

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

BIANCA MIDORI FONSECA MIYAKE

**ANÁLISE DE RISCOS NA UHE TRÊS IRMÃOS COM O USO DE TÉCNICAS DE
ESTABILIDADE DE TALUDES – ESTUDO DE CASO**

Ilha Solteira
2022

BIANCA MIDORI FONSECA MIYAKE

**ANÁLISE DE RISCOS NA UHE TRÊS IRMÃOS COM O USO DE
TÉCNICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil

Prof. Dr. Adriano Souza
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Miyake, Bianca Midori Fonseca.
M685a Análise de riscos na uhe três irmãos com o uso de técnicas de estabilidade
de taludes: estudo de caso / Bianca Midori Fonseca Miyake. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2022
134 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Adriano Souza
Inclui bibliografia

1. Barragem. 2. Estabilidade. 3. Percolação. 4. SEEP. 5. SLOPE.


Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

Bianca Midori Fonseca Miyake

**ANÁLISE DE RISCOS NA UHE TRÊS IRMÃOS COM O USO DE TÉCNICAS DE
ESTABILIDADE DE TALUDES – ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto
ao Curso de Graduação em Engenharia
Civil, da Faculdade de Engenharia da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Câmpus de Ilha Solteira.

Aprovado em 28/07/2022

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Adriano Souza
UNESP/FE - Campus de Ilha Solteira (Orientador)



Prof. Dr. Marco Antonio de Moraes Alcantara
UNESP/FE - Campus de Ilha Solteira



Engª Civil MSc. Amanda de Moraes Ricardi
Geometrisa - Segurança de Barragens - Ilha Solteira

Ilha Solteira, 28 de julho de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha Mãe e ao meu Pai, que me apoiaram em meus estudos durante toda minha jornada, e sempre acreditaram em mim. Com os esforços de meus pais que pude me tornar a pessoa que sou hoje. Faço um agradecimento excepcional à minha querida e amada avó, Maria Gomes Fonseca, quem ilumina meus caminhos de onde quer que esteja.

À minha namorada Caroline Sperandio, que esteve ao meu lado nesse projeto, e nessa vida, que me apoiou e encorajou ao longo desse caminho. Quem fez meus dias mais leves e mais felizes. Sem ela, nada disso seria possível.

Ao meu orientador Adriano Souza, que permitiu que esse trabalho fosse executado, e esteve sempre disposto a melhorá-lo. Além disso, o agradeço também como coordenador de curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, sempre determinado a facilitar o curso como um todo.

Aos amigos que fiz no decorrer dessa graduação, por tornarem meus dias mais alegres. Agradeço especialmente à minha amiga Laura Freschi de Oliveira, quem esteve presente na maioria dos meus dias nessa universidade, companheira de estudos e trabalhos acadêmicos.

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, que permitiu meu crescimento acadêmico e profissional.

À Geometrisa, que possibilitou meu contato com a segurança de barragens. Faço um agradecimento especial aos meus amigos e colegas de trabalho: Maria Luiza Favarão Vieira, que me apoiou no início da vida profissional, Amanda de Moraes Ricardi, que me acompanhou e me ensinou muito, e Helmer Murra Caetano, que me auxiliou principalmente nesse trabalho.

À Tijoá, que prontamente disponibilizou todos os materiais necessários para a execução desse trabalho.

A todos os professores que fizeram parte da minha trajetória, que permitiram que isso tudo fosse possível.

RESUMO

Tendo em vista os inúmeros desastres com barragens que já foram registrados no mundo, o presente estudo possui como finalidade analisar os riscos da barragem da UHE Três Irmãos, a partir do fator de segurança obtido por meio de método de estabilidade de talude, com base na percolação teórica para diferentes cenários. Duas seções foram escolhidas para tais análises, visando observar as mais críticas. Foi utilizado o projeto executivo da barragem, disponibilizado pelo empreendedor, e as características dos materiais foram obtidas pela literatura. As análises de percolação e estabilidade dos taludes foram feitas com o auxílio dos *softwares* SEEP/W e SLOPE/W, respectivamente, ambos do pacote GeoStudio. Os cenários contemplados nesse estudo foram operação normal, drenagem interna inoperante, sismos e rebaixamento rápido do reservatório. A partir disso, os resultados obtidos foram que, em geral, os taludes apresentam fatores de segurança acima dos critérios de aceitação encontrados na literatura, no entanto, para uma das seções, o fator de segurança para drenagem interna inoperante fica ligeiramente abaixo dos critérios, no entanto, este cenário é improvável para a barragem em questão, devido a sua manutenção satisfatória.

Palavras-chave: barragem, estabilidade, percolação, SEEP, SLOPE.

ABSTRACT

In view of the numerous dam disasters that have already been recorded in the world, the present study aims to analyze the risks of the Três Irmãos HPP dam, based on the safety factor obtained through the slope stability method, based on theoretical percolation for different scenarios. Two sections were chosen for such analyses, aiming to observe the most critical sections. The executive project of the dam, provided by the entrepreneur, was used, and the characteristics of the materials were obtained from the literature. Percolation and slope stability analyzes were performed with the help of SEEP/W and SLOPE/W software, respectively, both from the GeoStudio package. The scenarios contemplated in this study were normal operation, internal drainage inoperative, earthquakes and rapid lowering of the reservoir. From this, the results obtained were that, in general, the slopes present safety factors above the acceptance criteria found in the literature, however, for one of the sections, the safety factor for inoperative internal drainage is slightly below the criteria, however, this scenario is unlikely for the dam in question, due to its satisfactory maintenance.

Keywords: dam, stability, seepage, SEEP, SLOPE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das barragens de terra e de enrocamento.....	19
Figura 2 – Representação das barragens de concreto.....	21
Figura 3 – Seções original e alternativa para a Barragem de Paraibuna.....	25
Figura 4 – As nove componentes da tensão tridimensional.....	28
Figura 5 – Círculo de Mohr.....	29
Figura 6 – Trajetória de tensões.....	29
Figura 7 – Diferentes situações ao fim do rápido rebaixamento do reservatório.....	31
Figura 8 – Atrito e coesão.....	32
Figura 9 – Imbricamento.....	32
Figura 10 – Fatias de uma massa de solo genérica.....	34
Figura 11 – Forças aplicadas a uma fatia.....	35
Figura 12 – Seção da estaca 28+0,00 m.....	39
Figura 13 – Seção da estaca 111+10,00 m.....	41
Figura 14 – Percolação em operação normal da seção da estaca 28+0,00 m.....	45
Figura 15 – Fator de segurança do talude jusante com percolação em operação normal da seção da estaca 28+0,00 m.....	47
Figura 16 – Fator de segurança do talude montante com percolação em operação normal da seção da estaca 28+0,00 m.....	49
Figura 17 – Percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 28+0,00 m.....	51
Figura 18 – Fator de segurança do talude jusante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 28+0,00 m.....	53
Figura 19 – Fator de segurança do talude montante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 28+0,00 m.....	55
Figura 20 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.....	57
Figura 21 – Fator de segurança do talude montante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.....	59
Figura 22 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.....	61
Figura 23 – Fator de segurança do talude montante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.....	63
Figura 24 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 1)....	65
Figura 25 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 5)....	66
Figura 26 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 10).	67
Figura 27 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 15).	68
Figura 28 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 20).	69
Figura 29 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 25).	70
Figura 30 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 30).	71
Figura 31 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 1).....	73
Figura 32 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 5).....	74
Figura 33 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 10).	75
Figura 34 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 15).	76

Figura 35 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 20).	77
Figura 36 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 25).	78
Figura 37 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 30).	79
Figura 38 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 1).	81
Figura 39 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 5).	82
Figura 40 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 10).	83
Figura 41 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 15).	84
Figura 42 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 20).	85
Figura 43 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 25).	86
Figura 44 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 30).	87
Figura 45 – Percolação em operação normal da seção da estaca 111+10,00 m.....	90
Figura 46 – Fator de segurança do talude jusante com percolação em operação normal da seção da estaca 111+10,00 m.	92
Figura 47 – Fator de segurança do talude montante com percolação em operação normal da seção da estaca 111+10,00 m.	94
Figura 48 – Percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 111+10,00 m.	96
Figura 49 – Fator de segurança do talude jusante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 111+10,00 m.	98
Figura 50 – Fator de segurança do talude montante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 111+10,00 m.	100
Figura 51 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 111+10,00 m.	102
Figura 52 – Fator de segurança do talude montante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 111+10,00 m.	104
Figura 53 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 111+10,00 m.	106
Figura 54 – Fator de segurança do talude montante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.	108
Figura 55 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 1).	110
Figura 56 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 5).	111
Figura 57 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 10).	112
Figura 58 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 15).	113
Figura 59 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 20).	114

Figura 60 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 25).	115
Figura 61 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 30).	116
Figura 62 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 1).	118
Figura 63 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 5).	119
Figura 64 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 10).	120
Figura 65 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 15).	121
Figura 66 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 20).	122
Figura 67 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 25).	123
Figura 68 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 30).	124
Figura 69 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 1).	126
Figura 70 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 5).	127
Figura 71 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 10).	128
Figura 72 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 15).	129
Figura 73 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 20).	130
Figura 74 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 25).	131
Figura 75 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 30).	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios de aceitação de fator de segurança.	33
Tabela 2 – Características dos materiais na percolação.	42
Tabela 3 – Características dos materiais na estabilidade de taludes.	42

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO LITERÁRIA	16
3.1. CONCEITOS BÁSICOS	16
3.1.1. Definições	16
3.1.2. Histórias das barragens no Brasil	16
3.1.3. Objetivo das barragens:	17
3.1.3.1. Barragens de regularização	17
3.1.3.2. Barragens de contenção	17
3.1.3.3. Barragens para geração de energia	17
3.1.4. Tipos de Barragens:	18
3.1.4.1. Barragens convencionais	18
3.1.4.2. Barragens não convencionais	21
3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE PROJETOS DE BARRAGENS	22
3.2.1. A vida de uma barragem	22
3.2.2. O projeto de uma barragem	22
3.2.3. Escolha da seção transversal	24
3.3. ESTABILIDADE DE TALUDES	26
3.3.1. Tensões	27
3.3.2. Tensões efetivas	29
3.3.3. Deformações	30
3.3.4. Água versus estabilidade	30
3.3.5. Fluxo de água	31
3.3.6. Resistência ao cisalhamento	31
3.3.7. Fator de segurança	32
3.3.8. Método de Análise de Estabilidade – Morgenstern-Price	33
4. METODOLOGIA	37
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREEDIMENTO	37
4.2. ANÁLISE DOS DADOS	37
4.3. SEÇÃO DA ESTACA 28+0,00 m	38
4.4. SEÇÃO DA ESTACA 111+10,00 m	40
4.5. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44

5.1. SEÇÃO DA ESTACA 28+0,00 m	44
5.1.1. Operação normal	44
5.1.2. Drenagem interna inoperante	50
5.1.3. Sismos.....	56
5.1.3.1. Sismos com drenagem operando normalmente.....	56
5.1.3.2. Sismos com drenagem interna inoperante.....	60
5.1.4. Rebaixamento rápido do reservatório	64
5.2. SEÇÃO DA ESTACA 111+10,00 m.....	89
5.2.1. Operação normal	89
5.2.2. Drenagem interna inoperante	95
5.2.3. Sismos.....	101
5.2.3.1. Sismos com drenagem operando normalmente.....	101
5.2.3.2. Sismos com drenagem interna inoperante.....	105
5.2.4. Rebaixamento rápido do reservatório	109
6. CONCLUSÕES.....	134
REFERÊNCIAS	135

1. INTRODUÇÃO

Barragem é definida, na legislação brasileira, como qualquer estrutura edificada dentro ou fora de um curso d'água, permanente ou temporário, em talvegue ou em cava exaurida com dique, com finalidade de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, compondo-se pelo barramento e suas estruturas associadas (BRASIL, 2020).

A principal fonte de energia elétrica, no Brasil no início deste século é a geração hidrelétrica, algo que tem potencial de permanecer dessa forma por um longo período, dado que este tipo de produção de energia possui ainda considerável potencial (DOS REIS, 2000).

Os prejuízos causados por rupturas de grandes barragens, geralmente, geram consequências trágicas, particularmente quando esta barragem está a montante de regiões urbanizadas (LAURIANO, 2009).

No século XX, foram apontados em torno de 200 acidentes graves, no mundo, com barragens com altura superior a 15 metros, causando milhares de mortes e incontáveis desabrigados (SINGH, 1996).

No Brasil, a Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, atualizada pela Lei 14.066, de 30 de setembro de 2020, trata da legislação pertinente à segurança de barragens, mais especificamente, tal lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), seu Art. 17º prevê sobre declaração de condição de estabilidade de barragem (BRASIL, 2020).

Nesse sentido, o trabalho analisou duas seções da barragem de terra da UHE Três Irmãos, sendo cada uma em uma margem da barragem. As escolhas foram feitas diante da proximidade uma seção com a ombreira, e a outra devido a sua proximidade com o muro de transição, em concreto. Foram feitas análises de percolação e estabilidade dos taludes para diversos cenários. Além disso, os fatores de segurança obtidos pelas análises de estabilidade foram comparados com os critérios de aceitação encontrados na literatura.

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

A finalidade deste trabalho é obter os fatores de segurança de estabilidade de taludes, a partir de percolação teórica, da barragem da UHE Três Irmãos. E compará-los com os fatores previstos na literatura.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mensurar os Fatores de Segurança para diferentes tipos de combinações de ações;
- Avaliar por intermédio de um software específico a percolação no interior da barragem;
- Avaliar as cargas totais de água internas ao barramento;
- Obter as cunhas de ruptura para cada tipo de carregamento; e
- Gerar os diagramas das distribuições das pressões e superfície da linha freática.

3. REVISÃO LITERÁRIA

3.1. CONCEITOS BÁSICOS

3.1.1. Definições

Barragem é como definiu Costa (2012), uma obra construída em um rio qualquer com objetivo de conter ou armazenar água.

Em concordância, conforme Art. 2º da Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, também é definida como toda estrutura edificada com a finalidade de contenção ou acumulação de líquidos ou líquidos misturados a sólidos, de forma a compreender tanto o barramento quanto suas estruturas relacionadas em talvegue ou em cava exaurida com dique (BRASIL, 2020).

O barramento em si, em união às ombreiras e à fundação, é a estrutura encarregada de conter a água, sendo edificada transversalmente ao sentido do curso d'água (ANA, 2021).

3.1.2. Histórias das barragens no Brasil

Em 1577, o açude Apipucos já aparecia em um mapa holandês, sendo essa a primeira barragem, que há registros, no território brasileiro. Recentemente, o barramento foi ampliado de forma a auxiliar à construção de um acesso ao centro da capital do estado de Pernambuco (COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011).

Segundo bastante adiante no histórico das barragens brasileiras, a barragem do Ribeirão do Inferno, construída em 1883 no rio Jequitinhonha em Minas Gerais, foi a primeira barragem hidrelétrica situada no Brasil, conforme cita Oliveira (2018). Ainda segundo a autora, essa barragem foi edificada com a finalidade de produzir energia elétrica para extração de diamantes em uma mina.

Até o ano de 2020, no Brasil, existiam 21.953 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), dos mais variados tipos e objetivos, de acordo com o relatório anual de segurança de barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021).

3.1.3. Objetivo das barragens:

Costa (2012) relata que há dois grandes conjuntos de barragens, no que diz respeito a seus objetivos. O autor ainda menciona que o objetivo de uma barragem é o aspecto mais importante para o planejamento da mesma.

3.1.3.1. Barragens de regularização

O intuito dessas barragens é de regularizar o regime hidrológico do curso hídrico, de acordo com Costa (2012). Isso é feito de forma a acumular água ao longo dos meses de maior afluência, e utilizá-la nos períodos mais secos, também cita o autor.

O autor também diz que o volume acumulado é a razão de toda barragem de regularização, já o aumento do nível d'água é com o objetivo de geração de energia elétrica, em virtude da energia potencial hidráulica que a queda d'água causa (COSTA, 2012).

Essa elevação do nível também beneficia a navegação, na jusante pois regulariza a vazão, bem como na montante, devido ao afogamento de corredeiras ou cachoeiras, como menciona Costa (2012).

3.1.3.2. Barragens de contenção

Já as barragens de contenção possuem o propósito de interromper o fluxo da água temporariamente, ou também armazenar sólidos, ou misturas de sólidos e líquidos, como rejeitos de mineração, resíduos industriais ou, simplesmente, sedimentos (COSTA, 2012).

Costa (2012) também explica que a água é retida com a intenção de neutralizar possíveis ondas de cheia, que viriam a prejudicar a jusante. Enquanto que os sólidos são acumulados com o objetivo de não contaminar a região a jusante do barramento.

3.1.3.3. Barragens para geração de energia

De forma mais específica, há também as barragens para hidrelétrica, objetivo esse da barragem estudada no presente trabalho. Esse tipo de barramento se encaixa no primeiro grupo, barragens para regularização, como supramencionado.

Na escolha de seu local de construção, essa característica de barragem privilegia regiões em que há um considerável desnível do perfil longitudinal do curso

hídrico, isso porque é onde se encontra um maior potencial hidráulico, essencial para a geração de energia elétrica (COSTA, 2012).

3.1.4. Tipos de Barragens:

Existem vários tipos de barragens, dos mais primitivos aos com tecnologia bastante avançada. Sendo que este primeiro grupo é limitado a obras de pequenas dimensões (COSTA, 2012).

Costa (2012) divide os tipos de barragens em dois grandes conjuntos, convencionais e não convencionais, que ainda são divididos e subdivididos.

3.1.4.1. Barragens convencionais

- Barragens de terra:

As barragens de terra podem ainda ser divididas em homogêneas e zonadas. As primeiras são assim chamadas quando são construídas majoritariamente por um único material, como mostrado na Figura 1 (a). Enquanto as últimas possuem materiais de diferentes características, divididos em zonas, Figura 1 (b) (COSTA, 2012).

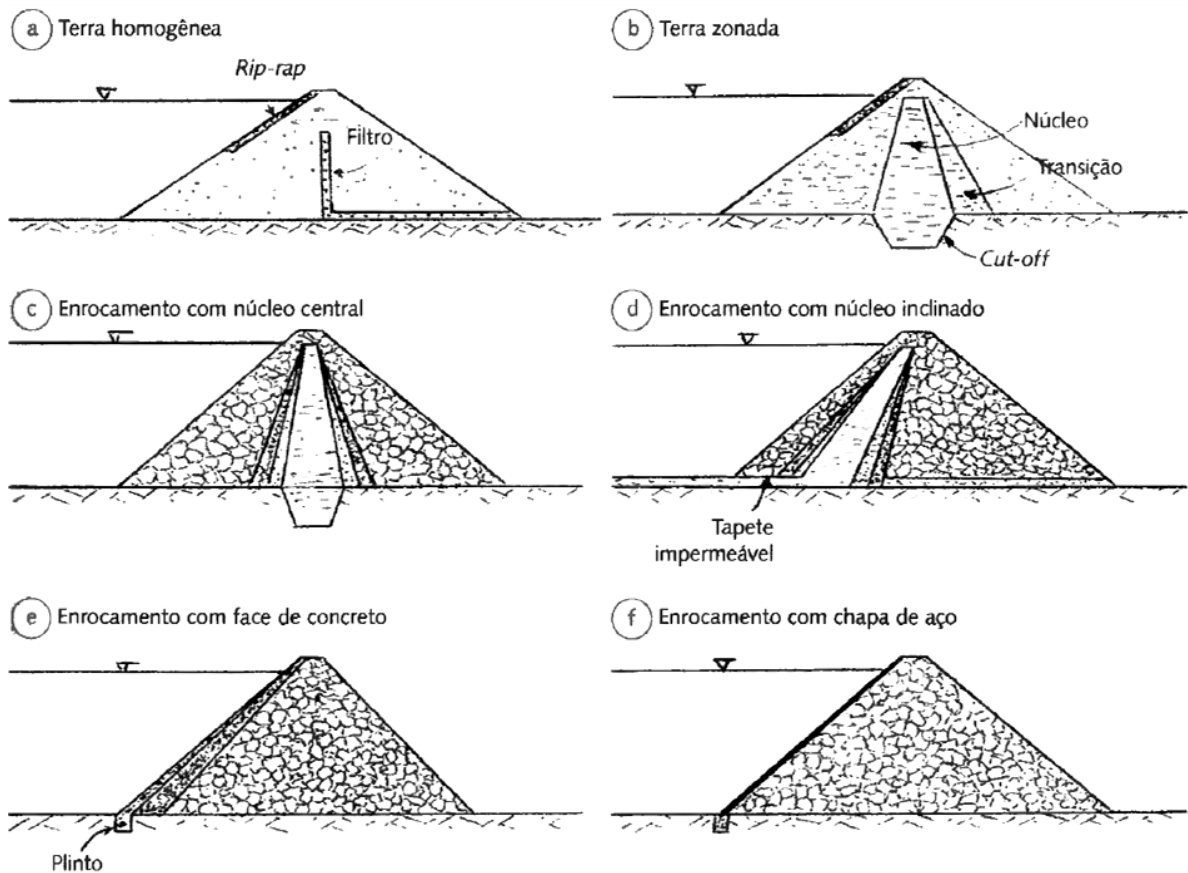
Barragens de terra homogênea é o tipo com mais exemplares neste país, isso se deve ao fato do território nacional possuir vales bastante abertos e vasta disponibilidade de materiais terrosos (MASSAD, 2010). Além disso, o autor também cita que barramentos deste gênero podem aceitar fundações mais deformáveis.

- Barragens de enrocamento:

Já as barragens de enrocamento são segmentadas em barragens com núcleo impermeável e barragens com face impermeável. Independentemente do tipo, as construções em enrocamento possuem material rochoso como principal componente estrutural utilizado (COSTA, 2012).

Costa (2012) explica que, nos barramentos com núcleo impermeável, a estanqueidade se dá por meio de um núcleo de material argiloso, separado do enrocamento por zonas de transição que servem para evitar o carreamento da matéria fina. Esse núcleo pode ser tanto centralizado quanto inclinado, como está exibido nas Figuras 1 (c) e 1 (d), nessa ordem. O autor também cita que a face impermeável é feita por revestimento impermeabilizante no talude de montante, podendo ser de asfalto ou chapa de aço, como mostrado nas Figuras 1 (e) e 1 (f), respectivamente.

Figura 1 – Representação das barragens de terra e de enrocamento.



Fonte: Costa (2012).

- Barragens de concreto:

No caso das barragens de concreto, elas podem ser divididas em barragens de gravidade, gravidade aliviada, em contraforte, de concreto rolado (compactado) e em arco (COSTA, 2012).

Costa (2012) apresenta que as barragens de gravidade são estruturas maciças, como mostradas na Figura 2 (a), e não possuem grandes armações, sendo assim, a construção trabalha em apenas sob compressão. MASSAD (2012) menciona que as barragens de gravidade atuam em razão de seu próprio peso, por isso o nome.

Massad (2010) define que esse tipo de barragem, geralmente, necessita, de uma fundação em rocha, em função da capacidade de suporte do terreno.

Por outro lado, as barragens de gravidade aliviada se diferenciam da anterior, pois sua estrutura é vazada, como mostrada na Figura 2 (b). Esse tipo de barragem imprime menores esforços na fundação, quando comparado com a barragem de

gravidade, porém, em razão da tração sofrida pela construção, é necessário um uso maior de armações (COSTA, 2012).

Na Figura 2 (c), pode ser observada a barragem em contraforte. Essa é inclinada e apoiada em contrafortes. Devido à inclinação, o peso da água do reservatório que há acima da barragem é favorável a estabilidade, isso porque esse peso é adicionado ao peso próprio da barragem (MASSAD, 2010).

Massad (2010), ainda, menciona que esse tipo de estrutura possui também como vantagem o volume reduzido de concreto que é necessário para sua construção, no entanto, há uma exigência maior por armação. Além disso, segundo o autor, a construção precisa de cuidados mais rigorosos com a fundação, em razão de sua base reduzida, contudo, isso gera vantagens em relação à subpressão.

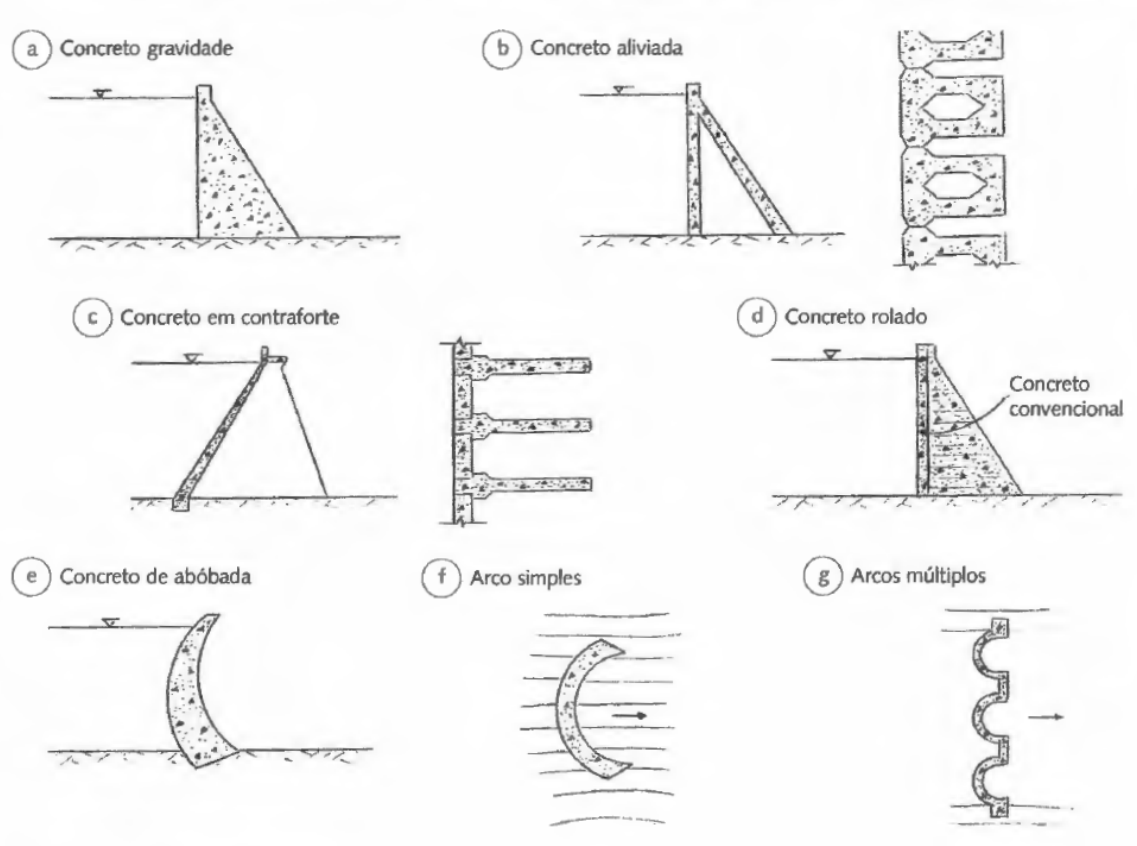
Em concordância, Costa (2012) diz que esse tipo de barramento possui uma estrutura ainda mais leve que a anterior, barragem de gravidade aliviada, mas também sofre maior tensão de contato e, portanto, necessita de maior armação.

Já as barragens de concreto rolado, ou compactado, são também barragens de gravidade, com diferencial que o concreto é espalhado e compactado por camadas. Esse tipo de barragem necessita de uma camada de concreto convencional em sua face montante para garantir a vedação, como está na Figura 2 (d) (COSTA, 2012).

Nas barragens em abóbada, ou em arco, há sempre uma curvatura em dois sentidos, horizontal e vertical, como está mostrada na Figura 2 (e). Ainda podem ser construídas em arco simples (Figura 2 (f)) ou em arcos múltiplos (Figura 2 (g)), como menciona Costa (2012).

Esse tipo de barragem divide suas cargas geradas pela pressão hidráulica com as ombreiras. Isso acontece em razão do efeito de arco gerado (COSTA, 2012).

Figura 2 – Representação das barragens de concreto.



Fonte: Costa (2012).

- Barragens mistas:

A questão dessas barragens é que são compostas com diferentes materiais, podendo ser uma seção mista, em que possui mais de um material transversalmente, ou mista em seu traçado, quando possui materiais diferentes longitudinalmente (COSTA, 2012).

Massad (2010) comenta que as barragens de terra-enrocamento são mais estáveis que as barragens de terra. O autor cita que ângulo de atrito elevado do material que compõe o enrocamento garante a estabilidade da obra, enquanto o núcleo de material argiloso garante a estanqueidade da mesma.

3.1.4.2. Barragens não convencionais

Existem algumas barragens que possuem menos exemplos hoje construídos, quando comparadas com as citadas no item anterior. No entanto, não deixam de se desenvolver (COSTA, 2012).

Costa (2012) cita e explica algumas barragens que se enquadram nesse aspecto. Tais como as barragens de gabião, que são assim chamadas por possuírem uma parede de gabião a jusante e material argiloso a montante, necessitando de uma manta geotêxtil entre os dois materiais para evitar carreamento dos mais finos.

Há também barragens de madeira, no caso, madeira de boa qualidade. A estanqueidade desse tipo de construção se dá em razão de uma chapa de aço que revestirá o barramento. Também precisam ser preenchidas, pois caso não sejam, essas estruturas se deslocariam devido às pressões hidrostáticas (COSTA, 2012).

Por fim, existem as barragens de alvenaria de pedra, similar às barragens de gravidade, já citadas. Essas construídas manualmente com alvenaria de pedra e cimento (COSTA, 2012).

3.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE PROJETOS DE BARRAGENS

3.2.1. A vida de uma barragem

Costa (2012) menciona que há uma vida útil a se considerar para a construção de um barramento. O autor ainda diz que essa vida é dividida, de forma bastante definida, em três partes, sendo eles: o projeto, a construção e a operação.

A fase de projeto possui a soma dos estudos, investigações e análises que foram utilizadas para escolher todos os parâmetros da obra. Já a construção é o período em que a barragem e todas as demais estruturas associadas, que possibilitarão o uso adequado da barragem para seu fim, são construídas. Esse ciclo é finalizado com o primeiro enchimento do reservatório. Enquanto a fase de operação abrange o verdadeiro funcionamento da barragem para seu devido fim (COSTA, 2012).

Em concordância, Medeiros (2020) menciona que a vida útil da barragem, de forma integral, compõe a sua fase de operação.

3.2.2. O projeto de uma barragem

Massad (2010) enfatiza que o projeto para uma barragem de terra necessita se enquadrar em dois elementos essenciais, segurança e economia. O autor também menciona que as vidas humanas dependem da segurança da barragem, bem como bens comunitários e individuais, fazendo com que esse elemento se torne, evidentemente, o fator primordial para o projeto.

Massad (2010) cita algumas situações que podem afetar a integridade da barragem, e a segurança dela precisa ser garantida nessas ocorrências. Sendo eles: o transbordamento, que pode danificar a estrutura do barramento por abertura de brechas, a erosão interna, a ruptura dos taludes artificiais e naturais, o efeito das ondas, que se formam no reservatório e sua energia pode gerar um desgaste no talude de montante, e o efeito erosivo, causado pelo escoamento da água da chuva.

Cruz (2004) aponta alguns pontos a se considerar no projeto básico para a construção de uma barragem.

No que diz respeito aos materiais construtivos do barramento, segundo Cruz (2004), é necessário definir muito bem os volumes de material que serão utilizados, bem como as fontes de onde serão retirados esses volumes. Além disso, o autor menciona que há outros materiais que precisam ser levados em consideração, materiais que não estarão presentes ao final da construção, mas que são utilizados durante o período da obra, por exemplo, os insumos usados para o desvio do curso hídrico. Existe também, de acordo com o autor, a preocupação indispensável com o fator relativo à compactação. Durante o projeto básico, é importante que se façam aterros experimentais sempre que houver essa possibilidade, como ainda cita o autor sobre o assunto.

Há a necessidade de conhecer a geologia estrutural da região da construção de forma nítida. Caso sejam descobertas falhas geológicas apenas durante o projeto executivo, acarretará em custos e atrasos da obra. Para evitar esse tipo de adversidade, precisam ser feitas sondagens a percussão e rotativas, bem como abertas trincheiras exploratórias, poços e galerias, para um adequado estudo da geologia da área (CRUZ, 2004).

Como concorda Echague et al. (2020), na humanidade, a geologia estrutural passou a ter um grande significado para a análise e construção de barragens.

No projeto básico, para adiantar o processo de tratamento da fundação, pode ser feito um estudo hidrogeológico. Dessa forma, é possível identificar as camadas permeáveis da fundação que ficarão em contato com o reservatório (CRUZ, 2004).

Repostas de engenharia mais arrojadas e complexas devem ser deixadas de lados, e dar preferência a soluções mais simples, de garantida confiabilidade e

comprovadas pela prática. Além disso, segurança e confiabilidade precisam ser colocadas à frente das ponderações de custo (ELETROBRAS, 2003).

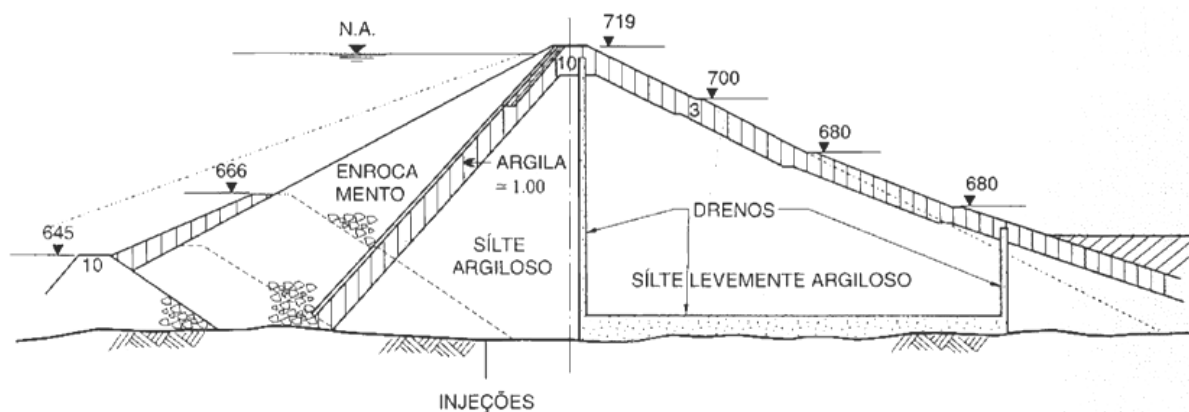
Já o projeto executivo precisa se prolongar desde o início da construção até os primeiros anos de funcionamento da barragem. Neste momento, é que se torna possível confirmar a exequibilidade da obra. Repostas alternativas só podem ser levadas em consideração quando dados se tornam conhecidos após o fim da etapa de projeto básico (CRUZ, 2004).

