

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

JOSÉ VICTOR TESSELE VARGAS

ANÁLISE DE FLUXO BIDIMENSIONAL DA BARRAGEM HIDROITUANGO POR MEIO
DE MODELAGEM NUMÉRICA

Joinville
2022

JOSÉ VICTOR TESSELE VARGAS

ANÁLISE DE FLUXO BIDIMENSIONAL DA BARRAGEM HIDROITUANGO POR MEIO
DE MODELAGEM NUMÉRICA

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Julián
Asdrubal Buriticá García

Coorientador:

Joinville
2022

JOSÉ VICTOR TESSELE VARGAS

ANÁLISE DE FLUXO BIDIMENSIONAL DA BARRAGEM HIDROITUANGO POR MEIO
DE MODELAGEM NUMÉRICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 28 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Julián Asdrubal Buriticá García
Orientador(a)
Presidente

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª. Dra. Anelize Borges Monteiro
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho à minha mãe, Cláudia F. Tessele.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos fazem referência a todos que de alguma forma tiveram influência no meu aprendizado durante o período de tempo em que estive dentro da universidade. Ao Prof. Julián García que me apoiou nessa breve aventura, por me orientar e apresentar o tópico de barragens, o qual considero um conhecimento de grande diferencial para meu preparo e ingresso ao mundo profissional. Faço um agradecimento especialmente ao Prof. Daniel Hastenpflug que me deu oportunidades para entrar no mundo da pesquisa científica e me incentivou a participar da Equipe InfraTEC, esta a qual terei para sempre muita gratidão pelos ensinamentos e acolhimento que lá recebi. No âmbito pessoal, agradeço de forma incomensurável aos meus pais, José L. Vargas e Cláudia F. Tessele, por investirem na minha educação e criarem comigo meus valores, prezando sempre pela minha liberdade e felicidade, oportunizando tudo que eu pudesse almejar. Sei, por conta deles, qual o posicionamento e os compromissos éticos que tenho perante a mim e a sociedade. Minhas conquistas são deles e as deles, minhas. Aos meus irmãos, Naruto Brandão e Jesuino Vieira, agradeço pelos inúmeros ensinamentos e experiências compartilhadas nesses últimos anos, certo de que nunca esqueceremos os bons momentos que vivemos hoje. Agradeço, ainda, às melhores pessoas que conheci ao chegar em Joinville-SC: Gabriela Fernandes, por me fazer sentir o valor e a segurança de uma amizade preservada e potencializada pelo tempo; e Bino Albino, com quem tive a felicidade de fundar a Obra durante os primeiros anos da graduação, estes que foram certamente anos que moldaram muito de quem sou hoje. Posteriormente, tive a oportunidade de morar na Torre com Vinicius Zilli e Mairon Wolniewicz, aos quais agradeço pelo apoio e por serem minha referência de dedicação, ajudando a aflorar dentro de mim a força para superar os tropeços da vida acadêmica. No passar dos anos, muitas foram as fases e muitas foram as circunstâncias, portanto agradeço a todos os grupos aos quais tive o prazer de pertencer: O Bolah, Bojackos, Caverna AntiSocial, Amigos Que Eu Gosto, Tontolândia e Armada de RainyWorkman. Obrigado pela parceria e companheirismo ao longo desses anos. Todos fazem parte dessa trajetória, agradeço a todos que assinaram a minha placa e aos que assinarão.

"Ser libre es (...) gastar la mayor cantidad de tiempo de nuestra vida en aquello que nos gusta hacer."(José Mujica, 2012).

RESUMO

A segurança das barragens e os estudos atribuídos a ela são fundamentais. Em obras de grande porte, acidentes que provoquem o colapsos da estrutura podem acarretar em muitas perdas ambientais, econômicas e vidas humanas, afetando direta e indiretamente a população. Por esse motivo, foi realizado nesta pesquisa um estudo de caso avaliando a influência das mudanças emergenciais numa barragem zoneada de enrocamento com núcleo impermeável de argila de grande porte localizada na Colômbia. Foram feitas simulações numéricas de fluxo e estabilidade de taludes por meio do programa computacional GeoStudio. Foi observado que, a princípio, a solução proposta atende aos critérios de segurança, apesar do aumento considerável dos gradientes e da análise de estabilidade de taludes realizada apresentar fatores de segurança adequados para as condições de operação e rebaixamento rápido. É importante mencionar que as mudanças de geometria podem acarretar em pontos de plastificação e recalques particulares, sendo importante para definir a segurança global da estrutura, portanto, a realização das análises de tensão-deformação que não foram abordadas na pesquisa.

Palavras-chave: Fluxo bidimensional. Modelagem numérica. Barragem de terra-enrocamento. Percolação. Estabilidade de Taludes.

ABSTRACT

The safety of dams and the studies assigned to it are fundamental. In large works, accidents that cause the collapse of the structure can result in many environmental, economic and human lives losses, directly and indirectly affecting the population. For this reason, a case study was carried out in this research evaluating the influence of emergency changes in a large rockfill dam with an impermeable clay core located in Colombia. Numerical simulations of flow and slope stability were performed using the GeoStudio computer program. It was observed that, in principle, the proposed solution meets the safety criteria, despite the considerable increase in slopes and the slope stability analysis carried out to present safety factors suitable for the operating conditions and rapid drawdown. It is important to mention that changes in geometry can lead to plasticization points and particular settlements, being important to define the global safety of the structure, therefore, carrying out stress-strain analyzes that were not addressed in the research.

Keywords: Two-dimensional flow. Numerical modeling. Earth-rockfill dam. Percolation. Slope stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragens de Concreto: a) Gravidade, b) Arco e c) Contrafortes . . .	19
Figura 2 – Barragem de Terra Homogênea	20
Figura 3 – Barragem de Enrocamento com Membrana de Concreto	21
Figura 4 – Exemplo da Seção Transversal de uma Barragem de Terra- Enrocamento	21
Figura 5 – Forças Atuantes em uma Fatia Vertical	23
Figura 6 – Exemplo do Modelo Físico de Linhas de Fluxo	28
Figura 7 – Exemplo do Método Gráfico de Linhas de Fluxo	29
Figura 8 – Exemplo do Método Numérico de Linhas de Fluxo	30
Figura 9 – Relevo do Local do Reservatório	33
Figura 10 – Barragem Hidroituango	34
Figura 11 – Ilustração Tridimensional da Barragem Hidroituango	35
Figura 12 – Seção Transversal da Barragem Inicial	37
Figura 13 – Seção Transversal Ampliada do Topo da Barragem Inicial	38
Figura 14 – Seção Transversal Ampliada da Base da Barragem Inicial	38
Figura 15 – Seção Transversal da Barragem Executada	39
Figura 16 – Seção Transversal Ampliada do Topo da Barragem Executada	40
Figura 17 – Dimensões Detalhadas da Barragem Executada	40
Figura 18 – Dimensões Detalhadas da Barragem Executada	41
Figura 19 – Seção Transversal Ampliada do Topo da Barragem Final	41
Figura 20 – Traçado das Condições de Contorno da Barragem Modelada	43
Figura 21 – Vazão na Seção de Controle da Barragem Inicial	46
Figura 22 – Vazão na Seção de Controle da Barragem Executada	47
Figura 23 – Linhas e Vetores de Fluxo da Barragem Inicial	47
Figura 24 – Linhas e Vetores de Fluxo da Barragem Executada	48
Figura 25 – Linhas e Vetores de Fluxo no Topo da Barragem Inicial	48
Figura 26 – Linhas e Vetores de Fluxo no Topo da Barragem Executada	49
Figura 27 – Vazão na Seção de Controle ao Retirar o Muro Corta Fluxo	49
Figura 28 – Linhas Equipotenciais Analisadas	50
Figura 29 – Linhas Equipotenciais no Início e Final da Análise de Rebaixamento Rápido	51
Figura 30 – Gradiente em X e Y: a) Topo da Seção Inicial e b) Topo da Seção Executada	52
Figura 31 – Poropressão da Barragem Inicial	53
Figura 32 – Poropressão da Barragem Executada	54

Figura 33 – Gráfico da Poropressão	54
Figura 34 – Gráfico da Variação da Poropressão	55
Figura 35 – Gráficos de Poropressão e Variação de Poropressão no Ponto Extra	55
Figura 36 – Seção Inicial no Final de Construção - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante	56
Figura 37 – Seção Executada no Final de Construção - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante	56
Figura 38 – Seção Inicial no Final de Construção - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante	57
Figura 39 – Seção Executada no Final de Construção - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante	57
Figura 40 – Seção Inicial em Operação - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante	58
Figura 41 – Seção Executada em Operação - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante	58
Figura 42 – Seção Inicial em Operação - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante	58
Figura 43 – Seção Executada em Operação - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante	59
Figura 44 – Seção Inicial em Rebaixamento Rápido - Estabilidade Global a Montante em a) 7 dias e b) 18 dias	59
Figura 45 – Seção Inicial em Rebaixamento Rápido - Estabilidade do Topo a Montante em a) 2 dias e b) 9 dias	59
Figura 46 – Seção Executada em Rebaixamento Rápido - Estabilidade Global a Montante em a) 8 dias e b) 20 dias	60
Figura 47 – Seção Executada em Rebaixamento Rápido - Estabilidade do Topo a Montante em a) 4 dias e b) 8 dias	60
Figura 48 – Seção Inicial - Gráficos de Variação do Fator de Segurança nas Rupturas Críticas a Montante	61
Figura 49 – Seção Executada - Gráficos de Variação do Fator de Segurança nas Rupturas Críticas a Montante	61
Figura 50 – Primeira Versão da Malha na Seção Inicial	66
Figura 51 – Alteração da Malha na Seção Inicial	66
Figura 52 – Primeira Versão da Malha na Seção Executada	67
Figura 53 – Alteração da Malha na Seção Executada	67
Figura 54 – Discretização das Etapas Analisadas em Regime Transiente	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos MEL não rigorosos	24
Quadro 2 – Características dos MEL rigorosos	24
Quadro 3 – Classificação e descrição dos solos de acordo com a NBR6502 . .	26
Quadro 4 – Agrupamento de acidentes em barragens	32
Quadro 5 – Acidentes e incidentes	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalo de Variação de k para Diferentes Materiais	26
Tabela 2 – Resumo das Características dos Materiais de Projeto	37
Tabela 3 – Resumo do Detalhamento da Malha por Material	43
Tabela 4 – Coordenadas de Controle	44
Tabela 5 – Coordenadas dos Intervalos de Ruptura	45
Tabela 6 – Fatores de Segurança Mínimos Permitidos	56

LISTA DE SIGLAS

2D – Duas Dimensões

3D – Três Dimensões

CBGB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

EPM – Empresas Públicas de Medellín

MDF – Método de Diferenças Finitas

MEF – Método de Elementos Finitos

MEL – Métodos de Equilíbrio Limite

NBR – Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Força Hidrostática
A	Área
b	Largura da Fatia
c	Coesão
c'	Coesão Efetiva
D	Força Aplicada na Superfície
E	Componente Horizontal da Força Entre Fatias
FS	Fator de Segurança
h	Carga Hidráulica
H	Carga Hidráulica
i	Gradiente Hidráulico
N	Força Normal na Base da Fatia
k	Coeficiente de Permeabilidade
kW	Força Horizontal Incorporadora de Efeitos Sísmicos
l	Comprimento da Base da Fatia
Q	Vazão
s	Resistência ao Cisalhamento
S	Força Tangente na Base da Fatia
T	Componente Vertical da Força Entre Fatias
u	Poropressão
w	Teor de Umidade
W	Peso da Fatia
z	Carga Altimétrica

ΔH	Varição de Carga Hidráulica
γ_0	Peso específico da Água
σ	Tensão Normal
τ	Tensão Cisalhante
ϕ	Ângulo de Atrito

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	Estrutura do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Conceitos de Barragens	18
2.1.1	Classificações	18
2.1.1.1	Concreto	19
2.1.1.2	Terra e Enrocamento	19
2.2	Parâmetros Geotécnicos	21
2.2.1	Estabilidade de Taludes	22
2.2.2	Percolação	25
2.3	Fluxos Bidimensionais	27
2.3.1	Método de Diferenças Finitas	29
2.3.2	Método de Elementos Finitos	30
2.4	Acidentes em barragens	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Informações do Projeto	33
3.2	Materiais e Parâmetros	35
3.3	Seções Estudadas	37
3.3.1	Projeto Inicial	37
3.3.2	Projeto Executado	39
3.4	Etapas de modelagem	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Cálculo de Vazão e Linhas de Fluxo	46
4.2	Linhas Equipotenciais	50
4.3	Gradientes	52
4.4	Poropressão	53
4.5	Estabilidade de Taludes	55
4.5.1	Final de Construção	56
4.5.2	Operação	57
4.5.3	Rebaixamento Rápido	59

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	63
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A	66
	APÊNDICE B	68

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história as barragens vem sendo obras fundamentais para o avanço da sociedade que, por consequência do crescimento populacional, necessita cada vez mais de seus recursos. As barragens são estruturas construídas em vales e destinadas a fechá-los transversalmente, proporcionando assim um represamento de água (CAPUTO, 1996). São inúmeros os benefícios do represamento das águas fluviais que vão da produção energética ao fornecimento de água para consumo residencial, industrial e agrícola em especial nos períodos de estiagem.

Em contrapartida aos diversos benefícios que as barragens trouxeram para a sociedade, podem haver também aspectos negativos em sua concepção. Para mitigar ao máximo os problemas provenientes das obras de barragem, é essencial que haja um acompanhamento e que sejam tomadas as precauções devidas desde a concepção do projeto até a fase operacional da obra.

A construção mal planejada de uma barragem pode acarretar em problemas construtivos e gerar perdas econômicas, causar catástrofes ambientais ou mesmo acidentes com destruição de patrimônio externo e vítimas fatais. Nos últimos anos diversos desastres tiveram notoriedade no Brasil, como o rompimento das barragens de rejeitos de mineração nas cidades de Mariana e Brumadinho em Minas Gerais. Acidentes como estes acarretam em consequências irreversíveis e para evitá-los são necessários acompanhamentos geotécnicos e estudos ao longo de todos os processos da obra.

Massad (2010) cita que em projetos de barragens, economia e segurança são dois fatores essenciais a serem cumpridos. Mesmo estes elementos sendo inversamente proporcionais, atualmente com o auxílio de programas de modelagem numérica é possível expandir os limites de geotecnia clássica e produzir estudos muito mais detalhados para elaboração de projetos complexos. Com a utilização do software GeoStudio é possível executar diversas análises baseadas em cálculos computacionais relativos à percolação em meios porosos, estabilidade de taludes e encostas e tensão-deformação nos solos.

Em 2018, ocorreu um acidente que obstruiu as tubulações de desvio da barragem colombiana Hidroituango durante sua fase de construção. O projeto da barragem sofreu alterações no núcleo impermeável com o intuito de atribuir agilidade na construção e evitar possíveis desastres. Neste contexto, o intuito do presente trabalho é analisar, por meio de modelagem numérica, as respostas dos fluxo bidimensional da seção inicial e da seção executada da barragem em questão.

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática de redes bidimensionais da nova seção da barragem Hidroituango, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar por meio de modelagem numérica a influência da alteração da seção transversal da barragem Hidroituango em seu fluxo bidimensional, visando entender possíveis alterações de vazão, linhas de fluxo, linhas equipotenciais, gradientes, poropressão e estabilidade de taludes em fase de final de construção, operação e rebaixamento rápido, além de verificar possíveis mudanças significativas nos resultados ao se alterar a complexidade da malha utilizada no software.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Conhecer os conceitos construtivos das barragens, entendendo seus parâmetros geotécnicos e seus pontos críticos;
- Desenvolver um modelo numérico gerando um acervo de dados e gráficos referentes ao fluxo bidimensional das barragens estudadas; e,
- Comparar os resultados obtidos, entendendo as condições e alterações que levaram à diferença entre as respostas de cada teste.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos os quais estão brevemente descritos abaixo.

- O Capítulo 1 inicia o tema contextualizando os conceitos primários do problema estudado e apresenta os objetivos gerais e específicos propostos;
- O Capítulo 2 introduz conhecimentos elementares para o entendimento das informações que virão nos capítulos subsequentes;
- O Capítulo 3 apresenta os parâmetros fixos e procedimentos de modelagem para a análise numérica;
- No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir dos gráficos e modelos do software; e,
- No Capítulo 5 estão as conclusões a partir dos resultados, bem como sugestões para a melhorias e estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão introduzidos conceitos essenciais para a compreensão da construção de barragens. São explicados os conhecimentos básicos de barragem discorrendo sobre conceitos e parâmetros geotécnicos. São apresentadas algumas das categorias das análises por modelagem numérica neste campo. Ainda, são abordados itens de segurança na construção de barragens e mostrados dados acerca do histórico de seus desastres e acidentes.

2.1 CONCEITOS DE BARRAGENS

De acordo com a Lei Federal nº 14.066/2020, responsável por estabelecer a Política Nacional de Segurança de Barragens, pode ser denominada como barragem qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (BRASIL, 2020). O CONAMA é o órgão responsável por estipular normas e regras para que as consequências derivadas da construção de barragens agridam em menor escala o meio ambiente.

Ao se planejar uma barragem é preciso estabelecer qual a sua finalidade, pois a partir dessa determinação é possível acrescentar e alterar diversos aspectos ao projeto que em conjunto com os parâmetros recolhidos in loco, determinarão demais detalhes como materiais utilizados, método construtivo e seção transversal. Para Caputo (1996), as barragens podem ser de acumulação ou derivação. A primeira tem o objetivo de produção energética, abastecimento de cidades ou servir de suprimento à irrigação, já a segunda tem o intuito apenas de conter e desviar os cursos d'água.

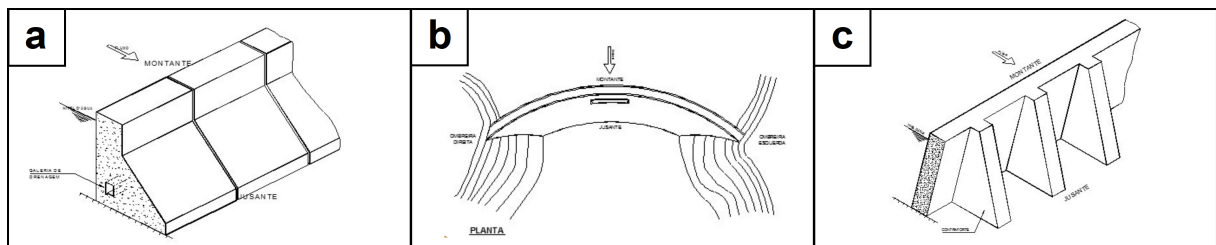
2.1.1 Classificações

Caputo (1996) acredita que a escolha técnico-econômica do tipo de barragem mais indicada depende da finalidade do uso e da disponibilidade de material na região, referente tanto às jazidas de extração locais quanto à viabilidade comercial e logística do lugar de execução. Além disso, atribui uma classificação por materiais, distinguindo as barragens entre concreto, terra ou terra-enrocamento. No entanto, para Costa (2012), ainda há uma gama de modelos de barragens não convencionais como barragens de madeira, alvenaria de pedra, gabião, além de combinações dos materiais citados.

2.1.1.1 Concreto

As barragens de concreto como um todo são caracterizadas, se em comparação com as demais, por suas geometrias e seções esbeltas, podendo inclusive tornar-se ponto turístico pelo seu visual exótico. No entanto, seus custos de projeto podem ser bem elevados tanto pelos materiais quanto pelas tecnologias exigidas, o que torna inviável sua execução em muitos locais. Massad (2010) diz que as barragens de concreto podem ser classificadas em três tipos: barragens de gravidade, barragens em arco de dupla curvatura e barragens de concreto estrutural com contrafortes. Abaixo são apresentadas na Figura 1 exemplos de cada uma das barragens citadas, respectivamente.

Figura 1 – Barragens de Concreto: a) Gravidade, b) Arco e c) Contrafortes



Fonte: Adaptado de Júnior (2006)

As barragens de gravidade, de acordo com Kuperman e Cifu (2006), são estruturas maciças de concreto que resistem aos esforços hidrostáticos pelas respostas de sua própria geometria trapezoidal. Nas barragens em arco, a face a montante (convexa) fica em contato direto com a carga hidrostática, como visto na Figura 1b, sua estrutura de concreto é beneficiada pela geometria que equilibra os esforços de compressão na parte a jusante (côncava) transferindo as demais forças para as fundações e apoios laterais. A terceira categoria, segundo o próprio Massad (2010), é constituída por lajes ou abóbodas múltiplas inclinadas que se apoiam em contrafortes, tendo benefícios pelo menor consumo de concreto, porém exige maiores gastos com materiais de construção e principalmente na fundação que costuma ser um ponto crítico deste método.

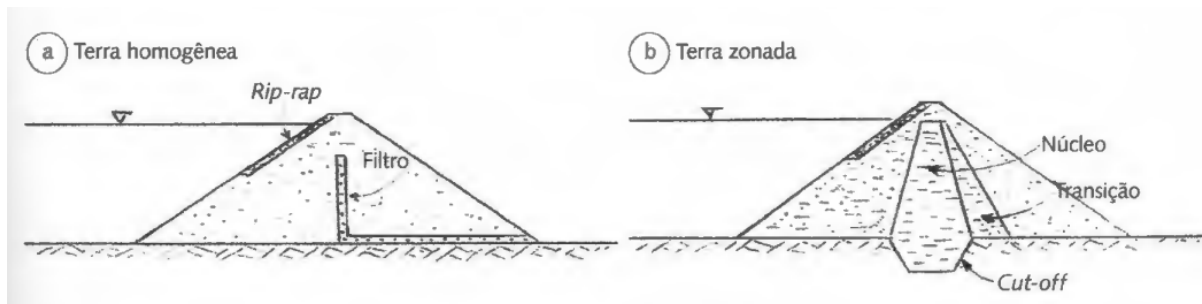
2.1.1.2 Terra e Enrocamento

Obras de terra e enrocamento, por conta das características físicas dos materiais, costumam exigir a movimentação de grandes volumes e demandam análise de diversos parâmetros geotécnicos para seus projetos, sendo assim, existe uma constância do uso dos materiais com as seções tipicamente utilizadas. Neste contexto, Massad (2010) elenca as principais modalidades de projeto como barragens de terra homogênea, de enrocamento com membrana de concreto e barragens de terra-enrocamento.

As barragens homogêneas, que segundo Caputo (1996) podem ser em terra, enrocamento ou terra-enrocamento, foram amplamente executadas no Brasil pelas características típicas do país que apresenta vales abertos, o que dificulta e encarece outros tipos de construção. O relevo e o tipo de solo presente no local influenciam diretamente em diversos aspectos para a construção de uma barragem, principalmente na elaboração do projeto e na execução da obra, por interferirem na segurança e custo do empreendimento.

Como apresentado na Figura 2, as barragens de terra homogêneas possuem um corpo de aterro impermeável argiloso com inserção de filtros verticais ou horizontais de material permeável para controlar o fluxo de água e evitar a erosão da estrutura. É comum a presença de uma barreira de rochas chamada *rip-rap* na face a montante do aterro, essa camada tem o objetivo de manter a segurança e estabilidade da estrutura evitando a erosão no local. Para Costa (2012), uma variação de barragem de terra em que há o zoneamento de materiais impermeáveis do núcleo em função de materiais terrosos mais permeáveis chamada de barragem mista ou zonada. Um exemplo de seção transversal pode ser observado também na Figura 2.

