

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

GUILHERME DA SILVA BENTO

**ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA
PARA MATERIAIS DE PROPRIEDADES DIFERENTES**

Florianópolis

2024

GUILHERME DA SILVA BENTO

**ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA
PARA MATERIAIS DE PROPRIEDADES DIFERENTES**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade
Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil
Orientador: Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Florianópolis

2024

GUILHERME DA SILVA BENTO

**ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA
PARA MATERIAIS DE PROPRIEDADES DIFERENTES**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade
Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Civil
Orientador: Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra

Bento, Guilherme da Silva
Análise Determinística de Estabilidade de Barragem de
Terra para Materiais de Propriedades Diferentes /
Guilherme da Silva Bento ; orientador, Rafael Augusto dos
Reis Higashi, 2024.
188 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis,
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Estabilidade de taludes. 3.
Barragem de Terra. 4. Métodos Determinísticos. I. Higashi,
Rafael Augusto dos Reis. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

GUILHERME DA SILVA BENTO
**ANÁLISE DETERMINÍSTICA DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE TERRA
PARA MATERIAIS DE PROPRIEDADES DIFERENTES**

Florianópolis, 27 de Junho de 2024.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado e aprovado pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Orlando Martini de Oliveira, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng^a Gisele Marilha Pereira Reginatto

Certifico que esta é a **versão original e final** do Trabalho de Conclusão de Curso que foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil por mim e pelos demais membros da banca examinadora.

Prof.(a) Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e por todo o suporte e educação, que me permitiu ser quem eu sou. Agradecimento especial para a minha mãe, que mesmo nos momentos difíceis onde não tínhamos boas condições financeiras, trabalhou muito para proporcionar conforto e não deixar faltar comida na nossa mesa para mim e para as minhas irmãs.

Agradeço ao ex-marido da minha mãe, seu Manoel Martins, que ajudou todos da minha casa e permitiu que reconstruíssemos as nossas as nossas vidas.

Agradeço aos meus amigos por todo o apoio nos momentos difíceis e por estarem comigo para comemorar os bons momentos. Agradecimento especial para os meus amigos da turma 18.1 de Engenharia Civil da UFSC. Ao Adriel Brito por toda parceria para sair nos finais de semana e para conversar enquanto tomamos um café na Nina. Ao Bernardo Caldeira por toda a parceria para sair aos finais de semana e nos trabalhos em grupo que fizemos juntos. Ao Caio Morelli por toda a ajuda com as matérias da faculdade e parceria nos trabalhos. Ao Pedro Gasparotti pelas conversas aprofundadas e reflexões sobre a faculdade. À Luísa Zimmermann pelas nossas conversas tomando café na Nina, parceria para trabalhos acadêmicos e nossos diversos conselhos um para o outro.

Agradeço a minha namorada, Marina Turra Sartori, por todo o apoio, companheirismo e paciência nessa etapa tão desgastante que é produzir o TCC, sem ela por perto essa jornada seria ainda mais difícil.

Agradeço as empresas que tive oportunidade de estagiar, vivenciei diversos desafios e obtive aprendizados que apenas a vivência de trabalhar na área de engenharia poderia me proporcionar. Agradecimento a engenheira Marília Machado Moureira que me ajudou quanto as minhas dúvidas sobre o projeto da barragem e sempre esteve a disposição.

Agradeço à UFSC e aos meus professores, que fizeram com que eu evolua como pessoa e profissional, disponibilizando um ensino de qualidade para a minha formação, me preparando para os desafios que vêm após a conclusão da minha graduação.

RESUMO

As barragens são objetos de grande importância para a sociedade devido as suas diversas aplicações, como abastecimento de água e geração de energia elétrica, retenção de rejeitos. A garantia da segurança delas é de grande importância, pois a possibilidade de falhas e rupturas podem ocasionar impactos negativos economicamente e/ou risco potencial a vidas humanas. A barragem de terra de estudo tem como função reter água, estando localizada na região Nordeste do Brasil. A barragem previamente estava planejada para ser composta por solo arenoso compactado e um núcleo argiloso compactado, porém devido a descoberta da presença de uma jazida próxima com material de boa qualidade, devido a facilidade de acesso, foi optado por utilizar este material. Este trabalho tem como objetivo analisar a possibilidade de uso de combinações de solo arenoso com núcleo impermeável de argila e comparar com os resultados do projeto inicial, para a etapa de final de construção, operação com nível de água máximo e rebaixamento do nível de água. A metodologia deste trabalho consiste na modelagem computacional do perfil do objeto de estudo por meio de softwares de análise, o Seep/W foi utilizado para estudar o comportamento da água que infiltra no corpo do maciço durante a sua operação, no programa Slope/W são analisadas as superfícies críticas e determinados os coeficientes de segurança para cada combinação de material, nos taludes de jusante e montante. Utilizou-se quatro métodos determinísticos para cálculo do fator de segurança, dois menos rigorosos, Bishop Simplificado e Fellenius, dois mais rigorosos, Morgenstern-Price e Spencer. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que os coeficientes de segurança, para cada etapa de análise, estão acima do mínimo exigido. Observou-se que os resultados para as combinações de solo arenoso original da barragem e deste solo arenoso com o núcleo impermeável de argila apresentam os resultados mais eficientes, as outras combinações de solo arenoso com núcleo argiloso impermeável resultam em valores maiores e mais conservadores de fator de segurança.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes. Barragem de terra. Métodos determinísticos.

ABSTRACT

Dams are objects of great importance to society due to their diverse applications, such as water supply, electricity generation, tailings retention. Ensuring their safety is of great importance, as the possibility of failures and ruptures can cause negative economic impacts and/or potential risk to human lives. The purpose of the work study earth dam is to retain water, being located in the Northeast region of Brazil. The dam was previously planned to be composed of compacted sandy soil and a compacted clay core, however due to the discovery of the presence of a nearby deposit with good quality material, due to the ease of access, it was decided to use this material. This work aims to analyze the possibility of using combinations of sandy soil with an impermeable clay core and compare with the results of the initial project, for the final stage of construction, operation with maximum water level and rev. The methodology of this work consists of computational modeling of the profile of the object of study using analysis software, Seep/W was used to study the behavior of water that infiltrates the body of the massif during its operation, in the Slope/W program are critical surfaces were analyzed and safety coefficients were determined for each combination of material, on the downstream and upstream slopes. Four deterministic methods were used to calculate the safety factor, two less rigorous, Bishop Simplificado and Fellenius, two more rigorous, Morgenstern-Price and Spencer. The results obtained in this work show that the safety coefficients, for each stage of analysis, are above the minimum required. It was observed that the results for the combinations of the dam's original sandy soil and this sandy soil with the impermeable clay core present the most efficient results, the other combinations of sandy soil with an impermeable clay core result in higher and more conservative factor values of security.

Keywords: Slope stability. Earth dam. Deterministic methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem de Rejeito	18
Figura 2 – Barragem de retenção de água	18
Figura 3 – Barragem de terra homogênea	19
Figura 4 – Barragem de terra zoneada.....	20
Figura 5 – Barragem de enrocamento	21
Figura 6 – Elementos de barragem de terra homogênea	23
Figura 7 – Elementos de barragem de enrocamento	24
Figura 8 – Superfície potencial de ruptura	29
Figura 9 – Área de resistência baixa para método probabilístico.....	31
Figura 10 – Equilíbrio de forças.....	34
Figura 11 – Equilíbrio de forças.....	34
Figura 12 – Forças atuantes nas fatias, método de Fellenius	36
Figura 13 - Forças atuantes nas fatias, método de Bishop Simplificado.....	37
Figura 14 - Forças atuantes nas fatias, método de Spencer.....	38
Figura 15 - Forças atuantes nas fatias por meio das resultantes, método de Spencer	39
Figura 16 - Forças atuantes nas fatias, método de Morgenstern-Price.....	40
Figura 17 – Interface MacStars	43
Figura 18 – Interface Slide2	44
Figura 19 – Interface Seep/W.....	45
Figura 20 – Interface Slope/W	46
Figura 21- Fluxograma do método utilizado no trabalho.....	47
Figura 22 – Barragem X.....	48
Figura 23 – Barragem X com núcleo de argila	49
Figura 24 – Superfície de ruptura, método de grades e raios	52
Figura 25 - Fator de Segurança, Etapa 1, material original de projeto, talude de jusante	55
Figura 26 - Fator de Segurança, Etapa 1, material original de projeto, talude de montante	56
Figura 27 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 1, talude de jusante.....	56
Figura 28 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 1, talude de montante	57
Figura 29 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 2, talude de jusante.....	57

Figura 30 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 2, talude de montante	58
Figura 31 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 3, talude de jusante	58
Figura 32 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 3, talude de montante	59
Figura 33 – Gráfico de fator de segurança para Etapa 1, talude de jusante	60
Figura 34 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 1, talude de montante	60
Figura 35 – Carga total de água, Etapa 2, material original de projeto.....	62
Figura 36 - Poropressão, Etapa 2, material original de projeto.....	62
Figura 37 - Fator de Segurança, Etapa 2, material original de projeto, talude de jusante	63
Figura 38 - Fator de Segurança, Etapa 2, material original de projeto, talude de montante	63
Figura 39 – Carga total de água, Etapa 2, material grupo 1	64
Figura 40 - Poropressão, Etapa 2, material grupo 1	64
Figura 41 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 1, talude de jusante	65
Figura 42 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 1, talude de montante ..	65
Figura 43 – Carga total de água, Etapa 2, material grupo 2	66
Figura 44 - Poropressão, Etapa 2, material grupo 2	66
Figura 45 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 2, talude de jusante	67
Figura 46 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 2, talude de montante ..	67
Figura 47 - Carga total de água, Etapa 2, material grupo 3.....	68
Figura 48 - Poropressão, Etapa 2, material grupo 3	68
Figura 49 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 3, talude de jusante	69
Figura 50 – Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 3, talude de montante..	69
Figura 51 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 2, talude de jusante	70
Figura 52 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 2, talude de montante	70
Figura 53 - Carga total de água, Etapa 3, material original de projeto	73
Figura 54 - Poropressão, Etapa 3, material original de projeto.....	73
Figura 55 - Fator de Segurança, Etapa 3, material original de projeto, talude de jusante	73
Figura 56 - Fator de Segurança, Etapa 3, material original de projeto, talude de montante	74
Figura 57 – Carga total de água, Etapa 3, material grupo 1	75
Figura 58 - Poropressão, Etapa 3, material grupo 1	75
Figura 59 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 1, talude de jusante	76

Figura 60 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 1, talude de montante ..	76
Figura 61 – Carga total de água, Etapa 3, material grupo 2	77
Figura 62 - Poropressão, Etapa 3, material grupo 2	77
Figura 63 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 2, talude de jusante	78
Figura 64 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 2, talude de montante ..	78
Figura 65 - Carga total de água, Etapa 3, material grupo 3.....	79
Figura 66 - Poropressão, Etapa 3, material grupo 3	79
Figura 67 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 3, talude de jusante	80
Figura 68 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 3, talude de montante ..	80
Figura 69 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 3, talude de jusante	81
Figura 70 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 3, talude de montante	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de segurança dos critérios de projeto, segundo Eletrobras	30
Tabela 2 – FS_{adm} para níveis de segurança, segundo NBR 11682	30
Tabela 3 – Propriedades geotécnicas de resistência efetiva e de permeabilidade, barragem original.....	50
Tabela 4 – Grupo 1, solo arenoso compactado e núcleo argiloso impermeável	51
Tabela 5 - Grupo 2, solo arenoso compactado e núcleo argiloso impermeável.....	51
Tabela 6 - Grupo 3, solo arenoso compactado e núcleo argiloso impermeável.....	51
Tabela 7 – Fatores de segurança mínimos para cada etapa de projeto	53
Tabela 8 – Quadro resumo de fator de segurança, regime de operação	61
Tabela 9 - Quadro resumo de fator de segurança, operação com nível de água máximo	72
.....	
Tabela 10 - Quadro resumo de fator de segurança, rebaixamento do nível de água..	83

SUMÁRIO

1	Introdução	15
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
2	Revisão Bibliográfica.....	17
2.1	Definição da Barragem	17
2.2	Tipos de Barragem.....	18
2.2.1	Barragem de Terra	19
2.2.2	Barragem de Enrocamento.....	20
2.2.3	Barragem Mista	21
2.2.4	Barragem de Concreto	21
2.3	Elementos da Barragem.....	22
2.4	Permeabilidade e Condutividade	24
2.5	Segurança de Barragens.....	25
2.6	Segurança de Barragens no Brasil	26
2.6.1	Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010	27
2.6.2	Lei Nº 14.006, de 30 de Setembro de 2020	28
2.7	Análise de Estabilidade de Talude.....	29
2.8	Análise Probabilística	30
2.9	Análise Determinística.....	31
2.9.1	Equilíbrio Limite	33
2.10	Método de Fellenius	35
2.11	Método de Bishop Simplificado	37
2.12	Método de Spencer	38
2.13	Método de Morgenstern-Price	40
2.14	Softwares de Análise	41

2.14.1	MacStars 2000	42
2.14.2	Slide2	43
2.14.3	Seep/W	44
2.14.4	Slope/W	45
3	Método	47
3.1	Barragem de Estudo.....	47
3.2	Mecanismos Analisados	49
3.3	Materiais de Estudo	49
3.4	Softwares para a Análise da Barragem.....	51
3.5	Análise da Barragem.....	52
3.5.1	Etapa 1 - Final de Construção	53
3.5.2	Etapa 2 – Operação com Nível de Água Máximo	53
3.5.3	Etapa 3 – Rebaixamento Rápido do Nível de Água	54
4	Resultados das Análises	55
4.1	Análise de Estabilidade Etapa 1 – Final de Construção	55
4.2	Análise de Estabilidade Etapa 2 – Operação com nível de Água Máximo	62
4.3	Análise de Estabilidade Etapa 3 – Rebaixamento do Nível da Água.....	73
5	Conclusões	84
6	Sugestões para Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A- SIMULAÇÕES DE ESTABILIDADE	92

1 INTRODUÇÃO

As barragens têm ao longo dos anos auxiliado quanto à gestão dos recursos hídricos, o uso mais antigo e comum é no armazenamento de água para o abastecimento e para a agricultura. As barragens também são utilizadas para a geração de energia elétrica, proteção contra inundações, controle de erosões e assoreamento gerados pela ocorrência de chuva, contenção de sólidos de mineração e de indústrias.

As barragens possuem uma grande importância para a sociedade, porém há preocupações com os riscos de rompimento e da segurança dos seus arredores. Acidentes dessa natureza geram prejuízos diretos, como perda de vidas e danos materiais, bem como geram prejuízos indiretos, como a impossibilidade de exploração dos recursos hídricos da região e interrupção das atividades nas áreas afetadas.

Segundo Costa (2012), o projeto de uma barragem envolve aspectos distintos sobretudo por abranger fatores de natureza diversificados. Para conceber o melhor arranjo de uma obra, é preciso levar em consideração os fatores: objetivo da obra, disponibilidade de materiais para a construção, relevo, balanço hídrico, condições geológico-geotécnicas das fundações e impactos ambientais relevantes. Estes fatores são importantes não apenas para definir o melhor arranjo da obra da barragem, mas também para analisar a viabilidade da obra.

No Brasil, a primeira barragem teve sua construção no século XVI, onde atualmente fica a área urbana de Recife, no estado de Pernambuco. Após o século XX, houve um acréscimo de investimento na construção de barragens no Brasil, para utilizar-se na geração de energia elétrica, usufruindo dos recursos hídricos vastos do território brasileiro.

Muitas “barragens pequenas” sofrem acidentes todos os anos no Brasil. A garantia da duração e operação no decorrer da vida útil da barragem prevista no projeto deve ser assegurada pela adequação do projeto, uma correta construção e manutenção. Assim, estas garantias devem ser concebidas pelo engenheiro projetista, empresa construtora e proprietário da obra (CARVALHO, 2011).

O Brasil contém diversas instituições vinculadas ao governo federal e governos estaduais que possuem dentro de suas atribuições aspectos ligados a barragens, como: Agência Nacional de Águas (ANA), vinculada ao Ministério do Meio Ambiente; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vinculada ao Ministério das Minas e Energia; Eletrobrás, uma empresa de capital aberto, controladas pelo governo federal, que possui atuação nas áreas de

geração, transmissão e distribuição de energia elétrica; Secretaria de Infraestrutura Hídrica e Saneamento, vinculada ao Ministério da Integração Nacional (CARVALHO, 2011).

Os taludes de uma barragem precisam estar estabilizados, para assegurar que não haja problemas de segurança da estrutura, com possibilidade de ruptura ou colapso. Segundo a NBR 11.682 (ABNT, 2009), o talude seguro é aquele que não apresenta indícios de instabilidade, como por exemplo, feições erosivas, trincas, sulcos, abatimentos, etc.

Neste presente trabalho, será feita uma abordagem teórica dos conceitos de barragem de terra e suas características. Após esta explicação teórica, será abordada a barragem de estudo neste trabalho, onde será realizado o estudo de caso, por meio das informações disponibilizadas por estudos de campo e estudos realizados em laboratório.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de uma barragem de terra quanto à sua estabilidade, através do estudo de caso que realiza uma combinação de materiais que constituem seu corpo. Assim, estabelecendo fatores de segurança, com base nos dados.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos Específicos deste trabalho são:

- Analisar os fatores de segurança a montante e jusante da barragem em 4 diferentes combinações de materiais;
- Comparar os resultados obtidos para as condições diferentes de materiais, destacando os casos mais críticos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As barragens são obras utilizadas para que haja uma adequada gestão dos recursos hídricos e na contenção de resíduos industriais ou rejeitos oriundos da mineração. Devido a magnitude da implantação e operação de uma barragem, podem ocasionar danos para a população, bens materiais e ao meio ambiente (ANA, 2016).

2.1 DEFINIÇÃO DA BARRAGEM

Segundo a Norma Brasileira ABNT 13028, barragem é considerada como sendo a estrutura principal de contenção que envolve o sistema de disposição de rejeitos, para sedimentos ou reservatório de água. No interior da estrutura, pode haver também estruturas internas de retenção de sólidos e fluidos.

Para a Resolução Normativa ANEEL N° 1064, de maio de 2023, barragem é qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso de água temporário ou permanente, com finalidade de acumulação ou contenção de substâncias líquidas ou mistura de sólidas e líquidas.

A construção de uma barragem pode ter diversos fins, onde se destacam a contenção de cheias, vazão mínima à jusante, garantir a possibilidade de navegação de um rio, contenção de rejeitos e geração de energia (Figura 2). A barragem para finalidade de contenção de cheias transforma a vazão de pico em uma vazão que escoe de maneira controlada, sem provocar inundações em áreas adjacentes. Uma barragem pode ter a função de garantir a vazão mínima à jusante, possibilitando ao longo do ano a vazão mínima no rio. Através do aumento da profundidade do reservatório, é possível que a barragem faça que o rio se torne apto para a navegação. As barragens de contenção de rejeitos são utilizadas para que fique armazenados subprodutos de indústrias (Figura 1).

Figura 1 – Barragem de Rejeito



Fonte: Correio do Pará, 2022

Figura 2 – Barragem de retenção de água



Fonte: Alves, 2019

2.2 TIPOS DE BARRAGEM

Segundo Costa (2012), as barragens, com relação ao seu tipo, são divididas em dois grupos: as barragens convencionais, que são comumente mais usadas e seu mecanismo é de grande conhecimento na literatura especializada; as barragens não convencionais, que incluem

as barragens menos utilizadas, apesar de que algumas podem ter sido desenvolvidas recentemente.

A decisão entre os tipos de barragem para uso dependerá da disponibilidade de materiais no local da obra, que está ligada de forma direta ao custo final de construção do empreendimento (CARVALHO, 2011)

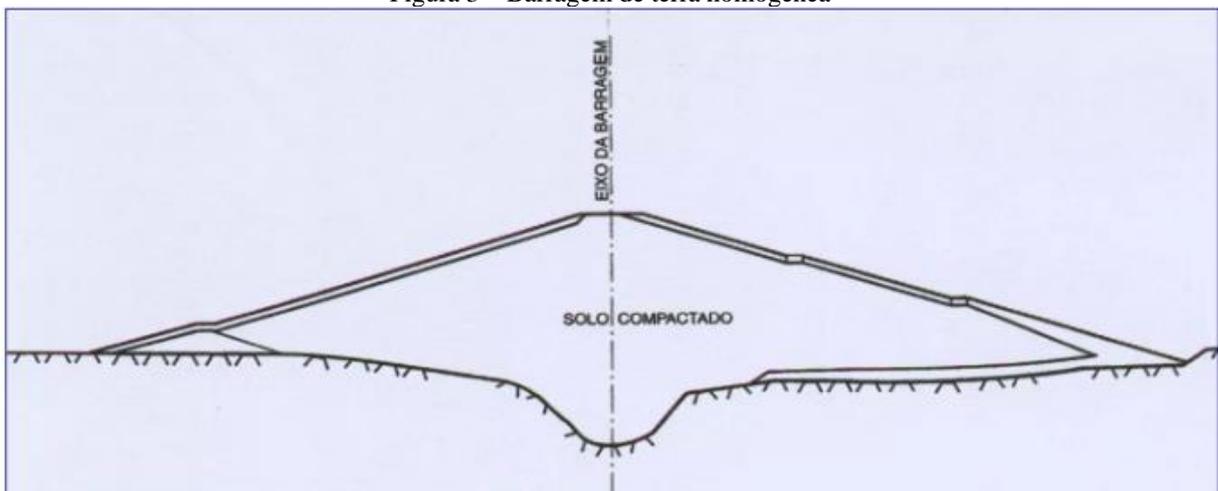
Cada tipo de barragem possui características únicas em sua composição. Conforme Filho (1998), as barragens de terra não podem possuir a esbeltez igual as barragens de concreto, devido ao concreto ser um material de elevada resistência aos fluxos de água, para as barragens formadas de terra há a necessidade de taludes inclinados afim de evitar escorregamentos internos e defender contra a erosão.

2.2.1 Barragem de Terra

As barragens de terra podem ser separadas em dois tipos, homogêneas e zoneadas.

Para ser considerada uma barragem homogênea, tem que haver predominância de um único material, podendo conter também a presença de outros elementos, como rip-rap e filtro, conforme a Figura 3 (COSTA, 2012). Neste caso, o material da área de empréstimo, quando compactado, deve apresentar baixo coeficiente de permeabilidade (CARVALHO, 2011).

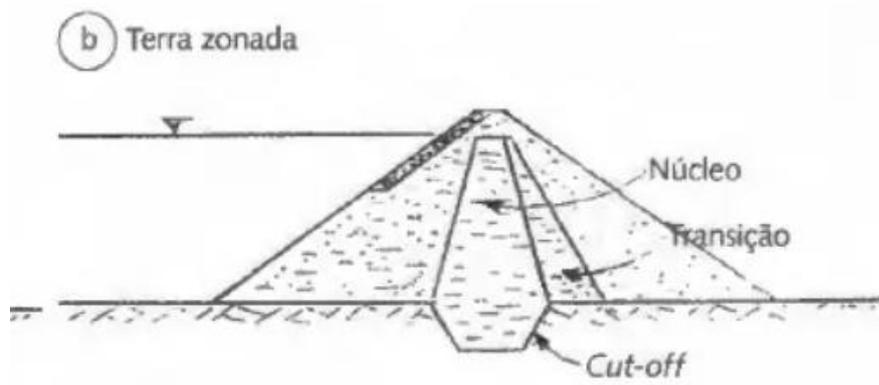
Figura 3 – Barragem de terra homogênea



Fonte: Cruz, 2004

Para as barragens do tipo zoneadas, há a presença de um zoneamento de materiais terrosos em função de suas propriedades e sua permeabilidade, conforme a Figura 4 (COSTA, 2012).

Figura 4 – Barragem de terra zoneada



Fonte: Adaptado de Costa, 2012

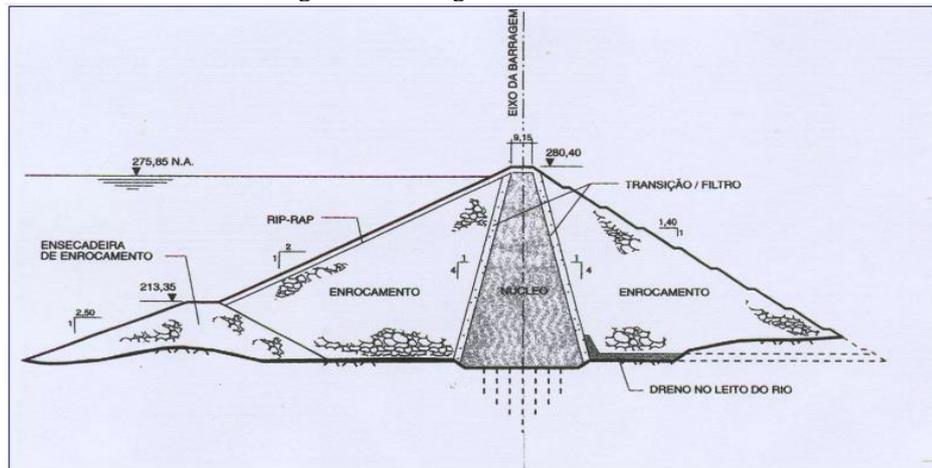
2.2.2 Barragem de Enrocamento

A barragem de enrocamento pode ser constituída de um núcleo impermeável e/ou uma face impermeável.

Na barragem de enrocamento com núcleo impermeável (Figura 5), sendo este centralizado ou inclinado para montante, é predominante a presença de material rochoso. A vedação da água é realizada por meio do núcleo impermeável, sendo divididas por zonas de transição, assim evitando o carregamento de material fino para o interior do enrocamento (COSTA, 2012).

Na barragem de enrocamento com face impermeável, a vedação da água é feita pela impermeabilização da face a montante. Esta proteção pode ser uma camada de asfalto, placa de concreto ou placa de aço (COSTA, 2012).

Figura 5 – Barragem de enrocamento



Fonte: Cruz, 2004

2.2.3 Barragem Mista

A barragem é considerada mista quando em sua constituição, há a presença de materiais distintos ao longo de uma seção transversal. Não é considerada barragem mista aquela em que o seu corpo principal é de enrocamento ou terra, e o vertedouro é de concreto. Os tipos mais comuns são formados de: terra e enrocamento, terra e concreto ou enrocamento e concreto (COSTA, 2012).

2.2.4 Barragem de Concreto

Segundo Gusmão Filho (2006), as barragens de concreto podem ser subdivididas em três grupos, conforme a sua estrutura.

A barragem de gravidade é indicada para vales largos com uma declividade suave, devido à pressão elevada que é exercida em sua fundação, é preciso que a mesma seja ancorada em rocha. O eixo da barragem pode ser uma linha reta ou uma leve curvatura em direção a montante, dependendo da topografia do local (FILHO, 2006).

A barragem em contraforte é um modelo de barragem onde os esforços atuantes no paramento montante são transmitidos para a fundação, por meio de contrafortes. Os contrafortes são estruturas que funcionam como “pilares”, recebendo o esforço do empuxo (POSSAN, 2013).

A barragem de arco são estruturas que recebem os esforços atuantes da água pelo efeito arco por meio da barragem. Elas possuem uma curvatura horizontal e engastamento lateral, onde a espessura da sua parede depende da sua altura. A sua aplicação é indicada para vales

estreitos de grande profundidade, sendo as laterais destes vales, geralmente rochosas (MOLITERNO, 1995).

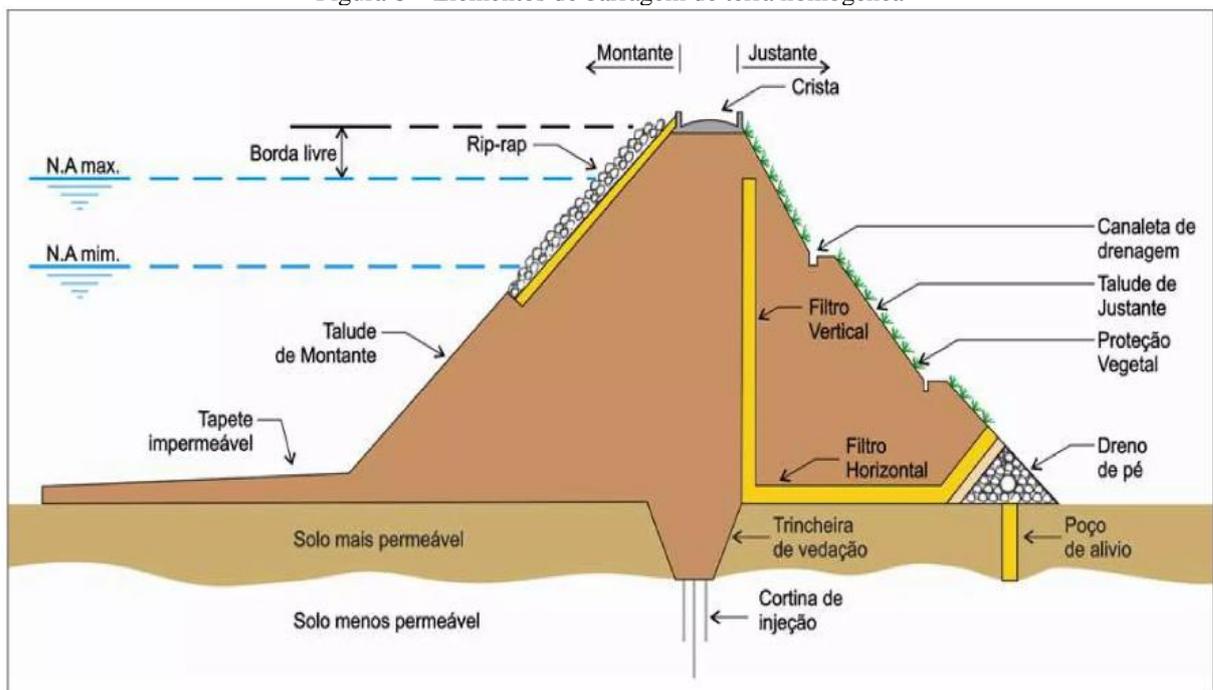
2.3 ELEMENTOS DA BARRAGEM

Os elementos principais elementos das barragens homogêneas são descritos a seguir (CARVALHO, 2011):A Figura 6 apresenta os elementos principais elementos.

- **Crista:** Parte com cota mais elevada do talude;
- **Borda Livre:** É a distância vertical entre o nível de água do reservatório e a crista da barragem;
- **Talude de Montante:** É o talude da barragem que fica diretamente em contato com a água do reservatório;
- **Talude de Jusante:** Talude da barragem que não está em contato com a água do reservatório;
- **Proteção do Talude de Montante (rip-rap):** Devido a ação de água da chuva e ondas do reservatório, é necessária a proteção contra a erosão. O rip-rap é uma camada de blocos de pedra, servindo como obstáculo à fuga dos materiais finos. Quando não tem rocha o suficiente, para o uso de rip-rap, pode ser usado, solo-cimento, revestimento de concreto ou pedras rejuntadas;
- **Proteção do Talude de Jusante:** Devido às águas da chuva, que podem adquirir grandes velocidades, é preciso proteger contra a erosão. Para esta proteção, utiliza-se grama ou até enrocamento. Além disso, devem ser construídas canaletas para que haja controle na coleta desta água.
- **Cortina de vedação:** Construída sob o corpo da barragem, tem como função interromper o fluxo sobre a mesma, através de uma barreira impermeável. Pode ser construída de cortina preenchida com material argiloso (cut-off), diafragma plástico, cortina de concreto e cortina de injeção.
- **Filtro Vertical:** Possui a função de drenar a água que percola por dentro do talude, conduzindo esta água para o filtro horizontal
- **Filtro Horizontal:** É responsável pela condução da água, oriunda do filtro vertical e da água filtrada pela fundação da barragem, pra o dreno de pé;
- **Dreno de Pé:** Conduz a água coletada pelos filtros para um deságue seguro;

- Poços de Alívio: São furos no solo, que reduzem a subpressão gerada pela percolação da água na fundação da barragem;
- Trincheira de Vedação: É uma escavação na base da barragem, criando uma zona impermeável, assim evitando fluxo de água para regiões mais permeáveis;
- Nível de água mínimo: É o nível mínimo de água para que a barragem garanta a sua funcionalidade;
- Nível de água máximo: É o nível máximo de água para qual a barragem foi projetada.
- Tapete impermeável à montante: Ele tem como objetivo de reduzir o gradiente hidráulico por meio da fundação, diminuindo assim a vazão, devido ao aumento do caminho percorrido pela água sob a barragem. De forma geral, o tapete é constituído do mesmo material e mesmas condições de compactação da barragem para barragens homogêneas, para barragens de enrocamento o material é o mesmo do núcleo impermeável.

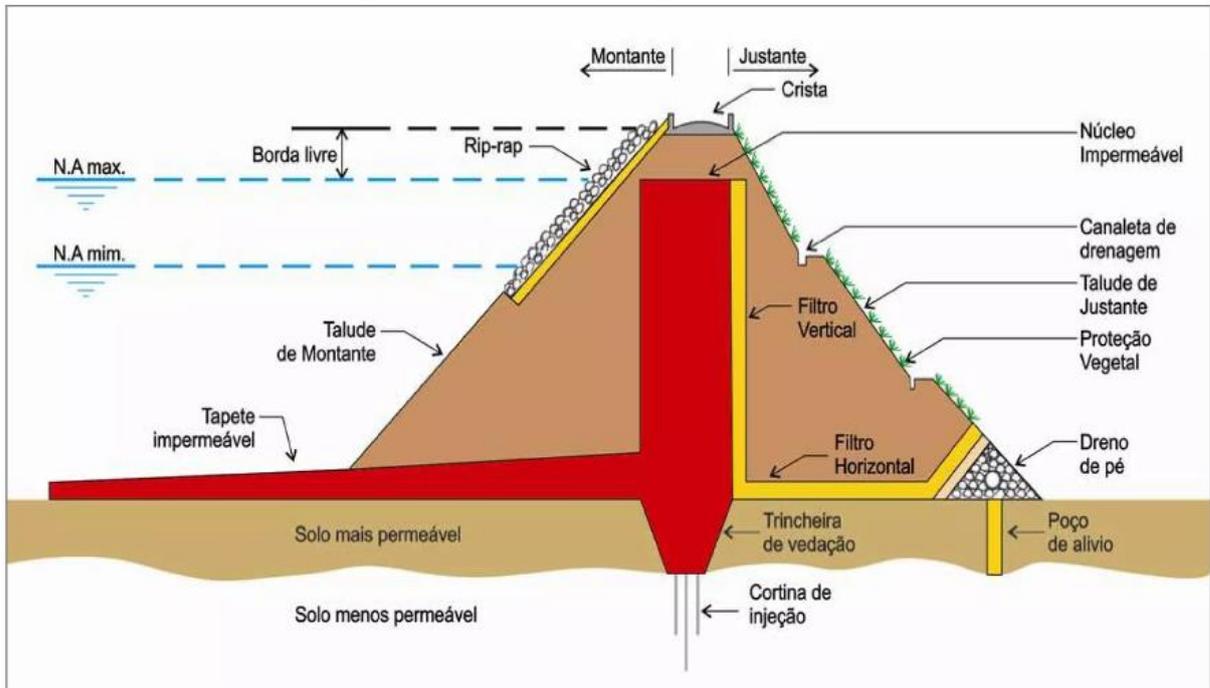
Figura 6 – Elementos de barragem de terra homogênea



Fonte: CARVALHO, 2011

Para as barragens de zoneadas, há o acréscimo de um núcleo impermeável, podendo ser este núcleo de argila, ou outro material. Nas barragens de enrocamento, há a presença de um núcleo impermeável ou face impermeável na face à montante (Figura 7).

Figura 7 – Elementos de barragem de enrocamento



Fonte: CARVALHO, 2011

2.4 PERMEABILIDADE E CONDUTIVIDADE

Conforme Gerschovich (2009), a água no solo tem origem de diversas fontes e é um dos fatores que mais interferem na estabilidade de taludes. No talude a pressão na água pode ser positiva ou negativa e variar devido a existência ou não de movimentação.

A permeabilidade de um meio poroso pode ser compreendida como a facilidade, ou dificuldade, que o meio oferece para a passagem de um fluido por meio de poros ou vazios. A condutividade descreve a “facilidade” que um meio confinado oferece ao fluido, como fissuras e fraturas nas rochas (CRUZ, 2004).

A condutividade e permeabilidade de solos e rochas são influenciadas por meio da sua dimensão e forma dos vazios. Assim, pode-se assumir que os solos porosos sejam mais permeáveis do que solos mais densos. Porém, a porosidade, quando considerada isoladamente, não pode ser relacionada a uma permeabilidade, pois são as dimensões e formas dos vazios que determinam a permeabilidade (CRUZ, 2004). A água contida no solo intervém em uma elevada quantidade de problemas, como no cálculo de vazões, na análise de recalques e nos estudos de estabilidade (PINTO, 2006).

Segundo Pinto (2006), o transporte da água no interior do solo e as tensões geradas, por meio deste transporte, são importantes para que possa ser feita a análise de situações práticas, como:

- Análises de estabilidade, devido a tensão efetiva depender da pressão neutra, este parâmetro está diretamente relacionado com as tensões causadas pela percolação da água;
- Cálculo de vazões;
- Estudo de recalques, pois os deslocamentos em uma estrutura, com frequência, estão ligados à redução do índice de vazios devido à saída de água destes vazios.

Os coeficientes de permeabilidade são tão menores quanto menores são os vazios nos solos e quanto menores são as partículas. Para pedregulhos, e mesmo para algumas areias grossas, a velocidade do fluxo de água no solo é muito elevada, e o fluxo torna-se turbulento. Solos residuais e solos evoluídos pedologicamente apresentam estrutura com macroporos, nos quais a água percola com maior facilidade, mesmo as partículas destes solos sejam pequenas, os vários entre as aglomerações das partículas são grandes (PINTO, 2006).

2.5 SEGURANÇA DE BARRAGENS

A segurança deve ser objetivo essencial no projeto, construção e operação. Uma vez que a ruptura de uma barragem pode acarretar em grandes impactos negativos na economia e meio-ambiente (FUSARO, 2007).

Devido ao aumento no número de barragens e um envelhecimento das existentes, a tendência é que ocorra um aumento na quantidade de barragens que apresentem um comportamento deficiente (SMIDERLE, 2014).

De acordo com o Boletim 99 (ICOLD, 1995), a porcentagem de ruptura, para grandes barragens construídas antes de 1950, é de 2,2% e cerca de 0,5% para barragens construídas após este período. A maior parte destas rupturas, cerca de 70%, ocorreu nos primeiros 10 anos de operação.

Com a probabilidade, mesmo que baixa, de ruptura de uma barragem e do alto risco do impacto na região a jusante, fica a questão de como isso pode ser resolvido. A segurança da

barragem pode-se apoiar em 3 pilares centrais: manutenção (preventiva e emergenciais), monitoramento e segurança estrutural (SMIDERLE, 2014).

2.6 SEGURANÇA DE BARRAGENS NO BRASIL

As primeiras demandas por programas de segurança de barragens, no Brasil, ocorreram principalmente após acidentes. O CBDB, na época CBDG (Comitê Brasileiro de Grandes Barragens), seguindo a tendência mundial da década de 70, elaborou alguns documentos importantes para conduzir os procedimentos de segurança adotados no Brasil (CBDB, 2011).

O CBDB, nos anos de 1979 e 1983, editou as “Diretrizes para a Inspeção e Avaliação de Segurança de Barragens em Operação”. No ano de 1986, publicou as “Recomendações para a Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos de Segurança”. Posteriormente, nos anos de 1995 e 1996, emitiu o “Cadastro Brasileiro de Deterioração de Barragens e Reservatórios” e “Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil”, respectivamente (CBDB, 2011).

Após o acidente ocorrido na barragem de Euclides da Cunha e o rompimento da barragem Armando de Salles Oliveira em 1977, o estado de São Paulo foi o primeiro na criação do decreto-lei, dispondo sobre segurança de barragens e auditorias técnicas nas barragens no estado. Mesmo não sendo implementado este decreto-lei, o documento foi utilizado como base para a criação da Lei Federal 9.433 de 1997, que definiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (SMIDERLE, 2014).

No ano de 2003, houve novamente a necessidade de programas de segurança de barragens, devido a ruptura de uma barragem de rejeitos situada no rio Pombas, em Minas Gerais. Depois deste acidente o Deputado Leonardo Monteiro propôs o projeto de lei (PLC-168), com foco na segurança de barragens (CBDB, 2011). A segurança de barragens voltou a ser um assunto prioritário no ano de 2009, quando a barragem de Algodões, no Piauí, rompeu e resultou em 7 mortes. Assim, no ano de 2010, a Lei Federal 12.334 visou aprimorar a gestão das barragens brasileiras, onde estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (SMIDERLE, 2014).

2.6.1 Lei Nº 12.334, de 20 de Setembro de 2010

A Lei Nº 12.334 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), sendo elas destinadas a acumulação de água, a disposição final ou temporária de rejeitos e a acumulação de resíduos industriais (BRASIL, 2010). A PNSB tem o objetivo de garantir o cumprimento de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências (ANA, 2021).

A PNSB não se aplica a todas as barragens, elas precisam uma destas propriedades (ANA, 2021):

- Altura do maciço maior ou igual a 15 metros;
- Capacidade do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m³;
- Reservatório que contém resíduos perigosos, conforme normas técnicas;
- Categoria de dano potencial associado médio ou alto, com relação a termos ambientais, econômicas, sociais ou risco de perda de vidas humanas.

O Art. 6º, da Lei Nº 12.334, estabelece os instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens:

- I - O sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- II - O Plano de Segurança da Barragem;
- III - O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
- IV - O Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA)
- V - O Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- VI - O Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
- VII - O Relatório de Segurança de Barragens (Brasil, 2010).

As barragens serão identificadas com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), devido a sua categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume. A classificação por categoria de dano potencial será feita em função do potencial de perda de vidas humanas e dos impactos econômicos e ambientais gerados pela ruptura da barragem, podendo ser essa classificação alta, média ou baixa (BRASIL, 2010).

A fiscalização da segurança de barragens deve ser realizada por algum órgão fiscalizador, sendo uma autoridade do poder público. A PNSB define uma gestão com diversos órgãos fiscalizadores, conforme os parâmetros (ANA, 2021):

- Quando o uso predominante da barragem é a geração de energia elétrica, o órgão fiscalizador é a entidade que concedeu o uso do potencial hídrico;
- Quando a barragem tem como uso a disposição final ou temporária de rejeitos de mineração, quem fiscaliza é a entidade que fiscaliza as atividades de mineração;
- Para barragens de disposição de rejeitos de minérios nucleares, o responsável é a entidade que regula a produção e uso da energia nuclear;
- Para barragens de disposição de resíduos industriais, o fiscalizador é entidade que concedeu a licença ambiental;
- Para barragem que tem como uso predominante a acumulação de água, fora para fins hidrelétricos, o órgão fiscalizador é a entidade que autoriza o uso dos recursos hídricos.

A elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) é obrigatório para barragens classificadas como médio e alto dano potencial associado. O PAE estabelecerá as ações em caso de emergência que o empreendedor precisará executar, como também identificar os agentes a serem notificados do ocorrido.

2.6.2 Lei Nº 14.006, de 30 de Setembro de 2020

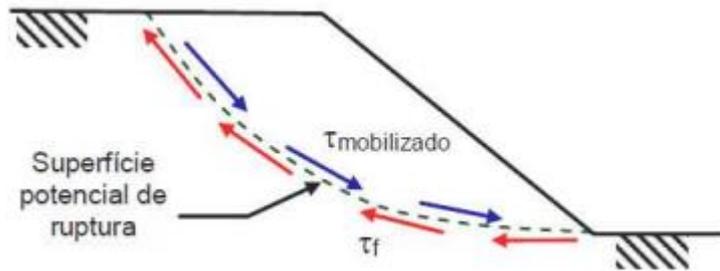
A Lei nº 14.006, de 30 de setembro de 2020, altera a Lei nº 12.334, de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) (BRASIL, 2020). Esta nova lei, que atualiza a Lei nº 12.334, teve sua origem no PL 550/2019, após o incidente da barragem da Vale em Brumadinho (MG), no ano de 2019 (SENADO NOTÍCIAS, 2020).

Com a nova lei, fica proibida a construção de barragens do tipo “a montante”, usadas em Brumadinho, todas as barragens construídas destas formas tiveram que ser desativadas até 25 de fevereiro de 2022, com possibilidade de o prazo ser prorrogado devido a inviabilidade técnica (SENADO NOTÍCIAS, 2020).

2.7 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE

A análise de estabilidade de talude tem como objetivo analisar um possível escorregamento de massa de solo presente no talude. Via de regra, as análises são feitas comparando as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. Assim, o fator de segurança é definido por (GERSCHOVICH, 2009):

Figura 8 – Superfície potencial de ruptura



Fonte: GERSCHOVICH, 2009

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = 1 \quad (\text{Equação 1})$$

FS > 1,0: Obra estável;

FS = 1,0: Ocorre a ruptura por escorregamento;

FS < 1,0: Não possui significado físico.

O FS, por definição, é o fator que relaciona a resultante das forças solicitantes e resistentes ao escorregamento do corpo do talude. O valor mínimo de fator de segurança a ser atingido é denominado FS_{adm} . A determinação do valor admissível para o fator de segurança (FS_{adm}) depende das consequências de uma eventual ruptura, em termos de perdas econômicas e/ou humanas, deve-se levar em consideração não só as condições atuais, mas também o uso futuro da área (GERSCHOVICH, 2009). Estes valores de FS_{adm} são apresentados na Tabela 1, conforme Eletrobrás (2003).

Tabela 1 – Fatores de segurança dos critérios de projeto, segundo Eletrobras

Condição	Fator de Segurança (FS)	Observação
Final de Construção	1,3 (a)	Taludes de Montante e de Jusante
Rebaixamento Rápido	1,1 a 1,3 (b)	Valor mínimo para solos dilatantes. Valor máximo para solos que contraem no cisalhamento
Percolação (estável)	1,5	Talude Jusante
Análise Sísmica	1	Taludes de Montante e de Jusante

Fonte: Adaptado Eletrobras, 2003

(a) Para barragens acima de 15 metros de altura sobre fundações relativamente fracas, usar fator de segurança mínimo de 1,4;

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

A Tabela 2 apresenta a recomendação para valores de FS_{adm} segundo a NBR 11682. Estes valores referem-se às análises de estabilidade interna e externa do maciço.

Tabela 2 – FS_{adm} para níveis de segurança, segundo NBR 11682

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais \ Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
	Alto	1,5	1,4
Médio	1,4	1,3	1,2(*)
Baixo	1,4	1,3	1,1(*)

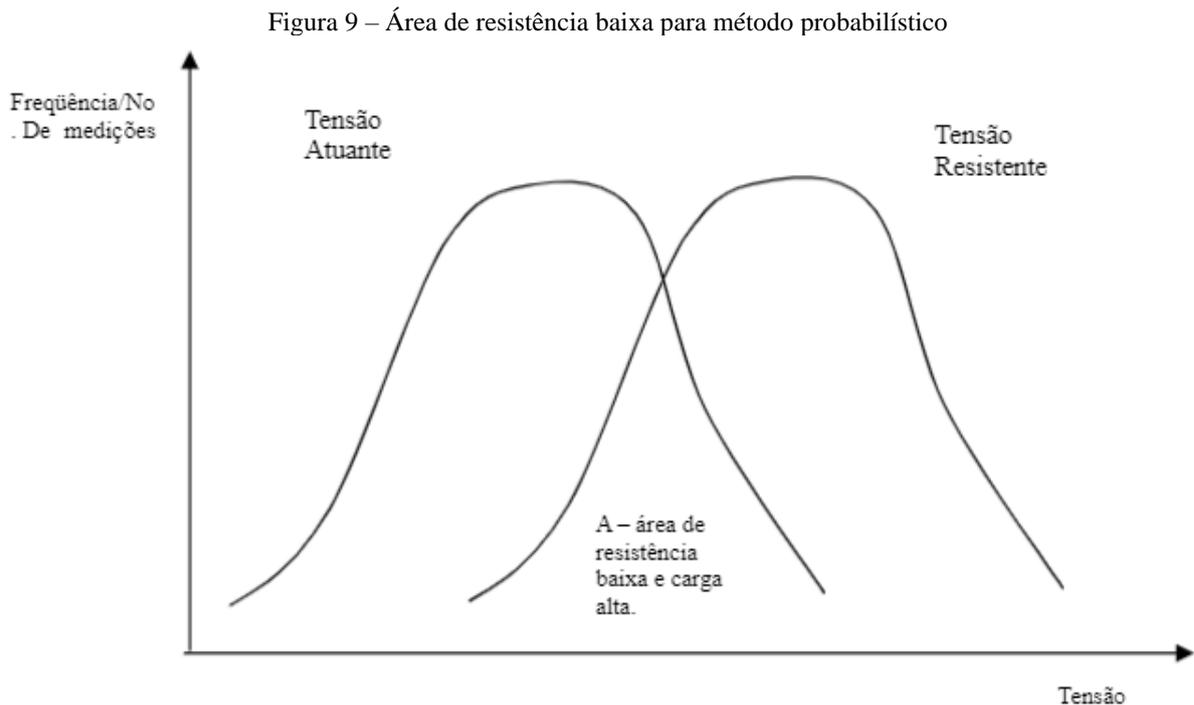
Fonte: ABNT NBR 11682

As formas de análise de estabilidade podem ser separadas por dois grupos: Análise probabilística e Análises determinísticas.

2.8 ANÁLISE PROBABILÍSTICA

Os métodos probabilísticos permitem quantificar algumas incertezas referentes ao fator de segurança para o talude, obtido por meio de métodos determinísticos (GERSCHOVICH, 2009).

Para o uso da análise probabilística é necessário o conhecimento das distribuições de probabilidade ou das funções de densidade de probabilidade das variáveis aleatórias associadas ao objeto de análise. A quantidade de dados disponíveis e o grau de dispersão dos mesmos em relação a uma média afetam a probabilidade calculada (DYMINSKI, 2008). Na Figura 9 é apresentada a definição da área de resistência baixa e carga alta.



A → Define a probabilidade de ruptura

Fonte: GERSCHOVISH, 2009

O uso de análise probabilística está avançando nos últimos anos. Estas análises são essenciais para a confecção de Mapas de Potencial de Ruptura, Mapas de Risco de Ruptura e outros (DYMINSKI, 2008).

2.9 ANÁLISE DETERMINÍSTICA

O método determinístico considera que as variáveis que englobam as análises de estabilidade de talude são variáveis determinísticas, ou seja, possuem um valor único, não levando em consideração as incertezas associadas na sua aplicação (FERNANDES, 2011).

Estas análises são realizadas em função de um fator de segurança, que pode ter algumas definições (DYMINSKI, 2008):

- a) Fator que minora os parâmetros de resistência ao cisalhamento (em termos de tensões efetivas):

$$\tau = \frac{c'}{FS1} + \sigma_N \times \frac{tg\phi}{FS2} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: FS1=FS2

- b) Fator que minora a resistência ao cisalhamento (em termos de tensões totais):

$$\tau = \frac{c}{FS3} + \sigma_N \times \frac{tg\phi}{FS4} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: FS3=FS4

- c) Relação entre momentos resistentes (M_R) e a atuante (M_A), para superfície de ruptura circular:

$$FS = \frac{M_R}{M_A} \quad (\text{Equação 4})$$

- d) Relação entre forças resistentes (F_R) e atuantes (F_A), utilizada em fundações:

$$FS = \frac{F_R}{F_A} \quad (\text{Equação 5})$$

- e) Relação entre resistência ao cisalhamento do solo e tensões cisalhantes atuantes no maciço:

$$FS = \left(\frac{\text{Resistência ao cisalhamento}}{\text{Tensões atuantes}} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

As definições citadas acima implicam em valores distintos para o fator de segurança (DYMINSKI, 2008). Para as análises de taludes, é adotada as definições a) e b), considerando um valor único de fator de segurança de todos os parâmetros.

Segundo GERSCHOVICH (2009), existem dois tipos de abordagem para a determinação do FS pelo método determinístico:

- Teoria de equilíbrio limite;
- Análise de tensões e deformações.

2.9.1 Equilíbrio Limite

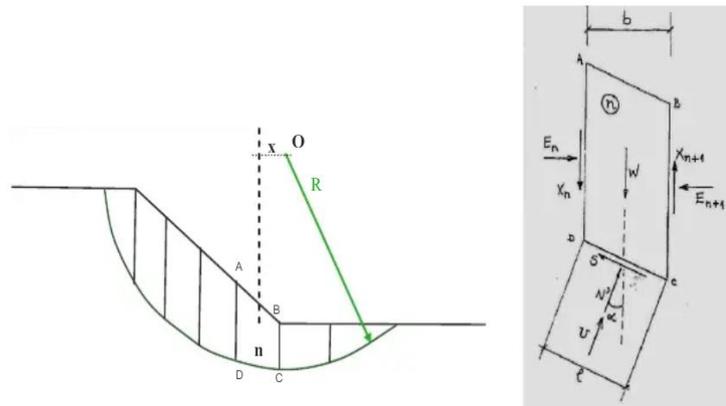
A teoria mais utilizada para a análise de estabilidade de taludes é o método de equilíbrio limite, por causa de sua abordagem simplificada e com modelagem computacional facilitada.

Os métodos de análise por equilíbrio limite consistem na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, que pode ser determinada por meio de uma superfície de ruptura, circular, poligonal ou outra geometria. O método assume que a ruptura ocorre ao longo de uma superfície e que, simultaneamente, todos os elementos ao longo desta superfície atingem a condição de FS (GERSCOVICH, 2008).

Segundo Moraes (1975), estes métodos podem ser divididos em dois grupos:

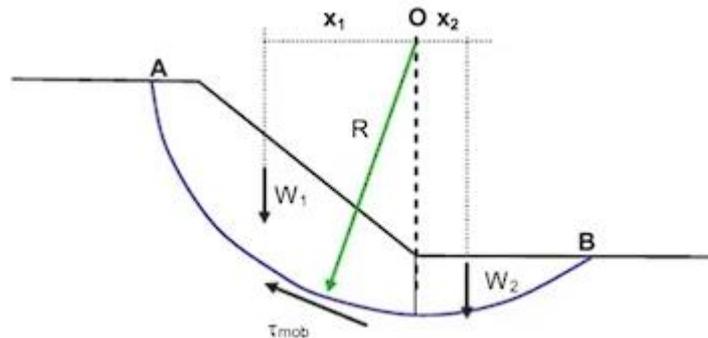
- a) Métodos onde é considerado o trecho rompido como uma massa única, fazendo hipóteses sobre a distribuição das tensões normais ao longo da superfície de ruptura. Estes métodos são aplicados apenas para taludes homogêneos;
- b) Métodos onde é considerado o trecho rompido como dividido em diversas fatias verticais, são aplicadas as equações de equilíbrio ($\Sigma F_v = 0$, $\Sigma F_h = 0$, $\Sigma F = 0$) para cada fatia.

Figura 10 – Equilíbrio de forças



Fonte: GERSCOVICH, 2009

Figura 11 – Equilíbrio de forças



Fonte: Adaptado de GERSCOVICH, 2009

Examinando as incógnitas e equações disponíveis na Figura 10 e na Figura 11, é possível determinar que o problema é estaticamente indeterminado, devido ao número de incógnitas ($6n-2$) ser maior que o número de equações ($4n$). Devido a essa indeterminação, diversos métodos aplicam hipóteses simplificadoras para que se reduza o número de equações. Uma hipótese comum a todos os métodos é assumir que o esforço normal na base da fatia atua no ponto central, assim reduzindo para $(5n-2)$ as incógnitas, com isso, os métodos apontam $(n-2)$ hipóteses para que o problema torna-se estaticamente determinado (GERSCOVICH, 2008).

As equações são $(3n)$:

- $2n$: Equilíbrio de forças horizontais, em cada direção, para cada fatia;
- n : Equilíbrio de momento para cada fatia;
- n : Mohr–Coulomb entre a relação de força de cisalhamento e força normal.

As incógnitas $(6n-2)$:

1: Fator de segurança

n : Força normal variável na base de cada fatia, N' ;

n : Localização da força normal, N' ;

n : Força de cisalhamento na base de cada fatia, S_m ;

- n-1: Força entre fatias, Z ;
- n-1: Inclinação da força entre fatias, θ ;
- n-1: Localização da força entre fatias.

A análise por equilíbrio limite engloba os chamados métodos tradicionais, para perfis homogêneos e perfis quaisquer.

Nos perfis homogêneos são métodos de superfície de ruptura circulares, respeitando a condição de ser constituído por um único material, normalmente utilizados para análises em termos de tensões totais.

Os perfis quaisquer englobam os chamados métodos de fatias, sendo estes métodos simplificados ou métodos rigorosos.

- a) Métodos Simplificados:
 - Fellenius;
 - Bishop;

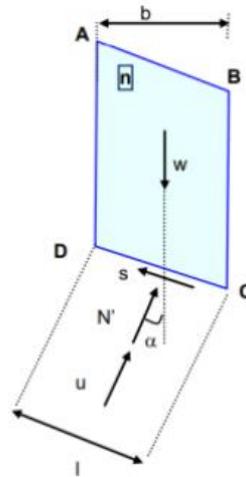
- b) Métodos Rigorosos:
 - Spencer;
 - Morgenstern-Price.

2.10 MÉTODO DE FELLENIUS

Segundo Telles (2015), o método de Fellenius é atribuído como um método de análise simplificado, devido ao método não atender às três equações do equilíbrio estático, o seu cálculo é possível sem o uso de recursos computacionais.

O método de Fellenius considera, como premissa básica, que os esforços atuantes entre as fatias são nulos. Para o cálculo do fator de segurança, considera-se apenas o equilíbrio de forças na direção normal à superfície de deslizamento e o equilíbrio de momentos.

Figura 12 – Forças atuantes nas fatias, método de Fellenius



Fonte: Adaptado de GERSCOVICH, 2009

Assim, o fator de segurança (FS) é determinado por meio da Equação 7, tendo em vista a ausência de poropressão.

$$FS = \frac{\sum (cl + N \operatorname{tg} \varphi)}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

FS: fator de segurança admissível;

c: coesão do solo [kPa];

l: comprimento da base da fatia [m];

N: força normal da base;

W: peso da fatia;

α : inclinação da base da fatia;

φ : ângulo de atrito.

Para o cálculo do fator de segurança considerando a poropressão, é utilizada a Equação 8.

$$FS = \frac{\sum (c' l + (W \cos \alpha - ul) \operatorname{tg} \varphi')}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

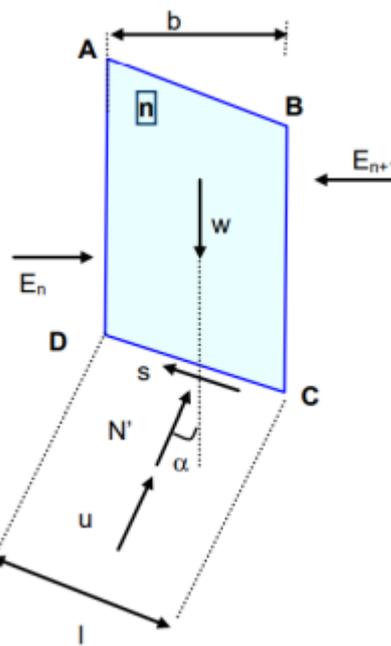
- c' : coesão efetiva do solo [kPa];
- u : força de percolação [kN];
- φ' : ângulo de atrito efetivo do solo;

Nas superfícies com grande profundidade e valores altos de poropressão, este método tende a fornecer valores menos confiáveis (GERSCOVICH, 2016).

2.11 MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

Segundo Silva (2019) tem uma simplificação proposta pelo próprio Bishop, denominada de método Bishop Simplificado, que consiste em não considerar a componente tangencial das forças entre as fatias de solo. Assim, a resultante entre as fatias é horizontal.

Figura 13 - Forças atuantes nas fatias, método de Bishop Simplificado



Fonte: Adaptado de GERSCOVICH, 2009

Para o cálculo do fator de segurança (FS), é utilizada a Equação 9.

$$FS = \frac{\sum (c'b + (W - ub)tg\varphi') \frac{1}{m_\alpha}}{\sum Wsena} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde m_α é determinado por meio da Equação 10.

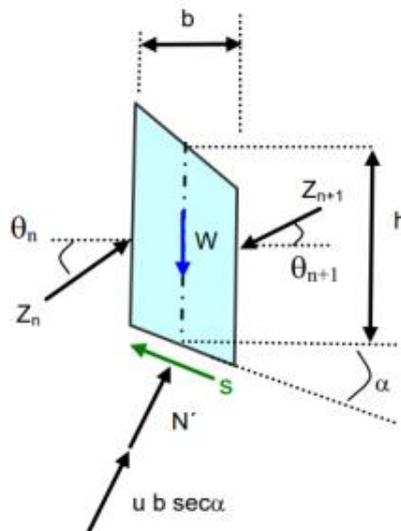
$$m_\alpha = \cos\alpha \frac{\text{sen}\varphi' \text{tg}\alpha}{FS} \quad (\text{Equação 10})$$

Para o cálculo do fator de segurança (FS), devido ao método não ser linear, é preciso realizar um processo iterativo de cálculo, onde se faz necessário um palpite para o valor de FS no cálculo do m_α . O processo de cálculo é realizado tantas vezes até que seja encontrado um valor de FS que satisfaça a tolerância determinada (DIAS, 2021).

2.12 MÉTODO DE SPENCER

Conforme Telles (2015), o método de Spencer é tido como um método de análise de estabilidade rigoroso, devido a ele satisfazer as condições de equilíbrio de forças e momentos.

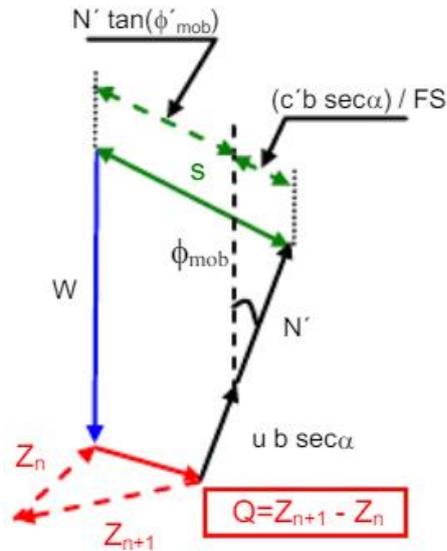
Figura 14 - Forças atuantes nas fatias, método de Spencer



Fonte: GERSCOVICH, 2009

Segundo Gerscovich (2016), as forças atuantes entre as fatias podem ser representadas por meio das resultantes Z_n e Z_{n+1} , onde a soma é dada pela resultante Q de inclinação θ .

Figura 15 - Forças atuantes nas fatias por meio das resultantes, método de Spencer



Fonte: GERSCOVICH, 2009

Por meio do equilíbrio de forças nas direções paralela e normal na base da fatia, pode-se determinar a equação Q . Os valores de Q e a inclinação θ diversificam para cada fatia (GERSCOVICH, 2009).

$$Q = \frac{\frac{c'b}{FS} \sec \alpha + \frac{tg \phi'}{FS} (W \cos \alpha - u b \sec \alpha) - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[1 + \frac{tg \phi'}{FS} tg(\alpha - \theta) \right]} \quad (\text{Equação 11})$$

Assume-se um valor para a inclinação θ , constante em todas as fatias, é definido o valor de Q , com este valor determinado, é possível o cálculo do FS. O fator de segurança (FS) em termos do equilíbrio de forças é calculado substituindo a expressão de Q na equação que assegura o equilíbrio global de forças (SILVA, 2019).

$$\sum Q \sin \theta = 0 \quad (\text{Equação 12})$$

$$\sum Q \cos \theta = 0 \quad (\text{Equação 13})$$

$$\sum Q = 0 \quad (\text{Equação 14})$$

Para a equação de equilíbrio de momentos, que é definida por meio do somatório de momentos das forças internas, sendo calculada pela seguinte equação:

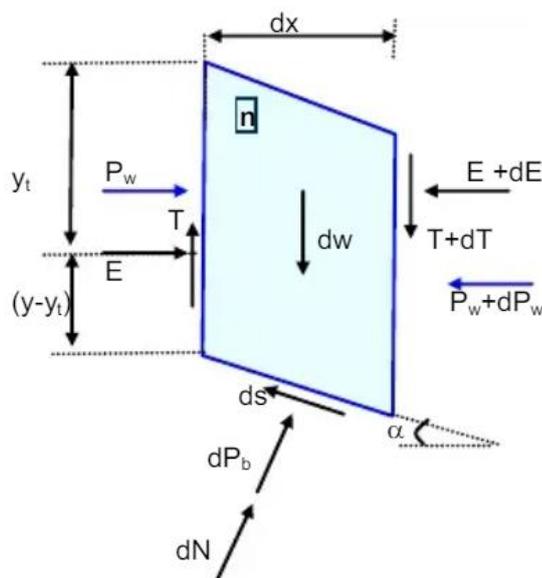
$$\sum [Q \cos(\alpha - \theta)] = 0 \quad (\text{Equação 15})$$

O valor de fator de segurança final é determinado por meio de um valor de θ , por qual, é obtido o mesmo fator de segurança, tanto para o equilíbrio de forças, quanto para o equilíbrio de momentos (SILVA, 2019).

2.13 MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

Segundo Gerscovich (2016), o método de Morgenstern-Price é tido como o mais abrangente de equilíbrio limite para uma superfície qualquer. Os esforços que atuam na fatia do solo são infinitesimais, conforme Figura 16.

Figura 16 - Forças atuantes nas fatias, método de Morgenstern-Price



Fonte: Adaptado de GERSCOVICH, 2009

Onde:

dW : peso da fatia;

P_w : poropressão no contorno da fatia;

dP_b : resultante poropressão na base da fatia;

E e T: esforços entre fatias;
Ds: resistência na base.

Para fazer com que o problema seja estaticamente determinado, assume-se que a inclinação da resultante θ pode mudar ao longo da superfície, por meio das equações (SILVA,2019):

$$\frac{T}{E} = \lambda f(x) \quad (\text{Equação 16})$$

Ou,

$$\text{tg}\theta = \frac{T}{E} = \lambda f(x) \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

T : componente tangencial resultante das forças entre as fatias;

E : componente normal da resultante das forças entre fatias;

λ : parâmetro escalar;

$f(x)$: função de forma arbitrária.

Conforme Gerscovich (2016), λ é um parâmetro escalar determinado por meio da solução do cálculo do fator de segurança (FS). O parâmetro $f(x)$ é uma função arbitrária, que para a sua determinação precisa de um julgamento prévio de como a inclinação das forças entre as fatias do talude.

2.14 SOFTWARES DE ANÁLISE

Os softwares são ferramentas de grande importância na análise de estabilidade de taludes, eles facilitam o processo de cálculos de métodos mais complexos e também permitem trazer os resultados em um menor tempo, assim obtendo resultados mais rigorosos (RODRIGUES, 2014).

Para a análise baseada na teoria do Equilíbrio Limite, existem alguns softwares que possibilitam este estudo. A escolha do programa de análise pode variar dependendo do que o

pesquisador queira obter. Alguns destes softwares são: MacStars 2000, utilizado nos trabalhos Souza Neto e Carneiro (2014) e Jaber (2011); Slide2, utilizado nos trabalhos Freitas (2021) e Oliveira (2023); Seep/W e Slope, utilizados nos trabalhos Santos (2021) e Gomes (2019).

