



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL -**  
**PPGECA**

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE BARRAGEM DE RESÍDUO DE**  
**MINERAÇÃO: ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA**

Campina Grande - PB  
2024

MILENA CRISTINA ROCHA DE SOUZA

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE BARRAGEM DE RESÍDUO DE  
MINERAÇÃO: ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Geotecnia

**Orientador:** Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior.

**Coorientadora:** Dr<sup>a</sup>. Carina Silvani

Campina Grande - PB

2024

MILENA CRISTINA ROCHA DE SOUZA

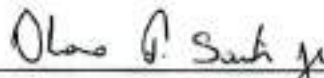
ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE BARRAGEM DE RESÍDUO DE  
MINERAÇÃO: ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior.  
Coorientadora: Dr<sup>a</sup>. Carina Silvani

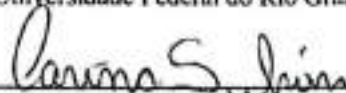
Aprovada em 02/03/24

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior (Orientador)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Carina Silvani (Coorientadora)  
Universidade Federal de Campina Grande



---

Prof. Dr. Osvaldo de Freitas Neto (Membro Externo)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



---

Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra (Membro Externo)  
Universidade Estadual da Paraíba

S729a

Souza, Milena Cristina Rocha de.

Análise de estabilidade de talude de barragem de resíduo de mineração: abordagem determinística e probabilística / Milena Cristina Rocha de Souza. – Campina Grande, 2024.

370 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Junior, Profa. Dra. Carina Silvani".

Referências.

1. Geotecnia. 2. Variabilidade Geotécnica. 3. Análise de Confiabilidade. 4. Monte Carlo. 4. Taludes de Mineração. I. Santos Junior, Olavo Francisco dos. II. Silvani, Carina. III. Título.

CDU 624.13(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

## REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): MILENA CRISTINA ROCHA DE SOUZA/ COMISSÃO EXAMINADORA: DR. OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE) - ORIENTADOR, DR.ª CARINA SILVANI - PPGECA/UFCG - COORIENTADORA, DR. OSVALDO DE FREITAS NETO - UFRN - EXAMINADOR EXTERNO, DR. RAIMUNDO LEIDIMAR BEZERRA - UEPB - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 09/2024). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE BARRAGEM DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO: ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 14:30 HORAS / NO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PAVIMENTOS, BLOCO CT, CAMPUS SEDE DA UFCG, EM CAMPINA GRANDE, DE FORMA HÍBRIDA.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA EM FORMATO HÍBRIDO, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO "EM EXIGÊNCIA" PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, FLÁVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO, ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 01 DE MARÇO DE 2024**



Documento assinado eletronicamente por **CARINA SILVANI, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/03/2024, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Milena Cristina Rocha de Souza, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 10:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Raimundo Leidimar Bezerra, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 10:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIO PEREIRA DA CUNHA, SECRETÁRIO (A)**, em 05/03/2024, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR, PROFESSOR**, em 05/03/2024, às 18:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Oswaldo de Freitas Neto, Usuário Externo**, em 05/03/2024, às 19:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **4180747** e o código CRC **17D0F1DD**.

## AGRADECIMENTOS

Inicialmente, quero expressar minha gratidão a Deus por revelar minha capacidade de ultrapassar meus limites sem comprometer a essência dos meus princípios.

Quero expressar minha gratidão aos meus pais, Cosmo e Vanuza, por dedicarem-se integralmente para proporcionar o melhor pra mim e meus irmãos. Agradeço pelo esforço incansável e pelo apoio emocional, mesmo quando não tinham ciência de que, indiretamente, estavam fortalecendo minha determinação. Também sou grata aos meus irmãos, João e Davi, por todos os momentos de alívio emocional que ofereceram e por todos os dias me lembrar a razão de seguir em frente.

Agradeço a Anderson, por se tornar um dos pilares essenciais na minha vida, oferecendo apoio em todas as áreas possíveis. Sua presença em cada momento e sua capacidade de mostrar que, mesmo quando tudo parece estar perdido, ainda há caminhos a serem explorados. Agradeço sinceramente por sua paciência e por nunca desistir de mim.

Expresso meu profundo agradecimento ao meu orientador, Olavo, pela paciência e disponibilidade em me orientar. Agradeço pelos valiosos ensinamentos que foram transmitidos ao longo desses últimos anos. Reconheço e agradeço a paciência demonstrada e pelos direcionamentos precisos oferecidos.

Quero expressar minha profunda gratidão à minha coorientadora, Carina Silvani. Primeiramente, por ter sido o presente mais valioso que este mestrado me proporcionou, e em segundo lugar, por se revelar a melhor coorientadora que alguém poderia desejar. Agradeço não apenas pelos ensinamentos e momentos de descontrações enriquecedores que compartilhou comigo, mas especialmente pelo apoio e empatia demonstrados ao longo deste último ano, tanto em relação ao meu trabalho quanta aos meus problemas pessoais.

Quero expressar minha gratidão a Elessandro Pereira, Diogo Brandani e João Costa pelo inestimável suporte técnico e profissional oferecidos. Saibam que sem vocês eu não teria conseguido concluir esta pesquisa. Vocês foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e profissional. Também quero estender meus agradecimentos ao meu gestor Rafael Siqueira, pela liberdade concedida para o meu crescimento profissional, bem como também prover o apoio essencial para a realização deste trabalho.

Agradeço também ao Professor André Pacheco de Assis, por sempre se mostrar interessado em responder meus questionamentos a respeito do universo probabilístico da geotecnia. Os conhecimentos passados foram muito importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA) da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, pelos ensinamentos passados.

Expresso minha gratidão ao Consórcio de Alumínio do Maranhão (ALUMAR) pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional proporcionados ao longo desses dois anos. Agradeço por todo suporte fornecido, o qual foi essencial não apenas para a realização deste trabalho, mas também por abrir novas perspectivas na área da engenharia civil

Agradeço aos meus colegas Rondinelly, Roneide, Maria Ingridy, Ana Letícia, Gilson, Léo, Allan, Lara e Osires por terem compartilhado essa trajetória comigo. Agradeço também ao meu psicólogo Felipe Gomes e minha psiquiatra Dr. Brenda Galiza, pelo apoio profissional que me deram ao longo dessa jornada.

Agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser concluído.



*“Não há vantagem alguma em viver a vida correndo”.*  
*(Shikamaru Nara da obra Naruto)*

## RESUMO

Tradicionalmente as análises de estabilidade são executadas considerando uma abordagem determinística, as quais fornecem fatores de segurança sem considerar as incertezas dos dados de entrada. Análises pautadas em conceitos estatísticos e probabilísticos, vem ganhando destaque nesse sentido, uma vez que estas abordagens permitem considerar a variabilidade inerente dos materiais e complementar o Fator de Segurança (FS) com parâmetros como o Índice de Confiabilidade ( $\beta$ ) e a Probabilidade de Ruptura (Pr). Neste sentido, o presente estudo buscou realizar uma análise comparativa entre os métodos de estabilidade determinísticos e probabilísticos, aplicados a diques de barragem de mineração. Como procedimentos, foram realizadas análises determinísticas pelos métodos de cálculo de Spencer e Morgenstern-Price empregando superfície de ruptura não-circular. Posteriormente, foram conduzidas análises de sensibilidade, para compreensão da influência dos parâmetros geotécnicos no comportamento do FS. Os resultados desse estudo apontaram que as maiores variações que acometem o FS, estão relacionadas às mudanças nos parâmetros de resistência, a qual a Superfície Potencial de Ruptura (SPR) intercepta. As análises probabilísticas por sua vez foram conduzidas considerando o método de Monte Carlo aplicado para um número de iterações variando entre 1000 a 10000 simulações. Todas as análises foram executadas no *Software Slide2* da *Rocscience* para nove seções críticas, considerando condições diferentes de carregamento. Como resultados, os fatores determinísticos e probabilísticos encontrados atenderam os limites admissíveis estabelecidos pela NBR 13028/17 bem como da *Australian National Committee on Large Dams - ANCOLD* (2019). Adicionalmente, as probabilidades de rupturas foram nulas com exceção das probabilidades das seções C e G, que apresentaram uma Pr significativas para os cenários de carregamentos pseudoestáticos e pós-sísmicos. No que concerne aos índices de confiabilidades encontrados, com exceção das seções C e G, todos os demais resultados apontaram para taludes com nível de desempenho satisfatório baseado nos limites estabelecido pela *U.S Army Corps of Engineers - USACE* (1997). Como contribuição, foi observado que a adição da abordagem probabilística em complemento a abordagem tradicional determinística, mostrou-se bastante promissora em relação ao ganho de informações a respeito das análises de estabilidade de taludes. Contudo, a aplicação dessa abordagem demanda um tempo e um esforço computacional considerável a serem avaliados em projetos práticos.

**Palavras-chave:** Variabilidade geotécnica. Análise de confiabilidade. Monte Carlo. Taludes de mineração.

## ABSTRACT

Traditionally, stability analyses are carried out using a deterministic approach, which provides factors of safety without considering the uncertainties in the input data. Analyses based on statistical and probabilistic concepts have been gaining prominence in this regard, since these approaches make it possible to take into account the inherent variability of materials and complement the Factor of Safety (FS) with parameters such as the Reliability Index ( $\beta$ ) and the Probability of Rupture (Pr). With this in mind, this study sought to carry out a comparative analysis between deterministic and probabilistic stability methods applied to mining dam embankments. Deterministic analyses were carried out using the Spencer and Morgenstern-Price calculation methods, employing a non-circular rupture surface. Sensitivity analyses were then carried out to understand the influence of geotechnical parameters on the behavior of the FS. The results of this study showed that the greatest variations affecting the FS are related to changes in the resistance parameters, which the Potential Rupture Surface (PRS) intersects. The probabilistic analyses were carried out using the Monte Carlo method applied to a number of iterations ranging from 1000 to 10000 simulations. All the analyses were carried out in Rocscience's *SLIDE2* software for nine critical sections, considering different loading conditions. As a result, the deterministic and probabilistic factors found met the admissible limits established by NBR 13028/17 as well as ANCOLD (2012). In addition, the probabilities of failure were zero, with the exception of the probabilities for sections C and G, which showed a significant Pr for the pseudo-static and post-seismic loading scenarios. With regard to the reliability indices found, with the exception of sections C and G, all the other results pointed to slopes with a satisfactory level of performance based on the limits established by the USACE (1997). As a contribution, it was observed that the addition of the probabilistic approach in addition to the traditional deterministic approach proved to be very promising in terms of gaining information about slope stability analysis. However, the application of this approach requires considerable time and computational effort to be evaluated in practical projects.

**Keywords:** Geotechnical variability. Reliability analysis. Monte Carlo. Mining slopes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais causas de rupturas de barragem de rejeitos. ....	16
Figura 2 - Processo Bayer simplificado. ....	17
Figura 3 - Variação do FS com o tempo. ....	21
Figura 4 - Superfície potencial de ruptura. ....	22
Figura 5 - Forças consideradas no método de Fellenius. ....	28
Figura 6 - Forças aplicadas a uma fatia considerando o Método de Bishop. ....	28
Figura 7 - Forças aplicadas a uma fatia considerando o Método de Morgenstern-Price. ....	29
Figura 8 - Forças aplicadas a uma fatia considerando o Método de Spencer. ....	31
Figura 9 - Determinação do FS pelo Método de Spencer. ....	32
Figura 10 - Geometria do Método de Janbu Simplificado. ....	33
Figura 11 - Curva para determinação do $F_0$ . ....	34
Figura 12 - Propagação das incertezas do solo. ....	35
Figura 13 - Resultados possíveis do lançamento de um dado. ....	39
Figura 14 - Etapas para a realização de um ajuste de distribuição de probabilidade. ....	41
Figura 15 - Exemplo do cálculo de probabilidade de falha para dois taludes em função do indicador de desempenho FS. ....	43
Figura 16 - Vista aérea da área de disposição de resíduo de bauxita da "Empresa A". ....	53
Figura 17 - Seções críticas de análise da ARB10. ....	53
Figura 18 - Planta de locação das investigações geotécnicas da ARB10. ....	54
Figura 19 - Planta de locação dos furos de sondagem à trado. ....	56
Figura 20 - Planta de localização das investigações próximas às seções A-A e B-B. ....	59
Figura 21 - Seção transversal típica do dique da ARB 10. ....	59
Figura 22 - Seção crítica A-A. ....	60
Figura 23 - Seção crítica B-B. ....	60
Figura 24 - Seção crítica C-C. ....	60
Figura 25 - Seção crítica D-D. ....	60
Figura 26 - Seção crítica E-E. ....	61
Figura 27 - Seção crítica F-F. ....	61
Figura 28 - Seção crítica G-G. ....	61
Figura 29 - Seção crítica H-H. ....	61
Figura 30 - Seção crítica I-I. ....	62
Figura 31 - Mínimo global x mínimo local. ....	66
Figura 32 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante desconsiderando $R_u$ (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	72
Figura 33 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante desconsiderando $R_u$ (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações) ....	73

Figura 34 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	75
Figura 35 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	76
Figura 36 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	78
Figura 37 - Resultado da Seção A-A Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	79
Figura 38 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	81
Figura 39 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	82
Figura 40 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	83
Figura 41 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	84
Figura 42 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	86
Figura 43 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Não drenado– (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	87
Figura 44 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	88
Figura 45 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência (3000 iterações).....	89
Figura 46 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	91
Figura 47 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	92
Figura 48 -Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	93
Figura 49 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	94

Figura 50 - Resultado da Seção A-A - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	96
Figura 51 - Resultado da Seção A-A - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	97
Figura 52 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	100
Figura 53 - Resultado da Seção B-B - Final de Construção – Talude Montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	101
Figura 54 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	102
Figura 55 - Resultado da Seção B-B - Final de Construção – Talude Montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	103
Figura 56 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	105
Figura 57 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	106
Figura 58 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	108
Figura 59 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	109
Figura 60 - Resultado da Seção B-B - Operação normal – drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	111
Figura 61 - Resultado da Seção B-B - Operação normal – drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	112
Figura 62 - Resultado da Seção B-B - Operação Normal – Não drenado– (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	114
Figura 63 - Resultado da Seção B-B - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	115
Figura 64 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	117
Figura 65 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	118

Figura 66 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	120
Figura 67 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	121
Figura 68 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	122
Figura 69 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000) (b) Gráfico de convergência do FS (1000) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	123
Figura 70 - Resultado da Seção B-B - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	125
Figura 71 - Resultado da Seção B-B - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	126
Figura 72 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	128
Figura 73 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	129
Figura 74 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	131
Figura 75 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	132
Figura 76 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	134
Figura 77 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	135
Figura 78 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	137
Figura 79 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	138
Figura 80 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	140
Figura 81 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	141

Figura 82 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	143
Figura 83 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	144
Figura 84 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	146
Figura 85 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	147
Figura 86 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	149
Figura 87 - Resultado da Seção - C-C Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	149
Figura 88 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	150
Figura 89 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	152
Figura 90 - Resultado da Seção C-C - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	154
Figura 91 - Resultado da Seção C-C - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações).....	155
Figura 92 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	158
Figura 93 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	159
Figura 94 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	161
Figura 95 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	162
Figura 96 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	164
Figura 97 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000) iterações (b) Gráfico de convergência do FS (iterações 1000) (c) Resultado da análise probabilística (3000) iterações (d) Gráfico de convergência do FS (iterações 3000).....	165



Figura 98 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	167
Figura 99 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	168
Figura 100 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	170
Figura 101 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	171
Figura 102 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	173
Figura 103 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	174
Figura 104 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	176
Figura 105 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	177
Figura 106 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	178
Figura 107 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	179
Figura 108 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	180
Figura 109 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	181
Figura 110 - Resultado da Seção D-D - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	183
Figura 111 - Resultado da Seção D-D - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	184
Figura 112 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	187
Figura 113 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	188

Figura 114 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	189
Figura 115 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	190
Figura 116 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	192
Figura 117 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	193
Figura 118 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	195
Figura 119 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	196
Figura 120 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	197
Figura 121 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	198
Figura 122 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	200
Figura 123 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	201
Figura 124 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	203
Figura 125 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	204
Figura 126 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	206
Figura 127 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	206
Figura 128 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	207
Figura 129 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	209

Figura 130 - Resultado da Seção E-E - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	210
Figura 131 - Resultado da Seção E-E - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	212
Figura 132 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	215
Figura 133 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	216
Figura 134 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	218
Figura 135 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	219
Figura 136 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	220
Figura 137 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	221
Figura 138 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	223
Figura 139 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	224
Figura 140 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	226
Figura 141 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	227
Figura 142 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	228
Figura 143 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Não drenado(a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	229
Figura 144 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	231
Figura 145 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	232

Figura 146 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	234
Figura 147 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	234
Figura 148 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	235
Figura 149 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	237
Figura 150 - Resultado da Seção F-F- Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	238
Figura 151 - Resultado da Seção F-F- Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	240
Figura 152 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	243
Figura 153 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	244
Figura 154 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	246
Figura 155 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	247
Figura 156 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	249
Figura 157 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude Jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	250
Figura 158 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude Jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	252
Figura 159 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude Jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	253
Figura 160 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	254
Figura 161 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	255

Figura 162 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	257
Figura 163 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).....	258
Figura 164 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	260
Figura 165 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (10000 iterações) (f) Gráfico de convergência da Pr (10000 iterações).....	261
Figura 166 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	263
Figura 167 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	264
Figura 168 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (10000 iterações) (f) Gráfico de convergência da Pr (10000 iterações).....	265
Figura 169 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (10000 iterações) (f) Gráfico de convergência da Pr (10000 iterações).....	267
Figura 170 - Resultado da Seção G-G - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	270
Figura 171 - Resultado da Seção G-G - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (32000 iterações) (f) Gráfico de convergência do Pr (32000 iterações). ....	271
Figura 172 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	275
Figura 173 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude Montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	276
Figura 174 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	278
Figura 175 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	279

Figura 176 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	281
Figura 177 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	282
Figura 178 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	283
Figura 179 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	284
Figura 180 - Resultado da Seção H-H - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	286
Figura 181 - Resultado da Seção H-H - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	287
Figura 182 - Resultado da Seção H-H- Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	289
Figura 183 - Resultado da Seção H-H- Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	290
Figura 184 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	291
Figura 185 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	292
Figura 186 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	294
Figura 187 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	295
Figura 188 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	296
Figura 189 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	297
Figura 190 - Resultado da Seção H-H - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	299
Figura 191 - Resultado da Seção H-H - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações). ....	300

Figura 192 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	303
Figura 193 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações) .....	304
Figura 194 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	306
Figura 195 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações) .....	307
Figura 196 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	309
Figura 197 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações) .....	310
Figura 198 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	311
Figura 199 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	312
Figura 200 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	314
Figura 201 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	315
Figura 202 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Não drenado– (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade. ....	317
Figura 203 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	318
Figura 204 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	319
Figura 205 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	320
Figura 206 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	322
Figura 207 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	323

Figura 208 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	324
Figura 209 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	325
Figura 210 - Resultado da Seção I-I - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.....	327
Figura 211 - Resultado da Seção I-I - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).....	328
Figura 212 - FS determinístico. ....	331
Figura 213 - Comportamento do FS e índice de confiabilidade probabilístico para cada cenário. (a) Seção A (b) Seção B (c) Seção C (d) Seção D (e) Seção E (f) Seção F (g) Seção G (h) Seção H (i) Seção I. ....	332



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Acidentes com barragens de resíduos no Brasil nos últimos 35 anos.....	15
Tabela 2 – FS mínimos para barragens de mineração (NBR 13028).....	23
Tabela 3 – FS recomendados pela ANCOLD.....	25
Tabela 4 - Características dos métodos determinísticos.....	27
Tabela 5 – Coeficientes de variação propriedades geotécnicas e ensaios <i>in situ</i> .....	39
Tabela 6 - Índice de confiabilidade alvo para análises de estabilidade.....	44
Tabela 7 - Valores Típicos de $P_r$ e $\beta$ .....	45
Tabela 8 - Parâmetros de confiabilidade.....	50
Tabela 9 - Resumo dos parâmetros encontrados para o resíduo de bauxita.....	55
Tabela 10 - Resultados encontrados nos ensaios realizados nas amostras coletadas à trado.....	57
Tabela 11 - Resumo das características geométricas da ARB10.....	58
Tabela 12 - Agrupamento das Amostras em função da textura do solo.....	63
Tabela 13 - Parâmetros de projeto da “Empresa A” para análises de estabilidade.....	63
Tabela 14 - Valores de resistência de Pico e liquefeita para matérias granulares.....	64
Tabela 15 - Razão de resistência encontrados para solos argilosos.....	64
Tabela 16 - Parâmetros geotécnicos para análises de estabilidade da ARB10.....	65
Tabela 17 - Condições analisadas nas análises de estabilidade de talude.....	66
Tabela 18 - Valores de Coeficiente de Variação usados.....	68
Tabela 19 - Número de iterações realizadas para cada seção crítica.....	70
Tabela 20 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção A-A.....	99
Tabela 21 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção B-B.....	127
Tabela 22 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção C-C.....	157
Tabela 23 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção D-D.....	186
Tabela 24 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção E-E.....	214
Tabela 25 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção F-F.....	242
Tabela 26 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção G-G.....	274
Tabela 27 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção H-H.....	302
Tabela 28 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção I-I.....	330

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – FS mínimos para deslizamentos (NBR 11682).....	23
---	----

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEP	<i>Alberta Environmental Protection</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANCOLD	<i>Australian National Committe on Large Dams</i>
ARB	Área de Resíduos de Bauxita
CD	<i>Consolidated Drained</i>
COV	Coefficiente de Variação
CPTU	<i>Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement</i>
CU	<i>Consolidated Undrained</i>
FDP	Função Densidade de Probabilidade
FOSM	<i>First Order Second Moment</i>
FS	Fator de Segurança
GISTM	<i>Global Industry Standard for Tailings Management</i>
IAI	<i>International Aluminium Institute</i>
MLE	<i>Maximum-Likelihood Estimators</i>
MM	Métodos dos Momentos
MMC	Método de Monte Carlo
NBR	Norma Brasileira
PEM	<i>Point Estimated Method</i>
PI	Poços de Inspeção
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragens
SPR	Superfície Potencial de Ruptura
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
TR	Trados
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>
UU	<i>Unconsolidated Undrained</i>
$N_{SPT}$	Resistência à penetração
Pr	Probabilidade de ruptura
Ru	Parâmetro de Poropressão
Su	Resistência não-drenada
$\beta$	Índice de Confiabilidade

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	13
2.1 OBJETIVO GERAL .....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
3.1 BARRAGEM DE RESÍDUOS .....	14
3.2 RESÍDUO DE BAUXITA .....	17
3.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES .....	19
3.4 MÉTODOS DETERMINÍSTICOS.....	26
3.4.1 Métodos de análise por equilíbrio limite.....	26
3.4.1.1 Fellenius .....	27
3.4.1.2 Bishop simplificado .....	28
3.4.1.3 Morgenstern-price.....	29
3.4.1.4 Spencer.....	30
3.4.1.5 Janbu simplificado .....	32
3.5 INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS PROPRIEDADES DO SOLO .....	34
3.6 PRINCÍPIOS ESSENCIAIS DE ESTATÍSTICA E PROBABILIDADE NA GEOTECNIA .....	36
3.6.1 Medidas de tendência central .....	36
3.6.2 Medidas de Dispersão .....	37
3.6.3 Probabilidade .....	39
3.6.3 Função densidade de probabilidade .....	40
3.8 MÉTODOS PROBABILÍSTICOS.....	42
3.8.1 Método de FOSM.....	45
3.8.2 Método das estimativas pontuais .....	46
3.8.3 Método de Monte Carlo .....	48
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	52
4.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	52
4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS .....	54
4.2.1 Parâmetros do resíduo de bauxita .....	55
4.2.2 Parâmetros do aterro compactado .....	56
4.2.3 Construção das seções críticas .....	58
4.2.4 Parâmetros da fundação .....	62

4.3 ANÁLISES DETERMINÍSTICAS E DE SENSIBILIDADE .....	65
4.4 ANÁLISES PROBABILÍSTICAS.....	68
<b>5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>71</b>
5.1 SEÇÃO A.....	71
5.1.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	71
5.1.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	74
5.1.3 Final de Construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	77
5.1.4 Final de Construção – Talude jusante considerando Ru .....	80
5.1.5 Operação Normal – Drenado .....	83
5.1.6 Operação Normal – Não Drenado.....	85
5.1.7 Solicitação Pseudoestática .....	88
5.1.8 Solicitação pós-sísmica .....	96
5.2 SEÇÃO B.....	99
5.2.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	99
5.2.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	102
5.2.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	104
5.2.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	107
5.2.5 Operação Normal – Drenado .....	110
5.2.6 Operação Normal – Não drenado.....	113
5.2.7 Solicitação Pseudoestática .....	116
5.2.8 Solicitação Pós-sísmica.....	124
5.3 SEÇÃO C .....	128
5.3.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	128
5.3.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	131
5.3.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	133
5.3.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	136
5.3.5 Operação Normal – Drenado .....	139
5.3.6 Operação Normal – Não drenado.....	142
5.3.7 Solicitação Pseudoestática .....	145
5.3.8 Solicitação pós-sísmica .....	153
5.4 SEÇÃO D.....	157
5.4.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	157
5.4.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	160
5.4.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	163
5.4.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	166

5.4.5	Operação Normal – Drenado .....	169
5.4.6	Operação Normal – Não drenado.....	172
5.4.7	Solicitação Pseudoestática .....	175
5.4.8	Solicitação pós-sísmica .....	183
5.5	SEÇÃO E .....	186
5.5.1	Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	186
5.5.2	Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	189
5.5.3	Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	192
5.5.4	Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	194
5.5.5	Operação Normal – Drenado .....	197
5.5.6	Operação Normal – Não drenado.....	200
5.5.7	Solicitação Pseudoestática .....	203
5.5.8	Solicitação pós-sísmica .....	210
5.6	SEÇÃO F.....	214
5.6.1	Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	214
5.6.2	Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	217
5.6.3	Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	220
5.6.4	Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	223
5.6.5	Operação Normal – Drenado .....	225
5.6.6	Operação normal – Não drenado.....	228
5.6.7	Solicitação Pseudoestática .....	231
5.6.8	Solicitação pós-sísmica .....	238
5.7	SEÇÃO G.....	242
5.7.1	Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru. ....	242
5.7.2	Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	245
5.7.3	Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	248
5.7.4	Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	251
5.7.5	Operação Normal – Drenado .....	254
5.7.6	Operação Normal – Não drenado.....	257
5.7.7	Solicitação Pseudoestática .....	259
5.7.8	Solicitação pós-sísmica .....	269
5.8	SEÇÃO H.....	275
5.8.1	Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	275
5.8.2	Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	278
5.8.3	Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	280

5.8.4	Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	283
5.8.5	Operação Normal – Drenado .....	286
5.8.6	Operação Normal – Não drenado.....	288
5.8.7	Solicitação Pseudoestática .....	291
5.8.8	Solicitação pós-sísmica .....	298
5.9	SEÇÃO I .....	302
5.9.1	Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru .....	302
5.9.2	Final de construção – Talude montante considerando Ru.....	305
5.9.3	Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru.....	308
5.9.4	Final de construção – Talude jusante considerando Ru .....	311
5.9.5	Operação Normal – Drenado .....	314
5.9.6	Operação Normal – Não drenado.....	316
5.9.7	Solicitação Pseudoestática .....	319
5.9.8	Solicitação pós-sísmica .....	326
<b>6</b>	<b>DISCUSSÕES</b> .....	<b>331</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>339</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>341</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>354</b>
A.1	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS .....	354
A.2	PARÂMETROS PROBABILÍSTICOS ADOTADOS .....	357

## 1 INTRODUÇÃO

Na história do Brasil, a intensa exploração de suas riquezas minerais deixou marcas profundas, transformando o setor mineral em uma das atividades que desempenham papel de destaque na produção de bens e serviços e no desenvolvimento socioeconômico (Carvalho, 2018). Essas atividades por sua vez geram volumes significativos de resíduos que requerem armazenamentos adequados devido ao seu alto poder de contaminação. Para o atendimento dessa demanda são erguidas estruturas conhecidas como barragem de rejeito, que exigem manutenção e monitoramento constante (Vick, 1990).

O crescente aumento das taxas de extração mineral vem proporcionando a construção de barragens cada vez maiores, tornando-se uma preocupação crescente para os órgãos públicos e a população local devido ao alto impacto ambiental associado a falhas dessas estruturas (Czajkowski *et al.*, 2023). Recentemente, as tomadas de decisões vêm incorporando cada vez mais análises e práticas de gestão de riscos, sendo este um tema crescente tanto para comunidade técnica, quanto acadêmica (Einstein, 1996; Pine; Roberds, 2005). Essa avaliação de riscos e quantificação da probabilidade de falhas são elementos que contribuem consideravelmente para a compreensão das possibilidades de um evento indesejado ocorrer (Jimenez-Rodriguez, Sitar, Chacón, 2006).

Tradicionalmente as análises de estabilidade de barragens são executadas por métodos determinísticos que analisam o equilíbrio de um maciço de solo por meio do cálculo de um Fator de Segurança (FS). Em alguns casos, esse FS pode ser bastante conservador, resultando em custos desnecessários para a engenharia (Jiang *et al.*, 2022). Em outras situações, apesar do seu resultado ser conservador, este método revela-se insuficiente, uma vez que as incertezas nos parâmetros do solo não são incorporadas no cálculo do FS, o que leva a um resultado não representativo da estabilidade do talude (Bardhan; Samui, 2022). De acordo com Johari e Gholampour (2018) a simples existência dessas incertezas nas propriedades do solo torna a análise de estabilidade um problema probabilístico e não determinístico.

Conforme abordado por Campello (2020), essas incertezas podem ser quantificadas por meio de conceitos estatísticos, como o Coeficiente de Variação (COV), a variância e o desvio padrão que, em conjunto contribuem para um entendimento detalhado do comportamento das condições do solo, possibilitando análises mais acuradas. Braga (2019) comenta que os estudos probabilísticos surgem como um complemento ao FS determinístico, visto que são atribuídos



valores numéricos às incertezas relacionadas a esse fator, por meio do cálculo do Índice de Confiabilidade ( $\beta$ ) e da Probabilidade de Ruptura ( $Pr$ ).

Considerando que a estabilidade de um talude depende diretamente das propriedades de resistência dos solos que o compõem, pode-se dizer que a presença da variabilidade do solo terá um impacto significativo na estabilidade dessas estruturas (Cheng *et al.*, 2018). Dessa forma, com a aplicação de modelos probabilísticos, é possível explorar novas abordagens relacionadas à confiabilidade de estruturas geotécnicas (Cho, 2009).

Com base neste cenário, a motivação para esta pesquisa surge da necessidade de realizar uma análise comparativa entre os métodos determinísticos e probabilísticos, com o intuito de demonstrar que a análise probabilística pode ser usada como um complemento à abordagem tradicionalmente determinística.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a estabilidade dos diques de contenção de Área de Resíduo de Bauxita (ARB), localizada em São Luís no Maranhão, por meio de métodos determinísticos e probabilísticos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar se os FS determinísticos atendem às exigências da NBR 13028/17 e da ANCOLD (2019) para os diferentes cenários construtivos dos diques de contenção de resíduo de bauxita;
- Apontar por meio de uma análise de sensibilidade os parâmetros geotécnicos que mais influenciam na estabilidade dos taludes dos diques de contenção de resíduo de bauxita;
- Verificar a adequação das probabilidades de ruptura ( $P_r$ ) e índice de confiabilidade ( $\beta$ ) dos taludes dos diques de contenção de resíduo de bauxita, com base nos valores estabelecidos pela USACE (1997);
- Comparar as análises feitas pelos métodos determinísticos e probabilísticos, a fim de verificar as condições de estabilidade de cada seção crítica do dique de contenção de resíduo de bauxita.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 BARRAGEM DE RESÍDUOS

O método empregado globalmente para o armazenamento de resíduos de mineração, controle de inundações e geração de energia renovável é o uso de barragens (Rose; Mugi; Saleh, 2023). De acordo com a definição dada no relatório *Inspection of Small Dam*, elaborado pela *Alberta Environmental Protection - AEP* (1998), as barragens se configuram como qualquer tipo de barreira construída para armazenar água ou outros materiais transportados até ela.

No Brasil, é possível encontrar uma ampla variedade de barragens com diversos objetivos e dimensões. Destas, 662 são utilizadas para o armazenamento de resíduos industriais e minerais, em virtude da ampla ocorrência e da facilidade de acesso que se tem aos depósitos minerais no país (Espósito; Duarte, 2010; Garcia *et al.*, 2017; Rose; Mugi; Saleh, 2023). As barragens de resíduos, são normalmente estruturas composta por diques de contenção, cujas alturas podem ser ajustadas para se elevar a capacidade de armazenamento dos resíduos gerados pela mineração (Hancock; Coulthard, 2022; Rose; Mugi; Saleh, 2023).

Historicamente, o processo de mineração do Brasil teve início com as primeiras expedições de garimpo que ocorreram principalmente no estado de Minas Gerais. No começo, esse processo se dava de forma simples, sendo essencialmente uma atividade manual com uma produção reduzida de resíduos. Contudo, com o emprego da máquina a vapor e a valorização de outros minérios, a geração de resíduos cresceu significativamente, porém as práticas de descarte se mantiveram inalteradas.

Com a criação das cidades mineradoras, os problemas relacionados à mineração começaram a ganhar repercussão. Segundo Ávila (2011), os primeiros conflitos entre as empresas e a sociedade tiveram início com o uso da terra e da água. Devido a esses incidentes, propostas foram traçadas com o intuito de proporcionar uma disposição adequada a esses materiais. Como resultado deste processo, os primeiros traços do que viria a ser chamada barragem de resíduos foram modelados.

Todavia, devido às limitações de conhecimentos e tecnologia da época, a construção dessas estruturas frequentemente demandava critérios técnicos e mão de obra qualificada (Ávila, 2011). Associado ao fato de que o aumento da capacidade dessas construções não acompanhava seu desenvolvimento técnico construtivo, teve-se então em 1986 o rompimento da barragem de rejeito de Fernandinho, localizado em Belo Horizonte, como sendo o primeiro caso de ruptura de barragem no Brasil. Na Tabela 1, encontram-se compilados os principais acidentes recentes que ocorreram no Brasil conforme Ávila *et al.* (2021).

Tabela 1 - Acidentes com barragens de resíduos no Brasil nos últimos 35 anos.

Ano	Barragem	Danos
1986	Fernadinho	7 mortes
2001	Rio Verde	5 mortes
2003	Florestal Cataguases	Vazamento de lixiviado, contaminação da água à jusante.
2006/2007	São Francisco	Vazamento de lixiviado, contaminação da água à jusante.
2014	Herculano	3 mortes
2015	Fundão	19 mortes, contaminação da água à jusante.
2019	Córrego do Feijão	270 mortes, contaminação ambiental à jusante.

Fonte: Ávila *et. al* (2021)

Com o aumento das consequências geradas pelo rompimento dessas estruturas, foram elevadas as fiscalizações e exigências quanto à garantia de sua segurança (Piciullo *et al.*, 2022). Neste sentido, Fontenelle (2007) comenta que o Ministério da Integração Nacional, em colaboração com a Agência Nacional de Águas (ANA), com os Estados, os Municípios e proprietários, vêm liderando esforços para prevenir e reduzir os riscos de acidentes em barragens em todo o país.

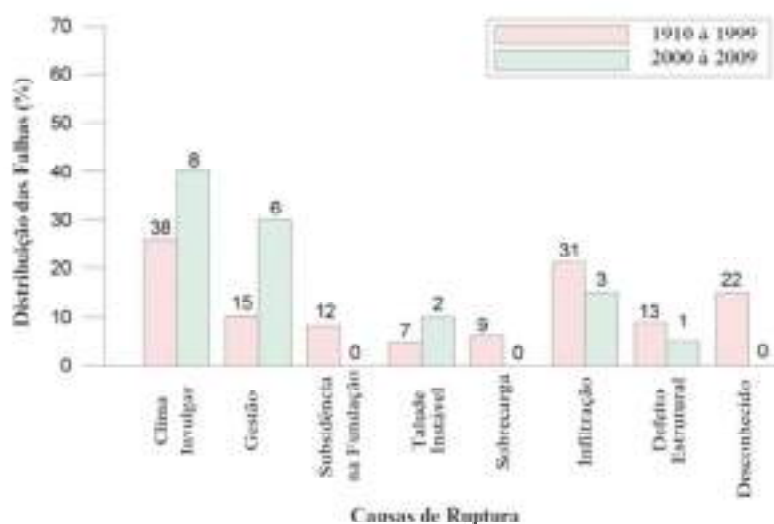
Dentre as iniciativas, destaca-se a promulgação da Lei nº 12.334/2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) para o armazenamento de água com diversos propósitos, bem como a gestão temporária ou final de rejeitos e resíduos industriais. Posteriormente, essa legislação foi aprimorada pela Lei 14.066/2020, que apresentou uma descrição detalhada dos requisitos necessários para a elaboração do Plano de Segurança de Barragens (PSB) e introduziu novos dispositivos e normativas.

Além disso, houve a publicação pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Norma Brasileira (NBR) 13028 (ABNT, 2017) que trata sobre: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos; e mais recentemente a criação do novo *Global Industry Standard for Tailings Management* (GISTM), que tem por objetivo priorizar a segurança dos barramentos durante todo o seu período de vida, incluindo seu pós-fechamento. Além disso, este documento busca trabalhar com dano zero para fatalidades, pessoas e meio ambiente (ICMM, 2020).

Conforme apontam Azam e Li (2010), dentre todas as finalidades para as barragens, as destinadas à contenção de resíduos são as que apresentam um elevado índice de falha, em função dos materiais usados na sua construção, muitas vezes oriundos do processo de mineração, bem como pelos sucessivos alteamentos que estas sofrem. De acordo com a AEP (1998), as barragens podem falhar por diversos motivos sendo estes classificados em três categorias gerais: falhas por erosão, por *piping* e falhas nos taludes. Os problemas que levam a

ocorrência dessas falhas podem estar associados à falta de compreensão dos elementos que regulam a segurança das operações, como também podem decorrer de circunstâncias deficientes nas investigações de campo, no projeto, na construção, no monitoramento ou até mesmo na interação entre eles (Duarte, 2008). Na Figura 1, são apontadas outras causas de ruptura de barragem de rejeitos a partir de bancos de dados levantados por Azam e Li (2010).

Figura 1 - Principais causas de rupturas de barragem de rejeitos.



Fonte: Adaptado de Azam e Li (2010).

Diferente das barragens de armazenamento de água que possuem preocupações voltadas às condições sísmicas, geotécnicas, construtivas, erosivas e hidrológica, as barragens de resíduo possuem um perigo adicional correspondente ao seu potencial de liberação de água e sedimentos contaminados, capazes de trazer sérios danos sociais e ambientais (Hancock; Coulthard, 2022; Oliveira *et al.*, 2023). Junto a isso, existem outros prejuízos indiretos resultantes de uma ruptura como, a interrupção das atividades produtivas na área afetada; impossibilidade de exploração dos recursos hídricos, bem como traumas psicológicos e físicos na população (Fontenelle, 2007). Posto isso, Oliveira *et al.* (2023) comentam que estas estruturas vêm sendo o foco principal nas discussões técnicas, com o propósito de aprimorar a sua construção e o seu monitoramento, visando à prevenção de futuros acidentes.

É essencial reconhecer que o alcance de uma garantia absoluta de segurança é impossível, tendo em vista que para cada barragem existem múltiplos cenários de deterioração com uma certa probabilidade de ocorrência, onde para cada um desses cenários persiste um risco potencial de acidente (Fontenelle, 2007). Embora não se possa eliminar os riscos, a segurança de barragens deve continuar sendo a principal preocupação presente em todas as fases de desenvolvimento e operação dessas estruturas (Zuffo, 2005).

### 3.2 RESÍDUO DE BAUXITA

O resíduo de bauxita, é um resíduo sólido industrial produzido pelo refino da alumina existente na bauxita (Liu *et al.*, 2023). O processo de refino ocorre através do Processo *Bayer*, amplamente utilizado nas indústrias de alumínio para digestão do minério de bauxita, o qual envolve a utilização de uma solução concentrada de soda cáustica em temperaturas e pressões específicas (Nath; Sahoo; Sahoo, 2015). Este processo se apoia no fato de que os hidratos de alumínio são solúveis em soda cáustica, realizando dessa forma a separação entre material de uso potencial do material inerte (Bedin, 2006).

O processo *Bayer* possui quatro etapas principais: a digestão, a clarificação, a precipitação e a calcinação (IAI, 2022). A primeira etapa envolve inicialmente a diminuição da granulometria da bauxita por um processo de moagem úmida para posteriormente ser submetida a um processo de digestão com adição de uma solução cáustica em condições específicas de temperatura e pressão. Nesta fase é obtido um licor rico em aluminato de sódio, que é separado do resíduo insolúvel na soda cáustica (resíduo sólido) na etapa de clarificação.

Na sequência ocorre o processo de precipitação, onde é feito o resfriamento do licor e precipitação do hidróxido de alumínio. Este é então levado para a etapa de calcinação, onde é aquecido a uma temperatura de aproximadamente 1000°C convertendo-se em alumina (Bedin, 2010). A taxa de geração de resíduo de bauxita provenientes desse processo varia entre 0,8 a 1,5 toneladas durante a produção de 1 tonelada de alumínio (Alam *et al.*, 2019). Na Figura 2, é apresentado um esquema simplificado do Processo *Bayer*.

Figura 2 - Processo Bayer simplificado.



Fonte: Adaptado do IAI (2022)

A composição química do resíduo é bastante variável e possui uma relação direta do seu depósito de origem e da técnica empregada no processo *Bayer* (Bedin, 2010). De maneira geral, o resíduo é composto principalmente por óxido de ferro, titânio, alumínio e sílica, bem como outros elementos como o cálcio, sódio, potássio e magnésio (IAI, 2022). Assim como a sua mineralogia, outros fatores como a sua homogeneidade, coloração, compacidade e dureza

também são influenciadas pela rocha de origem (Nierwinski, 2013). Dessa forma, é bastante complicado adotar uma caracterização geral para o resíduo de bauxita.

Sobre este aspecto são encontrados na literatura alguns estudos que tratam sobre as propriedades e comportamentos do resíduo de bauxita pertencentes a área de desenvolvimento desta pesquisa. O estudo inicial realizado para caracterização do material foi apresentado em Bedin (2006), onde foram realizados além dos ensaios de caracterização, ensaios de adensamento e ensaios triaxiais como o *Consolidated Undrained* (CU) e *Unconsolidated Undrained* (UU), para quatro campanhas realizadas em anos diferentes.

A determinação da composição granulométrica realizada no resíduo, levou em consideração a disposição do material e os pontos de lançamentos existentes. Em virtude disso, as amostras coletadas foram retiradas em pontos situados próximos e outros distantes às torres e calhas de lançamento do resíduo, em detrimento da diferença de disposição entre as partículas grossa e finas. Os resultados da composição granulométrica do resíduo de bauxita apresentaram uma variação de frações entre areia média e argila, possuindo características de materiais grossos para pontos localizados próximos às fontes de lançamento do resíduo e materiais finos para pontos mais distantes. Assim como os resultados da granulometria, os valores dos índices físicos também variaram em função da posição em relação às torres e calhas de lançamento.

Para a determinação dos parâmetros de resistência do resíduo, foram efetuados ensaios triaxiais CU e UU. Os resultados apresentaram que o valor do ângulo de atrito variou entre 23° a 40,54°, com valor médio em torno de 31,8°. Já os valores de resistência não drenada tiveram variação entre 0 e 100 kPa com valor médio em torno de 50 kPa.

Buscando estudar novamente o resíduo, contudo adotando agora a diferença de comportamento entre os pontos de lançamento próximos às torres e outros mais distantes, Bedin (2010) buscou entender o comportamento geomecânico do resíduo. Assim como foi observado em seu estudo anterior, o resíduo apresentava um comportamento granulométrico entre silte-arenoso e silte-argiloso que variavam em função da sua distância às torres de lançamento. Além dos ensaios de caracterização do material, Bedin (2010) realizou também ensaios de adensamento e triaxiais *Consolidated drained* (CD) e *Consolidated Undrained* (CU) para verificação do comportamento do estado crítico do material.

Com relação à liquefação, os ensaios mostraram que não existem tendência desse comportamento no resíduo. Entretanto, ao fazer essa verificação com os parâmetros e índices de estado, as amostras de lamas apresentaram comportamento contrátil ( $\psi > 0$ ). Esse comportamento contrátil também foi verificado nas amostras de areia vermelha com resultados apontando para ocorrência desse comportamento para tensões de confinamento inferiores a 100

kPa. Assim como na lama vermelha os parâmetros e índice de estados também apresentaram um comportamento contrátil do material, indicando tendência à liquefação.

No trabalho de Nierwinski (2019), foi realizado a caracterização e o comportamento geomecânico do resíduo de bauxita e outros rejeitos de mineração. Com relação aos ensaios triaxiais CU realizados no resíduo de bauxita, estes foram executados considerando amostras deformadas e indeformadas. Os resultados dos triaxiais mostraram comportamentos divergentes para os dois casos. Nas amostras indeformadas o comportamento é bem mais dilatante. Além disso, foi verificado comportamento diferente quanto a geração de poropressões, no qual nas amostras indeformadas foram geradas pressões positivas em todas as fases de carregamento. Assim como citado em Bedin (2006) essa diferença de comportamento dos ensaios de resistência entre as amostras, é resultado de uma possível cimentação de partículas e histórico de tensões que não podem ser reproduzidas nas reconstituições de corpos de prova em laboratório. Sobre os resultados de resistência, a autora constatou que não houve diferença significativa entre os valores de ângulo de atrito, tendo esse parâmetro um valor médio de  $32,4^\circ$ , sendo bastante similar com os valores encontrados em seu estudo anterior.

No que se refere à suscetibilidade de liquefação estática, a principal preocupação foi com relação às baixas tensões de confinamento. Ao ensaiar as duas amostras sob as mesmas condições, foi verificado que para tensões de 25 kPa, as amostras indeformadas apresentaram comportamento dilatante com geração de poropressões negativas, enquanto as amostras reconstituídas tiveram comportamento contrátil com geração de poropressões positivas. Além disso, para valores maiores de tensão confinante, ambos os materiais indicaram o mesmo comportamento mostrando uma condição estável quanto à ocorrência de liquefação. Esse comportamento de suscetibilidade a liquefação a baixas tensões de confinamento também foi verificado no trabalho de Bedin (2010).

Com base nessas pesquisas, torna-se se evidente que, para cada depósito de bauxita, assim como seu processo de refinamento e disposição, haverá um comportamento diferente entre as suas propriedades geotécnicas. Sendo assim, é importante que, para cada projeto, seja avaliado com cuidado as propriedades dos seus materiais evitando generalização das suas propriedades e comportamentos.

### 3.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A ocorrência de problemas em estruturas geotécnicas, incluindo solos e rochas, é uma questão bastante observada em encostas, taludes de aterro e pilhas (Auvinet; González, 2000;



Gerscovich, 2016). As amplas repercussões resultantes de um deslocamento de terra são custosas, evoluindo como uma fonte de preocupação constantes não só para especialistas em geotecnia e geologia, como também para a administração pública e a sociedade em geral, principalmente em regiões com atividade geológica intensa (Bromhead, 2005).

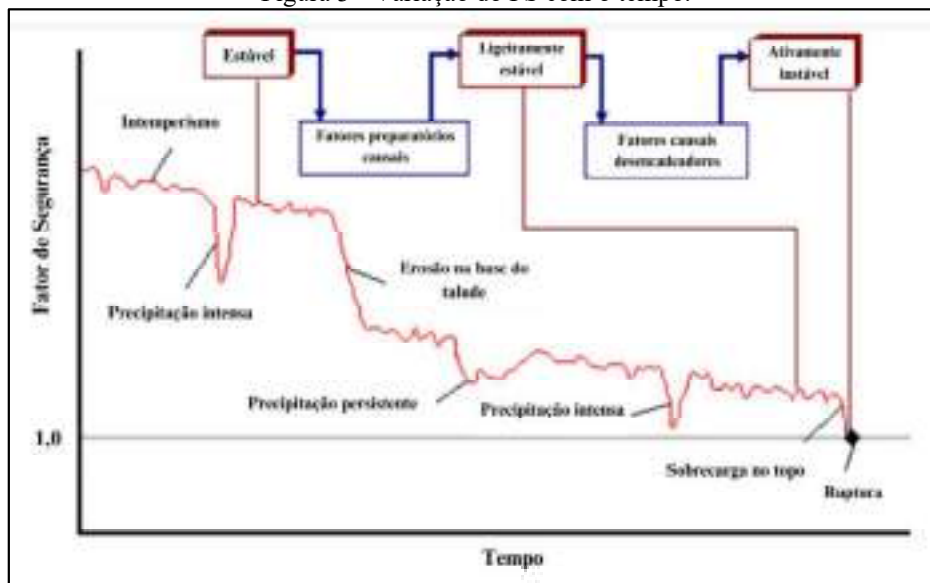
Quanto ao conceito de talude, Queiroz (2016) define como sendo uma inclinação ou declive da superfície de um terreno (solo ou rocha), que pode surgir naturalmente ou serem criados artificialmente, como os taludes de corte e aterro. Essas superfícies, conforme Augusto Filho e Virgilli (1998), são originadas de processos geológicos e geomorfológicos, sendo suscetíveis a modificações antrópicas e naturais ao longo do tempo. A compreensão da variação das tensões atuantes e os mecanismos de resistência ou longo dessas modificações são fundamentais para a realização de uma análise de estabilidade (Giacon Junior, 2018).

As análises de estabilidade, como discutida por Pedrosa *et al.* (2023), consiste em um método empregado para calcular as cargas que um terreno deve suportar, visando assegurar a sua estabilidade. Em outras palavras, esse método busca determinar o limite máximo de carga suportável imediatamente antes da ocorrência da ruptura. De acordo com Abramson *et. al* (2002, p.2), os objetivos de uma análise de estabilidade são:

- 1) Compreender o desenvolvimento e a forma dos declives naturais e os processos responsáveis pelas diferentes características naturais;
- 2) Avaliar a estabilidade dos taludes em condições de curto prazo (muitas vezes durante a construção) e de longo prazo;
- 3) Avaliar a possibilidade de deslizamentos de terra envolvendo taludes naturais ou artificiais existentes;
- 4) Analisar os deslizamentos de terras e compreender os mecanismos de ruptura e a influência dos fatores ambientais;
- 5) Permitir o redesenho de taludes falhados e o planejamento e concepção de medidas preventivas e corretivas, quando necessário;
- 6) Estudar o efeito de cargas sísmicas em taludes e aterros.

No que diz respeito as cargas, Fiori e Carmignami (2015) explicam que um talude está submetido a três forças distintas: a força decorrente do peso dos materiais que o compõem; as forças resultantes da infiltração e fluxo da água; e as forças que resistem ao cisalhamento dos materiais que o formam, sendo de suma importância alcançar o equilíbrio entre essas forças para garantir a estabilidade da estrutura. As modificações das forças que atuam e as mudanças na resistência ao cisalhamento terão um impacto direto na alteração do FS, o que pode resultar em seu aumento ou diminuição (Duncan; Wrigth; Brandon, 2014). Outros elementos, como fatores climáticos, geológicos e ação antrópica também desempenham um papel no desencadeamento do processo de falha, conforme é retratado na Figura 3 apresentada por Popescu (1994).

Figura 3 - Variação do FS com o tempo.



Fonte: Adaptado de Popescu (1994).

Segundo as considerações de Abramson *et al.* (2002), os taludes têm uma propensão a se deslocar devido às tensões induzidas no solo em resposta a carregamentos originários das forças gravitacionais, pressões tectônicas e eventos sísmicos. Essa tendência ao movimento é contrabalanceada pela capacidade de resistência ao cisalhamento, uma característica inerente aos solos, a qual é representada pelo Critério de Ruptura de *Mohr-Coulomb* (Duncan; Wrigth; Brandon, 2014)

Conforme os critérios de falha desenvolvidos por *Coulomb*, a força que contrapõem a movimentação do solo é caracterizada por dois parâmetros: coesão e ângulo de atrito (Al-Karni; Al-Shamrani, 2000). Para *Mohr* a ocorrência de ruptura dependerá das combinações das tensões normais e cisalhantes (Gerscovich, 2016). Nesse sentido, a ruptura ocorrerá quando as curvas de resistência, que representam o estado de tensões do material, tangenciar a envoltória que define seu estado de ruptura (Chowdhury, 2010). Ao realizar a linearização da envoltória de ruptura de *Mohr*, é possível estabelecer uma aproximação com a teoria de *Coulomb*, resultando no critério de ruptura de *Mohr-Coulomb*. Esse critério pode ser representado matematicamente pela Equação 1 (Schuster; Krizek, 1978):

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde,

$\tau$  = Resistência ao cisalhamento ao longo do plano de ruptura;

$c$  = Intercepto coesivo;

$\sigma$  = Tensão normal;

$\varphi$  = Ângulo de atrito interno.

No que diz respeito ao FS, este representa a correlação entre as forças que induzem a instabilidade (forças solicitantes) e aquelas que promovem a estabilidade (forças resistentes). Schuster e Krizek (1978) definem ainda o FS como o valor pelo qual os parâmetros de resistência podem ser reduzidos a fim de alcançar um equilíbrio crítico ao longo de uma Superfície Potencial de Ruptura (SPR).

A obtenção desse FS possibilita determinar o quão próximo um talude está das condições de sua possível ruptura, levando em consideração influências como pressões neutras, sobrecargas e características geométricas (Bezerra, 2019). Quando essa situação ocorre, surge uma região conhecida como SPR, conforme ilustrada na Figura 4, na qual é indicado o local onde a probabilidade de movimento de massa é maior. Dessa forma, para que haja a restauração da estabilidade do talude, é necessário a diminuição das forças solicitantes ou aumento das forças resistentes:

Figura 4 - Superfície potencial de ruptura.



Fonte: Autora (2023)

A expressão matemática que descreve o cálculo do FS é dada pela razão entre as forças solicitantes e resistentes, conforme a Equação 2. Segundo as diretrizes da ABNT (2009), a depender do tipo de obra e dos riscos envolvidos que estão associados a ela, são definidos FS mínimos com base nas classificações dos níveis de segurança conforme é apresentado no Quadro 1.

$$FS = \frac{\sum \text{Forças resistentes}}{\sum \text{Forças solicitantes}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Quadro 1 – FS mínimos para deslizamentos (NBR 11682).

<b>Nível de segurança contra danos materiais e ambientais</b>	<b>Nível de segurança contra danos a vida humana</b>	<b>Alto</b>	<b>Médio</b>	<b>Baixo</b>
	Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3	
Baixo	1,4	1,3	1,2	

Fonte: ABNT (2009)

No que se refere aos FS admissíveis para barragens, a ABNT (2017) define os FS mínimos para cada etapa de implantação da estrutura. Os valores de FS a serem obtidos por meio das análises determinísticas devem ser atendidos tanto para condições drenadas e não drenadas de cada material envolvido na seção de análise. Na Tabela 2 são apresentados os FS mínimos para barragem conforme as diretrizes da norma.

