

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

SABRINA STANZIONE BERING

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITO ALTEADA PELO
MÉTODO DE JUSANTE COM SOFTWARE DE MÉTODO DE ELEMENTOS
FINITOS**

Ilha Solteira
2023

SABRINA STANZIONE BERING

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITO ALTEADA PELO
MÉTODO DE JUSANTE COM SOFTWARE DE MÉTODO DE ELEMENTOS
FINITOS**

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. Artur Pantoja Marques
Orientador

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Bering, Sabrina Stanzione.

B511a Análise da estabilidade de barragem de rejeito alteada pelo método de jusante com software de método de elementos finitos / Sabrina Stanzione Bering. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023

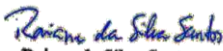
71 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Artur Pantoja Marques

Inclui bibliografia

1. Barragem. 2. Estabilidade. 3. Geotécnica. 4. Deslizamento. 5. Rejeito. 6. Software.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Setor
Setor Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

Sabrina Stanzione Bering

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITO ALTEADA PELO
MÉTODO DE JUSANTE COM SOFTWARE DE MÉTODO DE ELEMENTOS
FINITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenharia 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.

Aprovada em 16/01/2023

Comissão Examinadora


Prof. Dr. Artur Pantoja Marques

UNESP/FE - Ilha Solteira (Orientador)


Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcântara

UNESP/FE Ilha Solteira (Examinador)


Profa. Dra. Claudia Scoten Antonio Marques

UNIFUNEC/Santa Fé do Sul (Examinadora)

Ilha Solteira
16 de janeiro de 2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu amado pai que infelizmente a vida levou cedo demais, mas deixou sua filha para concluir o nosso objetivo da vida de ser bacharel em engenharia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu a oportunidade de ter uma família maravilhosa que influenciou em ser a mulher que eu sou. Principalmente minha Mãe Nanci, que sempre me apoiou em todas as minhas decisões e foi meu suporte, mulher incrivelmente forte que nunca me deixou faltar nada nesta vida, inclusive amor.

Agradeço meu avô e meu pai que não estão aqui para participar deste momento, homens esses que sempre estiveram comigo e me influenciaram a amar a engenharia e as ciências exatas, sei que estariam orgulhosos.

Ao meu irmão Bruno que sempre me defendeu e me incentivou e a minha tia Cleovi que me deu todo o suporte necessário para trilhar minha jornada, também a minha irmã Camila por nunca me deixar faltar carinho e atenção.

Aos meus amigos que dividiram comigo esses longos 6 anos de graduação, me acompanhando e incentivando em muitos momentos, principalmente a minha república Álcool-Íris, onde encontrei uma segunda família com a Sarah, Laura, Paula e Emilly e com meus amigos Wesley e Caroline.

A minha gratidão ao meu primeiro orientador, Professor Dr. Adriano Souza que não me deixou desistir da graduação, me incentivando a prosseguir e ser monitora e sua orientada e ao Professor Dr. Artur Pantoja Marques por orientar o final desse trabalho.

A Geolite, que me ofereceu a primeira oportunidade na área de geotecnia, abrindo meu caminho para trabalhar na mineração brasileira e forneceu todo o conhecimento e dados utilizados.

Fica minha gratidão principal a UNESP do campus de Ilha Solteira por me dar a oportunidade de ser bacharel em engenharia civil e me proporcionar conhecer professores incríveis e pessoas especiais. Obrigada por seis maravilhosos anos nesta cidade incrível.

RESUMO

Os tipos de construções de estruturas de contenção de rejeitos estão passando por muitos avanços tecnológicos nos processos construtivos e as vigências de novas normas, sendo esse o novo contexto brasileiro. Dessa forma, o trabalho teve por finalidade a apresentação das análises de estabilidade de uma barragem de rejeitos com alteamento a jusante. Os estudos foram baseados em métodos de estabilidade de taludes, com aplicação de diferentes cenários de forças solicitantes na estrutura, gerando fatores de segurança críticos, os quais serão alvo de estudo. Os projetos executivos e as características dos materiais foram obtidas do empreendedor e empregados no presente trabalho. As análises foram realizadas com o auxílio do *software* de métodos dos elementos finitos para determinação da rede de fluxo e os cenários de condição drenada, não drenada, de sismo drenada e sismo não drenada. A partir dos resultados obtidos, as seções apresentaram-se satisfatórios em comparação com a literatura, exceto na condição não drenada, o que atesta a necessidade de um novo alteamento a jusante para garantir o atendimento aos fatores de segurança determinados pela legislação vigente.

Palavras-chave: Barragem. Estabilidade. Geotécnica. Deslizamento. Rejeito. *Software*.

ABSTRACT

The types of construction of tailings containment structures are undergoing many technological advances in construction processes and the validity of new standards, which is the new Brazilian context. Thus, the purpose of this work is to present the stability analyzes of a tailings dam with downstream elevation. The studies are based on slope stability methods, with application of different scenarios of requesting forces in the structure, generating critical safety factors, which will be studied. The executive projects and the characteristics of the materials were initiated by the entrepreneur and used in the present work. The analyzes were carried out with the aid of the software of finite element methods for the flow network and the drained, undrained, drained earthquake and undrained earthquake condition scenarios. From the results obtained, the sections presented are restricted in comparison with the literature, except in the undrained conditions, which attests to the need for a new heightening just to ensure compliance with the right safety factors by the current legislation.

Keywords: Dam. Stability. Geotechnics. Flowers. Tailings. Software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de barragem alteada a montante.	16
Figura 2 - Modelo de barragem alteada a jusante.	17
Figura 3 - Seção típica de uma barragem de terra.	20
Figura 4 - Terminologia do talude.	22
Figura 5 - Rede de fluxo para barragem de terra.	24
Figura 6 - Modelo de escorregamento de translação.	26
Figura 7 - Modelo de escorregamento rotacional.	27
Figura 8 - Escorregamento circular.	28
Figura 9 - Escorregamento em cunha.	29
Figura 10 - Escorregamento planar.	30
Figura 11 - Movimento de queda de blocos por rolamento e tombamento.	31
Figura 12 - Fluxo de lama com detritos.	31
Figura 13 - Rastejo.	32
Figura 14 - Ilustração das forças existentes no método das lamelas.	33
Figura 15 - Talude com diferentes superfícies de deslizamento.	35
Figura 16 - Forças atuantes no Bishop.	37
Figura 17 - Ábaco para determinação do $M\alpha$ inicial.	38
Figura 18 - Forças atuantes no Morgenstern-Price.	39
Figura 19 - Forças atuantes no método Spencer.	40
Figura 20 - Divisão de um domínio em elementos.	44
Figura 21 - Compartimentação tectonoestratigráfica da Província Tocantins.	47
Figura 22 - Detalhamento da seção B da barragem.	48
Figura 23 - Vista geral da barragem de rejeitos.	49
Figura 24 - Detalhamento da seção D da barragem.	50
Figura 25 - Fluxograma das etapas das análises de estabilidades de taludes.	51
Figura 26 - Planta da barragem com indicação das seções de corte e instrumentação.	52
Figura 27 - Modelo da seção B de cálculo.	55
Figura 28 - Modelo da seção D de cálculo.	55
Figura 29 - Cálculo para condição drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,532$	57
Figura 30 - Cálculo para condição não drenada – Metodologia Morgenstern-Price – $FS=1,440$	58
Figura 31 - Cálculo para condição de sismo drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,321$	59
Figura 32 - Cálculo para condição de sismo não drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,229$	60
Figura 33 - Traçado da rede de fluxo para a seção B.	61
Figura 34 - Cálculo para condição drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,589$	63
Figura 35 - Cálculo para condição não drenada – Metodologia Morgenstern-Price – $FS=1,472$	64
Figura 36 - Cálculo para condição de sismo drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,366$	65
Figura 37 - Cálculo para condição de sismo não drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,262$	66
Figura 38 - Traçado da rede de fluxo para a seção D.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração.	24
Tabela 2 - Cota dos níveis de água da barragem de terra.	52
Tabela 3 - Propriedades dos materiais para os cálculos em condição drenada.....	54
Tabela 4 - Propriedades dos materiais para os cálculos em condição não drenada.	54
Tabela 5 - Coeficiente de permeabilidade dos materiais.....	54
Tabela 6 - Resultado dos cálculos da seção B.....	56
Tabela 7 - Resultado dos cálculos da seção D.	62

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1	HISTÓRIA DAS BARRAGENS.....	15
3.1.1	No mundo	15
3.1.2	No Brasil	15
3.2	CONCEITOS BÁSICOS	16
3.2.1	Definições.....	16
3.2.2	Objetivos e tipos de barragens	17
3.2.3	Escolha da seção típica.....	20
3.2.4	Estabilidade de barragens	21
3.2.5	Percolação da água.....	22
3.2.6	Rede de fluxo	23
3.2.7	Fator de segurança.....	24
3.3	SUPERFÍCIE DE RUPTURA.....	26
3.3.1	Escorregamentos circular	27
3.3.2	Escorregamentos em cunha.....	28
3.3.3	Escorregamentos planar.....	29
3.3.4	Quedas	30
3.3.5	Corridas	31
3.3.6	Rastejo	32
3.4	MÉTODO DE LAMELAS	32
3.5	EQUILÍBRIO LIMITE.....	34
3.6	BISHOP	36
3.7	MORGENSTERN-PRICE	38
3.8	SPENCER	39
3.9	ENSAIOS DE CAMPO.....	40
3.9.1	Sondagem SPT	40
3.9.2	Sondagem mista.....	41
3.10	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	41
3.11	INSTRUMENTAÇÃO DE MONITORAMENTO	42

3.11.1	Piezômetros.....	42
3.11.2	Indicadores de nível de água.....	42
3.12	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	43
3.12.1	História	43
3.12.2	Funcionamento	43
3.12.3	Malha de nós	44
3.12.4	Software de estabilidade de taludes	45
3.13	LIQUEFAÇÃO DE REJEITOS	45
4.	METODOLOGIA.....	47
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO	47
4.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE.....	50
4.3	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS	53
4.4	SEÇÕES DOS MODELOS DE CÁLCULOS.....	55
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	CÁLCULOS DA SEÇÃO B	56
5.2	CÁLCULOS DA SEÇÃO D	62
6.	CONCLUSÃO.....	68
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
8.	REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A barragem é definida como qualquer estrutura que atenda o objetivo de, construída de forma interna ou externa ao curso de água permanente ou transiente, conter a abundância dos fluídos ou sólidos, em cava exaurida com diques ou talvegue, apresentado o barramento junto com suas estruturas em associação (PINTO, 2022).

As barragens de rejeitos iniciam seu surgimento no início do século XX, devido ao desenvolvimento das tecnologias que conseguem explorar os materiais com baixo teor mineral que gera maior acúmulo de rejeito, necessitando serem deslocados a grandes distâncias das minas de exploração. Além disso, havia uma grande contaminação e obstrução de caminhos na área de disposição dos rejeitos (CBDB, 2012).

A partir do ano de 1930, surgem as primeiras barragens de contenção de rejeito com a finalidade de mitigar os seus impactos ambientais. Porém, como o conhecimento construtivo das mesmas era escasso, poucas apresentavam estabilidade (CBDB, 2012).

Apesar dos avanços tecnológicos nos métodos construtivos das barragens de rejeitos e o controle necessários compreendidos pelos projetistas, o Brasil ainda apresenta acidentes relacionados a essas estruturas com graves consequências ao ambiente e as pessoas (CBDB, 2012).

No Brasil, a atual Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 refere-se a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), legislação que rege à segurança de barragens, assim como a Resolução nº 95 de 7 de fevereiro de 2022 da Agência Nacional de Mineração (ANM) que consolida as normas para as barragens de mineração (ANM, 2022).

Assim, o trabalho analisou seções de um empreendimento de contenção de rejeitos, uma no eixo transversal da barragem e outra do dique de fechamento, com o método construtivo de alteamento a jusante em várias condições de estabilidade, apresentando a rede de fluxo e os fatores de segurança críticos, que foram comparados com a literatura para verificação do cumprimento das normas vigentes.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

Análise da estabilidade de um modelo de barragem de terra homogênea alteada pelo método a jusante e revestida com geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD), considerando as condições: drenada, não drenada, sismo drenado e sismo não drenado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Integrar os conhecimentos teóricos adquiridos nas disciplinas: maciços e obras de terra, e mecânica dos solos 1 e 2.
- Traçado da rede de fluxo.
- Aplicação de resultados de ensaios de campo, de laboratório e investigações geotécnicas, no monitoramento e caracterização da barragem.
- Utilização de *software* baseado em elementos finitos para análise do fator de segurança da estrutura, e
- Verificação se os fatores de segurança obtidos atendem as exigências previstas em normas e resoluções pertinentes.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 HISTÓRIA DAS BARRAGENS

3.1.1 No mundo

As barragens são estruturas existentes antes de Cristo, o seu registro mais antigo e que se tem conhecimento foi no Egito. A sua construção era feita com terra, transportada manualmente pelos escravos, e o processo de compactação feito pelo pastoreio dos animais nesta região, fazendo com que sua altura final atingisse 12 metros, porém com o galgamento na estrutura houve rompimento (MASSAD, 2003).

Já em 1820, na Inglaterra, Telford iniciou uso de núcleos argilosos em barragens, que até aquele momento eram feitas de materiais homogêneos. Esse novo modelo de construção garantiu maior estanqueidade às barragens e a partir deste momento começou a ser utilizado em vários lugares (MASSAD, 2003).

Na metade do século XIX, surge as primeiras experiências relacionadas a velocidade de percolação da água feitas por Darcy. O objetivo era descrever o percurso do fluxo dos fluídos através dos materiais com características porosas (MASSAD, 2003).

Após, em 1859 é apresentada a primeira patente do rolo compactados do tipo pé de carneiro, reconhecendo esse evento como primeiro passo para a mecanização do processo de compactação (MASSAD, 2003).

Em 1930, com a consolidação da ciência da Mecânica do Solo, inicia-se um processo de desenvolvimento mais acentuado nos tipos de barragens, a aplicação das teorias existentes, desenvolvimento de novos estudos e a otimização dos processos construtivos com o uso de maquinários (MASSAD, 2003).

3.1.2 No Brasil

Massad (2003), baseado em Vargas (1977), comenta que as primeiras barragens de terra brasileiras foram construídas no início do século XX, com o intuito

de minimizar a seca existente no Nordeste. Os projetos eram feitos de forma empírica, até que em 1947, no Estado do Rio de Janeiro, Terzaghi incrementou o filtro vertical ou também chamado de chaminé no projeto da antiga barragem do Vigário, sendo um marco também por ser a primeira vez de uma técnica de projeto direcionada para a construção de barragens.

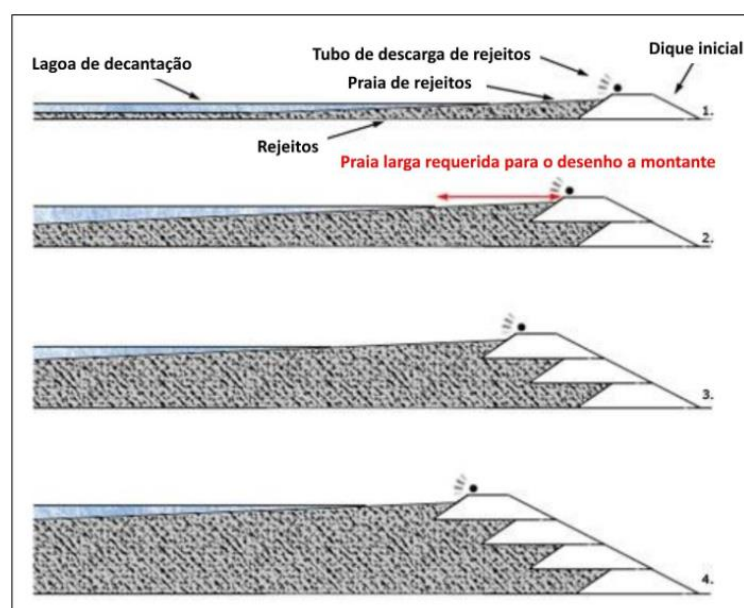
3.2 CONCEITOS BÁSICOS

3.2.1 Definições

As barragens de rejeitos são estruturas que acumulam os resíduos gerados dos processos de extração da mineração, englobando materiais líquidos e sólidos (PINTO, 2022).

Para o método construtivo do alteamento a montante, após a instalação do dique de partida, a construção é feita no sentido a montante da barragem, em direção ao reservatório conforme ocorre a elevação do nível de rejeitos (Figura 1) (EMERMAN, 2020).

Figura 1 - Modelo de barragem alteada a montante.

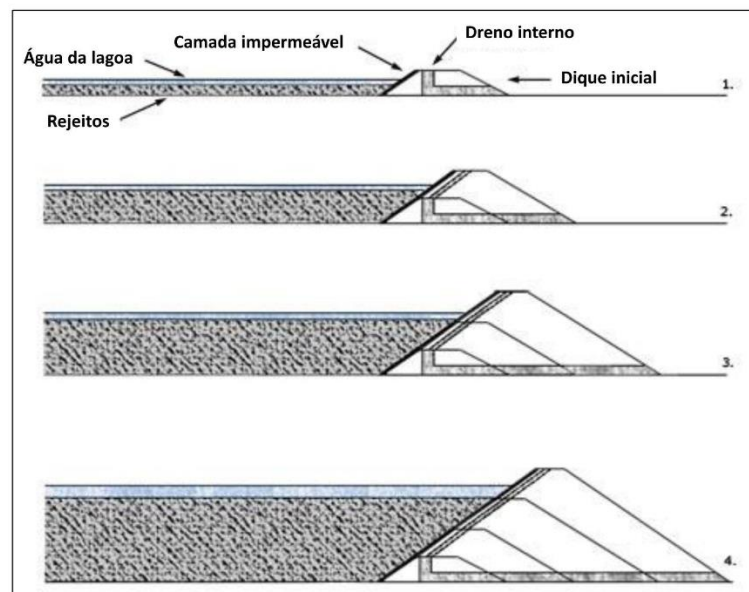


Fonte: Emerman (2020).