3.2.3. Escolha da seção transversal

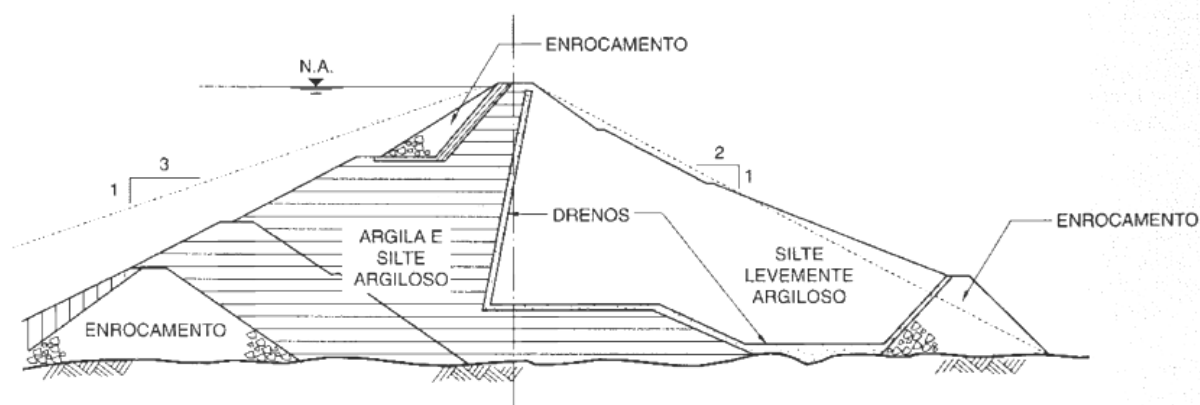
A escolha da seção transversal de uma barragem de terra sempre dependerá das condições do local da construção, como formato do vale e natureza da fundação, bem como de muitos aspectos construtivos, de acordo com Cruz (2004). Em se tratando de seção transversal composta por diversos materiais, há de se preocupar também com o aproveitamento de cada material em sua posição mais vantajosa e levando-se em consideração a fonte desses materiais, de forma a alcançar a composição e mobilização mais rentável (CRUZ, 2004).

Na figura 3 (a), está exposta a seção original desenvolvida para a Barragem de Paraibuna, já na Figura 3 (b), está apresentada a seção alternativa, com os mesmos volumes de matéria, no entanto, a seção posterior mostrou-se mais vantajosa (CRUZ, 2004).

Figura 3 – Seções original e alternativa para a Barragem de Paraibuna.



a) - Projeto original



b) - Seção alternativa

Fonte: Mello apud Cruz (2004).

Deve ser feito um estudo dos materiais de escavação do local de construção do barramento, pois esses materiais podem ser utilizados na própria barragem, deixando-os de lado apenas se não possuírem propriedades adequadas para o uso na obra (ELETROBRAS, 2003).

A ELETROBRAS (2003) fez algumas considerações sobre a definição das seções transversais da barragem. Todo material presente no local é aproveitado, exceto em casos que não há nenhuma aplicabilidade para o mesmo. Quando há a necessidade de buscar materiais de outras localidades, é necessário que se faça uma ponderação com base no local de onde será trazido, buscando sempre as soluções mais econômicas, o tipo de material também é de muita importância, porque certos

materiais permitem que sejam feitos taludes mais íngremes, com menor uso de solo, então, em algumas situações, pontos mais distantes com materiais que tenham essa possibilidade são mais rentáveis (ELETROBRAS, 2003).

A autora também menciona sobre as condições climáticas da região da construção da barragem, pois em locais de chuva abundante, o rendimento será menor, e a obra mais cara, assim, é dada prioridade a materiais que não necessitem do tempo seco para seu uso. Para a escolha da seção transversal, também levado em consideração o cronograma geral da obra, pois essa precisa ser adequada para se encaixar ao projeto de forma favorável ao custo final, por exemplo, se haverá necessidade de estoques de material (ELETROBRAS, 2003).

A seção da barragem também influencia no esquema de desvio do curso hídrico em que será inserida, podendo tornar esse esquema mais fácil e mais barato e, portanto, esse aspecto também é levado em consideração quando se faz a escolha da seção. Como já dito, um talude mais íngreme diminui o custo final da construção, mas um talude mais inclinado requer uma fundação que suporte mais esforços, então outro fator importante são as características geológico-geotécnicas e topográficas (ELETROBRAS, 2003).

Por fim, há de se ponderar também o arranjo geral da barragem e como a decisão sobre a seção transversal da barragem irá implicar nas demais estruturas, bem como qual a melhor forma de conciliar todas as partes de forma a diminuir o custo total (ELETROBRAS, 2003).

3.3. ESTABILIDADE DE TALUDES

Talude é uma superfície qualquer inclinada, podendo ser de solo ou rocha, natural ou produzido pelo homem. Há inúmeras situações em que é necessário que seja feito um estudo a respeito da estabilidade dos taludes, sejam eles naturais ou construídos (GERSCOVICH, 2016).

Da mesma forma, a norma NBR 11682 (ABNT, 1991) define talude natural como sendo aquele que é formado somente pela natureza, enquanto o talude artificial como o talude que foi moldado ou alterado pelo homem.

Em barragens, caso este do presente trabalho, trata-se de taludes, seja aterro ou corte, construídos pelo homem. Assim, as análises de estabilidade devem ser feitas

em diferentes fases da vida da barragem, desde o fim da construção, em sua operação e em situações de rápido rebaixamento do reservatório (GERSCOVICH, 2016).

A ruptura de taludes se caracteriza pela geração de uma superfície de cisalhamento sem interrupções na porção de solo, também menciona a autora. Como em taludes construídos há um maior conhecimento sobre as características geotécnicas, o estudo de estabilidade se torna menos complexo que em taludes naturais. O início da instabilidade dos taludes se dá quando as tensões cisalhantes coincidem com à resistência ao cisalhamento e, então, o fator de segurança se iguala a 1. Isso acontece devido à redução da resistência ou ao aumento da solicitação (GERSCOVICH, 2016).

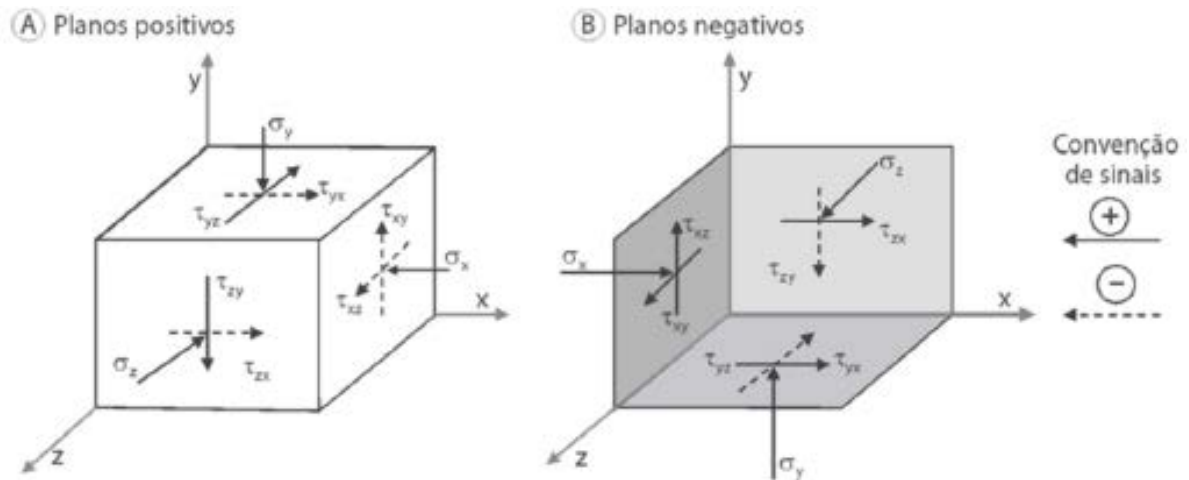
Viterbino (2020), nesse sentido, indica que o fator de segurança irá determinar, numericamente, se o talude se encontra estável e, em consequência disso, implicará na segurança da barragem como um todo.

3.3.1. Tensões

De acordo com Gerscovich (2016), há esforços causados pelo peso próprio de qualquer porção em uma massa de solo. Esses esforços definem o estado de tensão normal, no caso da resultante na direção normal, e tensão de cisalhamento, no caso da resultante na direção tangencial, como diz a autora.

No que é relativo a tridimensionalidade, Gerscovich (2016) expõe que as tensões são divididas em nove componentes, como mostra a Figura 4, tanto em planos positivos quanto em planos negativos.

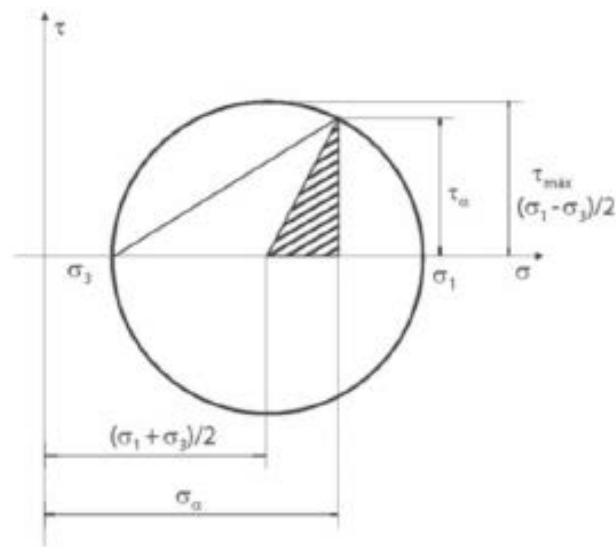
Figura 4 – As nove componentes da tensão tridimensional.



Fonte: Gerscovich (2016).

O Círculo de Mohr é um recurso gráfico em que os estados de tensão de um determinado ponto são retratados por coordenadas, sendo as tensões normais representadas pelas abscissas e as tensões de cisalhamento pelas ordenadas. Na Figura 5, está exposta essa solução gráfica. A partir das variações dos estados de tensão de um esforço, representadas por círculos de Mohr, pode-se definir a trajetória de tensões. Através da direção dessa trajetória definida, pode-se classificar o tipo de carregamento que gerou esse esforço (GERSCOVICH, 2016).

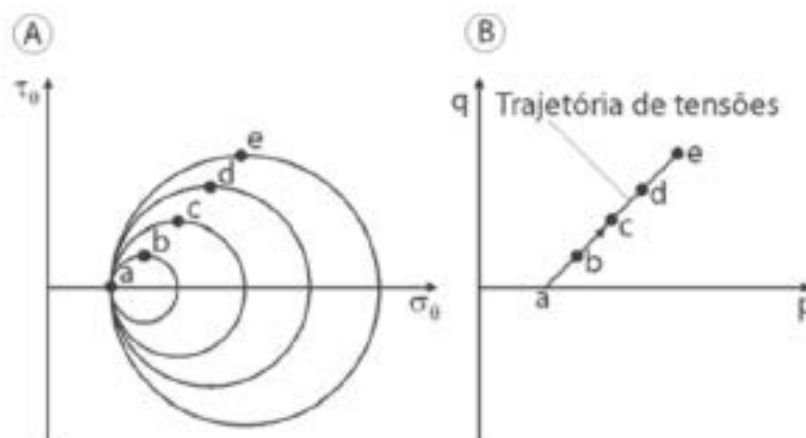
Figura 5 – Círculo de Mohr.



Fonte: Gerscovich (2016).

A trajetória de tensões gerada por um esforço qualquer pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 – Trajetória de tensões.



Fonte: Gerscovich (2016).

3.3.2. Tensões efetivas

Cruz (2004) comenta que apenas a partir do ano de 1960 que a tensão efetiva passou a ser utilizada em projetos de barragens. Ainda como cita o autor, essa

mudança se deve a “*Shear Strenght Confere*”, em tradução literal, conferência de resistência ao cisalhamento, realizada nesse mesmo ano nos Estados Unidos, em que o uso da pressão efetiva foi consagrado.

Cruz (2004) também define que, somente anos depois dessa conferência, as barragens já construídas tiveram seus cálculos de estabilidade refeitos, levando-se em consideração a tensão efetiva.

Em solos saturados, parte da tensão normal é transmitida ao solo, enquanto outra parte é transmitida para a água. O mesmo já não acontece com as tensões cisalhantes, visto que a água não suporta nenhuma tensão de cisalhamento. A parcela da tensão que é transmitida apenas aos grãos é a parte denominada tensão efetiva, essa compõe os fatores que definem a resistência dos solos. Os solos conseguem suportar uma alteração maior de tensões cisalhantes quanto maior for a tensão efetiva (GERSCOVICH, 2016).

3.3.3. Deformações

Tanto as tensões normais quanto as tensões de cisalhamento podem gerar deformações. Quando se trata de deformações causadas somente por tensões normais, a deformação é volumétrica. Já quando são causadas apenas por tensões de cisalhamentos, é um desvio angular (GERSCOVICH, 2016).

3.3.4. Água versus estabilidade

Como já dito, quanto maior a pressão efetiva, ou seja, menor a poropressão, maior é a resistência do solo ao cisalhamento, portanto, é possível fazer uma relação entre chuva e movimento de massa em taludes. Devido à infiltração, quando ocorre a chuva, menor é a tensão efetiva no solo e dessa forma, a incidência de movimentos de massas nos taludes aumenta (GERSCOVICH, 2016).

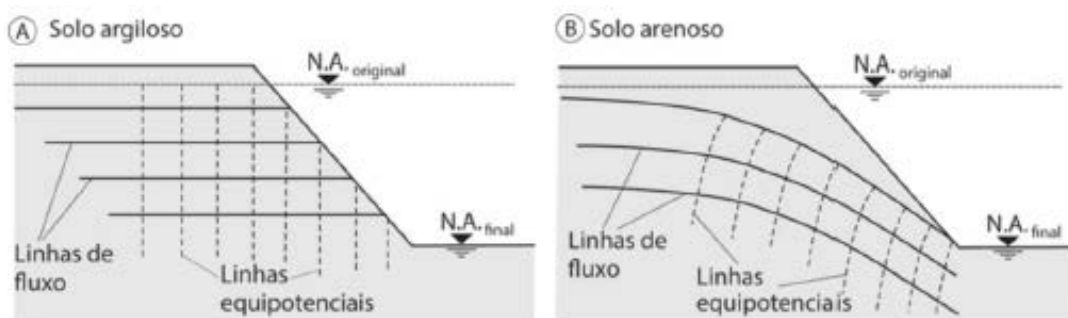
Gerscovich (2016) complementa que quando há água no solo, sua seção pode ser decomposta em três trechos, sendo não saturada, saturada por capilaridade e saturada inferior ao nível d'água. A autora também menciona que as pressões de águas são positivas abaixo do nível freático e negativas quando acima dele. Nesta região, em que a pressão da água é negativa, é somada uma resistência, que depende da sucção, pressão negativa, ainda de acordo com a autora.

3.3.5. Fluxo de água

O fluxo de água pela barragem pode carrear solo, originando processos de erosão interna, comumente conhecido por *piping*. Esse processo pode ser evitado por filtros e drenagens adequadas para a construção, fazendo com que o fluxo de água não encontre um caminho preferencial e, assim, diminuindo a possibilidade de dano à estrutura (CRUZ, 2004).

Bastantes cenários devem ser considerados para a análise de estabilidade de taludes, pois diversas situações podem ocorrer ao longo da barragem como um todo. Nestas análises, um fator fundamental é a permeabilidade, que está diretamente ligado ao tipo de material utilizado na construção da barragem, como mostra a Figura 7, em que o solo argiloso e o solo arenoso vivenciam situações diferentes ao fim do mesmo processo, o rápido rebaixamento do reservatório (GERSCOVICH, 2016).

Figura 7 – Diferentes situações ao fim do rápido rebaixamento do reservatório.



Fonte: Gerscovich (2016).

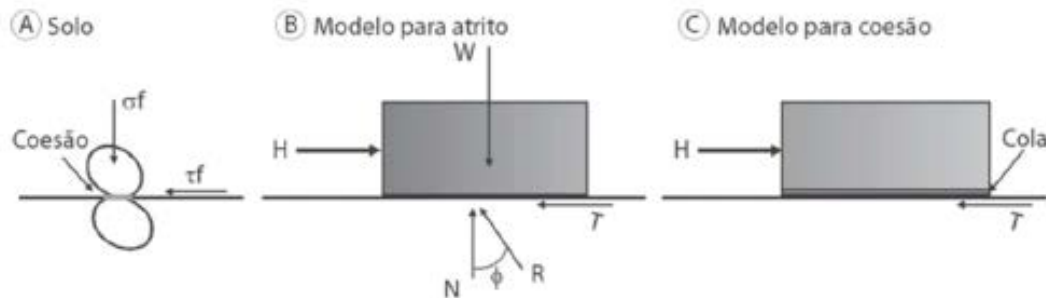
3.3.6. Resistência ao cisalhamento

Para que o talude suporte carregamentos e descarregamentos sem sofrer instabilidade, os grãos da porção de solo precisam resistir aos esforços cisalhantes, como cita Gerscovich (2016).

Gerscovich (2016) relata que a resistência ao cisalhamento de solos é em função de dois fatores, sendo resistência entre partículas e imbricamento. O primeiro refere-se ao atrito entre as partículas e à coesão, ou seja, a existência de ligações físico-químicas entre as partículas, como está mostrado na Figura 8. Já o imbricamento trata-se da resistência devida à disposição das partículas, isso porque

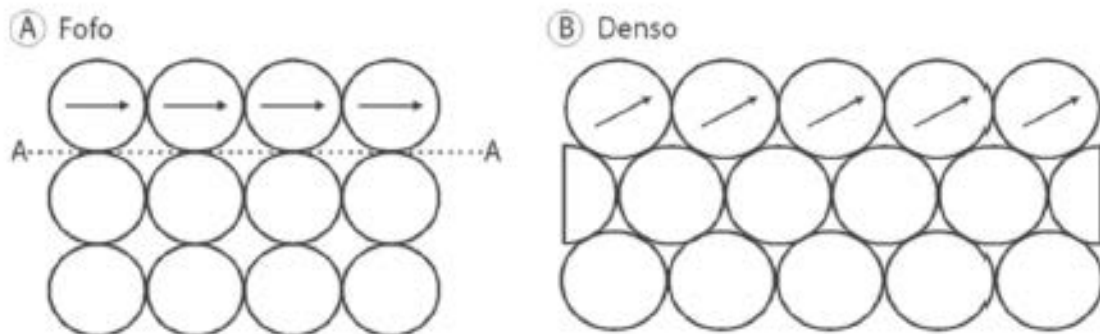
em solos com mais vazios, a movimentação da massa na horizontal sofre resistência entre grãos somente, não sendo necessário o movimento ascendente da partícula, enquanto em porções mais densas, um esforço maior é necessário para superar a resistência, como representado na Figura 9 (GERSCOVICH, 2016).

Figura 8 – Atrito e coesão.



Fonte: Budhu apud Gerscovich (2016).

Figura 9 – Imbricamento.



Fonte: Gerscovich (2016).

3.3.7. Fator de segurança

A norma NBR 11682 (ABNT, 1991) define que fator de segurança é dado pela relação entre as tensões resistentes e as tensões instabilizantes. A norma ainda diz que o fator de segurança calculado não coincide com o real, pois existem imprecisões devido às hipóteses simplificadoras.

De acordo com a ELETROBRAS (2003), vários cenários precisam ter sua estabilidade pelo fator de segurança, pois o escorregamento dos taludes pode levar à ruína da estrutura. Sendo assim, a ELETROBRAS (2003) definiu alguns limites para

o fator de segurança em cenários relevantes da vida da barragem, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Critérios de aceitação de fator de segurança.

Caso	Coeficiente de Segurança	Observações
Final de Construção	1,3 (*)	Taludes Montante e Jusante
Rebaixamento Rápido	1,1 a 1,3 (**)	Valor mínimo para solos dilatantes Valor máximo para solos que contraem no cisalhamento
Percolação Estável	1,5	Talude Jusante
Análise Sísmica	1,0	Taludes Montante e Jusante

(*) Para barragens acima de 1 m de altura sobre fundações relativamente fracas, usar o fator de segurança mínimo de 1,4.

(**) Nos casos em que o rebaixamento ocorre com frequência, considerar coeficiente 1,3.

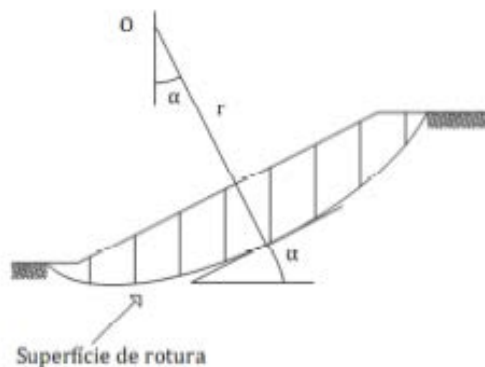
Fonte: Adaptada de ELETROBRAS (2003).

Com relação à análise sísmica, a ELETROBRAS (2003) menciona que as cargas sísmicas a serem utilizadas correspondem a 5% da aceleração da gravidade na direção horizontal e 3% na direção vertical.

3.3.8. Método de Análise de Estabilidade – Morgenstern-Price

Os métodos utilizados atualmente para a análise de estabilidade de estruturas de terra utilizam da divisão da massa de solo, acima da superfície de deslizamento, em fatias verticais de variadas larguras, dependendo de certas condicionantes, não sendo especificada a largura da fatia, tampouco que as fatias de uma mesma massa de solo possuam larguras iguais. Lembra-se apenas que quanto menor a espessura de cada fatia, maior a precisão dos resultados. Na Figura 10, pode se ver um exemplo dessa divisão em fatias de uma porção de solo genérica (FREITAS, 2011).

Figura 10 – Fatias de uma massa de solo genérica.



Fonte: Freitas (2011).

A superfície crítica de ruptura geralmente não é circular. Sendo assim, é mais complexa que a análise para superfície circular. Além disso, o problema é indeterminado e requer que algumas hipóteses sejam usadas para determinar a solução do problema. Essas hipóteses são o que diferencia os métodos utilizados para tal análise. No caso do método de Morgenstern-Price, qualquer tipo de superfície de ruptura pode ser considerado. Este método foi apresentado em 1965. Este método de análise de estabilidade taludes satisfaz todas as condições de equilíbrio e de fronteira. O cálculo computacional é necessário para execução do método (FREITAS, 2011).

As forças atuantes em uma fatia de largura infinitesimal estão apresentadas no Quadro 1.

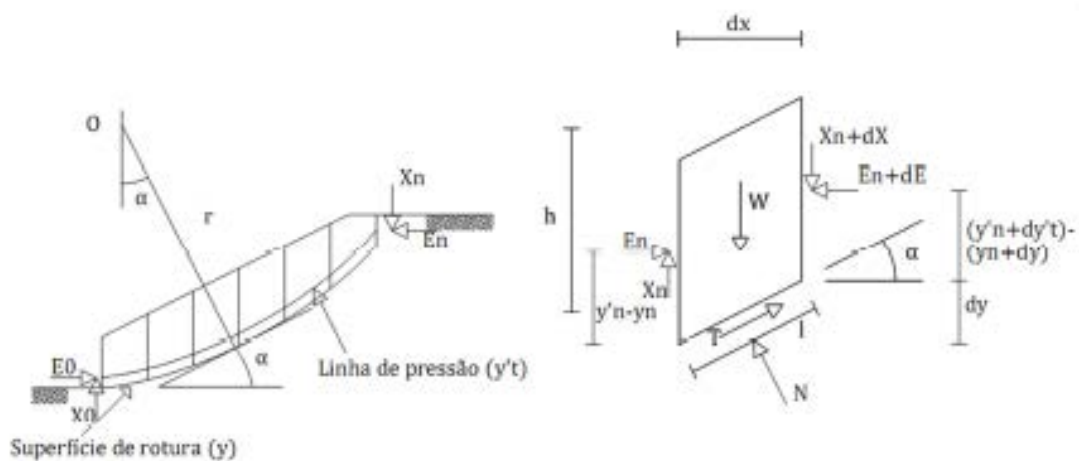
Quadro 1 - Forças atuantes em uma fatia de largura infinitesimal.

Força atuante	Símbolo
Impulso lateral	E'
Força vertical tangencial	X
Peso da fatia	dW
Pressão normal efetiva	dN'
Força tangencial na base	dT

Fonte: Freitas (2011).

A Figura 11 ilustra as forças aplicadas apresentadas no Quadro 1.

Figura 11 – Forças aplicadas a uma fatia.



Fonte: Freitas (2011).

A equação de equilíbrio em relação ao ponto médio da fatia se dá pela Equação (1).

$$E_n \times \left(y - y'_t + \frac{dy}{2} \right) - (E_n - dE_n) \times \left((y + dy) - (y'_t + dy'_t) - \frac{dy}{2} \right) - X \times \frac{dx}{2} - (X + dX) \times \frac{dx}{2} = 0 \quad (1)$$

A força de resistência ao corte (dT) é definida com base no critério de Mohr-Coloumb, segundo ainda cita FREITAS (2011). A Equação (2) mostra tal definição.

$$dT = \frac{1}{FS} \times (c' \times dx \times \sec \alpha + dN' \times \tan \phi') \quad (2)$$

em que:

α : ângulo da fatia com a horizontal;

c' : a coesão;

ϕ' : ângulo de resistência do corte, e

FS : fator de segurança.

4. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREEDIMENTO

A UHE Três Irmãos encontra-se entre os municípios de Andradina e Pereira Barreto, no estado de São Paulo. É uma barragem mista longitudinalmente, e possui duas eclusas, ou seja, além do aproveitamento energético, é uma barragem de navegação.

O empreendimento pertence à Tijoá Participações e Investimentos S.A. Os dados analisados foram fornecidos pelo empreendedor, a partir dos quais foram feitas as simulações.

4.2. ANÁLISE DOS DADOS

A metodologia desse trabalho consistiu em fazer uma análise da percolação no maciço e na fundação da barragem de terra da UHE Três Irmãos com auxílio do *software* SEEP/W, bem como analisar o fator de segurança dos taludes, gerado por simulação de estabilidade do *software* SLOPE/W. Ambos os *softwares* são pertencentes ao pacote GeoStudio. Para tais análises, Tijoá, empreendedor da UHE Três Irmãos, disponibilizou os projetos básico e executivo do empreendimento.

A percolação teórica e o fator de segurança foram gerados para quatro cenários possíveis:

- Operação normal, com percolação estável;
- Drenagem interna inoperante;
- Sismos;
- Rebaixamento rápido do reservatório.

Este rebaixamento é com período de 30 dias, rebaixando um metro por dia nos primeiros 20 dias, e com nível d'água do reservatório estabilizado nos últimos 10 dias.

O fator gerado para cada cenário foi comparado com os critérios de aceitação encontrados na literatura.

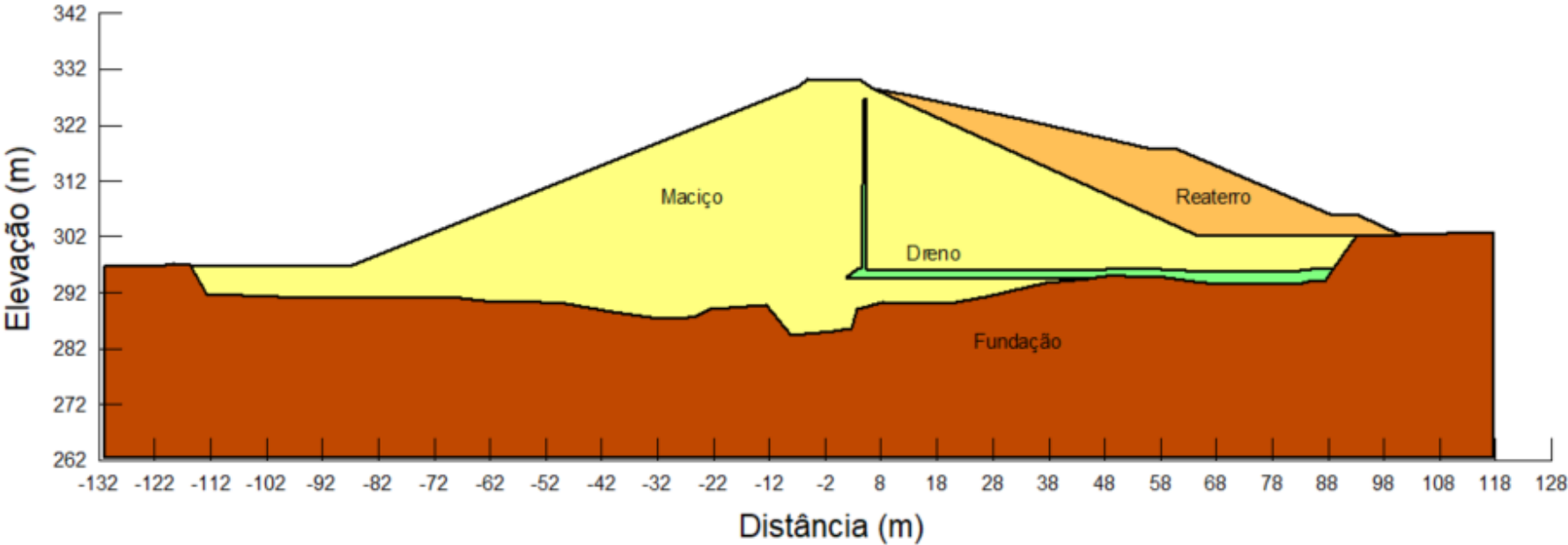
Duas seções foram escolhidas para as análises desse trabalho, sendo a seção 28+0,00 m, seção típica entre essa estaca e a estaca 35+5,00 m da barragem de terra da margem direita, e a seção da estaca 111+10,00 m da barragem de terra da margem esquerda. As escolhas foram feitas, pois a primeira se trata de uma seção próxima à

ombreira direita, enquanto a última se trata de uma seção próxima à estrutura de concreto, mais especificamente o muro de transição esquerdo. Ambas tratam-se de seções mais críticas do barramento.

4.3. SEÇÃO DA ESTACA 28+0,00 m

A Figura 12 mostra uma simplificação da seção da estaca 28+0,00 m, feita a partir do projeto executivo da UHE Três Irmãos.

Figura 12 – Seção da estaca 28+0,00 m.

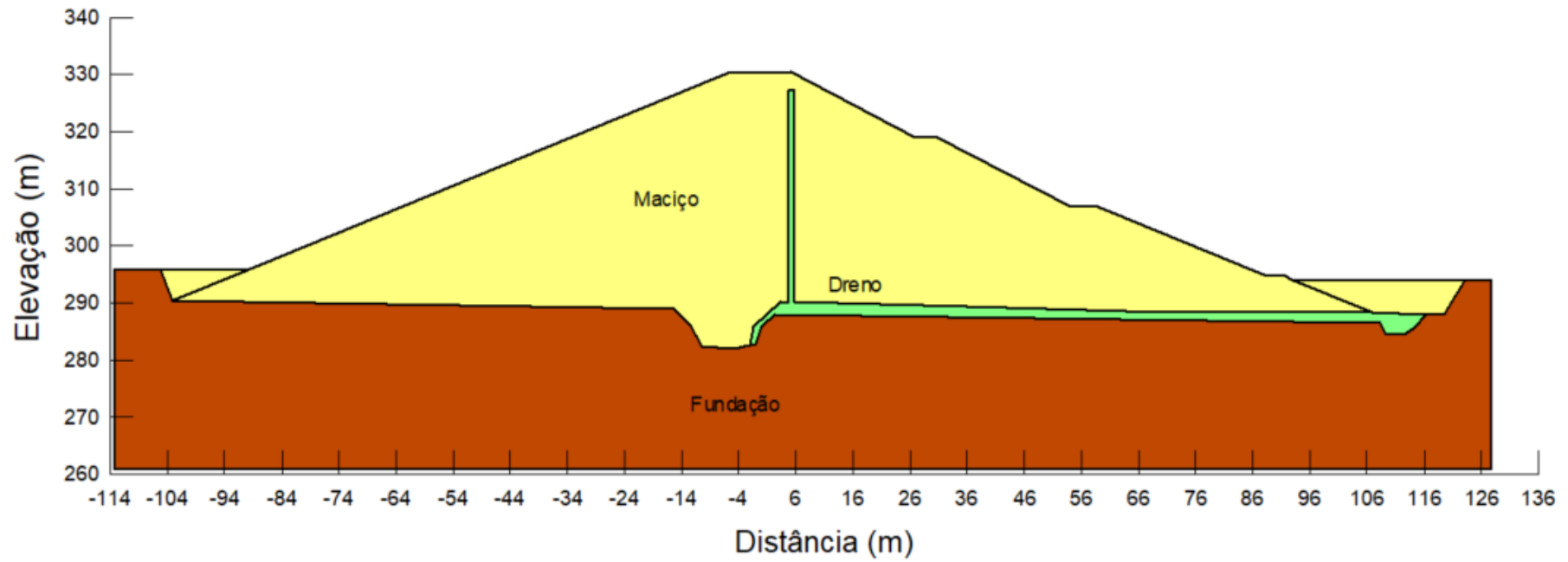


Fonte: Própria autora.