2.14.1 MacStars 2000

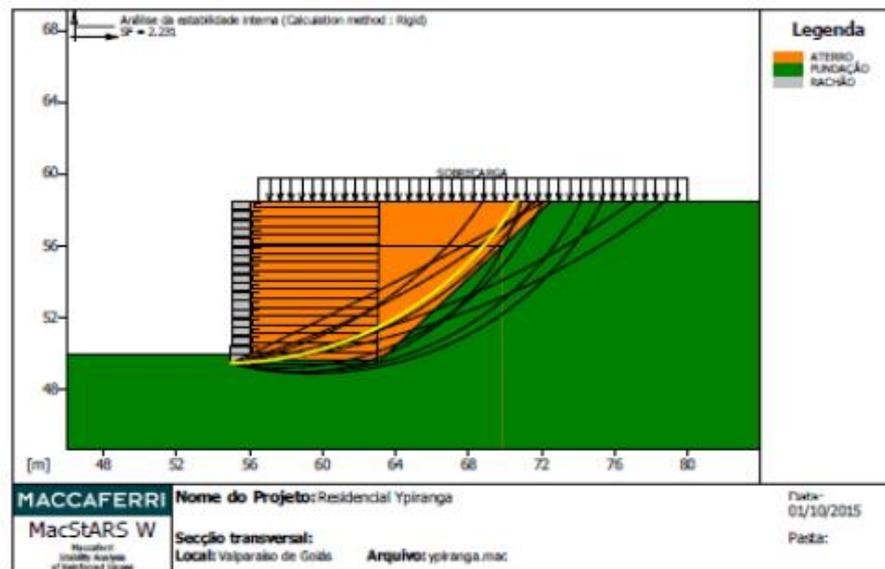
O software MacStars 2000 (MACCAFERRI Stability Analysis of Reinforced Slopes) foi criado pela empresa MACCAFERRI. O programa foi desenvolvido para a verificação de estabilidade de solos reforçados, ou seja, estruturas que analisam a estabilidade de taludes utilizando unidades de reforço capazes de absorver as tensões de tração. O software também permite a análise de estruturas de contenção à gravidade utilizando o mesmo princípio. (MACCAFERRI, 2024).

O programa permite conduzir as análises de estabilidade usando o método de Equilíbrio Limite considerando também taludes não reforçados. O ambiente utilizado pelo MacStars 2000 é um ambiente Windows, amigável e de fácil manuseio, o menu principal similar aos programas do Office, como o Word e o Excel (MACCAFERRI, 2024).

No trabalho Souza Neto e Carneiro (2014), o programa Macstars 2000 foi utilizado para a verificação da estabilidade do talude de topo após o reforço dos grampos. O software permite a análise pelos métodos de Janbu e Bishop, mas foi considerado como método de cálculo apenas o Bishop, devido ao mesmo possuir resultados semelhantes ao método de Morgenstern-Price utilizado na análise pelo Slop/W

No trabalho Jaber (2011), o programa foi utilizado para a análise de estabilidade de um talude com muros de gravidade constituídos por contenções em gabiões. O método determinístico utilizado para a determinação do fator de segurança foi o método de Bishop.

Figura 17 – Interface MacStars



Estabilidade Interna:
Força actuante nos Reforços de acordo com o Método Rígido
Análise de estabilidade com superfícies circulares de acordo com o Método de Bishop
Factor de Segurança Calculado: 2.231

Bloco	Limites de busca para as superfícies de ruptura	
	Primeiro ponto	Segundo ponto
01	56.00	100.00
Número de pontos de início no primeiro segmento: 1		
Número total de superfícies verificadas: 100		
Comprimento mínimo da base das lamelas [m]: 1.00		
Ângulo limite superior para a busca [°]: 0.00		
Ângulo limite inferior para a busca [°]: 0.00		

Fonte: Diniz, 2015

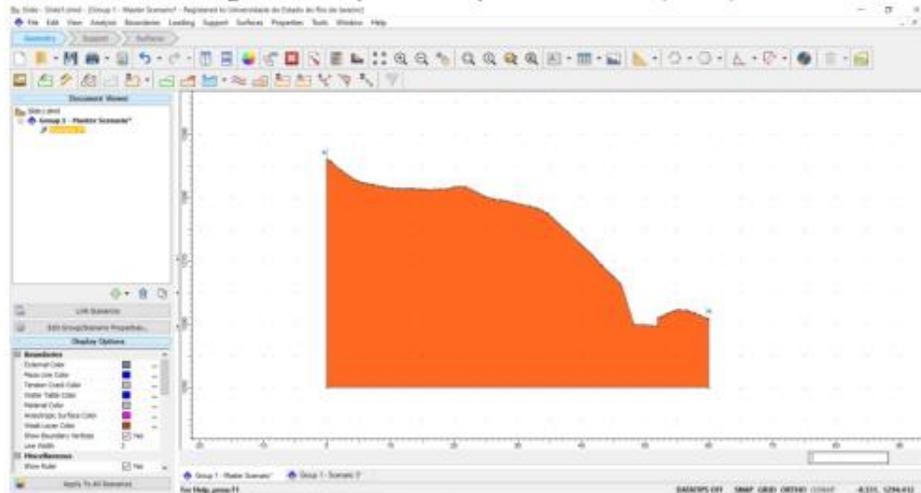
2.14.2 Slide2

O Slide2, desenvolvido pela Rocscience, é um programa análise de estabilidade de taludes por meio do método de Equilíbrio Limite em 2D, para avaliar o fator de segurança ou a probabilidade de falha de superfícies circulares ou não circulares, em encostas de solo ou rocha. O programa inclui uma ferramenta de análise de infiltração de águas subterrâneas por elementos finitos, onde é possível calcular o estado estacionário ou análise transitória sem a necessidade de uso de programas auxiliares (ROCSCIENCE, 2024).

No trabalho Freitas (2021), o programa Slide2 foi utilizado, junto com o Slope/W, para a modelagem de estrutura de contenção do tipo solo grampeado. Foram determinados os fatores de segurança para o talude com e sem o solo grampeado, ambos para o método de Spencer.

No trabalho Oliveira (2023), foi realizada a comparação entre os resultados de estabilidade por meio de método de equilíbrio limite e método de elementos finitos. O programa Slide2 foi utilizado para análise de estabilidade do talude pelo método de equilíbrio limite, obtendo resultados semelhantes com o método de elementos finitos

Figura 18 – Interface Slide2



Fonte: Freitas, 2021

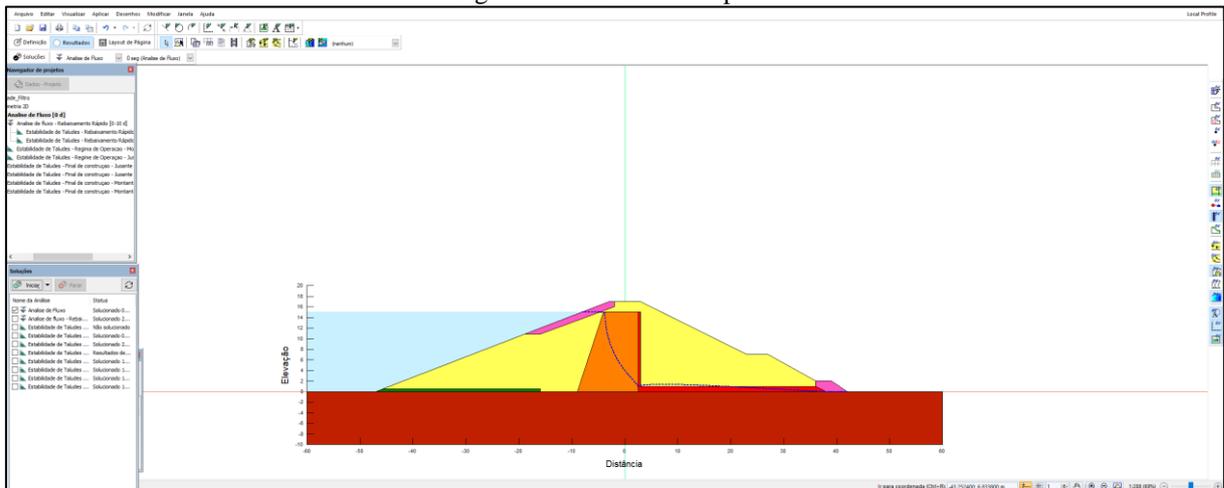
2.14.3 Seep/W

O software gráfico Seep/W é um programa pertencente ao *GEO-SLOPE International Ltd.*, que tem como base de cálculo o método de elementos finitos. Com o programa é viável analisar problemas de percolação, tanto de baixa, quanto de alta complexidade. No software é possível modelar a movimentação e distribuição de poropressões, tanto no solo como na rocha (GEO-SLOPE, 2001).

Para a modelagem de percolação no talude são utilizadas as condições de contorno: carga total (em função do nível do reservatório); fluxo de percolação nodal; e fluxo de percolação por área.

No trabalho Santos (2021), o software Seep/W foi utilizado para análise de infiltração de água no solo não saturado de taludes. No trabalho Gomes (2019), o programa foi utilizado para análise do fluxo de água, a partir da determinação da linha freática no interior do maciço e dos caminhos de fluxo, no regime de operação da barragem com nível máximo, considerado em regime permanente.

Figura 19 – Interface Seep/W



Fonte: Autor, 2024

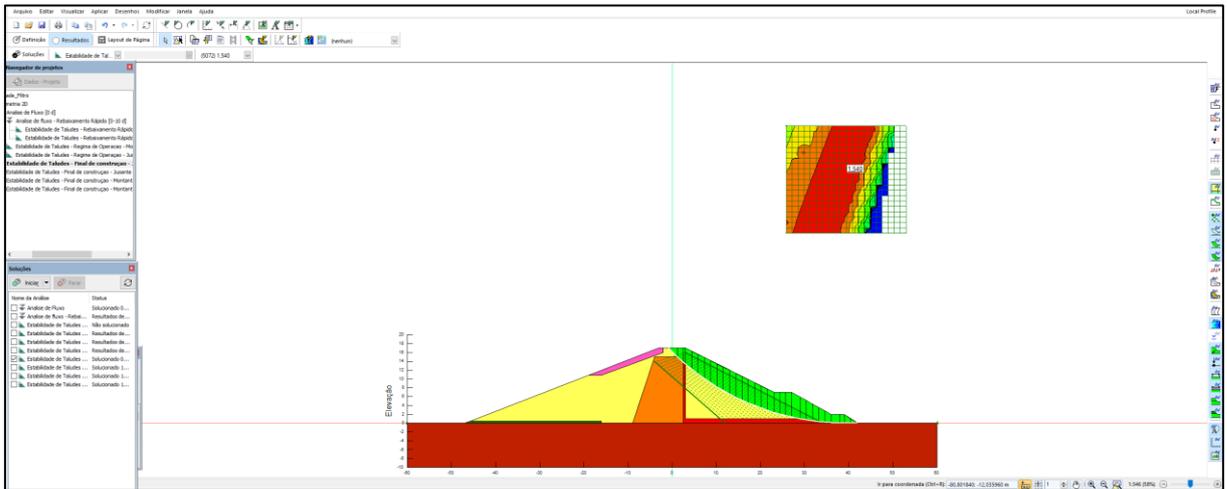
2.14.4 Slope/W

Segundo Rodrigues (2014), o Slope/W é um software desenvolvido pela Geo-Slope, que por meio da teoria de equilíbrio limite, calcula o fator de segurança (FS) de taludes em rocha ou solo. Este programa é um facilitador para a análise de taludes complexos, usando diversos métodos de análise, tais como, Bishop, Fellenius, Morgenstern-Price e Spencer.

As análises determinísticas da estabilidade de talude, no programa, calculam o fator de segurança (FS) a partir de um grupo determinado de condições e parâmetros de materiais, caso o fator de segurança obtido seja maior que a unidade, o talude é considerado estável (GEO-SLOPE, 2012).

No trabalho Santos (2021), o programa Slope/W foi utilizado junto com o Seep/W, no Slope/W foram obtidos os resultados de fator de segurança para a infiltração de água transiente em taludes homogêneos. No trabalho Gomes (2019), o software Slope/W foi utilizado para o estudo de estabilidade e determinação do fator de segurança crítico do talude de jusante, a partir da terminação da linha freática no interior do maciço obtido pelo programa Seep/W.

Figura 20 – Interface Slope/W

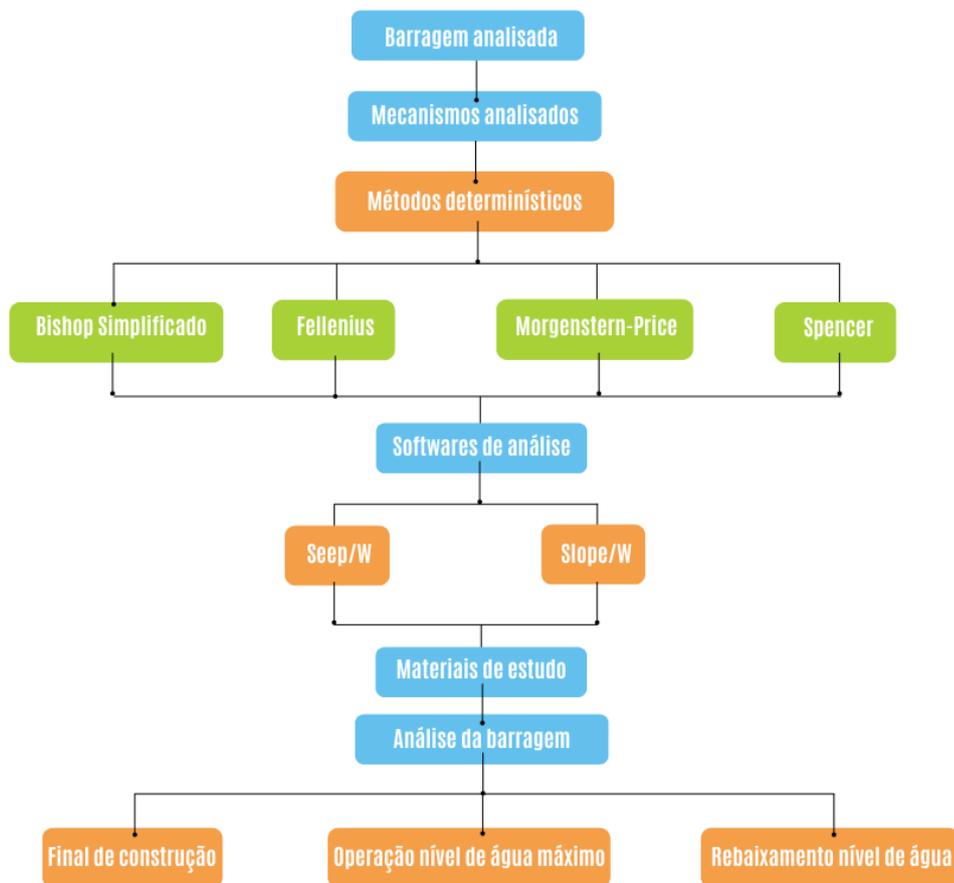


Fonte: Autor, 2024

3 MÉTODO

O método utilizado para a concepção deste trabalho consiste na modelagem computacional do perfil da barragem, por meio de softwares para a análise de estabilidade dos taludes de montante e jusantes. A partir da modelagem, por meio de métodos de Equilíbrio Limite para a análise de estabilidade, serão determinados os fatores de segurança para cada arranjo de materiais (Figura 21).

Figura 21- Fluxograma do método utilizado no trabalho



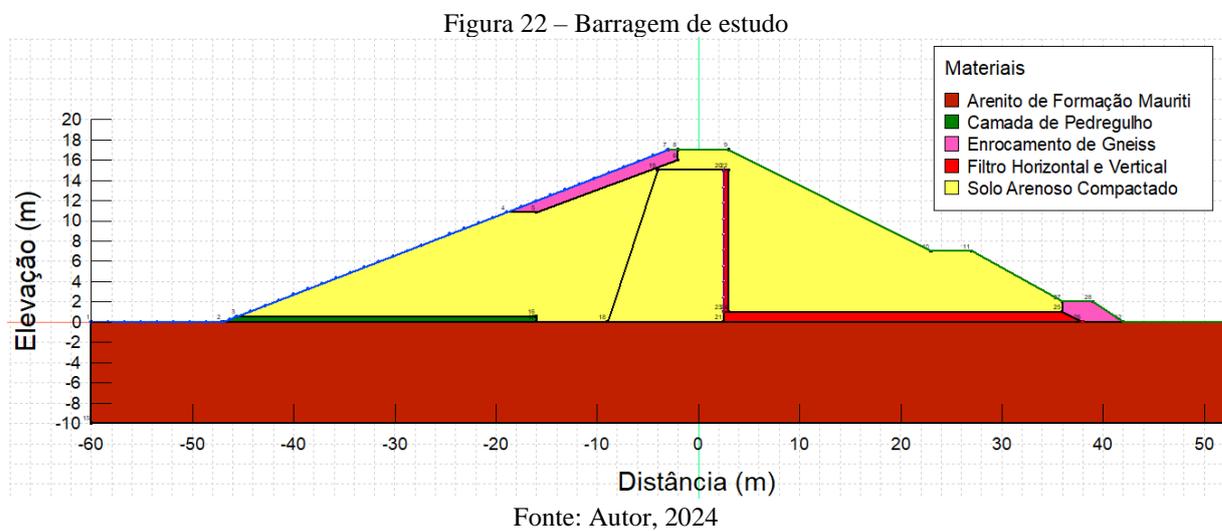
Fonte: Autor, 2024

3.1 BARRAGEM DE ESTUDO

A Barragem de estudo é utilizada para a retenção de água para abastecimento das cidades próximas, ela está localizada na região Nordeste do Brasil. A barragem de análise teve seus dados obtidos pelo autor por meio da empresa que o mesmo estagia, a escolha dela para o trabalho deve-se pela alteração de sua composição. Previamente a mesma era para ser do tipo

zoneado, com a presença de um núcleo impermeável de argila, este material seria obtido de jazidas da região. Após a descoberta de uma jazida próxima, foi realizada uma análise do material e constatado que o solo é de boa qualidade, assim, ocorreu a troca de material e a barragem foi construída com material homogêneo.

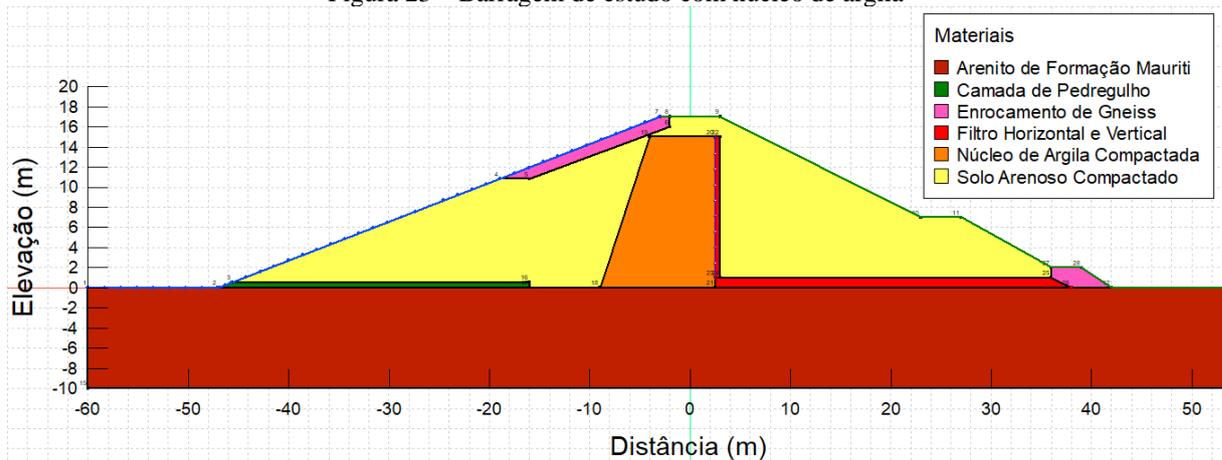
A Barragem de estudo possui uma altura total de 17,0 metros de altura, desde sua fundação até a sua crista. O talude de montante possui uma inclinação de 2,6:1, o talude de jusante possui duas inclinações distintas, devido a presença de uma berma de 4,0 metros, à 6,5 metros de altura, por tanto, a inclinação de jusante é de 1,9:1 e 2,15:1.



Na composição da barragem, além do solo arenoso compactado, há a presença de outros materiais, como: enrocamento de gnaiss na parte superior do talude de montante e na base do talude de jusante, camada de pedregulho na base do talude de montante, e o filtro horizontal e vertical que são compostos de areia. O solo onde localiza-se o objeto de estudo é um arenito de Formação Mauriti.

Para a solução de estudo deste trabalho, é proposta uma mudança no corpo da barragem. Nesta mudança, é incrementado um núcleo impermeável de argila, que com o solo arenoso compactado, formam o corpo principal da barragem. A localização, propriedades geotécnicas de resistência e de permeabilidade do enrocamento de gnaiss, camada de pedregulho, filtro vertical e horizontal, mantêm-se os mesmos.

Figura 23 – Barragem de estudo com núcleo de argila



3.2 MECANISMOS ANALISADOS

O estudo de estabilidade da barragem foi realizado por meio do método determinístico de fator de segurança. A análise foi feita para três períodos construtivos diferentes: final de construção, barragem em operação com nível de água máximo, barragem em operação com rebaixamento rápido. Para as análises durante a operação, é necessário o estudo da percolação da água pelo corpo da barragem, assim, é obtido o valor da vazão em um determinado segmento do perfil observado.

Para o estudo de estabilidade determinística foi utilizado o método de Equilíbrio Limite. Através dos softwares de análise, foram estabelecidos os valores fator de segurança (FS) com uso de métodos não rigorosos e métodos rigorosos, conforme a revisão bibliográfica. Dos métodos não rigorosos, foram utilizados: Fellenius e Bishop Simplificado. Nas análises por meio de métodos rigorosos, foram usados: Spencer e Morgenstern-Price.

3.3 MATERIAIS DE ESTUDO

A escolha de materiais para a constituição da Barragem X levou em consideração as possibilidades de geometria, necessidade de garantir a segurança e a presença de jazidas com materiais de boa qualidade próxima a locação da barragem. Devido à presença de jazidas com solos maduros e impermeáveis, utilizou-se o mesmo material para a parte externa e núcleo. Os parâmetros admitidos para a análise da barragem foram obtidos por meio de ensaios de campo, avaliados pelo critério de Mohr-Coulomb.

A Tabela 3 apresenta os valores dos parâmetros de resistência e permeabilidade adotados para o corpo da barragem. Os dados foram disponibilizados pelo relatório da empresa em que o autor estagia, cabendo observar que não foram disponibilizados os detalhes dos ensaios executados. Os parâmetros utilizados para a análise de estabilidade foram: peso específico (γ); coesão efetiva (c'); ângulo de atrito efetivo (ϕ'); coeficiente de permeabilidade (k).

Tabela 3 – Propriedades geotécnicas de resistência efetiva e de permeabilidade, barragem original

Material	Peso específico (γ) [kN/m ³]	Coesão efetiva (c') [kPa]	Ângulo de atrito (ϕ') [°]	Permeabilidade (k) [m/s]
Arenito formação Mauriti	22	50	35	1e-5
Camada pedregulho	17	0	25	0,005
Enrocamento de gnaisse	21	0	40	0,05
Filtro horizontal e vertical - areia	20	0	30	0,0002
Solo arenoso compactado	20	10	30	6e-8

Fonte: Autor, 2024

Para que seja realizada a análise de estabilidade, para a solução de talude de terra com núcleo de argila impermeável, foram utilizados os dados de Godoy (1972) e Cruz (2004) para determinar as propriedades geotécnicas de resistência efetiva e de permeabilidade. Os materiais utilizados no filtro vertical e horizontal, camada de pedregulho e enrocamento de gnaisse foram mantidos, as mudanças na barragem ocorrem na alteração da escolha de solo compactado de areia e do incremento de um núcleo impermeável de argila.

Os materiais para o estudo de estabilidade comparativas foram organizadas em três combinações, de solo arenoso compactado e argila, para a análise. O Grupo 1 (Tabela 4) utiliza o mesmo solo arenoso compactado da barragem original e o núcleo argiloso é o mesmo que foi previamente cogitado para ser utilizado, segundo o relatório de análise da barragem. O Grupo 2 (Tabela 5) e o Grupo 3 (Tabela 6) apresentam solo compactado arenoso e núcleo argiloso impermeável com propriedades conforme Godoy (1972) e Cruz (2004), sendo estes grupos distintos em ambos os parâmetros.

Tabela 4 – Grupo 1, solo arenoso compactado e núcleo argiloso impermeável

Material	Peso específico (γ) [kN/m ³]	Coesão efetiva (c') [kPa]	Ângulo de atrito (ϕ') [°]	Permeabilidade (k) [m/s]
Solo arenoso compactado	20	10	30	6e-8
Núcleo argiloso impermeável	20	5	31	1e-8

Fonte: Autor, 2024

Tabela 5 - Grupo 2, solo arenoso compactado e núcleo argiloso impermeável

Material	Peso específico (γ) [kN/m ³]	Coesão efetiva (c') [kPa]	Ângulo de atrito (ϕ') [°]	Permeabilidade (k) [m/s]
Solo arenoso compactado	21	8	31	9,4e-8
Núcleo argiloso impermeável	19	15	26	4e-8

Fonte: Adaptado de Godoy (1972) e Cruz (2004)

Tabela 6 - Grupo 3, solo arenoso compactado e núcleo argiloso impermeável

Material	Peso específico (γ) [kN/m ³]	Coesão efetiva (c') [kPa]	Ângulo de atrito (ϕ') [°]	Permeabilidade (k) [m/s]
Solo arenoso compactado	21	7	35	4,5e-8
Núcleo argiloso impermeável	21	12	30	3,2e-7

Fonte: Adaptado de Godoy (1972) e Cruz (2004)

3.4 SOFTWARES PARA A ANÁLISE DA BARRAGEM

Para a análise da barragem, foram escolhidos os softwares Seep/W e Slope/W, ambos são programas da GEO-SLOPE, contendo uma interface de fácil entendimento, além de permitir um estudo completo do objeto de estudo. A escolha dos programas também se deu pela familiaridade do autor com eles, devido ao mesmo ter trabalhado anteriormente com ambos e a empresa que ele estagia ter permitido o acesso a uma licença para o software.

Apesar do autor anteriormente ter trabalhado e saber utilizar o programa MacStars 2000, da empresa MACCAFERRI, o software não foi utilizado por motivo de ele não permitir todas as análises que serão necessárias para este trabalho.

O Slide2, desenvolvido pela Rocscience, não teve seu uso por motivo do autor nunca ter feito análises de estabilidade com esta ferramenta, mesmo possibilitando todos os estudos

necessários para o trabalho, foi optado por utilizar um programa em que o autor tivesse maior conhecimento.

3.5 ANÁLISE DA BARRAGEM

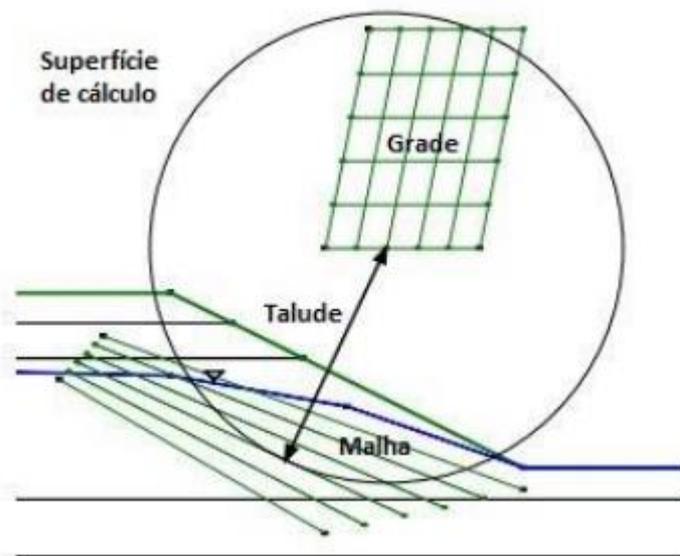
Para a realização do estudo de estabilidade da barragem por meio do método de equilíbrio limite, é necessário adicionar nos softwares a geometria e propriedades dos materiais da barragem de estudo.

Apesar de não ser o foco de estudo deste trabalho, é determinado o comportamento da água que infiltra no corpo do maciço. No software Seep/W, são adicionadas as condições de contorno da ação da água no solo, possibilitando a análise da percolação da água no solo.

Nas análises de fator de segurança no ambiente Slope/W, foi utilizada a opção de “grades e raios” para determinar a superfície de ruptura, devido a essa análise não forçar os parâmetros de ruptura do solo igual ao método de “entradas e saídas”. Para esta opção é preciso que o usuário determine uma grade de pontos fora do talude estudado, onde cada ponto dessa grade é considerado como o centro das superfícies potenciais de ruptura. Também é preciso determinar uma malha no interior do talude, onde as superfícies de análise serão tangentes.

Para a grade de pesquisa utilizou-se um total de 12 incrementos, que gera uma grade de 12x12 e para o valor de incrementos de raios foi utilizado uma malha com 20 elementos.

Figura 24 – Superfície de ruptura, método de grades e raios



Fonte: GEO-SLOPE, 2012

Assim, é obtida a região de ruptura da barragem e o seu fator de segurança. Para a análise de estabilidade, é preciso que os taludes apresentem valores maiores que o FS_{adm} estabelecidos pela Eletrobras (2003). Na Tabela 7 estão os os valores mínimos de fator de segurança para cada etapa de estudo. Atendendo as condições previamente estabelecidas, serão comparados os resultados de cada etapa com a solução optada pela empresa responsável, a fim de encontrar uma solução com núcleo de argila que pudesse ser utilizada e resultaria em um resultado semelhante.

A análise do perfil é feita em três etapas: final de construção; operação com nível de água máximo; rebaixamento rápido de nível de água.

Tabela 7 – Fatores de segurança mínimos para cada etapa de projeto

Etapa de Projeto	Fator de Segurança Mínimo
Final de construção	1,4
Operação com nível de água máximo	1,5
Rebaixamento rápido do nível de água	1,1

Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003)

3.5.1 Etapa 1 - Final de Construção

Após concluída a etapa construtiva da barragem, é realizada a análise de estabilidade para o corpo de estudo. Nessa fase, a barragem ainda não está em operação, não havendo a presença de água à montante.

Para o estudo da estabilidade da barragem para a etapa, é utilizado apenas o programa Slope/W, devido a não haver presença da água. No programa Slope/W, é analisada a segurança para os taludes de montante e jusante, para cada método de equilíbrio limite citados no item 3.2. Assim, os fatores de segurança para cada combinação de material de estudo.

3.5.2 Etapa 2 – Operação com Nível de Água Máximo

Nesta etapa é analisada a estabilidade da barragem para quando ela está operando no seu nível máximo de água, que é de 15 metros com relação a base da barragem. Primeiramente, é preciso analisar a percolação da água no perfil de estudo com o programa Seep/W.

A partir da determinação da linha freática no interior da barragem, é realizada a análise de estabilidade para os taludes de jusante e montante, por meio dos métodos de equilíbrio limite citados no item 3.2. Com isso, é possível determinar o fator de segurança para cada combinação de material de estudo.

3.5.3 Etapa 3 – Rebaixamento Rápido do Nível de Água

A etapa de rebaixamento rápido é a mais crítica da análise de estabilidade, devido ao nível de água baixar com relativa velocidade e o solo que estava em condição submersa estar saturado. A análise do comportamento da água no corpo do perfil de estudo é feita pelo programa Seep/W, onde é feito o rebaixamento de água em 10 metros no período de 10 dias, numa taxa constante de diminuir 1 metro para cada dia que se passa. Segundo o relatório disponibilizado pela empresa que o autor estagia, devido a região onde localiza-se a barragem estudo possuir volumes baixos de chuvas durante todo o ano, não é esperado grandes variações do nível de água no reservatório.

Após a determinação do comportamento da água no interior do perfil de estudo, é realizado o estudo de estabilidade, no software Slope/W, por meio dos métodos de equilíbrio limites informados no capítulo 3.2 Mecanismos Analisados. Assim, são obtidos os valores de fator de segurança, para cada combinação de material de estudo, no talude de montante e talude de jusante.

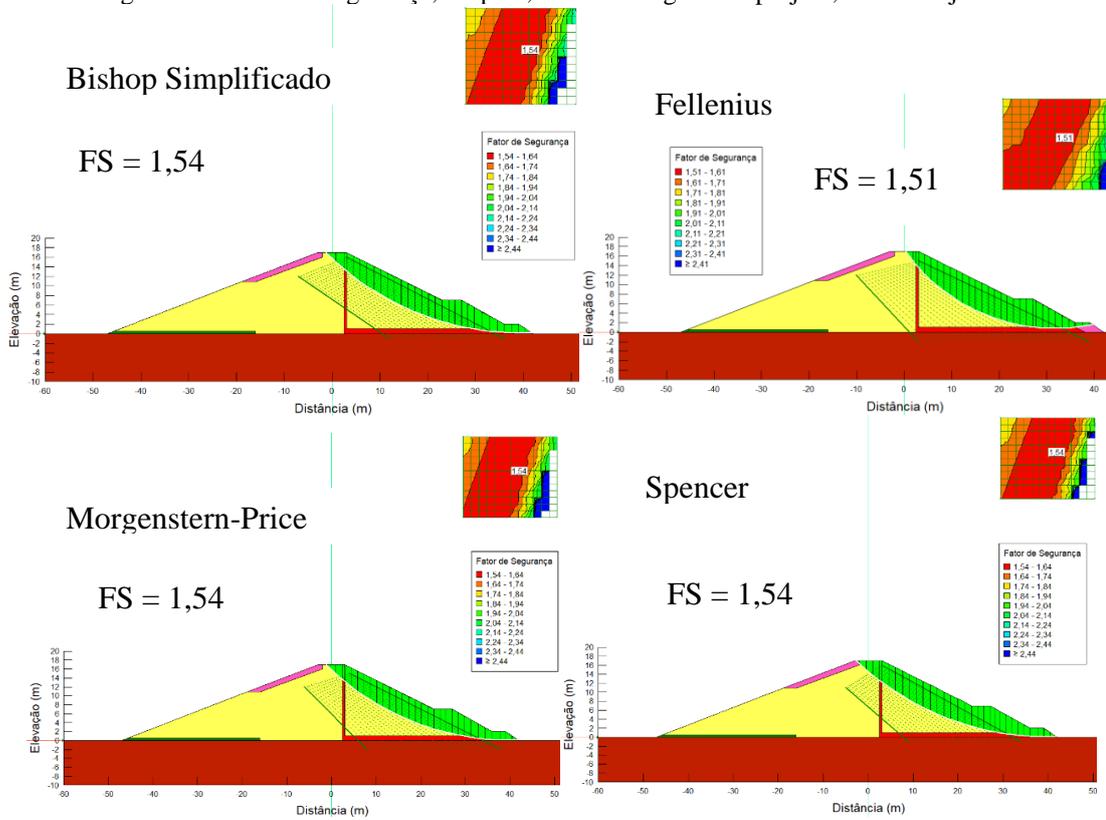
4 RESULTADOS DAS ANÁLISES

4.1 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ETAPA 1 – FINAL DE CONSTRUÇÃO

Para os cálculos dos fatores de segurança foram realizadas as simulações no software Slope/W conforme o capítulo 3.

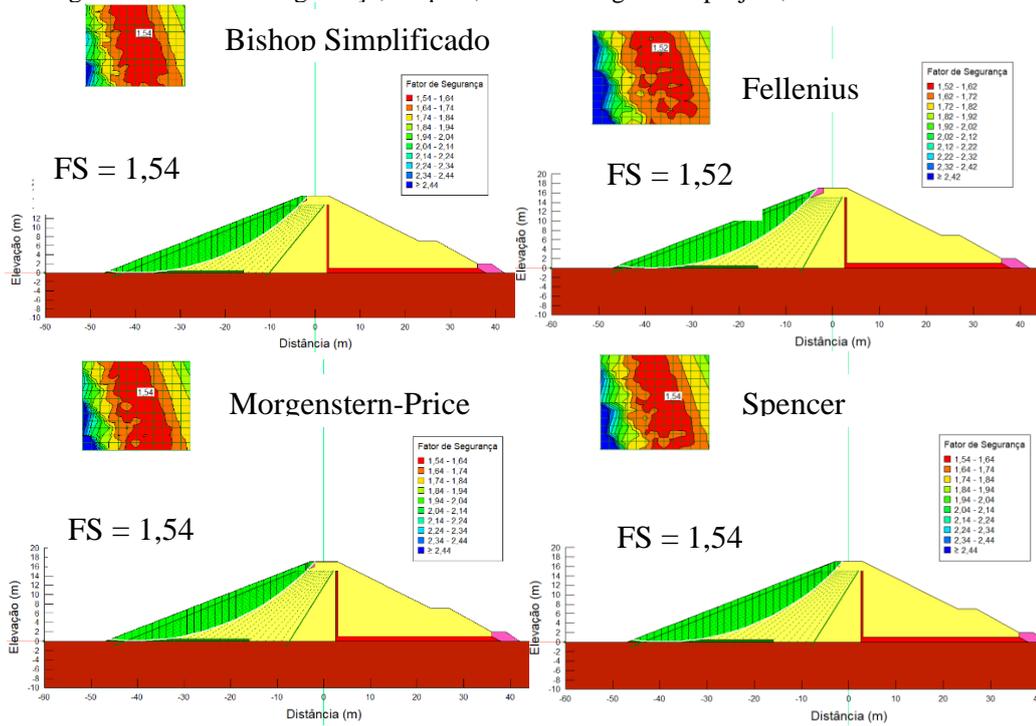
As Figura 25 e Figura 26, exibem os resultados da análise de estabilidade, do talude de jusante e do talude de montante, para o material de origem utilizado na barragem (Tabela 3).

Figura 25 - Fator de Segurança, Etapa 1, material original de projeto, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

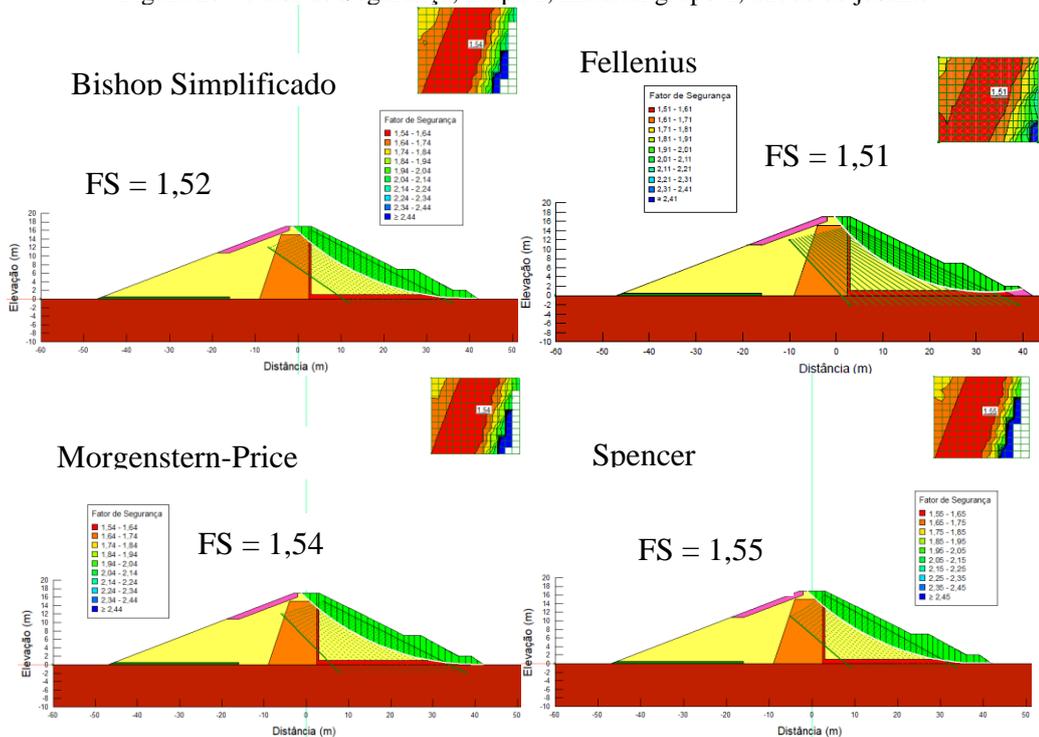
Figura 26 - Fator de Segurança, Etapa 1, material original de projeto, talude de montante



Fonte: Autor, 2024

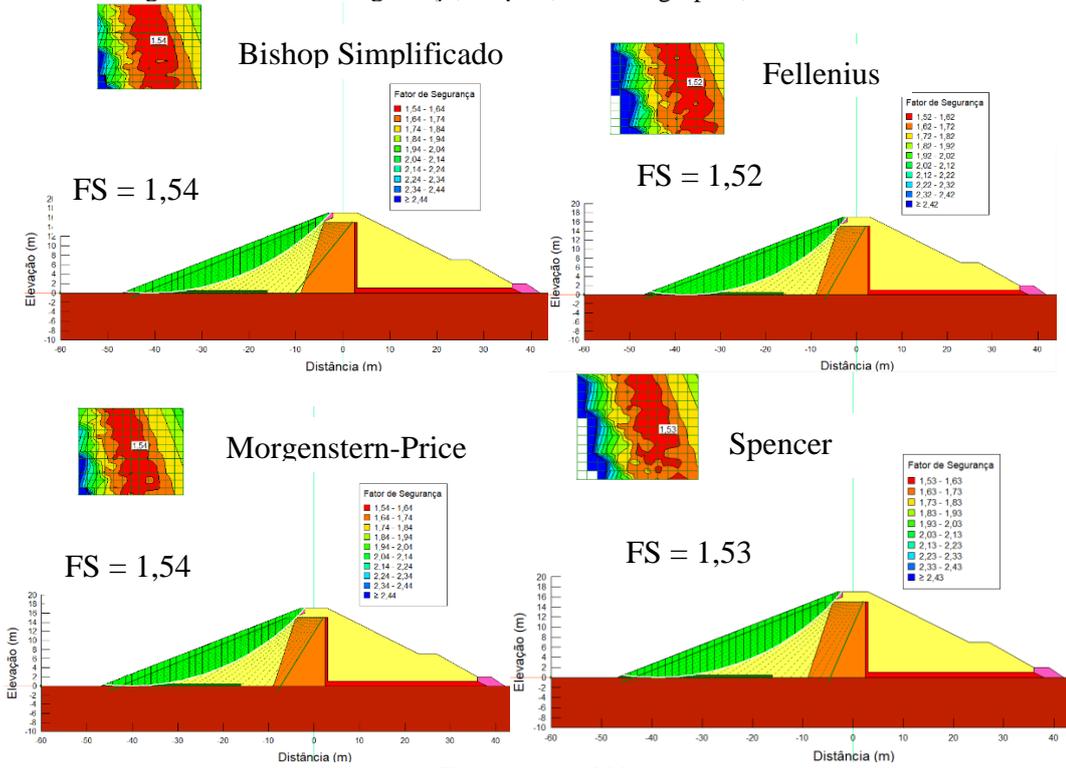
A Figura 27 e a Figura 28, exibem os resultados da análise de estabilidade, do talude de jusante e do talude de montante, para o material do grupo 1 (Tabela 4).

Figura 27 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 1, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

Figura 28 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 1, talude de montante



A Figura 29 e a Figura 30, exibem os resultados da análise de estabilidade para o material do grupo 2 (Tabela 5).

Figura 29 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 2, talude de jusante

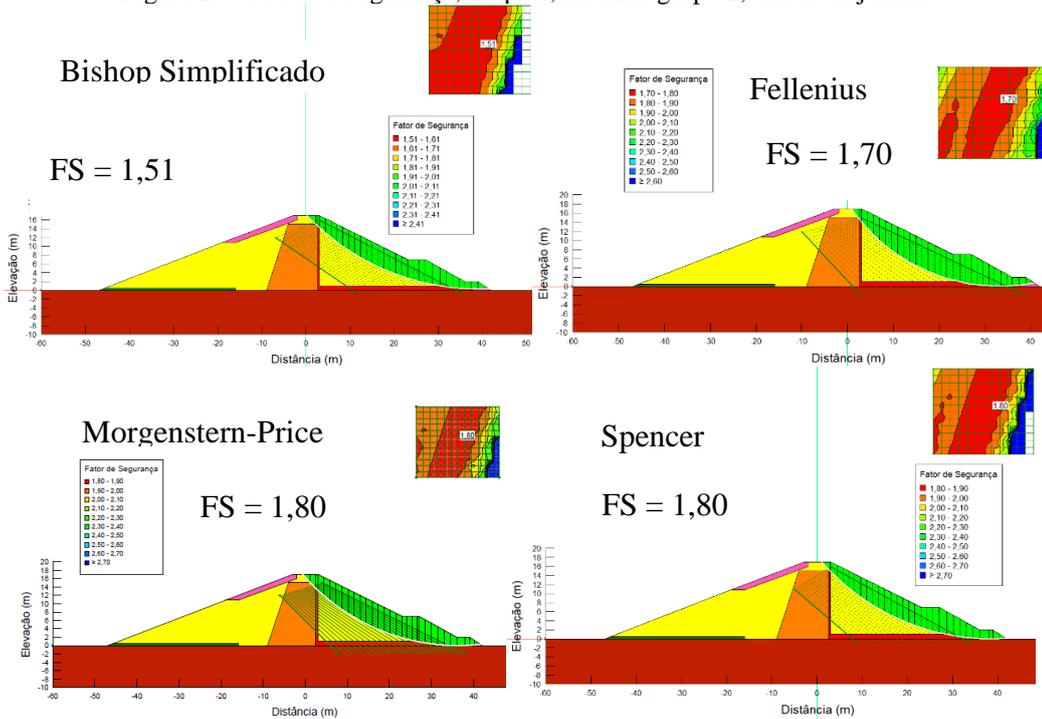
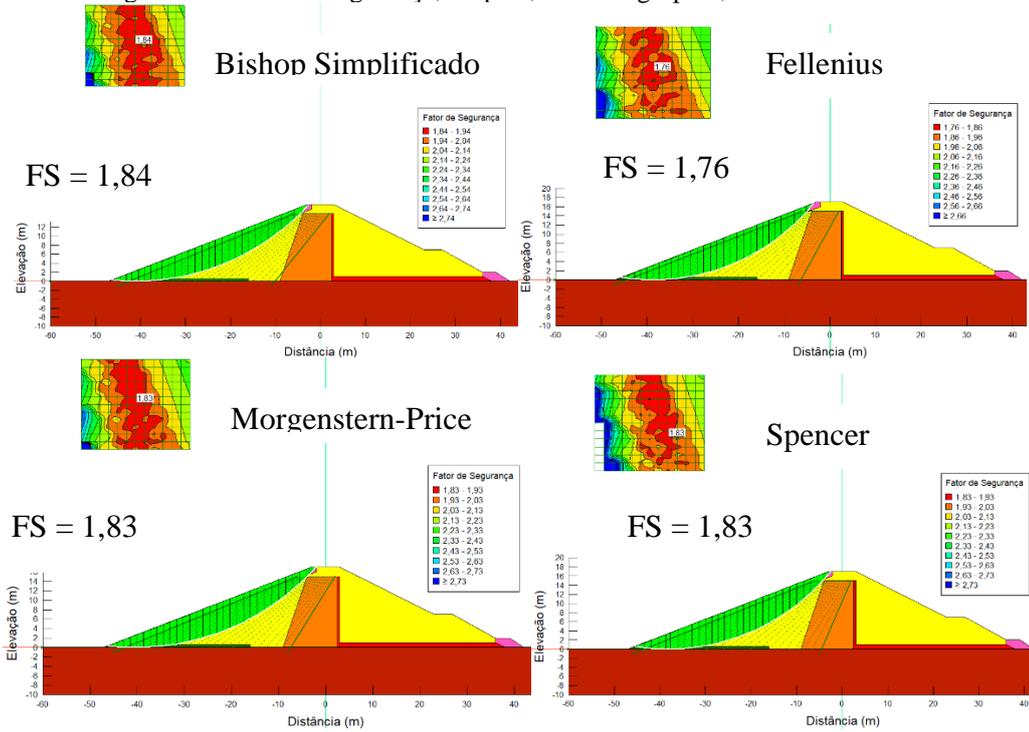


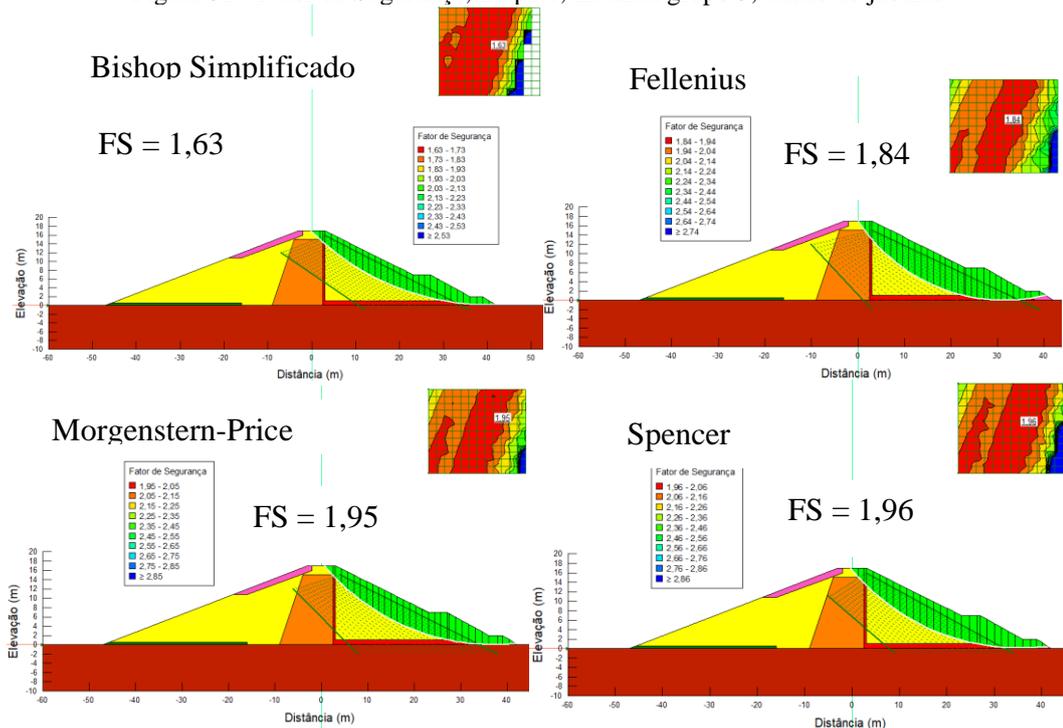
Figura 30 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 2, talude de montante



Fonte: Autor, 2024

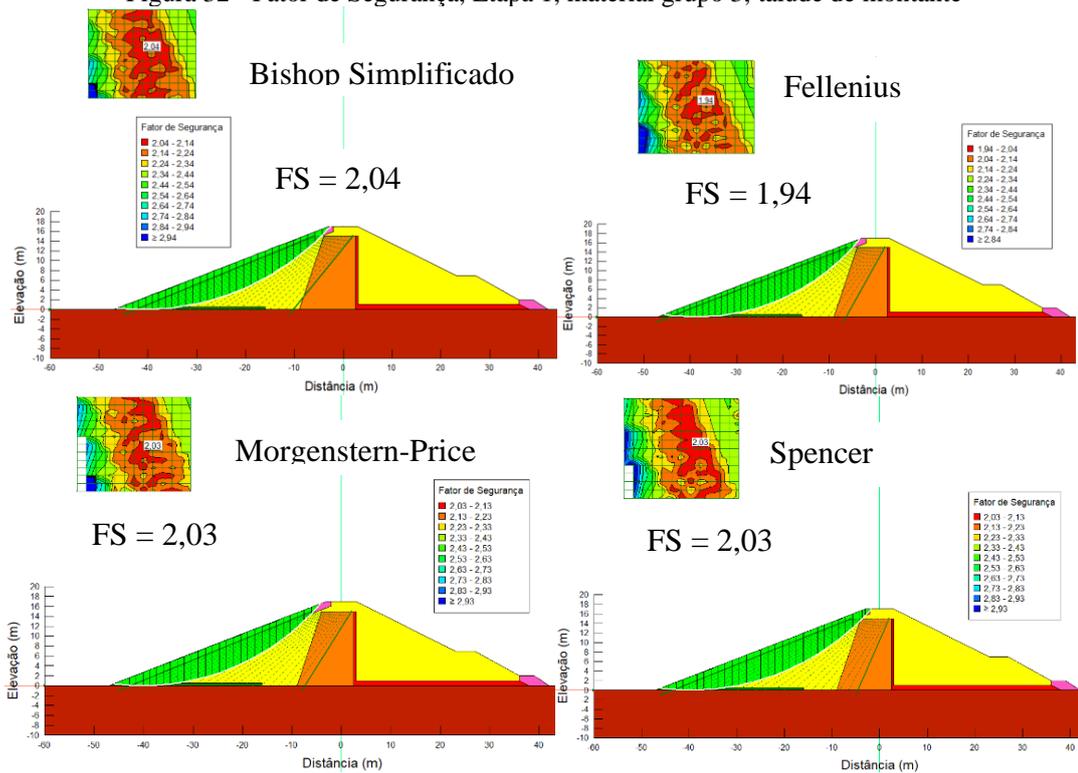
A Figura 31 e a Figura 32, exibem os resultados da análise de estabilidade para o material do grupo 3 (Tabela 6).

Figura 31 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 3, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

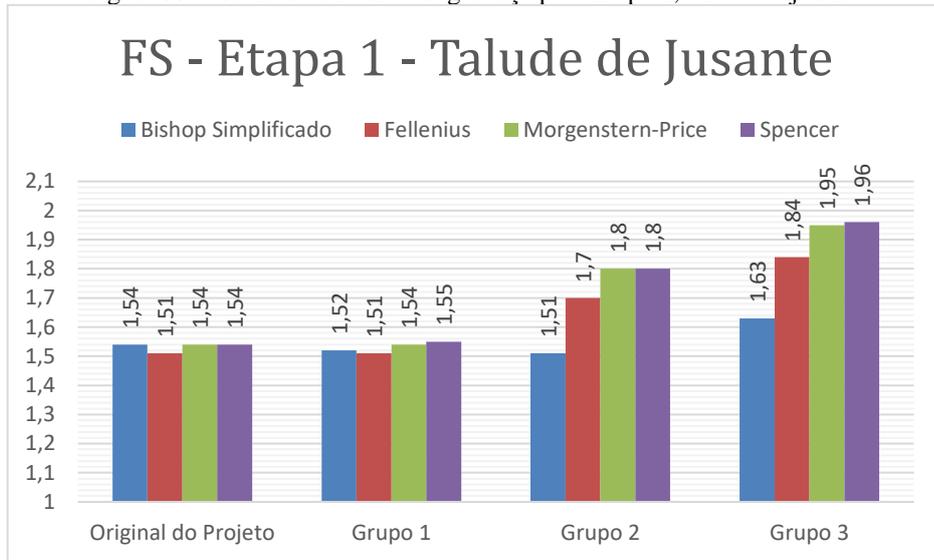
Figura 32 - Fator de Segurança, Etapa 1, material grupo 3, talude de montante



A partir dos resultados obtidos nas simulações de análise de estabilidade para a etapa de final de construção é constatado que todos os resultados das análises, para as quatro combinações de materiais de estudo, são maiores que o valor mínimo de fator de segurança exigido pela Eletrobrás (2023), que é 1,4 (Tabela 7).

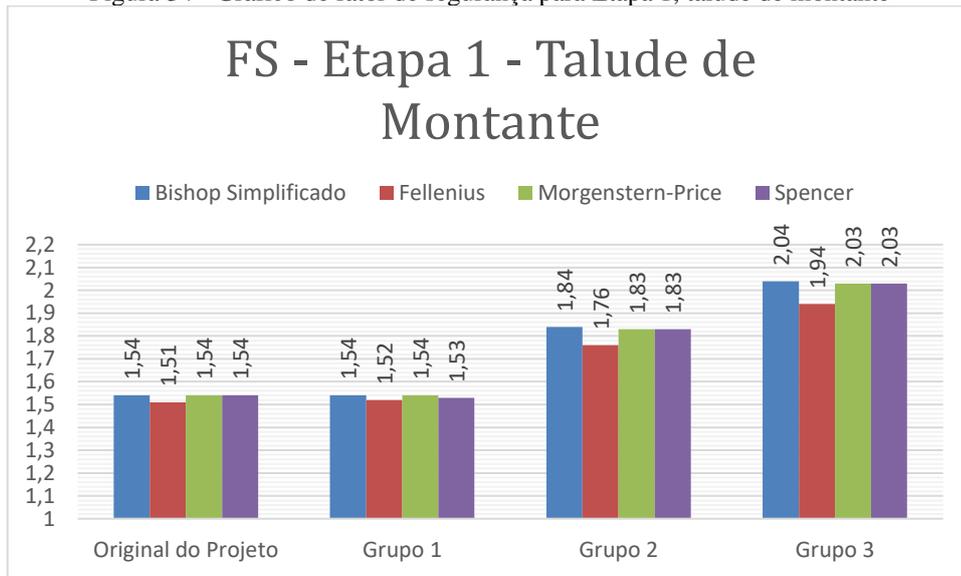
Conforme a Figura 33 e a Figura 34, para as análises do talude de jusante e de talude montante, os resultados dos métodos determinísticos Morgenstern-Price e Spencer, apresentam valores semelhantes para todas os materiais de estudo. As simulações dos métodos determinísticos não-rigorosos apresentam valores semelhantes para o material de origem da barragem e para o material do grupo 1. Para o material do grupo 2 e 3 há uma queda no fator de segurança no método de Bishop Simplificado do talude de jusante, porém, para o talude de montante apresenta valores próximos aos dos métodos rigorosos

Figura 33 – Gráfico de fator de segurança para Etapa 1, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

Figura 34 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 1, talude de montante



Fonte: Autor, 2024

A combinação de material original da barragem e material do grupo 1 apresentam valores próximos de fator de segurança, nesses materiais se diferenciam na presença do núcleo de argila impermeável no grupo material do grupo 1, sendo que para ambas o solo arenoso compactado é o mesmo. Porém, para as combinações de material do grupo 2 e material do grupo 3 os fatores de segurança obtidos foram maiores, assim sendo estas opções mais conservadoras para o uso (Tabela 8).

Tabela 8 – Quadro resumo de fator de segurança, regime de operação

Combinação de Materiais	Talude	FS - Método determinístico				FS mínimo Eletrobras (2003)	Situação
		Bishop Simplificado	Fellenius	Morgenstern-Price	Spencer		
Original do Projeto	Jusante	1,54	1,51	1,54	1,54	1,4	Estável
	Montante	1,54	1,52	1,54	1,54	1,4	
Grupo 1	Jusante	1,52	1,51	1,54	1,55	1,4	Estável
	Montante	1,54	1,52	1,54	1,53	1,4	
Grupo 2	Jusante	1,51	1,70	1,80	1,80	1,4	Estável
	Montante	1,84	1,76	1,83	1,83	1,4	
Grupo 3	Jusante	1,63	1,84	1,95	1,96	1,4	Estável
	Montante	2,04	1,94	2,03	2,03	1,4	

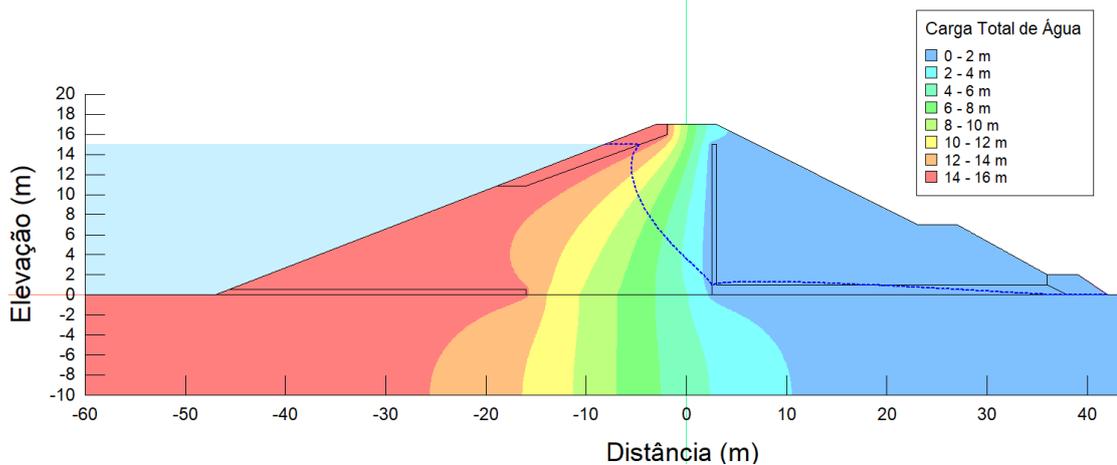
Fonte: Autor, 2024

4.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ETAPA 2 – OPERAÇÃO COM NÍVEL DE ÁGUA MÁXIMO

Conforme o capítulo 3.5.2 Etapa 2 – Operação com Nível de Água Máximo, é necessário realizar o estudo do comportamento da água no corpo da barragem para que se possa realizar as simulações de estabilidade, no talude de jusante e no talude de montante, assim, determinando seus fatores de segurança.