Tabela 2 – FS mínimos para barragens de mineração (NBR 13028).

<b>Fase</b>	<b>Tipo de ruptura</b>	<b>Talude</b>	<b>FS Mínimo</b>
Final de Construção	Maciço e Fundações	Montante e Jusante	1,30
Operação com rede de fluxo em condições normais de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e Fundações	Jusante	1,50
Operação com rede de fluxo em condições extrema, nível máximo do reservatório	Maciço e Fundações	Jusante	1,30
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,10
Operação com rede de fluxo em condições normal	Maciço	Jusante Montante	1,50 1,30
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e Fundações	Montante e Jusante	1,10

Fonte: ABNT (2017)

No que concerne ao cenário final de construção, Sandroni e Guidicini (2021) comentam que a maioria das barragens de terra são compactadas considerando a umidade ótima do solo. Nessas condições o solo se encontra parcialmente saturado, ou seja, com ar e água em seus vazios. Durante o processo construtivo de um barramento, cargas verticais são acrescentadas sobre o solo compactado resultando na geração de excessos de poropressões (Massad, 2010). Neste sentido, é de extrema importância que sejam conhecidas as poropressões geradas ao longo do

processo de construção das barragens, sendo a fase de final de construção a que apresenta maiores valores de poropressão (Vilhete, 2017). De acordo com Cruz (1996), as poropressões geradas, bem como as deformações que podem acometer um barramento, dependerá do estado de tensões e da velocidade construtiva.

Uma das formas de quantificar esse aumento das poropressões com o incremento de carregamentos verticais para a fase de final de construção em análises de estabilidade de talude, é incorporando o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ), que relaciona a tensão vertical total com a poropressão gerada (Silva, 2020). Segundo Bishop e Morgenstern (1960), a inclusão de tal parâmetro nas análises de estabilidade não significa necessariamente que a magnitude da poropressão é controlada, contudo é possível ter análises de estabilidade sem comprometer a precisão dos resultados.

No que se refere a fase de sollicitação pseudoestática, Vick (1990) comenta que a análise pseudoestática consiste na aplicação de uma abordagem estática, incrementada pelo acréscimo de forças horizontais que representam a carga sísmica. Adicionalmente, Guimarães (2020) explica que os métodos pseudoestáticos é uma extensão do Método de Equilíbrio Limite (MEL), nos quais o efeito sísmico é considerado, acrescentando forças estáticas adicionais que podem ser decompostas tanto na componente horizontal ( $F_h$ ), quanto na componente vertical ( $F_y$ ).

Conforme observado por Morales, Bard e Palma (2022), não existem expressões diretas para o cálculo do coeficiente sísmico vertical. No entanto, em análises pseudoestáticas, que o incorporam, esses coeficientes, são estimados a partir de uma fração do coeficiente sísmico horizontal, com variações de 30% a 100% desse valor. Valores para coeficiente horizontal sísmicos podem ser extraídos tanto pela literatura, quanto por meio de estudos de sismicidade na área de implantação do projeto (Cuentas, 2003). Nesta pesquisa, todas as informações relacionadas ao estudo sísmico fundamentaram-se nos dados obtidos por meio de ensaios de sismicidade conduzidos pela “Empresa A” na área de implantação da barragem, previamente utilizados em projetos anteriores.

Conforme estabelecido pela *Australian National Committee on Large Dams - ANCOLD* em seu documento *Guidelines on Tailing Dams (2019)*, são definidos fatores de segurança mínimos a serem seguidos em projetos de barragens em diferentes condições de carregamento. Segundo Zuffo (2005), a Austrália dispõe de um conjunto de leis abrangentes quando se trata de segurança de barragem. Os FS mínimos e as resistências a serem consideradas para cada condição segundo a ANCOLD (2019), estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – FS recomendados pela ANCOLD.

<b>Condições de carregamento</b>	<b>Resistências a serem usadas</b>	<b>FS mínimo admissível</b>
Longo Prazo Drenado	Resistência Drenada	1,50
Curto Prazo não drenado (com perda potencial)	Resistência Não Drenada	1,50
Curto Prazo não drenado (sem perda potencial)	Resistência Não Drenada	1,30
Pós-sísmica	Resistência Não Drenada Residual	1,00 -1,20

Fonte: ANCOLD (2012)

Conforme mencionado por Pedrosa *et. al* (2023), com a presença de tecnologias modernas houve um avanço no cálculo da estabilidade de taludes, o que resultou em um aumento na confiabilidade na busca da superfície crítica. Isso foi alcançado por meio da exploração de um conjunto amplo de possíveis superfícies de deslizamentos e pela aplicação de diversos métodos avançados de cálculo numérico como o método dos elementos finitos, método das diferenças finitas e métodos dos elementos discretos.

Conforme Braga (2019), existem na literatura diversos métodos que podem ser empregados para a avaliação de estabilidade, como:

- Métodos Analíticos: métodos que trabalham com a Teoria do Equilíbrio Limite, calculando não só o FS como também a Pr. São exemplos os métodos determinísticos, probabilístico e as análises de tensão-deformação;
- Método Experimentais: Se baseiam na elaboração de protótipos em escalas reduzidas para execução das análises;
- Métodos Observacionais: trabalham com experiências de obras anteriores ou de estruturas que já se romperam (retroanálise).

Tradicionalmente as análises de estabilidade de taludes são realizadas considerando os métodos determinísticos, que utilizam como dados de entradas parâmetros fixo do solo, para a determinação das condições de estabilidade. Considerando que esses parâmetros são suscetíveis a várias fontes de incertezas, determinar o FS sem levar em consideração essas informações, pode resultar em respostas não representativas. Neste contexto, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos a fim de proporcionar análises mais robustas para os fatores de segurança. Um deles é o emprego de análises probabilísticas, as quais tem como função gerar indicadores complementares ao resultado obtido pela análise determinística. Discussões a respeito dessa abordagem são tratadas no item 3.8.

### 3.4 MÉTODOS DETERMINÍSTICOS

Os métodos de análise considerando a abordagem determinística podem ser classificados em duas categorias: métodos baseados em equilíbrio limite e métodos baseados nas análises de tensão-deformação (Gerscovich, 2016). Nessa dissertação serão abordados apenas os métodos baseados em equilíbrio limite, discutidos a seguir.

#### 3.4.1 Métodos de análise por equilíbrio limite

De acordo com Gerscovich (2016), existem duas formas de calcular o FS por meio do método determinístico: a abordagem que considera a análise de tensões e a que trabalha com a teoria do equilíbrio limite. O primeiro realiza o equilíbrio em toda a massa de solo, discretizando em áreas menores, e verificando o comportamento do maciço frente as condições de carregamento que são impostas. Já o segundo divide a massa de solo em várias fatias e as equações de equilíbrio são escritas e resolvidas para cada uma delas (Duncan; Wright; Brandon, 2014; Fernández; Villalobos; King, 2018).

As análises de estabilidade de taludes são comumente executadas adotando o método de equilíbrio limite. A maioria das análises de equilíbrio limite consiste em comparar as resistências atuantes ao longo de uma SPR que mantém a estabilidade, com a resistência ao cisalhamento disponível (Abramson *et al.*, 2002). A aplicação dessa abordagem para estabilidade de taludes, se configura como uma forma quantitativa de analisar a estabilidade global de um maciço, em função de suas características geotécnicas, bem como sua reação a atuação de agentes externos e internos de instabilização (Braga, 2019).

Dentre os métodos de equilíbrio limite, o método das fatias é o mais empregado na verificação de estabilidade de taludes e barragens devido a sua simplicidade de cálculo. Além disso, ele não apresenta restrições quanto a heterogeneidade do solo, a geometria do talude, a consideração quanto ao tipo de análise e ainda inclui a distribuição de poropressões (Gerscovich, 2016; Sousa, 2021).

As análises de estaticidade podem ser feitas para três condições diferentes: equilíbrio de forças na direção vertical, equilíbrio de forças na direção horizontal e equilíbrio de momentos em relação a qualquer ponto. Todos os métodos das fatias existentes utilizam pelo menos uma dessas equações para o cálculo do FS (Duncan; Wright; Brandon, 2014). Conforme a quantidade de equações a serem incorporadas nas análises, o problema pode evoluir para um estado estaticamente indeterminado, demandando a formulação de suposições para simplificar o cenário e torná-lo estaticamente solucionável (Duncan, 1996; Malkawi; Abdulla, 2000). As

metodologias de simplificação mais usuais são para isso são: Fellenius (1936), Bishop (1955), Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967) e Janbu Simplificado (1975). Na Tabela 4, são apresentadas as principais características de cada método.

Tabela 4 - Características dos métodos determinísticos.

Métodos	Riguroso	Tipo de superfície	Equilíbrio de Forças		Forças entre fatias		Equilíbrio de momentos
			x	y	X	E	
Fellenius	Não	Circular	Não	Sim	Não	Não	Sim
Bishop Simplificado	Não	Qualquer	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Janbu simplificado	Não	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Spencer	Sim	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Morgenstern-Price	Sim	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

Os métodos que satisfazem apenas uma condição de equilíbrio (forças ou momentos) são ditos métodos simplificados, ao passo que os que atendem a todas as condições são chamadas de métodos rigorosos (Gerscovich, 2016). Quanto a geometria de ruptura dos taludes, estes podem se romper formando uma superfície circular ou não circular a depender do nível de homogeneidade existente no corpo do talude. Taludes considerados heterogêneos tendem a apresentar uma geometria de ruptura não-circular, em virtude das diferenças entre as resistências que cada camada de material apresenta.

A seguir são descritos os métodos determinísticos mais empregados nas análises de estabilidade de taludes.

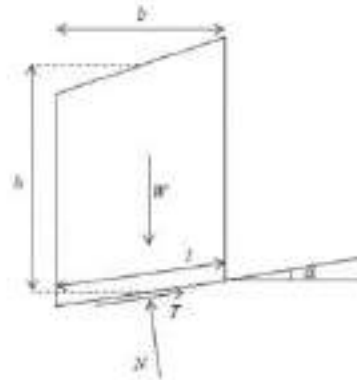
#### 3.4.1.1 Fellenius

O método de Fellenius (1936) foi uma das primeiras metodologias utilizadas para estimar a estabilidade de um talude (Abramson *et al.*, 2002). É considerado um método simples, contudo não deixa de ser um método conservativo, apresentando uma certa reserva de segurança favorável aos projetos (Zhou *et al.*, 2019).

Como hipótese simplificadora, ele desconsidera a força de interação entre as fatias, trabalhando apenas com a força normal e as forças atuante na base da fatia, conforme mostra a Figura 5. O cálculo do FS é realizado para cada fatia da SPR, no qual o FS crítico será o menor valor encontrado (Vecci, 2018).



Figura 5 - Forças consideradas no método de Fellenius.



Fonte: Ferreira (2012)

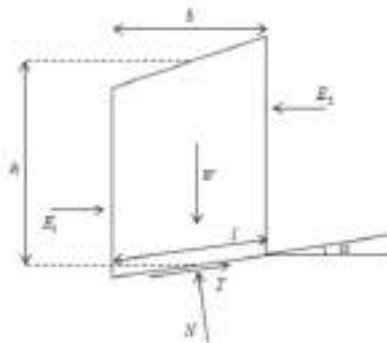
Aplicando o equilíbrio de momentos em relação a origem, e o equilíbrio de forças na direção vertical, tem-se que o cálculo do FS fica expresso pela Equação 3:

$$FS = \frac{\Sigma(c'l + (W\cos\alpha - ul)\tan\phi')}{\Sigma W\sin\alpha} \quad (\text{Eq. 3})$$

#### 3.4.1.2 Bishop simplificado

Assim como Fellenius, o método de Bishop (1955) é usado considerando uma SPR circular. Também é um método simples, porém diferente do anterior as interações horizontais (E) entre as fatias são consideradas no cálculo do FS. A representação das forças consideradas pelo método são representadas na Figura 6.

Figura 6 - Forças aplicadas a uma fatia considerando o Método de Bishop.



Fonte: Ferreira (2012)

Realizando o equilíbrio das forças verticais e de momentos na fatia, tem-se que o cálculo do FS pelo método de Bishop é feito utilizando a Equação 4:

$$FS = \frac{\Sigma[c'xl + (W - ul)x \tan\phi'] / m_\alpha}{\Sigma w \sin\alpha} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde,

$$m_{\alpha} = \cos\alpha + \left[1 + \frac{\tan\alpha \cdot \tan\phi_1}{FS_1}\right] \quad (\text{Eq. 5})$$

Por meio da Equação 4 e 5, nota-se que a solução é obtida de forma iterativa, uma vez que é preciso uma estimativa inicial para o valor de FS1, para poder de fato calcular o FS da estabilidade. Para esse caso em geral, adota-se inicialmente o FS obtido por Fellenius como primeira aproximação. De acordo com Gerscovich (2016), é possível estabelecer ainda duas relações entre os FS calculados por Fellenius e Bishop dadas pelas Equações 6 e 7:

- Para Tensões Efetivas:

$$FS_{Bishop} \cong 1,25 FS_{Fellenius} \quad (\text{Eq. 6})$$

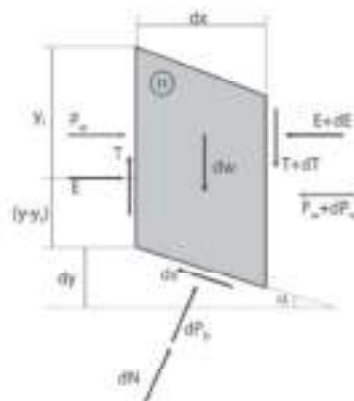
- Para Tensões Totais:

$$FS_{Bishop} \cong 1,1 FS_{Fellenius} \quad (\text{Eq. 7})$$

### 3.4.1.3 Morgenstern-price

O método de Morgenstern-Price (1965) é um método considerado rigoroso aplicado a qualquer tipo de superfície de ruptura, capaz de satisfazer todas as condições de equilíbrio de forças e momentos (Braga, 2019). Além disso, este método também considera as forças associadas às poropressões atuantes nos contornos das fatias, conforme ilustra a Figura 7.

Figura 7 - Forças aplicadas a uma fatia considerando o Método de Morgenstern-Price.



Fonte: Gerscovich (2016)

Sendo,

dW = Peso da fatia;

Pw = Poropressão no contorno da fatia;

dPb = Resultante da poropressão na base da fatia;

E e T = esforços atuando em (y - yt),

$dx$  = Largura infinitesimal da fatia;

$ds$  = Resistência na base.

Como hipótese simplificadora para tornar o problema estaticamente determinado, assume-se que a inclinação da resultante  $\theta$  varia, segundo uma função, ao longo da SPR dada pela seguinte relação (Gerscovich, 2016):

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{T}{E} = \lambda f(x) \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde,

$T$  = Força tangencial entre as fatias;

$E$  = Força normal entre as fatias;

$\lambda$  = Parâmetro a ser determinado pelo processo iterativo;

$f(x)$  e uma função arbitrária que depende da inclinação das forças no talude.

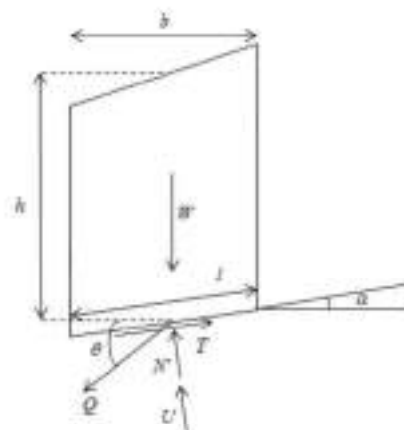
Existem diversas funções de distribuição da inclinação resultante  $f(x)$  que podem ser usadas, como: a função constante, trapezoide, meio-seno, senoide etc. Entretanto, a função padrão adotada pelos *softwares Slope/W* e *Slide* é a meio-seno, sendo, portanto, a mais utilizada (Duncan; Wright; Brandon, 2014).

O resultado encontrado pelo método de Morgenster-Price é considerado o mais acurado, contudo devido a quantidade de processos iterativos associados ele requer um uso extensivo de ferramenta computacional (Silva, 2021).

#### 3.4.1.4 Spencer

O Método de Spencer (1967), assim como o método anterior, pode ser aplicado para quaisquer superfícies de ruptura, além de satisfazer todas as equações de equilíbrio de forças e momentos, considerando as forças de interação entre as fatias (Ferreira, 2012). A resultante dessas forças entre fatias fica representada por uma força  $Q$  que passa pelo ponto de atuação das forças  $W$ (Peso),  $N'$ (normal) e  $T$ (cisalhante) localizado na base da fatia, e que possui uma inclinação constante  $\theta$  (Abramson *et al.*, 2002). A Figura 8 ilustra as forças aplicadas a uma fatia considerando o Método de Spencer.

Figura 8 - Forças aplicadas a uma fatia considerando o Método de Spencer.



Fonte: Ferreira (2012)

Fazendo o equilíbrio de forças horizontais e verticais na base da fatia, e considerando o eixo vertical na direção de  $N'$  e  $U$ , tem-se que:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$N' + U - W \cos \alpha - Q \sin(\alpha - \theta) = 0 \quad (\text{Eq. 9})$$

$$N' = W \cos \alpha + Q \sin(\alpha - \theta) - U \quad (\text{Eq. 10})$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$T - W \sin \alpha - Q \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad (\text{Eq. 11})$$

$$Q = \frac{T - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta)} \quad (\text{Eq. 12})$$

Sabendo que  $T$  é dado pela seguinte relação:

$$T = \frac{c'l + N'tg\varphi}{FS} \quad (\text{Eq. 13})$$

Substituindo (Eq. 10) e (Eq. 13) na (Eq. 12), obtém-se:

$$Q = \frac{\frac{c'l + [W \cos \alpha + Q \sin(\alpha - \theta) - U]tg\varphi}{FS} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[ 1 + \frac{tg\varphi \cdot tg(\alpha - \theta)}{FS} \right]} \quad (\text{Eq. 14})$$

Considerando o talude em equilíbrio, admite-se que não existem forças externas atuando na fatia. Nessa situação, atuarão apenas as forças de interação vertical e horizontal a qual a sua soma deverá ser nula. Dessa forma:

$$\Sigma Q \cos \theta = 0 \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\Sigma Q \sin \theta = 0 \quad (\text{Eq. 16})$$

Como hipótese simplificadora deste método, para contornar o problema de desbalanceamento das equações, considera-se o valor constante para todas as fatias. Dessa forma, tem-se que:

$$\Sigma Q \cos \theta = \Sigma Q \sin \theta = \Sigma Q = 0 \quad (\text{Eq. 17})$$

Quanto ao momento, se houver o equilíbrio das forças externas, consequentemente haverá o equilíbrio dos momentos. Com isso, tem-se:

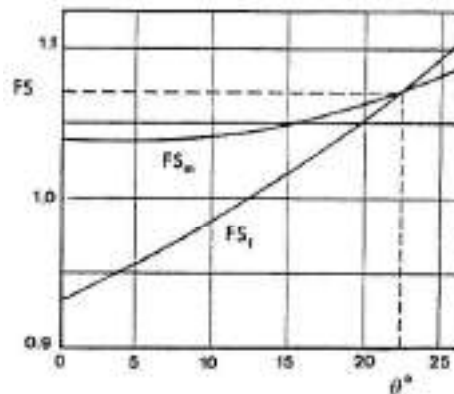
$$\Sigma [Q \sin(\alpha - \theta)] R = 0 \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\Sigma [Q \cos(\alpha - \theta)] R = 0 \quad (\text{Eq. 19})$$

A determinação do FS será feita de maneira interativa, uma vez que deverá ser arbitrado valores para  $\theta$ . Dessa forma, deve-se para cada valor arbitrado substituir a equação da força resultante  $Q$  nas equações de equilíbrio, a fim de se obter um  $FS_f$  (referente ao equilíbrio de forças) e um  $FS_m$  (referente ao equilíbrio de momentos) (Ferreira, 2012).

Esse processo será repetido até que obtenha uma intersecção entre as curvas geradas por esses dois fatores, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Determinação do FS pelo Método de Spencer.

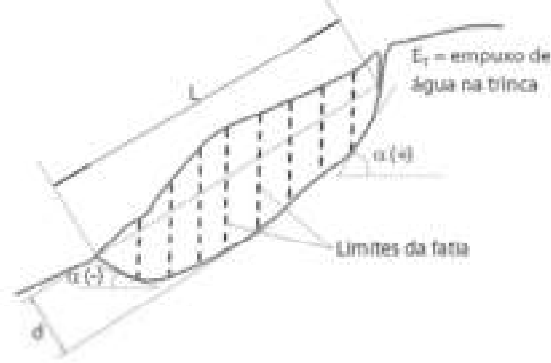


Fonte: Spencer, Apud Ferreira (1967)

#### 3.4.1.5 Janbu simplificado

O método de Janbu simplificado (1975) foi desenvolvido para facilitar os cálculos diferenciais do FS obtido pelo processo rigoroso. Nesse método simplificado, a consideração das forças cisalhantes entre as fatias é feita por meio de um fator de correção ( $f_0$ ), dependente do tipo de solo e da forma da superfície de ruptura (Vecci, 2018). Na Figura 10, tem-se as condições geométricas para o método de Janbu simplificado.

Figura 10 - Geometria do Método de Janbu Simplificado.



Fonte: Gerscovich (2016).

Por este método, o FS fica expresso por:

$$FS = f_0 \cdot \frac{\sum \{c' l + (p-u) tg \phi'\}}{\sum (W tg \alpha) + E_T} \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde,

$$n_\alpha = \cos^2 \alpha \left( 1 + \frac{tg \phi'}{FS} tg \alpha \right) \quad (\text{Eq. 21})$$

Sendo,

$f_0$  = Função da relação ( $d/L$ ) da forma da superfície de ruptura e dos parâmetros de resistência do solo. Esse parâmetro pode ser obtido graficamente a partir da Figura 11;

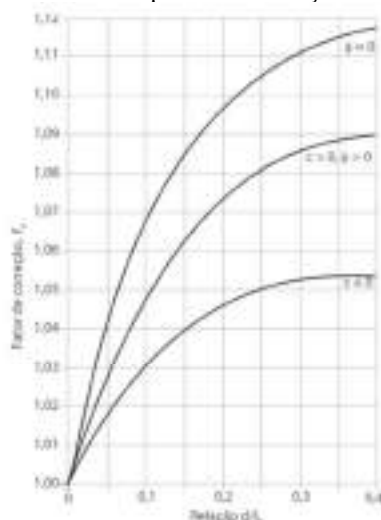
$\alpha$  = Inclinação da base da fatia variando entre  $-90^\circ < \alpha < 90^\circ$ ;

$p$  = Peso médio  $dW/dx$ ;

$u$  = Poropressão na base da fatia;

$E_T$  = Empuxo de água na trinca;

$W$  = Peso da fatia.

Figura 11 - Curva para determinação do  $F_0$ .

Fonte: Gerscovich (2016)

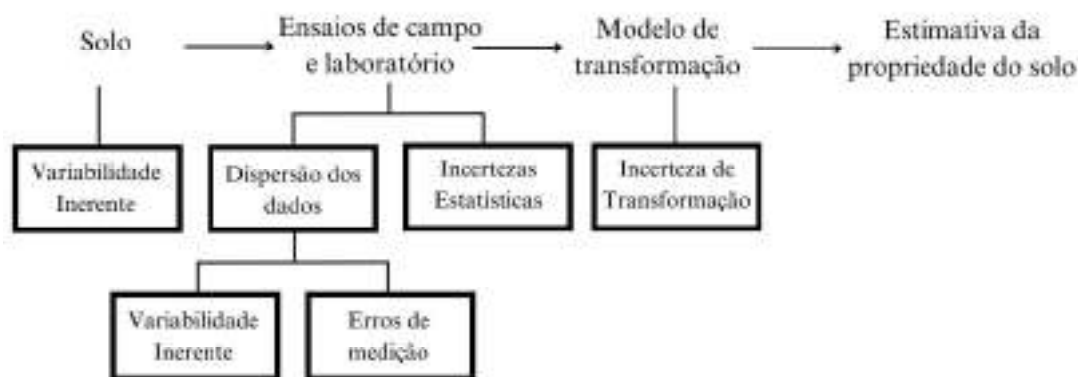
Nota-se, por meio da Equação 20 e Equação 21, que o mesmo processo iterativo realizado pelo método de Bishop também é empregado para o método de Janbu.

### 3.5 INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS PROPRIEDADES DO SOLO

O solo é um material de engenharia de grande complexidade, originado da interação de múltiplos processos geológicos, ambientais e físico-químicos, muitos dos quais ainda estão em andamento (Phoon, Kulhawy, 1999). Na maioria das vezes, as características do solo demonstram uma elevada variação espacial em termos de resistência devido às incertezas geotécnicas. Mesmo em camadas de solo que aparentam ser uniformes, essas incertezas podem impactar ou até mesmo controlar a estabilidade de um talude (Cheng *et al.*, 2018).

Ao desenvolver um projeto geotécnico, podem surgir várias fontes de incertezas, sendo três delas as fontes principais: variabilidade inerente, produzida pelas transformações que modificam continuamente a geologia natural do solo; erros de medição, causados por equipamentos danificados, erros humanos e divergências de execução com o que é previsto pelas normativas; e incertezas de transformação principalmente quando o problema requer a adoção de modelos empíricos e semiempíricos, o qual deve-se ter bastante cautela na escolha de correlações para estimativas do comportamento do solo (Phoon, Kulhawy, 1999; Malkawi; Abdulla, 2000). A consideração dessas incertezas em qualquer análise geotécnica é de extrema importância, uma vez que sua presença é inevitável (El-Ramly, 2001; Yang *et al.*, 2022). Na Figura 12, é apresentado um esquema que representa a propagação de incertezas nas estimativas das propriedades do solo.

Figura 12 - Propagação das incertezas do solo.



Fonte: Adaptado de Phoon e Kulhawy (1999).

Conforme pode ser observado pela Figura 12, as variações nas propriedades do solo acompanham todas as fases de um projeto geotécnico, influenciando na avaliação de segurança e levando a ocorrência de falhas em sistemas considerados seguros (Giancon Junior, 2018). Além disso, dificuldades com custos excessivos, atrasos, imprevistos e problemas ocasionais também são enfrentados (Yang *et al.*, 2022). Em virtude desses problemas, a análise de confiabilidade é apresentada como uma ferramenta importante para a avaliação e gerenciamento desses problemas (El-Ramly, 2001).

Métodos baseados em análises de confiabilidade que quantifiquem essas incertezas associadas aos parâmetros do solo vem sendo desenvolvidos desde 1970, incluindo métodos de abordagem probabilística, elementos finitos e metodologia *fuzzy* (Varkey, Hicks, Vardon, 2019; Zhou *et al.*, 2019). O foco principal dessas análises de confiabilidade, principalmente em problemas de estabilidade, é poder quantificar os efeitos que a variabilidade dos parâmetros tem sobre um resultado específico (Guo; Dias, 2020).

De acordo com Cheng *et al.* (2018) as condições de estabilidade de um talude podem ser fortemente influenciadas por essas incertezas. Neste sentido, Zhang e Huang (2016) comentam que quando se trabalha com dados do solo incertos, o FS gerado, bem como, a consequência da ruptura também será incerta. Nessa perspectiva, pode-se dizer que as incertezas nos parâmetros de resistência do solo, acabam alterando o refinamento no cálculo do FS (Al-Karni; Al-Shamrani, 2000).

Algumas ferramentas são utilizadas para lidar com as incertezas dos parâmetros geotécnicos, muitas das quais são aplicadas levando em consideração as experiências locais e de julgamentos dos engenheiros (Cho, 2009). Sobre estas ferramentas a ABNT (2009) recomenda que para situações em que haja uma grande variabilidade dos resultados ensaiados, os FS deverão ser majorados em até 10%. De acordo com Phoon *et al.* (2022), o FS encontrado



por meio de uma abordagem determinística, não pode ser considerado uma medida totalmente confiável, a menos que se tenha pleno conhecimento e controle sobre as variáveis que possam influenciar o seu resultado final. Apesar de ser uma metodologia amplamente utilizada nas análises de estabilidade de talude, a abordagem determinística não é capaz de oferecer informações a respeito da variabilidade dos parâmetros geotécnicos no FS (Kalantari *et al.*, 2023).

Como alternativa, estas análises podem ser executadas empregando uma avaliação probabilística, na qual o FS é complementado pelo  $\beta$  e pela Pr. Esses fatores irão apontar os requisitos de desempenho do FS, frente a dispersão geotécnica (Bardhan; Samui, 2022). Aspectos relacionados a esse tipo de análise bem como a definição desses fatores probabilísticos são apresentadas ao longo dos itens 3.8.

### 3.6 PRINCÍPIOS ESSENCIAIS DE ESTATÍSTICA E PROBABILIDADE NA GEOTECNIA

Para a aplicação da abordagem probabilística, é necessário ter conhecimento sobre algumas informações estatísticas a respeito dos parâmetros geotécnicos, bem como a forma de distribuição probabilística que melhor lhes representam (Yokozawa, 2019). Essas informações estatísticas, podem ser adquiridas aplicando-se um estudo descritivo dos dados.

Sobre a estatística descritiva, esta busca coletar, organizar, resumir e interpretar dados de um conjunto, descrevendo de forma simplificada seu comportamento. Por meio de medidas de tendência central e de dispersão, a análise descritiva procura trazer de forma sucinta as características de um conjunto de dados. Embora sejam medidas consideradas simples, se coletadas de maneira adequadas, elas podem representar bem um conjunto de dados, além de servir como uma base importante para a estatística inferencial (Adamson; Prion, 2013).

A seguir são apresentadas as principais medidas de tendência central e de dispersão fundamentais para uma análise de estabilidade probabilística.

#### 3.6.1 Medidas de tendência central

As medidas de tendência central buscam trazer informações a respeito da localização central de um conjunto de dados, fornecendo informações a respeito da concentração de onde a maioria dos valores de um conjunto se encontram (Larson; Farber, 2015). As três medidas de tendência central mais importantes são: média, mediana e a moda descritas a seguir.

- **Média ( $\bar{X}$ )**

A média aritmética simples é uma das medidas de tendência central mais utilizadas e que busca representar o comportamento central de uma amostra ou população. Pode ser

calculada por meio da soma dos valores de cada elemento observado, dividido pelo número total de elementos de um conjunto. Considerando um conjunto  $A = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  constituído por  $n$  elementos, a sua média será calculada pela Equação 22:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i}{n} \quad (\text{Eq. 22})$$

- **Mediana (Md)**

A mediana representa uma divisão em parte iguais de um conjunto amostral ou populacional ordenado, na qual metade dos elementos do conjunto se encontram abaixo dela e a outra metade acima, ou seja, é o valor que fica no centro da série ordenada (Azevedo, 2016). Em virtude disso, essa medida de tendência central tende a ser mais robusta que a média, uma vez que ela não é sensível a valores extremos.

- **Moda (Mo)**

A moda é uma medida estatística que representa os elementos que ocorrem com maior frequência em um conjunto de dados. Um conjunto de dados pode ser unimodal, quando existe apenas uma moda, ou multimodal quando o conjunto apresenta dois ou mais elementos que se repetem. Assim como a mediana, esta medida também não é influenciada por valores extremos.

### 3.6.2 Medidas de Dispersão

As medidas de dispersão são grandezas que quantificam a variabilidade e espalhamento que os dados de um conjunto têm do seu valor médio. As medidas de dispersão mais usuais são a variância e o desvio padrão (Bussab; Morettin, 2010). Entretanto, para realização das análises probabilísticas é necessário também o conhecimento do coeficiente de variação. Todas essas medidas são apresentadas a seguir.

- **Variância ( $S^2$ )**

A variância é uma medida de dispersão que é encontrada por meio da média dos quadrados das diferenças entre um elemento de um conjunto e sua média. Considerando novamente o mesmo conjunto  $A = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  constituído por  $n$  elementos, a sua variância poderá ser calculada tanto pela Equação 23 quanto pela Equação 24:

$$S^2 = \frac{(x_1 - \bar{X})^2 + (x_2 - \bar{X})^2 + \dots + (x_n - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (\text{Eq. 24})$$

- **Desvio padrão (S)**

O desvio padrão é outra medida de dispersão bastante utilizada e que é calculado pela raiz quadrada da variância amostral, de acordo com a Equação 25:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (\text{Eq. 25})$$

- **Coefficiente de Variação (COV)**

Assim como as demais medidas de dispersão, o COV também é uma medida estatística que quantifica a variabilidade de um conjunto de elementos em torno do seu valor médio. Dessa forma, quanto menor for o COV, significa que menos dispersos do valor médio estão os elementos do conjunto (Campello *et al.*, 2019). A fórmula do coeficiente de variação é dada pela Equação 26:

$$COV (\%) = \left(\frac{S}{\bar{X}}\right) \times 100 \quad (\text{Eq. 26})$$

No âmbito geotécnico, o coeficiente de variação muitas vezes é usado para estimar o desvio padrão de um parâmetro do solo em virtude da deficiência de recursos para realização de campanhas extensas de investigações geotécnicas (Mendes, 2019). Para que a abordagem probabilística seja executada é fundamental o conhecimento da dispersão dos parâmetros geotécnicos. Estes, segundo Duncan (2000), podem ser estimados a partir de grandes conjuntos de dados, ou quando não houver informações suficientes para se ter uma dispersão representativa, utilizar valores de COV estimados pela literatura. Na Tabela 5, são apresentados valores de COV usuais citados em (Duncan; Wright; Brandon, 2014):

Tabela 5 – Coeficientes de variação propriedades geotécnicas e ensaios *in situ*.

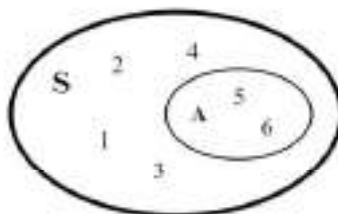
Propriedade ou ensaio de Campo	COV (%)	Referências
Peso específico ( $\gamma$ )	3 - 7	Harr (1987), Kulhawy (1992)
Peso específico submerso ( $\gamma_{sub}$ )	0 - 10	Lacasse & Nadim (1997), Duncan (2000)
Ângulo de Atrito $\varphi$	2 - 13	Harr (1987), Kulhawy (1992), Duncan (2000)
Resistência Não-Drenada $S_u$	13 - 40	Harr (1987), Kulhawy (1992), Lacasse & Nadim (1997)
Razão de Resistência Não-Drenada $S_u / \sigma_v'$	5 - 15	Lacasse & Nadim (1997), Duncan (2000)
Número de golpes de ensaio SPT ( $N$ )	15 - 45	Harr (1987), Kulhawy (1992)
Ensaio de penetração de cone elétrico ( $q_c$ )	5 - 15	Kulhawy (1992)
Ensaio de penetração de cone mecânico ( $q_c$ )	15 - 37	Harr (1987),
Ponta de prova do dilatômetro resistência ( $q_D$ )	5 - 15	Kulhawy (1992)
Ensaio de cisalhamento de palheta resistência não drenada ( $S_u$ )	10 - 20	Kulhawy (1992)

Fonte: Adaptado de Duncan, Wright, Brandon (2014).

### 3.6.3 Probabilidade

Para uma melhor compreensão de probabilidade, alguns conceitos são importantes. Consideremos então o exemplo de um lançamento de um dado com seus possíveis resultados apresentados na Figura 13:

Figura 13 - Resultados possíveis do lançamento de um dado.



Fonte: Autora (2023)

Segundo Azevedo (2016), sendo S o espaço amostral (que contém todos os resultados possíveis de um experimento), haverá para cada evento A (que contém os resultados de interesses), um número real representado por  $P(A)$ , que representará as chances desse evento acontecer. O conceito de probabilidade conforme apresentada em Assis *et. al* (2018), de forma quantitativa representa uma medida numérica de um determinado evento (A), pertencente a um espaço amostral (S) acontecer, sendo seu cálculo representado pela Equação 27:

$$P(A) = \frac{n(A)}{n(S)} \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde,

$P(A)$  = Probabilidade de um evento A acontecer;

$n(A)$  = Número de elementos amostrais do evento A;

$n(S)$  = Número de elementos do espaço amostral.

Existe um conjunto de axiomas que delimitam a teoria da probabilidade (Kolmogorov, 1956; Baecher, Christian, 2003). São elas:

- **Axioma 1:** A probabilidade  $P(A)$  de um evento A acontecer, se encontra entre 0 e 1:

$$0 \leq P(A) \leq 1 \quad (\text{Eq. 28})$$

- **Axioma 2:** A soma de todas as probabilidades de um espaço amostral é igual a 1:

$$\sum P(S) = 1 \quad (\text{Eq. 29})$$

- **Axioma 3:** Se A e B não tem nenhum elemento em comum ( $A \cap B = \emptyset$ ), ou seja, eventos mutuamente excludentes, então a probabilidade da união dos dois eventos é dada pela soma das suas probabilidades individuais:

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) \quad (\text{Eq. 30})$$

A teoria da probabilidade oferece ferramentas para resolução e compreensão de fenômenos incertos associados a vários contextos, permitindo a sua modelagem e análise.

### 3.6.3 Função densidade de probabilidade

A Função de Densidade de Probabilidade (FDP) é uma função que buscam descrever o comportamento da curva de distribuição de probabilidade de uma variável aleatória dentro de um conjunto de dados (Vecci, 2018). Essa função relaciona as chances de ocorrência de uma variável aleatória, por meio da Equação 31 (Braga, 2019):

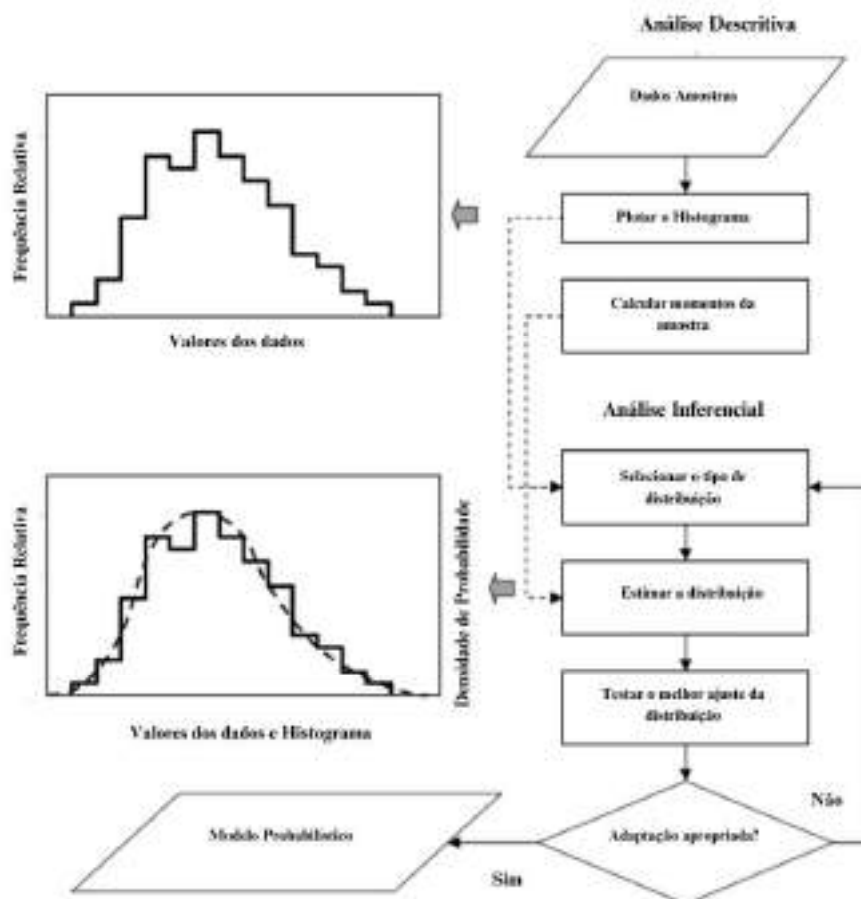
$$P(A \leq X \leq B) = \int_A^B f(x). dx \quad (\text{Eq. 31})$$

A escolha de qual distribuição mais se adequa a uma determinada propriedade é feita a partir de ferramentas gráficas como os histogramas. A acurácia desses histogramas será melhor, quanto maior for a quantidade de dados a serem trabalhados (Baecher, 1987). De acordo com El-Ramly (2001), onde houver quantidade de dados significativos, pode-se adotar a

distribuição observada no histograma. Entretanto, em casos em que a quantidade de dados seja reduzida ou ausente, deve-se adotar uma distribuição paramétrica para realizar o ajuste entre a curva encontrada com a função de distribuição mais próxima, observando sempre máximos e mínimos da distribuição selecionada com os valores físicos dos parâmetros.

Dentre os procedimentos mais usados para realizar esses ajustes, Yokozawa (2019) cita o Método dos Momentos (MM) e a metodologia *Maximum-Likelihood Estimators* (MLE), sendo está a abordagem mais utilizada. Jiang *et al.* (2023) também cita alternativas como a aproximação polinomial, o Método da Máxima Entropia de Informação e o Método de Markov Chain Monte Carlo. Na Figura 14 é apresentada um resumo das etapas necessárias para a realização do ajuste das distribuições.

Figura 14 - Etapas para a realização de um ajuste de distribuição de probabilidade.



Fonte: Uzielli *et al.* (2006).

Segundo Assis *et al.* (2018), ao conhecer a função de probabilidade de uma variável aleatória  $X$ , é possível estimar a sua probabilidade de ocorrência. Na engenharia existem diversas funções de densidade que podem ser adotadas quando não se tem dados suficientes para poder obter o tipo de distribuição, sendo as mais usuais: Normal, Log-normal,

Exponencial, Gamma e a Beta (Flores, 2008; Johari *et al.*, 2013). Na maioria das situações a distribuição normal pode ser adotada, a menos que haja dados suficientes capaz de caracterizar a função de distribuição da variável (Abramson *et al.*, 2002). Já em casos em que as variáveis não admitem valores negativos podem ser adotadas a função log-normal (Yang *et al.*, 2022).

### 3.8 MÉTODOS PROBABILÍSTICOS

Obras geotécnicas como barragens de terra, são constituídas de materiais naturais, que possuem parâmetros de resistências incertos. Contabilizar essas incertezas e entender os seus efeitos são importantes para um projeto de barragem adequado e para avaliação da sua segurança. Partindo disso, o emprego de uma abordagem probabilística para projetos geotécnicos é altamente desejável, uma vez que esta abordagem considera todas essas variações (Guo *et al.*, 2019).

A utilização da análise probabilística na estabilidade de taludes é tema de estudo de diversos trabalhos (Whitman, 1984; Chowdhury, Xu, 1993; Duncan, 2000; Flores, 2008; Cho, 2010; Silva, 2015; Yokozawa, 2019; Silva, 2019; Campello, 2020; Silva, 2021; Pereira, 2022), em que essas pesquisas têm abordado as incertezas associadas às propriedades do solo provenientes das investigações geotécnicas (Mouyeaux *et al.*, 2018). Essas incertezas surgem a partir da variabilidade espacial inerentes das propriedades do solo e dos erros de medição. Além disso, dados limitados das investigações geotécnicas dos locais, bem como simplificações adotadas pelos modelos de estabilidade, também contribuem para a dispersão dos parâmetros (Liu *et al.*, 2017).

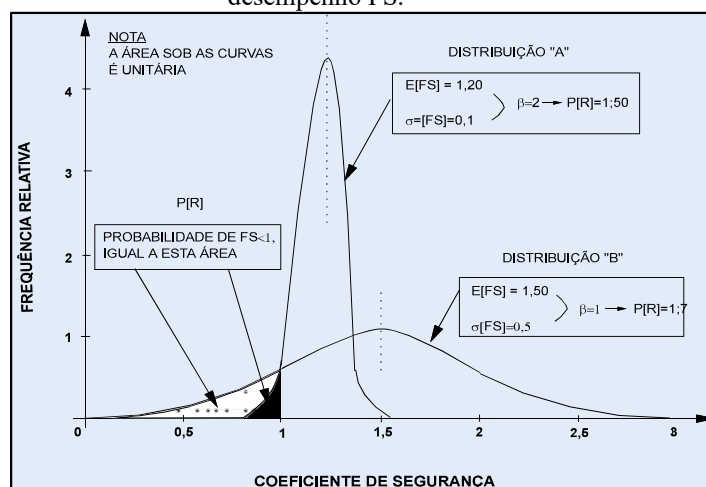
A abordagem probabilística leva em consideração a aleatoriedade dos dados do solo e o conhecimento humano limitado para realizar a avaliação probabilística de segurança (Cordier *et al.*, 2017). Diferente da abordagem determinística que gera um valor único para o FS, a aplicação da análise probabilística permite encontrar uma distribuição de probabilidade constituídas de diferentes valores para o FS, possibilitando uma quantificação da confiabilidade do talude, por meio da Pr. Quanto a esse último termo Duncan (2000) comenta que Pr não significa necessariamente uma falha catastrófica, mas sim um indicador de desempenho insatisfatório, sendo importante considerar as consequências do evento analisado.

Ressalta-se ainda que em uma análise probabilística, nem todos os parâmetros precisam ser considerados como variáveis aleatórias. Para o caso de análise de estabilidade as propriedades mais relevantes são: ângulo de atrito, peso específico e coesão (Mouyeaux *et al.*, 2018; Guo *et al.*, 2019). Para essas variáveis são adotadas distribuições de probabilidade, e

parâmetros estatísticos como a média, o desvio padrão e o COV. Nos demais casos, valores constantes são atribuídos aos parâmetros, que normalmente são aqueles que têm pouca influência no resultado da análise ou sobre os quais se tem maior confiabilidade.

Para exemplificar o conceito de probabilidade de ruptura, Assis *et al.* (2018) elaborou duas curvas de distribuição normal para o FS de segurança, exibidas na Figura 15, considerando dois taludes distintos. Na metodologia da abordagem determinística, a estabilidade é avaliada ao examinar o valor mínimo do FS. Isto, de acordo com Yokozawa (2019), proporciona um nível adicional de segurança ao método. No entanto, ao analisar a Figura 15, é possível observar também que, mesmo que os resultados das análises determinísticas apresentem um FS alto, isso não é uma garantia de estabilidade, uma vez que os parâmetros de dispersão podem levar a um aumento no valor de Pr. Nesse sentido, Jiang *et al.* (2022), comenta que na determinação do FS pela abordagem determinística, a palavra “segurança” traz uma falsa sensação de estabilidade. Essa discordância entre ambos os métodos de análise, se deve ao incremento das variabilidades, que somente são consideradas pela abordagem probabilística (Assis *et al.*, 2018).

Figura 15 - Exemplo do cálculo de probabilidade de falha para dois taludes em função do indicador de desempenho FS.



Fonte: Assis *et al.* (2018).

Entretanto, é importante ressaltar que a abordagem probabilística não sobrepõe os estudos determinísticos (Duncan, 2000; Jiang *et al.*, 2022). Nesse âmbito, Braga (2019) comenta que os estudos probabilísticos surgem como um complemento ao FS determinístico, uma vez que ele quantifica as incertezas associadas a esse fator por meio do  $\beta$ , responsável por indicar o grau de confiabilidade do FS gerado pelas análises determinísticas, bem como pela Pr que quantifica as chances de um incidente acontecer.



Dentre os métodos mais empregados para as análises probabilísticas tem-se o FOSM (*First Order Second Moment*); PEM (*Point Estimated Method*) e as simulações pelo Método de Monte Carlo (MMC). A escolha do método a ser utilizado deve considerar o tipo de problema e o que está associado a ele. Conforme Sousa (2021), a seleção da metodologia, deve ser feita com base na qualidade estatísticas requerida dos dados de entrada e de saída, do tempo necessário para o estudo e do esforço computacional planejado.

Apesar de existir diversos exemplos de aplicações e estudos considerando a análise probabilística em estabilidade de taludes, ainda é encontrada grandes divergências na literatura geotécnica quanto a Pr aceitável (Silva, 2019; Pereira, 2022; Jiang *et al.*, 2022). De acordo com El-Ramly (2001), é considerado aceitável uma Pr na ordem de  $2 \times 10^{-2}$  correspondendo a um índice de confiabilidade igual 2,00. Foster, Fell e Spannagle (2000), comentam que a probabilidade média anual de falha em grandes barragens de terra, com alturas maiores que 15 m, é na ordem de  $4,5 \times 10^{-4}$ . Para Jiang *et. al* (2022) a real Pr para estruturas críticas é frequentemente em torno de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$ . Já para *US Army Corps of Engineers* (USACE, 1997), são considerados aceitáveis valores de probabilidade na ordem de  $3 \times 10^{-5}$ .

Na Tabela 6, são apresentados os índices de confiabilidade alvo para análises de estabilidade estabelecidos pela USACE (1997). Estes valores serão considerados para verificação dos resultados das análises probabilísticas. Valores típicos de Pr e  $\beta$  para diferentes estruturas também são apresentados por Dell'Avanzi e Sayão (1998), conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 6 - Índice de confiabilidade alvo para análises de estabilidade.

Nível de desempenho Esperado	Índice de confiabilidade ( $\beta$ )	Pr (Pr)
Alto	5,0	$3,0 \times 10^{-7}$
Bom	4,0	$3,0 \times 10^{-5}$
Acima da média	3,0	$1,0 \times 10^{-3}$
Abaixo da média	2,5	$6,0 \times 10^{-3}$
Pobre	2,0	$2,3 \times 10^{-2}$
Insatisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

Fonte: Adaptado de USACE (1997).

Tabela 7 - Valores Típicos de Pr e  $\beta$ .

Caso	$\beta$	Pr
Fundações	2,3 - 3,0	$10^{-2} - 10^{-3}$
Taludes de Mineração	1,0 - 2,3	$10^{-1} - 10^{-2}$
Barragens	3,5 - 5,0	$10^{-3} - 10^{-5}$
Estruturas de contenção	2,0 - 3,0	$10^{-2} - 10^{-3}$

Fonte: Dell'Avanzi e Sayão (1998).

O procedimento metodológico para a realização de uma análise probabilística é descrito em (Malkawi *et al.*, 2000, p.167) onde:

O primeiro passo da metodologia é especificar a geometria do talude e a distribuição de probabilidade para as propriedades do solo ( $\phi$ ,  $C$  e  $\gamma$ ). O segundo passo é procurar a superfície de deslizamento crítica e seu FS associado utilizando métodos de equilíbrio limite (Ordinário, Bishop, Janbu e Spencer). Uma vez conhecidas (ou assumidas) a superfície crítica de deslizamento e as incertezas do solo, a análise de confiabilidade pode ser realizada. [...] para o caso do método de simulação de Monte Carlo conjuntos independentes de propriedades do solo ( $\phi$ ,  $C$  e  $\gamma$ ) são gerados a partir de suas distribuições de probabilidade atribuídas. Então o FS para cada conjunto pode ser calculado usando qualquer método de equilíbrio limitante. Assim, são determinados a média, o desvio padrão e a distribuição de probabilidade associada do FS. Finalmente, o índice de confiabilidade ( $\beta$ ) e a probabilidade de falha ( $P_f$ ) podem ser calculados.

A seguir são apresentados os métodos probabilísticos mais empregados em análises de estabilidade de taludes.

### 3.8.1 Método de FOSM

O método FOSM, é considerado um método simples que se baseia em uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor, para obter o segundo momento da função. Neste método apenas os dois primeiros momentos estatístico são avaliados, sendo eles respectivamente a média e variância (Braga, 2019). A função de desempenho da série de Taylor em torno de um valor médio fica então representada pela Equação 32.

$$FS(x) = FS(\bar{x}) + \frac{FS'(\bar{x})}{1!} (x - \bar{x}) + \frac{FS''(\bar{x})}{2!} (x - \bar{x})^2 + \dots \quad (\text{Eq. 32})$$

Como são avaliados apenas o primeiro e o segundo momento, trunca-se a Equação 32 no terceiro termo, obtendo o seguinte arranjo:

$$FS(x) = FS(\bar{x}) + FS'(\bar{x})(x - \bar{x})^2 \quad (\text{Eq. 33})$$

$$FS(x) - FS(\bar{x}) = FS'(\bar{x})(x - \bar{x})^2 \quad (\text{Eq. 34})$$

Elevando ambos os lados da Equação 34, obtêm-se a variância do FS, dada pela Equação 35.

$$V[FS(x)] = [FS'(\bar{x})]^2 \cdot V(x) \quad (\text{Eq. 35})$$

A Equação 35 realiza o cálculo da variância considerando o comportamento de apenas uma variável. Entretanto, como o cálculo do FS pode ser influenciado por mais de um parâmetro (ângulo de atrito, coesão, peso específico, resistência não-drenada etc.). Neste caso, deve-se utilizar a Equação 36 para calcular a variância do FS.

$$V[FS(x)] = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial FS}{\partial x_i} \right]^2 \cdot V(x_i) \quad (\text{Eq. 36})$$

Observa-se que o método requer o conhecimento das derivadas parciais do FS. A resolução dessas derivadas parciais, na maioria das situações são impraticáveis. Para contornar isso Sandroni e Sayão (1992), aconselham que seja realizado a variação de um parâmetro por vez, mantendo fixo os demais. Com relação a parcela de variação sugere-se que seja adotado um valor 10% (positivo e/ou negativo) sobre o valor médio de cada parâmetro, na aproximação das derivadas parciais (Farias, Assis, 1998; Dell'Avanzi, Sayao, 1998). Dessa forma, tem-se que para cada parâmetro variado é obtido um valor de FS deferente. O cálculo da derivada parcial é realizado considerando a Equação 37:

$$\frac{\partial FS}{\partial x_i} = \frac{FS(x_i + \partial x_i) - FS(\bar{x}_i)}{\partial x_i} \quad (\text{Eq. 37})$$

A vantagem desse método está na simplicidade dos cálculos, não exigindo o conhecimento das funções de distribuições de probabilidade dos parâmetros de entrada. Além disso, ele permite avaliar a influência que cada parâmetro tem sobre a magnitude do FS, sendo dessa forma uma das opções mais simples usadas para simplificar o cálculo de outros métodos probabilísticos, como por exemplo, os cálculos do método de Monte Carlo.

### 3.8.2 Método das estimativas pontuais

Desenvolvido por Rosenblueth em 1975, o Método das Estimativas Pontuais, ou *Point Estimate Method* (PEM) é um método indireto que permite a estimativa dos dois primeiros momentos de uma função estatística. Esse método aproximado tende a simplificar os

tratamentos estatísticos, e somente compromete a acurácia dos resultados, se as dispersões das variáveis envolvidas forem grandes (Assis *et al.*, 2018).

Assim como o método de FOSM, ele consiste em um procedimento simples de aproximação da média e da variância por uma função  $F(x)$  sem que se conheça ela explicitamente (Vecci, 2018). Pelo método de Rosenblueth, considera-se uma função de desempenho  $F(x)$  dependente de dois parâmetros admitidos como variáveis aleatórias, representada pela Equação 38:

$$F(\bar{X}) = [(P_{++}) \cdot (FS_{++})] + [(P_{+-}) \cdot (FS_{+-})] + [(P_{-+}) \cdot (FS_{-+})] + [(P_{--}) \cdot (FS_{--})] \quad (\text{Eq. 38})$$

Onde:

$P_{++}$  é a probabilidade de que os valores das duas variáveis sejam acrescidos de seus desvios padrão simultaneamente.