4.4. SEÇÃO DA ESTACA 111+10,00 m

A Figura 13 mostra uma simplificação da seção da estaca 111+10,00 m, feita a partir do projeto executivo da UHE Três Irmãos.

Figura 13 – Seção da estaca 111+10,00 m.



Fonte: Própria autora.

4.5. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

A Tabela 2 ilustra as características dos materiais utilizados na modelagem de percolação de ambas seções.

Tabela 2 – Características dos materiais na percolação.

Material	Permeabilidade (m/s)
Maciço	10^{-9}
Fundação	10^{-6}
Dreno	10^{-4}
Reaterro	10^{-9}

Fonte: Própria autora.

Já a Tabela 3 apresenta as características dos materiais utilizados na modelagem de estabilidade de taludes de ambas as seções.

Tabela 3 – Características dos materiais na estabilidade de taludes.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Maciço	21	25	23
Fundação	17	20	28
Dreno	18	0	35
Reaterro	21	25	23

Fonte: Própria autora.

Os valores exibidos na Tabela 2 e na Tabela 3 são baseados em valores encontrados na literatura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, estão apresentados os resultados e as discussões referentes às análises de percolação e estabilidade de taludes das seções.

5.1. SEÇÃO DA ESTACA 28+0,00 m

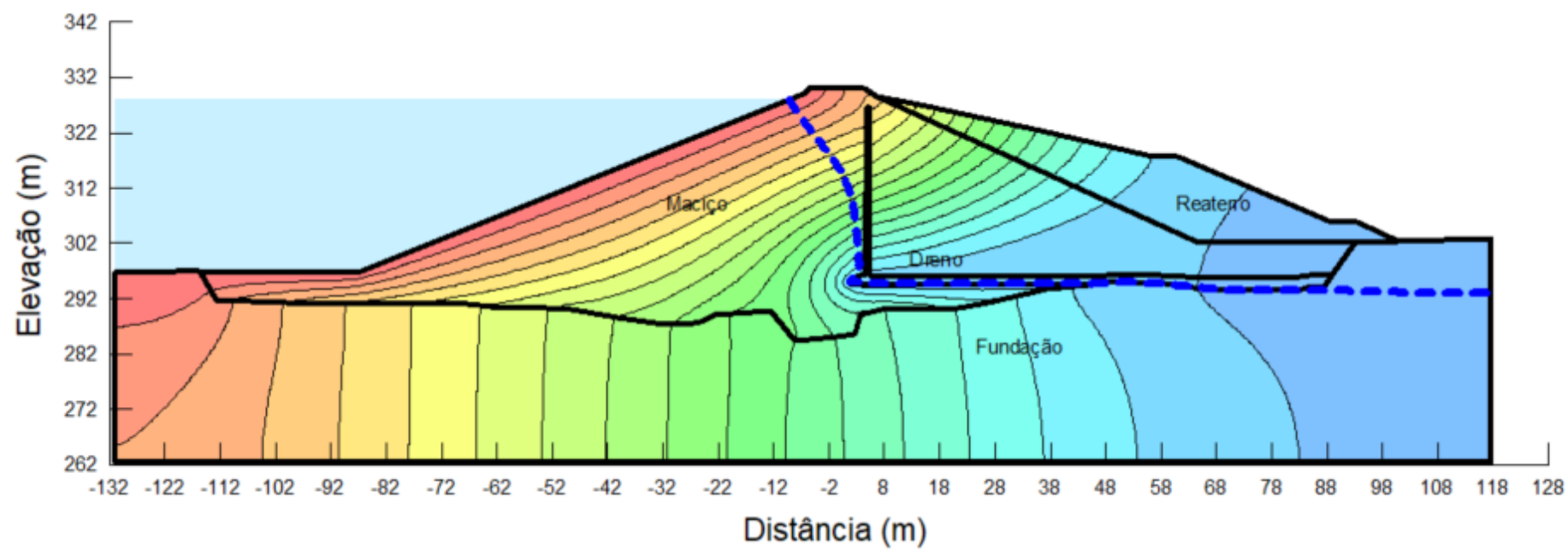
Os resultados para a seção da estaca 28+0,00 m estão apresentados divididos por cenários. Em todas as figuras, a linha pontilhada em cor azul representa o nível freático.

5.1.1. Operação normal

O cenário de operação normal se trata de percolação estável, com drenagem interna funcionando perfeitamente, sem nenhum tipo de adversidade.

A Figura 14 mostra o resultado da percolação teórica nessa situação.

Figura 14 – Percolação em operação normal da seção da estaca 28+0,00 m.

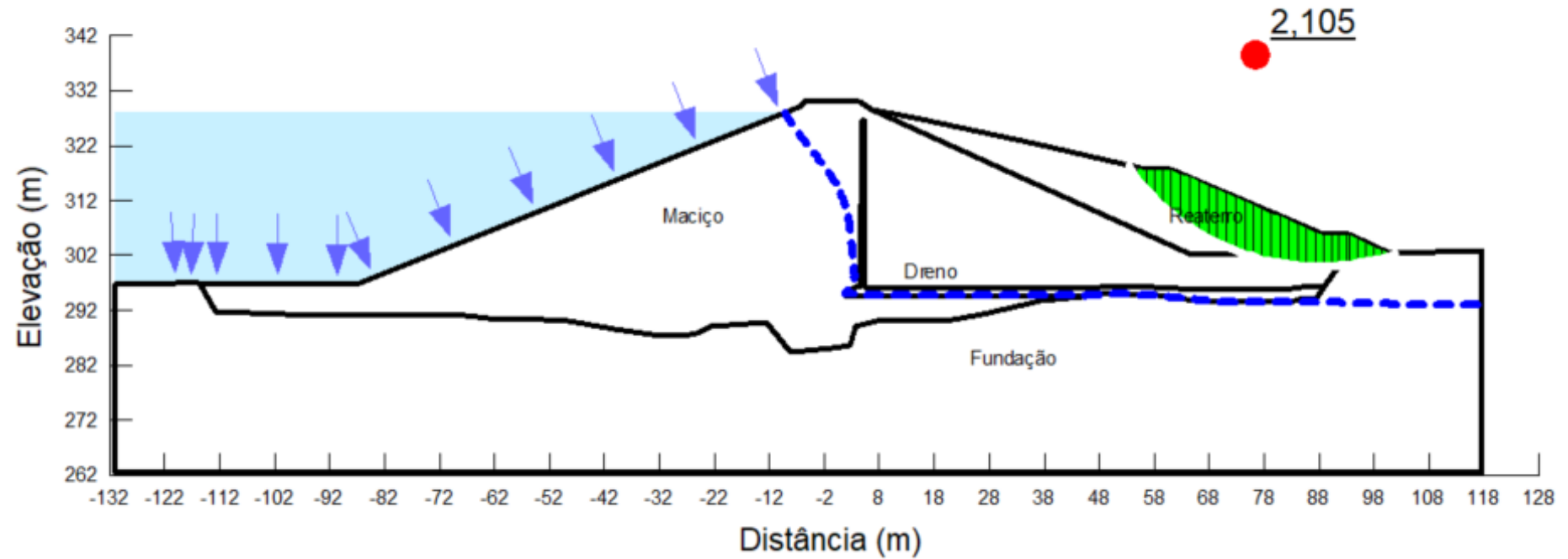


Fonte: Própria autora.

É possível observar pela Figura 14 que a linha freática percorre o talude montante, passa pelo filtro e segue pelo tapete drenante, sem atingir o talude jusante. Exibindo um funcionamento ideal para o dreno.

Já a Figura 15 mostra o fator de segurança para o talude jusante, quando a estrutura se encontra com a percolação mostrada na Figura 14.

Figura 15 – Fator de segurança do talude jusante com percolação em operação normal da seção da estaca 28+0,00 m.

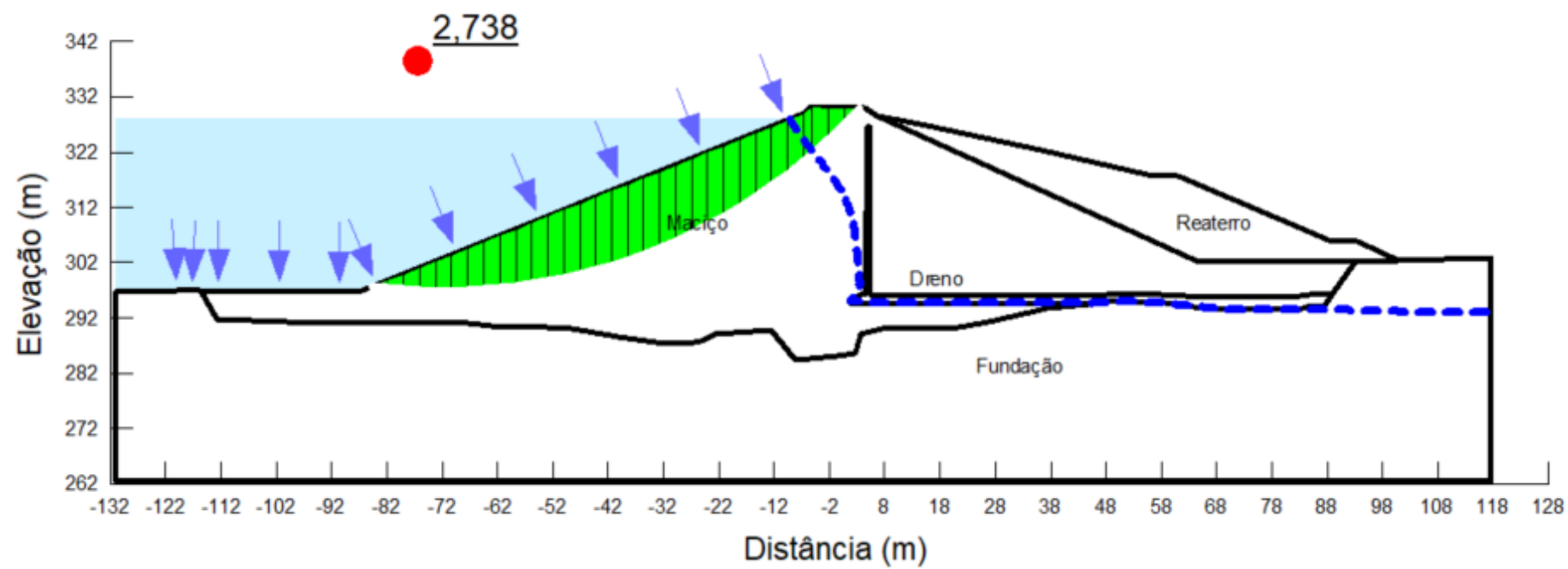


Fonte: Própria autora.

Esse fator de segurança está dentro dos critérios de aceitação encontrado na literatura. Como se observa a cunha em que o fator de segurança é mais crítico se limita praticamente à zona de reaterro, isso mostra que o reaterro está executando sua função com êxito, pois o talude jusante praticamente não seria afetado mesmo na situação de deslizamento dessa cunha.

O fator de segurança para o talude montante, quando a estrutura está com percolação estável está exibido na Figura 16.

Figura 16 – Fator de segurança do talude montante com percolação em operação normal da seção da estaca 28+0,00 m.



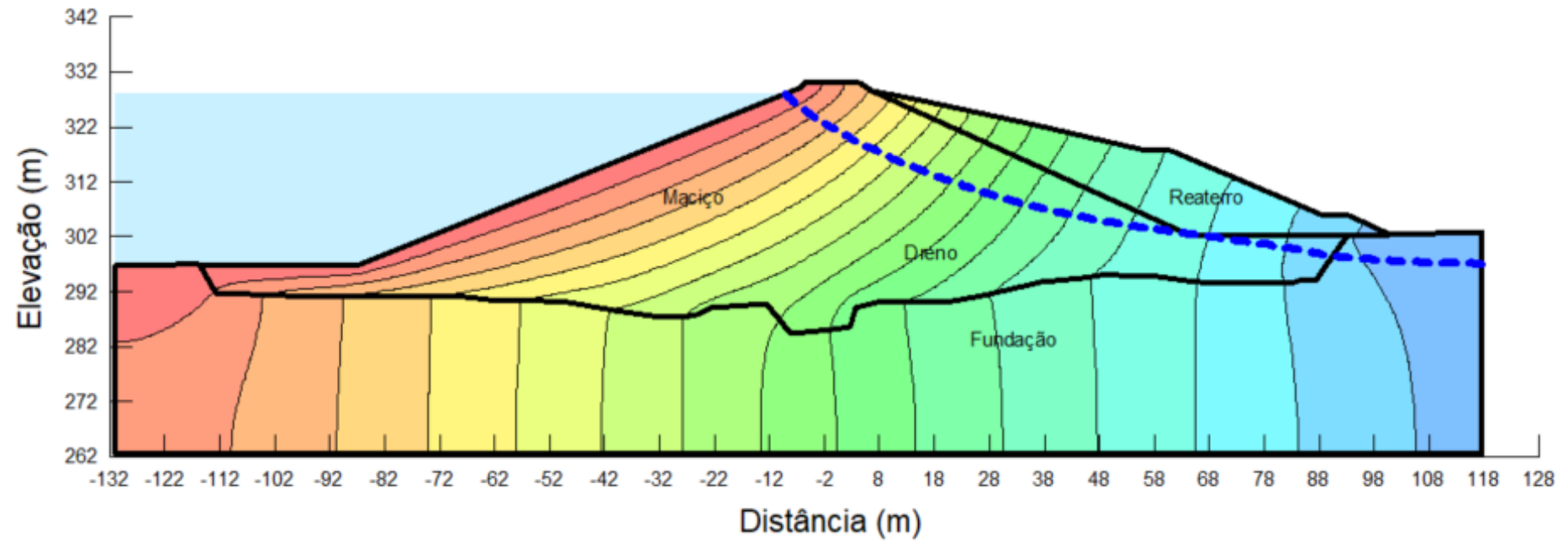
Fonte: Própria autora.

O talude de montante apresenta fator de segurança maior que o talude de jusante, como esperado, pois possui a carga da água presente no reservatório como esforço a favor de sua segurança.

5.1.2. Drenagem interna inoperante

Este cenário possui como característica o dreno completamente colmatado. A Figura 17 mostra o resultado da percolação teórica nessa situação.

Figura 17 – Percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 28+0,00 m.

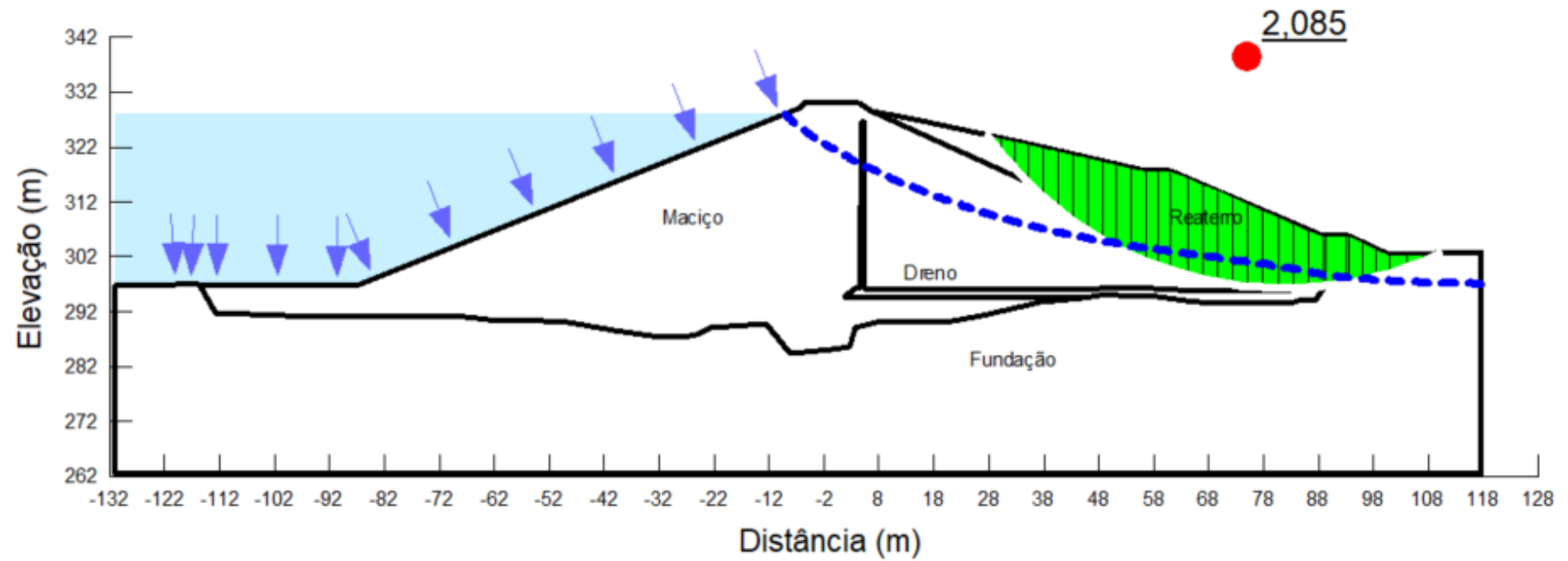


Fonte: Própria autora.

Nessa situação, a linha freática atravessa o maciço, e encontra-se consideravelmente mais elevada que no cenário de operação normal.

A Figura 18 exibe o fator de segurança para o talude jusante, quando a drenagem interna está inoperante.

Figura 18 – Fator de segurança do talude jusante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 28+0,00 m.

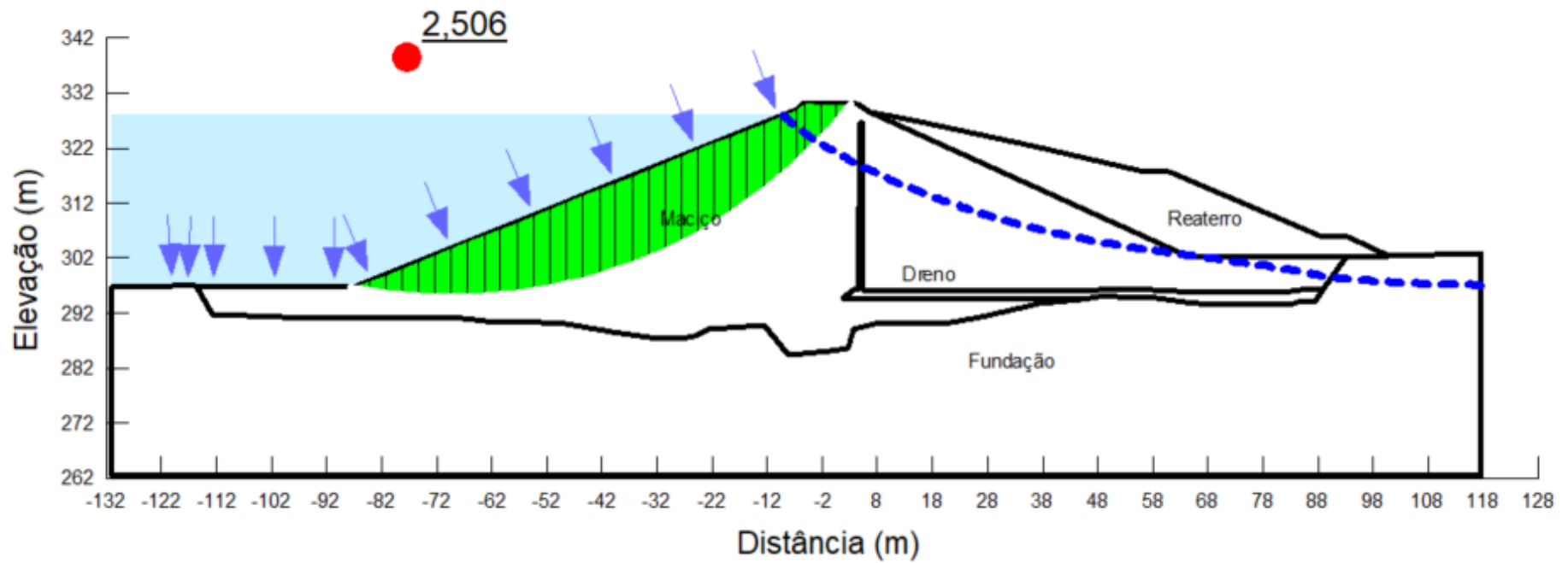


Fonte: Própria autora.

O fator de segurança nessa situação diminuiu com relação à situação anterior, com percolação estável. De qualquer forma, o fator continua acima dos limites encontrados na literatura. De maneira análoga ao caso de percolação estável, a zona de reaterro representa a maior parte da cunha em que o fator de segurança se apresenta com maior criticidade. Isso mostra ainda mais a utilidade dessa parte da estrutura.

O fator de segurança para o talude montante, quando a estrutura está com drenagem interna inoperacional está exibido na Figura 19.

Figura 19 – Fator de segurança do talude montante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 28+0,00 m.



Fonte: Própria autora.

Da mesma maneira, o fator de segurança da estabilidade do talude montante diminuiu, mas permaneceu dentro dos critérios de aceitação. E também continua com valor acima do fator de jusante, devido a carga de água do reservatório, como citado anteriormente.

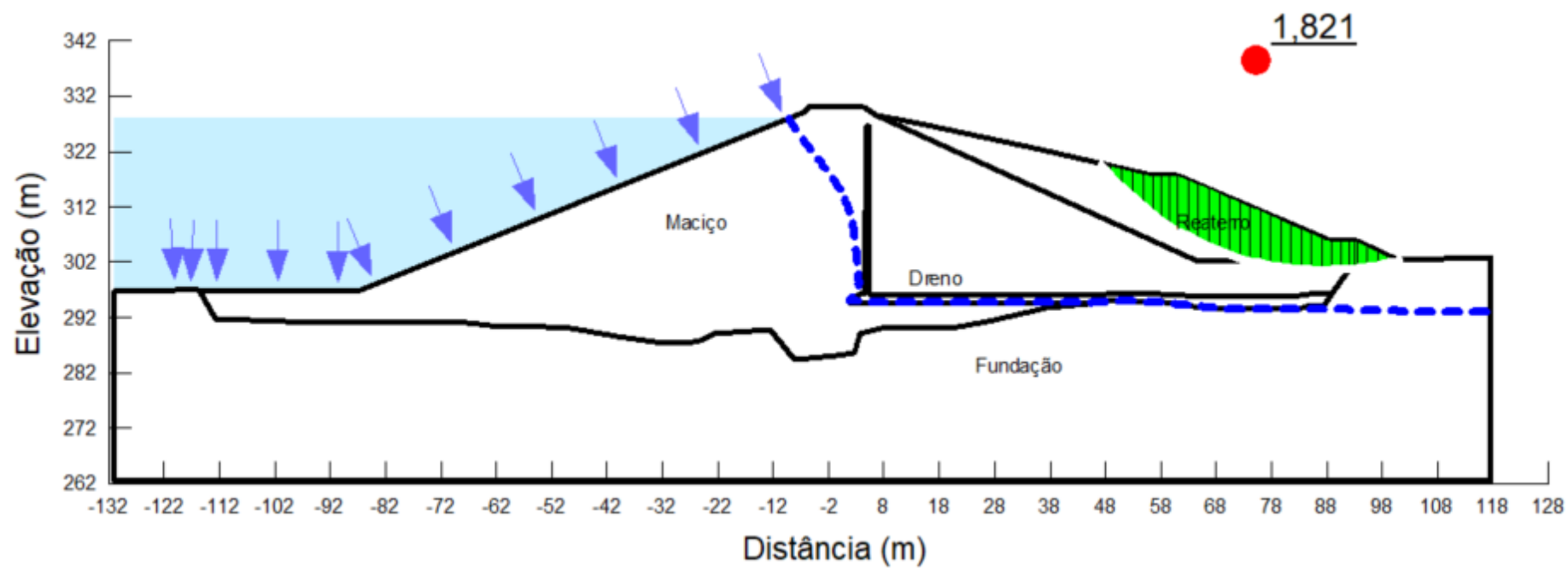
5.1.3. Sismos

Este cenário está dividido em duas situações, a primeira com drenagem operando normalmente e a segunda com drenagem interna inoperante. Os resultados de percolação são os mesmos para as duas situações já apresentadas e, portanto, não estão repetidas. A situação de percolação estável com drenagem operando normalmente está apresentada na Figura 14, enquanto a situação de filtro colmatado está apresentada na Figura 17.

5.1.3.1. Sismos com drenagem operando normalmente

A Figura 20 expõe o fator de segurança para o talude jusante.

Figura 20 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.

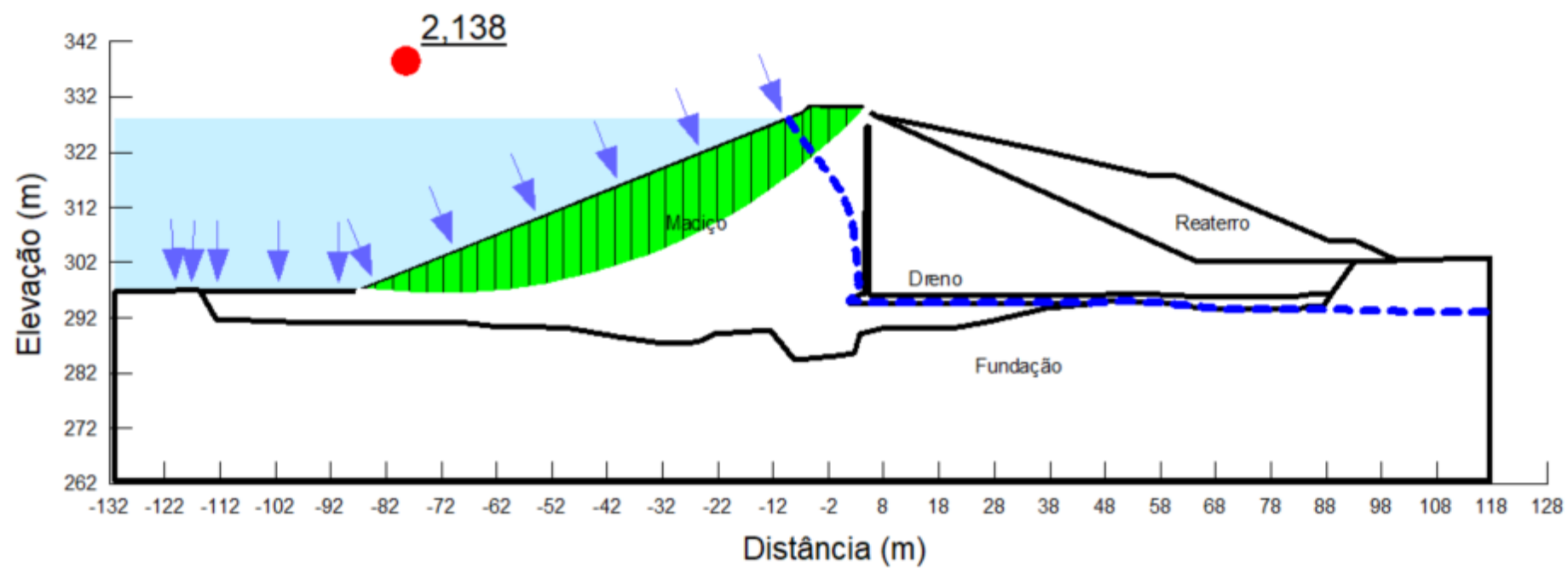


Fonte: Própria autora.

O fator de segurança nessa situação diminui consideravelmente, mas continua acima dos critérios de aceitação. A cunha com menor fator de segurança ainda atinge praticamente apenas o reaterro, reforçando sua funcionalidade.

A Figura 21 expõe o fator de segurança para o talude montante.

Figura 21 – Fator de segurança do talude montante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.



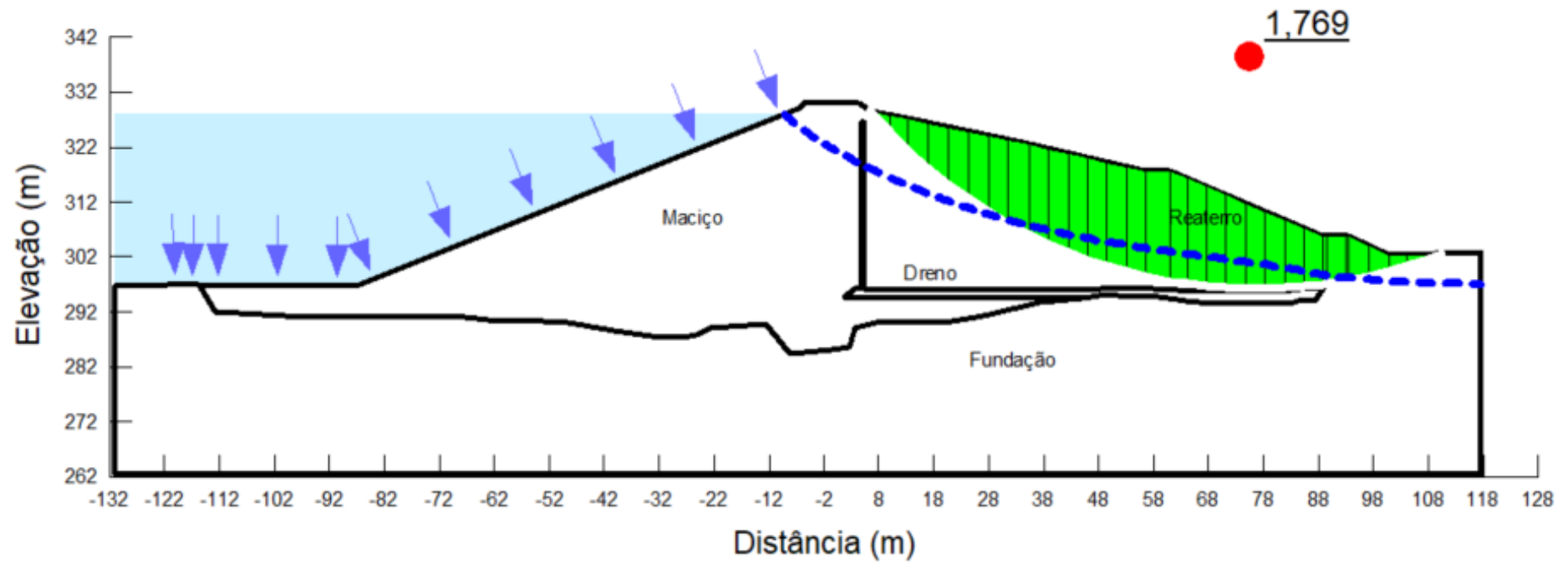
Fonte: Própria autora.

O fator de segurança nessa situação, apesar de ter diminuído, com relação a percolação estável sem sismos, ainda é um valor considerado alto. Isso devido à carga de água que auxilia na estabilidade do talude montante.

5.1.3.2. *Sismos com drenagem interna inoperante*

A Figura 22 expõe o fator de segurança para o talude jusante.

Figura 22 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.

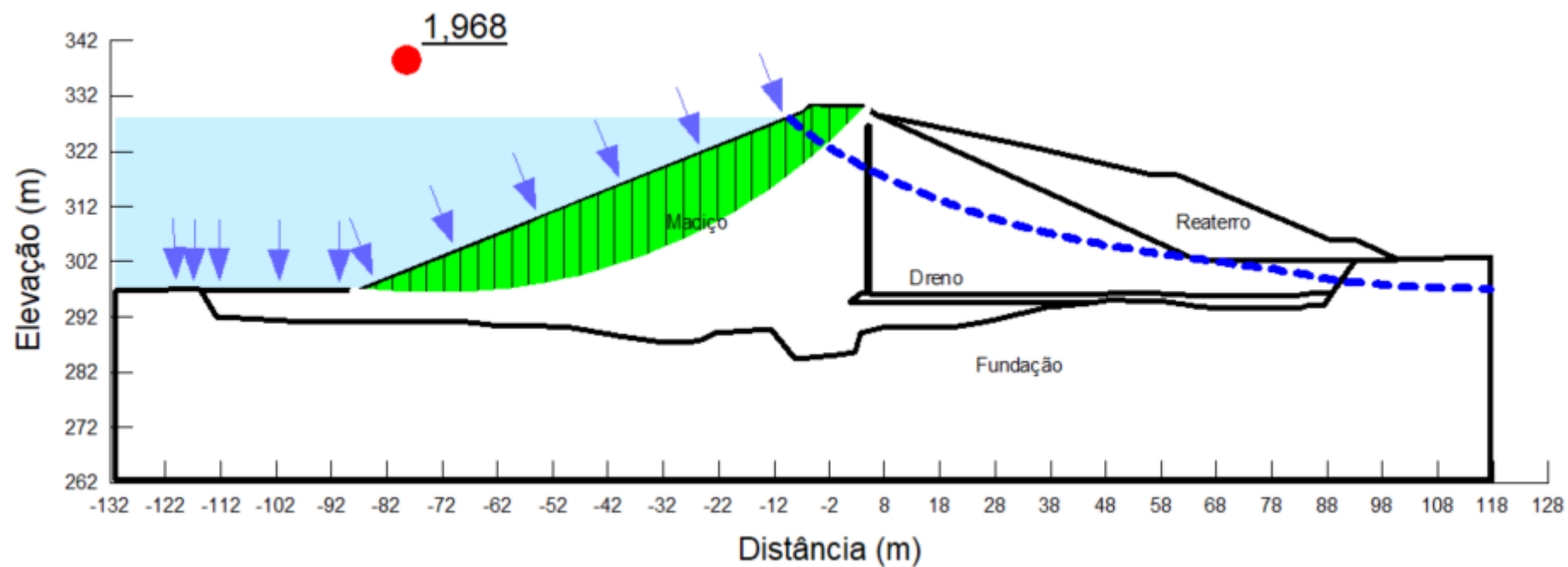


Fonte: Própria autora.

O fator de segurança diminui ainda mais nessa situação, como pode ser visto na Figura 22. Isso mostra como o filtro colmatado pode vir a prejudicar a estrutura.

A Figura 23 expõe o fator de segurança para o talude montante.