Entre os modelos existentes de barramentos, este tem o menor custo de construção, pois é necessária uma quantidade mínima de material para a execução. Porém, como o rejeito em sua forma natural está sob o alteamento, há uma maior susceptibilidade ao fenômeno de liquefação que pode levar a ruptura. Este método atualmente é proibido (EMERMAN, 2020).

O alteamento a jusante é o processo de construção de uma barragem, no qual o material é sobreposto no seu dique de partida e talude a jusante, sendo mais confiável e com maior custo em relação ao alteamento a montante (PINTO, 2022). O rejeito está anterior ao talude de montante, não existindo sob a estrutura (Figura 2). Logo, o modelo construtivo a jusante apresenta maior resistência a liquefação e outras possíveis falhas (EMERMAN, 2020).

Figura 2 - Modelo de barragem alteada a jusante.



Fonte: Emerman (2020).

3.2.2 Objetivos e tipos de barragens

As barragens têm por finalidade a regularização ou contenção dos variados tipos de materiais que existem (COSTA, 2012).

O objetivo da regularização é obter da melhor forma o regime hidrológico da região, acumulando água nos períodos de maior pluviosidade e utilizá-la nos períodos de secas para atender as demandas de consumo e uso da água. A estrutura visa à diminuição da vazão natural do fluxo de água para armazenar e nos períodos de déficit de afluência a vazão ser superior a natural (COSTA, 2012).

Para a construção desse modelo de barragem, existem as opções de aumento do nível de água natural ou a criação de um lago. Normalmente, a elevação da vazão é aplicada a barragens geradoras de energia elétrica devido à queda d'água que gera energia potencial e há melhoras nas condições de navegações. Já o lago tem o uso turístico que pode ser aproveitado (COSTA, 2012).

Costa (2012) apresenta como finalidade da barragem de contenção seu uso para armazenamento de água temporário ou de outros materiais sólidos ou líquidos, como rejeitos, sedimentos e resíduos.

A estrutura visa à contenção da enchente do material disposto, prevenindo inundações a jusante da estrutura e a poluição por materiais sólidos ou contaminantes para os cursos de água a jusante (COSTA, 2012).

Quando a barragem é utilizada para armazenamento, o teor de salinização tem que ser aferido, a sua morfologia da região que deve permitir o maior volume de acúmulo possível de água, algumas outras exigências específicas podem ser requisitadas quando direcionado a algum abastecimento específico, como abastecimento industrial ou irrigação (COSTA, 2012).

Já as de geração de energia, a hidrelétrica, o desnível do terreno devem ser acentuado, permitindo a maior geração de energia potencial. O regime hidrológico não pode apresentar grandes períodos de secas (COSTA, 2012).

As de navegações, o nível de água necessita ser regular para admitir a passagem dos calados das embarcações e a construção das eclusas. Nas de turismo, os lagos têm que ser extensos, evitando assoreamento, garantia de declividade nas margens do lago e ausência de grandes períodos de seca. Além disso, existem outros tipos de barragens que podem ser empregadas (COSTA, 2012).

As barragens são divididas em dois tipos: as convencionais, utilizadas usualmente e as não convencionais, não usuais e sem ampla literatura para consulta (COSTA, 2012).

As estruturas convencionais englobam as barragens de terra, que podem ser homogêneas, com apenas um material em predominância e podem conter elementos adicionais, como os filtros verticais. Também há as zonadas, apresentando materiais que a circunda para conferir propriedades específicas para suas funções, como auxiliar a permeabilidade da barragem (COSTA, 2012).

Nesse mesmo tipo de estruturas, temos as barragens de enrocamento, que podem ter núcleo impermeável, com a estrutura composta por material rochoso. Seu centro constituído de material argiloso para vedação da barragem, entre eles, há uma zona de transição dos materiais (COSTA, 2012).

A estrutura de enrocamento também pode ser do tipo que contém uma face impermeável, em que a vedação da estrutura é efetuada no talude a montante, com materiais diferentes, como a chapa de aço (COSTA, 2012).

Os barramentos de concreto também são estruturas convencionais, que podem ser dos tipos: gravidade, estrutura maciça que trabalha a compressão, gravidade aliviada, que tem aberturas na estrutura para diminuir as forças solicitantes na fundação e funciona para contrapor a tração e entre outras estruturas de concreto (COSTA, 2012).

As estruturas mistas são caracterizadas como convencionais também, pois, apesar de ser constituída de diferentes materiais em algumas seções, mescla os tipos construtivos de outros barramentos convencionais, como a estrutura de terra/enrocamento. Caso em que elementos aditivos da barragem, por exemplo, o vertedor, são de material divergentes da estrutura, não é considerada como método construtivo misto (COSTA, 2012).

Já as barragens do tipo não convencionais são: barragens de gabião, madeira, alvenaria de pedra, podendo existir outros modelos (COSTA, 2012).

3.2.3 Escolha da seção típica

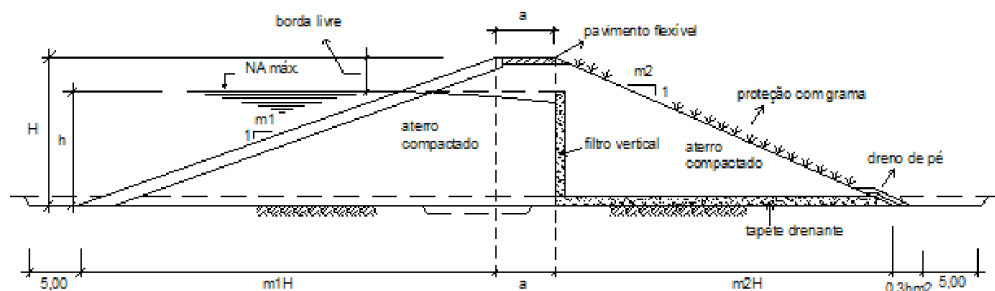
A escolha do tipo de projeto a ser executado para uma barragem depende de vários fatores: os aspectos geológicos e geotécnicos, hidráulicos e hidrológicos, clima, disponibilidade dos materiais, topográfica, custos e prazos (MASSAD, 2003).

As barragens constituídas com o uso de aterros são estruturas compostas por materiais naturais, solos e rochas, e devem conferir resistência as forças solicitantes, plasticidade, ser incompressível, ter contrações inexistentes em períodos de secas, boa aderência, rastejo mínimo, baixa permeabilidade e capacidade de erosões (MEIRELLES, 2013).

A seção típica transversal da barragem de terra geralmente tem o formato trapezoidal e são estruturas que apresentam um reservatório para armazenamento a montante e no corpo do barramento que retém a águas, tem conjuntos de estruturas hidráulicas, para condução do fluxo nela existente, como vertedouros e extravasores, Figura 3 (MEIRELLES, 2013).

A implantação é feita em locais com fácil acesso as áreas de empréstimos e com cotas elevadas em relação ao barramento, os escorregamentos são mínimos devido as margens dos reservatórios apresentar estabilidade, o vertedouro ter espaço na topografia da região para ser implantado externamente a barragem e o eixo da construção estar na parte mais estreita do rio. Como o corpo das barragens de terra é composto usualmente por solos argilosos ou areno-siltosos e areno-argilosos, deve haver disponibilidade no local (MEIRELLES, 2013).

Figura 3 - Seção típica de uma barragem de terra.



Fonte: Meirelles (2013).

Para o projeto também é necessário considerar a segurança e economia da estrutura. A segurança de barragem deve prevenir o transbordamento para que não haja brechas no corpo do barramento, erodibilidade nos taludes, bermas, ombreiras e crista, os efeitos de ondas ocasionadas pelo vento atuantes no reservatório e o fenômeno de *piping* (MASSAD, 2003).

Em questões econômicas, esse tipo de barragem tende a ter menores custos em relação a de concreto, pois sua construção tem maior simplicidade no projeto e na mobilização para as obras (MASSAD, 2003).

3.2.4 Estabilidade de barragens

As análises de estabilidades são métodos desenvolvidos para criar hipóteses sobre uma massa de solo e seu equilíbrio, considerando seus parâmetros de resistência, ou seja, se existe um nível d'água no terreno, se o material existente é composto por solo, rocha ou é misto (solo e rocha), entre outros (SILVA, 2011).

Os parâmetros considerados são aplicados nos taludes, superfícies inclinadas naturais ou artificiais (feitas pelo homem), a fim de se obter um fator de segurança (FS) mínimo que irá evitar superfícies de rupturas e escorregamentos (SILVA, 2011).

Para facilitar a compreensão e entendimento sobre os taludes em várias regiões, essas construções possuem uma determinada terminologia apresentada na Figura 4 (SILVA, 2011).

Figura 4 - Terminologia do talude.



Fonte: Bittencourt (2015).

O fator de segurança representa a resistência aos esforços solicitantes no maciço, considerando sua geometria, e se há margem de segurança para que não ocorra a ruptura devido ao cisalhamento do solo (Equação 1)(SILVA, 2011).

$$FS = \frac{\Sigma \tau}{\Sigma \tau_{mob}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- $\Sigma \tau$ representa a somatória das forças resistentes ao cisalhamento; e
- $\Sigma \tau_{mob}$ o somatório das forças atuante no maciço de terra.

3.2.5 Percolação da água

A água é um dos principais agentes causadores dos escorregamentos nos taludes, promovendo o aumento das pressões neutras nos solos, reduzindo a sua resistência efetiva e as forças de percolação (MEIRELLES, 2013).

A percolação é a infiltração da água a montante do barramento com um fluxo direcionado para a jusante, presumido pelas características do solo por sua viscosidade, tático-visual, grau de compactação e saturação (MEIRELLES, 2013).

A permeabilidade na estrutura deve ser controlada, evitando surgências de água nos taludes a jusante e o carregamento de partículas com menores diâmetros no seu fluxo, fenômeno conhecido como *pipping* (MEIRELLES, 2013).

Para reduzir os efeitos negativos da água na estrutura, são utilizados sistemas de drenagem interno e externos. Os internos são conhecidos como filtros (verticais, sub-horizontais ou inclinados) e drenos (MEIRELLES, 2013). Já a drenagem superficial é um conjunto de elementos que o compõem, com as canaletas, descidas d'água, caixas de passagem e bacias de dissipação, que captam os fluxos de água superficiais da estrutura, com seu direcionamento para dissipação, de acordo com a NBR 13028 (ABNT, 2017).

Para a aferição da permeabilidade do solo é necessário a realização de ensaios de permeabilidade, que podem apresentar cargas constantes com a percolação da água no solo, regido pela NBR 13292 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante, para cargas variáveis apresentada na NBR 14545 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, e para as rochas há a perda de água.

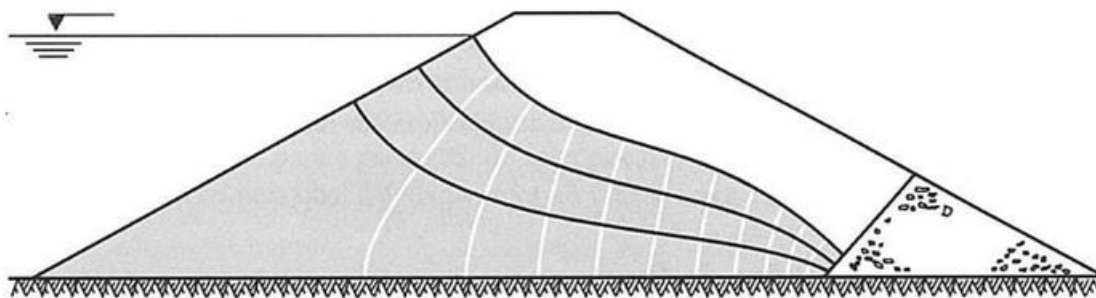
3.2.6 Rede de fluxo

Para as fundações de barragens, o fluxo de água tende a percolar em superfícies paralelas, também chamado de fluxo bidimensional (PINTO, 2006).

Sua representação é baseada nos caminhos curvos que a água percola e como as cargas são dissipadas no interior na estrutura, graficamente. Para o esboço da rede de fluxo, deve-se considerar a permeabilidade materiais a montante, jusante e do maciço (Figura 5) (PINTO, 2006).

Para o traçado é necessária a determinação de linhas limites, que devem respeitar a permeabilidade das camadas dos solos e a existência de fluxos de água na região de análise (PINTO, 2006).

Figura 5 - Rede de fluxo para barragem de terra.



Fonte: Pinto (2006).

3.2.7 Fator de segurança

Os fatores de segurança para as barragens de rejeito no Brasil seguem os parâmetros vigentes na norma brasileira NBR 13028 (ABNT, 2017), em que toda a estrutura da construção, a fundação, taludes, dique de partida e o reservatório de rejeito disposto são apresentados para a análise determinística de estabilidade pelo modelo de uma seção típica da barragem. Os fatores de segurança mínimos exigidos por norma estão apresentados na Tabela 1 (NBR 13028:2017).

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração.

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção*	Maciço e fundações	Montante e Jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo	Maciço	Jusante	1,5

em condição normal		Entre bermas	1,3
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Montante e Jusante	1,1

*Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem ser analisadas com "final de construção" devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.

Fonte: (NBR 13028:2017).

Os parâmetros dos materiais da barragem devem considerar nos seus valores o comportamento em situações de drenagem na estrutura, em que são consideradas as tensões efetivas, resistência a poro pressões e ao cisalhamento com parâmetros efetivos e quando necessário a utilização de resistência de pico ou residual de acordo com o projeto (NBR 13028:2017).

No caso da condição de não drenada, as tensões totais são solicitadas para atendimento à norma ou as tensões efetivas com parâmetros de resistência e poro pressões presumidas (NBR 13028:2017).

Segundo a Eletrobras (2003), para a condição de sismo as cargas utilizadas são correspondentes a 5% da aceleração da gravidade no sentido horizontal e 3% no sentido vertical.

Na resolução ANM nº 95/2022, os fatores de segurança obtidos para condições drenadas e não drenadas de pico o valor deve ser igual ou superior a 1,5 para barragens com dano potencial associado (DPA) alto.

As barragens são classificadas pelo seu dano potencial associado (DPA), de três níveis: baixo, médio e alto. Para a caracterização do nível, é necessário considerar o volume total do reservatório, existência de população a jusante, impacto ambiental e socioeconômico da área há qual a barragem está implantada. O tipo de projeto e impactos que podem ocasionar a existência da barragem gera a pontuação associada à sua estrutura (ANM, 2022)

Caso a pontuação seja igual ou superior a 13, seu DPA é considerado alto e as análises de estabilidade devem ser efetuadas para condição drenada, não drenada e solicitação sísmica drenada e não drenada com resistência de pico. Para a

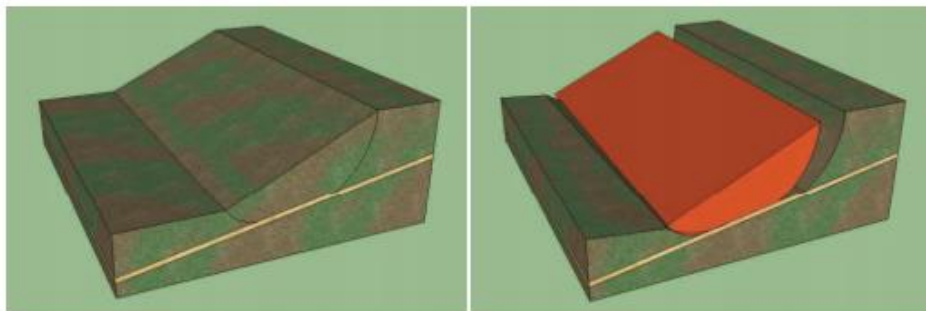
situação de susceptibilidade á liquefação em condições não drenadas o “FS” deve ser igual ou superior a 1,3, segundo o artigo 23 da resolução N° 95 da ANM de 2022.

3.3 SUPERFÍCIE DE RUPTURA

A superfície de ruptura é a região do maciço de terra que está mais suscetível à ruptura devido às tensões cisalhantes serem maiores ou próximas das tensões resistentes ao deslizamento, promovendo possivelmente o movimento de massa e seu escorregamento que podem ocorrer de várias formas, sendo dos tipos translacional, rotacional ou mista (SILVA, 2011).

Os escorregamentos translacionais (Figura 6) ocorrem quando o corpo do talude é aproximadamente paralelo a sua superfície e possui uma baixa profundidade, sendo que o material que o compõe tem maior resistência, porém está instável e ocasionando um escorregamento (SILVA, 2011).

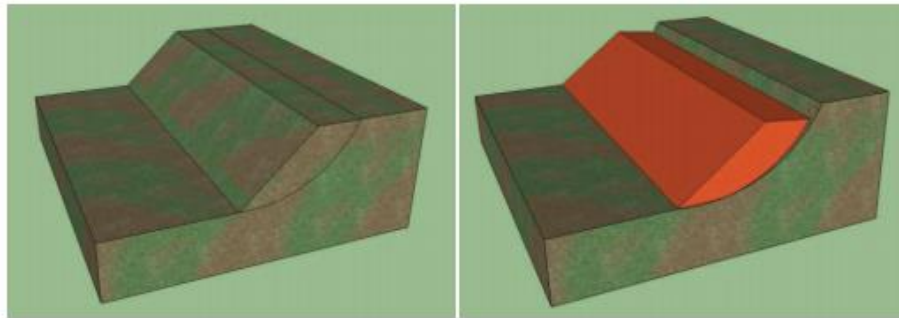
Figura 6 - Modelo de escorregamento de translação



Fonte: Silva (2011).

