do comprimento total da base do maciço, podendo ser representada pela Equação 3. É necessário que o comprimento da base do núcleo seja superior a 3 metros.

(3)

$$b = \frac{B}{3}$$

Em barragens que se faz uso de concreto permite taludes mais íngremes, sendo assim considerou-se de 1,5:1 tanto para montante como para jusante, sendo o dimensionamento do modelo das anteriores, quando se considera apenas face de concreto. Segundo Eletrobrás

(2003), a espessura da face de concreto para barragens de até 100 metros, se dá pela Equação 4, a qual tem relação apenas com a altura da barragem.

(4)

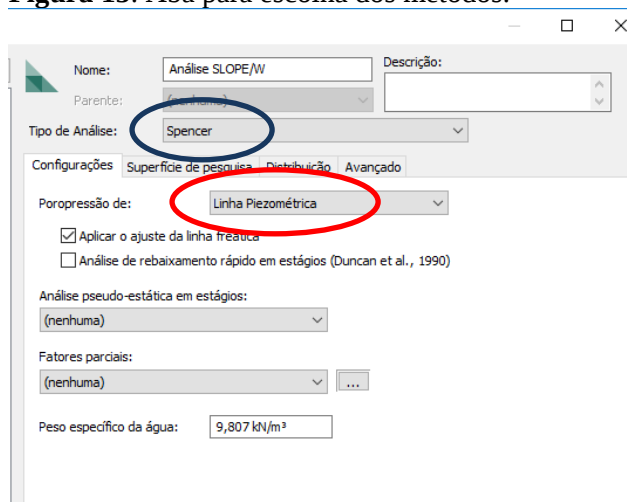
$$E = 0,3 + 0,002 * H$$

3.1.5 Software Geostudio

O programa que foi utilizado para realizar as simulações numéricas de estabilidade é o Geostudio, sendo um pacote de *software* desenvolvido nos anos 70, que atualmente é utilizado em mais de 100 países, atendendo pequenas a grandes empresas e também universidades. A versão utilizada foi a 2018 R2 no módulo Slope/W, sendo o *software* mais utilizados para análise de estabilidades na engenharia geotécnica, permitindo calcular o fator de segurança (FS), através dos métodos de equilíbrio limite, possibilitando comparar a diferença de fatores entre todos os métodos (GEOSLOPE INTERNACIONAL LTD, 2006).

Ao iniciar o programa foi selecionado o módulo de análise Slope/W, em seguida é possível escolher o tipo de análise conforme apresentada na Figura 15. Para realização deste trabalho foram escolhidos os métodos de Bishop, Morgenster-Price, Fellenius e Spencer, os quais são considerados os mais usuais.

Figura 15: Aba para escolha dos métodos.

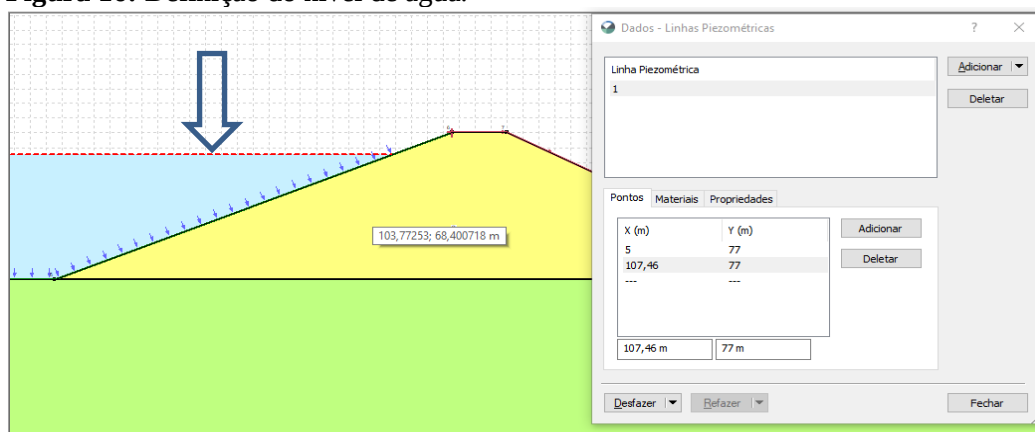


Fonte: Autora (2019).

O desenho da geometria a ser estudada foi desenhado no próprio programa, porém, poderia ter sido exportado do Auto CAD, inserindo os materiais que compõe o maciço com seus respectivos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) e o peso específico.

Logo após inseriu-se a linha piezométrica de regime permanente de operação, ou seja, o nível do reservatório está em seu valor normal, conforme apresenta Figura 16.

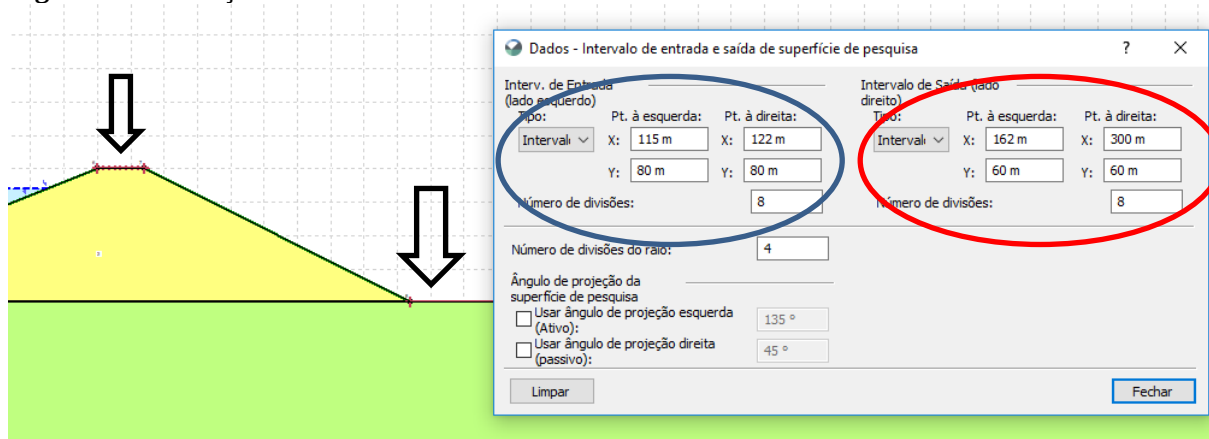
Figura 16: Definição do nível de água.