Figura 2 – Barragem de Terra Homogênea

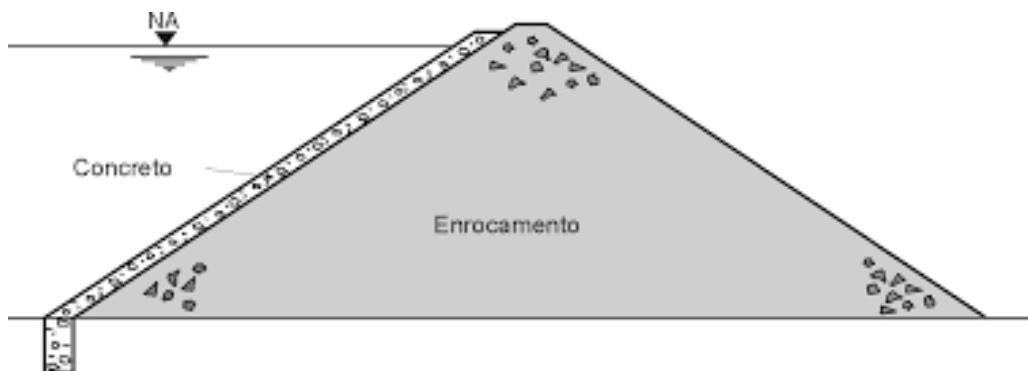


Fonte: Costa (2012)

Em caso de obras de enrocamento, a elevada permeabilidade desse material demanda a utilização de artifícios que diminuam a percolação entre os vazios. O segundo método citado utiliza uma camada de concreto na face a montante da barragem, o material aglomerante sobre o talude de pedras impede a passagem da água, enquanto o enrocamento estabiliza a estrutura. Na Figura 3 se apresenta um exemplo de como é disposto esta membrana na vista de uma seção transversal.

Barragens de terra-enrocamento possuem uma seção semelhante às barragens zoneadas e são constituídas essencialmente, segundo Caputo (1996), de um núcleo de argila impermeável rodeado por material permeável. O núcleo garante estanqueidade à barragem e, de acordo com Ribeiro (2015), deve ser protegido por camadas de transição em sua face a jusante para que não ocorra a fuga do material impermeável. As zonas de material permeável constituídas de enrocamento, são responsáveis por manter a estabilidade dos taludes da estrutura desse tipo de barragem.

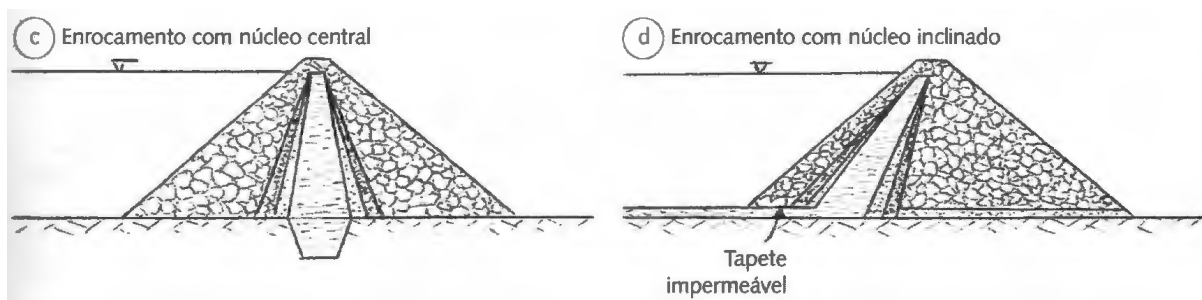
Figura 3 – Barragem de Enrocamento com Membrana de Concreto



Fonte: Massad (2010)

Muitas vezes o projeto só é possível devido à combinação dos materiais que viabilizam sua execução. Barragens de terra e enrocamento permitem taludes mais íngremes e possibilitam uma menor movimentação de massa, diminuindo o volume das obras em comparação a barragens de terra homogênea por exemplo. Na Figura 4 estão duas seções transversais típicas dessa modalidade: barragens de enrocamento com núcleos central e inclinado, respectivamente.

Figura 4 – Exemplo da Seção Transversal de uma Barragem de Terra-Enrocamento



Fonte: Costa (2012)

2.2 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Segundo Magalhães (2015), os parâmetros geotécnicos podem ser classificados em três grupos: resistência, deformabilidade e percolação. O estudo aprofundado da influência desses parâmetros nos cálculos relacionados à obras geotécnicas é essencial para entender as respostas das obras de terra.

Ao se analisar a resistência ao cisalhamento das estruturas, se avalia a segurança da estabilidade dos taludes, podendo ser nas fases de construção, regime permanente de operação ou rebaixamento rápido. Este estudo é feito nas regiões de aterro das barragens com cuidados nas faces de montante e jusante onde podem acontecer os movimentos de solo, além de abranger a região de fundação que também sofre influência dessa movimentação.

O fenômeno da percolação de fluidos em meios porosos é estudado em várias áreas da engenharia. Na engenharia geotécnica, em particular, o conhecimento das características do fluxo da água através de solos é essencial para análise de problemas de estabilidade de taludes, controle de águas subterrâneas, projeto de estruturas hidráulicas (CHUQUIMUNI, 2005).

As análises de deformação, conforme Souza (2013), buscam compreender os recalques da fundação e do maciço, além de recalques diferenciais entre as diferentes seções transversais da barragem que podem ocasionar em problemas, caso não forem adequadamente analisados na fase de projeto.

2.2.1 Estabilidade de Taludes

Os métodos para a análise de estabilidade de taludes, segundo Massad (2010), baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo, tomada como corpo rígido-plástico, na iminência de entrar em processo de escorregamento, por conta disso é chamado por Métodos de Equilíbrio Limite (MEL). Baseando-se no conhecimento das forças atuantes são determinadas as tensões de cisalhamento induzidas, por meio das equações de equilíbrio. Conclui-se a análise ao comparar essas tensões com a resistência ao cisalhamento dos solos característicos da estrutura estudada.

Existem variedades de MEL que seguem critérios mais ou menos rigorosos, porém eles têm características em comum de acordo com Chuquimuni (2005):

- a) Utilizam a mesma definição para fator de segurança local (FS):

$$FS_{local} = \frac{s}{\tau} \quad (1)$$

em que s é a resistência ao cisalhamento e τ a tensão cisalhante atuante;

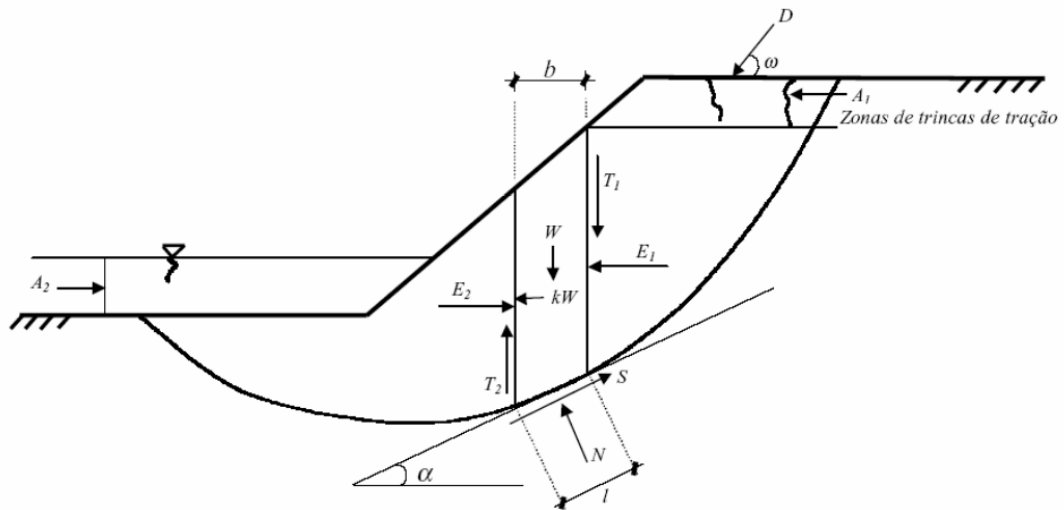
- b) Usam equações de equilíbrio para o cálculo de valores médios de tensão cisalhante (τ) e tensão normal (σ) ao longo da superfície de ruptura. Isto serve para estimar a resistência ao cisalhamento pelo critério de Mohr-Coulomb.

$$s = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (2)$$

onde c é a coesão dos grãos e ϕ o ângulo de atrito do solo;

- c) Utilizam de hipóteses complementares às equações de equilíbrio, visto que o número de incógnitas dos problemas são em geral superiores ao número de equações de estática. Os métodos de análise devem ser versáteis permitindo a inclusão de propriedades do solo e valores de poropressão que variam no interior do maciço. Por conta disso, os métodos subdividem a região do solo estudada delimitada pela superfície potencial de ruptura em fatias verticais de menor área, analisando as condições de equilíbrio em cada fatia de forma isolada. É possível entender como as forças agem nas fatias de forma genérica pela Figura 5.

Figura 5 – Forças Atuantes em uma Fatia Vertical



Fonte: Chuquimuni (2005)

Na figura, W é o peso da fatia de largura b , kW é a força horizontal que incorpora efeitos sísmicos, N é a força normal na base da fatia, S é a força tangente à base da fatia com ângulo α , sendo $S = \tau \cdot l$, $E1$ e $E2$ são componentes horizontais das forças entre as fatias, $T1$ e $T2$ são os componentes verticais das forças entre as fatias, $A1$ e $A2$ são as forças hidrostáticas, D é a força aplicada na superfície;

- d) Consideram de forma genérica que os maciços de solo têm comportamento rígido perfeitamente plásticos, logo, não são feitas considerações a respeito dos campos de tensão-deformação gerados por carregamento externo.

A partir da Equação 1, segundo Chuquimuni (2005), é possível associar para solos secos ou saturados, que:

$$S = \tau \cdot l = \frac{s \cdot l}{FS_{local}} \cdot [c' + (\sigma - u) \cdot \tan(\phi)] \quad (3)$$

onde: $\sigma = \frac{N}{l}$ é a tensão média na base da fatia e u é a poropressão atuante no centro da base da fatia. Para efeitos de resultados, quanto menor o FS, mais crítica é a situação da ruptura analisada.

O nível de rigor dos diversos métodos de equilíbrio limite faz referência ao grau de detalhamento envolvido em seus cálculos. O Quadro 1 apresenta uma relação dos métodos das fatias não rigorosos, enquanto o Quadro 2 lista os métodos com maior rigor em seus critérios de cálculo.

Quadro 1 – Características dos MEL não rigorosos

Método	Hipótese	Ruptura
Fellenius (1927) (fatias)	Não considera forças entre fatias.	(Circular)
Bishop Simplificado (1955) (fatias)	Resultante das forças entre fatias é horizontal.	(Circular)
Janbu Simplificado (1968) (fatias)	Resultante das forças entre fatias é horizontal. Um fator de correção empírico f_0 é usado para levar em conta os efeitos das forças tangenciais.	(Qualquer)
Janbu Generalizado (1968) (fatias)	Localização da força normal entre fatias definida por uma linha de empuxo arbitrária.	(Qualquer)

Fonte: Adaptado de Pacheco (2005)

Quadro 2 – Características dos MEL rigorosos

Método	Hipótese	Ruptura
Spencer (1967) (fatias)	Resultantes das forças entre fatias têm inclinações constantes através da massa do solo.	(Qualquer)
Morgenstern-Price (1965) (fatias)	Direção da resultante das forças entre fatias definidas usando uma função arbitrária $f(x)$. A parcela de $f(x)$ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e de momentos é calculada.	(Qualquer)
Janbu Simplificado (1968) (fatias)	Resultante das forças entre fatias é horizontal. Um fator de correção empírico f_0 é usado para levar em conta os efeitos das forças tangenciais.	(Qualquer)
Sarma (1973) (fatias)	Resistência interna entre fatias é mobilizada. Distribuição das resultantes das forças tangenciais entre fatias definidas com base em uma função arbitrária. A porcentagem da função λ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e momentos é calculada.	(Qualquer)
Sarma (1979) (cunhas)	Assume que a resistência ao cisalhamento é mobilizada nos lados de todas as cunhas. A inclinação das interfaces das cunhas é variada para produzir uma condição crítica de equilíbrio.	(Qualquer)

Fonte: Adaptado de Pacheco (2005)

2.2.2 Percolação

O estudo da percolação da água no solo, para Pinto (2006), é muito importante pois ela influencia diretamente em aspectos como no cálculo de vazão, nas análises de recalques e nos estudos de estabilidade. Massad (2010) explica que, para que seja feito o transporte da água de um ponto A até um ponto B, é necessário que haja uma diferença de carga total, como na Equação 4.

$$\Delta H = H_A - H_B \quad (4)$$

Sendo a carga total relacionada à carga altimétrica, à poropressão e ao peso específico da água, como definido pela Equação 5.

$$H = z + \frac{u}{\gamma_0} \quad (5)$$

De acordo com Caputo (1996), foi proposta em 1856 uma lei experimental elaborada pelo engenheiro francês Henry Darcy que relaciona velocidade de percolação à perda de carga total por unidade de comprimento. Com a Lei de Darcy, representada na Equação 6, foi possível verificar como os fatores geométricos afetam na vazão da água, relacionando o coeficiente de permeabilidade, o gradiente hidráulico e a área permeada.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (6)$$

O coeficiente de permeabilidade, para Pinto (2006), tem seu aumento proporcional ao tamanho das partículas do solo, logo, aos vazios que se criam entre eles. Em solos com grãos finos o coeficiente de permeabilidade tende a ser menor, pois os grãos menores criam uma disposição que diminui o volume de vazios entre eles. Solos grossos, por sua vez, possuem um alto volume de vazios em sua estrutura. Na Tabela 1 estão apresentados valores típicos propostos por Silva (2020) para o coeficiente de permeabilidade de acordo com a granulometria dos solos.

A NBR 6502 (1995) tem o objetivo de definir os termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica de fundações e obras de terra. Desta forma, propõe uma padronização da classificação e descrição dos solos de acordo com seus aspectos físicos, levando em conta principalmente o diâmetro máximo dos grãos do solo, como mostrado no Quadro 3.

Tabela 1 – Intervalo de Variação de k para Diferentes Materiais

Tipo de Material	Coefficiente de Permeabilidade (m/s)
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-4} a 5×10^{-4}
Argilas marinhas	10^{-10}
Argilas sedimentares	10^{-9} a 10^{-10}
Concreto	10^{-11}
Enrocamento sem finos	10^{-2}
Enrocamento com finos	10^{-5}
Pedregulhos	10^{-3}
Rochas alteradas	10^{-8}
Rochas maciças	10^{-11} a 10^{-12}
Siltes	10^{-8}
Solos compactados (kh)	10^{-6} a 10^{-8}
Solos compactados (kv)	10^{-9}
Solos porosos	10^{-4} a 10^{-6}

Fonte: Adaptado de Silva (2020)

Quadro 3 – Classificação e descrição dos solos de acordo com a NBR6502

Classificação	Descrição
Argilas	Solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade.
Siltes	Solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm.
Areias <i>Finas</i> <i>Médias</i> <i>Grossas</i>	Solo não coesivo e não plástico formado por partículas de rochas. Diâmetros entre 0,06 mm e 0,2 mm. Diâmetros entre 0,20 mm e 0,60 mm. Diâmetros entre 0,60 mm e 2,0 mm.
Pedregulhos	Solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 mm e 60 mm. Quando arredondados ou semi-arredondados, são denominados cascalho ou seixo.
Pedra-de-mão	Fragmento de rocha com diâmetro entre 60 mm e 200 mm.
Matacão	Fragmento de rocha, comumente arredondado por intemperismo ou abrasão, com diâmetro entre 200 mm e 1 m.
Bloco	Fragmento de rocha com diâmetro superior a 1 m.

Fonte: Adaptado de NBR 6502 (1995)

2.3 FLUXOS BIDIMENSIONAIS

Uma forma de se estudar percolação é a partir de redes de fluxo, para Pinto (2006), o fluxo da água pode seguir três comportamentos de acordo com a direção característica que é tomada. Caso ela siga um movimento em uma mesma direção, pode ser classificada como fluxo unidimensional, isso ocorre por exemplo em solos arenosos de grãos uniformes. Quando a partícula de água segue um movimento para qualquer direção, é classificada como fluxo tridimensional, como o deslocamento das partículas de água em direção a um poço, por exemplo. No entanto, no caso de percolação em barragens, as partículas possuem uma tendência de movimentos curvos e contidos em planos paralelos, se encaixando no fluxo bidimensional.

Os estudos de fluxos bidimensionais são feitos a partir de cálculos e representações gráficas dos deslocamentos das partículas de água, também chamados de rede de fluxo. Para solos saturados e com sólidos e líquidos incompressíveis, essas representações são, de acordo com Massad (2010), oriundas da definição de fluxo em regime permanente da Equação 7, chamada Equação de Continuidade.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

Neste caso, u equivale a velocidade de descarga na direção horizontal (x) e v , por sua vez, a velocidade de descarga na direção (y). De acordo com a Lei de Darcy, verifica-se que:

$$u = -k_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{e} \quad v = -k_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \quad (8)$$

O sinal negativo se dá por conta da carga h decrescer no sentido do fluxo. Considerando um solo isotrópico e homogêneo em que k é constante e igual a k_x e k_y , ao substituir a Equação 8 na Equação 9, se obtém a Equação de Laplace em duas dimensões:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (9)$$

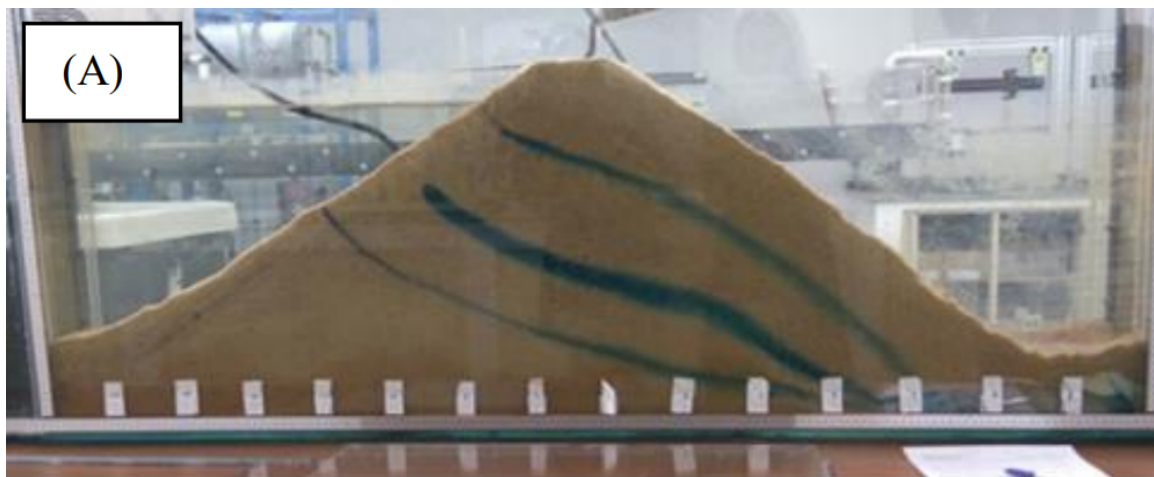
A Equação 9 resolvida de forma analítica é restrita a problemas com geometrias simples por suas funções matemáticas de alta complexidade, sendo necessário o uso de outros métodos viáveis para se calcular rede de fluxos com o grau de detalhamento exigido por obras de barragens. Para Saré (2003), os métodos para o estudo de redes de fluxo podem ser analíticos, analógicos, reduzidos, gráficos ou numéricos.

Sobre modelos analíticos, Ribeiro (2015) concorda com Massad (2010) ao dizer que soluções analíticas da equação de Laplace são restritas a alguns casos de geometria bem simples e, mesmo assim, as funções matemáticas usadas são muito complexas. A solução analítica consiste na definição de uma função $f = (x+iy) - \Phi + i\Psi$ tal que, Φ e Ψ sejam curvas que satisfaçam as condições de contorno.

A escolha do método analógico é possível, pois além de prever o comportamento do fluxo de água, a Equação de Laplace também é utilizada para fluxo elétrico e térmico, além disso, a Lei de Darcy é análoga às de Ohm e Fourier, aplicadas à correntes elétricas e fluxo térmico, respectivamente. Segundo Saré (2003), o principal problema físico semelhante é a analogia elétrica, em que a voltagem equivale à carga total, a condutividade à permeabilidade e a corrente à velocidade.

O também chamado modelo físico, consiste na execução em laboratório de um exemplar reduzido que reproduza os parâmetros, geometrias e condições de contorno do problema real. Comumente executado em uma caixa com faces de vidro em que são utilizados corantes na água para facilitar a visualização do fluido percolando o solo e os elementos da estrutura. Na Figura 6 está um exemplo de modelo reduzido de uma barragem com drenos horizontais.

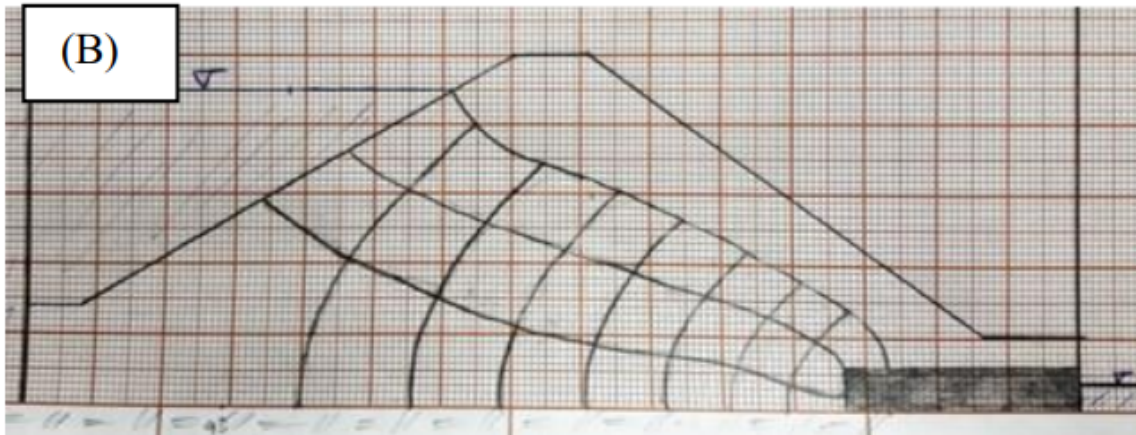
Figura 6 – Exemplo do Modelo Físico de Linhas de Fluxo



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2018)

Para Saré (2003), a representação gráfica pelo traçado das redes de fluxo é uma técnica que permite considerar a anisotropia e heterogeneidade do sistema. Consiste em produzir gráficos dos caminhos percorridos pela água e das correspondentes linhas equipotenciais, as duas famílias de curvas que satisfazem a Equação de Laplace. De acordo com Massad (2010), perda de carga constante entre duas equipotenciais e vazão constante entre duas linhas de fluxo consecutivas simplifica o traçado das redes de fluxo. A Figura 7 mostra um exemplo das redes de fluxo geradas pelo método de gráficos da mesma barragem apresentada na Figura 6.