$P_{+-}$  e  $P_{-+}$  é a probabilidade de que uma variável seja acrescida de seu desvio padrão e a outra variável seja decrescida de seu desvio padrão, na ordem imposta pelos símbolos de adição e subtração;

$P_{--}$  é a probabilidade de que os valores das duas variáveis sejam decrescidos de seus desvios padrão simultaneamente.

$FS_{++}$  é o valor do FS obtido quando as duas variáveis são acrescidas de seus desvios padrão;

$FS_{+-}$  e  $FS_{-+}$  são os FS obtidos quando uma variável é acrescida e a outra decrescida de seus respectivos desvios padrão, na ordem imposta pelos símbolos de adição e subtração;

$FS_{--}$  é o FS obtido quando as duas variáveis são decrescidas de seus desvios padrão.

Para o exemplo acima, supondo  $x_1$  e  $x_2$  como as variáveis aleatórias, as probabilidades de ocorrência de acréscimo e decréscimo ficam representadas pelas Equação 39 à 42:

$$P_{++} = (x_1 + \sigma_1) \cdot (x_2 + \sigma_2) \quad (\text{Eq. 39})$$

$$P_{+-} = (x_1 + \sigma_1) \cdot (x_2 - \sigma_2) \quad (\text{Eq. 40})$$

$$P_{-+} = (x_1 - \sigma_1) \cdot (x_2 + \sigma_2) \quad (\text{Eq. 41})$$

$$P_{--} = (x_1 - \sigma_1) \cdot (x_2 - \sigma_2) \quad (\text{Eq. 42})$$

Considerando que as funções de densidade de probabilidade sejam simétricas e que as variáveis não possuem correlações, as probabilidades de que as variáveis sejam acrescidas ou decrescidas do desvio padrão serão todas iguais (Rosenblueth, 1975). Na mesma linha de raciocínio, para duas variáveis aleatórias, entende-se que:

$$P_{++} = P_{+-} = P_{-+} = P_{--} = 0,25 \text{ ou } 1/4 \quad (\text{Eq. 43})$$

Logo, substituindo a informação da Equação 43 na Equação 38, é possível encontrar a função que representa a média do FS, sendo está representada pela Equação 44:

$$E(FS) = \frac{[(FS_{++}) + (FS_{+-}) + (FS_{-+}) + (FS_{--})]}{4} \quad (\text{Eq. 44})$$

Obtendo-se os valores de FS correspondentes a todas as combinações possíveis dos acréscimos e decréscimos estimados para cada variável aleatória, é possível calcular a variância pela subtração do quadrado da média aritmética dos valores de FS do somatório dos quadrados de FS, conforme indicado na Equação 45:

$$V(FS) = [(P_{++}) \cdot (FS_{++})^2] + [(P_{+-}) \cdot (FS_{+-})^2] + [(P_{-+}) \cdot (FS_{-+})^2] + [(P_{--}) \cdot (FS_{--})^2] - [E(FS)]^2 \quad (\text{Eq. 45})$$

O número de análises determinísticas necessárias para aplicação do método das estimativas pontuais aumenta exponencialmente ( $2^n$ ) com o número de variáveis aleatórias adicionadas ao problema, o que torna o método não recomendável para análises com muitos parâmetros variáveis (Chowdhury, 2010). De forma semelhante ao método FOSM, a média e o desvio padrão obtidos pelo método das Estimativas Pontuais podem ser usados no cálculo do índice de confiabilidade e da Pr do talude.

### 3.8.3 Método de Monte Carlo

Uma outra forma para avaliar o problema de estabilidade de talude de forma probabilística, é utilizando a metodologia de Monte Carlo, no qual valores discretos das variáveis aleatórias são gerados de acordo com a sua distribuição de probabilidade, para resolução da função de desempenho (Fernández, Villalobos, King, 2018).

Embora diversas metodologias probabilísticas tenham sido desenvolvidas, o método de Monte Carlo ainda é considerado o mais eficiente, para análises de estabilidade que consideram

as incertezas das propriedades do solo (Jiang *et al.*, 2022). A execução desse método se tornou possível devido a evolução da capacidade computacional, uma vez que em sua metodologia de execução são realizadas inúmeras combinações de variáveis dos parâmetros de entrada (Sousa, 2021).

Primeiramente o método exige a definição das variáveis aleatórias do problema. Em seguida, de acordo com a função de densidade de probabilidade atribuída a cada variável, é definido aleatoriamente um valor. Quando aplicado à estabilidade de taludes, cada combinação de valores obtidos para as variáveis representa uma amostra, para a qual será calculado o valor de FS. O processo é então repetido N vezes, gerando um histograma das frequências dos fatores de segurança.

A assertividade de uma análise pelo método de Monte Carlo é fortemente influenciada pelo número iterações adotadas, podendo se aproximar de uma solução exata quando este número é elevado. Neste sentido, Bilali *et al.* (2022), comenta que a convergência estatística do processo de simulação é fundamental para se obter resultados confiáveis. Porém cabe destacar que a consideração de um número elevado de variáveis poderá muitas vezes inviabilizar seu uso, uma vez que o número de interações necessárias para a estimativa da Pr, varia de forma exponencial.

O cálculo do número de iterações com base em um nível de confiança pré-estabelecido, pode ser feito com base na Equação 46, utilizando valores da Tabela 8.

$$N = \left( \frac{Z_{\alpha/2}^2}{4\alpha^2} \right)^n \quad (\text{Eq. 46})$$

Onde;

N = Número de simulações de Monte Carlo para certo nível de confiança;

$Z_{\alpha/2}$  = Parâmetro de confiabilidade (número de desvios-padrão) obtido da Tabela 8;

$\alpha$  = Tolerância (erro) admitida na aproximação de Monte Carlo;

n = Número de variáveis aleatórias independentes que afetam a variável dependente.

Tabela 8 - Parâmetros de confiabilidade.

Nível de Confiança (1- $\alpha$ ) (%)	Parâmetro de Confiabilidade $Z_{\alpha/2}$
90	1,64
95	1,96
95,45	2,00
98	2,33
99	2,58
99,5	2,81
99,73	3,00
99,9	3,29
99,99	3,89
99,994	4,00

Fonte: Assis *et al.* (2018).

Como mencionado anteriormente a realização de um número elevado de iterações torna a análise por Monte Carlo muitas vezes inviáveis em termos de tempo e esforço computacional (Castro, Reinaldo, 2022). Para contornar este problema muitas pesquisas trabalham adotando a metodologia baseada em tentativas, onde estima-se um número de iterações na ordem de milhares e verifica-se a convergência dos resultados. Neste sentido, Apaza e Barros (2014) ao realizarem uma análise probabilística de um caso real, constataram que a Pr convergia para um número de 2000 iterações; Mendes (2019) ao avaliar o potencial de liquefação estática e dinâmica de uma barragem, trabalhou com um número de 1000 iterações no Método de Monte Carlo; Yokozawa (2019) por sua vez realizou tentativas com 4 valores de iterações diferentes 100, 1.000, 10.000 e 100.000, notando uma convergência da Pr referente ao número de 2000 iterações; Campello (2020) ao analisar 3 cenários de influência da variabilidade geotécnica em talude, constatou que a convergência acontecia com um número de iterações entre 1000 a 5000. Kalantari *et al.* (2023) ainda comentam que para uma execução de Monte Carlo o número ótimo de simulações deverá ser em torno de 500 execuções.

Uma vez que a estabilidade de um talude está diretamente condicionada ao equilíbrio entre a força cisalhante mobilizada e a força cisalhante resistente, em uma análise pelo método de Monte Carlo, a Pr funciona como uma medida relativa do número de vezes no qual a força cisalhante mobilizada foi superior à resistente. Neste caso a probabilidade de falha será calculada simplesmente como uma relação entre o número de simulações que falharam ( $FS < 1$ ), sobre o número de simulações totais (N) (Yang *et al.*, 2022):

$$P_f = \left( \frac{n^o (FS < 1)}{N} \right) \quad (\text{Eq. 47})$$

O índice de confiabilidade por sua vez, representa o número de desvios padrões que separam o FS médio probabilístico, do FS crítico ( $F=1$ ). De acordo com Silva (2015), o índice de confiabilidade pode ser calculado a partir de duas formas:

- Assumindo que o FS segue uma distribuição normal, tem-se:

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (\text{Eq. 48})$$

Onde,

$\beta$  = Índice de confiabilidade;

$\mu_{FS}$  = Média do FS probabilístico;

$\sigma_{FS}$  = Desvio-padrão do coeficiente de segurança.

- Assumindo que o FS segue uma distribuição log-normal, tem-se:

$$\beta = \frac{\ln \left[ \frac{\mu_{FS}}{\sqrt{1 + V(FS)^2}} \right]}{\sqrt{\ln[1 + V(FS)^2]}} \quad (\text{Eq. 49})$$

Onde,

$\beta$  = Índice de confiabilidade;

$\mu_{FS}$  = Média do FS probabilístico;

$V(FS)$  = Coeficiente de variação do FS.



## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia que foi utilizada para o desenvolvimento do trabalho. São apresentadas informações a respeito das características da barragem, bem como o processo realizado para definição dos parâmetros geotécnicos necessários para a realização das análises de estabilidades determinísticas e probabilísticas. É importante comentar que parte da metodologia foi definida em parceria com técnica construtiva da “Empresa A”, com exceção de algumas configurações adotadas no *software* de estabilidade. Além disso, ressalta-se que os itens descritos foram analisados pela autora, para compreensão de como foram obtidos esses resultados.

### 4.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

As Áreas de Resíduos de Bauxita (ARB) objeto de estudo deste trabalho, pertencem a uma empresa multinacional, a qual denominaremos de “Empresa A”, situada na cidade de São Luís no Estado do Maranhão. Essas áreas de disposição têm como função receber os resíduos úmidos (*Wet-Disposal*) oriundos do processo *Bayer* provenientes das refinarias. Em virtude da alta concentração de solução alcalina que o resíduo possui, estas estruturas são projetadas com o intuito de minimizar ao máximo o potencial de contaminação do meio ambiente.

Por essa razão, essas áreas são constituídas de solos locais compactados, impermeabilizadas internamente, possuindo um complexo sistema de drenagem, de monitoramento e de distribuição do resíduo, com o objetivo de atender as legislações nacionais e internacionais. Na Figura 16, é possível visualizar toda a área destinada à disposição dos resíduos pertencentes a “Empresa A”.

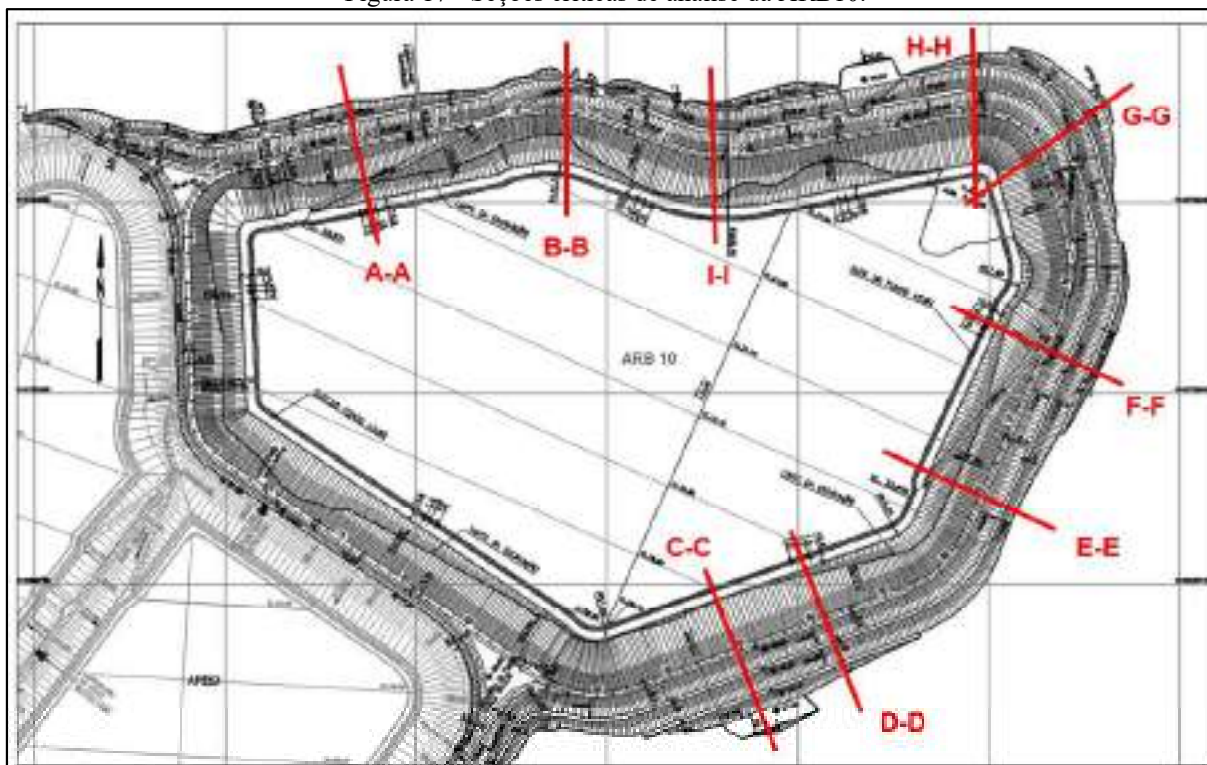
Figura 16 - Vista aérea da área de disposição de resíduo de bauxita da "Empresa A".



Fonte: Adaptado do Google Earth (2023)

Devido a disponibilidade de acesso a documentação técnica referente aos projetos de construção de cada área, o presente estudo tratou das análises da ARB10. As seções críticas adotadas para a execução das análises, seguiram as mesmas seções apresentadas nos relatórios referentes ao projeto básico, as quais foram definidas em função das alturas das cristas. Na Figura 17, são apresentadas as seções de análises em planta da ARB10.

Figura 17 - Seções críticas de análise da ARB10.



Fonte: Relatório SLU-D-618092-001 da "Empresa A" (2023)

## 4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de estabilidade tanto para o aterro compactado quanto para a fundação dos diques, foram obtidos a partir dos resultados apresentados nos ensaios de campo e laboratório presentes nos relatórios de consolidação de investigações geotécnicas (SLU-N-142759-001 e SLU-N-142790-001) fornecidos pela “Empresa A”.

As investigações de campo foram realizadas na área de implantação da ARB10, conforme apresentado na Figura 18, e contemplaram um total de 39 sondagens *Standard Penetration Test* (SPT), 15 ensaios de *Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement* (CPTU), 18 sondagens a trado (TR), 6 poços de inspeção (PI) para retirada de amostras indeformadas superficiais e 9 coletas de amostras do tipo Shelby/Denison a diferentes profundidades. Além disso, foram recolhidas amostras deformadas para a determinação dos pesos específico e teor de umidade natural do solo. Foram executados ainda em campo, ensaios de permeabilidade *in situ* e coleta de amostras para a determinação da umidade do solo em alguns pontos de SPT.

Figura 18 - Planta de localização das investigações geotécnicas da ARB10.



Fonte: Adaptado Google Earth (2023)

Os ensaios de laboratório consistiram na caracterização completa das amostras (Granulometria por peneiramento e sedimentação, Limites de Atterberg, densidade real dos grãos), realização de ensaios de compactação Proctor Normal, adensamento oedométrico,

permeabilidade, e ensaios triaxiais CD, CU e UU. Esses ensaios de laboratório foram realizados em materiais provenientes de amostras retiradas na área da fundação dos diques da ARB 10 (Amostras coletadas com amostrador tipo Shelby e Poços de Inspeção) e da área de empréstimo (amostras coletadas pelas sondagens à trado).

É importante esclarecer que o objetivo dos procedimentos delineados neste capítulo é fornecer uma compressão do método utilizado para a estimação dos parâmetros de cada camada de material nas geometrias analisadas. Portanto, salienta-se que o propósito deste capítulo não reside na exposição dos resultados obtidos nos ensaios de campo e laboratório em si, mas sim na explanação do processo que conduziu à estimação dos parâmetros finais empregados no *software*.

#### 4.2.1 Parâmetros do resíduo de bauxita

A definição dos parâmetros do resíduo de bauxita usados nas análises de estabilidade foi baseada a partir de valores adotados em projetos das ARBs anteriores (relatório SLU-F-012803-001), conforme procedimento adotado pela “Empresa A”. Para verificação da adequação desses parâmetros, fez-se uma comparação com os resultados dos estudos de Bedin (2006), Bedin (2010) e Nierwinski (2019), visto que essas pesquisas trabalharam com a caracterização do resíduo de bauxita pertencentes a empresa em questão.

Segundo o que foi apresentado nesses estudos, foi possível observar uma aproximação entre os parâmetros de projetos anteriores com os dos estudos realizados pelos três trabalhos citados, conforme pode ser visto na Tabela 9. Avaliando o comportamento desses dados, tem-se que os parâmetros empregados nos relatórios apresentam valores próximos. Posto isso, para os parâmetros geotécnicos do resíduo de bauxita, foi considerado tanto nas análises determinísticas quanto nas probabilísticas, os valores correspondentes aos adotados pela “Empresa A”.

Tabela 9 - Resumo dos parâmetros encontrados para o resíduo de bauxita.

<b>Parâmetros de projeto</b>	<b>Relatório da “Empresa A”</b>	<b>Bedin (2006)</b>	<b>Bedin (2010)</b>	<b>Nierwinski (2019)</b>
Peso específico natural (kN/m <sup>3</sup> )	-	18,0 – 20,0	15,8 – 17,8	-
Coesão (kPa)	0	10	0	-
Ângulo de atrito (°)	32	23 – 40,54	32 - 36	32,4
Su (kPa)	54	10 – 60	-	-

Fonte: Autora (2023).

#### 4.2.2 Parâmetros do aterro compactado

Os parâmetros da camada de aterro foram levantados a partir dos resultados apresentados no relatório SLU-N-142790-001.

Os ensaios para a caracterização do aterro foram conduzidos em amostras coletadas por sondagens a trados com 18 furos (TR-1 a TR-18), com profundidades variando entre 1 e 6 m. As amostras foram coletadas na região localizada no fundo do reservatório e da área da jazida, conforme é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Planta de localização dos furos de sondagem à trado.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2023).

A composição média das amostras das jazidas apresentaram a seguinte distribuição: 9% de pedregulhos, 3% de areia grossa, 32% de areia média, 47% de areia fina, 21% de silte e 13% de argila. Entretanto, para as amostras coletadas no fundo do reservatório as composições médias possuíam 0,3% de pedregulho, 0,4% de areia grossa, 54,7% de areia média, 26,7% areia fina, 10,3% de silte e 7,6% de argila. Os ensaios mostraram maior predominância nas composições entre areia média e silte.

Com relação aos resultados dos limites de Atterberg, algumas amostras apresentaram comportamento fracamente plástico. A densidade real dos grãos para a região da jazida variou entre 2,48 g/cm<sup>3</sup> a 2,79 g/cm<sup>3</sup> com valor médio em torno de 2,67g/cm<sup>3</sup>. Já para o fundo do reservatório esses valores variaram entre 2,56 g/cm<sup>3</sup> a 2,64 g/cm<sup>3</sup> com valor médio de 2,62g/cm<sup>3</sup>, sendo próximos do valor padrão de 2,6 g/cm<sup>3</sup> para solos minerais (Campos, 2019).

Os resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal apresentaram em média teor de umidade ótima 12,89% e peso específico seco máximo de 18,03 kN/m<sup>3</sup> para os materiais das jazidas. Já os materiais do fundo do reservatório apresentaram umidade média de 9,39% e peso específico seco máximo de 17,71 kN/m<sup>3</sup>, valores estes próximos aos encontrados por Oliveira *et al.* (2023).

Os ensaios de permeabilidade a carga variável foram realizados em amostras indeformadas e compactadas, moldadas por compactação na energia de 98% do Proctor Normal nas condições de umidade ótima. O coeficiente de permeabilidade (k) encontrado, apresentou valor médio em torno de  $5,52 \times 10^{-5}$  cm/s para a área da jazida e  $5,7 \times 10^{-5}$  cm/s para o fundo do reservatório, configurando-se como solos de baixa permeabilidade, sendo interessantes para taludes de barragem de terra (Vargas, 1977).

Para determinação da resistência do solo foram realizados ensaios de cisalhamento direto e triaxiais CD, CU e UU em amostras indeformadas e compactadas coletadas na área da jazida e do fundo do reservatório. Os resultados desses ensaios encontram-se resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados encontrados nos ensaios realizados nas amostras coletadas à trado.

Local	Ensaio Cis. Dir		Ensaio CID		Ensaio CIU		Ensaio UU			
	Tensões Efetivas		Tensões Efetivas		Tensões Efetivas		Tensões Totais			
	c' (kPa)	φ' (graus)	c' (kPa)	φ' (graus)	c' (kPa)	φ' (graus)	c (kPa)	φ (graus)		
Jazida	23,2	37,1	32,5	30,6	23,3	32,3	27	21,6	33,5	x
Fundo do Reservatório	18,4	36,1	x	x	22,9	32,6	61,0	29,5	62,1	1,5

Fonte: Adaptado do relatório SLU-F-155939-001.

Com base nos resultados apresentados no relatório SLU-F-155939-001, foram definidos os parâmetros do aterro compactado. Para o peso específico foi escolhido o maior valor encontrado nos ensaios de compactação, sendo este de 20 kN/m<sup>3</sup>. Em relação a coesão, optou-se por trabalhar com o menor valor encontrado nos ensaios triaxiais CU, sendo este de 10 kPa. Quanto ao ângulo de atrito foi adotado um valor de 33°. No Quadro A.1.1 são apresentados todos os resultados encontrados nos ensaios de laboratório realizados nas amostras coletadas à trado.

Sobre as características geométricas do aterro compactado essas são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resumo das características geométricas da ARB10.

<b>Características</b>	<b>Valor</b>
Área total do ARB10	846.170 m <sup>2</sup>
Largura da crista dos diques	7,50 m
Cota da crista regular	55,5 m
Cota do fundo acabado	29,8 m a 32,8 m
Inclinação dos taludes internos	1(V):2,75(H)
Inclinação dos taludes externos	1(V):2,5(H)
Largura das bermas	5,0 m
Altura das bermas	A cada 10 m

Fonte: Relatório SLU-F-153915-001.

#### 4.2.3 Construção das seções críticas

Para realizar o levantamento dos parâmetros geotécnicos das camadas de solo constituintes das fundações do dique de partida, análises foram feitas com base nos resultados dos ensaios de campo (Relatório SLU-N-142759-001) e laboratório (Relatório SLU-N-142790-001) das amostras coletadas nos poços de inspeção e pelo tubo Shelby/Denison. Os ensaios de campo colaboraram para a elaboração da estratigrafia da fundação, enquanto os ensaios de laboratório contribuíram para o levantamento das propriedades geotécnicas. Os relatórios que contribuíram para este processo foram: SLU-F-153917-001 e SLU-155939-001 todos abordando o agrupamento de informações sobre os ensaios de prospecção realizados.

Com base nos perfis oriundos das sondagens SPT, foi verificado que as camadas superficiais de solo entre 30 e 80 cm de profundidade eram constituídas de solo vegetal de coloração cinza, sendo está camada removida durante a execução do aterro. As camadas iniciais do solo são constituídas de silte arenoso e areia siltosa, com valores de  $N_{SPT} < 5$  para profundidade de até 5m. Nas camadas subsequentes há presença de silte arenoso, areia siltosa e silte argiloso, apresentando ganho de resistência  $N_{SPT}$  com a profundidade. Comportamento semelhante foi verificado nos resultados do ensaio CPTU. As camadas contendo materiais argilosos, teve profundidades variando entre 14 m e 23 m.

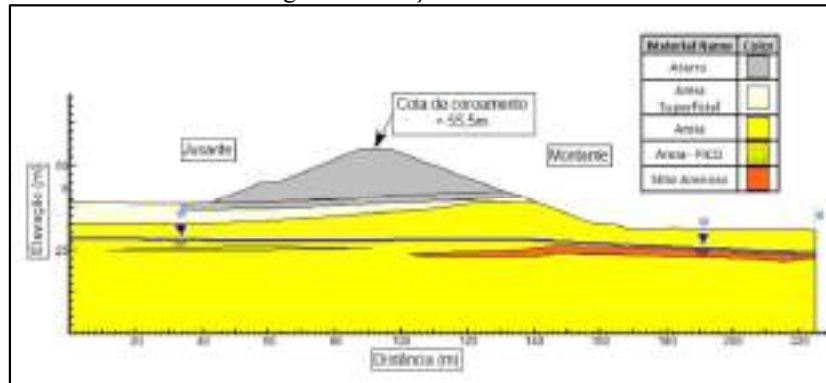
Conforme os boletins de sondagem, o nível de água na região da fundação dos diques se encontra em média na elevação 23,63 m, com elevação máxima de 30,68 m. Contudo, na área localizada no fundo do reservatório, a média do nível d'água encontra-se na elevação 26,48 m, com valor máximo 34,60 m. Conforme consta no documento SLU-F153915-001, o memorial de projeto estabeleceu que a cota de fundo do reservatório acabado estaria no mínimo a 1,5 m acima do nível d'água mais elevado detectado na área.

Com relação ao levantamento de parâmetros das camadas das fundações, o processo inicial consistiu em primeiro momento compreender como se comportava a estratigrafia do



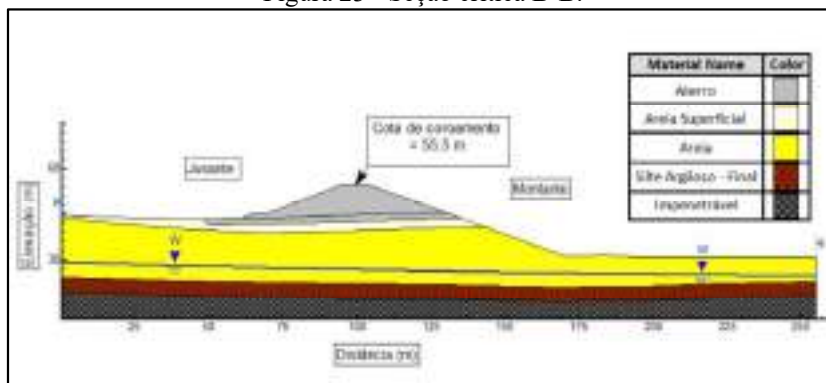


Figura 22 - Seção crítica A-A.



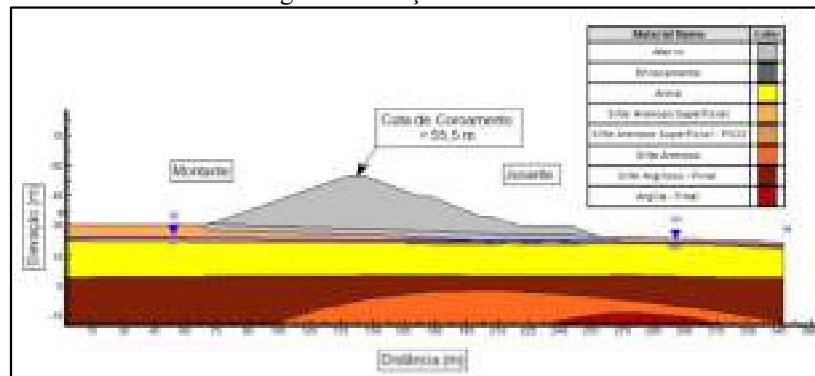
Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 23 - Seção crítica B-B.



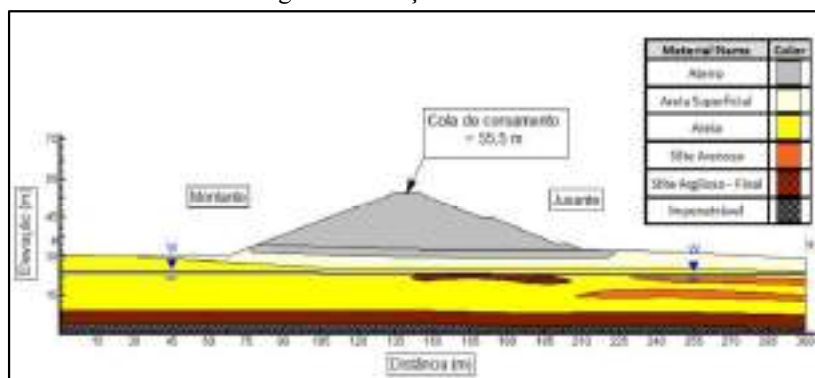
Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 24 - Seção crítica C-C.



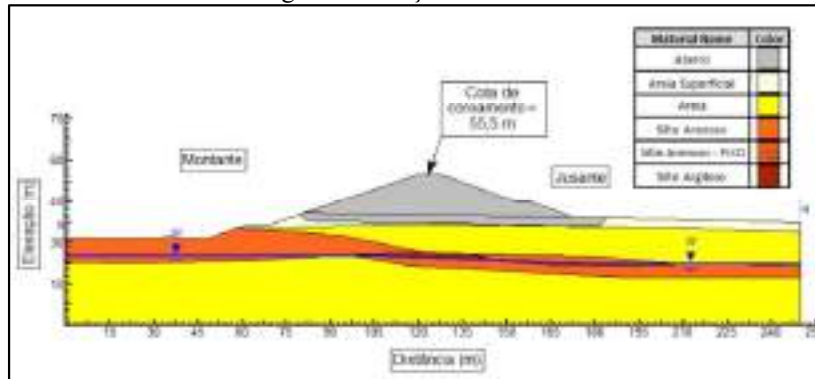
Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 25 - Seção crítica D-D.



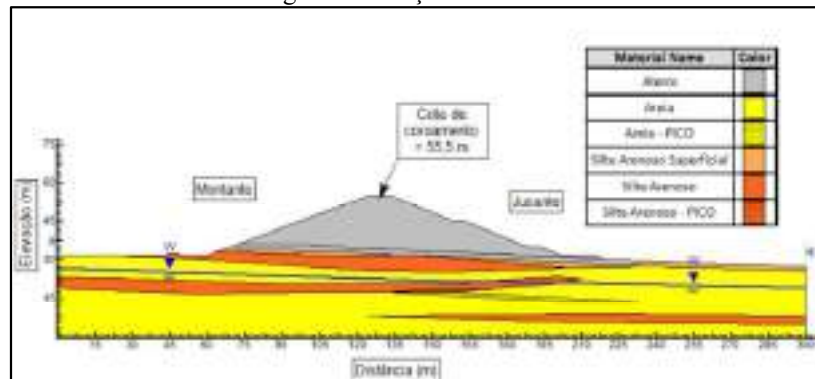
Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 26 - Seção crítica E-E.



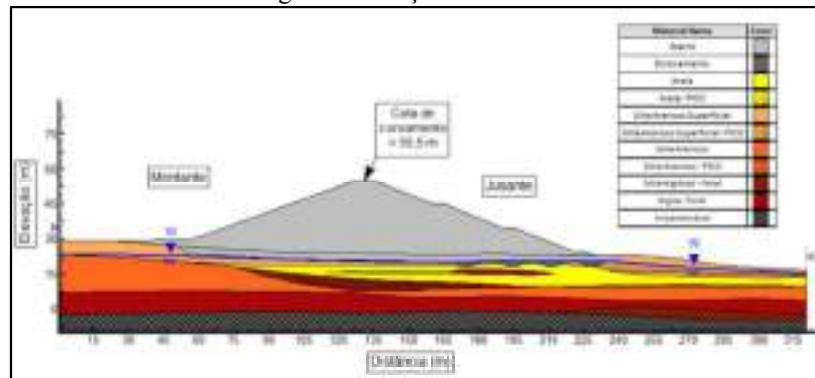
Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 27 - Seção crítica F-F.



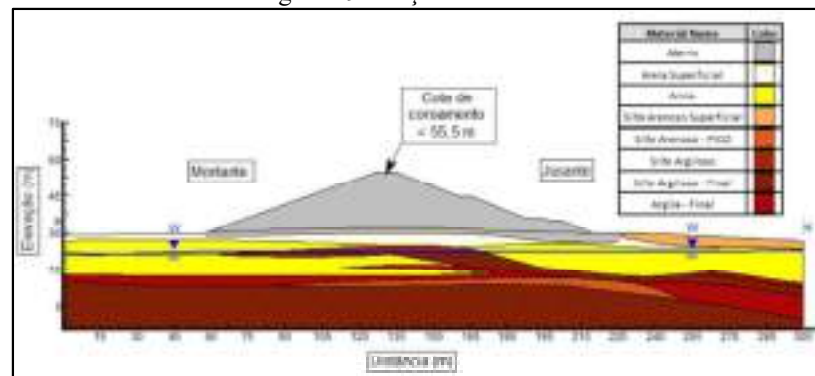
Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 28 - Seção crítica G-G.



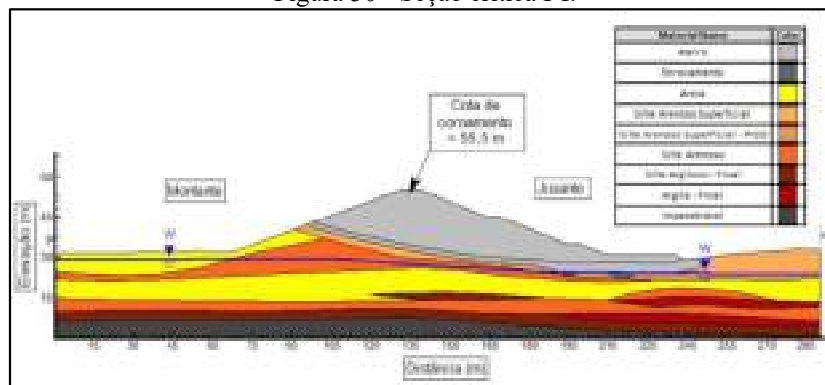
Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 29 - Seção crítica H-H.



Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

Figura 30 - Seção crítica I-I.



Fonte: Relatório SLU-F-153906-001 (2023)

A partir da Figura 22 a Figura 30, observa-se que algumas camadas receberam a nomenclatura dos materiais que as constituíam, acrescida de palavras como: final, operação, pico, liq. e residual. Essas terminações se referem a nomenclatura adotado no *software* para diferenciar o comportamento dos materiais em relação ao final de construção do aterro e sua operação, como também, para classificar aqueles materiais arenosos sujeitos a liquefação (pico/liq) e seu comportamento após um evento sísmico (residual). Adicionalmente, as camadas com nomenclaturas acrescidas da palavra superficial se referem aqueles materiais que apresentaram compactação variando entre fofa e medianamente compacta.

#### 4.2.4 Parâmetros da fundação

Para a realização das análises de estabilidade, é fundamental que os parâmetros geotécnicos das camadas dos solos sejam conhecidos, como por exemplo, o ângulo de atrito, peso específico e coesão (Guo *et al.* 2019). Neste sentido, os parâmetros geotécnicos das camadas foram levantados com base nos resultados de ensaios de amostras localizados em pontos distintos distribuídos na área de implantação da ARB10, conforme apresentado no relatório SLU-N-142790-001.

A Tabela 12 apresenta a classificação das amostras realizados pela “Empresa A”, organizada conforme o tipo de material que cada uma representava nos boletins de sondagem SPT e ensaios de CPTU. A numeração atribuída a cada amostra indica sua posição de retirada, enquanto as letras a categorizam com base nas suas respectivas profundidades de coleta. Os parâmetros de projeto adotados com base nos ensaios de cisalhamento direto e triaxial para as camadas de material da fundação encontra-se resumidos na Tabela 13. Os dados completos obtidos para cada ensaio estão exibidos no Quadro A.1.2.

Tabela 12 - Agrupamento das Amostras em função da textura do solo.

Material	Amostras
Silte arenoso superficial	PI-01 B1, PI-01 C1, SH-01 A, SH-06B, SH-08A
Silte arenoso	SH-06A, SH-07, SH-03A
Areia superficial	PI-02 C1, PI-03 B1, PI-04 B1, PI-04 C1, PI-05 C1, PI-06 C1, SH-02A, SH-02C
Areia	SH01B, SH-04A, SH-05A, SH-07B, SH-08B
Silte argiloso	SH-02B, SH-02D
Argila	SH-08C, SH-08D

SH – Shelby, PI – Poços de Inspeção

Fonte: Adaptado do relatório SLU-F-153906-001.

Tabela 13 - Parâmetros de projeto da “Empresa A” para análises de estabilidade.

Material	Empresa A			
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	D		ND
		c(kPa)	$\phi$ (°)	Su (kPa)
Enrocamento	22	0	35	x
Areia superficial	17	0	29	x
Areia	18	0	31	x
Silte arenoso superficial	17	0	30	x
Silte arenoso	18	0	31	x
Silte argiloso	18	11	34	50
Argila	19	26	29	70

\*D = Drenado; ND = Não Drenado

Fonte: Adaptado do Relatório SLU-F-153906-001.

O estudo da suscetibilidade a liquefação do solo da fundação foi avaliado mediante a identificação do comportamento contrátil e dilatante realizado pela “Empresa A”, empregando os métodos de análise de Olson (2001) e Jefferies & Been (2016). As análises foram feitas como base os resultados do CPTU. Com esses resultados foram selecionados os pontos com maior comportamento contrátil para realização do cálculo das resistências de pico e resistência liquefeita, com base nas Equações 49 e 50 respectivamente propostas por Olson (2001):

$$Su \left( \frac{pico}{\sigma'_{v0}} \right) = 0,205 + 0,0143 \cdot q_{c1} \pm 0,04 \quad \text{para } q_{c1} \leq 6.5 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 49})$$

$$Su \left( \frac{liq}{\sigma'_{v0}} \right) = 0,03 + 0,0143 \cdot q_{c1} \pm 0,03 \quad \text{para } q_{c1} \leq 6.5 \text{ MPa} \quad (\text{Eq. 50})$$

Os valores encontrados para as resistências de pico e resistência liquefeita dos materiais presentes na fundação encontrados pela “Empresa A”, são apresentadas na Tabela 14 a seguir:

Tabela 14 - Valores de resistência de Pico e liquefeita para matérias granulares.

Material	$Su_{pico}/\sigma'_{v0}$	$Su_{liq.}/\sigma'_{v0}$
Areia superficial	0,25	0,1
Areia	0,23	0,1
Silte arenoso superficial	0,23	0,1
Silte arenoso	0,23	0,1
Silte argiloso	-	-
Argila	-	-

Fonte: Adaptado do Relatório SLU-F-153906-001.

Materiais com presença de argila foram identificadas nos solos da fundação abaixo do nível do lençol freático, apresentando comportamento não drenado e sem suscetibilidade a liquefação. Para essas condições, a “Empresa A” realizou estudos com base nos resultados obtidos pelo ensaio CPTU, com o objetivo de identificar as razões de resistência de camadas de materiais argilosos que se encontravam abaixo no nível do lençol freático. As medidas levantadas encontram-se organizadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Razão de resistência encontrados para solos argilosos.

Material	$Su/\sigma'_{v0}$
Areia superficial	-
Areia	-
Silte arenoso superficial	-
Silte arenoso	-
Silte argiloso	0,21
Argila	0,18

Fonte: Adaptado do Relatório SLU-F-153906-001.

Os valores residuais dos parâmetros geotécnicos para o cenário de solicitação pós-sísmica, foram estimados pela “Empresa A” a partir da redução de 10% a 15% para materiais drenados conforme recomendação estabelecida no documento *Guidelines for Design of Dams and Appurtenant Structures for Earthquake* (2017) da ANCOLD. Já os materiais com comportamento não drenado, sofreram uma redução de 20% do seu valor original (Day, 2012).

Na Tabela 16, encontram-se organizados os parâmetros geotécnicos utilizados para as análises de estabilidade de taludes da ARB10 conforme é apresentado no relatório SLU-F-153906-001.

Tabela 16 - Parâmetros geotécnicos para análises de estabilidade da ARB10.

Solo	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Drenado		Não Drenado		Pós Sísmico			
		c(kPa)	$\phi$ (°)	Su, min	Su/ $\sigma'_{v0}$	c(kPa)	$\phi$ (°)	Su, min	Su/ $\sigma'_{v0}$
Aterro Compactado	20	10	33	-	-	0	30	-	-
Resíduo	18	0	32	54	-	-	-	43	-
Enrocamento	22	0	35	-	-	0	32	-	-
Areia Superficial	17	0	29	0	0,25	0	26	0	0,1
Areia	18	0	31	0	0,23	0	28	0	0,1
Silte Arenoso Superficial	17	0	30	0	0,23	0	27	-	0,1
Silte arenoso	18	0	31	0	0,23	0	28	-	0,1
Silte Argiloso	18	11	34	50	0,21	-	-	40	0,17
Argila	19	26	29	70	0,18	-	-	56	0,14

Fonte: Relatório SLU-F-153906-001.

### 4.3 ANÁLISES DETERMINÍSTICAS E DE SENSIBILIDADE

As análises de estabilidade foram executadas no *Software SLIDE 7.0* da empresa *Rocscience*, utilizando os parâmetros de resistências definidos no relatório de consolidações de estudos geotécnicos da “Empresa A” (SLU-F-153906-001), conforme apresentado na Tabela 16.

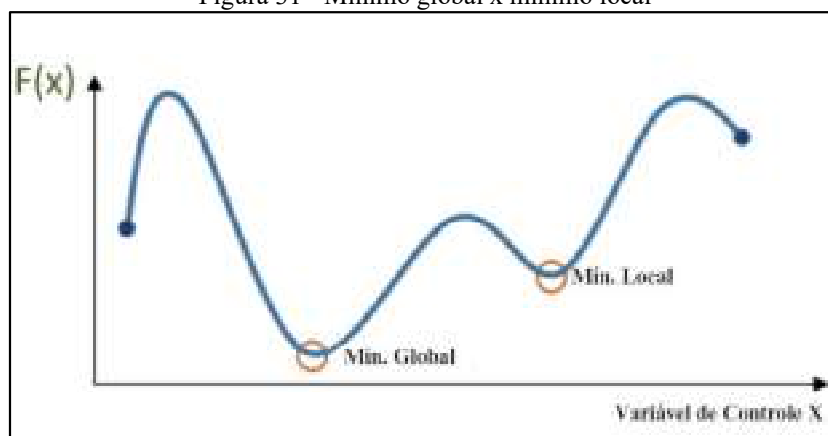
Para realização das análises no *software* de estabilidade, algumas configurações foram definidas: o método de busca adotado foi *Non-Circular* devido a presença de materiais variados na geometria da seção crítica, os quais possuíam propriedades de resistências diferentes, configurando assim, uma geometria heterogênea e com maior complexidade (Gerscovich, 2016; Schuster; Krizek, 1978; Duncan; Wright; Brandon, 2014).

Quanto ao método de busca foi utilizado o método *Cuckoo Search* associado ao *Optimize Surface*, seguindo a ordem de preferência de precisão, velocidade e facilidade de uso conforme recomendações existentes no documento intitulado *Critical Slip Surface Search Methods in Slide 7.0 – A Guide to Search Methods in Slide 7.0*, da *Rocscience* (2016). O método *Cuckoo Search* é um algoritmo de otimização que se baseia no processo parasitário da espécie de pássaros chamados cucos, que buscam os melhores ninhos (soluções) para depositar os seus ovos. De acordo com Joshi *et al.* (2017), a metodologia desse algoritmo consegue assegurar a qualidade dos resultados, ao descartar as soluções mais desfavoráveis.

Outro aspecto importante a respeito do método de busca *Cuckoo Search* é que este junto com o método *Simulated Annealing*, trabalham com a técnica de otimização global. Essa abordagem realiza a busca do FS testando todos os valores mínimos existentes no conjunto de dados de uma pesquisa, ao invés de ficar limitado a um valor mínimo de FS local. A Figura 31,

ilustra o que seria o valor mínimo local e o mínimo global para um conjunto de dados. Nota-se na Figura 31 que o valor encontrado pela análise de mínimo local não representa de fato o menor FS do conjunto de dados (representado pelo mínimo global), gerando muitas vezes um resultado não assertivo.

Figura 31 - Mínimo global x mínimo local



Fonte: Rocscience (2016).

Quanto as condições avaliadas, foram trabalhadas 10 situações diferentes, conforme é apresentada na Tabela 17, compreendendo três condições de carregamento - final de construção, operação em condição normal e solicitação sísmica – conforme estabelecido pela ABNT (2017). Adicionalmente também foram avaliados os comportamentos dos taludes após uma condição pós-sísmica, assim como é recomendado pela ANCOLD (2019) para barragens de resíduos.

É essencial destacar que nas análises de estabilidade conduzidas, a fase operacional com formação de redes de fluxo não foi contemplada, tendo em vista a existência de um sistema de impermeabilização interna no interior da barragem, implementado com o propósito de prevenir a infiltração de soda cáustica para o solo.

Tabela 17 - Condições analisadas nas análises de estabilidade de talude.

Número	Condição
1	Final de construção para o talude montante desconsiderando Ru na camada de aterro.
2	Final de construção para o talude montante considerando Ru na camada de aterro.
3	Final de construção para o talude jusante desconsiderando Ru na camada de aterro.
4	Final de construção para o talude jusante considerando Ru na camada de aterro.
5	Operação normal em condições drenadas.
6	Operação normal em condição não drenada.
7	Solicitação pseudoestática (cenário 1).
8	Solicitação pseudoestática (cenário 2).
9	Solicitação pseudoestática (cenário 3).
10	Solicitação pós-sísmica.

Fonte: Autora (2023)

A primeira condição que foi trabalhada nas análises de estabilidade foi o cenário de final de construção. Este foi dividido quanto a orientação da análise (jusante ou montante) e

com a presença ou não do parâmetro de poropressão ( $R_u$ ). Para esse parâmetro foi considerado um incremento igual a 0,2 a fim de simular excessos de poropressões a curto prazo no aterro recém-construído.

Para os solos argilosos que se encontravam abaixo do nível do lençol freático foi empregado o parâmetro B-barra igual a 0,3. É importante ressaltar que como não foram executados ensaios para determinar esse parâmetro, os valores de ambos os dados foram estimados. Com relação ao B-barra, este foi estimado seguindo valores de projetos anteriores executados na planta da “Empresa A”. Já no caso do parâmetro  $R_u$  são citados na literatura (Costa, 2009; Nery, 2013; Silva, 2020) valores inferiores a 0,5, sendo 0,2 o valor adotado nas análises de estabilidade da “Empresa A”.

Para as análises pseudoestáticas foi considerada aceleração horizontal igual 0,067 g, levantados por meio de estudo sísmicos realizados na planta da “Empresa A” presentes no relatório SLU-N-142813-001 e citado no relatório SLU-F-155906-001. Para essa condição de carregamento foram trabalhados três cenários distintos: carregamento apenas horizontal e carregamento horizontal combinados com carregamentos verticais em dois sentidos diferentes, sendo essas acelerações verticais igual a  $2/3$  da aceleração horizontal. As direções de aplicação desses carregamentos, seguiram as mesmas trabalhadas no projeto geotécnico desenvolvido pela “Empresa A”.

Quanto ao cenário pós-sísmico, foi adotado as recomendações sugeridas pela ANCOLD (2019). Em sua metodologia ela recomenda que as análises para esta condição deverão ser executadas após o sismo ter cessado. Além disso, não deverá ser considerada a aplicação de forças de aceleração nas análises. Adicionalmente, para os materiais drenados foi adotado coesão nula e redução de até 10% no ângulo de atrito. Enquanto para os materiais não drenados esta redução foi de 20% conforme recomenda Day (2012). Os valores adotados para este cenário encontram-se expostos na Tabela 16.

Os métodos empregados para a análise determinística foram os métodos de Spencer e Morgenstern-Price, por serem métodos considerados rigorosos e trabalharem com superfícies de ruptura qualquer. Quanto aos critérios de ruptura usados no *software* de estabilidade, foram usados o *Strength Type*, adotado nos relatórios da “Empresa A”. Dessa forma, foi aplicado o modelo *Vertical Stress Ratio* para solo em seu estado último de resistência, Mohr-Coulomb para condições normais e *Shansep* para os solos argilosos. O modelo *Shansep* desenvolvido por Ladd e Foot (1974), é amplamente empregado para caracterização da resistência ao cisalhamento não drenada das argilas (Gutierrez *et al.*, 2008). Conforme cita Santos Junior, Rigatto e Pinto (2020), este modelo além de contemplar o ganho da resistência não drenada



com o aumento da tensão confinante, também considera o histórico de tensões do solo por meio da razão de pré-adensamento.

Quanto às análises de sensibilidade são necessárias que se estime um intervalo de valores máximos e mínimos ao qual se quer verificar o comportamento do FS. A fim de estimar esses valores foram adotados os coeficientes médios de variação com base nos valores de coesão, ângulo de atrito, peso específico e resistência não-drenada apresentados em Assis *et. al* (2018) conforme a Tabela 18.

Tabela 18 - Valores de Coeficiente de Variação usados.

<b>Parâmetro</b>	<b>Coeficiente de Variação (%)</b>
Peso específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo efetivo de resistência	10 (04 a 20)
Coesão não-drenada	30 (20 a 50)

Fonte: Adaptado de Assis *et. al* (2018)

O procedimento adotado neste estudo foi realizado no *software SLIDE2* e consistiu em variar o peso específico, a coesão, o ângulo de atrito e a resistência não drenada. Estas propriedades foram variadas considerando duas vezes o valor do desvio padrão obtido por meio do COV, tanto para mais quanto para menos, a fim de avaliar quais dessas propriedades causavam maiores alterações na magnitude do FS.

#### 4.4 ANÁLISES PROBABILÍSTICAS

Assim como para as análises determinísticas e de sensibilidade, as análises probabilísticas também foram executadas no *software SLIDE2* utilizando o Método de Monte Carlo. Com base nas análises de sensibilidade, foram observadas que os parâmetros que causavam maiores variações no FS, era o ângulo de atrito, a coesão, a resistência não drenada e em menor grau o peso específico das camadas de materiais a qual a SPR interceptava. Buscando tornar a análise probabilística mais assertiva, optou-se por variar esses parâmetros de resistência de cada material pertencente à seção típica, com exceção do resíduo de bauxita e do enrocamento.

Para todos os parâmetros foi adotado como distribuição probabilística a distribuição log-normal, visto que estes parâmetros não podem apresentar valores negativos. Além disso, estes parâmetros têm a propensão de apresentar uma distribuição normal ou log-normal na natureza (Silva, 2015). Os dados de entrada estatísticos fundamentais para a realização da análise probabilística são a média, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos relativos, associado a quantos desvio padrão são considerados em relação à média. Nos Quadros A.2.1 a

A.2.9, estão organizados os dados estatísticos empregados nas análises considerando o valor de COV de 40% para a coesão, 10% para o ângulo de atrito, 3% para o peso específico e 30% para a resistência não-drenada, com base nos valores da Tabela 18, apresentados em Assis *et al.* (2018).

Em relação ao cálculo do número de iterações, assim como foi visto no item 3.8.3, ele pode ser estimado empregando a Equação 51. Se fosse considerado para este estudo um nível de confiança de 90% e adotando quatro variáveis aleatórias (ângulo de atrito, coesão, peso específico e resistência não-drenada), o número de simulações necessárias seria na ordem de:

$$N = \left( \frac{Z_{\alpha/2}^2}{4\alpha^2} \right)^n = \left( \frac{1,64^2}{4 \cdot 0,1^2} \right)^4 \cong 20.441.408,6 \text{ iterações} \quad (\text{Eq. 51})$$

A realização desse número de iterações exige um tempo e um esforço computacional extraordinário, tornando esse número de simulações impraticável. Em virtude disso, analisando os valores comuns de iterações citados no item 3.8.3, iniciou-se as análises probabilísticas com 1000 iterações e foi aumentando esse valor gradativamente com base no comportamento de convergência da Pr e do FS.

Posteriormente foram executadas análises com 3000 e 5000 iterações. Contudo a seção G continuou a não apresentar convergência. Sendo necessário reavaliá-la com um número de iterações maior. Em virtude do tempo requerido pelas análises probabilísticas, o incremento de 5000 para 10000 iterações, foi realizado apenas nas condições da seção G em que foi identificado Pr e resultados instáveis.

Após realizar 10000 iterações, verificou-se que os resultados da seção G continuava a apresentar instabilidade em suas curvas de convergência para os cenários pseudoestáticos. Além disso, como a Pr para o cenário pós-sísmico se mantinha elevado, optou-se por elevar o número de iterações para 32000 simulações, o mesmo número utilizado por El-Ramly (2001) e Silva (2019). Contudo em detrimento do tempo disponível para conclusão do trabalho, só foi possível realizar análises com esse número apenas para o cenário pós-sísmico, uma vez que para este número foi demandado um período de aproximadamente 5 dias de processamento. O número de iterações realizadas para cada seção é apresentado na Tabela 19:

Tabela 19 - Número de iterações realizadas para cada seção crítica.

<b>Número de Iterações</b>	<b>SA</b>	<b>SB</b>	<b>SC</b>	<b>SD</b>	<b>SE</b>	<b>SF</b>	<b>SG</b>	<b>SH</b>	<b>SI</b>
1000	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3000	x	x	-	x	x	x	-	x	x
5000	-	-	x	-	-	-	x	-	-
10000	-	-	-	-	-	-	x	-	-
15000	-	-	-	-	-	-	x	-	-
32000	-	-	-	-	-	-	x	-	-

Fonte: Autora (2023)

## 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, são abordados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, envolvendo tanto a análise determinística e de sensibilidade, quanto as análises probabilísticas. As seções de A até I foram avaliadas em relação às condições apresentadas na Tabela 17. Os resultados para cada seção, considerando as dez condições, são apresentadas de forma detalhada ao longo deste capítulo. As análises aqui apresentadas serão consistentes, apresentando variações apenas nos valores de FS, Pr,  $\beta$  de uma seção para outra.

### 5.1 SEÇÃO A

A seguir são expostos os resultados das análises determinísticas, de sensibilidade e probabilísticas realizados na geometria da seção A com 1000 e 3000 iterações.

#### 5.1.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

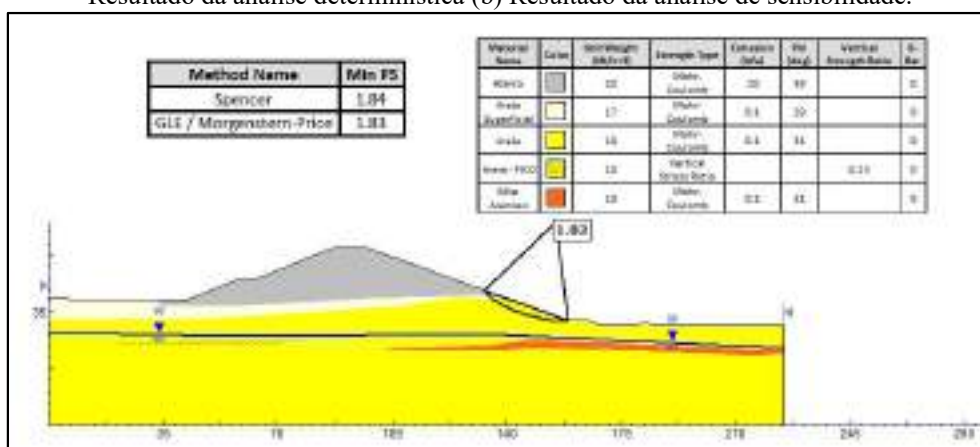
Os primeiros resultados encontrados referem-se à condição de final de construção para o talude montante, sem considerar o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro. Os resultados deste cenário encontram-se apresentados nas Figuras 32 e 33.