Já os escorregamentos rotacionais (Figura 7) acontecem com maior frequência em solos homogêneos, ou seja, com pouco material distinto, reduzida resistência as forças de cisalhamento e superfícies de ruptura curvas ou circulares (SILVA, 2011).

Figura 7 - Modelo de escorregamento rotacional.



Fonte: Silva (2011).

O escorregamento misto engloba os dois tipos: translacional e rotacional, em que o corpo do talude apresenta paralelismo em relação à superfície do talude e curvaturas nas extremidades (SILVA, 2011).

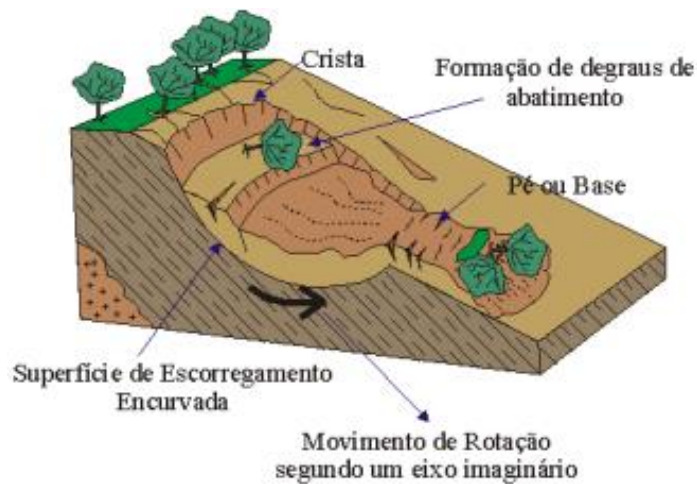
Alguns fatores são responsáveis por contribuir para a movimentação de massa, como a interferência do homem na geometria natural do talude, agentes intempéricos e a expansão urbano, que podem ocasionar novas forças atuantes e gerar a instabilidade (SILVA, 2011).

3.3.1 Escorregamentos circular

O escorregamento circular (Figura 8) é caracterizado por apresentar uma superfície de ruptura curva e sem planos definidos, ocasionados em solos considerados espessos ou rochosos com presença de muitas fraturas (BITTENCOURT, 2015).

Como não haja existência de descontinuidades que restringem o escorregamento, o talude é aproximadamente isotrópico, ou seja, as suas propriedades físicas são constantes em todas as direções (BITTENCOURT, 2015).

Figura 8 - Escorregamento circular.



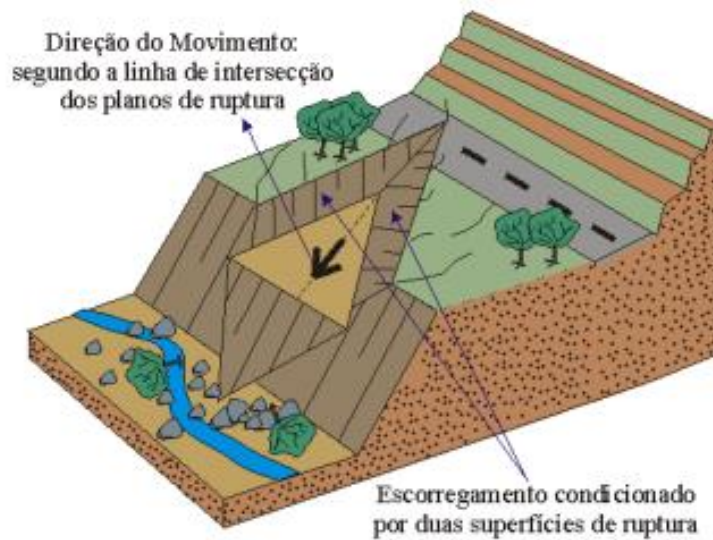
Fonte: Bittencourt (2015).

3.3.2 Escorregamentos em cunha

O escorregamento em cunha é considerado do tipo translacional onde o maciço, seja de solo ou rocha, apresenta instabilidade e acaba se desprendendo das superfícies que possuem menores resistências ao cisalhamento, ocasionando o movimento (BITTENCOURT, 2015).

O formato do escorregamento é de cunha, ou seja, prismático e com interseções de dois planos com fraquezas que geram uma descontinuidade evidenciada na superfície de ruptura, como na Figura 9 (BITTENCOURT, 2015).

Figura 9 - Escorregamento em cunha.



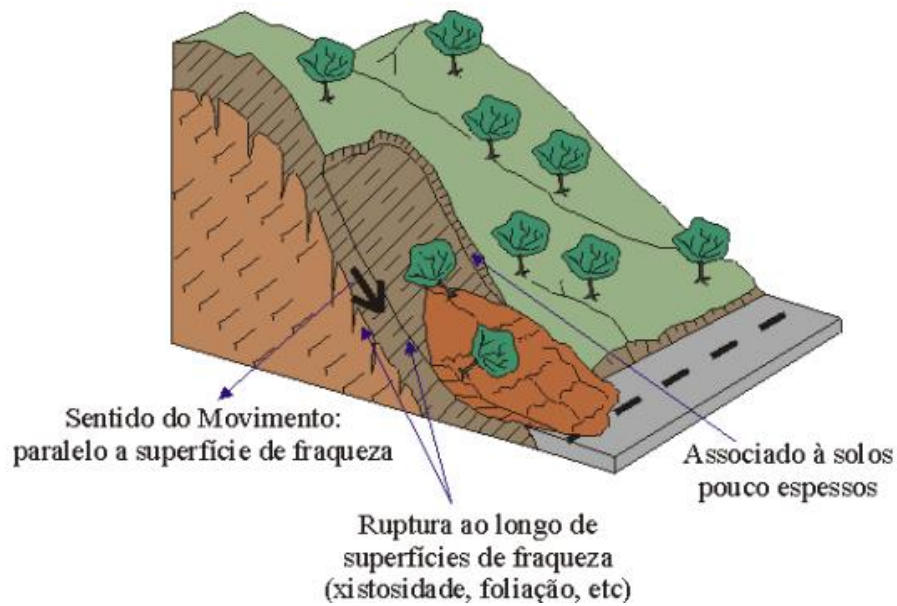
Fonte: Bittencourt (2015).

3.3.3 Escorregamentos planar

Os escorregamentos planares é análogo aos de cunhas, porém ocorrem em solos com espessuras menores, sendo que seu movimento se dá em um único plano de fraqueza (BITTENCOURT, 2015).

Pode ocorrer em maciços de solo ou rochas, com maior propensão ao escorregamento devido às inclinações elevadas que favorecem a descida do material por gravidade após seu desprendimento, evidenciando as descontinuidades laterais perpendiculares em relação ao talude (Figura 10)(BITTENCOURT, 2015).

Figura 10 - Escorregamento planar.



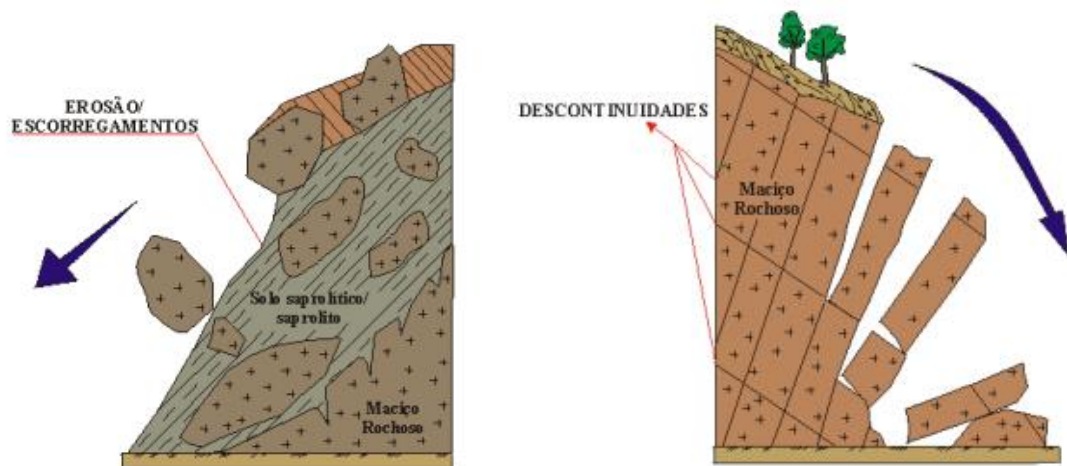
Fonte: Bittencourt (2015).

3.3.4 Quedas

Nas quedas, o material rochoso fraturado e instável sofre um movimento de queda livre no talude íngreme devido ao seu desprendimento do maciço (BITTENCOURT, 2015).

O movimento é extremamente rápido, em formatos de blocos, lascas, entre outros, com deslocamento de pequenos e médios volumes de material (Figura 11) (BITTENCOURT, 2015).

Figura 11 - Movimento de queda de blocos por rolamento e tombamento.

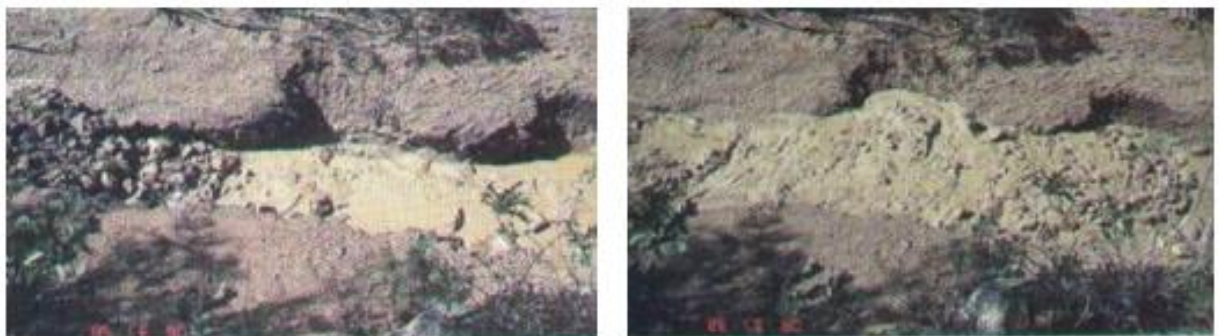


Fonte: Bittencourt (2015).

3.3.5 Corridas

As corridas são compostas de vários materiais como solo, água, detritos, outros, por diversas superfícies de deslocamento internas ou externas ao material em deslocamento similar a um escoamento, sendo que possuem velocidades consideradas médias e altas com a movimentação de grandes volumes e extensas superfícies de alcance no sentido das drenagens existentes (Figura 12) (BITTENCOURT, 2015).

Figura 12 - Fluxo de lama com detritos.



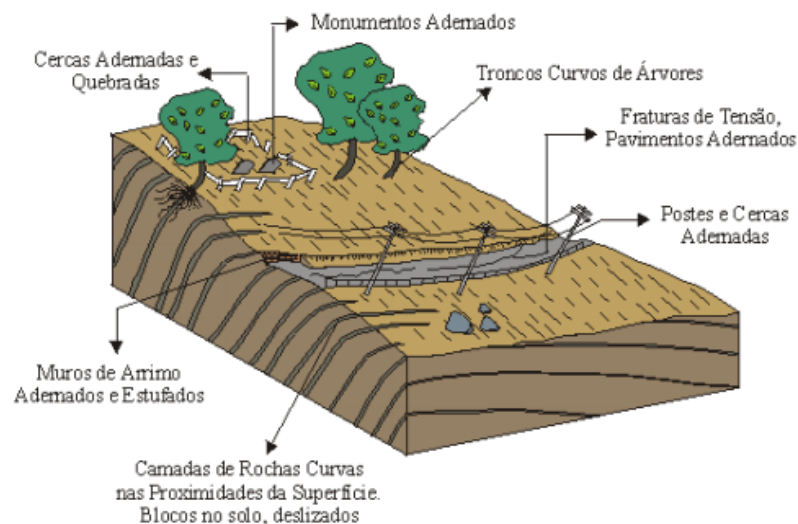
Fonte: Bittencourt (2015).

3.3.6 Rastejo

O rastejo é o deslocamento lento, de solos ou rochas, que possui geometria indefinida, com diversos planos de movimentação, sem a presença de traçados que o delimitam e desenvolvido na superfície do maciço (Figura 13) (BITTENCOURT, 2015).

As movimentações de rastejo contínuas são lentas, alcançando profundidades maiores, sem a presença de uma superfície de ruptura e com comportamento plástico (BITTENCOURT, 2015).

Figura 13 - Rastejo.



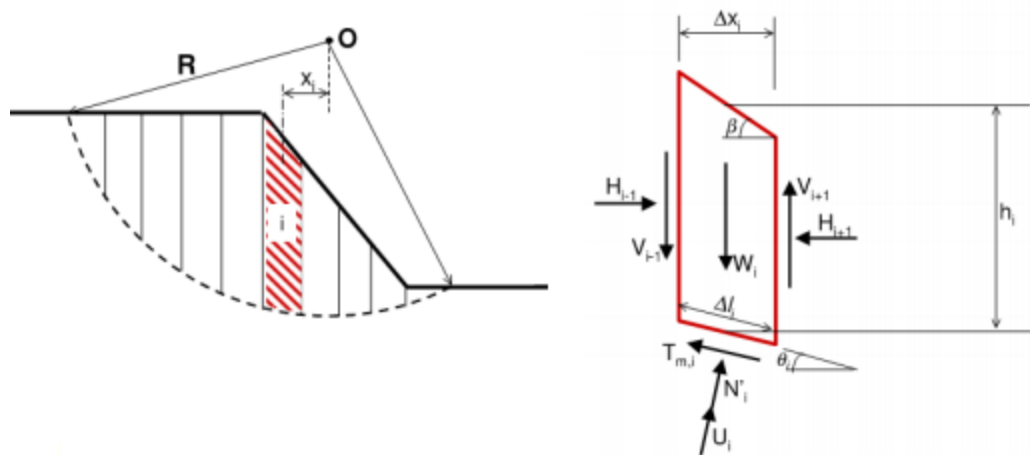
Fonte: Bittencourt (2015).

3.4 MÉTODO DE LAMELAS

Como os taludes são construções que facilmente apresentam compostos distintos na sua superfície de ruptura, garantindo muita complexidade para realização de estudos, surge à necessidade de encontrar métodos que proporcionam simplificações aos cálculos (BITTENCOURT, 2015).

O método de lamelas apresenta a proposta da divisão do corpo do talude em lamelas que podem ser possivelmente instáveis. Esta metodologia pode ser aplicada em várias formas geométricas, considerando apenas que a maioria dos esforços solicitantes advém do peso próprio do maciço acima da superfície de ruptura (Figura 14) (BITTENCOURT, 2015).

Figura 14 - Ilustração das forças existentes no método das lamelas.



Fonte: Bittencourt (2015).

Sendo:

- R é o raio da curvatura;
- O o centro da curvatura;
- H_{i-1} e H_{i+1} são as forças horizontais totais resultantes atuantes nas seções que são aplicadas;
- V_{i-1} e V_{i+1} as forças de cisalhamento que existem nas seções;
- W_i é o peso total da lamela;
- U_i a força de empuxo devido a presença da água;
- N'_i é a força normal;
- Δl_i é a largura e h_i a altura da lamela;
- θ o ângulo da Normal com a vertical;
- $T_{m,i}$ a tensão cisalhante na base da lamela.

Nesse método são analisadas as solicitações de momentos que cada uma das forças realiza, sendo favorável ou contrária a estabilidade do talude. Assim, a verificação do fator de segurança é representada pela Equação 2.

$$FS = \frac{\Sigma MR}{\Sigma MA} \quad \text{Equação 2}$$

Onde, ΣMR é a somatória dos momentos contrários ao escorregamento e ΣMA é a somatória dos momentos favoráveis, em que $FS=1$ representa a iminência de ruptura e $FS > 1$ o talude está estático (BITTENCOURT, 2015).

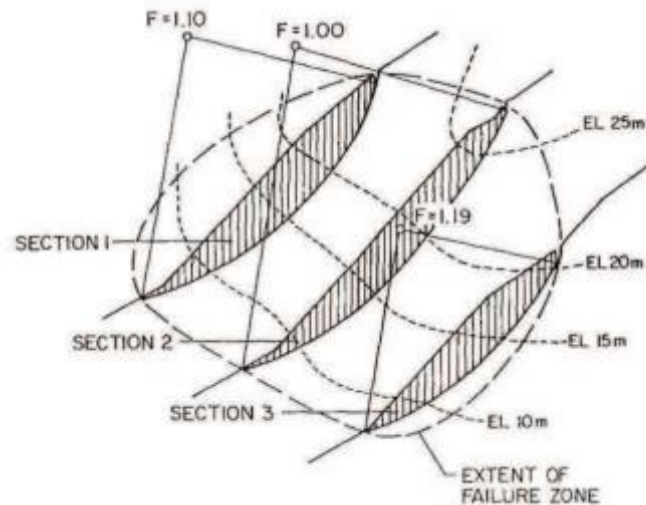
3.5 EQUILIBRIO LIMITE

O equilíbrio limite aplicado no maciço de terra determina como irá ocorrer à ruptura em um determinado tipo de superfície (SILVA, 2011).

A superfície de ruptura pode ocorrer das formas já apresentadas, quando o corpo livre apresenta o fator de segurança igual ou inferior a 1 ao longo da superfície (SILVA, 2011).