Fonte: Autora (2019).

Por fim, foi necessário delimitar a área selecionada para análise de estabilidade para o software poder traçar as prováveis cunhas de deslizamento. Foram indicados os dados de entrada e saída conforme mostra a Figura 17, repetindo todo o processo para cada modelo de barragem.

Figura 17: Definição dos dados de entrada e saída.

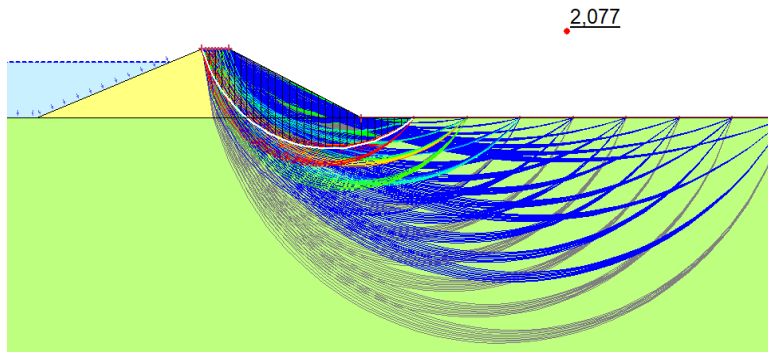


Fonte: Autora (2019).

Com os dados iniciais pré-estabelecidos e inserido o método de análise escolhido, gerou-se os fatores de segurança, as forças atuantes e os gráficos de visualização. Na Figura 18 podem-se observar os resultados que o software determina, resultando num fator de segurança (FS) para cada fatia, e assim realizar a análise do FS mais crítico. O fator de segurança apresentado na imagem é determinado pelo círculo completo considerando o ponto.

Cada lamela tem um equilíbrio de carga, e então são consideradas as forças que cada lamela apresenta, os momentos solicitantes gerados pelas forças e os momentos resistentes gerados pela resistência ao cisalhamento natural do solo (dado pelo ângulo de atrito e coesão fornecidos do solo).

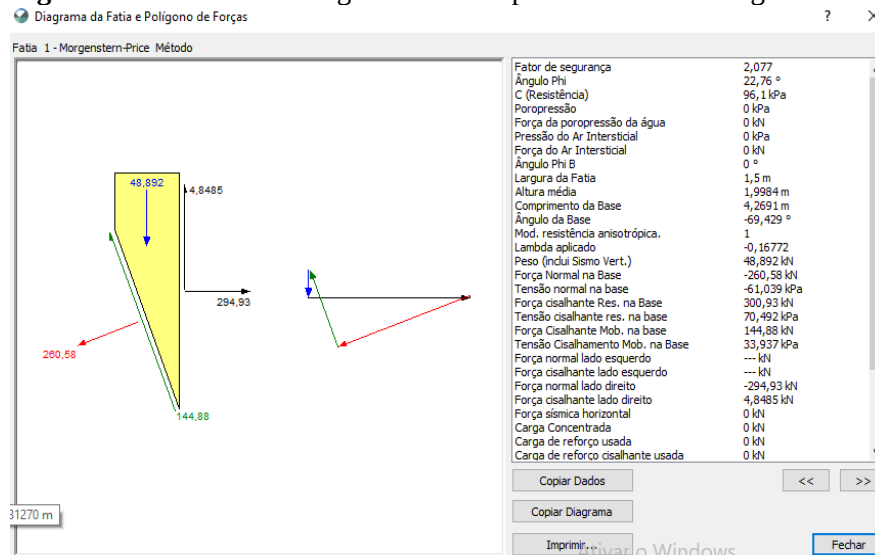
Figura 18: Fator de segurança por meio da análise de Morgenstern-Price.



Fonte: Autora (2019).

O software também permite fazer emissão de um relatório de diagrama da fatia, conforme Figura 19, tal relatório apresenta todos os dados gerados pelo programa, como o fator de segurança, intercepto coesivo, ângulo de atrito, largura da fatia, dentre outros.

Figura 19: Relatório de diagrama da fatia pelo método de Morgenstern - Price.



Fonte: Autora (2019).

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Modelagem numérica

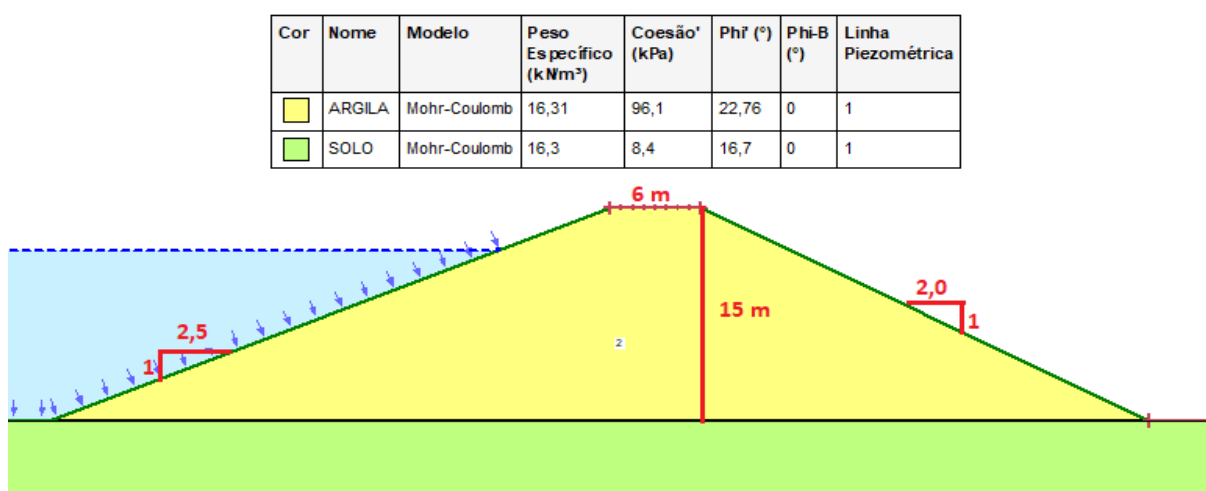
Os resultados apresentados a seguir são resultantes da análise de estabilidade dos taludes a montante e a jusante, com o auxílio do software Slope/W, utilizando o método de equilíbrio limite, determinando as superfícies críticas de ruptura e determinando os fatores de segurança.