Como ilustrado na Figura 32-(a), a fundação da seção A é constituída por quatro estratos de materiais distintos denominadas de: areia superficial, areia, areia-pico e silte arenoso. As sondagens SPT realizadas nas proximidades dessa seção revelaram  $N_{SPT}$  crescente a partir de 12 m de profundidades, com as camadas superficiais exibindo resistência  $N_{SPT}$  variando entre 2 a 19, sendo classificadas como camadas pouco a medianamente compactas.

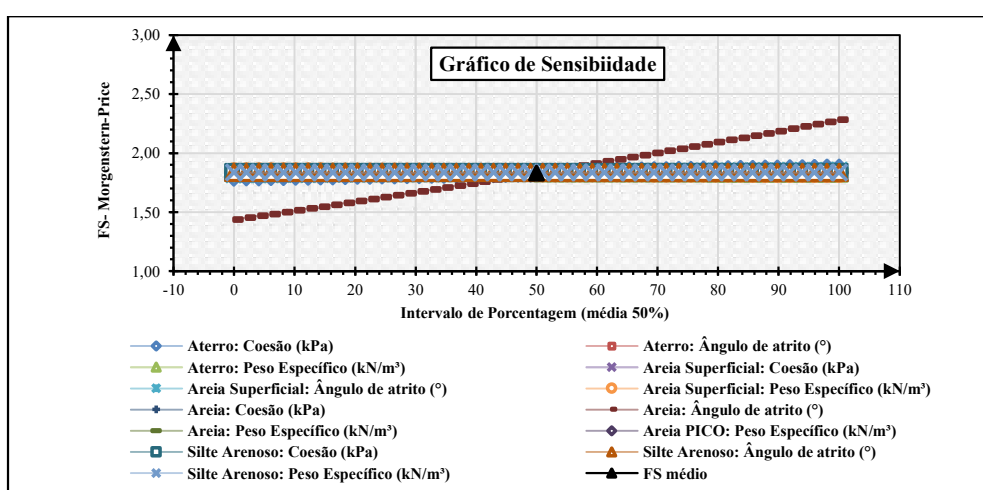
Ao examinar os resultados da Figura 32-(a), percebe-se inicialmente que o FS de 1,83 é superior ao mínimo exigido para este cenário de 1,3, configurando-se como um talude estável de acordo com a NBR 13028/17. A segunda observação é quanto a localização da SPR, a qual encontra-se inserida em camadas de materiais arenosos superficiais. A localização dessa superfície pode estar associada a baixa compactidade desses materiais tendo em vista os valores de  $N_{SPT}$  observado para elas.

Analisando os métodos determinísticos empregados, nota-se que os valores dos FS obtidos por ambos os métodos foram bem próximos. Já para os resultados das análises de sensibilidade, observa-se na Figura 32-(b) que o parâmetro de resistência que causa maior variação no FS é o ângulo de atrito da camada de areia. No que se refere às análises probabilísticas, os resultados para 1000 e 3000 iterações são apresentados na Figura 33.

Figura 32 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

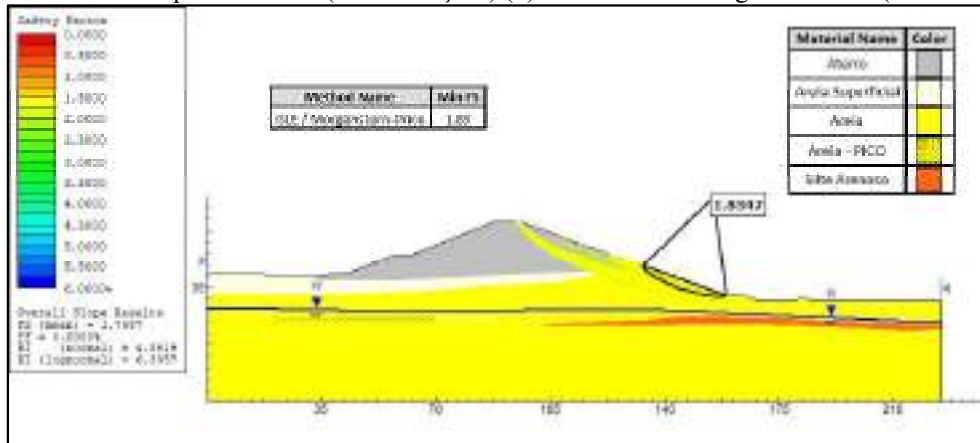


(b)

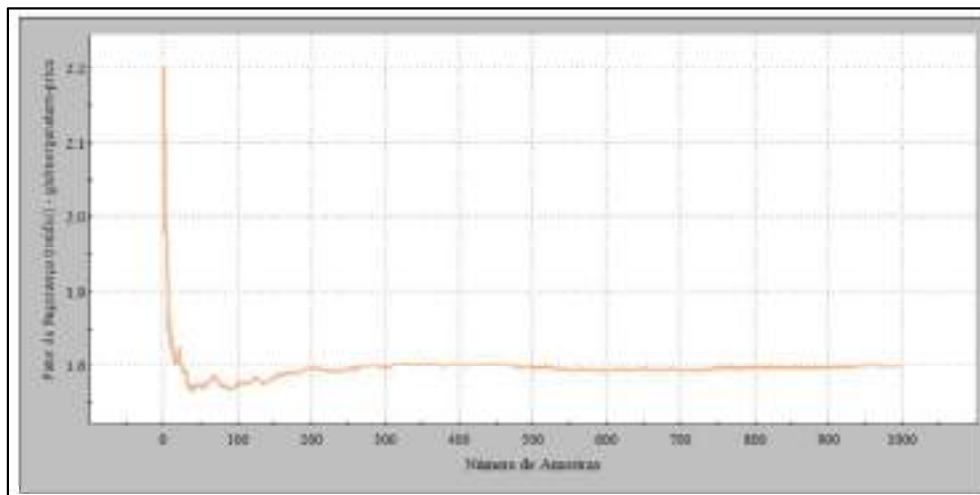
Fonte: Autora (2023)

Ao analisar as Figura 33-(a) e 33-(c), verifica-se que o FS médio probabilístico foi igual a 1,79 para ambos os números de iterações, revelando pouca variação em comparação com o resultado encontrado pela abordagem determinística. A Pr para ambas as iterações permaneceu em 0%, indicando que, das 3000 iterações realizadas pelo método de Monte Carlo, nenhuma resultou em um FS inferior a 1. Quanto ao índice de confiabilidade os menores valores encontrados variaram entre 4,86 (valor normal) a 6,45 (valor log-normal), ambos dentro dos níveis de desempenho considerado adequado pela USACE (1997). Quanto às curvas de convergências, apresentadas Figuras 33-(b) e 33-(d), é possível observar que para uma análise considerando 3000 iterações a convergência acontece após 1000 iterações.

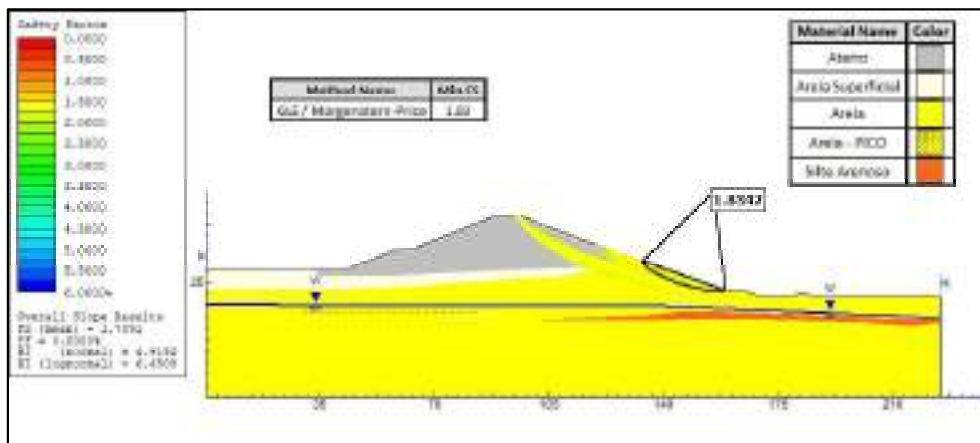
Figura 33 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)



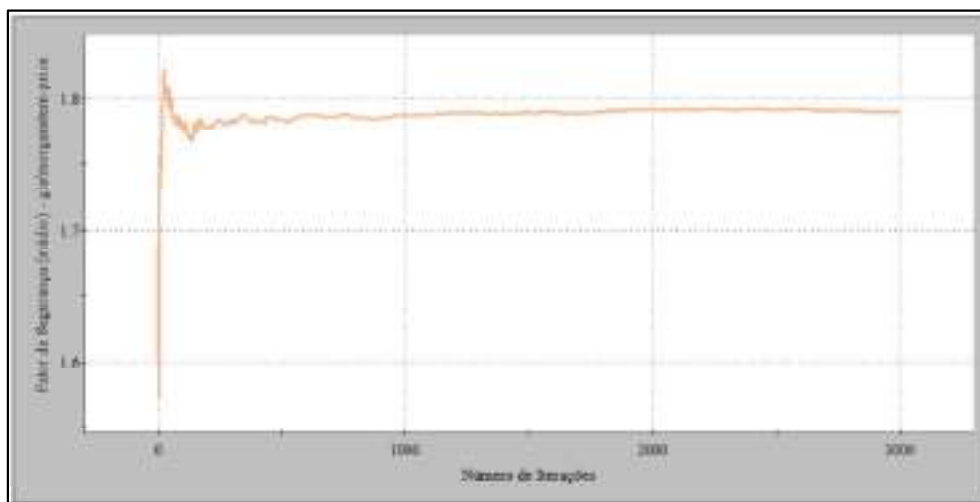
(a)



(b)



(c)



(d)

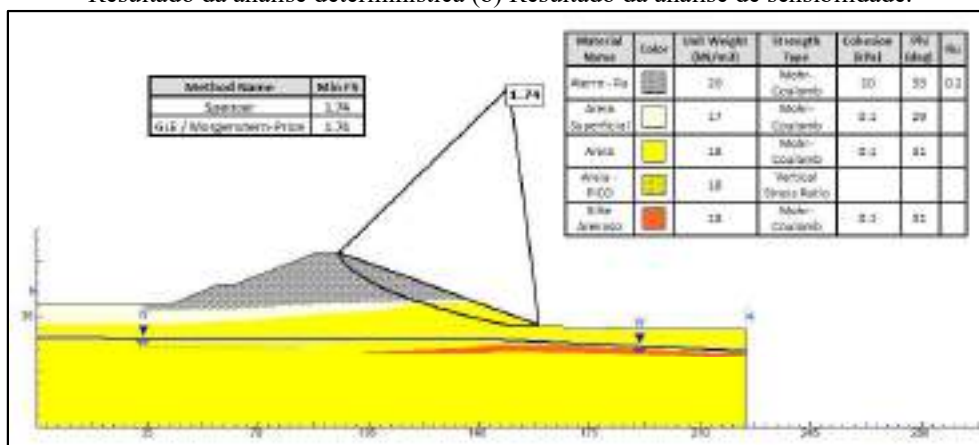
Fonte: Autora (2023)

### 5.1.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

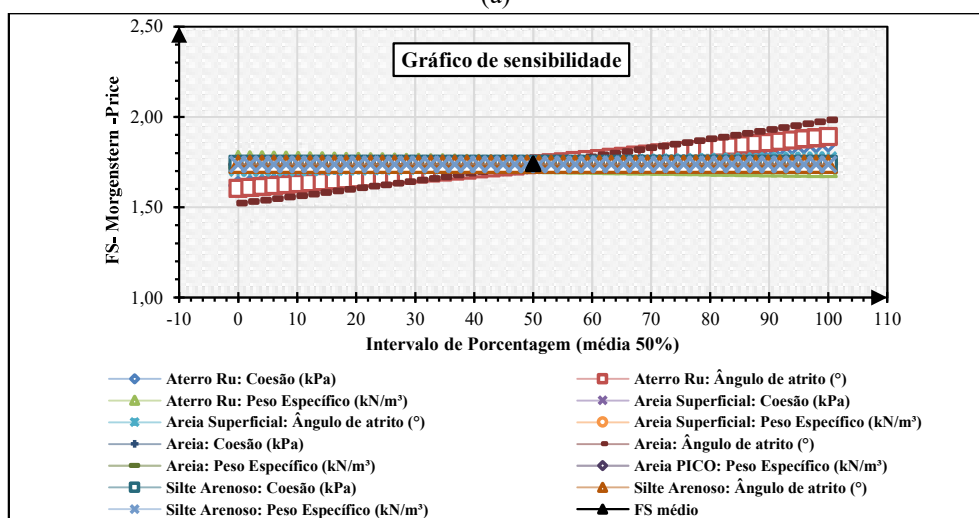
As Figuras 34 e Figuras 35 apresentam os resultados das análises da condição final de construção para o talude montante, considerando o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ) na camada de aterro compactado.

Ao analisar os resultados da Figura 34-(a), observa-se uma alteração na SPR, agora envolvendo também a camada de aterro compactado. Essa alteração é resultado dos efeitos que a presença da poropressão tem sobre a resistência ao cisalhamento dos solos, geralmente impactando negativamente na estabilidade. Contudo, apesar da presença desse parâmetro, o FS consegue atender aos requisitos mínimos de estabilidade exigidos pela NBR 13028/17. Isso mostra, que apesar da consideração de tal parâmetro, as características geométricas e as propriedades dos materiais são suficientes para assegurar a estabilidade do talude. Quanto aos métodos de cálculos determinístico, os FS resultaram em valores semelhantes. Além disso, ao examinar a Figura 34-(b), percebe-se que o FS não apenas reage à variação do ângulo de atrito da camada de areia, como também é influenciado pelos parâmetros da camada de aterro, como a coesão e o ângulo de atrito.

Figura 34 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante considerando Ru (a)  
Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



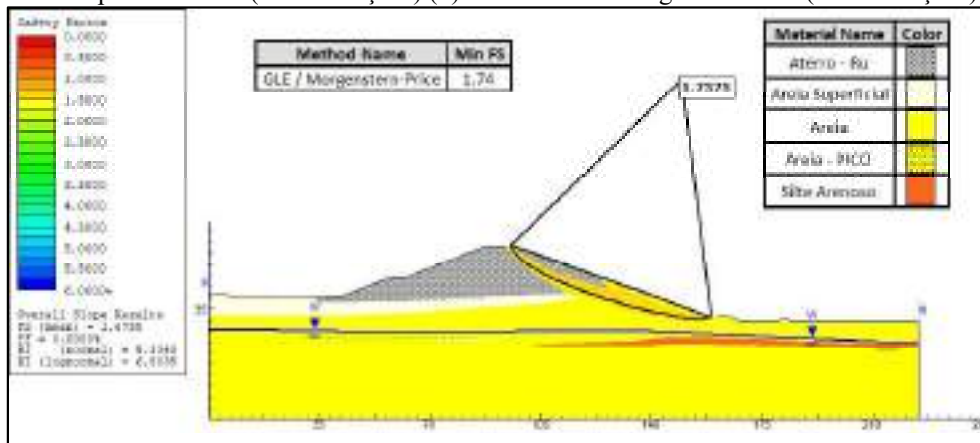
(b)

Fonte: Autora (2023)

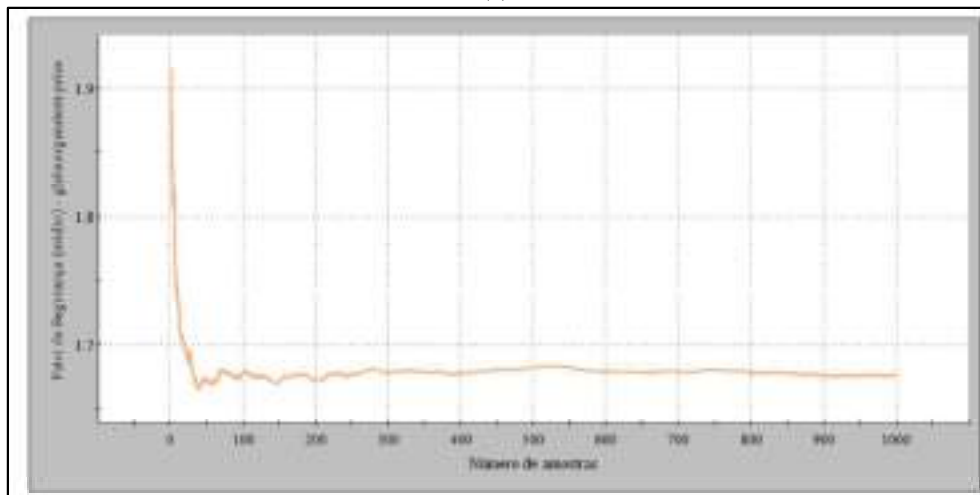
Em relação aos resultados da análise probabilística, apresentados nas Figura 35-(a) e 35-(c), verifica-se que o FS médio encontrado para ambas as iterações se aproximam do valor de 1,67. No que diz respeito aos demais dados probabilísticos, os resultados apontaram para uma Pr igual a 0% e um índice de confiabilidade variando entre 5,34 (valor normal) e 6,85 (valor log-normal), evidenciando que, para as ambas iterações, o talude apresenta nível de desempenho considerado adequado, conforme estabelece a USACE (1997). Quanto às curvas de convergência, observa-se nas Figura 35-(b) e 35-(d), que os resultados encontrados tendem a estabilizar a partir de 1000 iterações.



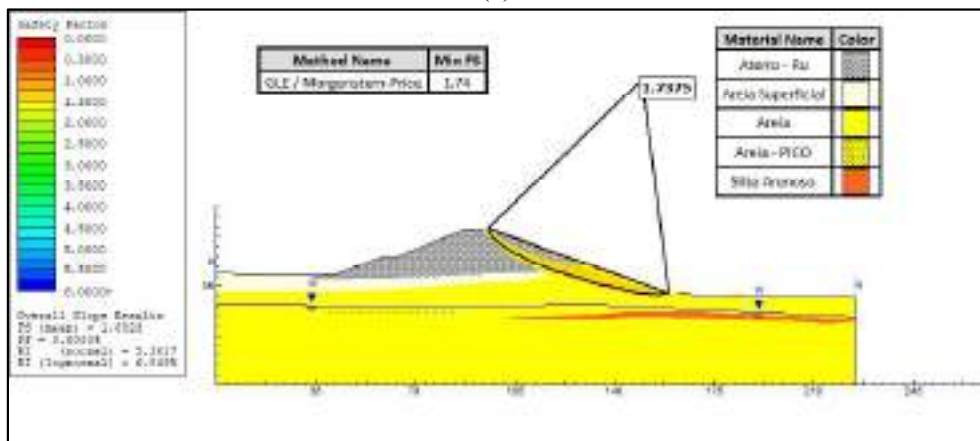
Figura 35 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



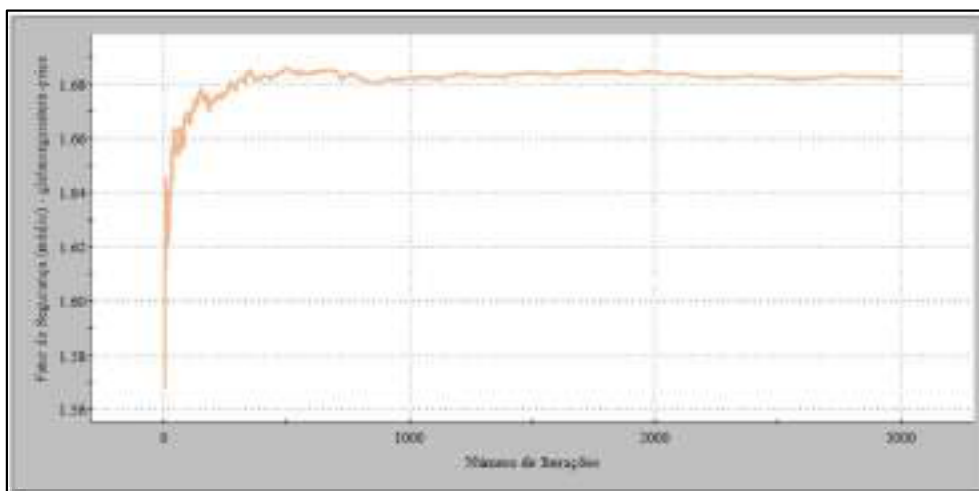
(a)



(b)



(c)



(d)

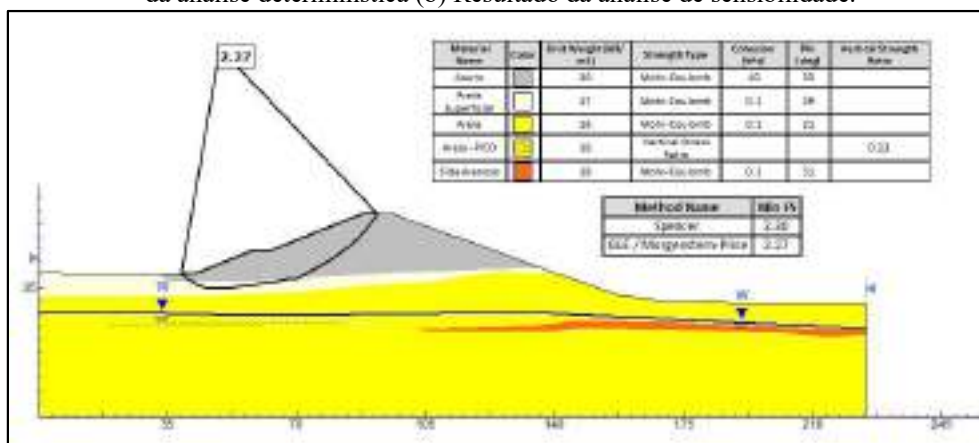
Fonte: Autora (2023)

### 5.1.3 Final de Construção – Talude jusante desconsiderando Ru

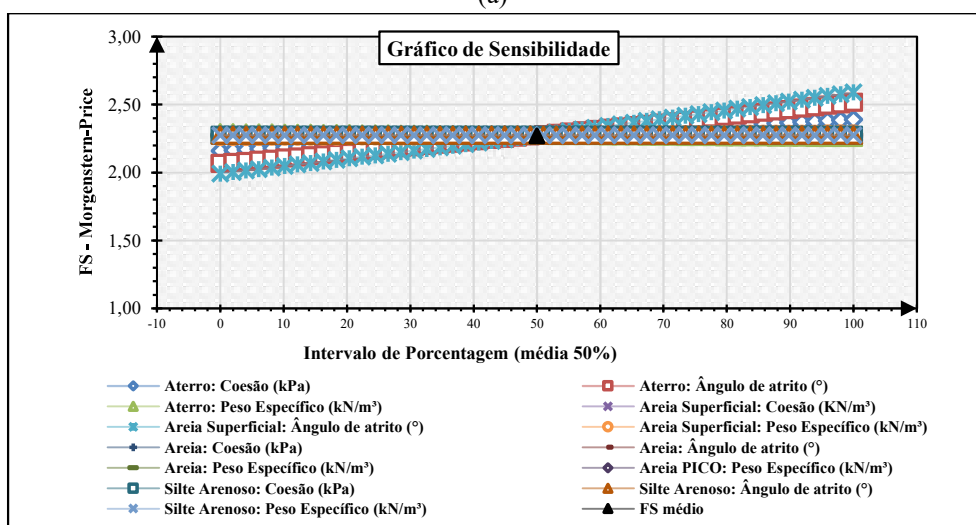
As análises referentes ao cenário de final de construção para o talude Jusante, sem considerar o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ) na camada de aterro, estão ilustradas nas Figuras 36 e Figura 37.

Observa-se pela Figura 36-(a) que a SPR se encontra inserida quase por completo na camada de aterro, configurando um cenário de ruptura global. Nota-se que o FS gerado além de atender aos valores mínimos da NBR 13028/17 de 1,3 para este cenário, ainda se apresenta superior aos valores encontrados para o talude de montante. No que concerne aos resultados apresentados na Figura 36-(b), observa-se que, embora a parcela de areia superficial seja reduzida na SPR, seu ângulo de atrito exerce uma variação considerável no comportamento do FS. Nessa situação, essa influência é superior à dos parâmetros da camada de aterro, como o ângulo de atrito e a coesão.

Figura 36 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



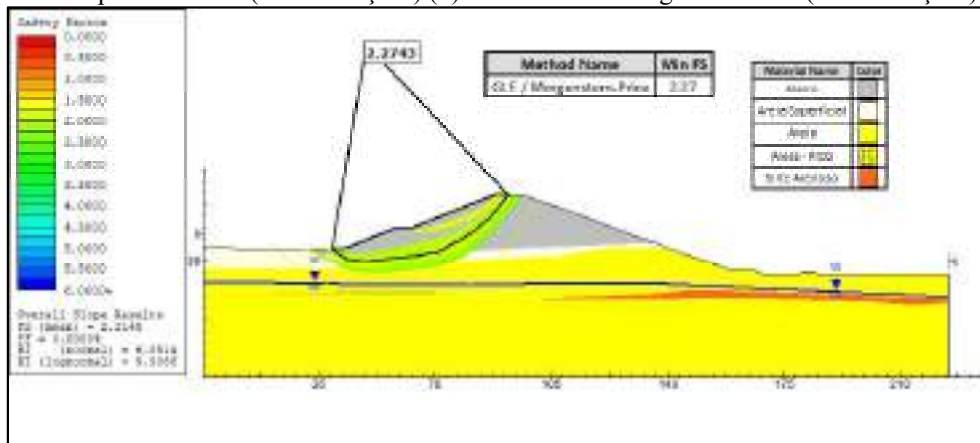
(b)

Fonte: Autora (2023)

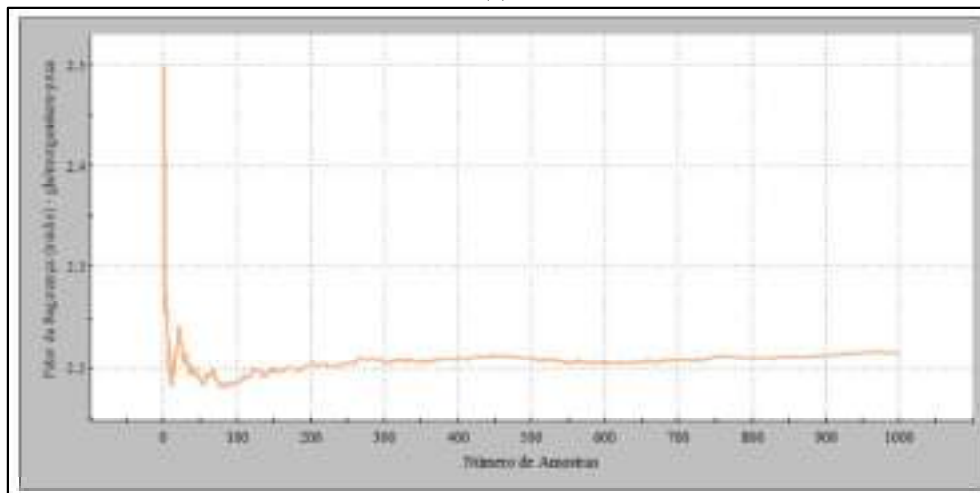
No contexto das análises probabilísticas apresentadas nas Figuras 37-(a) e 37-(c), o FS probabilístico médio encontrado para ambas as iterações foi aproximadamente igual 2,20. No que diz respeito aos demais dados probabilísticos, constatou-se uma Pr igual a 0% e índice de confiabilidade variando entre 6,65 (valor normal) a 9,91 (valor log-normal), ambos indicativos de uma condição estável do talude, conforme define a USACE (1997). Nas Figuras 37-(b) e 37-(d), são exibidas às curvas de convergência do FS, evidenciando que os resultados tendem a se estabilizar a partir de 1500 iterações.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que não há indícios de instabilidade para este talude, considerando a condição de carregamento analisado, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística.

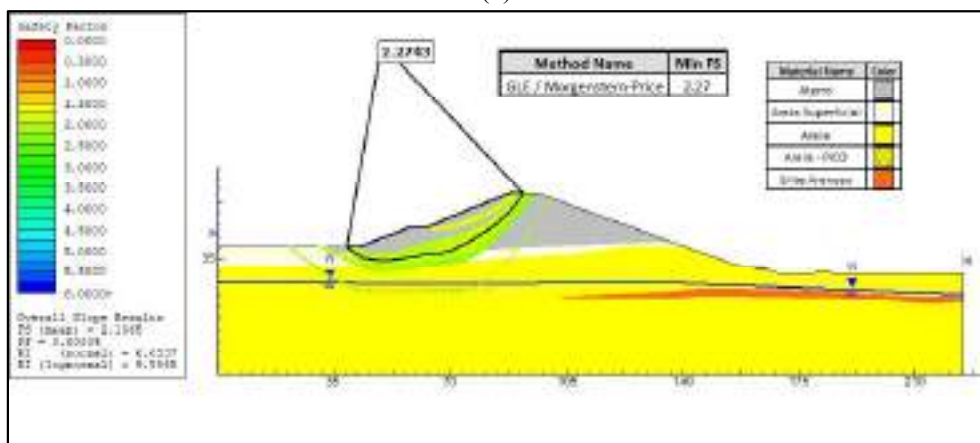
Figura 37 - Resultado da Seção A-A Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



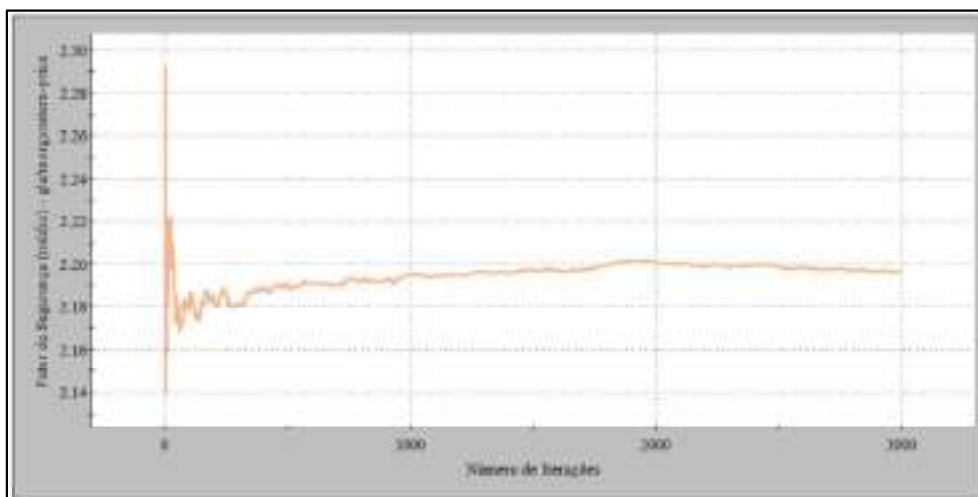
(a)



(b)



(c)



(d)

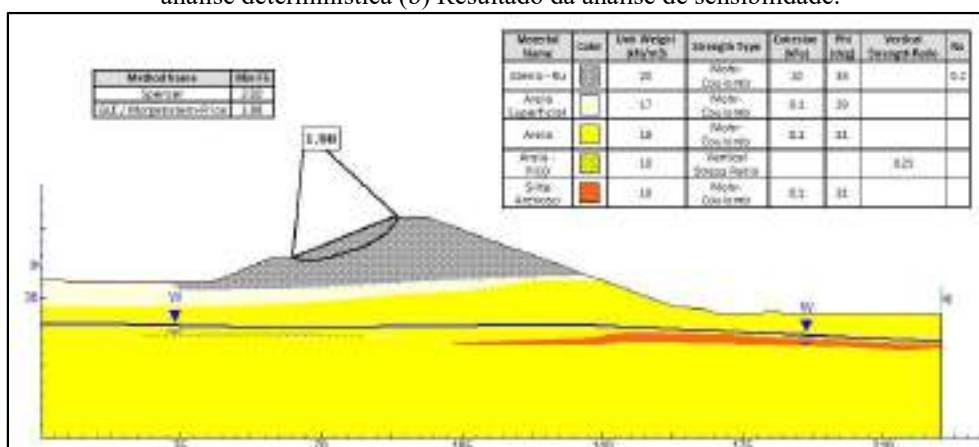
Fonte: Autora (2023)

#### 5.1.4 Final de Construção – Talude jusante considerando Ru

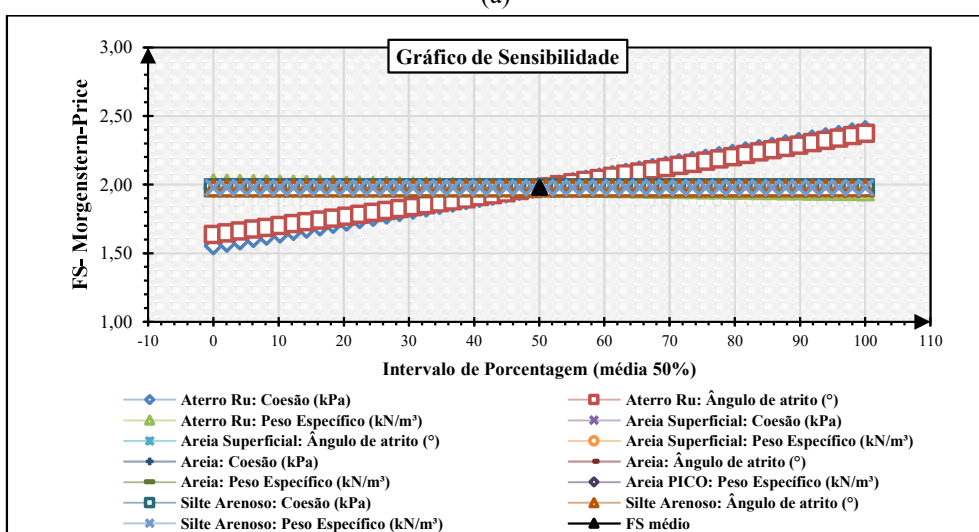
Os resultados das análises referentes ao cenário de final de construção para o talude jusante, levando em consideração o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ) na camada de aterro, são apresentados nas Figuras 38 e Figuras 39.

Analisando a Figura 38-(a), observa-se que a SPR se encontra localizada próxima aquela identificada no cenário anterior, porém, com um FS menor. Novamente, a redução desse valor pode ser atribuída à influência negativa que a presença de poropressão pode exercer no comportamento de resistência ao cisalhamento dos solos. Quanto aos resultados da análise de sensibilidade apresentados na Figura 38-(b), é observado que os parâmetros que mais impactam o comportamento do FS são o ângulo de atrito e a coesão da camada de aterro.

Figura 38 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

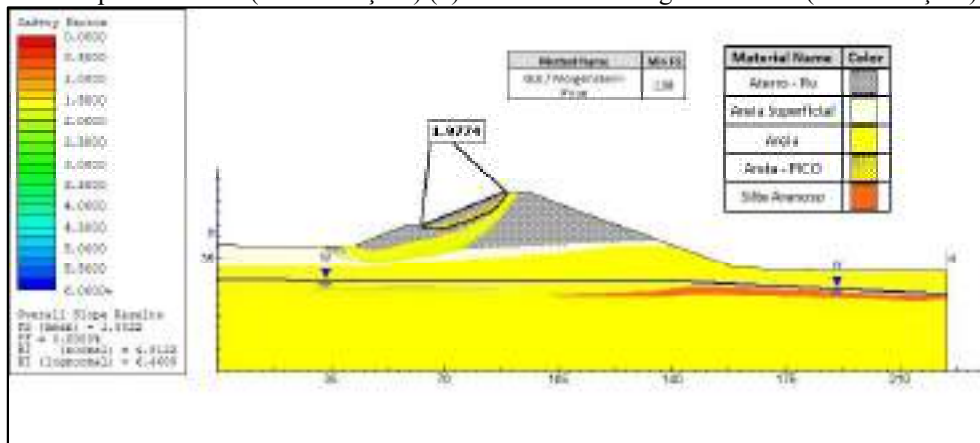


(b)

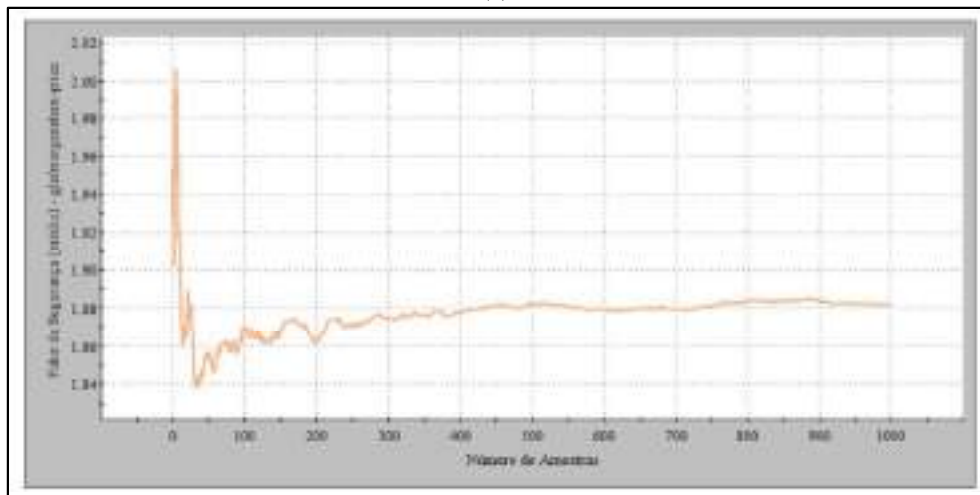
Fonte: Autora (2023)

No âmbito das análises probabilística apresentadas na Figura 39-(a) e 39-(c), é observado que o FS médio probabilístico encontrado foi aproximadamente 1,88. Quanto aos dados probabilísticos, a Pr encontrada foi igual a 0%, com índice de confiabilidade variando entre 4,71 (valor normal) e 6,47 (valor log-normal), ambos indicativos de um nível de desempenho considerado satisfatório para talude, conforme a USACE (1997). Nas Figuras 39-(b) e 39-(d), são exibidas as curvas de convergência do FS, evidenciando uma instabilidade ao longo das primeiras 1000 iterações, e comportamento convergente a partir deste valor.

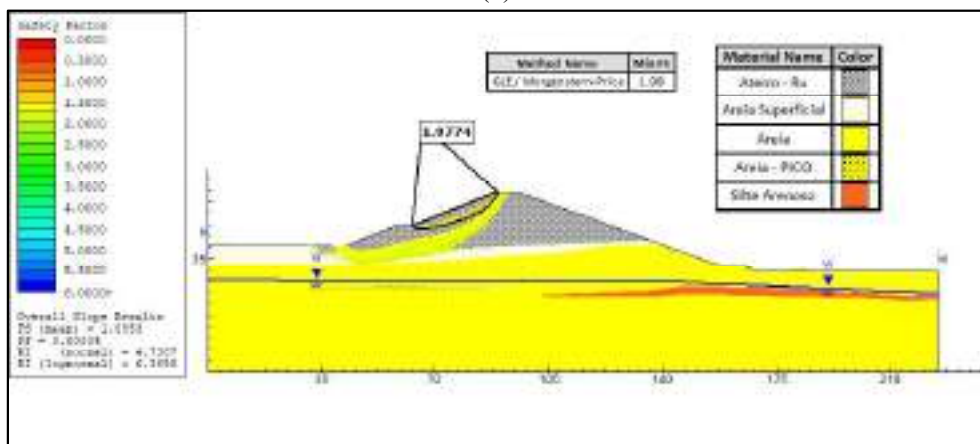
Figura 39 - Resultado da Seção A-A – Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



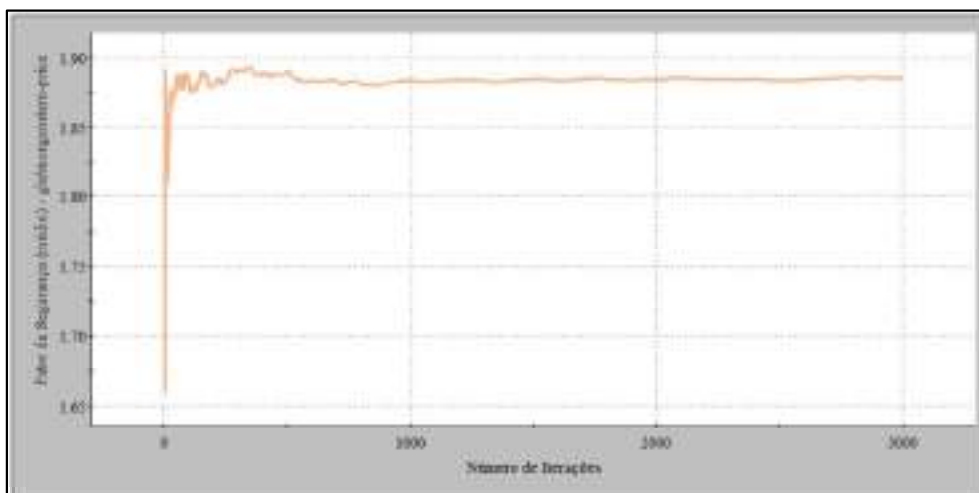
(a)



(b)



(c)



(d)

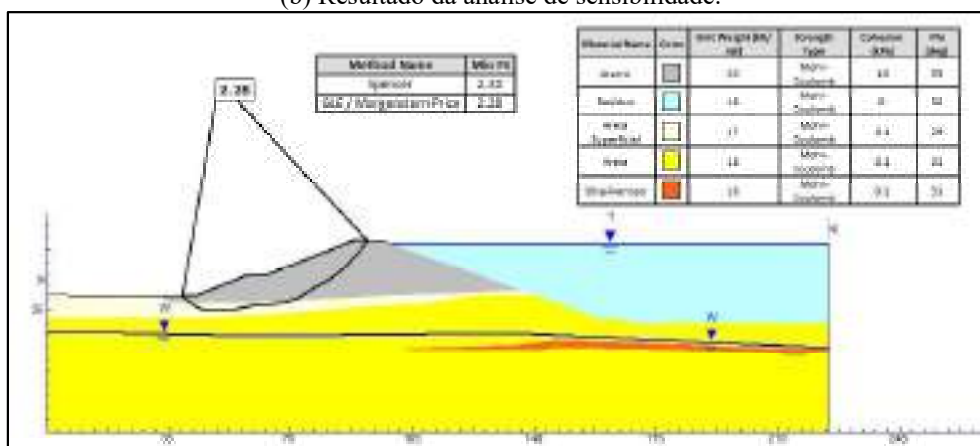
Fonte: Autora (2023)

### 5.1.5 Operação Normal – Drenado

Os resultados obtidos para o cenário de operação em condição normal drenada são destacados nas Figuras 40 e 41.

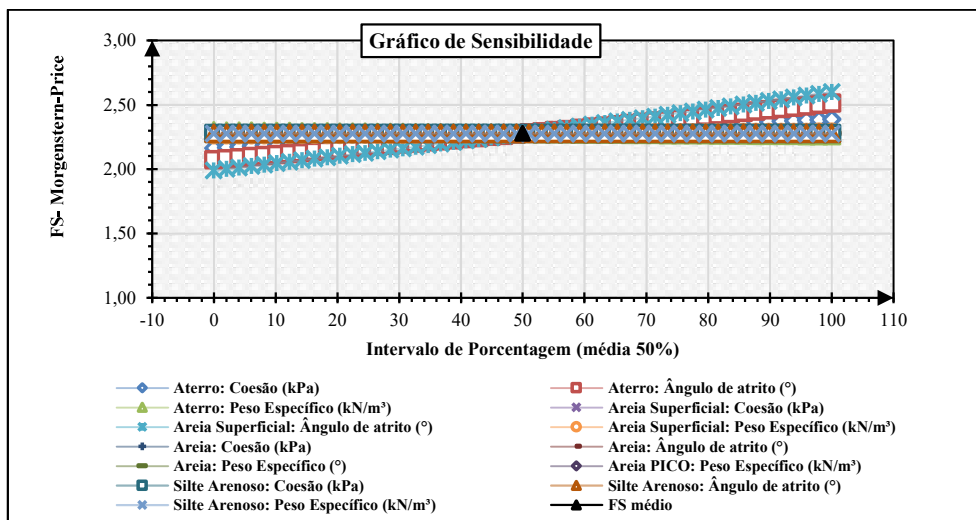
Para este cenário é possível constatar pela Figura 40-(a) que o FS foi superior ao valor de 1,5 mínimo exigido pela NBR 13028/17. Além disso, observa-se uma semelhança no comportamento da SPR em relação ao cenário final de construção sem Ru, apresentando valores de FS bastante próximos. Essa correspondência de comportamento entre os cenários também foi observada nos resultados da análise de sensibilidade, exibida na Figura 40-(b).

Figura 40 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



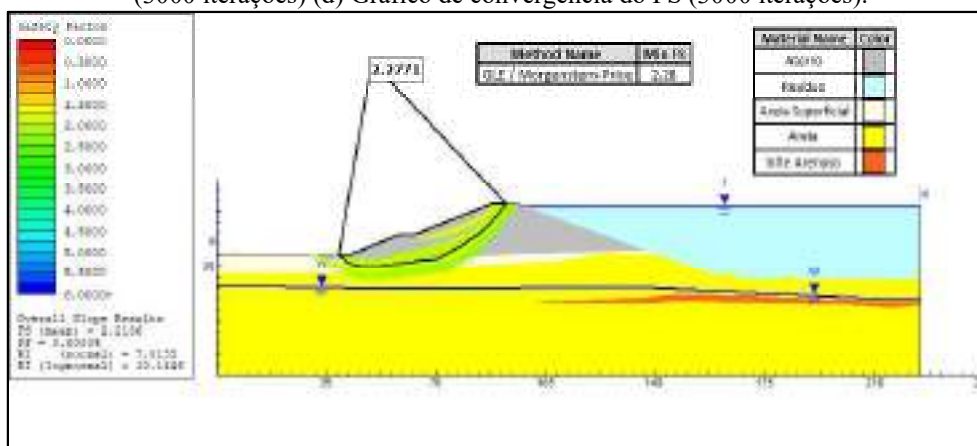


(b)

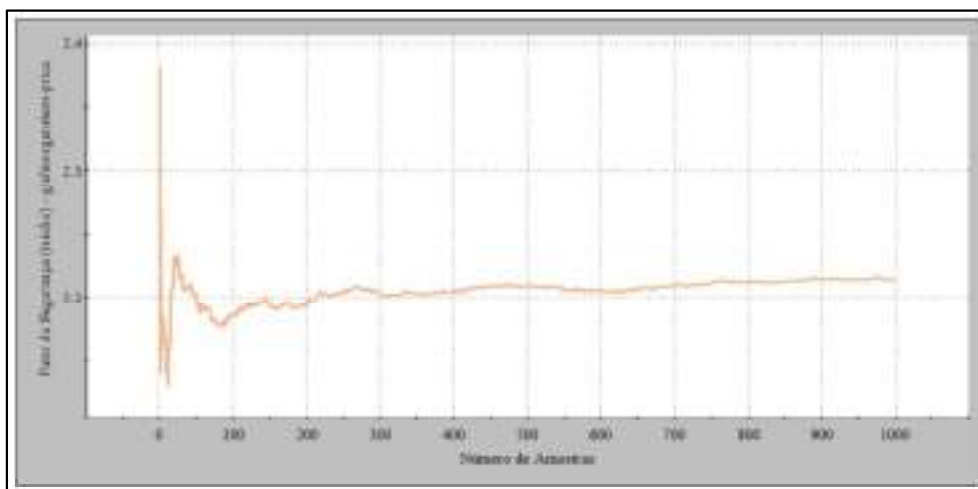
Fonte: Autora (2023)

No que se refere aos resultados das análises probabilísticas, os FS médio probabilístico encontrado foi aproximadamente 2,20 para ambos as iterações, conforme mostra as Figuras 41-(a) e 41-(c). Adicionalmente, a Pr encontrada foi nula com índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,62 (valor normal) a 10,14 (valor log-normal). Com base na faixa de valores estabelecidas pela USACE (1997), o talude em questão encontra-se com nível de desempenho alto e sem indícios de instabilidade tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística. Quanto às curvas de convergência do FS, ilustradas nas Figuras 41-(b) e 41-(d), nota-se que ao realizar um número de 3000 iterações às curvas tendem a apresentar variações menores a partir de 1500 iterações.

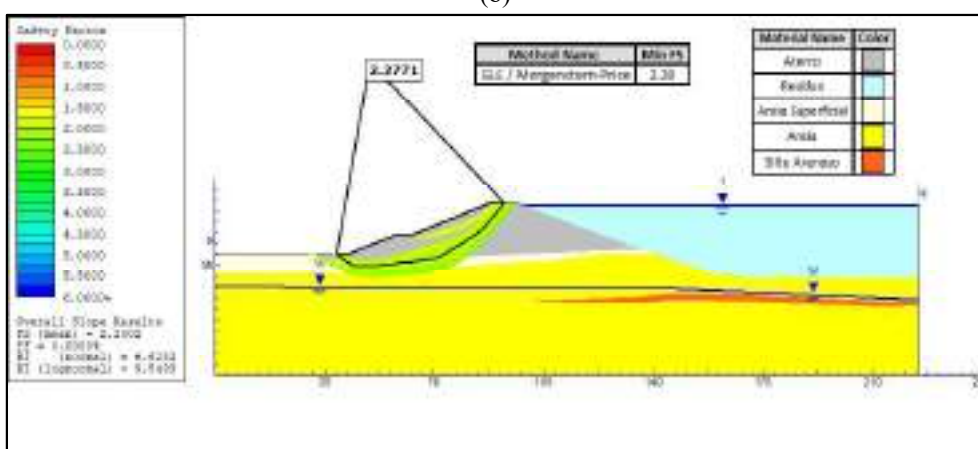
Figura 41 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



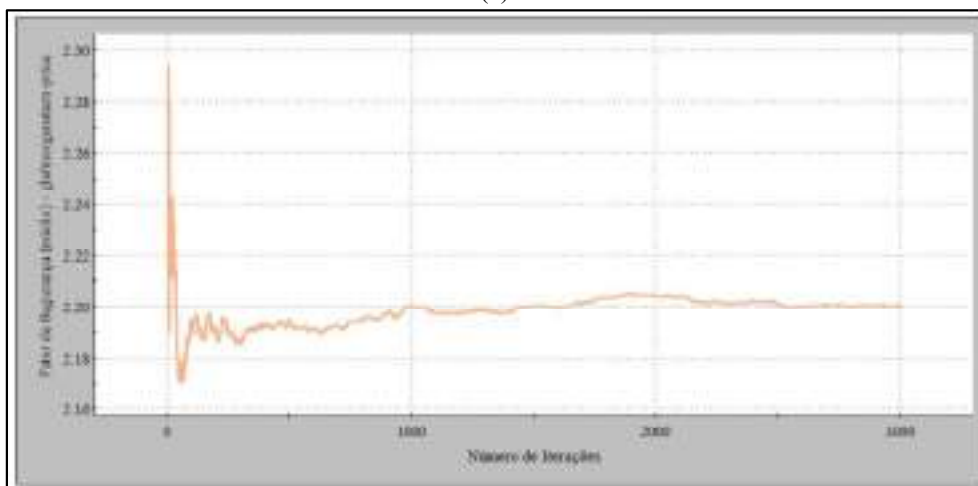
(a)



(b)



(c)



(d)

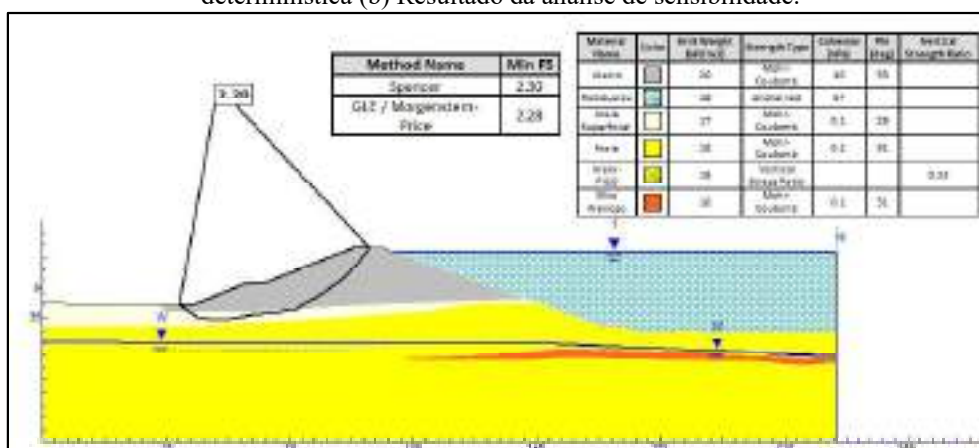
Fonte: Autora (2023)

### 5.1.6 Operação Normal – Não Drenado

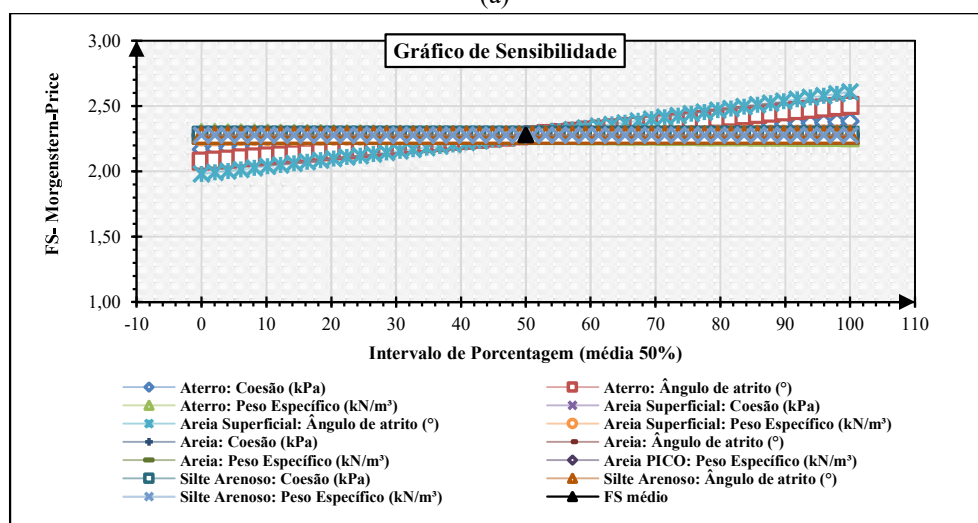
Os resultados das análises referentes ao cenário de operação em condição normal não drenada, estão expostos na Figura 42 e Figura 43.

