

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

COMPARAÇÃO DO QUANTITATIVO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE  
BARRAGENS DE REJEITO ALTEADAS À MONTANTE E À JUSANTE

MAYRA DE ALMEIDA CARMO

JUIZ DE FORA

2023

COMPARAÇÃO DO QUANTITATIVO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE  
BARRAGENS DE REJEITO ALTEADAS À MONTANTE E À JUSANTE

MAYRA DE ALMEIDA CARMO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Juiz de Fora, como  
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: GEOTECNIA

Orientadora: Tatiana Tavares Rodriguez

Coorientadora: Julia Righi de Almeida

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2023

COMPARAÇÃO DO QUANTITATIVO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE  
BARRAGENS DE REJEITO ALTEADAS À MONTANTE E À JUSANTE

MAYRA DE ALMEIDA CARMO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução N° 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Por:

---

Prof.(a) TATIANA TAVARES RODRIGUEZ, D.Sc/M.Sc (Orientadora)  
Universidade Federal de Juiz de Fora/ Dpto De Transportes E Geotecnia - TRN

---

Prof.(a) JULIA RIGHI DE ALMEIDA, D.Sc/M.Sc (Coorientadora)  
Universidade Federal de Juiz de Fora/ Dpto De Transportes E Geotecnia - TRN

---

Prof.(a) CATIA DE PAULA MARTINS, D.Sc/M.Sc (Examinadora 01)  
Universidade Federal de Juiz de Fora/ Dpto De Transportes E Geotecnia - TRN

---

Prof.(a) MARIO VICENTE RICCIO FILHO, D.Sc/M.Sc (Examinador 02)  
Universidade Federal de Juiz de Fora/ Dpto De Transportes E Geotecnia - TRN

## AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus, pela força, poder e coragem para vencer essa batalha.

À minha avó e mãe do coração, Conceição, que tanto contribuiu para minha formação pessoal, com carinho e firmeza, pelo cuidado e zelo de todos os dias. Aos meus pais, Maria Celia e Rogério, e ao meu tio Ronaldo, por me apoiarem e abraçarem comigo esse sonho da graduação. Aos meus avós, Leninha e Quinca, este que olha por mim lá de cima... e meu avô Tião, por me ensinarem tanto sobre a vida, e principalmente a enxergar a grandiosidade das coisas simples. Tive a sorte de crescer rodeada de pais e mães que também chamo de tios e tias, inclusive minha madrasta, um agradecimento em especial a todos eles, que sempre se fizeram presentes na minha vida. Aos meus primos e primas, em especial a Fernanda, por compartilharem a vida comigo e serem ombro amigo sempre que precisei. E ainda, à razão pela qual eu nunca desisti, meus irmãos, minha vida... Thiago, Vitor Hugo, Joaquim, Ronaldo e Nicolas, obrigada por serem minha força diária.

Ao meu companheiro, André, por me apoiar e cuidar de mim quando mais precisei, pessoa fundamental nessa jornada da graduação. Aos meus amigos e amigas, em especial à Elisa, que esteve sempre ao meu lado. Aos colegas de profissão, por compartilharem das entregas, dos contratempos e das comemorações, vencemos essa. E aos irmãos e irmãs de Rotaract, por mesmo distantes se fazerem tão presentes, e me ensinaram a utilizar da minha profissão para fins nobres, em especial a Letícia e Sara.

Aos professores que passaram pela minha graduação, os gigantes aos quais me apoiei, um muito obrigada por todo o aprendizado, dentro e fora da sala de aula, e um agradecimento especial à minha orientadora Tatiana Rodriguez, por ser além de ser uma profissional inspiradora, uma pessoa que acredita em pessoas, obrigada pela paciência comigo, por transformar a escrita deste trabalho tão leve. Ainda, à minha co-orientadora, Julia Righi, a qual tive a oportunidade de ser monitora e conhecer um pouco do seu trabalho impecável, duas professoras que são inspirações na Faculdade de Engenharia.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os colegas que pude compartilhar conhecimento na Microraptor, na Coordenação de Estágios, em especial ao Otávio Bittencourt, por me ensinar a ser uma profissional íntegra e sempre em busca do melhor. Às colegas da monitoria de

Geologia, aos amigos e amigas do Diretório Acadêmico da Faculdade de Engenharia e às parcerias firmadas na Duall e Consulte, empresas nas quais pude aprender na prática a me tornar uma melhor profissional de Engenharia.

“[...] O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem. [...]”

*João Guimarães Rosa*

## RESUMO

As barragens de rejeito são importantes para a manutenção da indústria minerária no Brasil e no mundo, executadas a fim de realizar a contenção da sobra do processo de beneficiamento do minério, de forma segura e eficiente. Para as operações são utilizadas técnicas de alteamento à montante, à jusante e por linha de centro, entretanto, desde os rompimentos de Mariana-MG e Brumadinho-MG, ocorridos em 2015 e 2019, respectivamente, a ANM (Agência Nacional de Mineração), junto à órgãos competentes regulamentadores proibiram a construção de novas barragens pelo método e criando um plano de descaracterização destas barragens até 2030. O fato da existência numerosa de construções com tal método de alteamento apesar da recorrência de acidentes envolvendo-as, deve-se, principalmente, ao custo relativamente menor se comparadas com as demais técnicas. Logo, enquanto questão central desta monografia é saber quais os elementos que compõem tal custo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é comparar os elementos construtivos que influenciam diretamente no custo de construção de uma barragem com alteamento à montante e uma barragem com alteamento à jusante, ambas com volume de contenção de rejeitos equivalentes, determinados pelo software AutoCAD, da Autodesk. Para tanto, foram analisados os fatores de segurança para estabilidade dos taludes de jusante dos dois tipos de barragem, através do software Slope/W, da GeoStudio. Ao findar das análises e comparação dos elementos construtivos em relação aos custos, foi confirmada a hipótese de que barragem a jusante possui um quantitativo maior, quando comparados os volumes de materiais do que barragem à montante, devido, principalmente, aos custos atrelados à fundação e construção do maciço.

Palavras-chave: Alteamento à Jusante; Alteamento à Montante; Elementos Construtivos; Custo.

## **ABSTRACT**

Tailings dams are important for the maintenance of the mining industry in Brazil and in the world, executed to carry out in order to carry out the containment of the surplus of the ore beneficiation process, in a safe and efficient way. Upstream, Downstream and Center Line raising techniques are used, however, since the Mariana-MG and Brumadinho-MG ruptures, which occurred in 2015 and 2019, respectively, the ANM (National Mining Agency), together with the competent regulators, banned construction of new dams by the method and creating a plan to un-characterize these dams until 2030. Recurrence of accidents involving them is mainly due to the relatively lower cost compared to other techniques. The question here is to know which elements make up such a cost. The objective of this work is to compare the constructive elements that directly influence the construction cost of a dam with heightening upstream and a dam with heightening downstream, both with equivalent tailings containment volume, determined by Autodesk AutoCAD software. For this purpose, the safety factors for the stability of the downstream slopes of the two types of dams were analyzed using the software Slope/W, from GeoStudio. At the end of the analyzes and comparison of the constructive elements in relation to costs, the hypothesis was confirmed that the downstream dam has a greater quantity, when comparing the volumes of materials than the upstream dam, mainly due to the costs linked to the foundation and construction of the massif.

Keywords: Upstream raising; Downstream raising; Constructive Elements; Cost

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Elementos de uma barragem pelo Método Construtivo de Montante.....	23
Figura 2: Principais riscos de ruptura causados pelo alteamento segundo o método de montante .....	24
Figura 3: Seção Típica da Barragem Forquilha III.....	26
Figura 4: Hidrociclone (a) e seu esquema (b) .....	27
Figura 5: Método Construtivo de Jusante.....	28
Figura 6: Seção Típica da Barragem Maravilhas II referente ao 5º alteamento .....	29
Figura 7: Método Construtivo de Linha de Centro .....	29
Figura 8: Linha do Tempo com os principais marcos na Legislação de Barragens de Rejeito no Brasil.....	35
Figura 9: Boas Práticas para segurança de grandes instalações .....	36
Figura 10: Sequência ilustrativa de um overtoping (galgamento).....	38
Figura 11: Sequência ilustrativa de um piping .....	39
Figura 12: - Sequência geral do processo da liquefação. ....	40
Figura 13: Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração .....	42
Figura 14: Fluxograma de Metodologia do Trabalho.....	45
Figura 15: Modelo 01 de Barragem a Montante.....	48
Figura 16: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 02 .....	50
Figura 17: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 03 .....	50
Figura 18: Análise de FS do Talude 02 ao Talude 03 .....	51

Figura 19: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 04 .....	51
Figura 20: Análise de FS do Talude 03 ao Talude 04 .....	52
Figura 21: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 05 .....	52
Figura 22: Análise de FS do Talude 04 ao Talude 05 .....	53
Figura 23: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 06 .....	53
Figura 24: Análise de FS do Talude 05 ao Talude 06 .....	54
Figura 25: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 07 .....	54
Figura 26: Análise de FS do Talude 06 ao Talude 07 .....	55
Figura 27: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 08 .....	55
Figura 28: Análise de FS do Talude 07 ao Talude 08 .....	56
Figura 29: Análise Global NA em Operação Normal .....	56
Figura 30: Análise Global com N.A. na extremidade .....	57
Figura 31: Modelo 02 de Barragem a Montante.....	58
Figura 32: Análise Global .....	59
Figura 33: Análise de FS do Talude 01 ao 05 .....	59
Figura 34: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 02 .....	60
Figura 35: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 03 .....	60
Figura 36: Análise de FS do Talude 02 ao Talude 03 .....	61
Figura 37: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 04 .....	61
Figura 38: Análise de FS do Talude 03 ao Talude 04 .....	62

Figura 39: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 05 .....	62
Figura 40: Análise de FS do Talude 04 ao Talude 05 .....	63
Figura 41: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 06 .....	63
Figura 42: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 07 .....	64
Figura 43: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 08 .....	64
Figura 44: Análise Global .....	65
Figura 45: Análise Global com N.A. na extremidade .....	65
Figura 46: Modelo 02 de Barragem a montante (AutoCAD) .....	66
Figura 47: Modelo 02 de Barragem a Jusante (AutoCAD) .....	67
Figura 48: Modelo da Barragem de Jusante no Alçamento 01 .....	68
Figura 49: Análise de FS do Talude 01 ao 02 .....	68
Figura 50: Análise de FS do Talude 01 ao 03 .....	68
Figura 51: Análise de FS do Talude 02 ao 03 .....	69
Figura 52: Análise de FS do Talude 01 ao 04 .....	69
Figura 53: Análise de FS do Talude 03 ao 04 .....	70
Figura 54: Análise Global .....	70
Figura 55: Análise Global com NA na extremidade .....	70
Figura 56: Análise de FS do Talude 01 ao 02 .....	71
Figura 57: Análise de FS do Talude 01 ao 03 .....	71
Figura 58: Análise de FS do Talude 02 ao 03 .....	72

Figura 59: Análise de FS do Talude 01 ao 04 .....	72
Figura 60: Análise de FS do Talude 03 ao 04 .....	72
Figura 61: Análise de FS do Talude 01 ao 05 .....	73
Figura 62: Análise de FS do Talude 04 ao 05 .....	73
Figura 63: Análise de FS do Talude 01 ao 06 .....	74
Figura 64: Análise de FS do Talude 05 ao 06 .....	74
Figura 65: Análise Global .....	74
Figura 66: Análise Global com NA na extremidade .....	75

## LISTA DE IMAGENS

Imagem 1: Vale - Mina da Fábrica - Barragem Forquilha III .....	25
Imagem 2: Vale - Mina do Pico - Barragem Maravilhas II.....	28
Imagem 3: Vale - Mina Timbopeba - Barragem do Doutor .....	30
Imagem 4: Conteúdo da Barragem de Rejeito de Mout Polley descendo o córrego Hazeltine e atingindo o lago Quesnel .....	31
Imagem 5: Bento Rodrigues após o rompimento .....	32
Imagem 6: Brumadinho, MG, após o rompimento.....	33

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1: Relação de falhas em barragens considerando o método construtivo .....	21
---	----

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Relação de Custos e Unidades.....	46
Tabela 2: Resumo com os parâmetros geotécnicos dos materiais.....	47
Tabela 3: Resumo dos FS do Modelo 01 de Barragem à Montante .....	57
Tabela 4: Resumo das análises de barragem a montante.....	66
Tabela 5: Resumo dos FS das Análises de Barragem de Jusante .....	75
Tabela 6: Informações da geometria das barragens.....	76
Tabela 7: Comparação de elementos construtivos das barragens.....	76

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CRI	Categoria de Risco
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
EACH	Escola de Artes, Ciências e Humanidades
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FS	Fator de Segurança
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PL	Projeto de Lei
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SINIMA	Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente
SNISB	Sistema de Informações sobre Segurança de Barragens
USP	Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	19
1.2 OBJETIVO .....	22
1.3 ESTRUTURA.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 BARRAGEM DE REJEITO: MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	23
2.1.1 Método De Montante .....	23
2.1.2 Vale – Mina da Fábrica – Barragem Forquilha III.....	25
2.1.3 Método de Jusante.....	26
2.1.4 Vale – Mina do Pico – Barragem Maravilhas II .....	28
2.1.5 Método de Linha de Centro:.....	29
2.1.6 Vale - Mina Timbopeba - Barragem do Doutor.....	30
2.1.7 Rompimento de Barragens no Brasil e no mundo: .....	31
2.1.8 Legislação.....	33
2.2 MECANISMOS DE RUPTURA.....	37
2.2.1 Fator de Segurança.....	40
2.2.2 Parâmetros de Resistência.....	42
2.2.3 Métodos de Estabilidade .....	42
2.3 Custos.....	43
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 Aspectos Importantes.....	46
3.2 Materiais .....	47
3.3 Método de Análise .....	47
4 RESULTADOS E ANÁLISES .....	50
4.1 Análise À Montante – Modelo 01.....	50
4.2 Barragem À Montante – Modelo 02.....	58
4.3 Cálculo Das Áreas Das Seções Típicas Para Comparação Das Barragens.....	66
4.4 Barragem À Jusante – Alçamento 01 .....	67
4.5 Barragem À Jusante – Alçamento 02 .....	71
4.5 Barragem À Jusante – Alçamento 02 .....	71

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	77
REFERÊNCIAS .....	78

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de março de 2019, define como barragem “[...] qualquer estrutura em curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas [...]” (BRASIL, 2019, n.p.). Para fins de estudo deste trabalho, especificamente as barragens de rejeito de mineração são definidas pela Portaria 70.389 de 17 de maio de 2017 como:

barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais; (BRASIL, 2017).

Segundo Farias (2002, p.5), durante a realização da Conferência Rio + 10, de 2002 em Johannesburgo, “[...] a mineração foi considerada como uma atividade fundamental para o desenvolvimento econômico e social de muitos países [...]”, levando em conta a essencialidade dos minérios para a vida moderna. Contudo, Pulino (2010) ressalta que tal atividade contribui com uma vasta quantidade de resíduos depositados em estruturas de barragens de contenção de rejeitos. Ainda, Albuquerque Filho (2004) destaca três métodos construtivos de barragens de rejeitos, que são: (i) Método de Montante; (ii) Método de Jusante; e (iii) Método da Linha de Centro.

O Quadro 1, relacionando os métodos de construção de barragens de rejeito e suas características competitivas em relação à construção, sintetiza as vantagens e desvantagens dos métodos de alteamento a montante e à jusante. Dentre as características apresentadas para cada tipo de método construtivo, é possível observar que elas seguem uma linha de grandes vantagens na seguinte ordem: Jusante, Linha de Centro e Montante, exceto para o último item:

o custo. Se torna mais viável a construção de uma barragem à montante pelo valor despendido do que dos demais tipos.

Quadro 1: Características dos Métodos de Alçamento de Barragens de Rejeito

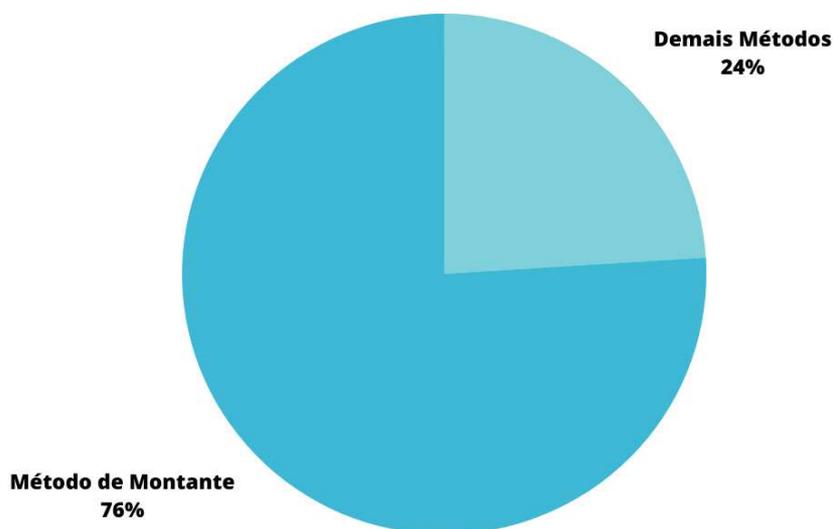
	Montante	Jusante	Linha de Centro
Tipo de Rejeito	Rejeitos de baixa densidade para promover segregação	Qualquer tipo	Areias ou lamas de baixa plasticidade
Armazenamento de água	Não é recomendável para grandes volumes	Aceita um bom armazenamento de água	Aceitável
Resistência sísmica	Pouca resistência a vibrações	Boa resistência a vibrações	Aceita áreas de alta sismicidade
Alçamentos	Recomendável menos de 10m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Materiais para alçamento	Rejeitos ou estéril	Rejeitos ou estéril	Rejeitos ou estéril
Custo	Baixo	Alto	Moderado

Fonte: Modificado de Carvalho Filho, 2008

Dentre os diversos tipos de custo, entende-se que os grupos que geram maior impacto na escolha do método construtivo são: custo de execução, custo de local e custo ambiental, caracterizados respectivamente por Carvalho Filho (2018), Lozano (2006) e Vinaud (2019).

No Brasil, observa-se a existência de barragens construídas pelos três métodos e a ocorrência de falhas, como traz o *Gráfico 1*, sobre a relação de falhas quando comparados métodos de jusante e montante, para Rico *et al.* (2008, *apud* SILVA FILHO, 2019).

Gráfico 1: Relação de falhas em barragens considerando o método construtivo



Fonte: Modificado de Rico *et al.* (2008 *apud* SILVA FILHO, 2019)

Após episódios de falhas em barragem de rejeito no estado de Minas Gerais, o Decreto Estadual 46993/2016 (MINAS GERAIS, 2016) e, logo depois, a Lei 14066/2020 (BRASIL, 2020) apresentam a proibição de construção de alteamento à montante em todo o território mineiro e nacional, respectivamente. Cardozo, Pimenta e Zingano (2016) concluem, em seu trabalho, que o método à montante apresenta maior propensão à falha e propõem utilização do método de jusante, apesar do maior custo construtivo e operacional, justificado pelo melhor controle dos materiais envolvidos e suas propriedades.

Através dos conceitos e dados apresentados neste trabalho, é possível inferir sobre o alto número de construções de barragem com esse tipo de alteamento, ainda que as estatísticas sejam desfavoráveis na questão da segurança. Existe, então, uma grande vantagem competitiva que estabelecia tal escolha: o custo. A questão aqui é: quais são os elementos que influenciam esse custo em questão de quantitativos de materiais de maciço e fundação?

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo principal deste trabalho é, a partir do dimensionamento de duas barragens hipotéticas alteadas à montante e à jusante, realizar uma comparação entre os elementos que compõem os custos construtivos das operações de alteamento.

## **1.3 ESTRUTURA**

Este trabalho apresenta 4 capítulos, além deste introdutório. No capítulo 2, a Revisão Bibliográfica, estão apresentados os métodos construtivos de Barragens de Rejeito, dimensionamento técnico e o detalhamento de seus custos. No capítulo 3, é tratada a Metodologia, situando a Barragem Hipotética e suas características, parâmetros dos materiais e métodos de análise. A partir do dimensionamento de duas barragens, são então, no Capítulo 4, obtidos os resultados e realizadas as análises sobre os custos. Por fim, no Capítulo 5 estão apresentadas as conclusões.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BARRAGEM DE REJEITO: MÉTODOS CONSTRUTIVOS

#### 2.1.1 MÉTODO DE MONTANTE

Segundo Soares (2010), no alteamento de montante, o principal ponto de interesse é que há o uso de rejeitos depositados como estrutura da própria contenção, uma vez que tais rejeitos integram uma praia quando lançados à montante na crista do dique inicial, e que se tornará parte da fundação da construção de um novo alteamento. A *Figura 1* mostra os elementos que compõem o método apresentado e sua disposição.