Os parâmetros de entrada no software foram: o modelo da seção de cada barragem, uma linha piezométrica de regime permanente de operação e a caracterização do solo e dos materiais de construção para cada barragem, que foram apresentados anteriormente por meio de pesquisas bibliográficas.

4.1.1.1 Barragem de terra

A Barragem de terra foi considerada homogênea com altura de 15 metros e inclinações indicadas pela Eletrobrás (2000) de 2,50:1 a montante e 2,00:1 a jusante. Foram utilizados para análise os índices físicos apresentados por Volpato (2015), com intercepto coesivo de 96,1 kPa e um ângulo de atrito de 23°, como mostra Figura 20.

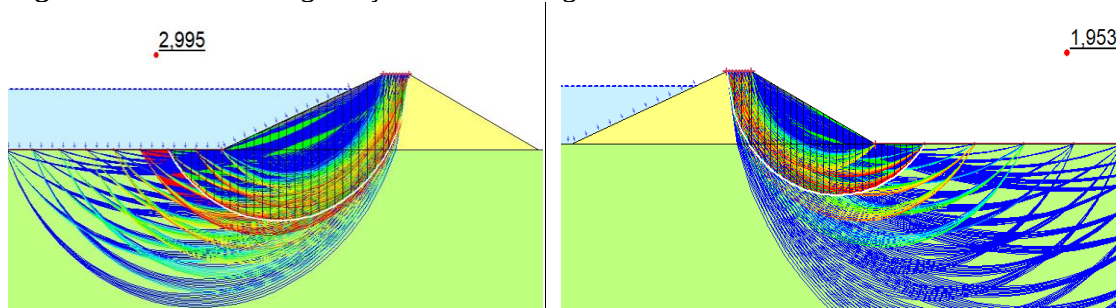
Figura 20: Modelo barragem de terra.



Fonte: Autora (2019).

Na Figura 21 é possível observar por meio do círculo de deslizamento o valor do menor FS a montante e a jusante, ambos foram obtidos pelo método de Fellenius.

Figura 21: Fatores de segurança críticos, barragem de terra.



Fonte: Autora (2019).

A barragem de terra apresentou um FS crítico de 1,953 a jusante e de 2,995 a montante os quais foram obtidos pelo método de Fellenius, e os maiores FS foram obtidos pelo método de Spencer, sendo eles 2,277 a jusante e 3,529 a montante, conforme apresentado na Tabela 4. Essa diferença entre os métodos pode ser explicada pelo fato dos métodos que apresentaram maior valor, Spencer e Morgenstern – Price, considerarem todas as equações de equilíbrio de forças e momentos, com paralelas as resultantes das forças de interação aplicada em cada fatia. Já o método de Fellenius, não considera todas as equações, apesar de ser um dos métodos mais conservadores.

Esta justificativa pode ser aplicada para todas as barragens analisadas, já que foram obtidos os menores valores pelo método de Fellenius e os maiores pelos métodos de Spencer e Morgenstern – Price. O método de Bishop apresentou valores bem próximos dos métodos de Spencer e Morgenstern – Price, tendo uma pequena variação para mais ou para menos, mesmo podendo ter apresentado um valor maior, não o considerou relevante pelo fato de alguns autores concordarem que este método apresenta problemas em estruturas de inclinação acentuada, portanto, tal método não foi considerado.

Tabela 4: Fatores de segurança barragem de terra.

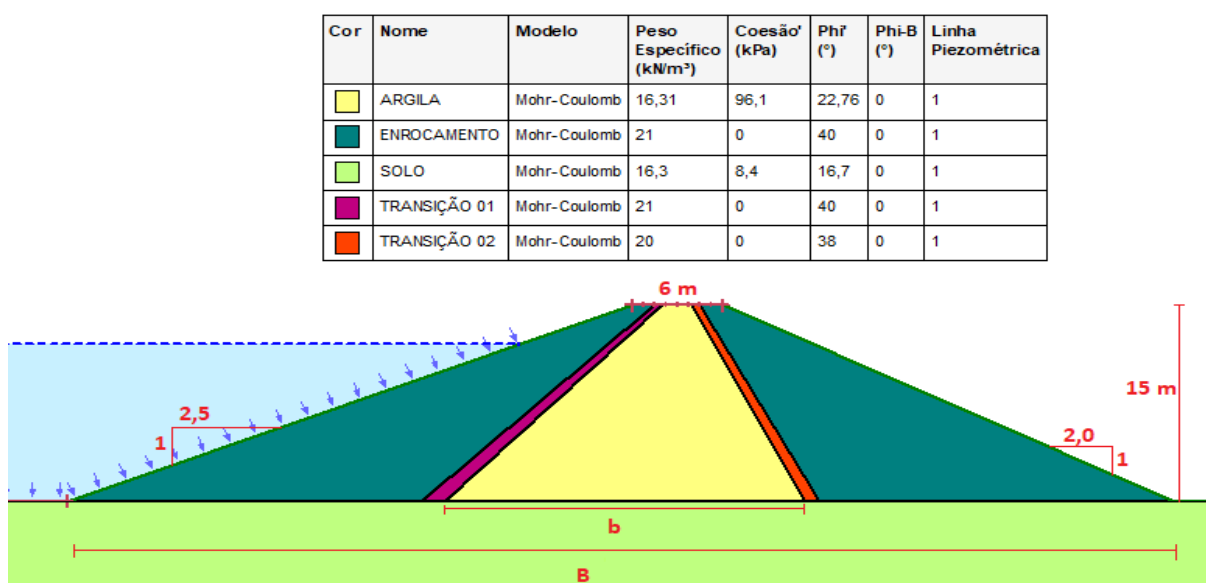
Método	Barragem de terra	
	Montante	Jusante
Morgenstern – Price	3,44	2,08
Spencer	3,53	2,28
Bishop	3,43	2,08
Fellenius	2,99	1,95

Fonte: Autora (2019).