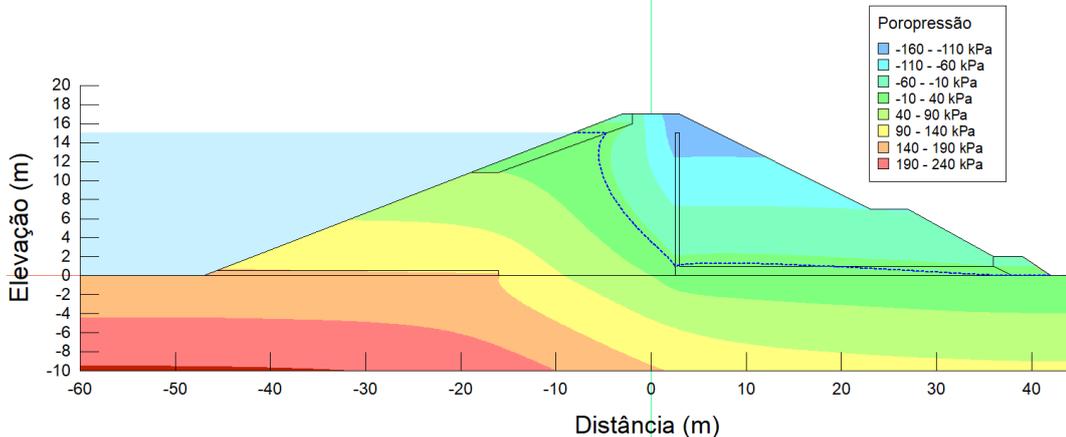
A Figura 35 e a Figura 36 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais de origem da barragem (Tabela 3), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão de água de $5,07e-5 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 37 e a Figura 38 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 35 – Carga total de água, Etapa 2, material original de projeto



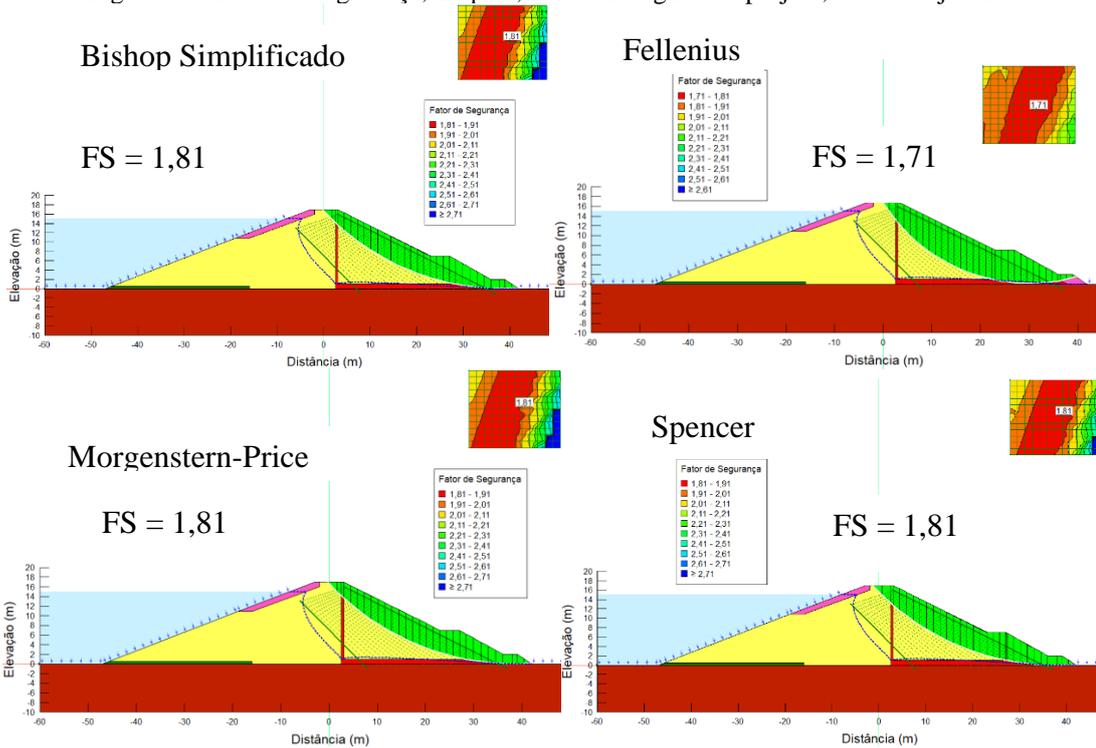
Fonte: Autor, 2024

Figura 36 - Poropressão, Etapa 2, material original de projeto



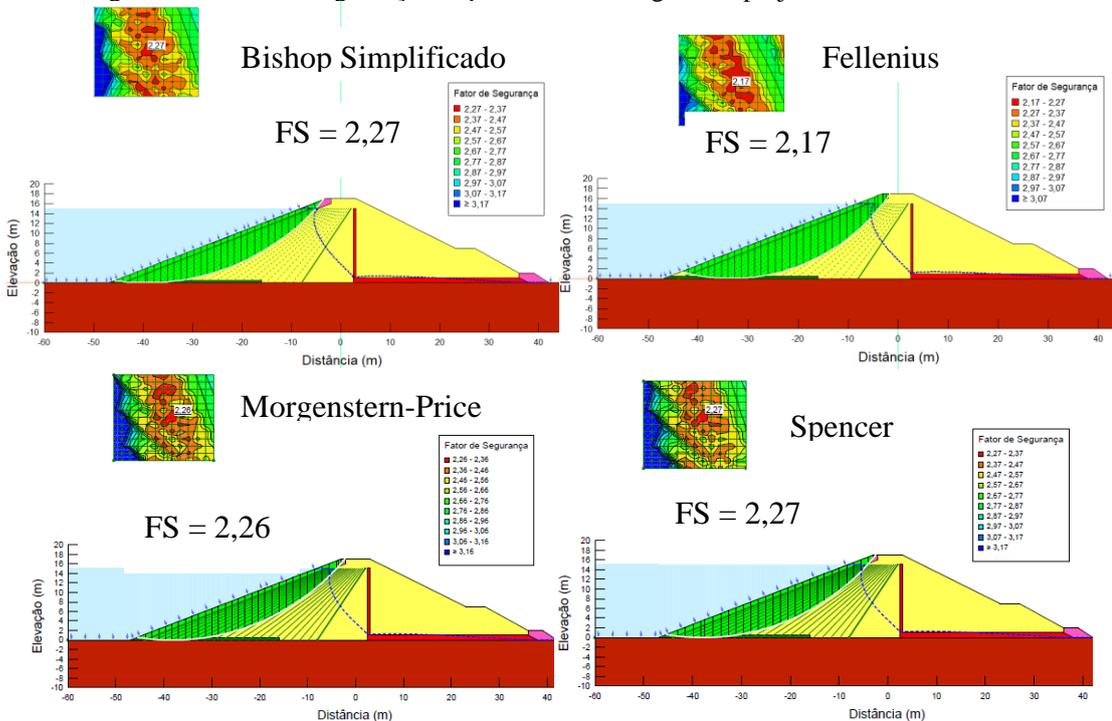
Fonte: Autor, 2024

Figura 37 - Fator de Segurança, Etapa 2, material original de projeto, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

Figura 38 - Fator de Segurança, Etapa 2, material original de projeto, talude de montante

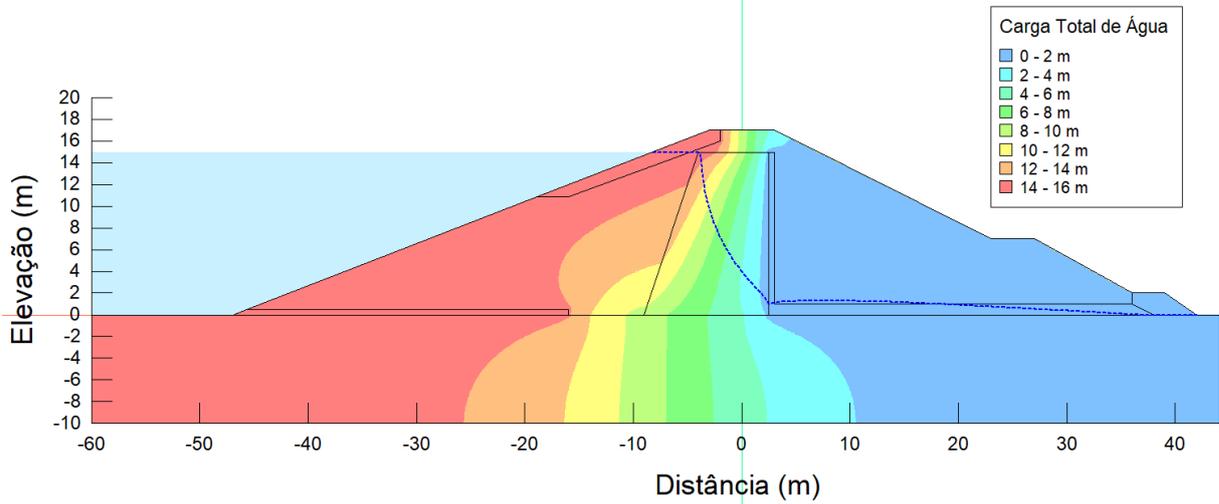


Fonte: Autor, 2024

A Figura 39 e a Figura 40 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais do grupo 1 (Tabela 4), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão

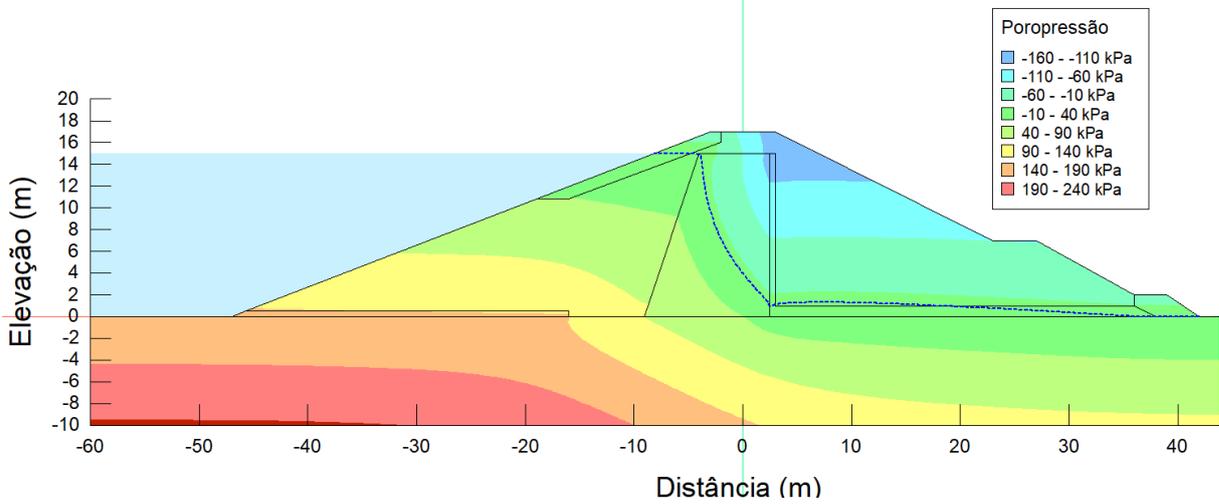
de água de $4,98e-5 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 41 e a Figura 42 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 39 – Carga total de água, Etapa 2, material grupo 1



Fonte: Autores, 2024

Figura 40 - Poropressão, Etapa 2, material grupo 1



Fonte: Autores, 2024

Figura 41 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 1, talude de jusante

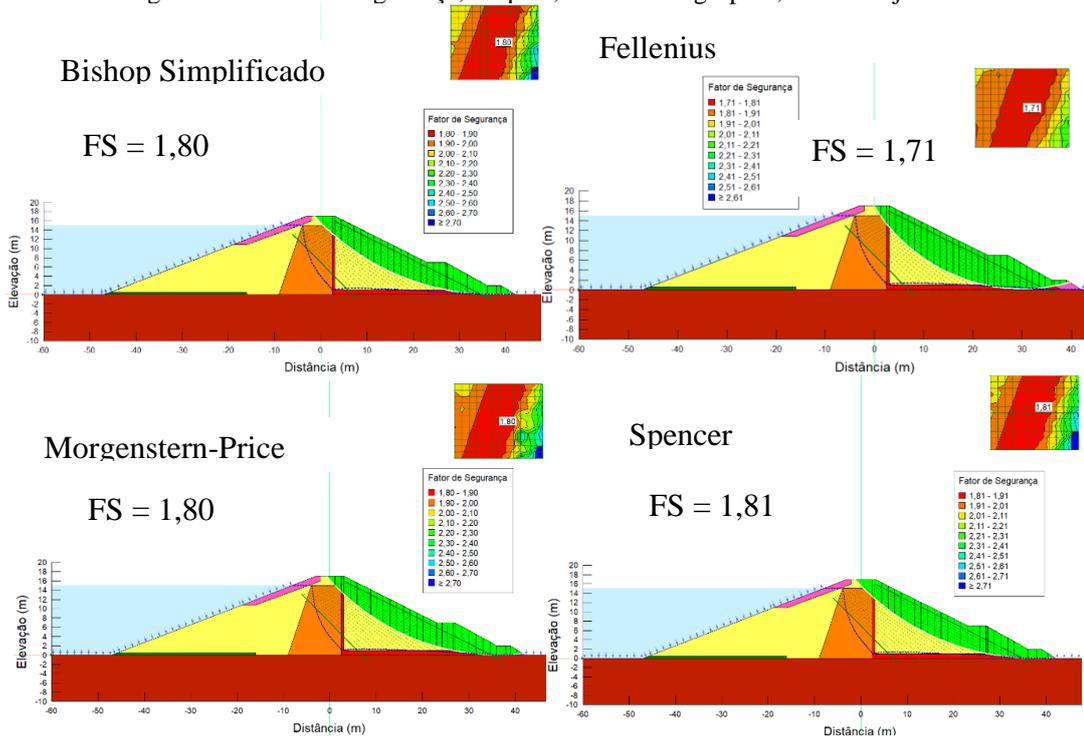
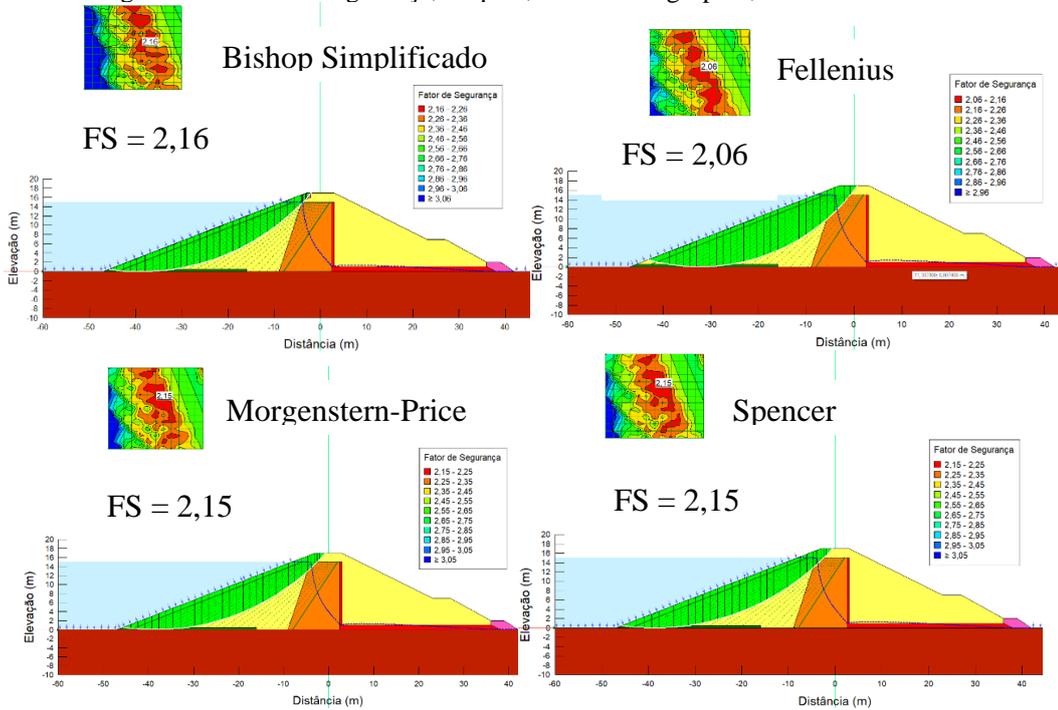


Figura 42 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 1, talude de montante



A Figura 43 e a Figura 44 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais do grupo 2 (Tabela 5), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão

de água de $5,00 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 45 e a Figura 46 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 43 – Carga total de água, Etapa 2, material grupo 2

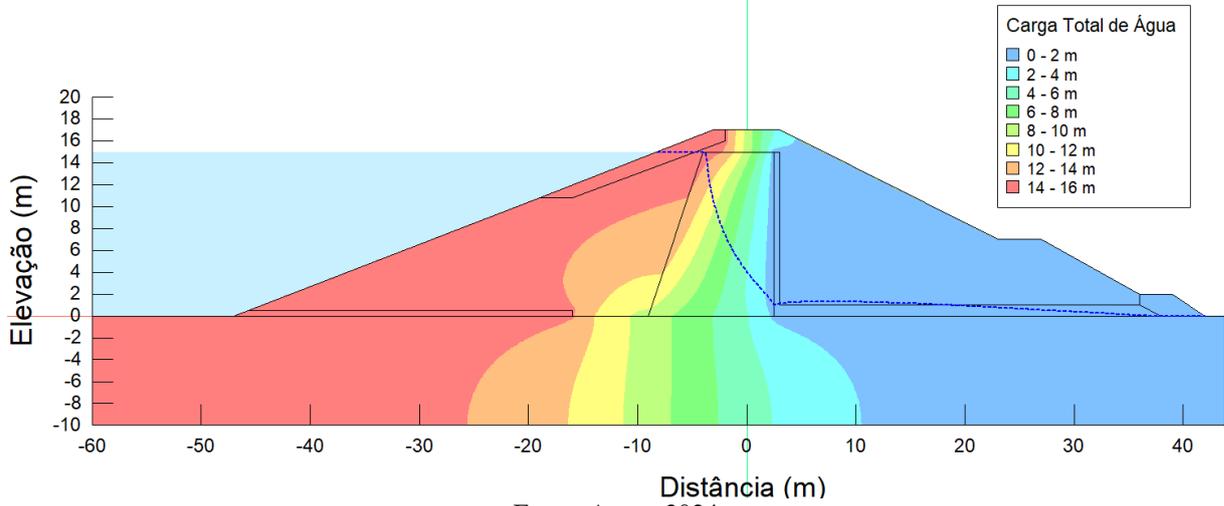


Figura 44 - Poropressão, Etapa 2, material grupo 2

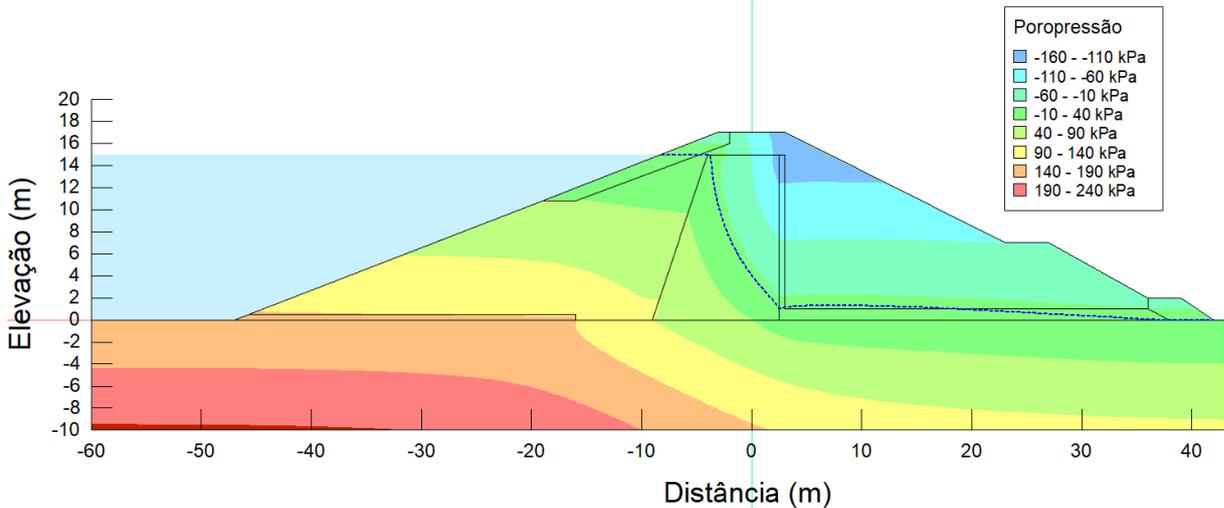
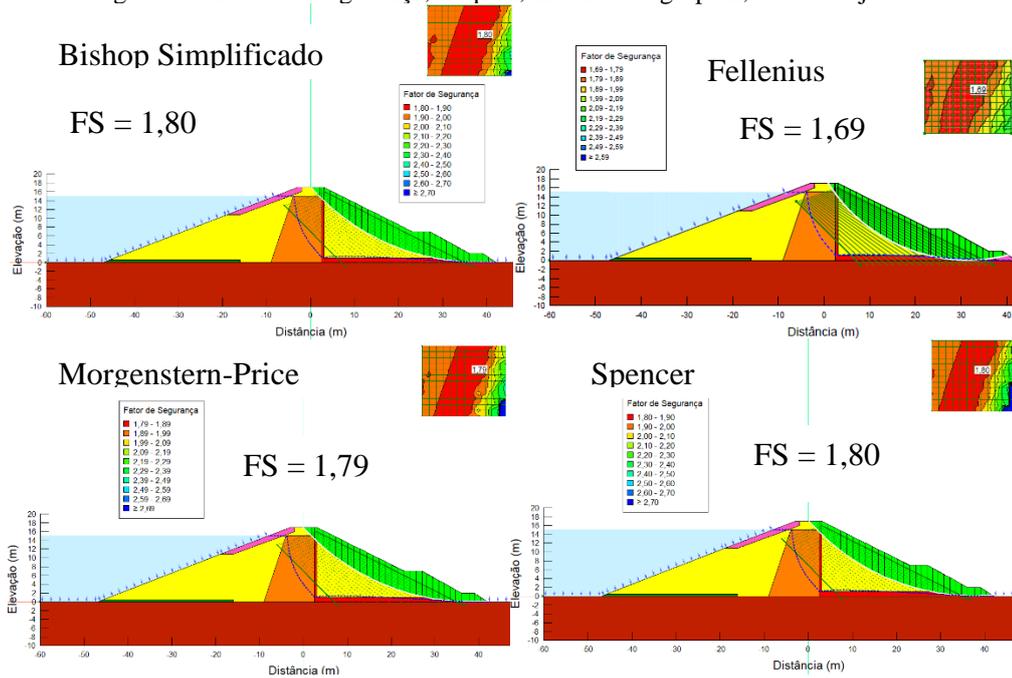
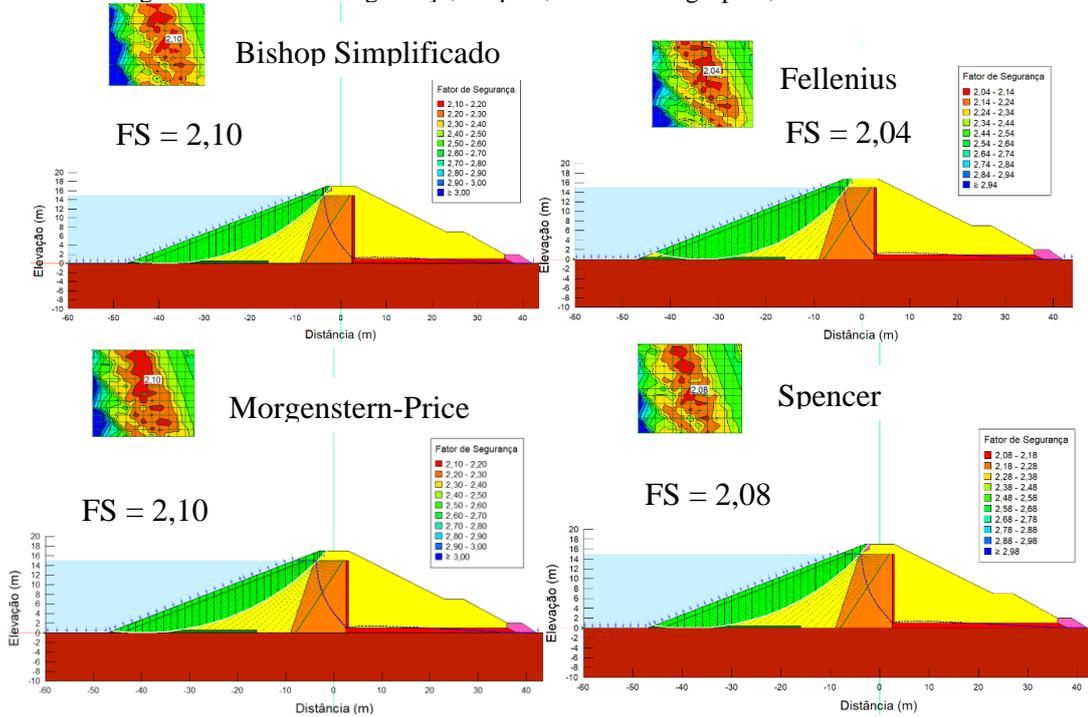


Figura 45 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 2, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

Figura 46 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 2, talude de montante

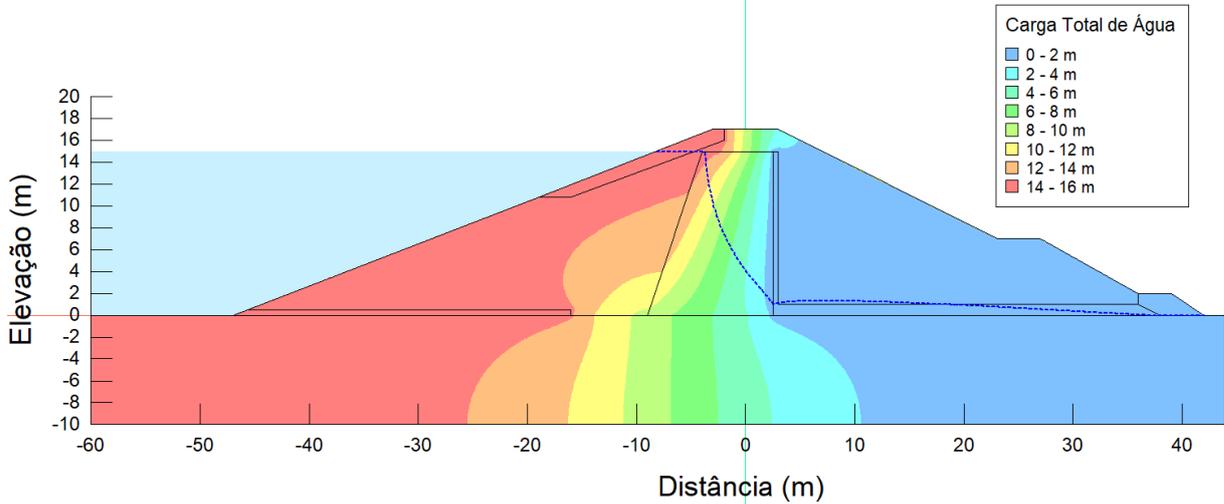


Fonte: Autor, 2024

A Figura 47 e a Figura 48 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais do grupo 3 (Tabela 6), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão

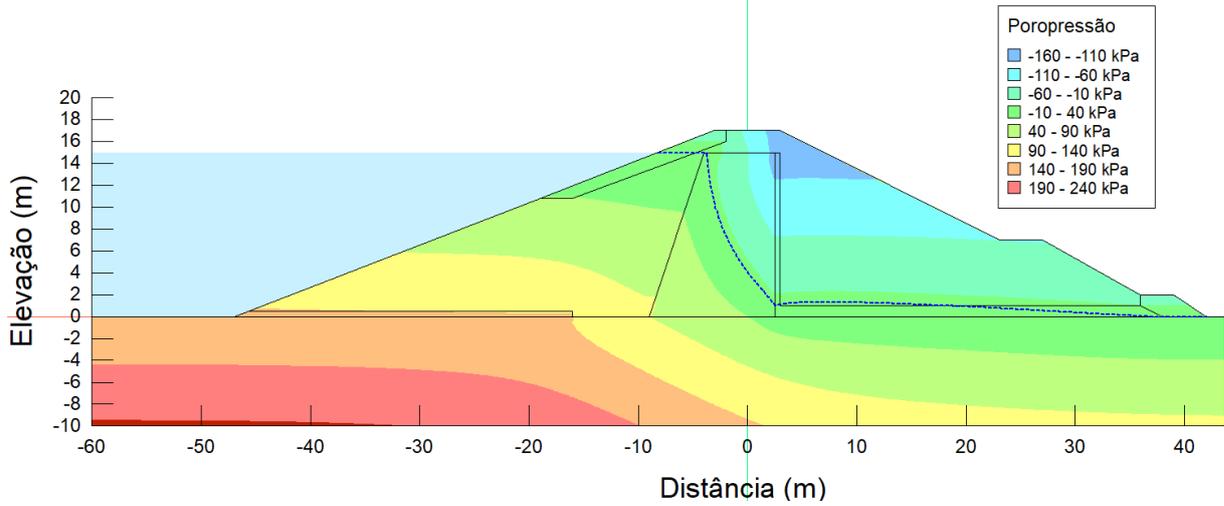
de água de $5,22e-5 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 49 e a Figura 50 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 47 - Carga total de água, Etapa 2, material grupo 3



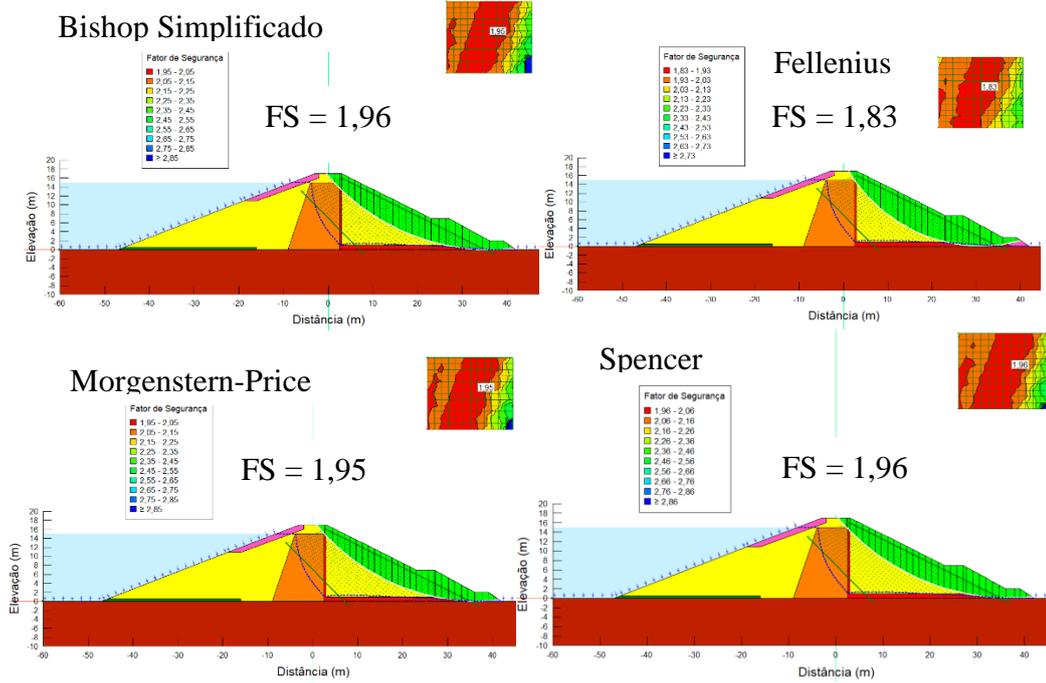
Fonte: Autor, 2024

Figura 48 - Poropressão, Etapa 2, material grupo 3



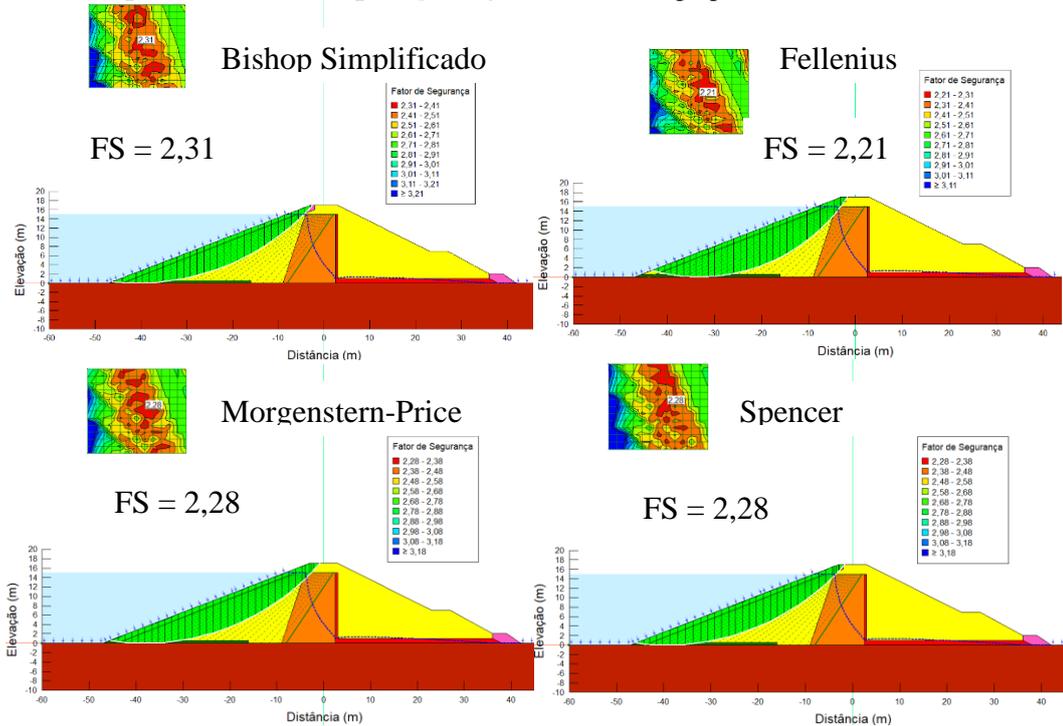
Fonte: Autor, 2024

Figura 49 - Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 3, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

Figura 50 – Fator de Segurança, Etapa 2, material do grupo 3, talude de montante



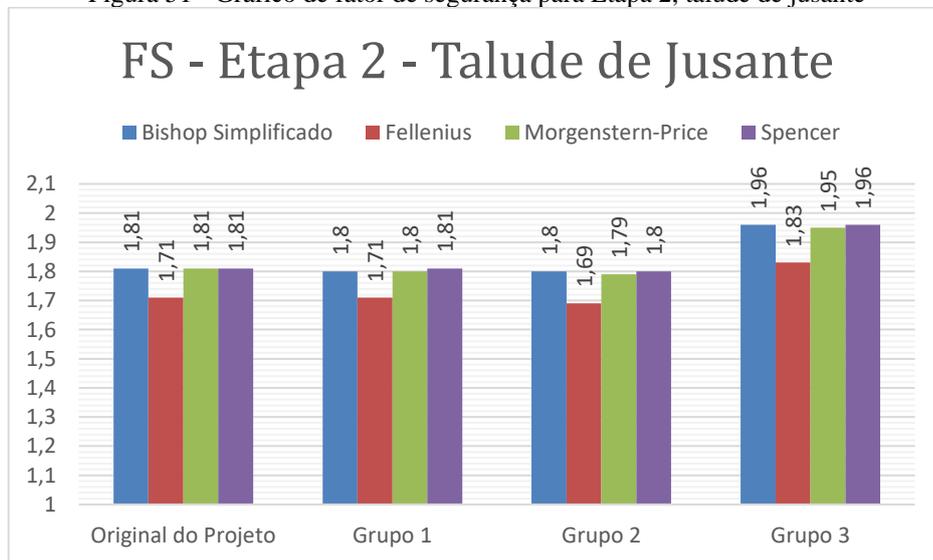
Fonte: Autor, 2024

A partir dos resultados obtidos nas simulações de análise de estabilidade realizadas para a etapa de final de construção é constatado que todos os resultados das análises, para as quatro combinações de materiais de estudo, são maiores que o valor mínimo de fator de segurança

exigido pela Eletrobrás (2023), que é 1,5 (Tabela 7). Devido a presença de água, no talude de montante há um aumento no fator de segurança comparando com os resultados obtidos na Análise de Estabilidade Etapa 1 – Final de Construção.

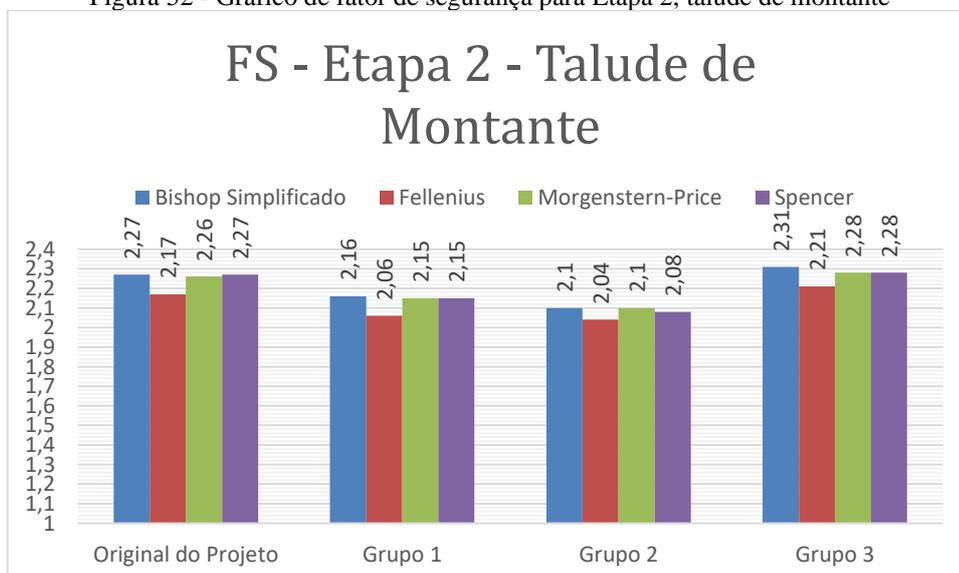
Conforme a Figura 51 e a Figura 52, os resultados das simulações dos métodos rigorosos e do método de Bishop Simplificado são semelhantes para todas as combinações de materiais do talude de jusante e do talude de montante. O método de Fellenius resulta em resultados de fator de segurança menores para todas as simulações realizadas, mas ainda dentro do critério de segurança estabelecido pela Eletrobrás (2003).

Figura 51 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 2, talude de jusante



Fonte: Autor, 2022

Figura 52 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 2, talude de montante



Fonte: Autor, 2022

A combinação de material original da barragem, material do grupo 1 e grupo 2 apresentam valores próximos de fator de segurança para o talude de jusante, onde não há o contato direto com a água do reservatório, porém, no talude de montante a combinação de material original da barragem apresenta valores mais conservadores, semelhantes aos encontrados para a análise do material do grupo 3. Para as simulações, no talude de jusante e talude de montante, o material do grupo 3 apresenta-se como a opção com valores maiores de fator de segurança (Tabela 9).

Tabela 9 - Quadro resumo de fator de segurança, operação com nível de água máximo

Combinação de Materiais	Talude	FS - Método determinístico				FS mínimo Eletrobras (2003)	Situação
		Bishop Simplificado	Fellenius	Morgenstern-Price	Spencer		
Original do Projeto	Jusante	1,81	1,71	1,81	1,81	1,5	Estável
	Montante	2,27	2,17	2,26	2,27	1,5	
Grupo 1	Jusante	1,80	1,71	1,80	1,81	1,5	Estável
	Montante	2,16	2,06	2,15	2,15	1,5	
Grupo 2	Jusante	1,80	1,69	1,79	1,80	1,5	Estável
	Montante	2,10	2,04	2,10	2,08	1,5	
Grupo 3	Jusante	1,96	1,83	1,95	1,96	1,5	Estável
	Montante	2,31	2,21	2,28	2,28	1,5	

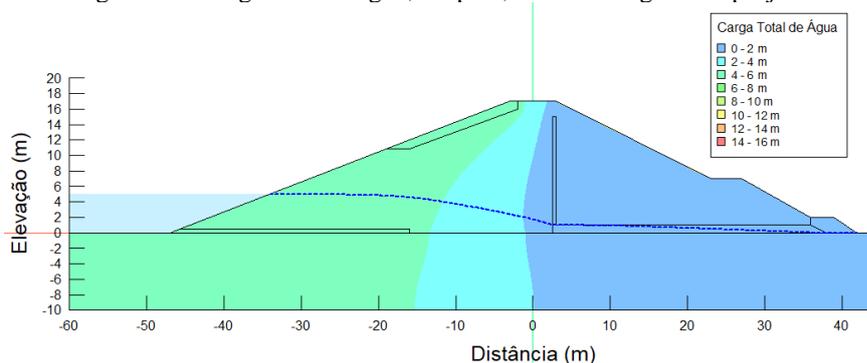
Fonte: Autor, 2024

4.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE ETAPA 3 – REBAIXAMENTO DO NÍVEL DA ÁGUA

Para o estudo da barragem para o rebaixamento do nível de água da barragem é realizada a análise a partir do nível de água máximo até o nível de rebaixo. Conforme o item 3.5.3, o nível de água reduz 1 metro de forma constante para cada dia que se passa, tendo o rebaixo de 10 metros no período de 10 dias. Após o estudo do comportamento da água no corpo da barragem é realizada as simulações de estabilidade para determinação dos fatores de segurança.

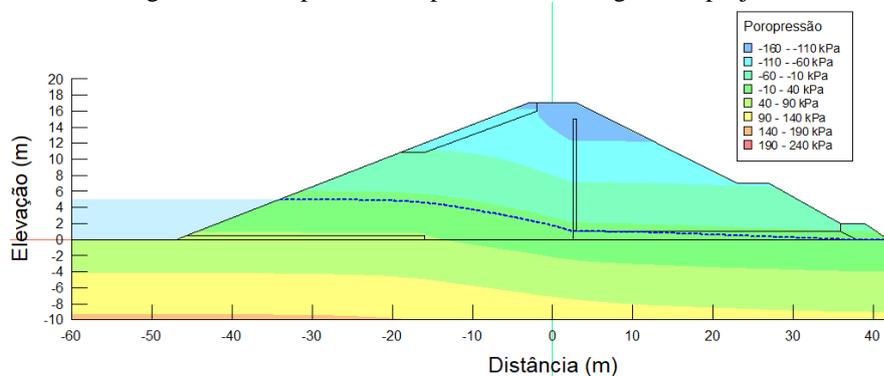
A Figura 53 e a Figura 54 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais de origem da barragem (Tabela 3), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão de água de $1,49e-5 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 55 e a Figura 56 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 53 - Carga total de água, Etapa 3, material original de projeto



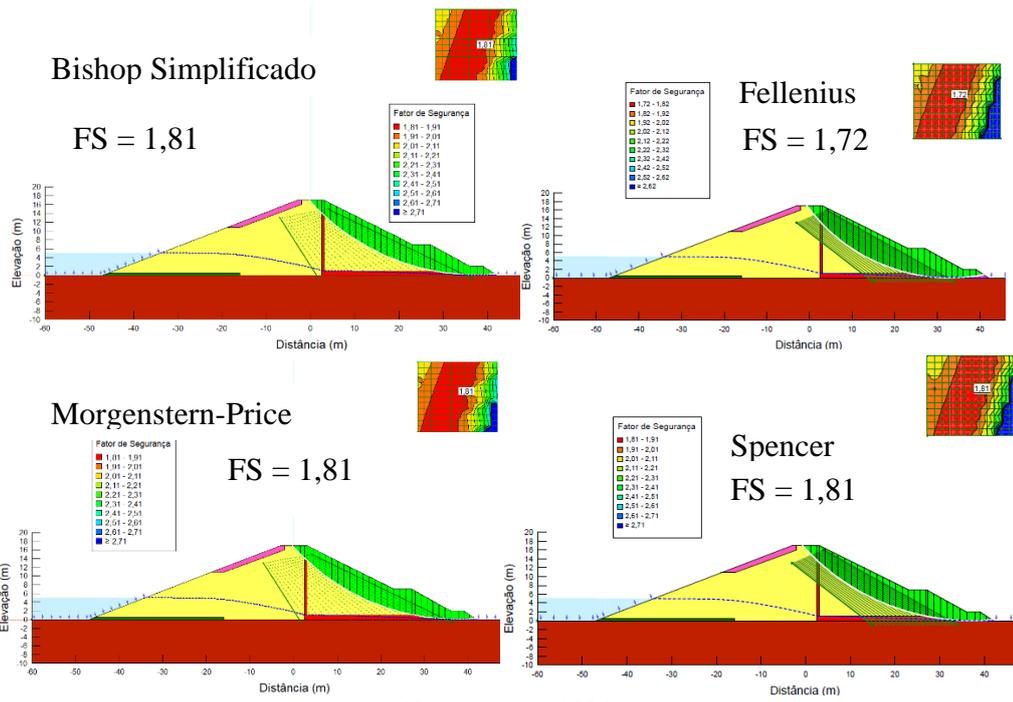
Fonte: Autor, 2024

Figura 54 - Poropressão, Etapa 3, material original de projeto



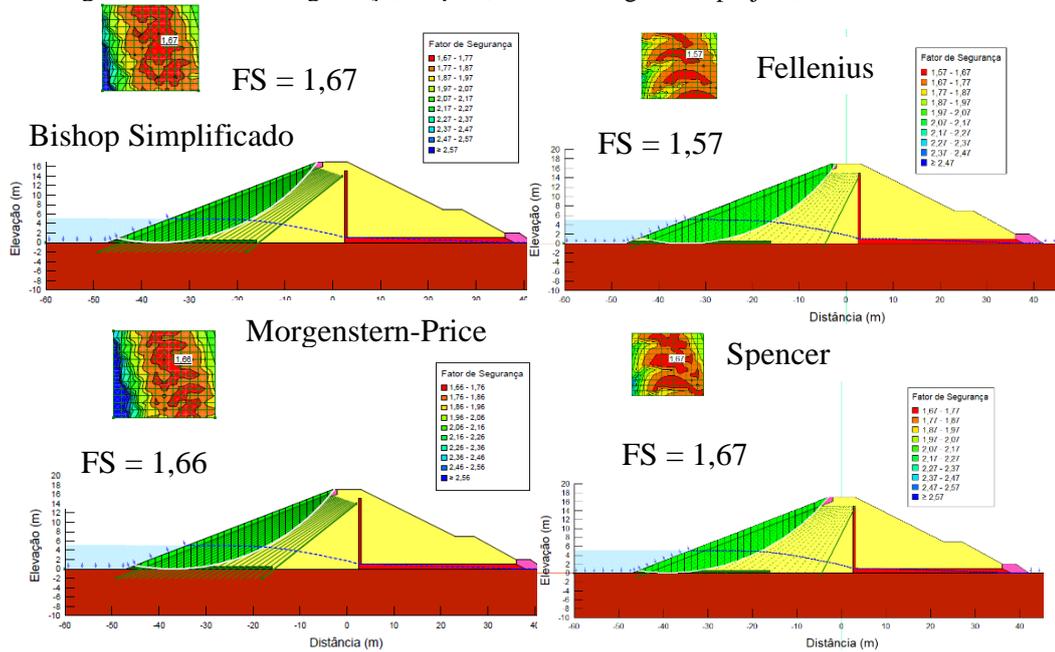
Fonte: Autor, 2024

Figura 55 - Fator de Segurança, Etapa 3, material original de projeto, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

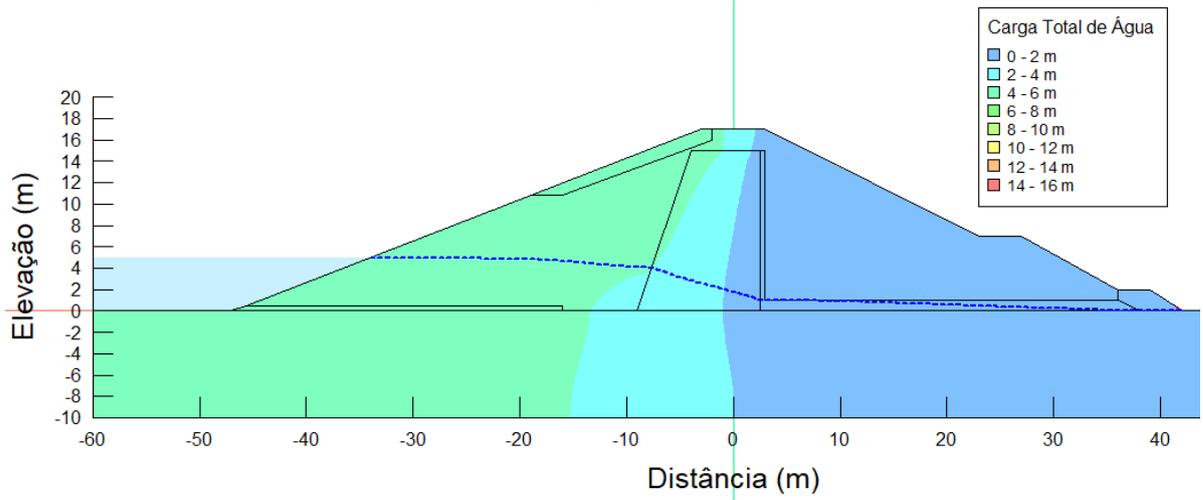
Figura 56 - Fator de Segurança, Etapa 3, material original de projeto, talude de montante



Fonte: Autor, 2024

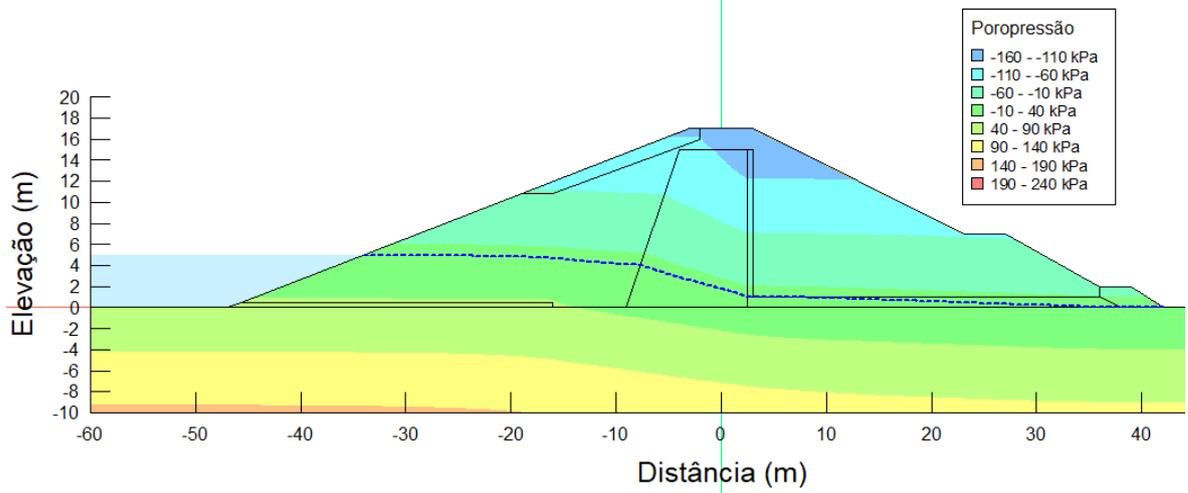
A Figura 57 e a Figura 58 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais do grupo 1 (Tabela 4), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão de água de $1,46 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 59 e a Figura 60 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 57 – Carga total de água, Etapa 3, material grupo 1



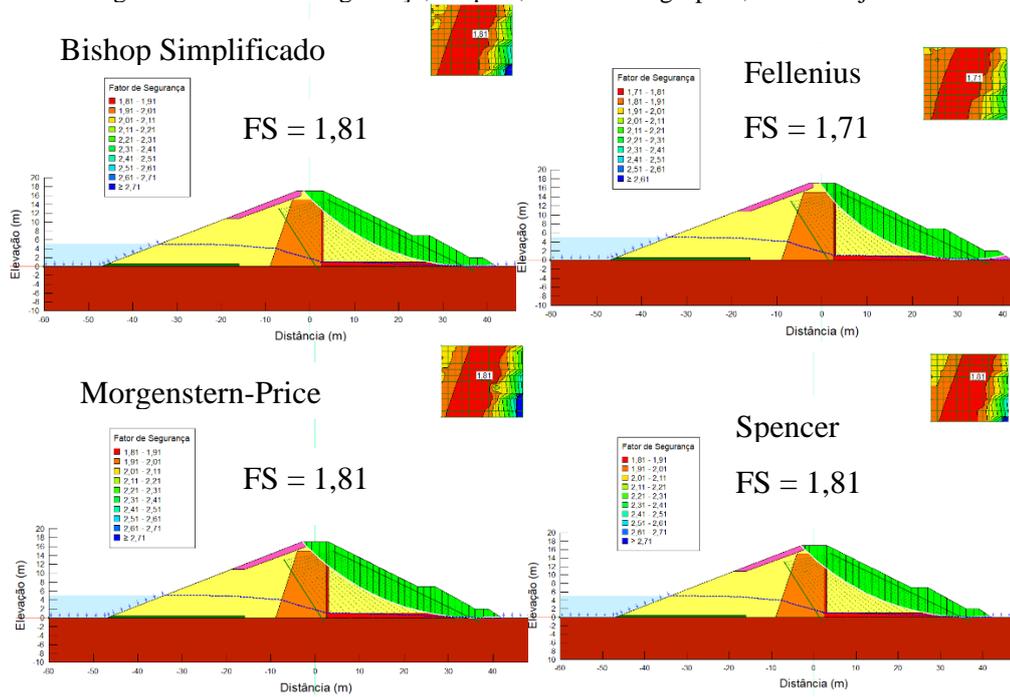
Fonte: Autor, 2024

Figura 58 - Poropressão, Etapa 3, material grupo 1



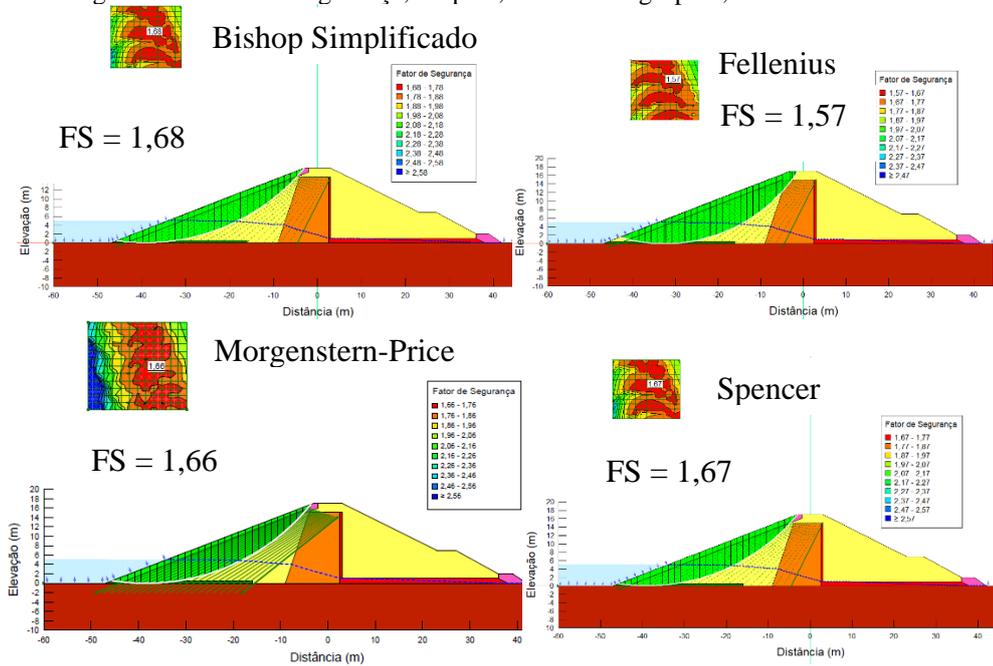
Fonte: Autor, 2024

Figura 59 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 1, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

Figura 60 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 1, talude de montante



Fonte: Autor, 2024

A Figura 61 e a Figura 62 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais do grupo 2 (Tabela 5), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão de água de $1,47 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 63 e a Figura 64 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 61 – Carga total de água, Etapa 3, material grupo 2

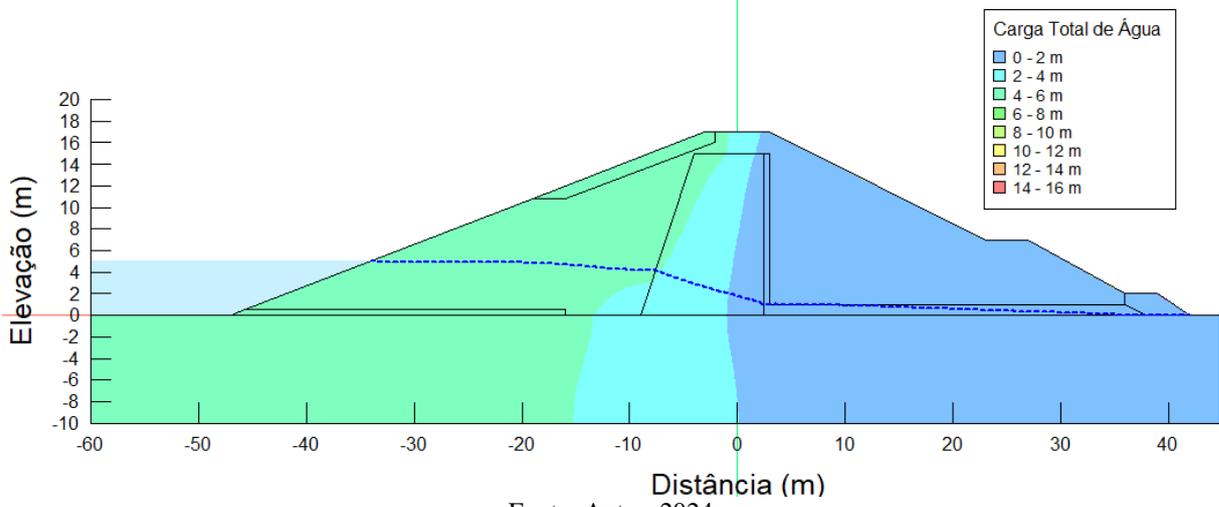


Figura 62 - Poropressão, Etapa 3, material grupo 2

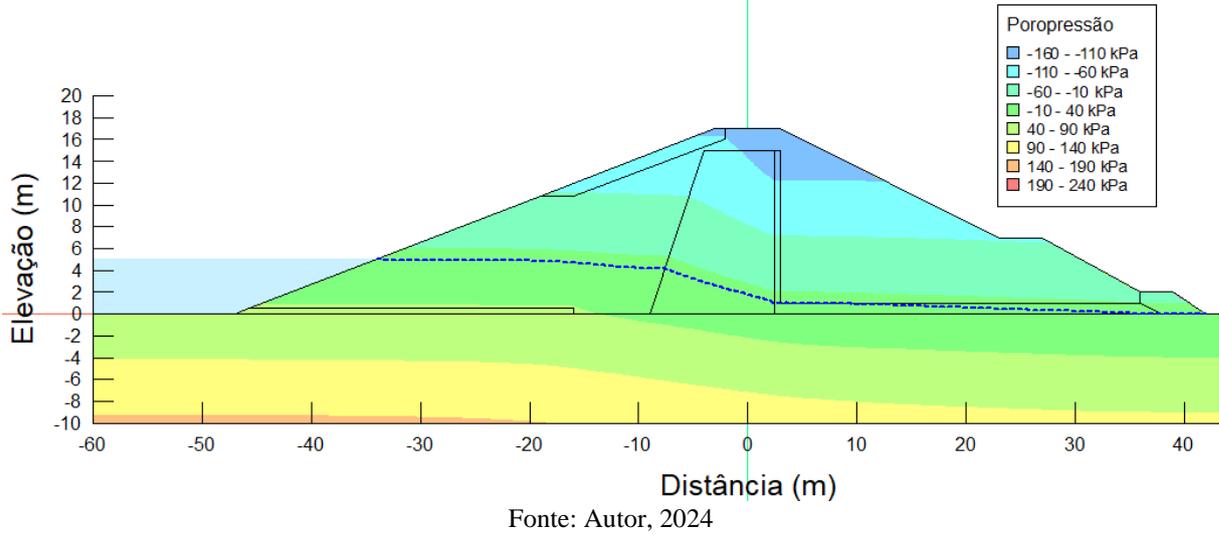


Figura 63 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 2, talude de jusante

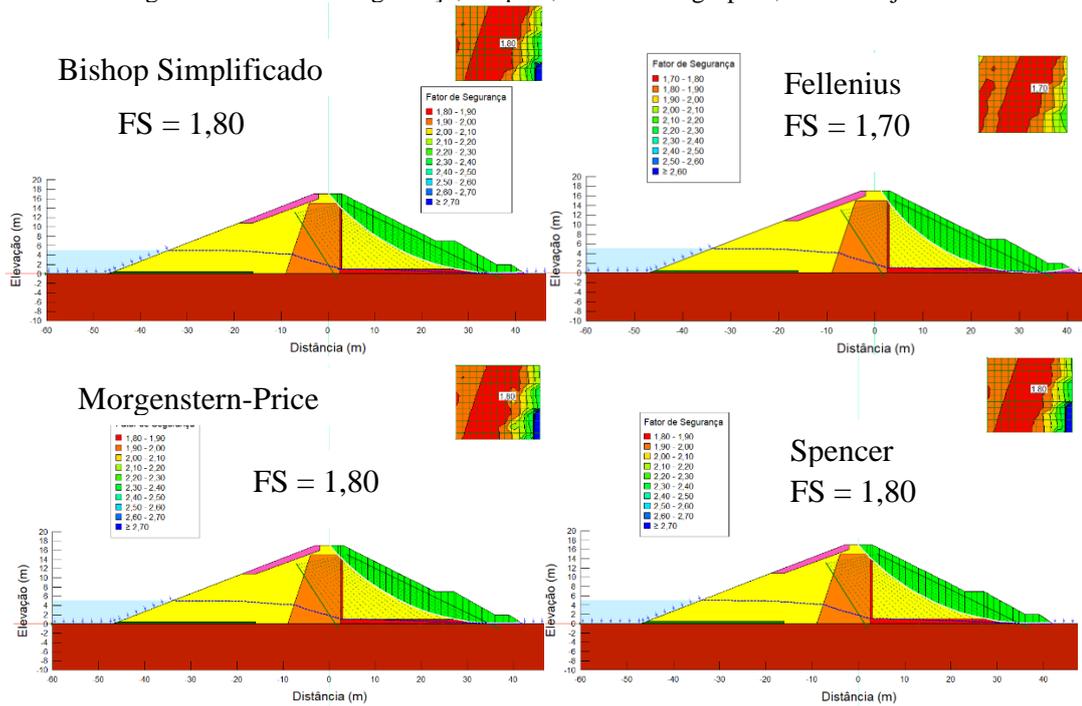
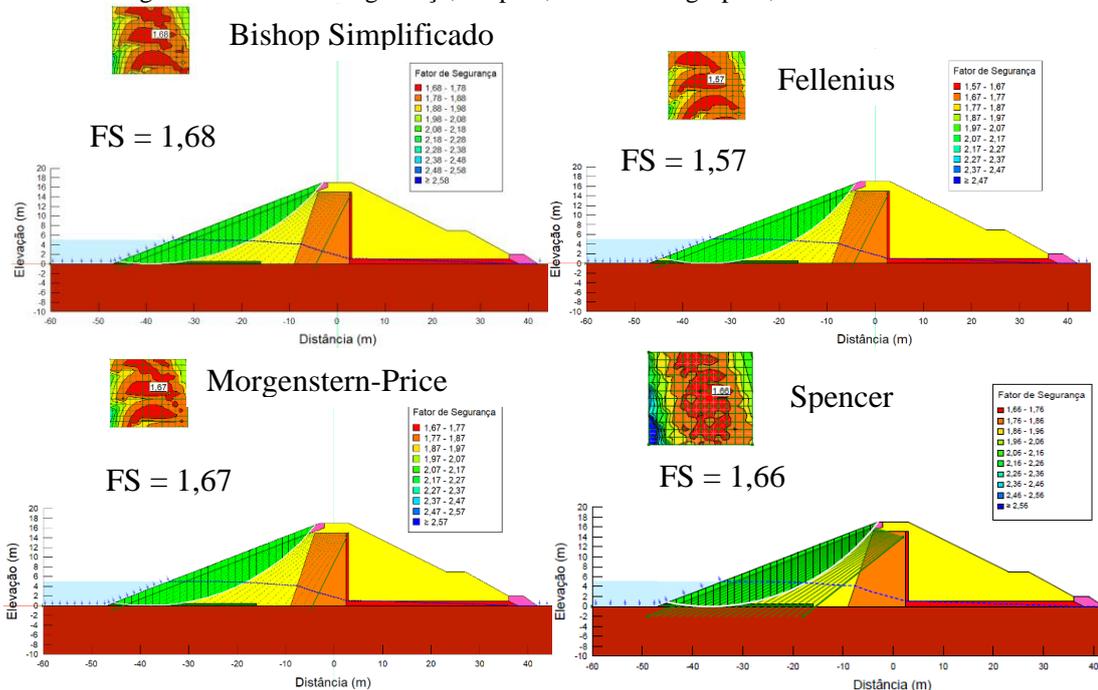
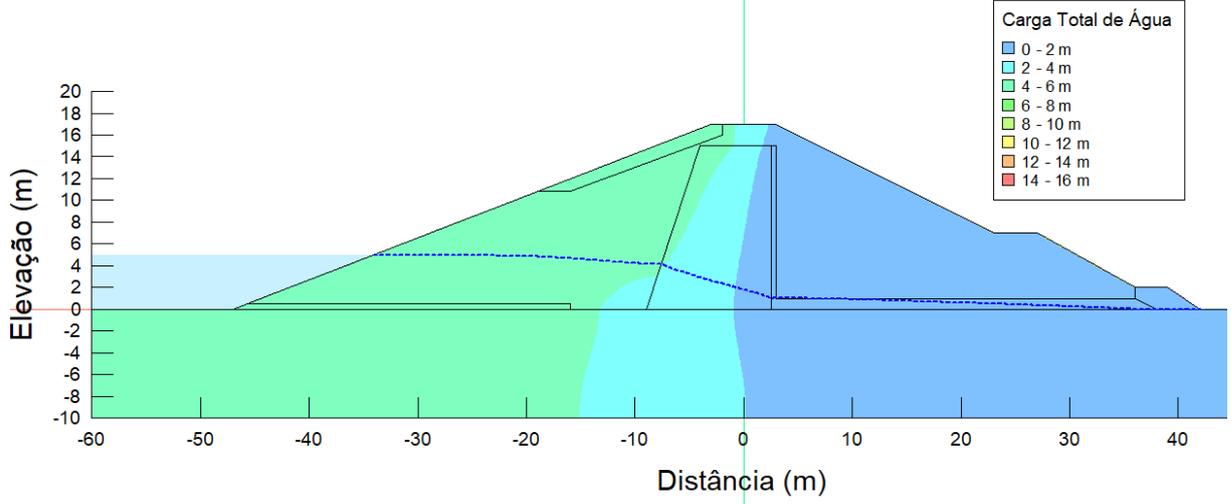


Figura 64 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 2, talude de montante



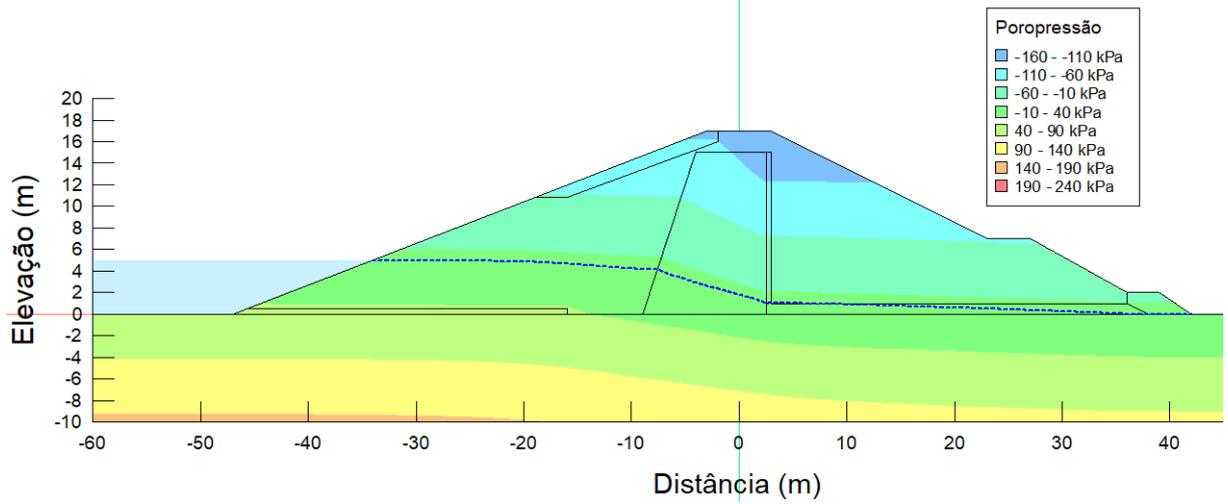
A Figura 65 e a Figura 66 apresentam o comportamento da água no corpo da barragem para os materiais do grupo 3 (Tabela 6), no centro do perfil de análise é constatada uma vazão de água de $1,54e-5 \text{ m}^3/\text{s}$. A Figura 67 e a Figura 68 exibem os resultados das simulações de estabilidade para o talude de jusante e talude de montante, respectivamente.