Cada ponto determinado na superfície de ruptura pode ter variação do fator de segurança em sua seção, como na Figura 15, o que gera o aparecimento de uma seção considerada crítica, ou seja, com menor valor de “FS” e que estará mais propensa ao escorregamento, sendo possível desconsiderar as ações laterais que possam existir (SILVA, 2011).

Figura 15 - Talude com diferentes superfícies de deslizamento.



Fonte: Silva (2011).

Os fatores de segurança podem ser analisados de três formas distintas. O primeiro caso representa as somatórias das forças estabilizadoras, ou seja, que mantêm o maciço de terra estático e o somatório das forças instabilizadoras, que promovem o desequilíbrio (Equação 3)(SILVA, 2011).

$$FS = \frac{\Sigma F_{estabilizadora}}{\Sigma F_{instabilizadora}} \quad \text{Equação 3}$$

Analogamente ao caso anterior, a estabilidade irá ser analisada através dos momentos resistentes existentes (Equação 4)(SILVA, 2011).

$$FS = \frac{\Sigma M_{estabilizadora}}{\Sigma M_{instabilizadora}} \quad \text{Equação 4}$$

O equilíbrio é analisado no limite de corte existente, em que os parâmetros τ e τ_{mob} são as resistências do material existente no talude expressas pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 1) (SILVA, 2011).

A incógnita c' representa a coesão do solo analisado, σ' a tensão efetiva e $\tan \varphi'$ a tangente do ângulo de atrito. Os parâmetros podem ser apresentados também considerando a presença da água, dependendo apenas da pior situação para escolher as resistências dos cálculos (Equação 5 e Equação 6) (SILVA, 2011).

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad \text{Equação 5}$$

$$\tau_{mob} = \frac{c' + \sigma' \tan \varphi'}{FS} \quad \text{Equação 6}$$

Para o equilíbrio limite pode-se considerar três métodos, sendo que todos visam analisar a estabilidade dos taludes (SILVA, 2011).

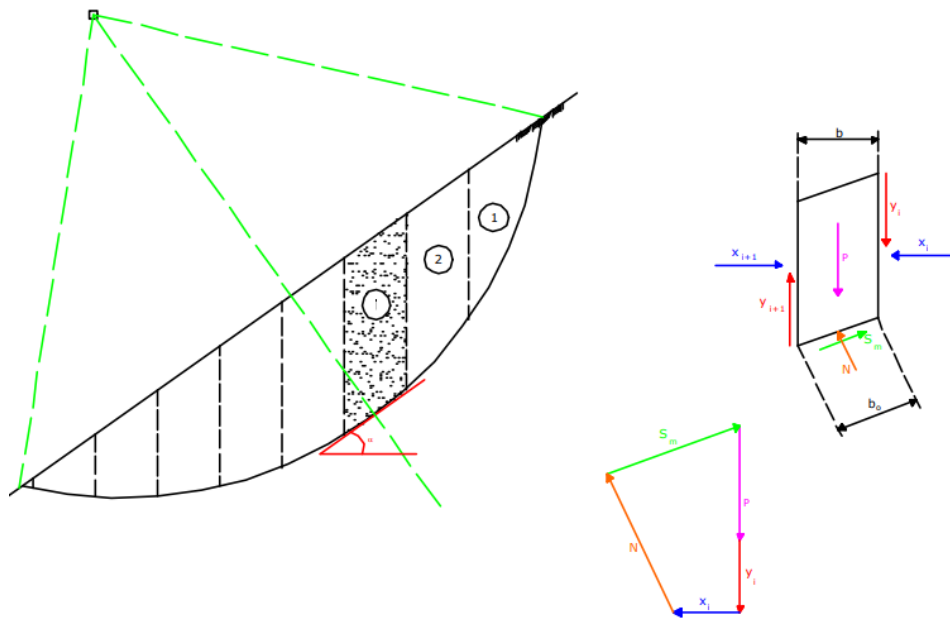
O primeiro método é o geral que analisa a estabilidade considerando todo o maciço em situação de instabilidade (SILVA, 2011).

O segundo, métodos das lamelas, realiza a divisão do corpo rígido no sentido longitudinal para analisá-las separadamente, e o último método, das cunhas, é análogo ao segundo com a divisão do maciço feita em forma de cunhas (SILVA, 2011).

3.6 BISHOP

O Bishop é um dos métodos das lamelas, que realiza divisão em fatias de uma superfície de ruptura circular, considerando as forças que atuam na lamela e a interação com as outras lamelas existentes (Figura 16) (BASTOS, 2003).

Figura 16 - Forças atuantes no Bishop.



Fonte: Bastos (2003).

Onde “ x_{i+1} ” e “ x_i ” são as forças horizontais totais resultantes atuantes nas seções que são aplicadas, “ y_{i+1} ” e “ y_i ” as forças de cisalhamento que existem nas seções, “ P ” é o peso total da lamela, “ N ” é a força normal, “ b_0 ” é a largura da lamela e “ S_m ” a força resistente ao movimento na base da lamela. (BASTOS, 2003)

A resistência ao movimento que confere estabilidade ao talude é expressa pelo equilíbrio dos momentos existentes na lamela e dada pela Equação 7.

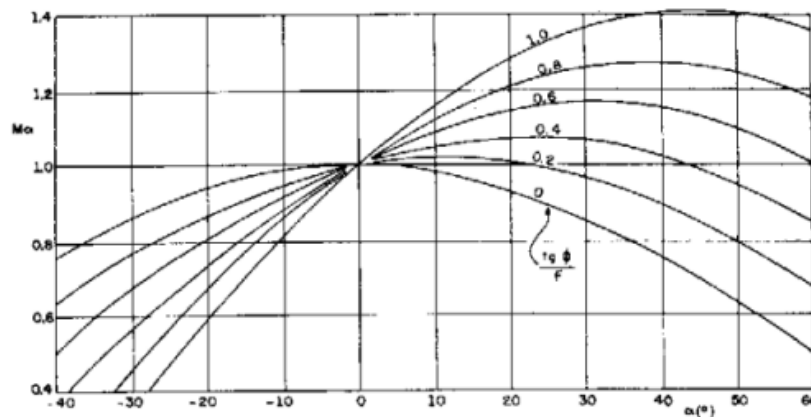
$$s = c + \frac{N \cos \alpha}{b} \tan \varphi \quad \text{Equação 7}$$

Conhecendo os parâmetros, pode-se realizar também o equilíbrio de forças considerando a direção da componente peso e a anulação das forças de cisalhamento y_{i+1} e y_i que permite a simplificação do método do Bishop. Assim o fator de segurança, com a presença da pressão neutra (u), é apresentado pela Equação 8.

$$s = c + \frac{N \cos \alpha}{b} \tan \varphi \quad \text{Equação 8}$$

Por este método ser considerado iterativo, é necessário inicialmente estipular valores para " $M\alpha$ " que irá gerar valores de FS e finalizando apenas quando o fator de segurança arbitrário for igual ao da iteração (Figura 17)(BASTOS, 2003).

Figura 17 - Ábaco para determinação do $M\alpha$ inicial.



Fonte: Bastos (2003).

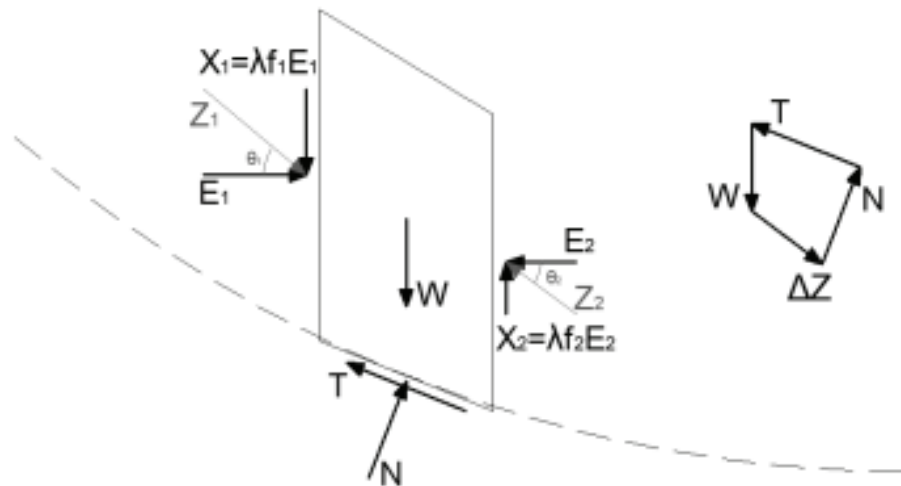
3.7 MORGENTERN-PRICE

Este método é considerado um dos mais rigorosos, pois verifica todas as condições de equilíbrio existentes na lamela (SILVA, 2011).

O fator de segurança é obtido através da combinação entre as forças e momentos verticais e horizontais existentes, formando um sistema não linear, sendo necessário utilizar métodos iterativos para a solução do problema (Figura 18) (SILVA, 2011).

Todas as solicitações iterativas são representadas por funções do tipo $f(x)$ que são multiplicadas por λ , um fator que é previamente determinado (SILVA, 2011).

Figura 18 - Forças atuantes no Morgenstern-Price.



Fonte: Silva (2011).

No qual:

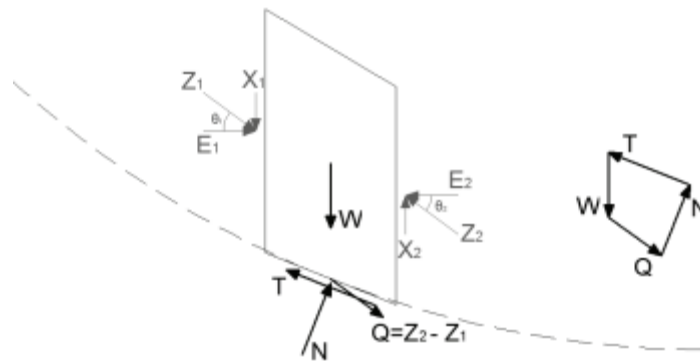
- θ representa o a inclinação da lamela com a horizontal;
- E : as forças normais existentes nas seções;
- N : a força normal na base da fatia.

3.8 SPENCER

O método Spencer também é considerado iterativo e rigoroso, apresentando algumas semelhanças com o método de Morgenstern-Price (SILVA, 2011).

As solicitações existentes e o ângulo de inclinação θ na lamela são considerados constantes, sendo que o fator de segurança é obtido pelo somatório das forças horizontais ou paralelas ao plano e dos momentos em relação a um ponto determinado previamente (Figura 19) (SILVA, 2011).

Figura 19 - Forças atuantes no método Spencer.



Fonte: Silva (2011).

As componentes “Xi” representam as forças cisalhantes nas seções da lamela e “Q” a resultante das forças de interação entre as fatias, aplicada na lamela no seu ponto médio da base (SILVA, 2011).

3.9 ENSAIOS DE CAMPO

3.9.1 Sondagem SPT

As sondagens do tipo SPT são feitas para reconhecimento do tipo de solo de acordo com sua profundidade, determinação do nível de água freático da região e o índice de resistência a penetração a cada metro. Seguem as diretrizes da ABNT NBR 6.484 (ABNT, 2020) “Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio”.

Elas são feitas utilizando o trado concha ou cavadeira inicialmente até a profundidade de 1 metro de forma manual e após é instalado o tubo de revestimento de sapata cortante. O furo continua sua execução com o trado concha até o nível freático e depois se utiliza a circulação da água, sendo que a cada metro perfurado é coletada a amostra para análise do perfil do solo (NBR 6484, ABNT 2020).

3.9.2 Sondagem mista

A sondagem mista é a junção da sondagem SPT no trecho de solo com a sondagem rotativa no trecho de rocha do perfil analisado (ABGE, 2013).

As sondagens rotativas se utilizam de equipamentos motomecanizados que auxiliam na perfuração das camadas de rocha do perfil geológico, obtendo materiais rochosos em formatos cilíndricos, nomeados de testemunhos, que são amostras retiradas da perfuração para realização da análise das camadas de rochas existentes (ABGE, 2013).

Por isso, a sondagem recebe o nome de mista, ela aplica a metodologia da investigação de solo SPT e da sondagem rotativa, permitindo estudos em regiões que apresentam perfis geológicos compostos por solo e rocha, o que auxilia na investigação do solo em maiores profundidades e uma boa delimitação da geologia da região (ABGE, 2013).

As normas e parâmetros aplicados nesse tipo de ensaio de campo são apresentados pelas normas ABNT NBR 6484/2020, DNER. PRO 102/97 e Manual de Sondagens ABGE de 2013.

3.10 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório são essenciais para caracterização das propriedades das camadas de solo coletado, que podem ser feitas de várias formas, porém as mais comuns são as amostras deformadas e indeformadas.

Os ensaios de caracterização principais consistem na determinação dos limites de consistência (limites de Atterberg) regidos pela NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), análise granulométrica por peneiramento e sedimentação apresentado na NBR 7181 (ABNT, 2016), massa específica dos grãos na NBR 6458:2016 e de compactação pela NBR 7182 (ABNT, 2016). Também, para determinação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito do solo utilizam-se os

ensaios do tipo triaxiais que podem ser ou não drenados seguindo as normas ASTM D7181 (2020) e ASTM D4767 (2020).

3.11 INSTRUMENTAÇÃO DE MONITORAMENTO

3.11.1 Piezômetros

Os piezômetros são instrumentos utilizados para aferir as poropressões existentes em estruturas de solo e rocha (SANTOS, 2019).

Existem variados tipos de piezômetros, como tubo aberto, corda vibrante, elétrico e entre outros, sendo que o tipo a ser aplicado depende de diversos fatores como, a estrutura, a precisão necessária, os dados secundários que desejam ser obtidos, etc (SANTOS, 2019).

Os piezômetros mais usuais são do tipo aberto (*standpipe*), que apresentam boa confiabilidade e sensibilidade para aferir as pressões neutras existentes. Feitos com o uso de tubo PVC e um sistema drenante apenas na ponta da cota base de instalação, sendo isolado em todo o resto da perfuração e fixado por um bloco de concreto (SILVEIRA, 2006).

As pressões neutras são essenciais para saber o comportamento da estrutura, pois, valores positivos significam alta da pressão neutra no interior, indicando uma carga maior no maciço, além da sua própria estrutura e valores negativos indicam alívio das pressões neutras internas na estrutura, porém podem ser indícios de processos de percolação da água no maciço, afetando a estabilidade (SILVEIRA, 2006).

3.11.2 Indicadores de nível de água

Os indicadores de nível de água são instrumentos utilizados no monitoramento do nível de água do reservatório da estrutura a qual se encontra (SANTOS, 2019).

A instalação se dá pelo uso de tubos de PVC perfurados envolvidos em material drenante e outro filtrante, permitindo que não ocorra danos devido à possibilidade de ocorrer colapso no furo, que foi executado previamente para sua alocação (SANTOS, 2019).

Apesar da simplicidade, são extremamente necessários por serem considerados confiáveis. A fim de garantir sua eficácia, podem-se realizar ensaios de equalização (SANTOS, 2019).

3.12 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

3.12.1 História

O método dos elementos finitos surgiu na década de 1960, após a invenção do computador que possibilitou a realização de cálculos mais complexos através das suas ferramentas disponíveis, pois a teoria dos elementos já era conhecida, mas não conseguia se desenvolver (SCREMIN, 2015).

No início, sua aplicação era feita apenas na mecânica dos sólidos, porém com a evolução e descobertas de novas tecnologias, suas aplicações começaram a se estender por outra área, como a dinâmica. Problemas de baixo grau de complexidade deixaram de serem os principais do uso desse método (SCREMIN, 2015).

Ainda hoje este método está em evolução, cada vez abrangendo problemas mais complexos e apresentando maiores níveis de detalhamentos (SCREMIN, 2015).

3.12.2 Funcionamento

Para iniciar as análises utilizando o método do MEF é essencial inserir informações sobre o problema, como os tipos de materiais a serem utilizados, as

forças atuantes e a definição da área de aplicação das malhas que necessitam da escolha do seu formato e quantidade de nós utilizados (SCREMIN, 2015).

Após caracterizar o problema, os cálculos de tensões e deformações são feitos nos pontos pré-definidos se baseando nos comportamentos elástico e plástico da estrutura (SCREMIN, 2015).

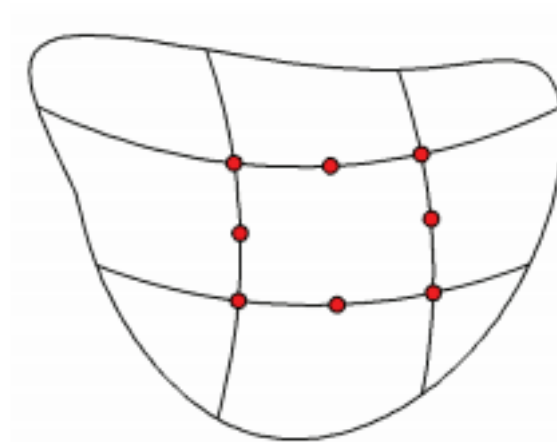
3.12.3 Malha de nós

A malha de nós do MEF é o domínio no qual as características iniciais do problema serão empregadas, considerando as geometrias e suas ligações (SCREMIN, 2015).

Determinada pela forma triangular ou quadrangular para sua construção, a malha pode ter de 3 a 8 nós que representam a quantidade de ligações entre as figuras e os pontos de análises das tensões e deformações (Figura 20) (SCREMIN, 2015).

A quantidade de nós é definida pelo utilitário, sendo que ao empregar maiores quantidades, mais próximos serão os resultados da realidade (SCREMIN, 2015).