4.1.1.2 Barragem de enrocamento

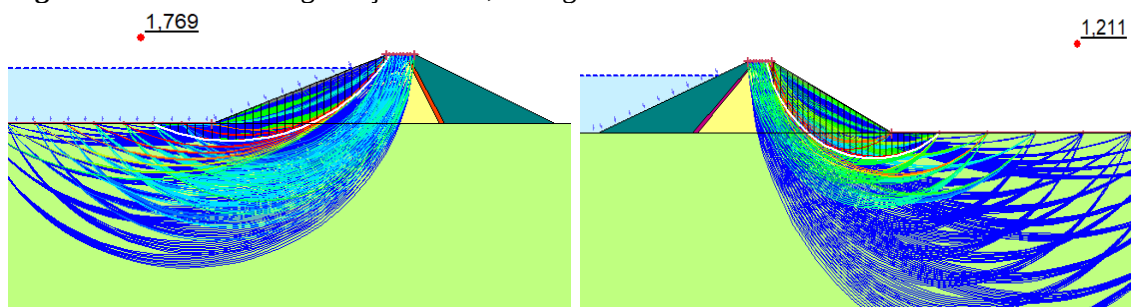
A barragem enrocamento com 15 metros de altura e inclinações indicadas pela Eletrobrás (2000) de 2,5:1 a montante e 2:1 a jusante, apresenta núcleo argiloso com intercepto coesivo de 96,10 kPa e ângulo de atrito de 23°. O enrocamento por ser um material não coesivo apresenta se intercepto coesivo igual a zero, por esse motivo apresenta valor de ângulo de atrito alto, sendo de 40° (RIBEIRO,2015). Foram consideradas faixas de transição entre o enrocamento e o núcleo argiloso, para tal, o intercepto coesivo é igual a zero, pois como o enrocamento trata-se de um material não coesivo, e ângulo de atrito de 34°, sendo um valor menor que do enrocamento pelo fato do material ser mais fino. O modelo da barragem de enrocamento é apresentado na Figura 22.

Figura 22: Modelo barragem de enrocamento.



Fonte: Autora (2019).

A barragem de enrocamento apresentou fator de segurança crítico de 1,211 a jusante e 1,769 a montante (Figura 23), assim como na barragem de terra esses valores foram obtidos pelo método de Fellenius.

Figura 23: Fatores de segurança críticos, barragem de enrocamento.

Fonte: Autora (2019).

Os demais fatores de segurança para a barragem de enrocamento podem ser observados na Tabela 5, sendo os maiores FS no valor de 1,413 a jusante e 1,936 a montante, resultante do método de Morgenster-Price.

Tabela 5: Fatores de segurança barragem de enrocamento.

Método	Barragem de enrocamento	
	Montante	Jusante
Morgenstern – Price	1,94	1,41
Spencer	1,94	1,41
Bishop	1,97	1,44
Fellenius	1,77	1,21

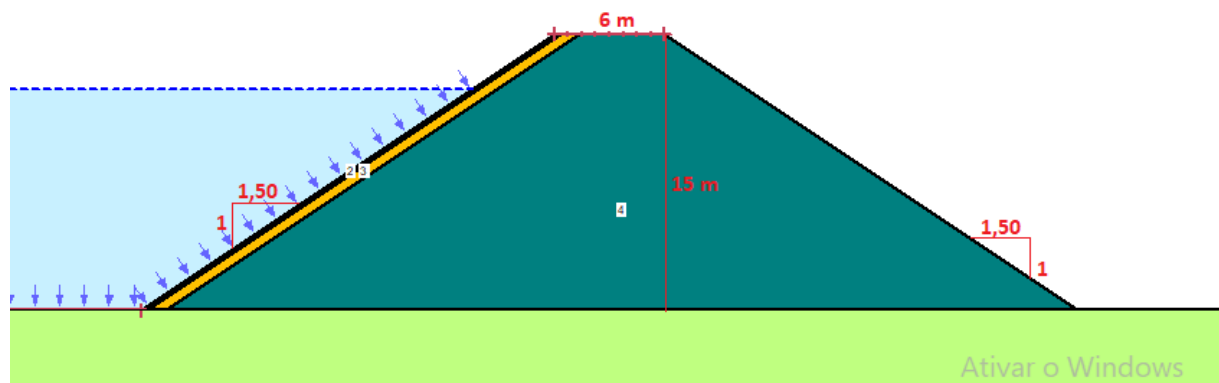
Fonte: Autora (2019).

4.1.1.3 Barragem de concreto

A barragem foi considerada de enrocamento com face de concreto a montante em vista de ser mais viável que a barragem inteira de concreto, pela economia de concreto. Pelo fato de barragem com uso de concreto permitirem uma inclinação mais íngreme foi considerado a indicada pela Eletrobrás (2000) de 1,5:1 tanto a montante como jusante. Os parâmetros do enrocamento são os mesmos utilizados na barragem anterior, vale ressaltar que neste modelo não tem presença do núcleo argiloso, sendo assim apresenta uma única faixa de transição entre o enrocamento e o concreto, com parâmetros indicados na Figura 24. O concreto foi inserido no software com material de alta resistência com peso específico de 25 kN/m³, por se tratar de uma laje com armadura.