Observa-se a partir do resultado exibido na Figura 42-(a) que o talude analisado apresentou um FS alto, superando o limite mínimo de 1,5 estabelecido pela NBR 13028/17. Quanto aos resultados referentes a análise de sensibilidade, exibidos na Figura 42-(b), é observado uma variação do FS quanto a alterações nos parâmetros de resistência da camada de aterro e areia superficial.

Figura 42 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



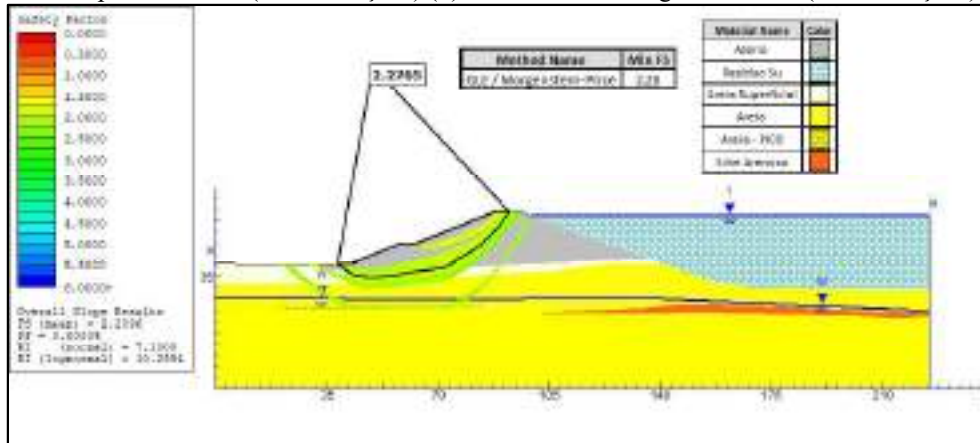
(b)

Fonte: Autora (2023)

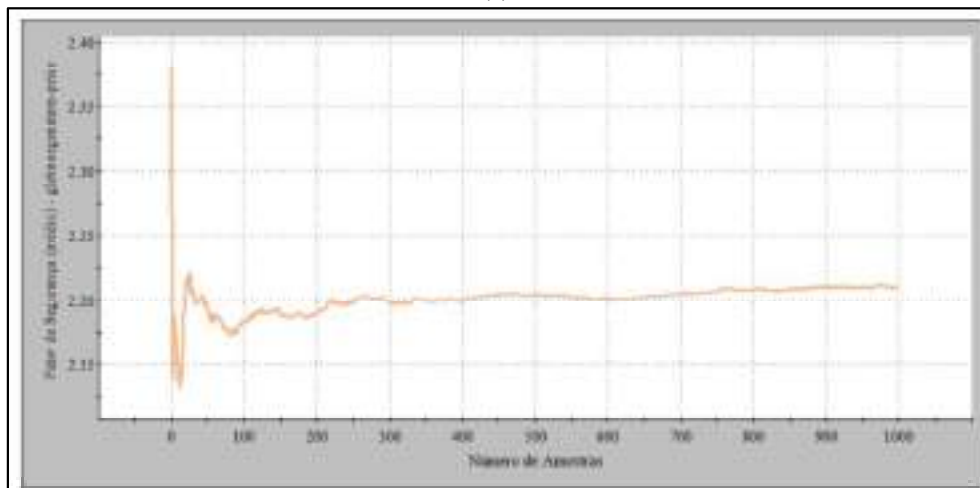
Ao examinar os resultados da Figura 43-(a) e 43-(c), nota-se que o FS médio probabilístico obtido para ambas as iterações foi aproximadamente 2,20. Além disso, os resultados probabilísticos revelaram uma Pr igual a 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,65 (valor normal) a 10,26 (valor log-normal). Esses valores, de acordo com a USACE (1997), indicam uma alta confiabilidade do FS e um bom nível de desempenho. Com relação às curvas de convergência, ilustradas nas Figuras 43-(b) e 43-(d), observa-se que, para

uma análise com 3000 iterações, os resultados tendem a apresentar um comportamento estável só a partir das primeiras 1500 simulações.

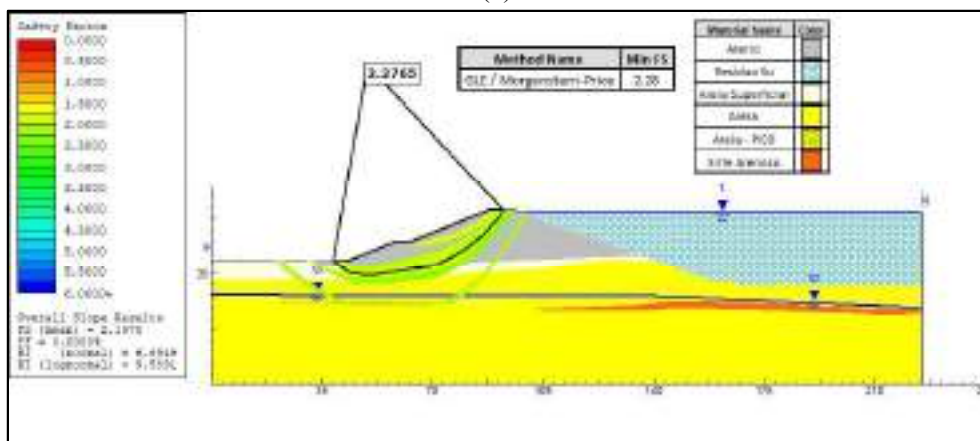
Figura 43 - Resultado da Seção A-A - Operação Normal – Não drenado– (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



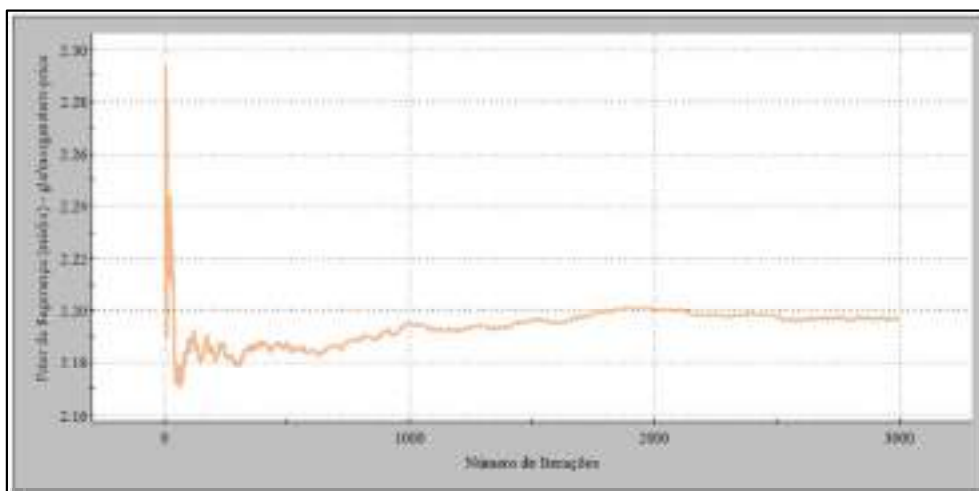
(a)



(b)



(c)



(d)

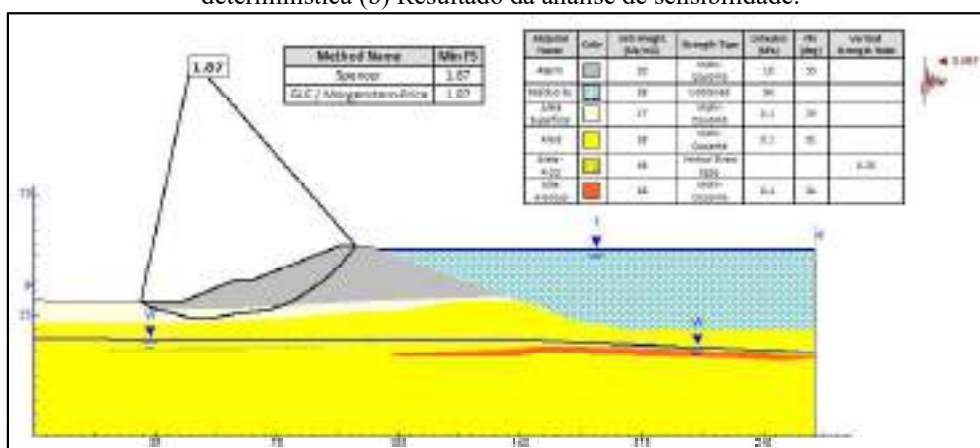
Fonte: Autora (2023)

### 5.1.7 Solicitação Pseudoestática

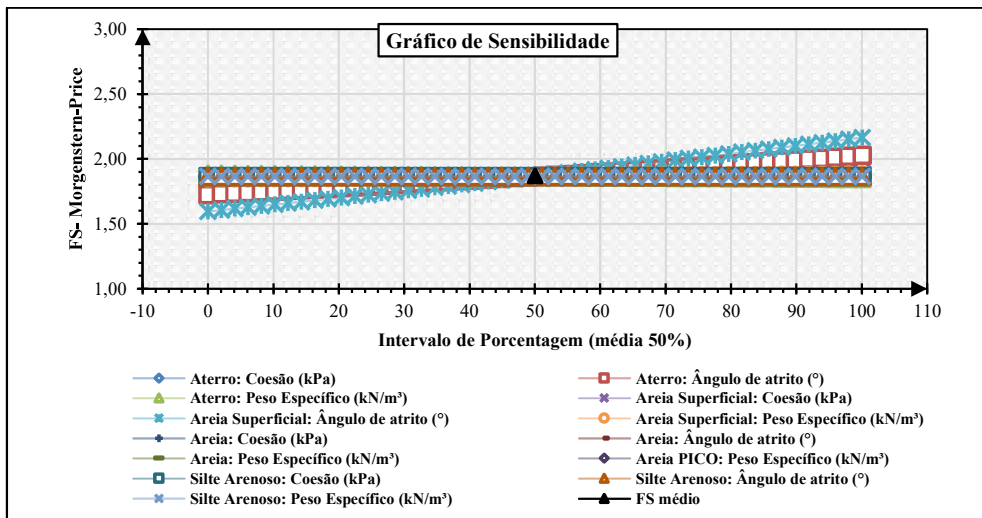
Os resultados das análises referentes ao cenário de operação sujeito a solicitação pseudoestática, são destacados nas Figuras 44 a 49.

Analisando a Figura 44-(a), observa-se uma redução no FS se comparado com os encontrados para cenários anteriores. No entanto, mesmo havendo essa diminuição, o talude se mantém estável conforme a NBR 13028/17, com FS igual a 1,87. Em relação as análises de sensibilidade, apresentadas na Figura 44-(b), nota-se que os parâmetros que mais tem influência no FS são o ângulo de atrito e coesão do aterro, bem como ângulo de atrito da camada de areia superficial.

Figura 44 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

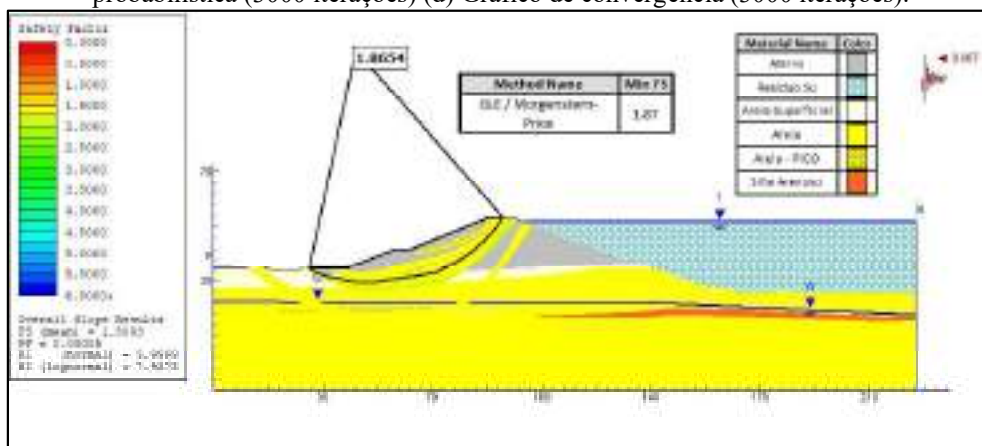


(b)

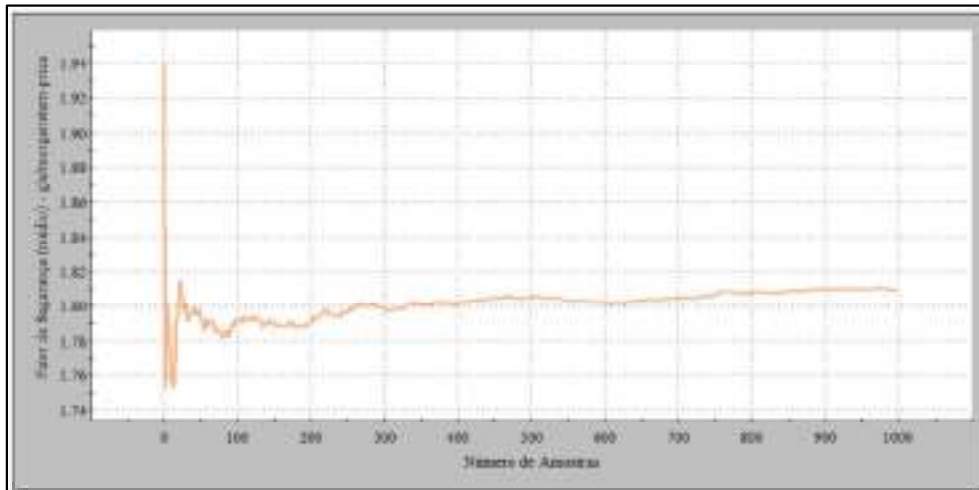
Fonte: Autora (2023)

Os resultados da análise probabilística, conforme evidenciado na Figura 45-(a) e 45-(c), revelam que o FS médio probabilístico foi igual 1,81. Em relação aos demais resultados probabilísticos, foi identificada uma Pr igual a 0% e índices de confiabilidade variando entre 6,00 (valor normal) a 7,93 (valor log-normal). Ambos os parâmetros apresentados pela abordagem probabilística se enquadram dentro dos padrões aceitáveis da USACE (1997). No que se refere às curvas de convergências, exibidas nas Figura 45-(b) e 45-(d), tem-se que assim para a condição anterior, ao realizar 3000 iterações, a estabilização dos resultados só é verificada a partir de 1500 iterações.

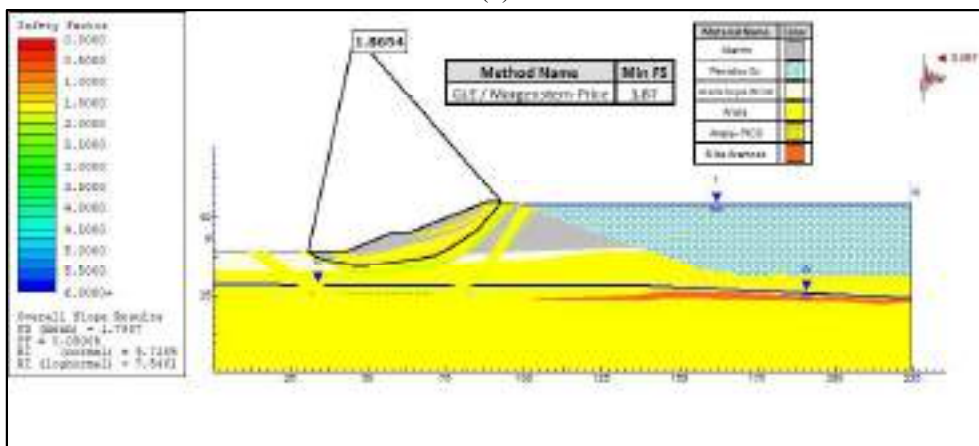
Figura 45 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência (3000 iterações).



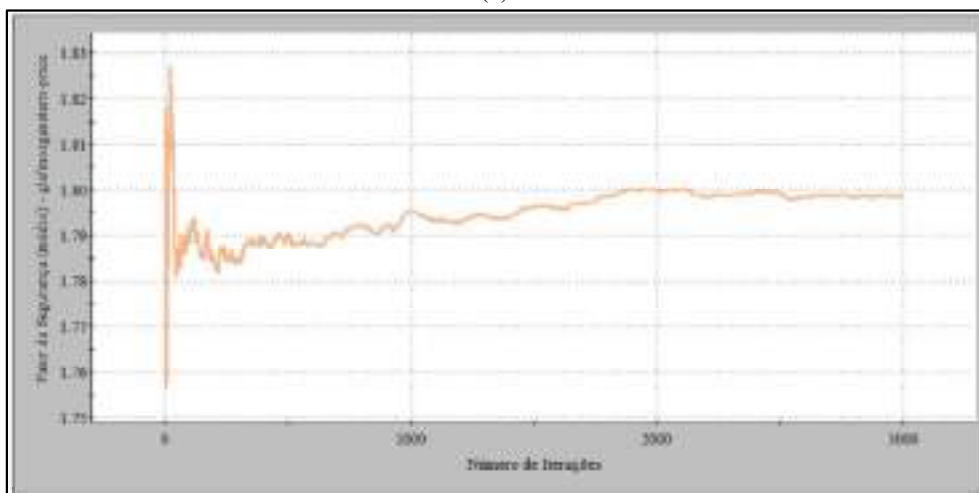
(a)



(b)



(c)



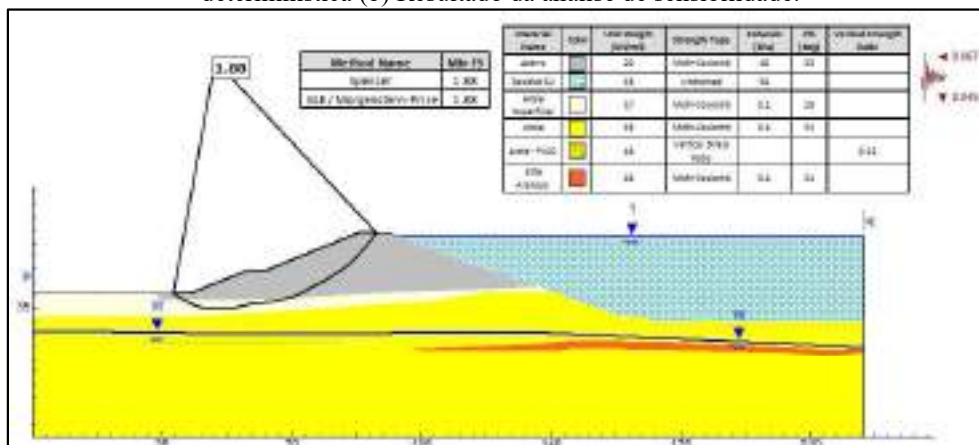
(d)

Fonte: Autora (2023)

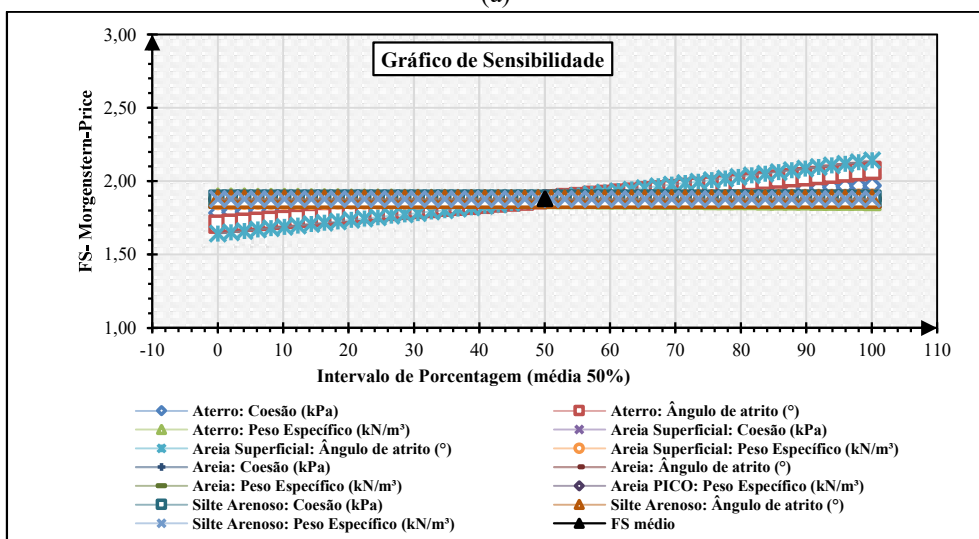
Para o segundo cenário pseudoestático, considerando a adição de carregamento vertical, Figura 46-(a), foi possível observar um leve aumento no FS se comparado com o carregamento exclusivamente horizontal. Além disso, a análise de sensibilidade revelou uma pequena flutuação do FS, destacando um aumento da influência do ângulo de atrito e coesão da camada

de aterro sobre ele, conforme é ilustrado na Figura 46-(b). Por ambos os métodos determinísticos empregados, o talude exibiu comportamento estável, apresentando FS superior a 1,10 exigido pela NBR 13028/17.

Figura 46 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



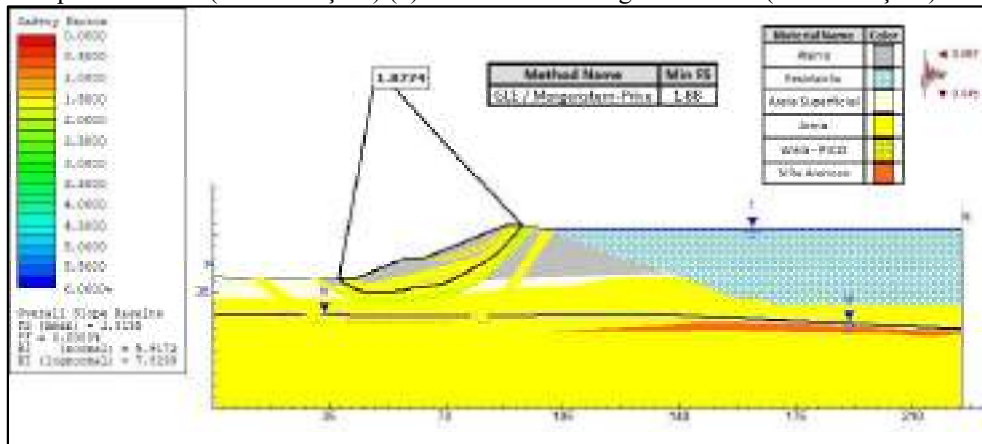
(b)

Fonte: Autora (2023)

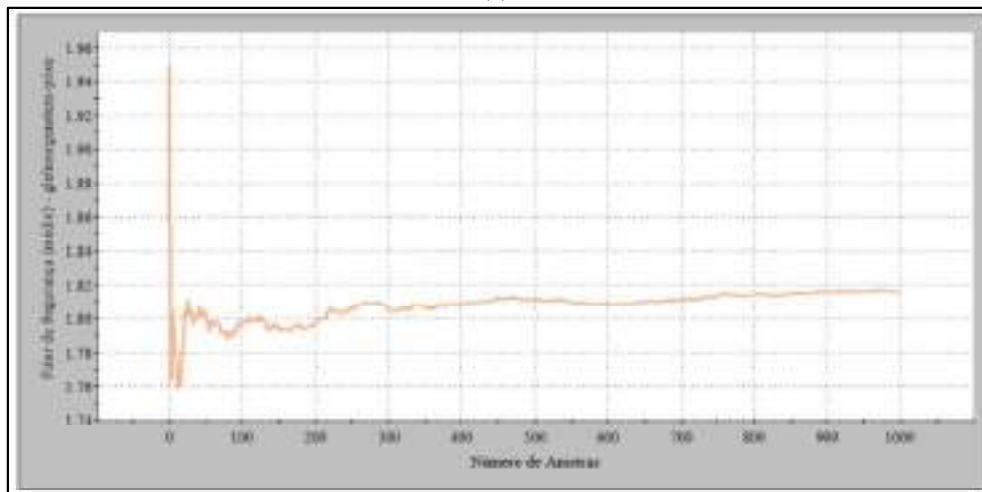
Com relação aos resultados das análises probabilísticas, apresentados nas Figuras 47-(a) e 47-(c), estes revelam um FS médio probabilístico igual a 1,80, uma Pr igual a 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 5,71(valor normal) a 7,83 (valor log-normal). Em relação aos resultados de convergência do FS das Figuras 47-(b) e 47-(d), observa-se um comportamento ligeiramente estável dos resultados a partir de 1500 iterações. Com base nesses resultados, é possível dizer que o talude demonstra comportamento estável tanto pela abordagem determinística quanto probabilística.



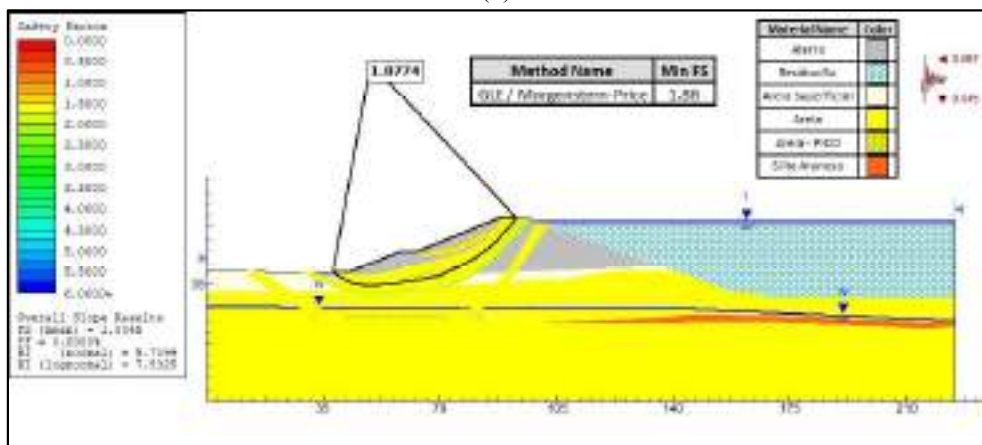
Figura 47 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



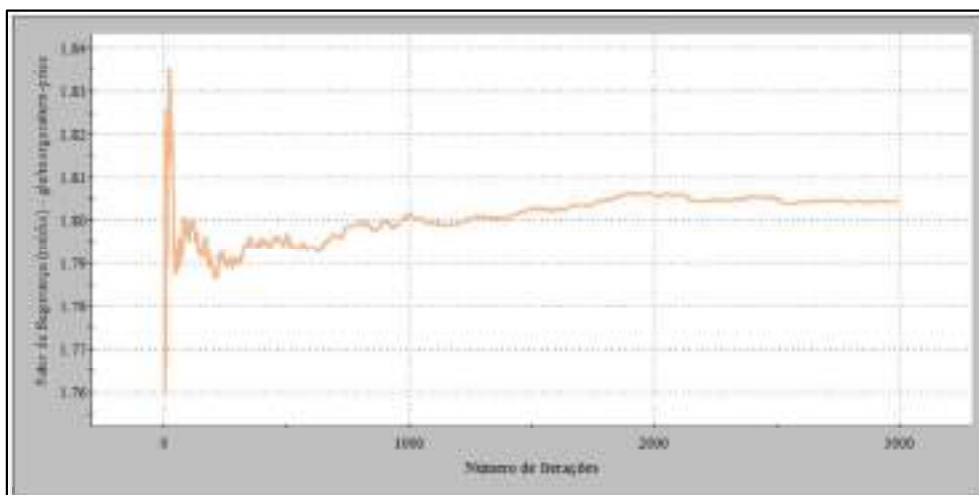
(a)



(b)



(c)

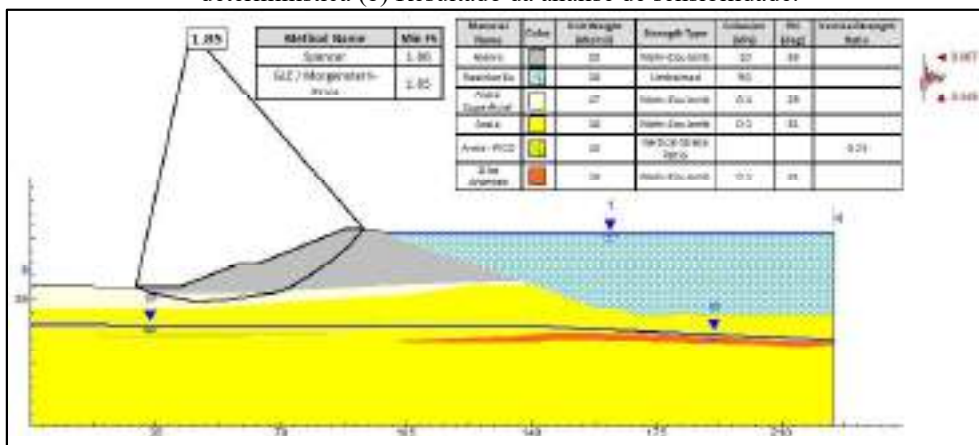


(d)

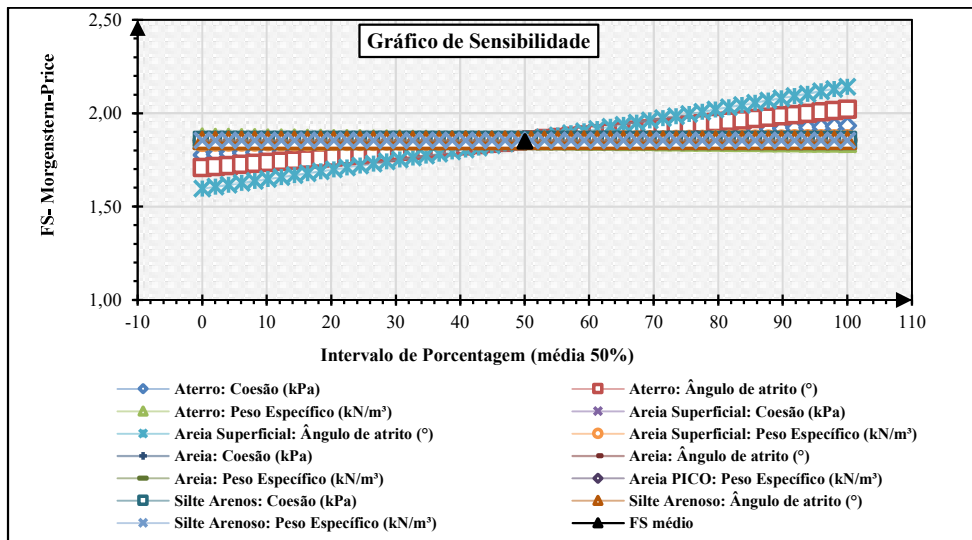
Fonte: Autora (2023)

O último cenário sísmico analisado apresentou um FS determinístico igual a 1,85, conforme é exibido na Figura 48-(a), representando o menor resultado entre os três cenários analisados. É importante ressaltar que, apesar desse comportamento, o FS encontra-se em conformidade com os requisitos estabelecidos pela NBR 13028/17. Com relação ao gráfico de sensibilidade, ilustrado na Figura 48-(b), observa-se, assim como os demais cenários, que as propriedades que mais exercem influência sobre o FS são o ângulo de atrito e coesão do aterro compactado, sendo o ângulo de atrito da areia superficial, o de maior influência.

Figura 48 -Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

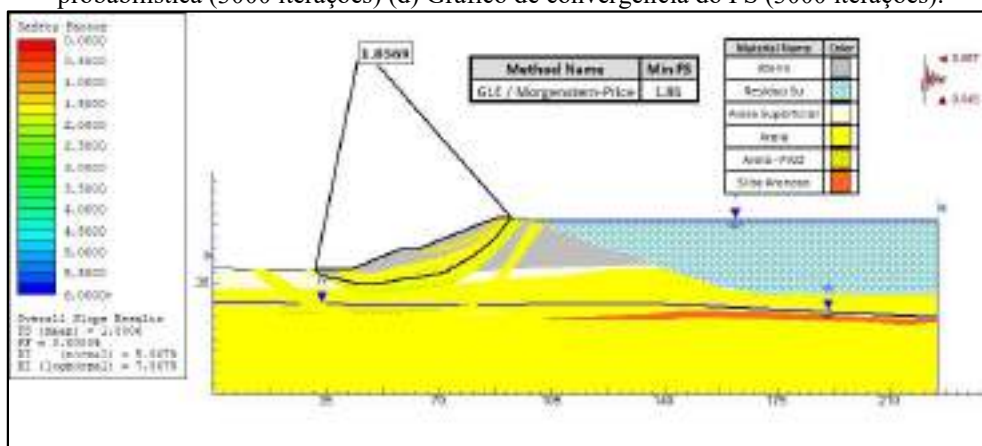


(b)

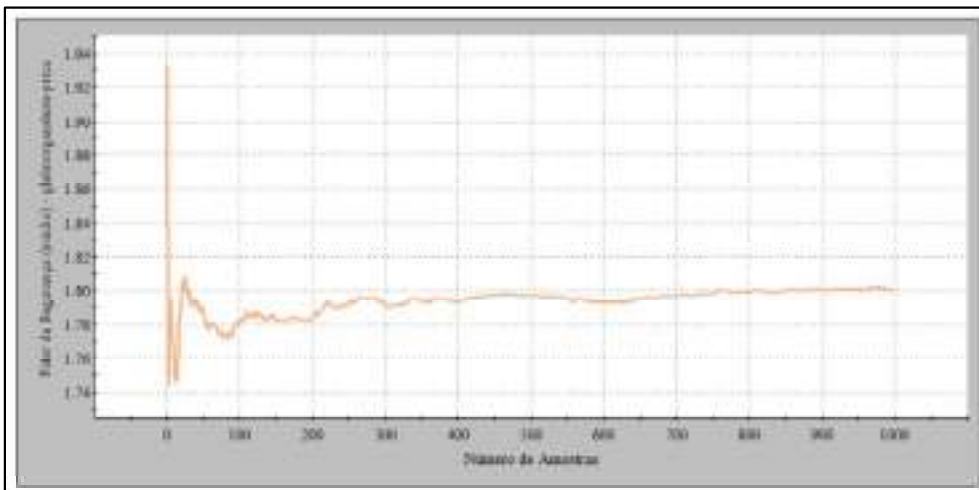
Fonte: Autora (2023)

No que concerne aos resultados encontrados pela abordagem probabilística, observa-se partir das Figuras 49-(a) e 49-(c), que o FS médio probabilístico foi aproximadamente igual a 1,80. As Pr por sua vez foram nulas e os índices de confiabilidade mínimos variaram 5,71 (valor normal) entre 7,52 (valor log-normal). Ambos os resultados apresentados se encontram em conformidade com o que é proposto pela USACE (1997). Em relação a estabilização dos resultados, as Figuras 49-(b) 49-(d), apresentam, assim como os demais cenários, um início de convergência a partir de 1500 simulações.

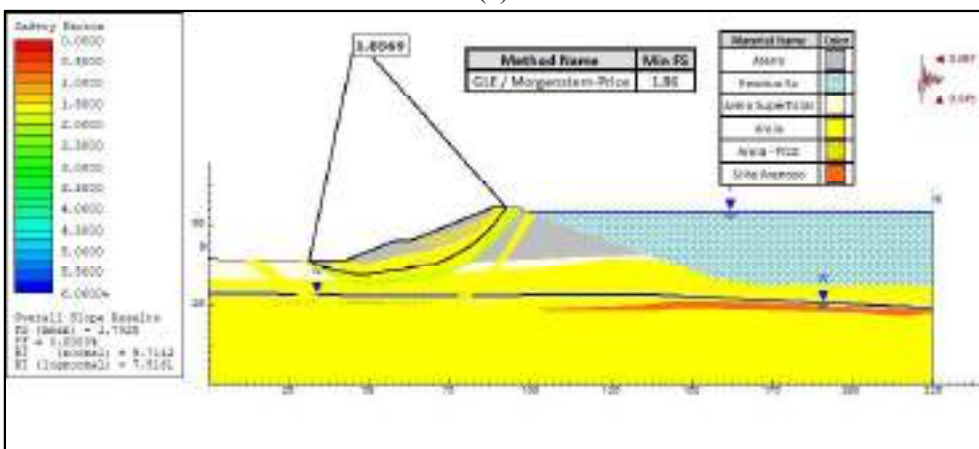
Figura 49 - Resultado da Seção A-A - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



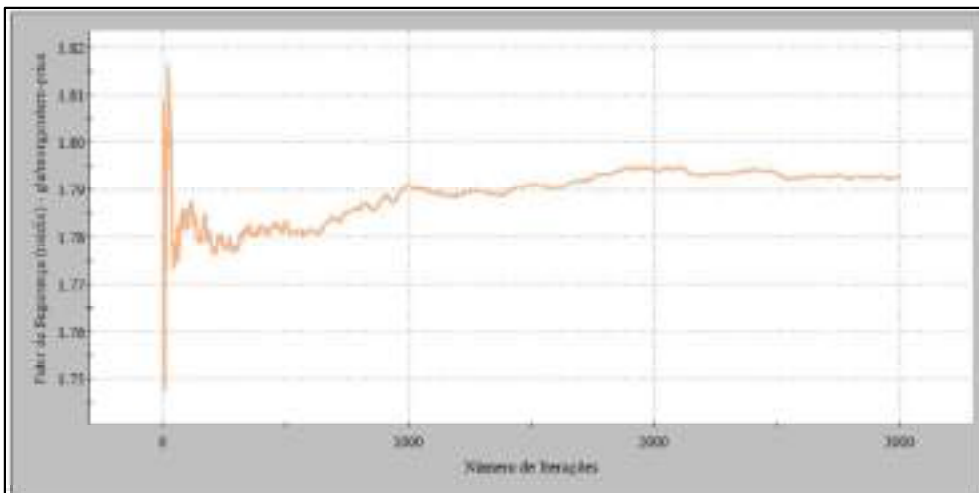
(a)



(b)



(c)



(d)

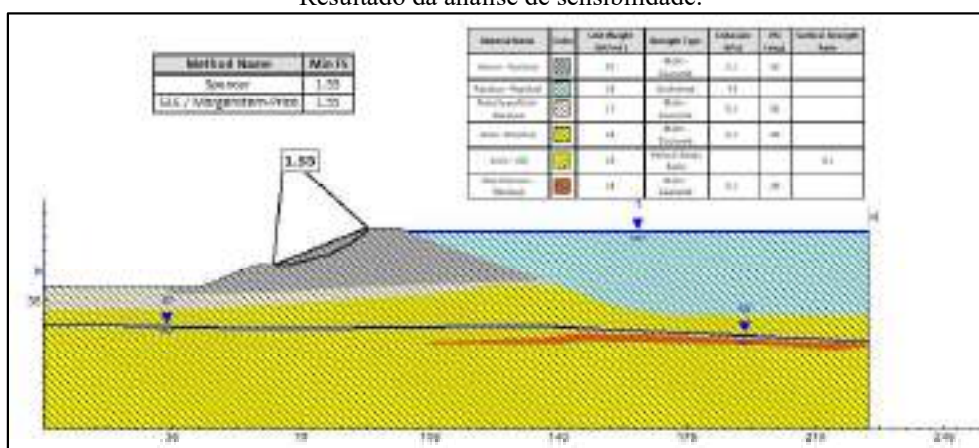
Fonte: Autora (2023)

### 5.1.8 Solicitação pós-sísmica

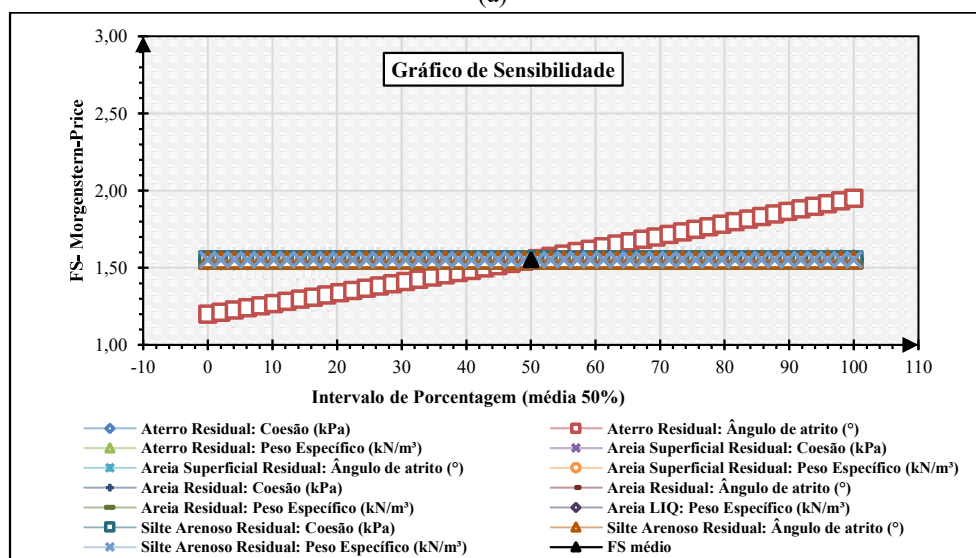
Após execução das análises pseudoestáticas, foram conduzidas análises para verificar a estabilidade do talude da barragem para um momento pós-sísmico. Os resultados referentes a este cenário são apresentados nas Figuras 50 e 51.

Para o cenário pós-sísmico é notada uma diminuição do FS de 1,85 para 1,55, decorrente da diminuição dos parâmetros de resistência do solo quando submetido a esta condição. Apesar deste cenário, os resultados da análise determinística mostraram que para as condições analisadas o talude se mantém estável mesmo após um cenário pós-sísmico, sendo seu FS superior ao mínimo exigido de 1,00 pela ANCOLD (2019). No que diz respeito aos resultados da análise de sensibilidade, apresentados na Figura 50-(b), verifica-se que para este cenário, o parâmetro que exerce maior influência sobre o FS é o ângulo de atrito da camada de aterro.

Figura 50 - Resultado da Seção A-A - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

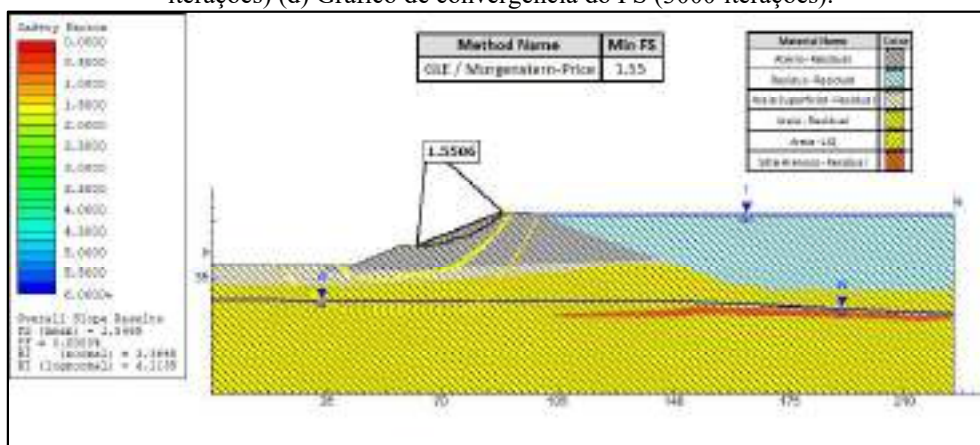


(b)

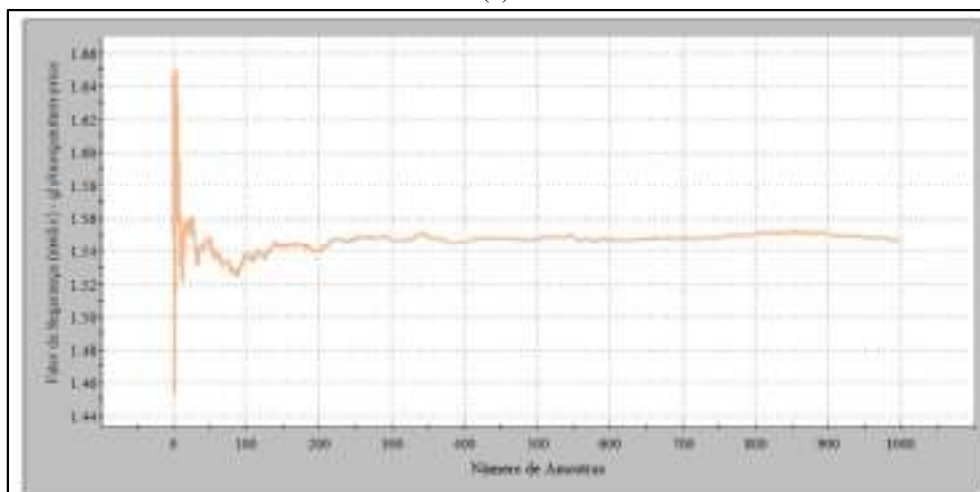
Fonte: Autora (2023)

Com relação aos resultados da análise probabilística, exibidos nas Figuras 51-(a) e 51-(c), estes revelam um FS médio probabilístico igual a 1,55 semelhante ao encontrado pela análise determinística. Quanto à probabilidade de ocorrência de uma ruptura, a análise probabilística apontou uma PR nula para ambos os números de iterações executadas. Adicionalmente, os índices de confiabilidade variaram entre 3,32 (valor normal) a 4,11 (valor log-normal), sendo estes acima dos limites mínimos de desempenho estabelecido pela USACE (1997). Quanto às curvas exibidas nas Figuras 51-(b) e 51-(d), nota-se uma estabilização do FS em torno do valor de 1,55, evidenciando uma convergência mais definida em comparação com os cenários de solicitação pseudoestática. Nesse contexto, destaca-se que os resultados tendem a se estabilizar a partir de 1000 iterações.

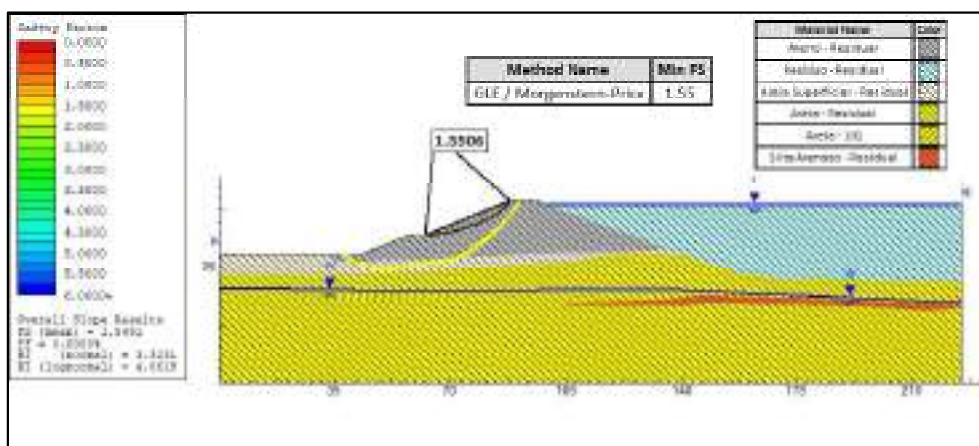
Figura 51 - Resultado da Seção A-A - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



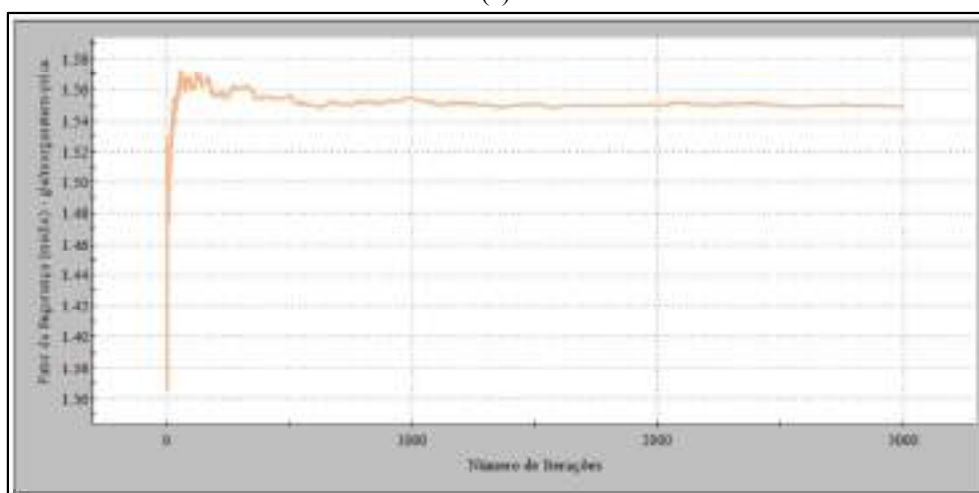
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 20, encontram-se organizado todos os resultados encontrados a partir da aplicação de análises de estabilidade determinísticas e probabilística para a seção A. Ao examinar a tabela e utilizando os valores de referência do item 3.8, é possível inferir que o talude da seção A demonstrou estabilidade diante dos dez cenários de carregamentos avaliados, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística.

Tabela 20 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção A-A.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				3000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,83	1,80	0	4,86	6,40	1,79	0	4,92	6,45
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,74	1,68	0	5,34	6,80	1,68	0	5,36	6,85
Final de construção Sem Ru	J	1,3	2,27	2,21	0	6,85	9,91	2,20	0	6,65	9,59
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,98	1,88	0	4,81	6,46	1,89	0	4,74	6,37
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,28	2,21	0	7,02	10,14	2,20	0	6,62	9,55
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	2,28	2,21	0	7,10	10,26	2,20	0	6,65	9,59
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,87	1,81	0	6,00	7,93	1,80	0	5,73	7,55
			1,88	1,82	0	5,92	7,83	1,80	0	5,71	7,53
			1,85	1,80	0	5,97	7,87	1,79	0	5,71	7,52
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,55	1,55	0	3,37	4,11	1,55	0	3,32	4,06

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

## 5.2 SEÇÃO B

A seguir são expostos os resultados das análises determinísticas, de sensibilidade e probabilísticas realizados na geometria da seção B para um número de 1000 e 3000 iterações.

### 5.2.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

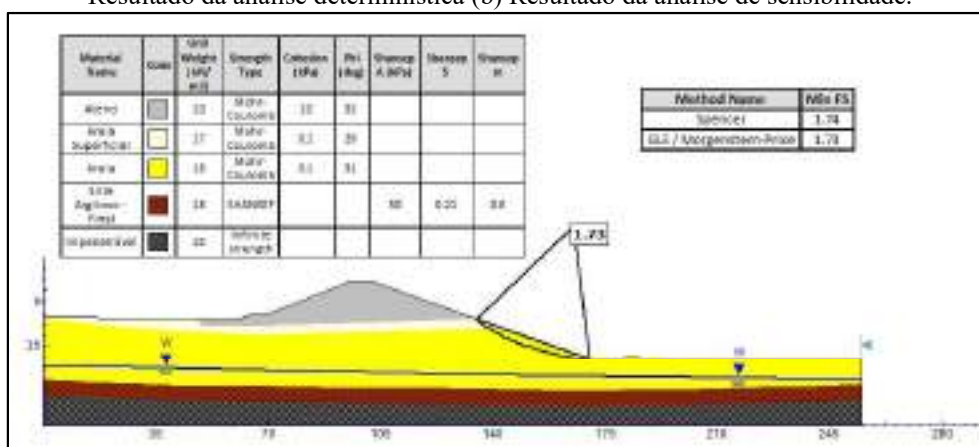
Os primeiros resultados encontrados referem-se à condição de final de construção para o talude montante, sem considerar o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro. Os resultados desta condição encontram-se apresentados nas Figura 52 e 53.

Conforme ilustrado na Figura 52-(a), a fundação da seção B é constituída por quatro estratos de materiais distintos denominadas de: areia superficial, areia, silte argiloso-final e impenetrável. As sondagens SPT realizadas nas proximidades dessa seção revelaram  $N_{SPT}$  crescente, com as camadas superficiais sendo classificadas como materiais medianamente compactos.

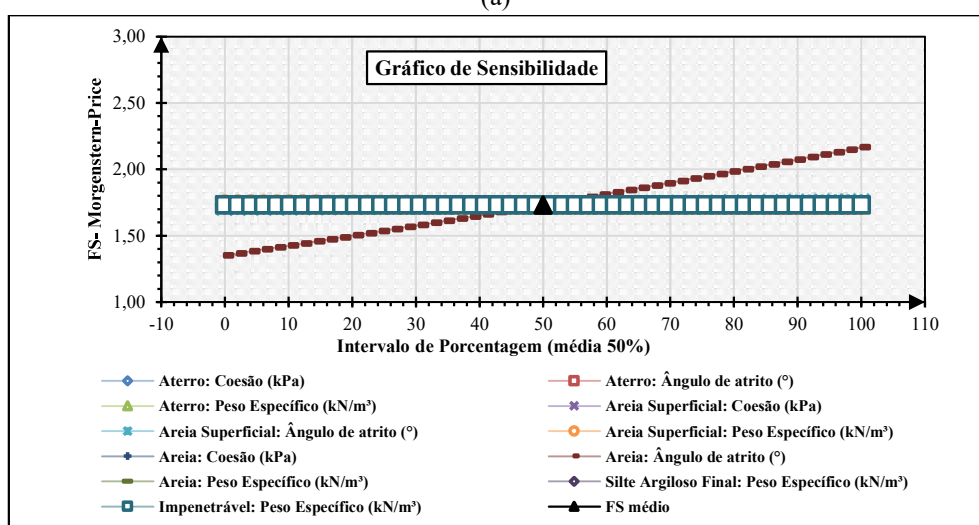
Com base nos resultados apresentados na Figura 52-(a), observa-se que para esta condição o talude se mantém estável obtendo um FS de 1,73 superior ao mínimo exigido de 1,3 conforme preconizado pela NBR 13028/17. No que diz respeito às análises de sensibilidade, a Figura 52-(b), revela que o ângulo de atrito da areia é o parâmetro responsável pela maior variação do FS.