Figura 65 - Carga total de água, Etapa 3, material grupo 3



Fonte: Autor, 2024

Figura 66 - Poropressão, Etapa 3, material grupo 3



Fonte: Autor, 2024

Figura 67 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 3, talude de jusante

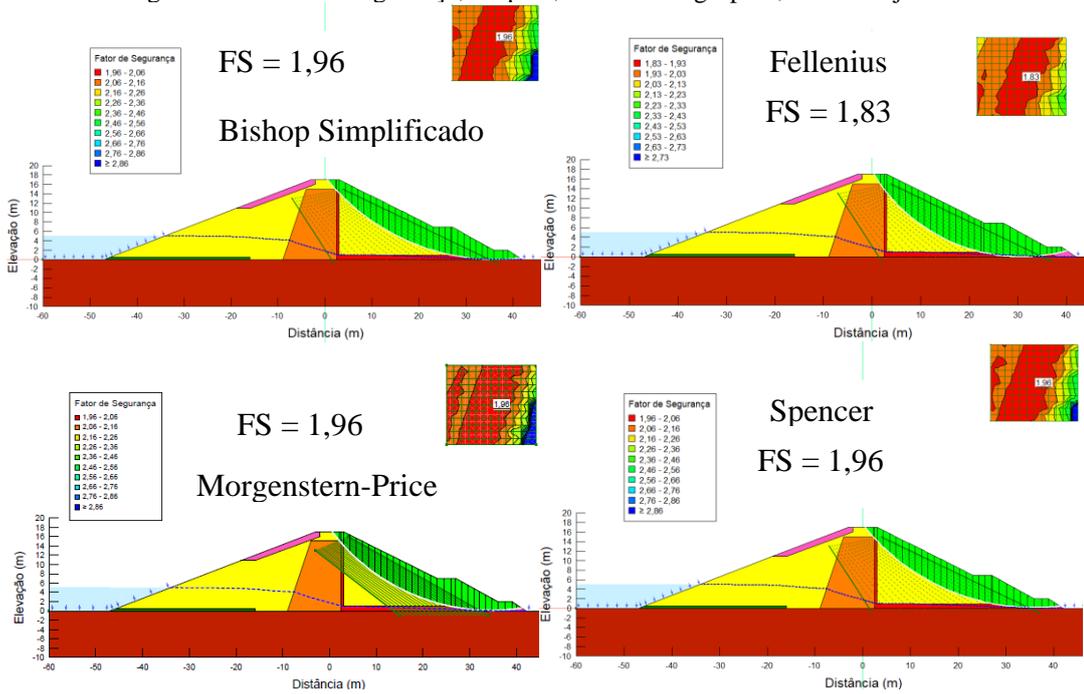
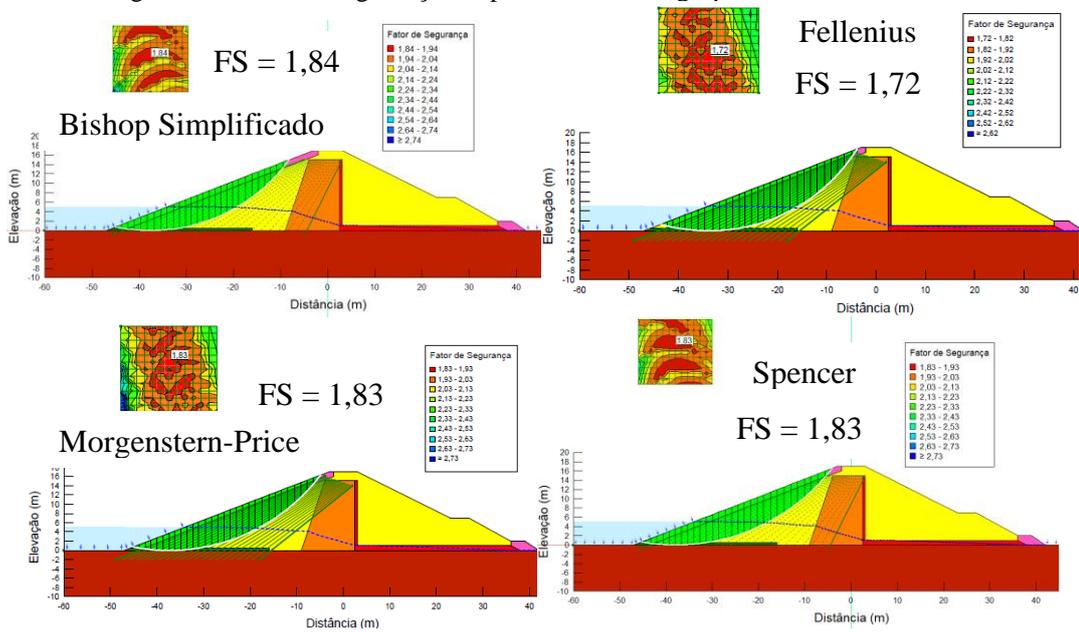


Figura 68 - Fator de Segurança, Etapa 3, material do grupo 3, talude de montante

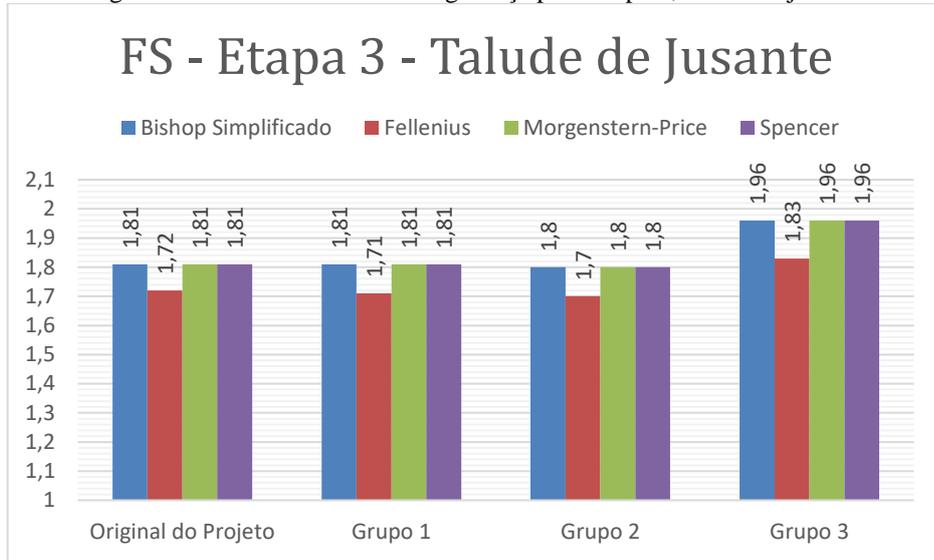


A partir dos resultados obtidos nas simulações de análise de estabilidade realizadas para a etapa de rebaixamento do nível de água é constatado que todos os resultados das análises, para as quatro combinações de materiais de estudo, são maiores que o valor mínimo de fator de segurança exigido pela Eletrobrás (2023), que é 1,1 (Tabela 7). Devido ao rebaixamento do

nível de água da barragem, os valores de fator de segurança para o talude de montante são menores que os resultados obtidos na Etapa 2 – Operação com Nível de Água Máximo

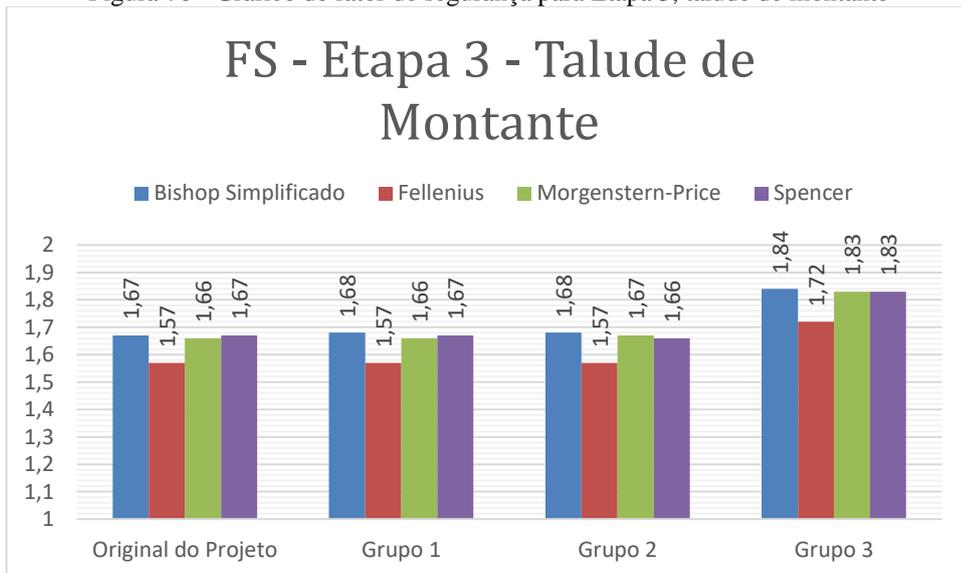
Conforme a Figura 69 e a Figura 70, pode-se constatar que as análises pelos métodos determinísticos rigorosos apresentam valores próximos para todas as combinações de materiais. O método de Bishop Simplificado, para todas as simulações desta etapa, apresenta valores similares aos métodos rigorosos. Porém, o método de Fellenius resulta em valores abaixo dos demais para todas as análises de materiais.

Figura 69 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 3, talude de jusante



Fonte: Autor, 2024

Figura 70 - Gráfico de fator de segurança para Etapa 3, talude de montante



Fonte: Autor, 2024

No estudo da etapa de rebaixamento do nível de água da barragem a combinação de material original da barragem, material do grupo 1 e material do grupo 2 apresentam os menores valores de fatores de segurança para o talude de jusante e para o talude de montante, sendo estes valores similares. As simulações para o material do grupo 3 apresentam valores mais elevados, tornando-se uma opção conservadora para esta etapa de estudo.

Tabela 10 - Quadro resumo de fator de segurança, rebaixamento do nível de água

Combinação de Materiais	Talude	FS - Método determinístico				FS mínimo Eletrobras (2003)	Situação
		Bishop Simplificado	Fellenius	Morgenstern-Price	Spencer		
Original do Projeto	Jusante	1,81	1,72	1,81	1,81	1,1	Estável
	Montante	1,67	1,57	1,66	1,67	1,1	
Grupo 1	Jusante	1,81	1,71	1,81	1,81	1,1	Estável
	Montante	1,68	1,57	1,66	1,67	1,1	
Grupo 2	Jusante	1,80	1,70	1,80	1,80	1,1	Estável
	Montante	1,68	1,57	1,67	1,66	1,1	
Grupo 3	Jusante	1,96	1,83	1,96	1,96	1,1	Estável
	Montante	1,84	1,72	1,83	1,83	1,1	

Fonte: Autor, 2024

5 CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo analisar a segurança da barragem para o uso de diferentes materiais, devido ao objeto de estudo previamente ser planejado para contar um núcleo impermeável de argila. A partir de métodos determinísticos de análise de estabilidade, a barragem teve o seu estudo para três etapas distintas, sendo elas a etapa de final de construção, etapa de operação em nível máximo de água e etapa de rebaixamento de nível de água. Com base nos coeficientes mínimos de segurança estabelecidos pela Eletrobrás (2003), observou-se que todos os grupos de materiais apresentam fatores de segurança maiores que os mínimos para cada etapa de análise.

Para a determinação do fator de segurança para cada etapa de estudo, foram usados os métodos determinísticos citados no item 3.2. Dos métodos não rigorosos, o método de Bishop Simplificado resulta em valores que variam menos de 1% com resultados dos métodos rigorosos na maioria das análises, porém, o método de Fellenius apresenta fator de segurança menor que todos os demais, com diferença de até 0,13 no seu fator de segurança. Os métodos rigorosos, Morgenstern-Price e Spencer, resultaram em valores parecidos em todas as etapas analisadas, com variação de no máximo 0,1 no seu fator de segurança, trazendo uma maior segurança para os seus resultados.

Mesmo com todos os materiais de estudo resultando em valores seguros para a barragem, é preciso analisar se é necessário optar por um material mais resistente ou não. O material original utilizado na barragem e os materiais do grupo 1 apresentam valores semelhantes e menores, quando comparados com as demais combinações de materiais, para a etapa de final de construção e a etapa de rebaixamento de nível de água. Porém, na etapa de operação com nível máximo de água os materiais do grupo 1 resultam em valores menores de coeficiente de segurança. Os materiais do grupo 2 e do grupo 3 são as combinações que apresentam valores maiores nas 3 etapas de análise, sendo estes resultados mais conservadores quanto a segurança da barragem analisada.

Comparando os resultados obtidos para cada combinação de material nas etapas de análise, a escolha do material homogêneo utilizado na barragem mostra-se eficiente, sendo que o fator de segurança alcançado situa-se acima do fator de segurança mínimo estipulado, o que não representa um resultado conservador. O grupo de materiais 1, apresenta um valor mais eficiente para a etapa de operação com nível de água máximo, tornando-se uma boa opção para o corpo da barragem. A escolha do material utilizado teve por sua vez o fator de haver uma

jazida próxima com material arenoso de boa qualidade, o que pode facilitar e até mesmo baratear a construção da barragem de estudo. Para a viabilidade do uso dos materiais do grupo 1, com a argila compactada impermeável, será preciso viabilizar o transporte deste material.

Finalmente, este trabalho trata-se de uma análise comparativa de fatores de segurança para materiais distintos em cada etapa de uma barragem. O método empregado nesta pesquisa que variou o material da barragem, além das análises dos respectivos fatores de segurança, demonstrou uma grande importância para a compreensão do comportamento do perfil da barragem de estudo. As simulações de estabilidade executadas durante esta pesquisa demonstraram que todos os materiais de estudo podem ser utilizados para a construção da barragem em questão, fazendo com que seja escolhida a combinação de material mais adequada para compor o corpo da barragem.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para pesquisas futuras, a partir dos estudos realizados nesta pesquisa e com possibilidade de um estudo mais aprofundado em barragem de terra, destacam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar análises de estabilidades de estabilidade com mais métodos determinísticos rigorosos;
- Estudo de propriedades de materiais de jazidas próximas, para fim de comparação com o material adotado para a barragem;
- Analisar comportamento da barragem para o rebaixamento total do nível de água da barragem;
- Realizar estudo aprofundado do comportamento da água no corpo da barragem

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-13028: Mineração – Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água**. Rio de Janeiro. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens volume I**: instruções para apresentação do Plano de Segurança da Barragem. Brasília, 2016c.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens volume II**: Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem. Brasília, 2016c.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens 2020**. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/snisp/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf>>

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa Aneel Nº 1.064, de 2 de Maio de 2023**. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231064.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2024.

ALVES, Mayk. **Barragem é uma construção que serve para represar águas correntes**. 2019. Disponível em: Barragem é uma construção que serve para represar águas correntes. Acesso em: 04 maio 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682 – Estabilidade de taludes**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSIS, A.P. **Apostilas de Barragens**. Brasília: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2003.

Carvalho, D. **BARRAGENS: UMA INTRODUÇÃO PARA GRADUANDOS**. Campinas. 2011.

CORREIO DO PARÁ (Pará). Redação. **Como as chuvas prejudicaram e ainda ameaçam as barragens de rejeitos?** 2022. Disponível em: <https://correiodopara.com.br/como-as-chuvas-prejudicaram-e-ainda-ameacam-as-barragens-de-rejeitos/>. Acesso em: 06 maio 2024.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos. 2004.

DIAS, F. B. **Avaliação de Estabilidade de Uma Barragem Alteada Pelo Método de Montante Por Diferentes Metodologias de Cálculo de Fator de Segurança: Comparação Determinística**. Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2021.

DINIZ, Moacir C. B. **Projeto e execução de sistema de contenção em gabião: estudo de caso da obra Varandas Residencial Clube em Valparaíso de Goiás**. Brasília, 2015. 63 f.

ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Brasília, 2003.

FERNANDES, M. M. **Mecânica dos Solos: Introdução à Engenharia Geotécnica**. 1ª edição, Porto, FEUP edições, 2011.

FREITAS, Giovana Bastos de. **MODELAGEM DE ESTRUTURA DE CONTENÇÃO DO TIPO SOLO GRAMPEADO EM FILITO COM OS SOFTWARES SLOPE/W E SLIDE2**. 2021. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021. Disponível em: <https://tec.uff.br/wp-content/uploads/sites/719/2021/10/TCC-Giovana-Bastos-de-Freitas-Versão-Final.pdf>. Acesso em: 04 maio 2024.

GEO-SLOPE. **SEEP/W for seep analysis** – User’s Guide. GEO-SLOPE International Ltd. Canadá. 2001b.

GEO-SLOPE International Ltd. **Stability Modeling with SLOPE/W**. Manual Técnico. Alberta, Canadá, 2012.

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

GERSCOVICH, D. M. S. **Apostila estabilidade de taludes**. Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GODOY, N. S. **Fundações: Notas de Aula, Curso de Graduação**. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos - USP 1972.

GOMES, Thalyta Bruna Souza. **MODELAGEM E CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DA BARRAGEM DO ASSENTAMENTO OLIVENCIA LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE QUIXADÁ/CE**. 2019. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/49520/1/2019_tcc_tbsgomes.pdf. Acesso em: 04 abr. 2024.

GUSMÃO FILHO, J. **Desempenho de Obras Geotécnicas**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2006.

JABER, Rodrigo. **ESTUDO DA PROBABILIDADE DE RUPTURA DE UMA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EM GABIÕES, LOCALIZADO EM GOIÂNIA - GOIÁS**. 2011. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/ESTUDO_DA_PROBABILIDADE_DE_RUPTURA_DE_UMA ESTRUTURA_DE_CONTENÇÃO_EM_GABIÕES__LOCALIZADO_EM_GOIÂNIA_-_GOIÁS.pdf. Acesso em: 06 maio 2024.

MACCAFERRI (org.). **Guia para elaboração de Projetos**. Disponível em: <https://intranet.maccaferri.com.br/downloads/software/por/GuiaProjetosMacstars2000.pdf>. Acesso em: 18 maio 2024.

MARQUES FILHO, Pedro Lagos: **Barragens e reservatórios**. In **Geologia de Engenharia** / editores Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves de Brito – São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, (397 a 418 p.), 1998.

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

MORAES JR, L.J de, 1975, **Algumas considerações práticas a respeito de estabilidade de taludes**, Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, Marcélia Aparecida Marques de. **COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE E ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES**. 2023. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/5488/3/MONOGRAFIA_ComparaçãoMétodosEquilíbrio.pdf. Acesso em: 06 maio 2024.

OLIVEIRA, Jader Roosevelt de Carvalho. **Contribuição para a Verificação e Controle da Segurança de Pequenas Barragens de Terra**. 2008. 52 v. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

PINTO, C. DE S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas**. 3. ed. São Paulo, SP.: Oficina dos Textos, 2006.

POSSAN, Edna. **Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais: Barragens de Concreto**. Curso Segurança de Barragens. ANA, 2013.

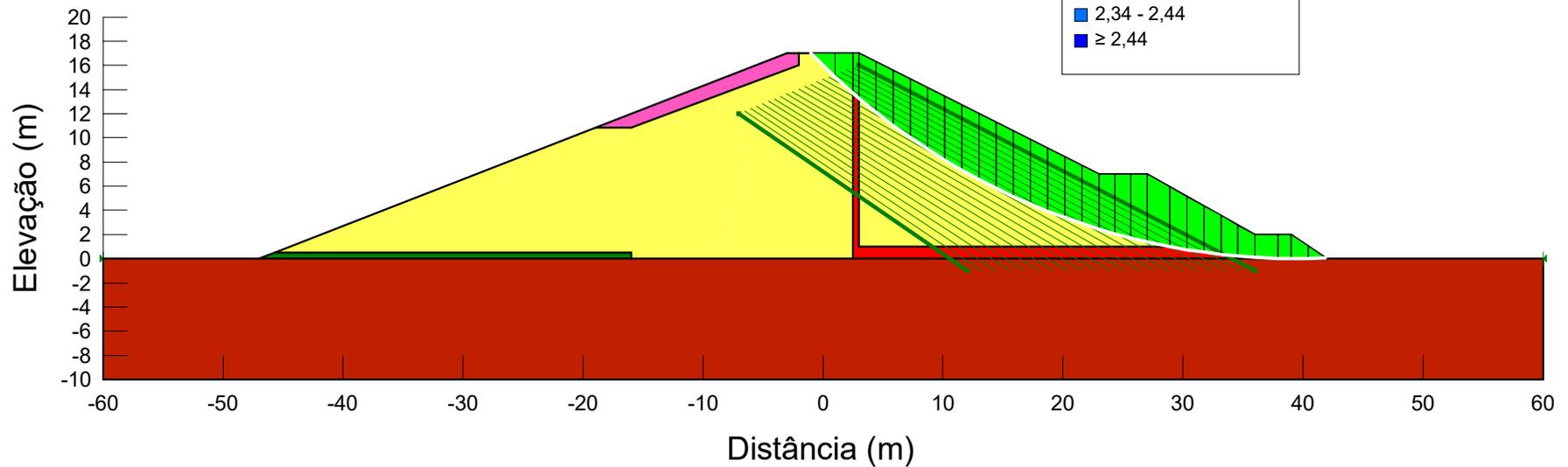
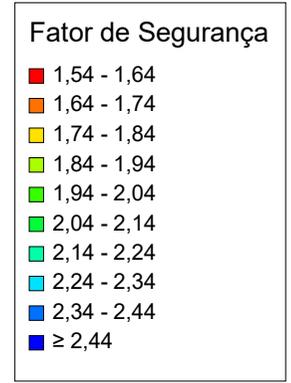
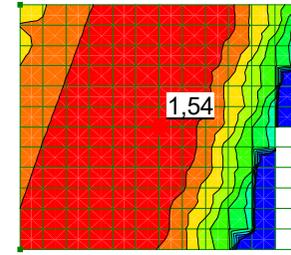
ROCSCIENCE. **Documentation and Theory Overview**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide2/overview>. Acesso em: 18 maio 2024.

RODRIGUES, C. J. B. **Análise de Fiabilidade de Taludes em Solos**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Universidade do Minho UMINHO, Guimarães, 2014.

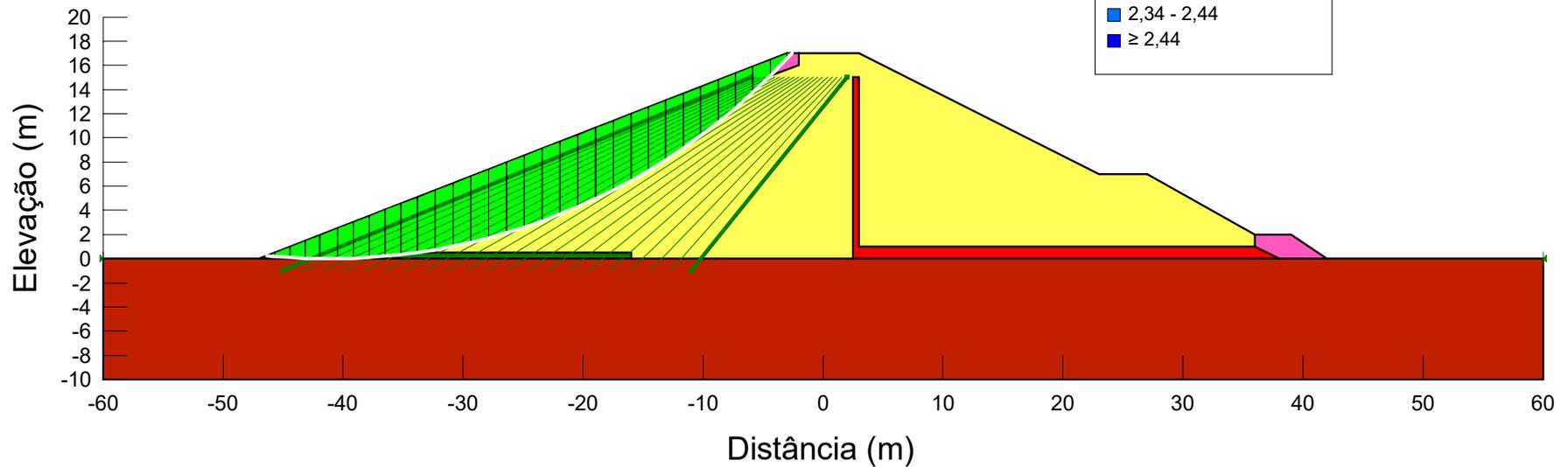
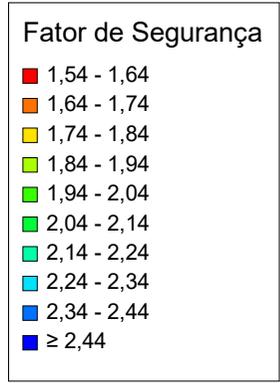
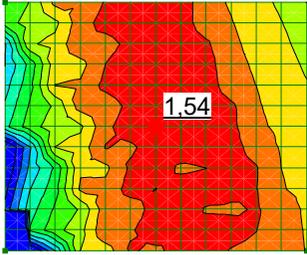
SANTOS, Daniel Batista. **ESTABILIDADE GLOBAL TRANSIENTE DE TALUDES PELO MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE SOB INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLO NÃO SATURADO**. 2021. 83 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2021. Disponível em: file:///C:/Users/user4/Downloads/2021_DanielBatistaSantos_tcc.pdf. Acesso em: 22 abr. 2024.

SOUZA NETO, Danisete Pereira de; CARNEIRO, Hayanne Crystinne de Oliveira. **RECOMENDAÇÕES DE ESTABILIZAÇÃO ATRAVÉS DA TÉCNICA DE SOLO GRAMPEADO, VISANDO A REDUÇÃO DE RISCOS DE DESLIZAMENTOS DE UMA ENCOSTA EM CAMARAGIBE-PE**. 2014. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/45825?mode=full>. Acesso em: 12 maio 2024.

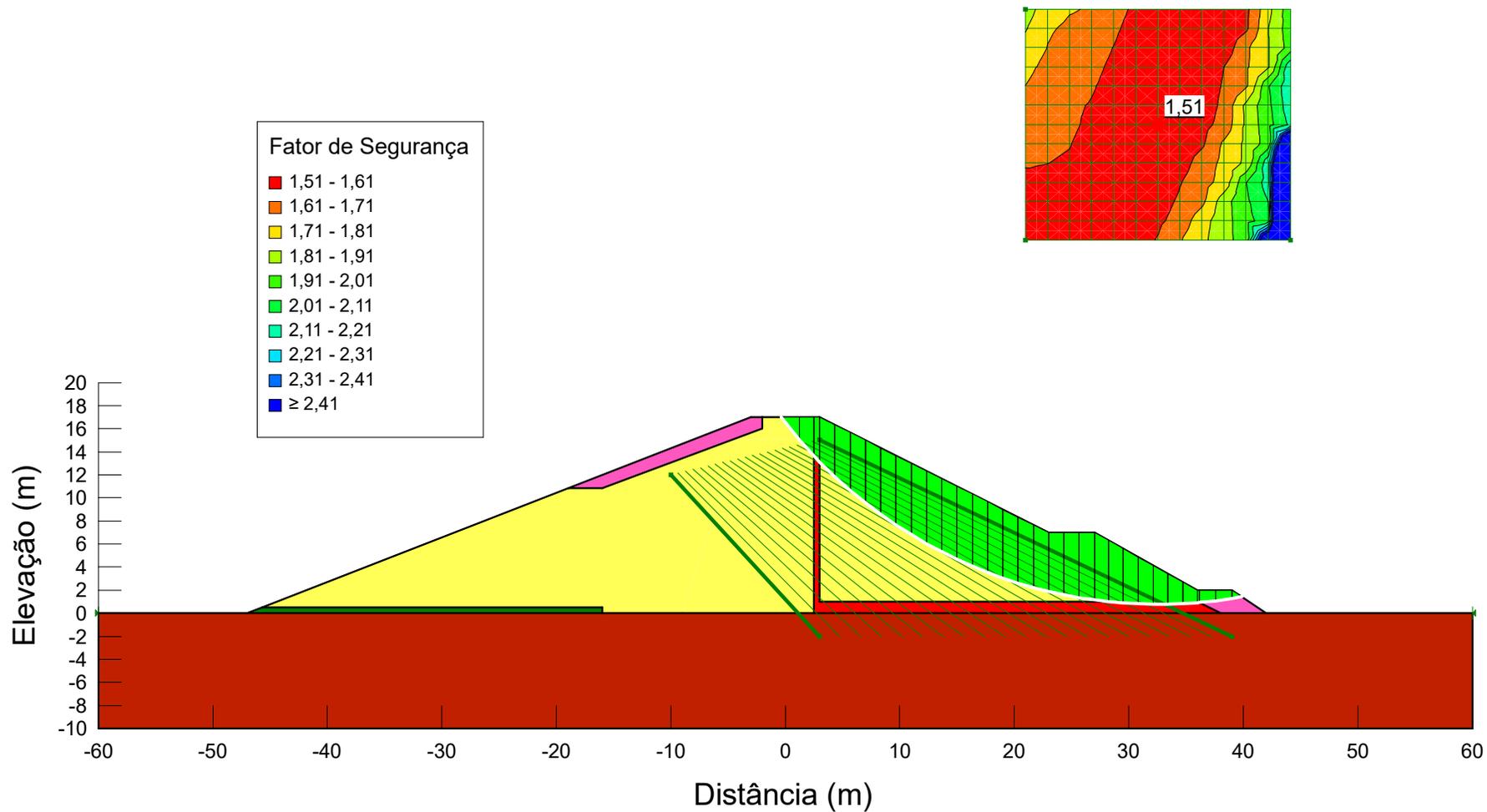
APÊNDICE A- SIMULAÇÕES DE ESTABILIDADE



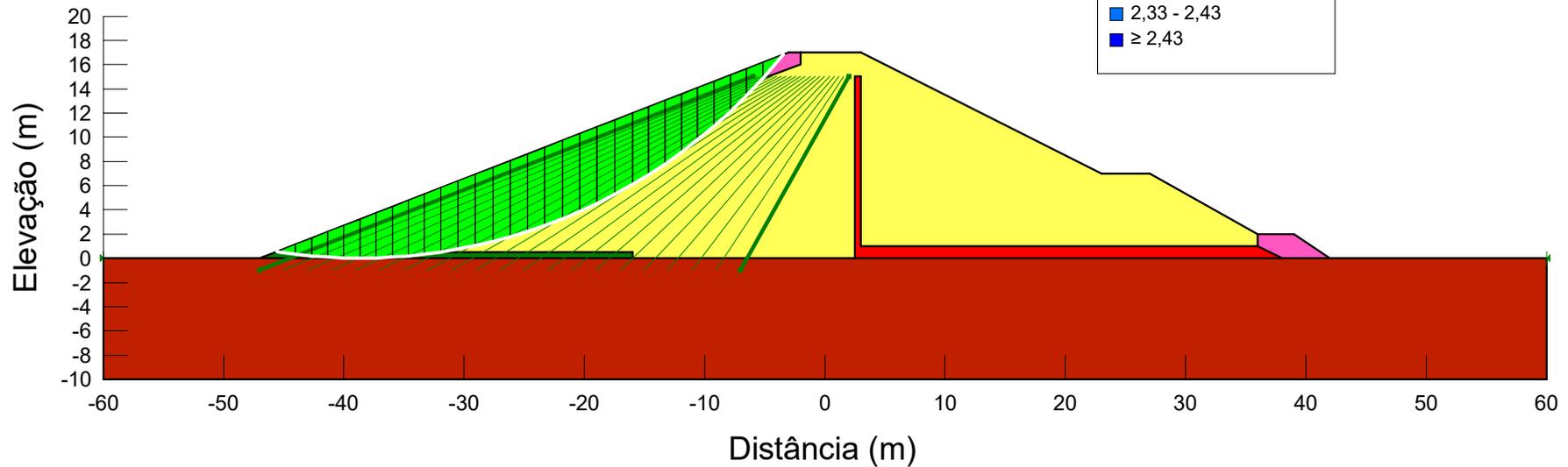
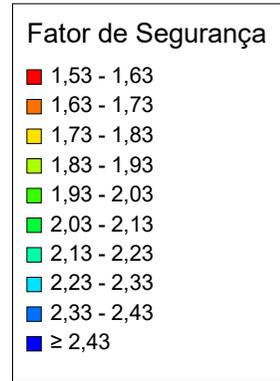
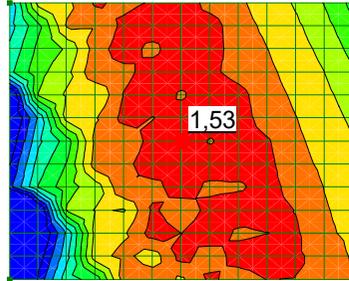
Final de construção - Material original - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



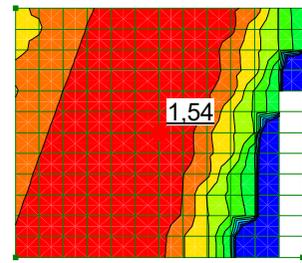
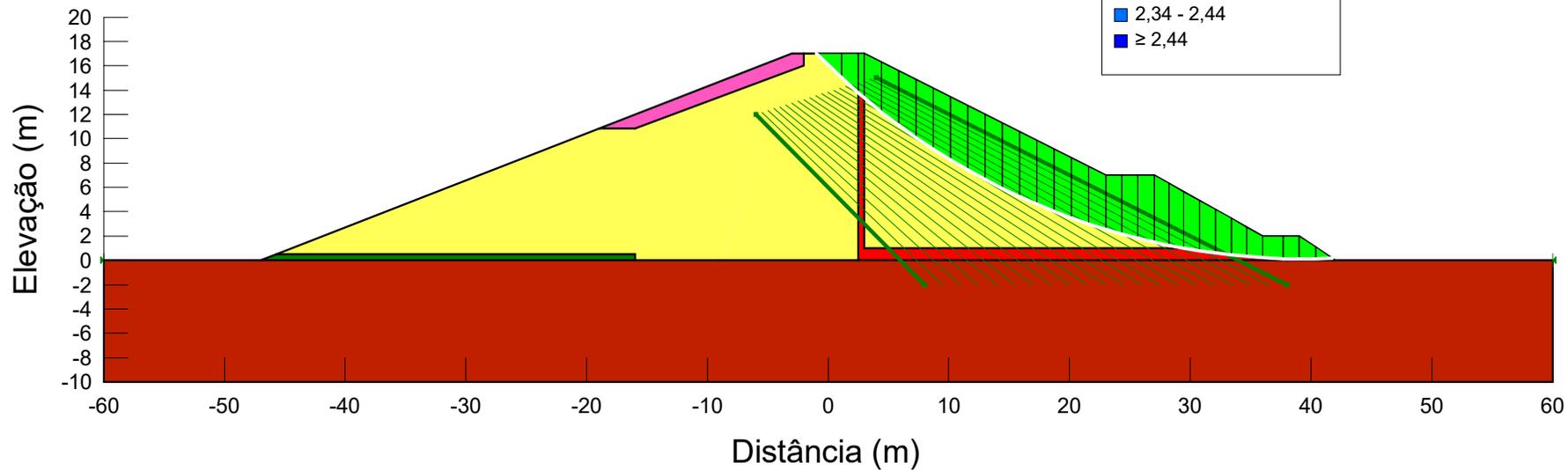
Final de construção - Material original - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



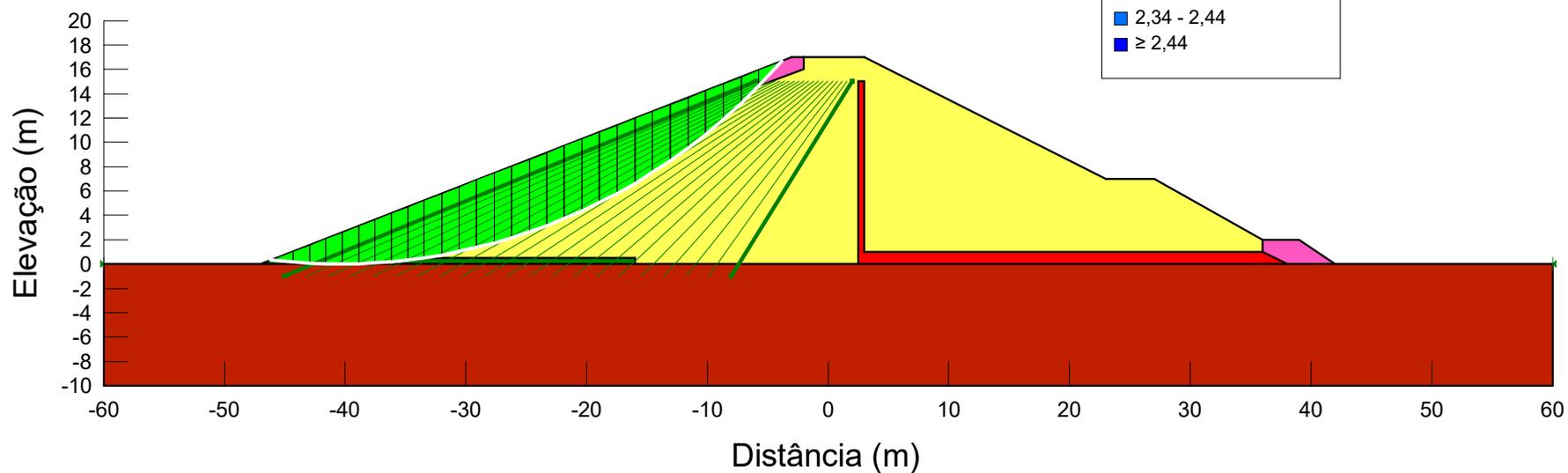
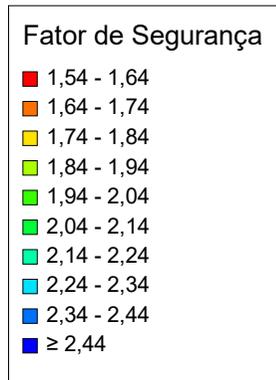
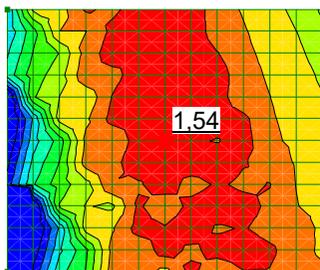
Final de construção - Material original - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



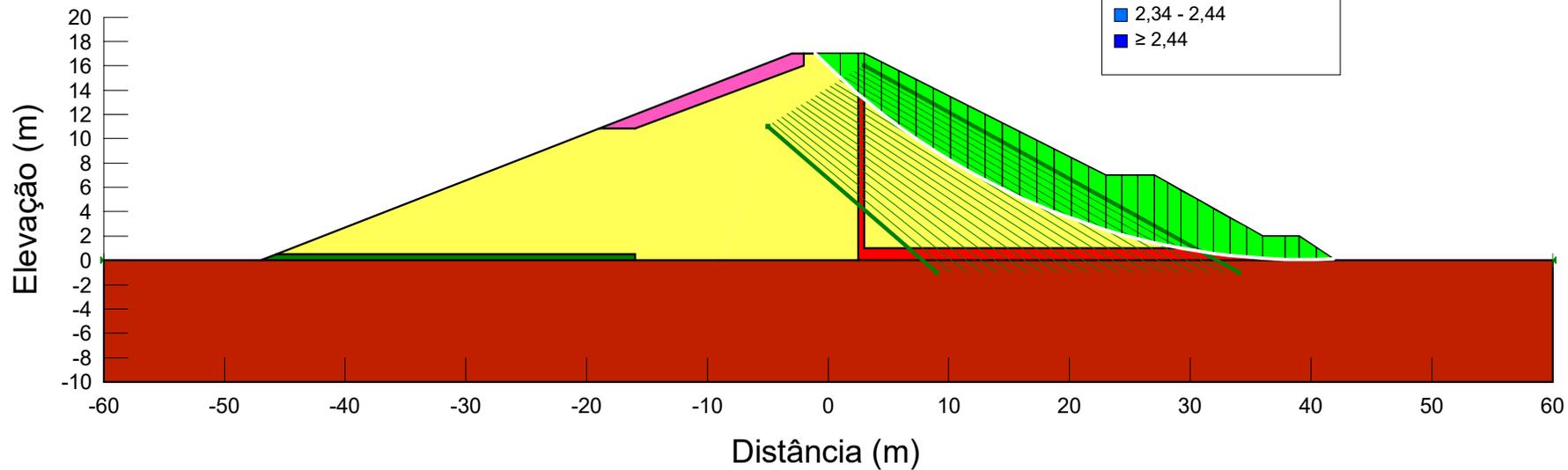
Final de construção - Material original - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



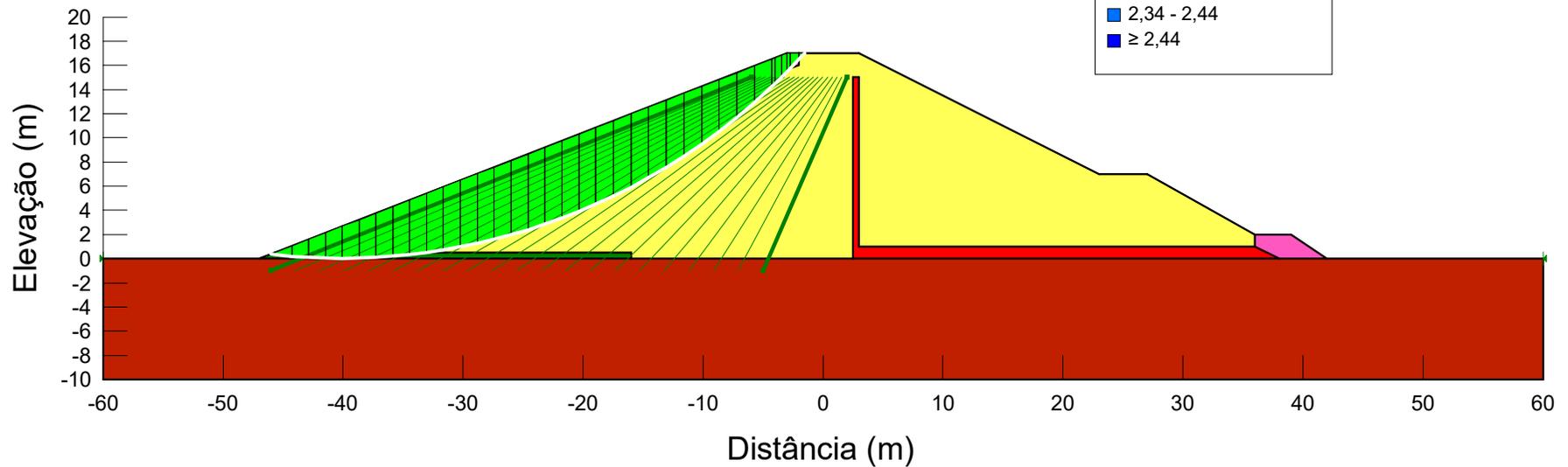
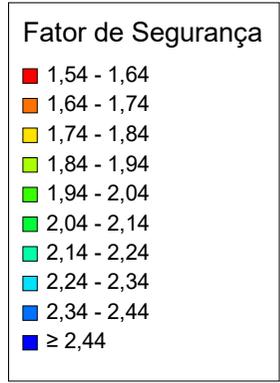
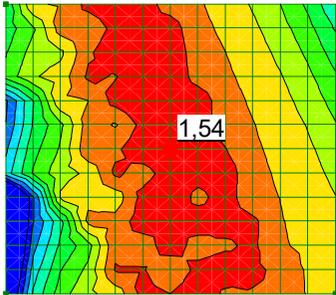
Final de construção - Material original - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



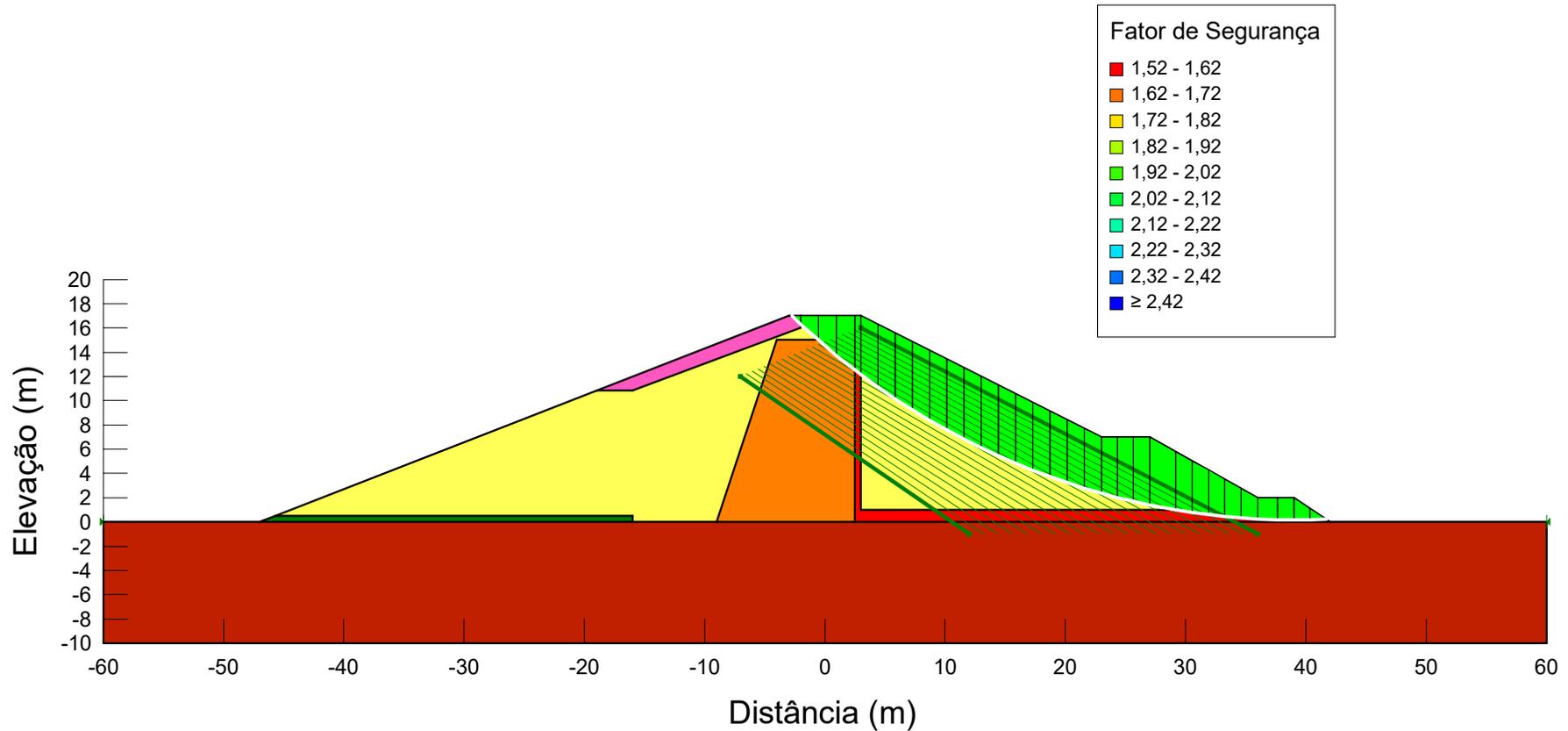
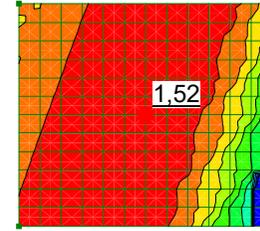
Final de construção - Material original - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



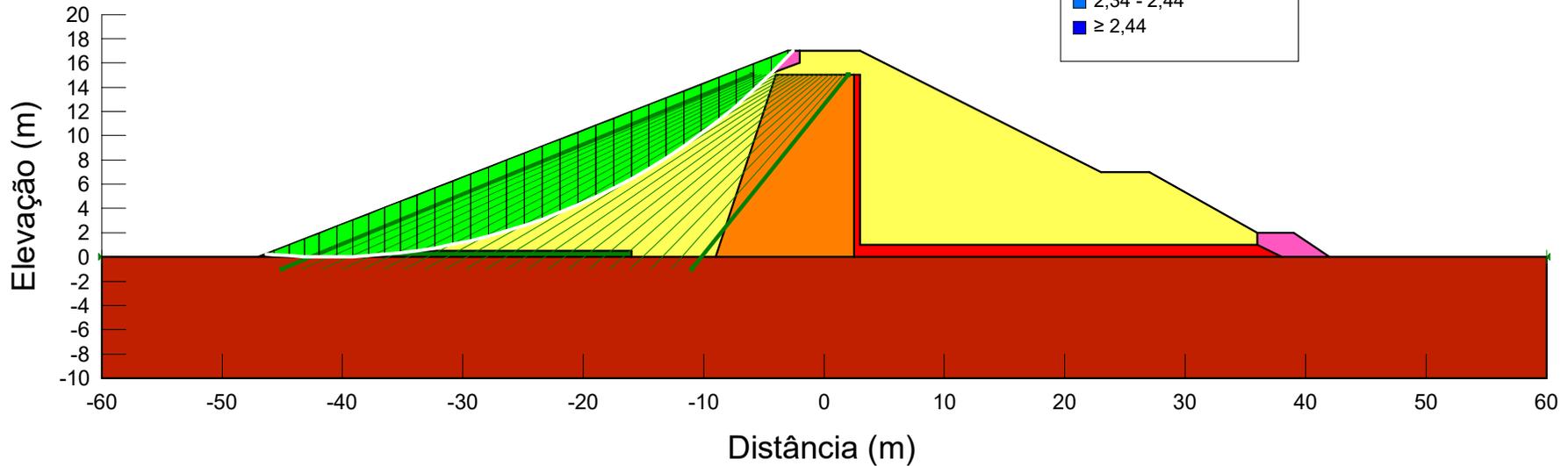
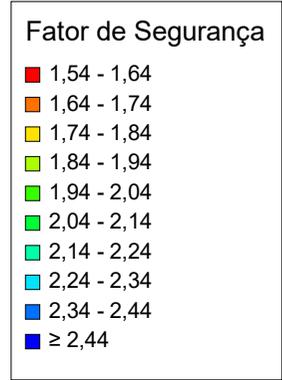
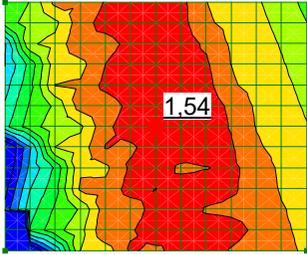
Final de construção - Material original - Jusante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



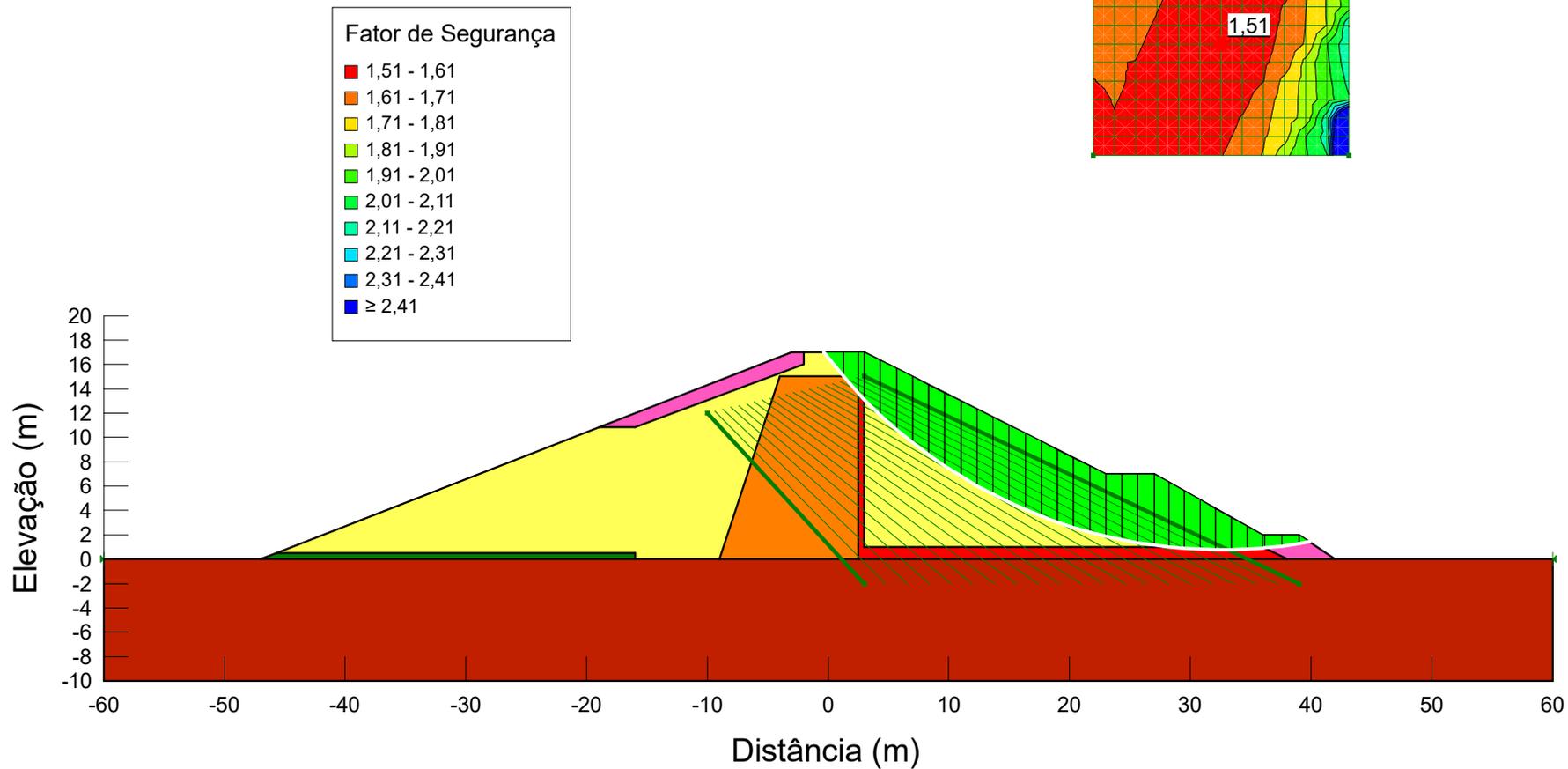
Final de construção - Material original - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



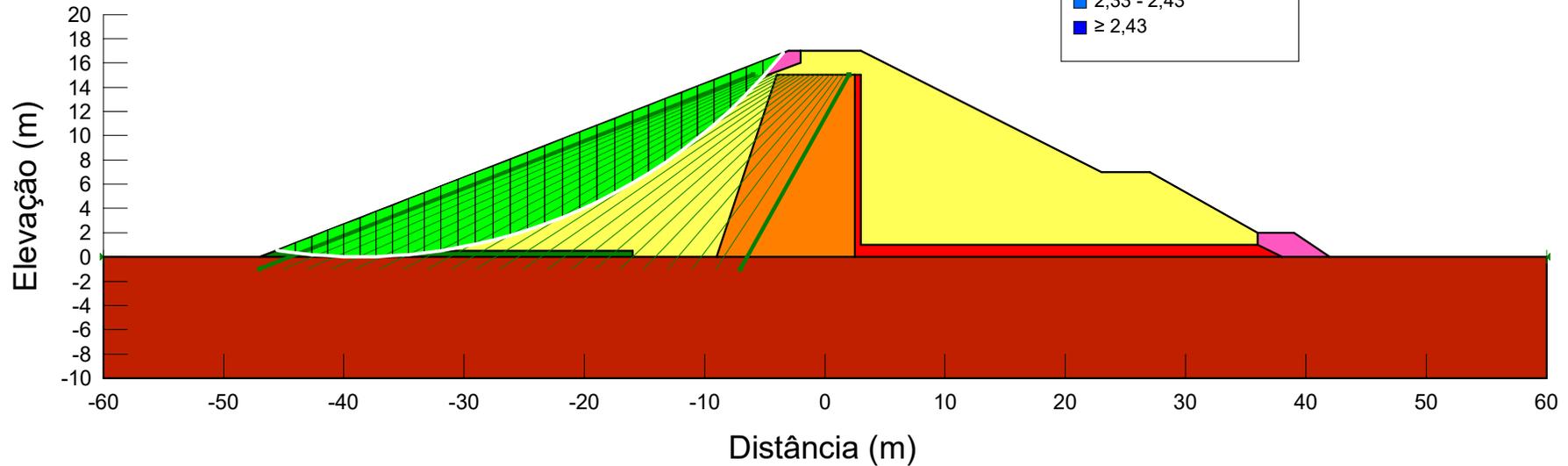
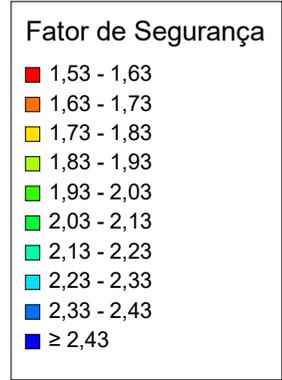
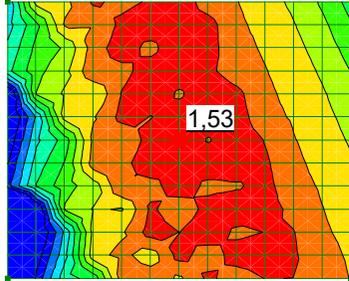
Final de construção - Material Grupo 1 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



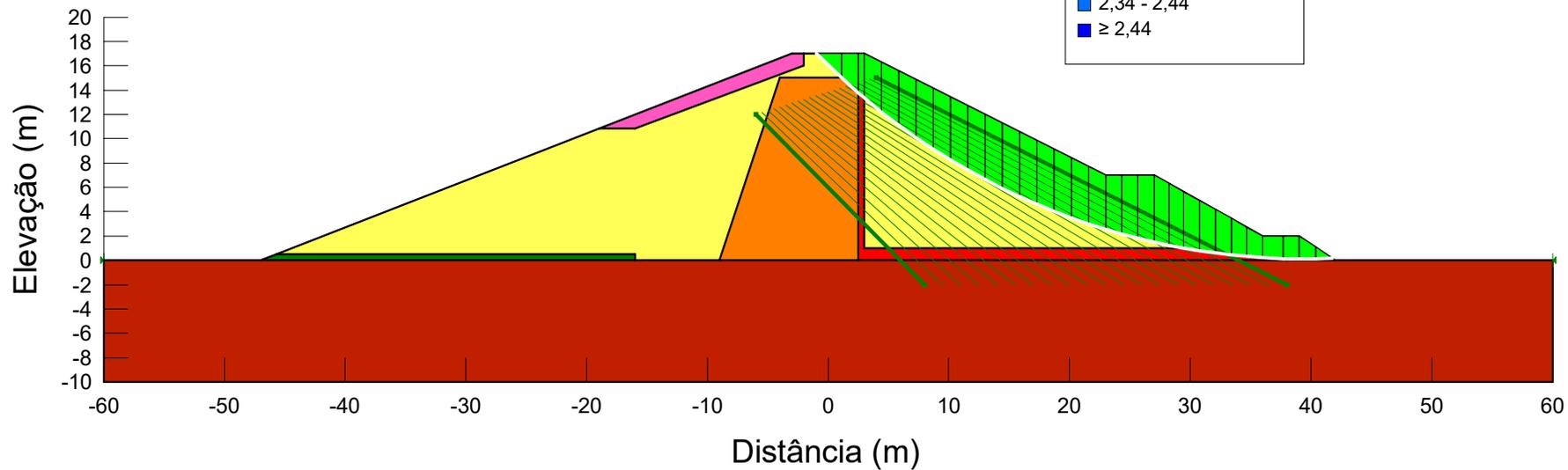
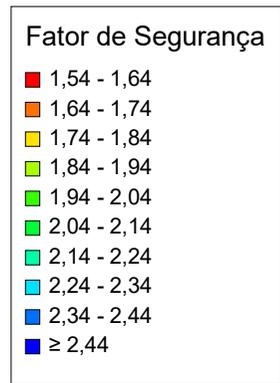
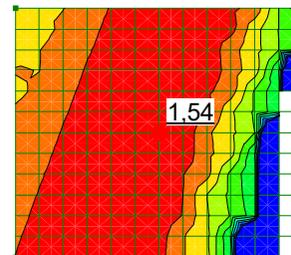
Final de construção - Material Grupo 1 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



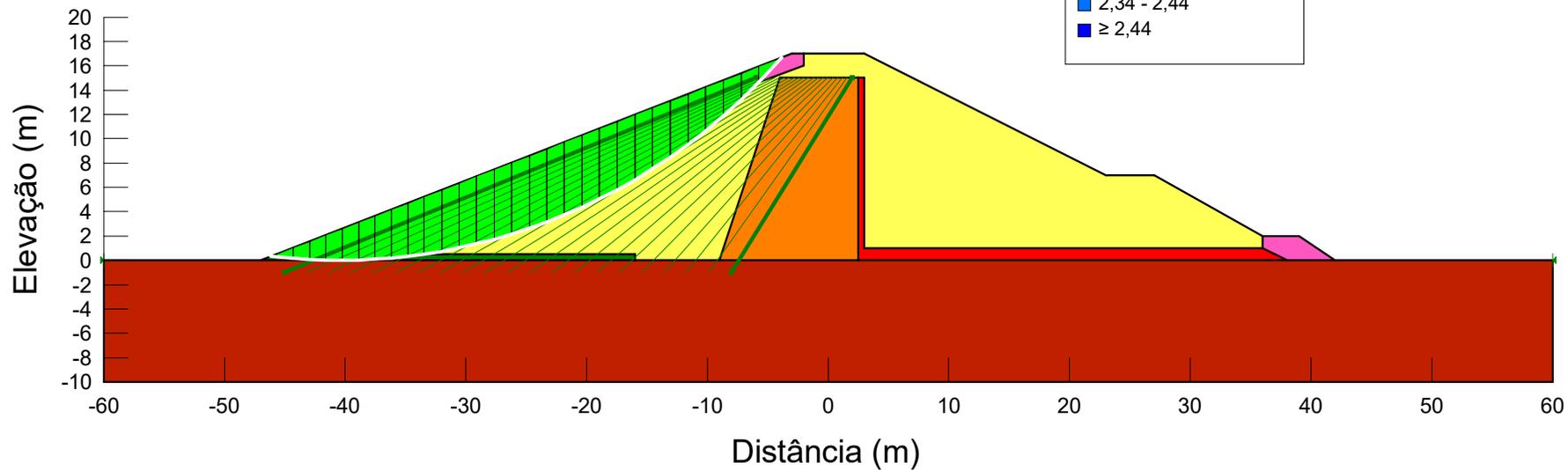
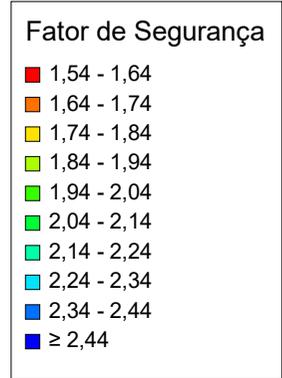
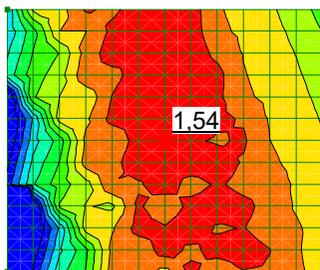
Final de construção - Material Grupo 1 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



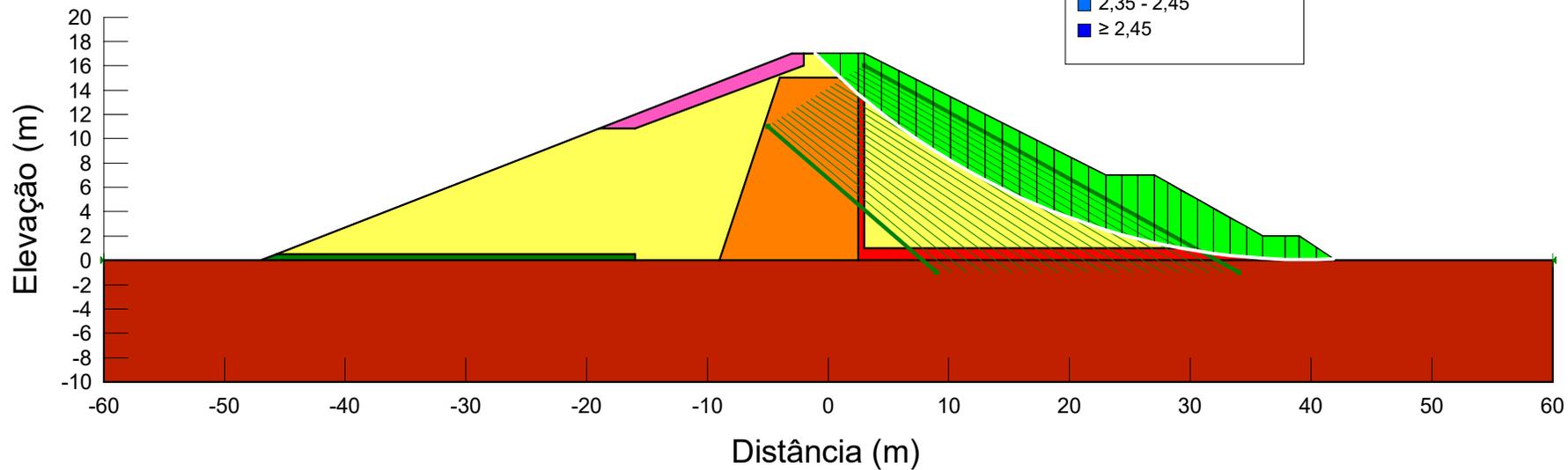
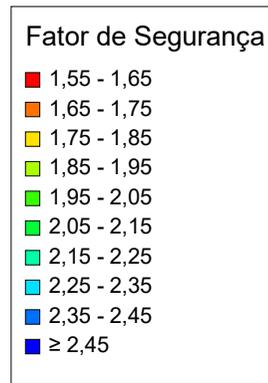
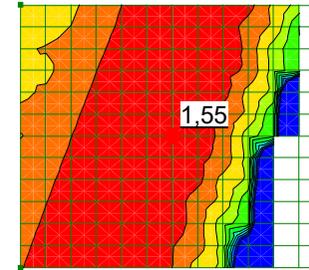
Final de construção - Material Grupo 1 - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



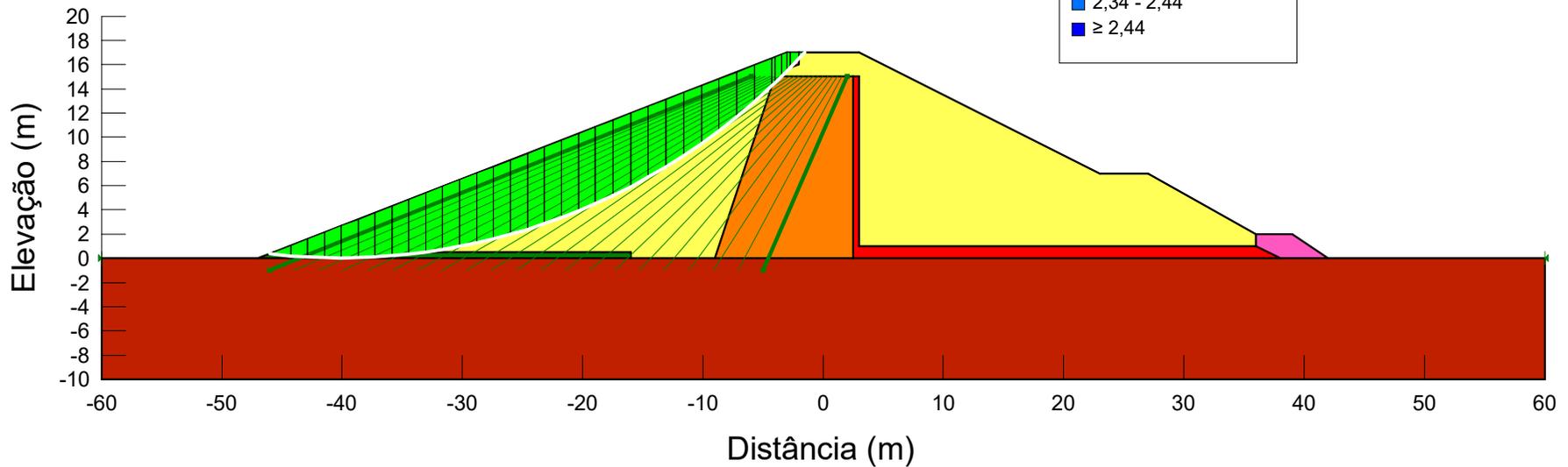
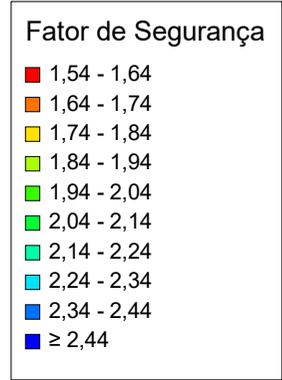
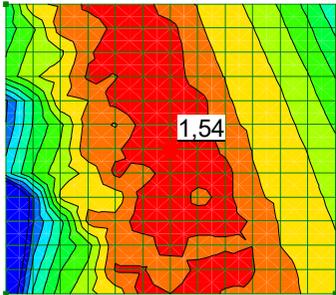
Final de construção - Material Grupo 1 - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



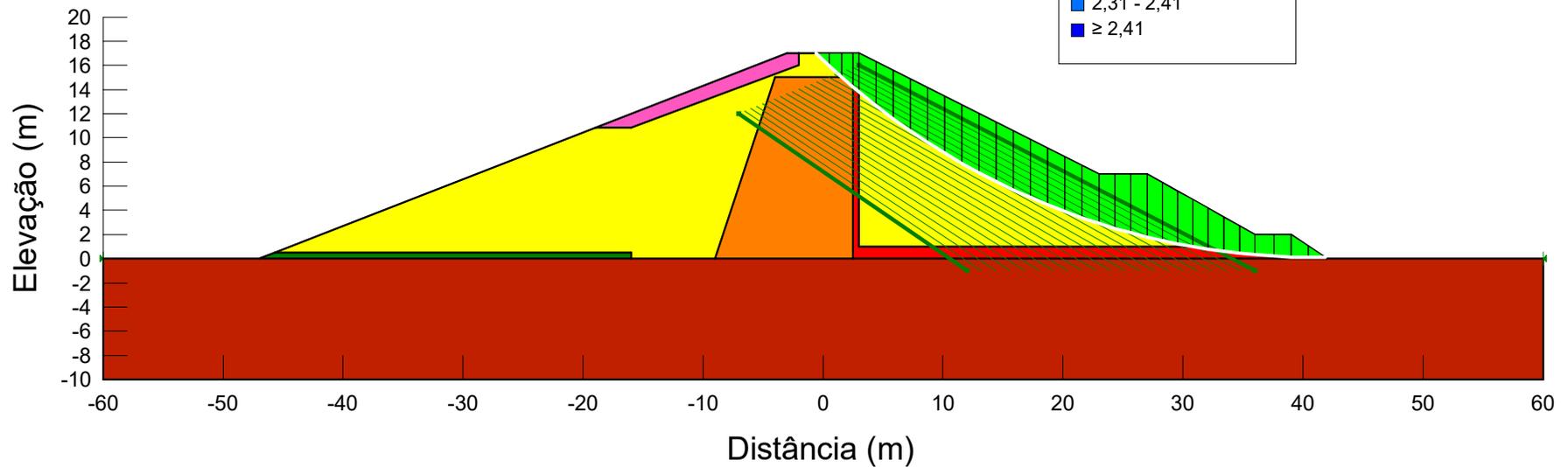
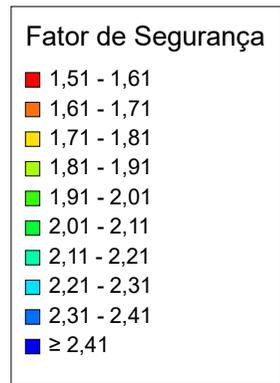
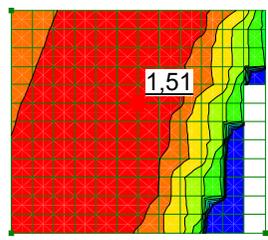
Final de construção - Material Grupo 1 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



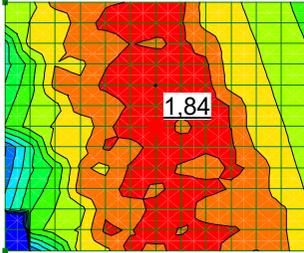
Final de construção - Material Grupo 1 - Jusante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



Final de construção - Material Grupo 1 - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550

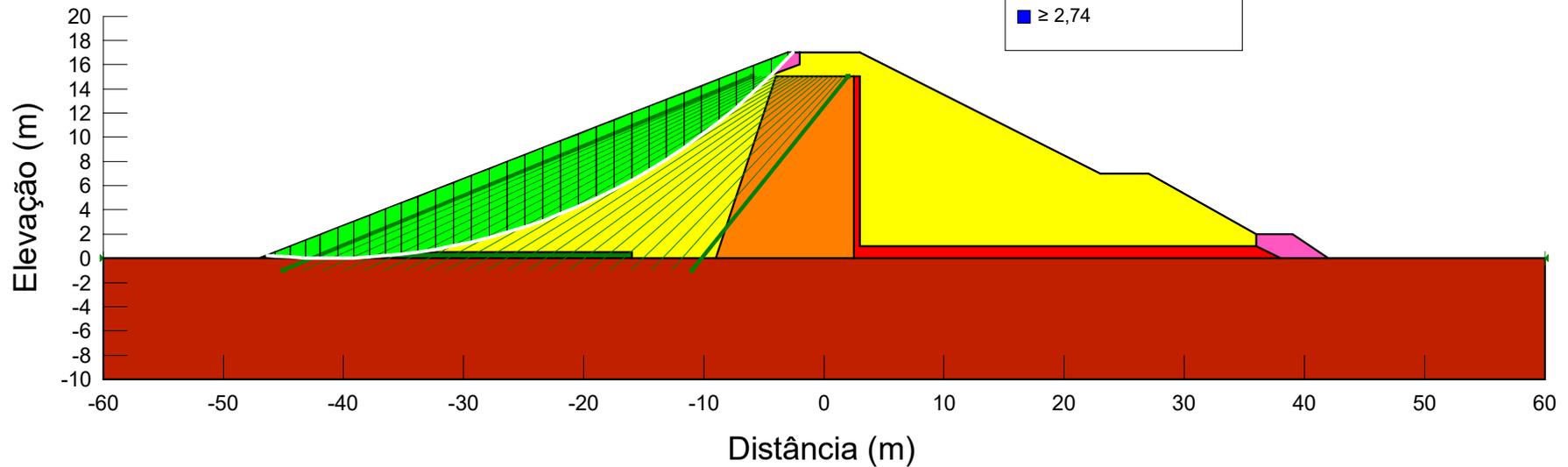


Final de construção - Material Grupo 2 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



Fator de Segurança

- 1,84 - 1,94
- 1,94 - 2,04
- 2,04 - 2,14
- 2,14 - 2,24
- 2,24 - 2,34
- 2,34 - 2,44
- 2,44 - 2,54
- 2,54 - 2,64
- 2,64 - 2,74
- $\geq 2,74$

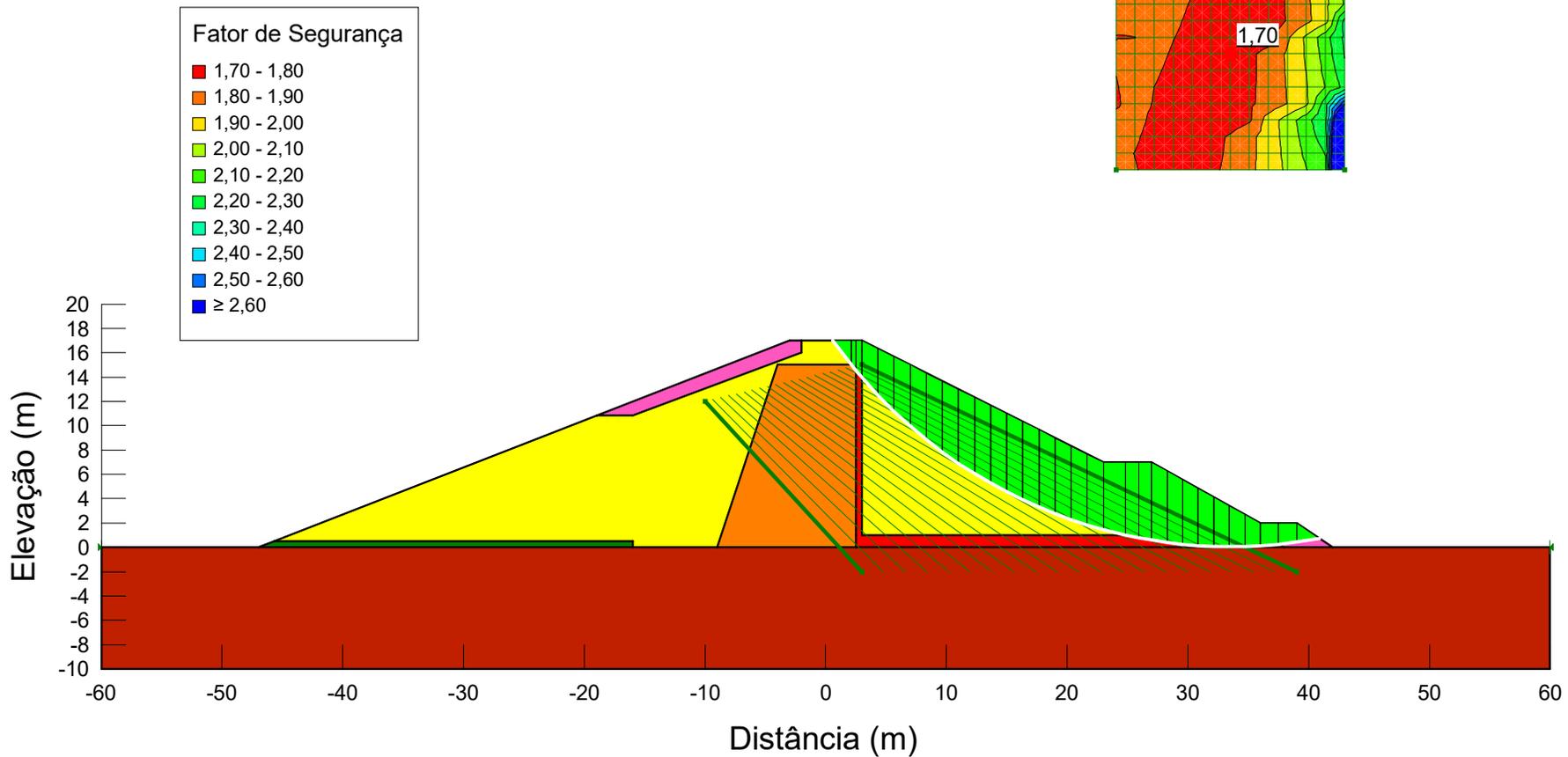


Final de construção - Material Grupo 2 - Montante - Bishop S.