Figura 23 – Fator de segurança do talude montante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.



Fonte: Própria autora.

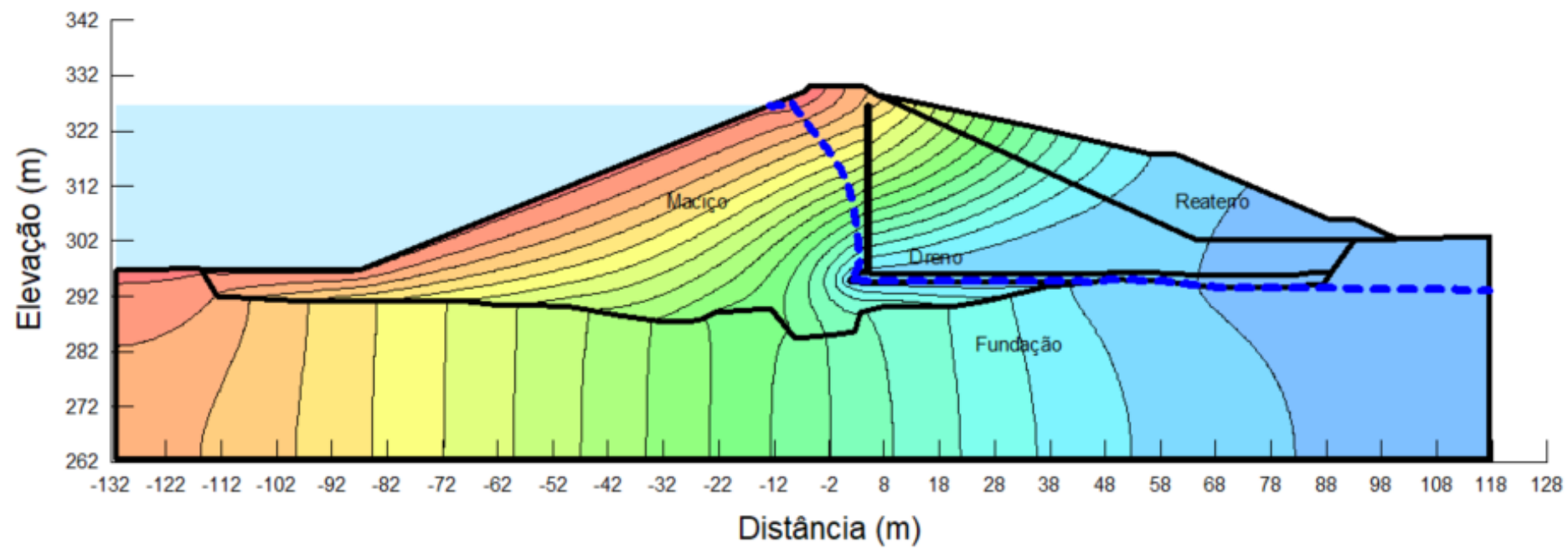
Como já visto anteriormente, o fator de segurança é maior para o talude montante do que para o talude jusante. Nota-se, pela Figura 23, como o filtro colmatado pode afetar a estabilidade do barramento, em diversas situações.

5.1.4. Rebaixamento rápido do reservatório

Para tornar a apresentação mais dinâmica, para cada situação, tanto a percolação quanto o fator de segurança de estabilidade para ambos os taludes estão apresentados a cada 5 dias, iniciando no primeiro dia e finalizando no 30º dia.

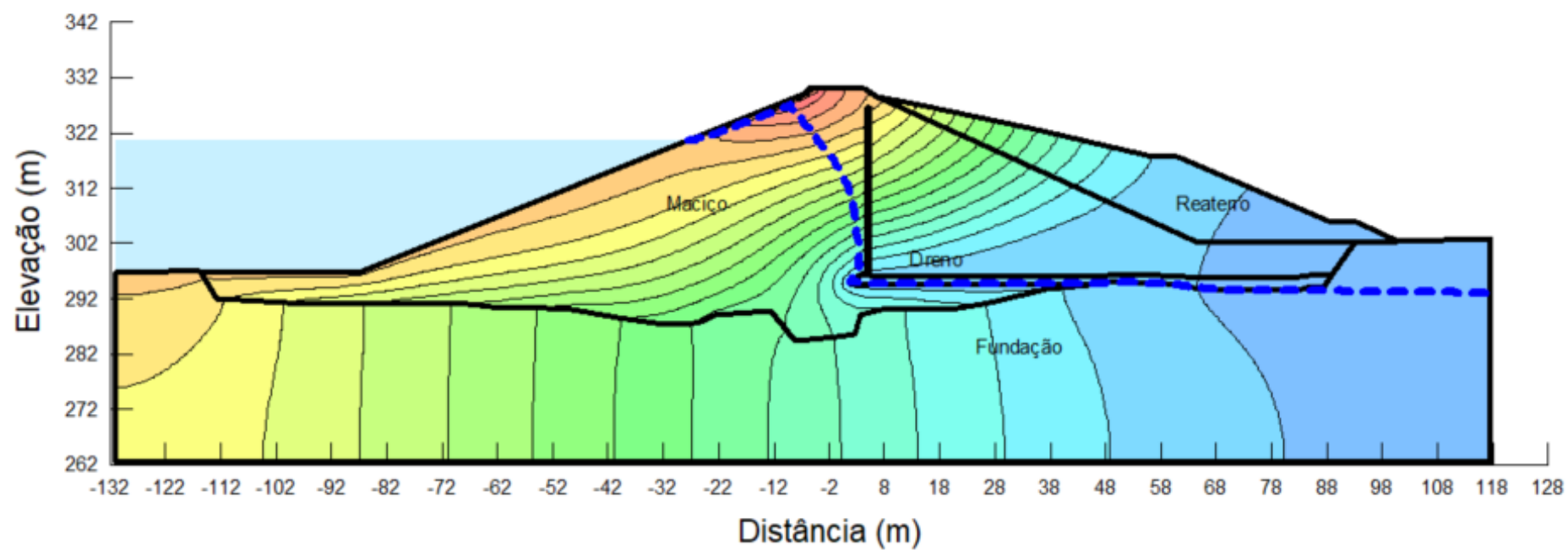
Em sequência são apresentadas nas Figuras 24 a 30 a percolação no maciço e na fundação ao longo dos 30 dias de rápido rebaixamento do reservatório.

Figura 24 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 1).



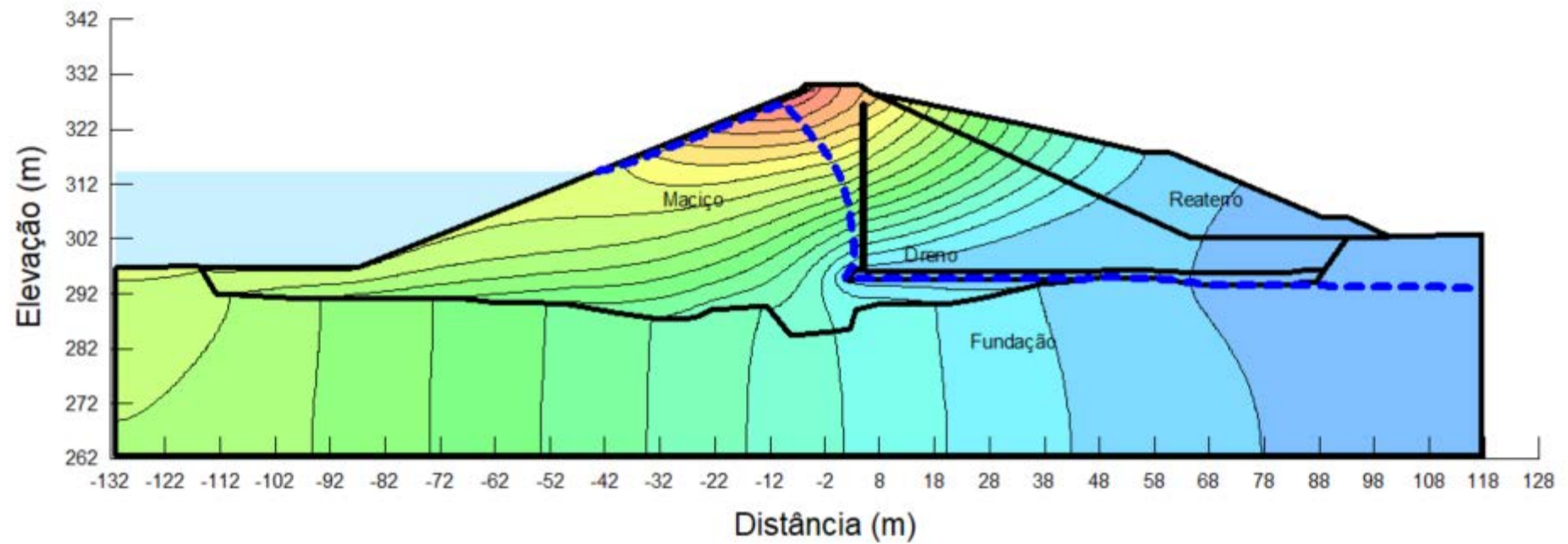
Fonte: Própria autora.

Figura 25 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 5).



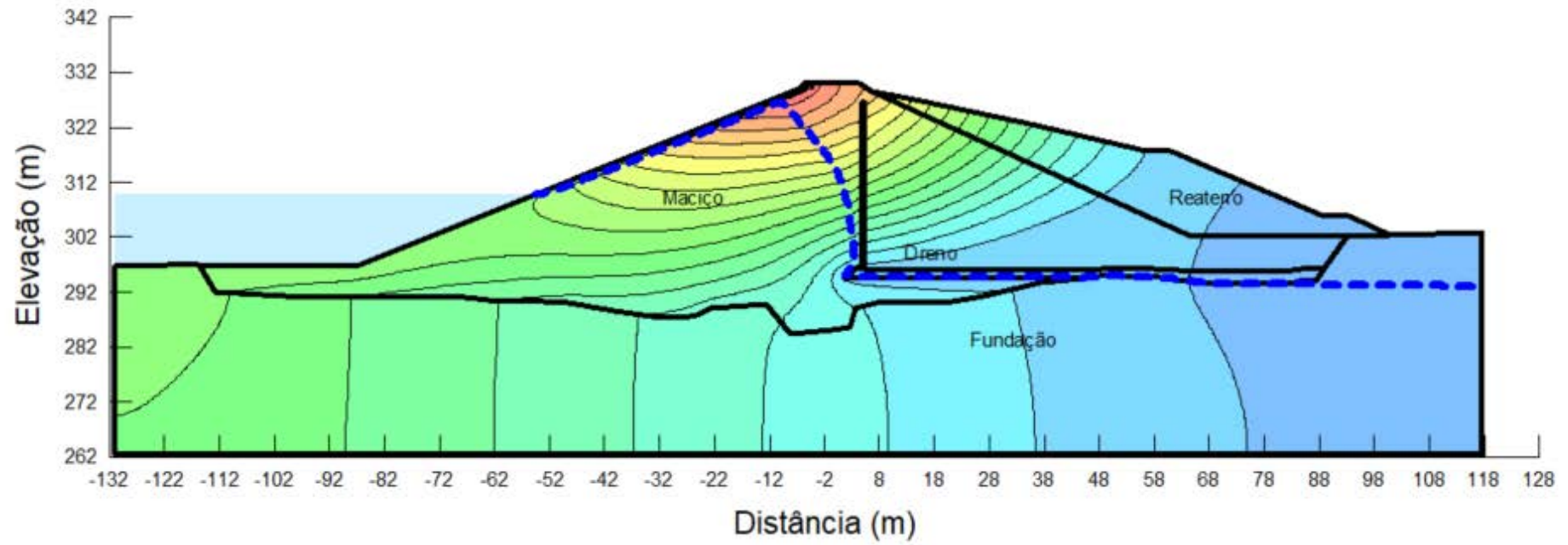
Fonte: Própria autora.

Figura 26 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 10).



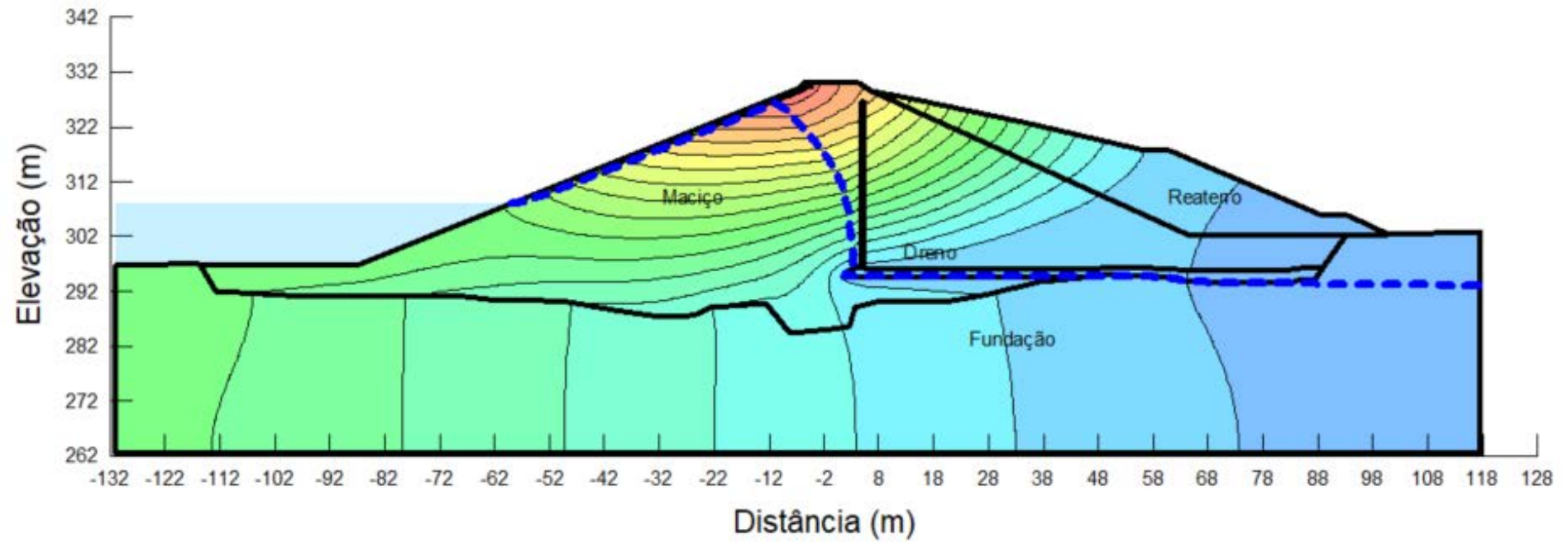
Fonte: Própria autora.

Figura 27 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 15).



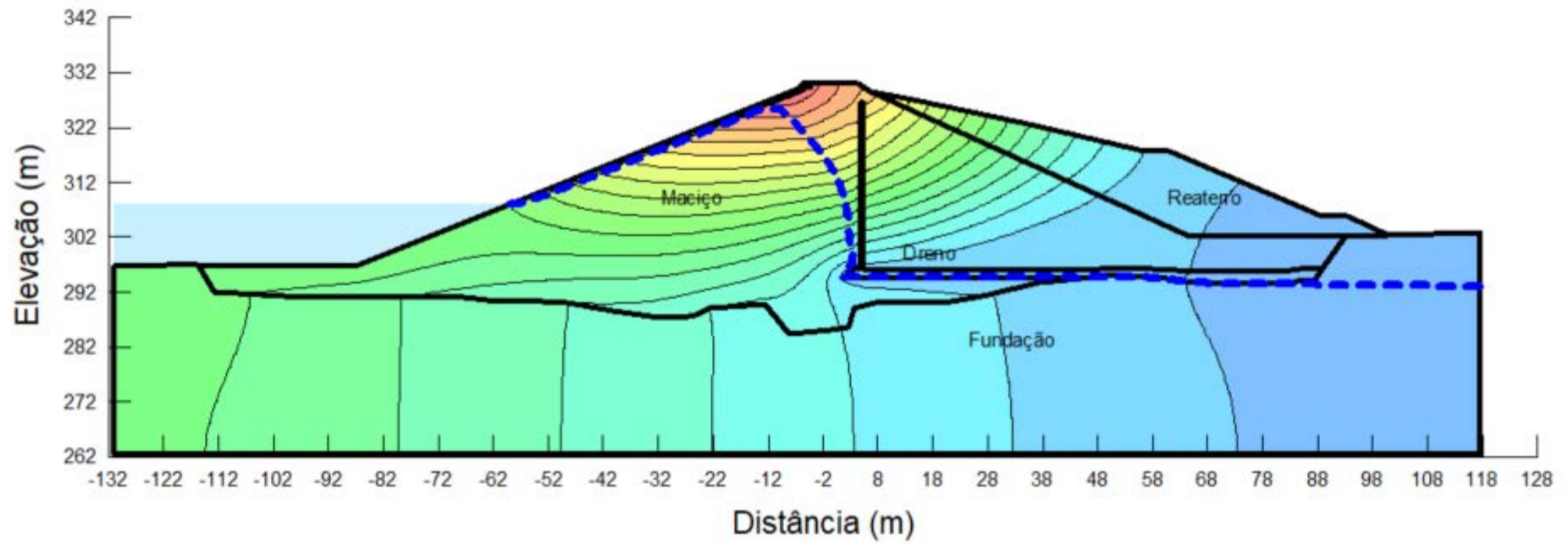
Fonte: Própria autora.

Figura 28 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 20).



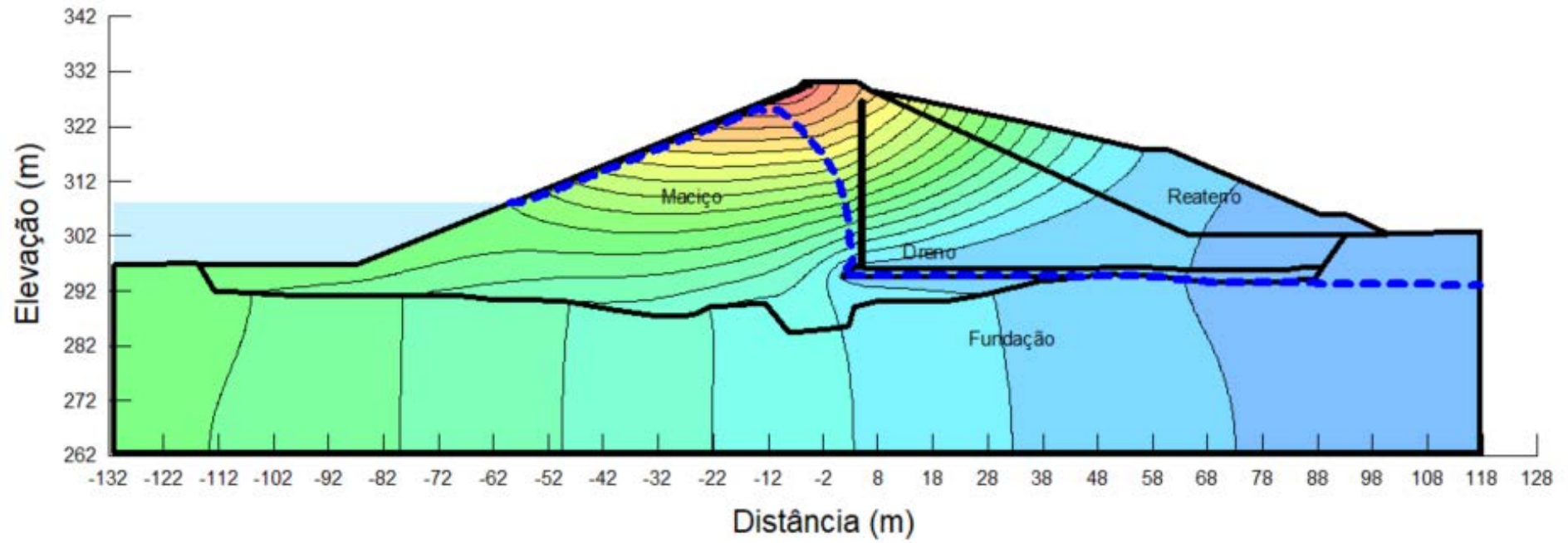
Fonte: Própria autora.

Figura 29 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 25).



Fonte: Própria autora.

Figura 30 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 30).

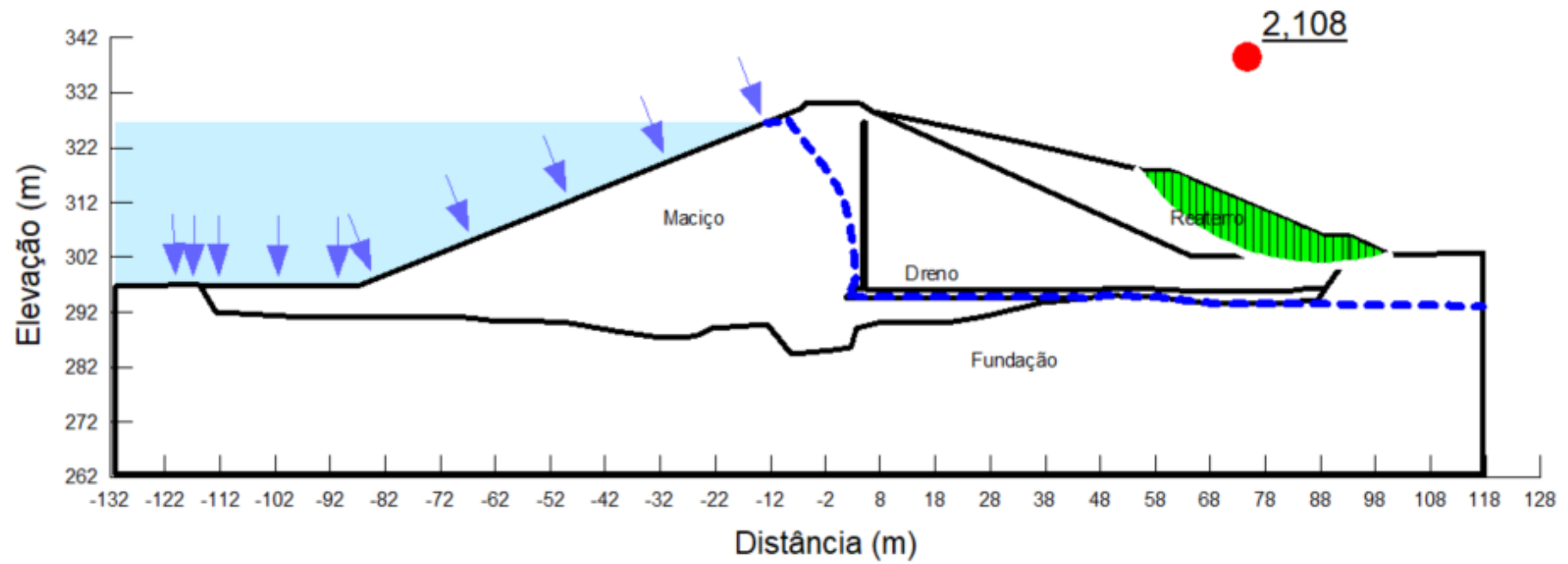


Fonte: Própria autora.

Por meio da Figura 24 a Figura 30, pode-se perceber que o nível freático praticamente não se altera. No entanto, o nível do reservatório cai drasticamente durante esse período, retirando o esforço causado pela carga de água do reservatório que agia a favor da segurança do talude montante.

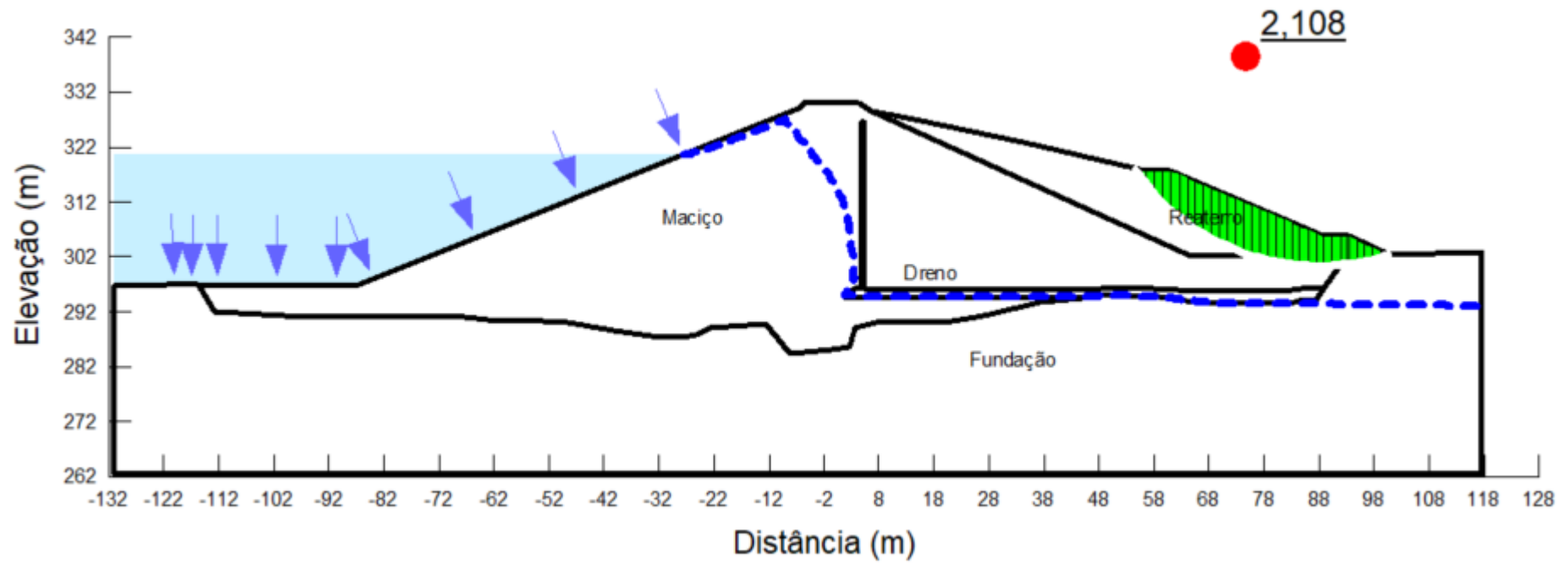
Nas Figuras 31 a 37 são apresentados o fator de segurança do talude de jusante durante esse rebaixamento, com os dias coincidentes com os dias apresentados da percolação.

Figura 31 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 1).



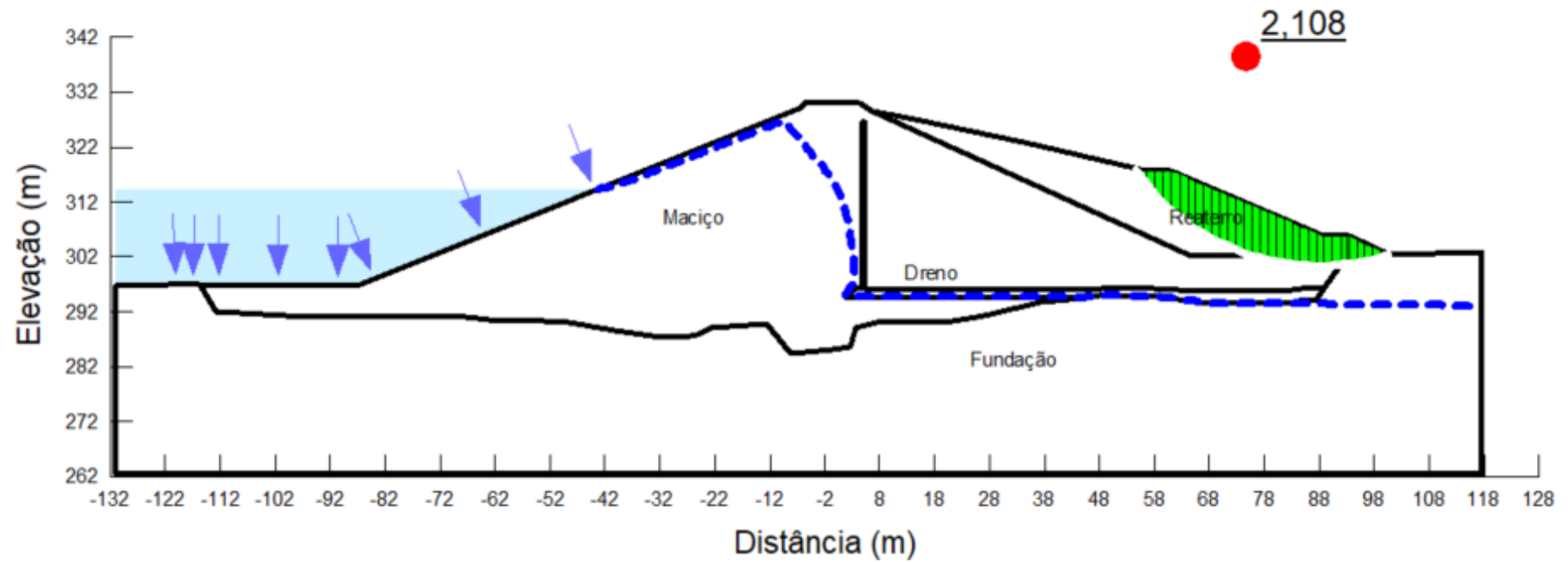
Fonte: Própria autora.

Figura 32 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 5).



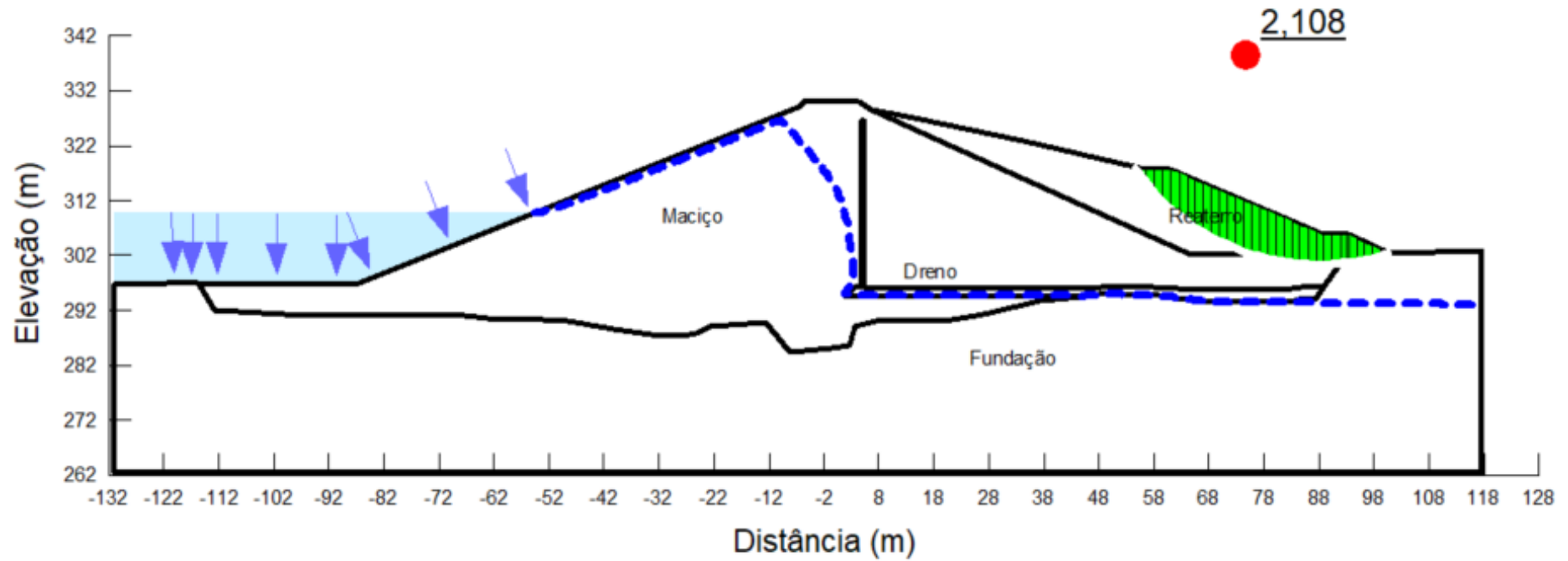
Fonte: Própria autora.

Figura 33 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 10).



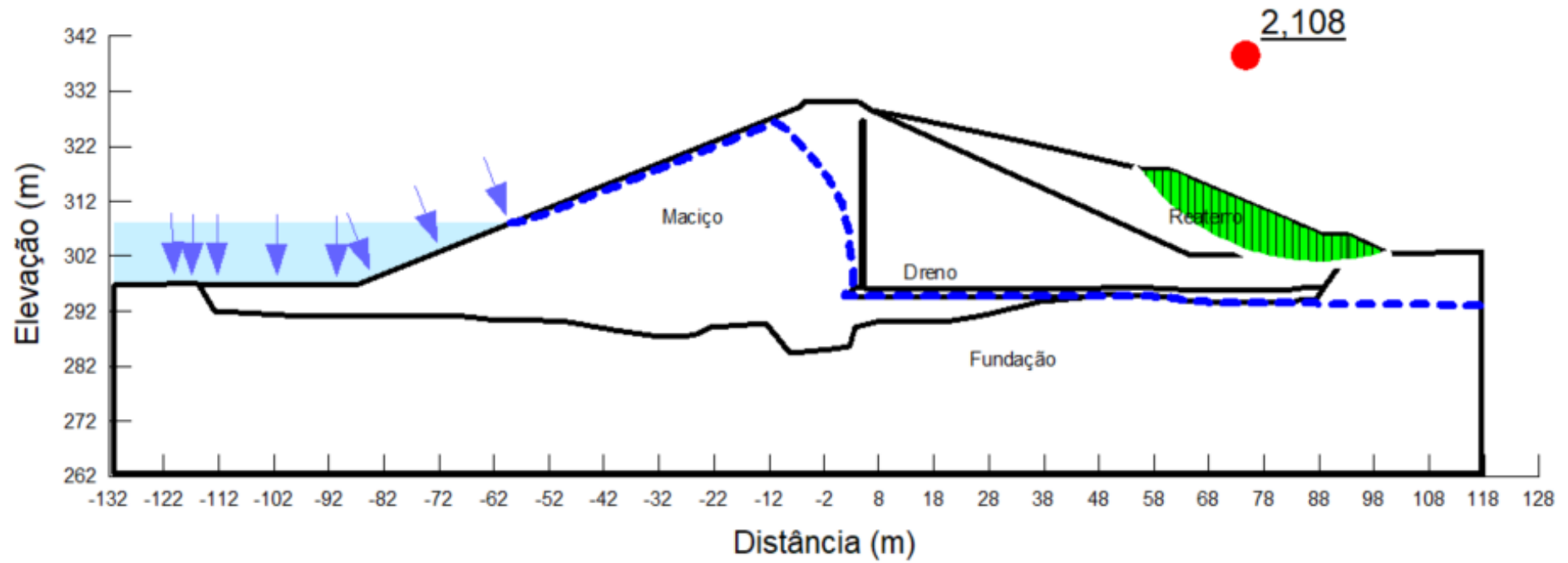
Fonte: Própria autora.