Figura 1: Elementos de uma barragem pelo Método Construtivo de Montante



Fonte: Albuquerque Filho (2004)

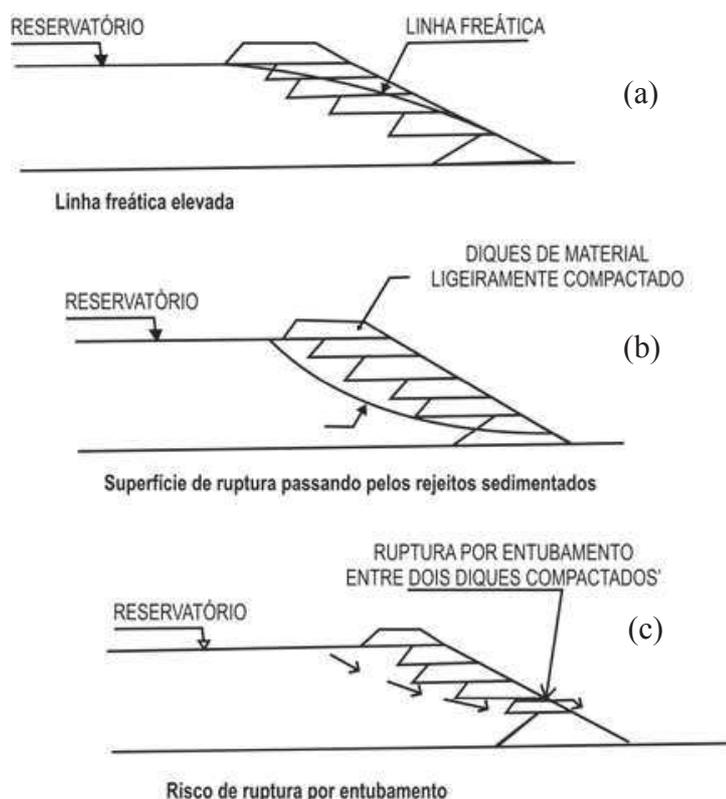
Para que esse sistema opere, o autor completa que no lançamento dos rejeitos, deve ocorrer a segregação granulométrica, quando a parte mais granular se deposita próxima ao maciço e a lama, as partes mais finas, vão em direção à lagoa de decantação. É interessante que “[...] os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, favorecendo a segregação granulométrica.” (SOARES, 2010, p. 850).

Ainda, o alteamento à montante tem como principal vantagem a economia em relação ao custo de construção, destacando os menores volumes na etapa de alteamento, relacionada a uma maior velocidade no processo, facilidade de construção da barragem e o uso reduzido de equipamentos de terraplenagem.

Como desvantagens, este método apresenta menor coeficiente de segurança, uma vez que a linha freática está situada próxima ao talude de jusante (Figura 2a); os rejeitos, base da fundação, são sedimentados, entretanto não devidamente compactados (Figura 2b). Existe,

ainda, a possibilidade de entubamento (*piping*), quando surge água na superfície do talude, na ocorrência de concentração de fluxo em dois diques compactados (Figura 2c); e risco de ruptura por liquefação (SOARES, 2010). A Figura 2 ilustra algumas das desvantagens.

Figura 2: Principais riscos de ruptura causados pelo alteamento segundo o método de montante



Fonte: Silveira; Reades (1973 *apud* SOARES, 2010)

Soares (2010) recomenda cuidados e aplicações de medidas em relação a este método com o intuito de melhorar a segurança e desempenho deste tipo de obra, e geralmente são relacionados ao lançamento de rejeitos, retenções de água, granulometria do material e nível d'água. Apenas para o caso de ocorrências de vibrações, sismos naturais ou induzidos, recomenda-se que este método seja descartado. Em relação à estabilidade das obras, esta é ditada pelo avanço do lago de decantação, ao elevar a superfície do nível freático, possibilitando o entubamento. É preciso que se tenha um cuidado com o talude de jusante em relação às erosões, de acordo com o alteamento subsequente. O monitoramento deve ser uma ação continuada, sendo feito em todo o processo de alteamento até a fase de desativação.

### 2.1.2 VALE – MINA DA FÁBRICA – BARRAGEM FORQUILHA III

Parte do Complexo Itabiritos, localizado em Ouro Preto, Minas Gerais, na Mina da Fábrica, a Barragem Forquilha III foi construída em 2000. Seu alteamento é dado pelo método de montante e por essa razão sofre sucessivos alteamentos sobre os rejeitos depositados, segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2012). Em janeiro de 2022, a BBC (2022) noticiou que, segundo a ANM, apenas 3 barragens no Brasil estavam em emergência nível 3, ou seja, quando há risco iminente de rompimento, dentre elas, a Barragem Forquilha III. Entretanto, nenhum acidente foi registrado desde o início da temporada de chuvas.

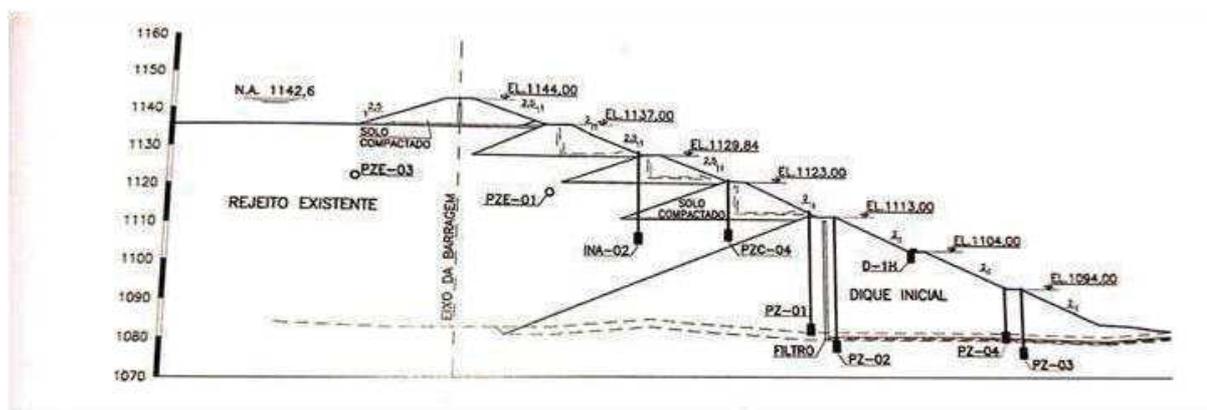
Imagem 1: Vale - Mina da Fábrica - Barragem Forquilha III



Fonte: BBC (2022)

A Figura 3 figura mostra a seção típica da barragem.

Figura 3: Seção Típica da Barragem Forquilha III



Fonte: CBDB (2012)

### 2.1.3 MÉTODO DE JUSANTE

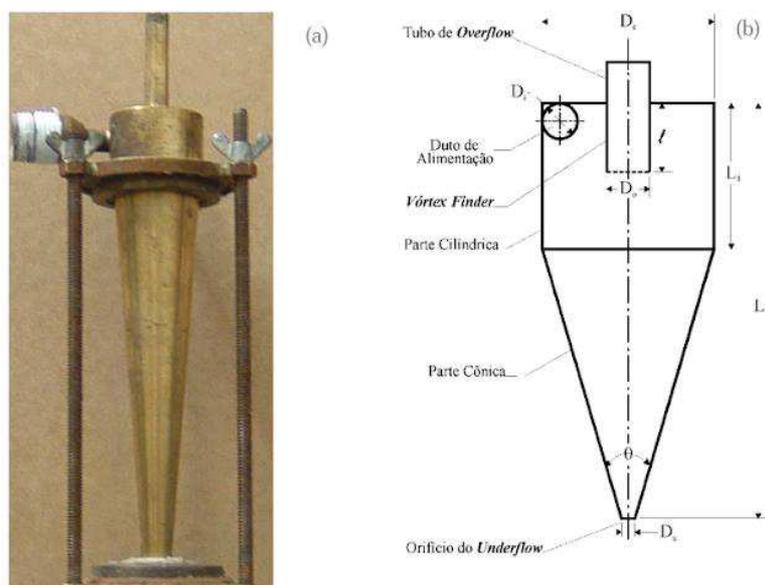
Segundo Soares (2010), no método de jusante, o eixo da barragem se desloca à jusante de acordo com os processos de alteamentos. Também se constrói um dique inicial, impermeável e neste caso, o material normalmente utilizado é argiloso compactado. Possuindo drenagem interna, com filtro vertical e tapete drenante, além do corpo da barragem ser impermeabilizado, podendo ser de argila compactada ou mantas plásticas.

Diferentemente do método anterior, neste somente os rejeitos com maior granulometria são utilizados no alteamento, dentre outros, este é um dos fatores que contribuem para que este tipo de construção possa ser projetada para alturas maiores. São utilizados hidrociclones nos rejeitos e *underflow* lançado no talude, compactado sobre controle construtivo.

Os hidrociclones são dispositivos que separam mecanicamente os rejeitos, por meio do processo de centrifugação. O *underflow* compreende as parcelas grossas, utilizadas na construção do talude jusante, assumindo a estabilidade da barragem, enquanto que o *overflow* está relacionado com as parcelas finas, lançada no reservatório (MAFRA, 2016). A

Figura 4 ilustra um hidrociclone.

Figura 4: Hidrociclone (a) e seu esquema (b)



Fonte: Vieira (2006)

Soares (2010) apresenta como vantagens maior segurança através do controle do alteamento e lançamento de rejeitos; maior resistência às vibrações e ao cisalhamento, relacionada à menor probabilidade de ruptura horizontal; além da possibilidade de instalação de sistemas de drenagem e impermeabilização, enquanto ocorre o processo de alteamento.

As desvantagens são relacionadas ao custo e ao tempo, ou seja, maior volume de material, maior quantidade de rejeito nas primeiras etapas e execução de alteamento mais lento. Destaca-se a impossibilidade de proteção com cobertura vegetal e drenagem superficial ainda na fase de construção, uma vez que há superposição de rejeitos no talude de jusante e necessita de hidrociclones, construção de enrocamento para conter o avanço das parcelas grossas e dique a jusante para contenção desses materiais. A *Figura 5* mostra os elementos que compõem o método apresentado e sua disposição.

Figura 5: Método Construtivo de Jusante



Fonte: Albuquerque Filho (2004)

#### 2.1.4 VALE – MINA DO PICO – BARRAGEM MARAVILHAS II

Propriedade da Vale, a Barragem Maravilhas II, localizada no município de Itabirito, Minas Gerais, na Mina do Pico, faz parte do Complexo Itabiritos (Imagem 2).

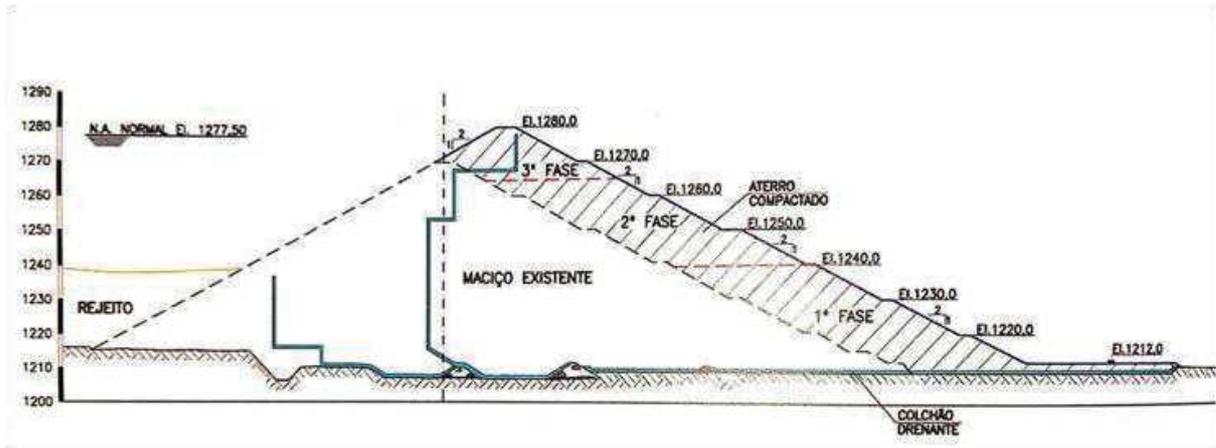
Imagem 2: Vale - Mina do Pico - Barragem Maravilhas II



Fonte: Câmara Municipal de Belo Horizonte (2019)

A barragem possui alteamentos no método de jusante e é do tipo homogênea, de solo compactado. Há drenagem superficial feita por canaletas de ombreira, bermas e descidas d'água. A *Figura 6* mostra a seção típica da barragem.

Figura 6: Seção Típica da Barragem Maravilhas II referente ao 5º alteamento



Fonte: CBDB (2012)

### 2.1.5 MÉTODO DE LINHA DE CENTRO:

Para Albuquerque Filho (2004), barragens de rejeito alteadas pelo método da linha de centro representam uma variação do método de jusante, pois o alteamento da crista é realizado de forma vertical. Acrescenta ainda que, de maneira geral, o método pode ser apresentado como uma solução de geometria intermediária entre os dois métodos aqui descritos, agregando vantagens e desvantagens a ambos.

Um dique de partida é construído inicialmente, no qual os rejeitos são lançados à montante, formando a praia de rejeitos. Sobre a praia formada, os rejeitos são lançados formando os alteamentos subsequentes, sobre o talude de jusante do dique inicial. Coincide-se, neste método, o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos alteamentos sucessivos (SOARES, 2010). A *Figura 7* mostra os elementos que compõem o método apresentado e sua disposição.

Figura 7: Método Construtivo de Linha de Centro



Fonte: Albuquerque Filho (2004)

Soares (2010) insere vantagens e minimiza desvantagens em relação aos métodos anteriores, destacando a facilidade de construção; a possibilidade de usar materiais oriundos de áreas de empréstimo, como estéril ou *underflow* dos hidrociclones para o alteamento; além de permitir o controle da linha freática do talude à jusante. Como desvantagens, têm-se a ocorrência em potencial de escorregamentos na área à montante; necessidade de uso de hidrociclones, enrocamento de pé e impossibilidade de tratamentos da superfície, como mencionados no método de jusante.

#### 2.1.6 VALE - MINA TIMBOPEBA - BARRAGEM DO DOUTOR

Propriedade da Vale e localizada em Ouro Preto, Minas Gerais, no Complexo Minerador de Mariana, na Mina Timbopeba, a Barragem do Doutor foi construída em 2001 e desde 2005 recebe todos os rejeitos e lamas provenientes do tratamento mineral da Usina de Timbopeba. É alteada com os próprios rejeitos, partindo de um dique inicial de terra compactada, pelo método de linha de centro. Os rejeitos são ciclonados, sendo o *underflow* lançado a jusante e o overflow, contendo a maior parte de água, à montante, formando uma praia de rejeitos de extensão variável, com inclinação de aproximadamente 1% (no mínimo) (CBDB, 2012). A *Imagem 3* traz uma vista aérea da Barragem do Doutor – Mina Timbopeba - Vale

Imagem 3: Vale - Mina Timbopeba - Barragem do Doutor



Fonte: Carvalho (2020)

### 2.1.7 ROMPIMENTO DE BARRAGENS NO BRASIL E NO MUNDO:

Segundo Marshall (2017), em 2014 uma barragem de rejeitos tóxicos de extração de cobre e ouro, na mina Mount Polley, sofreu ruptura na província da Colúmbia Britânica, na costa oeste do Canadá. Propriedade da empresa Imperial Metals, aproximadamente 24 milhões de m<sup>3</sup> de lama foi carregada através do Lago Polley, avançando o Córrego Hazeltine até atingir o Lago Quesnel, como pode ser visto na *Imagem 4*, provocando diversos prejuízos econômicos e social.

Imagem 4: Conteúdo da Barragem de Rejeito de Mout Polley descendo o córrego Hazeltine e atingindo o lago Quesnel



Fonte: HAYWARD (2017 *apud* Marshall, 2017)

Em 2015, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, houve o rompimento da barragem do Fundão, a qual recebia rejeitos de extração de minério de ferro e era propriedade da empresa Samarco (joint venture da Vale S.A. e PHP Billiton). Segundo o Ibama (2020), seria então “[...] o maior desastre socioambiental do país no setor de mineração, com o lançamento de cerca de 45 milhões de metros cúbicos de rejeitos no meio ambiente. [...]”, que causaram a destruição do Rio Doce; a onda de lama percorreu mais de 600km atravessando os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, atingindo o Oceano Atlântico. Este então, foi o maior desastre brasileiro registrado envolvendo rejeitos de mineração (MARSHALL, 2017).

A *Imagem 5* apresenta Bento Rodrigues, um mês após o rompimento, em dezembro de 2015.

Imagem 5: Bento Rodrigues após o rompimento



Fonte: MILANEZ (2017 *apud* Marshall, 2017)

Em 25 de janeiro de 2019, Minas Gerais foi alvo de mais uma tragédia, a barragem da mina Córrego do Feijão, da Vale, rompeu em Brumadinho, provocando a morte de 272 pessoas, segundo o Sindicato Nacional Dos Docentes Das Instituições De Ensino Superior – Andes (2022). Foram 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração despejados na bacia do rio Paraopeba, percorrendo mais de 300km. A barragem era alteada à montante. (ANDES, 2022)

A *Imagem 6* apresenta Brumadinho após o rompimento da barragem da Vale.

Imagem 6: Brumadinho, MG, após o rompimento



Fonte: Sharif (2022 *apud* ANDES, 2022)

Assim, Silva e Ribeiro (2020), motivadas pelos desastres ocorridos nos últimos anos, ressaltam a importância da necessidade e permanência de melhores condições de segurança, fiscalização e monitoramento das barragens, trabalhando dentro da possibilidade a evitar acidentes, rupturas e outros danos.

#### 2.1.8 LEGISLAÇÃO

A partir da relação de falhas observadas no *Gráfico 1*, tornou-se necessário rever os conceitos de segurança em barragens conforme a legislação. Segundo a ANM (2021), ainda na década de 70, começou a ser trabalhada no Brasil uma legislação de segurança de barragem, com pequenos avanços nas décadas de 80 e 90, culminando, assim, à proposição do PL nº 1.181/2003, dando origem à Lei nº 12.334/2010, a qual trouxe,

[...] a implantação da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), o Sistema de Classificação de Barragens de acordo com o Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA), criou o Plano de Segurança de Barragens

(PSB), o Sistema de Informações Sobre Segurança de Barragens (SNISB), o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA) e o Relatório de Segurança de Barragens (RSB). (ANM, 2021).

Especialmente em Minas Gerais, em 2016, após o rompimento da barragem da Samarco, por meio do Decreto Estadual 46993/2016 (MINAS GERAIS, 2016), institui-se auditoria técnica extraordinária para barragens com método de alteamento para montante, assim como suspende-se emissões de orientação básica e formalização de processos de licenciamento ambiental de novas barragens, ou ampliação de barragens cujo método construtivo seja à montante.

Após inúmeras Portarias e Resoluções, em 2017, a Portaria DNPM nº 70.389/2017 estabeleceu critérios para a mineração, especificamente proprietários de barragem dessa área. Em 2019, em decorrência dos últimos acidentes significativos com barragem de rejeitos, especialmente construídas pelo método de alteamento a montante, a ANM, através da Resolução ANM nº 13/2019, proíbe a construção de novas barragens a montante e exige o descomissionamento e descaracterização das barragens já existentes com este tipo de alteamento, estabelecendo prazos de elaboração e conclusão dos projetos.

Finalmente, em 2020, segundo a Lei 14066/2020 (BRASIL, 2020),

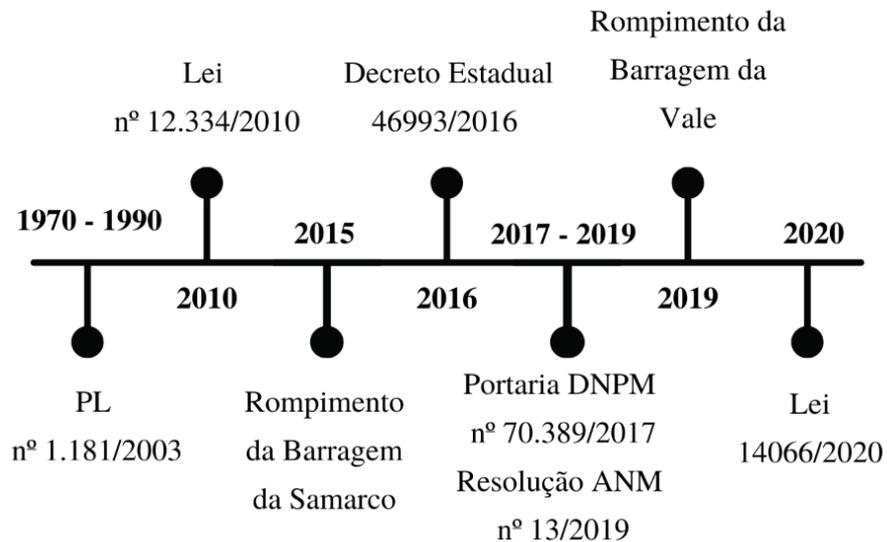
Art. 2º-A . Fica proibida a construção ou o alteamento de barragem de mineração pelo método a montante.

§ 1º Entende-se por alteamento a montante a metodologia construtiva de barragem em que os diques de contenção se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado.

§ 2º O empreendedor deve concluir a descaracterização da barragem construída ou alteada pelo método a montante até 25 de fevereiro de 2022, considerada a solução técnica exigida pela entidade que regula e fiscaliza a atividade minerária e pela autoridade licenciadora do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama).

A *Figura 8* apresenta os principais marcos da legislação de barragens de rejeito no Brasil.

Figura 8: Linha do Tempo com os principais marcos na Legislação de Barragens de Rejeito no Brasil



Fonte: Autora (2022)

A Agência Nacional de Mineração apresenta como dados de tipos de construção de barragens de mineração no Brasil os seguintes percentuais: 55,3% (510) alteadas em etapa única, 21,1% (195) alteadas à jusante, 11,6% (107) alteadas por linha de centro, 6,9% (64) alteadas à montante ou desconhecido e 5,0% (46) não preenchido (ANM, 2022).