Figura 7 – Exemplo do Método Gráfico de Linhas de Fluxo



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2018)

A dificuldade na obtenção de resultados em soluções analíticas para situações complexas de fluxo em meios porosos, conduziu à utilização de métodos numéricos que aumentam a precisão dos estudos geotécnicos utilizando a Equação de Laplace. Dentre os modelos numéricos conhecidos, os mais utilizados para o estudo de fluxos são o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Elementos Finitos (MEF). Para que os resultados sejam fidedignos, é necessário que sejam bem utilizados os parâmetros e condições de contorno adequados para o problema. Por seguir um fluxo bidimensional, as modelagens em 2D para percolação suprem, em sua maioria, as demandas sem necessidade de grande consumo de processamento como em modelagens 3D.

2.3.1 Método de Diferenças Finitas

Um dos métodos numéricos mais utilizados para a solução da Equação de Laplace, segundo Massad (2010), é o Método de Diferenças Finitas que consiste, essencialmente, na substituição da Equação de Laplace, com o auxílio da fórmula de Taylor, por uma equação de diferenças finitas dada pela Equação 10 que, de acordo com Saré (2003), sempre será linear.

$$h_1 + h_2 + h_3 + h_4 - 4 \cdot h_0 = 0 \quad (10)$$

No MDF, o meio contínuo analisado é seccionado em um conjunto de regiões menores quadradas formando uma malha, são aplicadas as equações que atrelam resultados físicos nos nós da malha, que são seus pontos de intersecção. A partir disso são feitos cálculos computacionais para gerar os resultados aproximados.

2.3.2 Método de Elementos Finitos

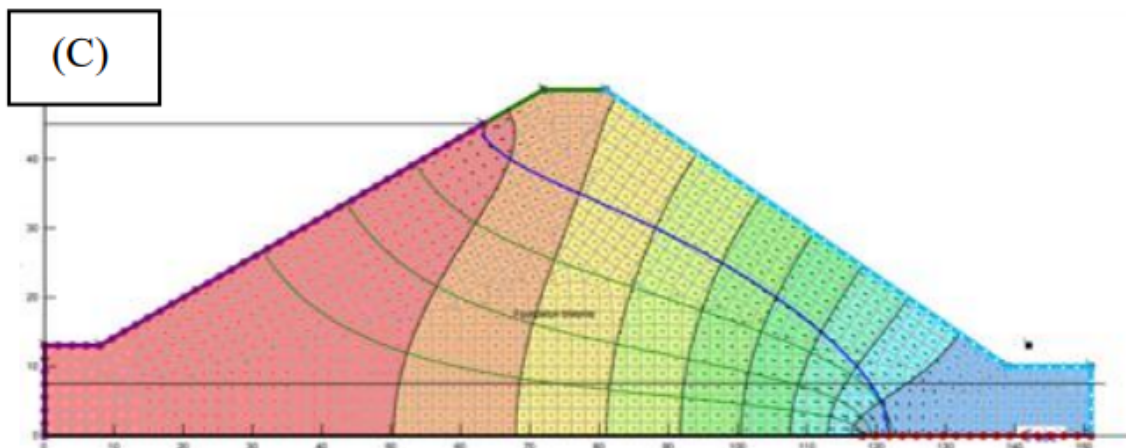
A modelagem por elementos finitos, como os demais métodos, é essencial tanto para a elaboração de um projeto quanto posteriormente para a comparação na fase de operação. Um comparativo entre os métodos também é importante para verificar a confiabilidade do modelo e posteriormente do projeto executivo.

Massad (2010) afirma que o Método de Elementos Finitos se adapta bem aos problemas de percolação e água em meios porosos saturados em regime permanente por se aplicar a qualquer problema extremo e, segundo Saré (2003), é possível definir funções de ordem mais elevada. O MEF consiste em seccionar o meio contínuo em um conjunto de elementos discretos que, da mesma forma que nos MDF, geram elementos em seus pontos adjacentes chamados nós.

A cada nó são associados potenciais que passam a ser incógnitas procuradas. Admite-se, então, que o potencial de cada nó está atrelado à sua coordenada, gerando uma função polinomial completa, o que certifica que não haverão direções preferenciais de fluxo e permite a compatibilidade dos valores relativos aos nós comuns em vários elementos. A geometria mais simples de um elemento é a triangular, pois contém o mínimo de 3 nós coincidentes, associado a um polinômio de primeiro grau. Para minimizar a Função de Dissipação é gerado um sistema de equações lineares que que as incógnitas são os potenciais dos nós, cujas soluções são obtidas por meio de cálculos computacionais levando-se em conta as condições de contorno.

Nesse contexto, o GeoStudio é um software que utiliza de elementos finitos para fazer diversas análises geotécnicas, dentre elas a SEEP/W e a SLOPE/W, com a finalidade de modelar o fluxo de águas subterrâneas e estabilidade de maciços, respectivamente. Na Figura 8 está a resposta numérica da mesma simulação de barragem apresentada nas Figuras 6 e 7.

Figura 8 – Exemplo do Método Numérico de Linhas de Fluxo



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2018)

2.4 ACIDENTES EM BARRAGENS

O termo acidente é utilizado para designar tanto os desastres ou rupturas como as anormalidades ou incidentes. Desastre ou ruptura o colapso da barragem com reservatório cheio ou de estruturas como vertedouro, tomada d'água, casa de força e galerias implicando na ocorrência de enchentes a jusante com destruição de patrimônios externos e paralisação prolongada ou definitiva da obra. Incidentes ou anormalidades são os comportamentos imprevistos ou inadequados durante a construção ou operação da barragem, implicando em despesas com atrasos no cronograma construtivo, redução dos benefícios ou necessidade de reforços e reparos sem destruição de patrimônios externos à obra. Por comportamento inadequado Sandroni e Guidicini (2021) refere-se:

- aos fenômenos observados que se acredita possam degenerar produzindo desastres;
- aos eventos que tendem a impedir que a obra opere ou tenha a configuração inicialmente desejada;
- aos fenômenos observados que, embora não se constituam em ameaça para a segurança da barragem, possam gerar apreensão na comunidade afetada pela obra ou no público em geral; e,
- ao não atendimento a critérios desejados ou vigentes de segurança.

Os tipos de acidentes variam de acordo com as características das barragens, porém em barragens de terra e enrocamento os principais desastres acontecem principalmente por três fatores: percolação, instabilidade e erosão. Sandroni e Guidicini (2021) apresentam uma forma de agrupamento para categorizar os acidentes que utiliza tanto a fase da obra em que se deu o acidente como modo de ocorrência, o qual, por sua vez é dividido em tipos de acidente. As categorias adotadas estão apresentadas no Quadro 4.

Os dados estatísticos a respeito da incidência dos modos de acidentes mostram quais as maiores fragilidades, atualmente, nos projetos de barragens. Segundo Sandroni e Guidicini (2021), os acidentes por instabilidade, ainda que tenham diminuído sua incidência nos últimos anos refletindo uma melhor compreensão dos mecanismos envolvidos, representam de 5% a 15% do total. O galgamento responde por cerca de 24% a 42% dos acidentes e também vem diminuindo, o que pode ser creditado tanto ao desenvolvimento de métodos mais efetivos de análise hidrológica quanto ao maior cuidado com seus procedimentos operacionais. A percolação parece ser hoje o principal modo de acidentes em barragens de terra e enrocamento, sendo responsável por 38% a 55% dos acidentes. Percolação e galgamento, juntos, são responsáveis por 70% a 80% dos acidentes, logo, mostram os pontos críticos a serem estudados em barragens.

Quadro 4 – Agrupamento de acidentes em barragens

Fase	Modo	Tipo
1. Com água no reservatório	1.1. Percolação	1.1.1. Em aterros 1.1.2. Em interfaces 1.1.3. Nas fundações 1.1.4. No reservatório (fugas)
	1.2. Instabilidade	1.2.1. Em aterros e suas fundações 1.2.2. Em estruturas e suas fundações 1.2.3. Em encostas e cortes
	1.3. Erosão	1.3.1. Na crista (galgamento) 1.3.2. Em taludes de aterros 1.3.3. Em estruturas e suas fundações
	1.4. Outros	1.4.1. Deterioração 1.4.2. Defeitos de operação 1.4.3. Siltagem do reservatório 1.4.4. Acidentes especiais
2. Durante a construção	2.1. Percolação	2.1.1. Em enseadeiras
	2.2. Instabilidade	2.2.1. Em maciços terrosos 2.2.2. Em encostas e cortes
	2.3. Erosão	2.3.1. Na crista (galgamento) 2.3.2. Em estruturas de desvio
	2.4. Outros	2.4.1. Acidentes especiais

Fonte: Sandroni e Guidicini (2021)

De acordo com o Comitê Brasileiro de Grandes Barragens - CBGB (1986), as ações para lidar com acidentes e incidentes em barragens são classificados como procedimentos de projeto (P), construção (C), operação (O) e abandono (A). O Quadro 5 apresenta a relação de itens a serem verificados em cada uma das situações. Os processos de segurança visam criar um procedimento padrão para resolução dos problemas futuros ou causados pelos desastres.

Quadro 5 – Acidentes e incidentes

Procedimento	Fase			
	P	C	O	A
Investigação e avaliação	P	C	O	A
Reparos / Restabelecimento de condições seguras	P	C	O	A
Medidas de precaução	P	C	O	A
Lições / Documentação / Registro / Divulgação		C	O	

Fonte: CBGB (1986)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os critérios e metodologias preliminares para a concepção dos resultados. A boa interpretação das informações e a escolha apropriada dos parâmetros e procedimentos na modelagem buscam aproximar os cálculos numéricos a seus efeitos práticos. Os dados referentes à barragem Hidroituango e suas especificidades foram retirados do documento de consultoria produzido e disponibilizado publicamente pela Pöyry (2021), empresa de que analisou o caso da obra colombiana. Demais informações e parâmetros utilizados para execução dos modelos numéricos foram adotados baseados em valores típicos para os materiais segundo a literatura.

3.1 INFORMAÇÕES DO PROJETO

Os primeiros esboços de projeto da barragem da hidrelétrica de Ituango, também chamada Hidroituango, apareceram no fim da década de 1970. Na época já se estudava a viabilidade de uma obra de terra e enrocamento de grande porte por conta da geologia e necessidades físicas do local. A Figura 9 apresenta uma imagem de satélite com a localização do terreno em que se pode identificar o relevo em que o reservatório e a barragem estão incluídos. No entanto, apenas a partir de 1999 foram feitos estudos complementares e, por fim, em 2010 foram aprovados os desenhos mais detalhados e utilizados inicialmente para a construção da barragem, que começou a ser executada no ano de 2014.

Figura 9 – Relevo do Local do Reservatório



Fonte: Google Earth (2022)

A hidrelétrica foi referência por suas grandes dimensões e por sua capacidade de geração energética, suficiente para suprir cerca de 17% do consumo de energia da Colômbia. Sua altura conta com 220 m de altura e seu reservatório tem em torno de 70 km de comprimento com capacidade de até $2.720 \times 10^6 \text{ m}^3$ em seu nível máximo de operação. As Figuras 10 e 11 apresentam, respectivamente, uma imagem real da barragem após a construção e uma ilustração tridimensional com os principais elementos da barragem, além de sua posição em relação aos rios Ituango e Cauca.

Figura 10 – Barragem Hidroituango



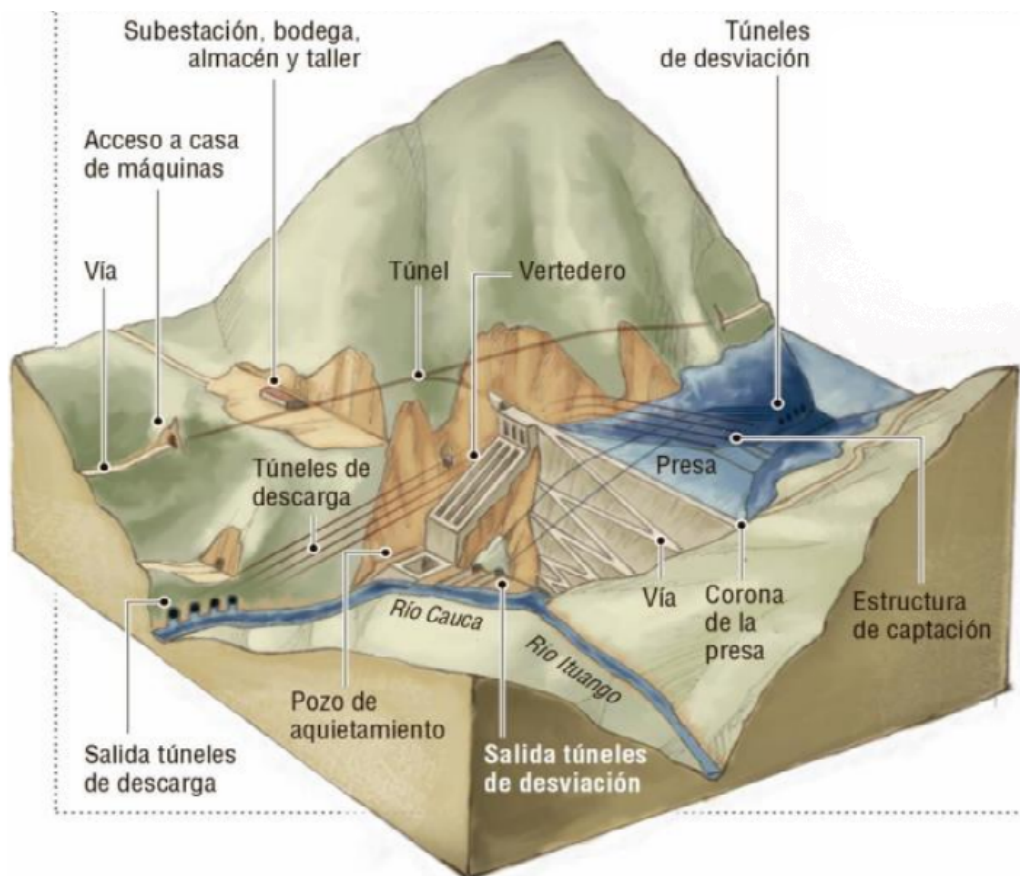
Fonte: EPM (2022)

Havia sido concluído cerca de 87% de seu projeto quando iniciou-se uma sequência de desastres que culminaram em problemas na sua execução. No dia 28 de abril de 2018, umas das tubulações de desvio do curso da água que viabiliza a construção rompeu e essa instabilidade seguida de outros deslizamentos colocou em alerta governantes e engenheiros responsáveis. Na época uma série de cidades próximas ao leito do rio sofreram com enchentes e secas provocadas pelo desastre.

O controle de estabilidade da barragem estava precário, havia grande receio de que com a chegada da temporada de chuvas e sem plena atividade da tubulação de desvio fluvial a altura do reservatório ultrapassasse o nível da obra construída, até então na altitude de 385 m. Houve, para acelerar o processo construtivo da barragem, uma alteração no seu desenho prevendo o descolamento do núcleo argiloso do centro do enrocamento por uma camada mais fina e inclinada do mesmo material, construída em três etapas até a cota segura de 418 metros acima do nível do mar, em que os vertedouros poderiam ser utilizados para controle de vazão do reservatório, voltando, deste ponto até a crista da barragem, à geometria vertical tradicional.

Entre os materiais de núcleo e enrocamento, visando garantir a estabilidade do material impermeável, foram dispostas camadas de transição e filtro inclinado tanto a montante quanto a jusante. Foram acrescentados ao projeto, ainda, muros verticais com 38 metros de profundidade, com topo na altitude de 418 m e base na cota 380 metros acima do nível médio do mar. Os muros possuem um coeficiente de permeabilidade baixo, cortando o material de enrocamento e servindo como corta fluxo do sistema. As dimensões e parâmetros dos elementos citados serão explicados com maiores detalhes nos próximos tópicos ainda neste capítulo.

Figura 11 – Ilustração Tridimensional da Barragem Hidroituango



Fonte: Adaptado de El Colombiano (2015)

3.2 MATERIAIS E PARÂMETROS

Os solos utilizados tanto no projeto inicial quanto na etapa final são os mesmos, variando apenas em sua geometria e modo construtivo. Foram classificados em materiais de enrocamento, materiais permeáveis de filtro e transição e material impermeável de núcleo. Na ausência de alguns parâmetros importantes para a análise, a Tabela 1 foi utilizada como referência para atribuir valores de coeficiente de permeabilidade aos materiais seguindo suas especificações granulométricas, seguindo as categorias indicadas na Tabela 3 da NBR 6502 (1995).

Nas áreas de enrocamento foram utilizados dois materiais nomeados 3B e 3C, o primeiro constituído por grãos de até 90 cm com menos de 5% dos grãos inferiores a 50 mm, o segundo com grãos de até 180 cm e taxa inferior a 30% de grão menores que 250 mm. Pela grande semelhança na permeabilidade entre os dois solos, adotou-se um único valor de $k = 10^{-2}$ m/s, para ambos materiais de enrocamento sem finos.

O material do núcleo tem o objetivo de estancar o fluxo de água da barragem e para isso foi utilizada uma argila chamada 1A. Ser um solo fino permite que sua permeabilidade seja baixa e implica na melhor impermeabilidade da estrutura com condutividade hidráulica de $k = 10^{-9}$ m/s, como disponibilizado pela Pöyry (2021).

Para as camadas de filtro foram utilizados dois tipos de material também permeáveis, nomeados 2A e 2B. O primeiro com grãos menores, com tamanho máximo de grão de 20 mm e apenas 5% de grãos inferiores a 0,075 mm, classificado como areia fina. O segundo material com grãos de até 40 mm e menos de 5% deles sendo inferiores a 2 mm, pode ser classificado como areia grossa ou pedregulho. Para efeitos de modelagem, seguindo a literatura, foi atribuído ao material de filtro 2A uma condutividade hidráulica de $k = 10^{-5}$ m/s e para filtro 2B de $k = 10^{-4}$ m/s.

Foram previstas camadas de transição, chamadas 3A, com o intuito de suavizar a diferença granulométrica entre as camadas de núcleo e enrocamento, evitando a erosão da estrutura argilosa e diminuindo evacuação dos grãos finos para os vazios dos demais materiais. Este material tem tamanho máximo de grão entre 150 mm e 250 mm, não permitindo mais que 15% de seus grãos inferiores a 0,15 mm de diâmetro. Para esse solo transitório com características de pedregulho, na modelagem numérica, considerou-se $k = 10^{-3}$ m/s.

No projeto final houve a inclusão do muro contra fluxo de cimento-bentonita, cuja especificação mais importante para a modelagem é seu coeficiente de permeabilidade que, de acordo com as amostras ensaiadas em laboratório, tem valor médio na escala de 10^{-9} m/s, permitindo um bom estanque do fluxo subterrâneo. Para o solo do leito do rio em que a barragem foi construída foram imputados parâmetros de rocha alterada, logo, $k = 10^{-8}$ m/s.

Para a concepção dos modelos foi necessário adotar alguns parâmetros baseados na literatura correlata de García (2013), como o teor de umidade w que influencia nas análises de percolação e permite entender como será o comportamento da poropressão ao longo do tempo. Além disso, os parâmetros utilizados para a análise de estabilidade de taludes como peso específico γ , coesão efetiva c' e ângulo de atrito ϕ foram escolhidos baseados nas características dos solos, como granulometria, tipo de material e demais dados obtidos no texto da consultoria da empresa Pöyry (2021).

Os valores adotados para cada tipo de solo estão na Tabela 2 juntamente com um resumo das características dos materiais utilizados na modelagem da barragem.

Tabela 2 – Resumo das Características dos Materiais de Projeto

Material	Classificação	k (m/s)	w (%)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)
1A	Núcleo	10^{-9}	23	19	48	27
2A	Filtro	10^{-5}	16	20	0	30
2B	Filtro	10^{-4}	15	20	0	35
3A	Transição	10^{-3}	13	20	0	40
3B e 3C	Enrocamento	10^{-2}	5	20	0	45
Muro	Cimento-Bentonita	10^{-9}	1	24	-	37
Rocha Alterada	Leito do Rio	10^{-8}	-	25	0	45

Fonte: Autor (2022)

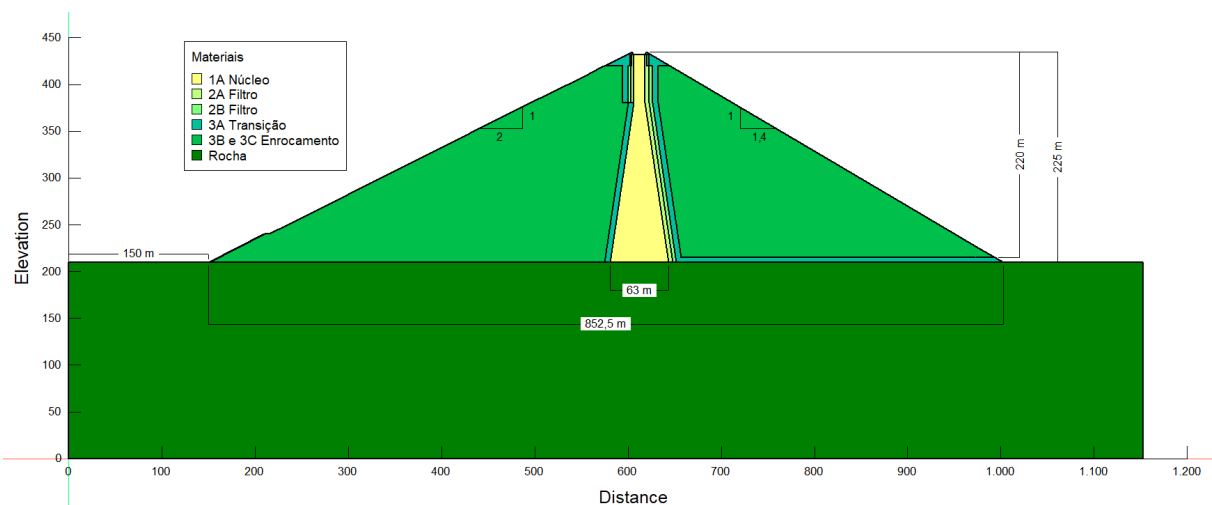
3.3 SEÇÕES ESTUDADAS

Foram elaboradas duas geometria para modelagem, uma chama Seção Inicial, contendo os parâmetros do projeto feito em 2010, e uma chamada Seção Executada, com as alterações feitas após o acidente de 2018. As dimensões e características foram estudadas e, quando possível, foram atribuídas pequenas mudanças de geometria para facilitar o processo de modelagem.

3.3.1 Projeto Inicial

A seção transversal do projeto da barragem Hidroituango de 2010 foi estudada e remodelada a partir de informações disponibilizadas no relatório de consultoria da Pöyry (2021). Na Figura 12 é possível visualizar de forma geral o modelo construído pelo autor para as análises numéricas.