Figura 34 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 15).



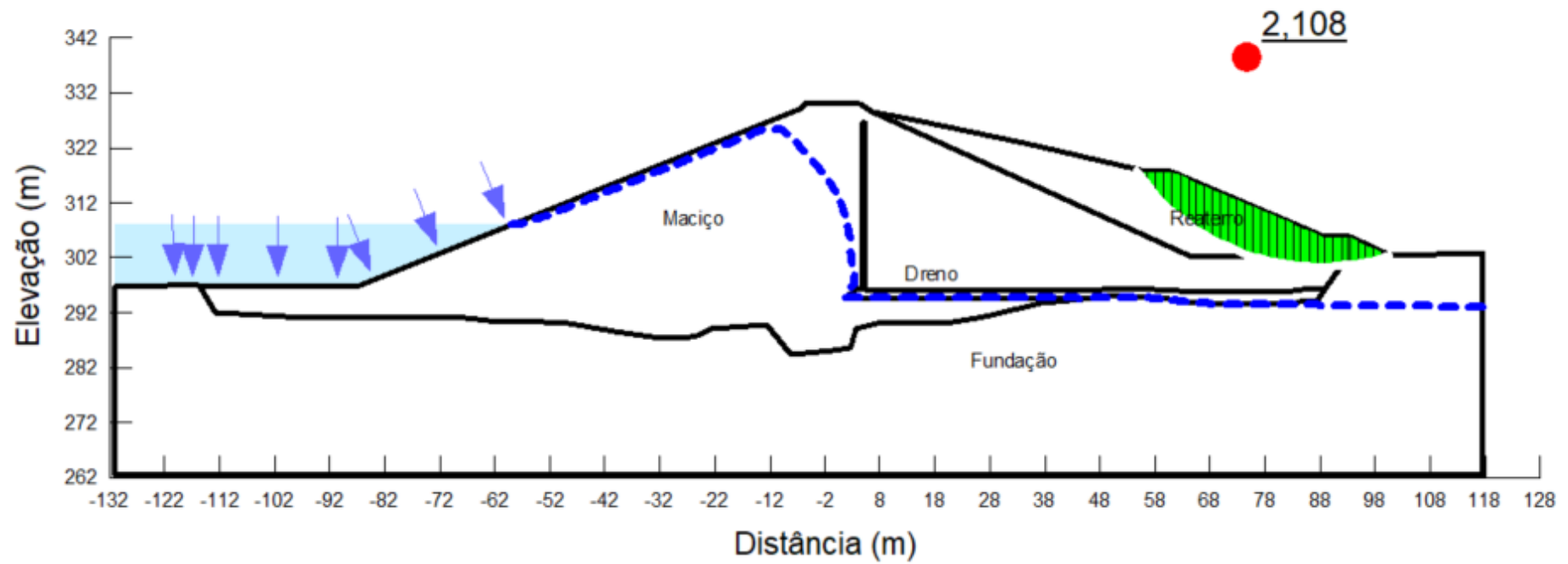
Fonte: Própria autora.

Figura 35 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 20).



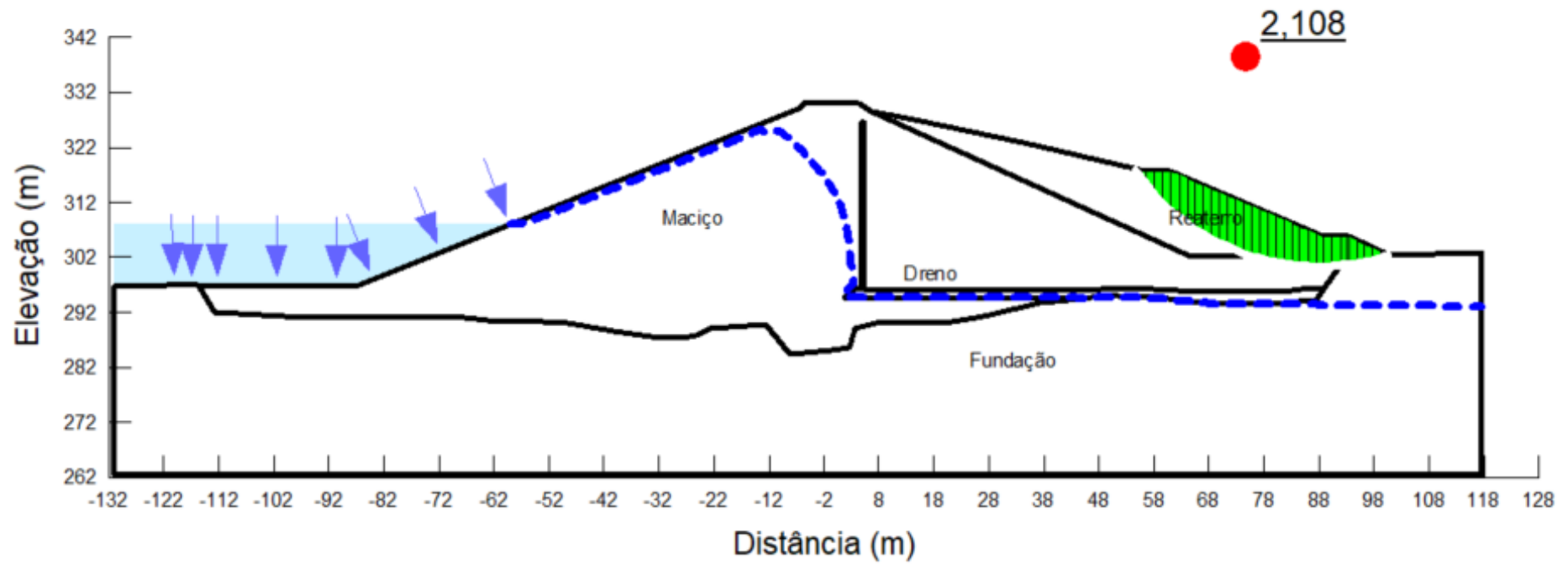
Fonte: Própria autora.

Figura 36 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 25).



Fonte: Própria autora.

Figura 37 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 30).

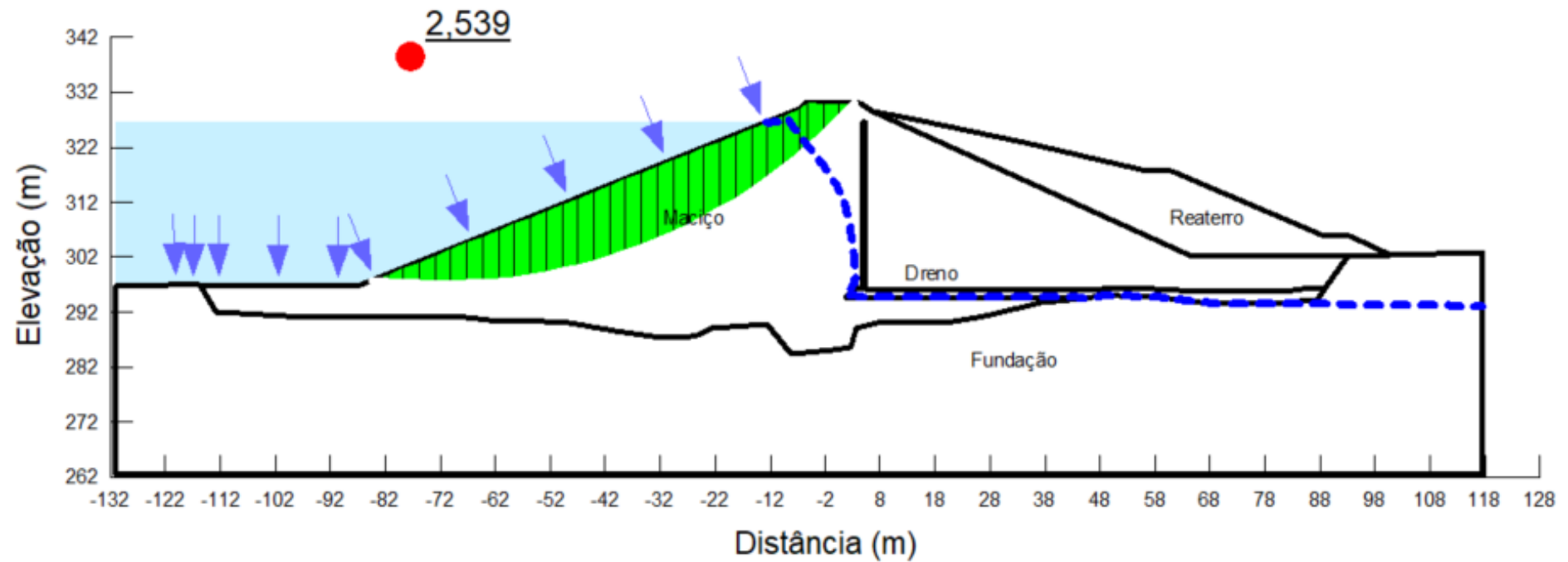


Fonte: Própria autora.

Como é possível observar, o fator de segurança do talude jusante não se altera em nenhum momento durante o rebaixamento do reservatório.

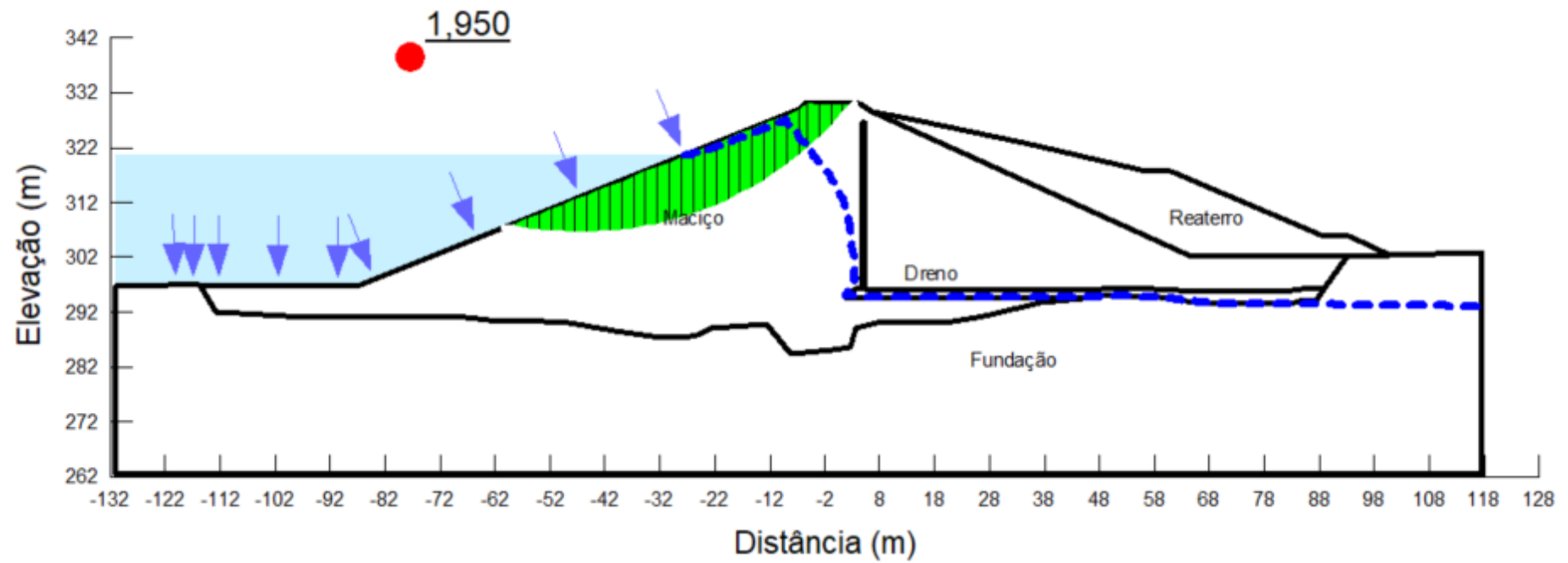
Nas Figuras 38 a 44 são apresentados os fatores de segurança para o talude montante, com os dias coincidentes com os dias apresentados da percolação.

Figura 38 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 1).



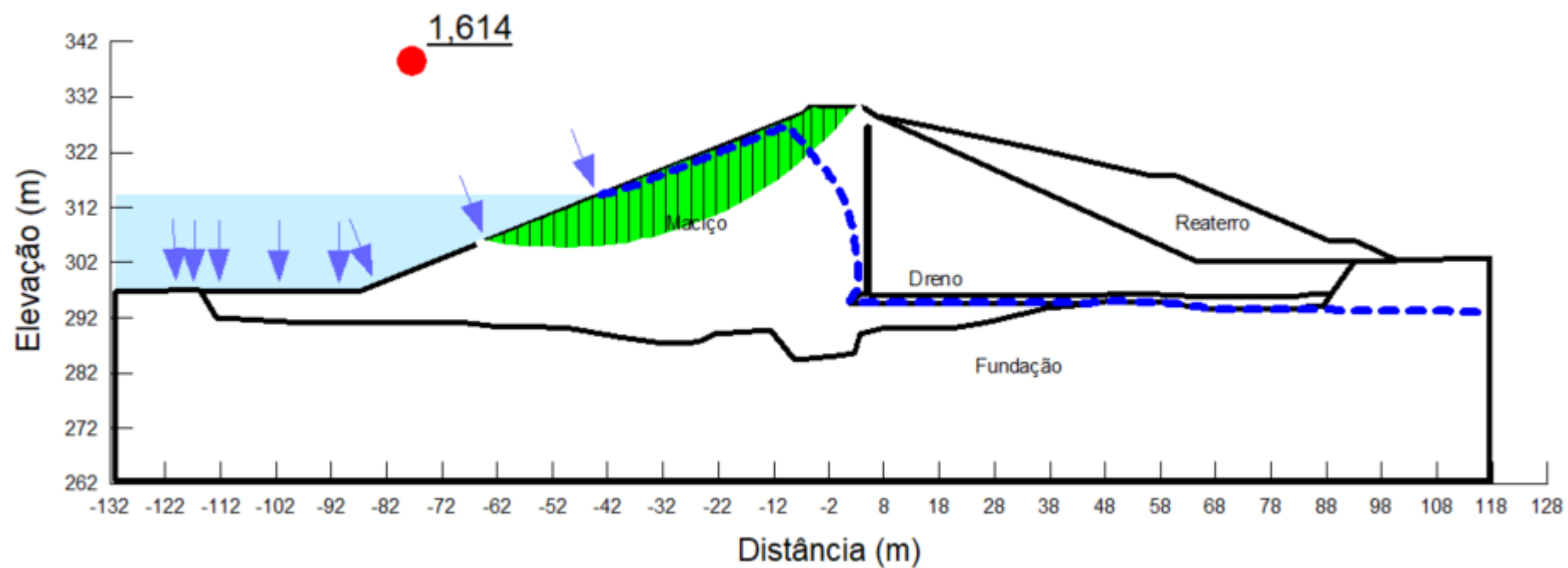
Fonte: Própria autora.

Figura 39 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 5).



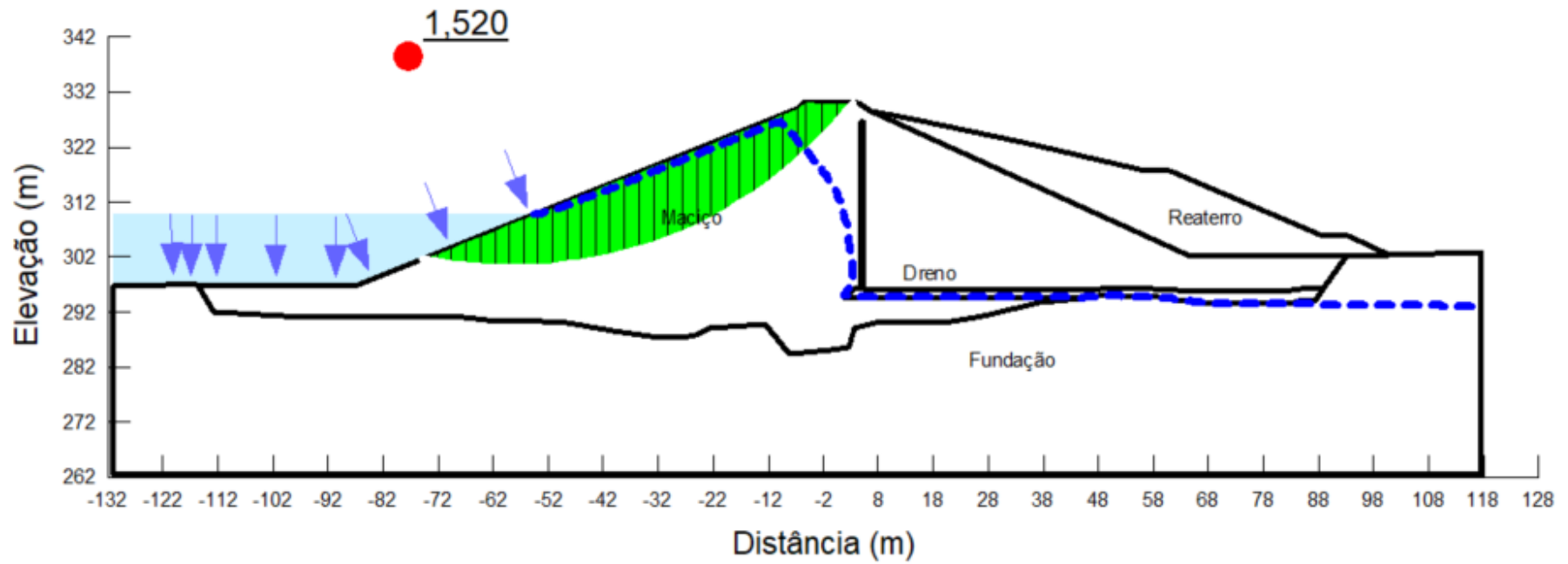
Fonte: Própria autora.

Figura 40 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 10).



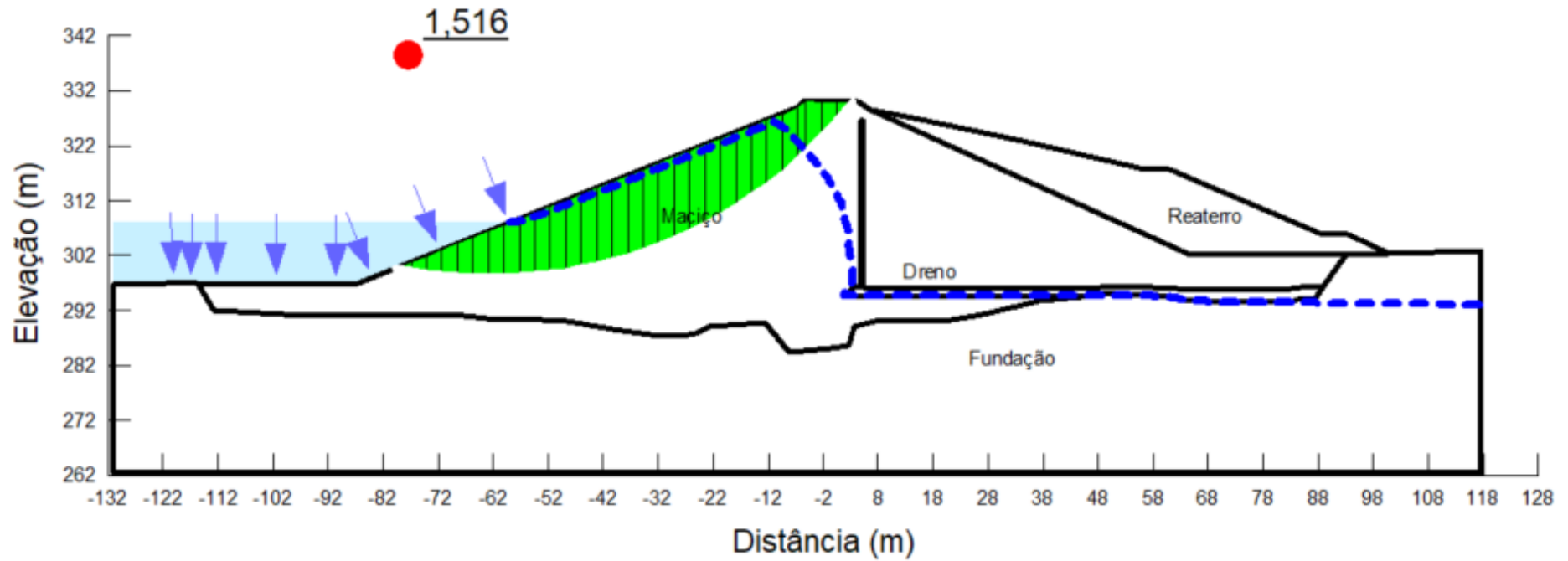
Fonte: Própria autora.

Figura 41 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 15).



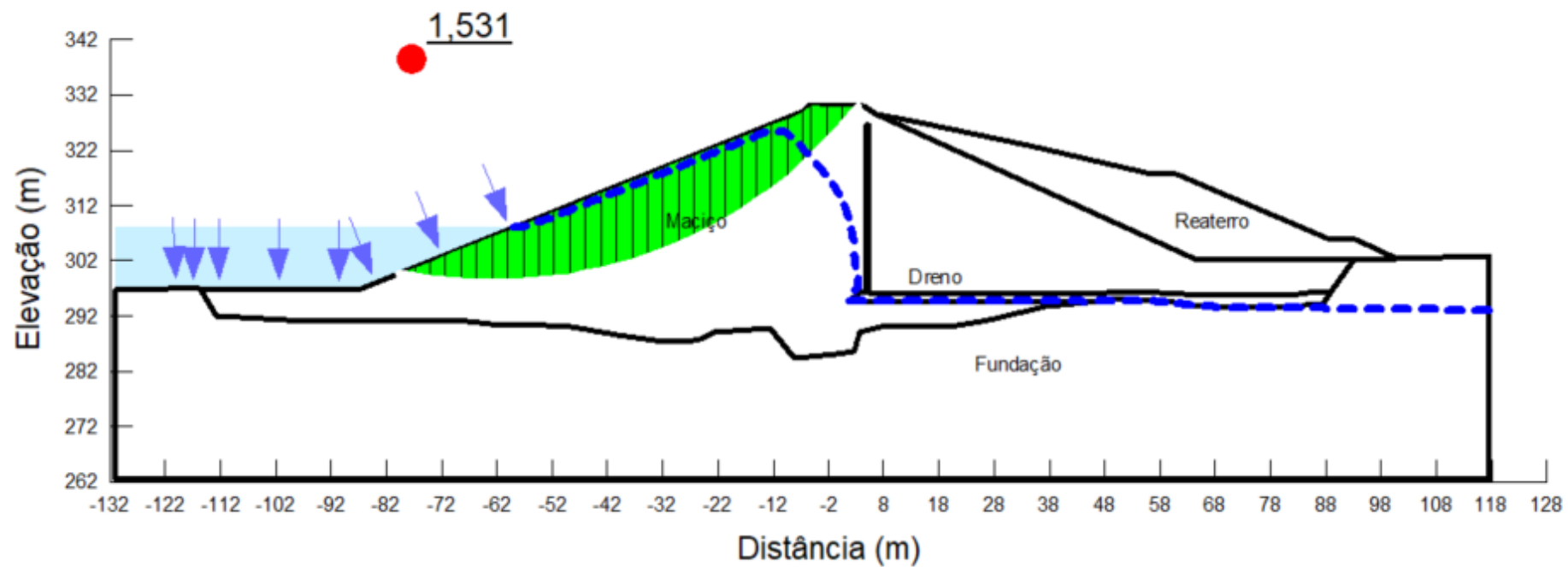
Fonte: Própria autora.

Figura 42 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 20).



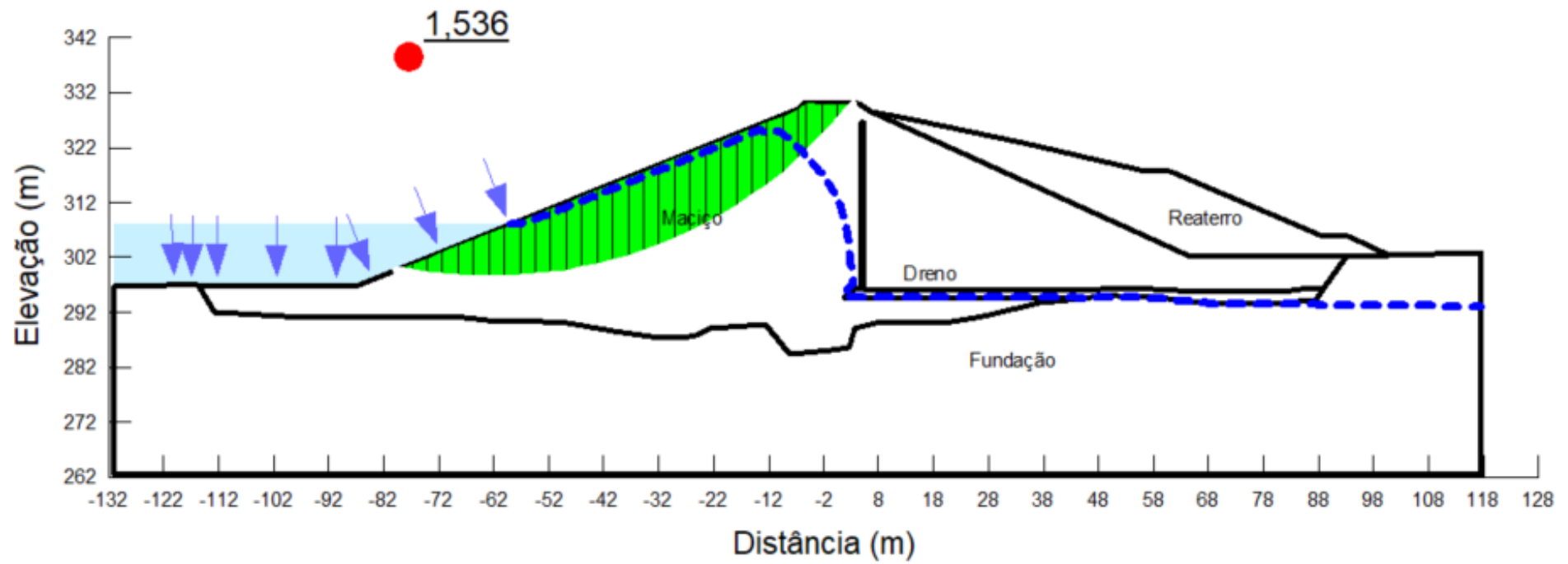
Fonte: Própria autora.

Figura 43 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 25).



Fonte: Própria autora.

Figura 44 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 28+0,00 m (dia 30).



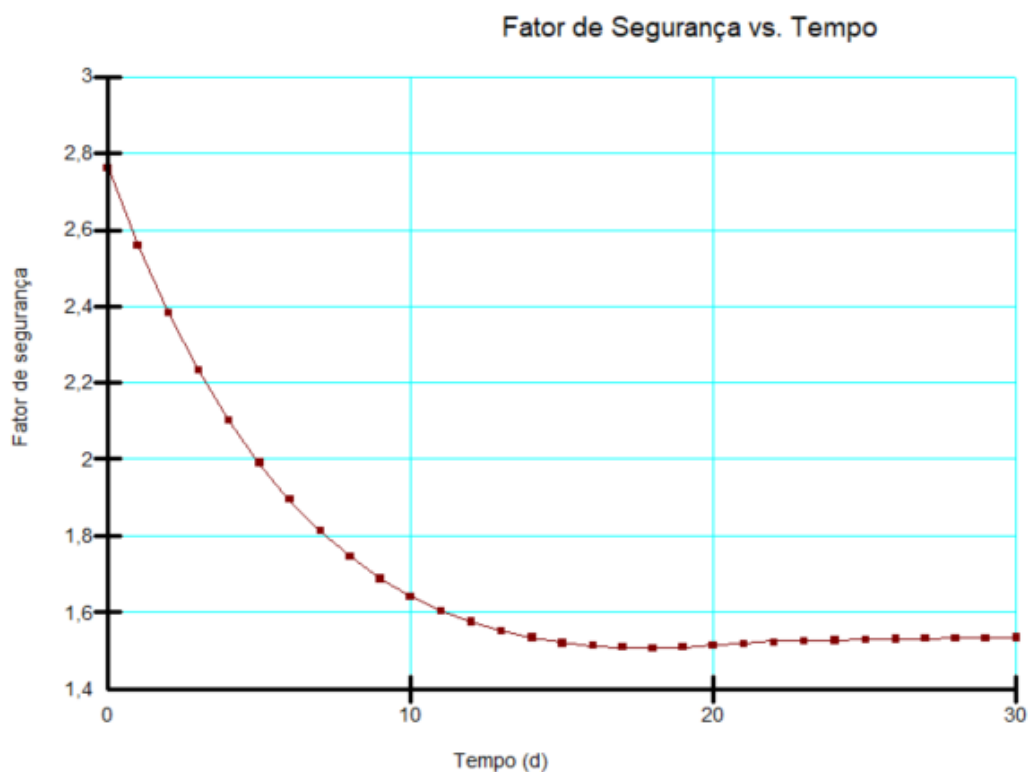
Fonte: Própria autora.

Nos 10 primeiros dias, observa-se que o fator de segurança diminui expressivamente. Entre o 10º e 20º dia começa um processo de estabilização. Entretanto, a partir do 20º dia, o fator de segurança aumenta, e segue aumentando até o 30º dia, esse evento acontece em razão do nível do reservatório estabilizar nesse período, o que estabilizaria o fator também, porém, como o nível freático dentro do maciço começa a diminuir, lentamente, o fator tem seu valor um pouco aumentado nesses últimos dias.

Apesar disso, no momento mais crítico para o talude de jusante, o fator de segurança ainda atende os critérios de aceitação previstos em literatura.

A fim de resumir as alterações do fator de segurança do talude montante, o talude afetado pelo rebaixamento rápido, no gráfico 1 estão apresentados o fator de segurança ao longo do tempo.

Gráfico 1 – Fator de segurança do talude jusante da seção da estaca 28+0,00 m ao longo do tempo.



Fonte: Própria autora.

5.2. SEÇÃO DA ESTACA 111+10,00 m

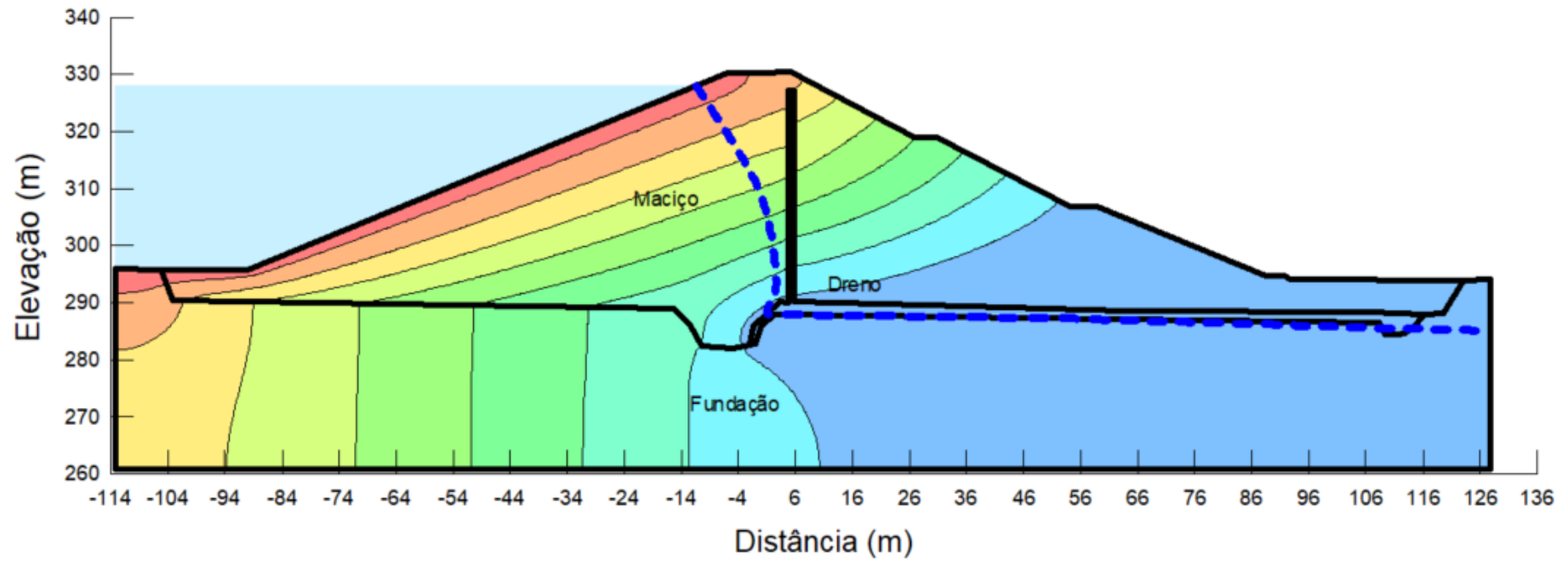
Os resultados para a seção da estaca 111+10,00 m estão apresentados divididos por cenários. Da mesma forma, em todas as figuras, a linha pontilhada em cor azul representa o nível freático.