Em relação à segurança de barragens no Brasil e no mundo, em entrevista para Takar (2019), especialistas confirmam que a legislação brasileira é tão funcional quanto a de outros países, entretanto a falta de fiscalização compromete o cumprimento das normas e regulamentações. Para Takar (2019), o lucro é força motriz da mineração, por essa razão, gastos com segurança são colocados em segundo plano, o que leva ao acontecimento de tragédias, como as de Mariana e Brumadinho, em Minas Gerais. Segundo Marcelo Marini Pereira de Souza, presidente da Abai (Associação Brasileira de Avaliação de Impacto) e professor do Programa de pós-graduação em Sustentabilidade da EACH/USP:

A Austrália cumpre as boas práticas que garantem a segurança de qualquer grande empreendimento [...] No Brasil, infelizmente, as boas práticas de segurança não são seguidas. Os projetos buscam reduzir custos ao extremo. O licenciamento ambiental é questionável. A

fiscalização dos empreendimentos não é adequada. O monitoramento é feito por meio de autodeclaração das empresas, o que pode gerar fraudes. E a punição... bem, veja o caso de Mariana. Até hoje as famílias atingidas continuam morando em casas alugadas (SOUZA, 2019 *apud* TAKAR, 2019).

A *Figura 9* ilustra um ciclo de boas práticas de segurança a ser seguidos em grandes instalações.

Figura 9: Boas Práticas para segurança de grandes instalações



Fonte: Takar (2019)

Os números não estão a favor da legislação, a ANM (Agência Nacional de Mineração) possui, em 2019, apenas 34 funcionários para fiscalização dos empreendimentos, incluindo as 790 barragens de rejeitos do Brasil (TAKAR, 2019). Em relação ao custo, o professor da Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), Sérgio Médico de Eston diz:

É algo cultural, enraizado. Uma obsessão. Aqui, infelizmente, segurança é visto como custo. A prioridade é o lucro. A diretoria da empresa está preocupada em agradar o mercado financeiro [...] Por que se constrói barragem pelo método a montante? Porque é mais barato. O método a jusante, mais seguro, custa o triplo. O problema é que, quando acontece uma

tragédia como essa, o custo de reparação é infinitamente maior para a companhia.” (ESTON, 2019 *apud* TAKAR, 2019).

Ainda, sobre a estrutura de uma barragem de rejeito alteada à montante, Alberto Fonseca, professor de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, afirma que “Para que uma barragem a montante funcione com segurança, você precisa ter um sistema de controle mais eficiente. Ela exige uma rotina de cuidados mais frequente.” (FONSECA, 2019 *apud* TAKAR, 2019).

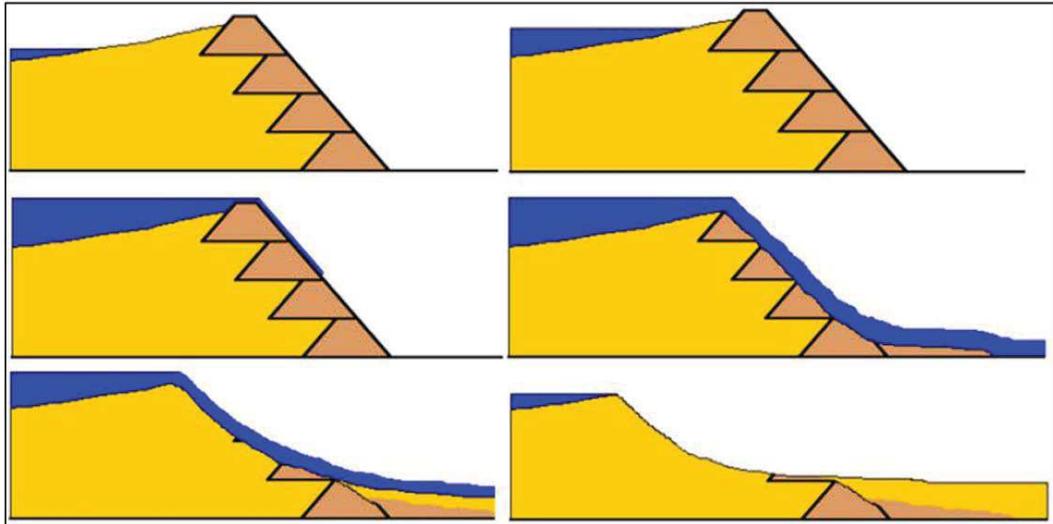
## 2.2 MECANISMOS DE RUPTURA

Para Marangon (2020), as barragens de rejeitos são estruturas complexas nas quais há a possibilidade de causar danos à sociedade, sejam materiais ou pessoais, com impactos nas áreas ambiental, econômica, de segurança e imagem institucional. Por esses motivos, é importante dar uma atenção especial à gestão da segurança em barragens.

Mecanismos de ruptura, instabilidade em barragem, modos de falha ou eventos de risco, são algumas das expressões para trabalhar o tema tão importante no contexto de riscos e segurança em barragens de rejeitos. Como em qualquer construção, uma barragem também pode apresentar falhas que resultam na instabilidade ou até colapso da estrutura. A título de projeto, é preciso compreender “[...] os seguintes mecanismos de ruptura: instabilidade física, galgamento, erosão interna (*piping*), e liquefação, quando aplicável.” (MARANGON, 2020).

O galgamento, ou *overtopping*, ocorre quando o sistema de extravasão não é capaz de verter a vazão do reservatório, relaciona-se à passagem da água, neste caso, do rejeito, pela crista do dique, o que ocasiona na ruptura total ou parcial do corpo da barragem. A ruptura por galgamento em barragens de rejeito tem motivos de falhas semelhantes às barragens convencionais, porém diferem-se nas circunstâncias que desencadeiam o galgamento. Devido ao processo erosivo, pode ocorrer aumento de brechas na crista da barragem, a depender da intensidade e tempo do galgamento (CAETANO, 2022; VALERIUS, 2014). A *Figura 10* apresenta a sequência de um galgamento.

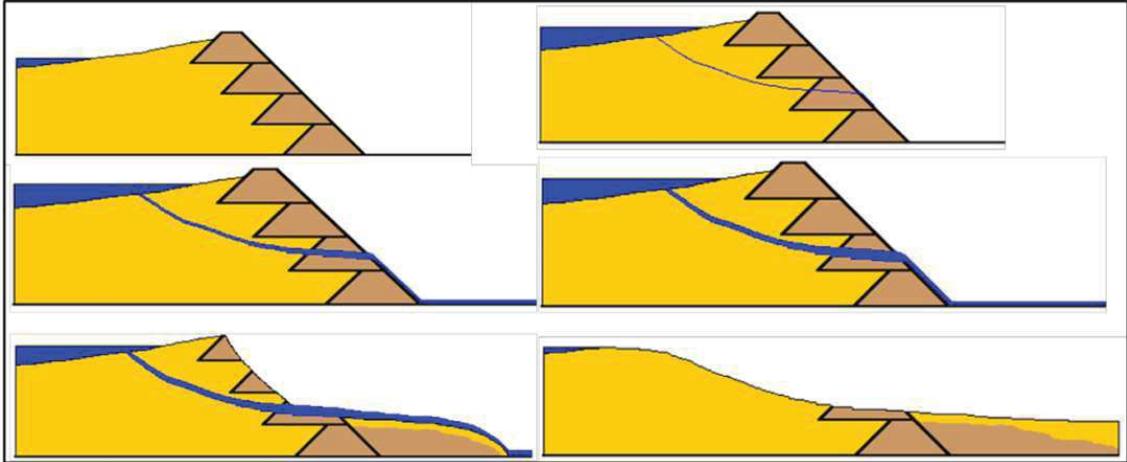
Figura 10: Sequência ilustrativa de um *overtopping* (galgamento)



Fonte: Galo (2017)

O *piping*, segundo Galo (2017), se configura como uma erosão interna de jusante à montante, em que se forma um orifício alongado e há carreamento de partículas de solo pelo corpo da barragem, que ocorre devido ao fluxo excessivo de água. O deslocamento das partículas enfraquece as forças na matriz do solo, e desestabiliza o estado de tensões no maciço. Com o aumento do fluxo, há formação de canais, levando a estrutura à ruína. Atribui-se esse tipo de ruptura às falhas no sistema de drenagem interna, quando ocorre no corpo do aterro; já em fundações ou ombreiras, além de drenagem interna, também pode-se relacionar a problemas geológicos ou construtivos. A *Figura 11* ilustra a sequência de uma ruptura através de erosão interna (*piping*).

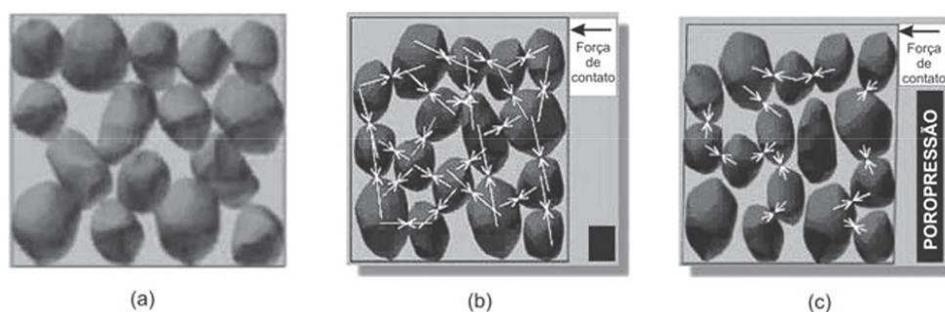
Figura 11: Sequência ilustrativa de um *piping*



Fonte: Galo (2017)

De forma simplista, a liquefação ocorre em consequência de elevadas poropressões, induzindo redução das tensões efetivas do material, tornando o atrito entre os grãos muito baixo ou nulo. Neste ponto, o rejeito se comporta como um fluido, perdendo a resistência esperada no projeto (MARANGON, 2020; GALO, 2017). A liquefação relaciona-se normalmente a carregamentos estáticos (poropressões induzidas) ou dinâmicos (sismos ou vibrações), em grande parte das vezes, ocorrendo em barragens com método de alteamento a montante. A liquefação estática não se relaciona a eventos sísmicos e sim ao aumento das poropressões induzidas, podendo ser por aumento da superfície freática ou rápidos alteamento, ou seja, uma taxa de carregamento excessiva; já a liquefação dinâmica ocorre quando há eventos sísmicos e altas vibrações (GALO, 2017). A *Figura 12* ilustra o processo de liquefação.

Figura 12: Sequência geral do processo da liquefação



Fonte: Pereira (2005)

A estabilidade física de taludes está relacionada à tensão de cisalhamento que atua em uma massa de solo delimitada por uma superfície, e quando a tensão supera a resistência ao cisalhamento do material, ocorre a ruptura. O cisalhamento em si não ocasiona o início de uma ruptura, e sim eventos de naturezas diversas. Em barragens de rejeitos, as situações mais recorrentes são: “[...] elevação e aproximação da superfície freática do talude de jusante; elevação das poropressões durante as etapas de alteamento pela passagem de maquinário pesado e durante o trabalho de disposição dos rejeitos [...]” (VALERIUS, 2014, p. 15).

Tal instabilidade pode ser provocada por acréscimo de poropressão, que pode ocorrer durante um carregamento devido a um alteamento ou até pela rápida disposição de rejeitos. Esse fenômeno pode ser desenvolvido nos rejeitos, na fundação ou até mesmo na barragem, não permitindo a dissipação da poropressão, ocasionada pelo baixo coeficiente de permeabilidade (VICK, 1983 *apud* VALERIUS, 2014). Pode ainda, ser provocado por elevação da superfície freática ou problemas em fundações.

### 2.2.1 FATOR DE SEGURANÇA

Para Caetano (2022), a segurança de taludes é um tema de extrema importância, e estudar sua estabilidade é fundamental, independente da fase de projeto (operação ou barramento) ou tipo de aterro (compactados, escavados ou naturais).

O fator de segurança (FS) é definido como a razão da resistência ao cisalhamento e as forças cisalhantes atuantes na superfície de ruptura. A seguir, são apresentadas as equações I, II e III.

$$FS = \frac{s}{S_m} \quad (I)$$

Em que,

FS – Fator de Segurança;

s – Resistência ao cisalhamento disponível do solo;

$S_m$  – Tensão de cisalhamento mobilizada.

E,

$$s = c' + (\sigma - u)tg\phi' \quad (II)$$

Logo,

$$S_m = \frac{1}{FS} [c' + (\sigma - u)tg\phi'] \quad (III)$$

O Fator de Segurança pode ser obtido ainda pela relação entre os momentos das forças atuantes sobre a cunha, em um referencial situado fora do talude. Chegando a conclusão de que pode-se considerar um maciço estável quando o FS for maior que 1, uma vez que os esforços atuantes serão menores que os esforços resistentes, como na equação IV (MARANGON, 2020; ABNT, 2018).

$$FS = \frac{\sum Mr}{\sum Ma} \quad (IV)$$

Em que,

Mr – Momento devido as forças de equilíbrio;

Ma – Momento devido as forças de instabilidade.

A norma NBR 13028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) traz alguns valores de Fator de Segurança mínimos relacionando fase, tipo de ruptura e talude, ilustrada na *Figura 13*.

Figura 13: Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção <sup>a</sup>	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal	Maciço	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,1
<sup>a</sup> Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas como "final de construção", devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.			

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017)

## 2.2.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Segundo Rodrigues (2015), os solos compostos por uma granulometria variada apresentam tanto coesão ( $c$ ) quanto ângulo de atrito ( $\phi$ ), os quais, denominados como parâmetros de resistência do solo, podem ser obtidos em laboratório através de ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais. O ângulo de atrito é relacionado à resistência por atrito entre as partículas e é o máximo ângulo formado pela força cisalhante com a normal para que não haja deslizamento. Coesão é a resistência que o solo apresenta devido a esse atrito; a coesão real pode ser entendida como a atração química entre as partículas, não dependendo da força normal, e difere-se da coesão aparente, determinada pela pressão capilar da água (VIECILI, 2003).

## 2.2.3 MÉTODOS DE ESTABILIDADE

Os métodos de análise de estabilidade podem ser determinísticos ou probabilísticos, atribuindo valor médio às variáveis de cálculo do fator de segurança ou considerando os parâmetros de entrada como variáveis aleatórias, respectivamente, e neste segundo caso, deduz-se pela probabilidade de ocorrência e distribuição de frequência. Divididos em três grandes grupos, os métodos mais utilizados são: Métodos de Tylor, do talude infinito e das fatias, o qual é

subdividido em: Método Fellenius ou Método Ordinário; Método de Bishop; Método de Bishop Simplificado; Método de Janbu Simplificado; Método de Spencer e Método de Morgenstern–Price. Este último citado relaciona forças normais e cisalhantes e pode satisfazer o equilíbrio dessas forças e momentos, além de ser o método mais utilizado atualmente no meio geotécnico, inclusive pelo programa Slope/W do pacote GEOSTUDIO (CAETANO, 2022).

### 2.3 CUSTOS

Os processos de estabelecimento dos custos de execução de um serviço ou atividade, também chamado de composição de custos (unitários e totais), é a listagem dos insumos diretamente relacionados ao produto final, detalhando a execução do serviço e suas respectivas quantidades, e tipicamente as categorias envolvidas são: material; mão-de-obra e; equipamento (MATTOS, 2006). Além disso, segundo o SINAPI (2020), são custos indiretos aqueles relacionados à logística, infraestrutura e gestão para a realização da obra, além de serviços de apoio à obra. Mattos (2006) reitera que a soma de custos direto e indiretos definem o orçamento de obras, complementando ainda com localidade, ano e período de execução, fatores que influenciam no preço.

O custo de execução da obra está necessariamente incluído no custo direto reportado acima, e a escolha do método construtivo aborda fatores como materiais, mão de obra, equipamentos e infraestrutura em si, levando em consideração as fases de aterro, drenagem e o próprio rejeito (TIKASA, 2006 *apud* CARVALHO FILHO, 2018). Para Carvalho Filho (2018), também devem ser considerados custos de administração local, composto por corpo técnico e gestores.

O custo local está diretamente relacionado à área física necessária para implementação da barragem de rejeito, sendo avaliados, segundo Ritcey (1989 *apud* LOZANO, 2006), aspectos como armazenamento, disponibilidade do local, hidrologia, custos iniciais, facilidade de operação e condições geológicas e geotécnicas. Ainda, para Robertson *et al.* (1980-81-82-83-99 e 2004 *apud* LOZANO, 2006), fatores ambientais também devem ser levados em consideração para a escolha do local, visando o fim das operações da jazida, como aspectos de recuperação ambiental e fechamento da barragem de rejeito. A metodologia aplicada por Robertson e Shaw (1999, 2004 *apud* LOZANO, 2006) traz como influências fatores socioeconômicos, como população, gastos governamentais e propriedade de terra.

Sobre o custo ambiental, no conteúdo do Anexo I da Resolução CONAMA nº 237/1997, rejeitos em barragens são itens constantes do documento, e tal atividade necessita passar pelo processo de Licenciamento Ambiental, visando a obtenção das seguintes licenças (BRASIL, 1997): Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO). Ainda, considerando o controle de segurança de uma barragem, é preciso incluir um Plano de Emergência, e a zona de auto salvamento (ZAS), “[...] refere-se à proteção do vale a jusante, distante da Barragem [...]” (CAMPOS; POZNYAKOV, 2020, p. 62), incidindo sobre os custos finais da obra.

A publicação da Portaria 70.389/17 obriga o empreendedor instalar sirenes e outros mecanismos de defesa nas ZAS; possuir equipe de segurança de barragem capaz de responder às emergências internas e; realizar exercícios de simulação interna e externa de procedimentos de emergência. Ainda, o empreendedor tem como responsabilidade detectar, avaliar e definir o nível de emergência; notificar e comunicar as autoridades, e cabe às entidades públicas a coordenação e direcionamento das respostas, realizando as fases de ações de emergência, conclusão e acompanhamento. Segundo a Lei 23.291/19, no território mineiro, a ZAS pode ser majorada em 25 km a partir do talude a jusante, levando em consideração aspectos populacionais e demográficos das áreas habitadas. (PEREIRA et al., 2021).

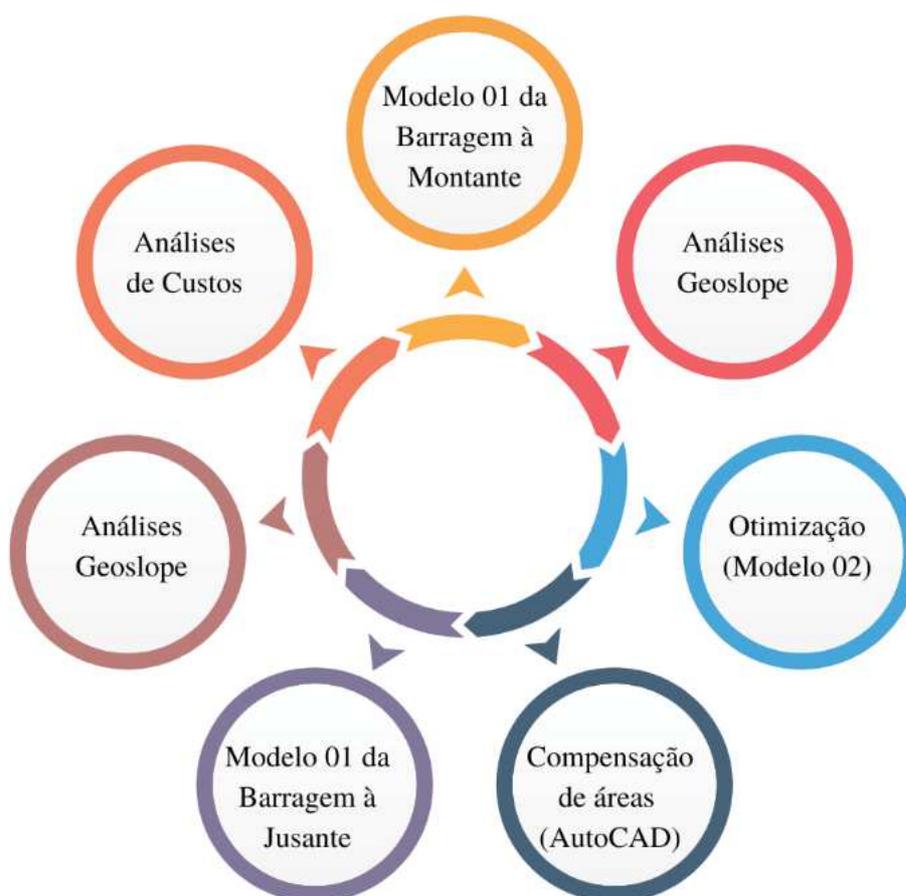
Segundo Campos (2021), com base no Relatório de Segurança em Barragens (ANA, 2021), há uma porcentagem significativa das barragens com comunidades a jusante e não possuem protocolos de resposta à possíveis emergências, dificultando a implementação do PAE e sua relação com a defesa civil e dificilmente encontra-se o alinhamento aos Planos de Contingência Municipais. Por fim, o documento de Orientações para apoio à elaboração de planos de contingência municipais para barragens da Defesa Civil (BRASIL, 2016, p.5) explica que:

Salienta-se que o Plano de Contingência é um esforço na tentativa de reduzir as chances de ocorrência de danos humanos em uma situação emergencial. Não há uma garantia absoluta de que nenhuma vítima ocorrerá, mas é certo que ao dispor de um planejamento prévio, que prepare a população exposta a um determinado risco, bem como os agentes públicos e privados responsáveis pelas ações emergenciais, aumentam-se as chances de preservação de vidas e da integridade física das pessoas.