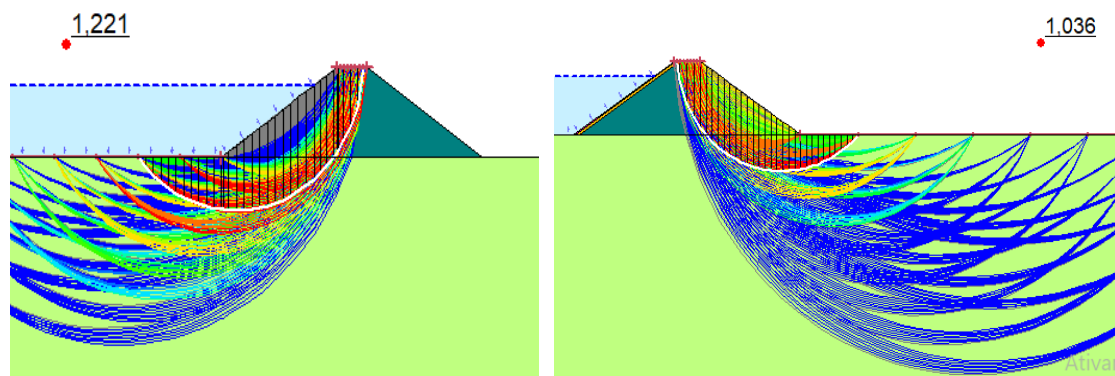
Figura 24: Modelo barragem de concreto.

Cor	Nome	Modelo	Peso Específico (kN/m ³)	Coesão' (kPa)	Phi' (°)	Phi-B (°)	Linha Piezométrica
	CONCRETO	Alta Resistência	25				1
	ENROCAMENTO	Mohr-Coulomb	21	0	40	0	
	SOLO	Mohr-Coulomb	16,3	8,4	16,7	0	1
	TRANSIÇÃO	Mohr-Coulomb	19	0	34	0	



Fonte: Autora (2019).

Assim como os modelos anteriores o fator de segurança crítico foi obtido pelo método de Fellenius, sendo de 1,036 a jusante e 1,221 a montante, tais valores podem ser observados na Figura 25.

Figura 25: Fatores de segurança críticos, barragem de concreto.

Fonte: Autora (2019).

Já os maiores fatores de segurança foram de 1,261 a jusante e 1,776 a montante, obtidos pelos métodos de Mongersterm – Price e Spencer, que são apresentados assim como os demais valores na Tabela 6.

Tabela 6: Fatores de segurança barragem de concreto.

Método	Barragem de concreto	
	Montante	Jusante
Morgenstern – Price	1,77	1,26
Spencer	1,77	1,26
Bishop	1,78	1,26
Fellenius	1,22	1,04

Fonte: Autora (2019).

4.1.2 Comparação dos fatores de segurança entre as barragens

Para cada barragem foram feitas diversas verificações de estabilidade, analisando todos os fatores de segurança, sendo que para cada análise de FS foram utilizados os métodos de Bishop, Fellenius, Morgenstern – Prince e Spencer, considerando o menor de cada análise como o fator de segurança crítico. Na Tabela 7 é possível observar todos os FS encontrados para talude a jusante e a montante das barragens.

Tabela 7: Comparativo dos fatores de segurança.

Método	Barragem de terra		Barragem de enrocamento		Barragem de concreto	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Morgenstern – Price	3,44	2,08	1,94	1,41	1,77	1,26
Spencer	3,53	2,28	1,94	1,41	1,77	1,26
Bishop	3,43	2,08	1,97	1,44	1,78	1,26
Fellenius	2,99	1,95	1,77	1,21	1,22	1,04

Fonte: Autora (2019).

Pode-se observar que os maiores valores de FS são da barragem de terra, onde o intercepto coesivo do material do corpo da barragem é maior comparando com os materiais das outras barragens, observando-se assim que o valor do fator de segurança está diretamente ligado ao ângulo de atrito e com o intercepto coesivo, consequentemente uma das causas na ruptura.

Verificou-se que o valor mais crítico, ou seja, o menor fator de segurança foi obtido pelo método de Fellenius para os três modelos de barragens, tanto a montante quanto a jusante, ressaltado que esse valor mais baixo é decorrente do fato de que este método não considera todas as equações do equilíbrio limite, sendo o método mais simples de análise. Em

contrapartida os maiores valores ficaram nas análises pelos métodos de Spencer e Morgenstern – Pince, tais métodos considerados os mais rigorosos.

A Eletrobrás (2003) indica um fator de segurança mínimo de 1,5 tanto para montante como para jusante, em caso de regime permanente de operação. Sendo assim as barragens as barragens de enrocamento e de concreto causariam problemas. A barragem de enrocamento apresentou valores próximos ao mínimo, porém inferiores, caracterizando uma possível instabilidade. Já a barragem de concreto apresentou valores bem abaixo do recomendado chegando próximos a 1,0 o que significaria uma ruptura do corpo da barragem., tais valores têm relação à utilização de materiais não coesos, devido a já análise da ligação direta do intercepto coesivo no fator de segurança, consequentemente na estabilidade.

Porém, pode-se se observar que aumentando a inclinação do talude consequentemente aumenta o valor do fator de segurança, sendo uma possível saída para o caso da necessidade da construção desses dois modelos de barragem. Vale ressaltar que o modelo construtivo de barragem de terra se apresentou como mais seguro, além de ser o mais econômico, em vista de que os outros métodos construtivos são utilizados na falta de material argiloso.

CAPÍTULO 5

5.1 CONCLUSÕES

Com base nos inúmeros incidentes e acidentes relacionados a barragens nos últimos anos, apresentando como consequência grandes prejuízos ambientais e percas de vidas humanas, é importante cada vez mais aprofundar-se em estudos quanto à estabilidade destas estruturas. Portanto, é fundamental um dimensionamento e uma análise correta a fim de evitar uma possível ruptura do corpo da barragem.