5.2.1. Operação normal

O cenário de operação normal se trata de percolação estável, com drenagem interna funcionando perfeitamente, sem nenhum tipo de adversidade.

A Figura 45 mostra o resultado da percolação teórica nessa situação.

Figura 45 – Percolação em operação normal da seção da estaca 111+10,00 m.

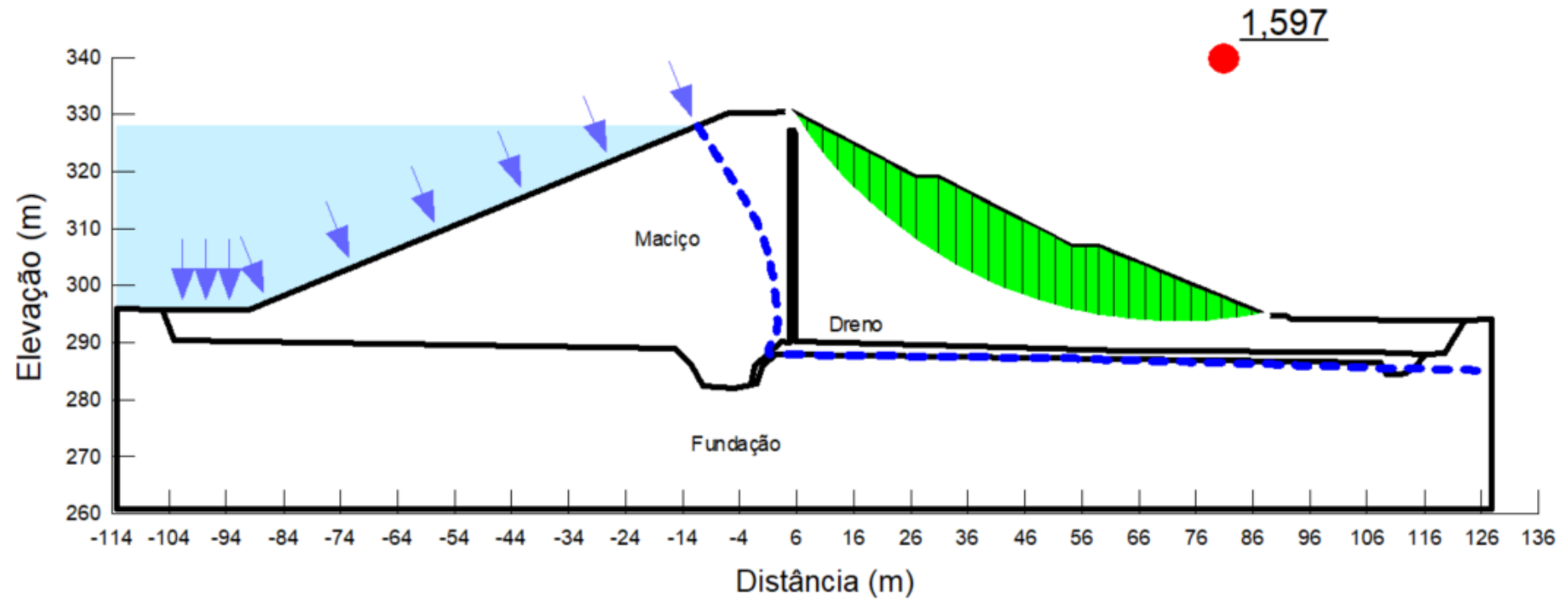


Fonte: Própria autora.

Avaliando a Figura 45 verifica-se que a linha freática percorre o talude de montante, passa pelo filtro e segue tapete drenante, sem atingir o talude jusante, dessa forma, é mostrado o funcionamento ideal do filtro.

Já a Figura 46 mostra o fator de segurança para o talude jusante, quando a estrutura se encontra com a percolação mostrada na Figura 45.

Figura 46 – Fator de segurança do talude jusante com percolação em operação normal da seção da estaca 111+10,00 m.

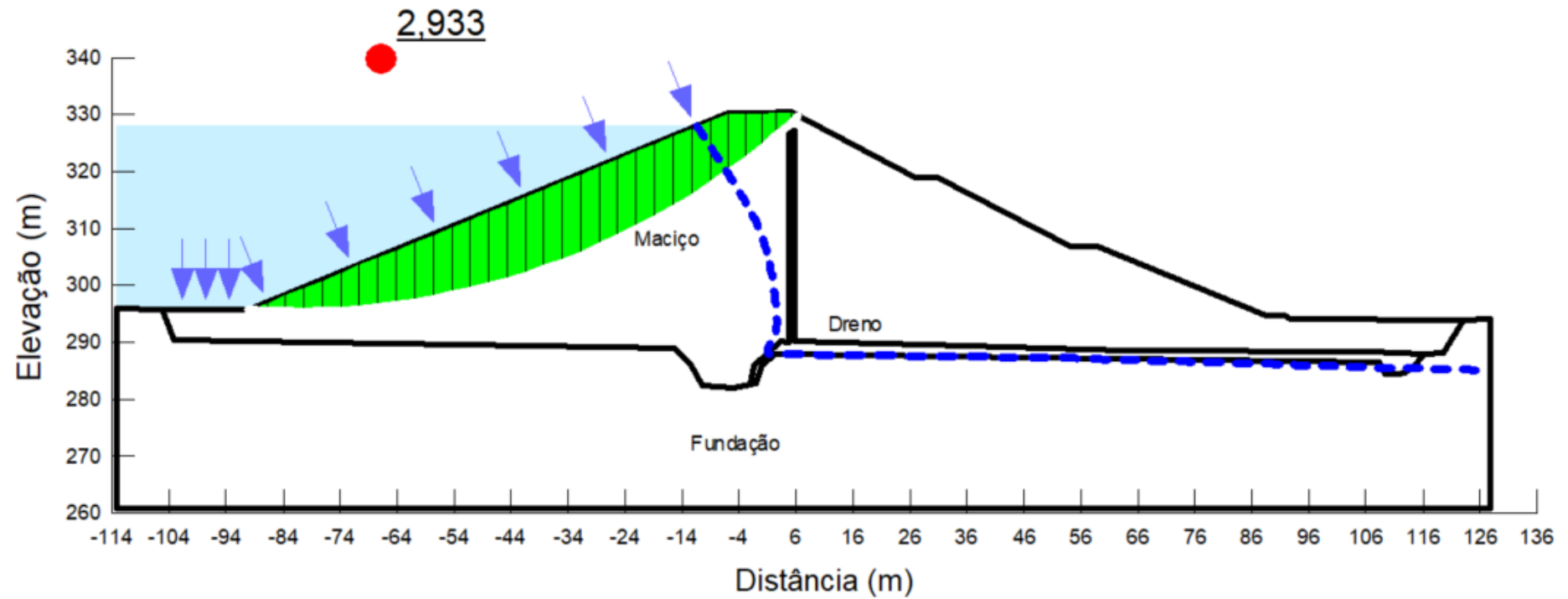


Fonte: Própria autora.

Nota-se que o fator de segurança do talude de jusante nessa situação para esta seção é mais baixo que o para a seção anterior. Apesar de algumas outras alterações na estrutura, esse fator menor se deve muito provavelmente à falta do reaterro nessa seção. De qualquer forma, o fator de segurança obtido está dentro dos critérios de aceitação encontrados na literatura.

O fator de segurança para o talude montante, quando a estrutura está com percolação estável está exibido na Figura 47.

Figura 47 – Fator de segurança do talude montante com percolação em operação normal da seção da estaca 111+10,00 m.



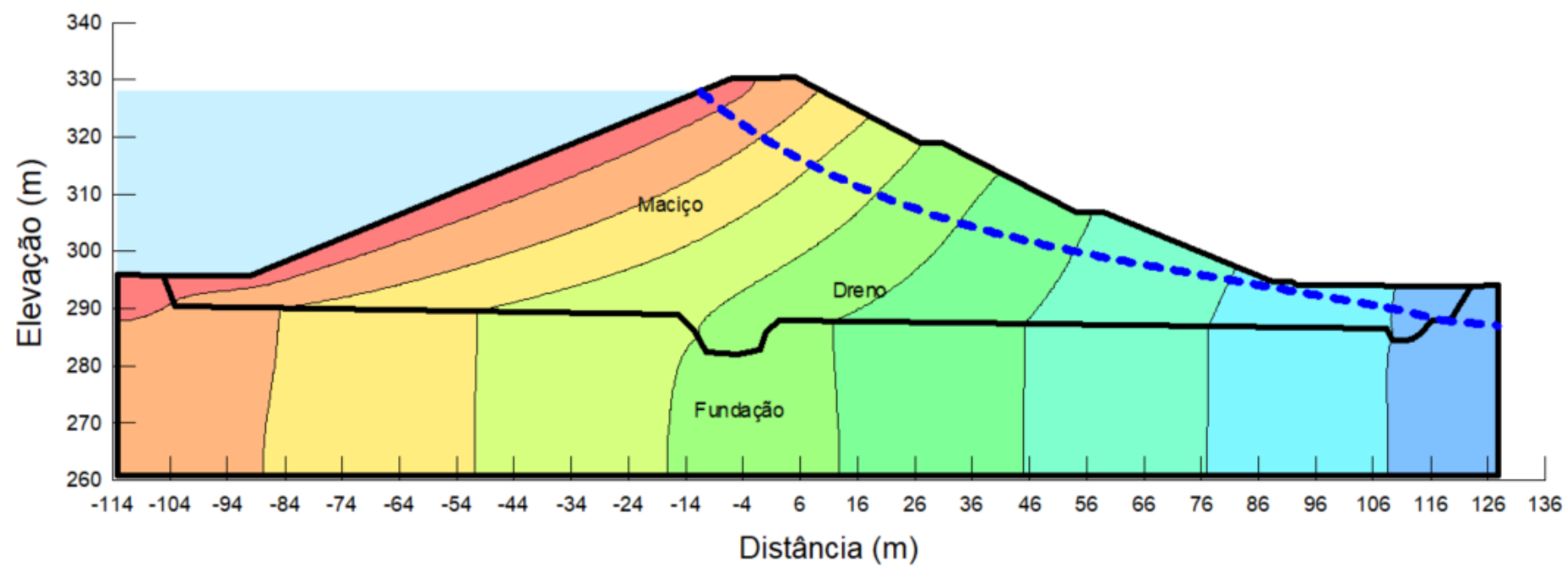
Fonte: Própria autora.

O talude de montante apresenta fator de segurança maior que o talude de jusante, como esperado, isso acontece, pois, o talude de montante possui a carga da água presente no reservatório como esforço a favor da segurança desse talude. Da mesma maneira como visto na seção anterior.

5.2.2. Drenagem interna inoperante

Este cenário possui como característica o dreno completamente colmatado. A Figura 48 mostra o resultado da percolação teórica nessa situação.

Figura 48 – Percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 111+10,00 m.

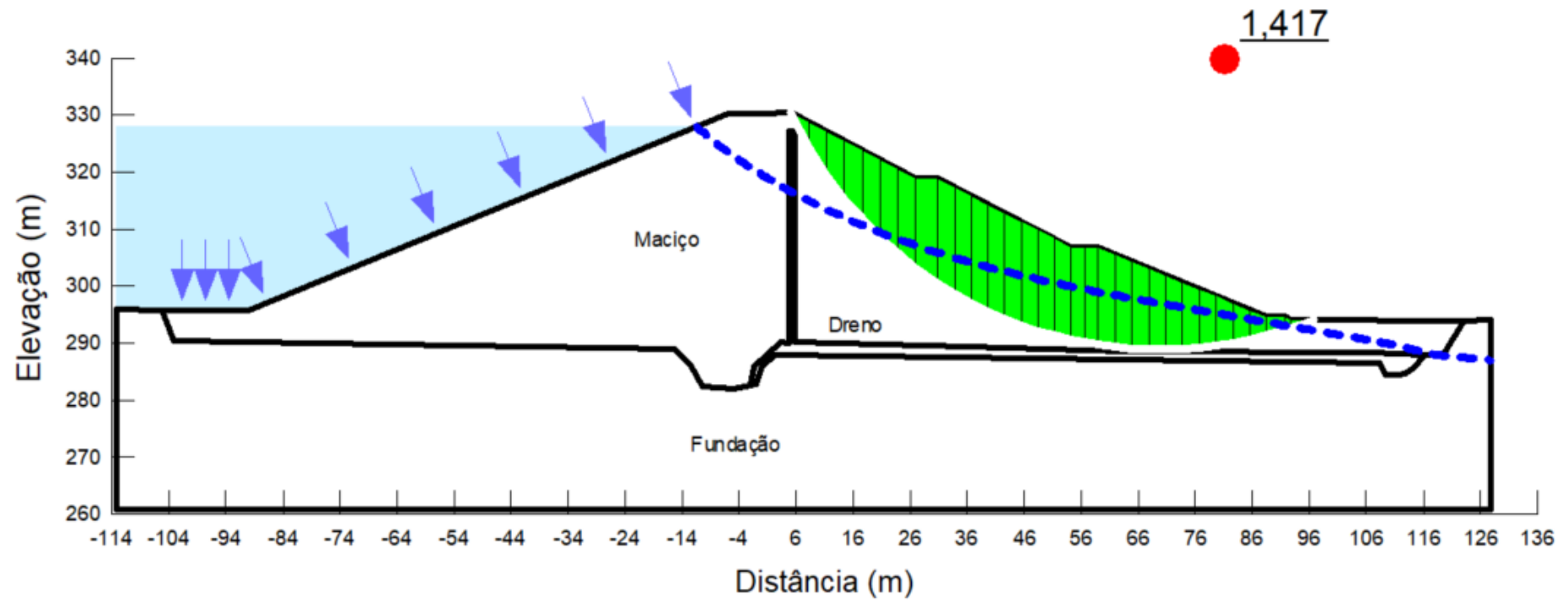


Fonte: Própria autora.

Nessa situação, a linha freática está mais elevada quando comparada com a situação de operação normal.

A Figura 49 exibe o fator de segurança para o talude jusante, quando a drenagem interna está inoperante.

Figura 49 – Fator de segurança do talude jusante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 111+10,00 m.

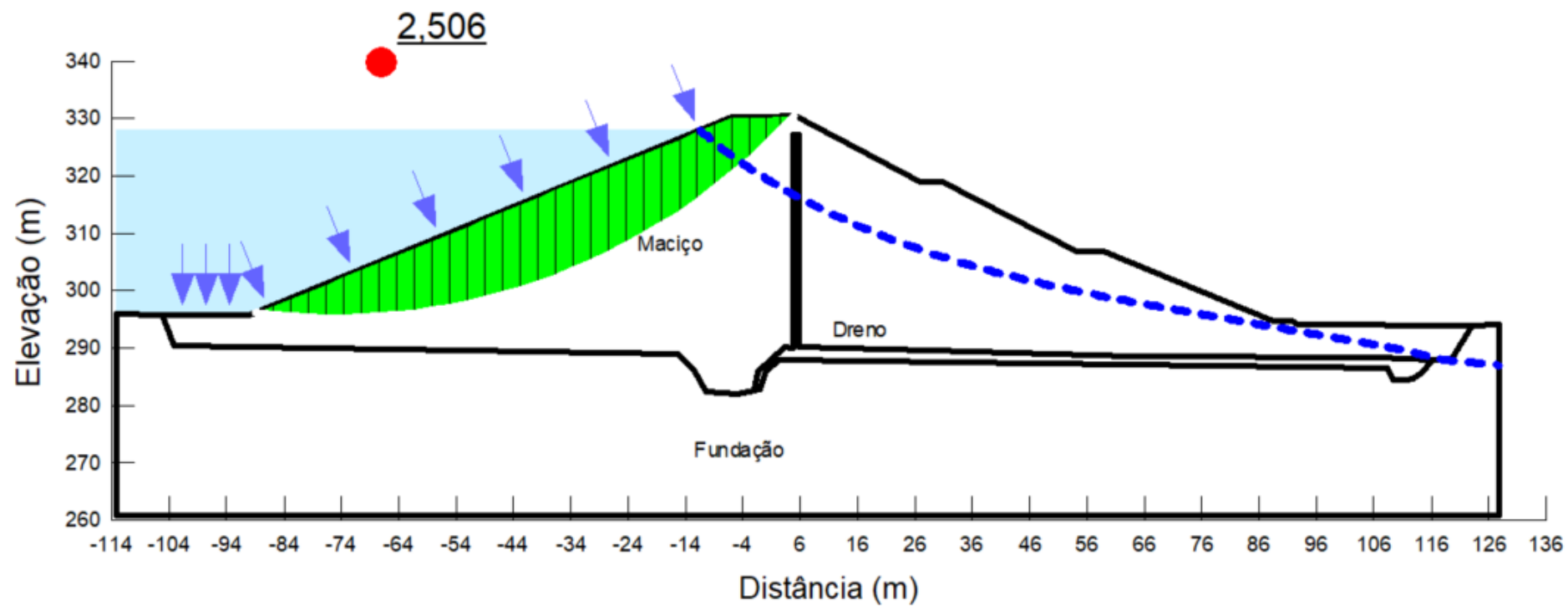


Fonte: Própria autora.

O fator de segurança está abaixo do estabelecido para percolação estável. No entanto, o filtro dessa simulação está totalmente colmatado, situação pouquíssimo provável para a realidade de uma barragem com boa gestão, caso este da barragem estudada, pois o filtro ficaria, no máximo, parcialmente inoperante.

O fator de segurança para o talude montante, quando a estrutura está com drenagem interna inoperacional está exibido na Figura 50.

Figura 50 – Fator de segurança do talude montante com percolação com dreno totalmente colmatado da seção da estaca 111+10,00 m.



Fonte: Própria autora.

Da mesma maneira, o fator de segurança da estabilidade do talude montante diminuiu, mas permaneceu dentro dos critérios de aceitação. E também continua com valor acima do fator de jusante, devido a carga de água do reservatório, como citado anteriormente.

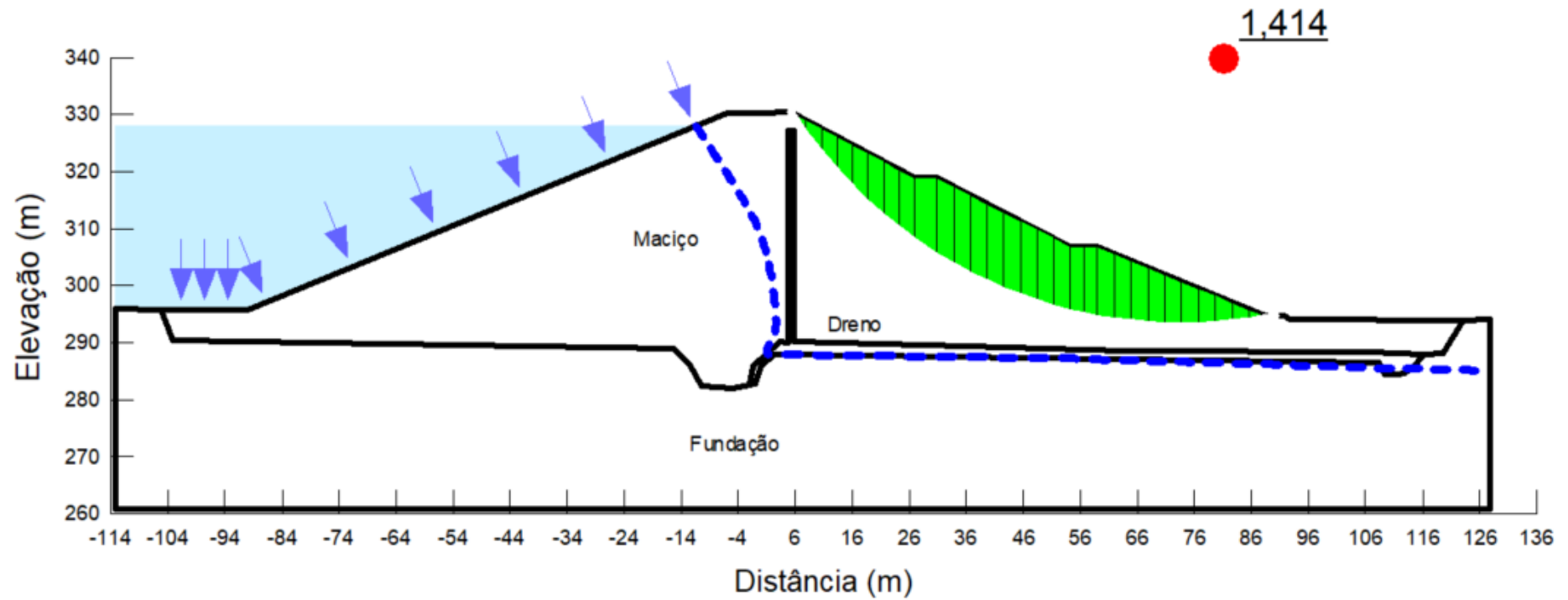
5.2.3. Sismos

Este cenário está dividido em duas situações, a primeira com percolação estável e a segunda com drenagem interna inoperante. Os resultados de percolação são os mesmos para as duas situações já apresentadas e, portanto, não estão repetidas. A situação de percolação estável com drenagem operando normalmente está apresentada na Figura 45, enquanto a situação de filtro colmatado está apresentada na Figura 48.

5.2.3.1. Sismos com drenagem operando normalmente

A Figura 51 expõe o fator de segurança para o talude jusante.

Figura 51 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 111+10,00 m.

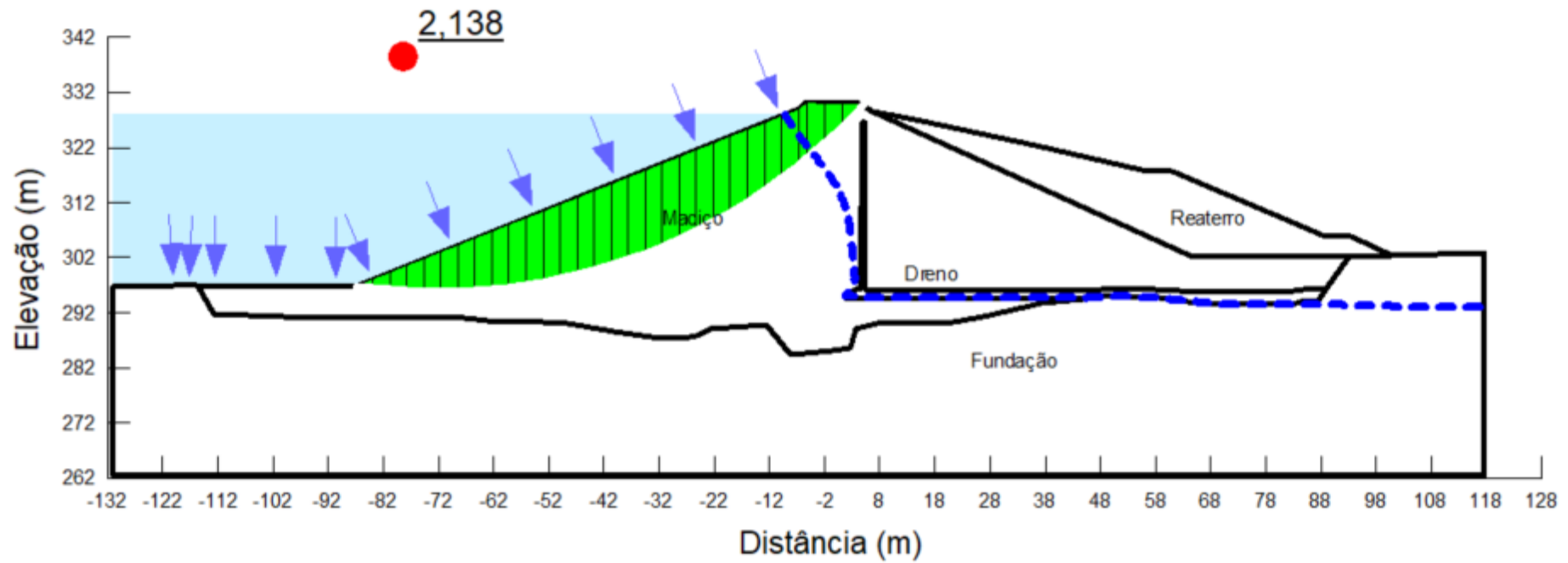


Fonte: Própria autora.

O fator de segurança nessa situação diminui, mas continua acima dos critérios de aceitação.

A Figura 52 expõe o fator de segurança para o talude montante.

Figura 52 – Fator de segurança do talude montante com drenagem normal com sismos da seção da estaca 111+10,00 m.



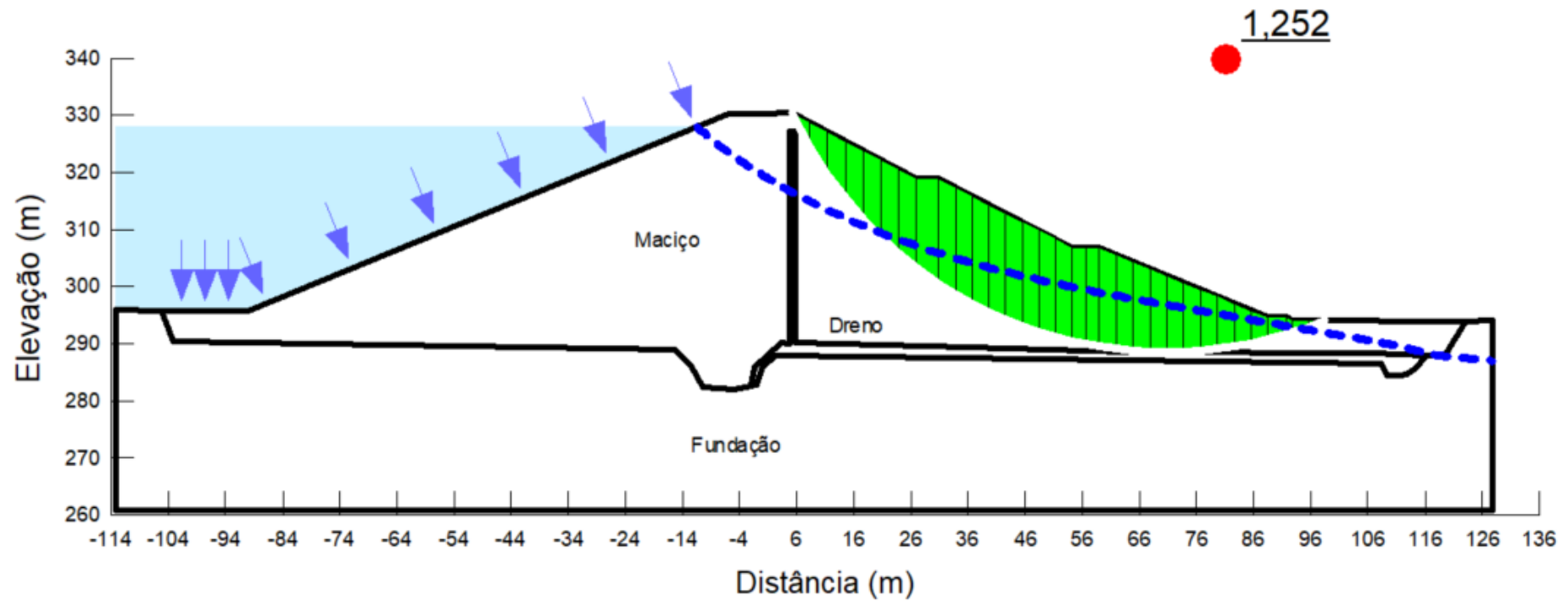
Fonte: Própria autora.

O fator de segurança nessa situação, apesar de ter diminuído, com relação a percolação estável sem sismos, ainda é um valor considerado alto. Isso devido à carga de água que auxilia na estabilidade do talude montante.

5.2.3.2. *Sismos com drenagem interna inoperante*

A Figura 53 expõe o fator de segurança para o talude jusante.

Figura 53 – Fator de segurança do talude jusante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 111+10,00 m.

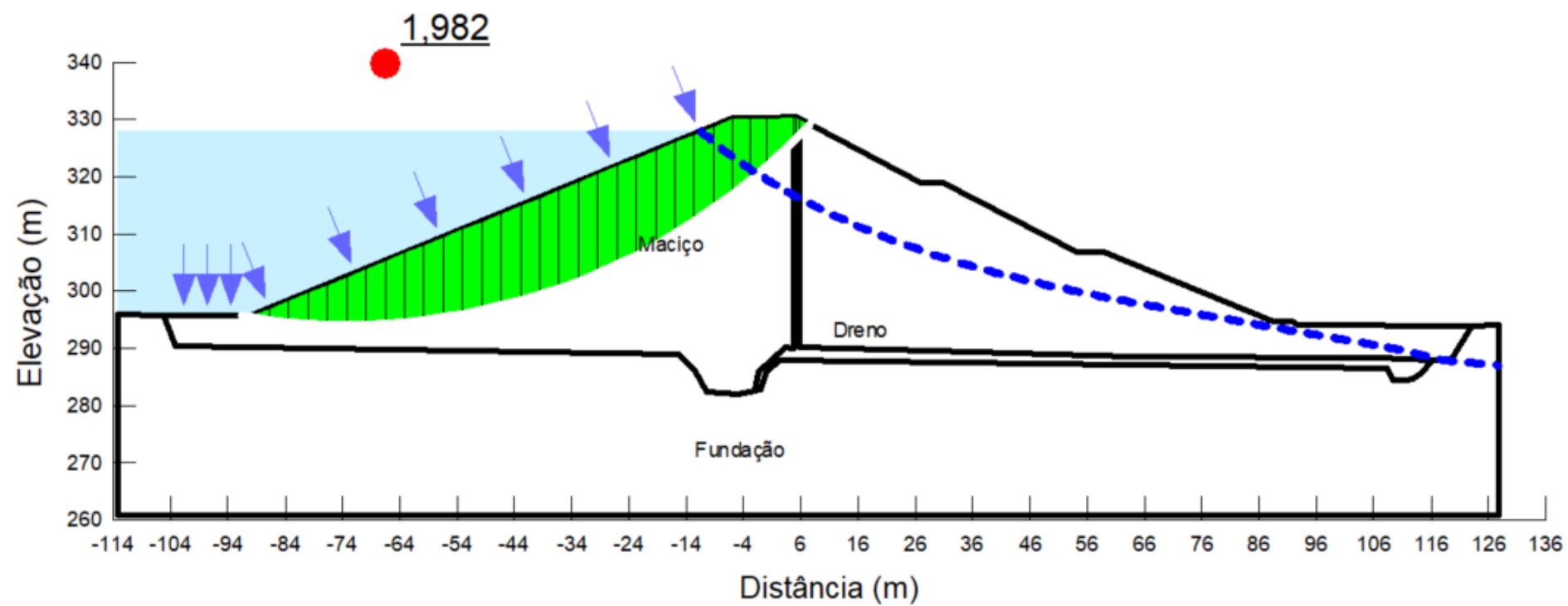


Fonte: Própria autora.

O fator de segurança diminui ainda mais nessa situação, como pode ser visto na Figura 53. Isso mostra como o filtro colmatado pode vir a prejudicar a estrutura.

A Figura 54 expõe o fator de segurança para o talude montante.

Figura 54 – Fator de segurança do talude montante com drenagem inoperante com sismos da seção da estaca 28+0,00 m.



Fonte: Própria autora.

Como já visto anteriormente, o fator de segurança é maior para o talude montante do que para o talude jusante. Nota-se, pela Figura 54, como o filtro colmatado pode afetar a estabilidade do barramento, em diversas situações.

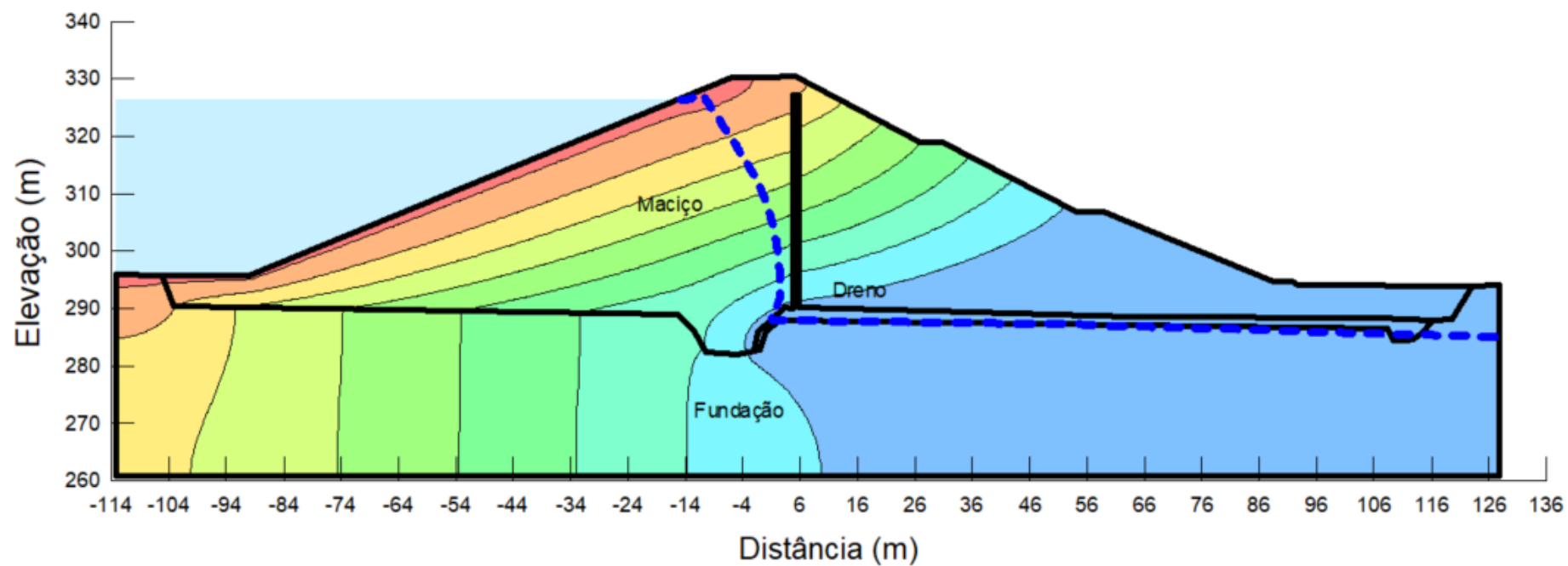
5.2.4. Rebaixamento rápido do reservatório

Este rebaixamento é com período de 30 dias, rebaixando um metro por dia nos primeiros 20 dias, e com nível d'água do reservatório estabilizado nos últimos 10 dias

Para tornar a apresentação mais dinâmica, para cada situação, tanto a percolação quanto o fator de segurança de estabilidade para ambos taludes estão apresentados a cada 5 dias, iniciando no primeiro dia e finalizando no 30º dia.