### 3 METODOLOGIA

Para fins de comparação, será utilizado o programa Slope/W do pacote GEOSTUDIO 2019, a fim de dimensionar os dois tipos construtivos de barragem aqui mencionados. O programa solicita a entrada dos parâmetros de resistência para o material a ser analisado (coesão e ângulo de atrito) e do peso específico. A título deste trabalho, o rompimento a ser avaliado, se dá pelo maciço e não pela fundação, razão pela qual será considerado que a barragem está assente em terreno de alta resistência. A *Figura 14* ilustra a metodologia, os passos a serem dados desde a criação de um modelo inicial de barragem até as análises finais.

Figura 14: Fluxograma de Metodologia do Trabalho



Fonte: Autora (2022)

A princípio, será modelada uma barragem inspirada na seção típica da Barragem Forquilha III, alteada a montante, analisando-se o fator de segurança corresponde ao proposto pela norma NBR13028 (ABNT, 2017), e, a partir do volume de rejeito fixado, será modelada uma barragem à jusante. Dessa forma, inicia-se a comparação de quantitativos, através dos elementos que influenciam na diferença de custos entre um tipo de alteamento e outro.

Em relação aos custos, a *Tabela 1* apresenta a divisão e a escolha das variáveis a serem avaliadas.

Tabela 1: Relação de Custos e Unidades

Tipo	Unidade
Custos de Execução	
Volume do maciço	m <sup>3</sup>
Fundação	m <sup>3</sup>
Sistema de drenagem	m <sup>3</sup>
Tempo de execução	H
Monitoramento	h
Custo Local	
Área em planta	m <sup>2</sup>

Fonte: Autora (2022)

### 3.1 ASPECTOS IMPORTANTES

A primeira barragem para análise será inspirada na Barragem Forquilha III, localizada em Ouro Preto, Minas Gerais, na Mina da Fábrica, aqui descrita no item 2.1.2. A barragem hipotética está localizada em território sem possíveis comunidades afetadas, sejam elas ribeirinhas, indígenas ou quaisquer outros tipos. O modelo de alteamento à jusante, inspirado na barragem Maravilhas II, localizada em Itabirito, Minas Gerais, descrita no item 2.1.4, tem como base o dique inicial da primeira barragem e altura de alteamento em função do volume de rejeito.

### 3.2 MATERIAIS

Quanto ao solo para o aterro, será estudado o solo compactado, utilizado por Costa (2020), no dimensionamento da barragem situada na Estrada Pedreira, bairro Filgueiras, na região nordeste do município de Juiz de Fora, Minas Gerais, e cujos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos através de ensaio de cisalhamento direto foram: Intercepto Coesivo Efetivo ( $c'=22,5$  kPa) e Ângulo de Atrito Efetivo ( $\phi'=38,3^\circ$ ), e quanto à propriedade do solo, tem-se: Peso Específico ( $\gamma=20,11$  kN/m<sup>3</sup>) com energia intermediária de compactação. Os parâmetros de resistência do rejeito hipotético foram extraídos dos resultados de ensaios triaxiais CIU para os rejeitos finos (lamas) da dissertação de Ferreira (2016). Assim, os seguintes valores característicos serão adotados para a análise: Peso Específico Máximo Seco ( $\gamma=21,90$  kN/m<sup>3</sup>) com umidade ótima de 16,3% em energia normal de compactação, gerando Peso Específico ( $\gamma=21,90$  kN/m<sup>3</sup>); Intercepto Coesivo Efetivo ( $c'=5$  kPa) e Ângulo de Atrito Efetivo ( $\phi'=38,0^\circ$ ). A *Tabela 2* mostra os parâmetros geotécnicos do solo e do rejeito.

Tabela 2: Resumo com os parâmetros geotécnicos dos materiais

Material	Peso Específico Máximo Seco	Umidade Ótima	Peso Específico	Intercepto Coesivo Efetivo	Ângulo de Atrito Efetivo
Solo do Maciço/Fundação	-	-	20,11 kN/m <sup>3</sup>	22,5 kPa	38,3°
Rejeito Fino	21,90 kN/m <sup>3</sup>	16,3%	25,46 kN/m <sup>3</sup>	5 kPa	38,0°

Fonte: Autora (2022)

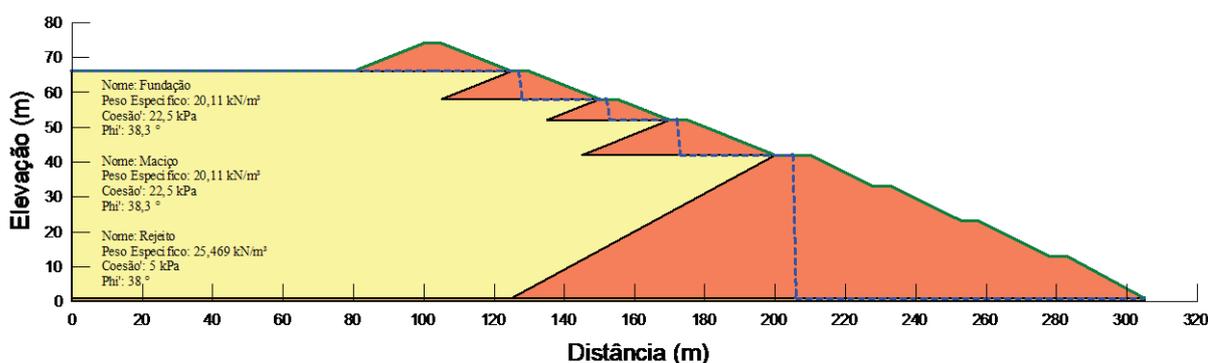
### 3.3 MÉTODO DE ANÁLISE

Para análise é avaliada a estabilidade dos taludes através do método de Morgenstern-price, utilizado pelo Slope/W, do pacote GeoStudio. A partir de um modelo de barragem alteada a montante, será avaliada o fator de segurança mínimo. Optou-se pela análise na fase de operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório, considerando a ruptura no maciço, para o talude de jusante, cujo fator de segurança limite é de 1,5. Ainda, uma última análise na fase de operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório, com ruptura no maciço e fator de segurança limite proposto de

1,3, como recomendado pela NBR 13028/2017. A *Figura 13* identifica as análises mencionadas.

Primeiramente, foi desenhada uma barragem inspirada na Barragem Forquilha III, já no software Slope/W, do pacote GeoStudio. A *Figura 15* ilustra o Modelo 01 de barragem a montante.

Figura 15: Modelo 01 de Barragem a Montante



Fonte: Autora (2022)

A partir do modelo apresentado acima, foram feitas análises talude a talude, inclusive a análise global e com o N.A. (nível d'água) no caso extremo. No caso de o modelo apresentar fatores de segurança muito acima ou muito abaixo dos recomendados pela norma, será necessário passar por otimização do modelo, criando então, um Modelo 02 de barragem à montante.

A partir do modelo de barragem à montante adotado, e partindo de um dique inicial idêntico ao da barragem à montante, será feito uma equivalência de área de rejeito pela seção típica da barragem, para encontrar um modelo de barragem à jusante, cuja área de maciço seja em função da altura de alteamento necessária para obter-se uma área de rejeito aproximada, a título de comparação, com auxílio do software AutoCAD, da Autodesk.

Com o modelo final das duas barragens, passando nos critérios de segurança, serão comparados os quantitativos de custos referente à execução e local. Em relação à execução, será adotado um valor de 700m de comprimento linear de barragem, para ambas as seções típicas, a fim de encontrar um volume referente ao maciço, fundação, rejeito e drenagem. Será considerada

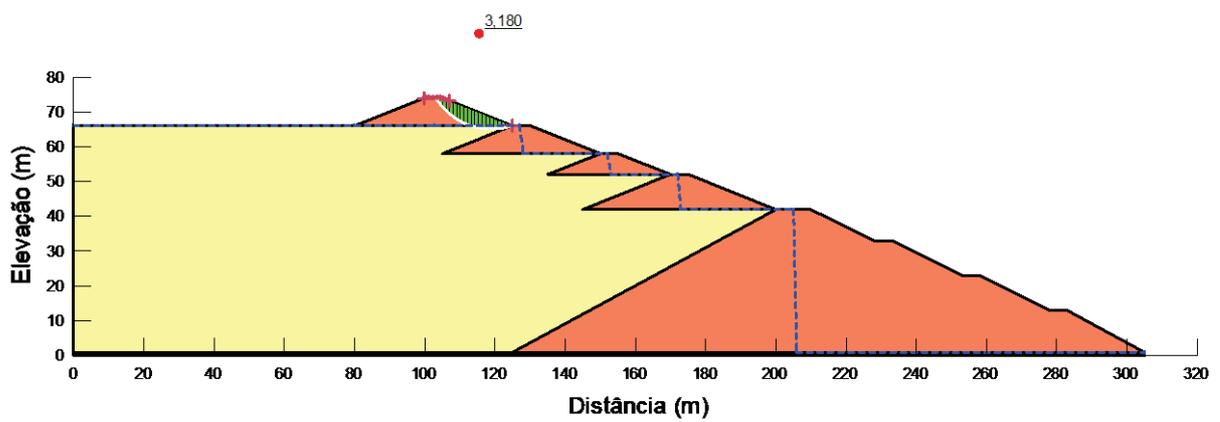
apenas uma escavação de limpeza da fundação de 0,5m nas duas barragens. A área do maciço, comprimento da seção típica e altura da barragem serão obtidas através do AutoCAD.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

### 4.1 ANÁLISE À MONTANTE – MODELO 01

A *Figura 16* apresenta a análise com entrada no Talude 01 e saída no Talude 02. O FS encontrado foi de 3,18, sendo superior ao mínimo sugerido por norma.

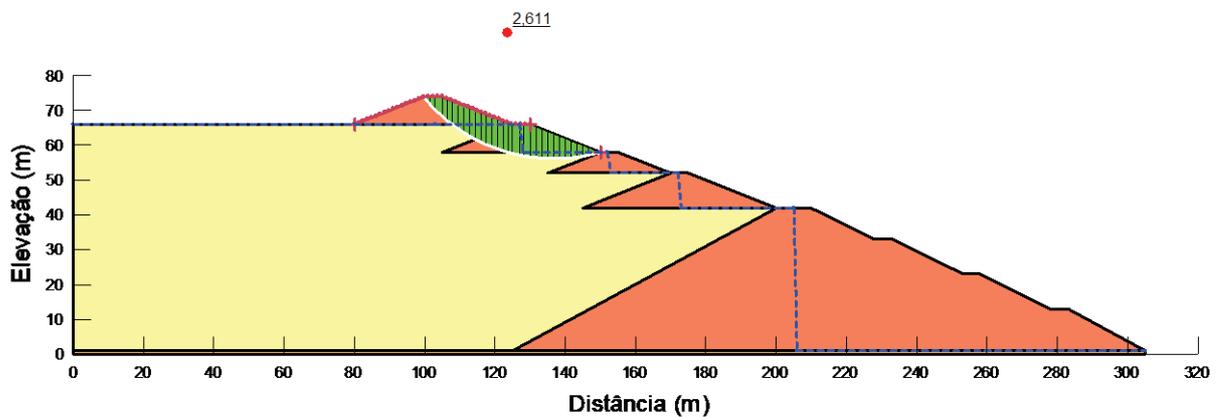
Figura 16: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 02



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 17* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01 e 02 e saída no Talude 03. O FS encontrado foi de 2,61, sendo superior ao mínimo sugerido por norma.

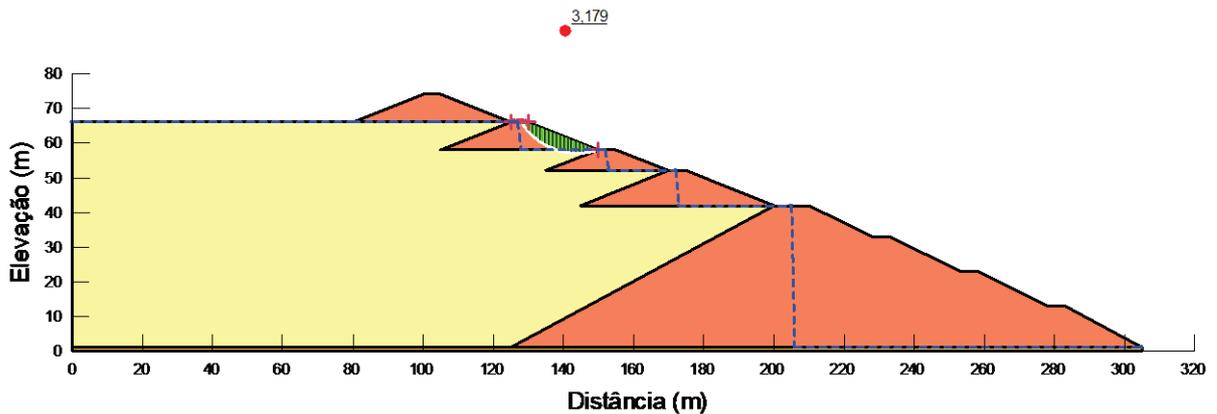
Figura 17: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 03



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 18* apresenta a análise com entrada no Talude 02 e saída no Talude 03. O FS encontrado foi de 3,18, sendo superior ao mínimo sugerido por norma.

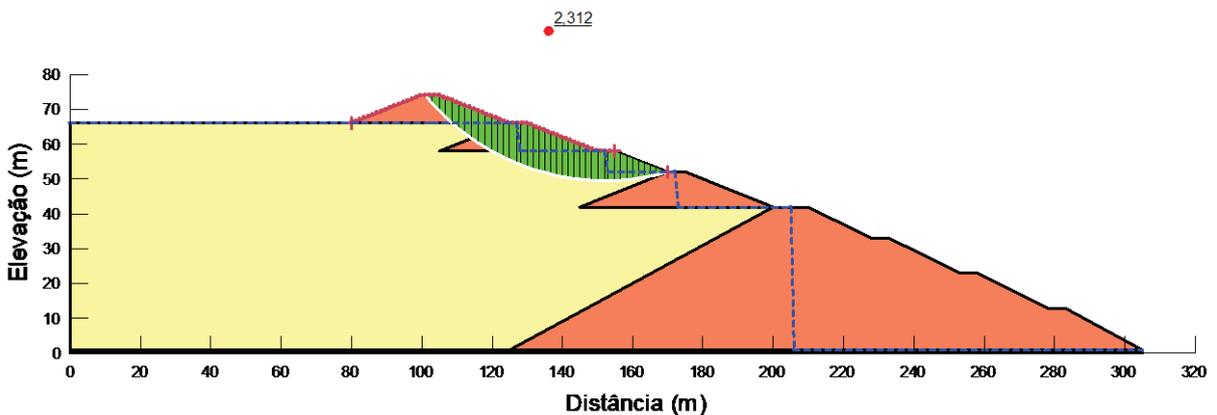
Figura 18: Análise de FS do Talude 02 ao Talude 03



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 19* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02 e 03 e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 2,31, superior ao mínimo recomendado pela norma.

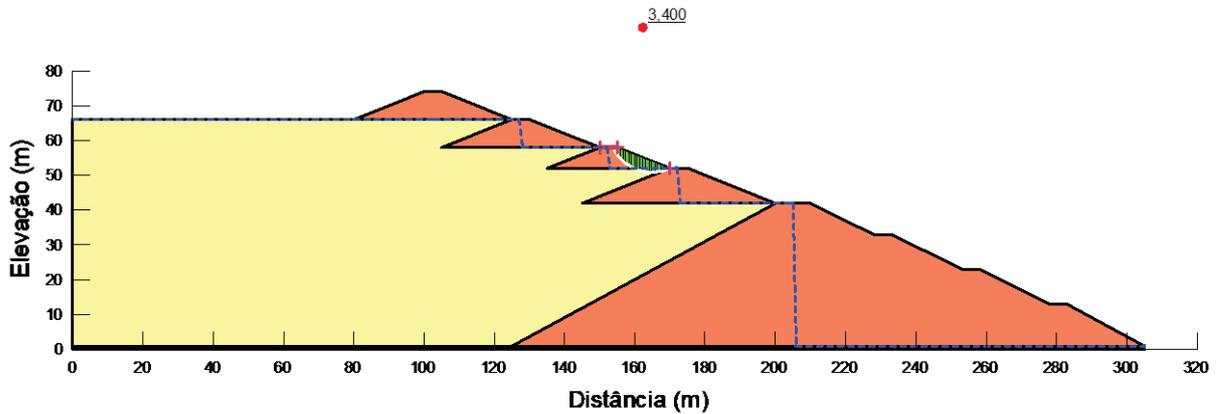
Figura 19: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 04



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 20* apresenta a análise com entrada no Talude 03 e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 3,40.

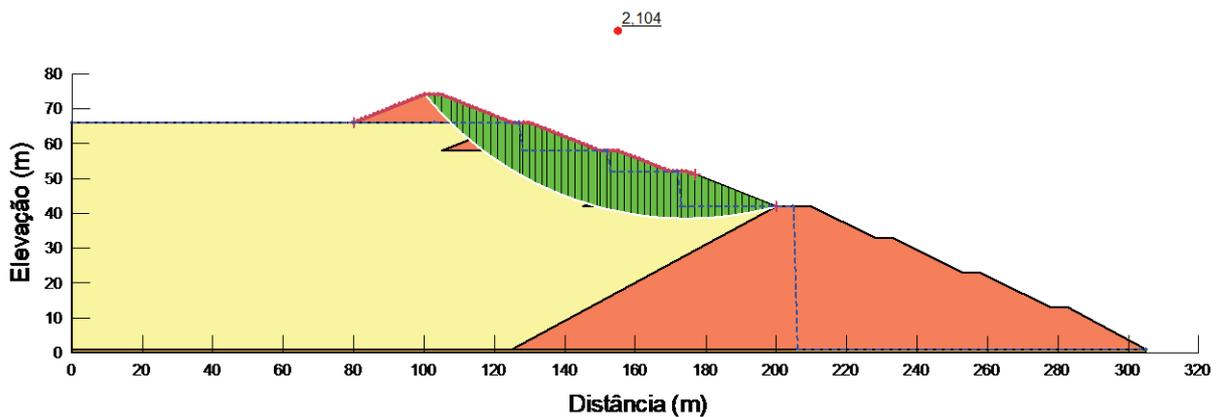
Figura 20: Análise de FS do Talude 03 ao Talude 04



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 21* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03 e 04 e saída no Talude 05. O valor encontrado foi de 2,10, superior ao recomendado pela norma.

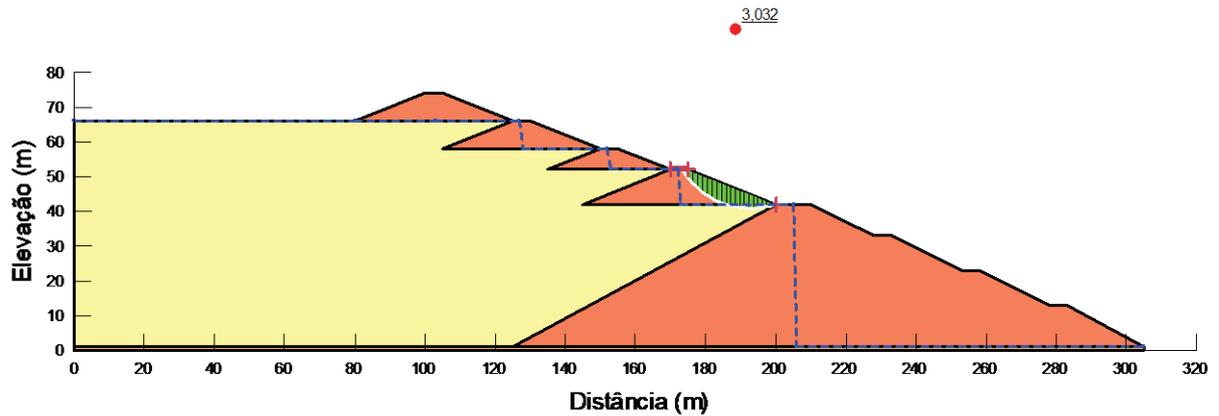
Figura 21: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 05



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 22* apresenta a análise com entrada no Talude 04 e saída no Talude 05. O valor encontrado foi de 3,03, superior ao recomendado pela norma.

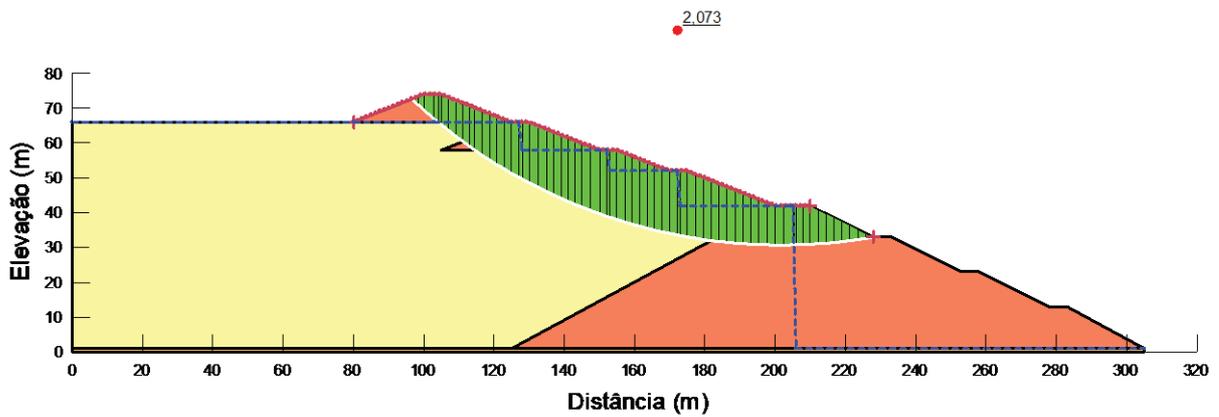
Figura 22: Análise de FS do Talude 04 ao Talude 05



Fonte: Autora (2022)

A Figura 23 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04 e 05 e saída no Talude 06. O valor encontrado foi de 2,07, superior ao recomendado pela norma.