Devido a isso se elaborou uma simulação de três métodos construtivos, considerando serem construídos sobre o solo de Cascavel/PR, que por sua vez foi caracterizado por Zen e Almeida (2018) como um solo compressível, colapsível e laterítico, sendo uma argila siltosa.

Os parâmetros de resistência dos materiais construtivos de cada modelo foram retirados de bibliografia, uma vez que não houve a realização de ensaios laboratoriais. Desta forma, obtiveram-se valores de coesão e ângulo de atrito para cada material, inserindo-os no software Slope/W, que por sua vez gerou valores de FS para cada modelo tanto para o talude a montante como jusante.

Observou-se que os valores de fator de segurança a montante são sempre superiores aos de jusante, devido a percolação de água estar no sentido montante – jusante, favorecendo sempre o talude a montante e concentrando maiores esforços no talude jusante.

Verificou-se que os maiores valores de fator de segurança foram obtidos pelos métodos de Mongestern – Price e Spencer, considerados os mais rigorosos pelo fato de levarem em conta todas as equações do equilíbrio limite de forças e momentos. O método de Bishop apesar de alguns autores citarem problemas com ele, os valores de fator de segurança desse método ficaram bem próximo dos mais rigorosos. Já o método de Fellenius apresentou valores menores pois apesar de ser conservador não considera todas as equações do equilíbrio limite.

Foi possível analisar que a coesão é um fator importante para estabilidade, em vista que a barragem de terra, com um alto valor de coesão, apresentou FS superior em relação às outras que levavam em seu maciço materiais não coesos.

Além disso, a barragem terra apresentou valores de FS superiores do mínimo indicado de 1,5, sendo assim uma estrutura com sua estabilidade garantida. Já a barragem de enrocamento teve valor de fator de segurança próximos ao mínimo, porém um pouco

inferiores causando uma possível instabilidade e podendo ser reparado aumentando a inclinação do corpo da barragem, em vista que analisou-se que aumentando a inclinação consequentemente aumenta o fator de segurança.

Já barragem de concreto apresentou valores a jusante muito próximos a 1,0 indicando uma possível ruptura do maciço, assim não sendo indicada tanto pelo fator de estabilidade, bem como o econômico, uma vez que o material para construção da barragem de terra é mais acessível quando comparada ao concreto, ainda mais pela região da cidade de Cascavel já se tratar de solo argiloso.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar escala em miniatura dos três modelos de barragens para comprovar sua segurança.

Avaliar a influência da compactação (proctor intermediário e modificado) no fator de segurança de barragens.

Avaliar o efeito de sucção do solo compactado no fator de segurança.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA., M.A.; ZEN, B.A.B. **Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel/Pr.** Artigo XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador - BA, 2018.

ANA. **Manual de estudos de disponibilidade hídrica para aproveitamentos hidrelétricos:** Manual do usuário. Agência Nacional de Águas, Brasília: ANA, SOF, 2010.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens.** Oficina dos textos. 352f. 1ª Edição. 2012

MARANGON, M. **Barragens de Terra e Enrocamento.** 2004.

DA CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras** – Casos históricos, materiais de construção e projeto. São Paulo: Oficina de Textos, 1996

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos de projetos de Pequenas centrais hidrelétricas .** Centrais elétricas brasileiras S. A. - Eletrobrás, 2000.

GEO-SLOPE. **Slope/W for slope analysis – User’s guide,** GEOSLOPE International Ltd., Canadá. 2001.

MAIA, P. C. A. **Avaliação de comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos.** Dissertação de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil: Geotecnia– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001

MASSAD, F. **Obras de terra:** Curso básico de geotecnia. São Paulo: Oficina dos textos, 2013.

MILANI FILHO, L. **O uso do concreto compactado com rolo em barragens** – tendências futuras. 2003. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

MOLITERNO, A. **Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples,** São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

NOVAK P.; MOFFAT , A.I.B.; NALLURI C.; NARAYANAN R. **Hydraulic Structures.** 3rd. ed. London: Spon Press, 2004.

RIBEIRO, C. R. **Análise de estabilidade global de barragens de terra e enrocamento estudo de caso: PCH Xavantina/SC.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SAYÃO, A. **“Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento”.** Curso de Mestrado da PUC -RJ, Rio de Janeiro, 2009.

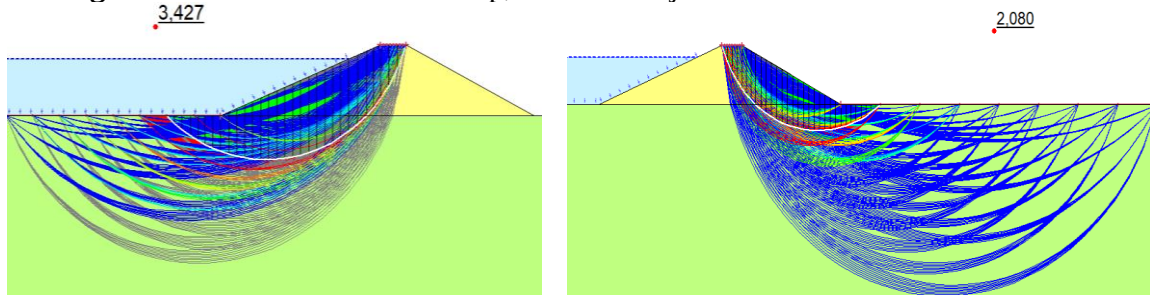
STEPHENS, T. **FAO - Manual sobre pequenas barragens de terra:** guia para localização, projeto e construção. 2011.

VILHETE, D. F. **Retroanálise da ruptura do talude a montante da barragem Açú no final do período construtivo.** Dissertação de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

VOLPATO, A. F. **Determinação da resistência ao cisalhamento de um solo argiloso e laterítico característico da região de Cascavel/PR com adição de cal.** Trabalho de conclusão de curso em Engenharia civil – Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz, Cascavel, 2015.