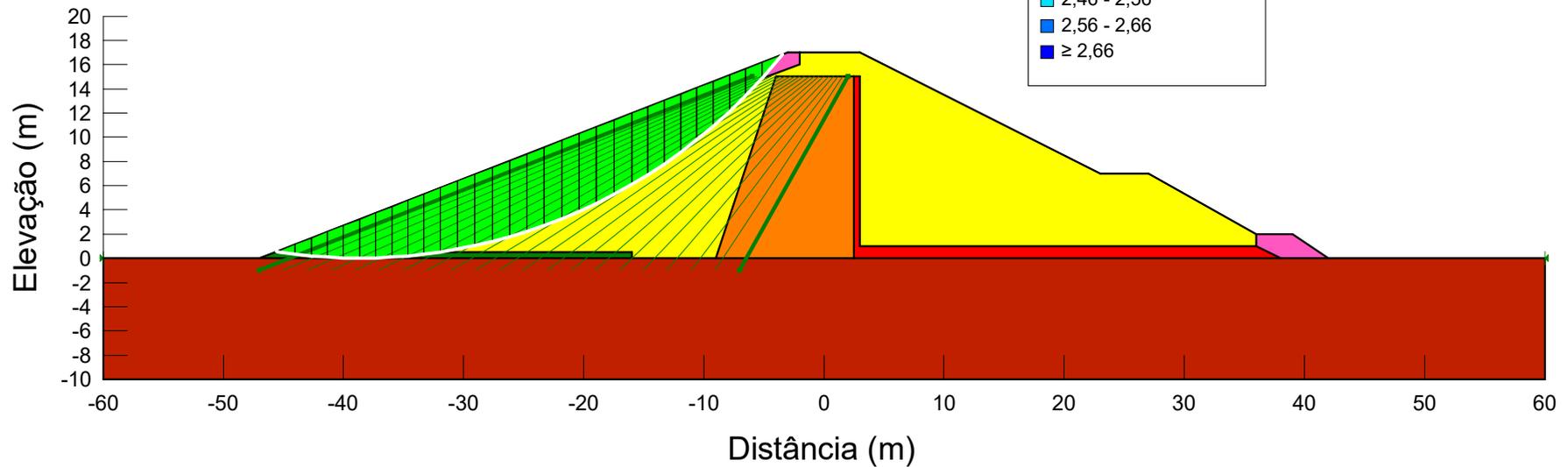
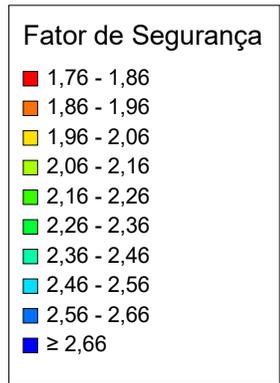
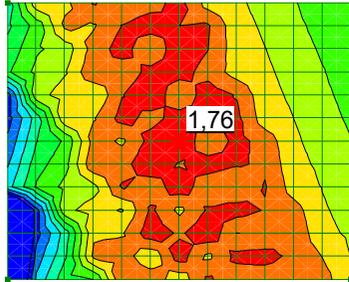
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz

19/06/2024

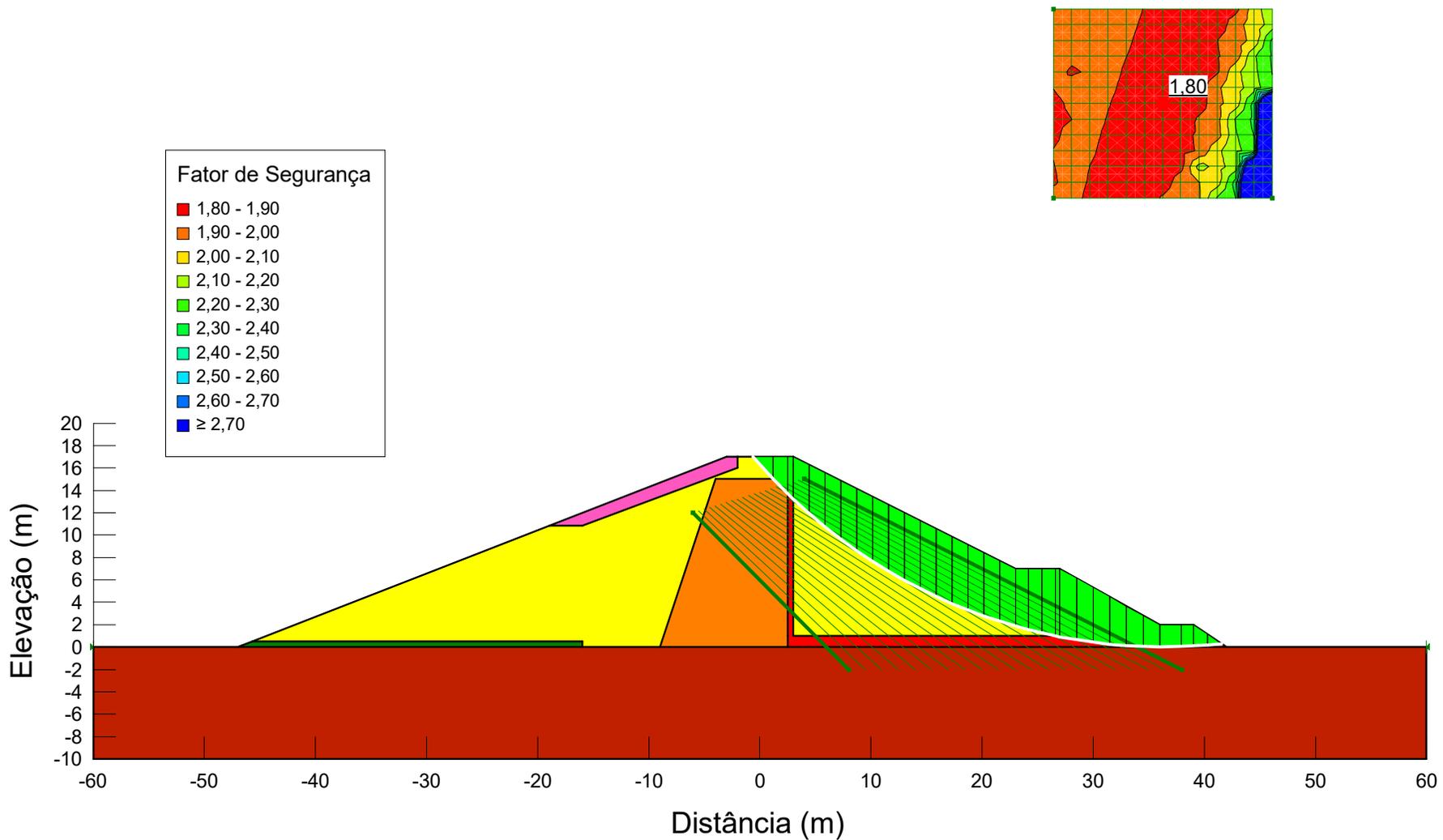
1:550



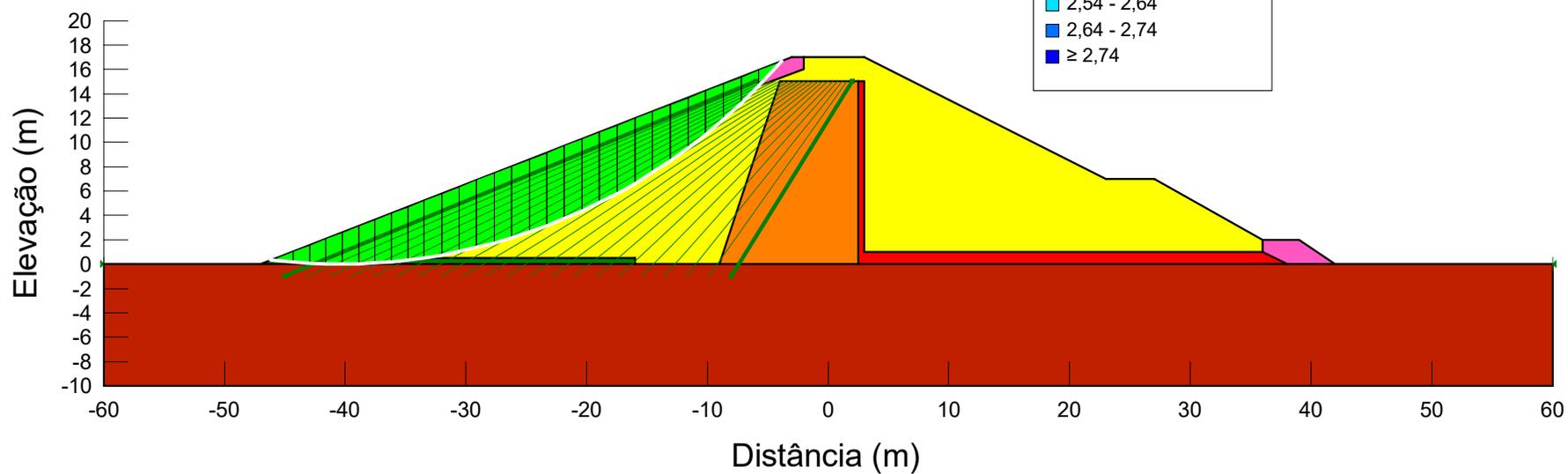
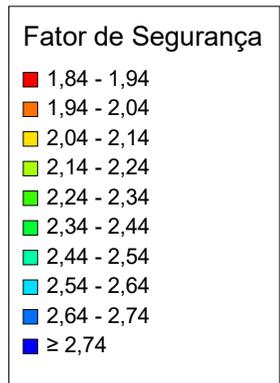
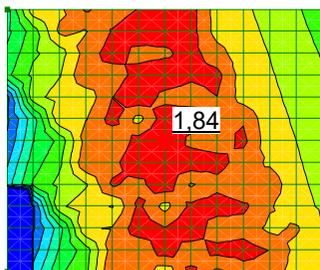
Final de construção - Material Grupo 2 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



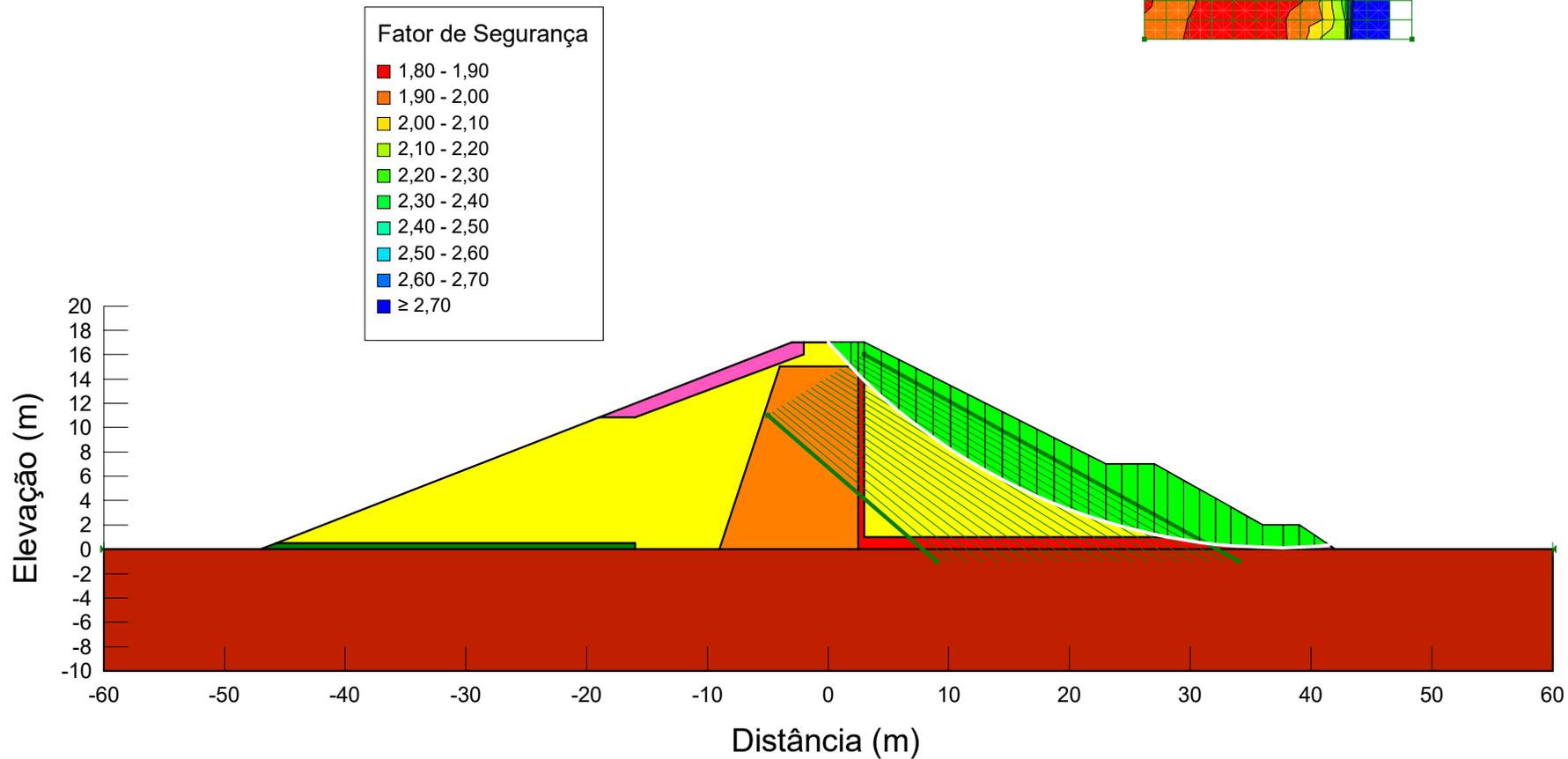
Final de construção - Material Grupo 2 - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



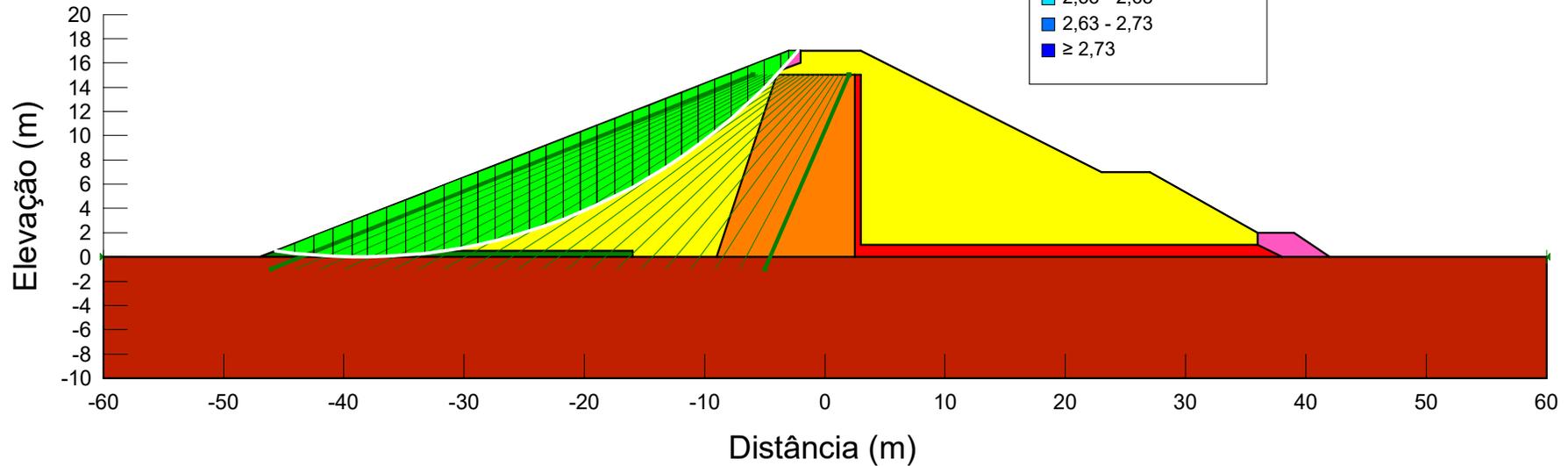
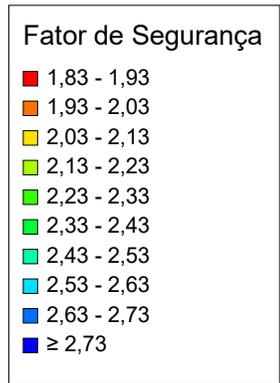
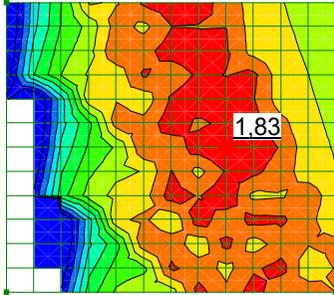
Final de construção - Material Grupo 2 - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



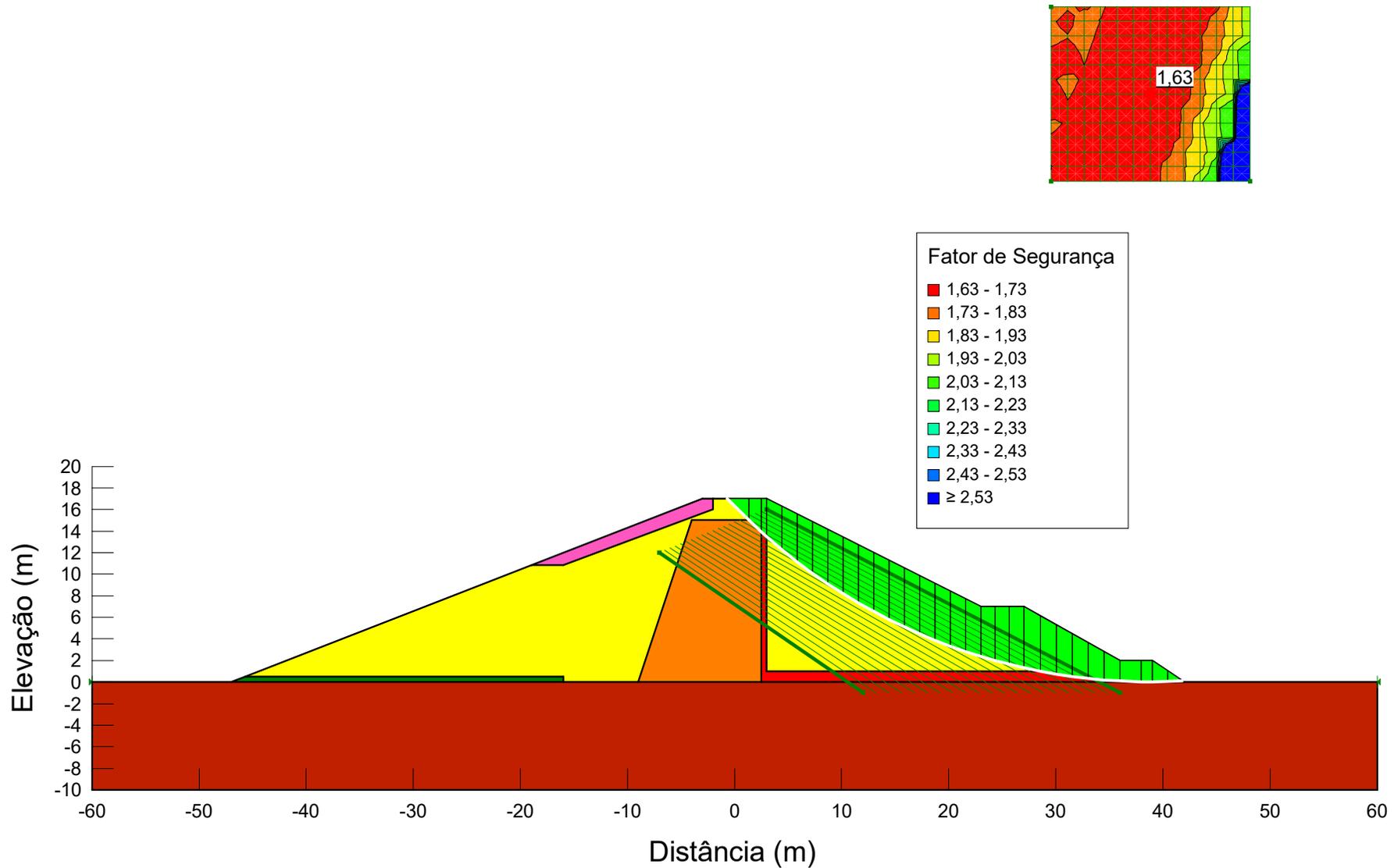
Final de construção - Material Grupo 2 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



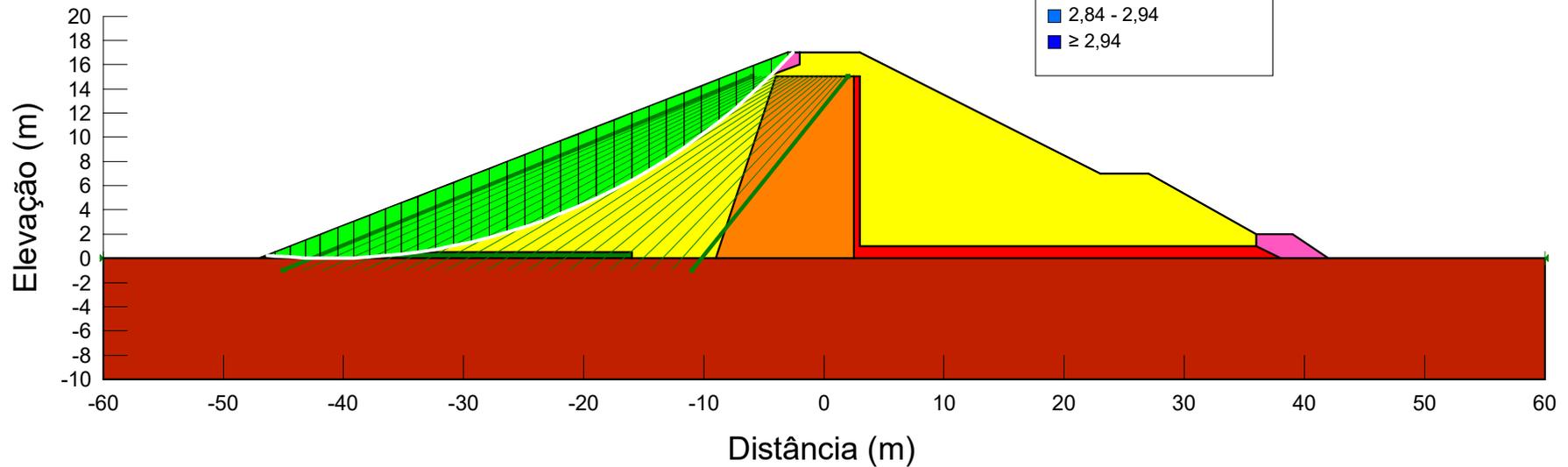
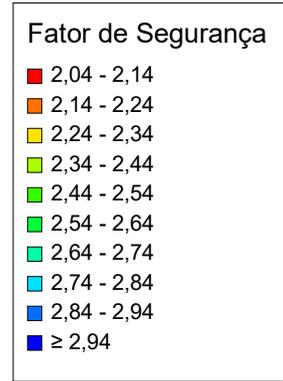
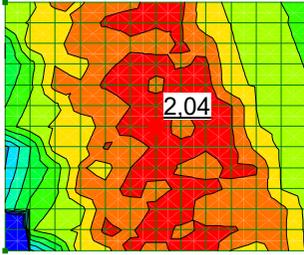
Final de construção - Material Grupo 2 - Jusante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



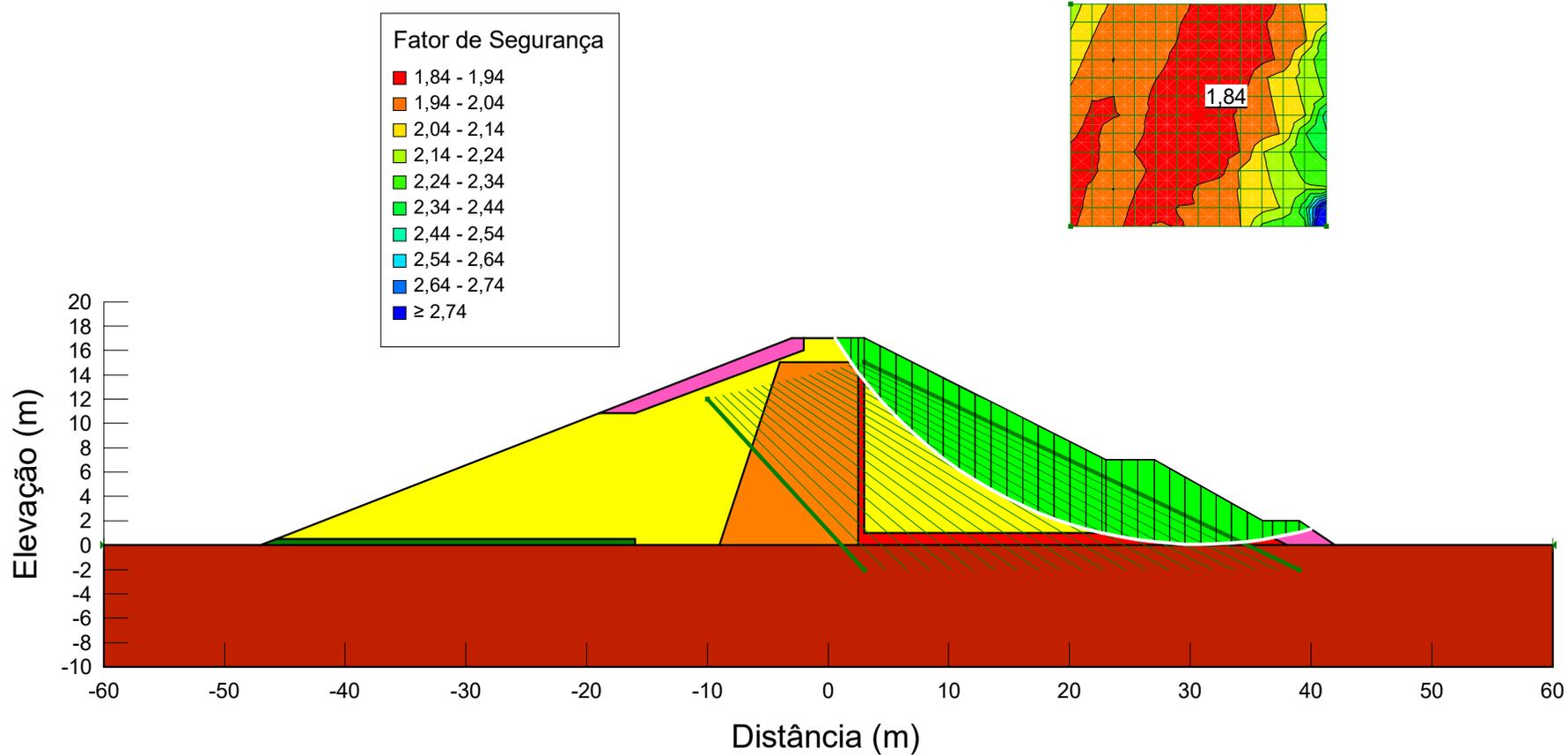
Final de construção - Material Grupo 2 - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



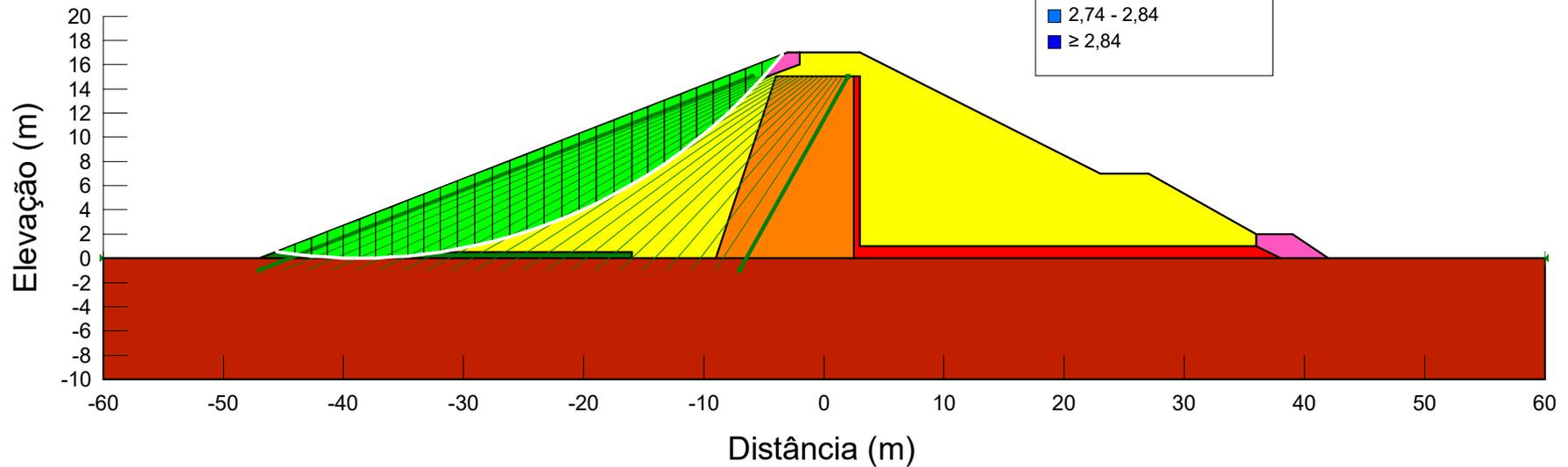
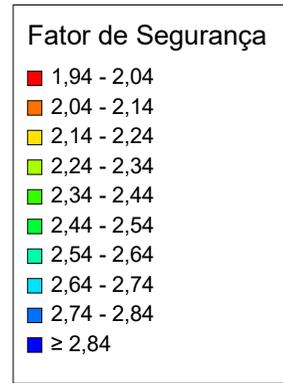
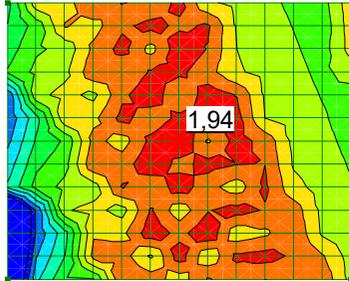
Final de construção - Material Grupo 3 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



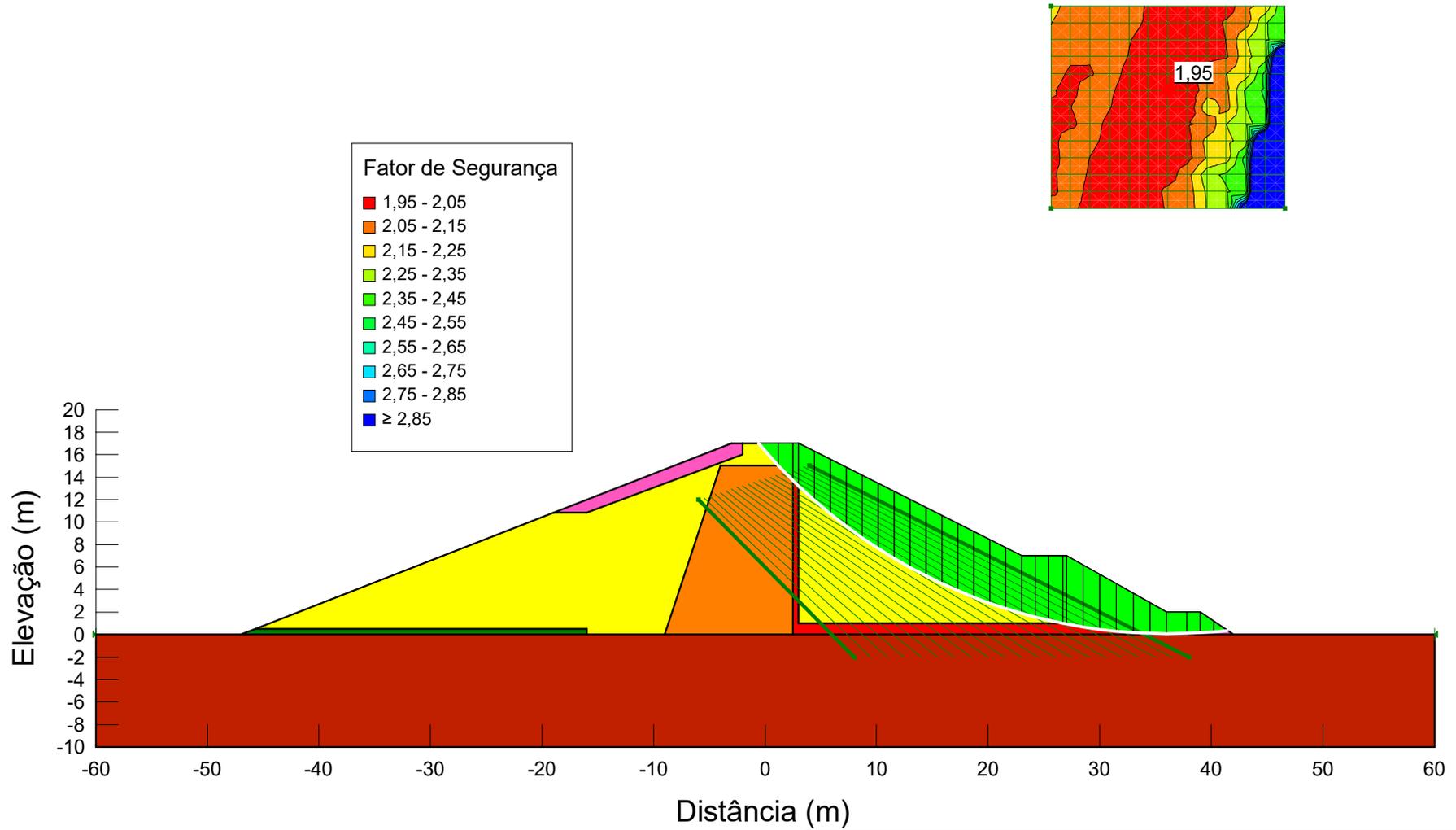
Final de construção - Material Grupo 3 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



Final de construção - Material Grupo 3 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



Final de construção - Material Grupo 3 - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550

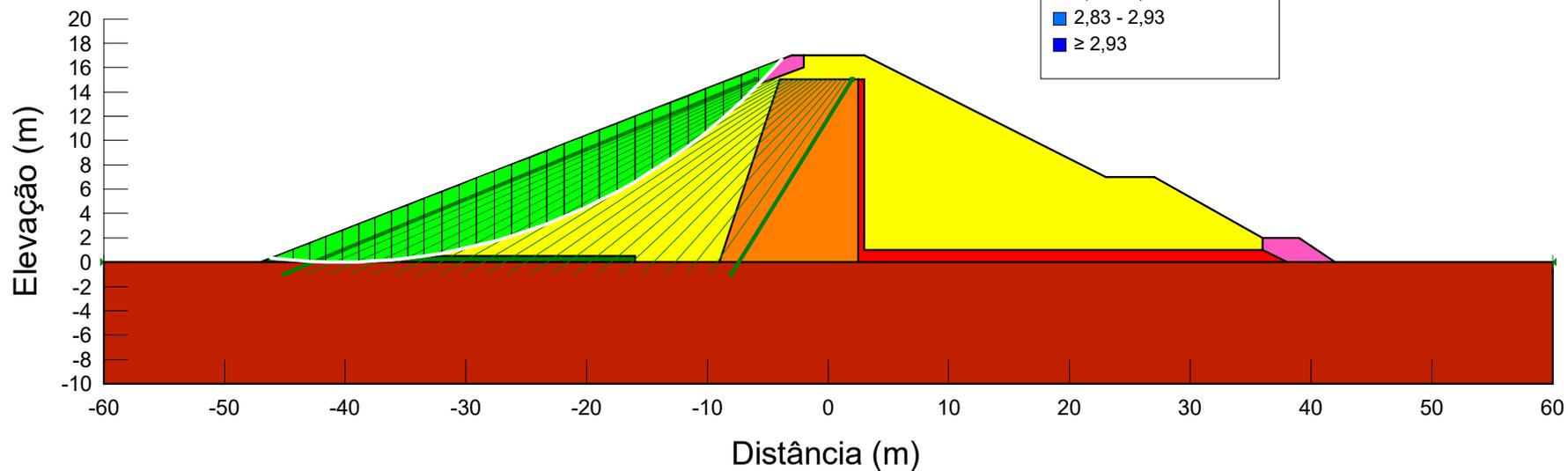
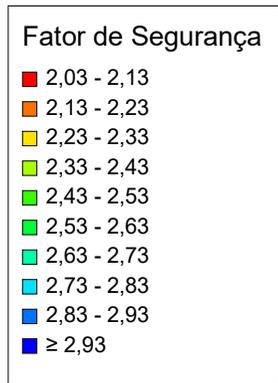
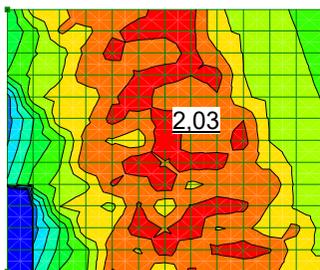


Final de construção - Material Grupo 3 - Jusante - Morg.-P.

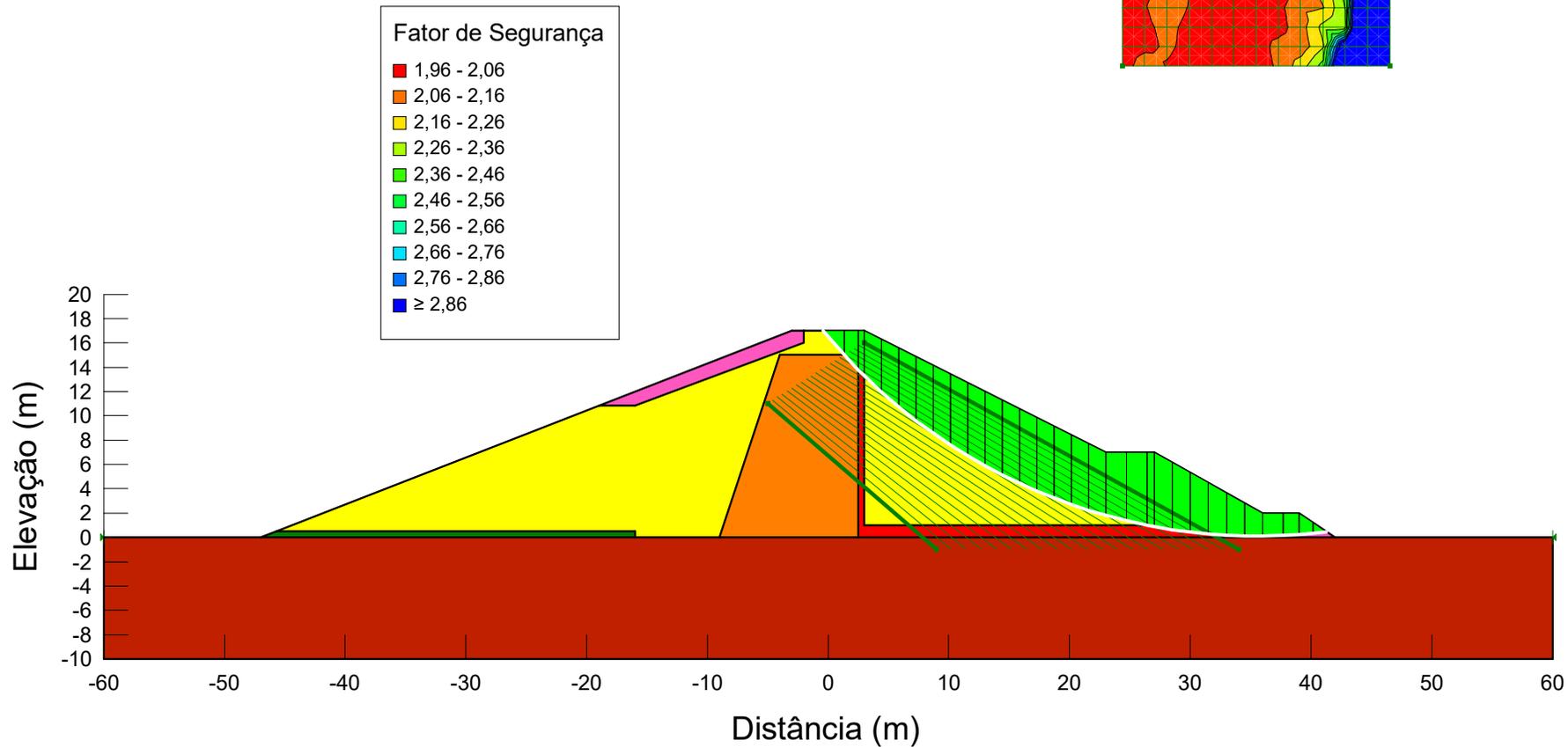
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz

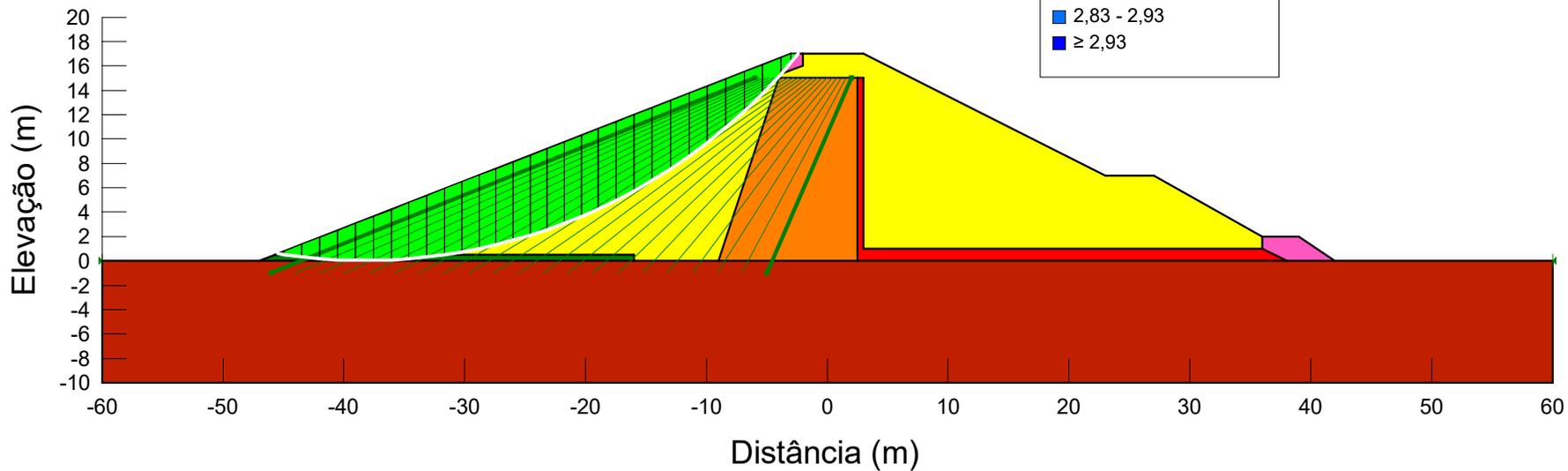
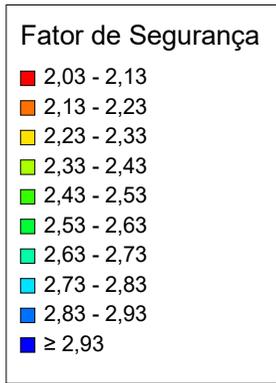
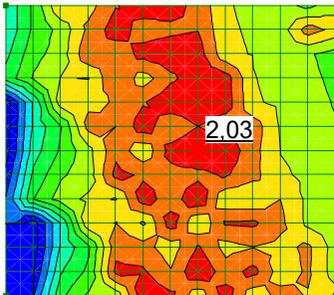
19/06/2024

1:550

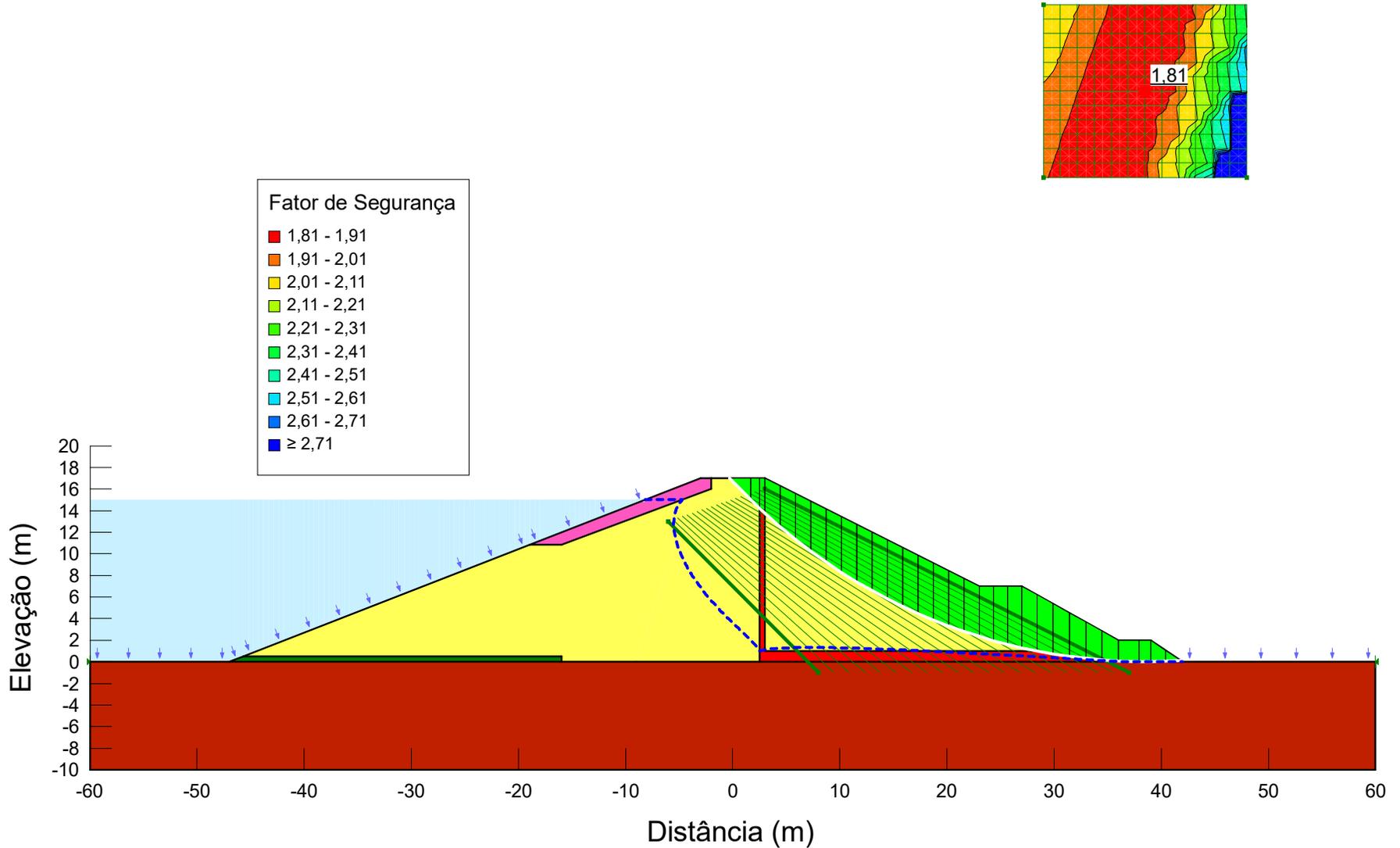


Final de construção - Material Grupo 3 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550

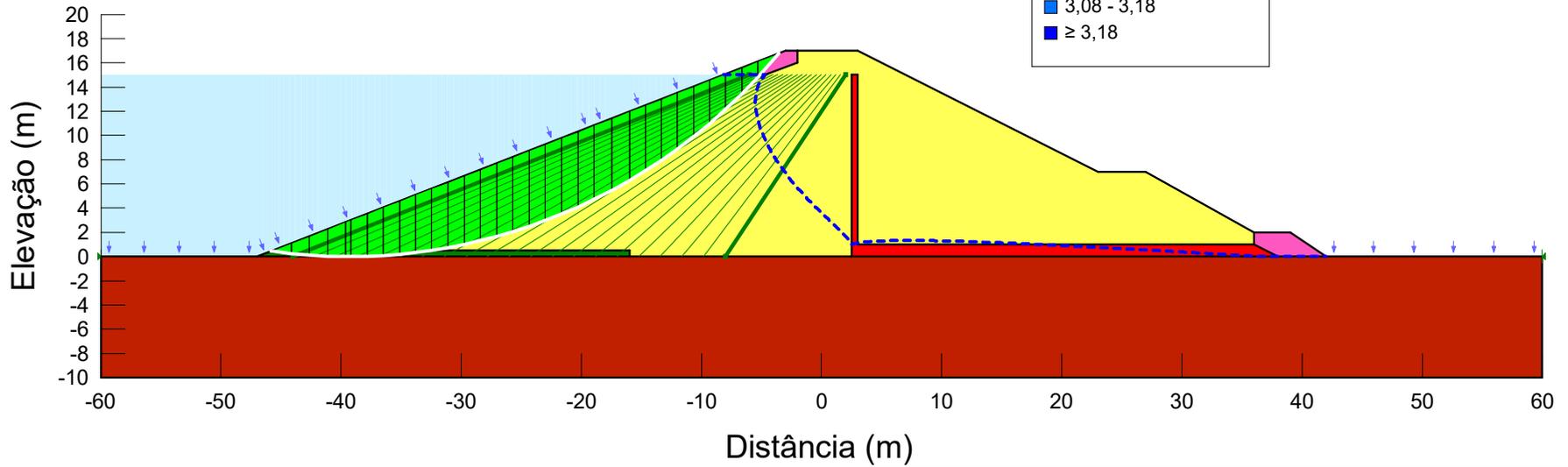
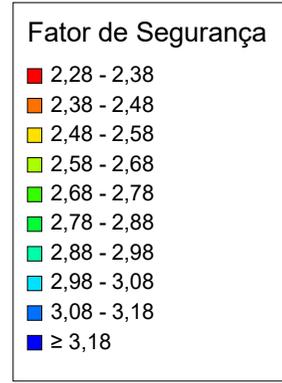
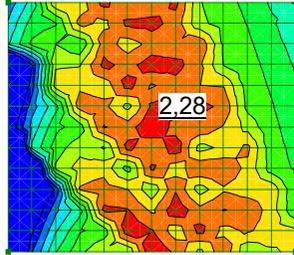




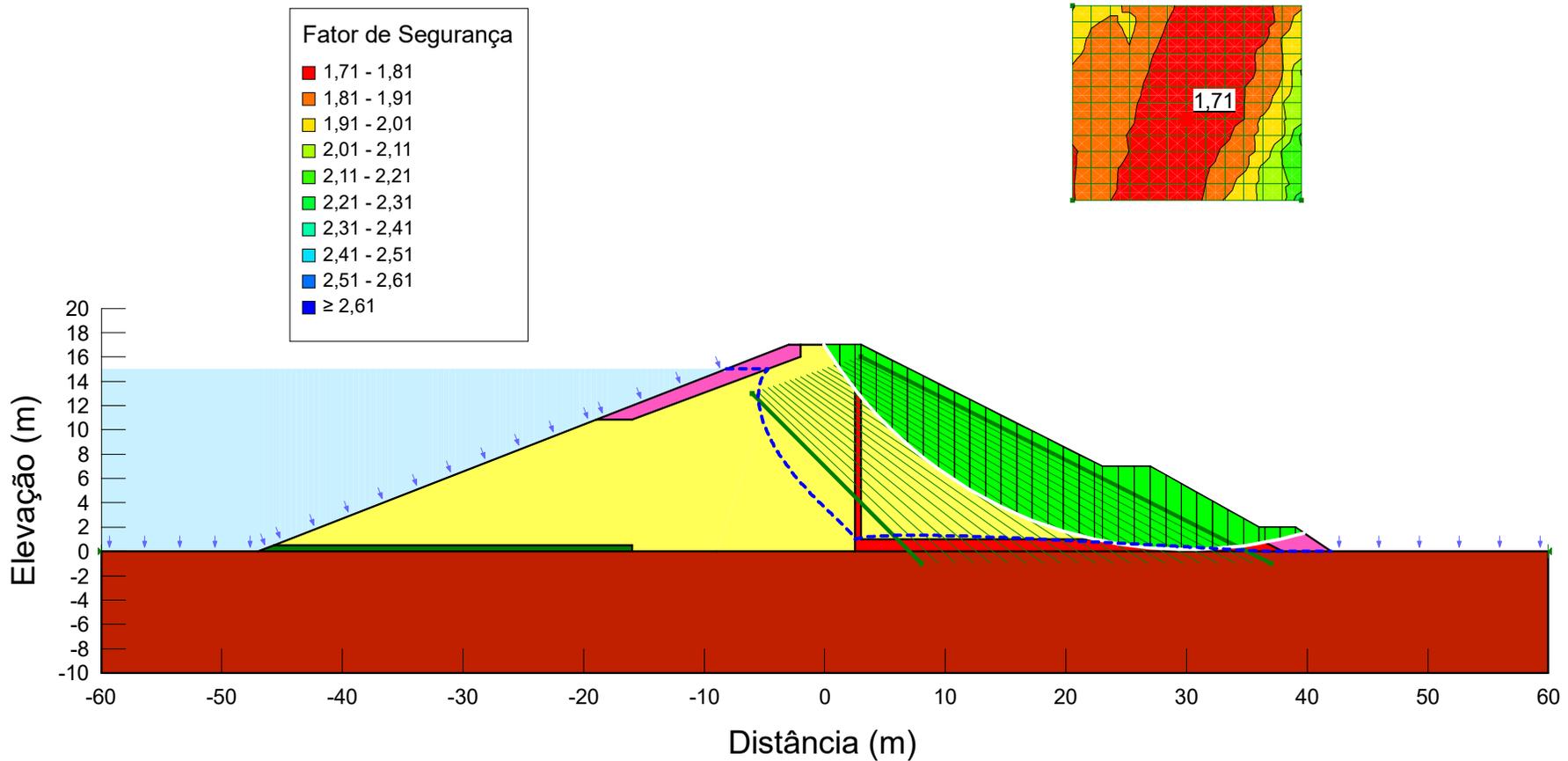
Final de construção - Material Grupo 3 - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
19/06/2024	1:550



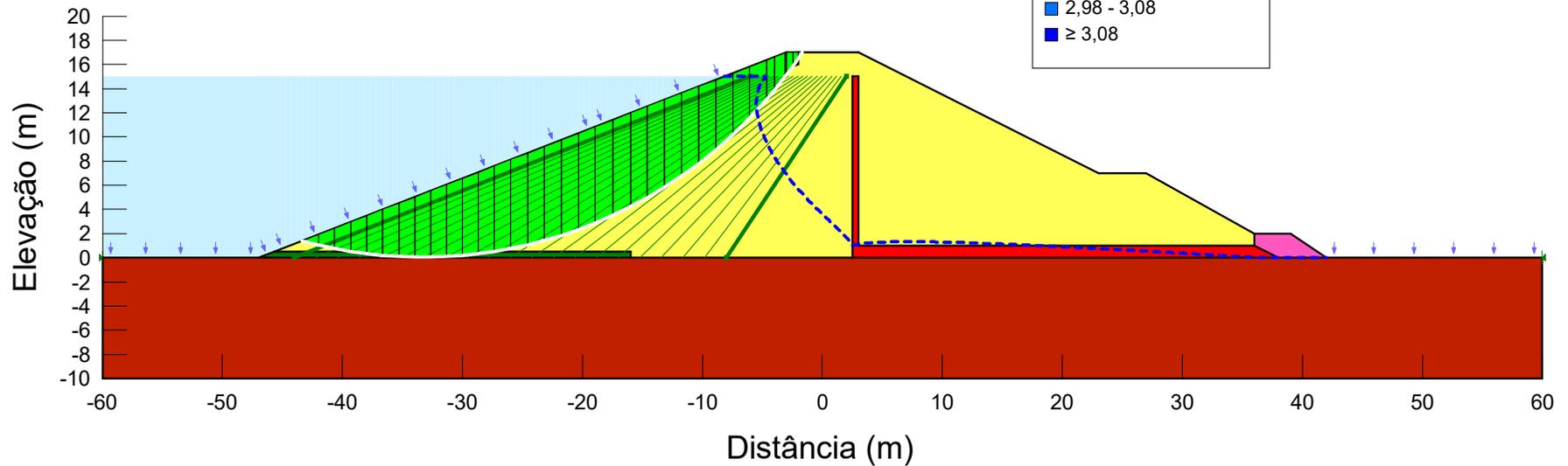
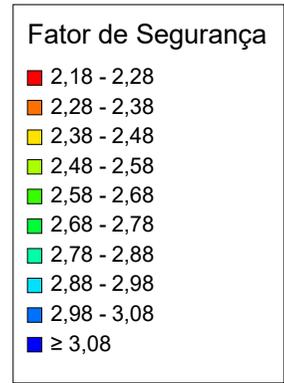
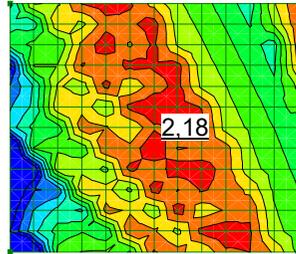
Regime de Operação - Material Original - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