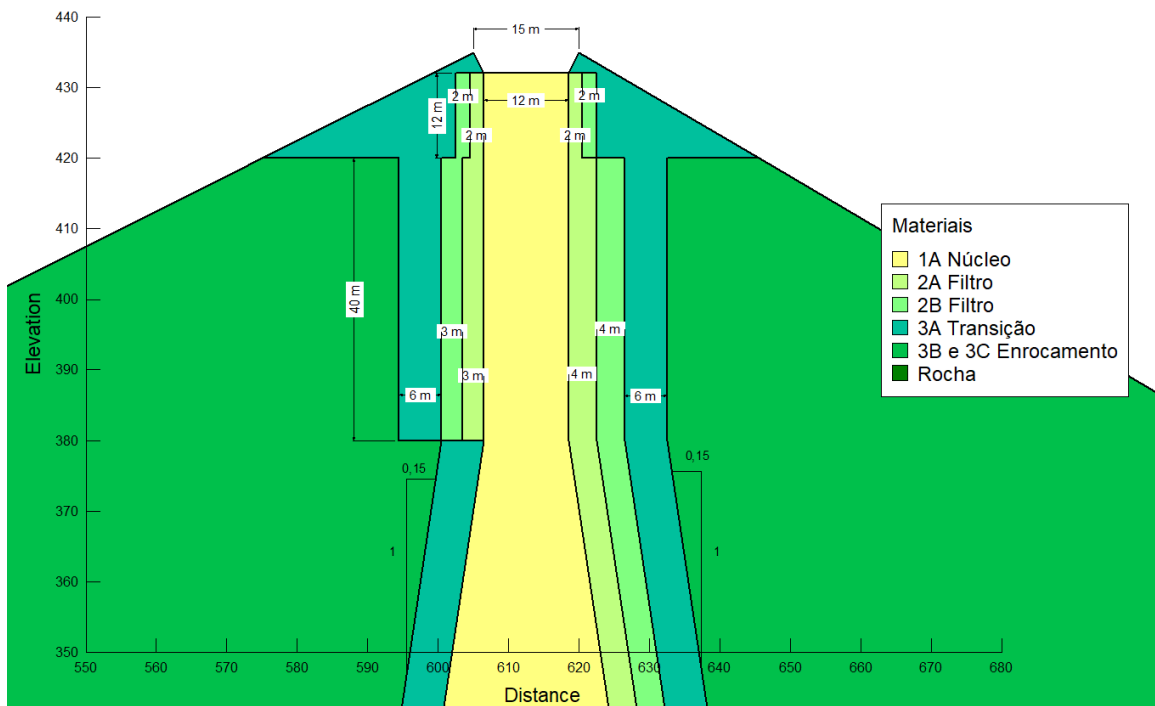
Figura 12 – Seção Transversal da Barragem Inicial



Fonte: Autor (2022)

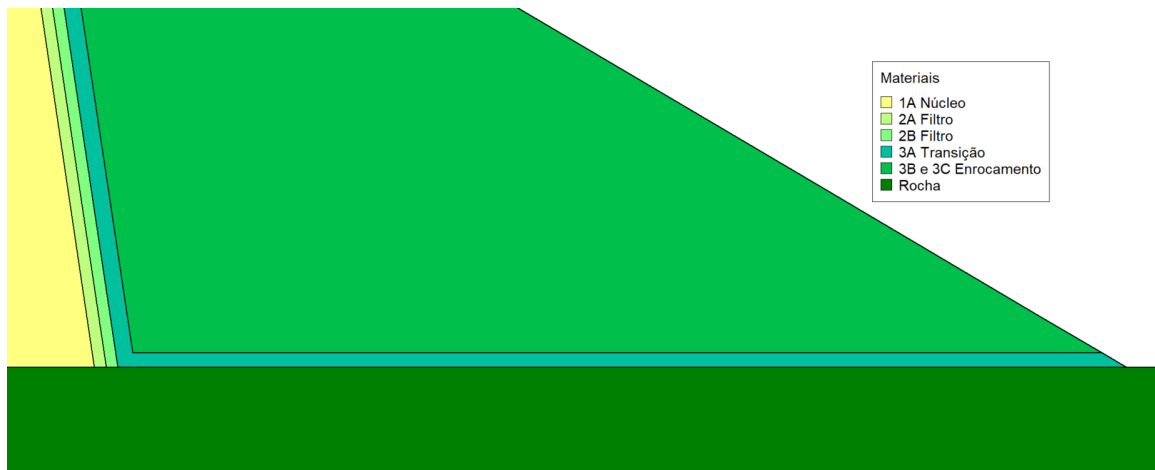
A geometria trapezoidal da barragem é constituída majoritariamente pelos materiais 3B e 3C de enrocamento, o volume parte da cota de 210 m acima do nível do mar no leito do Rio Cauda e atinge o topo da barragem no nível 435 m de altitude, sendo sua altura total de 225 m. Seus taludes foram projetados com inclinações de 1H:2V e 1H:1,4V a montante e jusante, respectivamente. O núcleo central impermeável com material 1A, que parte da base com inclinação em ambas as faces de 1H:0,15V, afunilando sua largura até a cota 380 m de altitude que se mantém em 12 m até o topo da barragem a 435 m acima do nível do mar.

Figura 13 – Seção Transversal Ampliada do Topo da Barragem Inicial



Fonte: Autor (2022)

Figura 14 – Seção Transversal Ampliada da Base da Barragem Inicial



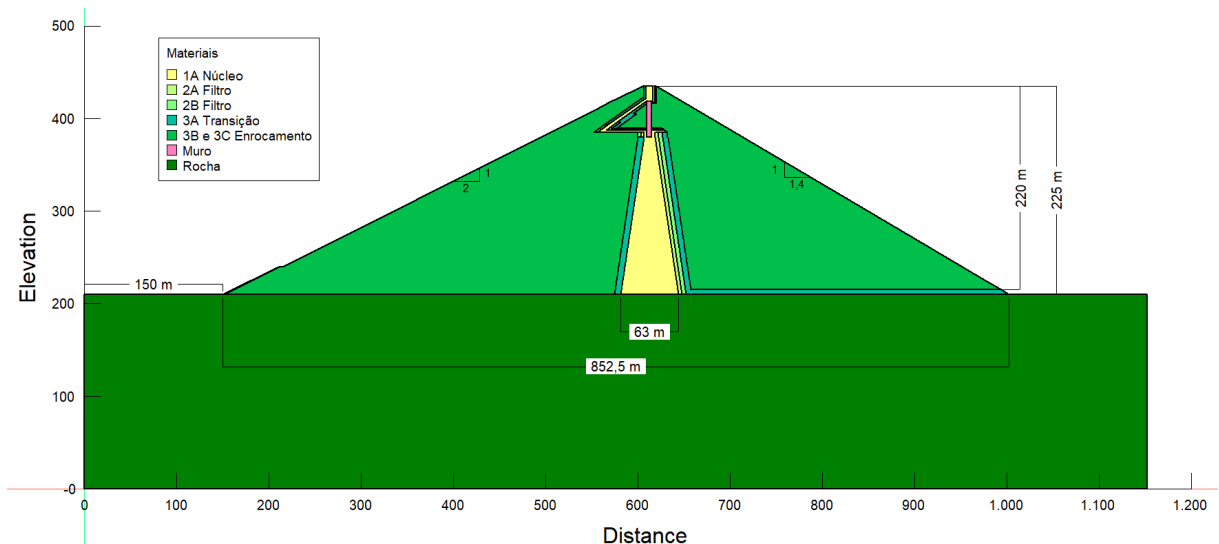
Fonte: Autor (2022)

As camadas de filtros e transição dos materiais estão presentes ao longo de toda a altura da barragem e suas espessuras mudam de acordo com suas exigências de projeto, as dimensões dessas camadas são apresentadas na Figura 13. A capa 3A a jusante, ao atingir a base da barragem, se estende horizontalmente até o fim da camada de enrocamento, como na Figura 14.

3.3.2 Projeto Executado

O projeto executado se assemelha em muitos pontos ao projeto inicial, exceto na região superior da barragem acima do nível 380 m de altitude, altura que estava a barragem ao sofrer os desastres. Nas Figuras 15 e 16 é possível ter uma visão geral da seção aplicada na barragem executada e da Figura 17 à Figura 19 são apresentadas em detalhes as alterações propostas pelo novo projeto.

Figura 15 – Seção Transversal da Barragem Executada

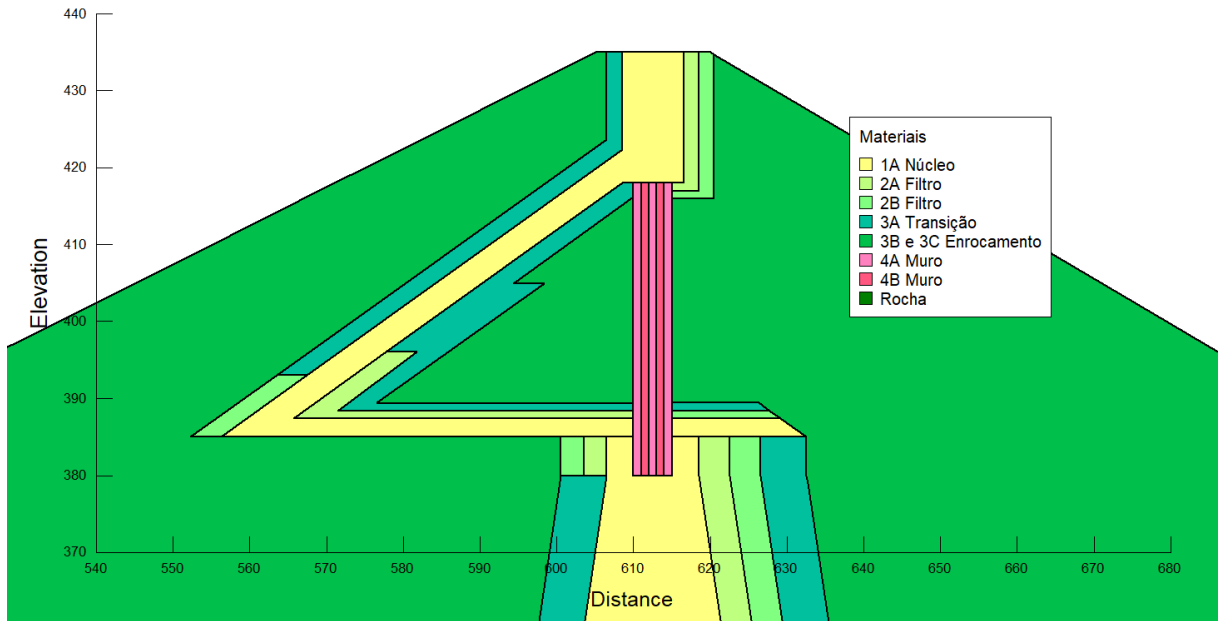


Fonte: Autor (2022)

Na cota de 385 m, o núcleo vertical é substituído por uma capa horizontal de mesmo material 1A, abaixo de uma camada de filtro 2B e uma de transição 3A. As três camadas horizontais se estendem longitudinalmente a montante, suas dimensões são mostradas na Figura 17. A camada de núcleo, mantendo uma espessura constante e em conjunto às demais, é construída com uma inclinação de 1H:1,4V até a cota de 418 metros acima do nível do mar. Na Figura 18 está apresentadas a distribuição dos materiais 2B e 3A nessas fichas de alturas.

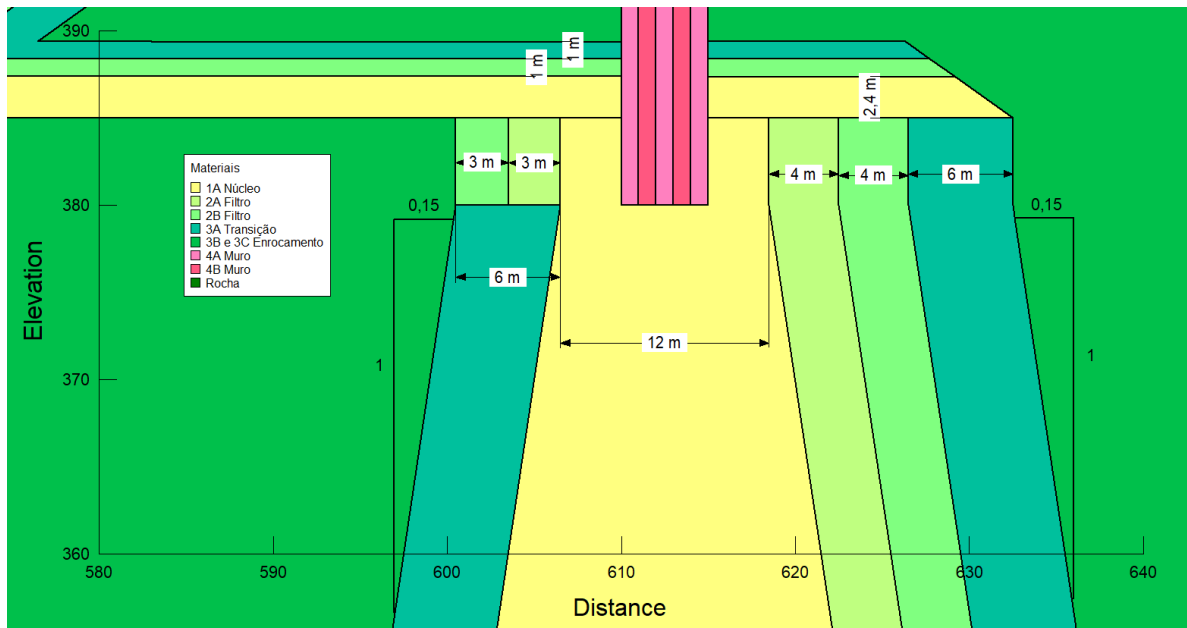
Ao atingir a altura do vertedouro, o núcleo retorna à posição vertical, porém com espessura de 8 m e segue até o topo da barragem acompanhado de uma camada de transição com espessura de 2 m a montante e duas camadas de 2 m dos materiais de filtro a jusante, como mostra a Figura 19. Na prática, imagina-se que haja uma camada no topo da barragem que isole os filtros e o núcleo da face externa.

Figura 16 – Seção Transversal Ampliada do Topo da Barragem Executada



Fonte: Autor (2022)

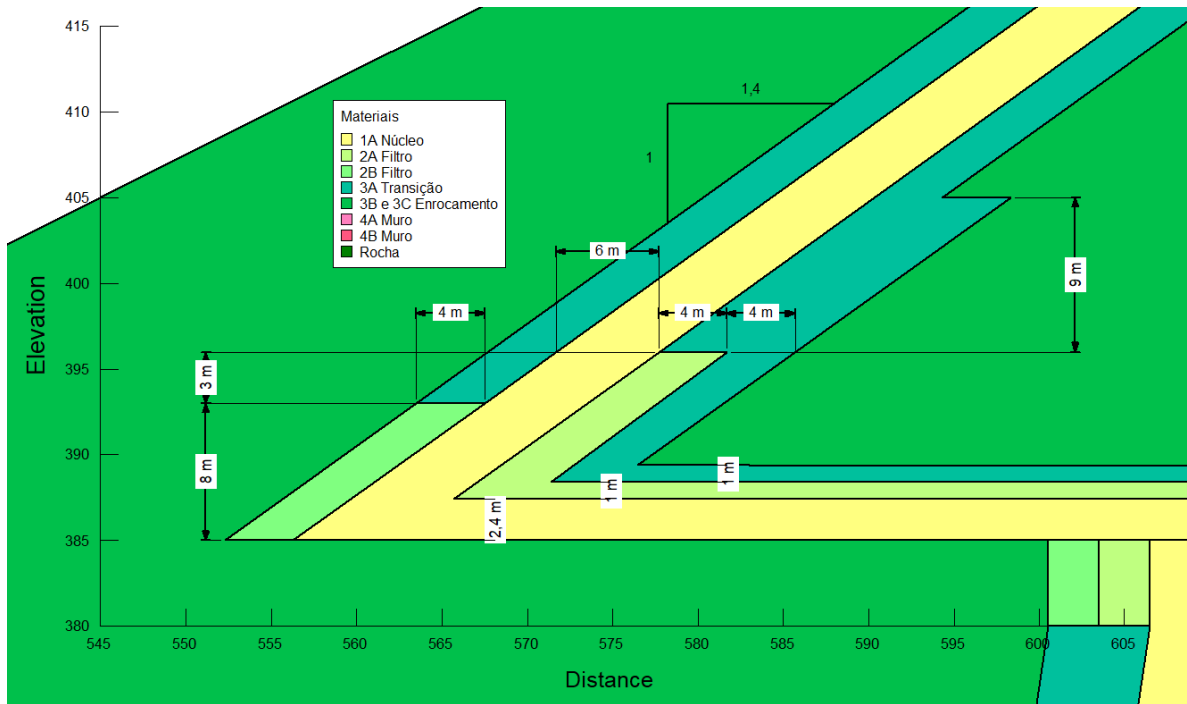
Figura 17 – Dimensões Detalhadas da Barragem Executada



Fonte: Autor (2022)

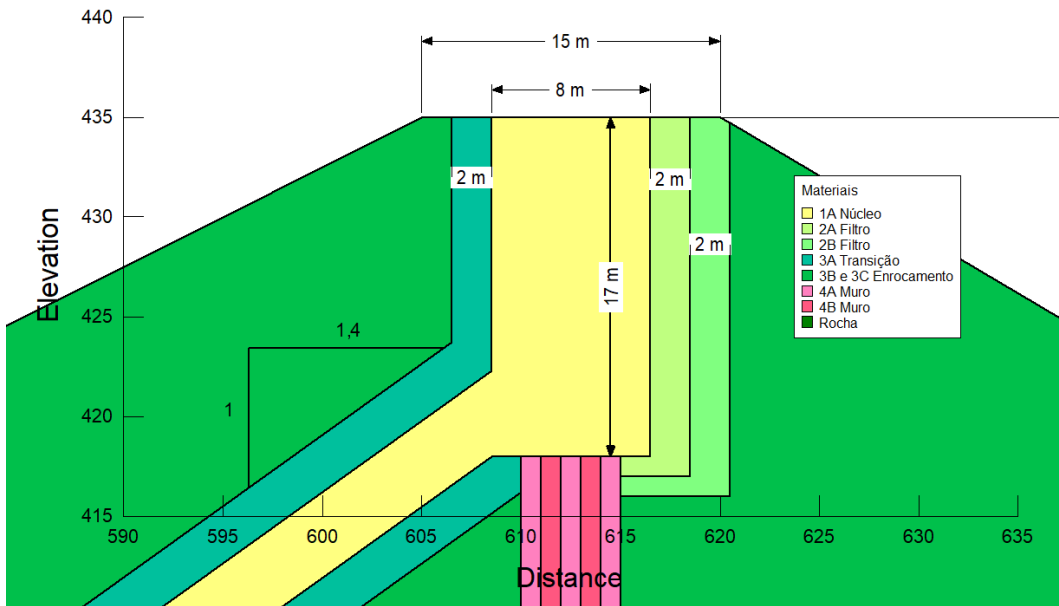
Conectando os dois filtros verticais foi acrescentado um muro feito com uma mistura de cimento e bentonita de 5 m de espessura e 38 m de altura com o intuito de cortar o fluxo da região e manter a estanqueidade do sistema. O muro segue na parte interna do núcleo argiloso por 5 m verticalmente e em regiões próximas às ombreiras da barragem o muro, ou cortina, de cimento-bentonita passa a ser constituído por 3 muros de 1 m de largura reforçados por uma tela e com vãos preenchidos por argamassa impermeável também com 1 m de espessura.

Figura 18 – Dimensões Detalhadas da Barragem Executada



Fonte: Autor (2022)

Figura 19 – Seção Transversal Ampliada do Topo da Barragem Final



Fonte: Autor (2022)

No momento da modelagem foi fundamental a aplicação de conceitos básicos de geometria analítica, para que os pontos, linhas e regiões estivessem dentro dos padrões de projeto. Todas as coordenadas utilizadas foram revisadas algebricamente para que não houvesse qualquer alteração em comparação à seção proposta pelo relatório da empresa Pöyry (2021).

3.4 ETAPAS DE MODELAGEM

O software utilizado para todos os procedimentos de modelagem numérica foi o GeoStudio, cujas modalidades de análises geotécnicas voltadas para o estudo de fluxos bidimensionais foram fundamentais para a execução dos cálculos e resultados do trabalho. A concepção das modelagens deste trabalho seguiram uma lista de etapas de estudos, modelagem, remodelagem e análises, são elas:

- Estudo dos parâmetros de projeto;
- Modelagem da seção do projeto inicial em regime permanente de operação;
- Modelagem da seção do projeto executado em regime permanente de operação;
- Remodelagem das propriedades iniciais, viabilizando resultados comparativos mais precisos e enxutos;
- Remodelagem de ambas as seções considerando um regime transiente de operação com rebaixamento rápido do reservatório;
- Remodelagem de ambas as seções para a análise de estabilidade de taludes; e,
- Análise final dos resultados.

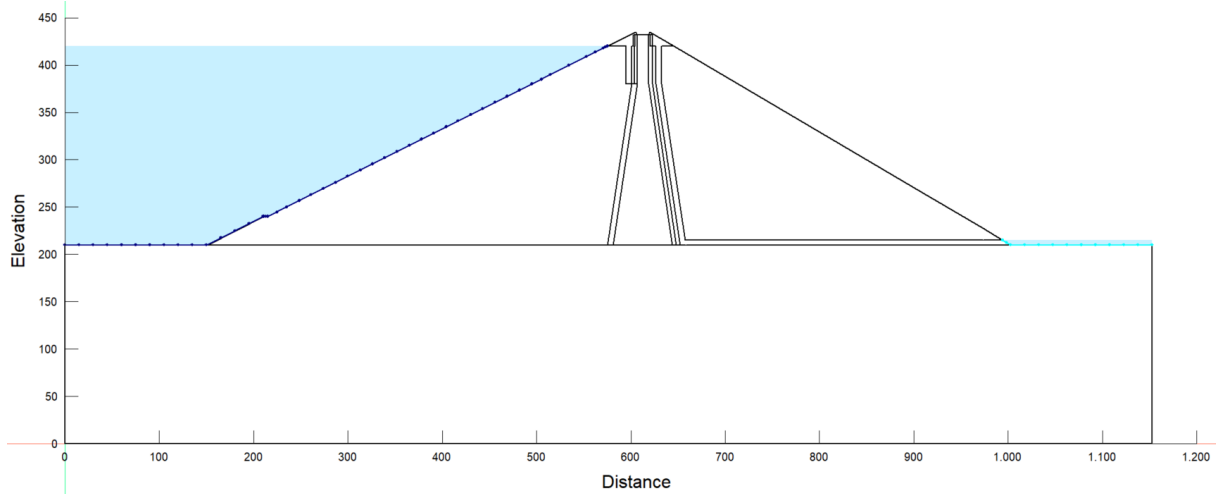
Antes de começar a modelagem utilizando o GeoStudio, é necessário selecionar um dos tipos de análise do software. Primeiramente optou-se pela análise SEEP/W em regime permanente, visando resultados na fase de operação sem variação de tempo para fluxo de águas subterrâneas.

Para iniciar a geometria foram aplicados os pontos com as coordenadas de acordo com as dimensões do projeto inicial da barragem e, em seguida, traçadas as linhas que delimitariam as regiões da seção transversal. Após isso, foram criados os materiais e adicionados seus parâmetros à fonte de dados do programa de acordo com as informações mostradas na Tabela 2. O coeficiente de permeabilidade e o teor de umidade foram utilizados para a modelagem em estado saturado.

Com os materiais criados e atribuídos às devidas regiões, foram aplicadas as condições de contorno a montante e jusante da barragem, como sugerido na Figura 20. Em ambas situações, no que se refere ao tipo de condições de contorno, foi considerado como Carga Total de Água. A entrada de fluxo na face esquerda do modelo foi compreendida entre as cotas 210 m e 420 m, representando a altura máxima de operação do nível d'água do reservatório. Na face direita, a saída do fluxo alcança da cota 210 m a 215 m, sendo a altura do nível d'água no leito do rio.