Figura 52 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

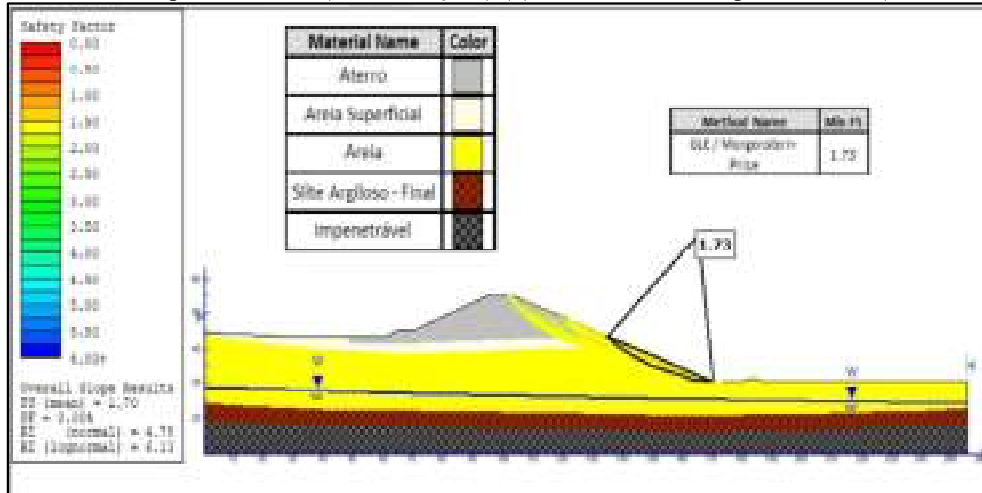


(b)

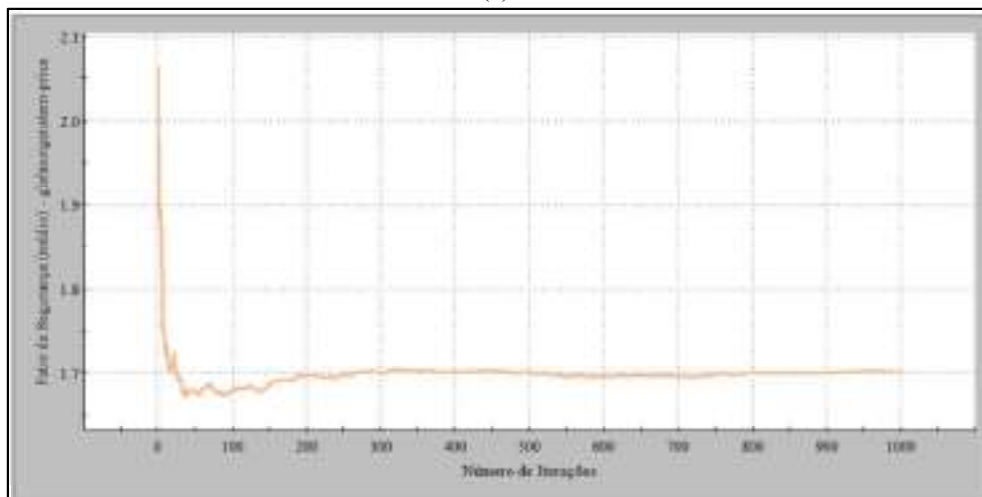
Fonte: Autora (2023)

Em relação aos resultados da análise probabilística, evidenciados nas Figuras 53-(a) e 53-(c), estes destacam um FS médio probabilístico de 1,70, com Pr iguais a 0% para ambos os números de iterações. Quanto aos índices de confiabilidade mínimos encontrados, estes variaram entre 4,73 (valor normal) a 6,06 (valor log-normal), classificando o desempenho do talude como satisfatório, conforme estabelecido pela USACE (1997). No que concerne às curvas de convergência do FS, percebe-se pelas Figuras 53-(b) e 53-(d), que a curva tende a se estabilizar em torno de 1,70, indicando convergência dos resultados após 1000 iterações. Dessa forma, é possível dizer que a partir dos resultados obtidos para essa condição, o talude se mostrou estável por ambas as metodologias de análise.

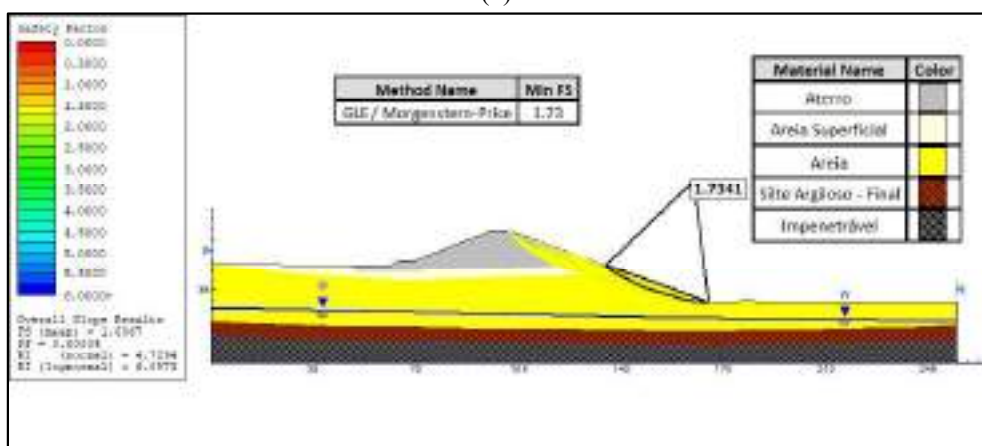
Figura 53 - Resultado da Seção B-B - Final de Construção – Talude Montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



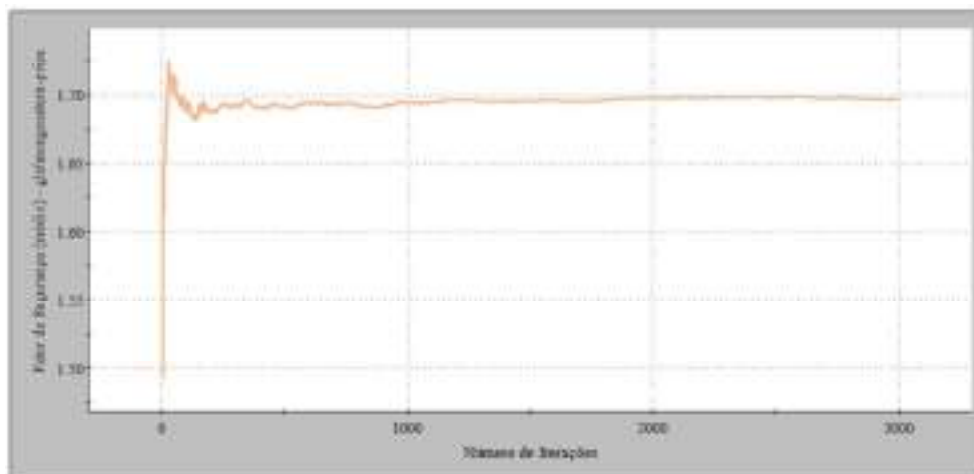
(a)



(b)



(c)



(d)

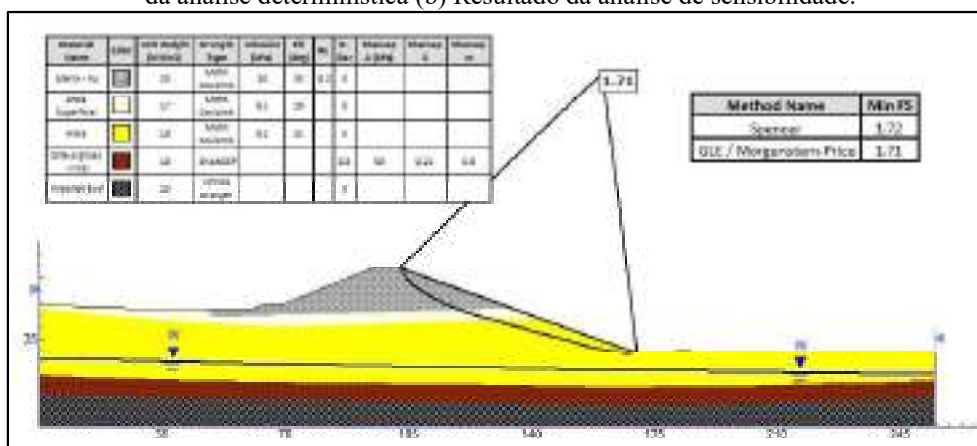
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

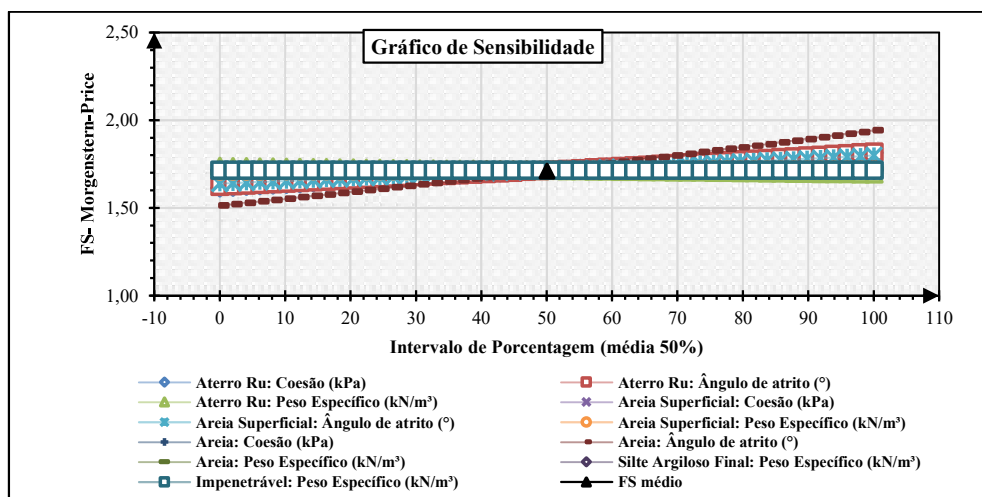
Os resultados das análises para a fase de construção para o talude montante, levando em consideração o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro, são apresentados nas Figuras 54 e 55.

Analisando os resultados da Figura 54-(a), observa-se que a presença do parâmetro Ru na camada do aterro, não traz mudanças significativas no resultado do FS, mas altera a localização da SPR, passando de uma ruptura local para uma ruptura global. Observa-se também que por ambos os métodos determinísticos o talude se mantém estável possuindo um FS de 1,71 superior ao mínimo exigido de 1,3 conforme recomenda a NBR 13028/17. No que diz respeito aos resultados da análise de sensibilidade, observa-se que a variação do FS é mais significativa devido a mudanças no ângulo de atrito da camada de areia, seguida do ângulo de atrito do aterro compactado e da areia superficial, conforme é mostrado na Figura 54-(b).

Figura 54 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

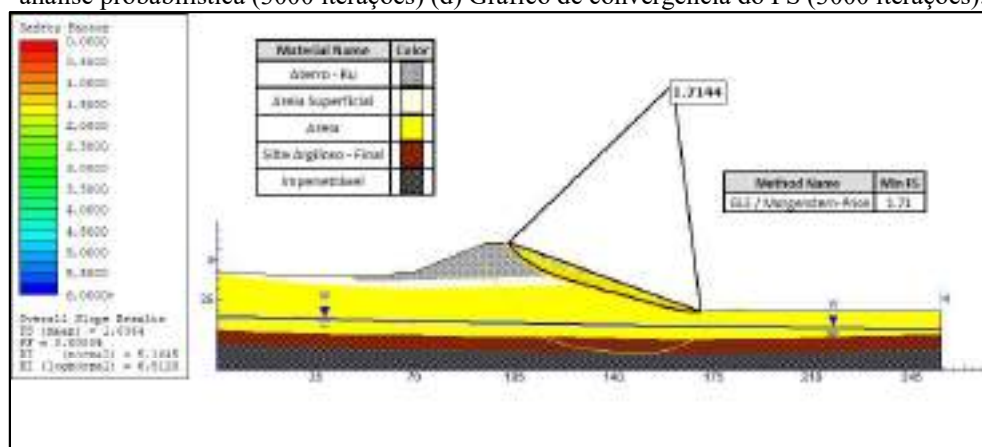


(b)

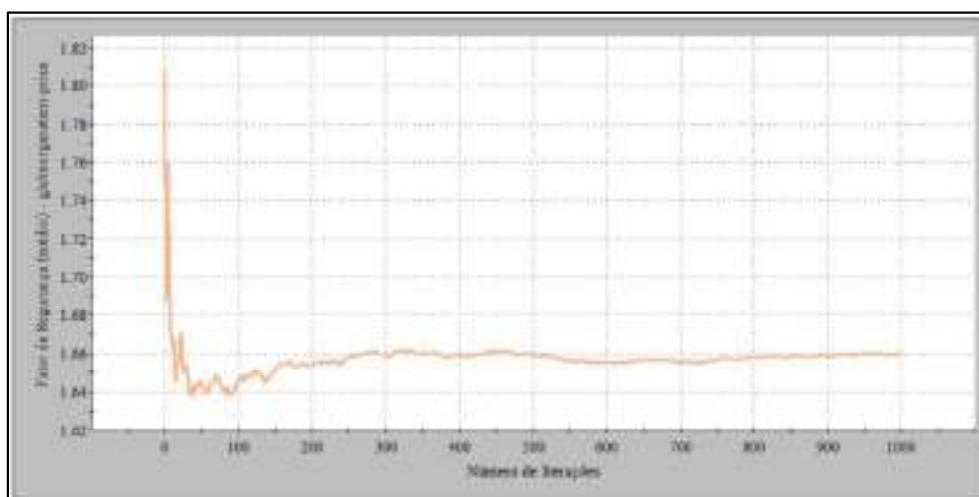
Fonte: Autora (2023)

Com relação aos resultados da análise probabilística, exibidos nas Figuras 55-(a) e 55-(c), estes apresentaram aproximadamente um FS médio probabilístico igual a 1,64, com Pr igual a 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 5,31 (valor normal) a 6,71 (valor log-normal) para ambas as iterações testadas. Os valores de Pr e dos índices de confiabilidade encontrados revelam que o talude montante se apresenta estável considerando os valores de referência da USACE (1997). Quanto às curvas de convergências, apresentadas nas Figuras 55-(b) e 55-(d), observa-se que com o aumento do número de iterações de 1000 para 3000, os resultados tendem a se estabilizar em torno do valor de 1,64, apresentando convergência a partir de 1000 iterações. A partir dos resultados aqui apresentados, pode-se inferir que, para essa condição, o talude se apresenta estável por ambas as metodologias de análise de estabilidade.

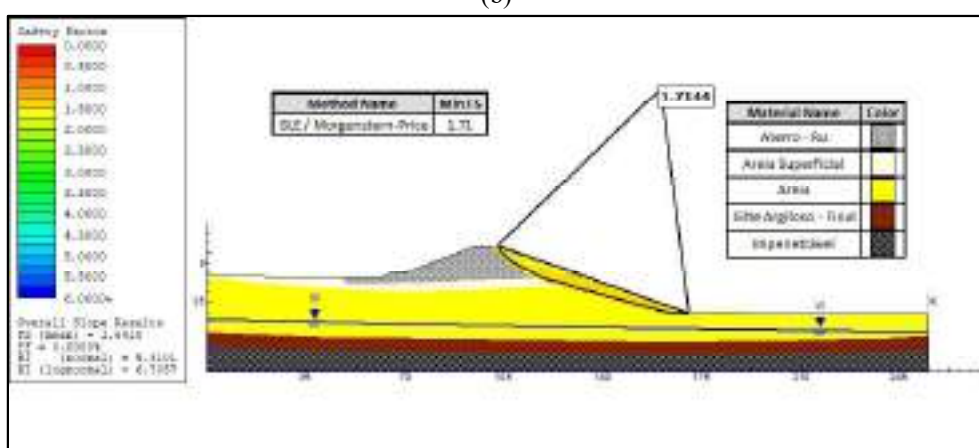
Figura 55 - Resultado da Seção B-B - Final de Construção – Talude Montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



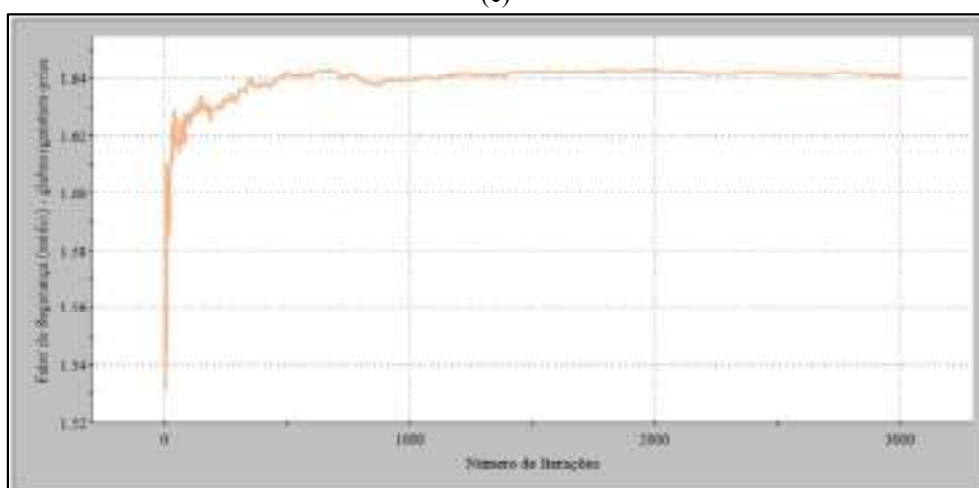
(a)



(b)



(c)



(d)

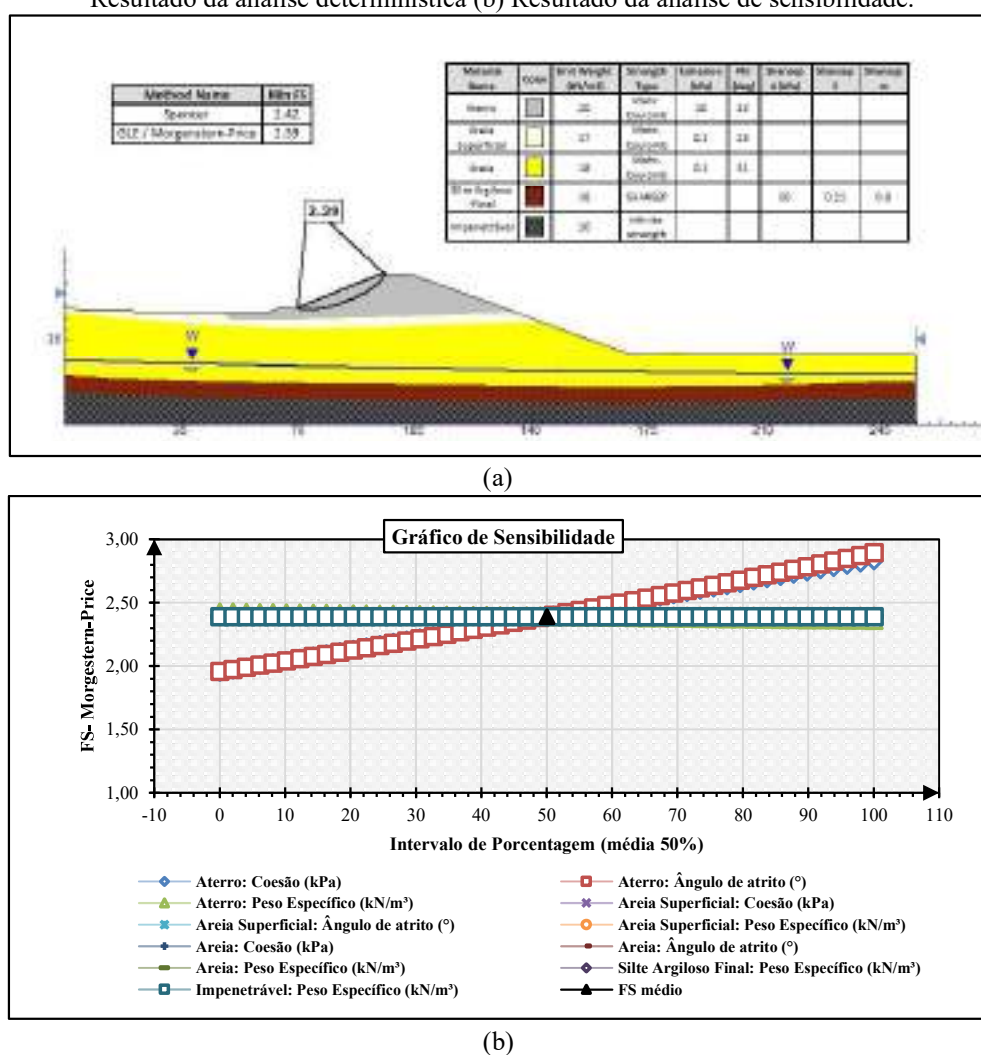
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

Os resultados das análises para a fase final de construção do talude jusante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 56 e 57.

Ao analisar os resultados da Figura 56-(a), nota-se um aumento do FS em comparação com os resultados dos cenários a montante, passando de valores na faixa de 1,71 pra 2,39, ultrapassando o mínimo exigido de 1,3 pela NBR 13028/17. Na análise de sensibilidade, retratada na Figura 56-(b), destaca-se uma influência significativa dos parâmetros de resistência da camada de aterro, como o ângulo de atrito e a coesão, sobre o valor FS. Além disso, observa-se em menor escala, que o peso específico também exerce influência nesse valor, exibindo um comportamento oposto aos demais parâmetros, isto é, causando um aumento no FS com a sua redução.

Figura 56 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.

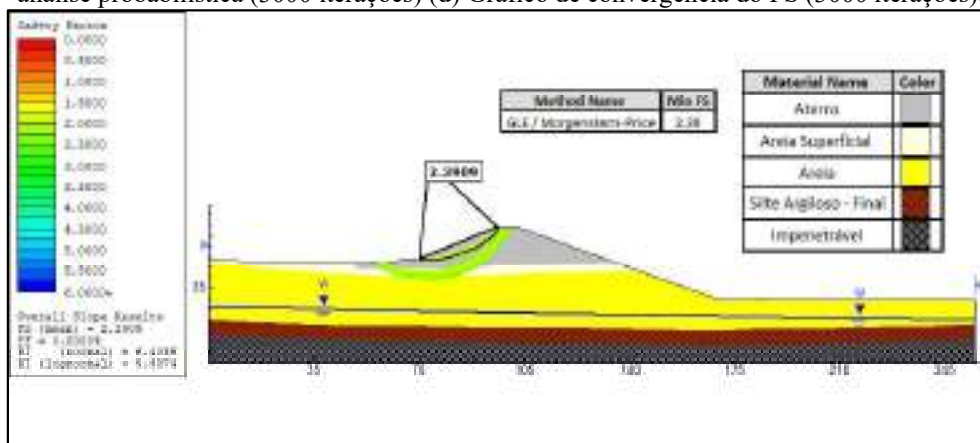


Fonte: Autora (2023)

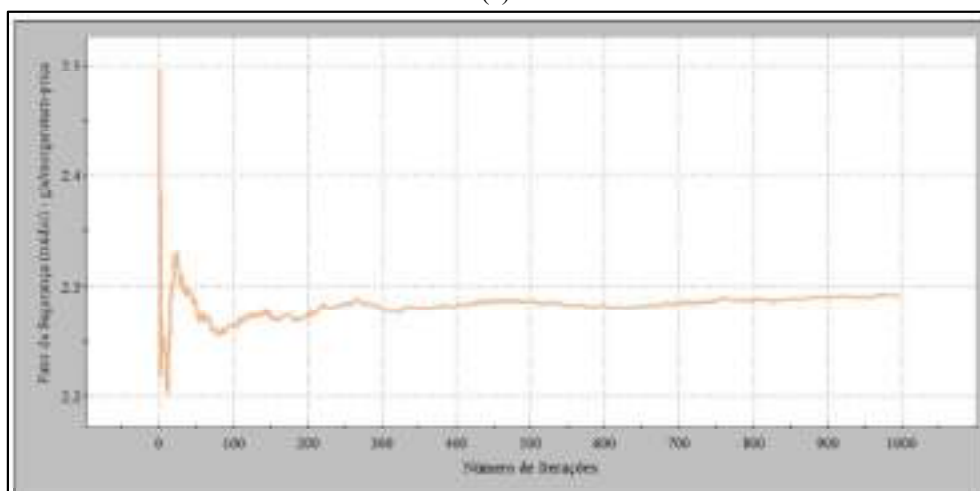
Em relação aos resultados gerados pela abordagem probabilística, é observado pelas Figuras 57-(a) e 57-(c) que, para ambas as interações, o FS médio probabilístico foi aproximadamente igual a 2,28. Adicionalmente a Pr encontrada foi igual a 0%, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 5,99 (valor normal) a 8,76 (valor log-normal), o que,

segundo a USACE (1997), caracteriza um talude com nível de desempenho satisfatório. Além disso, as Figuras 57-(b) e 57-(d), revelam que a partir de 1000 iterações os resultados tendem a convergir para um valor estável entorno de 2,28. Com base nos resultados obtidos para esta condição, constata-se a estabilidade do talude por ambas as abordagens de análise.

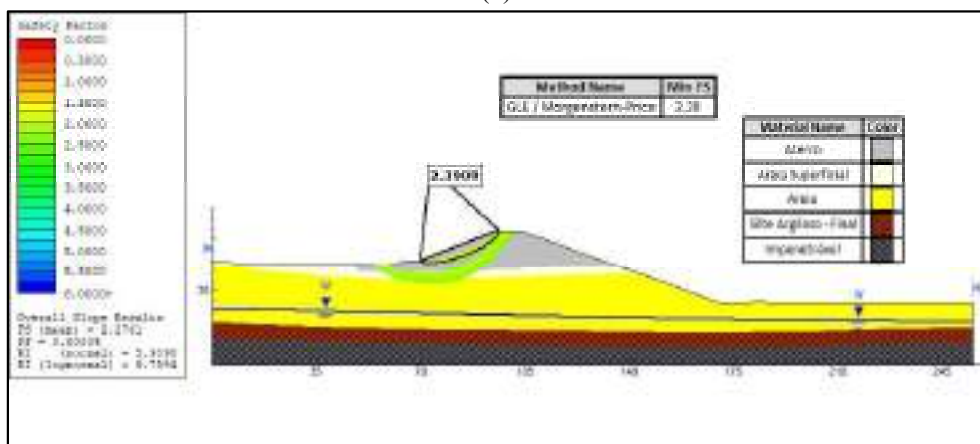
Figura 57 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



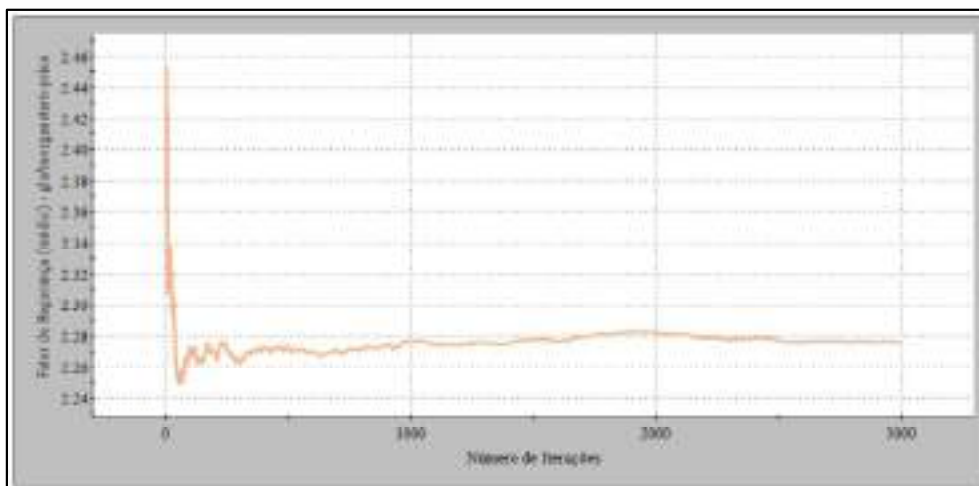
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

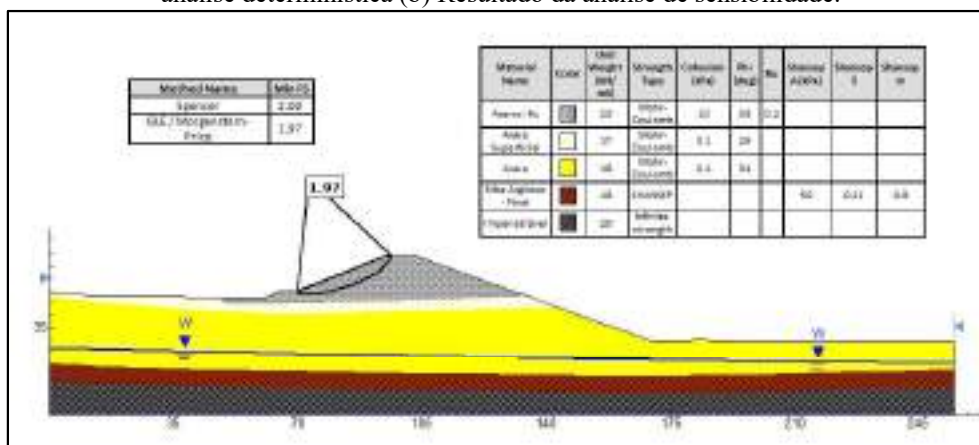
#### 5.2.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

As Figuras 58 e 59 apresentam os resultados das análises realizadas para a fase de final de construção do talude jusante, considerando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro.

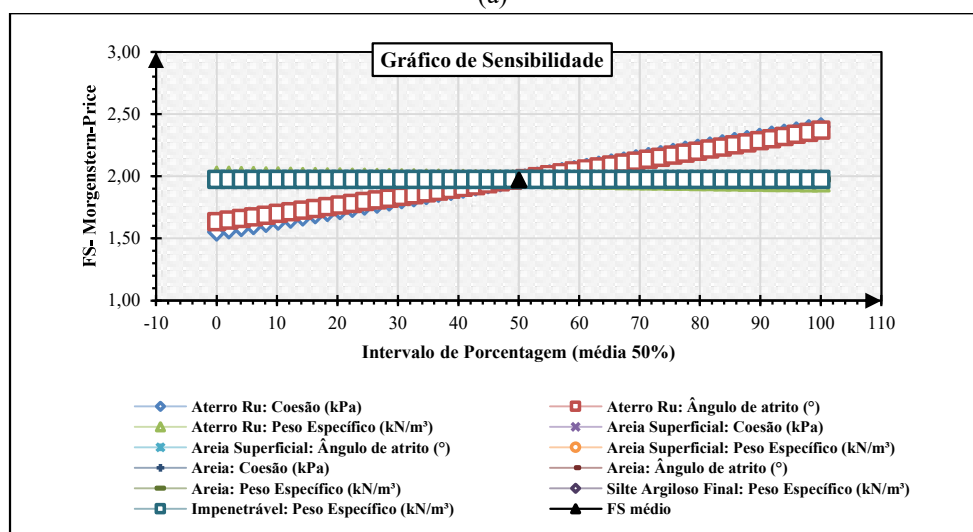
Com a inclusão do parâmetro de poropressão na camada de aterro, observa-se a partir da Figura 58-(a), uma diminuição significativa do FS passando 2,39 para 1,97. Contudo, apesar dessa redução, o FS permanece em conformidade com o valor mínimo de 1,3 estabelecido pela NBR 13028/17. Em relação a análise de sensibilidade, apresentada na Figura 58-(b), verifica-se que a coesão do aterro exerce uma influência maior no FS do que seu o ângulo de atrito. Esse aumento da influência da coesão, em comparação com o cenário anterior, pode estar relacionado ao fato de que, com a presença da poropressão, a resistência de contato entre as partículas das areias é reduzida, tornando a resistência ao movimento dependente da coesão.



Figura 58 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

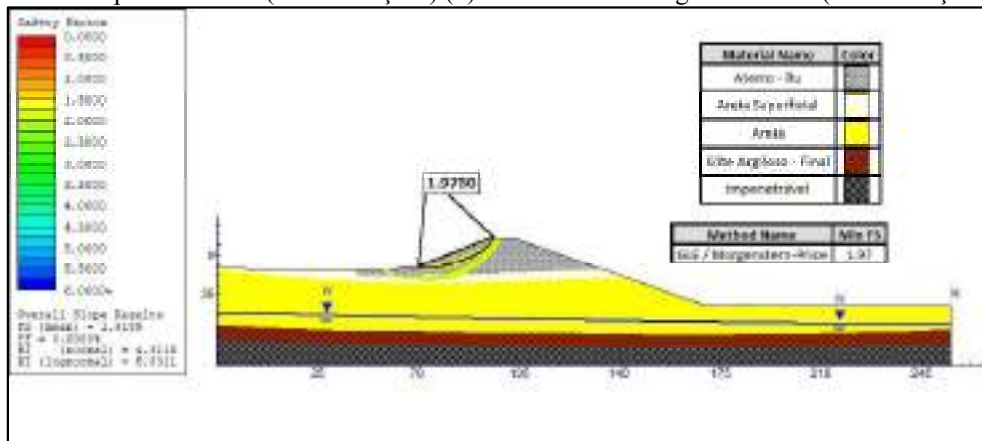


(b)

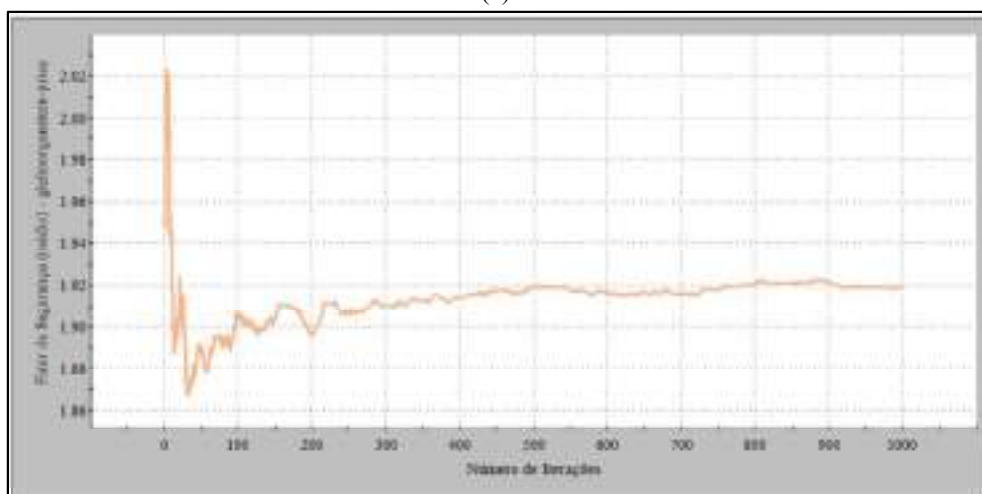
Fonte: Autora (2023)

Os resultados da análise probabilística são apresentados nas Figuras 59-(a) e 59-(c). Ao examinar estas figuras, destaca-se que o FS médio probabilístico foi de 1,92, com Pr igual a 0% em ambos os números de iterações. Quanto aos índices de confiabilidade mínimos, estes variaram entre 4,27 (valor normal) a 5,78 (valor log-normal). Em relação as curvas de convergência, exibidas nas Figuras 59-(c) e 59-(d), observa-se que os resultados tendem a estabilizar em torno de 1,92 a partir de 1000 iterações. Esses resultados, estão em conformidade com os padrões estabelecido pela USACE (1997), apontam para um talude estável, assim com a abordagem determinística.

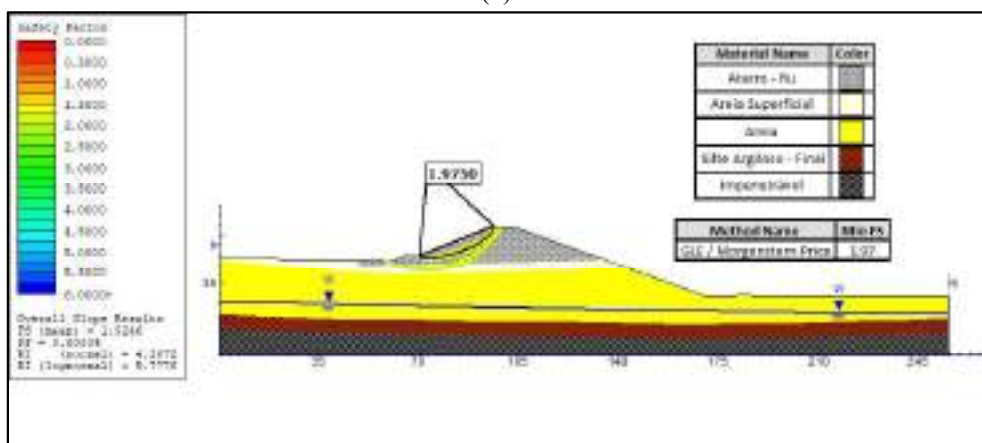
Figura 59 - Resultado da Seção B-B - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



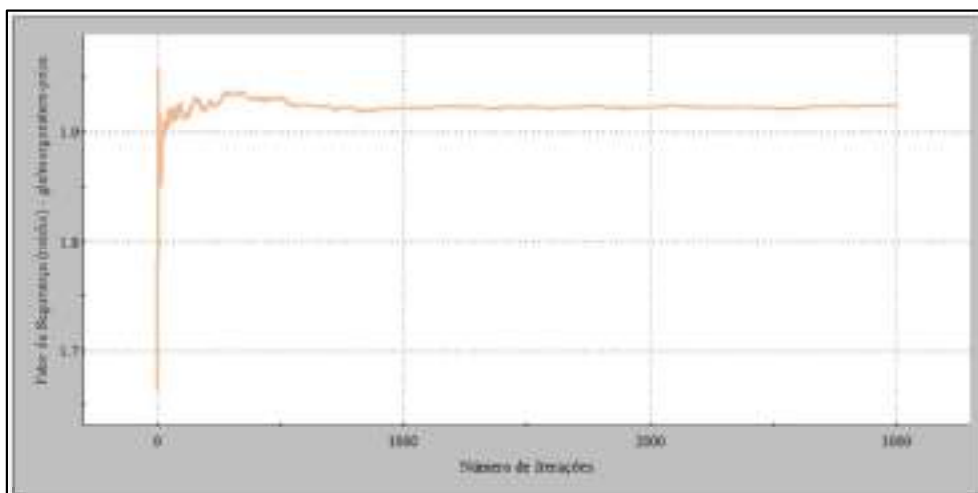
(a)



(b)



(c)



(d)

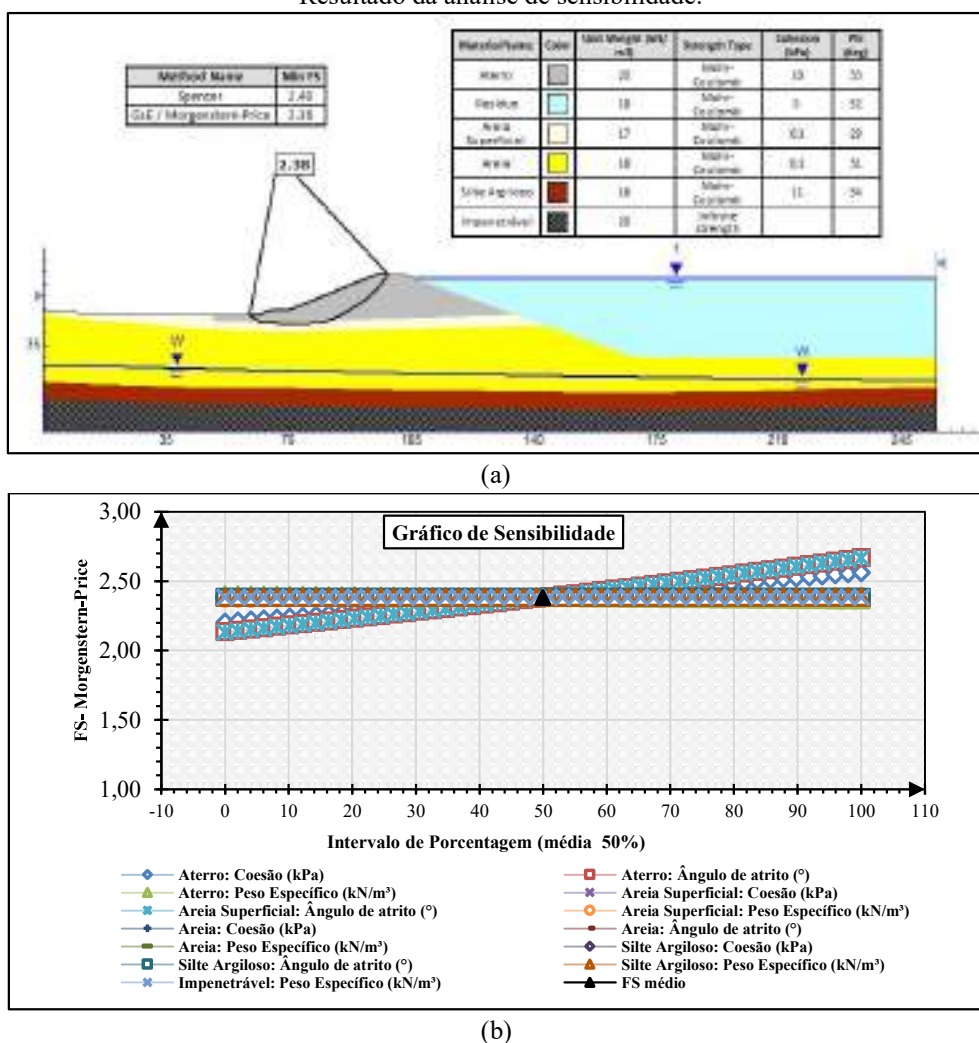
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.5 Operação Normal – Drenado

Os resultados para o cenário de operação em condição normal drenada são exibidos nas Figuras 60 e 61.

Avaliando os resultados da Figura 60-(a), nota-se que o comportamento dos resultados é semelhante a condição de final de construção sem o parâmetro  $R_u$ . A distinção entre ambas, é observada nos resultados de sensibilidade apresentados na Figura 60-(b), onde se constata que a influência da coesão do aterro é inferior ao do ângulo de atrito da camada de areia superficial. Além disso, verifica-se que, por ambos os métodos determinísticos, o talude permanece estável, sendo o menor FS equivalente a 2,38 atendendo a NBR 13028/17.

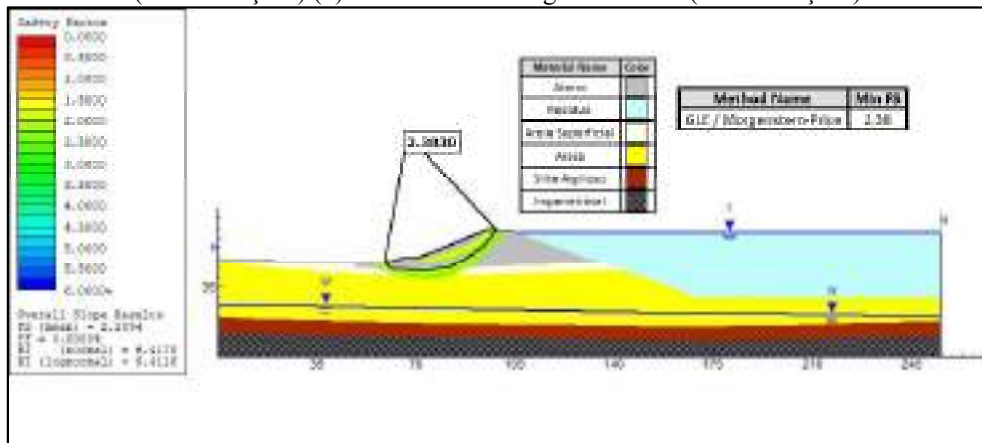
Figura 60 - Resultado da Seção B-B - Operação normal – drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



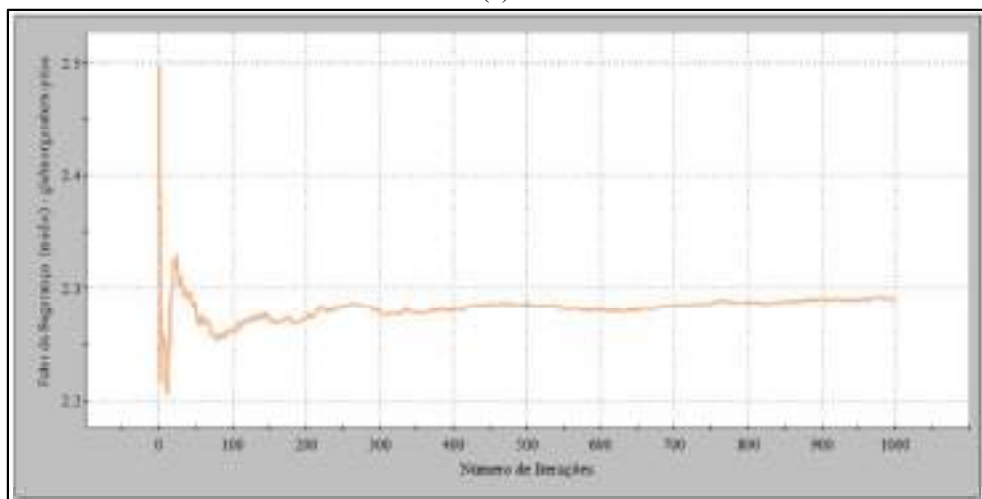
Fonte: Autora (2023)

Em relação aos resultados da abordagem probabilística, apresentados nas Figuras 61-(a) e 61-(c), observa-se que o FS médio probabilístico foi aproximadamente igual a 2,27, com Pr nula e índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,02 (valor normal) a 8,80 (valor log-normal). Em relação às curvas de convergência, apresentadas nas Figura 61-(b) e 61-(d), percebe-se que os resultados das análises probabilísticas tendem a convergir em torno de 2,27 a partir de 1000 iterações. Os resultados de ambas as iterações indicaram comportamento estável do talude, considerando os valores de referência da USACE (1997).

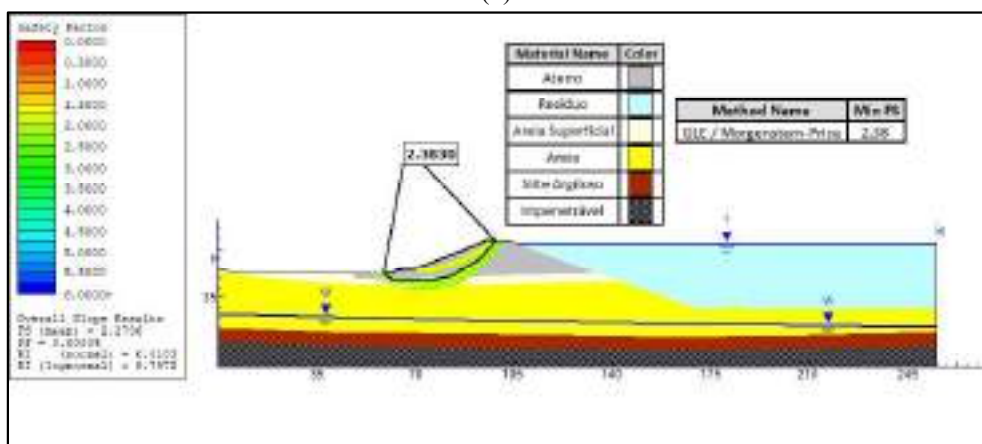
Figura 61 - Resultado da Seção B-B - Operação normal – drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



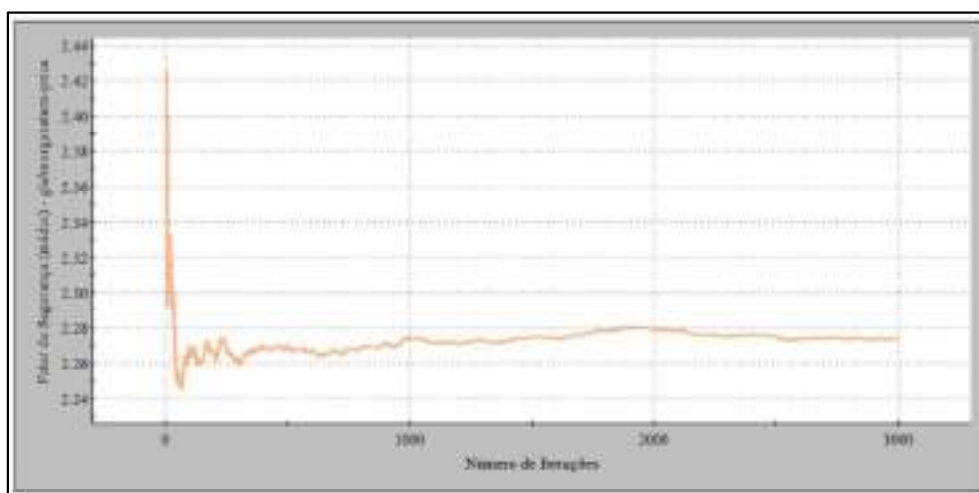
(a)



(b)



(c)



(d)

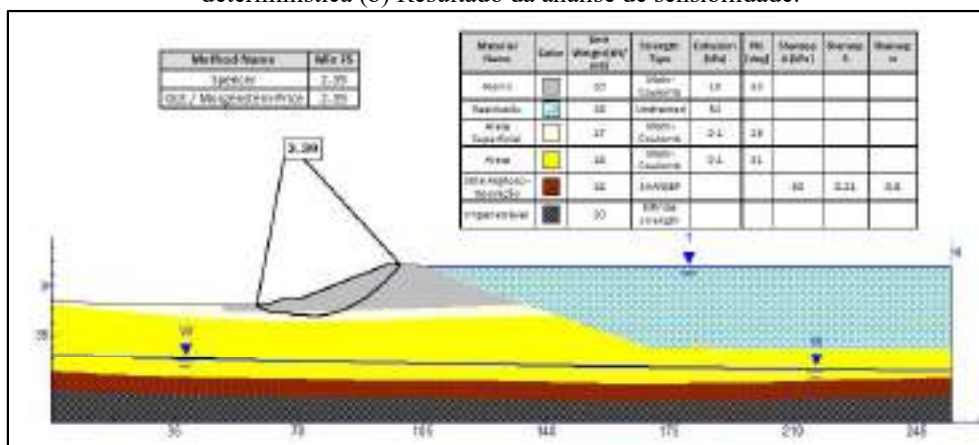
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.6 Operação Normal – Não drenado

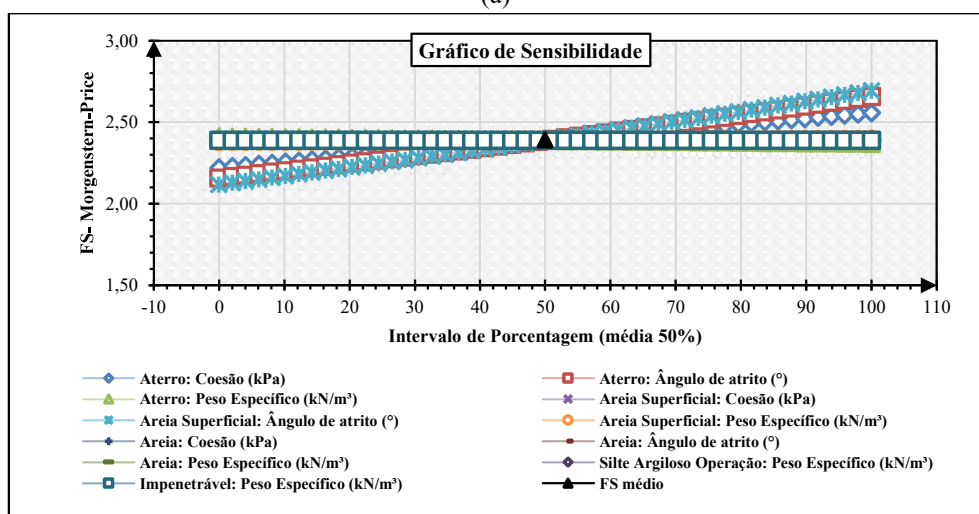
Os resultados das análises referentes a fase de operação em condição normal não drenado, estão expostos nas Figuras 62 e 63.

O resultado da análise determinística, conforme é apresentado na Figura 62-(a), revela um FS igual 2,39 superando o valor mínimo exigido pela NBR 13028/17, estabelecido em 1,5. Ao analisar a Figura 62-(b), observa-se a variação do FS em relação as alterações no ângulo de atrito da camada de areia superficial, bem como no ângulo de atrito e coesão da camada de aterro compactado.

Figura 62 - Resultado da Seção B-B - Operação Normal – Não drenado– (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

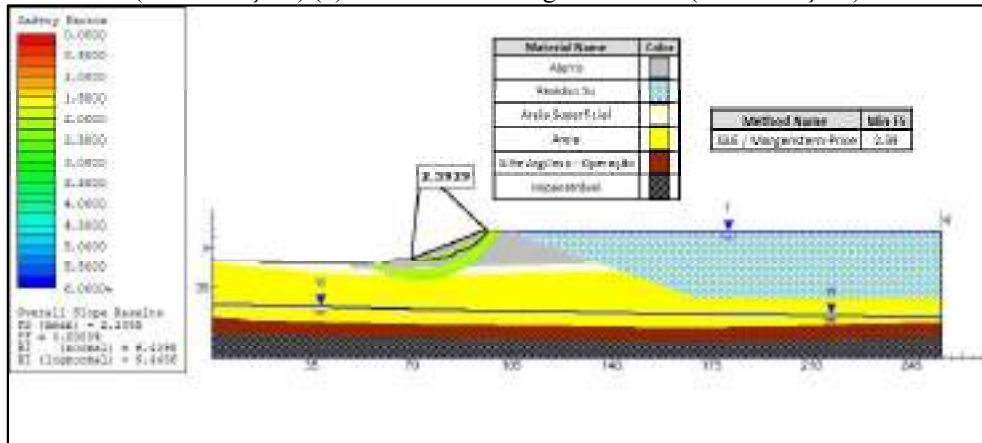


(b)

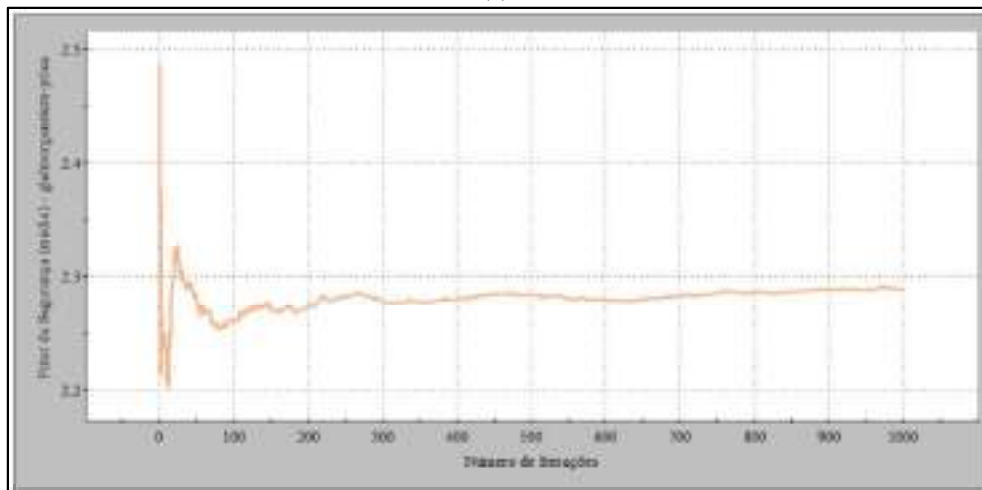
Fonte: Autora (2023)

Ao analisar os resultados da abordagem probabilística, apresentados nas Figuras 63-(a) e 63-(c), nota-se que o FS médio probabilístico atingiu aproximadamente 2,27, representando um valor considerado elevado para este cenário. A Pr foi de 0% em ambas as iterações, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,01 (valor normal) a 8,79 (valor log-normal) ambos alinhados com os valores estabelecidos pela USACE (1997). Quanto às curvas apresentadas nas Figuras 63-(c) e 63-(d), nota-se que os resultados tendem a adotar um comportamento estável em torno de 2,27 a partir de 1000 iterações. Neste sentido, para este cenário de carregamento, nenhuma das análises realizadas indicaram cenário de instabilidade do talude.