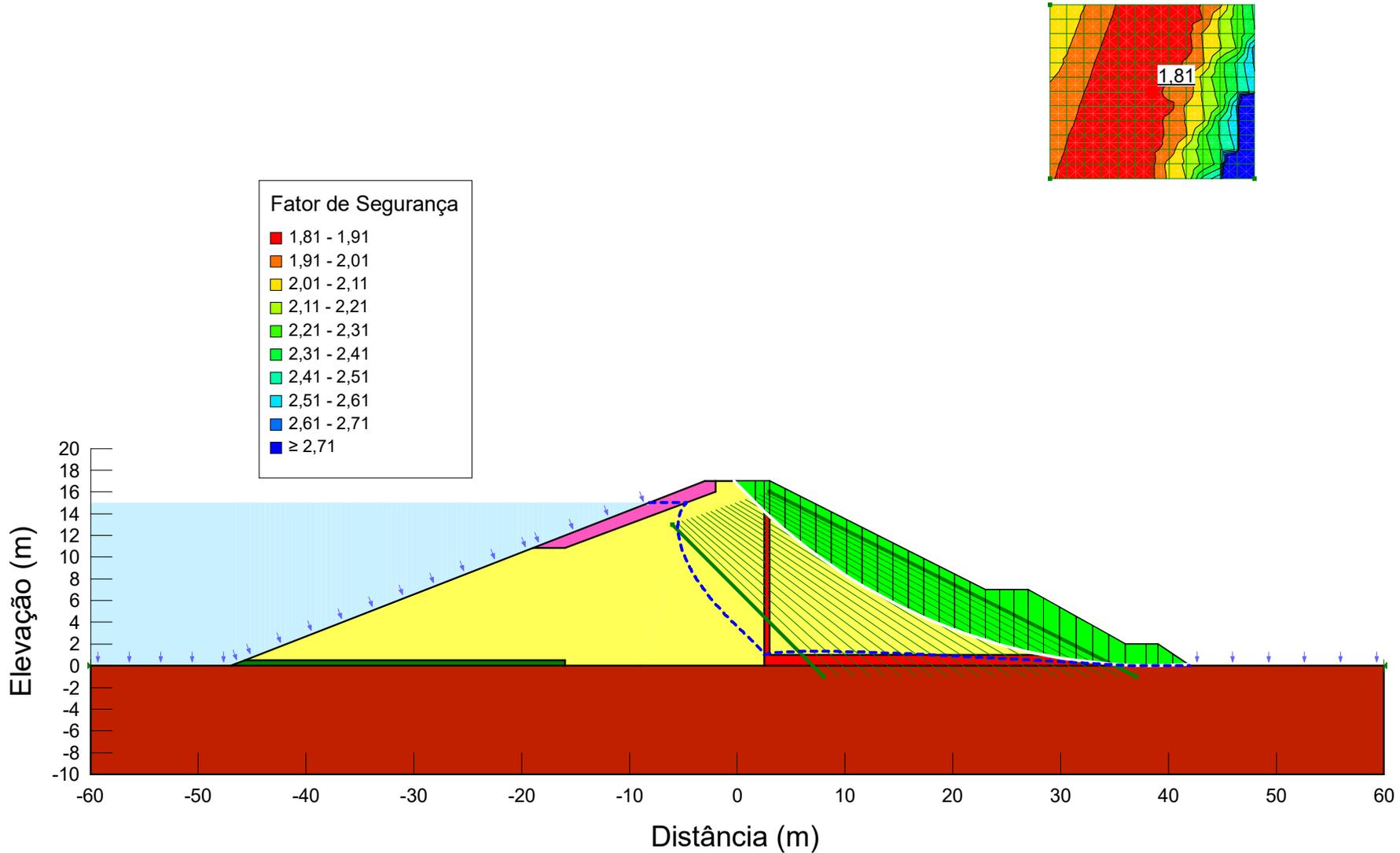
Regime de Operação - Material Original - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



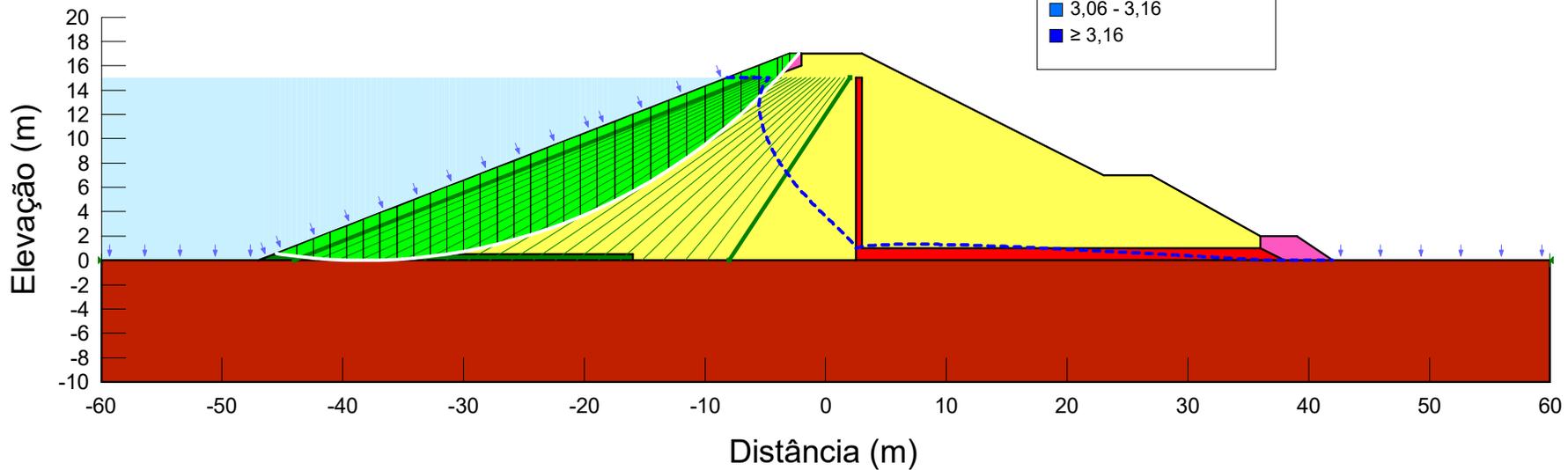
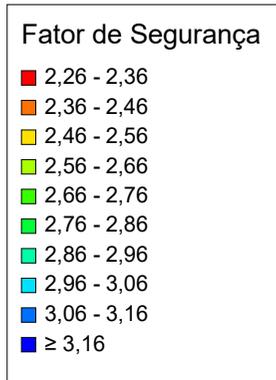
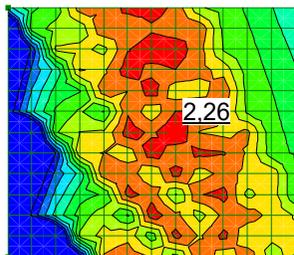
Regime de Operação - Material Original - Jusante - Fellenius	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



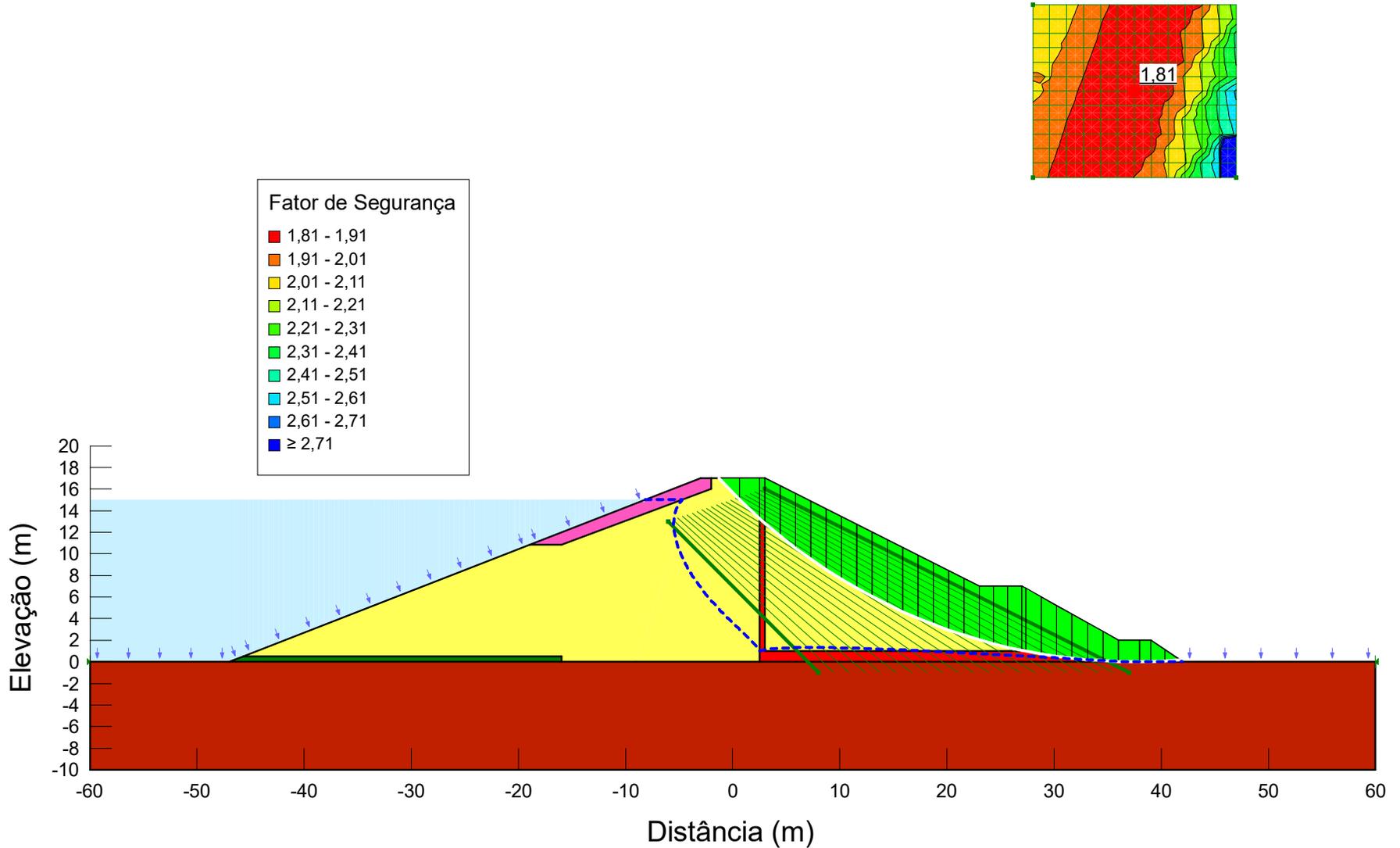
Regime de Operação - Material Original - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



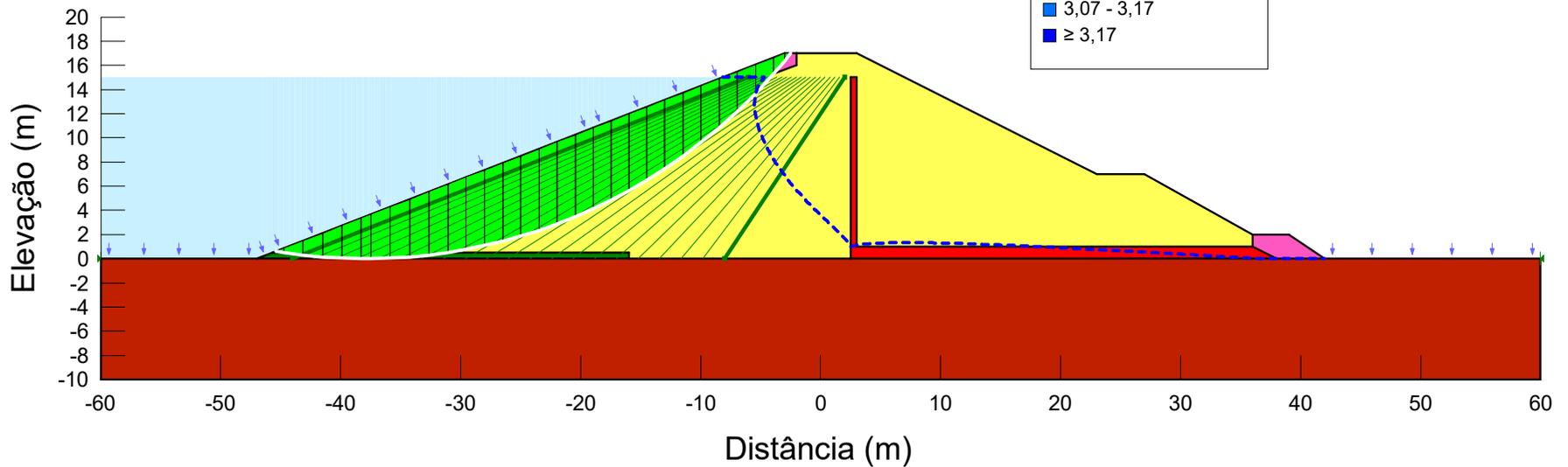
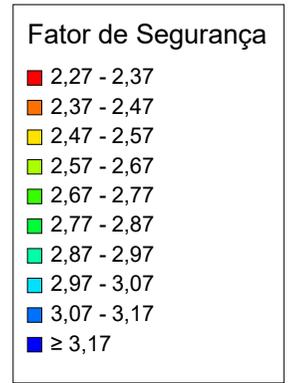
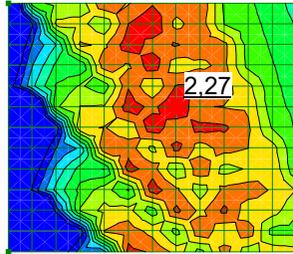
Regime de Operação - Material Original - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



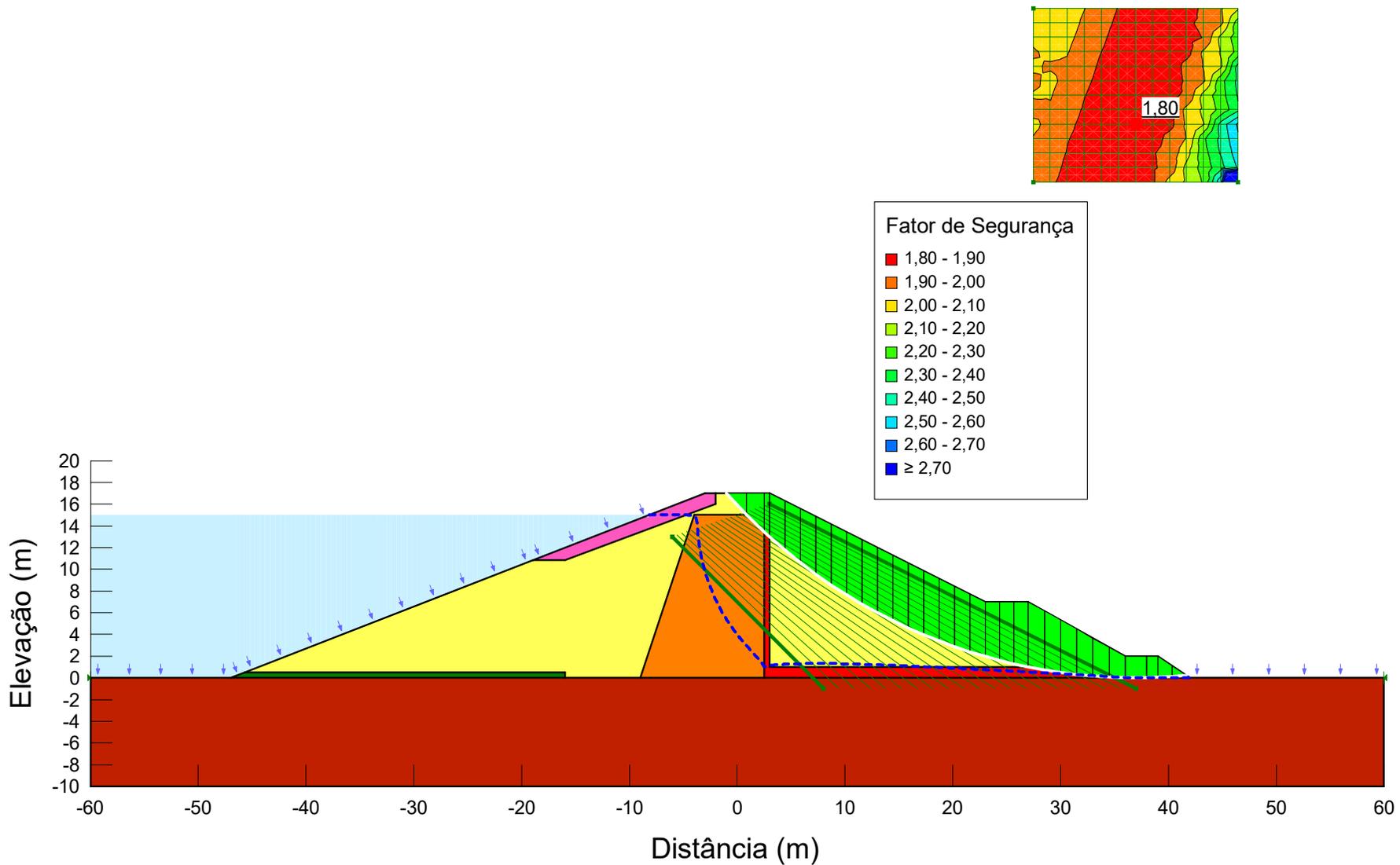
Regime de Operação - Material Original - Montante - Morg.-P.	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



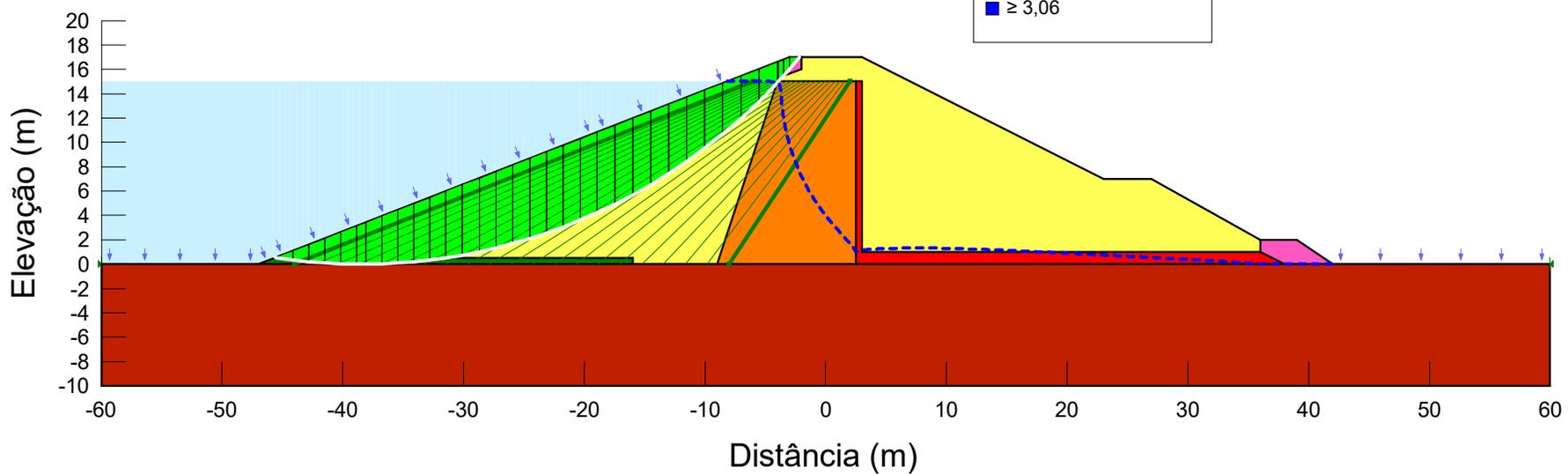
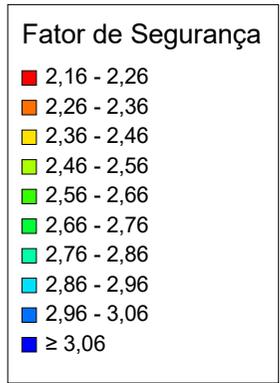
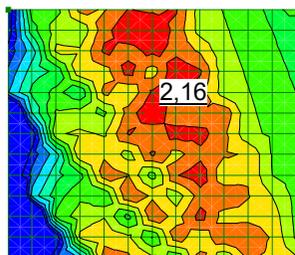
Regime de Operação - Material Original - Jusante - Spencer	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



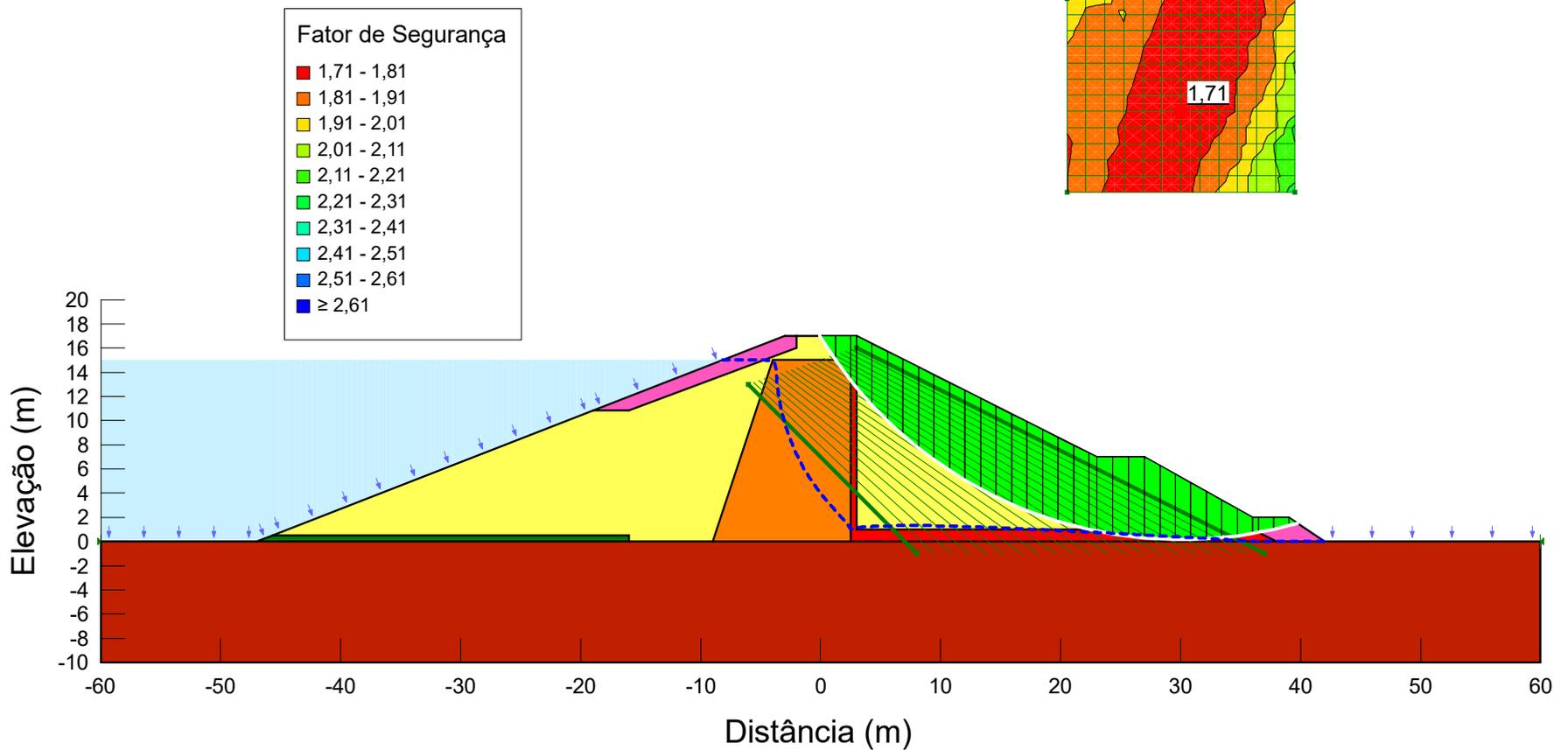
Regime de Operação - Material Original - Montante - Spencer	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



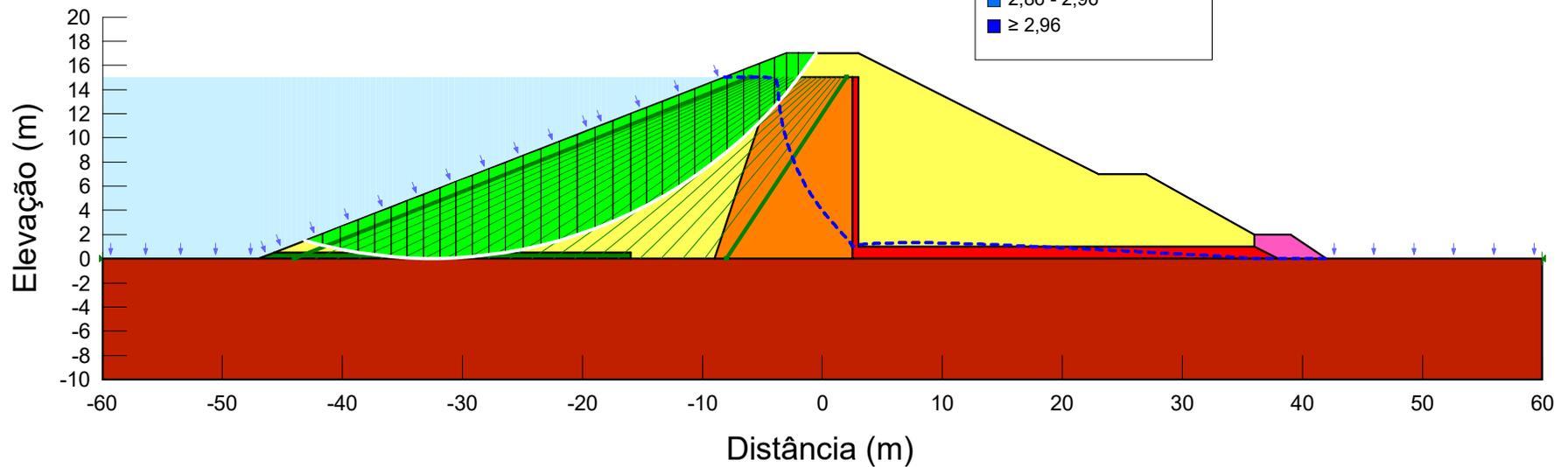
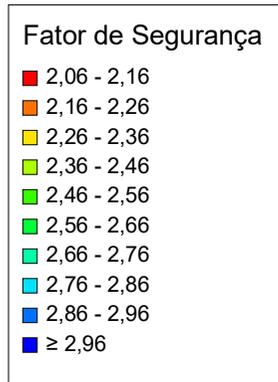
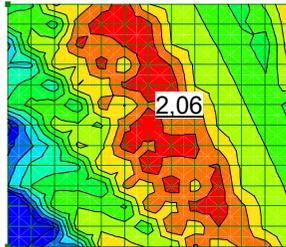
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



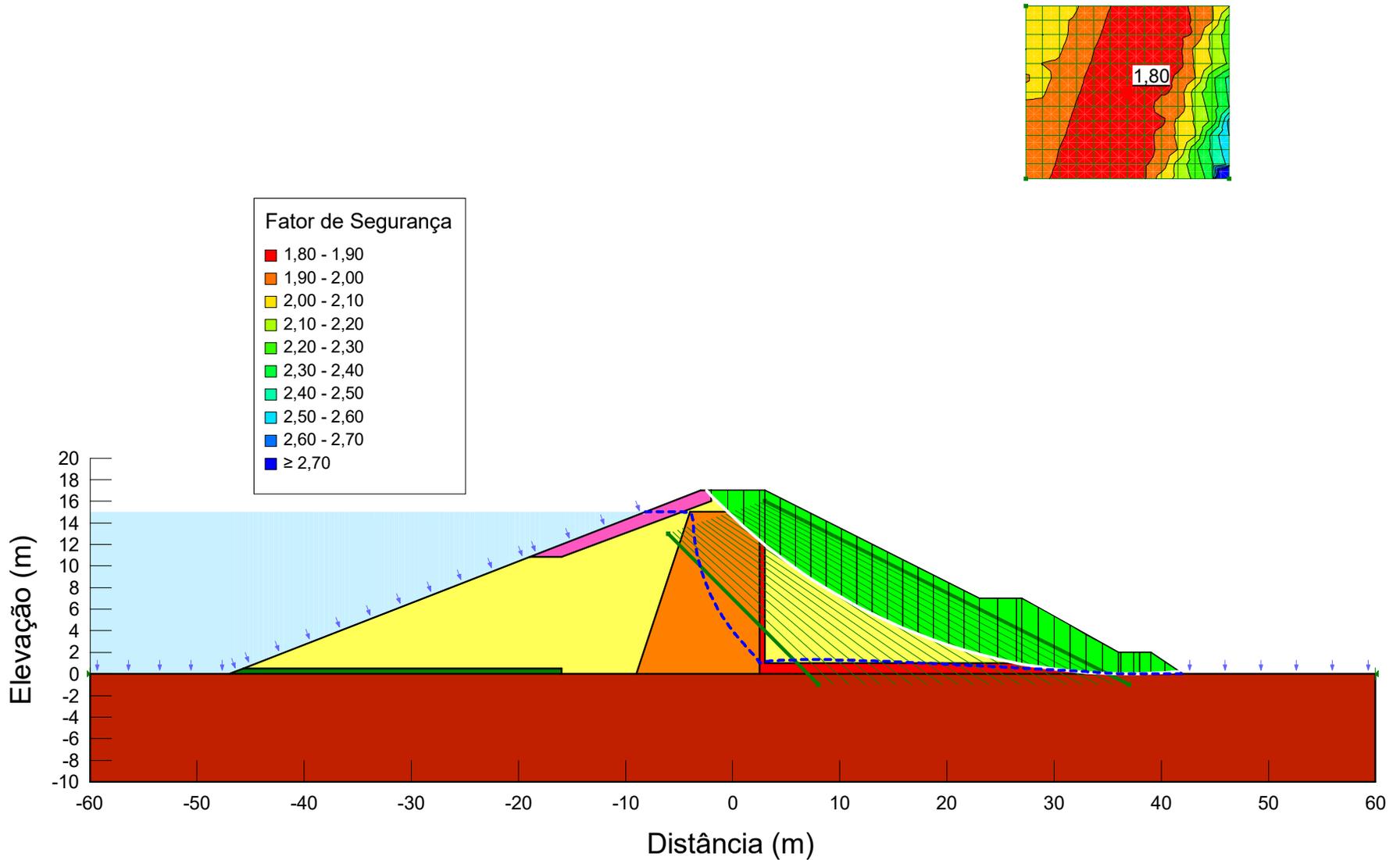
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



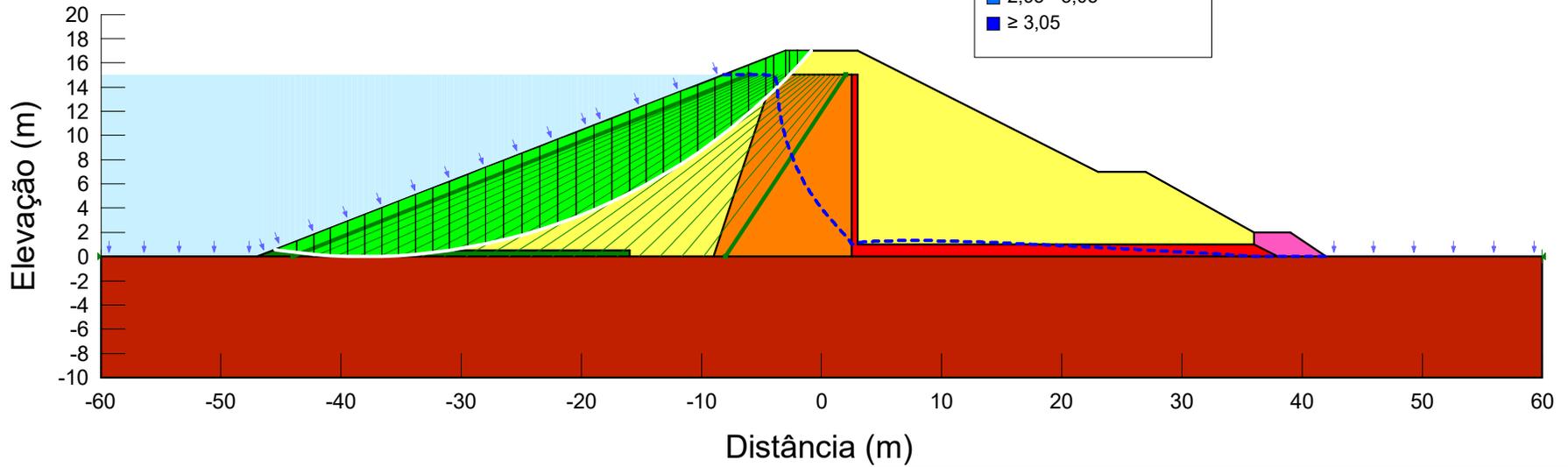
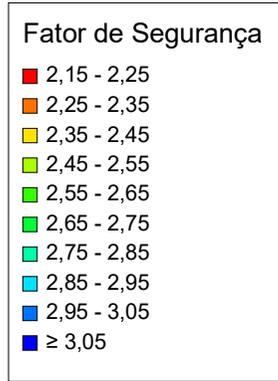
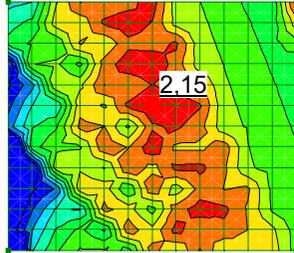
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



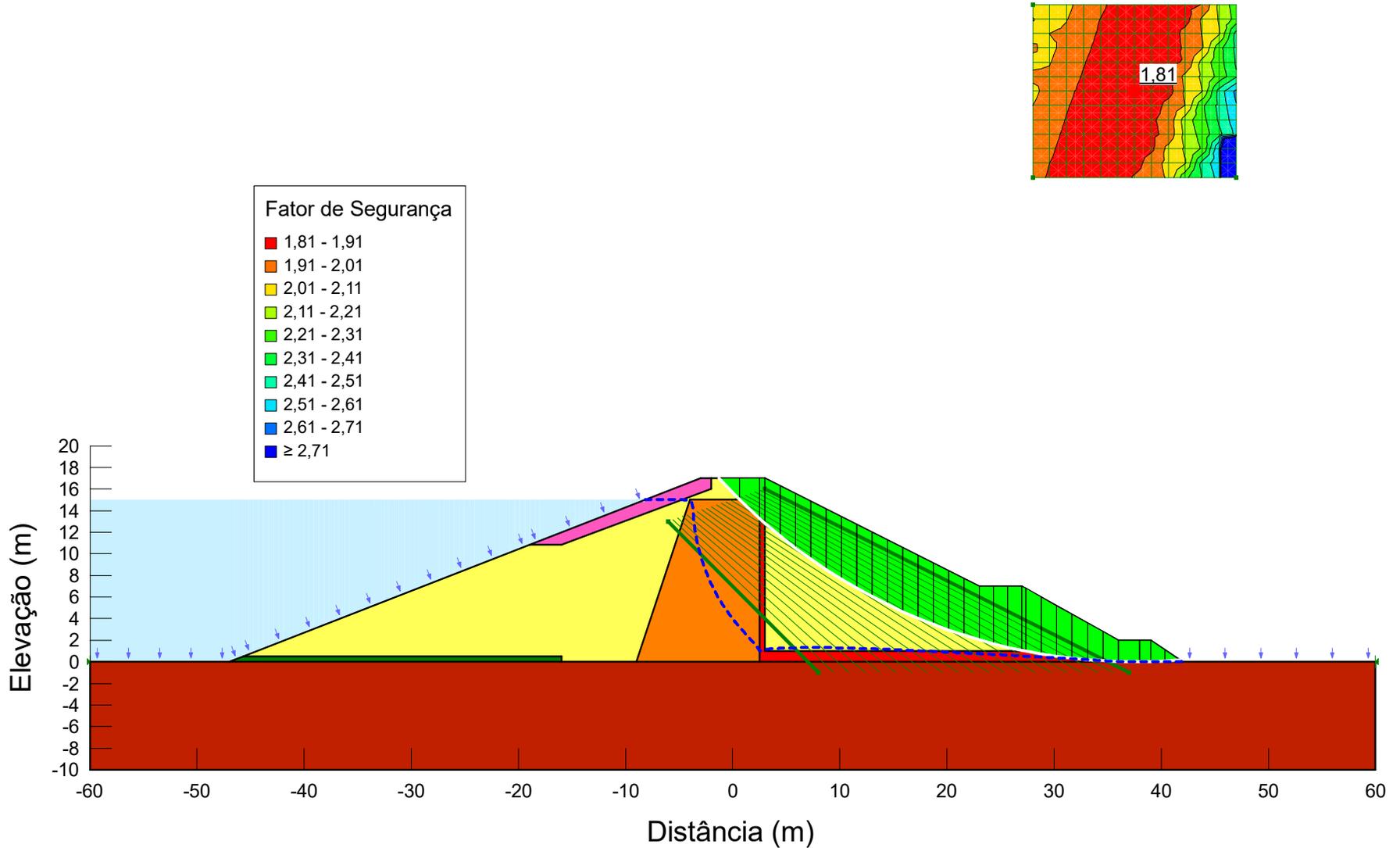
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Montante - Fellenius	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



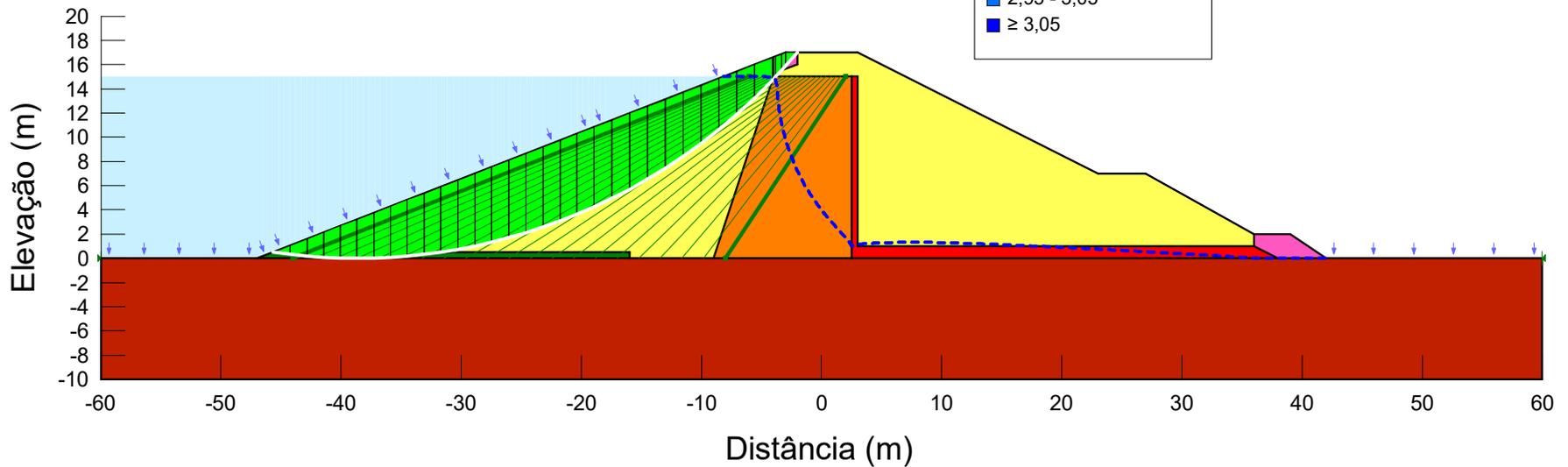
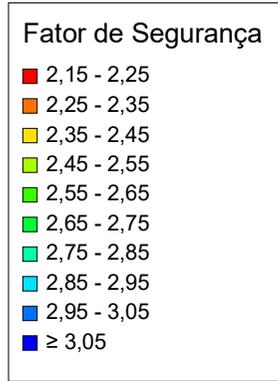
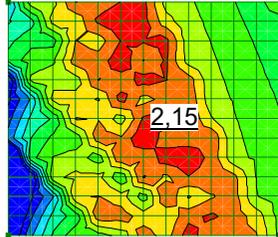
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



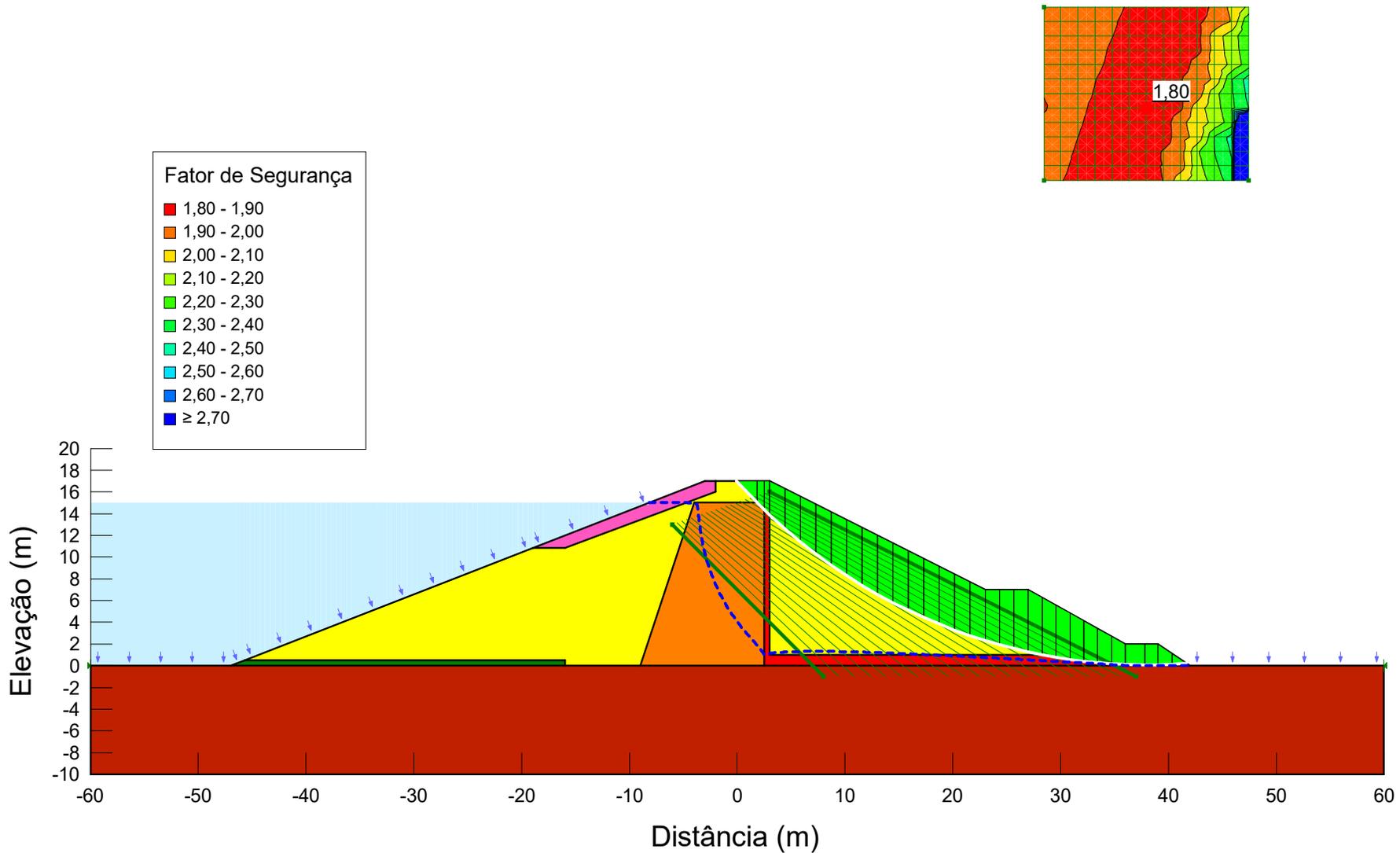
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Montante - Morg.-P.	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



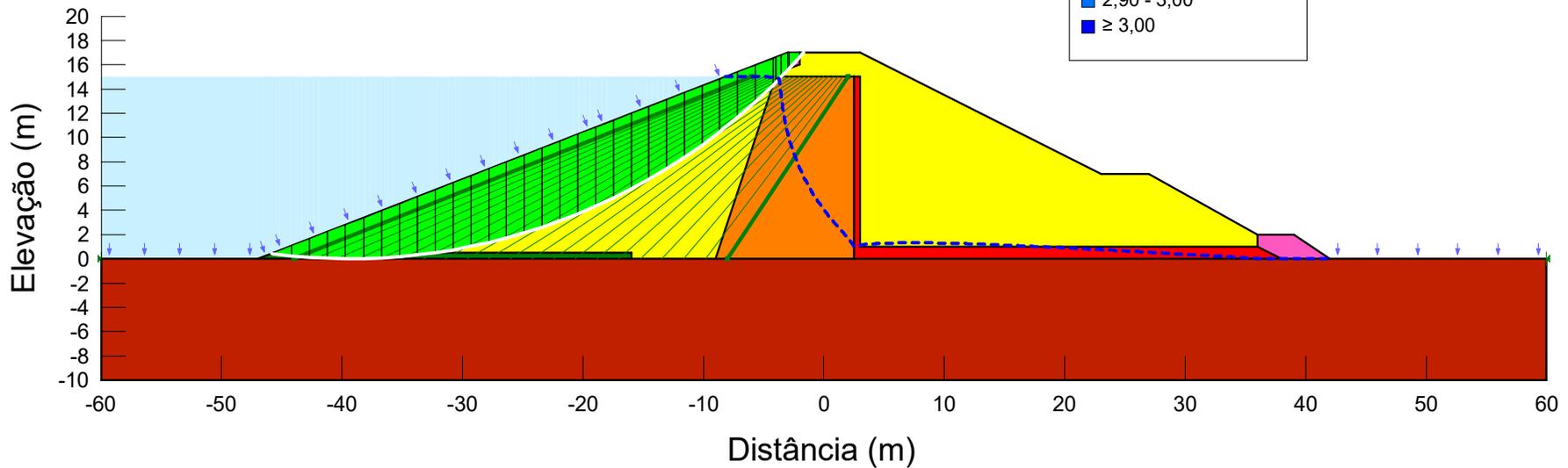
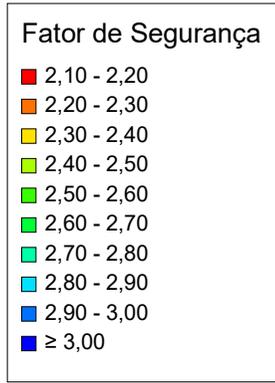
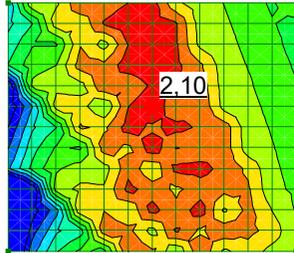
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Jusante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



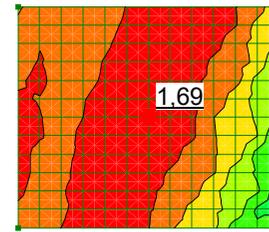
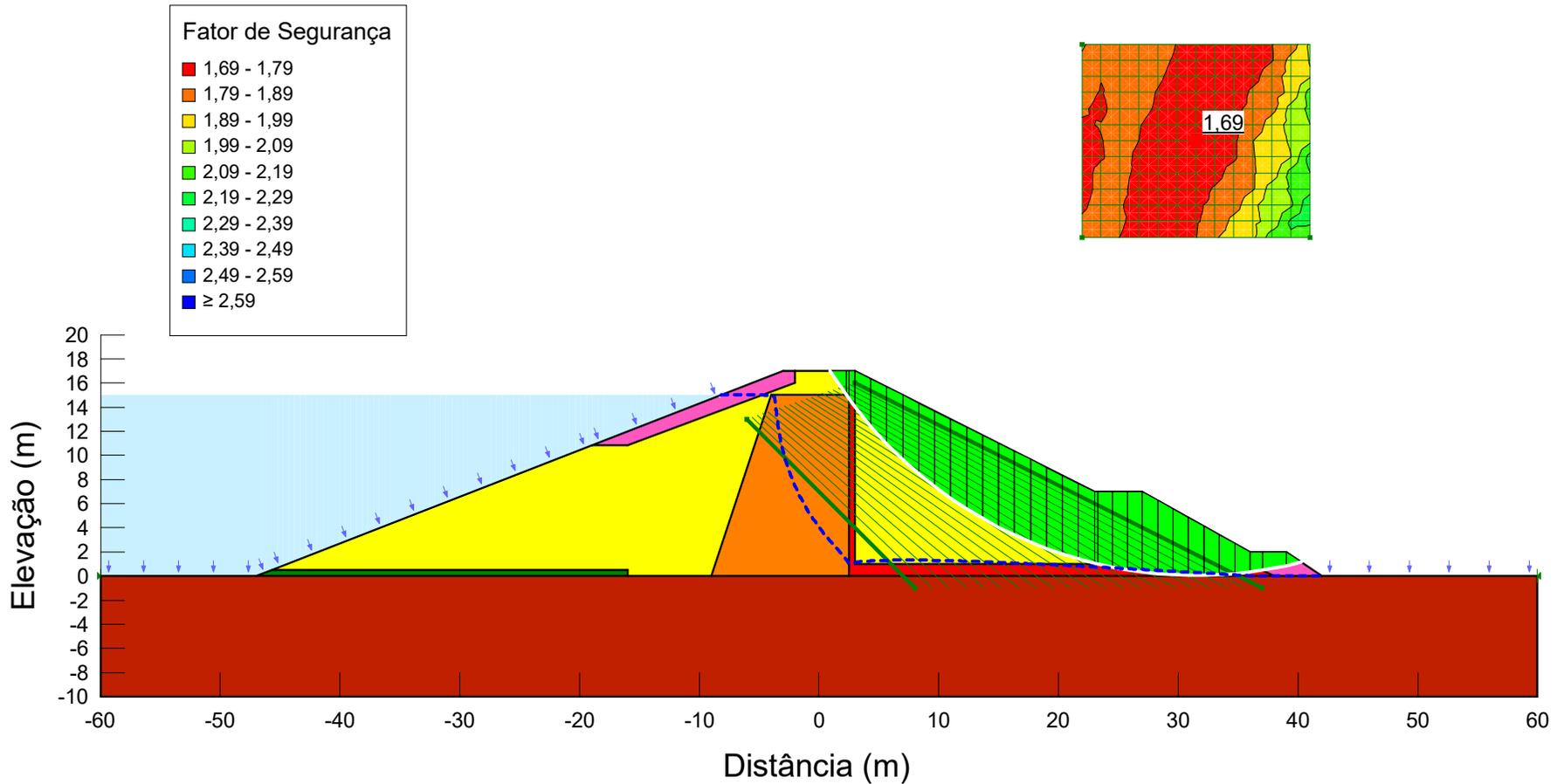
Regime de Operação - Material Grupo 1 - Montante - Spencer	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
20/06/2024	1:550



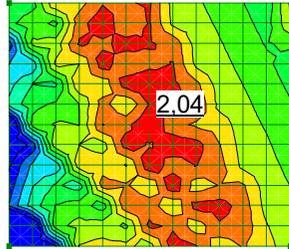
Regime de Operação - Material Grupo 2 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Regime de Operação - Material Grupo 2 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

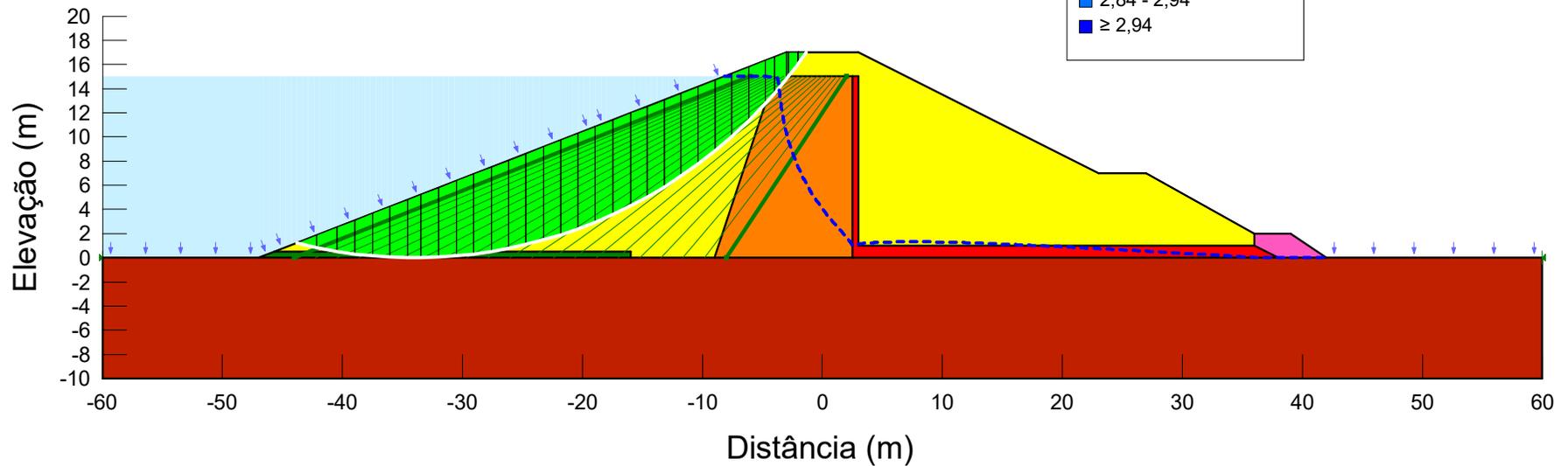


Regime de Operação - Material Grupo 2 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Fator de Segurança

- 2,04 - 2,14
- 2,14 - 2,24
- 2,24 - 2,34
- 2,34 - 2,44
- 2,44 - 2,54
- 2,54 - 2,64
- 2,64 - 2,74
- 2,74 - 2,84
- 2,84 - 2,94
- ≥ 2,94

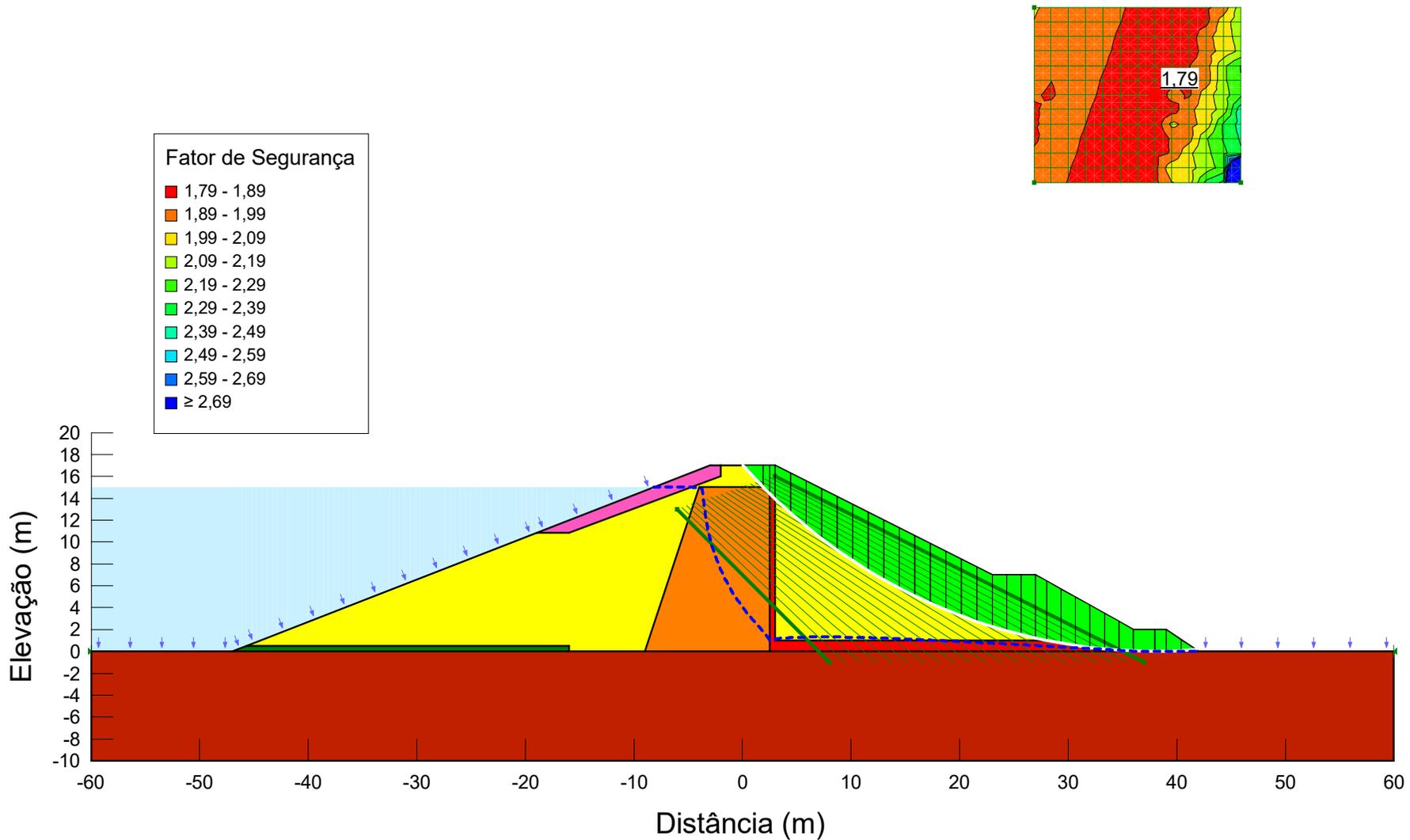


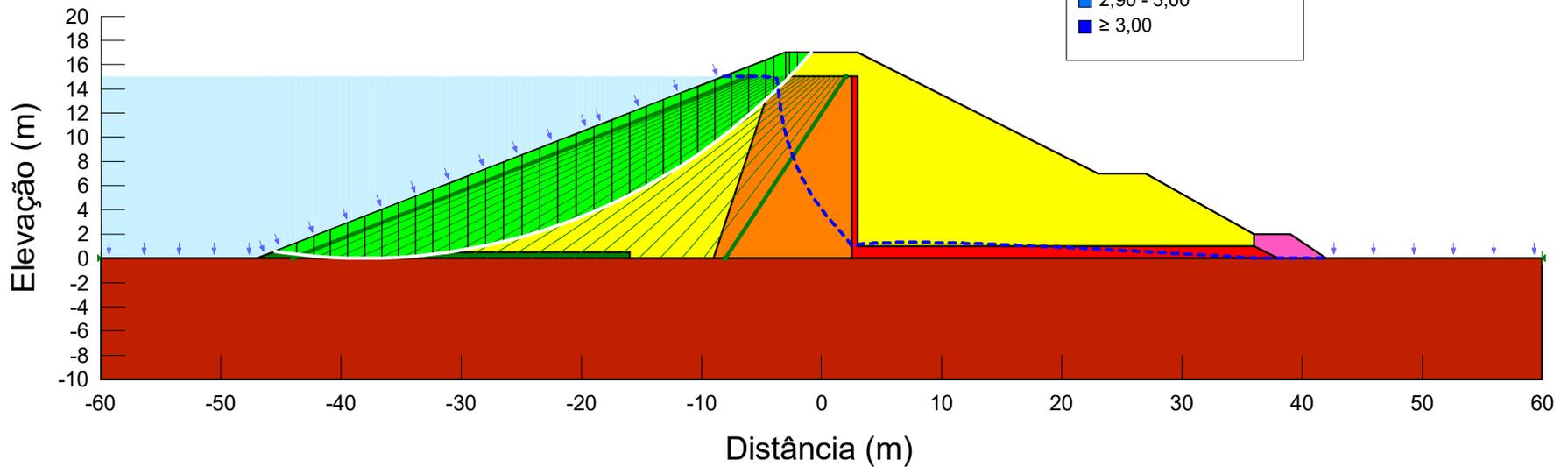
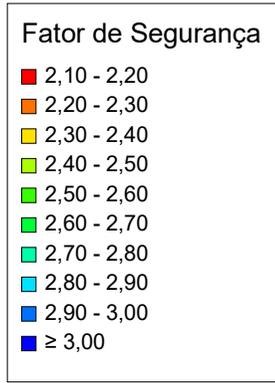
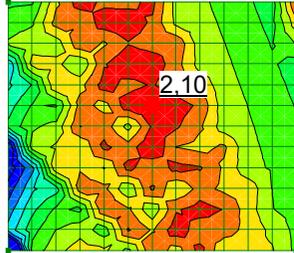
Regime de Operação - Material Grupo 2 - Montante - Fellenius

Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz

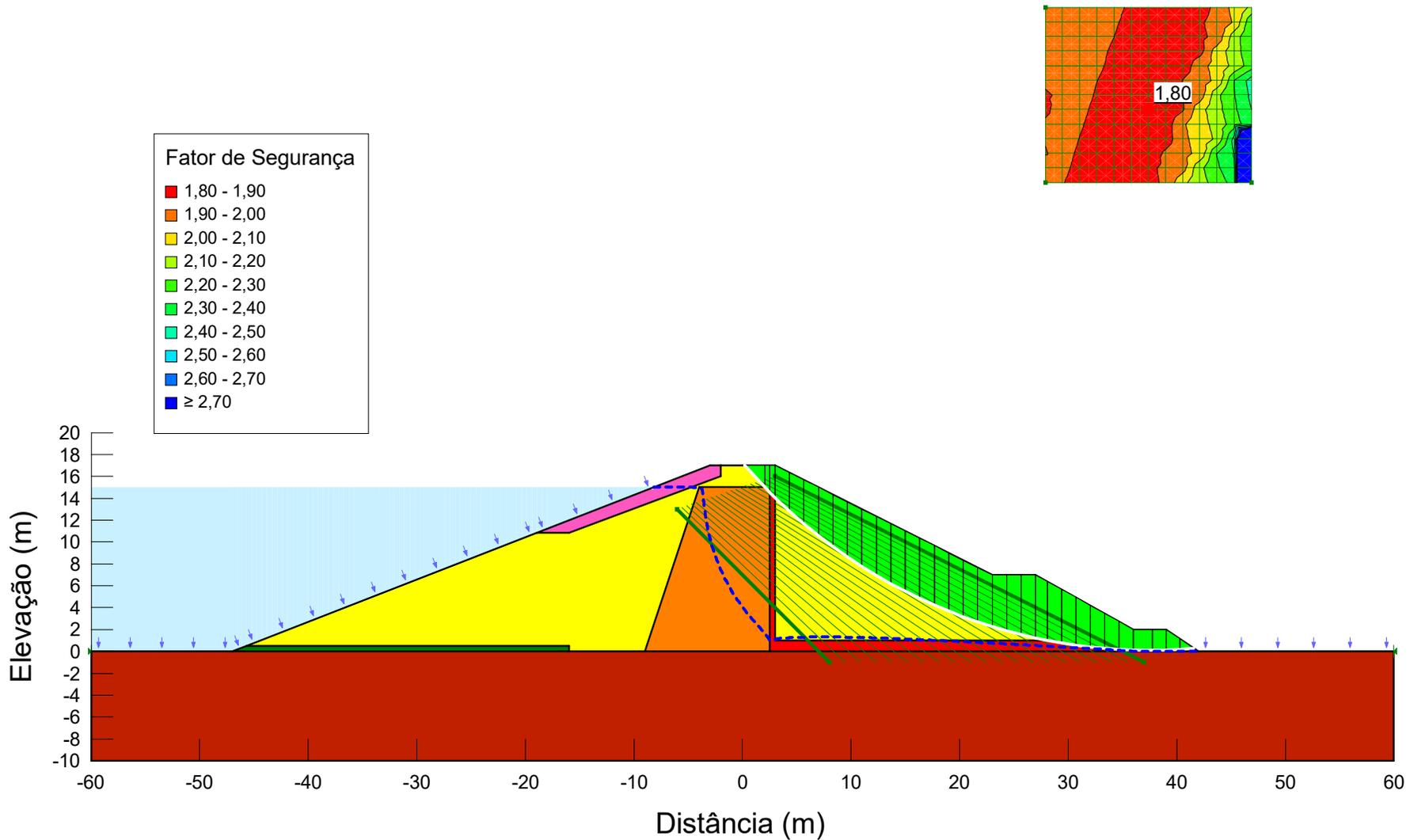
21/06/2024

1:550

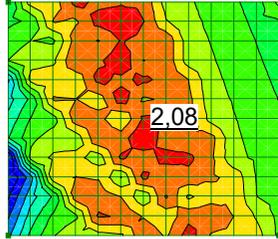




Regime de Operação - Material Grupo 2 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

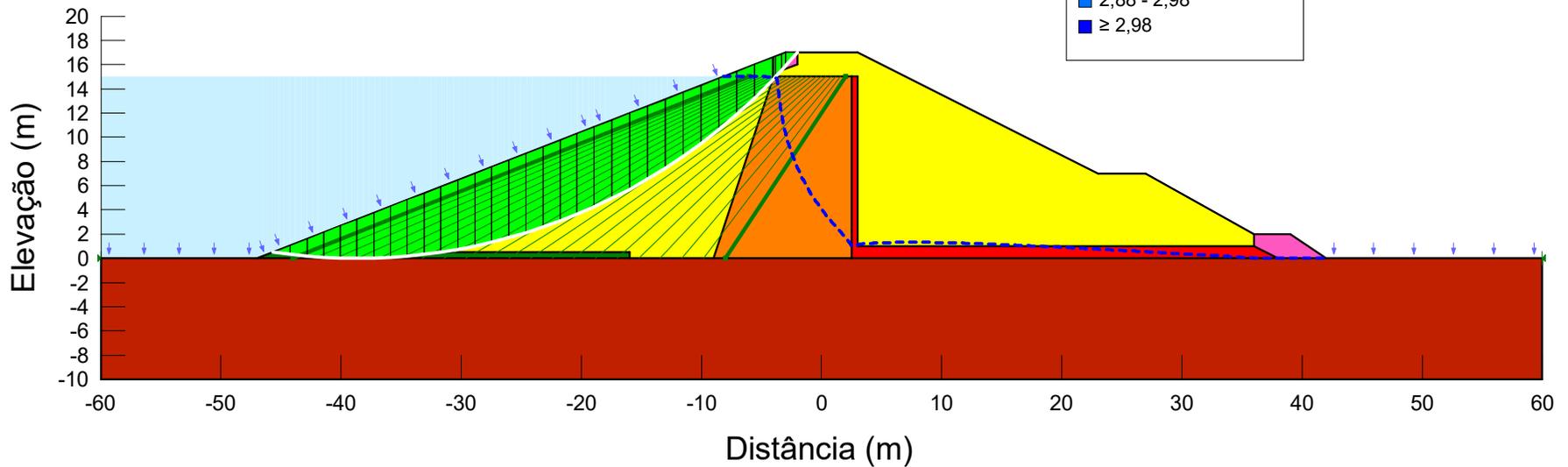


Regime de Operação - Material Grupo 2 - Jusante - Spencer	
Análise de Estabilidade da Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