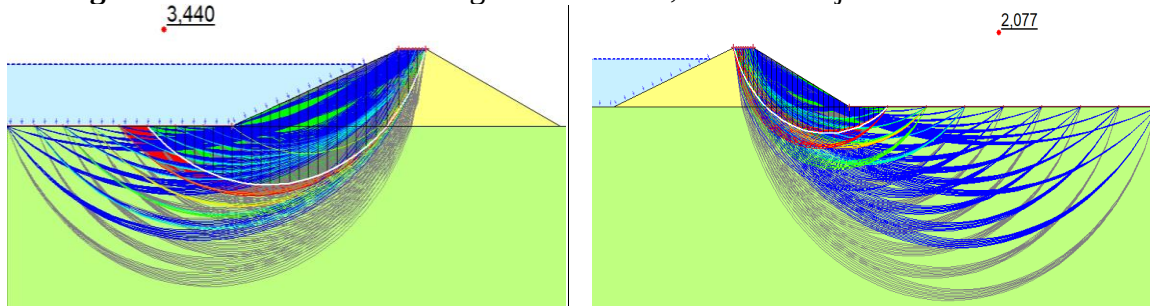
ANEXOS

Barragem de Terra – Método Bishop, montante e jusante



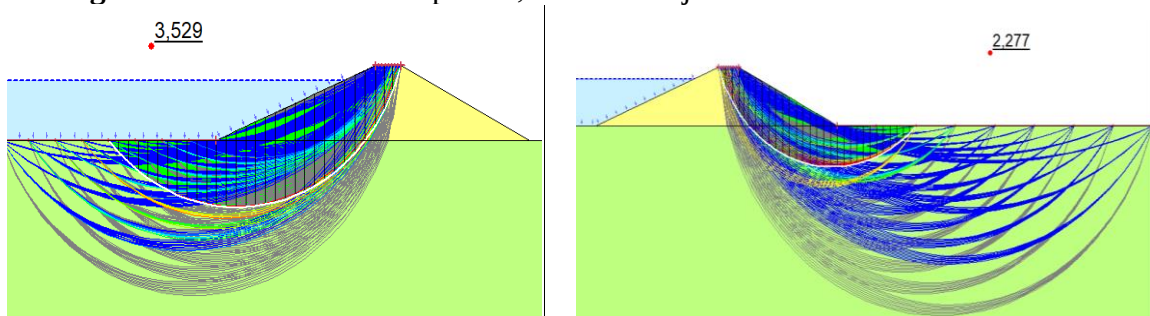
Fonte: Autora (2019).

Barragem de Terra – Método Morgenstern - Price, montante e jusante



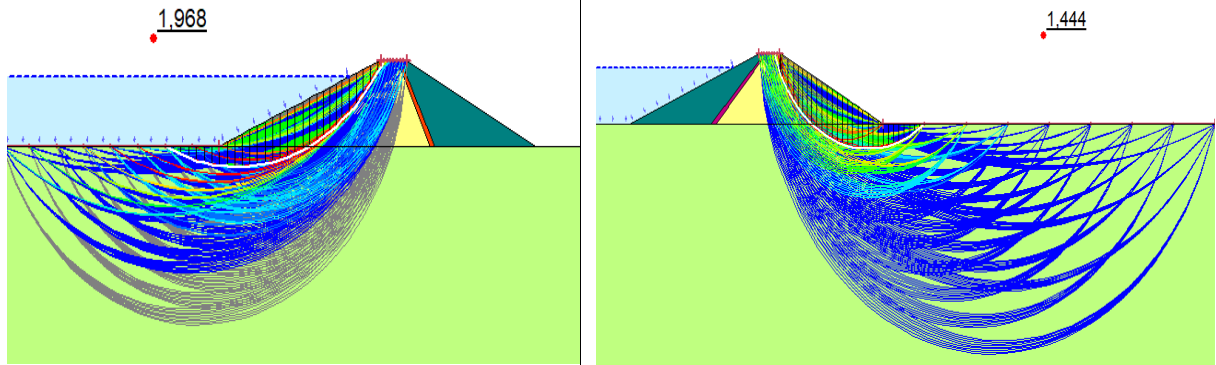
Fonte: Autora (2019).

Barragem de Terra – Método Spencer, montante e jusante



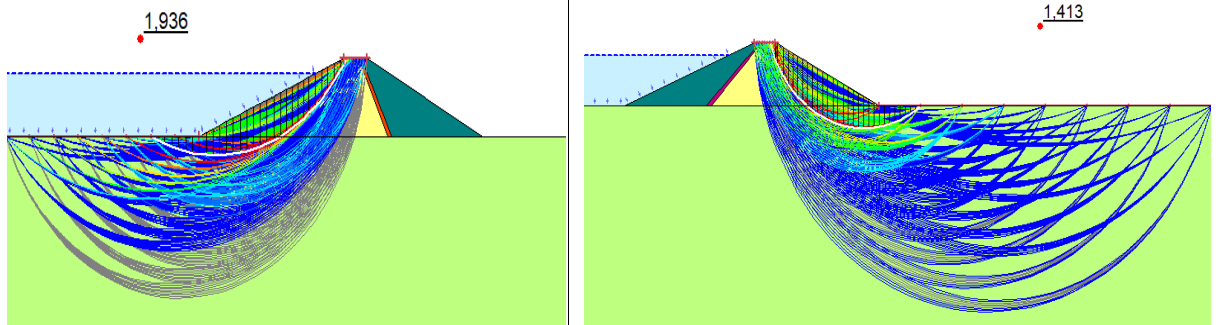
Fonte: Autora (2019).