Figura 20 - Divisão de um domínio em elementos.



Fonte: Scremin (2015).

A Figura 20 representa uma pequena área de uma malha quadrangular delimitada pelas linhas e a presença de 8 nós indicados pelos pontos. Toda essa estrutura irá sofrer movimentos de deslocamentos nos seus eixos existentes gerando deformações na sua forma inicial (SCREMIN, 2015).

3.12.4 Software de estabilidade de taludes

O *software* de estabilidade de taludes visa a aplicação de métodos de equilíbrio limite para analisar a sua estabilidade ao deslizamento da estrutura, avaliando o fator de segurança gerado através do uso de análises geralmente determinística de superfícies de ruptura circular e não circular (BARBOSA, 2018).

As variáveis que afetam a estabilidade da estrutura podem ser: o nível de água, com fluxo transiente ou laminar, carga fixas ou variáveis, características das camadas de solo do modelo analisado, entre outras (BARBOSA, 2018).

O *software* realiza a interpretação dos dados inseridos e o direcionamento do deslizamento depende de qual sentido deseja-se verificar a probabilidade do deslizamento, apresentando a superfície de ruptura com o fator de segurança crítico (BARBOSA, 2018).

3.13 LIQUEFAÇÃO DE REJEITOS

A apresentação de modelos que conseguiriam explicar e desenvolver o fenômeno da liquefação dos solos sempre foi muito limitado. Logo, surge a necessidade de compreender e prever este acontecimento devido aos escorregamentos e deslizamento que ocasiona a perdas financeiras, ambientais e até de vidas humanas (GALLEGO-HERRERA, 2012).

A liquefação dos solos é um estado que está presente principalmente em solos arenosos, ocorrendo devido à existência do valor elevado de poro pressão positivo no solo e a falta de vazios para expulsão da água devido a sua saturação, promovendo o comportamento contrátil na areia fofa e sua movimentação. (BEEN & JEFFERIES, 1985, KRAMER, 1996).

Esse comportamento também pode ser visto com constância em estruturas de contenções de rejeitos e estéril, no qual sua composição apresenta solos arenosos e saturados (GALLEGO-HERRERA, 2012).

Segundo o dicionário de Oxford, a liquefação pela definição física é a “transição da substância do estado gasoso ou sólido para o estado líquido, nos solos esse comportamento ocorre devido à transformação do estado sólido para o fluido.

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), os resíduos de mineração, que inclui os rejeitos, são:

Na geração de resíduos da mineração, destaca-se a existência dos resíduos sólidos de extração (estéril) e do tratamento/beneficiamento (rejeitos). Estes resíduos, de modo geral, podem ser pilhas de minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos, solos, aparas e lamas das serrarias de mármore e granito, as polpas de decantação de efluentes, as sobras da mineração artesanal de pedras preciosas e semipreciosas – principalmente em região de garimpos – e finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento (IBRAM, 2016, p.13).

A liquefação em argilas ou lama pode ser ocasionada pelo seu teor de umidade superior ao limite de liquidez, limite do solo no qual seu comportamento líquido transita para o plástico, comportando-se como um fluido (WANG, W., 1979, SEED *et al.*, 2003).

Porém, a liquefação na mecânica dos solos é ocasionada pela existência de resistência ao cisalhamento nulo, neste caso o carregamento analisado é estático, descrito pela Equação 5 (ISHIHARA, 1993)

Para os rejeitos, a coesão é nula devido ao seu comportamento fluido, logo a tensão efetiva necessita ser igualada a zero, pois, o rejeito a ser trabalhado é arenoso e possui como característica ϕ' elevado (superior a 30°)(ISHIHARA, 1993).

A tensão efetiva do solo representa as cargas reais que ele está suportando e sua anulação, devido às poropressões atingirem a tensão total de confinamento,

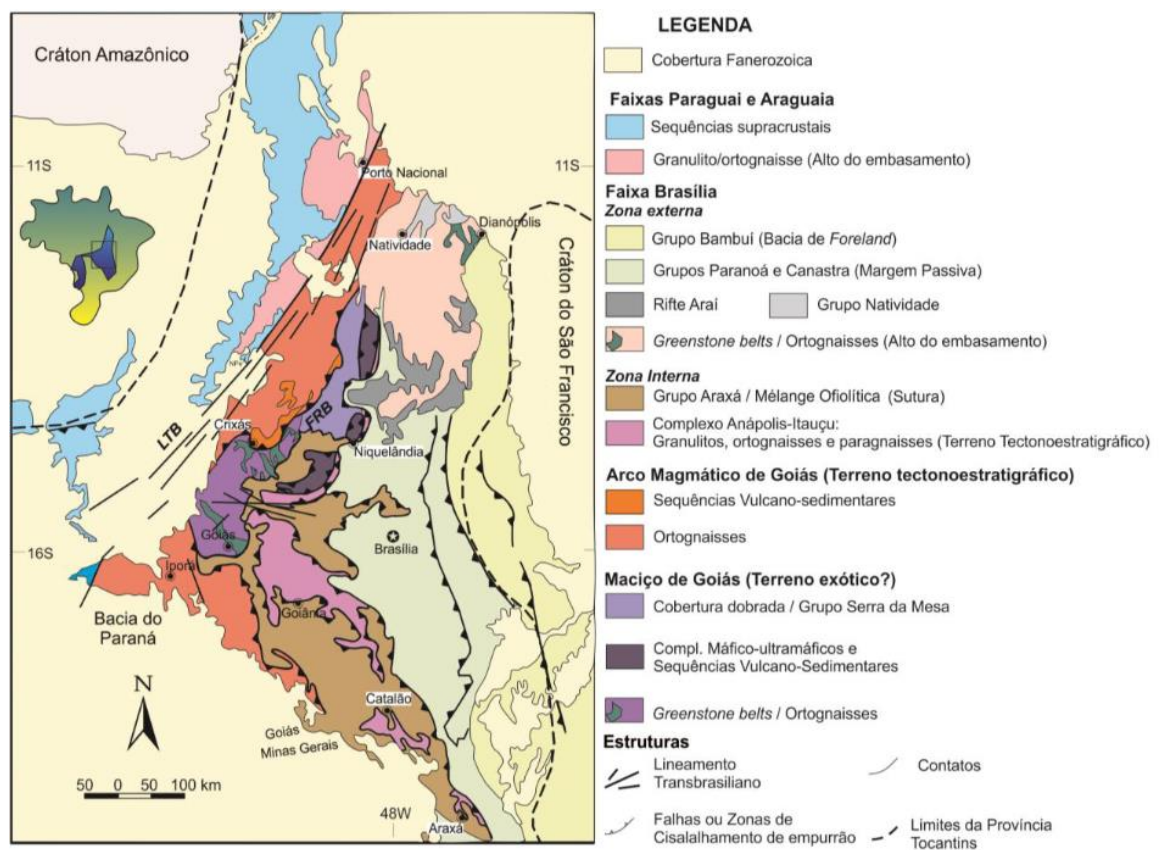
resultaria na total perda de capacidade do solo de resistir a qualquer solicitação (YAMAMURO E COVERT, 2001).

4. METODOLOGIA

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

O empreendimento encontra-se localizado no estado de Goiás, á aproximadamente 250 km da capital, Goiânia. A estrutura se encontra sobre a Província Estrutural do Tocantins, do Grupo Serra da Mesa que tem como rochas predominantes a muscovita-quartzitos, muscovita-quartzo xisto e os quartzito. O solo é o saprólito de quartzito e xisto (Figura 21).

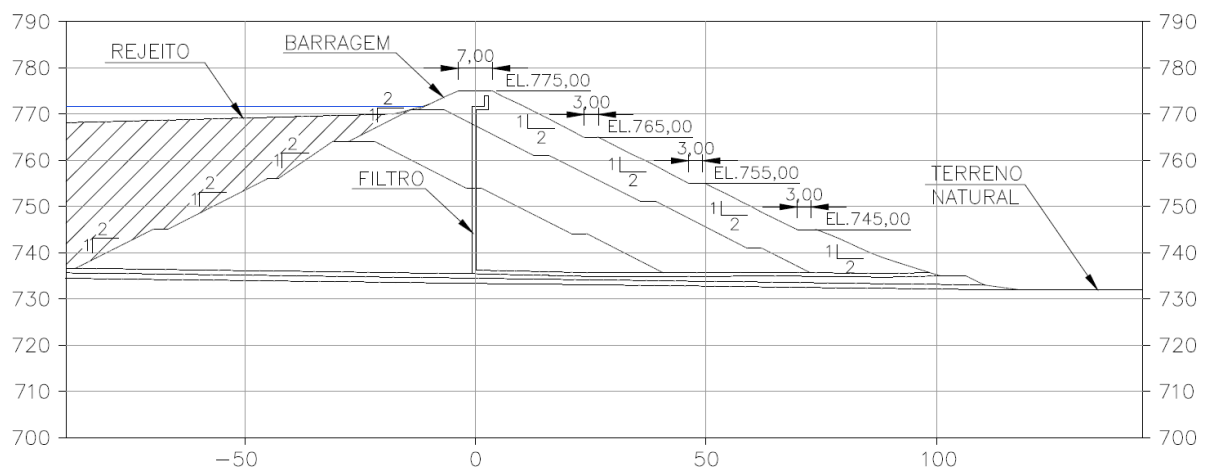
Figura 21 - Compartimentação tectonoestratigráfica da Província Tocantins.



Fonte: Santos *et al* (2015).

A barragem de terra homogênea, composta predominantemente por argila, é utilizada para disposição de rejeito gerado pelo beneficiamento do minério de ouro, com estrutura alteada a jusante e reservatório impermeabilizado com geomembrana de PEAD. A altura máxima é de 41 metros, com a elevação da crista na cota 775,00 metros, seus taludes apresentam inclinações de 1V:2H a jusante e a montante, as bermas têm 3 metros de largura, o comprimento da crista é de 530 metros e o sistema de drenagem interna é composto por filtro septo vertical de areia com o tapete drenante de areia (filtro chaminé) (Figura 22).

Figura 22 - Detalhamento da seção B da barragem.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

Implantada sobre o terreno que tem o perfil geológico composto por colúvio e saprólito, o barramento apresenta um extravasor de emergência, sistema de bombeamento e canais de drenagem periféricos compondo os seus elementos de drenagem (Figura 23).

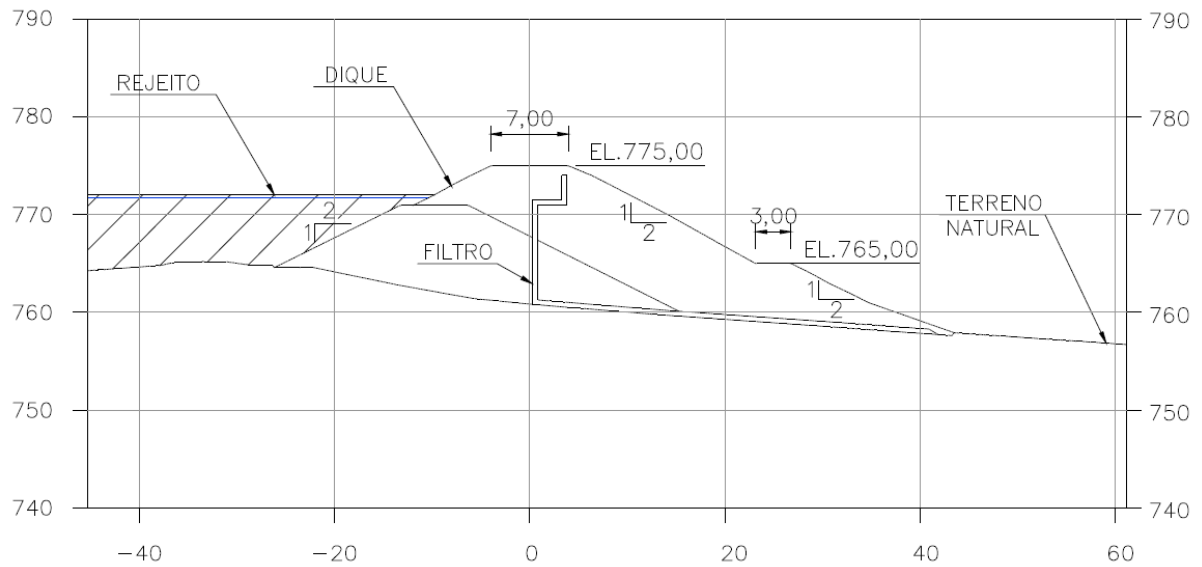
Figura 23 - Vista geral da barragem de rejeitos.



Fonte: Google Earth (Modificada pela própria autora).

Já o dique de fechamento da estrutura é homogêneo e composto por material areno siltoso, com alteamento a jusante, altura máxima de 16 metros e comprimento da crista de 106 metros. Sua estrutura é similar a principal, em que a largura da crista é de 7 metros e os taludes possuem a mesma inclinação (Figura 24).

Figura 24 - Detalhamento da seção D da barragem.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Para a realização das análises de estabilidades determinísticas é utilizado o *software* de elementos finitos, que verifica o menor fator de segurança possível nos taludes do barramento, configurando o deslizamento no sentido de montante para a jusante da estrutura.

A sequência aplicada na metodologia, para obtenção dos resultados é descrita no fluxograma da Figura 25, sendo que as etapas serão detalhadas.

Figura 25 - Fluxograma das etapas das análises de estabilidades de taludes.

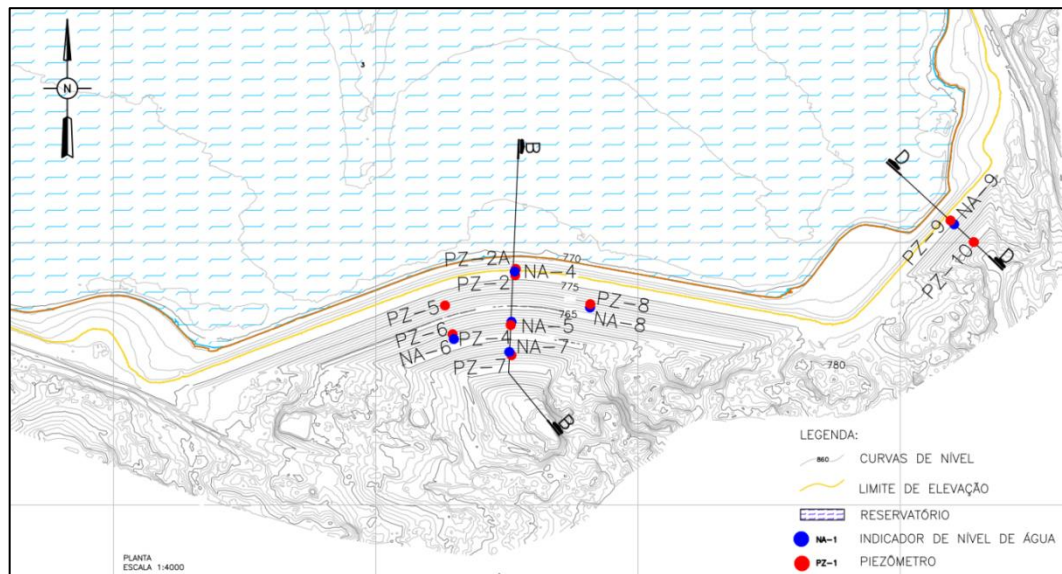
FLUXOGRAMA DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES



Fonte: Elaborada pela própria autora.

A metodologia empregada consiste nas análises das seções típicas da barragem, geradas a partir do projeto executivo e a topografia do empreendimento, que são: a Seção B, a crítica do barramento gerada no seu eixo, e a Seção D, seção crítica do dique de fechamento (Figura 26).

Figura 26 - Planta da barragem com indicação das seções de corte e instrumentação.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

O nível de água foi traçado baseando-se nas cotas máximas de água do primeiro trimestre do ano de 2022 dos instrumentos instalados na barragem, do tipo indicadores de nível de água e piezômetros, que estavam próximas as seções típicas de cálculos, indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Cota dos níveis de água da barragem de terra.

Seção	Instrumentos	Janeiro	Fevereiro	Março	Cota de instalação (m)
B-B	PZ-02A	738,51	738,86	739,23	729,54
B-B	PZ-04	738,99	739,52	739,91	729,52
B-B	PZ-07	735,60	735,91	736,13	732,99
D-D	PZ-09	Seco	Seco	Seco	756,17
D-D	PZ-10	758,86	758,81	758,65	756,50
B-B	INA-04	738,15	738,26	738,54	734,75
B-B	INA-05	738,16	738,54	738,81	732,51
B-B	INA-07	735,60	735,88	736,11	735,59
D-D	INA-09	Seco	Seco	Seco	762,35

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Para os instrumentos que não apresentavam leituras com níveis de água, consideradas leituras secas, o valor empregado é o da cota de instalação nas seções, para realizar o traçado do nível de água. A cota máxima de nível de água do reservatório no primeiro trimestre de 2022 é de 771,695 metros. A localização é apresentada na Figura 26.

Nos cálculos serão utilizados os métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern-Price para quatro cenários: a condição drenada, em que os parâmetros de cálculos são as tensões efetivas, a condição não-drenada no qual os parâmetros são baseados nas tensões totais, a condição de sismo drenada, em que o modelo é submetido a 5% da aceleração da gravidade para a aceleração horizontal e 3% para a aceleração vertical com a drenagem da barragem eficiente e a condição de sismo não drenada com o maciço saturado e acelerações da gravidade equivalentes a condição drenada. A rede de fluxo é traçada no *software* de estabilidade pelo métodos dos elementos finitos.