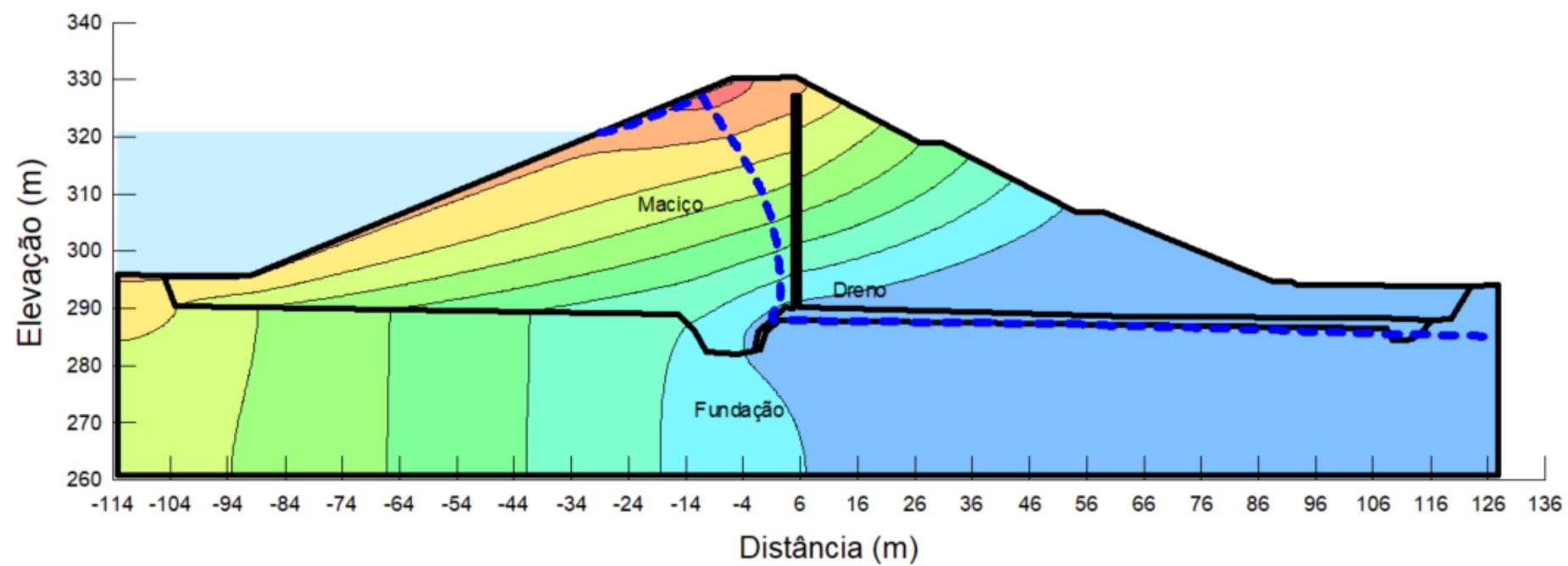
Em sequência estão apresentadas da Figura 55 a Figura 61 a percolação no maciço e na fundação ao longo dos 30 dias de rápido rebaixamento do reservatório.

Figura 55 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 1).



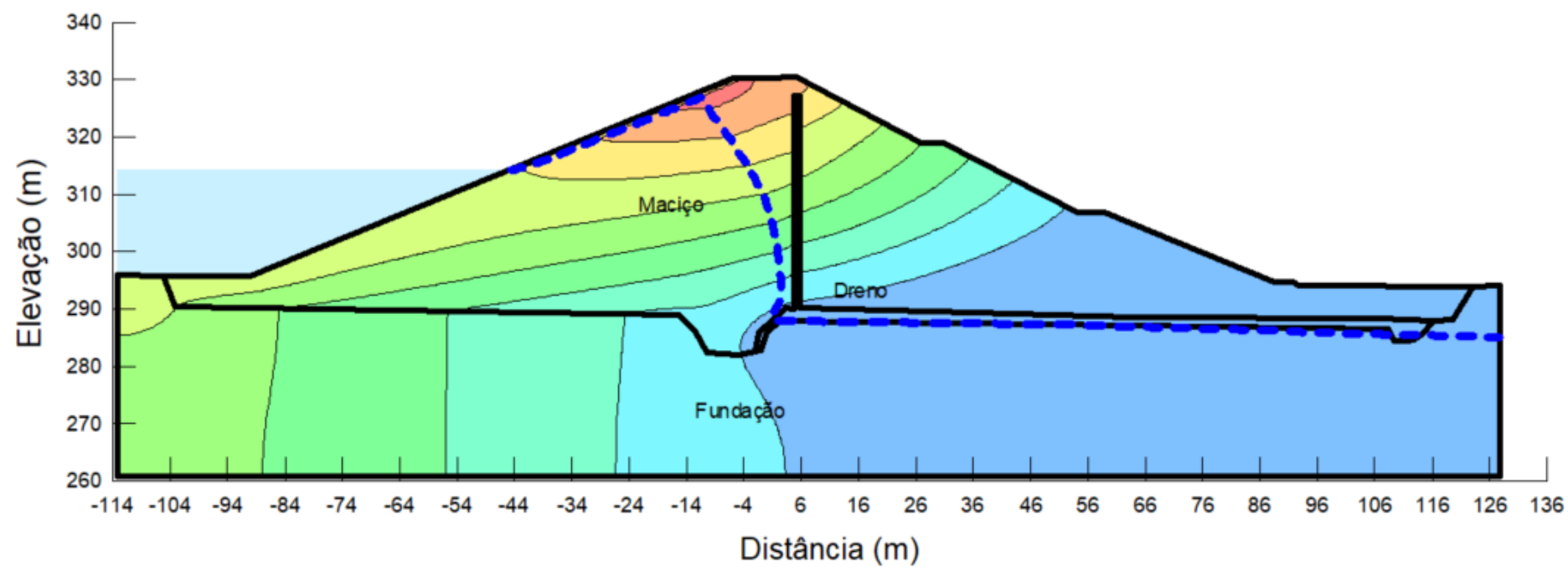
Fonte: Própria autora.

Figura 56 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 5).



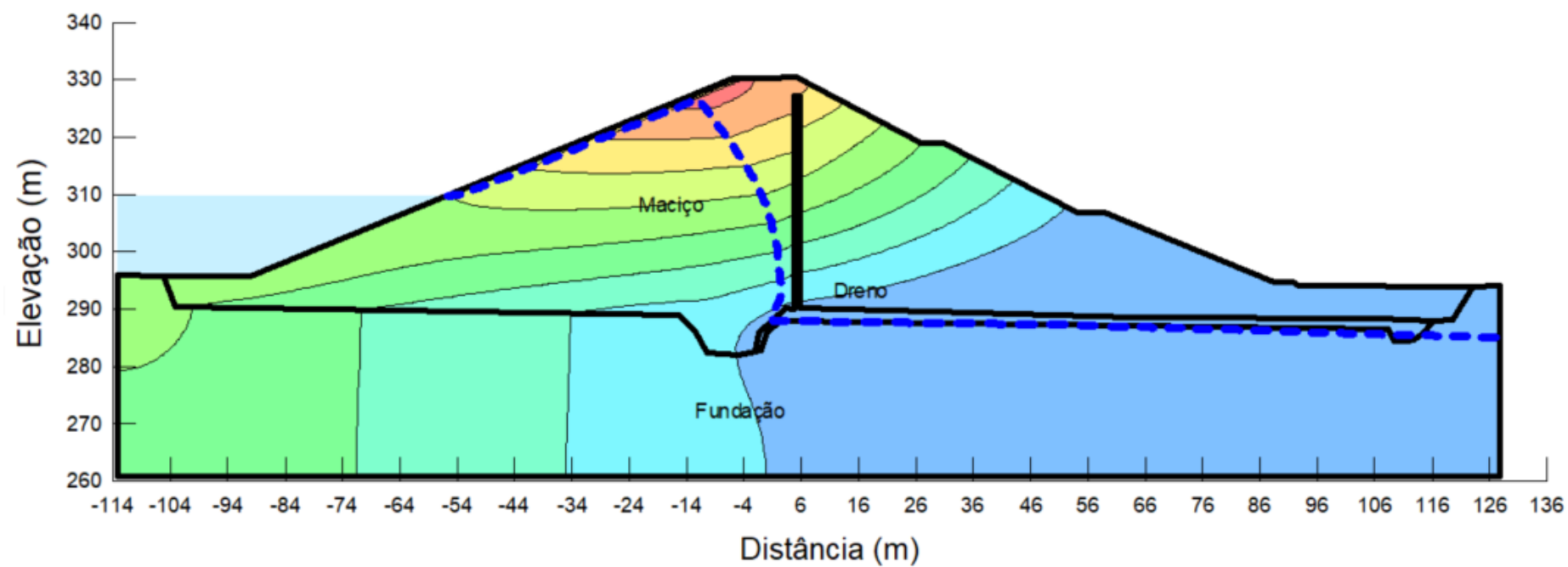
Fonte: Própria autora.

Figura 57 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 10).



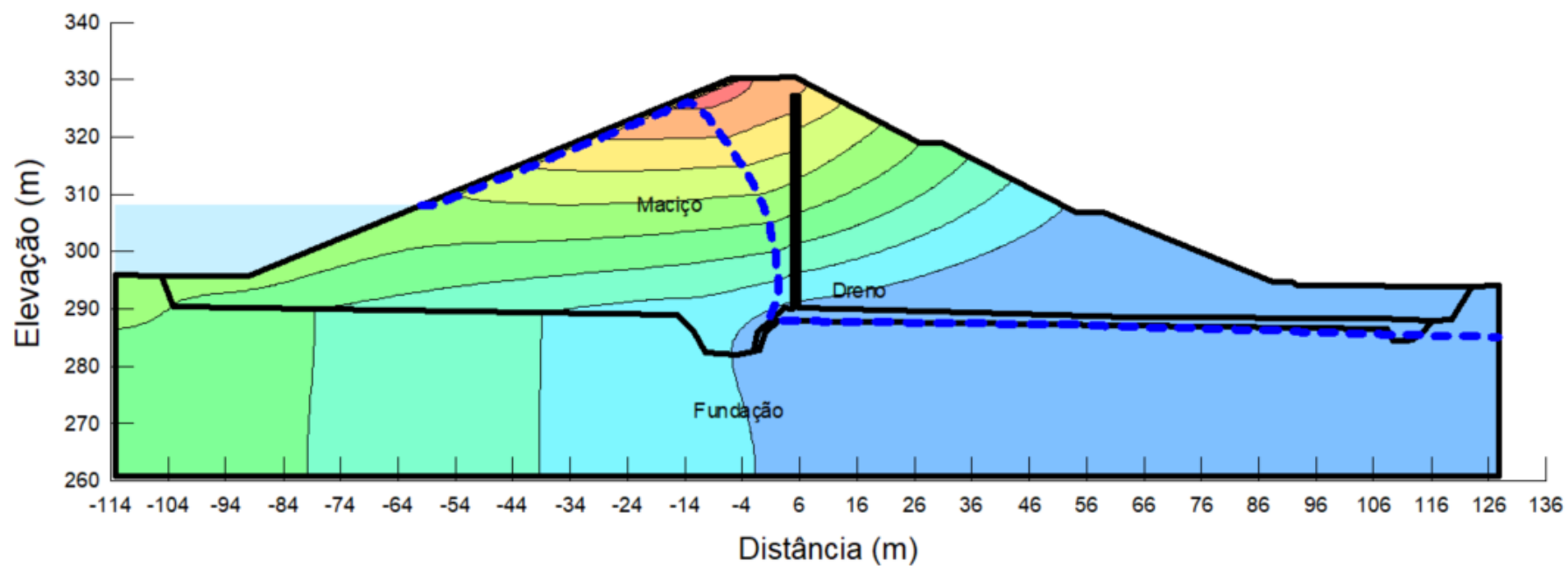
Fonte: Própria autora.

Figura 58 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 15).



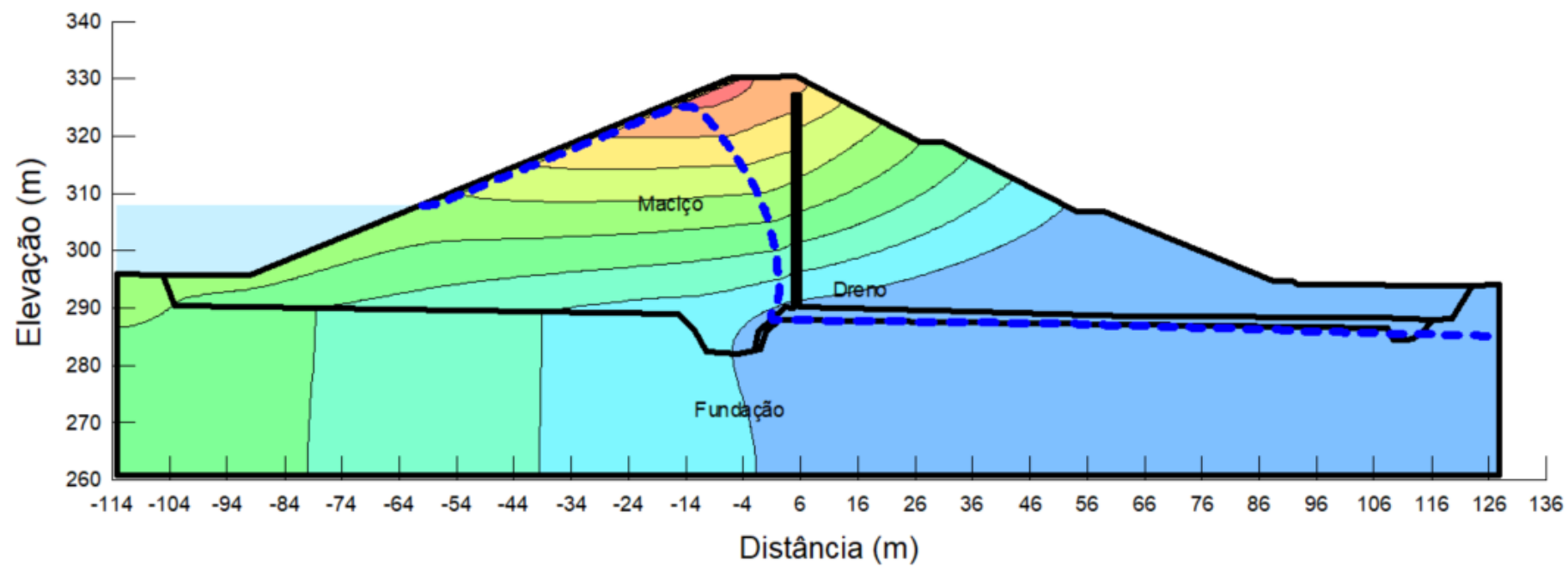
Fonte: Própria autora.

Figura 59 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 20).



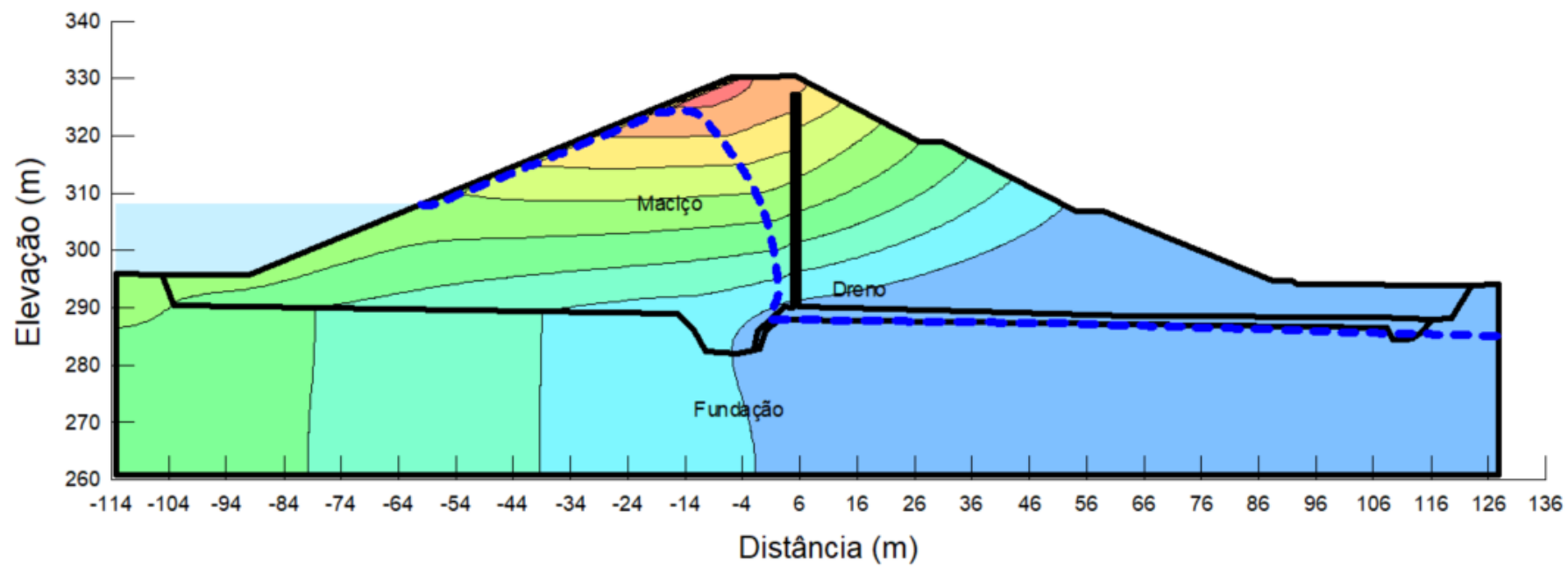
Fonte: Própria autora.

Figura 60 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 25).



Fonte: Própria autora.

Figura 61 – Rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 30).

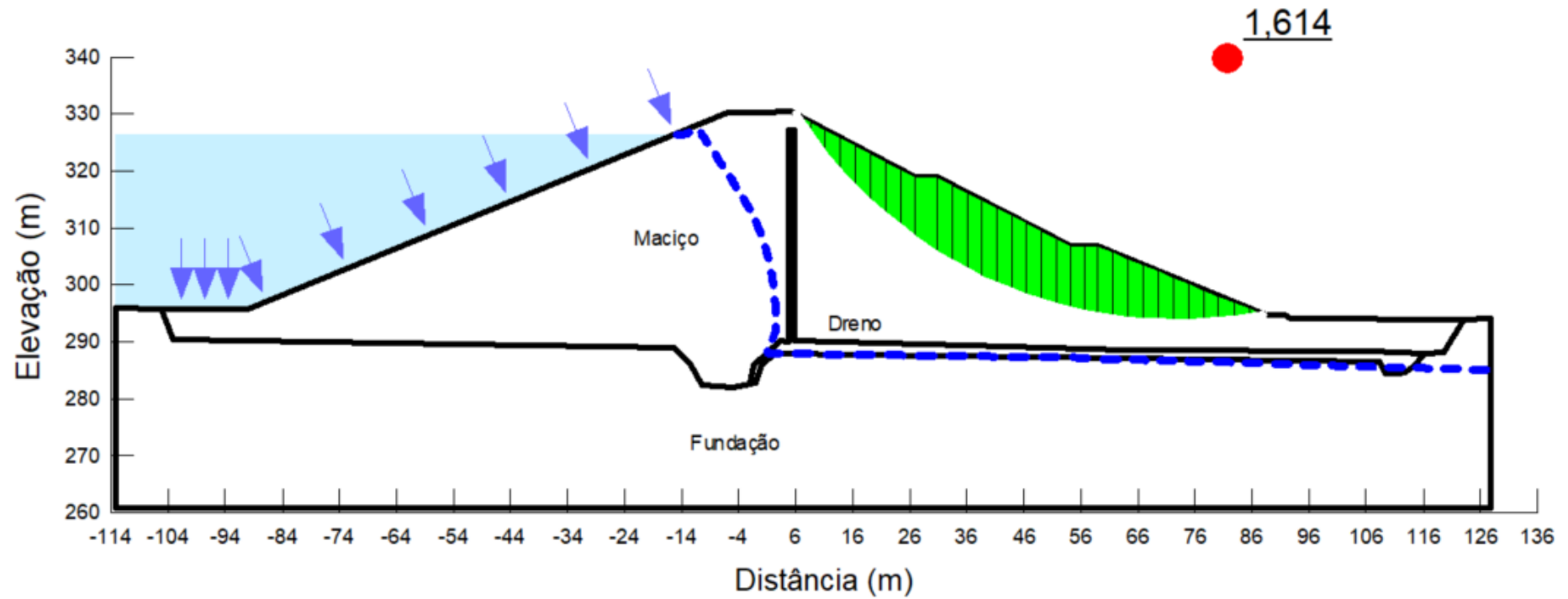


Fonte: Própria autora.

Por meio da Figura 55 a Figura 61, pode-se perceber que o nível freático praticamente não se altera. No entanto, o nível do reservatório cai drasticamente durante esse período, retirando o esforço causado pela carga de água do reservatório que agia a favor da segurança do talude montante.

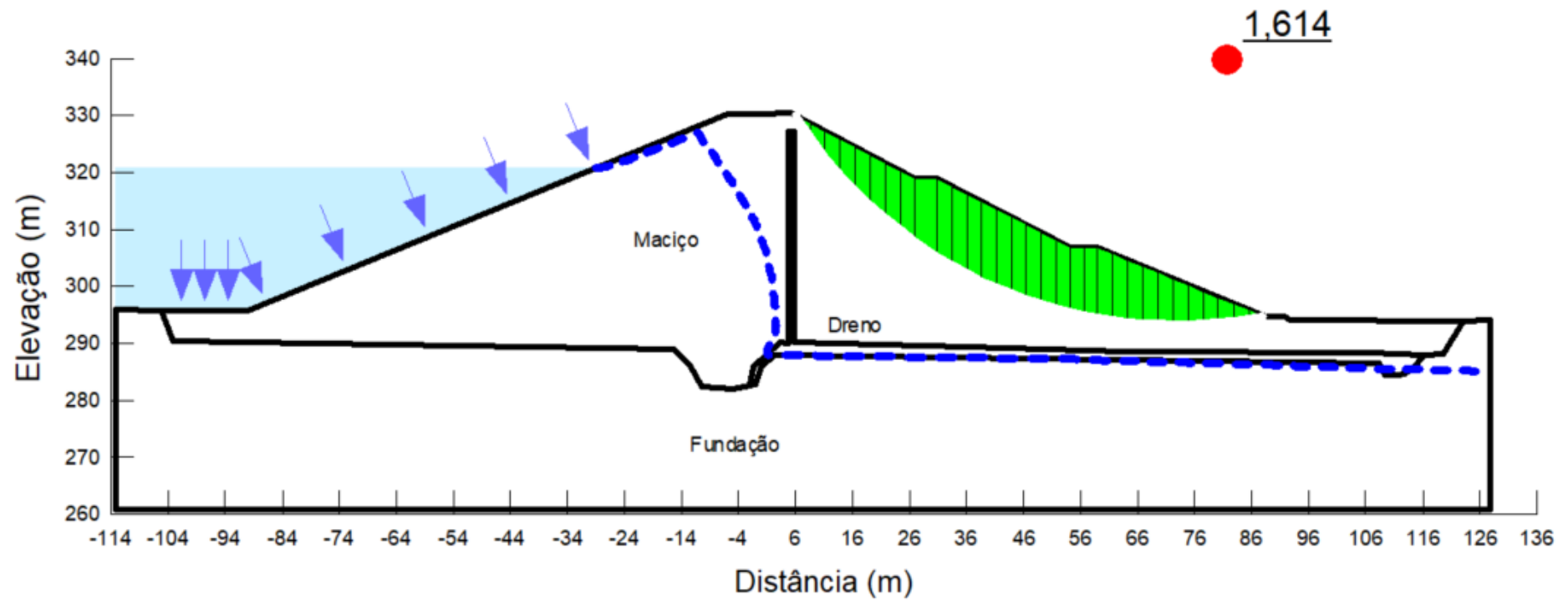
Da Figura 62 a Figura 68, estão apresentados o fator de segurança do talude de jusante durante esse rebaixamento, com os dias coincidentes com os dias apresentados da percolação.

Figura 62 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 1).



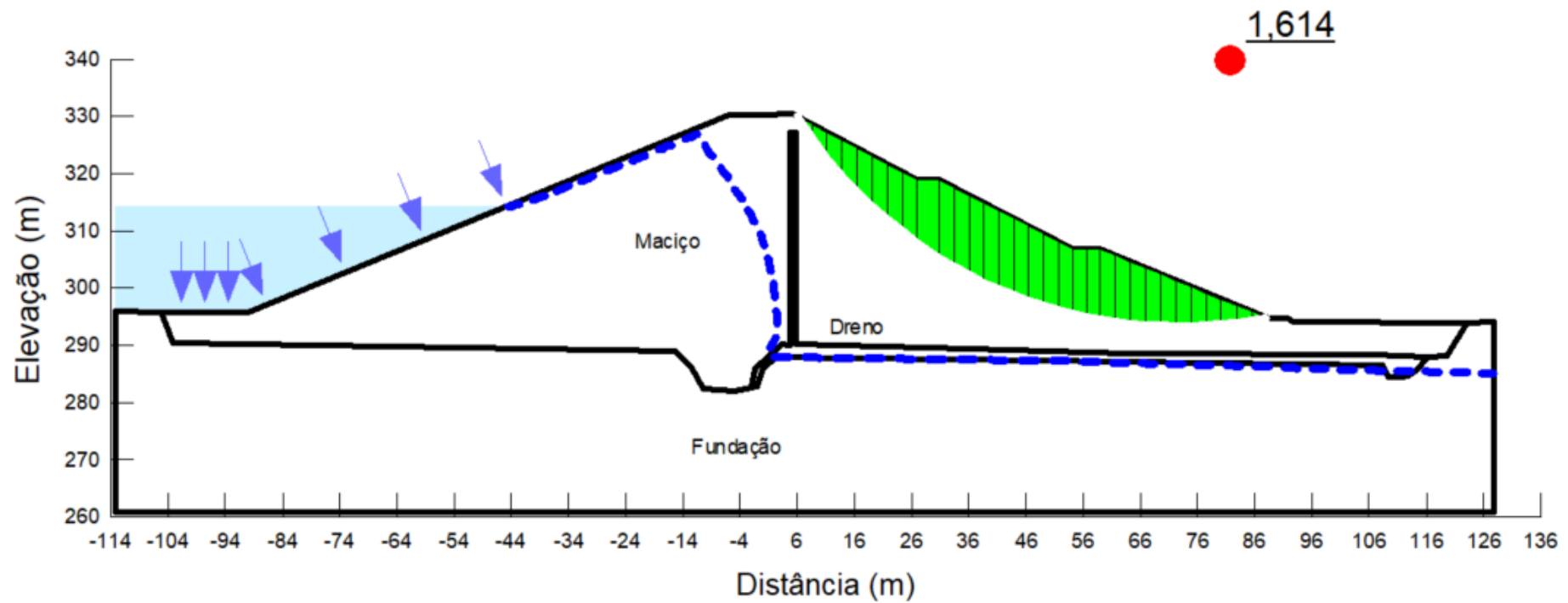
Fonte: Própria autora.

Figura 63 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 5).



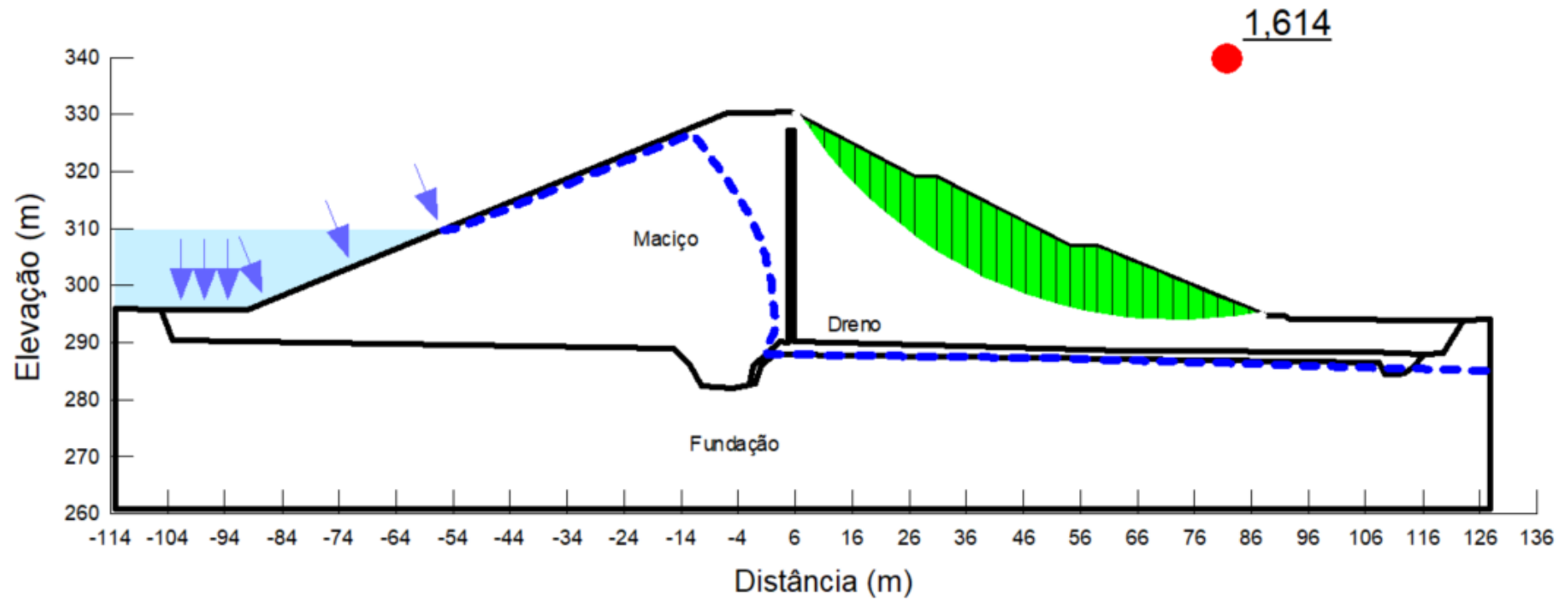
Fonte: Própria autora.

Figura 64 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 10).



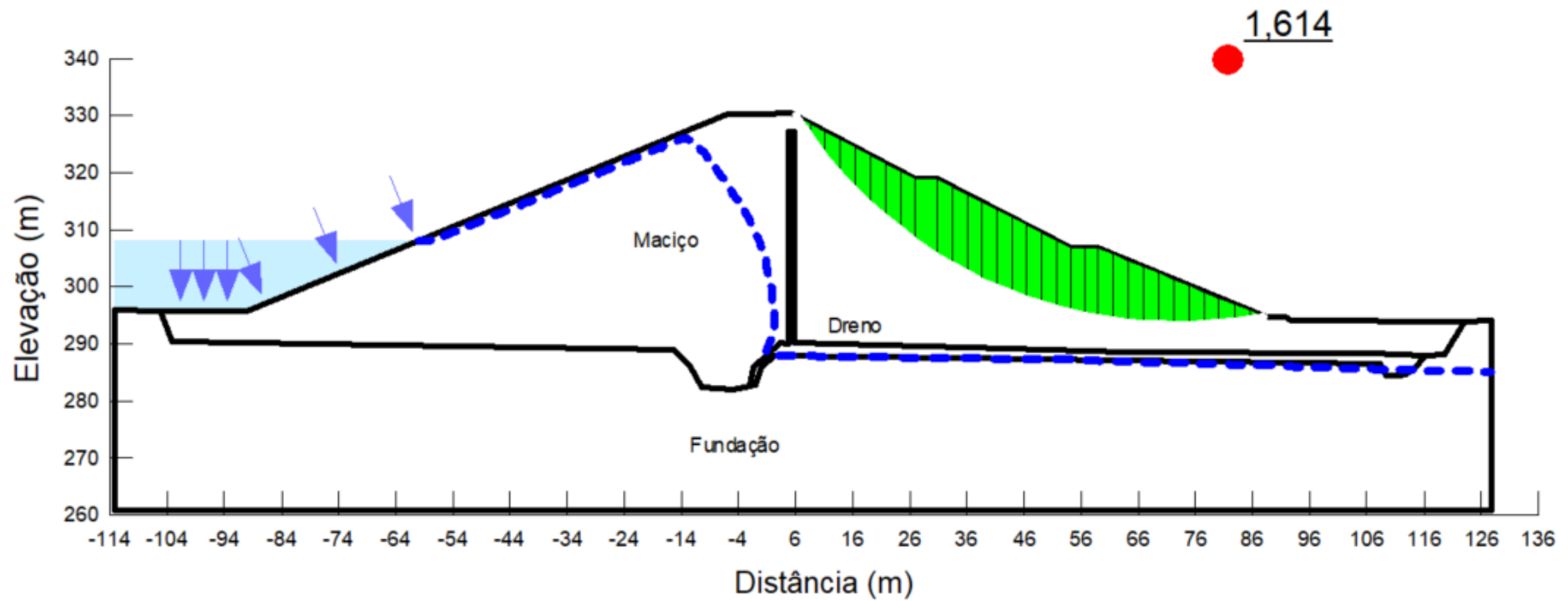
Fonte: Própria autora.