Para executar as primeiras simulações foi escolhida uma propriedade de malha com tamanhos globais de elementos de aproximadamente 10 m. Este detalhamento gerou inicialmente 3563 nós e 3441 elementos, estando dentro do esperado visto o grande porte da obra. Finalizada a primeira etapa, ao executar a análise foram obtidos os primeiros resultados com vetores e linhas de fluxo, gráficos de vazão e poropressão, além de gerar e aplicar as isolinhas de poropressão, linhas equipotenciais e gradientes.

Figura 20 – Traçado das Condições de Contorno da Barragem Modelada



Fonte: Autor (2022)

Na segunda etapa de modelagem, utilizou-se como base o modelo inicial da barragem para reproduzir o novo modelo com a seção executada. O projeto executado possui características mais complexas e com mais detalhes em sua seção transversal, porém as condições de contorno se mantiveram como originalmente, bem como os dados dos materiais e demais informações da análise com exceção da adição do material da cortina corta fluxo.

Com os resultados parciais dos modelos, foi possível entender as regiões críticas em cada categoria de análise. Os locais de transição e filtro sofriam mudanças intermediárias de resultados, o núcleo impermeável e muro corta fluxo foram os elementos com maior variação, logo, seriam os locais em que o tamanho de malha deveriam ser menor. Seguindo este raciocínio, foi adotado o tamanho de malha de 10 m para o enrocamento e rocha alterada do rio, 2 m para os materiais de filtro e transição e 1 m para o núcleo e muro corta fluxo. Na Tabela 3 está um resumo dos materiais de acordo com a malha adotada e no Apêndice A é possível visualizar o resultado dessa alteração nas seções inicial e executada.

Tabela 3 – Resumo do Detalhamento da Malha por Material

Material	Tamanho dos Elementos
1A Núcleo	1 m
2A Filtro	2 m
2B Filtro	2 m
3A Transição	2 m
3B e 3C Enrocamento	10 m
Muro Corta Fluxo	1 m
Rocha Alterada do Rio	10 m

Fonte: Autor (2022)

A alteração foi feita apenas em algumas regiões para diminuir a necessidade de processamento, visto que a maior parte do modelo demandava este nível de detalhamento pois os resultados se manteriam estáveis. Para que os valores comparativos fossem precisos, foram criadas linhas e pontos de controle com coordenadas fixas em comum nos dois projetos, onde as análises de poropressão e vazão seriam aferidas para gerar os gráficos.

As linhas de controle foram traçadas compreendendo as regiões de enrocamento e transição horizontal próximo à face esquerda das duas seções com o intuito de avaliar os resultados de vazão da saída de água a jusante. Os pontos para estudo da poropressão foram aplicados no centro do núcleo impermeável em quatro alturas diferentes, estes locais foram escolhidos já prevendo a etapa seguinte que avaliaria as barragens após o rebaixamento rápido do nível do reservatório. No caso da seção executada, acrescentou-se um ponto extra de análise entre o núcleo inclinado e o muro de cimento bentonita, visto que havia um local de enrocamento cercado por materiais impermeáveis, logo, seria uma região com resultados específicos e destoantes do restante da barragem. A Tabela 4 apresenta as coordenadas exatas dos pontos e linhas de controle utilizados para gerar os gráficos de poropressão e vazão do sistema.

Tabela 4 – Coordenadas de Controle

Elemento	Coordenadas (X; Y)
Ponto 1	(612,5; 375,0)
Ponto 2	(612,5; 345,0)
Ponto 3	(612,5; 295,0)
Ponto 4	(612,5; 215,0)
Ponto Extra	(600,0; 400,0)
Linha 1	(900,0; 270,3) a (900,0; 210,0)

Fonte: Autor (2022)

A quarta etapa de modelagem consistiu na criação de cópias dos modelos executados anteriormente, com o objetivo de entender as respostas da poropressão nas regiões da estrutura na fase de rebaixamento rápido. Com o tipo de análise alterado de regime permanente para transiente, optou-se por dividir as análises em 120 etapas no intervalo de tempo de 3650 dias (10 anos). A discretização detalhada mostrando o incremento exponencial das etapas feitas pelo software está apresentada no Apêndice B.

O tempo estipulado para o esvaziamento completo do reservatório foi de 30 dias e seguiu uma função linear de primeiro grau de redução. Pelo grande porte da barragem, este é um período razoável e tem alta relevância para as análises de estabilidade de taludes, visto que este é o período de maior oscilação e instabilidade das estruturas com a alteração abrupta da poropressão dentro do corpo da barragem.

Para a execução do estudo de estabilidade de taludes, foram criadas quatro análises SLOPE/W para cada fase da barragem. Inicialmente foi considerada a fase de final de construção atrelada apenas à geometria das seções, posteriormente a fase de operação atreladas à análise SEEP/W em regime permanente e finalmente a fase de rebaixamento rápido atreladas à fase de regime transiente.

O tipo de análise escolhido para todos os testes de estabilidade foi o Morgenstern-Price (item 2.2.1, Quadro 2), por conta de seu alto grau de rigor nos critérios de cálculo. Na análise de estabilidade durante o rebaixamento rápido, foram considerados todos os resultados das 120 etapas de análise no intervalo de 10 anos seguindo a modelagem analisada anteriormente.

Os parâmetros de estabilidade foram devidamente relacionados aos materiais utilizados e então foi possível estipular uma superfície de pesquisa para possíveis intervalos de entradas e saídas de rupturas. As superfícies definidas foram as mesmas em ambas as seções, distinguindo-se de acordo com as 4 regiões de critério: jusante global, montante global, topo a jusante e topo a montante. As coordenadas de cada região estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Coordenadas dos Intervalos de Ruptura

Região	Entrada (X_{E1} ; Y_{E1});(X_{E2} ; Y_{E2})	Saída (X_{S1} ; Y_{S1});(X_{S2} ; Y_{S2})
Jusante Global	(505,5; 385,0); (747,5; 360,0)	(798,5; 330,0); (1100,0; 210,0)
Montante Global	(455,0; 360,0); (705,0; 385,0)	(50,0; 210,0); (395,0; 330,0)
Topo a Jusante	(535,0; 400,0); (628,5; 430,0)	(645,5; 420,0); (739,0; 365,0)
Topo a Montante	(638,5; 430,0); (679,5; 375,0)	(465,0; 365,0); (575,0; 420,0)

Fonte: Autor (2022)

Para as superfícies que analisaram rupturas a jusante a direção do movimento se deu da esquerda para a direita e para as superfícies a montante foram analisadas da direita para a esquerda. As coordenadas X_E e Y_E (1 e 2) são referentes aos locais de entrada e, seguindo o mesmo raciocínio, as coordenadas X_S e Y_S (1 e 2) se referem a regiões de saída. Os intervalos da superfície de pesquisa no topo das seções foram escolhidos priorizando possíveis rupturas que envolvessem diretamente as regiões da cortina e núcleo inclinado da barragem executada, as mesmas coordenadas foram utilizadas na a análise da seção inicial para efeitos comparativos.

Após a conclusão da quinta etapa, todos os resultados foram agrupados e formatados para iniciar a fase de comparação e análises finais dos resultados, que serão detalhadas no capítulo a seguir.

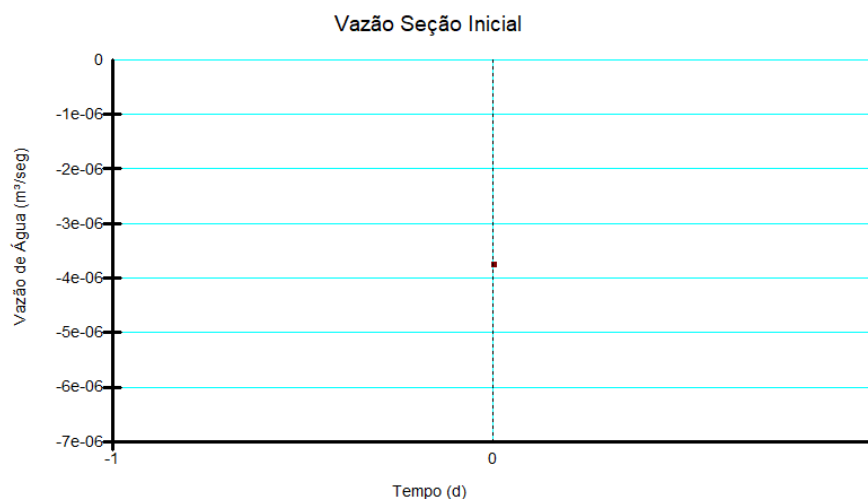
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados resultados e gráficos das simulações numéricas elaboradas no software GeoStudio, a partir da análise desses dados é possível relacionar os projetos e fazer comentários acerca de suas semelhanças e diferenças.

4.1 CÁLCULO DE VAZÃO E LINHAS DE FLUXO

Os gráficos de vazão foram aferidos em uma linha vertical chamada seção de controle. A mesma foi escolhida para quantificar a ação esperada da vazão na barragem, essa linha está localizada próxima à jusante da barragem e possui as mesmas coordenadas em ambas seções transversais, o que possibilita o processo comparativo entre os modelos. As análises foram feitas em regime permanente de operação, logo, sem variação de tempo. Portanto, os resultados são representados em valores por nó analisado, em que o próprio software utiliza uma função que gera a média desses valores. Tendo isto em conta, os valores em módulo das vazões na região de controle das barragens inicial e executada, respectivamente, podem ser aproximados a $3,75 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $4,45 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, como mostram os gráficos das Figuras 21 e 22.

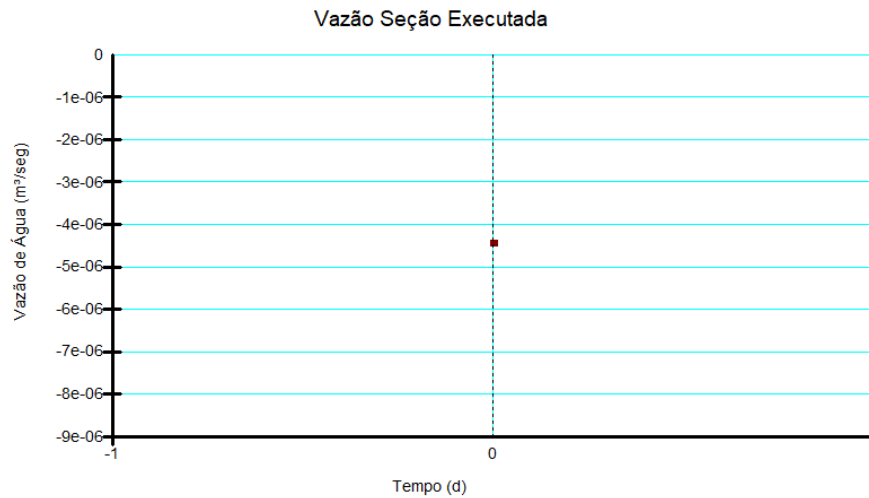
Figura 21 – Vazão na Seção de Controle da Barragem Inicial



Fonte: Autor (2022)

O valor da vazão maior no segundo modelo, indica que a estanqueidade do sistema foi prejudicada, porém de forma pouco expressiva visto o grande porte da obra. Ao considerar um dia de operação, estes valores de vazão correspondem a 324 L/dia para a seção inicial e 384,5 L/dia no caso da seção executada.

Figura 22 – Vazão na Seção de Controle da Barragem Executada

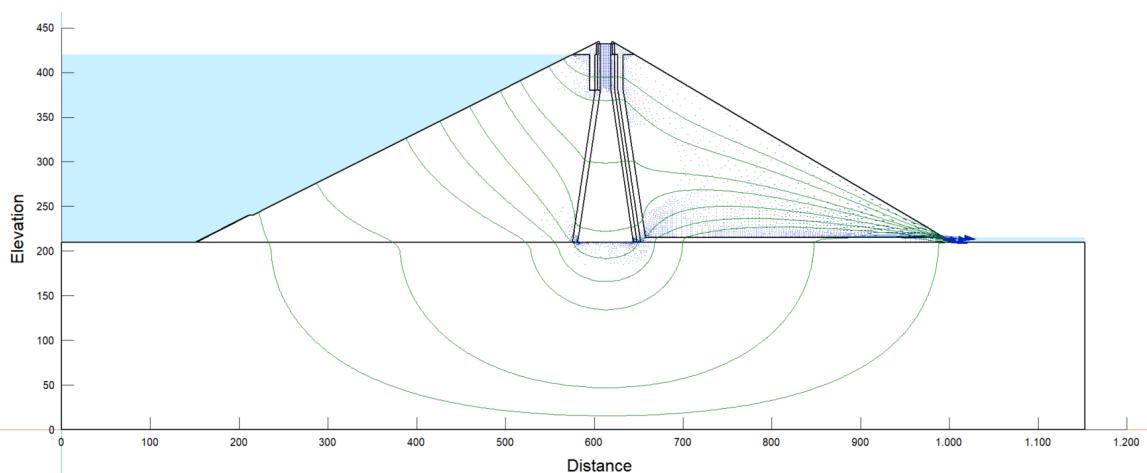


Fonte: Autor (2022)

Pelas linhas de fluxo é possível entender o caminho que a água faz para sair de montante a jusante por dentro dos materiais. As linhas são influenciadas pelos vetores de fluxo que mostram não só a direção da água na área estudada, mas também as informações sobre a velocidade do fluxo de acordo com o tamanho do vetor.

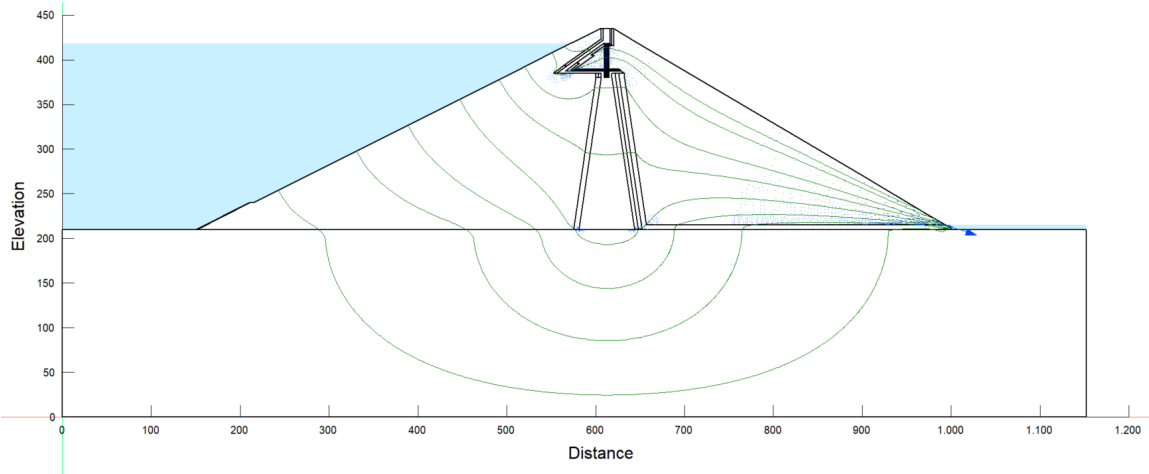
O resultado é mais preciso quanto mais detalhada for a malha analisada, pois a resultante da linha de tendência de fluxo partirá do resultado de um maior número de vetores quantificados. Materiais com maior condutividade hidráulica permitem que o fluxo aumente a velocidade e quanto mais ao final do trecho, maior o volume de água. Esse tipo de simulação é importante, pois mostra como a diferença dos parâmetros dos materiais influencia no comportamento da percolação da água nos meios porosos. Nas Figura 23 e 24 estão traçadas as linhas equipotenciais das barragens inicial e executada, respectivamente.

Figura 23 – Linhas e Vetores de Fluxo da Barragem Inicial



Fonte: Autor (2022)

Figura 24 – Linhas e Vetores de Fluxo da Barragem Executada

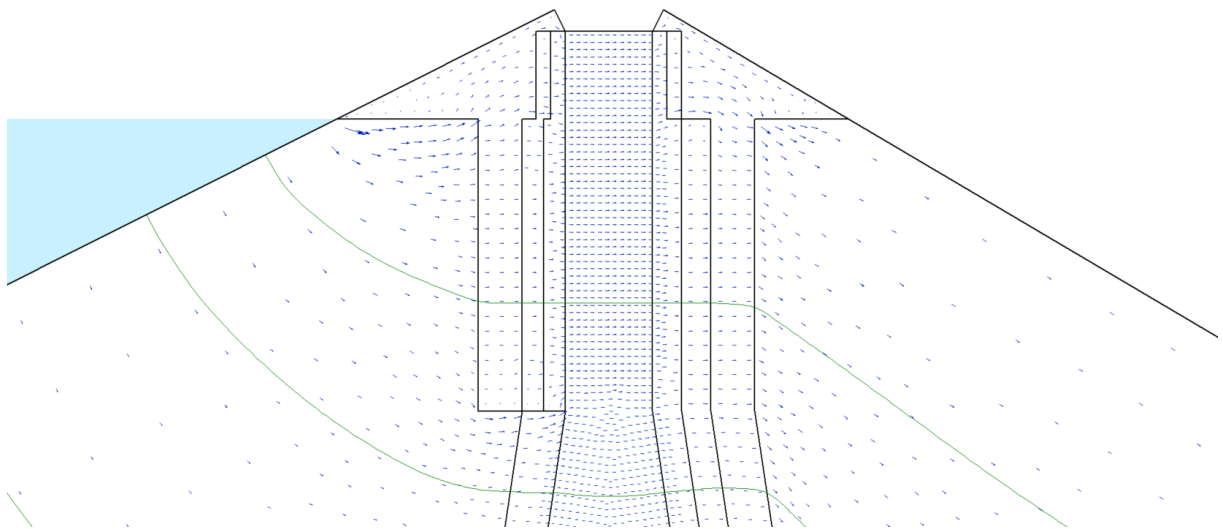


Fonte: Autor (2022)

Dos resultados anteriores, é possível analisar que materiais mais impermeáveis impedem a passagem da água e diminuem os módulos dos vetores enquanto o contrário acontece na mudança para materiais mais permeáveis. A quantidade de vetores representados nas figuras fazem referência apenas à quantidade de elementos analisados, tendo um maior detalhamento na malha destas regiões.

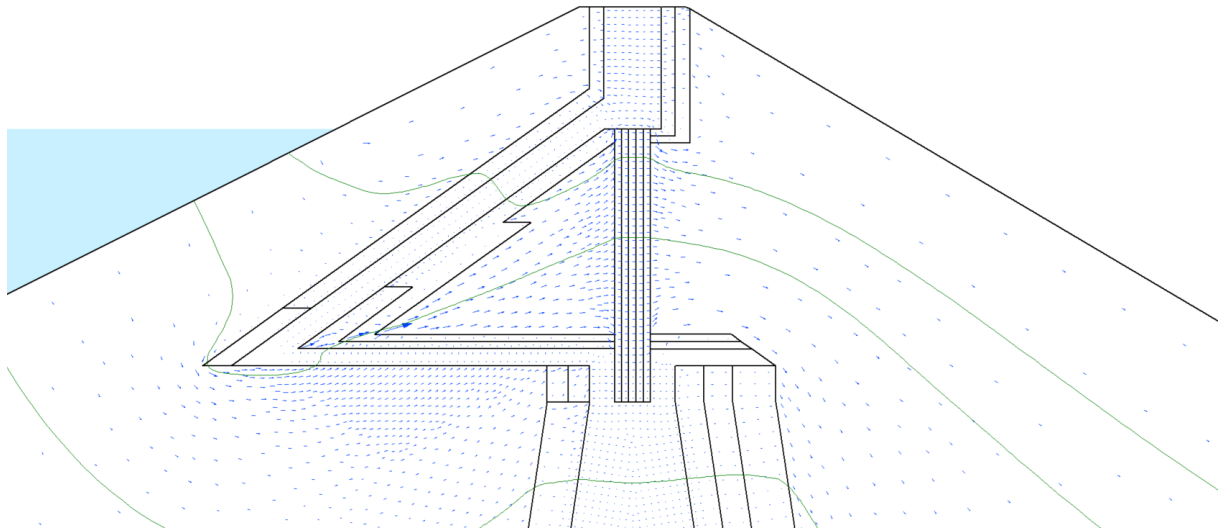
Nas Figuras 25 e 26 estão a ampliação do topo das barragens com as linhas e vetores de fluxo apresentados anteriormente. Vetores como na região de mudança de núcleo horizontal para inclinado, com módulo mais significativo, mostram um local de desarmonia de fluxo. Nessas áreas em que a vazão é maior, o fluxo e volume de água aumentam, gerando um acúmulo de linhas de fluxo. A água desvia de outras regiões da barragem por conta do transporte facilitado desses locais.

Figura 25 – Linhas e Vetores de Fluxo no Topo da Barragem Inicial



Fonte: Autor (2022)

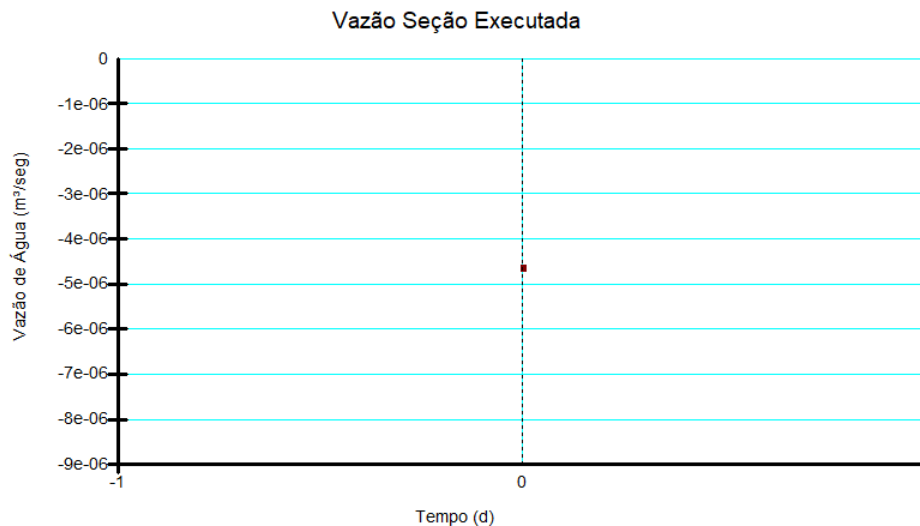
Figura 26 – Linhas e Vetores de Fluxo no Topo da Barragem Executada



Fonte: Autor (2022)

Com a exposição dos vetores é possível analisar a efetividade do muro corta fluxo que, apesar de servir como meio impermeável, não apresentou grandes mudanças na rota da água na representação das linhas de fluxo. No entanto, ao refazer a análise do modelo sem o muro corta fluxo, o valor médio da vazão na seção de controle subiu para $4,65 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, se comparado ao resultado do modelo inicial, o que reflete em uma diferença de $0,90 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$, um acréscimo de 24% ao valor inicialmente calculado. A Figura 27 mostra o gráfico dessa hipótese analisada.