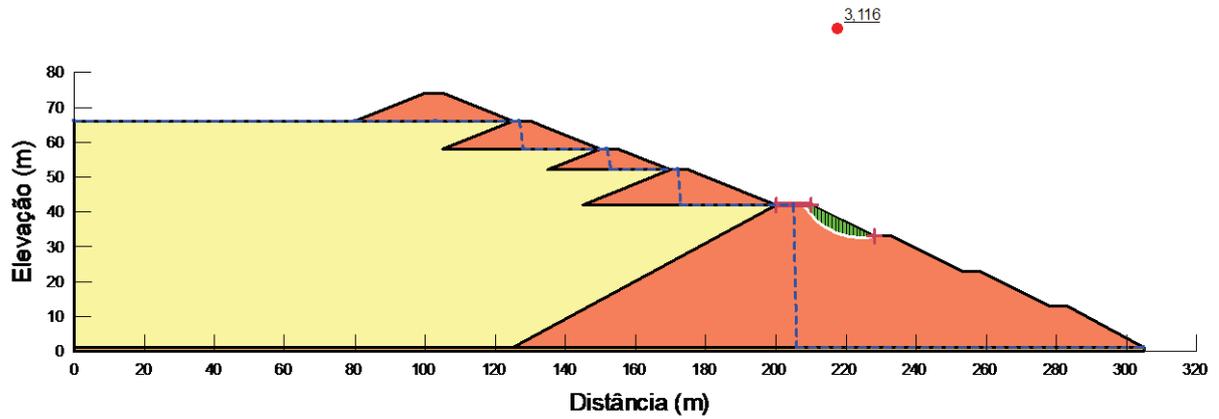
Figura 23: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 06



Fonte: Autora (2022)

A Figura 24 apresenta a análise com entrada no Talude 05 e saída no Talude 06. O valor encontrado foi de 3,12, superior ao proposto pela norma.

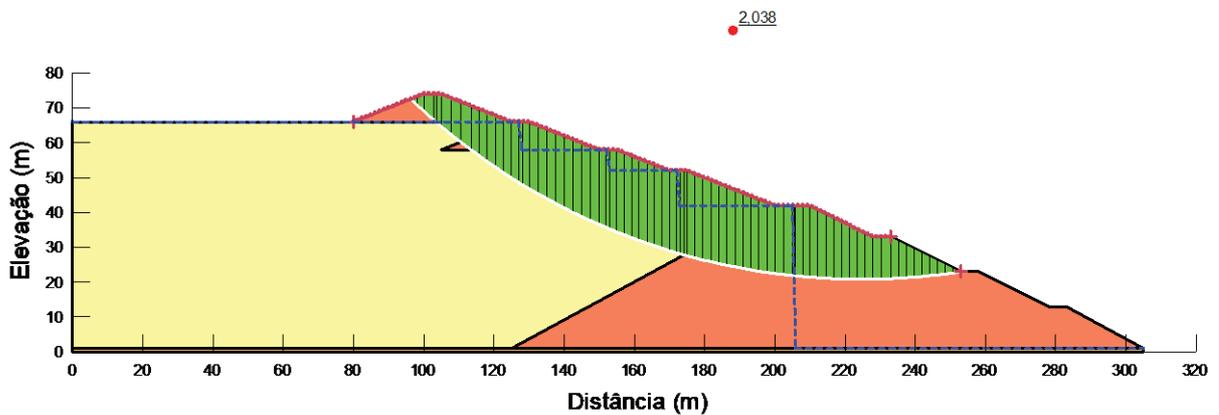
Figura 24: Análise de FS do Talude 05 ao Talude 06



Fonte: Autora (2022)

A Figura 25 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05 e 06 e saída no Talude 07. O valor encontrado foi de 2,04, igual ao recomendado pela norma.

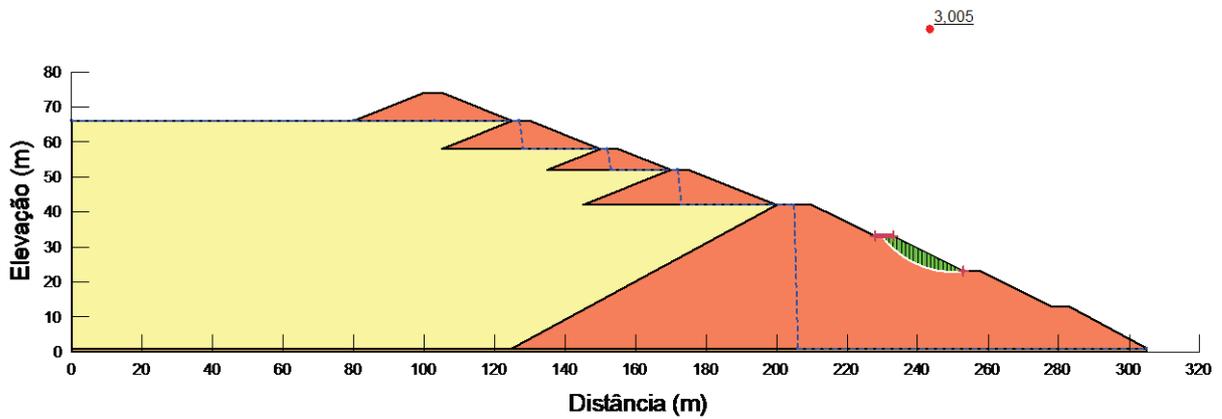
Figura 25: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 07



Fonte: Autora (2022)

A Figura 26 apresenta a análise com entrada no Talude 06 e saída no Talude 07. O valor encontrado foi de 3,01, superior ao recomendado pela norma.

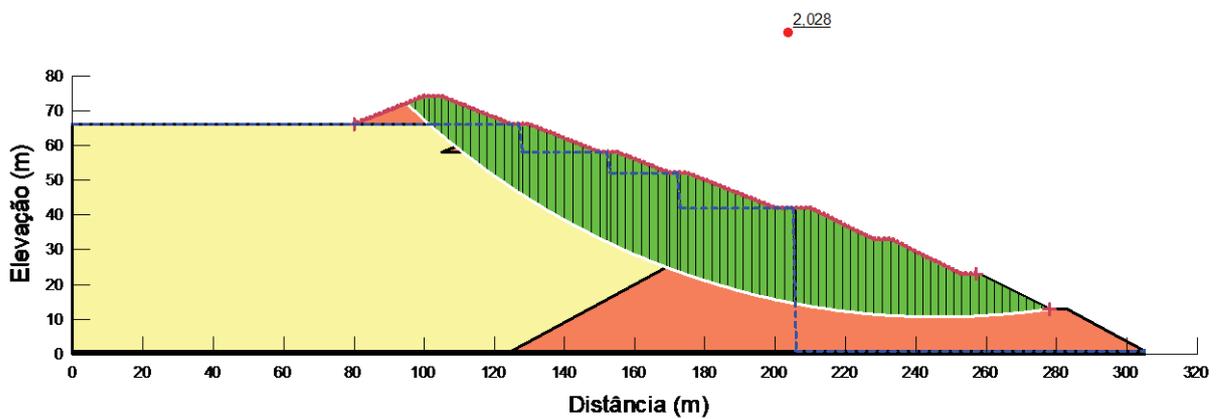
Figura 26: Análise de FS do Talude 06 ao Talude 07



Fonte: Autora (2022)

A Figura 27 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06 e 07 e saída no Talude 08. O valor encontrado foi de 2,03, superior ao recomendado pela norma.

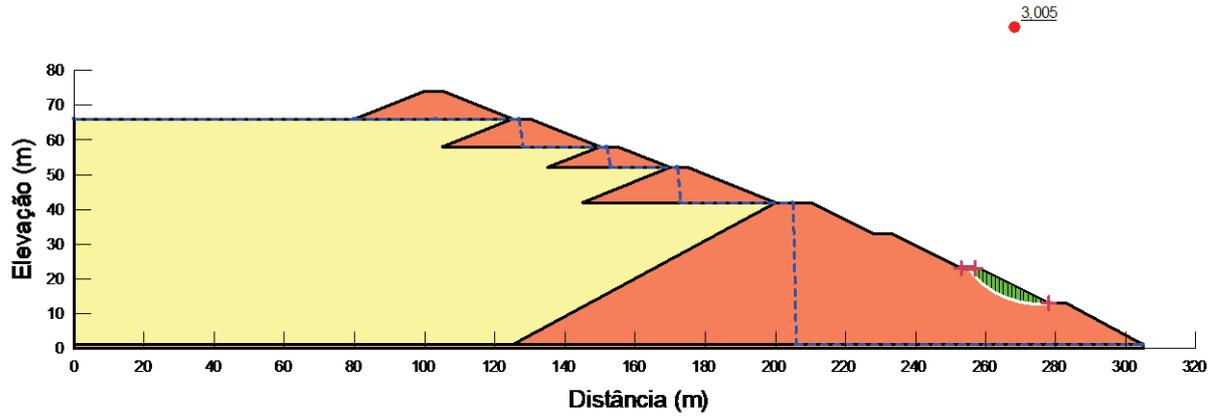
Figura 27: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 08



Fonte: Autora (2022)

A Figura 28 Figura 26 apresenta a análise com entrada no Talude 07 e saída no Talude 08. O valor encontrado foi de 3,01, superior ao recomendado pela norma.

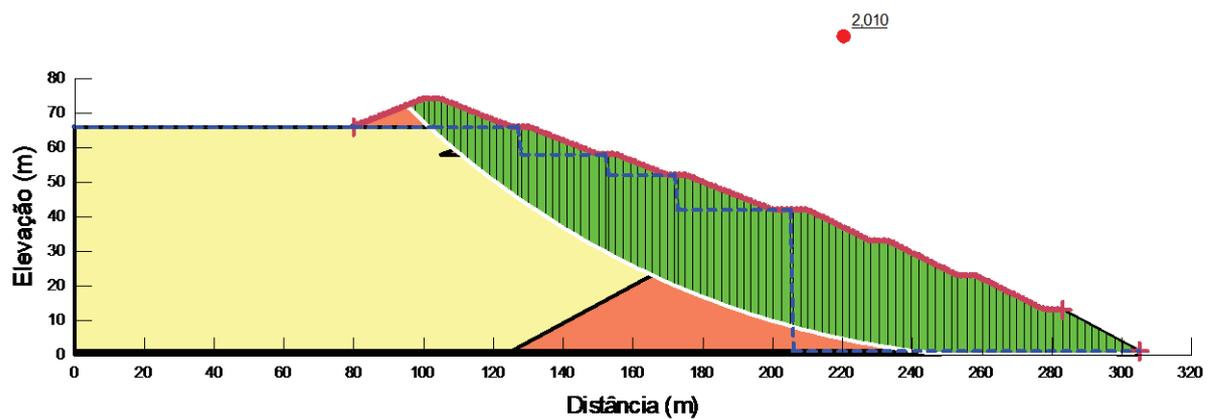
Figura 28: Análise de FS do Talude 07 ao Talude 08



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 29* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e saída no Talude 09, análise global. O valor encontrado foi de 2,01, superior ao recomendado pela norma.

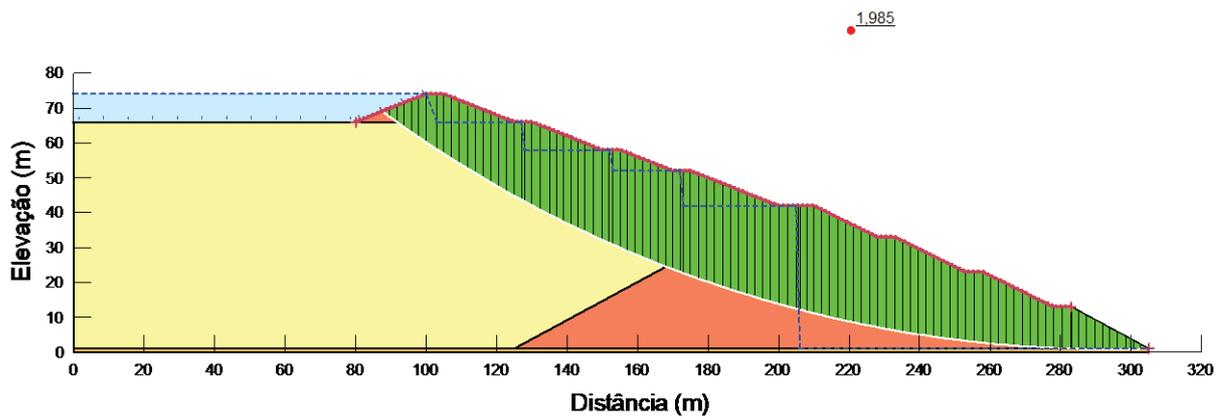
Figura 29: Análise Global NA em Operação Normal



Fonte: Autora (2022)

A Figura 30 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e saída no Talude 09, análise global, com N.A. na extremidade. O valor encontrado foi de 1,98, superior ao recomendado pela norma.

Figura 30: Análise Global com N.A. na extremidade



Fonte: Autora (2022)

Tabela 3: Resumo dos FS do Modelo 01 de Barragem à Montante

Ref.	Análise	FS Modelo 01
1	T1	3,18
2	T1 a T2	2,61
3	T2	3,18
4	T1-T3	2,31
5	T3	3,40
6	T1 a T4	2,10
7	T4	3,03
8	T1 a T5	2,07
9	T5	3,12
10	T1 a T6	2,04
11	T6	3,01
12	T1 a T7	2,03
13	T7	3,01
14	GLOBAL	2,01
15	NA na extremidade	1,98

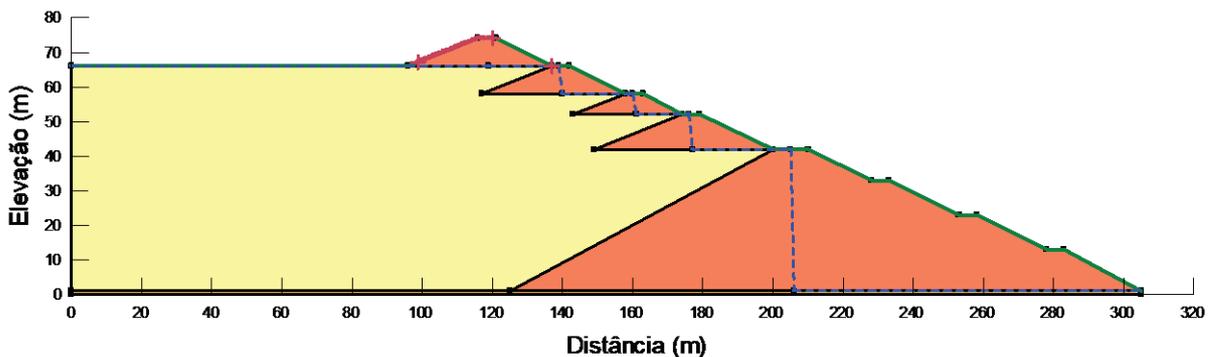
Fonte: Autora (2022)

Analisando de forma geral os resultados, tem-se que o menor fator de segurança foi de 1,9, apresentado da análise com NA na extremidade, ilustrado na *Figura 30*, entretanto, como o caso de maior fator de segurança é com rede de fluxo em condição normal de operação, é considerado o menor fator de segurança da análise global, de 2,0, representado na *Figura 29*. Como o valor foi consideravelmente superior a 1,5 proposto inicialmente, deverá ser feita uma otimização da geometria da barragem, portanto, serão feitas alterações na proposta inicial de barragem a montante de tal forma que o FS neste trecho seja maior ou igual a 1,5, o proposto pela norma NBR13028 (ABNT, 2017).

#### 4.2 BARRAGEM À MONTANTE – MODELO 02

A *Figura 31* apresenta o Modelo 02 da Barragem a Montante, onde foram alteradas as inclinações dos taludes 01 a 04, de 2,5/1 (relação comprimento/altura), para 2/1.

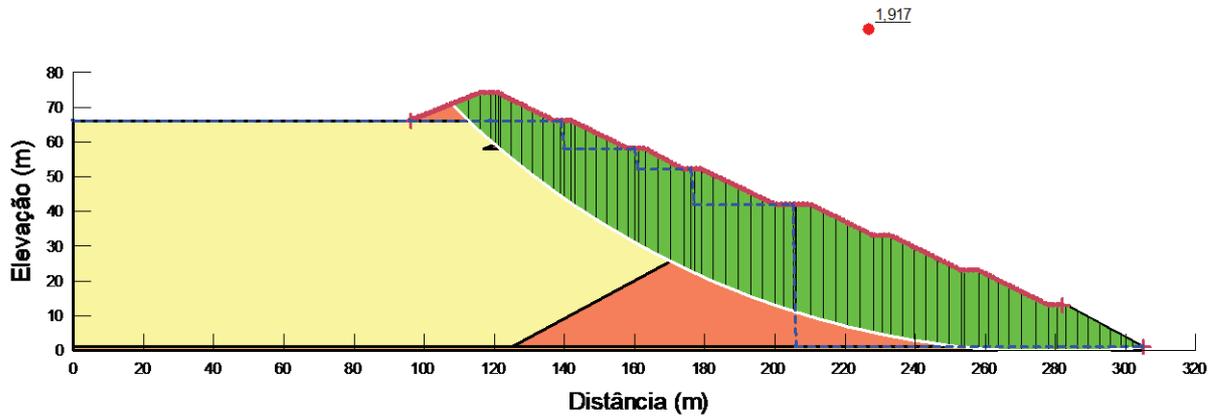
Figura 31: Modelo 02 de Barragem a Montante



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 32* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e saída no Talude 09, análise global. O valor encontrado foi de 1,92, superior ao recomendado pela norma.

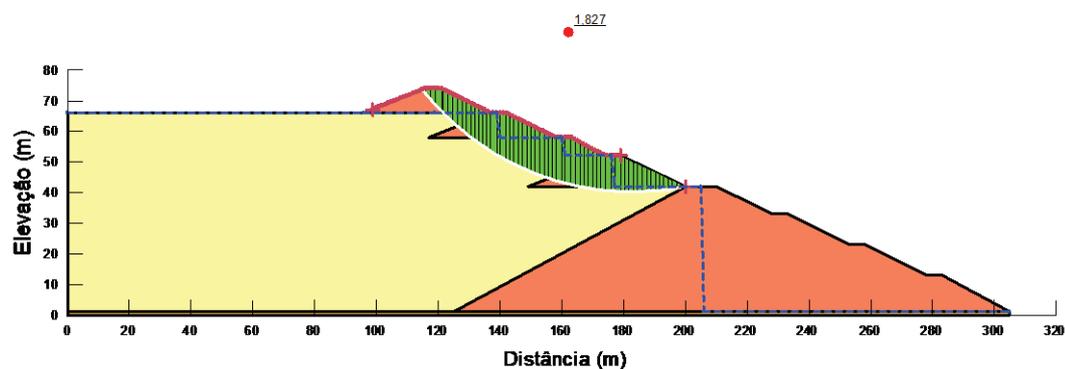
Figura 32: Análise Global



Fonte: Autora (2022)

Para a análise global, o fator de segurança apresentado foi de 1,9, acima do proposto pela norma, entretanto será realizada a análise também dos taludes 01 a 04, cuja análise obteve fator de segurança abaixo do global. A *Figura 33* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03 e 04 e saída no Talude 05. O valor encontrado foi de 1,83, superior ao recomendado pela norma.

Figura 33: Análise de FS do Talude 01 ao 05



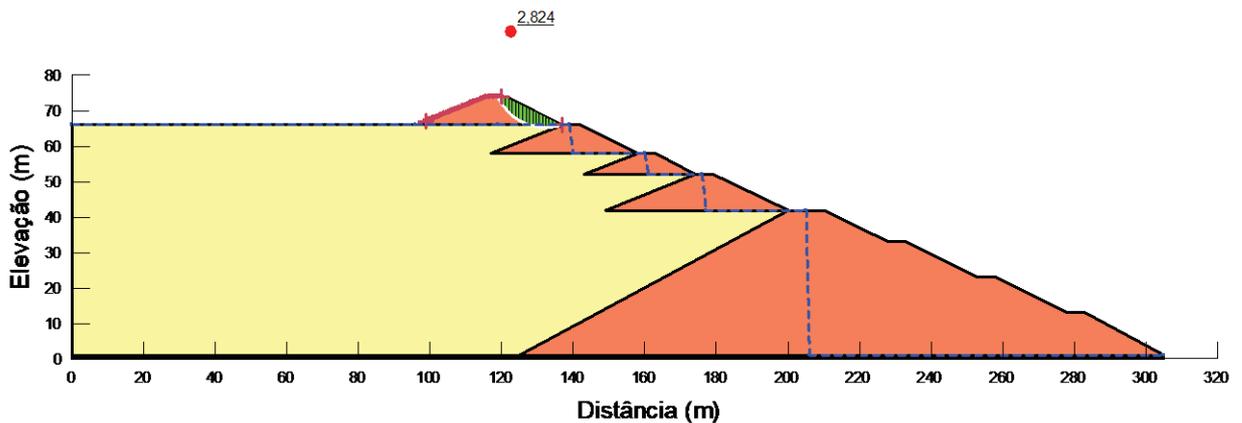
Fonte: Autora (2022)

Através das análises anteriores, são obtidos valores de fator de segurança acima do recomendado pela norma, entretanto, não será dada continuidade na otimização através da

diminuição da inclinação pois neste trabalho estão sendo feitas apenas análises de estabilidade, não levando em conta avaliações de sismos, por exemplo, que poderia levar à fatores de segurança menores. Logo, pensando na segurança, o mínimo adotado de projeto será de 1,8. Para as análises talude a talude, inclusive a análise global e com o N.A. (nível d'água) no caso extremo.