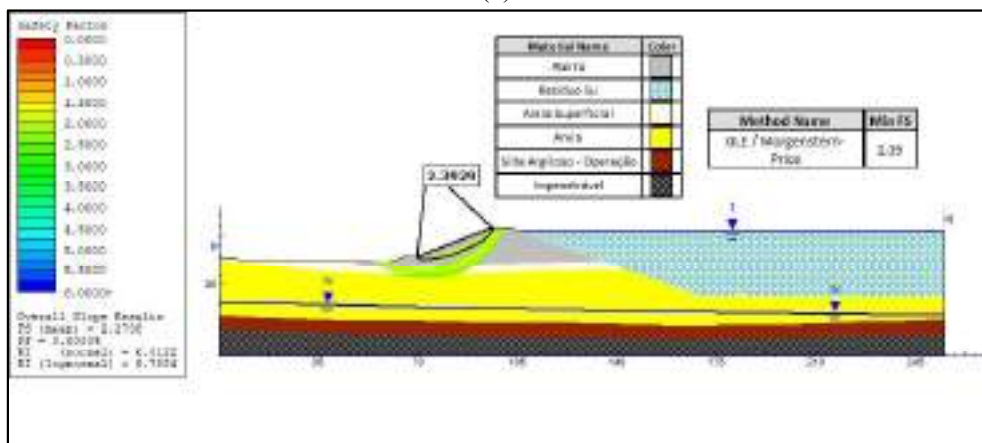
Figura 63 - Resultado da Seção B-B - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



(a)

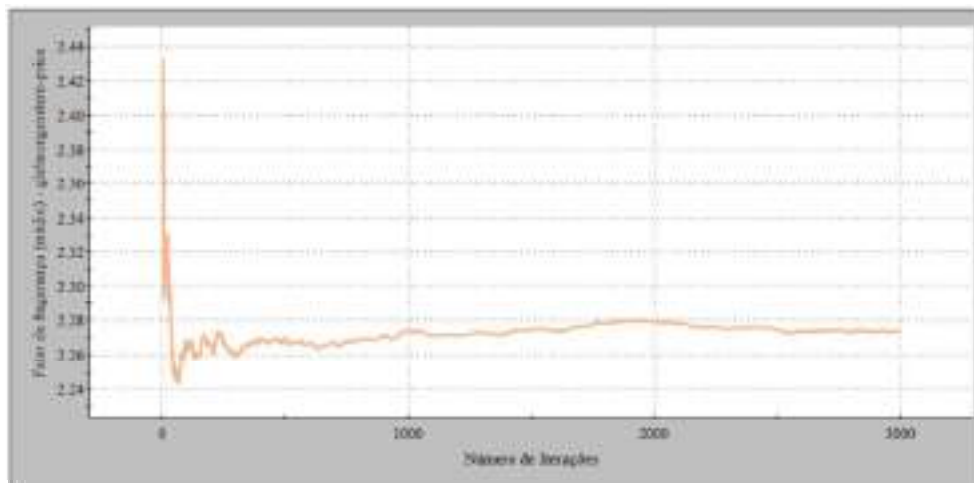


(b)



(c)





(d)

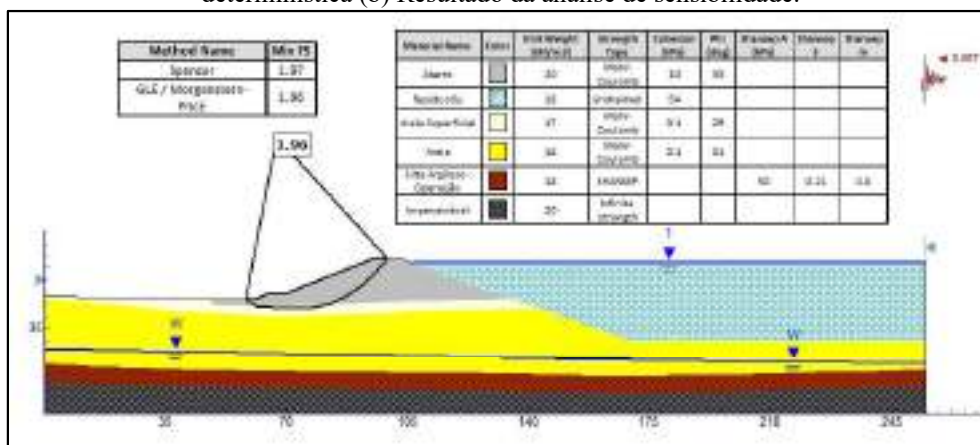
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.7 Solicitação Pseudoestática

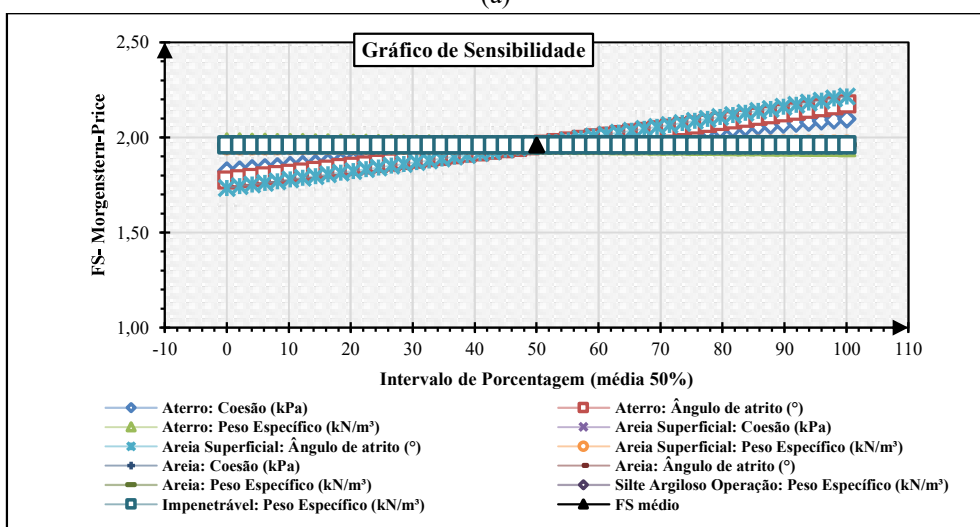
Os resultados das análises referentes a fase de operação sujeitas a solicitações pseudoestática, são destacados nas Figuras 64 a 69.

A introdução de carregamentos sísmicos horizontais na seção B durante a fase de operação, ocasionou a redução do FS passando de 2,39 do cenário de condição não drenada para 1,96 com a aplicação desse carregamento. Contudo, apesar dessa diminuição, o FS encontrado pela abordagem determinística ultrapassou o valor mínimo estabelecido para este cenário de 1,10 conforme define NBR 13028/17. Quanto aos resultados da análise de sensibilidade, ilustrados na Figura 64-(b), estes revelam uma variação do FS em relação as mudanças nos parâmetros de resistência da camada de areia superficial e aterro compactado.

Figura 64 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

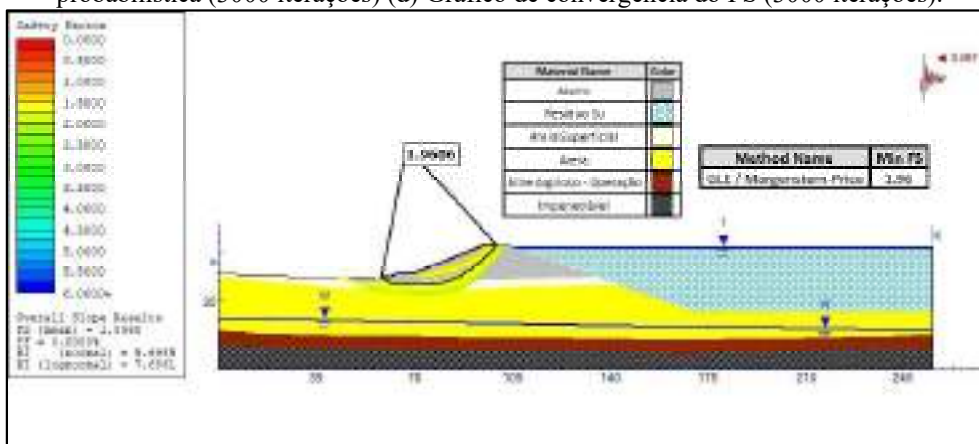


(b)

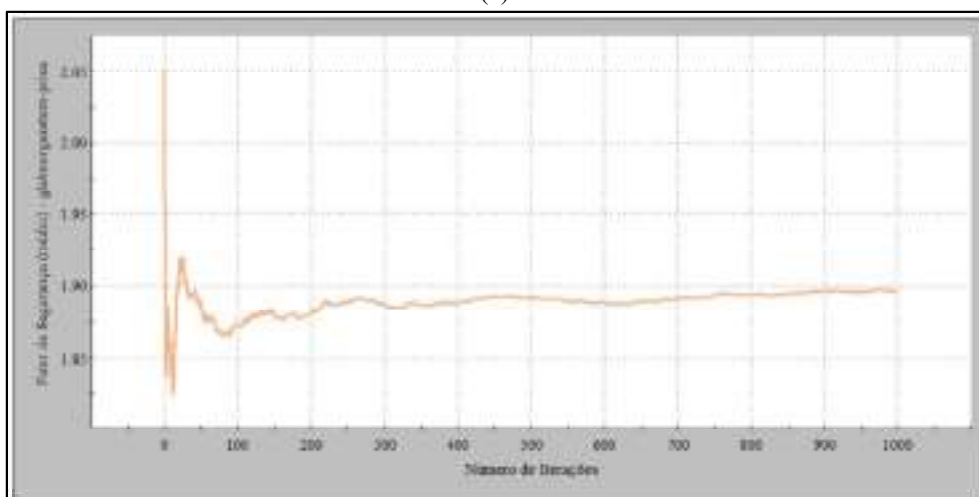
Fonte: Autora (2023)

Em relação aos resultados obtidos pela abordagem probabilística, conforme evidenciado nas Figuras 65-(a) e 65-(c), destaca-se um FS médio probabilístico de aproximadamente 1,88. Essa análise revelou ainda uma Pr nula, juntamente com índices de confiabilidade mínimos 5,31 (valor normal) a 7,14 (valor log-normal), ambos enquadrados como parâmetros aceitáveis de desempenho, conforme estabelecido pela USACE (1997). No que concerne às curvas apresentadas nas Figura 65-(c) e 65-(d), nota-se um comportamento inicialmente instável até 1000 iterações, evoluindo para uma estabilidade em torno de 1,88 a partir desse ponto.

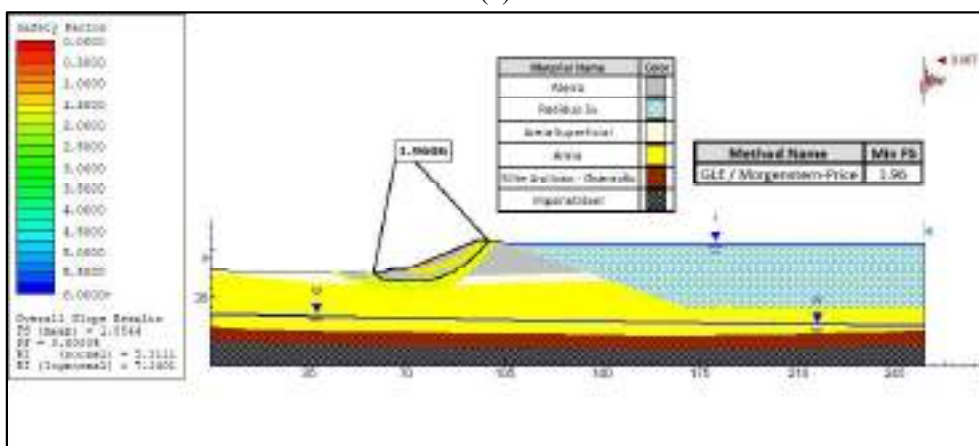
Figura 65 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



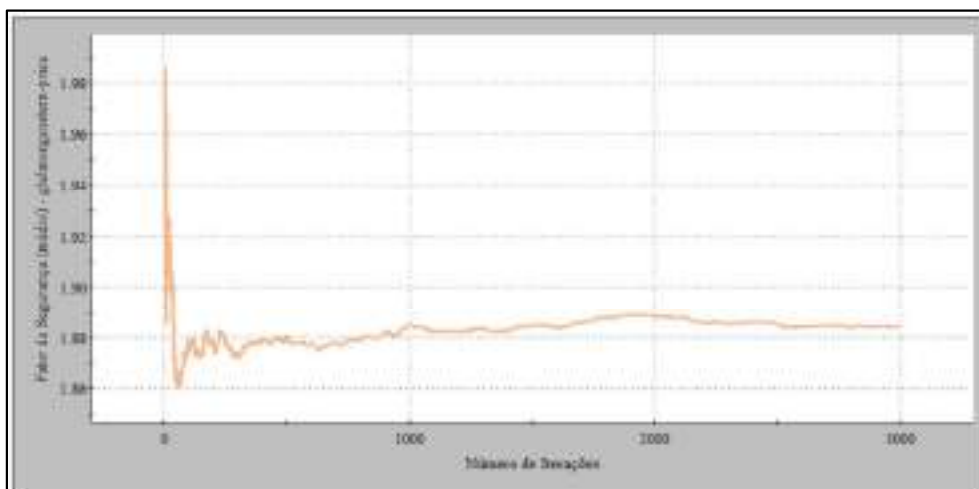
(a)



(b)



(c)

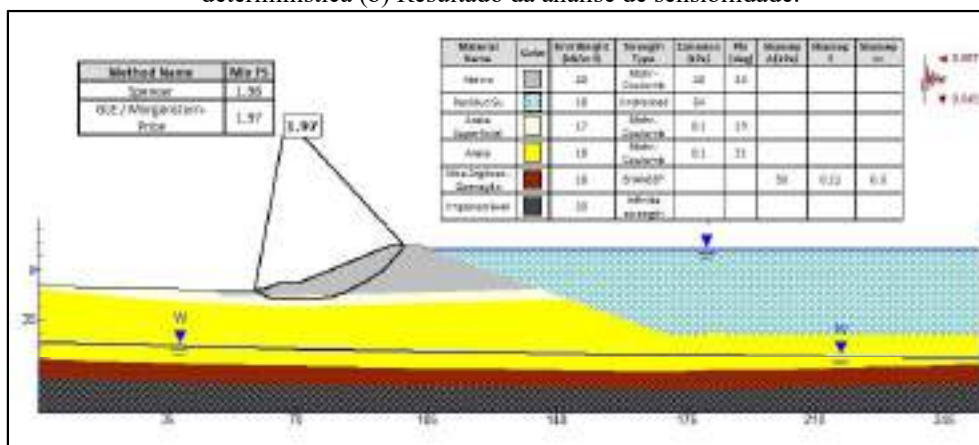


(d)

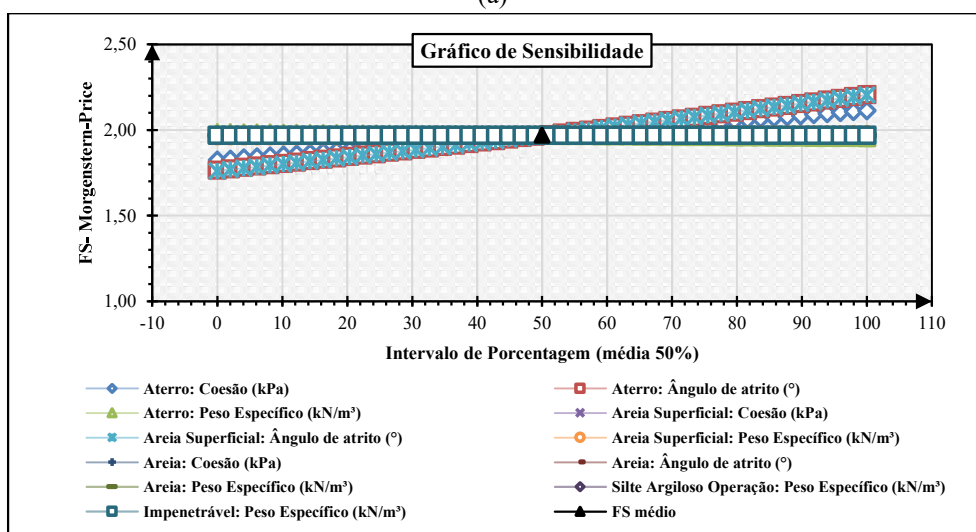
Fonte: Autora (2023)

As Figuras 66, 67, 68 e 69 exibem os resultados das análises para o cenário de operação com solicitação pseudoestática, considerando carregamentos horizontais e verticais com direções distintas. Analisando os dados da Figura 66-(a), observa-se que não houve uma variação significativa no FS com o incremento do carregamento vertical. Além disso os resultados apresentados na Figura 66-(b) exibiram comportamento semelhante ao observado na Figura 65-(b).

Figura 66 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

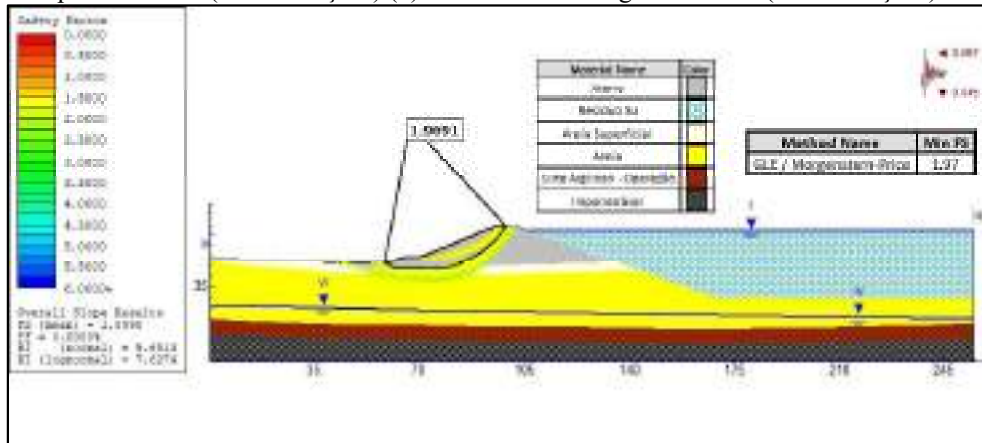


(b)

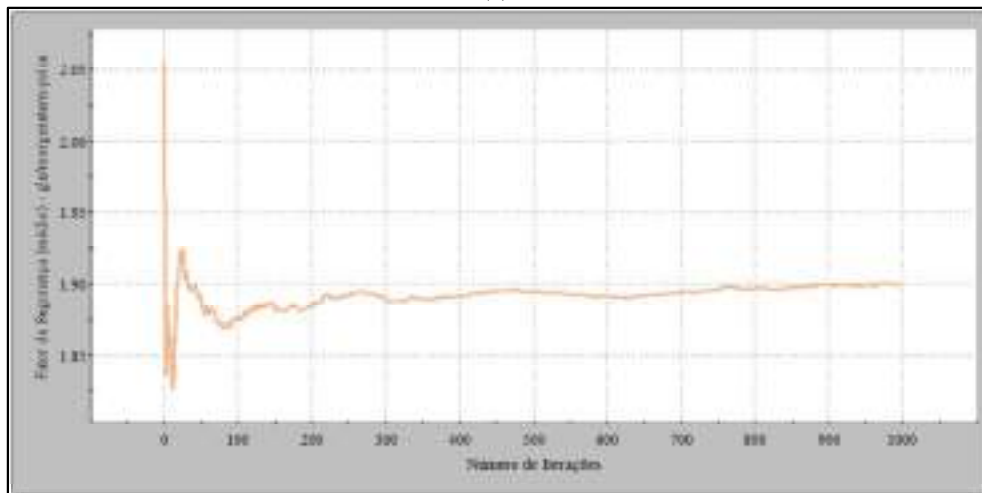
Fonte: Autora (2023)

No que diz respeito aos resultados da análise probabilística, representados na Figura 67-(a) e 67-(c), é possível observar que também não houve variação significativa dos resultados com relação ao cenário anterior. Os resultados da Figura 67-(b) e 67-(d), revelam uma instabilidade nas primeiras 1000 iterações, estabilizando-se em torno de 1,89 a partir desse ponto. Os resultados do terceiro cenário de carregamento encontram-se apresentados nas Figuras 68 e 69.

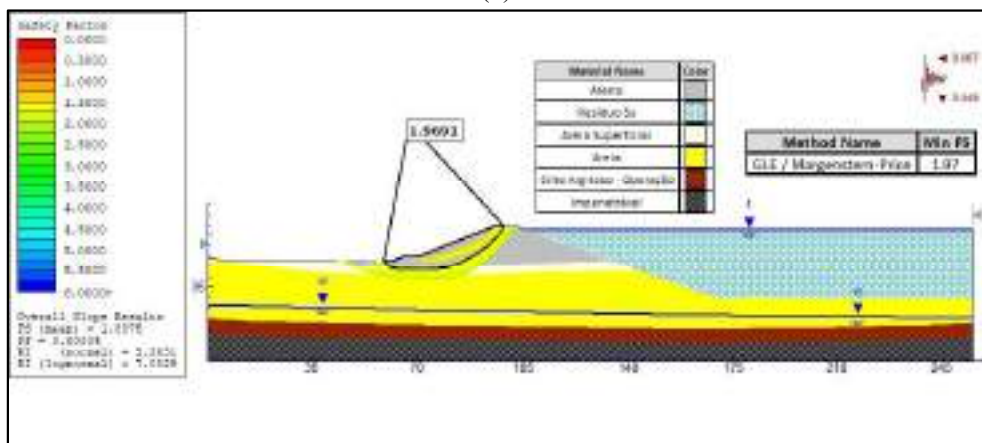
Figura 67 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



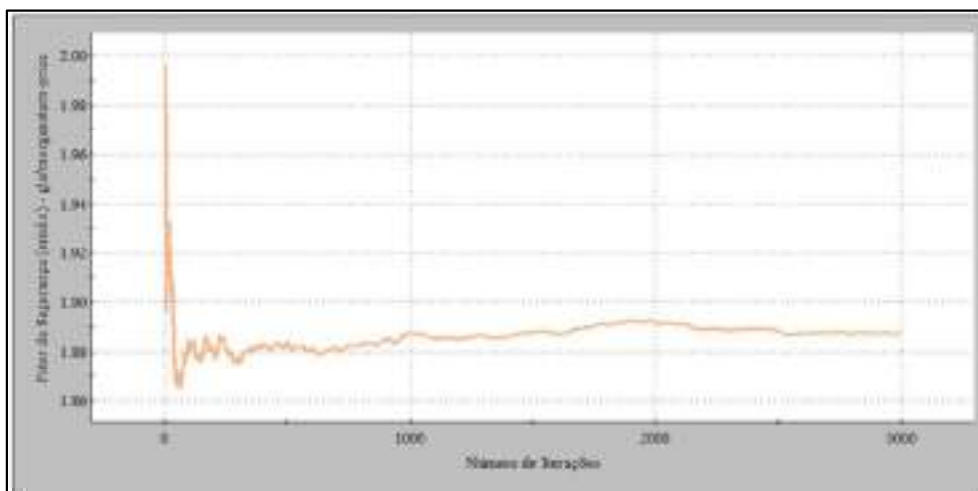
(a)



(b)



(c)

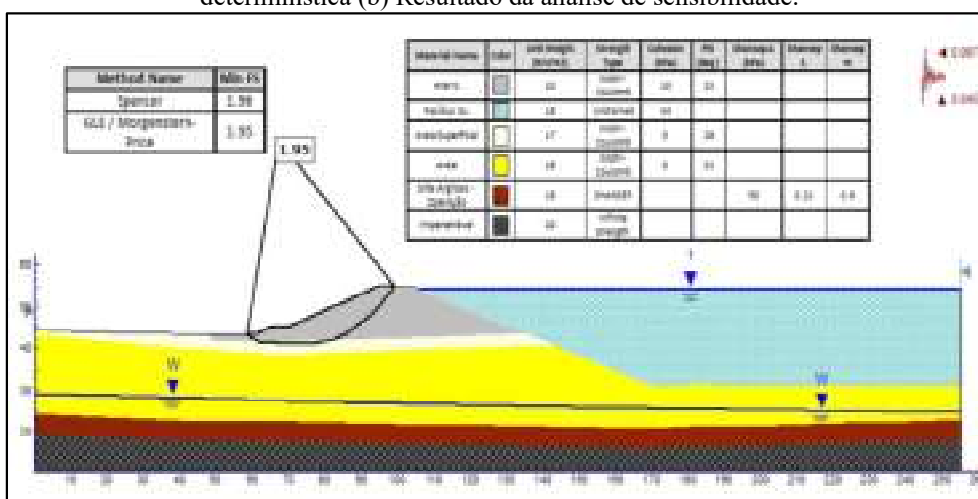


(d)

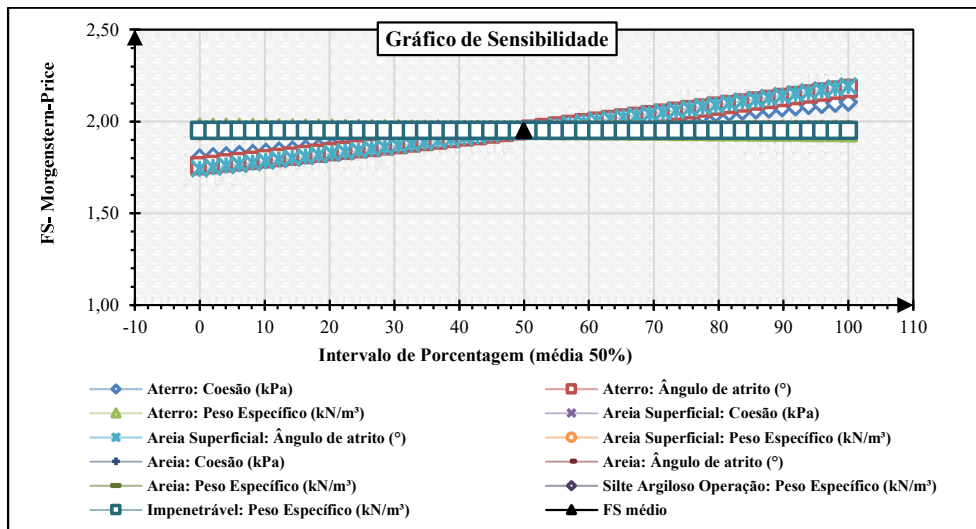
Fonte: Autora (2023)

Ao analisar os resultados das Figuras 68 e 69, observa-se que não há uma variação significativa no comportamento dos resultados em comparação com os dois cenários analisados anteriormente. Destaca-se, no entanto, que entre os três cenários de carregamento pseudoestático, este foi o que apresentou o menor FS, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística, configurando-se como o cenário mais crítico. Apesar disso, os valores obtidos indicam a estabilidade do talude diante dessas solicitações, atendendo aos valores mínimos estabelecidos pela NBR 13028/17 e da USACE (1997). Com relação a convergência dos resultados, eles passaram a apresentar um comportamento estável a partir de 1000 iterações.

Figura 68 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



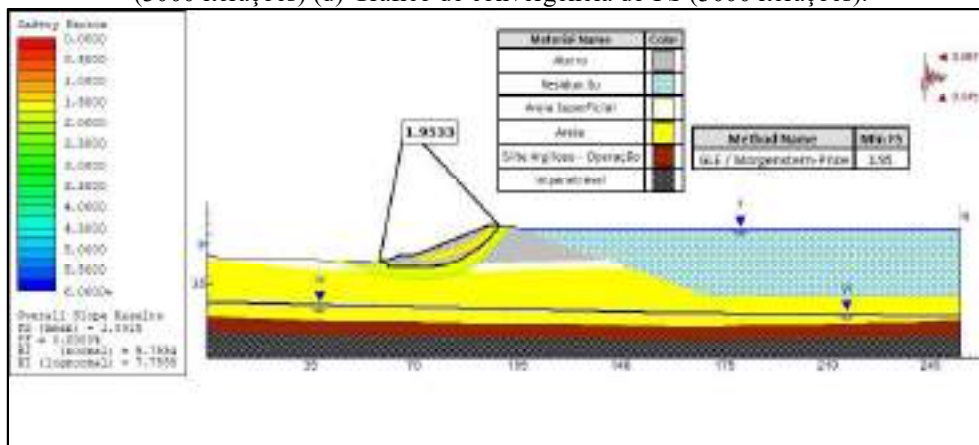
(a)



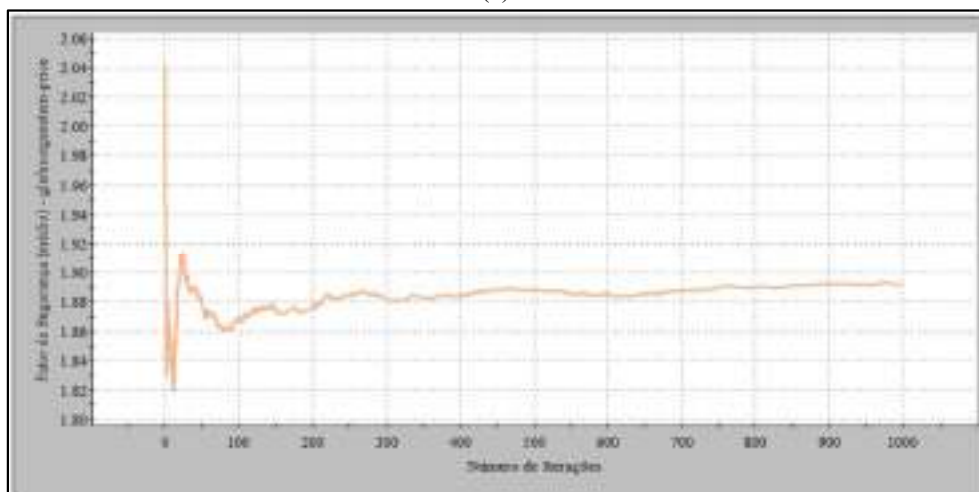
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 69 - Resultado da Seção B-B - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000) (b) Gráfico de convergência do FS (1000) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).

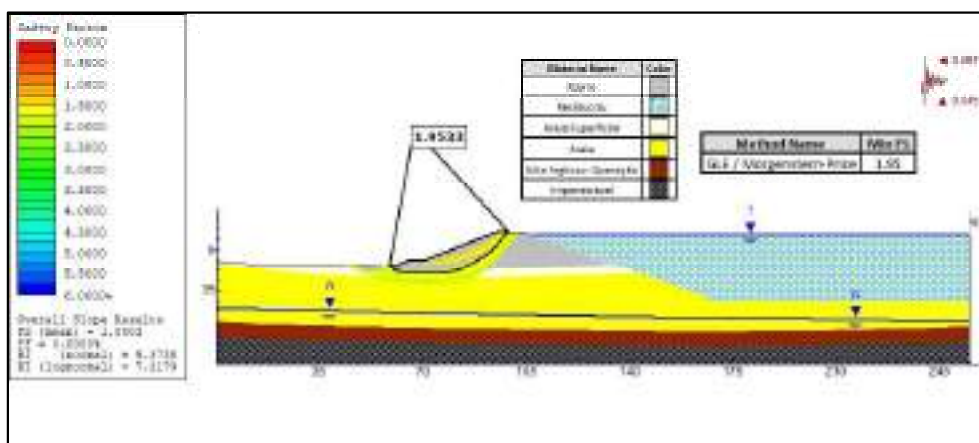


(a)

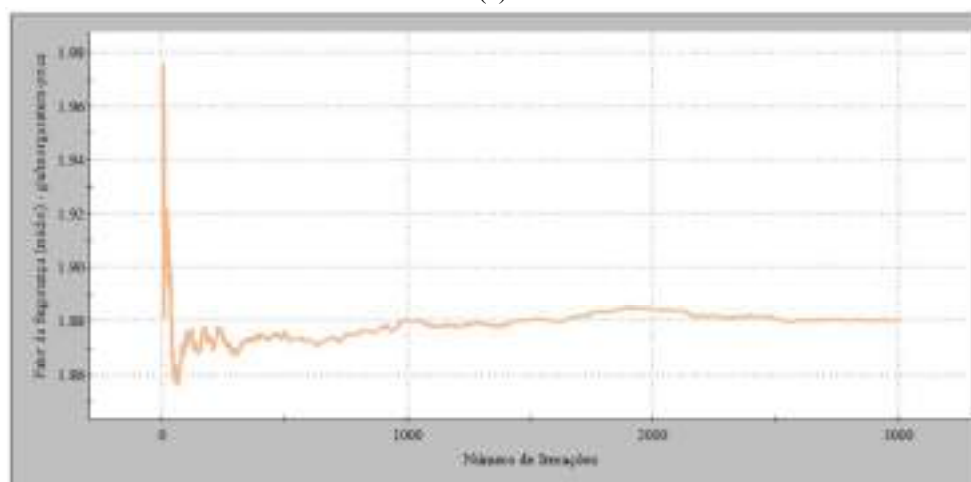


(b)





(c)



(d)

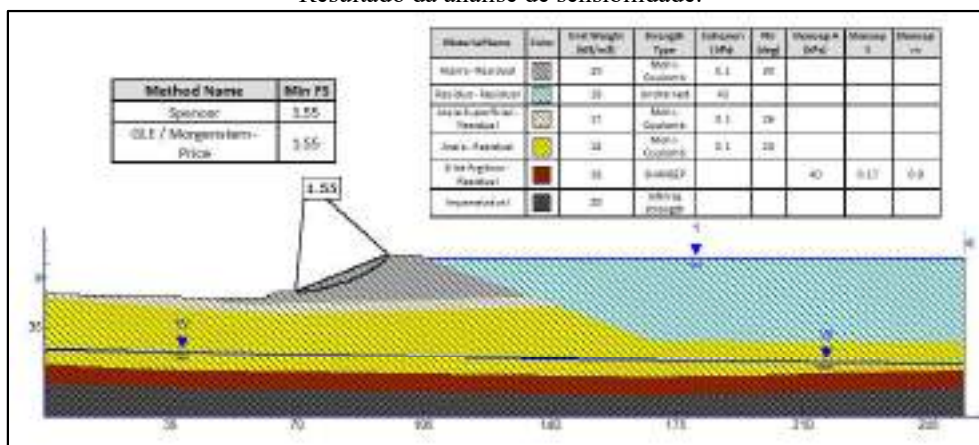
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.8 Solicitação Pós-sísmica

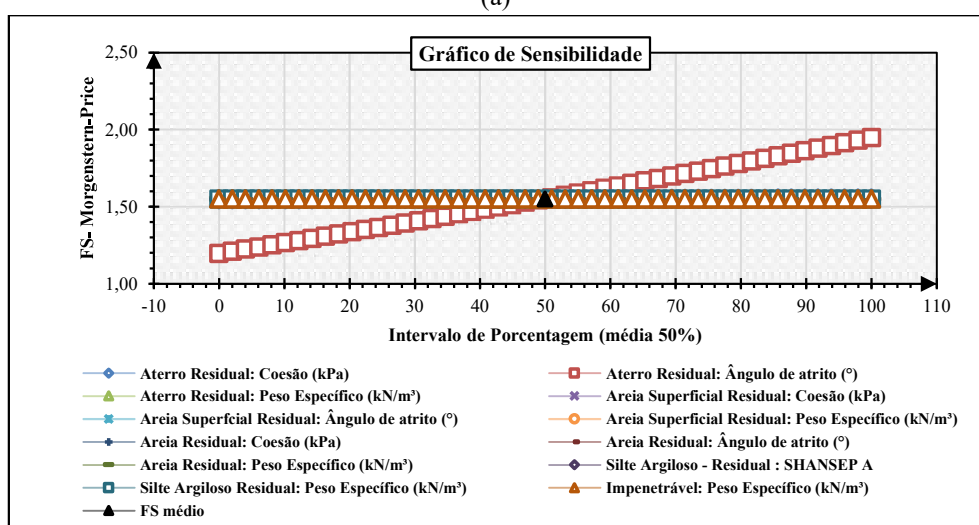
A avaliação da estabilidade considerando uma fase pós-sísmica também foi estudada, sendo seus resultados apresentados nas Figuras 70 e 71.

Avaliando os resultados da Figura 70-(a), observa-se novamente uma redução do FS determinístico, passando de 1,95 para 1,55 após a ocorrência de um carregamento pós-sísmico. Este comportamento é decorrente da diminuição dos parâmetros geotécnicos em resposta a um evento sísmico e encontram-se em conformidade com a ANCOLD (2019). Em relação ao resultado da análise de sensibilidade apresentada na Figura 70-(b), destaca-se que o FS é influenciado apenas pela variação do ângulo de atrito residual da camada de aterro compactado.

Figura 70 - Resultado da Seção B-B - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

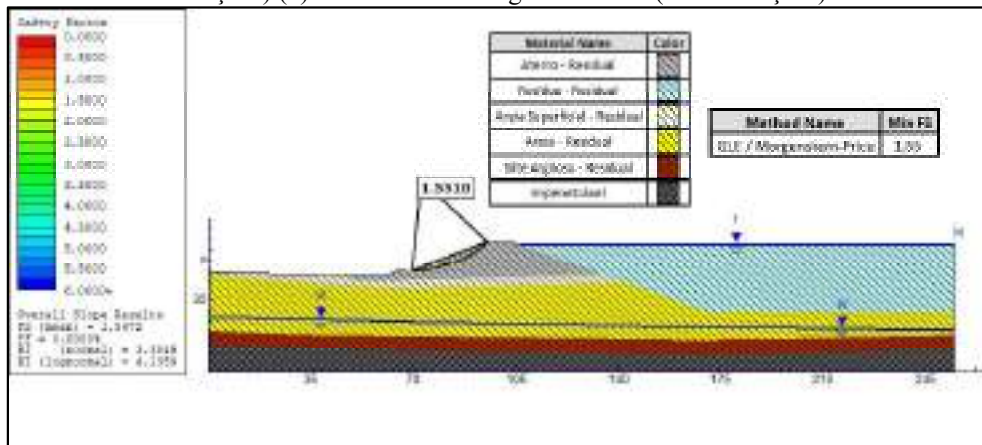


(b)

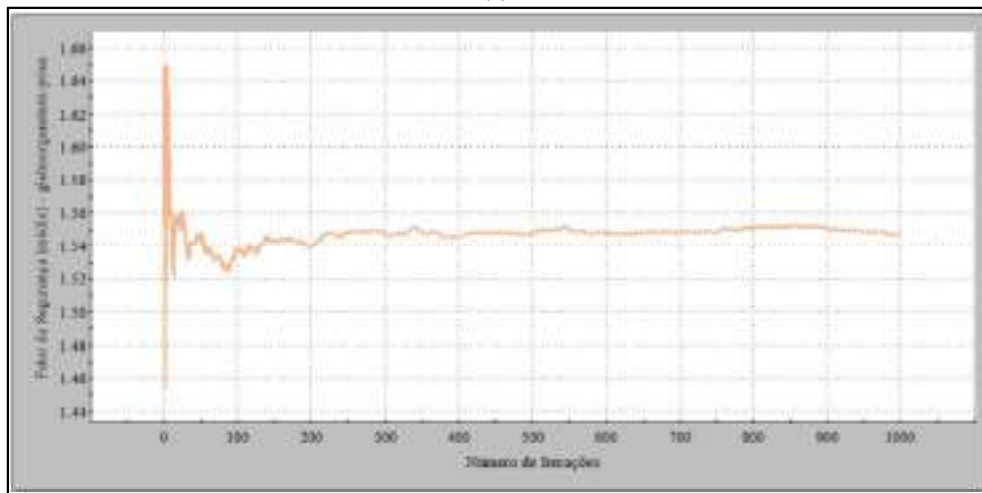
Fonte: Autora (2023)

No que concerne aos resultados da análise probabilística, as Figuras 71-(a) e 71-(c), indicam que o FS médio probabilístico igual a 1,55 para ambas as iterações, assemelhando-se ao valor encontrado pela abordagem determinística. Além disso, os resultados dessa análise mostraram uma Pr nula e índices de confiabilidade mínimos variando entre 3,33 (valor normal) a 4,07 (valor log-normal), sendo estes os menores valores observados para a seção B, e estando em conformidade com o estabelecido pela USACE (1997). Quanto às curvas apresentadas nas Figuras 71-(b) e 71-(d), é possível observar uma convergência dos resultados em torno de 1,55 a partir de 1000 iterações.

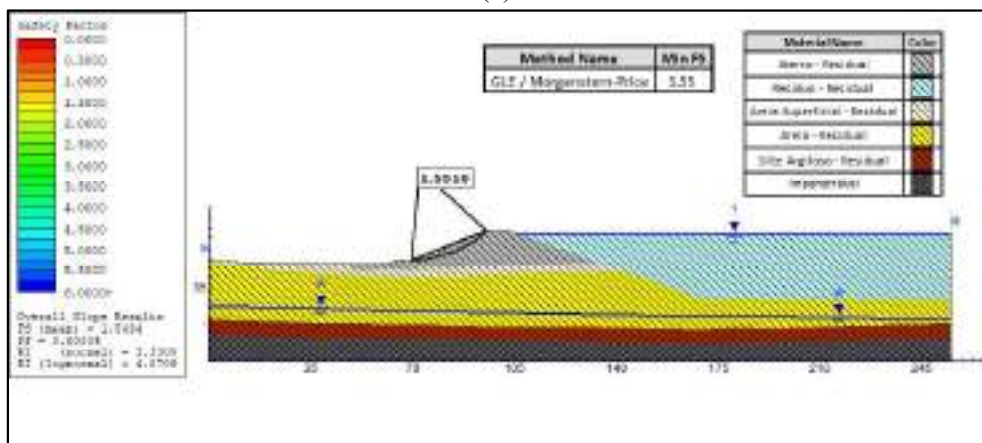
Figura 71 - Resultado da Seção B-B - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



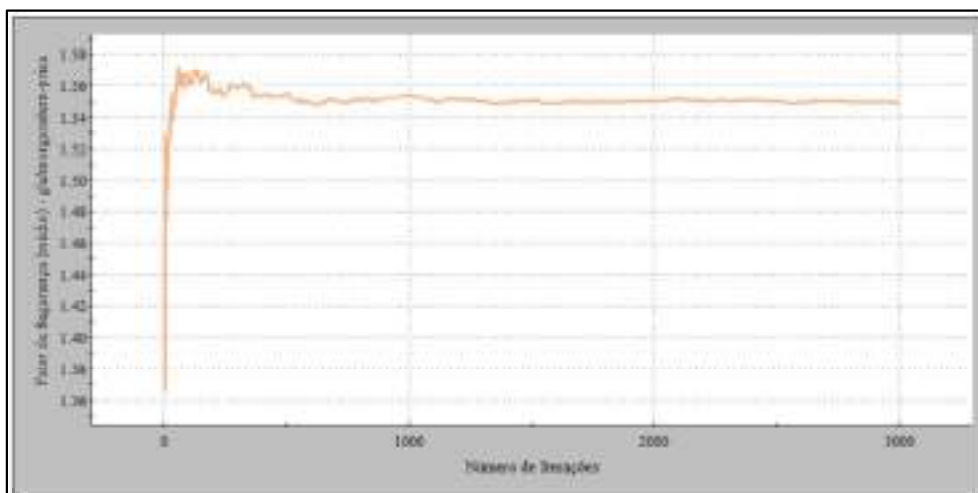
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 21, estão organizados os resultados encontrados a partir da aplicação de análise probabilística para a seção B, considerando um número de iterações variado entre 1000 e 3000. Ao examinar a tabela e utilizar os valores de referência do item 3.8, é possível inferir que os taludes da seção B demonstraram estabilidade diante dos dez cenários de carregamentos avaliados, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística.

Tabela 21 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção B-B.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				3000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,73	1,7	0	4,78	6,13	1,70	0	4,73	6,06
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,71	1,66	0	6,05	7,68	1,64	0	5,31	6,71
Final de construção Sem Ru	J	1,3	2,39	2,29	0	6,41	9,4	2,28	0	5,99	8,76
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,97	1,92	0	4,31	5,83	1,82	0	4,27	5,78
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,38	2,29	0	6,42	9,41	2,27	0	6,02	8,8
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	2,39	2,29	0	6,44	9,44	2,27	0	6,01	8,79
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,96	1,90	0	5,70	7,69	1,88	0	5,31	7,14
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,97	1,89	0	5,65	7,63	1,89	0	5,27	7,08
			1,95	1,89	0	5,76	7,76	1,88	0	5,37	7,22
	J	1,0	1,55	1,55	0	3,38	4,14	1,55	0	3,33	4,07

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

### 5.3 SEÇÃO C

A seguir são expostos os resultados das análises determinísticas, de sensibilidade e probabilísticas realizados na geometria da seção C para 1000 e 5000 iterações.

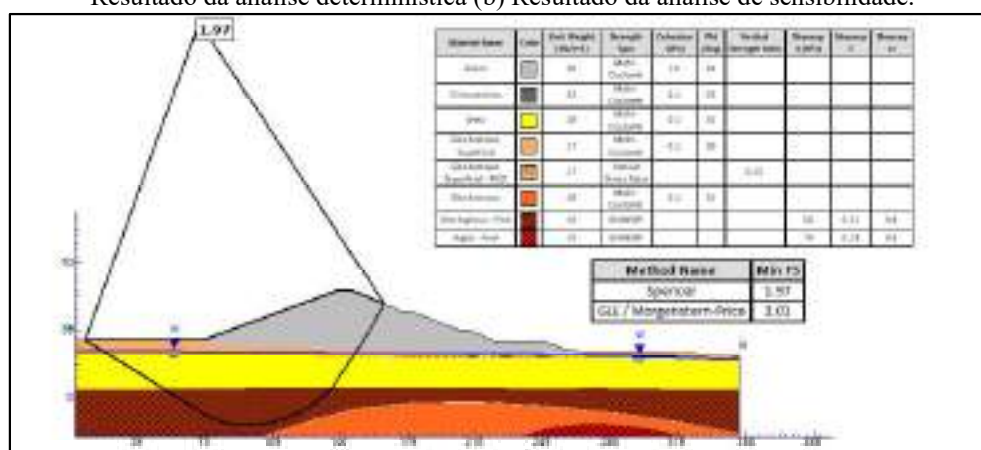
#### 5.3.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

As Figuras 72 e 73 exibem os resultados das análises para a fase final de construção do talude montante, considerando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro.

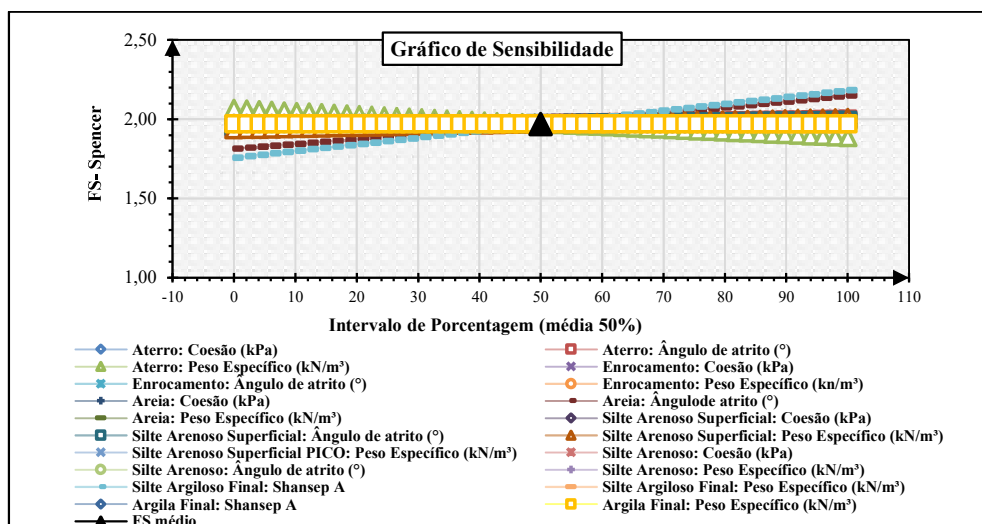
A fundação da seção C, conforme é mostrado na Figura 72-(a) é composta por sete camadas de materiais diferentes denominados de: areia, silte arenoso superficial, silte arenoso-pico, silte arenoso, silte-argiloso, argila final e impenetrável. Ao examinar o perfil desta seção, é possível observar que o aterro compactado estará apoiado em uma fundação considerada sensível, devido a existência de uma camada extensa de material silte-argiloso.

Ao examinar a seção para a fase de final de construção, nota-se pela Figura 72-(a), que a SPR intercepta a camada de material silte-argiloso, sugerindo que a estabilidade da estrutura será significativamente influenciada pelas condições de resistência desse material. A análise de sensibilidade da Figura 72-(b), confirma que a estabilidade é de fato afetada pelos parâmetros de resistência da camada de material silte-argiloso. No entanto, é válido destacar que a estabilidade também sofre influência do ângulo de atrito da areia e do peso específico da camada de aterro. Por ambos os métodos determinísticos analisados, o talude se mantém estável, sendo o menor FS encontrado igual 1,97 obtido pelo método de Spencer, superando o mínimo exigido pela NBR 13028/17.

Figura 72 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

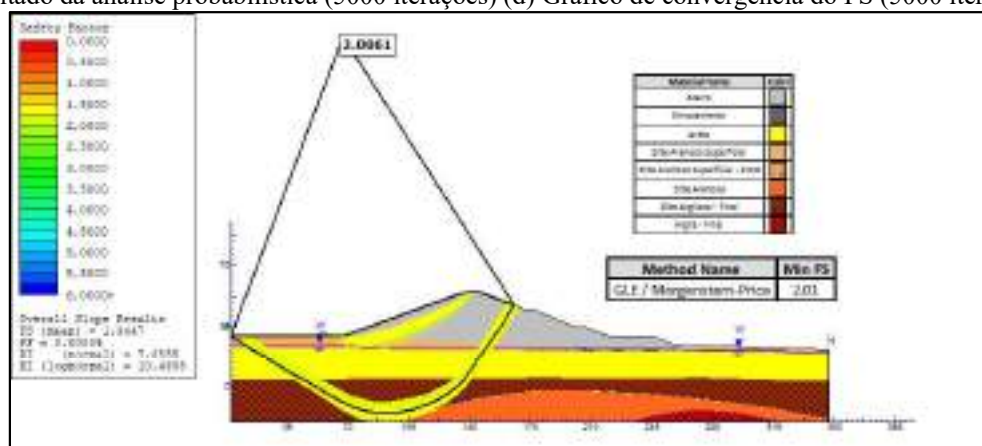


(b)

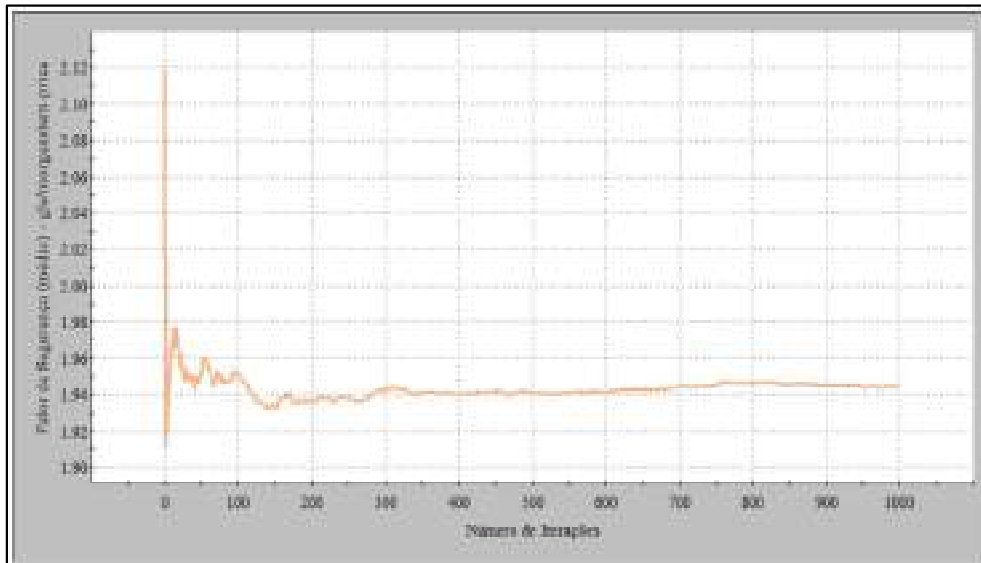
Fonte: Autora (2023)

Com base nos resultados apresentados nas Figura 73-(a) e 73-(c), observa-se que o FS médio probabilístico foi igual a 1,94 próximo ao valor determinístico encontrado pelo método de Spencer de 1,96. Observa-se ainda que a Pr encontrada foi igual a 0% e os índices de confiabilidade mínimos variaram entre 7,66 (valor normal) a 10,46 (valor log-normal). Estes resultados apontam para um talude com comportamento estável para essa condição, tendo como referência os valores aceitáveis de desempenho da USACE (1997). As curvas apresentadas na Figura 73-(c) e Figura 73-(d) revelam que os resultados tendem a convergir para 1,94, se estabilizando a partir de 2000 iterações. Com base nesses valores e considerando os dados apresentados no item 3.8, é possível concluir que, no contexto desse cenário, o talude analisado se mantém estável.