Os fatores de segurança obtidos em cada cenário serão comparados com a literatura para comprovação da estabilidade da barragem e cumprimentos das normas.

4.3 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

Os materiais a serem utilizados no modelo de cálculo de cada seção são provenientes dos ensaios de laboratórios e de campo realizados pelo empreendedor da barragem que fornece os dados para consolidação e definição dos parâmetros. As características dos materiais são adquiridas por ensaios de Atterberg, massa específica, granulometria – sedimentação e peneiramento, umidade natural, densidade natural, compactação – Energia normal e cisalhamento direto, para os materiais de condição não drenada é executado o ensaio triaxial não drenado, estabelecidos no projeto executivo e apresentados na Tabela 3 para a condição drenada e Tabela 4 para a condição não drenada.

Tabela 3 - Propriedades dos materiais para os cálculos em condição drenada.

Material	Cor	Peso específico (kN/m ³)	Tipo de tensão	Coesão (kPa)	Φ (graus)
Aterro		19	Mohr-Coulomb	5	30
Rejeito		20	Mohr-Coulomb	0	22
Fundação		18	Mohr-Coulomb	0	33
Filtro		17	Mohr-Coulomb	0	30

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Tabela 4 - Propriedades dos materiais para os cálculos em condição não drenada.

Material	Cor	Peso específico (kN/m)	Tipo de tensão	Coesão (kPa)	Φ (graus)
Aterro		19	Mohr-Coulomb	5	30
Aterro - Condição drenado		19	Mohr-Coulomb	5	27
Rejeito		20	Mohr-Coulomb	0	22
Fundação - Condição drenado		18	Mohr-Coulomb	0	30
Filtro		17	Mohr-Coulomb	0	30

Fonte: Elaborada pela própria autora.

Para o traçado dos níveis de água foram consideradas duas linhas freáticas, pois o reservatório da barragem é impermeável, revestido com geomembrana de PEAD. Na determinação da rede de fluxo, utiliza-se a permeabilidade (representada por “k”) dos materiais indicada na Tabela 5 e o nível de água do reservatório. Os parâmetros são definidos pela execução dos ensaios de permeabilidade de carga variável.

Tabela 5 - Coeficiente de permeabilidade dos materiais.

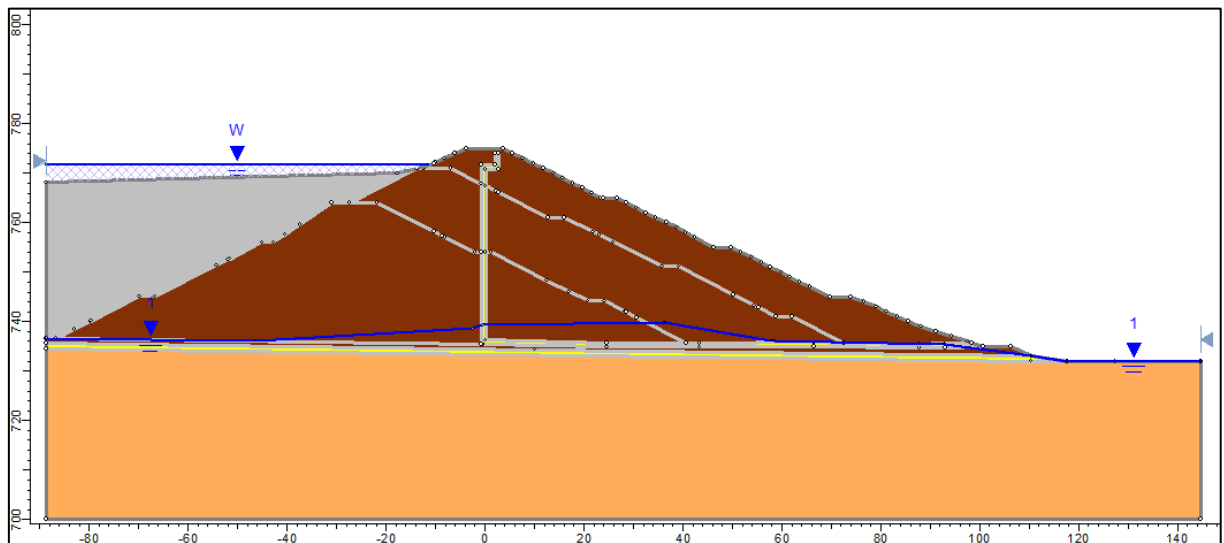
Material	Cor	Permeabilidade k (m/s)
Aterro		$8,80 \times 10^{-7}$
Geomembrana PEAD		$1,00 \times 10^{-27}$
Rejeito		$5,25 \times 10^{-7}$
Fundação		$4,00 \times 10^{-5}$
Filtro		$5,00 \times 10^{-4}$

Fonte: Elaborada pela própria autora.

4.4 SEÇÕES DOS MODELOS DE CÁLCULOS

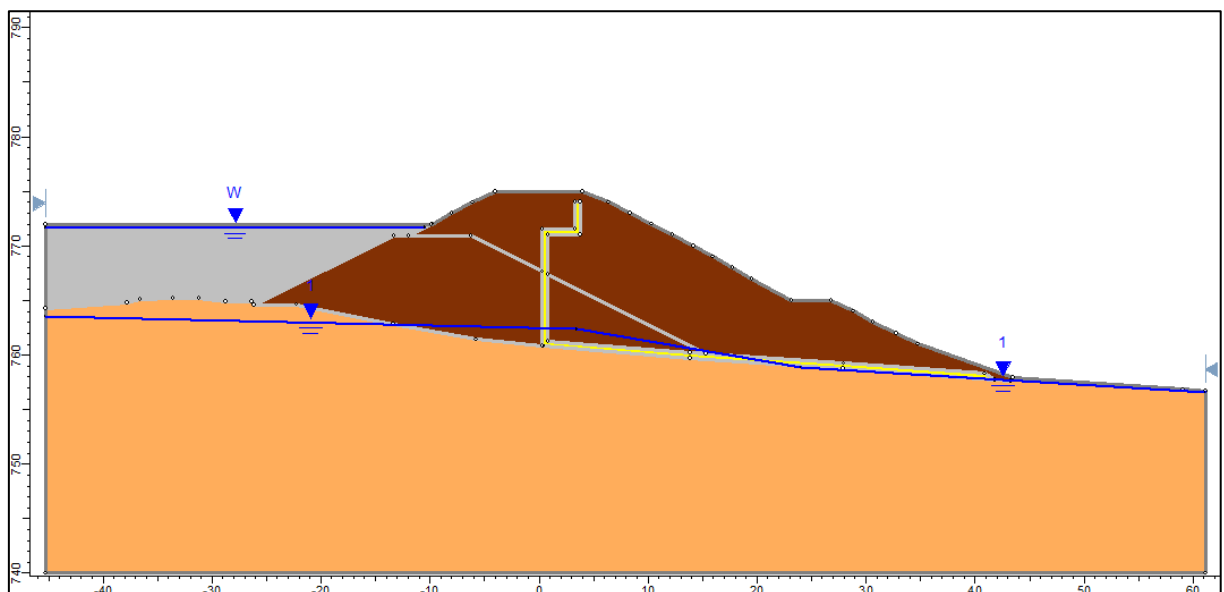
A Figura 27 apresenta a seção B e a Figura 28 a seção D, que são os modelos de cálculo com os materiais e níveis de água empregados.

Figura 27 - Modelo da seção B de cálculo.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 28 - Modelo da seção D de cálculo.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cálculos executados dos modelos nas condições drenada, não drenada, sísmica drenada e sísmica não drenada são apresentadas neste item 5.

5.1 CÁLCULOS DA SEÇÃO B

Os fatores de segurança dos cálculos da seção B, para os quatros cenários e os três tipos de metodologia: Bishop, Spencer e Morgenstern-Price, são apresentados na Tabela 6, sendo que o FS REQ se refere ao fator de segurança mínimo exigido pela literatura para cada um dos cenários

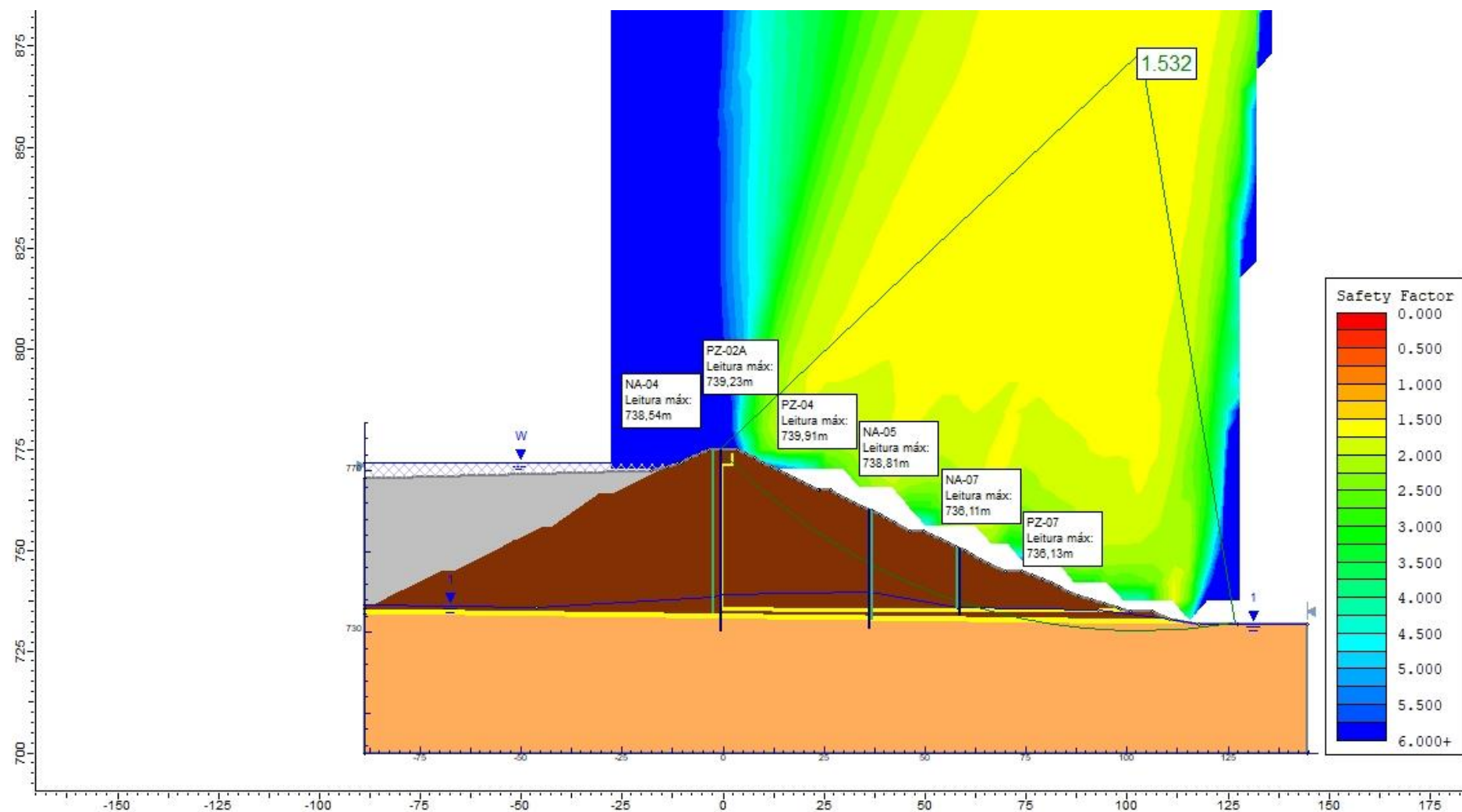
Tabela 6 - Resultado dos cálculos da seção B.

SEÇÃO	CONDIÇÃO DE ANÁLISE	FS ATUAL			FS REQ
		Bishop	Spencer	Morgenstern-Price	
B	Condição Estática (Operação)	<u>1,532</u>	1,533	1,536	1,50
B	Condição Não Drenada	1,446	1,447	<u>1,440</u>	1,50
B	Condição Pseudo-Estática de Operação (Sismo)	<u>1,321</u>	1,327	1,327	1,10
B	Condição Pseudo-Estática de Não Drenada (Sismo)	<u>1,229</u>	1,235	1,235	1,10

Fonte: Elaborada pela própria autora.

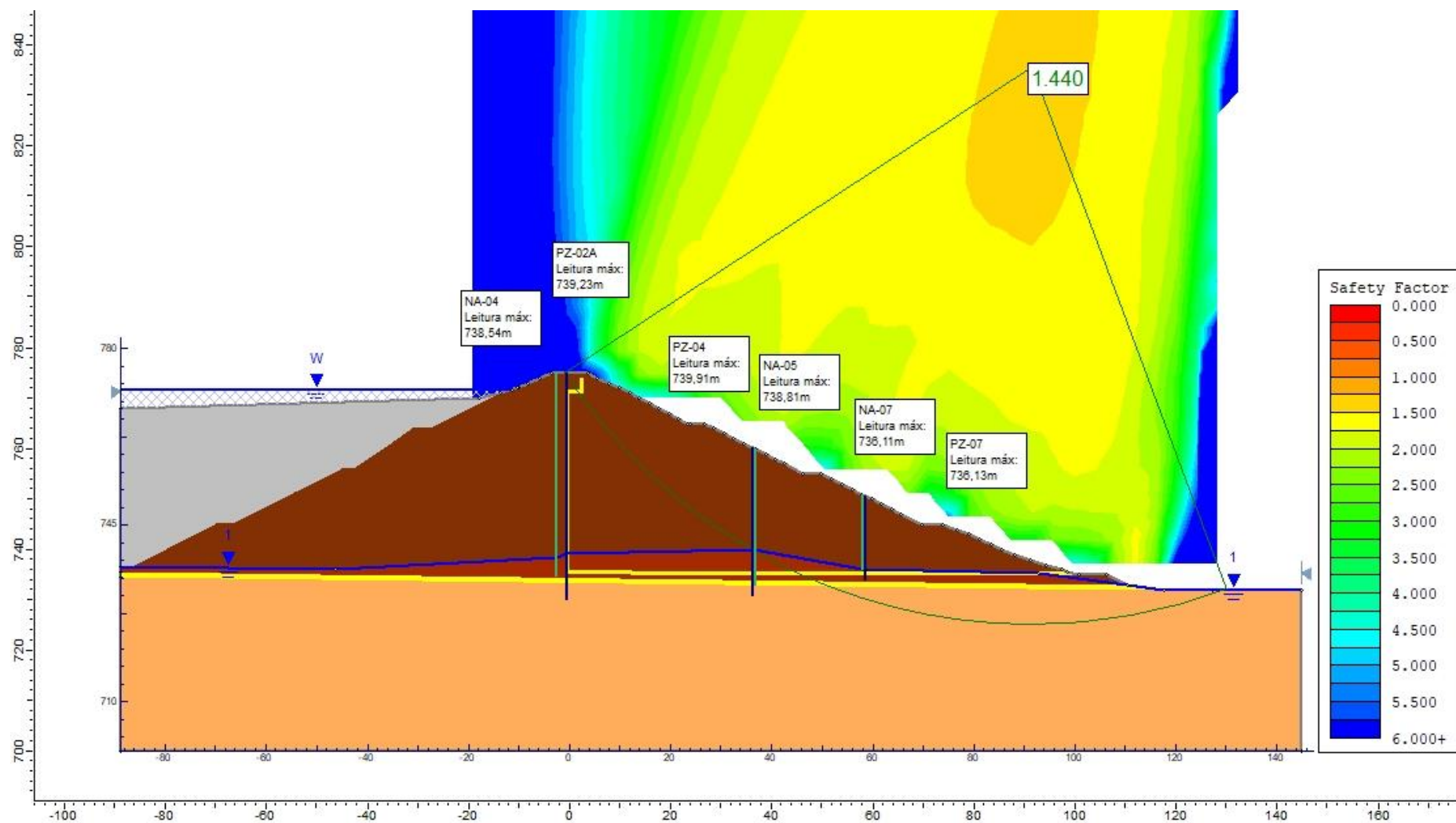
A Figura 29 à Figura 32 representa a método de equilíbrio limite com menor fator de segurança cada condição de cálculo, que tem os valores em destaque na Tabela 6. A Figura 33 descreve a rede de fluxo, indicada pela linha rosa, e a malha dos métodos dos elementos finitos

Figura 29 - Cálculo para condição drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,532$.