Figura 27 – Vazão na Seção de Controle ao Retirar o Muro Corta Fluxo

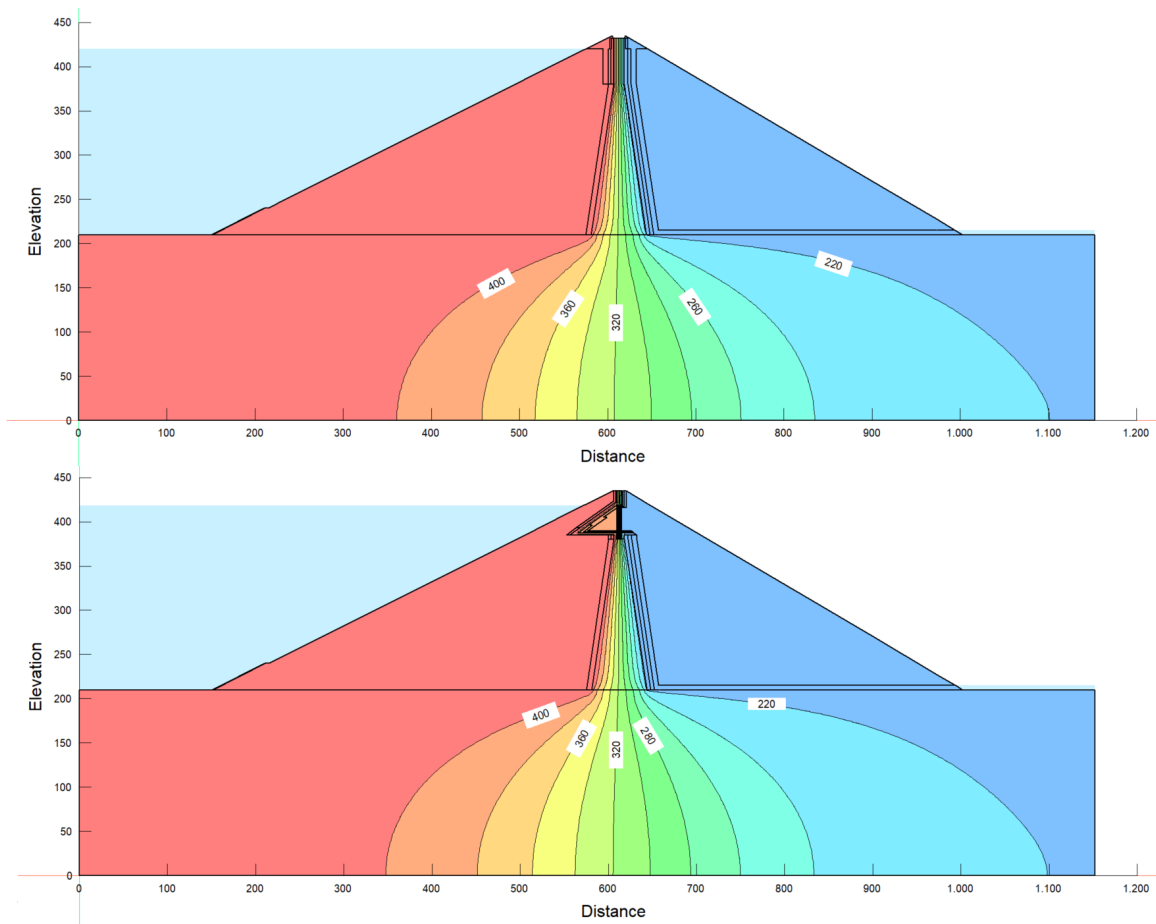


Fonte: Autor (2022)

4.2 LINHAS EQUIPOTENCIAIS

As linhas equipotenciais indicam que qualquer ponto nela incluso possui a mesma carga hidráulica (h). Na figura 28, cada cor apresentada possui uma diferente carga hidráulica e ao pé que se aumenta a distância percorrida pela água, percolando o material, a mesma tende a diminuir da esquerda (montante) para direita (jusante). Nota-se que nos materiais mais permeáveis não há uma mudança significativa das linhas equipotenciais, sendo no núcleo argiloso onde existe maior alteração, isso se dá pela maior perda de energia que acontece ao percorrer essa distância em materiais mais impermeáveis.

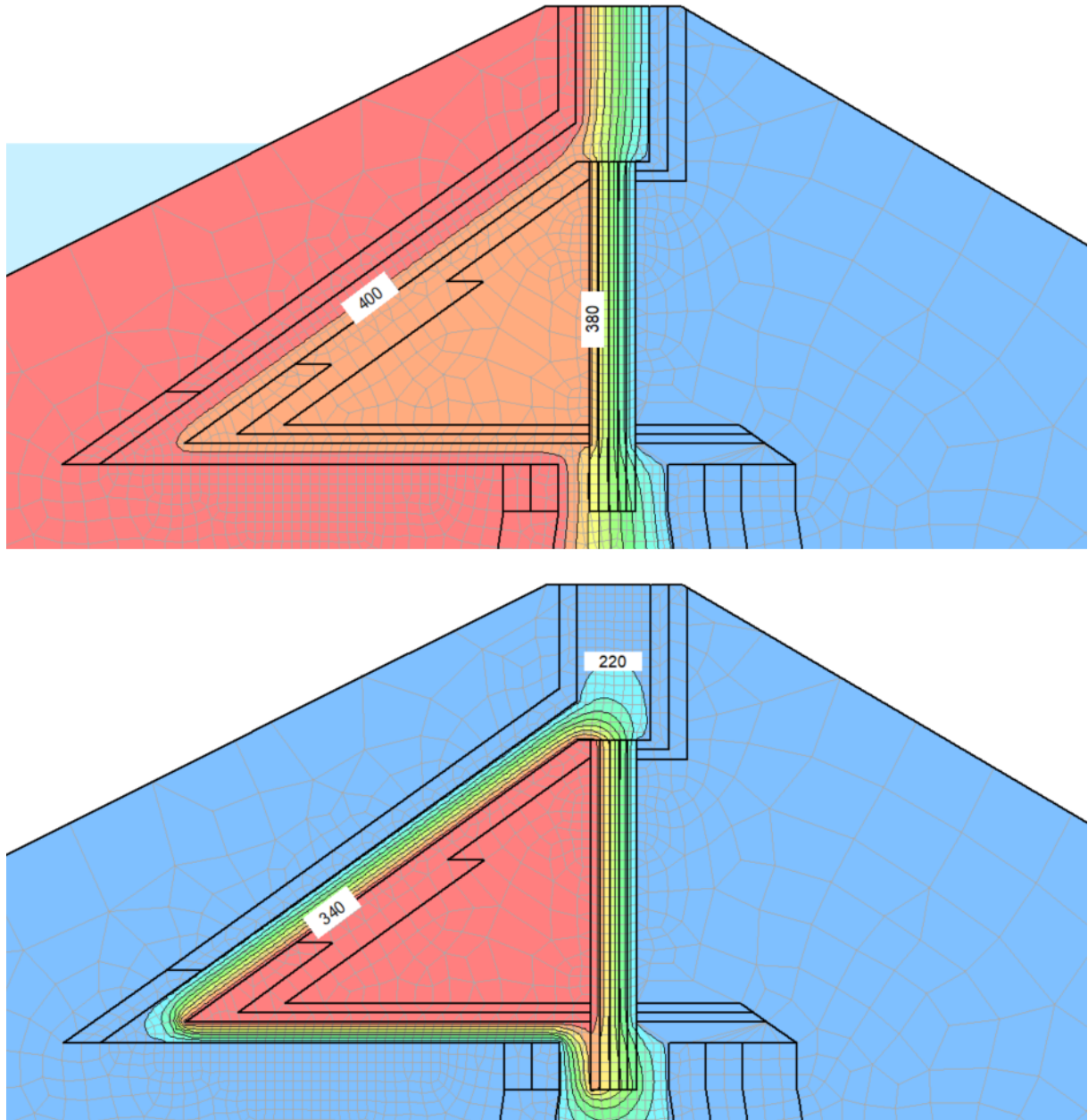
Figura 28 – Linhas Equipotenciais Analisadas



Fonte: Autor (2022)

Após a fase de rebaixamento rápido, as linhas equipotenciais se diluíram gradativamente pela estrutura seguindo um comportamento atrelado à poropressão até se estabilizar. Na região do topo da barragem executada entre o filtro e a cortina, a carga hidráulica se manteve contante mesmo após 10 anos de analisados, se mantendo enclausurada. A Figura 29 mostra, respectivamente, as linhas equipotenciais do topo da barragem executada em fase de operação (0d) e 10 anos após o rebaixamento rápido (3.650d).

Figura 29 – Linhas Equipotenciais no Início e Final da Análise de Rebaixamento Rápido



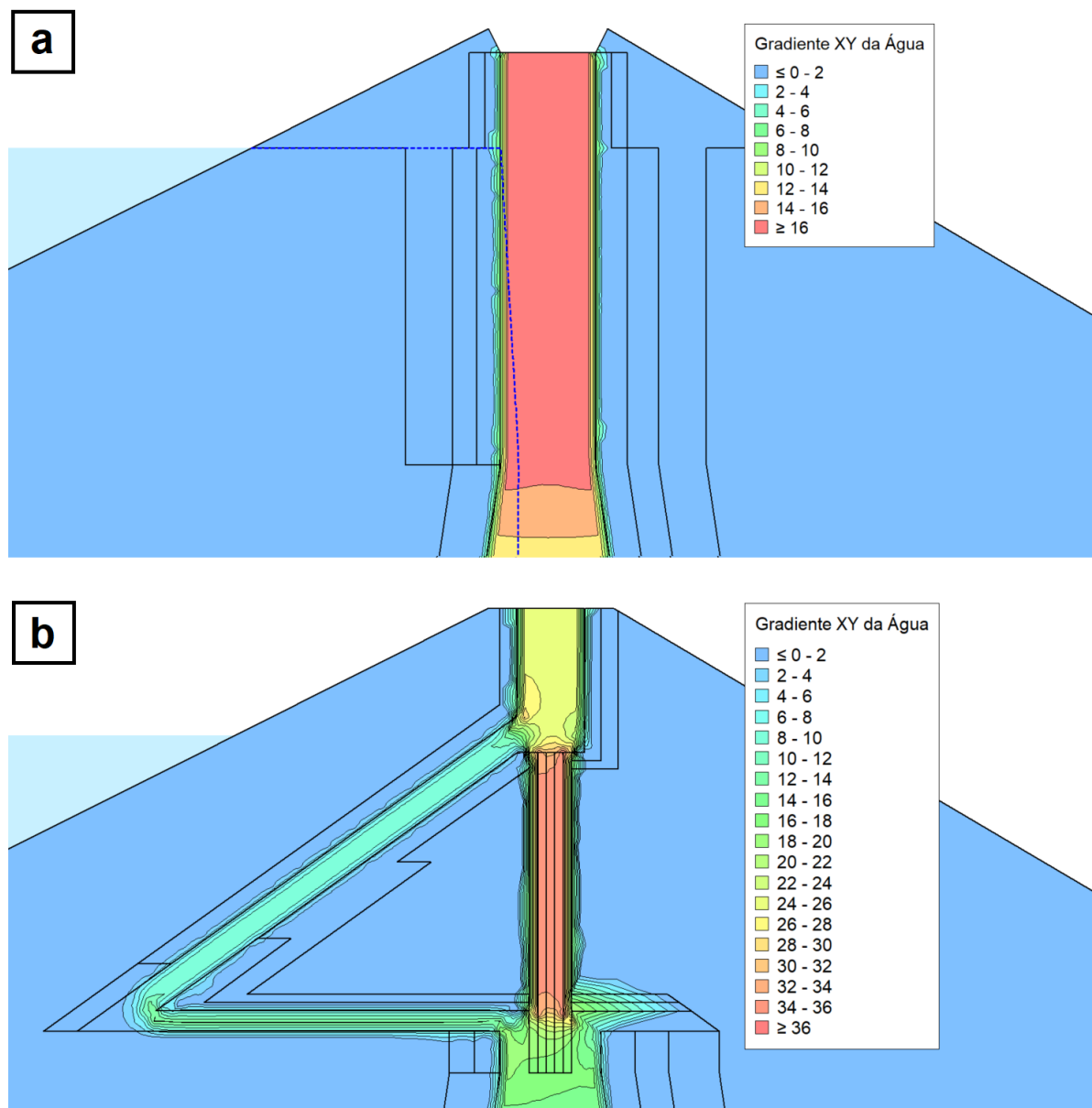
Fonte: Autor (2022)

Este e outros comportamentos afetarão diretamente os resultados que serão discutidos posteriormente como gradiente hidráulico, estabilidade de taludes e poropressão na fase de regime transiente em rebaixamento rápido. Por estarem todos atrelados a parâmetros de cálculo em comum, seguindo a Lei de Darcy, o acúmulo da carga hidráulica permanente pode trazer efeitos a longo prazo que afetam a segurança da estrutura da barragem.

4.3 GRADIENTES

Ao se estudar os gradientes em X, Y e combinados XY, foi possível entender algumas áreas críticas da barragem. Os valores de gradiente são obtidos pelo $\Delta h/L$ sendo Δh a diferença da carga hidráulica e L o comprimento. Locais com valores elevados indicam uma perda de carga mais acelerada, podendo representar áreas com problemas de fluxo. Segundo Pöyry (2021), barragens de grande porte costumam apresentar valores de gradientes acima de 11. Para efeitos comparativos e ausência dos dados necessários para uma análise mais aprofundada, foi considerado o valor de gradiente estável máximo para a estrutura de 16 por conta do resultado obtido na primeira simulação.

Figura 30 – Gradiente em X e Y: a) Topo da Seção Inicial e b) Topo da Seção Executada



Fonte: Autor (2022)

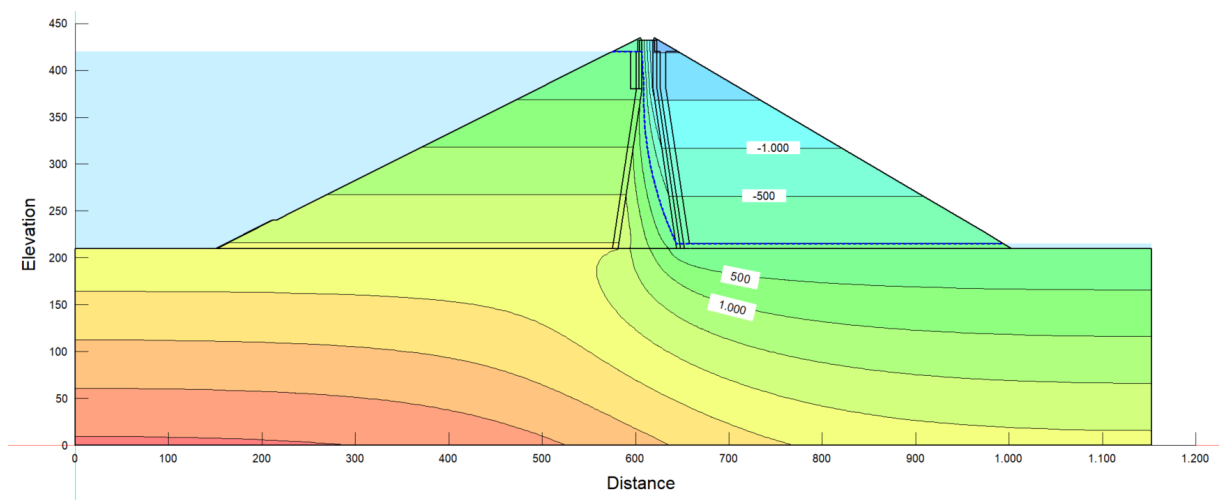
Para a fase de operação em regime permanente, os valores de gradiente em áreas ocupadas pelo material 1A do modelo executado apresentaram um pequeno aumento na zona superior de transição do núcleo inclinado para o vertical. Tais resultados mostram onde há maior demanda de inspeções e atenção para segurança da barragem. De acordo com o relatório de consultoria da empresa Pöyry (2021), o material do muro corta fluxo de cimento-bentonita é passível de gradientes de até 40, logo, os resultados estão dentro do esperado para o projeto e não apresentam risco. No entanto, no núcleo vertical acima da cortina há locais com gradientes que chegam a 26, isso se deve pela interferência da própria cortina.

Ao analisar os gradientes durante o rebaixamento rápido, os resultados se mantêm estáveis até a segunda semana de análise. Após isso os valores próximos a face a montante do núcleo impermeável aumentam temporariamente e voltam ao valor máximo esperado. A região do núcleo horizontal e inclinado passa a ser o ponto crítico da estrutura, atingindo gradientes entre 25 e 60. Estes altos valores tornam a região propícia a ocorrência de *piping*, que acontece pela evasão dos grãos causando erosão da estrutura.

4.4 POROPRESSÃO

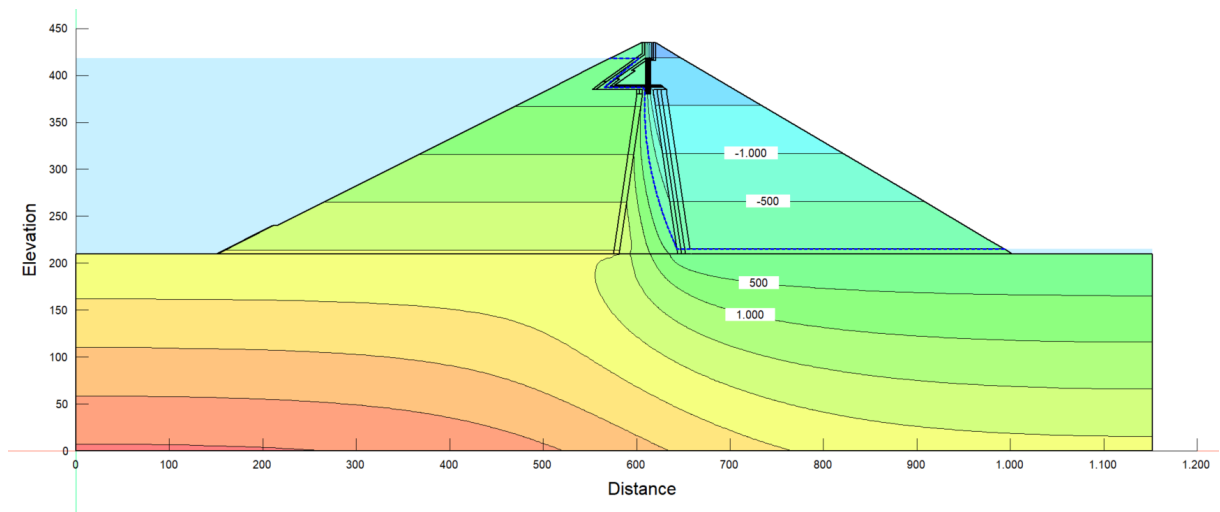
Ao gerar uma simulação de poropressão, é possível traçar uma isosuperfície que representa a linha neutra de poropressão. Em toda essa linha o valor de poropressão é zero e qualquer ponto acima dela apresenta valores negativos e pontos abaixo da linha possuem valores positivos. Na análise em fase de operação, as curvas de poropressão tiveram comportamento semelhante, com a linha neutra passando pelo núcleo impermeável até o nível de saída de água na base da barragem como mostram as Figuras 31 e 32.

Figura 31 – Poropressão da Barragem Inicial



Fonte: Autor (2022)

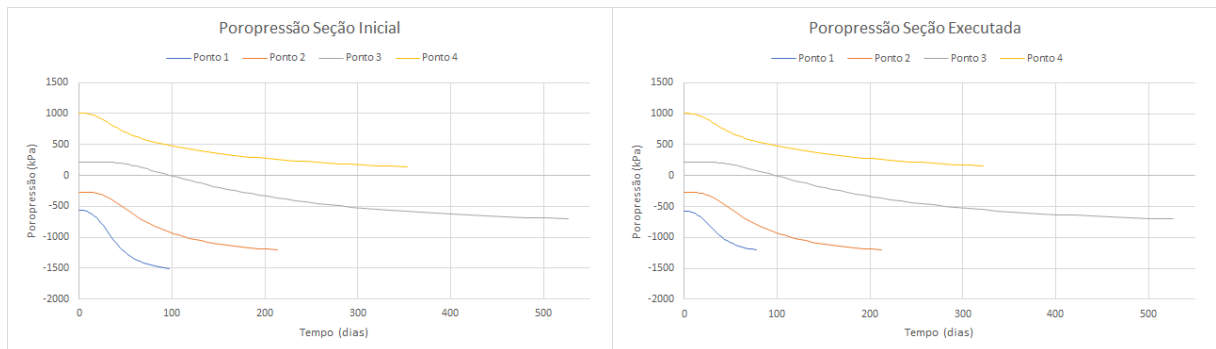
Figura 32 – Poropressão da Barragem Executada



Fonte: Autor (2022)

As análises feitas em regime transiente na fase de rebaixamento rápido mostram que os pontos estudados possuem comportamentos semelhantes na maior parte da barragem, porém a alteração no topo da barragem executada causou algumas variações. Os Pontos 2, 3 e 4 em ambas as seções estabilizam por volta das 55^a, 75^a e 65^a etapas, respectivamente, como mostrado nos gráficos da Figura 33. O Ponto 1, no entanto, não seguiu esse padrão, sendo influenciado pela seção de poropressão enclausurada no topo da seção executada, o que afetou no seu valor final estabilizado em comparação à seção inicial.

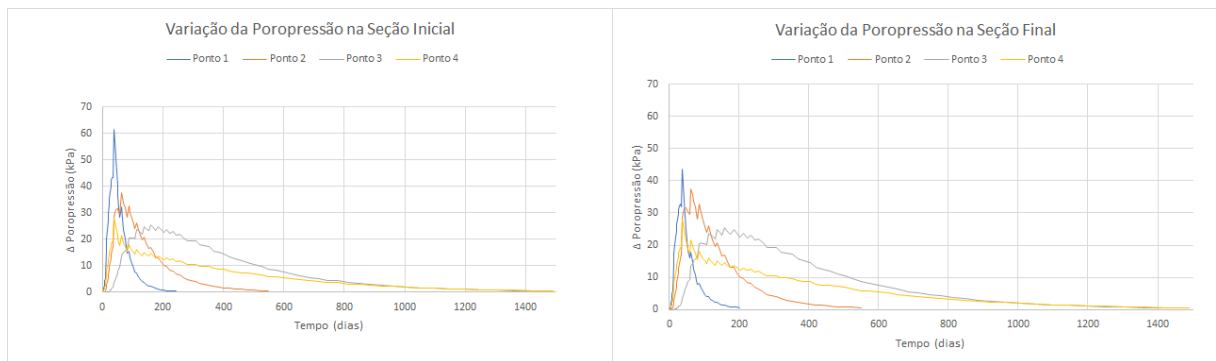
Figura 33 – Gráfico da Poropressão



Fonte: Autor (2022)

Os gráficos da Figura 34 mostram a diferença da amplitude de variação entre os pontos analisados e é possível observar que logo nas primeiras etapas de análise as poropressões não sofrem a mesma variação. Isso implica em resultados distintos entre as duas seções, sendo a primeira poropressão estabilizada em aproximadamente 1.570 kPa e a segunda em cerca de 1.270 kPa. A poropressão está diretamente atrelada à tensão efetiva do solo, portanto é necessário fazer estudos estatísticos como este que possam por comparação encontrar possíveis anomalias nos projetos.