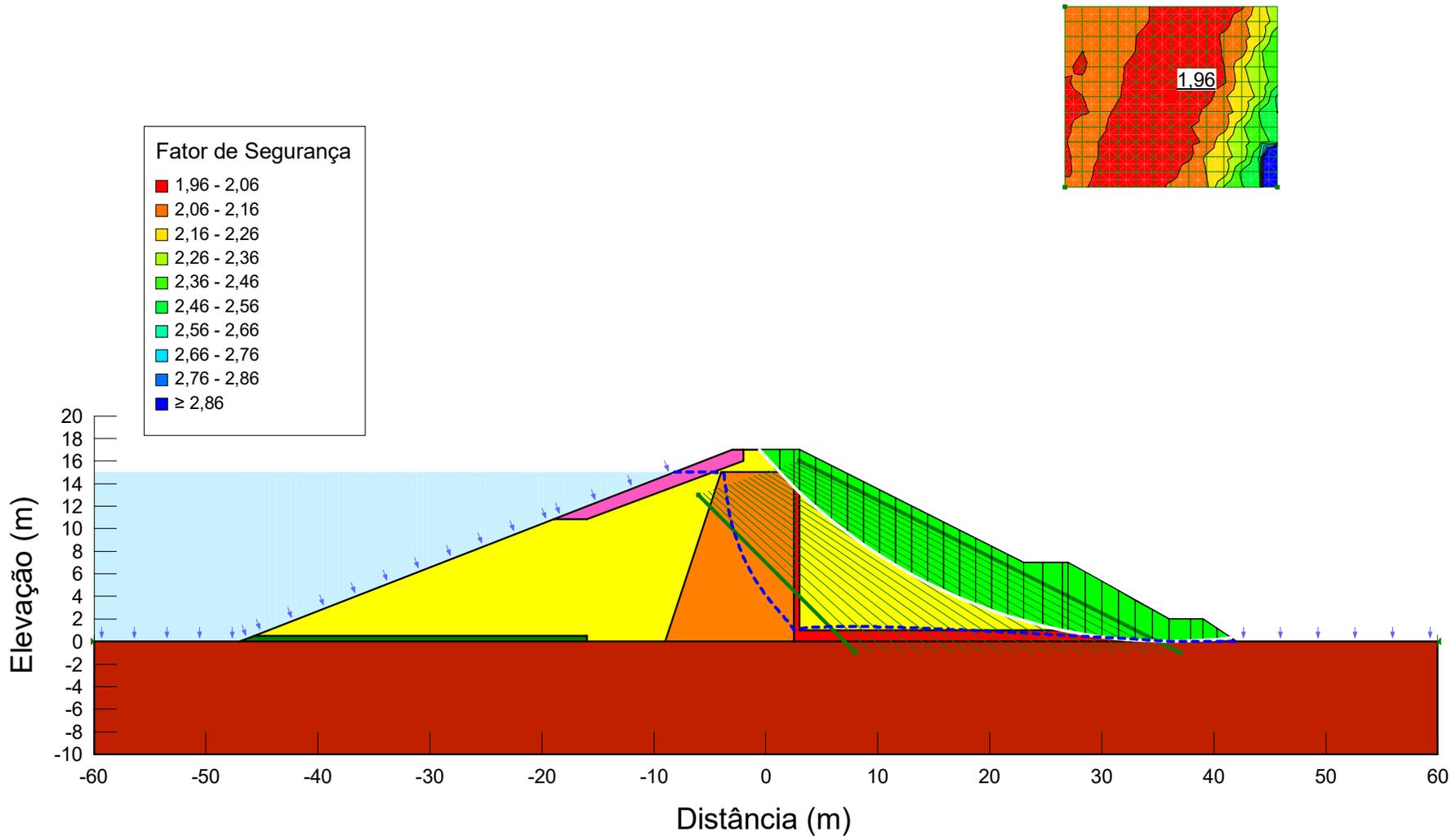


Fator de Segurança

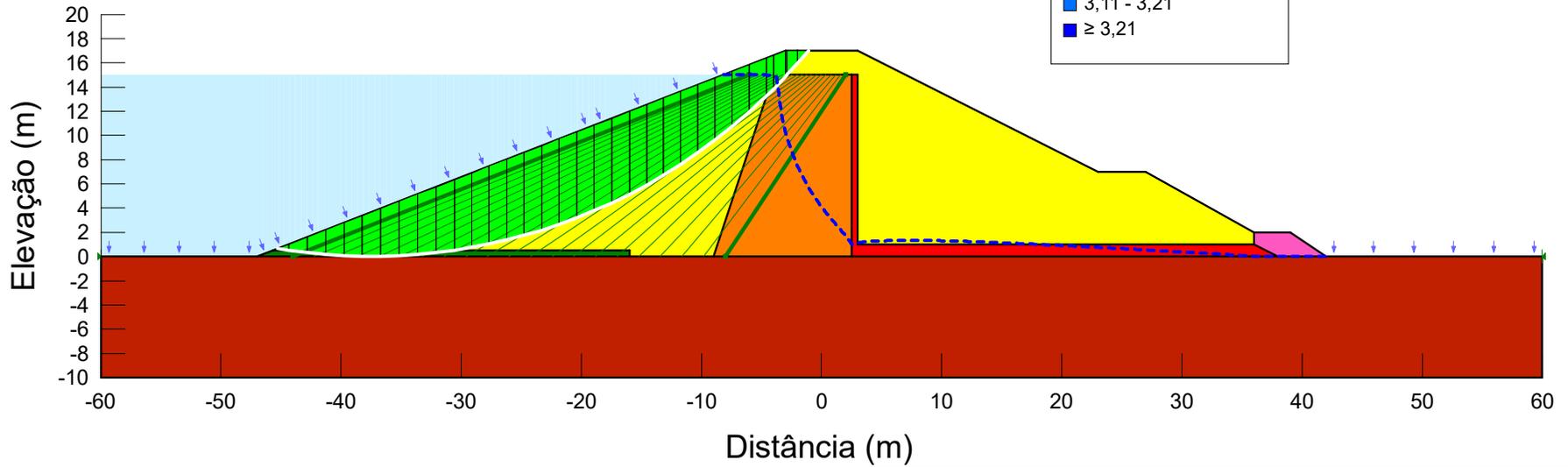
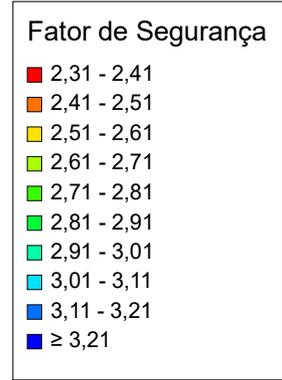
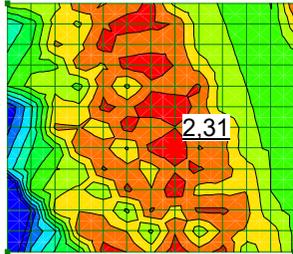
- 2,08 - 2,18
- 2,18 - 2,28
- 2,28 - 2,38
- 2,38 - 2,48
- 2,48 - 2,58
- 2,58 - 2,68
- 2,68 - 2,78
- 2,78 - 2,88
- 2,88 - 2,98
- ≥ 2,98



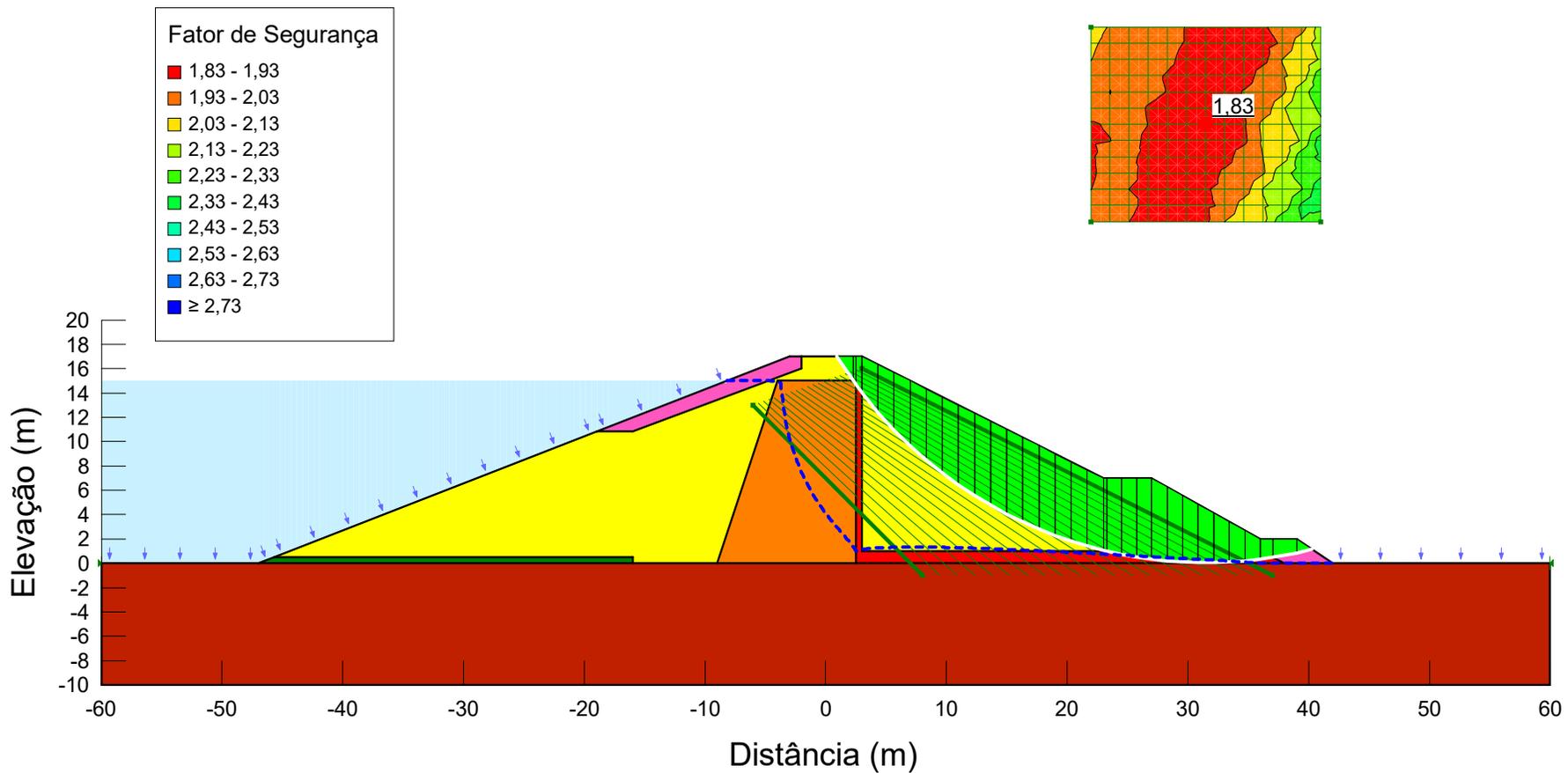
Regime de Operação - Material Grupo 2 - Montante - Spencer	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



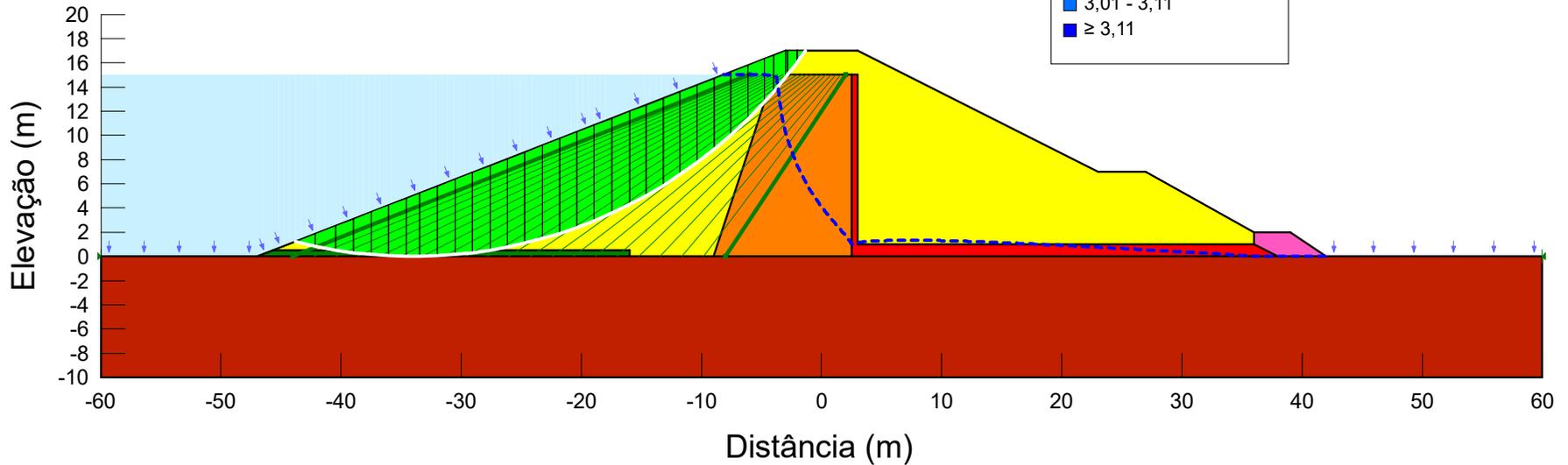
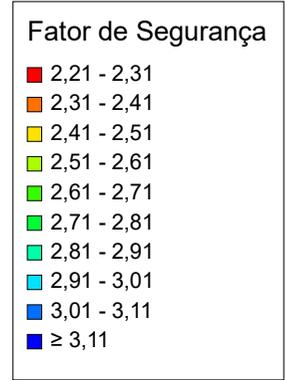
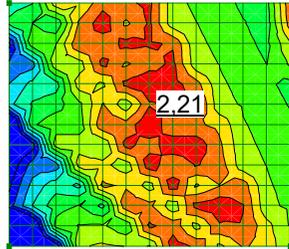
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



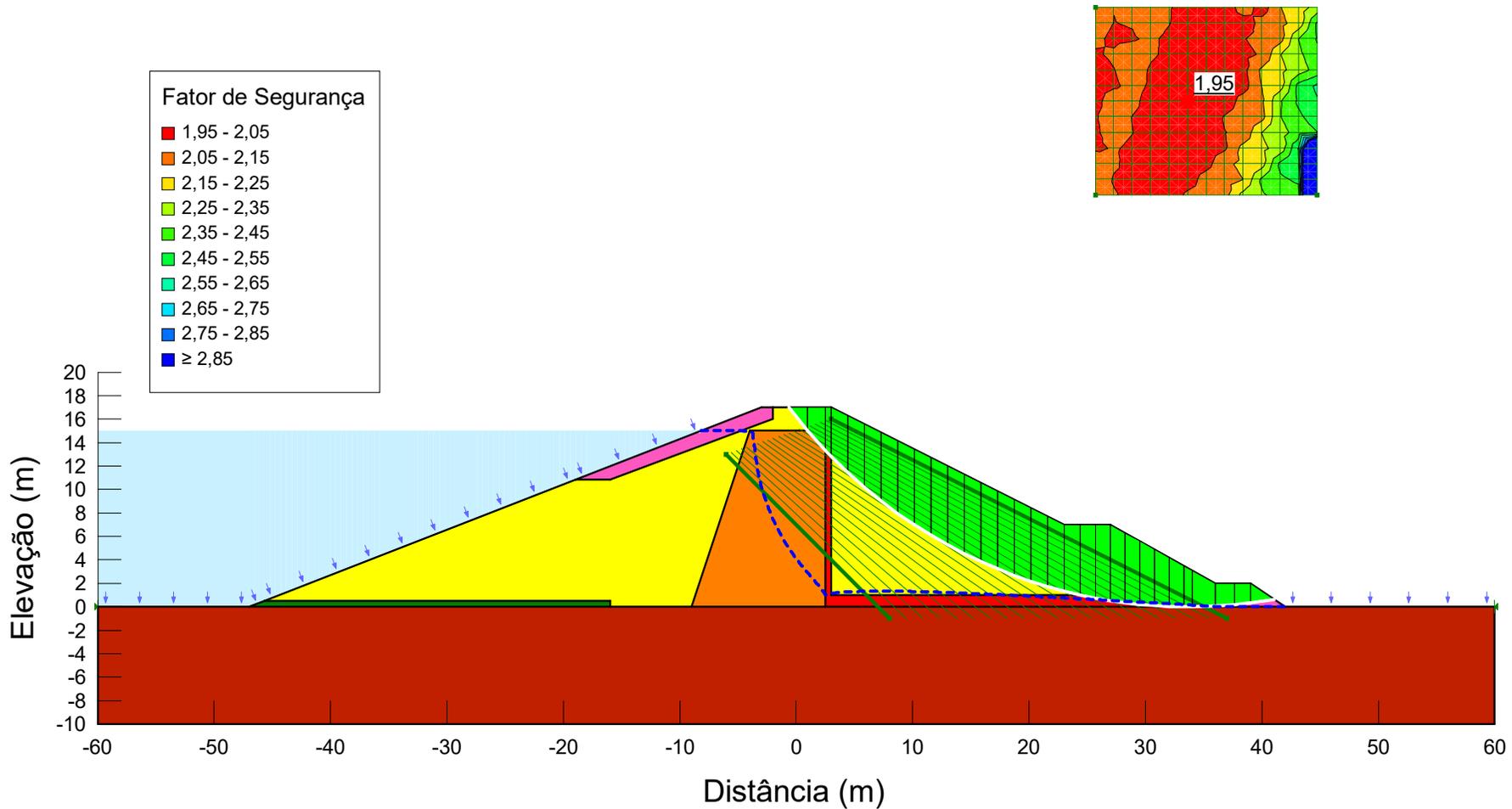
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



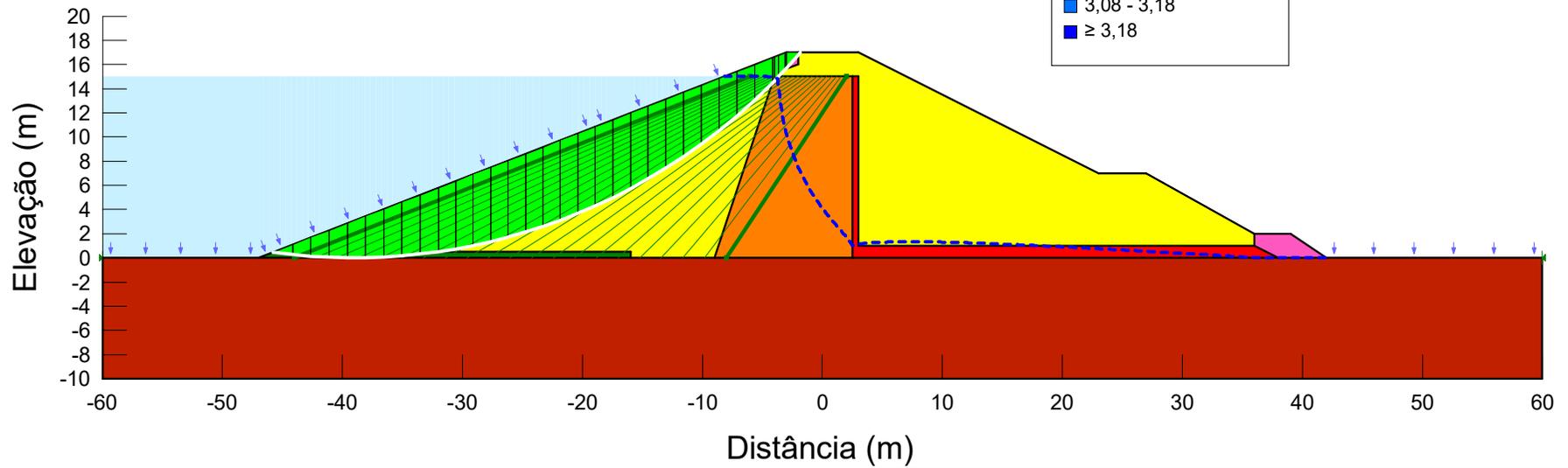
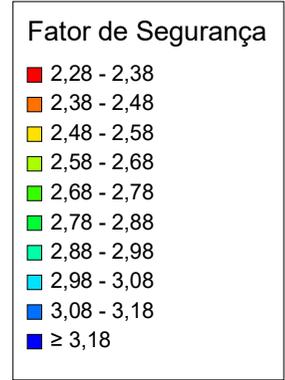
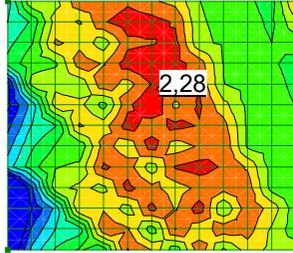
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



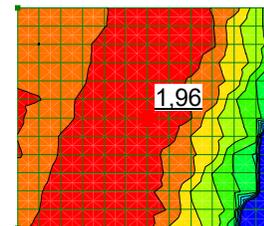
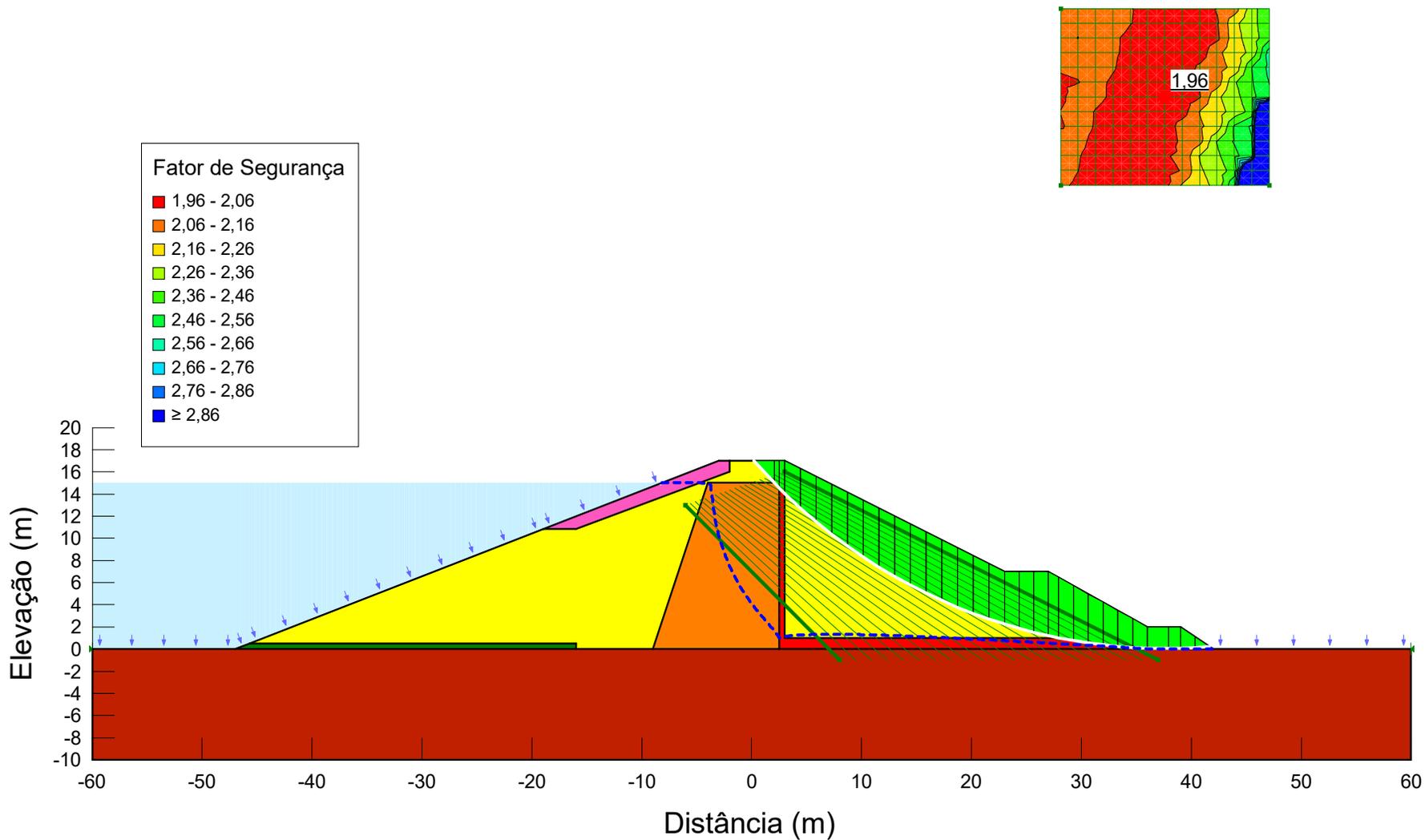
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



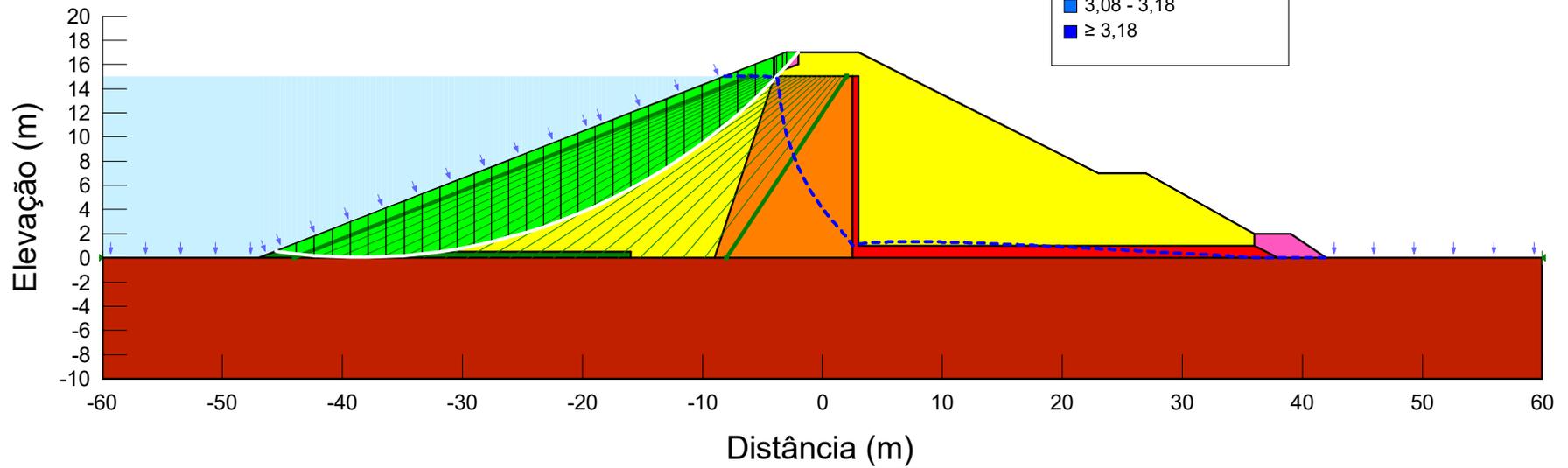
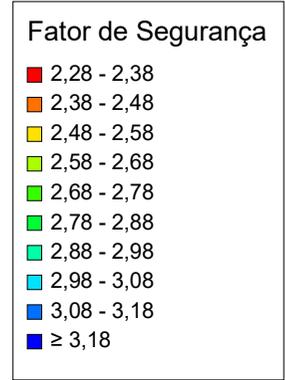
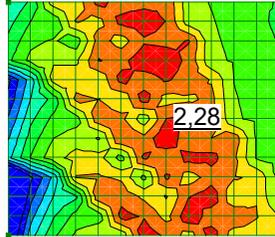
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



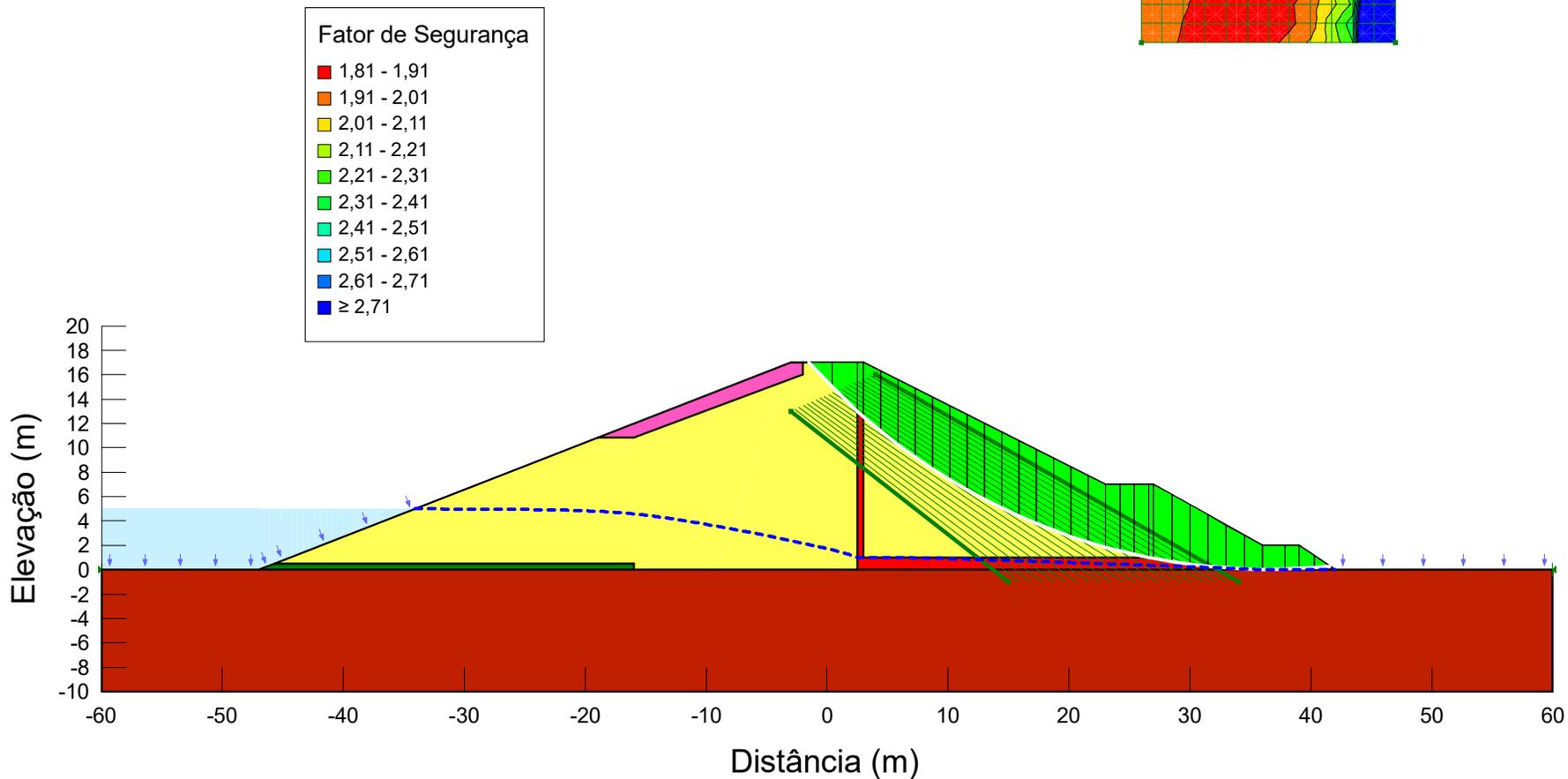
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



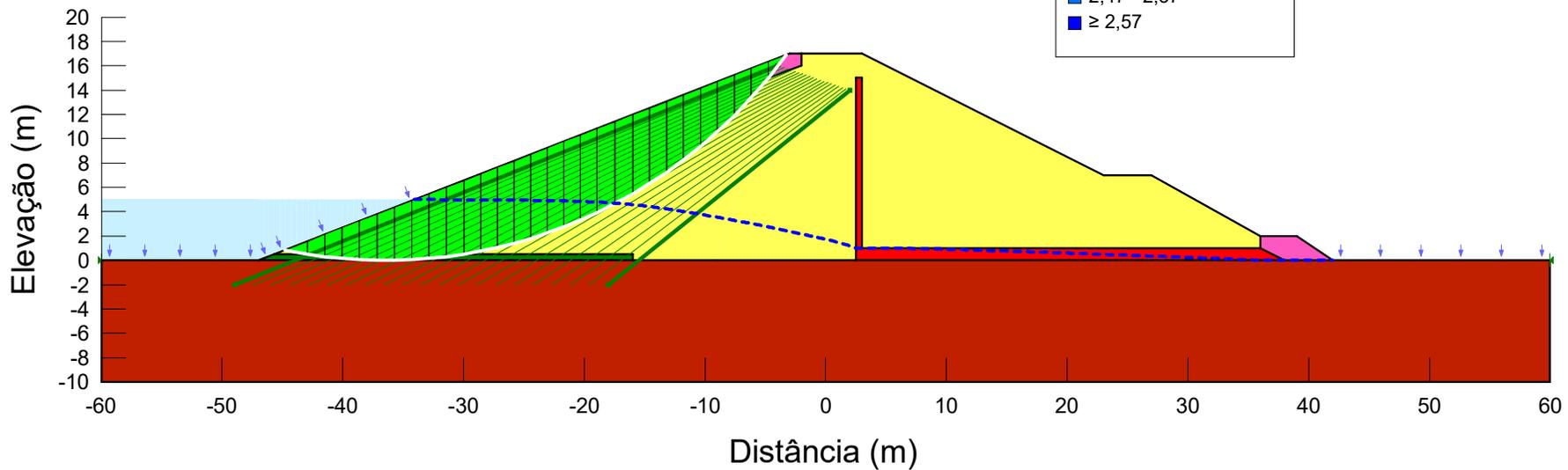
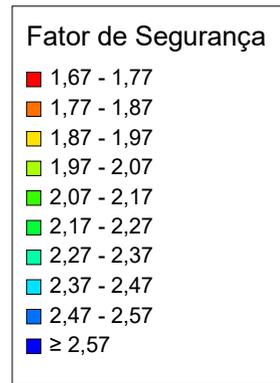
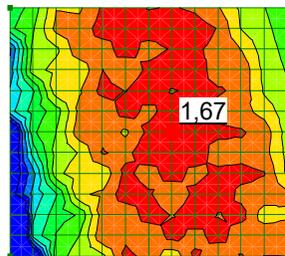
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Jusante - Spencer	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



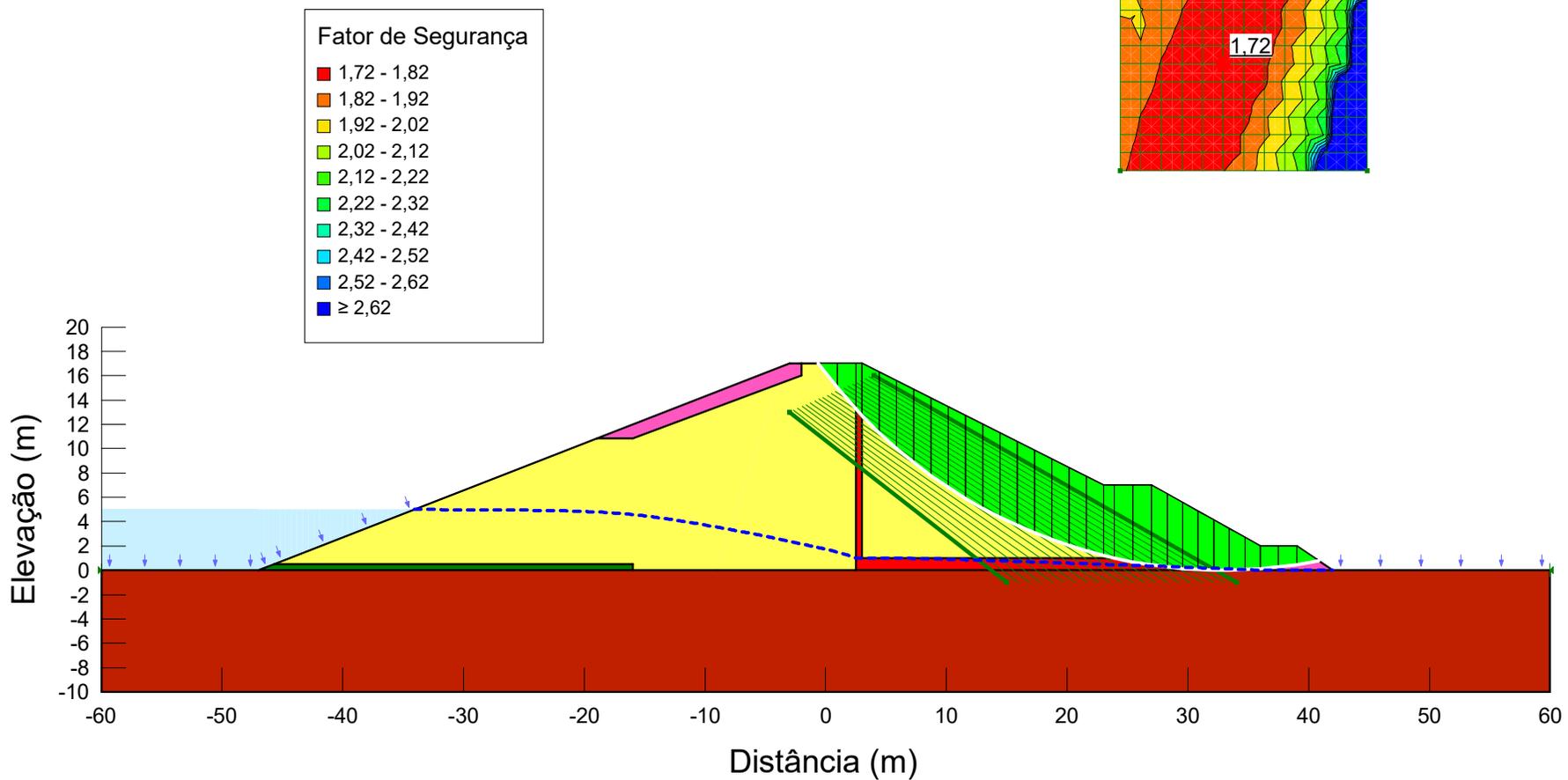
Regime de Operação - Material Grupo 3 - Montante - Spencer	
Análise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

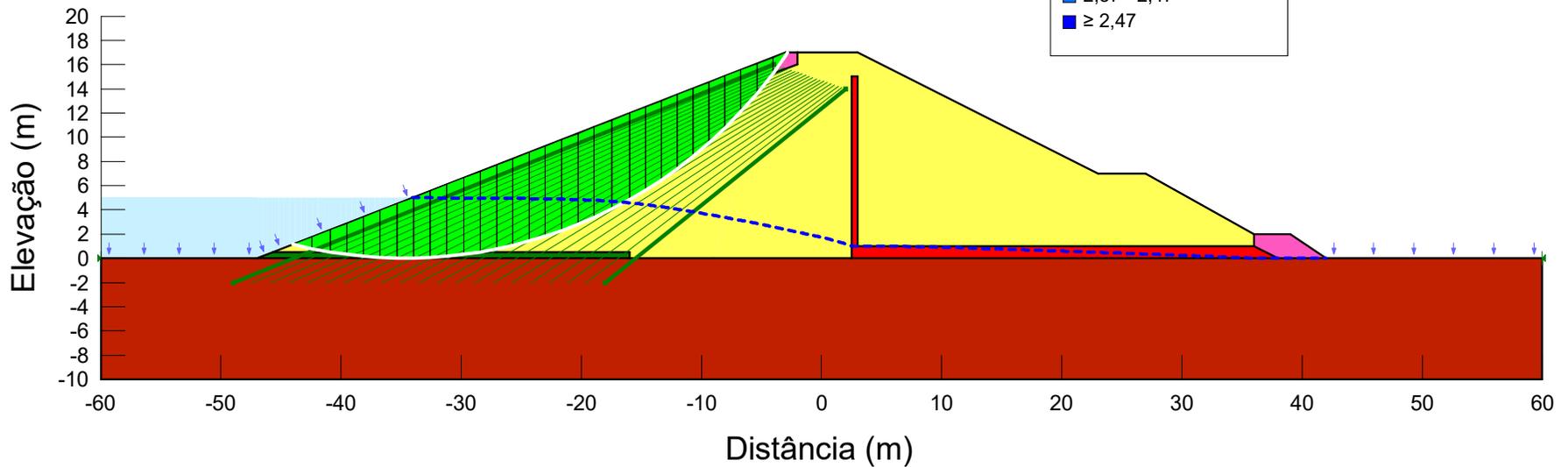
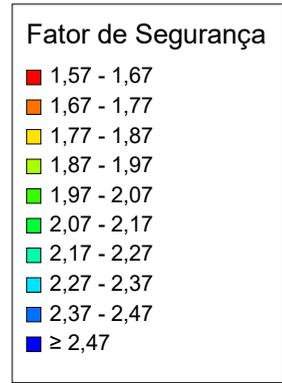
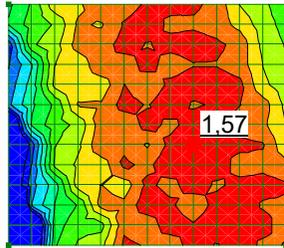


Rebaixamento - Material Original - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

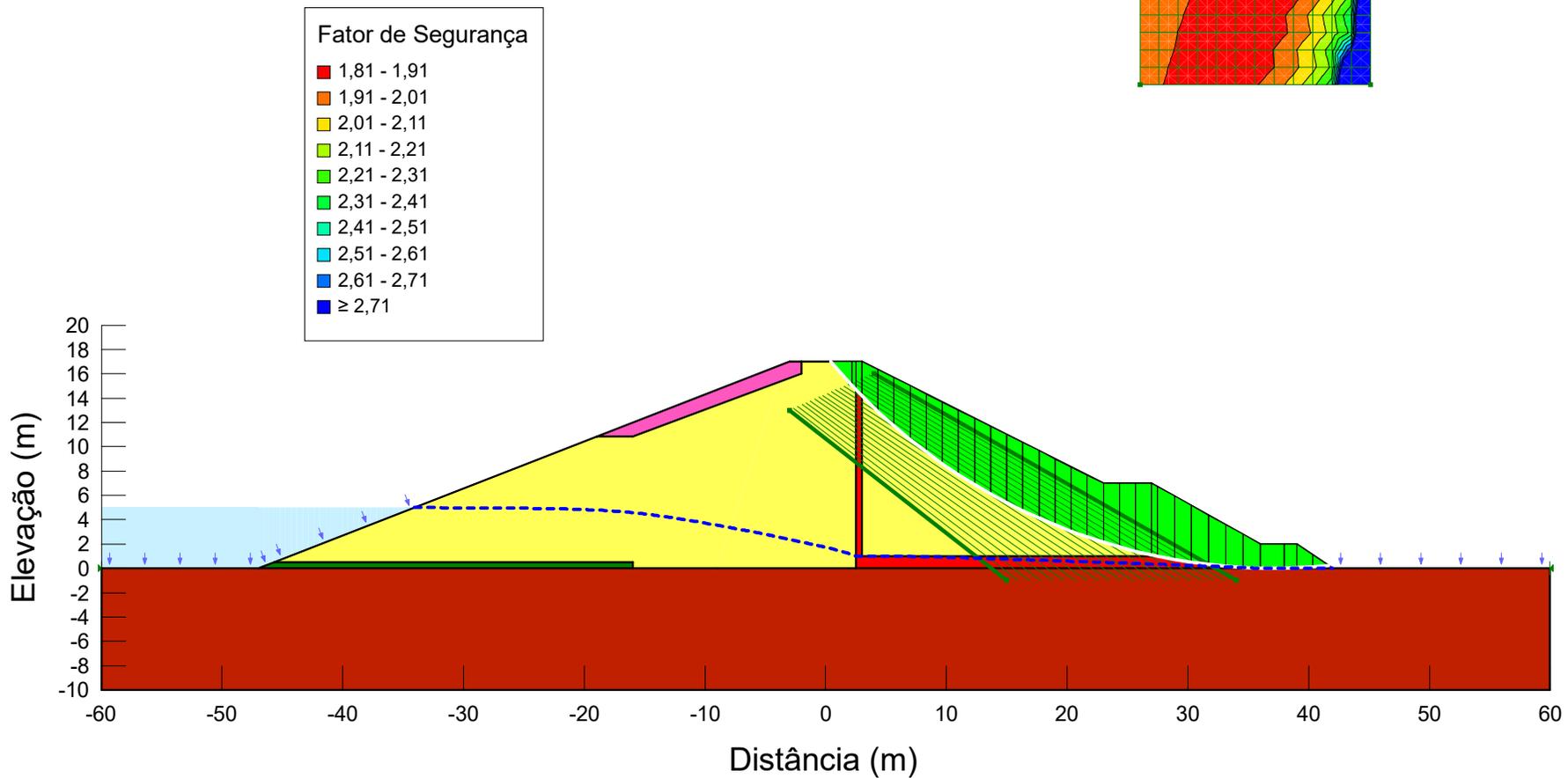


Rebaixamento - Material Original - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

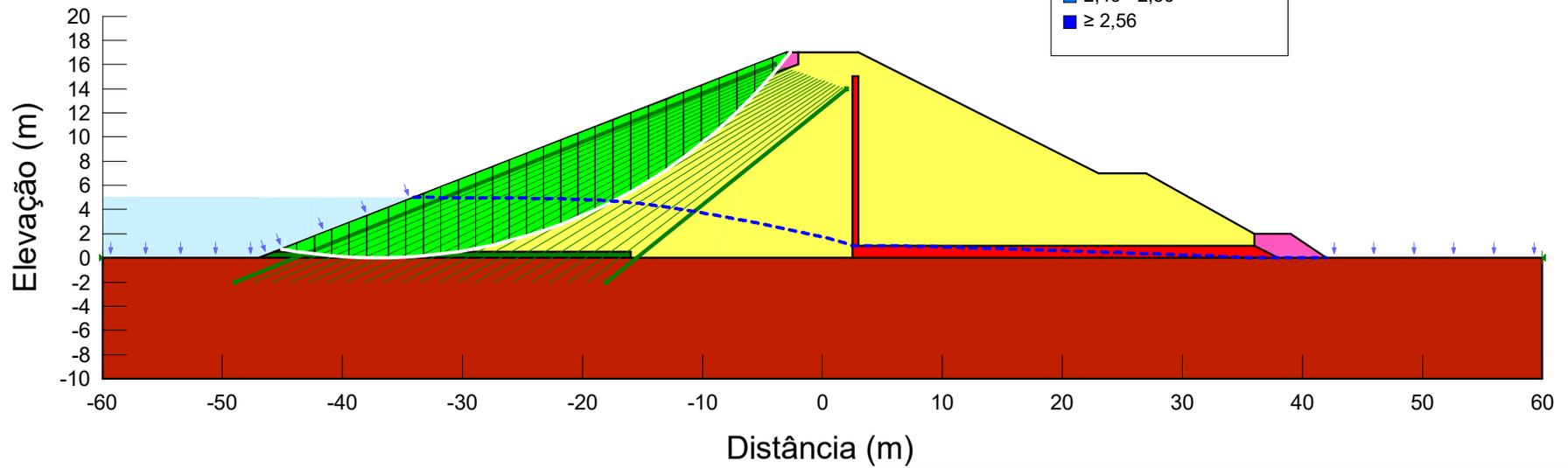
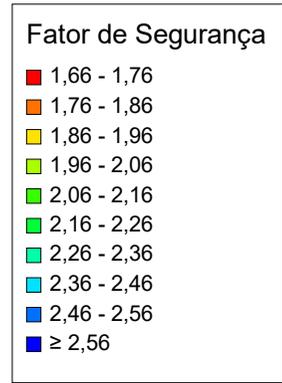
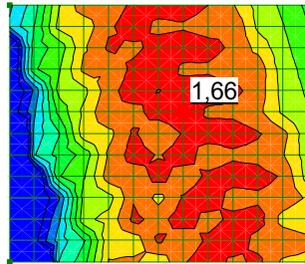




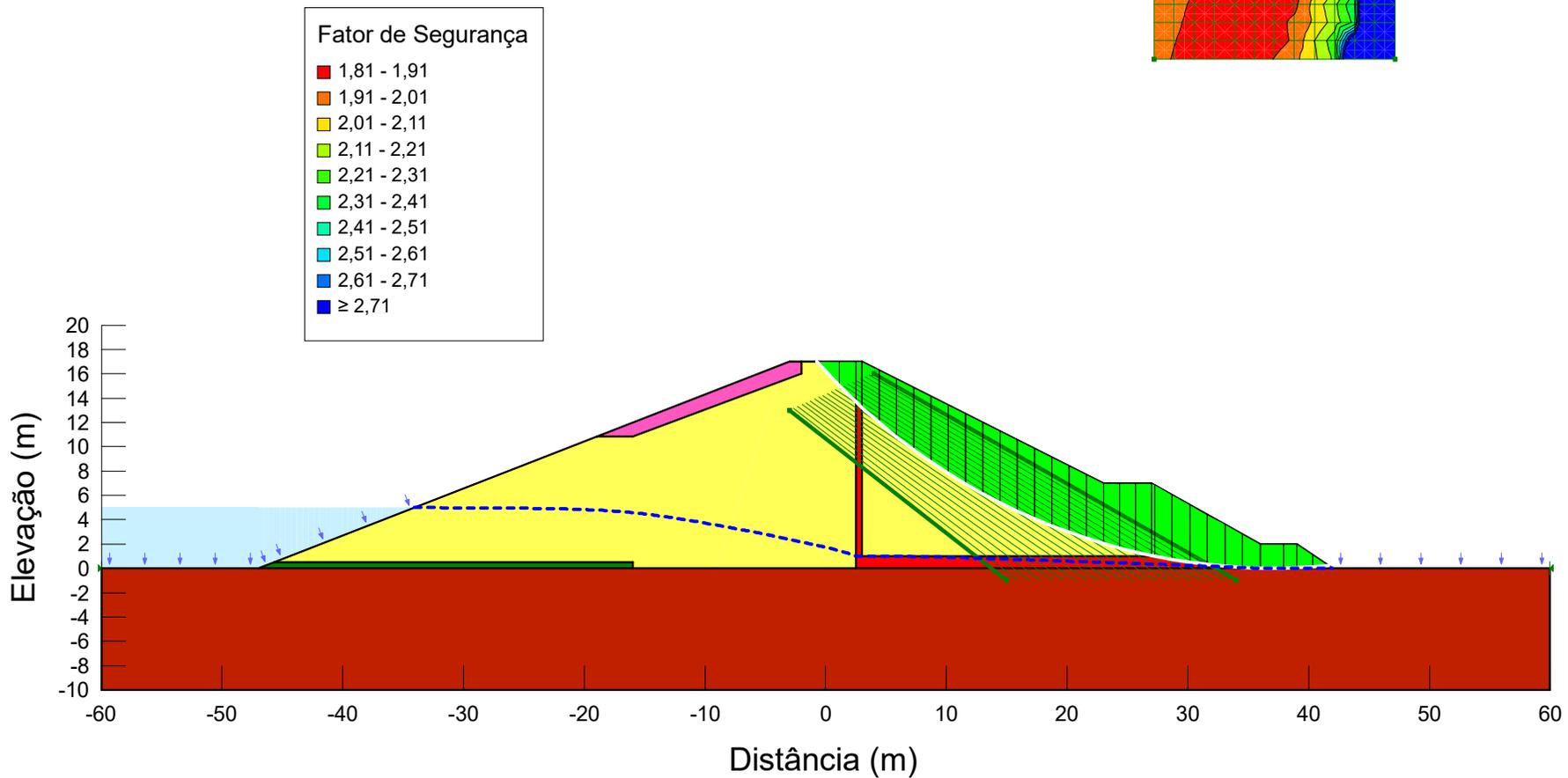
Rebaixamento - Material Original - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



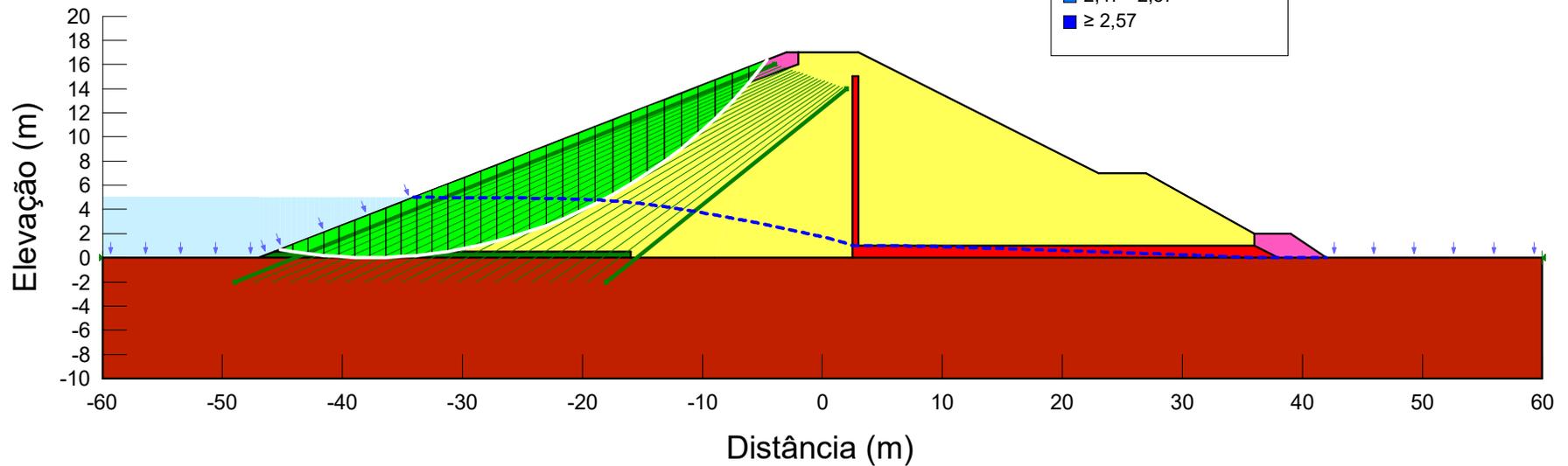
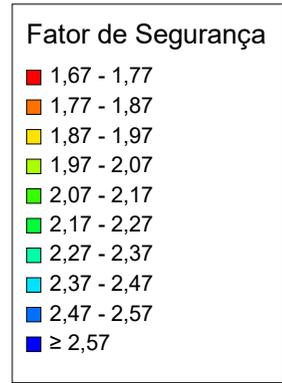
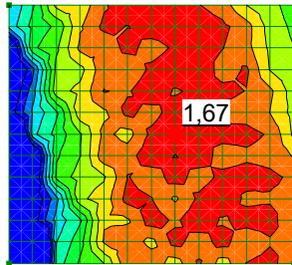
Rebaixamento - Material Original - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



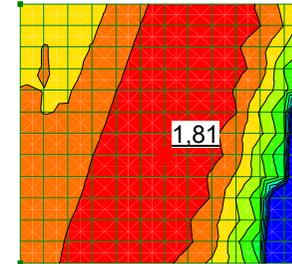
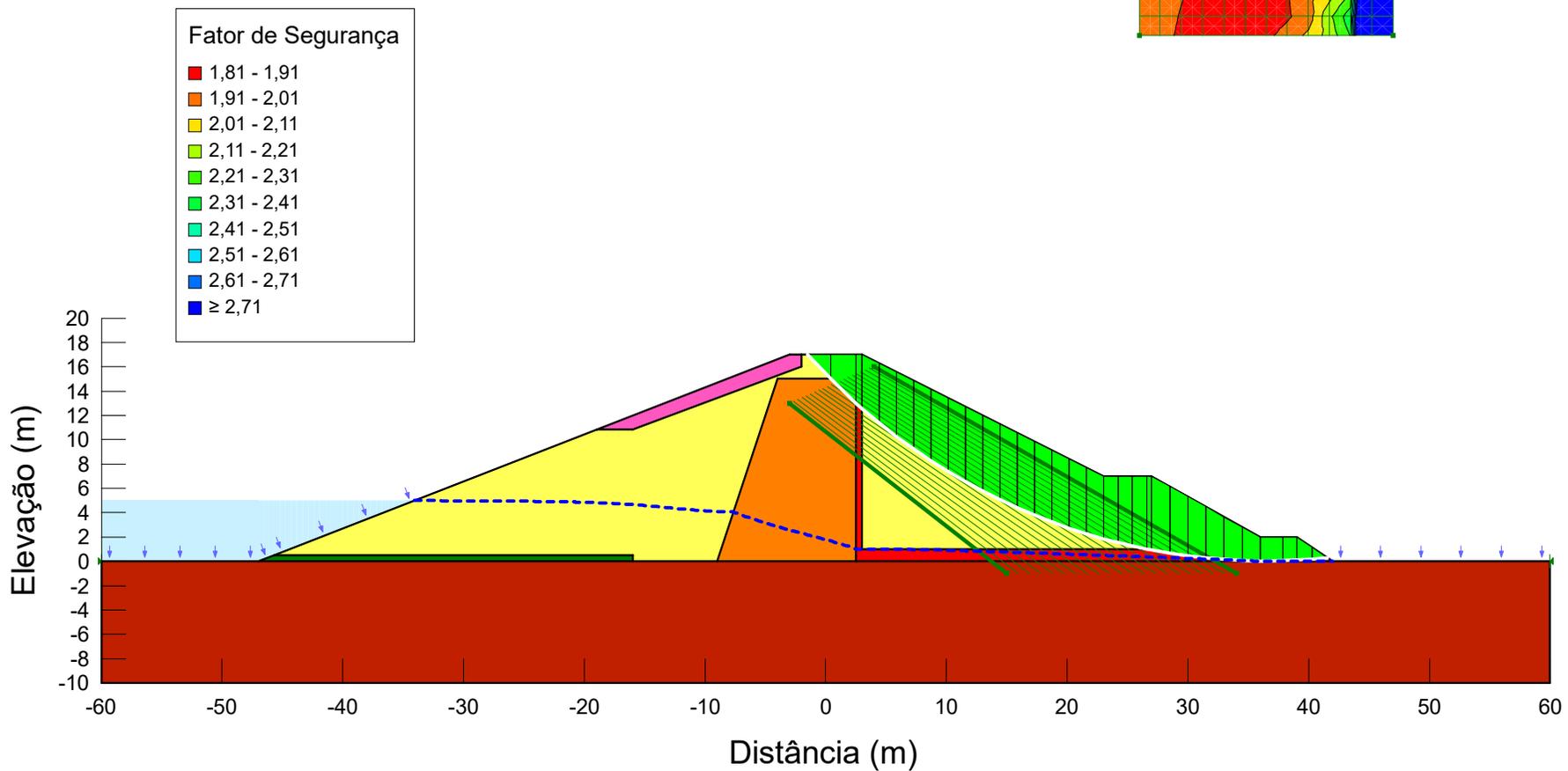
Rebaixamento - Material Original - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



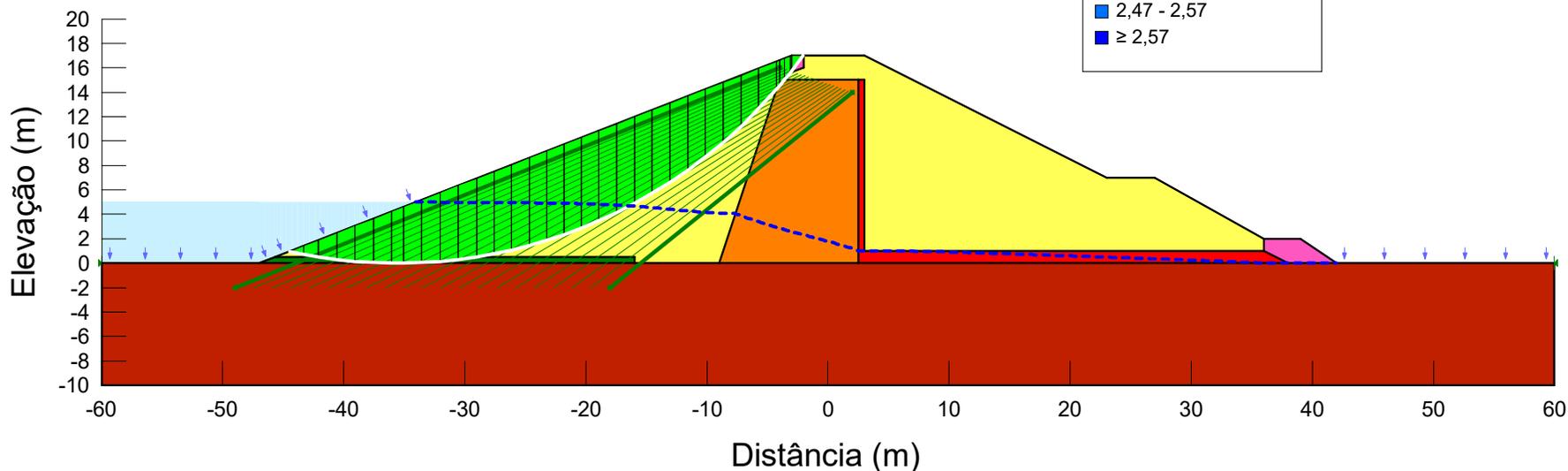
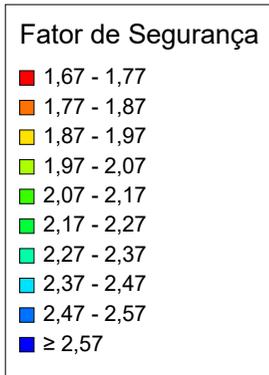
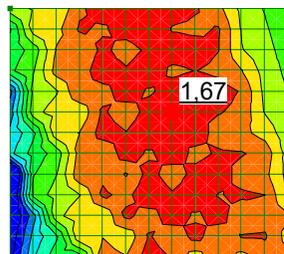
Rebaixamento - Material Original - Jusante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



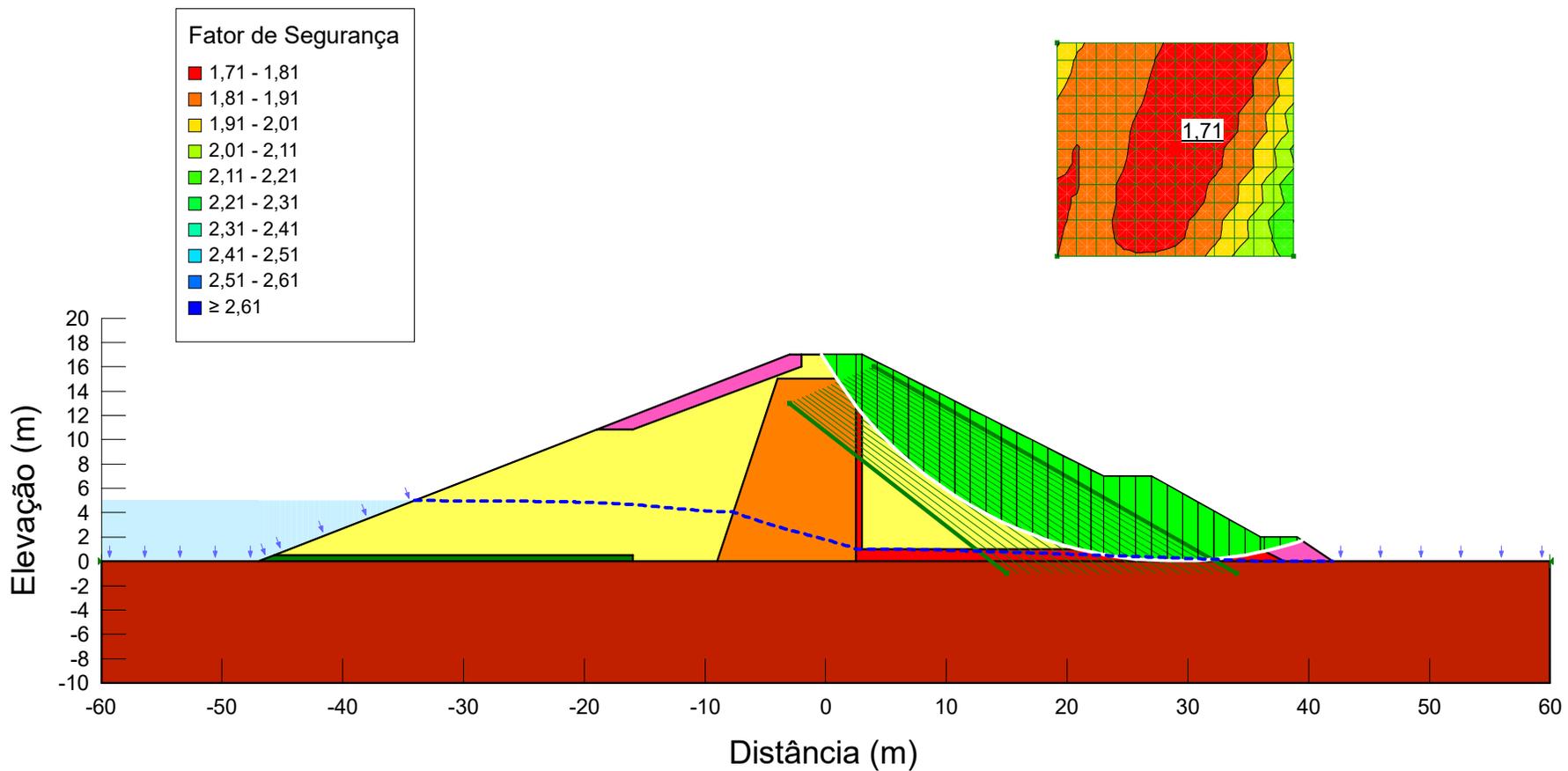
Rebaixamento - Material Original - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



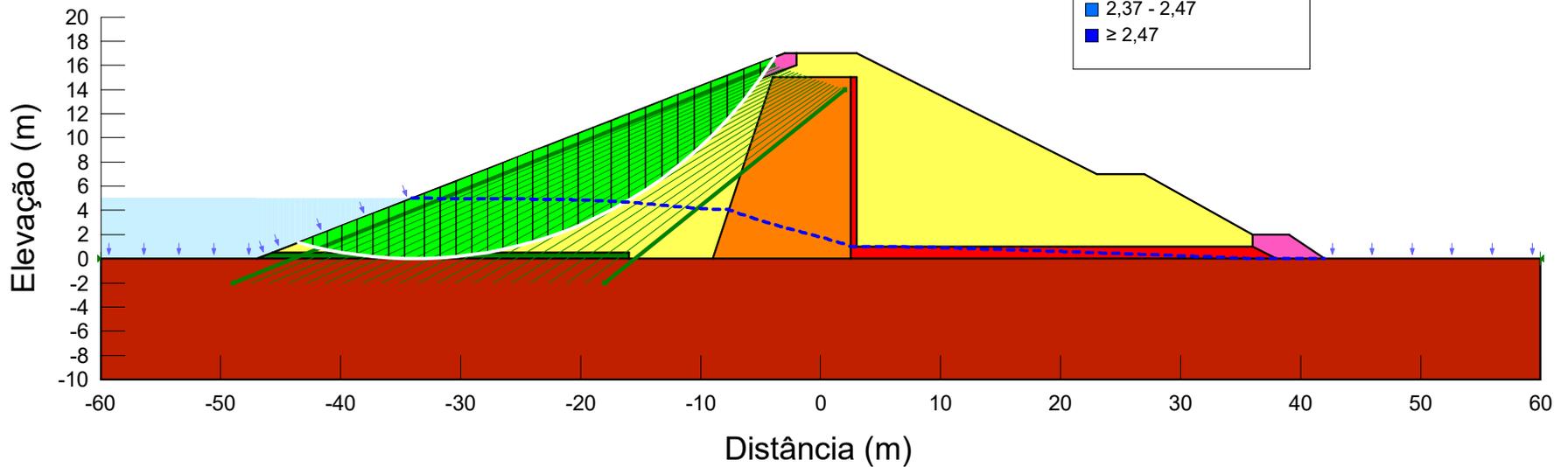
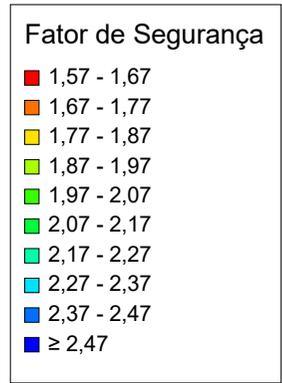
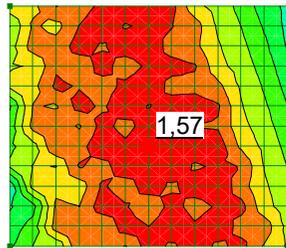
Rebaixamento - Material Grupo 1 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