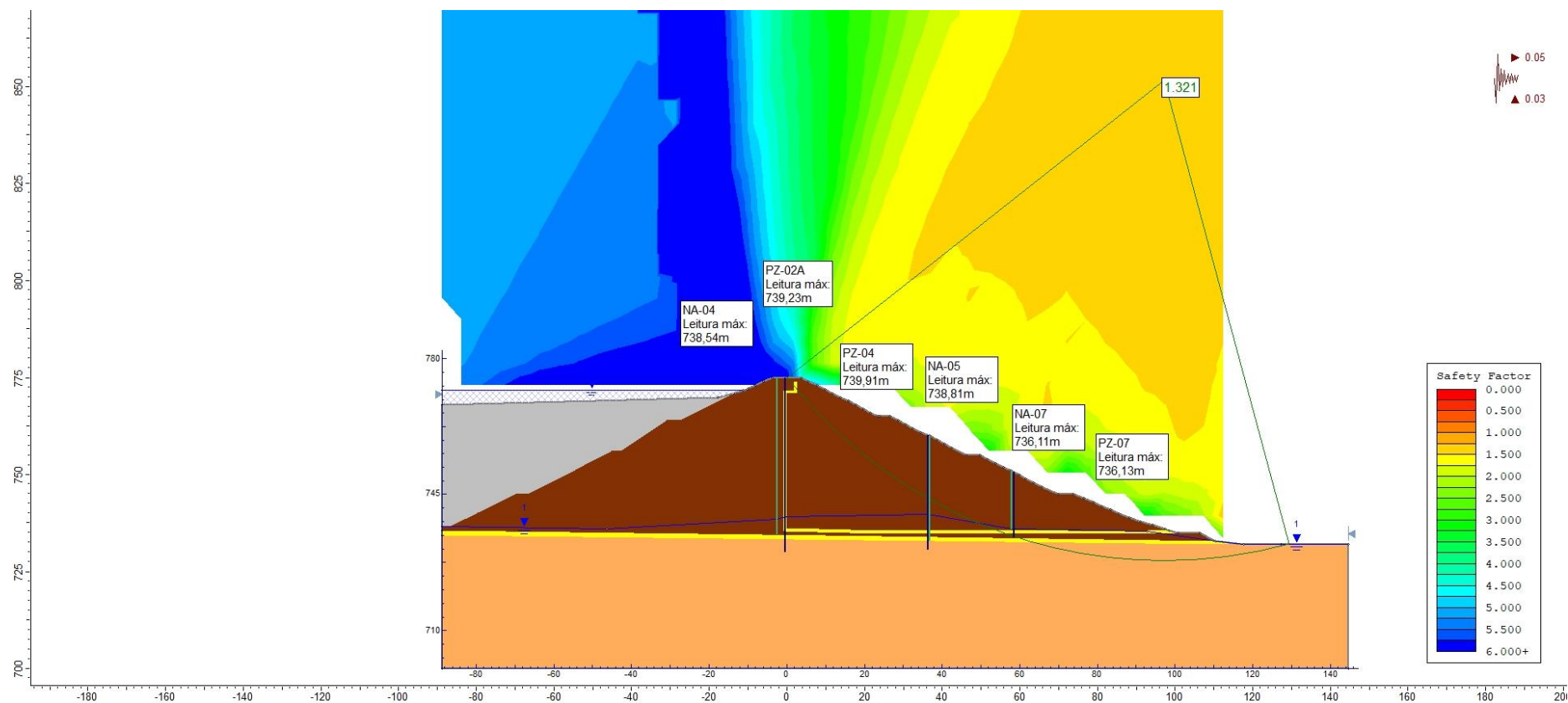
Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 30 - Cálculo para condição não drenada – Metodologia Morgenstern-Price – FS=1,440.



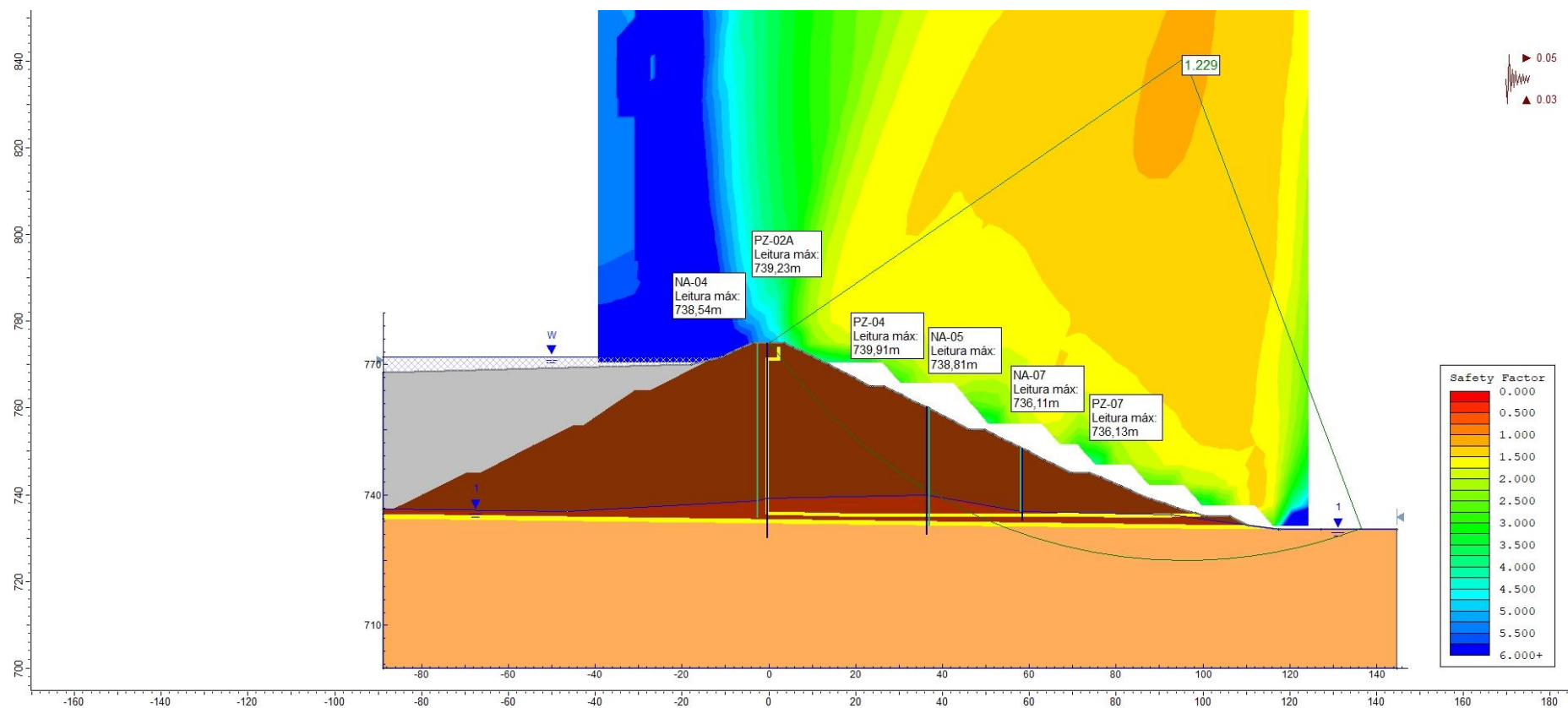
Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 31 - Cálculo para condição de sismo drenada – Metodologia Bishop – FS=1,321.



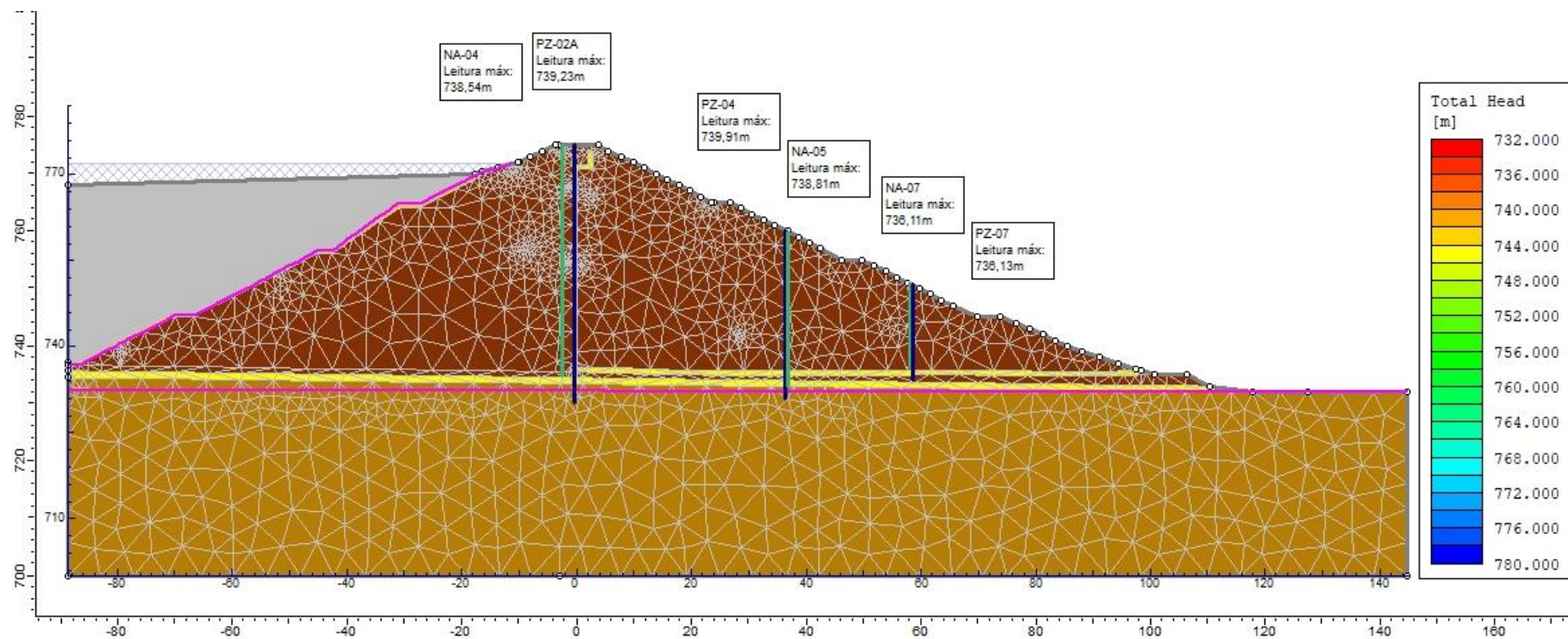
Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 32 - Cálculo para condição de sismo não drenada – Metodologia Bishop – FS=1,229.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 33 - Traçado da rede de fluxo para a seção B.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

5.2 CÁLCULOS DA SEÇÃO D

Os fatores de segurança dos cálculos da seção D, para os quatros cenários e os três tipos de metodologia: Bishop, Spencer e Morgenstern-Price, são apresentados na Tabela 7, sendo que o FS REQ se refere ao fator de segurança mínimo exigido pela literatura para cada um dos cenários.

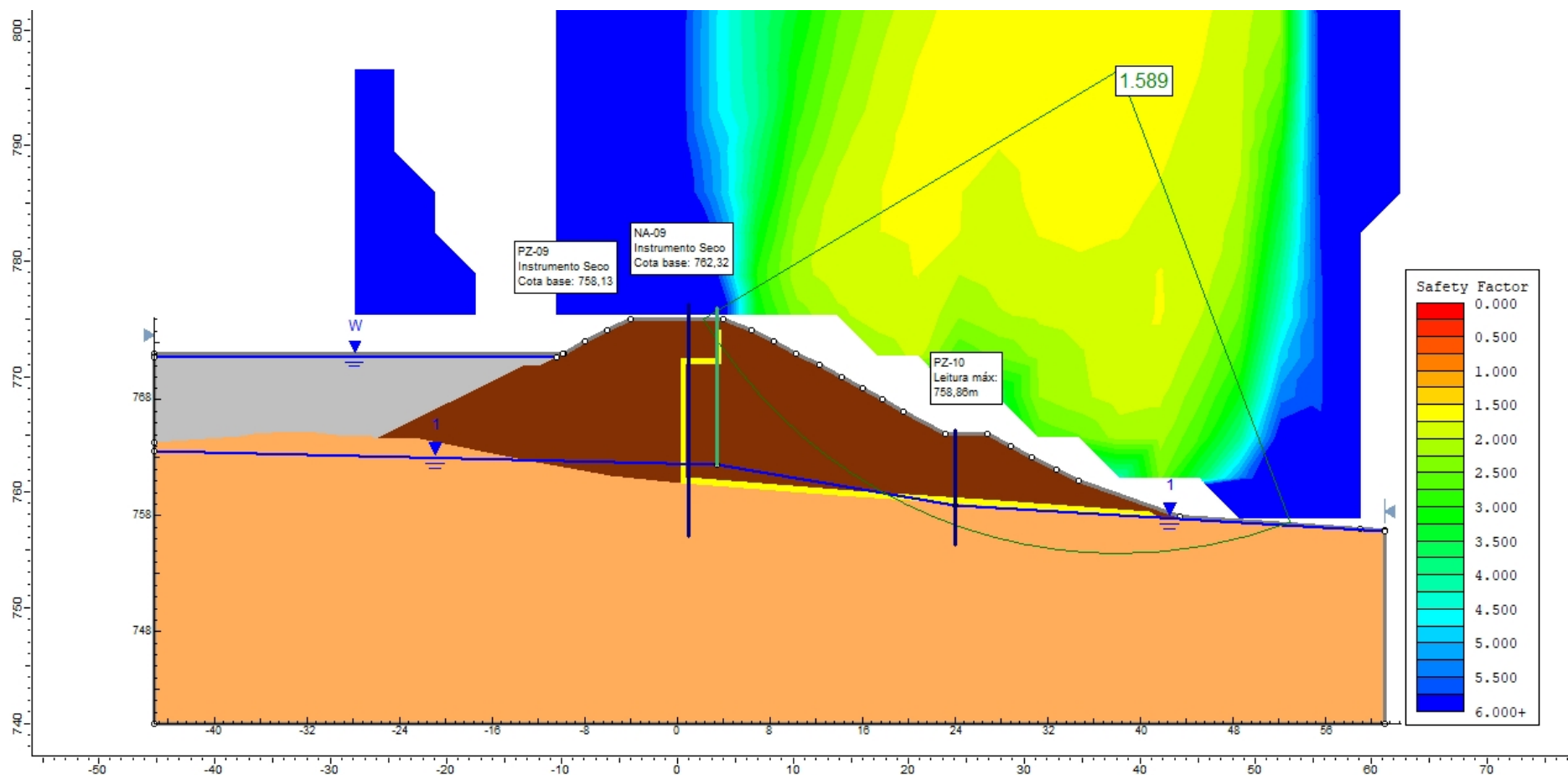
Tabela 7 - Resultado dos cálculos da seção D.

SEÇÃO	CONDIÇÃO DE ANÁLISE	FS ATUAL			FS REQ
		Bishop	Spencer	Morgenstern-Price	
D	Condição Estática (Operação)	<u>1,589</u>	1,597	1,599	1,50
D	Condição Não Drenada	<u>1,472</u>	1,474	1,476	1,50
D	Condição Pseudo-Estática de Operação (Sismo)	<u>1,366</u>	1,378	1,377	1,10
D	Condição Pseudo-Estática de Não Drenada (Sismo)	<u>1,262</u>	1,271	1,271	1,10

Fonte: Elaborada pela própria autora.

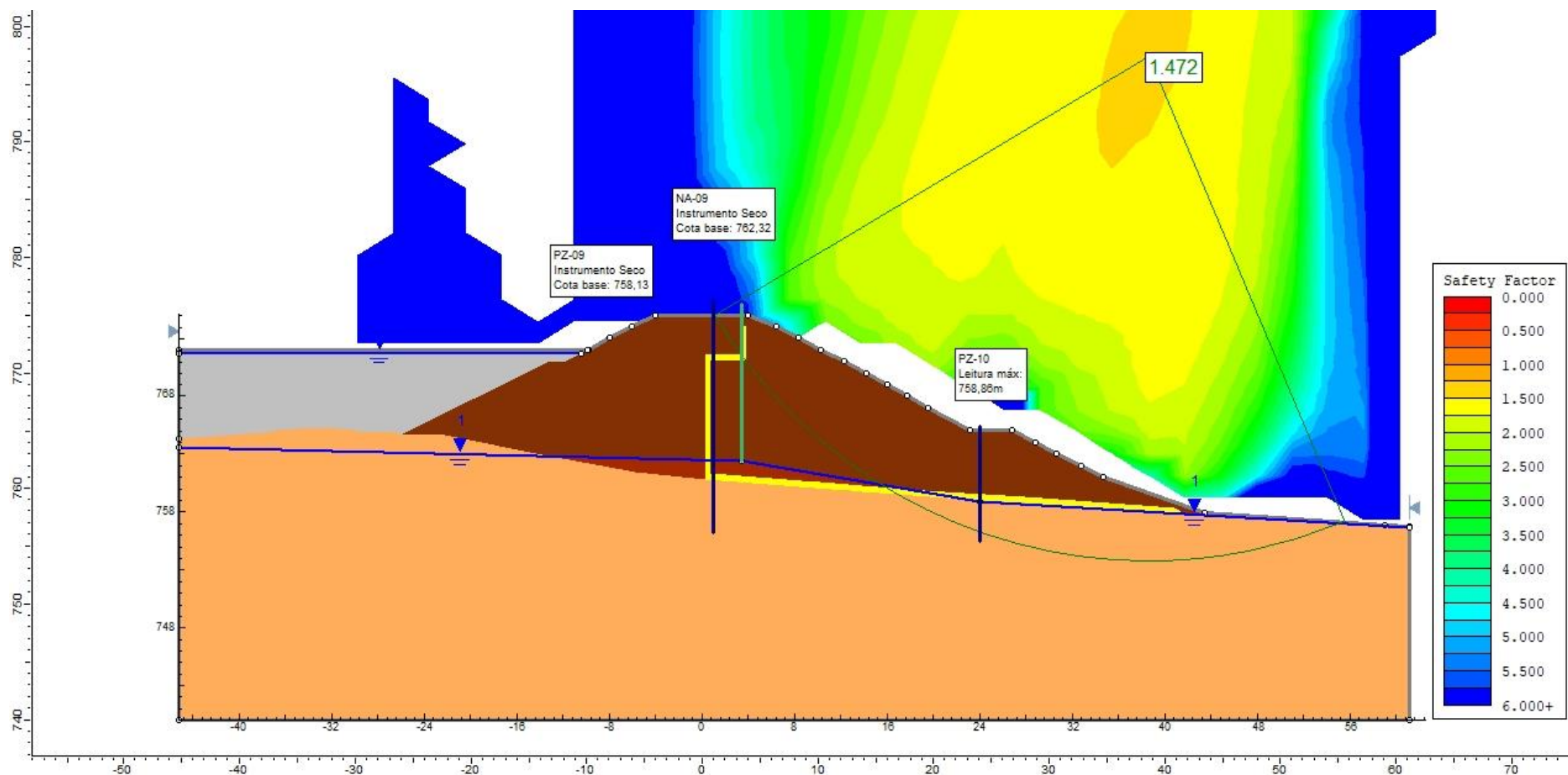
A Figura 34 à Figura 37 apresenta a metodologia com menor fator de segurança cada condição, que tem os valores em destaque nas Tabela 7. A Figura 38 descrevem a rede de fluxo, indicada pela linha rosa, e a malha dos métodos dos elementos finitos.