Barragem de Enrocamento – Método Bishop, montante e jusante



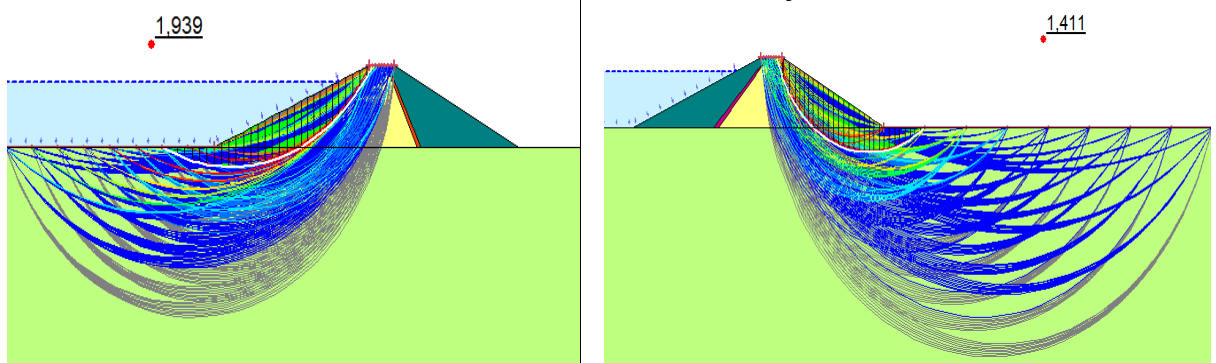
Fonte: Autora (2019).

Barragem de Enrocamento – Método Morgenstern - Price, montante e jusante



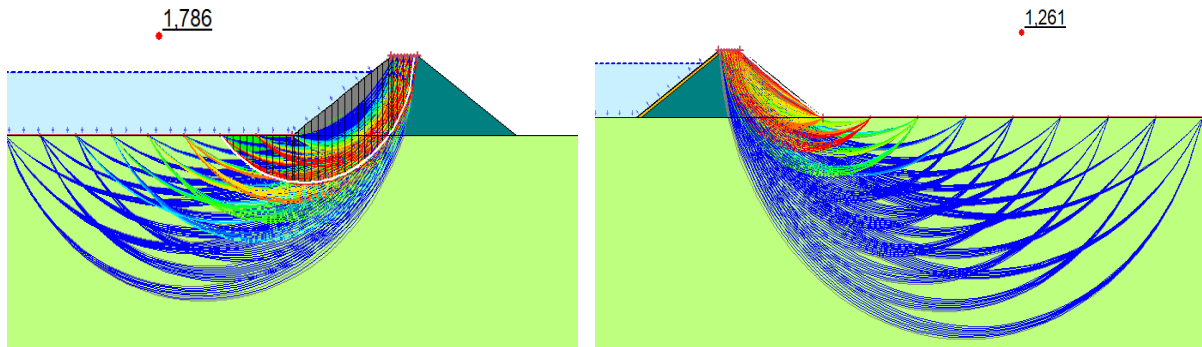
Fonte: Autora (2019).

Barragem de Enrocamento – Método Spencer, montante e jusante



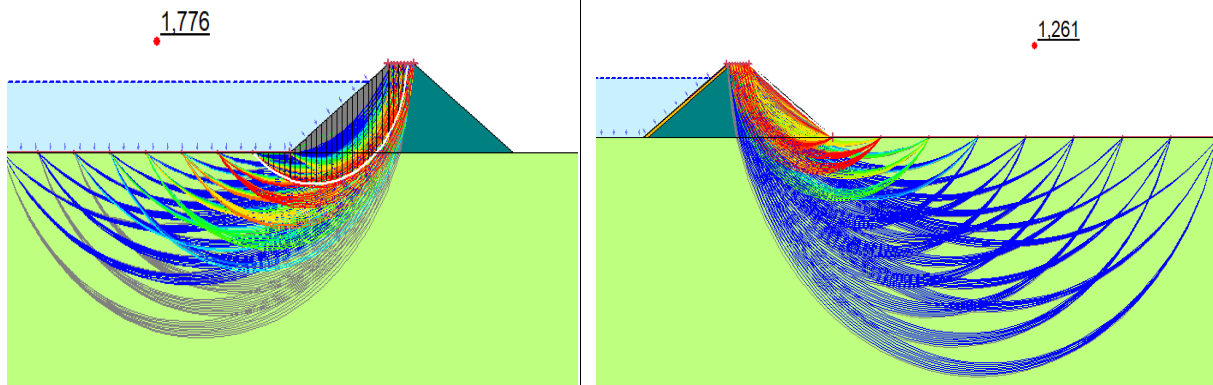
Fonte: Autora (2019).

Barragem de Concreto – Método Bishop, montante e jusante



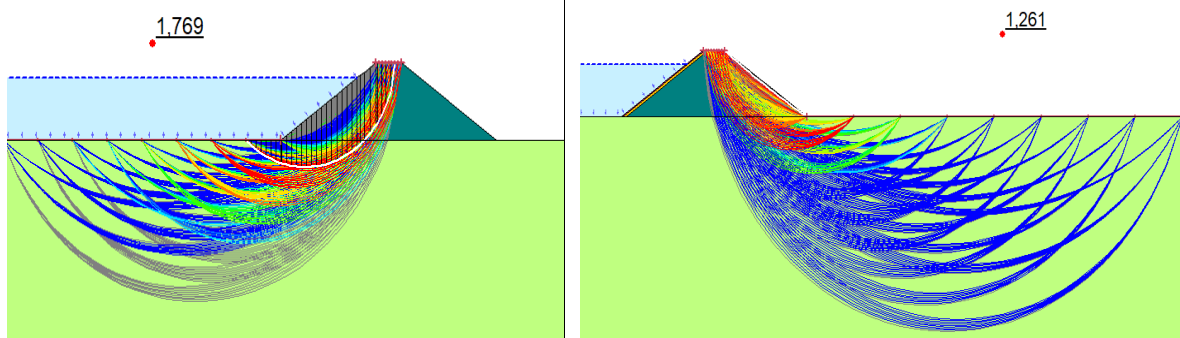
Fonte: Autora (2019).

Barragem de Concreto – Método Morgenstern - Price, montante e jusante



Fonte: Autora (2019).

Barragem de Concreto – Método Spencer, montante e jusante



Fonte: Autora (2019).