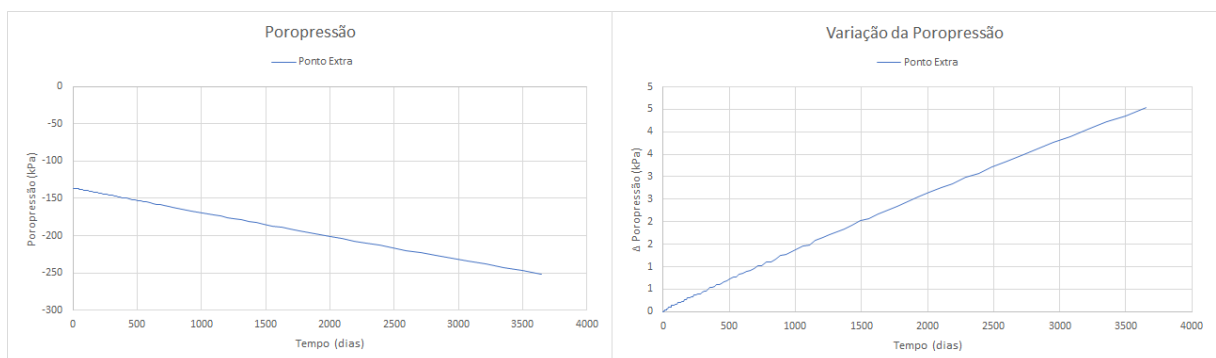
Figura 34 – Gráfico da Variação da Poropressão



Fonte: Autor (2022)

Por conta dessa influência, foi necessário estudar um ponto extra dentro da região com poropressão aprisionada e observou-se que existe uma variação, ainda que baixa, de poropressão no local. A poropressão muda seguindo uma variação que ocorre de forma progressiva como mostram os gráficos da Figura 35.

Figura 35 – Gráficos de Poropressão e Variação de Poropressão no Ponto Extra



Fonte: Autor (2022)

4.5 ESTABILIDADE DE TALUDES

A análise de estabilidade do barramento é de suma importância, nesta etapa são verificados os fatores de segurança mínimos (FS_{\min}) dos taludes nas três etapas de solicitação: final de construção, regime permanente de operação e em regime transiente de rebaixamento rápido. Como base para comparação de FS_{\min} , foram considerados os valores encontrados na literatura que atendem projetos dessa natureza, estes valores estão apresentados na Tabela 6.

O método escolhido para análise, Morgenstern-Price, satisfaz todas as condições estáticas, como equilíbrio de forças verticais, equilíbrio de forças horizontais e equilíbrio de momentos.

Tabela 6 – Fatores de Segurança Mínimos Permitidos

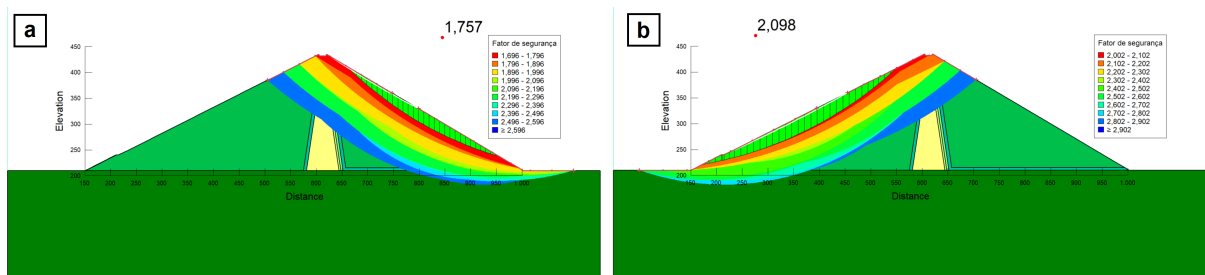
Fases de Projeto	Taludes	Fator de Segurança
Final de Construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Operação	Montante	-
	Jusante	1,5
Rebaixamento Rápido	Montante	1,1 - 1,3
	Jusante	-

Fonte: Adaptado de García (2013)

4.5.1 Final de Construção

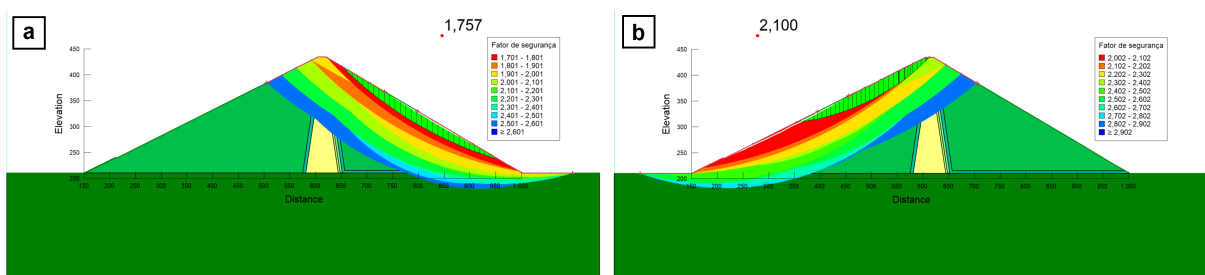
A fase final de construção não é considerada carga hidráulica, pois acontece antes mesmo do enchimento do reservatório, por conta disso, sua análise não considera a poropressão e os demais efeitos da água ao percolar pela barragem. Abaixo estão apresentados os quatro intervalos de pesquisa de acordo com a Tabela 5. Em cada figura é apresentado o mapa de segurança com as áreas delimitadas de acordo com o fator de segurança de cada ruptura, além das fatias e o fator de segurança da ruptura crítica consideradas pelo autor, sendo uma a montante e uma a jusante para as cada seção analisadas.

Figura 36 – Seção Inicial no Final de Construção - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante



Fonte: Autor (2022)

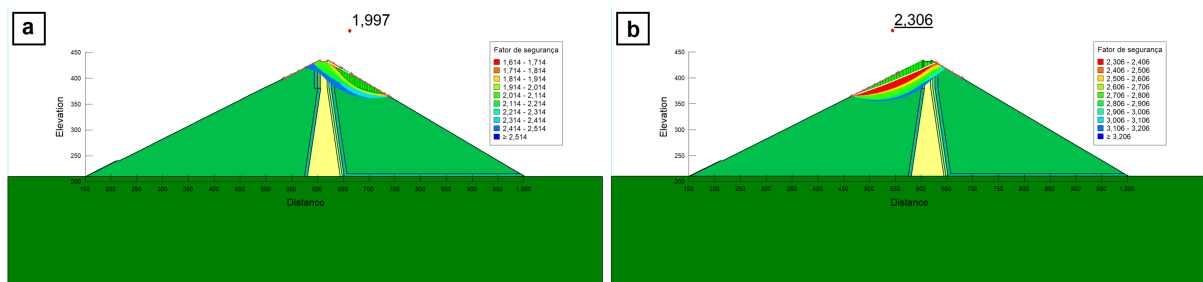
Figura 37 – Seção Executada no Final de Construção - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante



Fonte: Autor (2022)

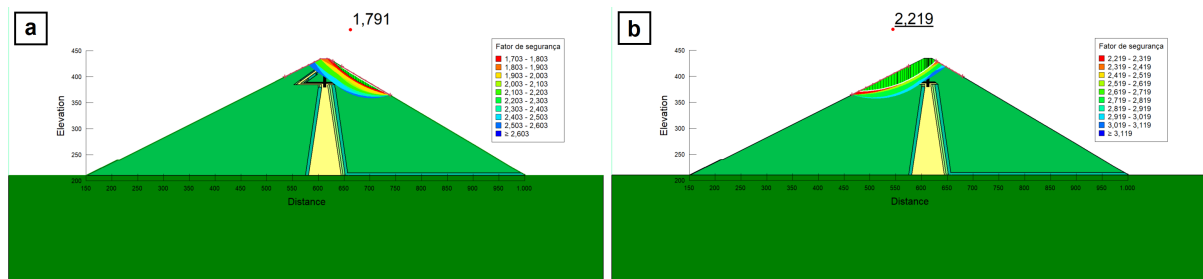
Barragens com corpo de enrocamento têm maior estabilidade de taludes se em comparação as de terra, por conta disso os fatores de segurança em todas as análises de final de construção estão acima do mínimo estabelecido. As rupturas das imagens de estabilidade global, nas Figuras 36 e 37, foram escolhidas pelo menor fator de segurança dentre as seções analisadas que movimentaram um grande volume de solo. As rupturas de topo da barragem, nas Figuras 38 e 39, foram analisadas pelo menor FS envolvendo as alterações de geometria do núcleo.

Figura 38 – Seção Inicial no Final de Construção - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante



Fonte: Autor (2022)

Figura 39 – Seção Executada no Final de Construção - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante



Fonte: Autor (2022)

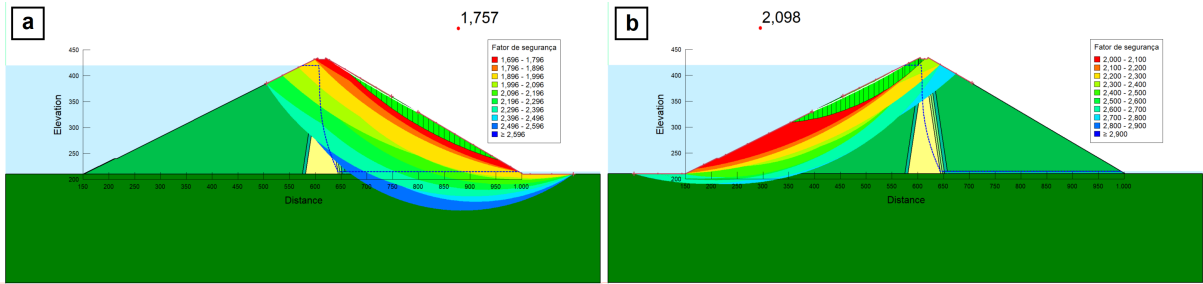
Por conta do talude a montante ser menos inclinado, seus fatores de segurança são maiores. As alterações de geometria diminuíram a segurança do topo da barragem, porém não é uma situação considerada crítica.

4.5.2 Operação

Nesta etapa foram levados em consideração parâmetros hidráulicos, pois a análise acontece com o reservatório cheio, simulando o período de atividade da barragem. Esta etapa tem influência principalmente em regiões argilosas, pois é onde o solo saturado sofre alterações físicas se em comparação com a fase anterior.

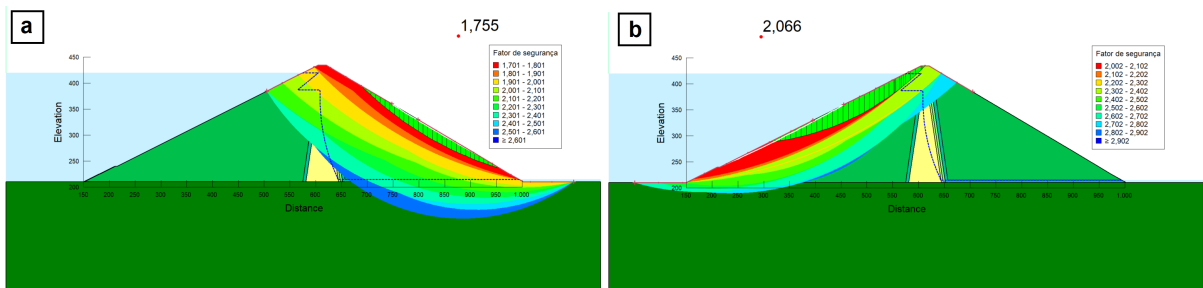
Na avaliação de estabilidade global, a face a jusante é a que sofre instabilidade com o solo saturado, pois a montante a própria carga hidráulica auxilia a manter a estabilidade do talude. Abaixo estão os resultados críticos considerados pelo autor.

Figura 40 – Seção Inicial em Operação - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante



Fonte: Autor (2022)

Figura 41 – Seção Executada em Operação - Estabilidade Global a) a Jusante e b) a Montante

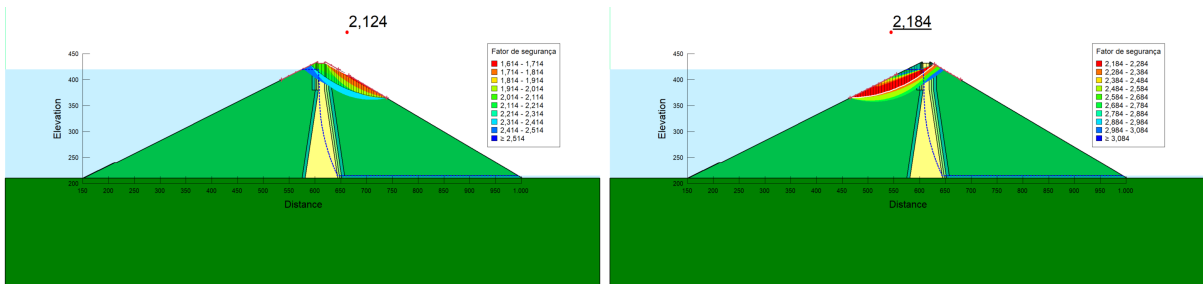


Fonte: Autor (2022)

Quando comparados à fase de final de construção, os resultados em operação não apresentaram alteração significativa de estabilidade global. No entanto, no topo das barragens o fator de segurança teve aumento representativo como mostram as Figuras 42 e 43. Quando o nível de poropressão está estabilizado, ele diminui as tensões efetivas da barragem, conservando a estabilização.

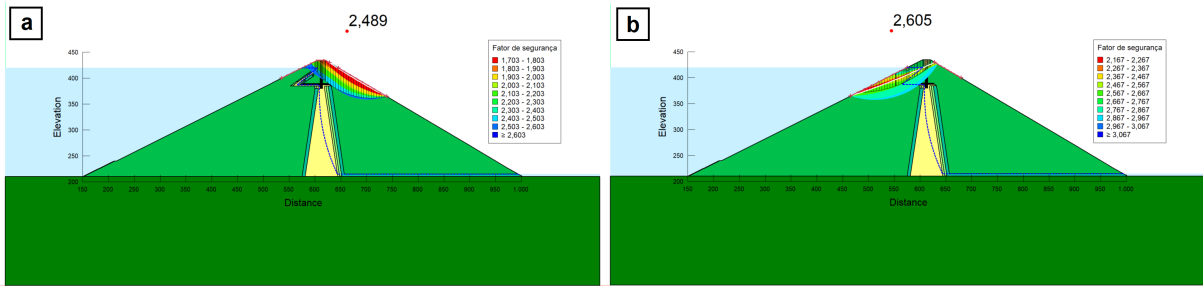
Ao contrário da etapa anterior, a alteração de geometria quando analisada em operação aumentou o fator de segurança dos taludes no topo da barragem a jusante e montante.

Figura 42 – Seção Inicial em Operação - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante



Fonte: Autor (2022)

Figura 43 – Seção Executada em Operação - Estabilidade do Topo a) a Jusante e b) a Montante



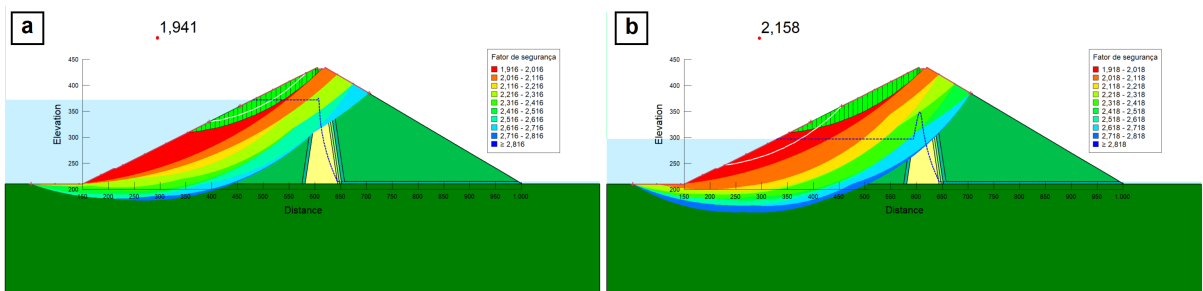
Fonte: Autor (2022)

4.5.3 Rebaixamento Rápido

No que tange a condição de rebaixamento rápido, esta implica em uma situação crítica ao talude a montante. Nesta análise é considerada a alteração das condições de pressão intersticial, diminuindo a carga estabilizadora sobre o talude a montante da barragem.

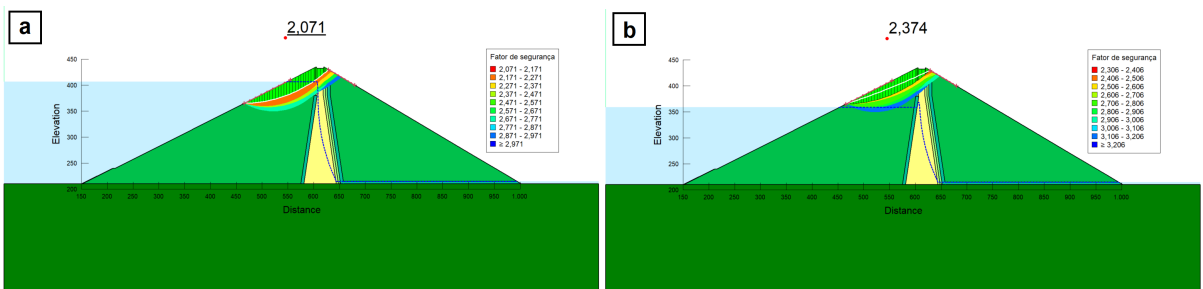
Diferente das demais análises, foram escolhidas rupturas apenas de montante, pois o talude a jusante manteve os mesmos resultados da fase anterior. Abaixo estão as situações de ruptura consideradas críticas durante o rebaixamento ao atingir FS mínimo e ao estabilizar.

Figura 44 – Seção Inicial em Rebaixamento Rápido - Estabilidade Global a Montante em a) 7 dias e b) 18 dias



Fonte: Autor (2022)

Figura 45 – Seção Inicial em Rebaixamento Rápido - Estabilidade do Topo a Montante em a) 2 dias e b) 9 dias

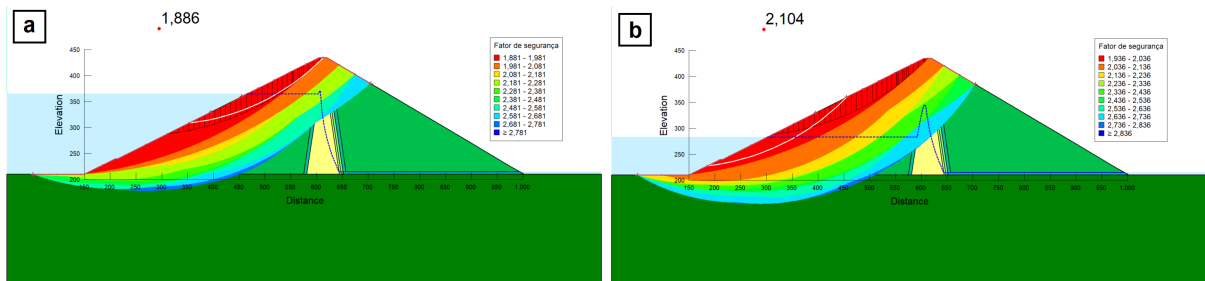


Fonte: Autor (2022)

Durante o tempo de esvaziamento do reservatório, considerando a estabilidade global na seção inicial, o fator de segurança foi reduzido progressivamente até o sétimo dia da análise atingindo 1,941. Após esse período o fator voltou a crescer, até estabilizar em 2,158 no décimo oitavo dia analisado. Considerando rupturas apenas no topo da barragem, o valor de FS chegou logo no segundo dia em 2,071, seu menor valor. Voltando a subir e estabilizando no nono dia de análise.

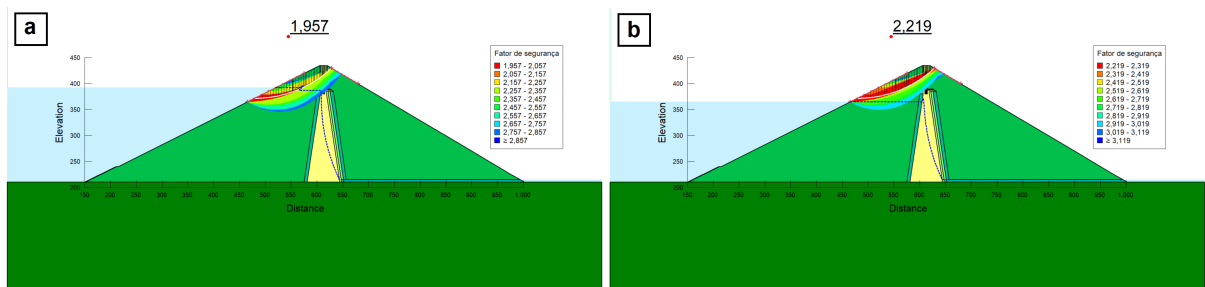
A diferença no tempo de pico acontece pois poropressão deixou o corpo da barragem de cima para baixo, logo, materiais alocado na parte superior da seção estabilizaram antes dos nas áreas mais baixas.

Figura 46 – Seção Executada em Rebaixamento Rápido - Estabilidade Global a Montante em a) 8 dias e b) 20 dias



Fonte: Autor (2022)

Figura 47 – Seção Executada em Rebaixamento Rápido - Estabilidade do Topo a Montante em a) 4 dias e b) 8 dias

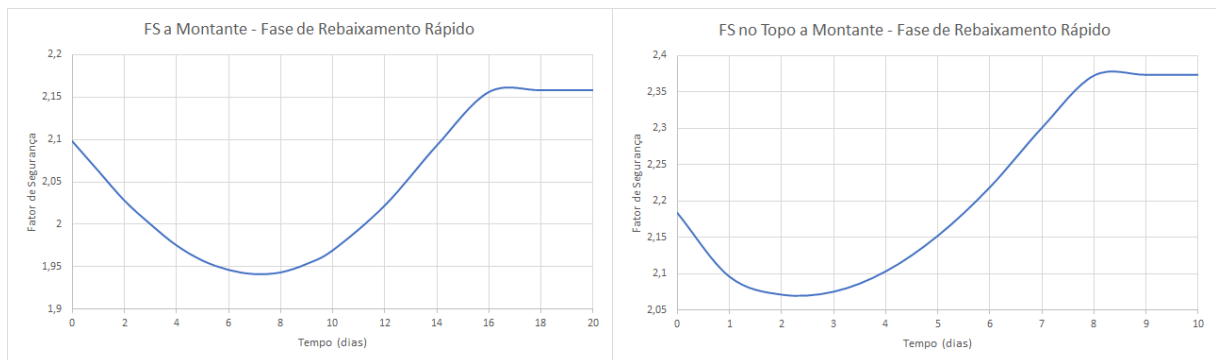


Fonte: Autor (2022)

Na seção executada, as alterações de FS foram levemente maiores, ainda não apresentando riscos à estrutura. Na análise global o menor fator de segurança aconteceu em 8 dias, atingindo 1,886, e retornando à estabilidade em 20 dias. Considerando as rupturas do topo da barragem, o menor FS aconteceu em 4 dias com 1,957 e a estabilidade do valor em 8 dias com 2,219.

Para entender o comportamento dos resultados, o autor tratou os dados das análises gerando 4 gráficos que apresentam a variação dos fatores de segurança em função do tempo. O estudo estatístico pode contribuir para a compreensão de possíveis anomalias causadas pela geometria da seção executada. Os gráficos estão apresentados nas Figuras 48 e 49.