A *Figura 34* apresenta a análise com entrada no Talude 01 e saída no Talude 02. O valor encontrado foi de 2,82, próximo ao estabelecido em projeto.

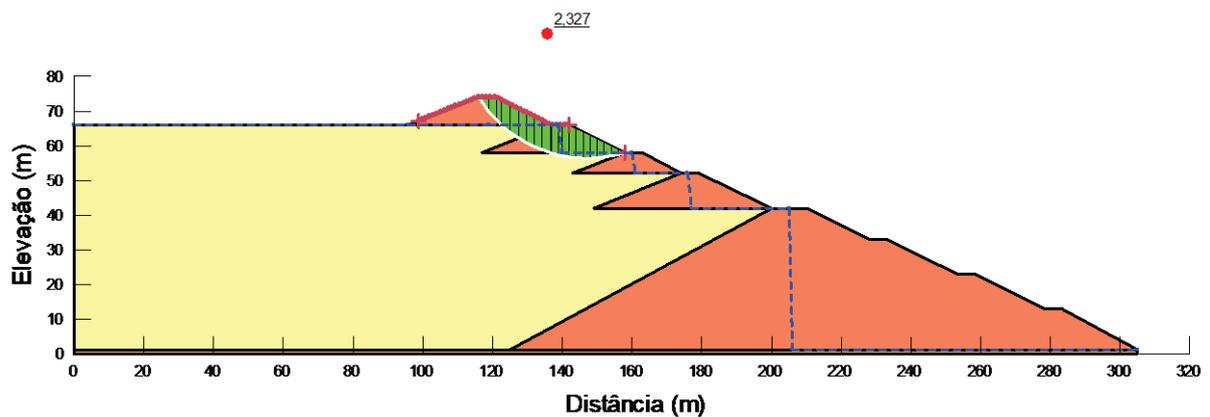
Figura 34: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 02



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 35* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01 e 02 e saída no Talude 03. O valor encontrado foi de 2,33, superior ao estabelecido em projeto.

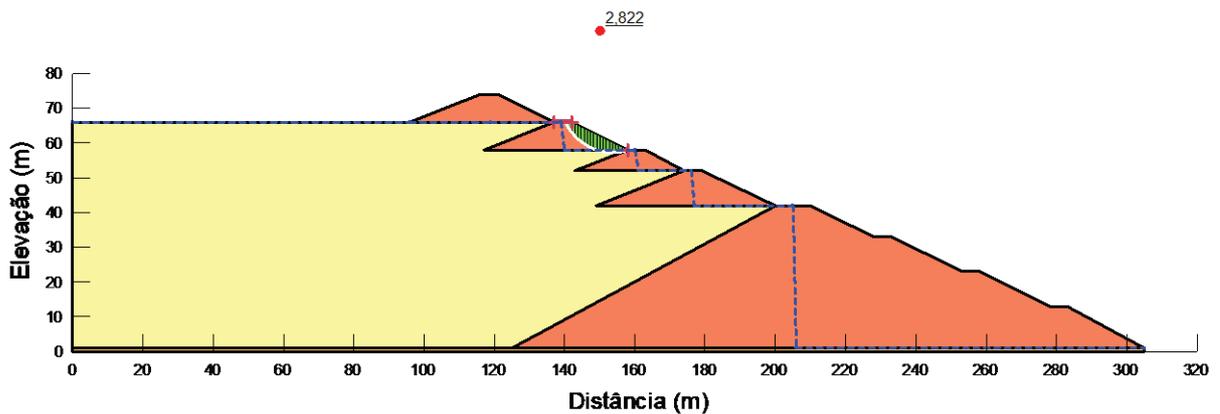
Figura 35: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 03



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 36* apresenta a análise com entrada no Talude 02 e saída no Talude 03. O valor encontrado foi de 2,82, próximo ao estabelecido em projeto.

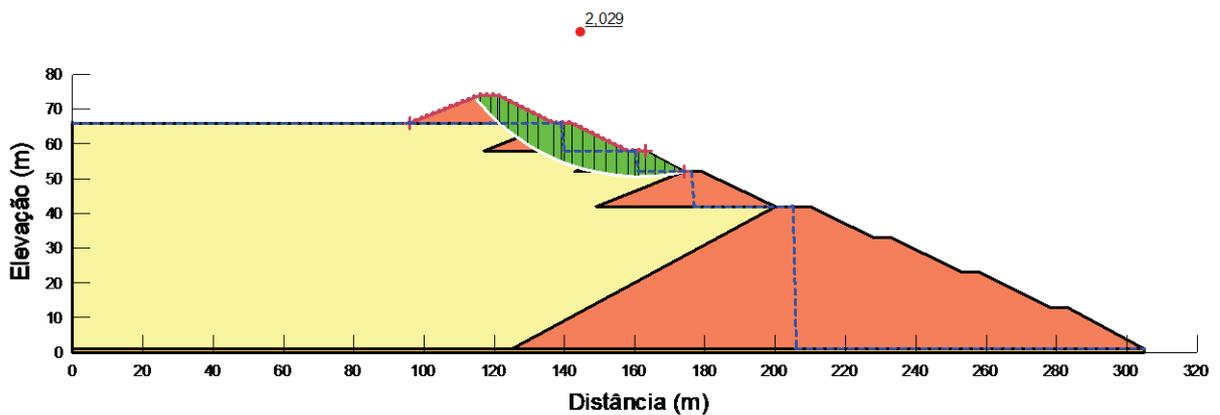
Figura 36: Análise de FS do Talude 02 ao Talude 03



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 37* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02 e 03 e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 2,03 superior ao estabelecido em projeto.

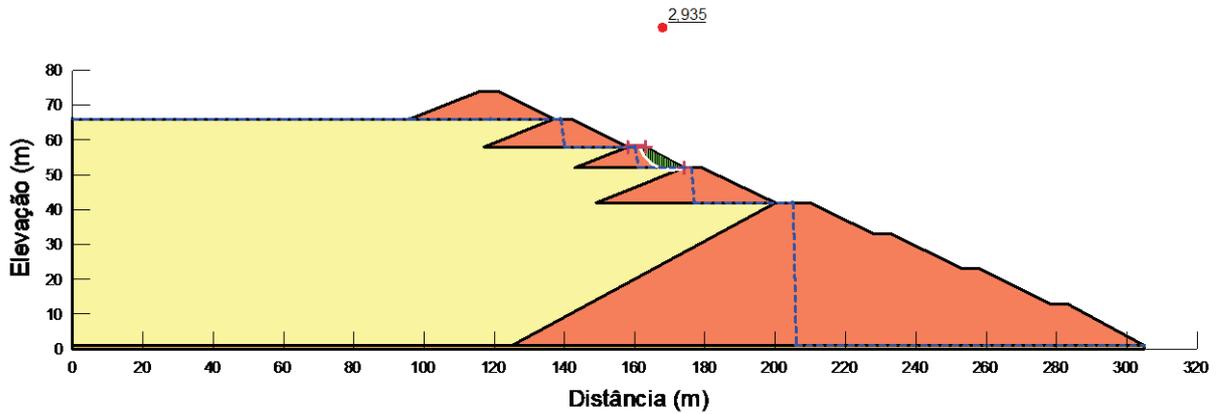
Figura 37: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 04



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 38* apresenta a análise com entrada no Talude 03 e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 2,93, superior ao estabelecido em projeto.

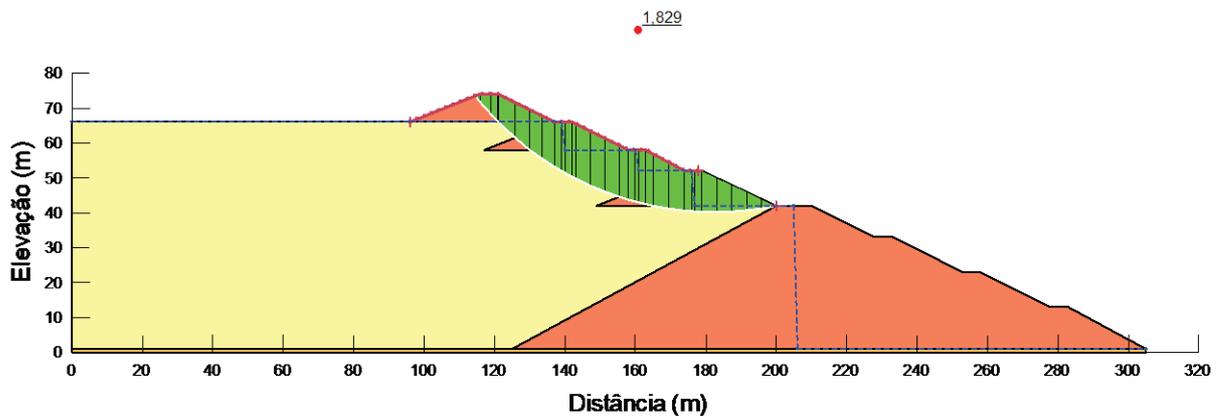
Figura 38: Análise de FS do Talude 03 ao Talude 04



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 39* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03 e 04 e saída no Talude 05. O valor encontrado foi de 1,83, próximo ao estabelecido em projeto.

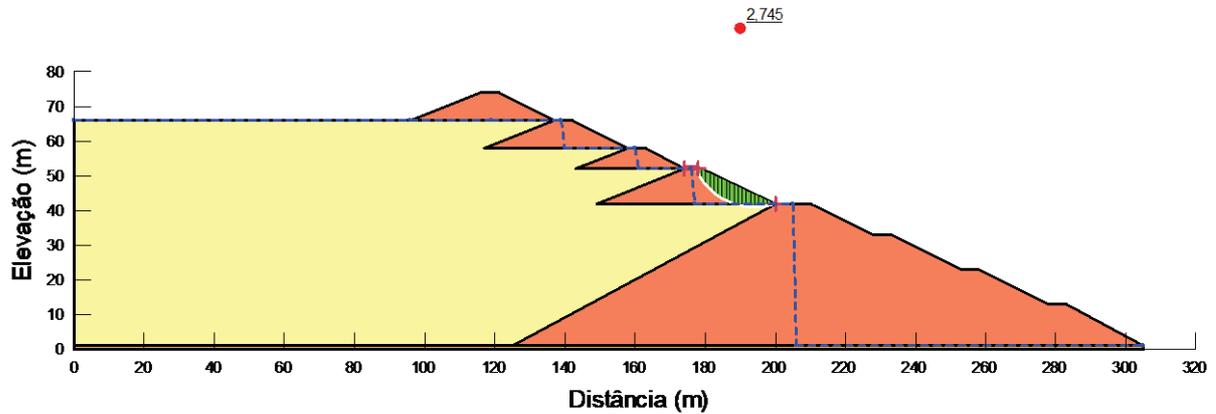
Figura 39: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 05



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 40* apresenta a análise com entrada no Talude 04 e saída no Talude 05. O valor encontrado foi de 2,74, superior ao estabelecido em projeto.

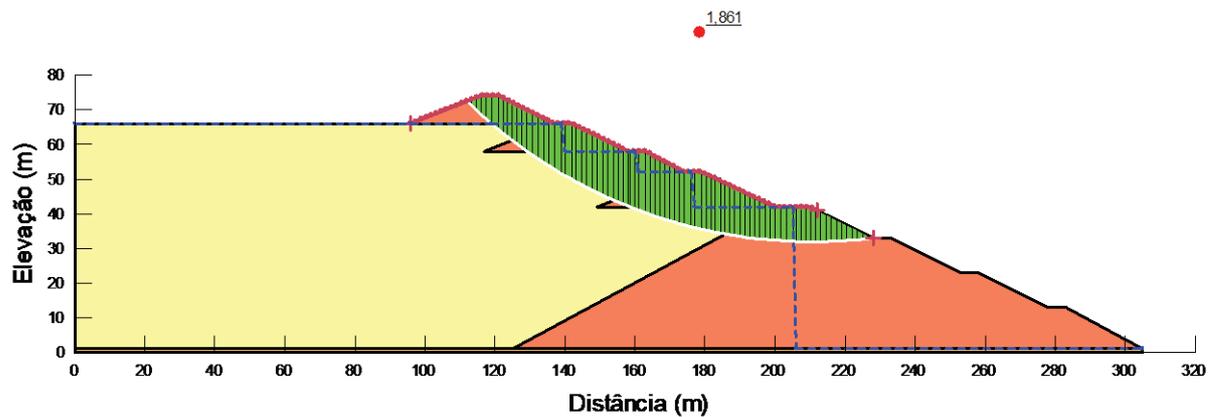
Figura 40: Análise de FS do Talude 04 ao Talude 05



Fonte: Autora (2022)

A Figura 41 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04 e 05 e saída no Talude 06. O valor encontrado foi de 1,86, superior ao estabelecido em projeto.

Figura 41: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 06

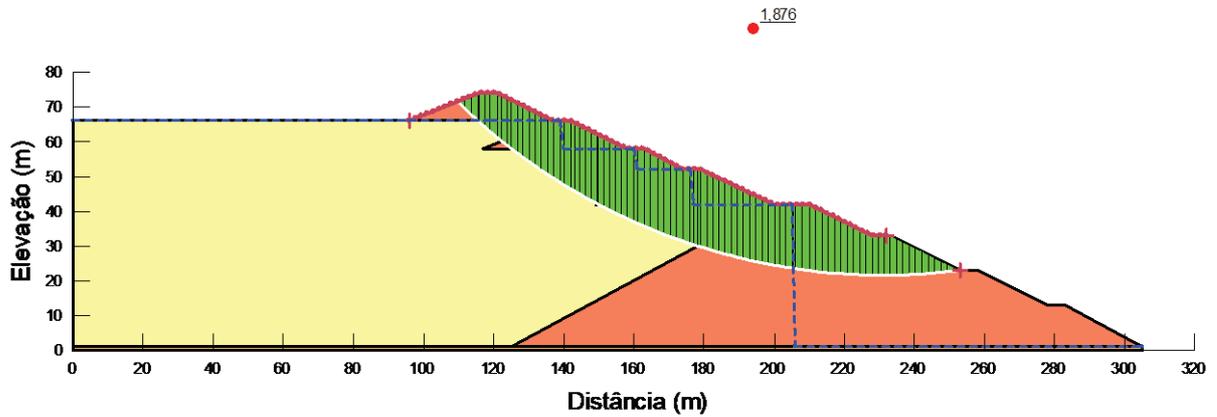


Fonte: Autora (2022)

Ressalta-se que as análises: Taludes 06 a 07, Taludes 07 a 08 e Taludes 08 a 09, não foram refeitas, uma vez que não houve alteração de suas geometrias.

A Figura 42 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05 e 06 e saída no Talude 07. O valor encontrado foi de 1,88, superior ao estabelecido em projeto.

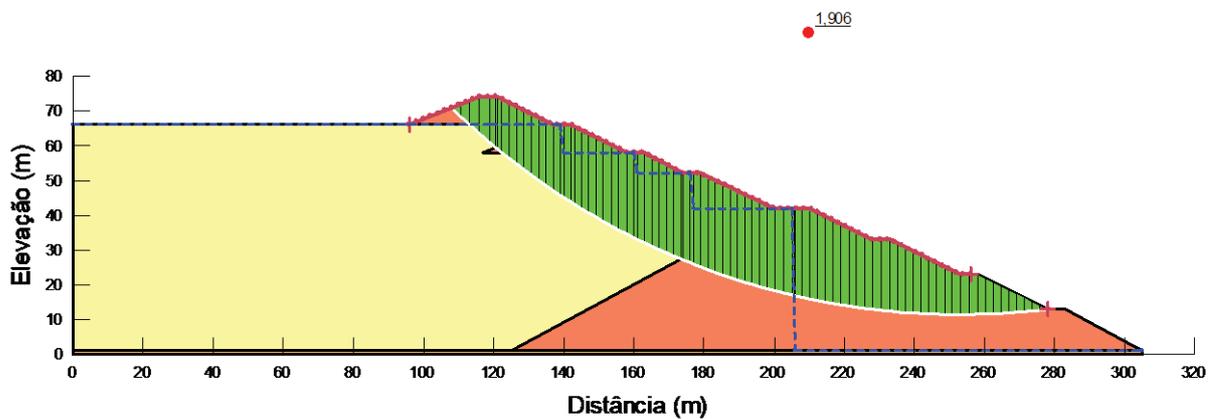
Figura 42: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 07



Fonte: Autora (2022)

A Figura 43 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06 e 07 e saída no Talude 08. O valor encontrado foi de 1,91, superior ao estabelecido em projeto.

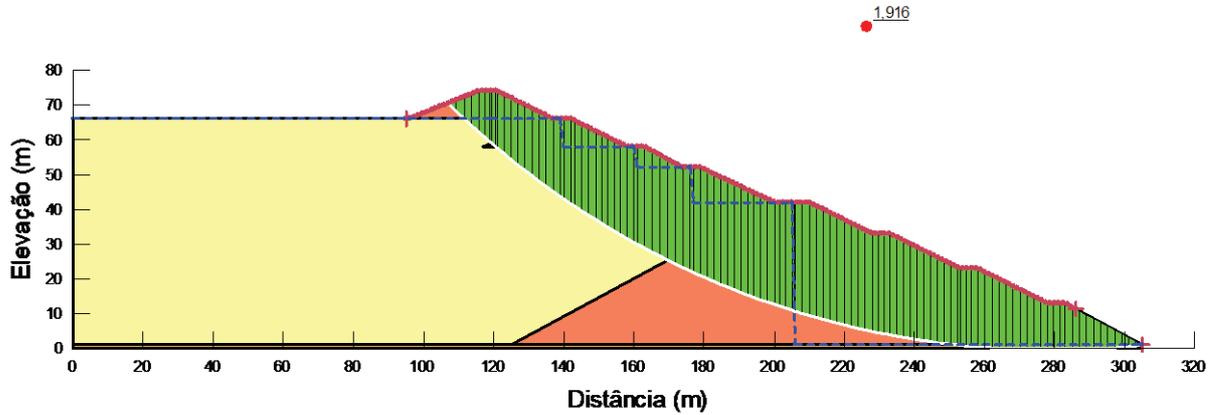
Figura 43: Análise de FS do Talude 01 ao Talude 08



Fonte: Autora (2022)

A Figura 44 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e saída no Talude 09, análise global. O valor encontrado foi de 1,92, superior ao estabelecido em projeto.

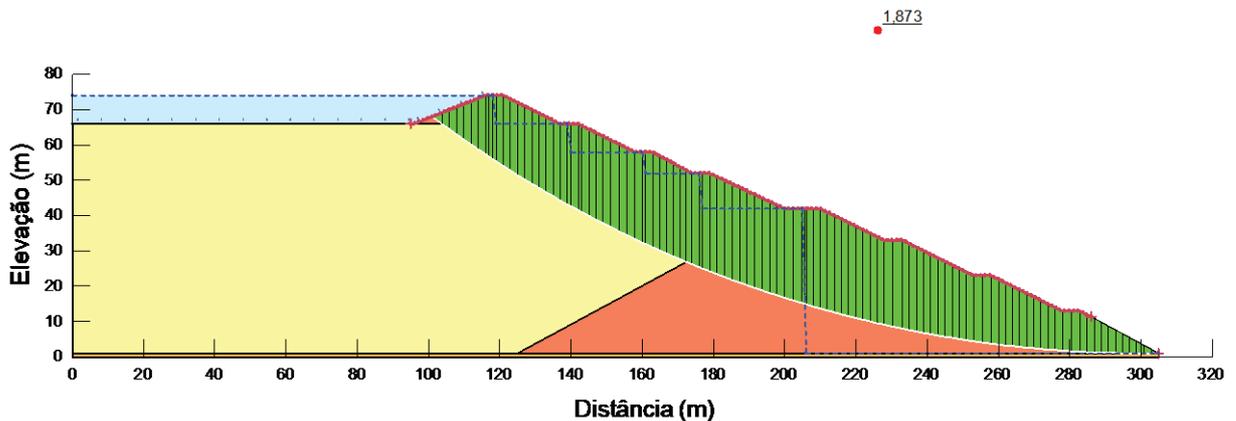
Figura 44: Análise Global



Fonte: Autora (2022)

A Figura 45 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07 e 08 e saída no Talude 09, análise global, com N.A. na extremidade. O valor encontrado foi de 1,87, superior ao estabelecido em projeto.

Figura 45: Análise Global com N.A. na extremidade



Fonte: Autora (2022)

Em todas as análises feitas talude a talude do Modelo 02, os fatores de segurança obtiveram valores superiores ao 1,8 estabelecido em projeto e também superiores a 1,5, o proposto pela norma 13028 (ABNT, 2017). A Tabela 4 apresenta resumidamente os valores encontrados. Apesar de estarem com valores de fator de segurança acima do recomendado pela norma, a seção típica da barragem não será otimizada a partir do Modelo 02, uma vez que para este

trabalho apenas a análise de estabilidade está sendo levada em consideração, e se submetida à outras análises, pode haver diminuição desse fator de segurança, sendo considerado como mínimo de projeto 1,8, ou seja, 20% acima do valor recomendado por norma.