Figura 65 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 15).



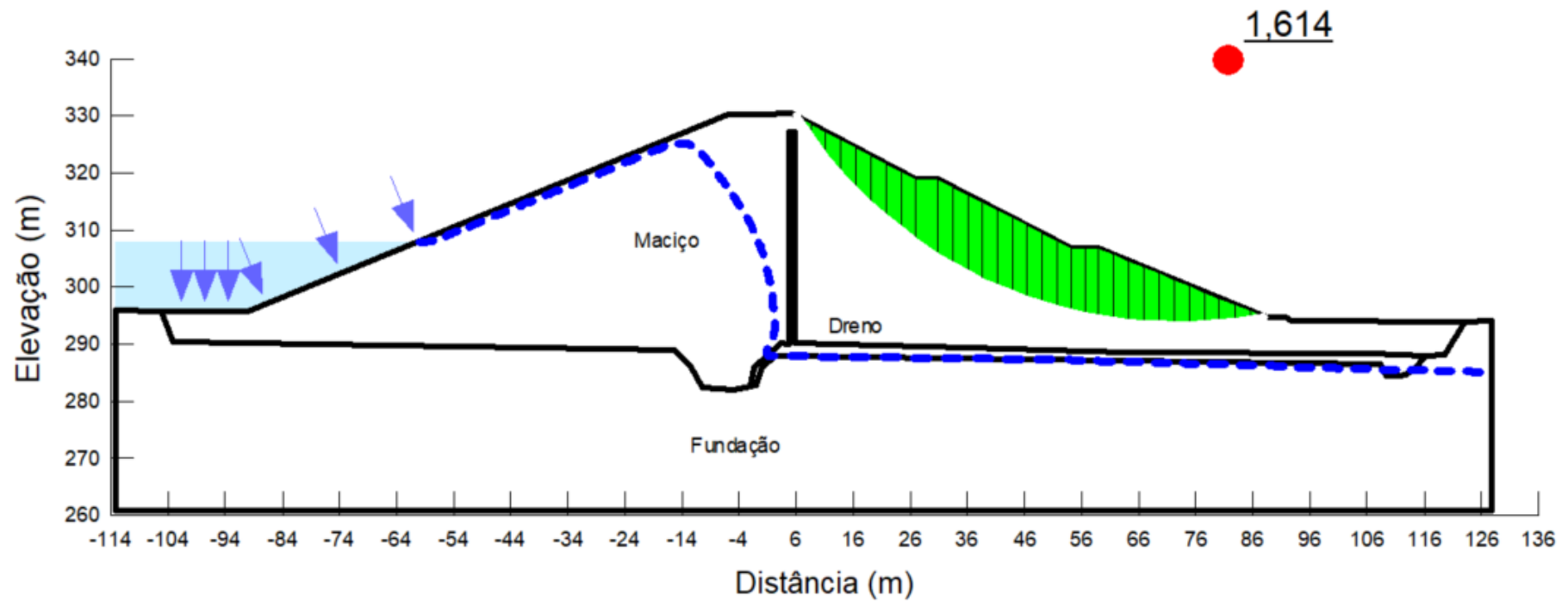
Fonte: Própria autora.

Figura 66 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 20).



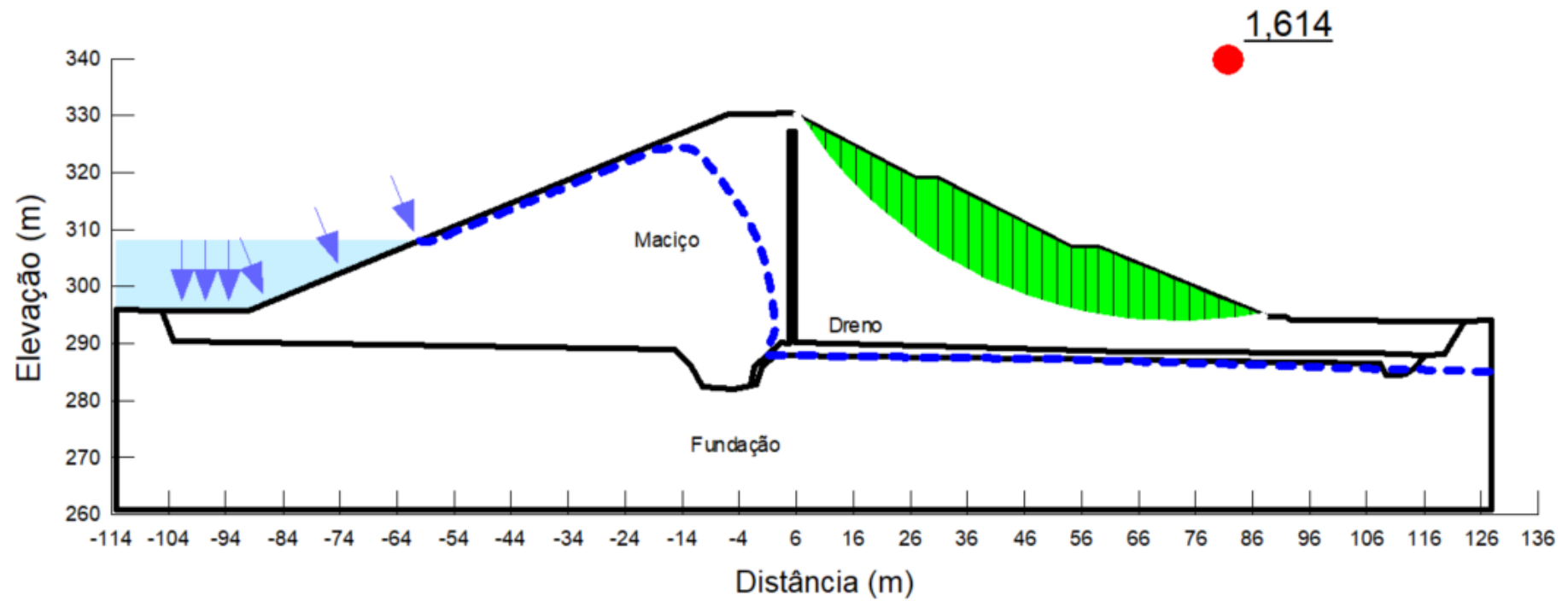
Fonte: Própria autora.

Figura 67 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 25).



Fonte: Própria autora.

Figura 68 – Fator de segurança do talude de jusante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 30).

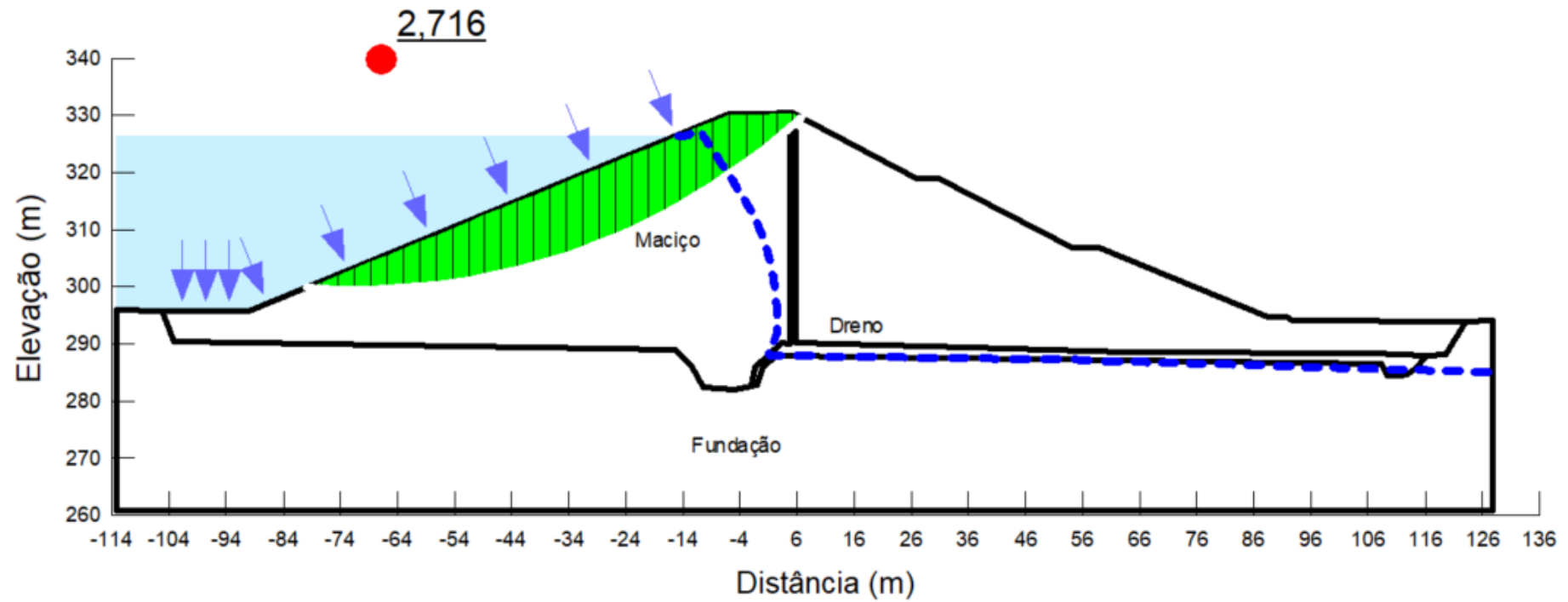


Fonte: Própria autora.

Da mesma forma que na seção anterior, o fator de segurança do talude jusante não se altera em nenhum momento durante o rebaixamento do reservatório.

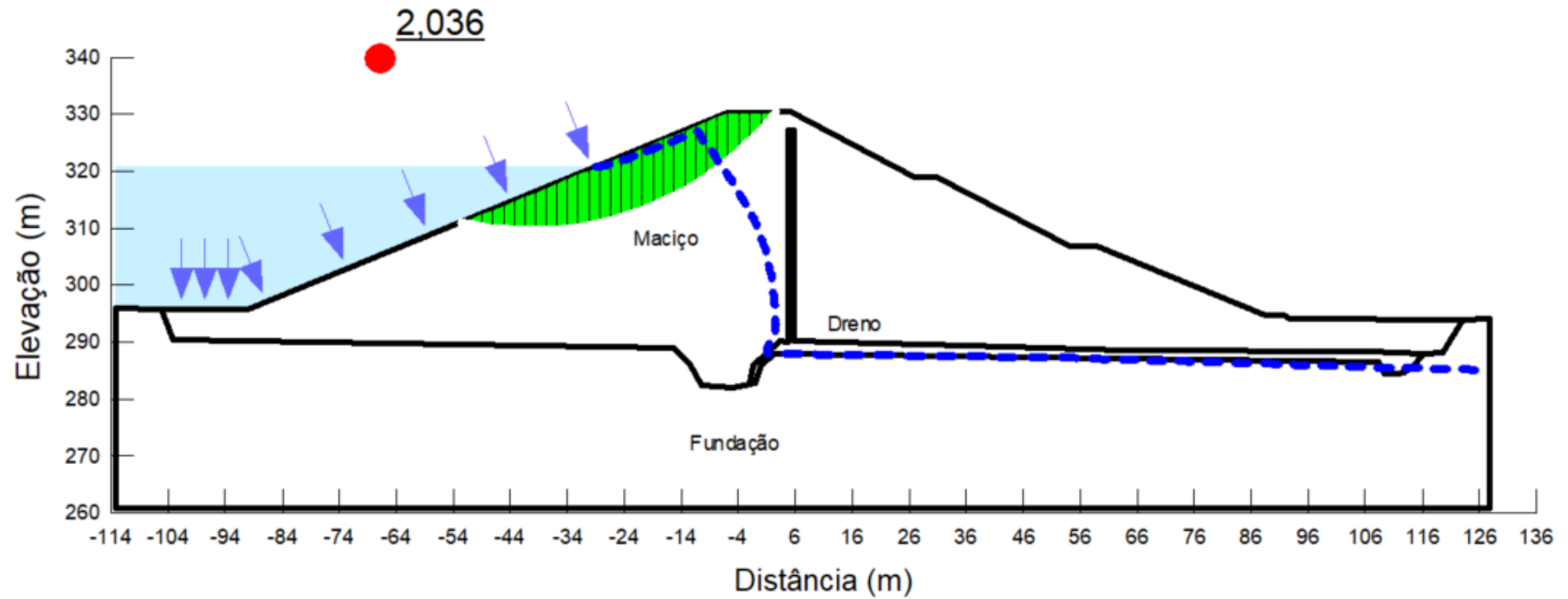
Da Figura 69 a 75, estão apresentados os fatores de segurança para o talude montante, com os dias coincidentes com os dias apresentados da percolação.

Figura 69 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 1).



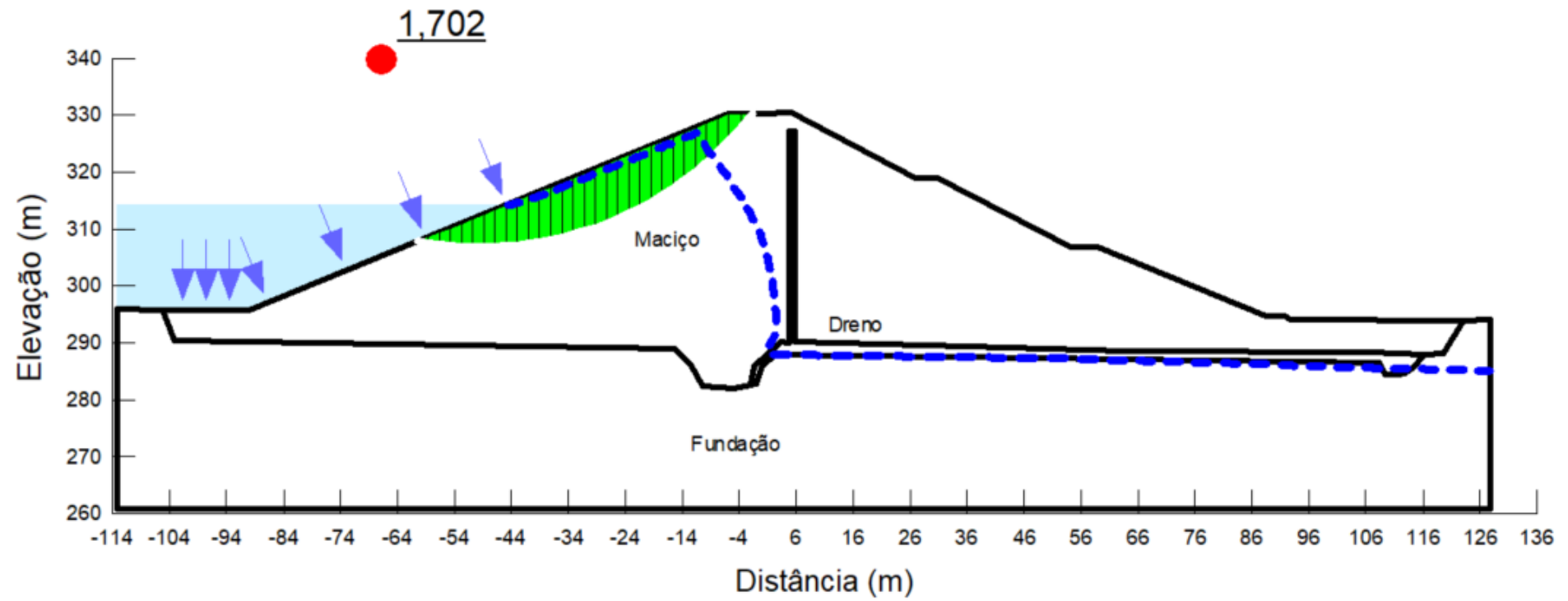
Fonte: Própria autora.

Figura 70 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 5).



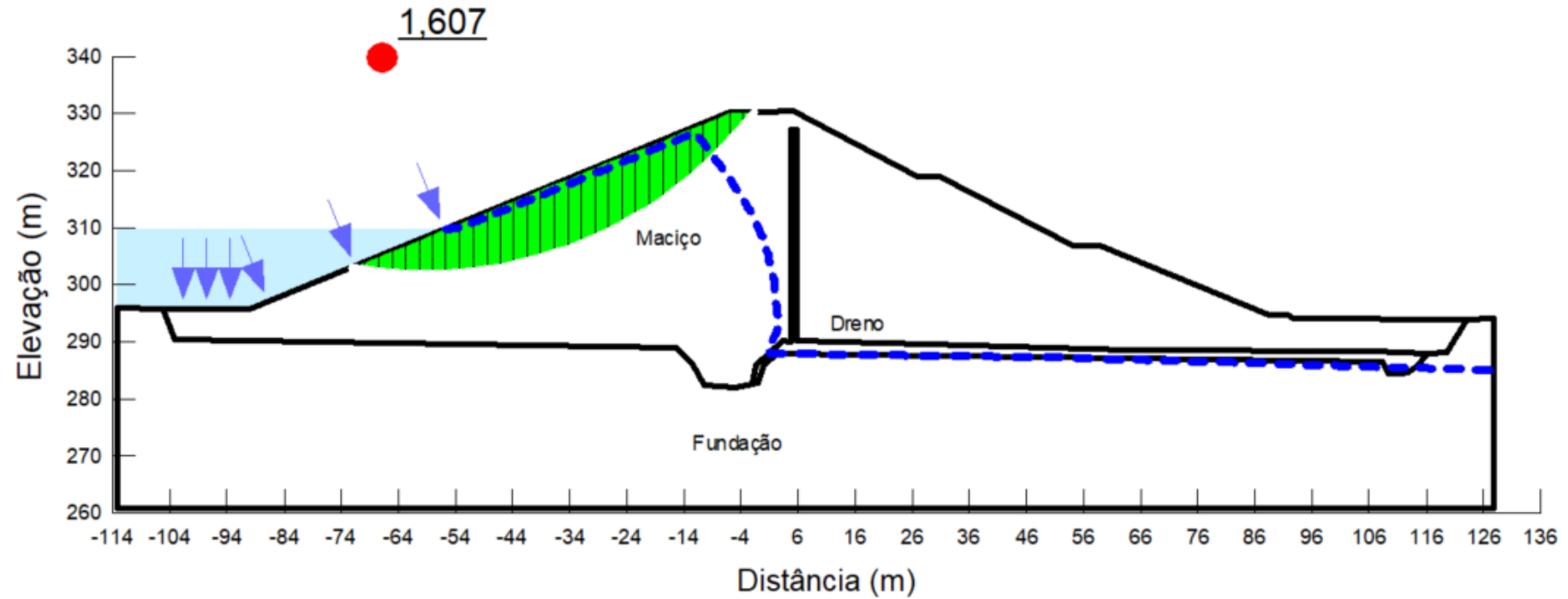
Fonte: Própria autora.

Figura 71 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 10).



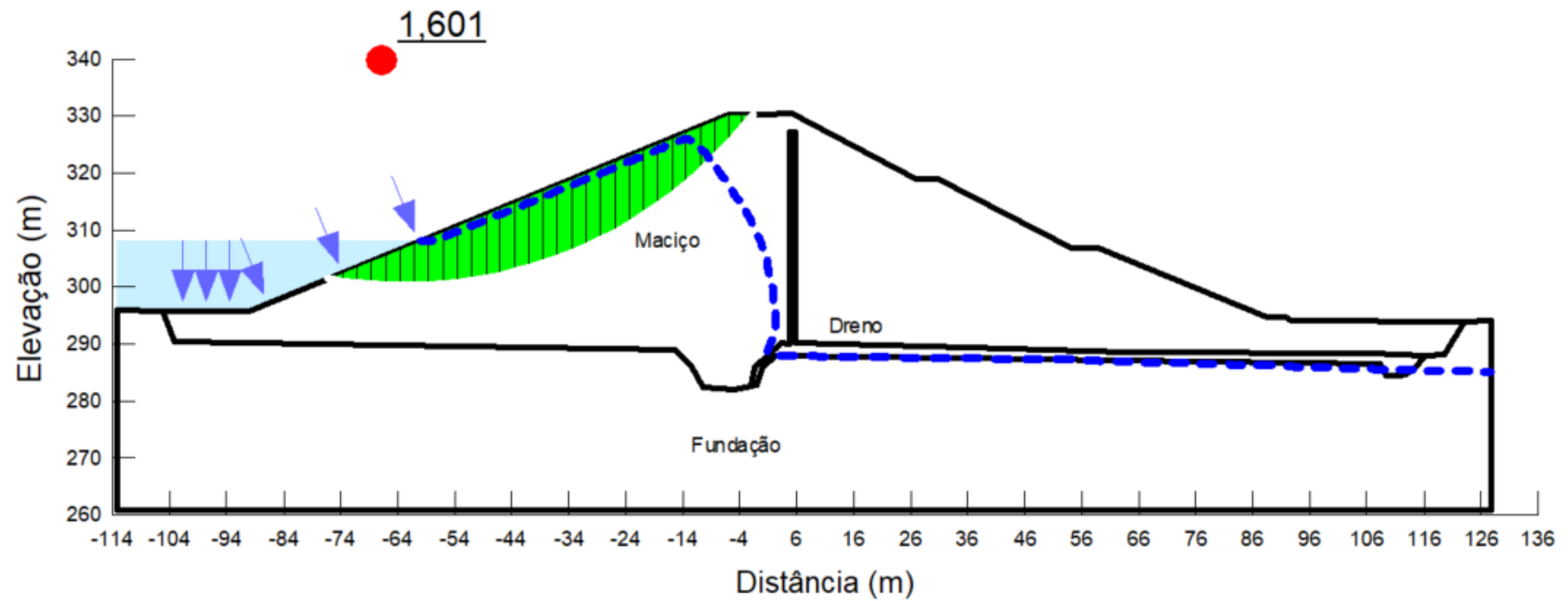
Fonte: Própria autora.

Figura 72 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 15).



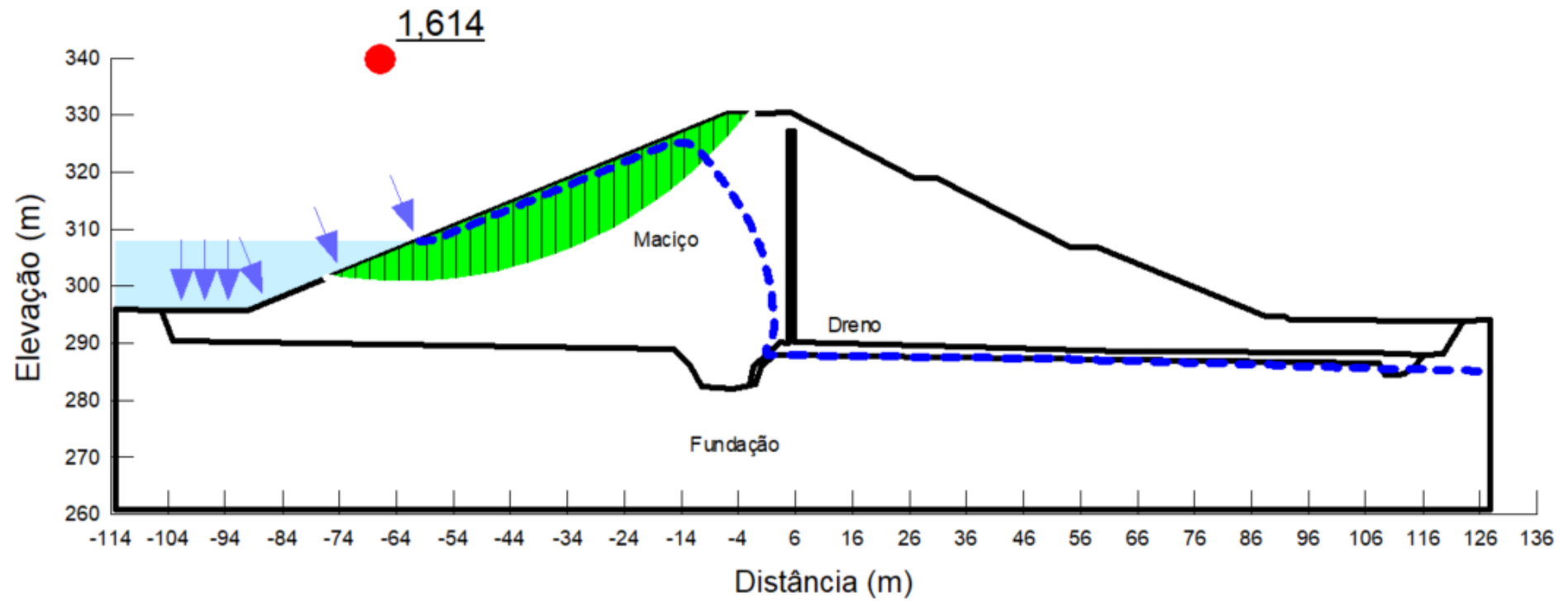
Fonte: Própria autora.

Figura 73 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 20).



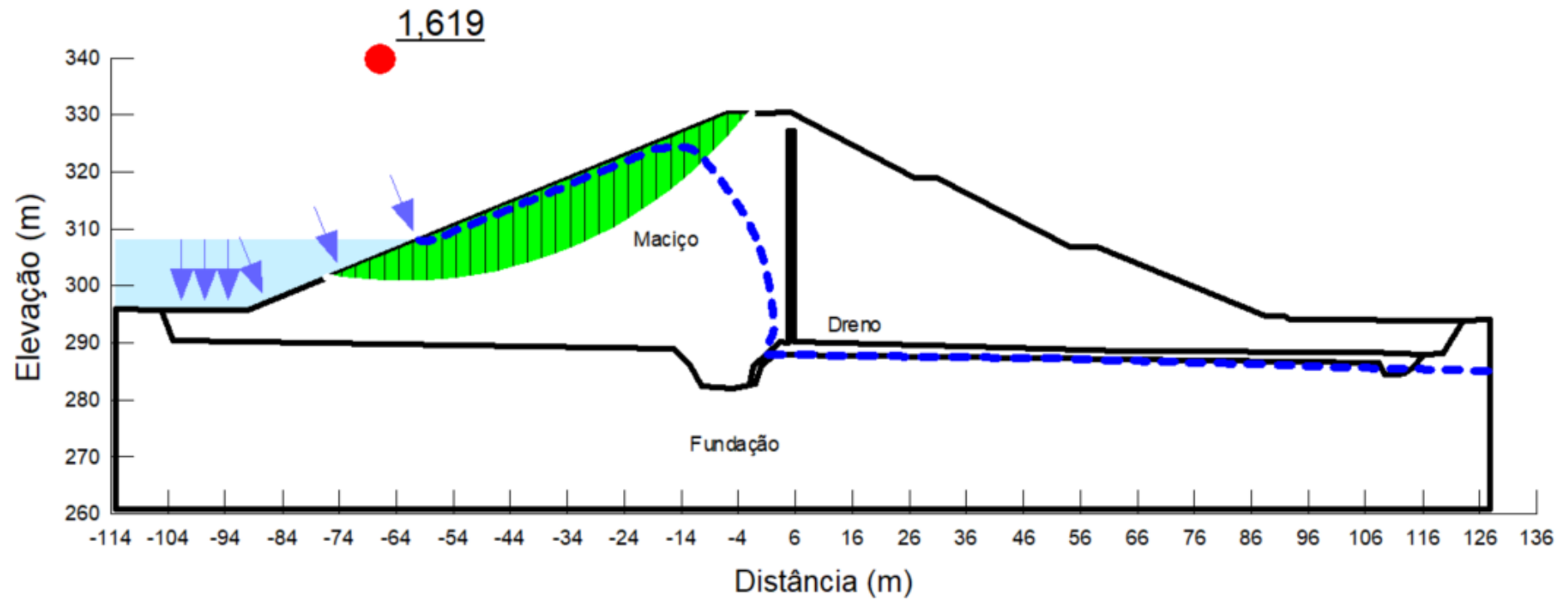
Fonte: Própria autora.

Figura 74 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 25).



Fonte: Própria autora.

Figura 75 – Fator de segurança do talude de montante no rebaixamento rápido do reservatório da seção da estaca 111+10,00 m (dia 30).



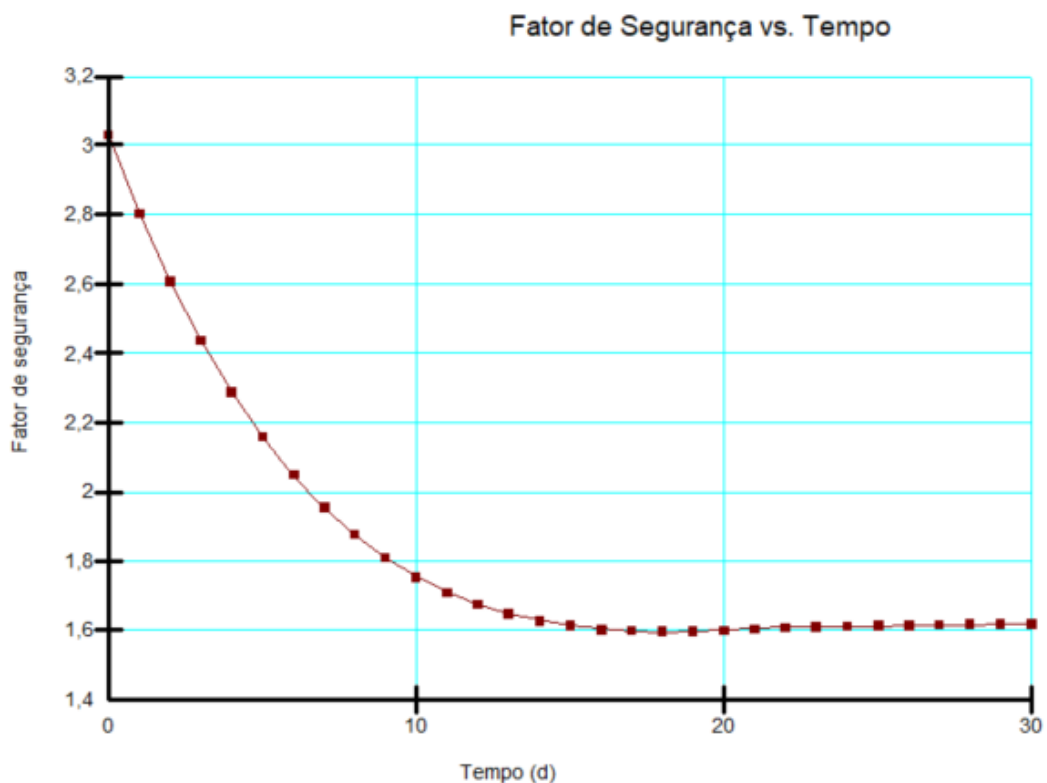
Fonte: Própria autora.

Da mesma forma como mostrado sobre a seção anterior, nos 10 primeiros dias, observa-se que o fator de segurança diminui expressivamente. Entre o 10º e 20º dia, o fator começa um processo de estabilização. Entretanto, a partir do dia 20º dia, o fator de segurança aumenta, e segue aumentando até o 30º dia, esse evento acontece em razão do nível do reservatório estabilizar nesse período, o que estabilizaria o fator também, porém, como o nível freático dentro do maciço começa a diminuir, lentamente, o fator tem seu valor um pouco aumentado nesses últimos dias.

Apesar disso, no momento mais crítico para o talude de jusante, o fator de segurança ainda atende os critérios de aceitação previstos em literatura.

A fim de resumir as alterações do fator de segurança do talude montante, o talude afetado pelo rebaixamento rápido, no gráfico 1 estão apresentados o fator de segurança ao longo do tempo.

Gráfico 2 – Fator de segurança do talude jusante da seção da estaca 111+10,00 m ao longo do tempo.



Fonte: Própria autora.

6. CONCLUSÕES

Com exceção da situação extrema de drenagem interna totalmente inoperante na seção da margem esquerda, os fatores de segurança de estabilidade de taludes obtidos encontram-se acima dos critérios de aceitação encontrados em literatura. De qualquer forma, segundo os dados fornecidos pelo empreendedor, a UHE Três Irmãos é bastante instrumentada, que possibilitaria a identificação de um problema no filtro.

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se observar a importância do sistema de drenagem interna para a estrutura de uma barragem, bem como a funcionalidade do reaterro, quando comparado os resultados das duas seções.

O estudo de estabilidade é uma atividade preventiva de fundamental importância, pois possibilita o diagnóstico interno da barragem junto à análise da instrumentação. Estes, junto às demais atividades de segurança de barragens realizadas pela UHE Três Irmãos, contribuem para uma barragem segura e estável.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil - ANA). Relatório de segurança de barragens 2020 / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. -- Brasília: ANA, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11682: Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro, 1991, p. 2 e 3.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Brasília, DF. Setembro de 2020. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art2. Acesso em 18 de fevereiro de 2022.

COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projeto. Oficina de Textos, 1996.

DOS REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. Manole, 2000.

ECHAGUE, Jorge et al. ESTUDO DE ESTABILIDADE EM UMA BARRAGEM DE TERRA COM ÊNFASE NA ANÁLISE GEOTÉCNICA E GEOFÍSICA. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 10, n. 2, 2018.

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. **Rio de Janeiro**, 2003.

FREITAS, M.A.C. *et al.* Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Morgenstern-Price e Correia. 2011.

GERSCOVICH, Denise M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2ª ed. Oficina de Textos, 2016.

LAURIANO, A. W. Estudo de ruptura da barragem de funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal de Minas Gerais), Belo Horizonte - MG, Brasil, 2009.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de Textos, 2010.

MEDEIROS, Carlos Henrique de AC. Curso de Segurança de Barragens (320h). 2020.

MELLO, F. M.; PIASENTIN, C. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: 50 anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

OLIVEIRA, N. C. C. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. *Varia Historia*, v. 34, 2018, p. 315-346.

SINGH, V. **Dam breach modeling technology**. Springer Science & Business Media, 1996.

VITERBINO, Lucas; FREITAS, Jeremy. Análise de estabilidade de taludes de barragens de terra. *Revista Científica Multidisciplinar do CEAP*, v. 2, n. 1, p. 10-10, 2020.