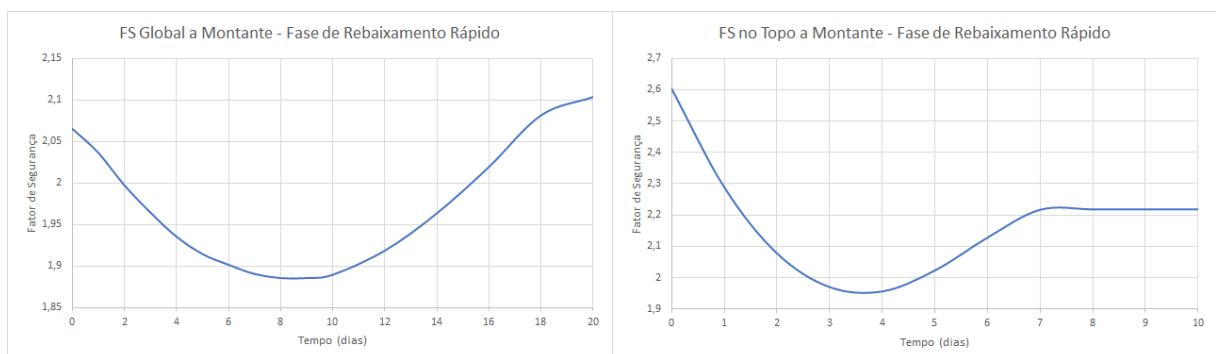
Figura 48 – Seção Inicial - Gráficos de Variação do Fator de Segurança nas Rupturas Críticas a Montante



Fonte: Autor (2022)

Os valores do fator de segurança da seção inicial seguiram trajetórias semelhantes, porém com intervalos de tempo diferentes, ambos estabilizando levemente acima do FS obtido na fase de operação e não apresentando perigo para a estabilidade de seus taludes.

Figura 49 – Seção Executada - Gráficos de Variação do Fator de Segurança nas Rupturas Críticas a Montante



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 49 é possível perceber que a variação entre FS inicial e FS final na análise global é menos significativa na seção executada que na seção inicial. A estabilidade do topo da barragem não seguiu a mesma de tendência que as demais, mantendo o FS final abaixo do registrado na fase de operação. Este fato pode ser decorrente da poropressão enclausurada entre os materiais como mostrado no subcapítulo que trata dos resultados da poropressão.

Avaliando os resultados como um todo, é possível concluir que ambas as seções estão em situação segura com relação a estabilidade de seus taludes, pois em nenhuma das análises os fatores de segurança estiveram abaixo dos valores mínimos propostos previamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram efetuadas análises numéricas de uma barragem que faz parte de um projeto hidrelétrico na cidade colombiana de Ituango. A barragem principal passou por um acidente nos tubos de desvio que poderiam afetar sua segurança. O procedimento construtivo de compactação das últimas etapas do corpo da barragem foi alterado para uma solução alternativa que acelerasse sua execução. Foram feitas simulações de comportamento com enfoque nos fluxos de água na seção contemplada inicialmente e na seção alterada para avaliar os impactos na segurança da obra devido a possíveis alterações nos parâmetros de poropressão, gradientes e estabilidade de taludes durante as fases de operação e rebaixamento rápido.

A vazão na seção de controle permaneceu constante ou com pequenas alterações entre os modelos. Essa equivalência acontece pela presença dos muros que apresentam efetividade em diminuir a vazão na região, permitindo que a geometria executada trabalhe de forma similar à inicial. No entanto, a alteração da seção forneceu novas linhas de fluxo, desviando o caminho da água dentro do corpo da barragem.

Nas análises de fluxo percebeu-se que os gradientes aumentaram na solução executada. Com a vazão se mantendo constante ou com aumentos pouco representativos, o coeficiente de permeabilidade dos materiais mantidos e a área das regiões impermeáveis diminuindo, seguindo a Equação 6, os resultados de gradiente tendem a sofrer esse aumento. Na fase de rebaixamento rápido, os altos valores de gradiente trazem insegurança à estrutura, sendo necessário que sejam feitas inspeções e possíveis reformulações destes locais. Os resultados fora do padrão só foram observados ao se aumentar o detalhamento da malha de análise nos modelos.

Ao esvaziar o reservatório, o nível de poropressão no núcleo central da barragem zonada teve comportamento semelhante entre os dois modelos. No entanto, na seção executada houve o aprisionamento da água na região entre o núcleo inclinado e a cortina corta fluxo. Este fato resultou na existência permanente da carga hidráulica no local e potencialmente pode interferir na segurança da barragem. A água acumulada aumenta o peso do material, esse aumento de peso pode gerar deformações e recalques adicionais concentradas naquela área, visto que o núcleo drenado vai suportar a carga sem o auxílio da poropressão para mitigar suas tensões efetivas.

No que diz respeito à estabilidade de taludes, observou-se que a barragem é estável considerando a situação inicial e executada. Foi observado, particularmente, que para a solução alternativa a zona com poropressão elevada pode ter levado a uma diminuição do fator de segurança ao longo do tempo como observado nos gráficos da Figura 49, visto que seu comportamento é anômalo às demais análises.

Além das análises de fluxo e estabilidade de taludes, é válido ressaltar que estudos detalhados de tensão-deformação devem ser feitos para avaliar as mudanças de rigidez dos materiais e como isso pode influenciar a plastificação desses materiais, principalmente nas áreas em que temos as cortinas impermeáveis. Podem existir pontos de plastificação resultando em rupturas locais, que em uma deformação acelerada pode desencadear em movimentos de massa que não são consideradas nas análises de estabilidade por serem análises determinísticas, com parâmetros fixos.

Esta foi uma análise acadêmica com o intuito de entender possíveis mudanças de comportamento por conta da alteração de geometria, pois incidentes são comuns na construção de barragens e atribuem perigo à construção caso não haja a devida atenção às mudanças de projeto. O estudo possui simplificações nas geometrias e nas propriedades dos materiais, que foram adotados dentro de valores típicos hipotéticos para o projeto. Algumas propriedades foram obtidas diretamente dos relatórios de segurança após o incidente, mas outras foram adotadas pelo autor para o desenvolvimento e conclusão dos estudos. Demonstrou-se que a solução proposta atende parcialmente aos critérios de segurança, no entanto é necessário que haja atenção com os processos construtivos de compactação que podem resultar em propriedades diferentes às camadas de material utilizadas.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Para pesquisas futuras relacionadas ao trabalho, é interessante que se realize uma pesquisa mais detalhada das propriedades reais para as áreas e materiais da barragem. Seria importante ter acesso a algum tipo de instrumentação geotécnica que tenha sido executada in loco para aferir os níveis de poropressões e recalques. Isso permite verificar se os materiais compactados atendem critérios de segurança, pois com a aceleração do ritmo de compactação, os materiais podem reagir tendo propriedade diferentes que devem ser reconsideradas em estudos posteriores.

É recomendado que sejam feitas as análises de tensão-deformação para encontrar os pontos de plasticidade e garantir o conhecimento dos parâmetros globais da obra. Esta etapa pode ainda envolver análises probabilísticas, alterando valores de coesão, ângulo de atrito e demais propriedades para ver como essas mudanças podem impactar os resultados do fator de segurança a longo prazo.

Considera-se pertinente, ainda, um possível estudo que busque entender os efeitos a longo prazo da poropressão aprisionada no topo da barragem executada, buscando uma alternativa de drenagem no local para evitar esse acúmulo de água na fase de rebaixamento rápido.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1996.
- CHUQUIMUNI, R. A. A. **Análise Numérica do Alçamento de Barragens de Terra**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.
- COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. **Segurança de Barragens: Recomendações par a formulação e verificação de critérios e procedimentos**. Rio de Janeiro, 1986.
- COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. 1. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.
- EL COLOMBIANO. **Hace un año se cambió el curso del Cauca en Ituango**. 2015. Disponível em: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/hace-un-ano-se-cambio-el-curso-del-cauca-en-ituango-FY1302456>.
- GARCÍA, J. A. B. **Análise de Comportamento de Barragens Construídas com Núcleos Argilosos Compactados no Ramo Super Úmido**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil — Universidade de Brasília, 2013.
- GOOGLE EARTH. 2022. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@7.11480827,-75.68210432,965.91268358a,10252.77461794d,35y,155.04750108h,42.65212558t,0r>.
- JÚNIOR, L. P. V. Segurança das barragens de concreto. **Revista IBRACON**, v. 1, n. 42, p. 57, 2006.
- KUPERMAN, S. C.; CIFU, S. Projeto de barragens de concreto. **Revista IBRACON**, v. 1, n. 42, p. 82–83, 2006.
- MAGALHÃES, M. de Souza . **Dimensionamento de estruturas de contenção atirantadas utilizando os métodos de equilíbrio limite e de elementos finitos**. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2015.
- MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2010.
- OLIVEIRA, T. C. F. de et al. Avaliação de modelos físicos reduzidos construídos em laboratório para o estudo da percolação de Água em duas barragens homogêneas de terra. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, v. 0, n. 19, p. 5, 2018.

PACHECO, P. G. M. **Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

PINTO, C. de Sousa . **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2006.

PÖYRY. **Relatório de Consultoria**. 0. ed. Santiago, Chile: La Unidad de Negocios de Energía de Pöyry, 2021.

RIBEIRO, C. R. **Análise de Estabilidade Global de Barragens de Terra e Enrocamento Estudo de Caso: PCH Xavantina-SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de Terra e Enrocamento**. 1. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2021.

SARÉ, A. R. **Análise das condições de fluxo na barragem de Curuá-Una, Pará**. Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2003.

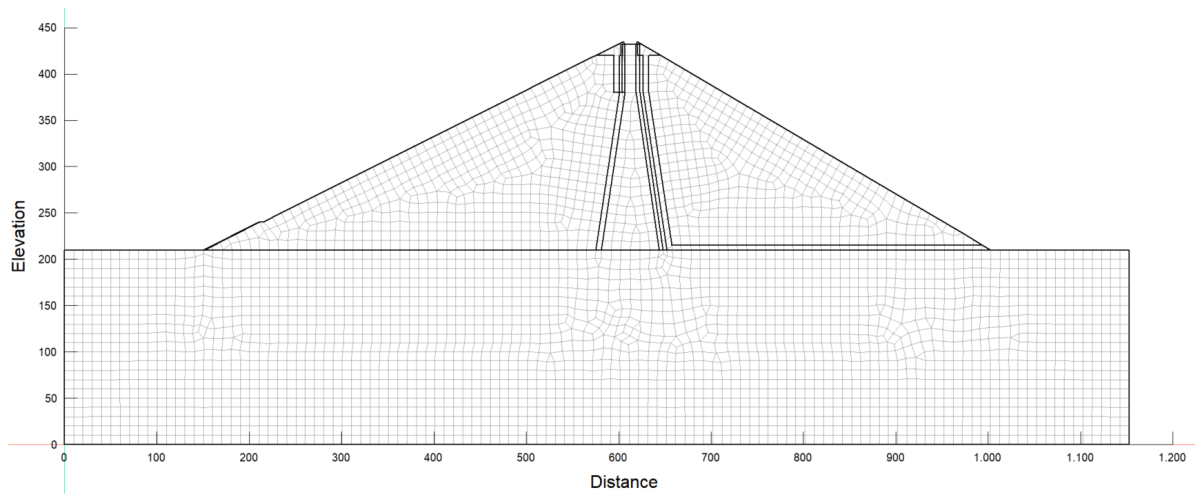
EPMEmpresas Públicas de Medellín. **Empresas Públicas de Medellín - Proyecto Hidroeléctrico Ituango**. 2022. Disponível em: <https://cu.epm.com.co/institucional/proyectos/hidroituango/informacion-oficial-de-la-contingencia-2018/galeria/proyecto-hidroelectrico-ituango>.

SILVA, T. B. da. **Análise de Fluxo, Estabilidade e Tensão-Deformação no Agreste Pernambucano**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental — Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

SOUZA, M. M. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

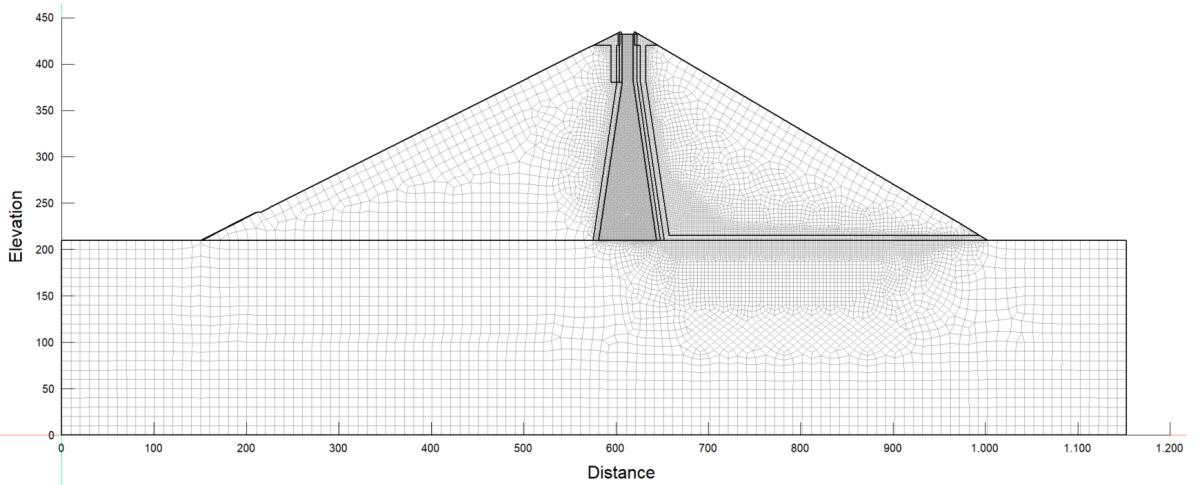
APÊNDICE A - ALTERAÇÃO DA MALHA NAS SEÇÕES ESTUDADAS

Figura 50 – Primeira Versão da Malha na Seção Inicial



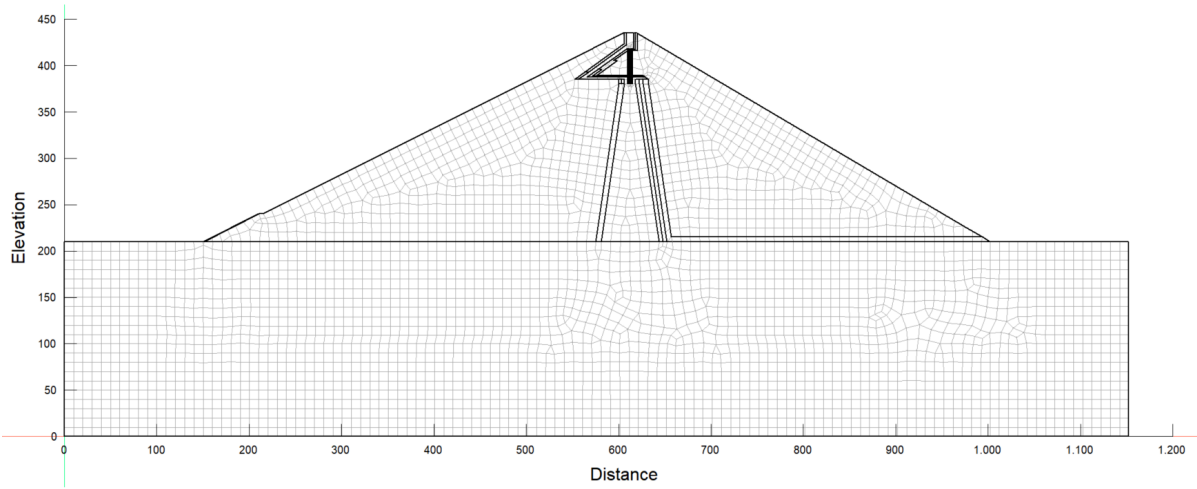
Fonte: Autor (2022)

Figura 51 – Alteração da Malha na Seção Inicial



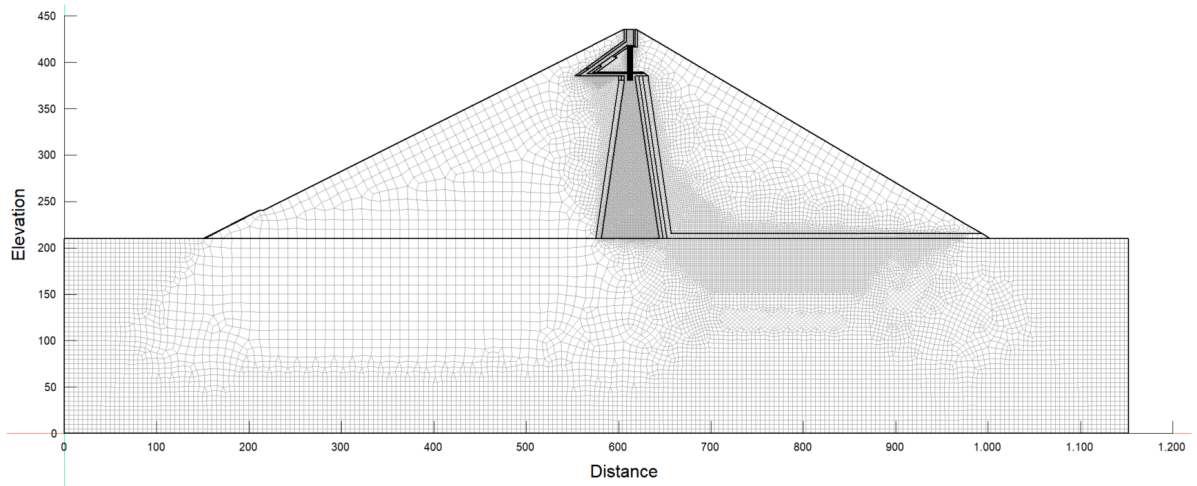
Fonte: Autor (2022)

Figura 52 – Primeira Versão da Malha na Seção Executada



Fonte: Autor (2022)

Figura 53 – Alteração da Malha na Seção Executada



Fonte: Autor (2022)

APÊNDICE B - DISCRETIZAÇÃO DAS ETAPAS

Figura 54 – Discretização das Etapas Analisadas em Regime Transiente

Discretização (etapas e/ou tempos):									
#	Incremento (d)	Decorrido (d)	Decorrido	Salvar	#	Incremento (d)	Decorrido (d)	Decorrido	Salvar
1	1	1	1 Dias	Salvar	61	12	281	281 Dias	Salvar
2	1	2	2 Dias	Salvar	62	13	294	294 Dias	Salvar
3	1	3	3 Dias	Salvar	63	14	308	308 Dias	Salvar
4	1	4	4 Dias	Salvar	64	14	322	322 Dias	Salvar
5	1	5	5 Dias	Salvar	65	15	337	337 Dias	Salvar
6	1	6	6 Dias	Salvar	66	16	353	353 Dias	Salvar
7	1	7	7 Dias	Salvar	67	16	369	1,01 anos	Salvar
8	1	8	8 Dias	Salvar	68	17	386	1,06 anos	Salvar
9	1	9	9 Dias	Salvar	69	18	404	1,11 anos	Salvar
10	1	10	10 Dias	Salvar	70	18	422	1,16 anos	Salvar
11	2	12	12 Dias	Salvar	71	19	441	1,21 anos	Salvar
12	2	14	14 Dias	Salvar	72	20	461	1,26 anos	Salvar
13	2	16	16 Dias	Salvar	73	21	482	1,32 anos	Salvar
14	2	18	18 Dias	Salvar	74	22	504	1,38 anos	Salvar
15	2	20	20 Dias	Salvar	75	23	527	1,44 anos	Salvar
16	2	22	22 Dias	Salvar	76	23	550	1,51 anos	Salvar
17	2	24	24 Dias	Salvar	77	25	575	1,57 anos	Salvar
18	2	26	26 Dias	Salvar	78	26	601	1,65 anos	Salvar
19	2	28	28 Dias	Salvar	79	27	628	1,72 anos	Salvar
20	2	30	30 Dias	Salvar	80	28	656	1,8 anos	Salvar
21	2	32	32 Dias	Salvar	81	29	685	1,88 anos	Salvar
22	2	34	34 Dias	Salvar	82	31	716	1,96 anos	Salvar
23	3	37	37 Dias	Salvar	83	31	747	2,05 anos	Salvar
24	3	40	40 Dias	Salvar	84	34	781	2,14 anos	Salvar
25	3	43	43 Dias	Salvar	85	34	815	2,23 anos	Salvar
26	3	46	46 Dias	Salvar	86	36	851	2,33 anos	Salvar
27	3	49	49 Dias	Salvar	87	38	889	2,43 anos	Salvar
28	3	52	52 Dias	Salvar	88	39	928	2,54 anos	Salvar
29	3	55	55 Dias	Salvar	89	41	969	2,65 anos	Salvar
30	3	58	58 Dias	Salvar	90	43	1.012	2,77 anos	Salvar
31	4	62	62 Dias	Salvar	91	45	1.057	2,89 anos	Salvar
32	4	66	66 Dias	Salvar	92	46	1.103	3,02 anos	Salvar
33	4	70	70 Dias	Salvar	93	49	1.152	3,15 anos	Salvar
34	4	74	74 Dias	Salvar	94	51	1.203	3,29 anos	Salvar
35	4	78	78 Dias	Salvar	95	53	1.256	3,44 anos	Salvar
36	4	82	82 Dias	Salvar	96	55	1.311	3,59 anos	Salvar
37	5	87	87 Dias	Salvar	97	57	1.368	3,75 anos	Salvar
38	5	92	92 Dias	Salvar	98	60	1.428	3,91 anos	Salvar
39	5	97	97 Dias	Salvar	99	63	1.491	4,08 anos	Salvar
40	5	102	102 Dias	Salvar	100	65	1.556	4,26 anos	Salvar
41	5	107	107 Dias	Salvar	101	68	1.624	4,45 anos	Salvar
42	6	113	113 Dias	Salvar	102	71	1.695	4,64 anos	Salvar
43	6	119	119 Dias	Salvar	103	74	1.769	4,84 anos	Salvar
44	6	125	125 Dias	Salvar	104	77	1.846	5,05 anos	Salvar
45	6	131	131 Dias	Salvar	105	81	1.927	5,28 anos	Salvar
46	7	138	138 Dias	Salvar	106	84	2.011	5,51 anos	Salvar
47	7	145	145 Dias	Salvar	107	88	2.099	5,75 anos	Salvar
48	7	152	152 Dias	Salvar	108	91	2.190	6 anos	Salvar
49	8	160	160 Dias	Salvar	109	96	2.286	6,26 anos	Salvar
50	8	168	168 Dias	Salvar	110	99	2.385	6,53 anos	Salvar
51	8	176	176 Dias	Salvar	111	104	2.489	6,81 anos	Salvar
52	9	185	185 Dias	Salvar	112	108	2.597	7,11 anos	Salvar
53	9	194	194 Dias	Salvar	113	113	2.710	7,42 anos	Salvar
54	9	203	203 Dias	Salvar	114	118	2.828	7,74 anos	Salvar
55	10	213	213 Dias	Salvar	115	123	2.951	8,08 anos	Salvar
56	10	223	223 Dias	Salvar	116	128	3.079	8,43 anos	Salvar
57	11	234	234 Dias	Salvar	117	134	3.213	8,8 anos	Salvar
58	11	245	245 Dias	Salvar	118	140	3.353	9,18 anos	Salvar
59	12	257	257 Dias	Salvar	119	145	3.498	9,58 anos	Salvar
60	12	269	269 Dias	Salvar	120	152	3.650	9,99 anos	Salvar

Fonte: Autor (2022)