Tabela 4: Resumo das análises de barragem a montante

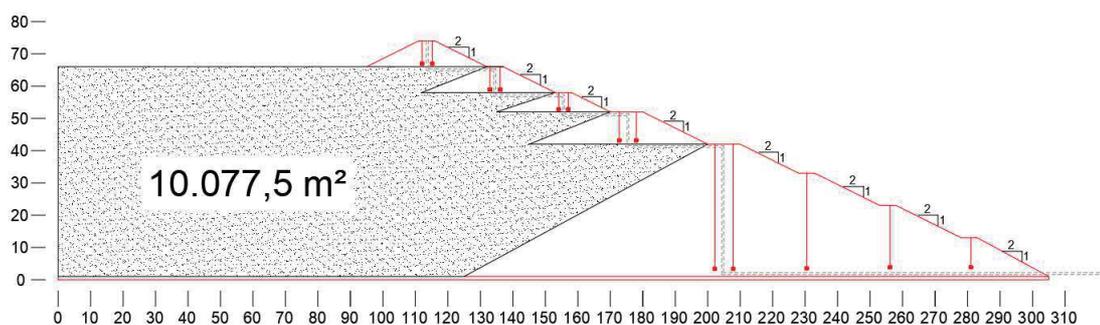
Ref.	Análise	FS Modelo 01	FS Modelo 02
1	T1	3,18	2,82
2	T1 a T2	2,61	2,33
3	T2	3,18	2,82
4	T1-T3	2,31	2,03
5	T3	3,40	2,93
6	T1 a T4	2,10	1,83
7	T4	3,03	2,74
8	T1 a T5	2,07	1,86
9	T5	3,12	
10	T1 a T6	2,04	1,88
11	T6	3,01	
12	T1 a T7	2,03	1,91
13	T7	3,01	
14	GLOBAL	2,01	1,92
15	NA na extremidade	1,98	1,87

Fonte: Autora (2022)

### 4.3 CÁLCULO DAS ÁREAS DAS SEÇÕES TÍPICAS

A barragem a montante modelo 02 foi representada graficamente no software AutoCAD, da Autodesk. A *Figura 46* ilustra a barragem a montante, no modelo 02, com área de rejeito medida de 10.077,5m<sup>2</sup>.

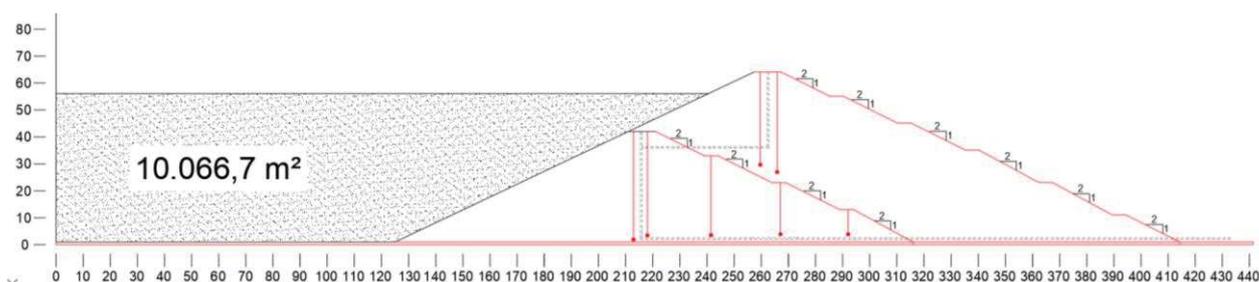
Figura 46: Modelo 02 de Barragem a montante (AutoCAD)



Fonte: Autora (2022)

A partir da área de rejeito e da geometria do dique inicial da barragem a montante, foi representada uma barragem a jusante, considerando, ainda, borda livre de 8 metros, bem como no modelo 02 de barragem a montante. A área de rejeito foi de 10.066,7 m<sup>2</sup>. A *Figura 47* ilustra a barragem alteada a jusante, representada graficamente pelo software AutoCAD.

Figura 47: Modelo 02 de Barragem a Jusante (AutoCAD)



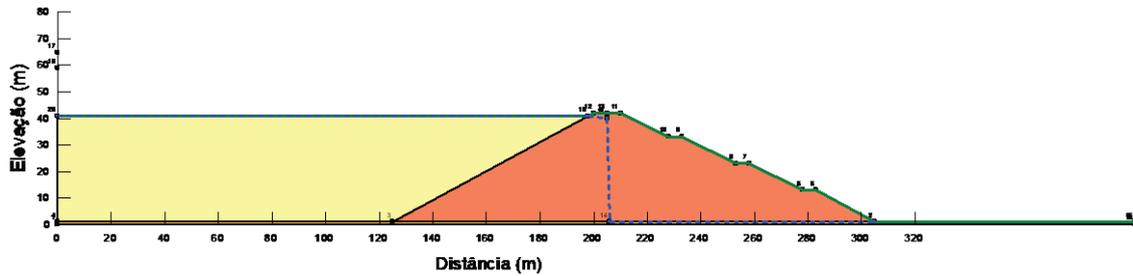
Fonte: Autora (2022)

Com o modelo de barragem a jusante, foram feitas as análises no Slope/W, do pacote GeoStudio, para avaliação da estabilidade e verificação de necessidade de otimização.

#### 4.4 BARRAGEM À JUSANTE – ALTEAMENTO 01

A *Figura 48* representa a primeira fase de alteamento da barragem a jusante, todos os taludes possuem inclinação de 2/1 e as bermas de 5 m de comprimento. Foi deixado uma borda livre de rejeito de 1,2 m. Considerando as próximas análises na fase de operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório, considerando a ruptura no maciço e fundações, para o talude de jusante, cujo fator de segurança limite de norma é de 1,5, mas o adotado em projeto é de 1,8.

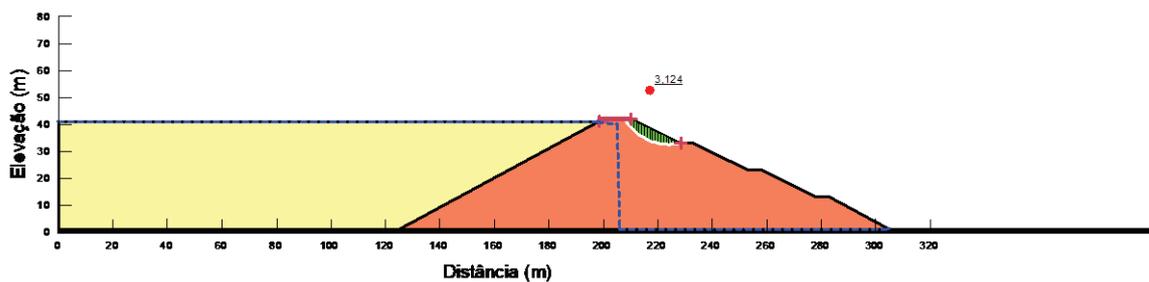
Figura 48: Modelo da Barragem de Jusante no Alçamento 01



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 49* apresenta a análise com entrada no Talude 01 e saída no Talude 02. O valor encontrado foi de 3,12, superior ao estabelecido em projeto.

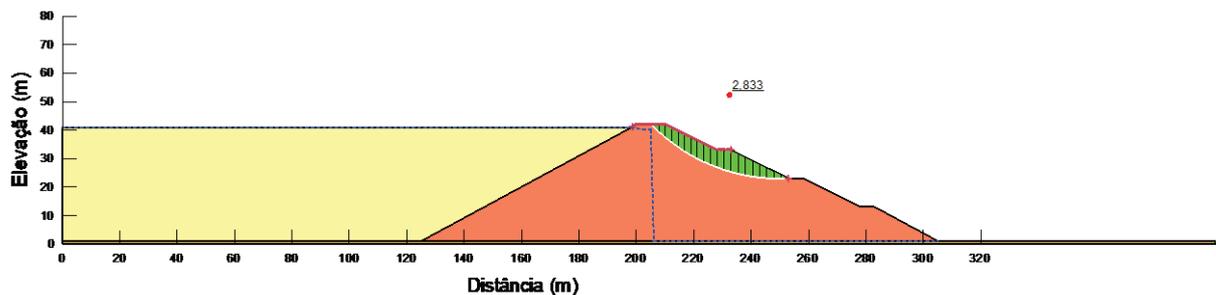
Figura 49: Análise de FS do Talude 01 ao 02



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 50* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01 e 02 e saída no Talude 03. O valor encontrado foi de 2,83, próximo ao estabelecido em projeto.

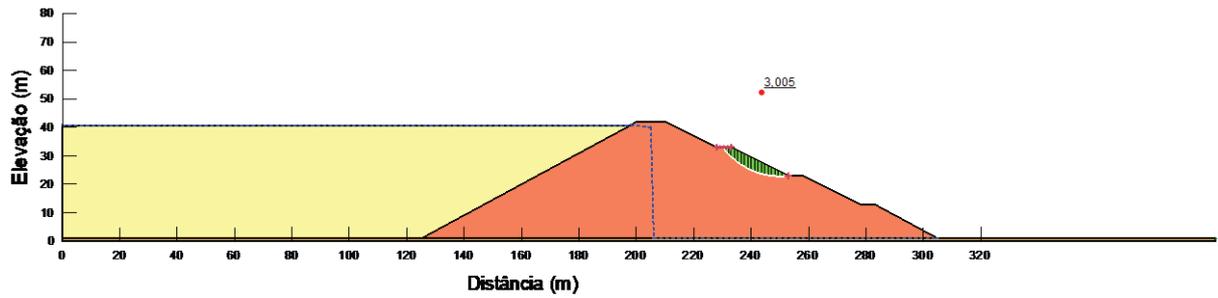
Figura 50: Análise de FS do Talude 01 ao 03



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 51* apresenta a análise com entrada no Talude 02 e saída no Talude 03. O valor encontrado foi de 3,01, superior ao estabelecido em projeto.

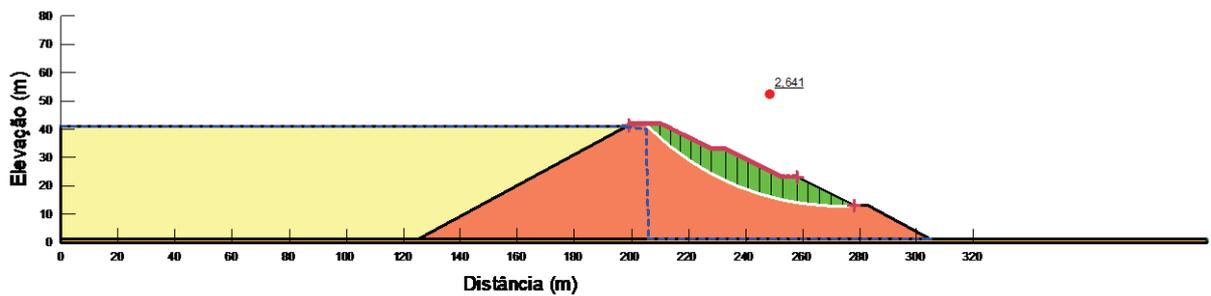
Figura 51: Análise de FS do Talude 02 ao 03



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 52* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02 e 03, e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 2,64, superior ao estabelecido em projeto

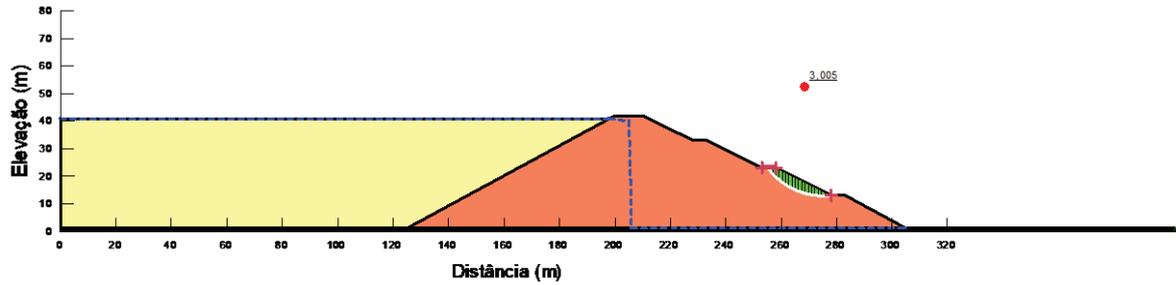
Figura 52: Análise de FS do Talude 01 ao 04



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 53* apresenta a análise com entrada no Talude 03 e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 3,01, superior ao recomendado pela norma.

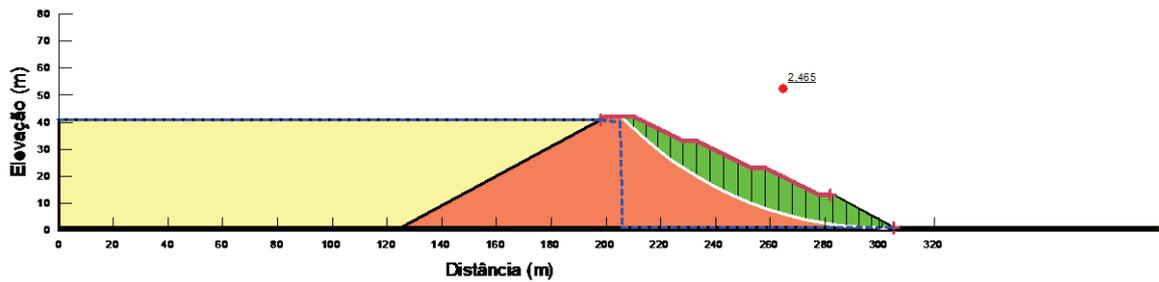
Figura 53: Análise de FS do Talude 03 ao 04



Fonte: Autora (2022)

A Figura 54 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01 ao 05 e saída no Talude 06, análise global. O valor encontrado foi de 2,45, próximo ao estabelecido em projeto.

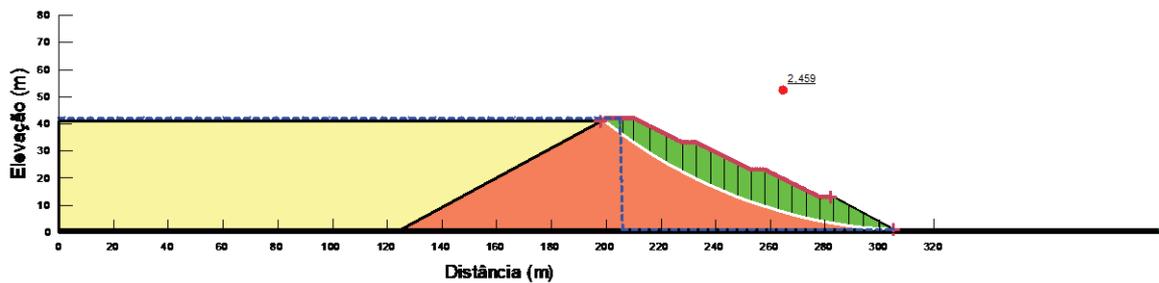
Figura 54: Análise Global



Fonte: Autora (2022)

A Figura 55 apresenta a análise global, com NA na extremidade. O valor encontrado foi de 2,46, superior ao estabelecido em projeto.

Figura 55: Análise Global com NA na extremidade



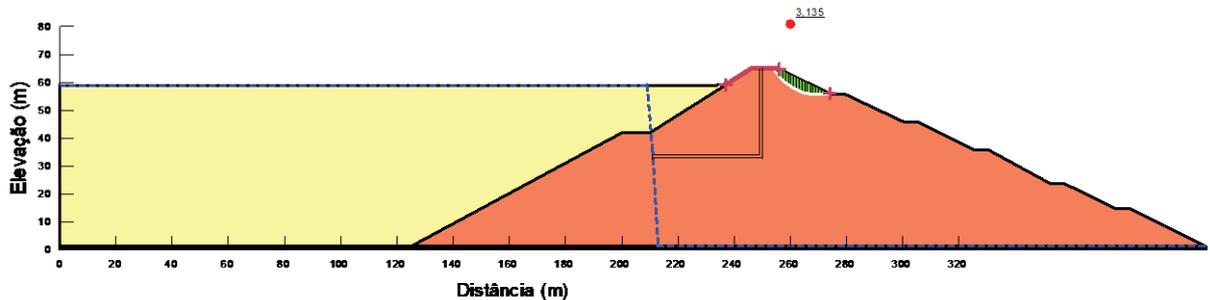
Fonte: Autora (2022)

#### A 4.5 BARRAGEM À JUSANTE – ALTEAMENTO 02

Figura 56 apresenta a análise com entrada no Talude 01 e saída no Talude 02. O valor encontrado foi de 3,13, superior ao estabelecido em projeto.

#### 4.5 BARRAGEM À JUSANTE – ALTEAMENTO 02

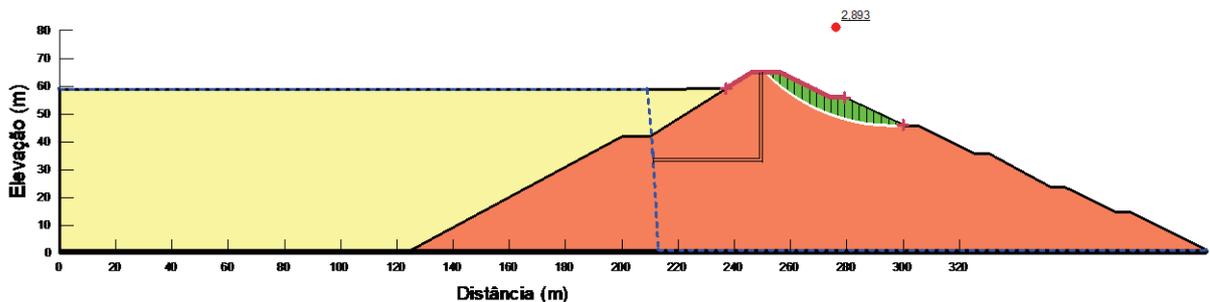
Figura 56: Análise de FS do Talude 01 ao 02



Fonte: Autora (2022)

A Figura 57Figura 49 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01 e 02 e saída no Talude 03. O valor encontrado foi de 2,86, superior ao estabelecido em projeto.

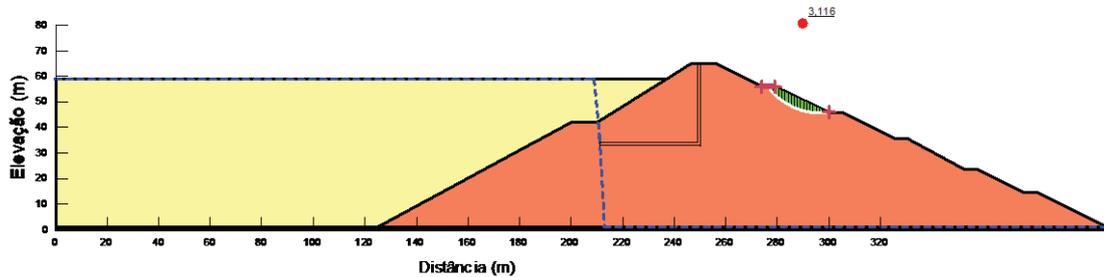
Figura 57: Análise de FS do Talude 01 ao 03



Fonte: Autora (2022)

A Figura 58 apresenta a análise com entrada no Talude 02 e saída no Talude 03. O valor encontrado foi de 3,12, superior ao recomendado pela norma.

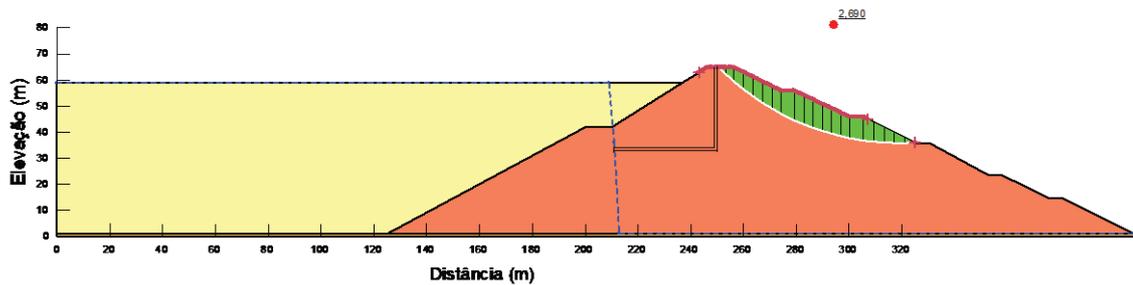
Figura 58: Análise de FS do Talude 02 ao 03



Fonte: Autora (2022)

A Figura 59 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02 e 03 e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 2,69, superior ao estabelecido em projeto.

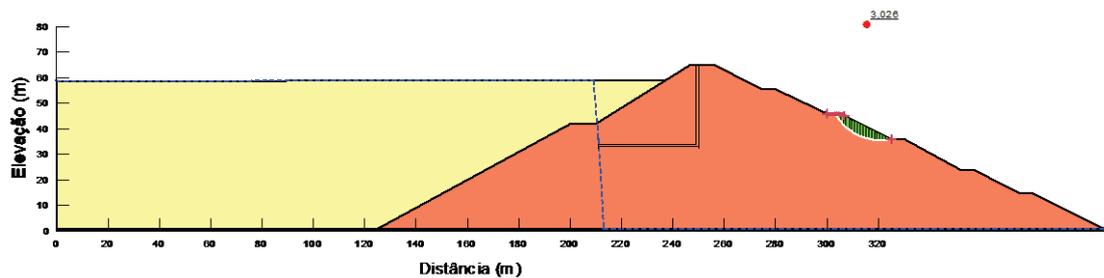
Figura 59: Análise de FS do Talude 01 ao 04



Fonte: Autora (2022)

A Figura 60 apresenta a análise com entrada no Talude 03 e saída no Talude 04. O valor encontrado foi de 3,02, superior ao estabelecido em projeto.