Figura 34 - Cálculo para condição drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,589$.



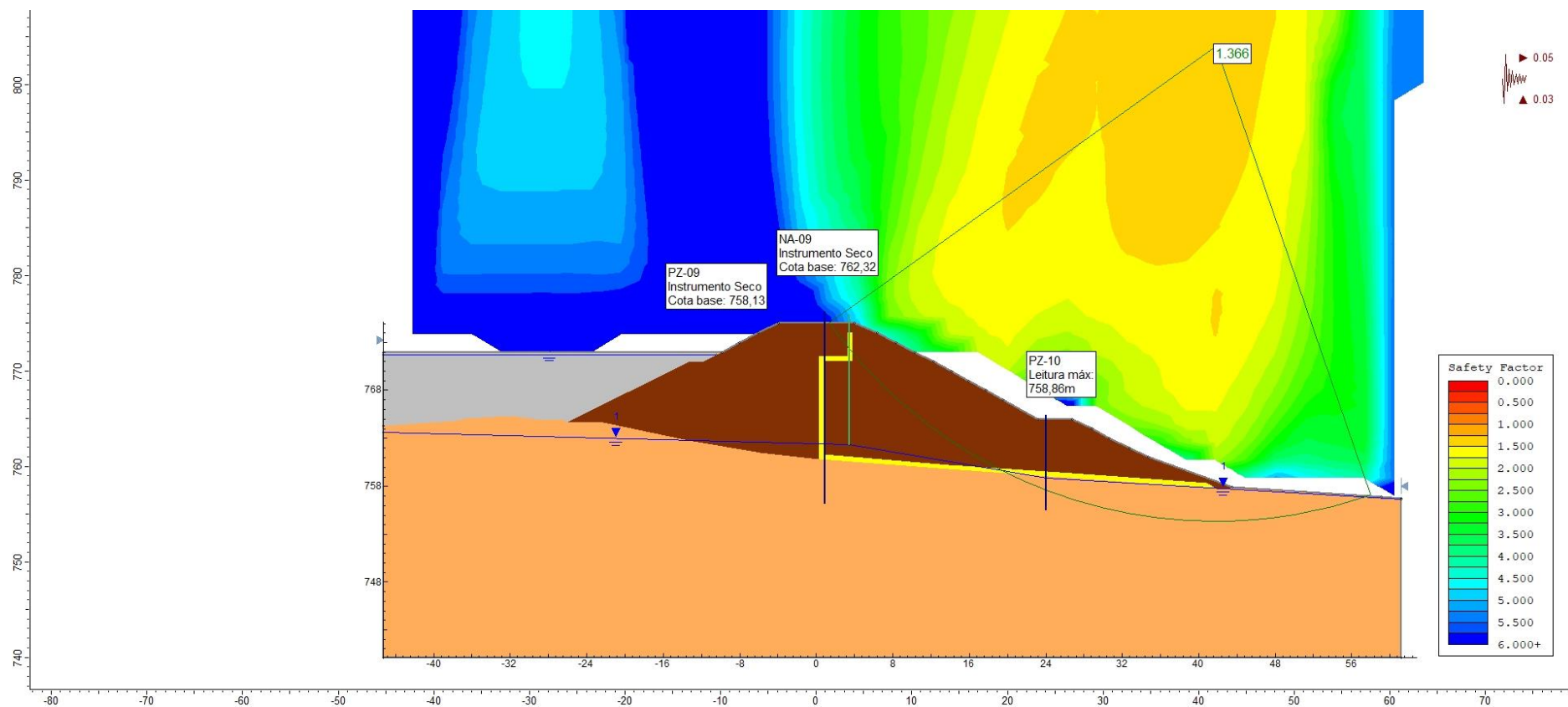
Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 35 - Cálculo para condição não drenada – Metodologia Morgenstern-Price – $FS=1,472$.



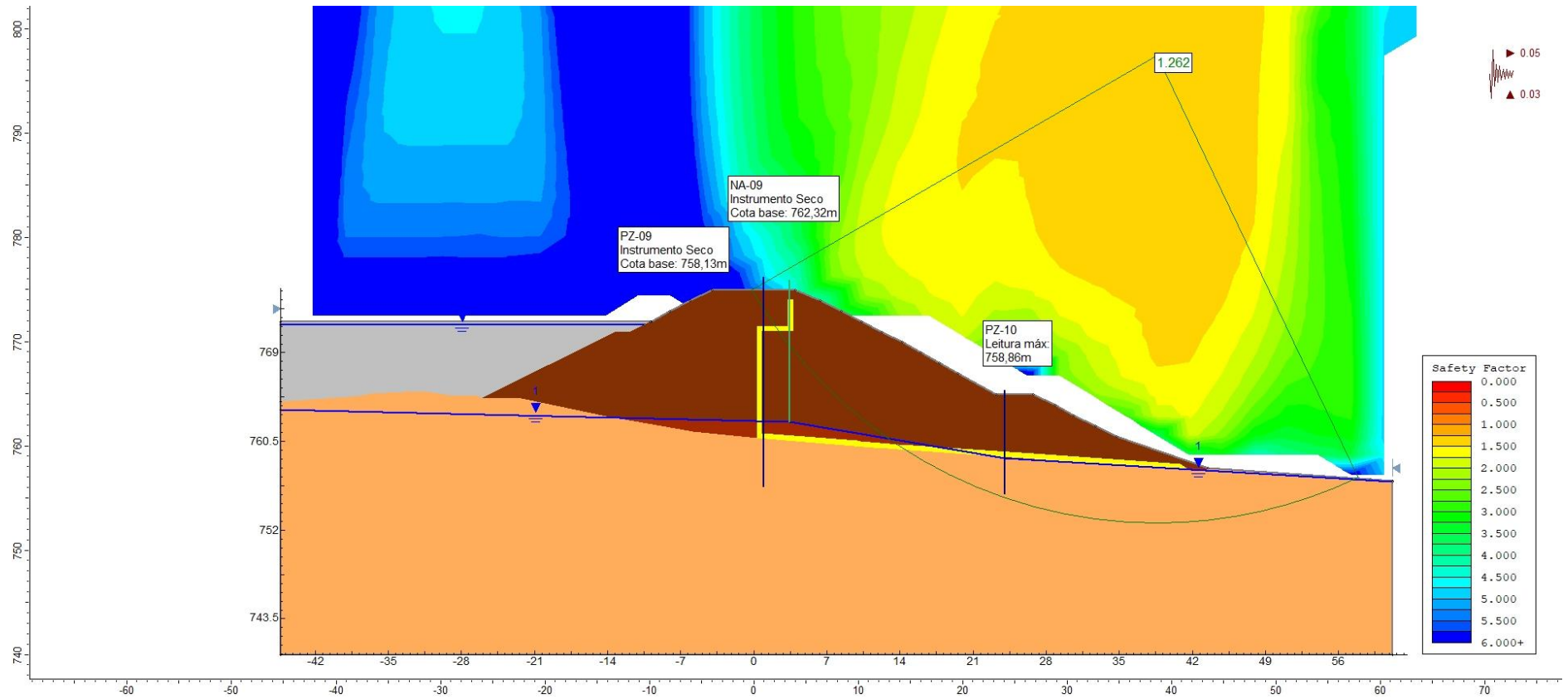
Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 36 - Cálculo para condição de sismo drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,366$.



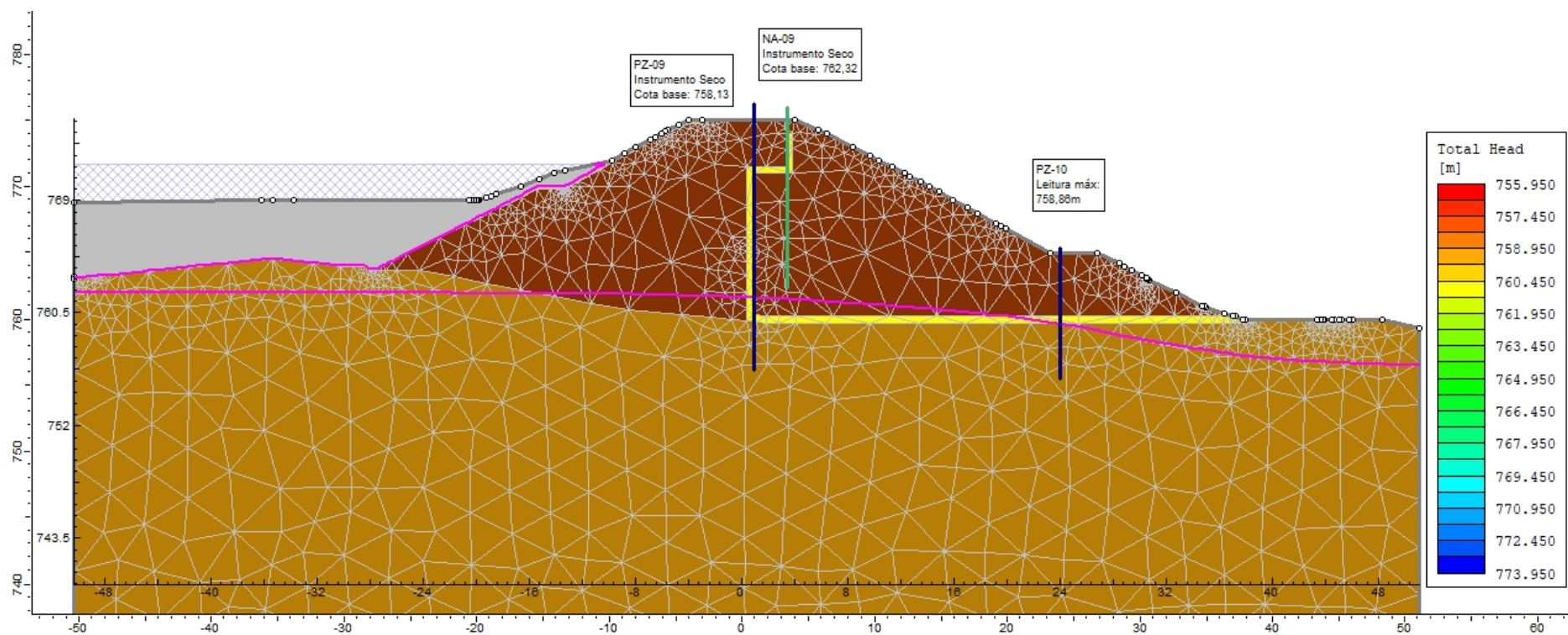
Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 37 - Cálculo para condição de sismo não drenada – Metodologia Bishop – $FS=1,262$.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

Figura 38 - Traçado da rede de fluxo para a seção D.



Fonte: Elaborada pela própria autora.

6. CONCLUSÃO

O trabalho verifica a necessidade da existência um novo reforço na barragem, devido ao cenário de condição não drenada apresentar fatores de segurança com valores inferiores ao exigido pela legislação vigente.

Assim, demonstra-se a importância de existir um controle e monitoramento de rotina dos parâmetros e condições da barragem, a fim de permitir perceber que a estrutura já não está mais em perfeitas condições de funcionamento e que não cumpri a legislação. Também se faz necessário que os órgãos competentes vigiem e avaliem a operação do barramento para evitar-se possíveis catástrofes.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos se chegou às seguintes conclusões:

- (1) Nas duas seções de modelo, para a barragem em condições drenada, sismo hipotético e pseudo-estáticas não drenada, os valores obtidos foram superiores aos requeridos pela literatura; já nas condições não drenadas, os valores foram inferiores aos exigidos pela legislação vigente.
- (2) Os fatores de segurança para os cenários de cálculos não foram cumpridos, portanto, se fazem necessários o reforço da estrutura e a nova elaboração de um projeto executivo que atendam aos parâmetros exigidos por norma.
- (3) Por apresentar dano potencial alto, devido ao volume total do reservatório, existência de população a jusante e os impactos socioeconômicos e ambientais que pode ocasionar, a condição não drenada é exigida pela legislação e requer o fator de segurança igual ou superior a 1,5.
- (4) A impermeabilização do reservatório proporciona uma linha de fluxo no eixo horizontal da barragem aproximadamente constante, localizando-se abaixo do maciço da mesma, passando pela fundação e paralela ao talude de montante. Esta impermeabilização impede a infiltração de água contaminada proveniente do contato do rejeito com o maciço e o lençol freática da região. Descrevem o fluxo de água proveniente das áreas de contribuição anteriores ao reservatório, agregando a rede de fluxo.

8. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução ANM N° 95, de 07 de fevereiro de 2022**. Brasília, DF, p. 1-49. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. **Manual de sondagens**. 5ª ed. São Paulo: ABGE, 2013. 103 p. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5241575/mod_resource/content/1/SNDAGEN%20-%20ENSAIOS.pdf. Acesso em: 01 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028:2017**: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos. 3ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 22 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NRB 6484:2020**: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 32 p.

BASTOS, P. S. S. Obras de terra 3. Apostila, Bauru: Faculdade de Engenharia de Bauru, 2003. 28 slides, color. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto4/Muros%20Arrimo/Ap%20Obras%20Ter%20ra%203.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2021

BEEN, K.; JEFFERIES, M. G. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, 35(2): 99-112.

BITTENCOURT, D. M. A. **Estabilidade de taludes**. Goiás: Puc Goiás, 2015. 36 slides, color. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17430/material/GEO_II_13_Estabilidade%20de%20Taludes.pdf. Acesso em: 23 ago. 2021.

BOSCOV, M. E. G. **Análise de estabilidade de taludes**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016. 33 slides, color. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2100229/mod_resource/content/1/An%C3%A1lise%20de%20estabilidade%20de%20taludes%20A.pdf. Acesso em: 26 ago. 2021.

CÁRDENA GUILLÉN, J. L. Modelagem elasto-plástica da liquefação dinâmica de solos. Jorge Luis Cárdenas Guillén; orientador: Celso Romanel. – 2008. 246f., Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Rio de Janeiro: PUC, 2008.

COMITE BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS - CBGB, “Barragens no Brasil / Dams in Brazil”. CBGB, RJ, 1982.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - CBDB. **Barragens de rejeito no Brasil**. CBDB, 2012. 310 p.

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

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

EMERMAN, Steven H. Avaliação da Barragem de Rejeitos, do Uso de Cianeto e do Consumo de Água no Projeto de Ouro Volta Grande Proposto, Pará, Norte do Brasil. Utah 84660, Eua: Malach Consulting, 2020. 43 p. Disponível em: https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/prov95_portugues.pdf. Acesso em: 04 jan. 2023.

GALLEGO-HERRERA, H. D. Análise do comportamento de rejeito de mineração durante a construção de um aterro experimental. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 211/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2012, 109 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. Gestão e manejo de rejeitos da mineração. Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1ª ed. - Brasília: IBRAM, 2016. 128 p. ISBN: 978-85-61993-10-8

ISHIHARA, K. (1993) Liquefaction and flow failure during earthquake. *Géotechnique*, 43, 351-415. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>

KRAMER, S. L. Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall, New Jersey, U.S, v. 1, 1996, 653 p.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 170 p.

MEIRELLES, F. S. C. **Curso de segurança de barragens**: Módulo I: Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais. Itaipu: Agência Nacional de Saneamento Básico, 2013. 86 p. Disponível em: https://capacitacao2.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2179/9/Unidade_9-modulo1.pdf. Acesso em: 01 dez. 2022.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 363 p.

PINTO, M. B. P. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Definições importantes sobre segurança de barragens**. 2022. Disponível em: https://www.snisd.gov.br/Entenda_Mais/outros/definicoes-importantes-sobre-seguranca-de-barragem.pdf. Acesso em: 01 dez. 2022.

SANTOS, L. C. M. L. *et al.* Análise tectônica de terrenos: metodologia, aplicação em cinturões orogênicos e exemplo das províncias Tocantins e Borborema, Brasil. **Geonomos**, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 51-63, 31 dez. 2014. GEONOMOS. <http://dx.doi.org/10.18285/geonomos.v22i2.317>. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11701>. Acesso em: 4 dez. 2022.

SANTOS, L. C. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos**. 2019. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28051/4/EstudoSobreInstrumenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SCREMIN, A. **O método dos elementos finitos**. 2015. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM266/Apostila/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20ao%20MEF.pdf>. Acesso em: 23 set. 2022.

SEED, R. B.; CETIN, K. O.; MOSS, R. E. S.; KAMMENER, A. M.; WU, J.; PASTRANA, J. M.; RIEMER, M. F.; SANCIO, R. B.; BRAY, J. B.; FARIS, A. Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework. Keynote presentation, Proc 26th ASCE Los Angeles Spring Seminar, Long Beach, CA, US, 2003, 71 p.

SILVA, J. P. M. **Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes**. 2011. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62106/1/000149997.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2021.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 416 p.

WANG, W. Some findings in soil liquefaction. Water conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1979.

YAMAMURO, J. A.; Covert, K. M. Monotonic and cyclic liquefaction of very loose sands with high silt content. J. Geotech. & Amp; Geoenvironmental. Engineering. ASCE, 2001, 127 (4): 314-324.