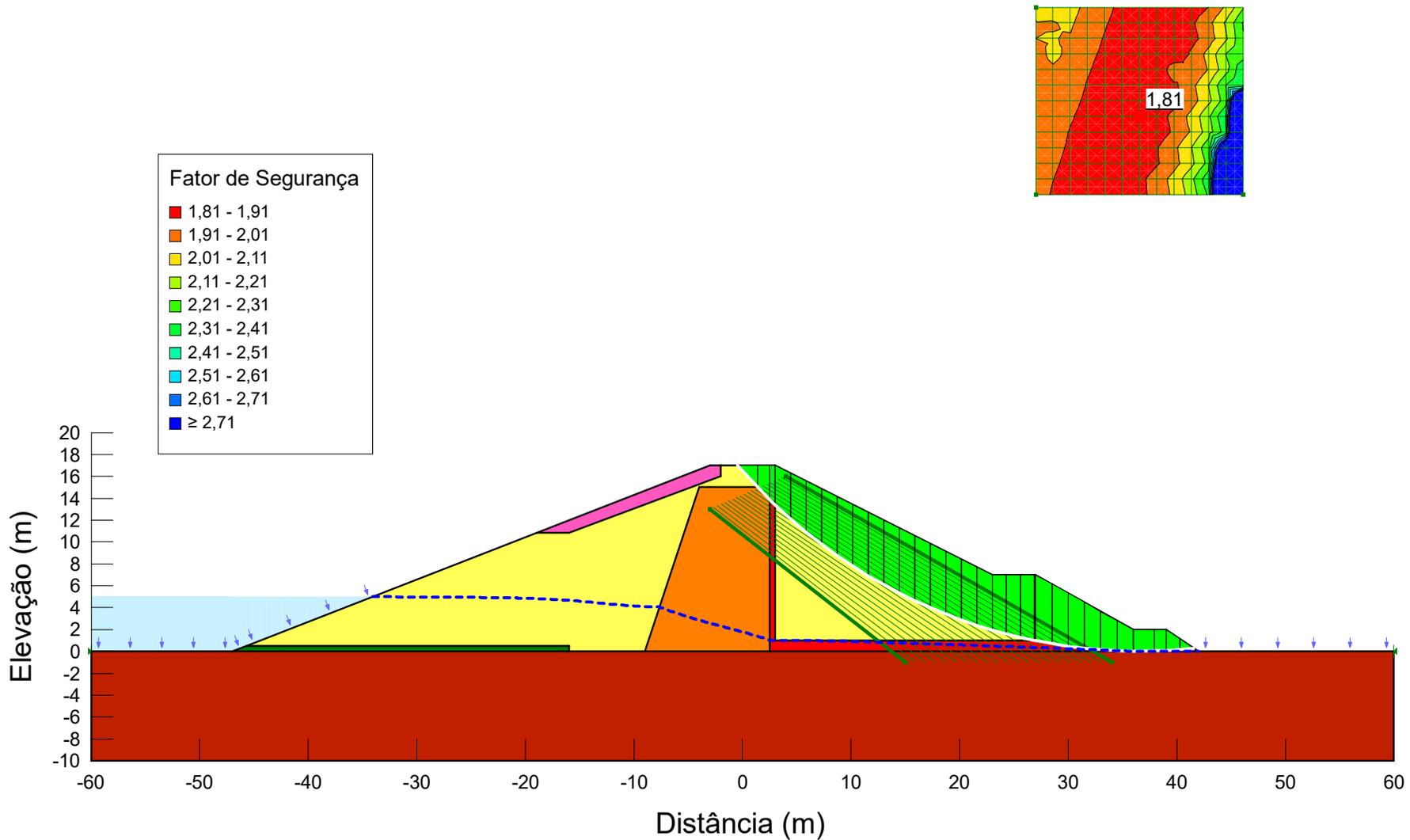
Rebaixamento - Material Grupo 1 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



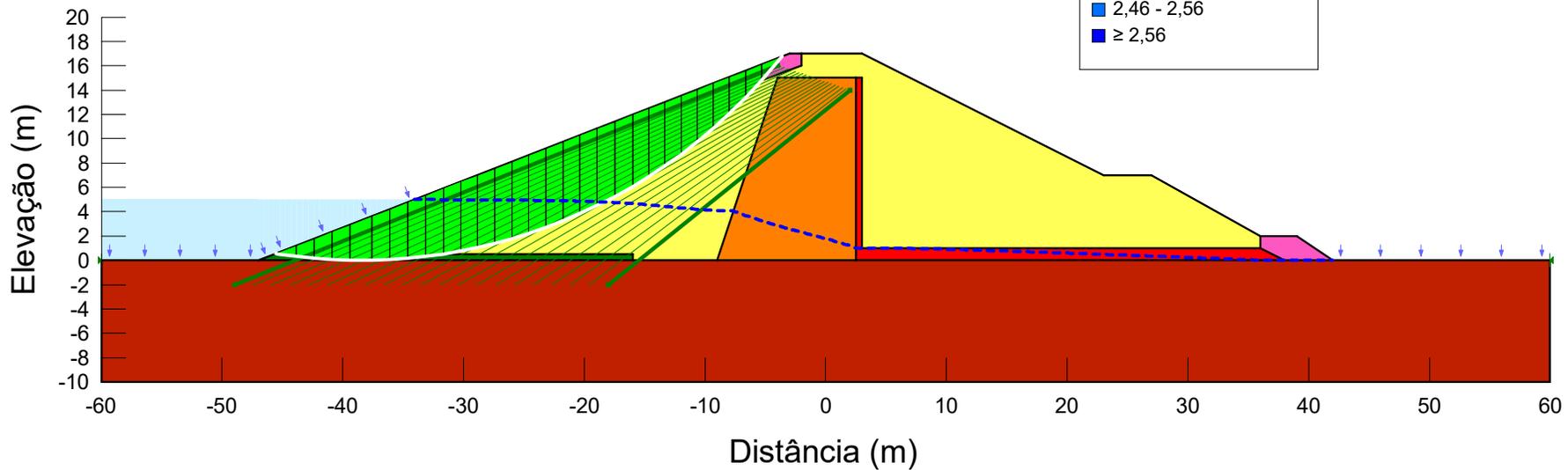
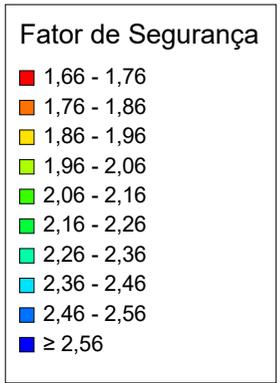
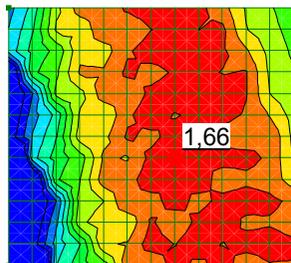
Rebaixamento - Material Grupo 1 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



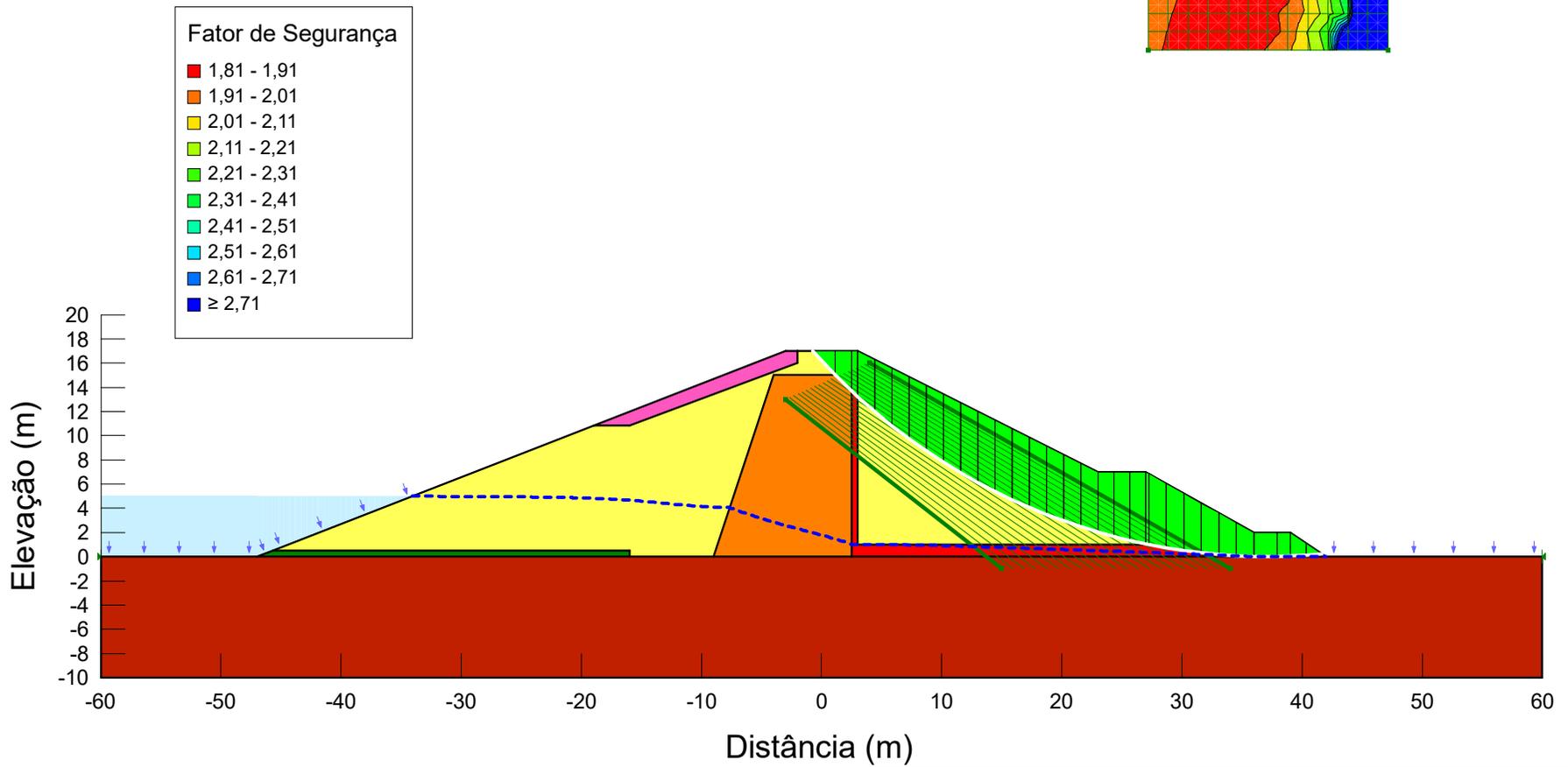
Rebaixamento - Material Grupo 1 - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Rebaixamento - Material Grupo 1 - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Rebaixamento - Material Grupo 1 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

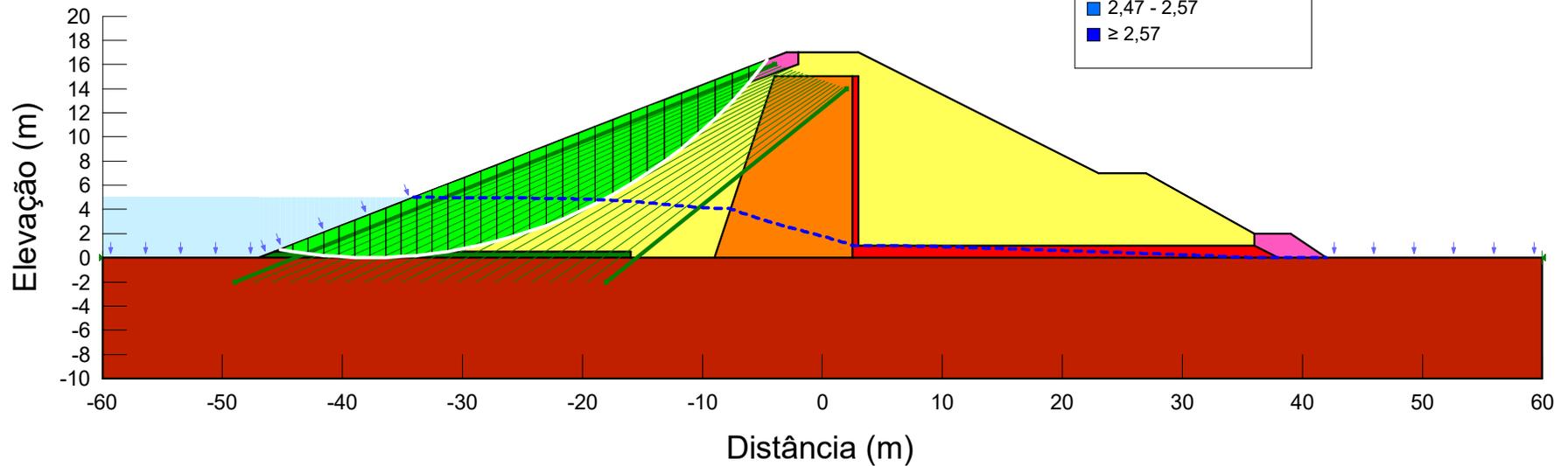
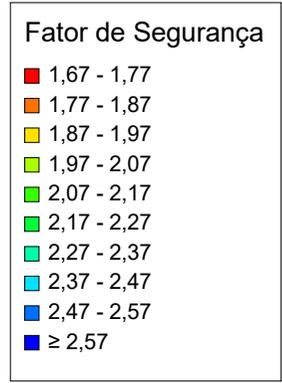
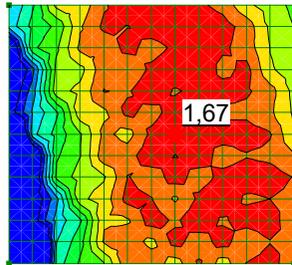


Rebaixamento - Material Grupo 1 - Jusante - Spencer

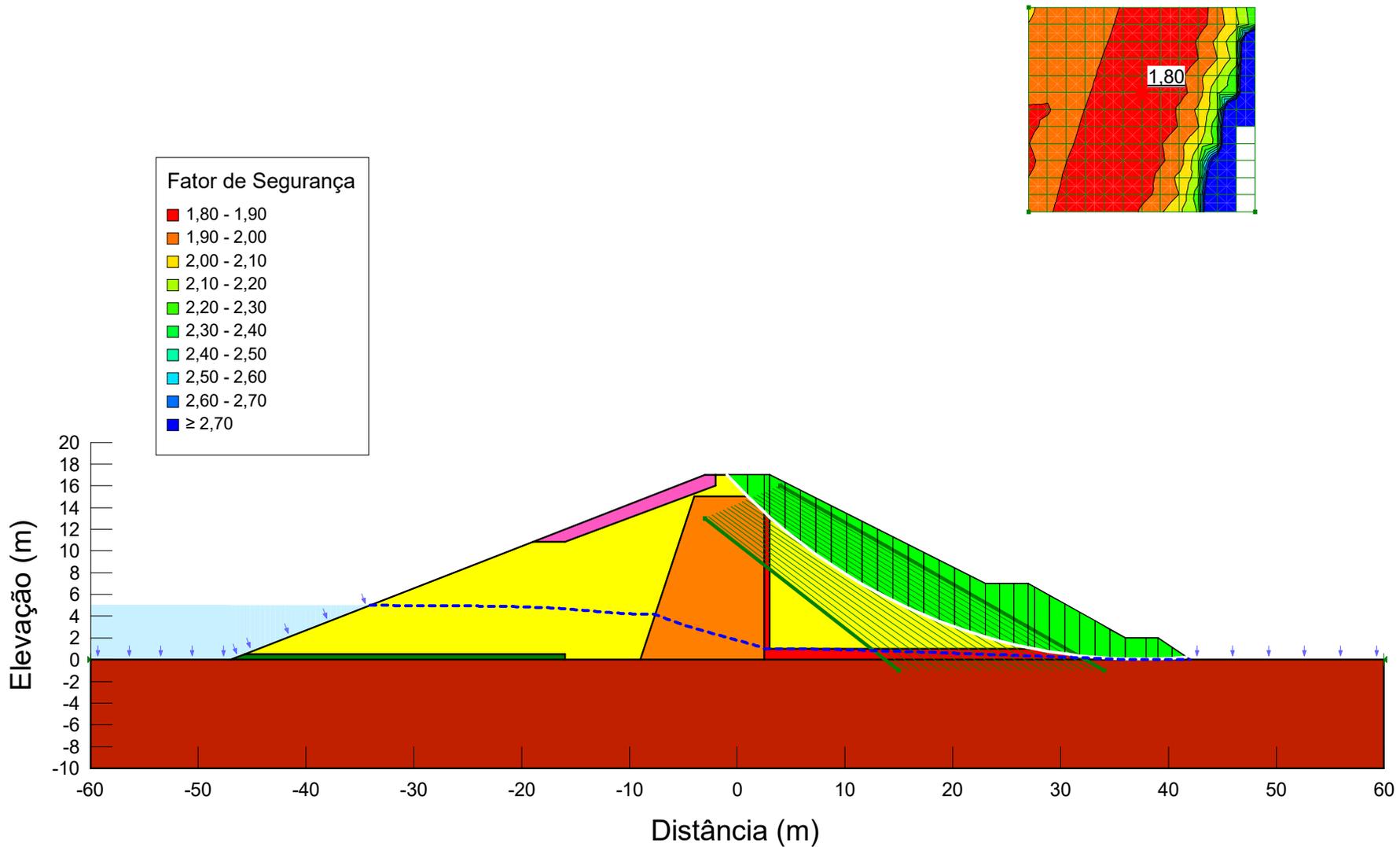
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz

21/06/2024

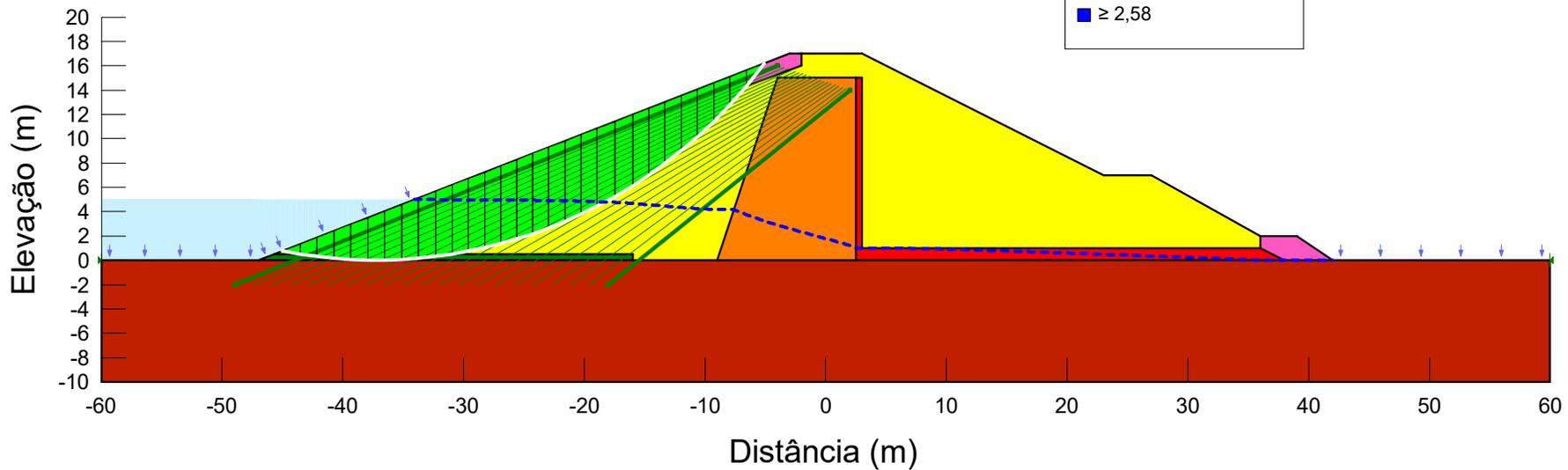
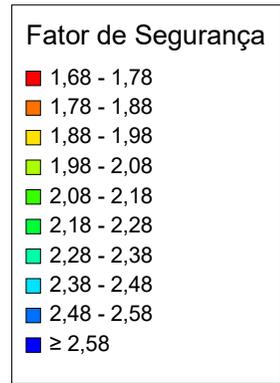
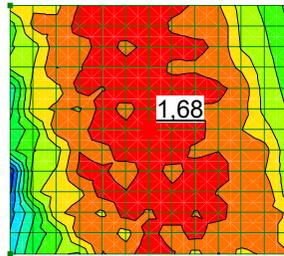
1:550



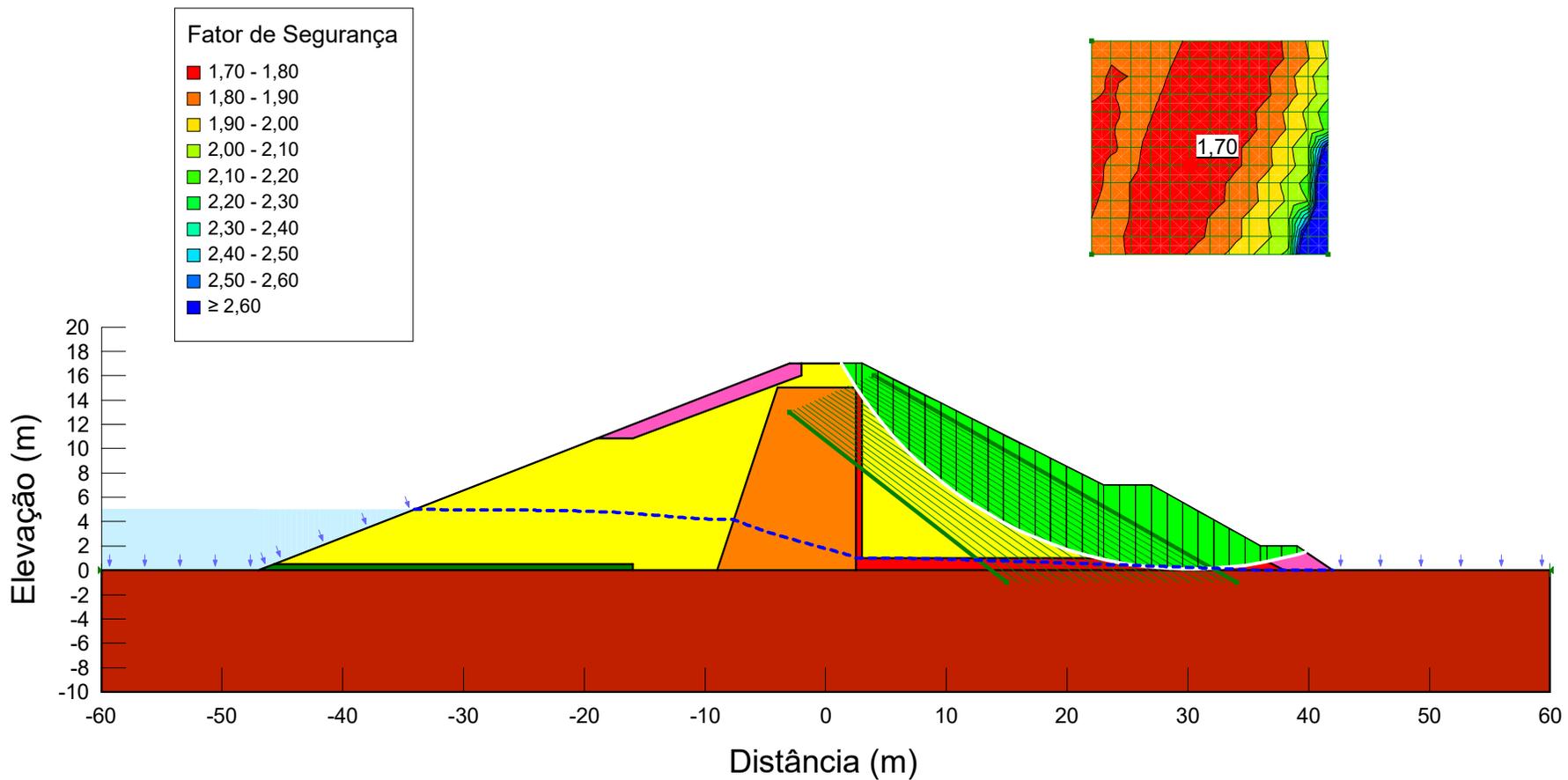
Rebaixamento - Material Grupo 1 - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

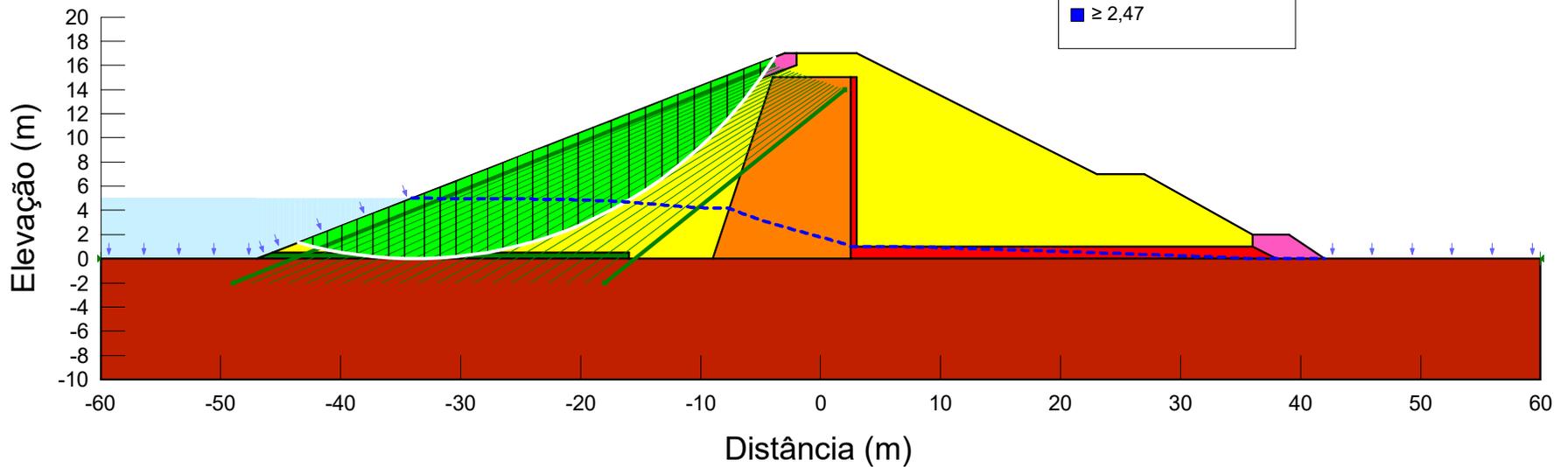
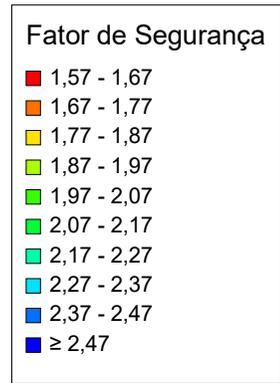
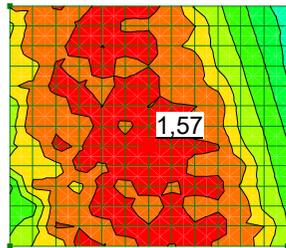


Rebaixamento - Material Grupo 2 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

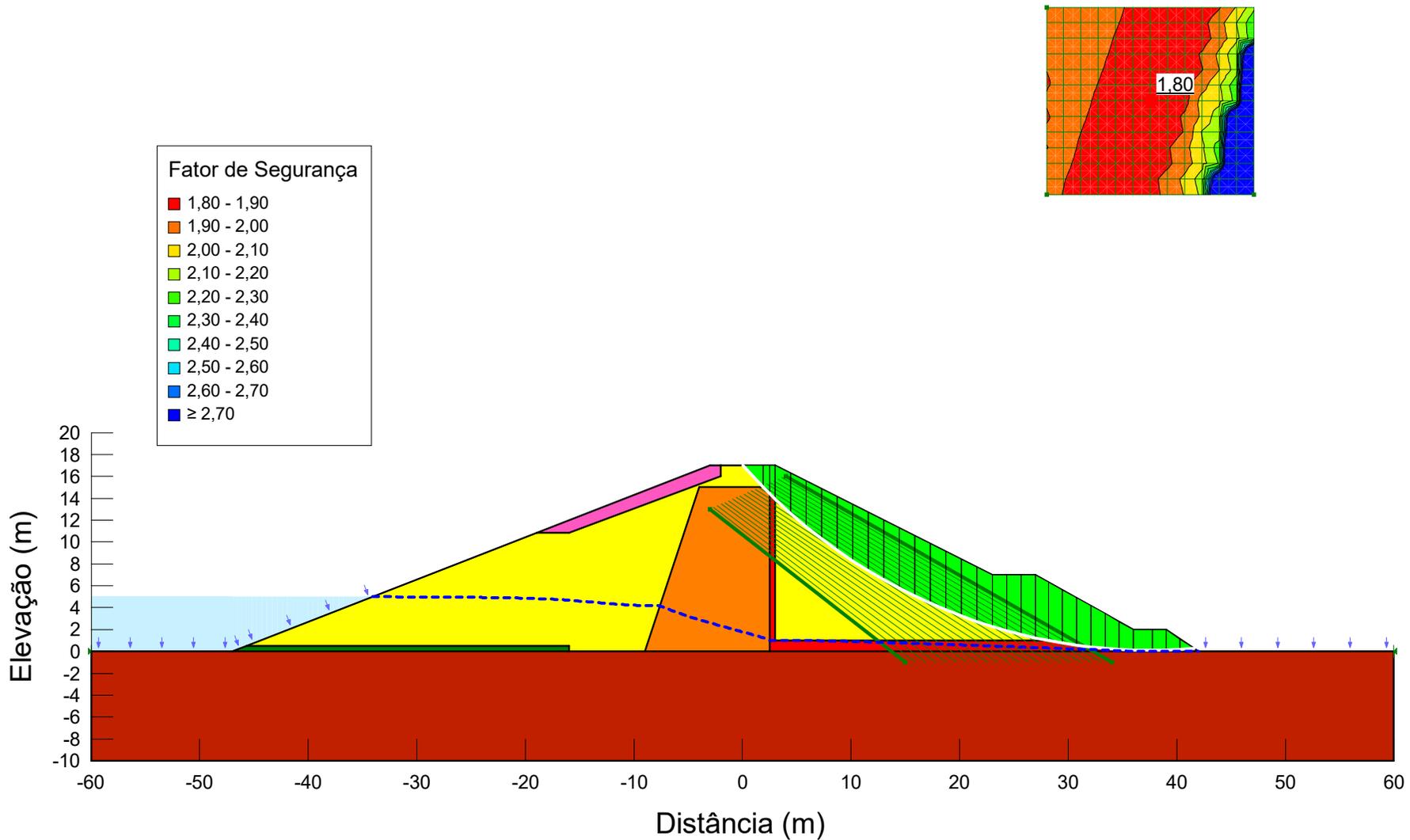


Rebaixamento - Material Grupo 2 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550

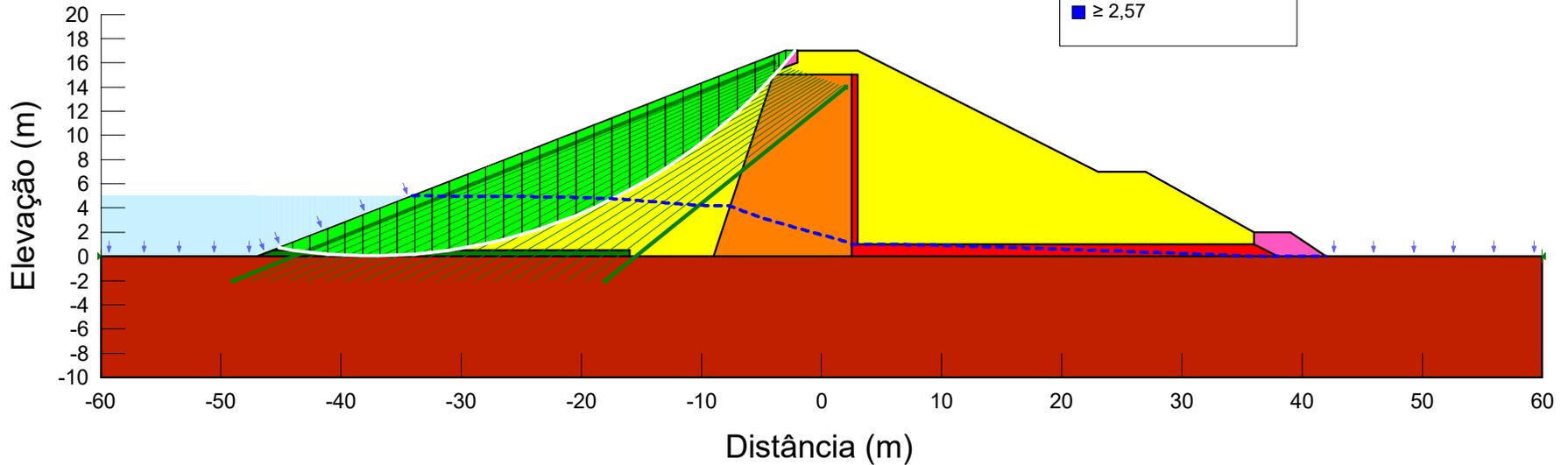
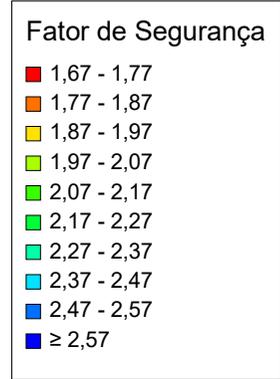
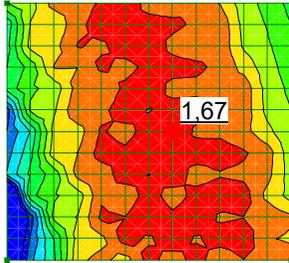




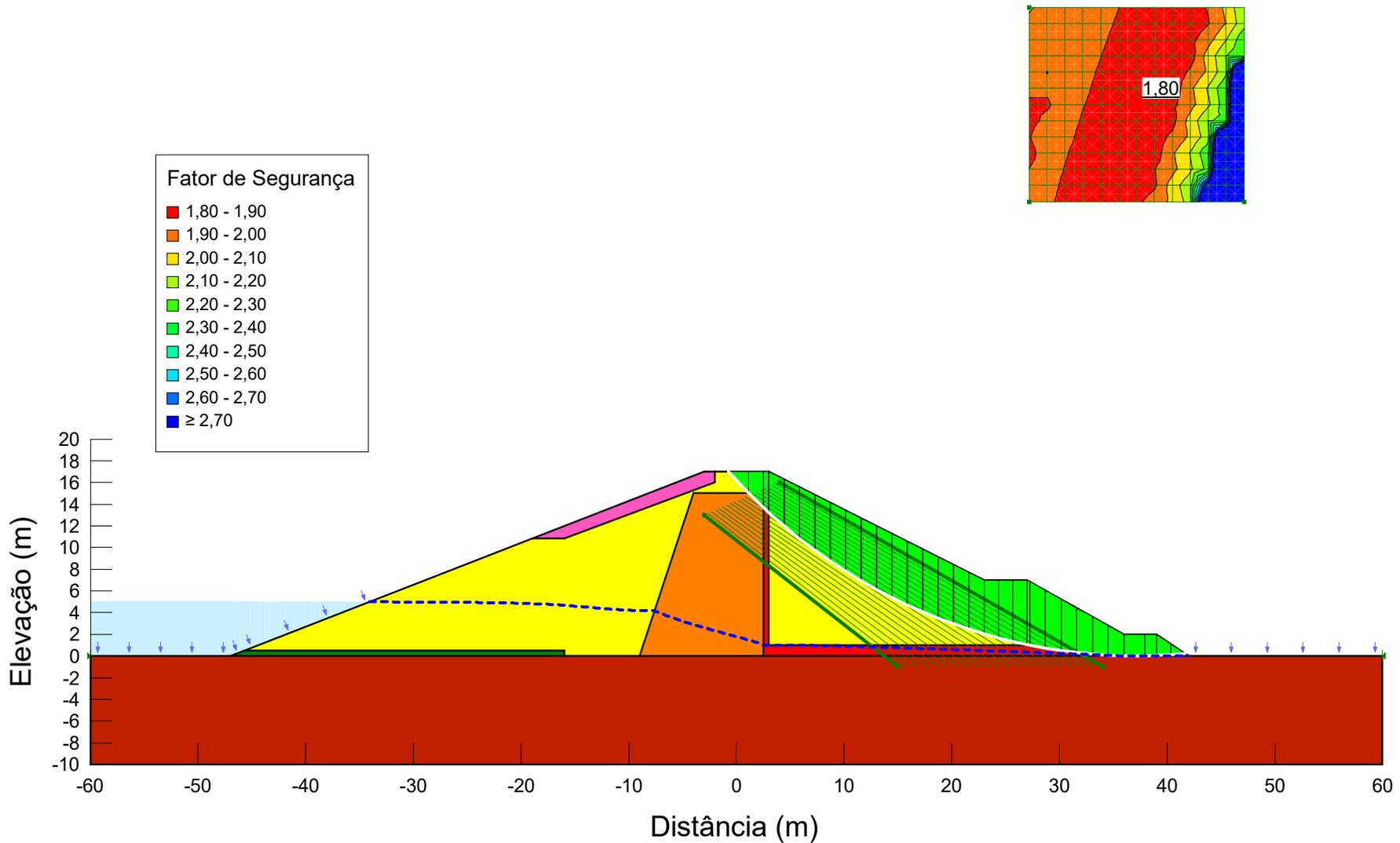
Rebaixamento - Material Grupo 2 - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



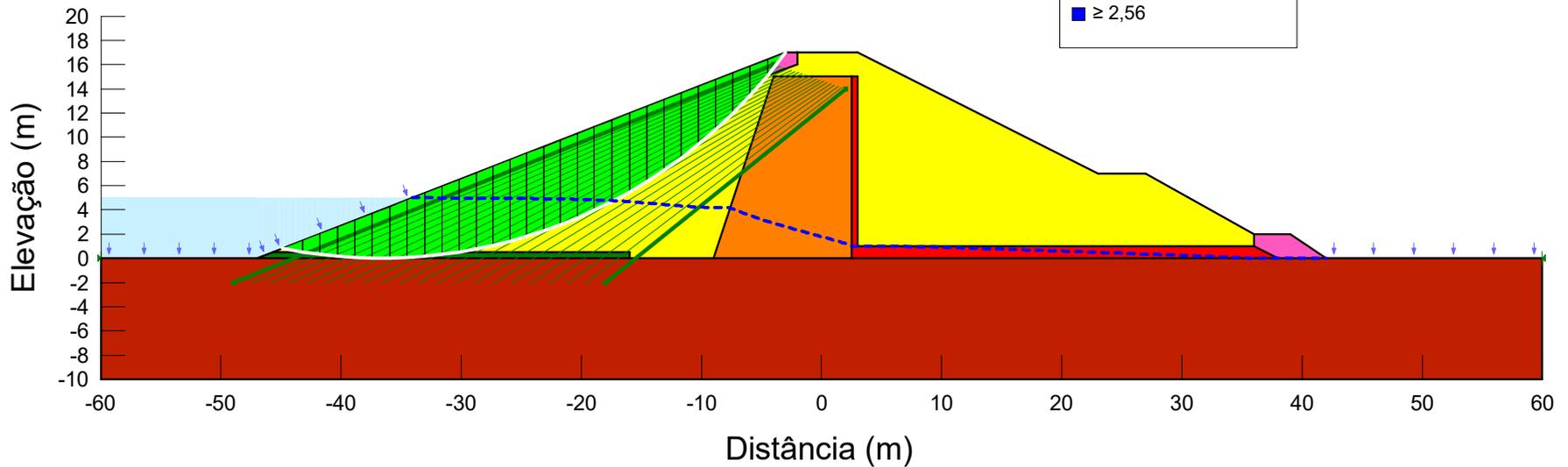
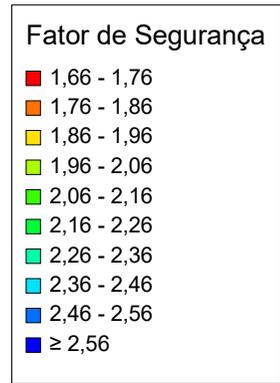
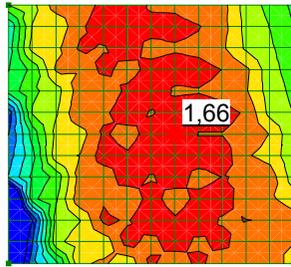
Rebaixamento - Material Grupo 2 - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



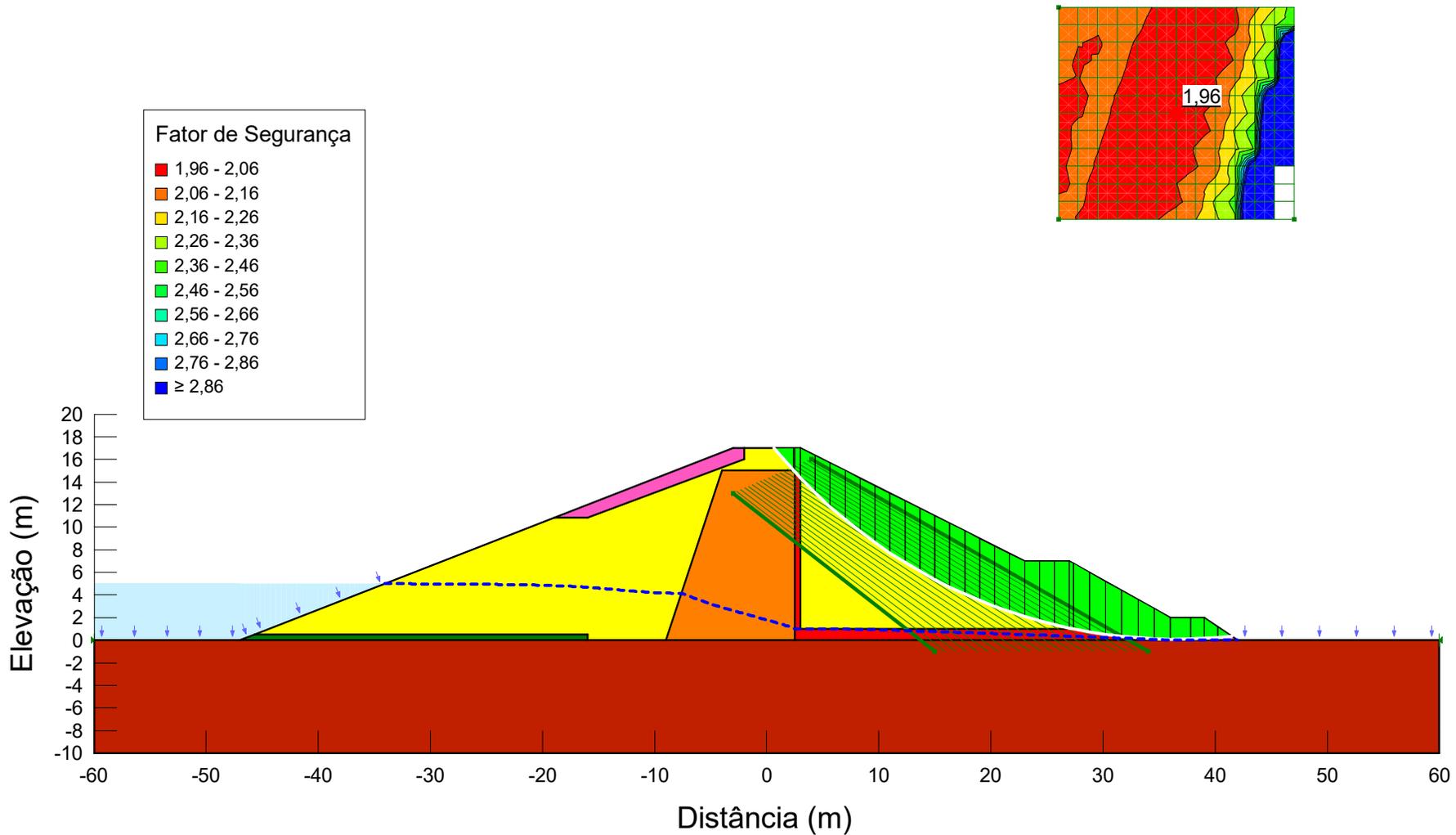
Rebaixamento - Material Grupo 2 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



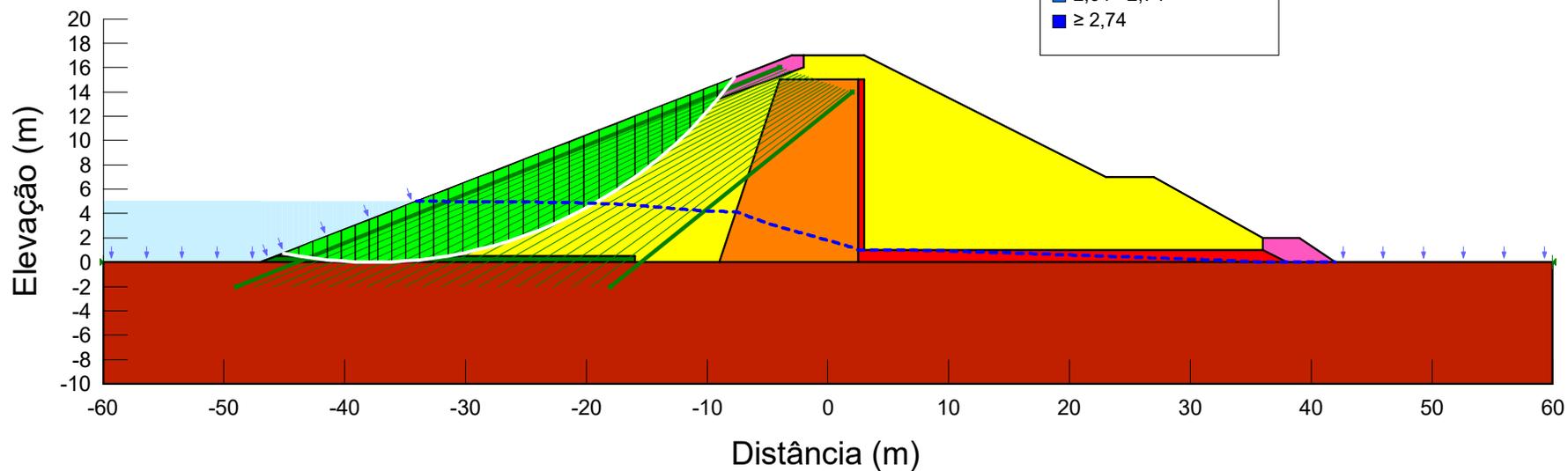
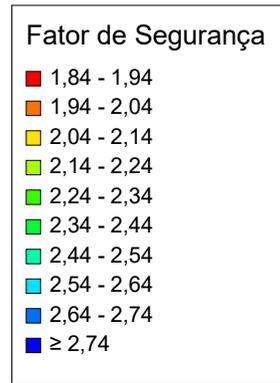
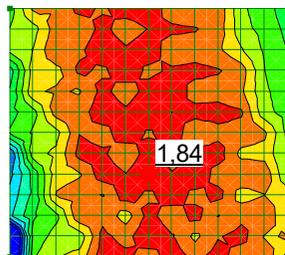
Rebaixamento - Material Grupo 2 - Jusante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



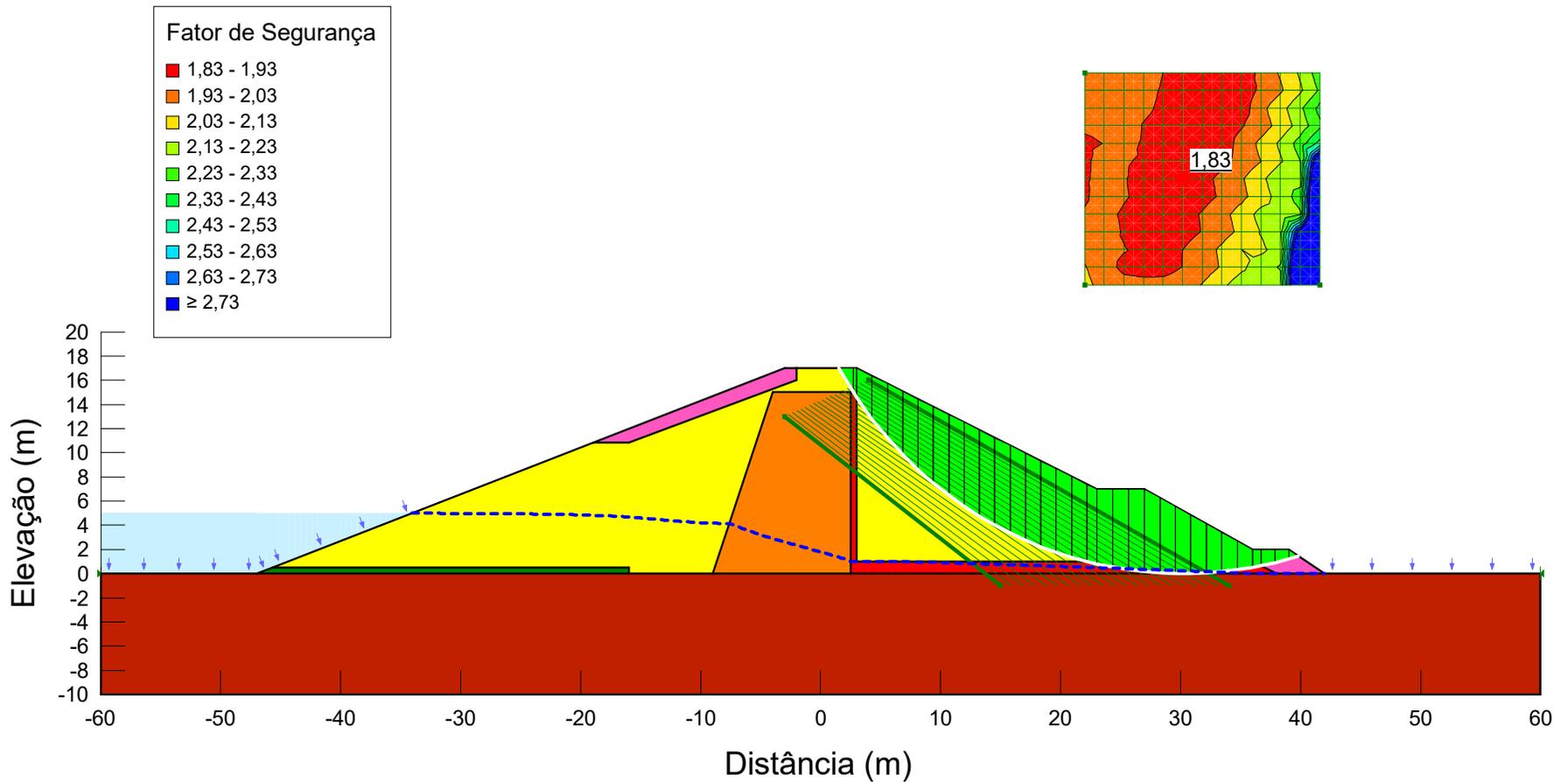
Rebaixamento - Material Grupo 2 - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



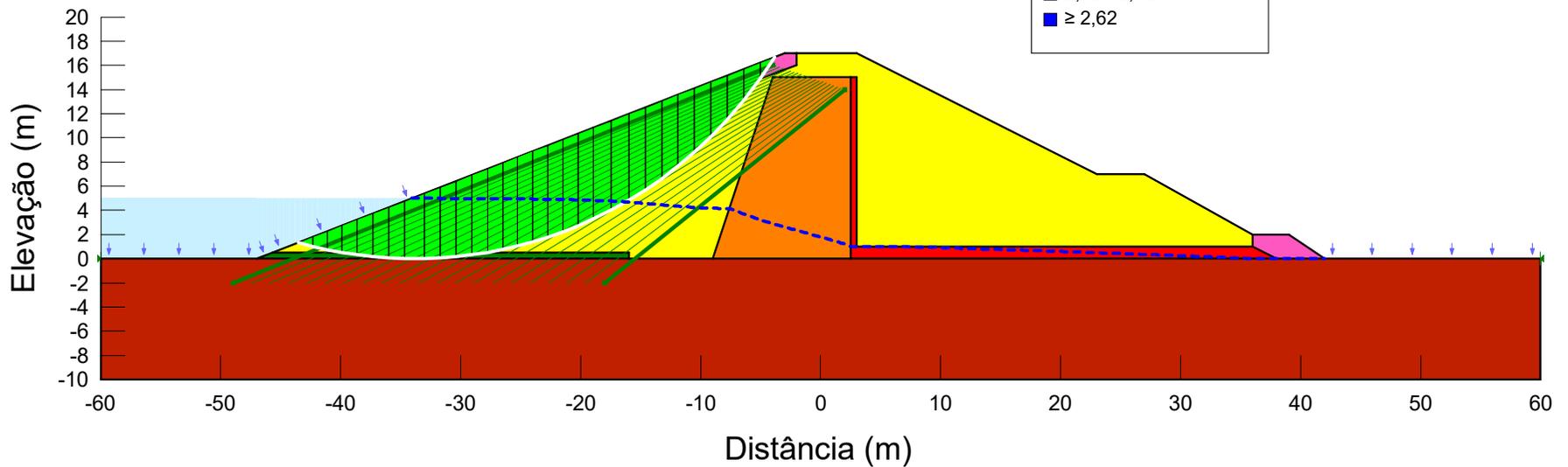
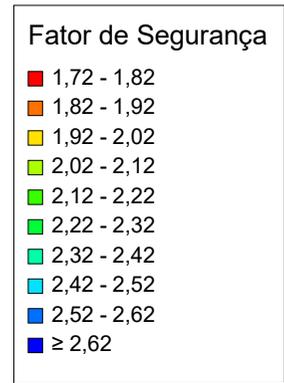
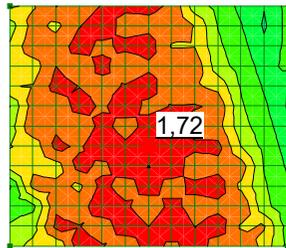
Rebaixamento - Material Grupo 3 - Jusante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



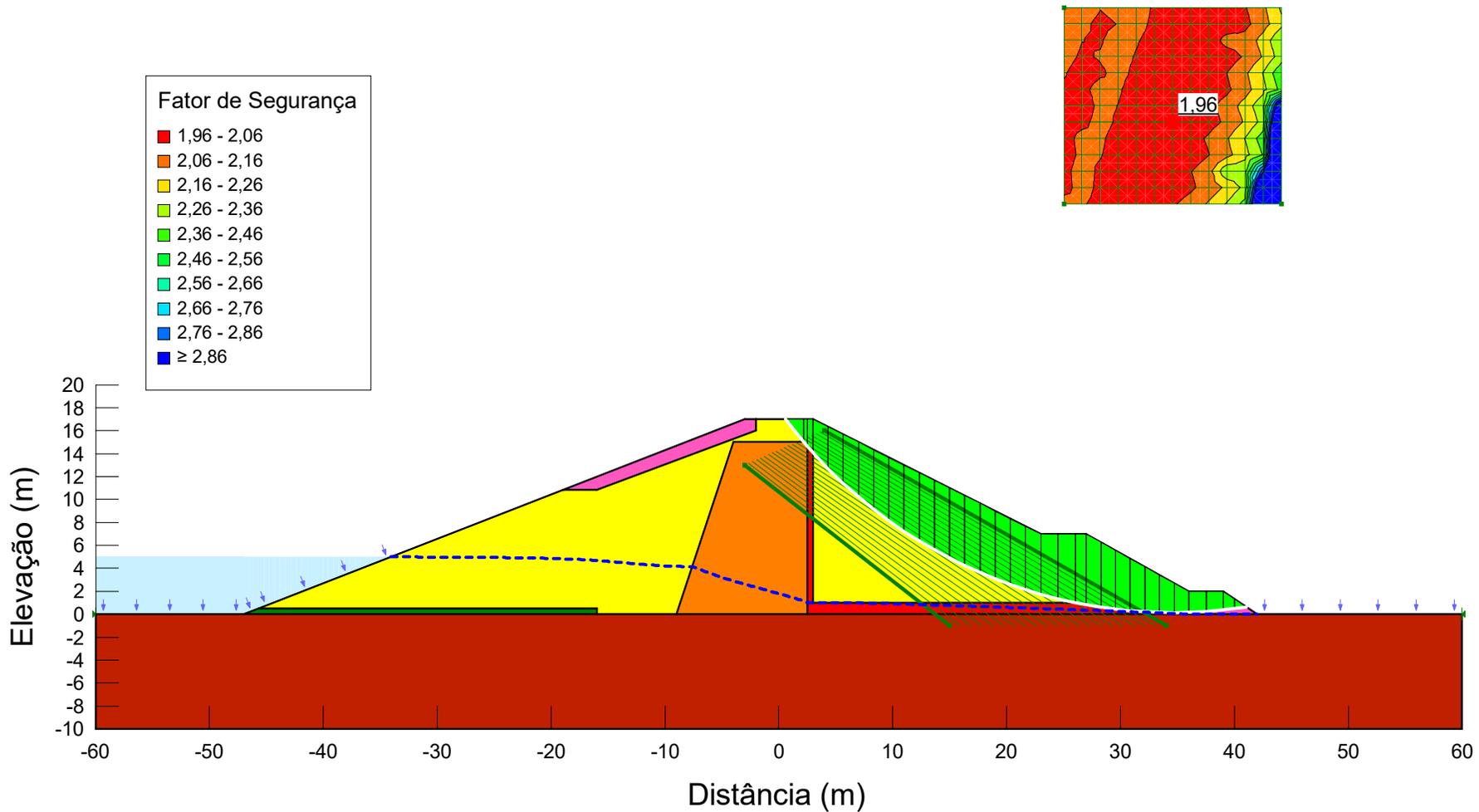
Rebaixamento - Material Grupo 3 - Montante - Bishop S.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Rebaixamento - Material Grupo 3 - Jusante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



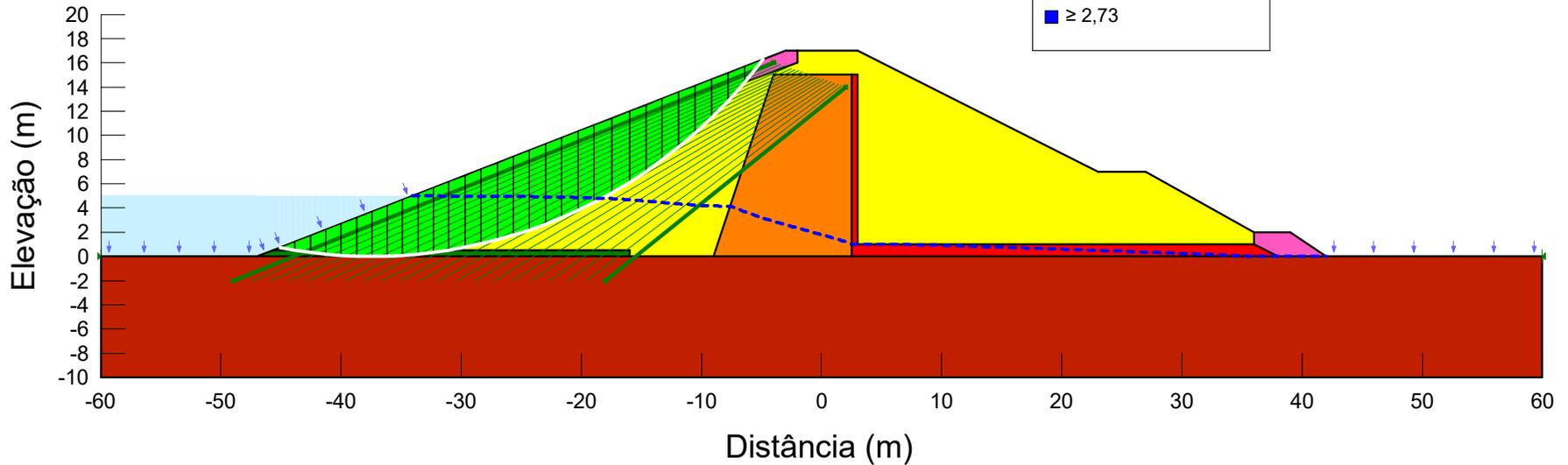
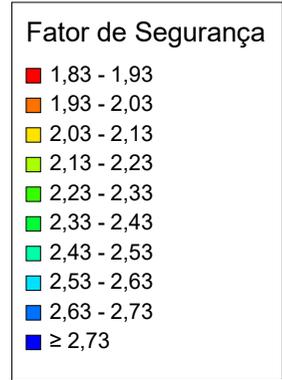
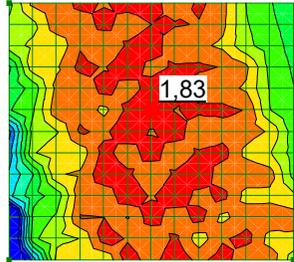
Rebaixamento - Material Grupo 3 - Montante - Fellenius	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



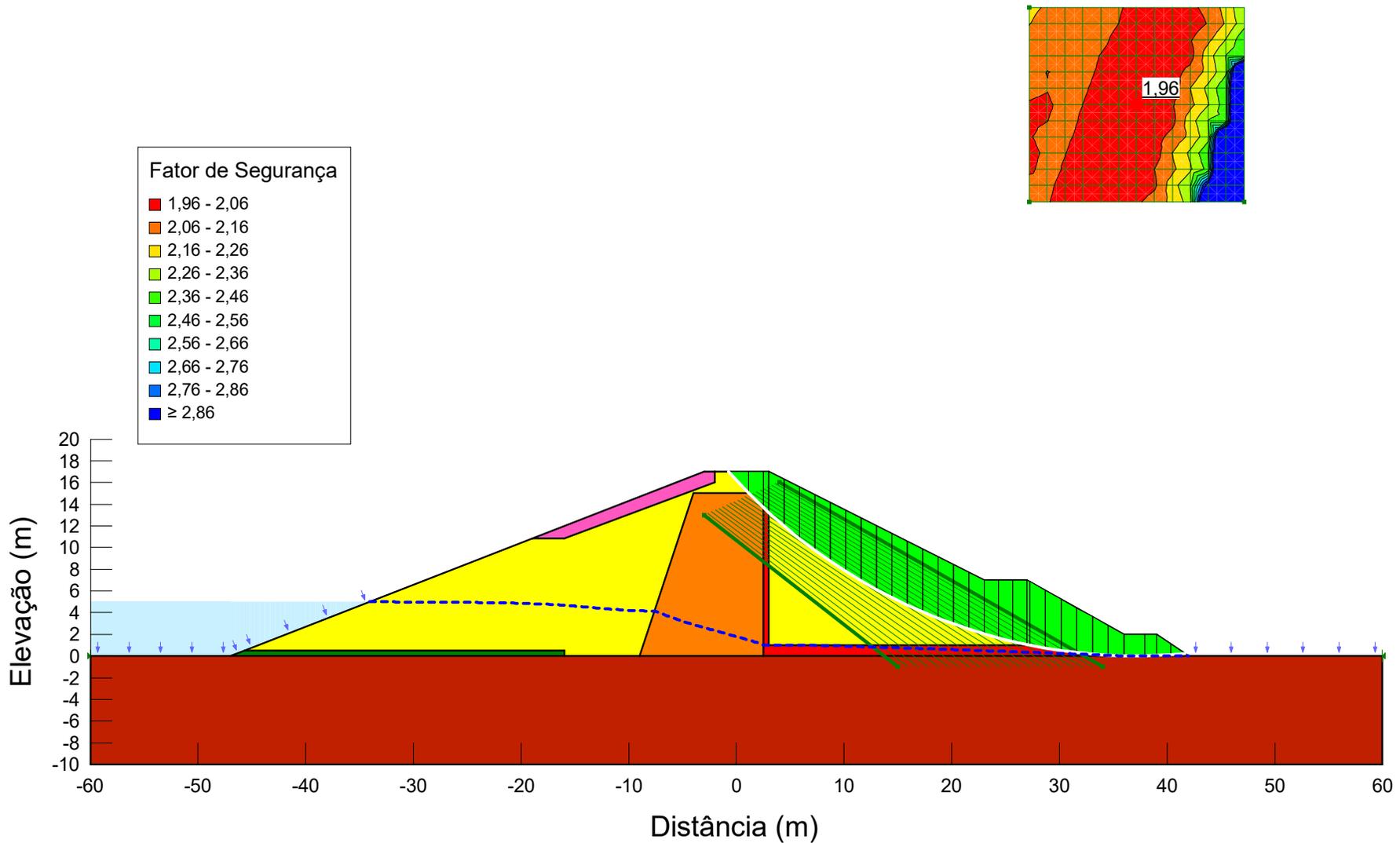
Fator de Segurança

■	1,96 - 2,06
■	2,06 - 2,16
■	2,16 - 2,26
■	2,26 - 2,36
■	2,36 - 2,46
■	2,46 - 2,56
■	2,56 - 2,66
■	2,66 - 2,76
■	2,76 - 2,86
■	≥ 2,86

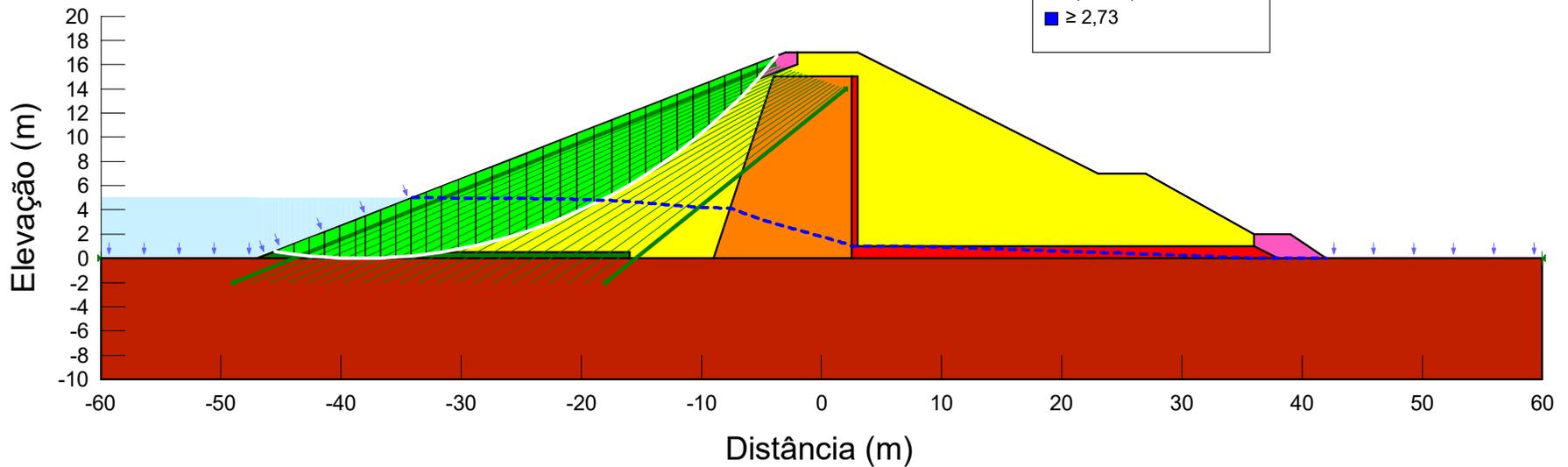
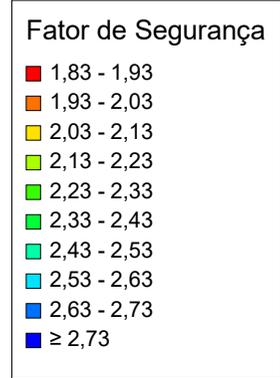
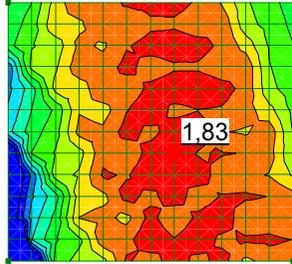
Rebaixamento - Material Grupo 3 - Jusante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Rebaixamento - Material Grupo 3 - Montante - Morg.-P.	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Rebaixamento - Material Grupo 3 - Jusante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550



Rebaixamento - Material Grupo 3 - Montante - Spencer	
Analise_de_Estabilidade_da_Barragem.gsz	
21/06/2024	1:550