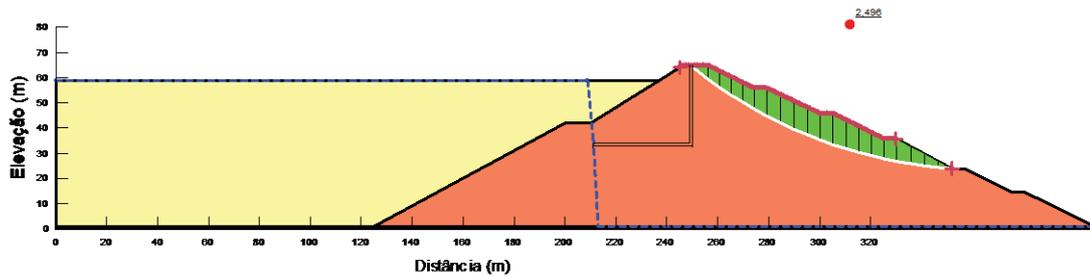
Figura 60: Análise de FS do Talude 03 ao 04



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 61* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03 e 04 e saída no Talude 05. O valor encontrado foi de 2,49, superior ao estabelecido em projeto.

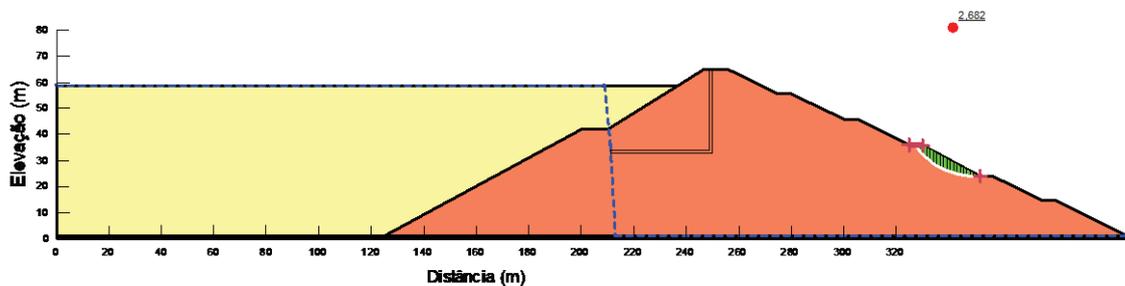
Figura 61: Análise de FS do Talude 01 ao 05



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 62* apresenta a análise com entrada no Talude 04 e saída no Talude 05. O valor encontrado foi de 2,6, superior ao recomendado pela norma.

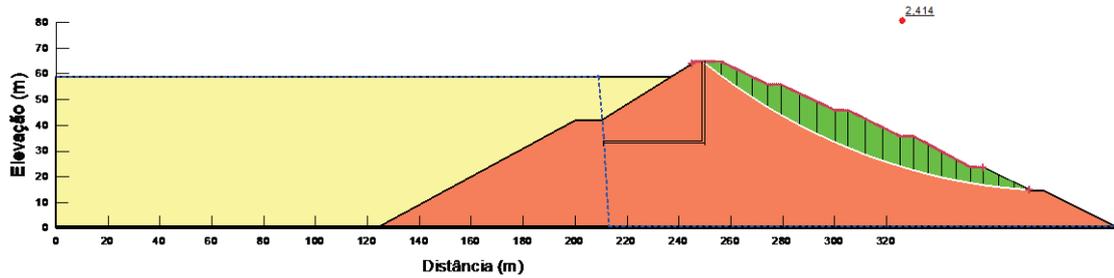
Figura 62: Análise de FS do Talude 04 ao 05



Fonte: Autora (2022)

A *Figura 63* apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04 e 05 e saída no Talude 06. O valor encontrado foi de 2,41, próximo ao estabelecido em projeto.

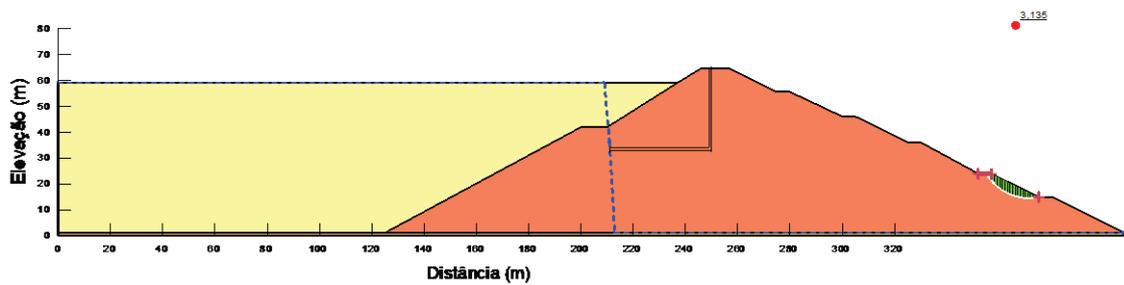
Figura 63: Análise de FS do Talude 01 ao 06



Fonte: Autora (2022)

A Figura 64 apresenta a análise com entrada no Talude 05 e saída no Talude 06. O valor encontrado foi de 3,13, superior ao estabelecido em projeto.

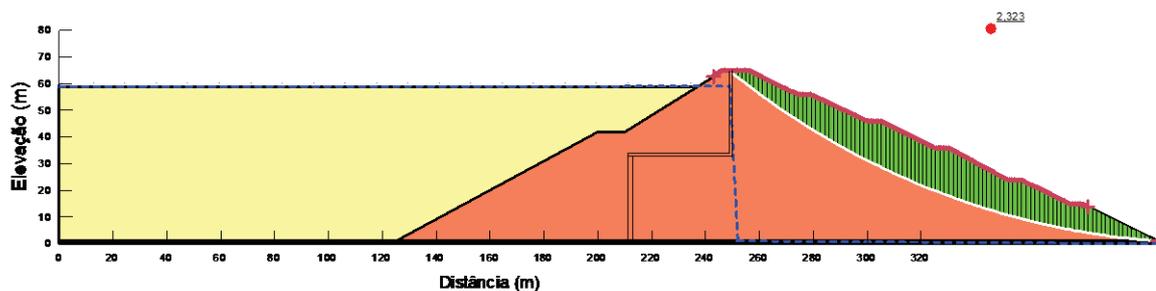
Figura 64: Análise de FS do Talude 05 ao 06



Fonte: Autora (2022)

A Figura 65 apresenta a análise com entrada nos Taludes 01, 02, 03, 04, 05 e 06 e saída no Talude 07, análise global. O valor encontrado foi de 2,32, superior ao estabelecido em projeto.

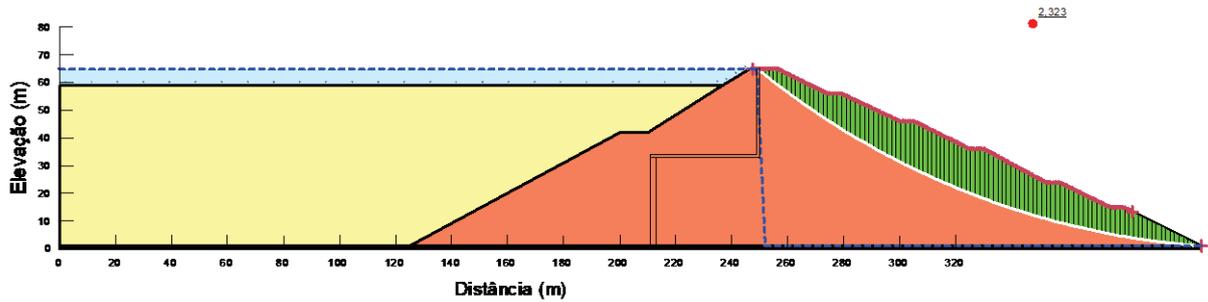
Figura 65: Análise Global



Fonte: Autora (2022)

A Figura 66 apresenta a análise global, com NA na extremidade. O valor encontrado foi de 2,32, próximo ao estabelecido em projeto.

Figura 66: Análise Global com NA na extremidade



Fonte: Autora (2022)

A Tabela 5 apresenta resumidamente as análises representadas anteriormente.

Tabela 5: Resumo dos FS das Análises de Barragem de Jusante

Ref.	Alt.	Análise	FS
			Modelo 01
1	Alteamento 01	T1 a T2	3,12
2		T1 a T3	2,83
3		T2 a T3	3,01
4		T1 a T4	2,64
5		T3 a T4	3,01
6		Global	2,46
7		Na na extremidade	2,46
8	Alteamento 02	T1 a T2	3,13
9		T1 a T3	2,89
10		T2 a T3	3,12
11		T1 a T4	2,69
12		T3 a T4	3,03
13		T1 a T5	2,49
14		T4 a T5	2,68
15		T1 a T6	2,41
16		T5 a T6	3,13
17		Global	2,32
18		Na na extremidade	2,32

Fonte: Autora (2022)

Como o FS global, e também o menor, é de 2,323, acima do proposto pela norma NBR13028 (ABNT, 2017) e pelo estabelecido em projeto, e todos os taludes já possuem inclinação 2/1, o modelo será adotado. A partir da geometria das barragens, foi possível obter as medidas dos elementos construtivos, a título de comparação.

A *Tabela 6* apresenta as características geométricas das barragens alteadas à jusante e montante, respectivamente, retiradas dos modelos representados no AutoCAD.

Tabela 6: Informações da geometria das barragens

	Jusante	Montante
Comprimento de crista (m)	700,00	700,00
Altura Fundação (m)	0,50	0,50
Área Maciço (m <sup>2</sup> )	9515,77	4690,33
Comprimento Seção Típica (m)	414,30	305,00
Atura da Barragem (m)	64,08	74,00

Fonte: Autora (2022)

A *Tabela 7*, por sua vez, apresenta a comparação de custos dos elementos construtivos da barragem alteada à Jusante em relação a barragem alteada à Montante, resultando em uma relação Jusante/Montante.

Tabela 7: Comparação de elementos construtivos das barragens

Tipo de Custo	Unidade	Jusante	Montante	Relação
<b>Custos de Execução</b>				
Volume do maciço	m <sup>3</sup>	6661036,20	3283231,56	2,03
Fundação	m <sup>3</sup>	145005,00	106750,00	1,36
Tempo de execução	meses	71,57	87,50	0,82
<b>Custo Local</b>				
Área em planta	m <sup>2</sup>	290010,00	213500,00	1,36

Fonte: Autora (2022)

Para a comparação do tempo de execução de cada uma, foi utilizada como referência a construção das Barragens, Maravilhas II (Jusante) e Forquilha III (Montante), apresentadas neste trabalho, em que, respectivamente, foram demandados 77 meses para altear 71 metros e 84 meses para altear 72 metros (CBDB, 2012).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das análises feitas neste trabalho, foi possível confirmar a hipótese inicial de que uma barragem alteada a jusante possui um custo mais elevado do que uma barragem com alteamentos à montante, e os principais fatores que levam à tal conclusão giram em torno do maciço e da fundação, tanto para materiais quanto para construção. Para estes dois itens, é chegado ao valor de comparação de 3,39 do custo de uma barragem a jusante em relação à barragem a montante, próximo ao valor mencionado por Eston (2019 *apud* TAKAR, 2019).

Neste estudo, avaliou-se aos quantitativos dos custos construtivos relativo ao corpo da barragem, devido ao volume de material da fundação e maciço, tempo de construção e sistema de drenagem. Relacionado ao custo local, comparou-se a área projetada das duas barragens. Os demais custos, inclusive os ambientais, não entraram em comparação, uma vez que ambas as barragens necessitam das mesmas licenças ambientais e cuidados, como estudos de viabilidade, de comunidades locais e mancha de inundação.

Ainda, através da entrevista de Takar (2019) e dos fatores estudados para a construção de uma barragem de rejeito alteada à montante, a qual leva em conta uma série de fatores a serem analisados para sua construção, como conhecimento topográfico da área, granulometria e previsão do comportamento do rejeito, além do controle pós construção (SOARES, 2010), é possível concluir que os desastres de barragens que utilizam esse método de alteamento não possuem relação direta com a técnica em si, e sim com a falta de monitoramento e cumprimento das normativas e regulamentações por parte dos empreendimentos. As medidas tomadas pela ANM, a fim de minimizar as possibilidades de acidentes envolvendo barragens de rejeito tornaram-se necessárias no atual cenário devido ao descumprimento de medidas antigas, por profissionais negligentes, imprudentes e imperitos.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, Luiz Heleno. **AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PIEZOCONE**. 2004. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6145> > Acesso em: 27 de maio de 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028**: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos. Terceira Edição ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 16 p.

BBC NEWS BRASIL (Brasil). **Área atingida por chuvas em MG tem 3 das barragens com maior risco de desabamento do país**. 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-59974486>. Acesso em: 03 out. 2022.

BRASIL. **Atos do Poder Legislativo**. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Diário Oficial da União. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982> . Acesso em: 27 de maio de 2022.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução nº 2.784, de 21 de março de 2019. Diário Oficial da União. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=48138> > Acesso em: 27 de maio de 2022.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia**. Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Diário Oficial da União. Disponível em: < [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/20222904/do1-2017-05-19-portaria-n-70-389-de-17-de-maio-de-2017-20222835) > Acesso em: 27 de maio de 2022.

BRASIL. Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração. **Agência Nacional de Mineração**. Quantitativo de Barragens - Método Construtivo em 16 de maio de 2022.

Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>. Acesso em: 16 de maio de 2022.

CAETANO, Helmer Murra **Análise de riscos em uma barragem de rejeito com o uso de diversas técnicas de estabilidade de taludes: estudo de caso**. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/236009>>. Acesso em: 02 nov. 2022.

CÂMARA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE (Brasil) (ed.). **Maravilhas II só voltará a operar após laudo previsto para setembro**. 2019. Disponível em: <https://www.cmbh.mg.gov.br/comunica%C3%A7%C3%A3o/not%C3%ADcias/2019/06/maravilhas-ii-s%C3%B3-voltar%C3%A1-operar-ap%C3%B3s-laudo-previsto-para-setembro>. Acesso em: 16 out. 2022.

CAMPOS, Nathalia Neves; POZNYAKOV, Karolina. **A gestão de riscos em barragens de rejeitos no Brasil**. Boletim do Gerenciamento, Rio de Janeiro, v. 30, n. 30, p. 53-66, out. 2020. Disponível em: <https://nppg.org.br/revistas/boletimdoGerenciamento> . Acesso em: 26 jul. 2022.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO – UMA REVISÃO. **Holos**, [S.L.], v. 8, p. 77-85, 9 maio 2017. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.5367>. Disponível em: < <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5367> >. Acesso em: 26 jul. 2022.

CARVALHO FILHO, José Walter de Sousa. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS CUSTOS PROJETADOS E EXECUTADOS NA CONSTRUÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA NO MUNICÍPIO DE SÃO VICENTE DO SERIDÓ - PB**. 2018. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de João Pessoa, João Pessoa, 2018. Disponível em: < <https://bdcc.unipe.edu.br/publications/estudo-comparativo-entre-os-custos-projetados-e-executados-na-construcao-de-uma-barragem-de-terra-no-municipio-de-sao-vicente-do-serido-pb-jose-walter-de-sousa-carvalho-filho/>> Acesso em: 6 de junho de 2022.

CARVALHO, Igor. **Barragem da Vale sofre instabilidade e força remoção de moradores em Ouro Preto**. 2020. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2020/04/14/barragem-da-vale-sofre-instabilidade-e-forca-remocao-de-moradores-em-ouro-preto>. Acesso em: 18 out. 2022.

COSTA, Arthur Carmo. **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DOS TALUDES DE UMA BARRAGEM DE TERRA DE PEQUENO PORTE PARA RESERVATÓRIO DE ÁGUA**. 2020. 52 f. TCC - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS (Brasil) (ed.). **BARRAGENS DE REJEITOS NO BRASIL**. Rio de Janeiro: Editora, 2012. 308 p.

FARIAS, Carlos Eugênio Gomes. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. 2002. 42 f. TCC - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, 2002. Disponível em: < [https://www.cgee.org.br/relatorios/-/asset\\_publisher/gjaL0bGaR8Qb/document/id/806029?inheritRedirect=false](https://www.cgee.org.br/relatorios/-/asset_publisher/gjaL0bGaR8Qb/document/id/806029?inheritRedirect=false) > Acesso em: 27 de maio de 2022.

FERREIRA, Daiane Souza. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE ATERRO EXPERIMENTAL EXECUTADO SOBRE UM DEPÓSITO DE REJEITOS FINOS**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em: < <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6979> > Acesso em: 4 de julho de 2022.

FONTELLES, M. J.; SIMÕES, M. G.; FARIAS, S. H.; FONTELLES, R. G. S. **Metodologia da pesquisa científica: Diretrizes para a elaboração de um protocolo de pesquisa**. Belém, 2009. 8 p. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-588477>. Acesso em: 26 de julho de 2022.

GALO, D. B. **Análise de riscos em barragens de rejeitos com o uso de técnicas semiprobabilísticas de estabilidade de taludes – Um estudo de caso**. 119 f. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2017.

LEANDRO PRAZERES (Brasil). **Área atingida por chuvas em MG tem 3 das barragens com maior risco de desabamento do país.** 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-59974486>. Acesso em: 02 nov. 2022.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos usando o Método de análise hierárquica.** 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-14122006-123702/pt-br.php> > Acesso em: 6 de junho de 2022.

MAFRA, José Mário Queiroga. Barragem construída com rejeito ciclonado: uma possível solução para disposição de rejeito no Brasil?. **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-2, jan. 2015. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS. <http://dx.doi.org/10.20906/cps/cb-06-0005>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/309216714\\_Barragem\\_construida\\_com\\_rejeito\\_ciclonado\\_uma\\_possivel\\_soluciao\\_para\\_disposicao\\_de\\_rejeito\\_no\\_Brasil](https://www.researchgate.net/publication/309216714_Barragem_construida_com_rejeito_ciclonado_uma_possivel_soluciao_para_disposicao_de_rejeito_no_Brasil). Acesso em: 08 out. 2022.

MARANGON, Márcio. **Barragens de Terra, de Enrocamento e de Rejeitos.** In: Curso Básico de Obras de Terra. NuGeo-UFJF. 2020. Vol. 5. 61p. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/ensino/graduacao/publicacoes-academicas-livre/>>. Acesso em 08 de novembro de 2022.

MARSHALL, Judith. Rompimentos de barragens de rejeitos no Brasil e no Canadá: uma análise do comportamento corporativo. **Caderno Eletrônico de Ciências Sociais**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 27, 26 dez. 2017. Universidade Federal do Espírito Santo. <http://dx.doi.org/10.24305/cadecs.v5i1.2017.17793>.

MINAS GERAIS. **Assembleia Legislativa de Minas Gerais.** Decreto 46993, de 02 de maio de 2016. Diário do Executivo. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=46993&comp=&ano=2016>. Acesso em: 27 de maio de 2022.

PULINO, Alexandre Masocatto. **ÍNDICES DE ESTIMATIVA DE CUSTOS DE FECHAMENTO DE PILHAS DE ESTÉRIL E BARRAGENS DE REJEITOS**. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/RAOA-BELRQS>> Acesso em: 27 de maio de 2022.

RODRIGUES, Nuno Gonçalo Loureiro. **ESTUDOS SOBRE O ÂNGULO DE ATRITO EM SOLOS GRANÍTICOS RESIDUAIS**. 2015. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2015.

SILVA FILHO, Júlio César da. **ESTUDO DO MÉTODO DE ALTEAMENTO PARA MONTANTE EM BARRAGENS DE REJEITOS DA MINERAÇÃO**. 2019. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário de João Pessoa, João Pessoa, 2019. Disponível em: < <https://bdccc.unipe.edu.br/publications/estudo-do-metodo-de-alteamento-para-montante-em-barragens-de-rejeitos-da-mineracao-julio-cesar-da-silva-filho/> > Acesso em: 6 de junho de 2022.

SILVA, K. B. C. ; RIBEIRO, K. D. . RUPTURA EM BARRAGENS DE REJEITOS: UMA ABORDAGEM SOBRE MONITORAMENTO E FISCALIZAÇÃO. **IGNIS** Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo, Engenharias e Tecnologia de Informação, v. 9, p. 17-34, 2020.

SINAPI. **Caixa Econômica Federal**, 2020. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/site/Paginas/PageNotFoundError.aspx?requestUrl=https://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 6 de junho de 2022.

SINDICATO NACIONAL DOS DOCENTES DAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR (ANDES) (ed.). **Três anos após o rompimento da barragem de Brumadinho (MG), atingidos ainda cobram justiça**. 2022. Disponível em: <https://www.andes.org.br/conteudos/noticia/tres-anos-apos-o-rompimento-da-barragem-de-brumadinho-mG-atingidos-ainda-cobram-justica1>. Acesso em: 25 jan. 2022.

SOARES, Lindolfo. **Barragem de Rejeitos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França., 2010. 896 p.

TAKAR, Téo. **Barragem brasileira é pior? Problema é fiscalização, punição e lucro alto**. 2019. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2019/01/31/como-e-a-seguranca-das-barragens-de-mineracao-em-outros-paises.htm>. Acesso em: 02 dez. 2022.

VALERIUS, M. B. (2014). **Cadastro e Análise do Potencial de Risco das Barragens de Rejeitos de Mineração do Estado de Goiás**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 245/14, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

VIECILI, Cristiano. **DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO SOLO DE IJUÍ A PARTIR DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO**. 2003. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2003.

VIEIRA, Luiz Gustavo Martins. **Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes**. 2006. 323 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15053>. Acesso em: 08 out. 2022.

VINAUD, Laura Ursino Pereira. **BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS: listas de verificação de aspectos técnicos, legais e ambientais**. 2019. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2019. Disponível em: < <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/tcc/monografias-defendidas/> > Acesso em: 6 de junho de 2022.