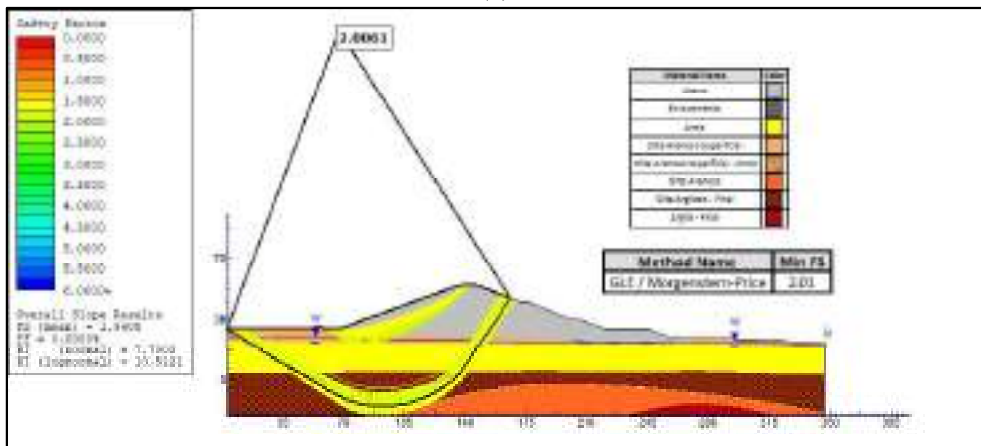
Figura 73 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



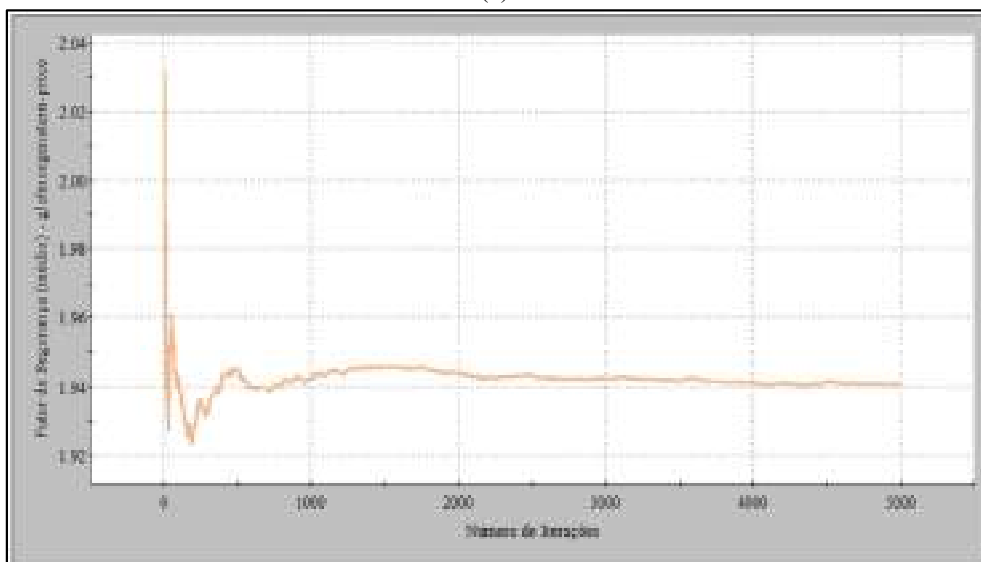
(a)



(b)



(c)



(d)

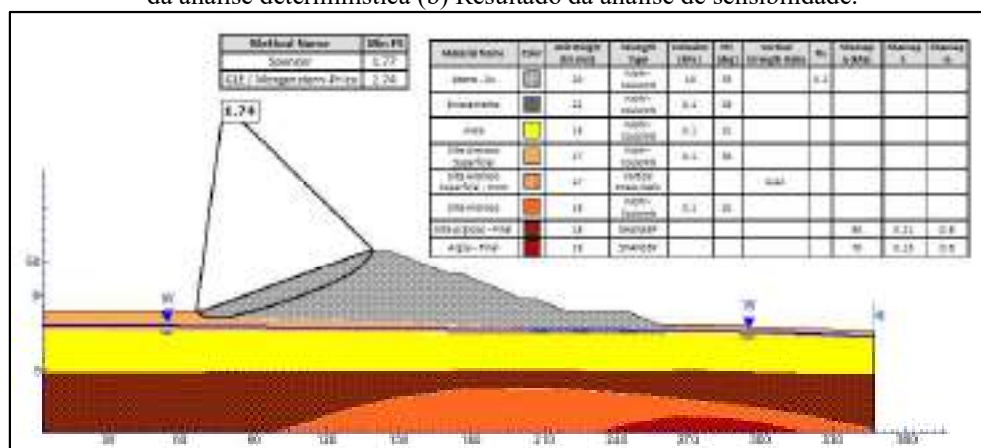
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

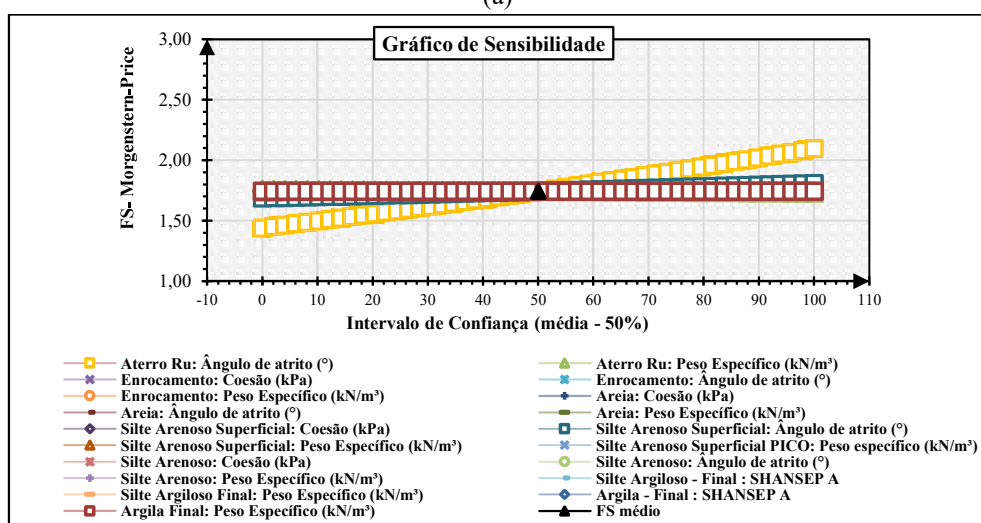
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude montante, considerando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro, são exibidos nas Figuras 74 e 75.

Na Figura 74-(a), é evidente não apenas uma diminuição do FS, mas também a observação de que a SPR se encontra inserida na camada de aterro compacto, sendo esta a mais suscetível à instabilidade para esta condição. Essa observação é respaldada pelos resultados da análise de sensibilidade apresentados na Figura 74-(b), os quais evidenciam que o ângulo de atrito do aterro é o parâmetro mais influente no cálculo do FS. No que se refere a estabilidade, o talude se mantém estável para a condição analisada possuindo um FS de 1,74 superior ao mínimo admissível de 1,3 conforme cita a NBR 13028/17.

Figura 74 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

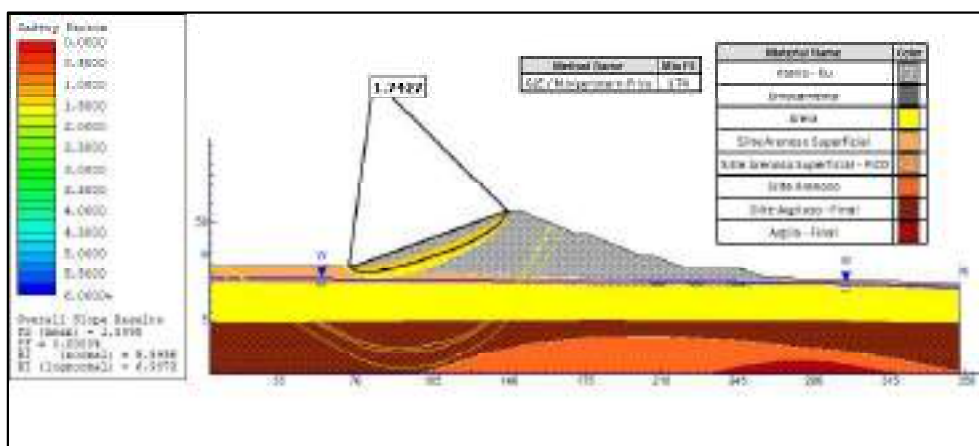


(b)

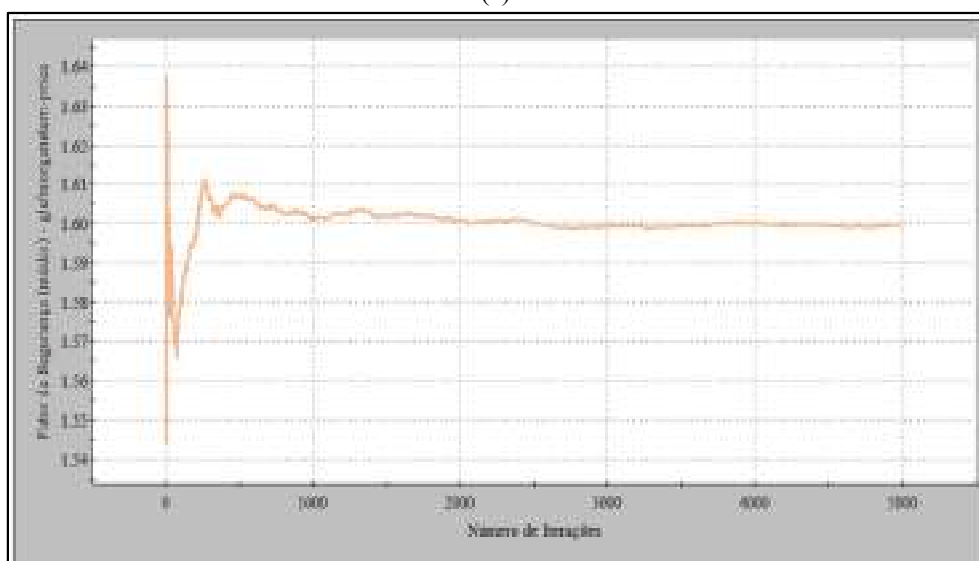
Fonte: Autora (2023)







(c)



(d)

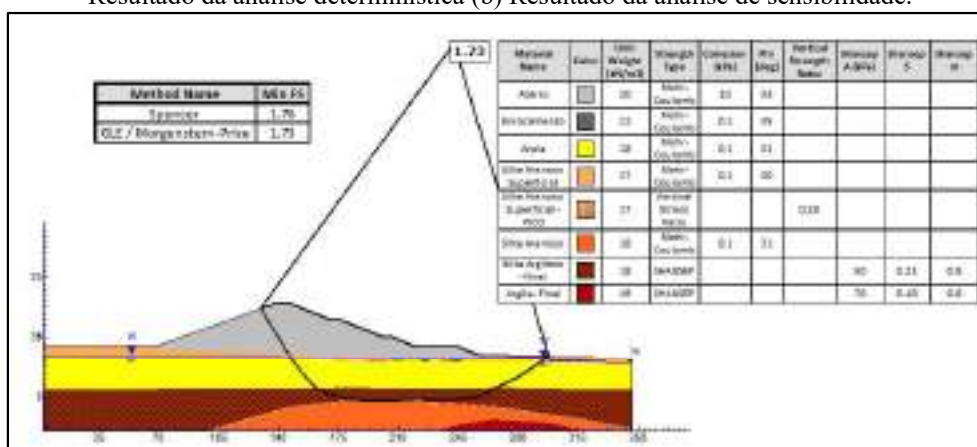
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

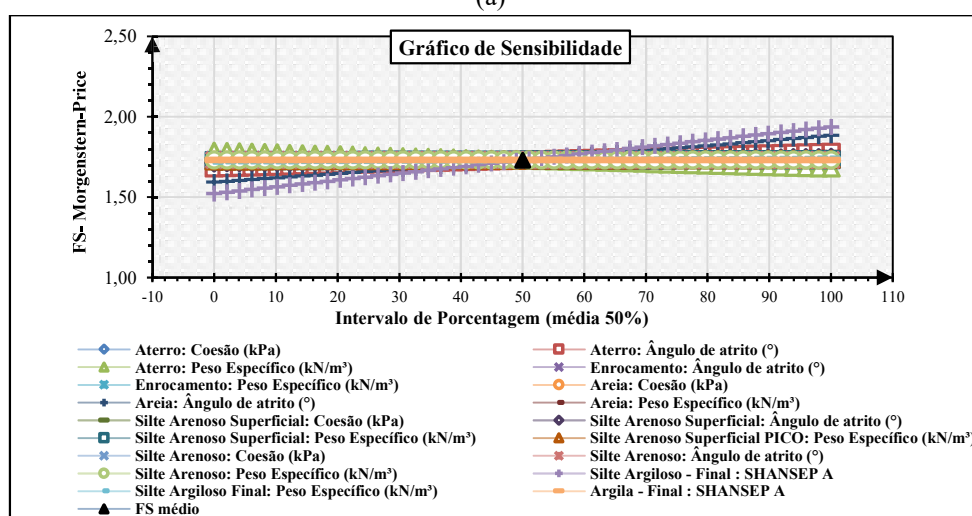
Os resultados das análises feitas para o cenário final de construção para o talude jusante, desconsiderando o parâmetro de poropressão na camada de aterro, são apresentados nas Figura 76 e 77.

Com base nos resultados das Figura 76-(a) e Figura 76-(b), é observado um comportamento semelhante com o cenário para o talude montante com diferença apenas na redução do FS para este cenário. Em termos de estabilidade, o talude se mantém estável pela abordagem determinística, possuindo um FS igual a 1,73 referente ao método de cálculo de Morgenstern-Price e atendendo as exigências da NBR 13028/17.

Figura 76 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

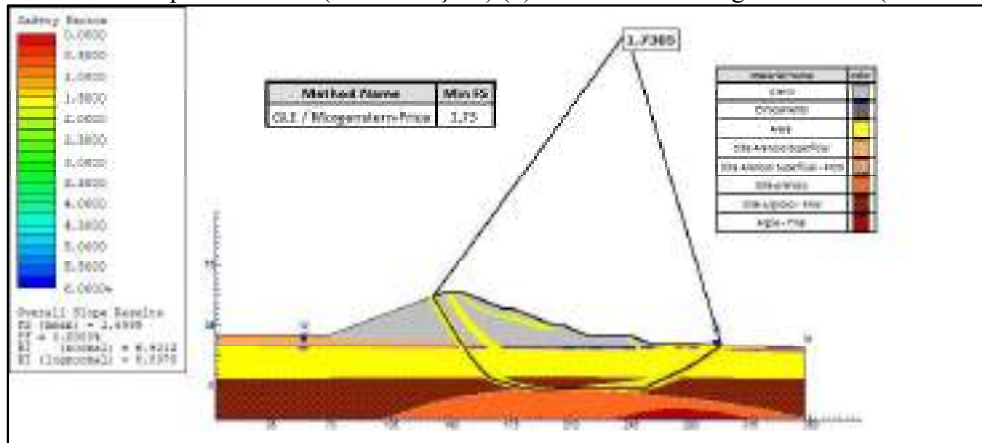


(b)

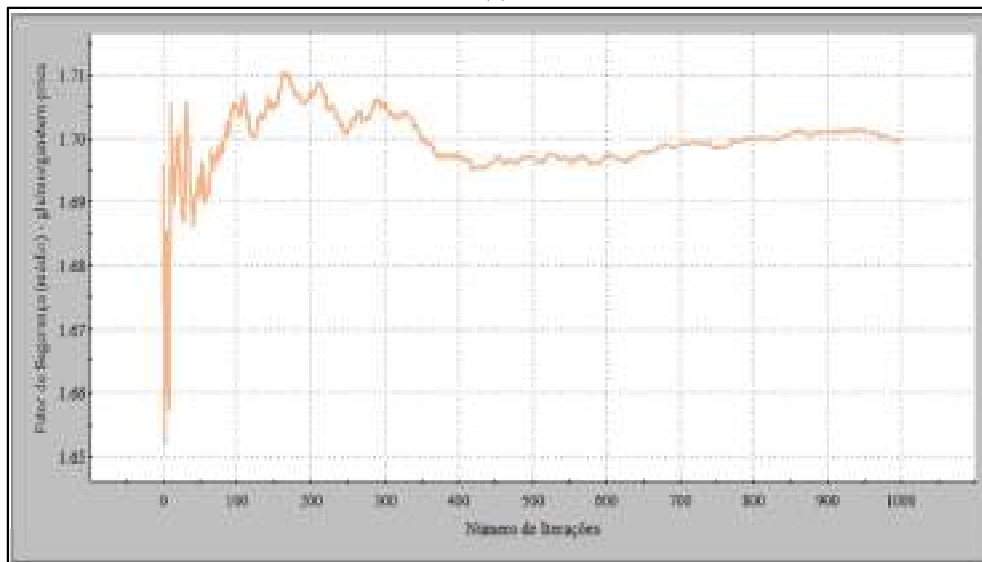
Fonte: Autora (2023)

Com base na Figura 77-(a) e 77-(c), destaca-se que o FS probabilístico para ambos os números de iterações foi igual a 1,70. Além disso, os resultados apontaram para uma Pr igual a 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,88 (valor normal) a 8,84 (valor log-normal), ambos considerados aceitáveis pela USACE (1997). Em relação a curva apresentada na Figura 77-(b), observa-se uma instabilidade nos resultados quando as análises foram conduzidas com 1000 iterações. Entretanto, ao elevar esse número para 5000, nota-se pela Figura 77-(d) que os resultados tendem a apresentar um comportamento estável a partir de 2000 iterações. Neste sentido, é possível dizer que o talude mantém a sua estabilidade, considerando as condições em que este foi analisado.

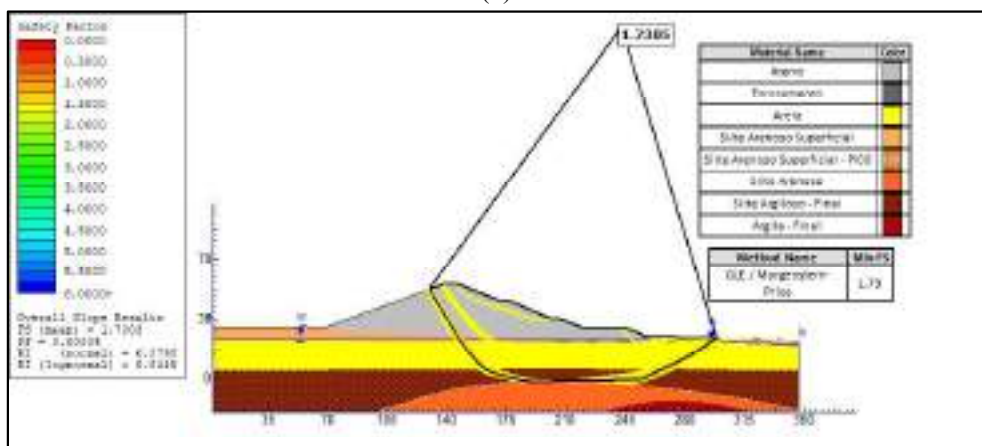
Figura 77 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



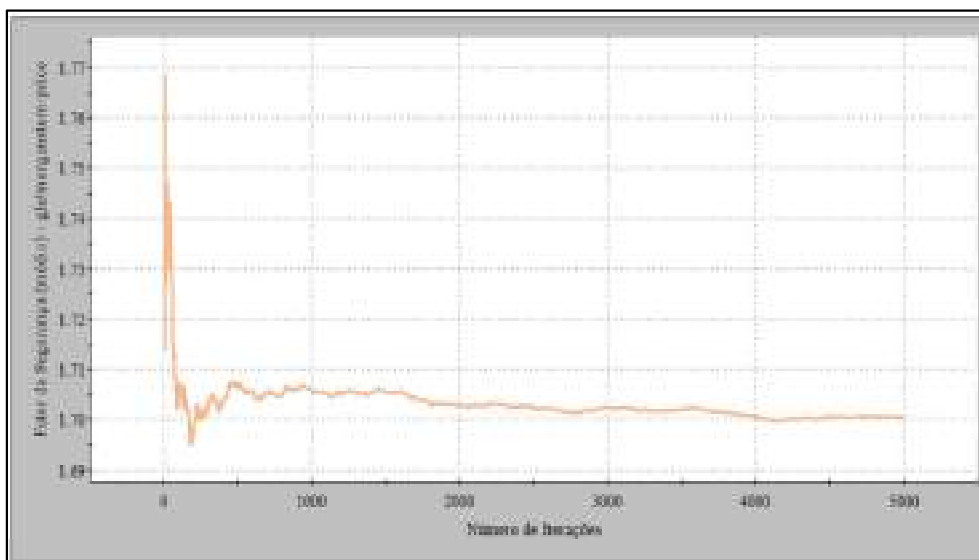
(a)



(b)



(c)



(d)

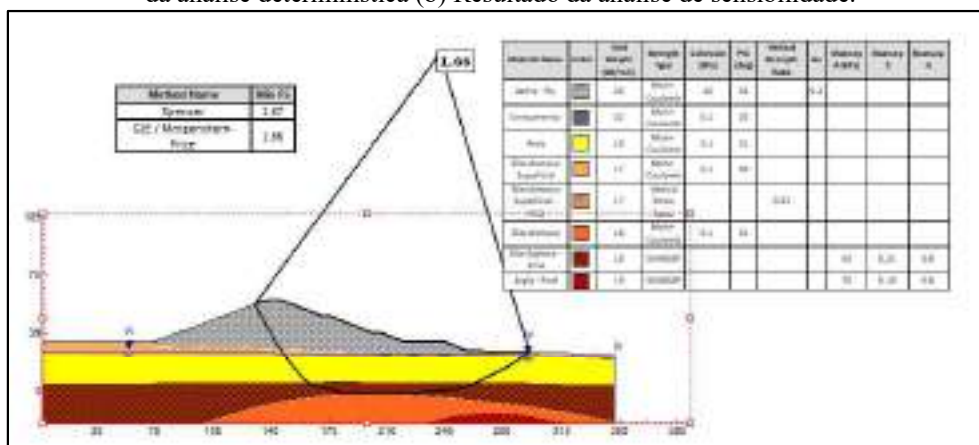
Fonte: Autora (2023)

#### 5.2.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

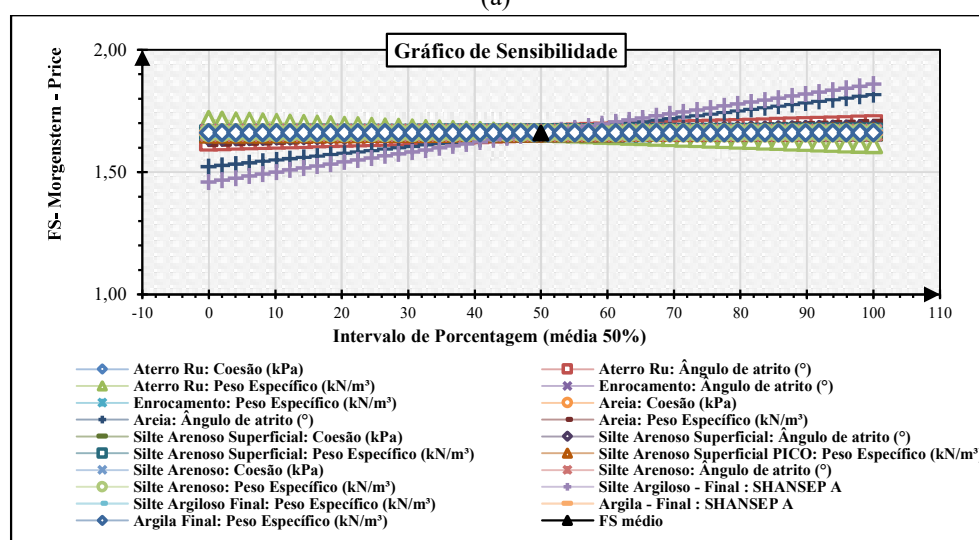
Os resultados para a fase de final de construção para o talude jusante considerando o parâmetro Ru, são apresentadas nas Figuras 78 e 79.

Os resultados da Figura 78-(a) apresentam uma redução do FS se comparado com a condição anterior. Contudo, mesmo havendo essa redução, o talude apresenta comportamento estável e com FS superior ao exigido pela NBR 13028/17. Os resultados das análises de sensibilidade, ilustradas na Figura 78-(b), apresentaram comportamentos semelhantes ao cenário sem o Ru, com uma leve variação negativa do peso específico do aterro, variação positiva do ângulo de atrito da camada de areia e da resistência não-drenada da camada de silte-argiloso.

Figura 78 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



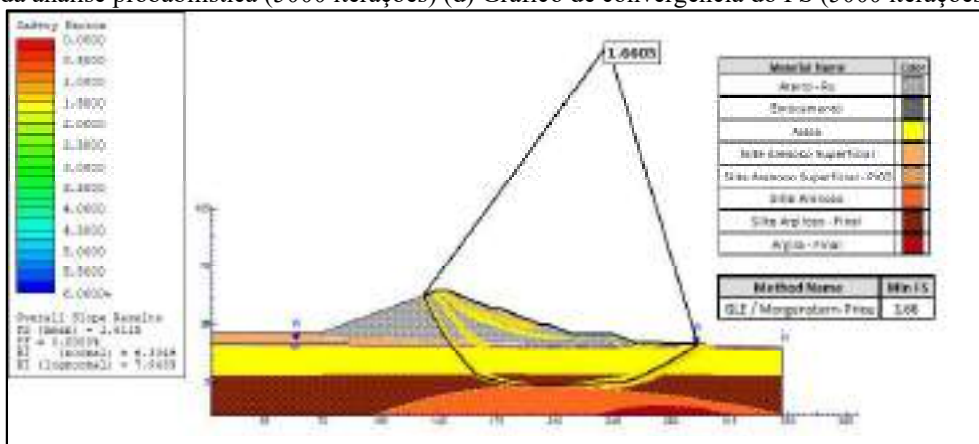
(b)

Fonte: Autora (2023)

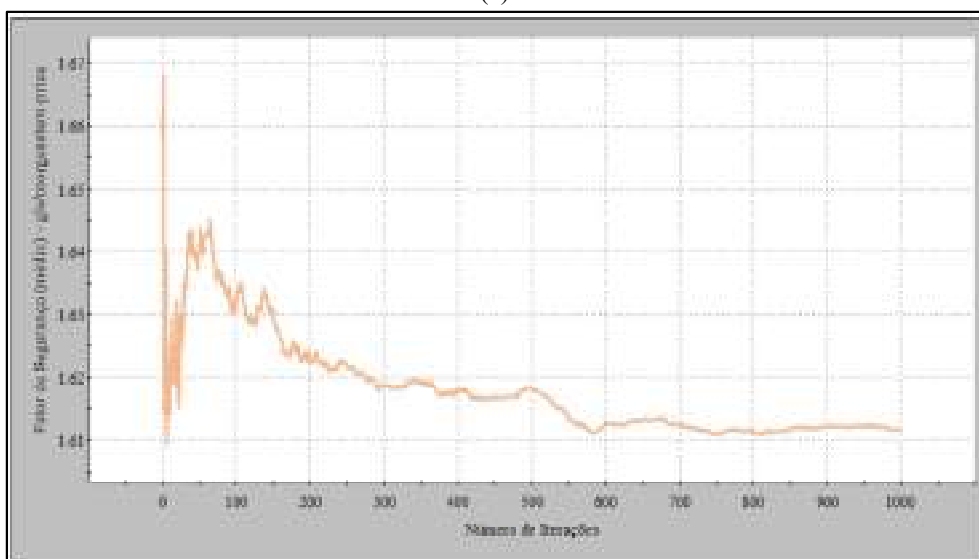
Observa-se, pela Figura 79-(a), que o FS médio probabilístico foi igual a 1,61 para ambos os números de iterações. Quanto aos demais parâmetros, constatou-se uma Pr de 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,23 (valor normal) a 7,79 (valor log-normal), ambos considerados adequados pela USACE (1997). Em relação à curva representada na Figura 79-(b), nota-se que para 1000 iterações os resultados apresentam uma variação significativa, não evidenciando uma convergência clara. No entanto, ao elevar esse número para 5000, conforme mostrado na Figura 79-(d), os resultados adquirem um comportamento estável, convergindo a partir de 2500 iterações.

Ao comparar os resultados de ambas as abordagens utilizadas para análise de estabilidade do talude jusante da seção C, é possível inferir que o talude se mantém estável diante das condições em que foi examinado.

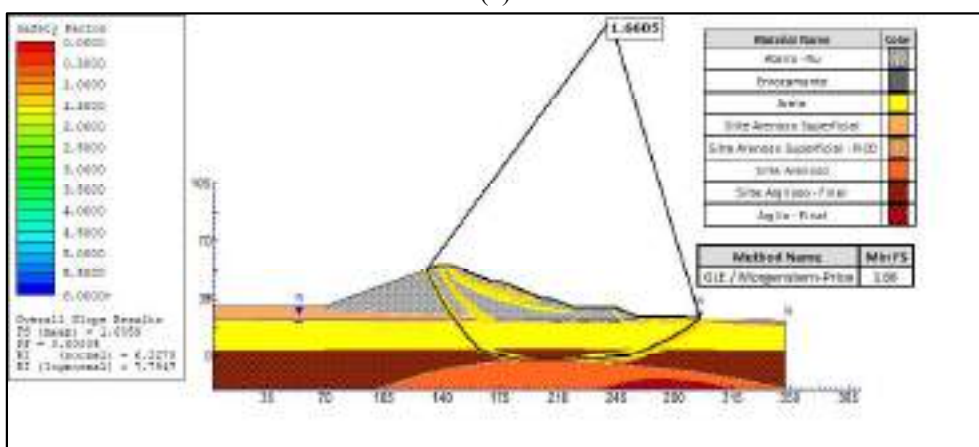
Figura 79 - Resultado da Seção C-C - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



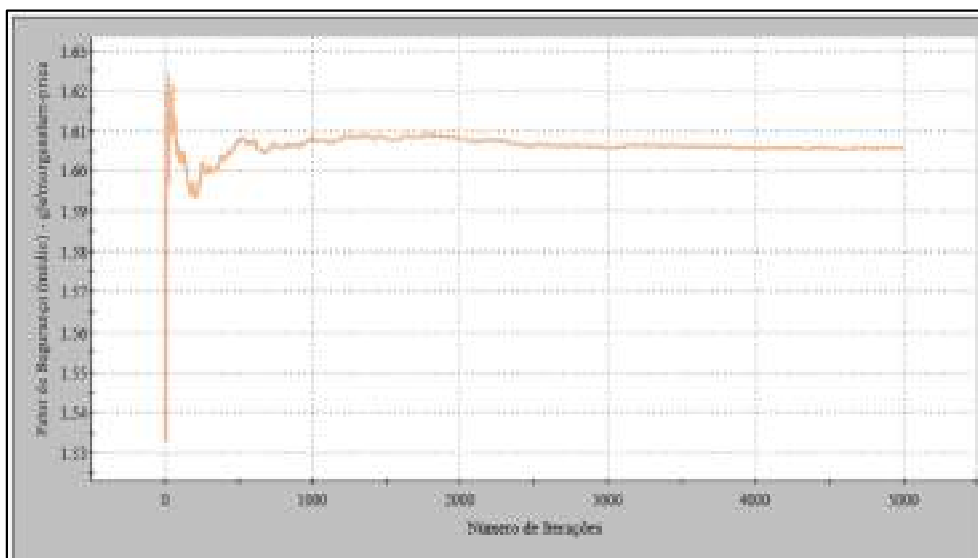
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

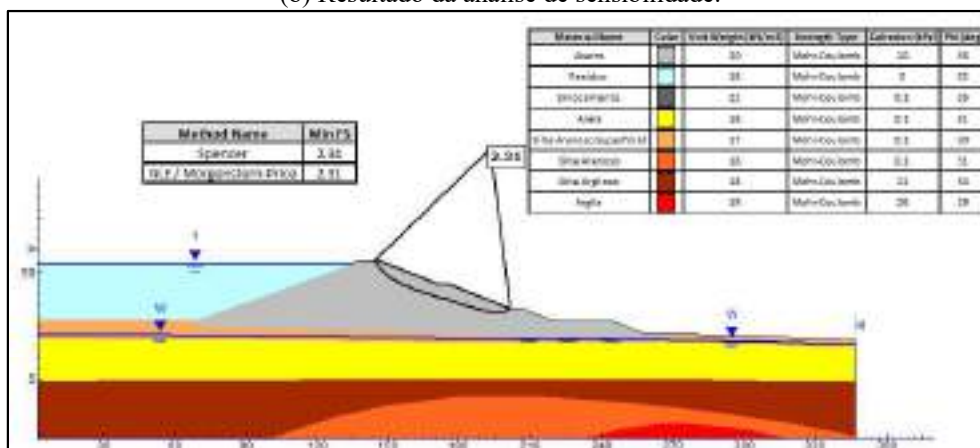
### 5.2.5 Operação Normal – Drenado

Os resultados para a fase de operação em condição normal drenado são apresentados nas Figuras 80 e 81.

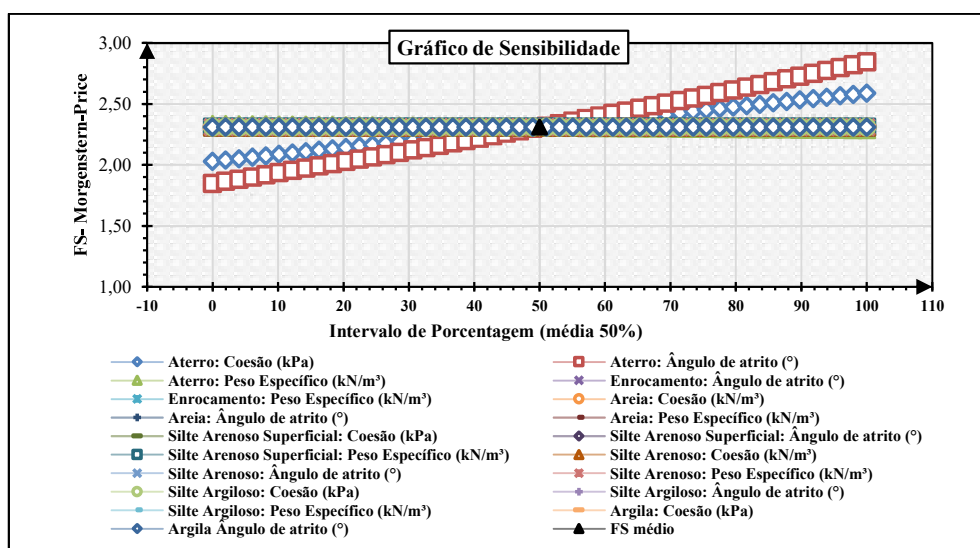
A análise de estabilidade determinística para a condição drenada, apresentou um FS de 2,31 superior ao mínimo admissível de 1,5 pela NBR 13028/17, caracterizando o talude como estável. Analisando ainda a Figura 80-(a), observa-se que a SPR fica totalmente inserida na camada de aterro compactado. Isso ocorre por haver um aumento de contato entre as partículas do solo da fundação, proporcionando um ganho de resistência nessas camadas, maior do que na camada de aterro. Quanto a análise de sensibilidade apresentada na Figura 80-(b), observa-se que os parâmetros que mais influenciam na magnitude do FS são ângulo de atrito e coesão do aterro compactado.



Figura 80 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

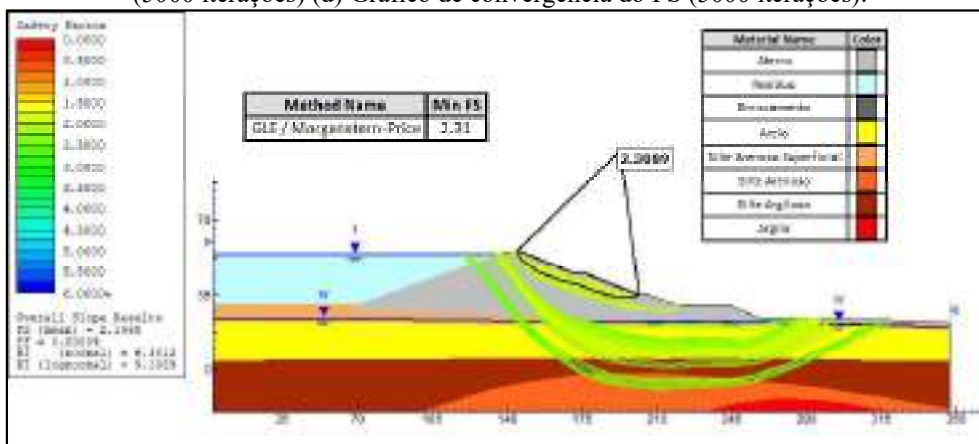


(b)

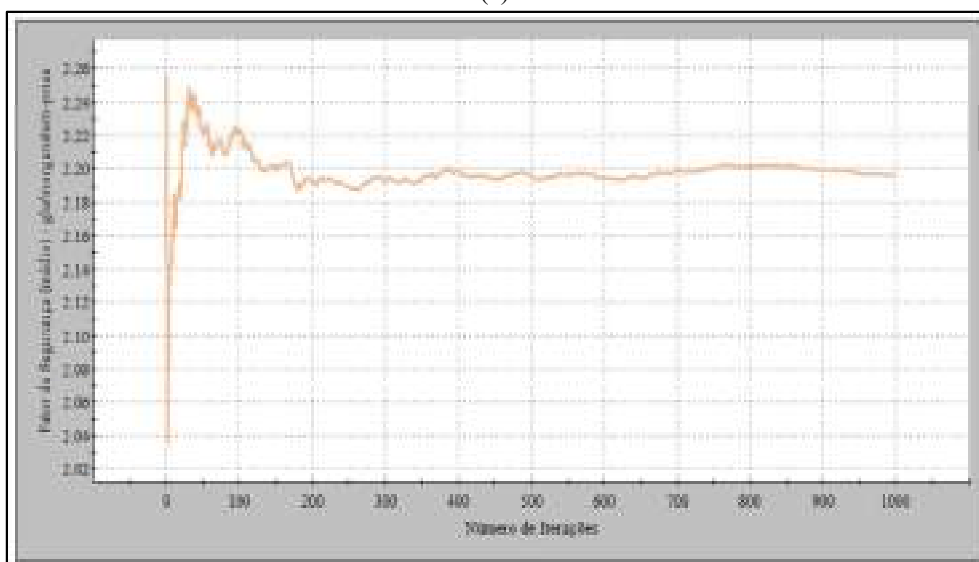
Fonte: Autora (2023)

Nas Figuras 81-(a) e 81-(c), os resultados da abordagem probabilística revelaram um FS médio para o talude jusante fixado em 2,20 para ambas as iterações. Em ambos os casos, a Pr é de 0%, acompanhada de índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,31(valor normal) a 9,09 (valor log-normal), classificando o desempenho do talude como elevado conforme os critérios da USACE (1997). Quanto ao gráfico de convergência na Figura 81-(b), este ilustra que os resultados das análises realizadas pelo método de Monte Carlo, tendem a convergir para um valor estável após aproximadamente 300 iterações, mantendo-se estável em torno de 2,20. Ao aumentar o número de iterações de 1000 para 5000, conforme representado na Figura 81-(d), nota-se que a estabilização dos resultados em torno de 2,20 torna-se mais acentuada. Os dados apresentados corroboram com a conclusão de que o talude demonstra uma estabilidade consistente.

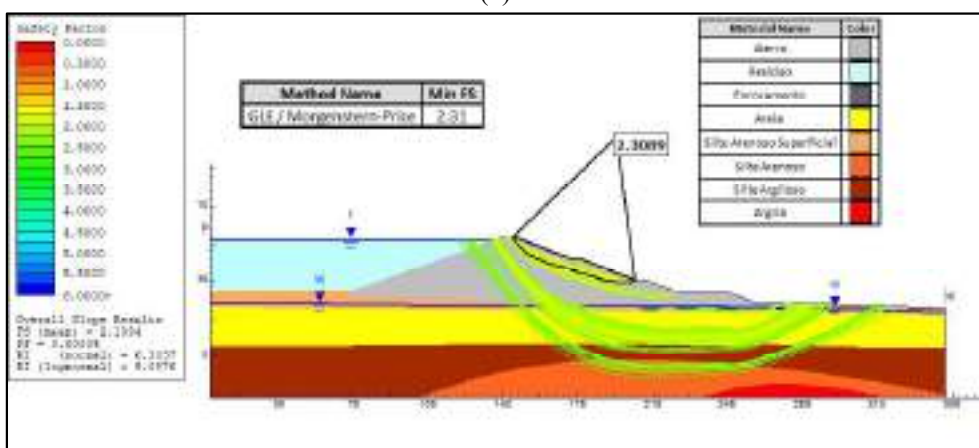
Figura 81 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



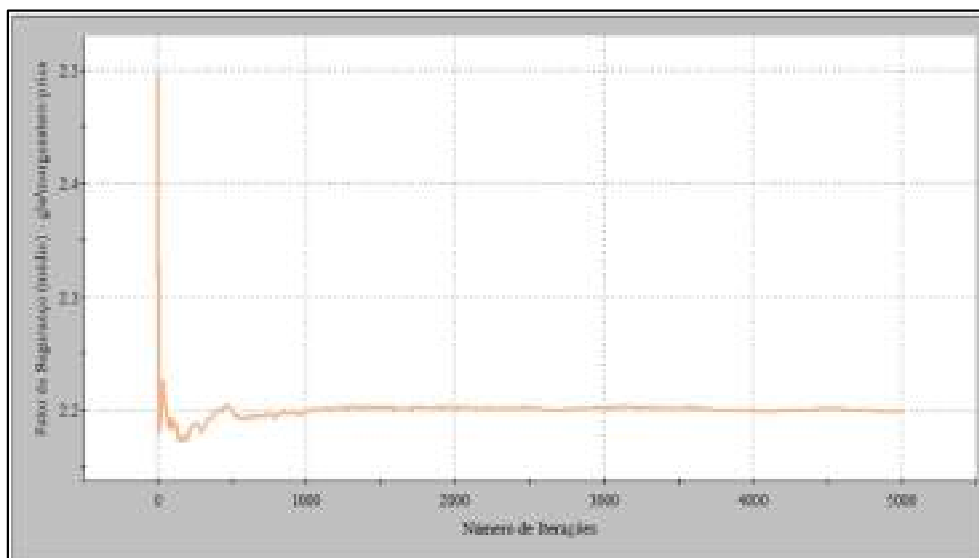
(a)



(b)



(c)



(d)

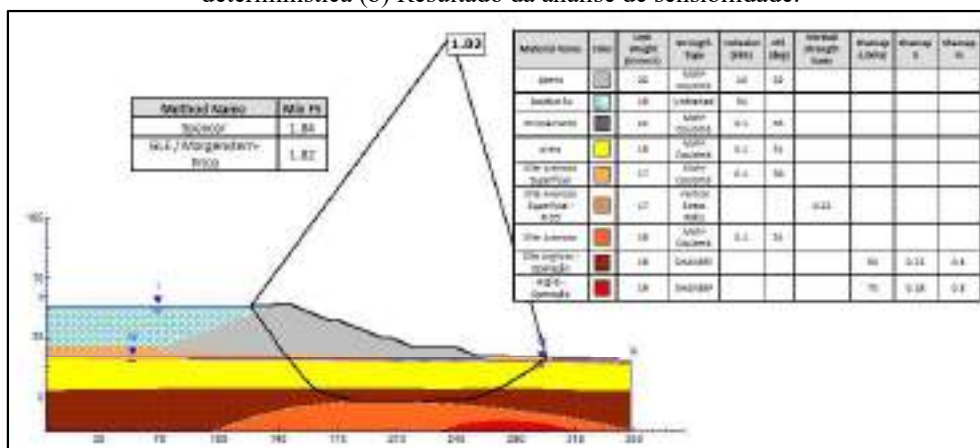
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.6 Operação Normal – Não drenado

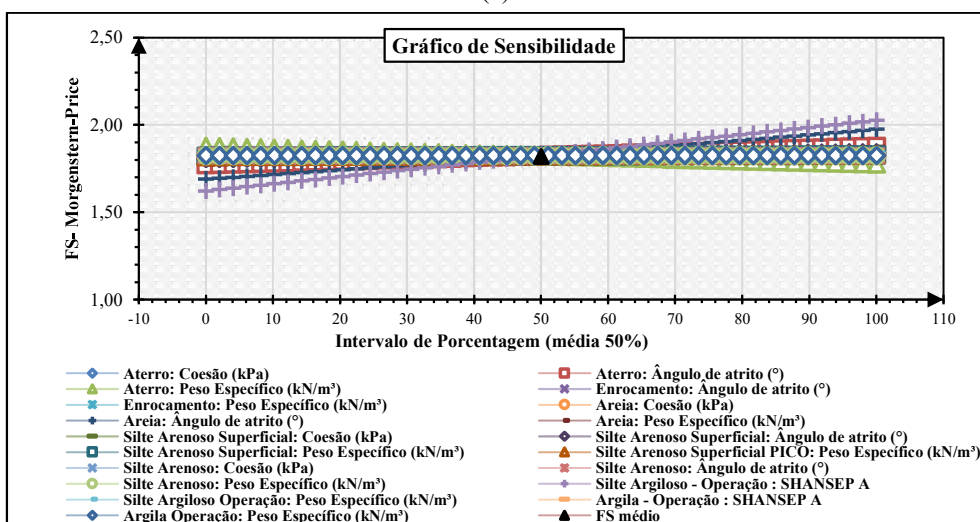
Os resultados das análises referentes a fase de operação em condição normal não drenada, estão expostos nas Figuras 82 e 83.

No contexto da condição não-drenada, ocorre uma redução no FS de 2,31 para 1,82, Figura 82-(a), devido à ausência de dissipação do excesso de poropressão. Isso resulta na diminuição das forças de contato entre as partículas do solo contribuindo para a redução da resistência ao cisalhamento. Contudo, apesar desse comportamento, os valores obtidos atenderam aos limites mínimos exigidos pela NBR 13028/17. Quanto aos resultados da análise de sensibilidade, nota-se pela Figura 82-(b), uma leve variação no FS em relação a mudanças nas propriedades do solo, como a resistência não-drenada do silte-argiloso, o ângulo de atrito da areia e o peso específico do aterro compactado.

Figura 82 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



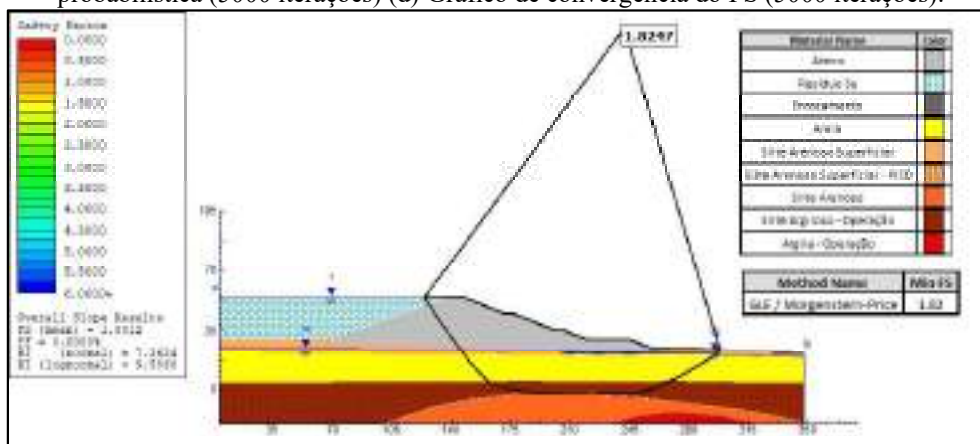
(b)

Fonte: Autora (2023)

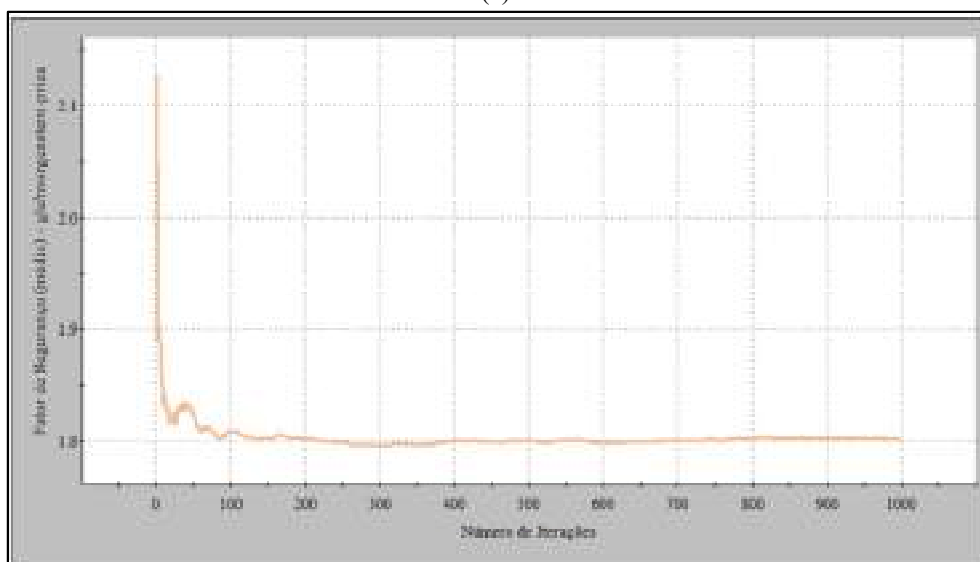
No que diz respeito aos resultados da análise probabilística, as Figura 83-(a) e Figura 83-(c), indicam que o FS probabilístico não demonstrou variações significativas em comparação com os resultados da abordagem determinística. No contexto das probabilidades de ocorrência de incidentes, os resultados revelaram uma Pr de 0%, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 7,26 (valor normal) a 9,59 (valor log-normal). Esses dados revelam a ausência de indícios de instabilidade, considerando as condições analisadas.

Na Figura 83-(b), é perceptível que a curva tende a convergir já nas primeiras 200 iterações, evidenciando uma estabilização dos resultados em torno de 1,80. Ao aumentar o número de iterações para 5000, conforme ilustrado na Figura 83-(d), essa convergência passa a ser observada a partir de 2000 iterações.

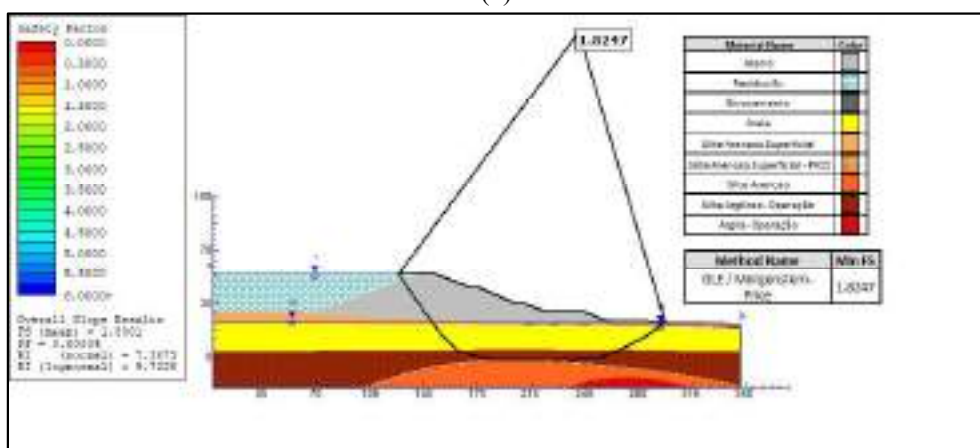
Figura 83 - Resultado da Seção C-C - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



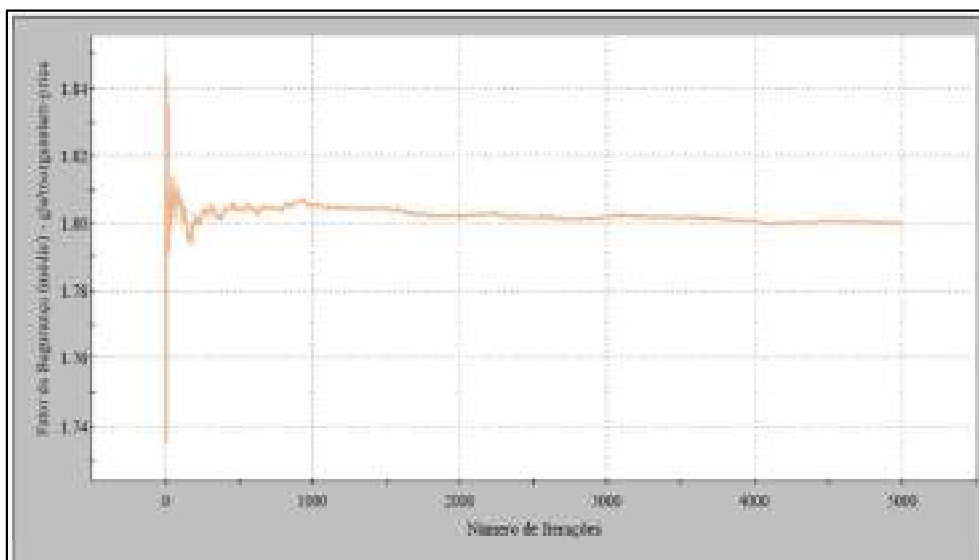
(a)



(b)



(c)



(d)

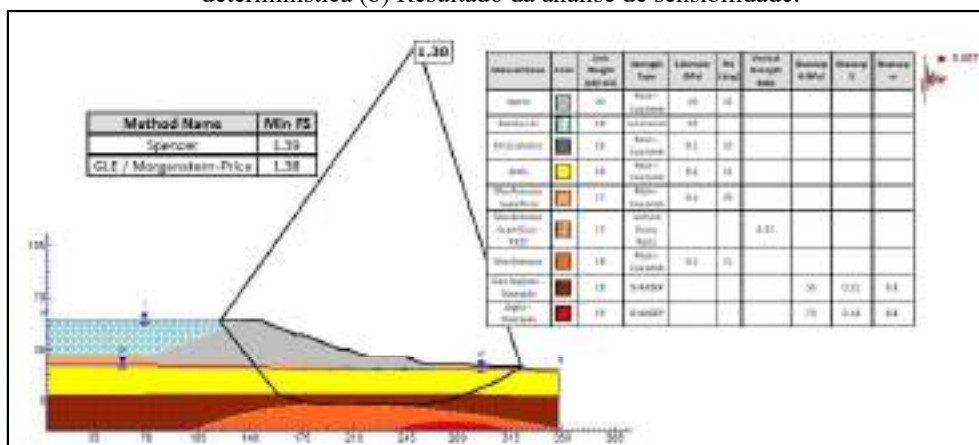
Fonte: Autora (2023)

### 5.2.7 Solicitação Pseudoestática

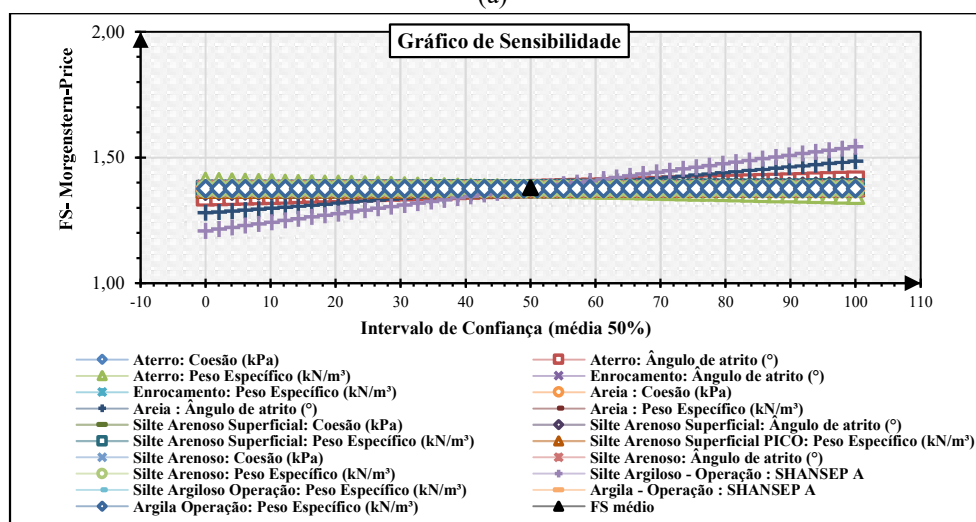
Posteriormente, análises pseudoestática foram realizadas, com o objetivo de verificar a estabilidade dos taludes jusante frente a este tipo carregamento. Os resultados dessas análises são apresentados nas Figuras 84 e 85.

Considerando apenas um carregamento horizontal, conforme mostra a Figura 84-(a), a análise pseudoestática apresentou um FS igual a 1,38, superior ao mínimo exigido de 1,10 pela NBR 13028/17. Quanto a análise de sensibilidade, apresentada na Figura 84-(b), está revela mais uma vez que o FS é variável a mudanças na resistência não-drenada do silte argiloso e do ângulo de atrito da camada de areia.

Figura 84 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

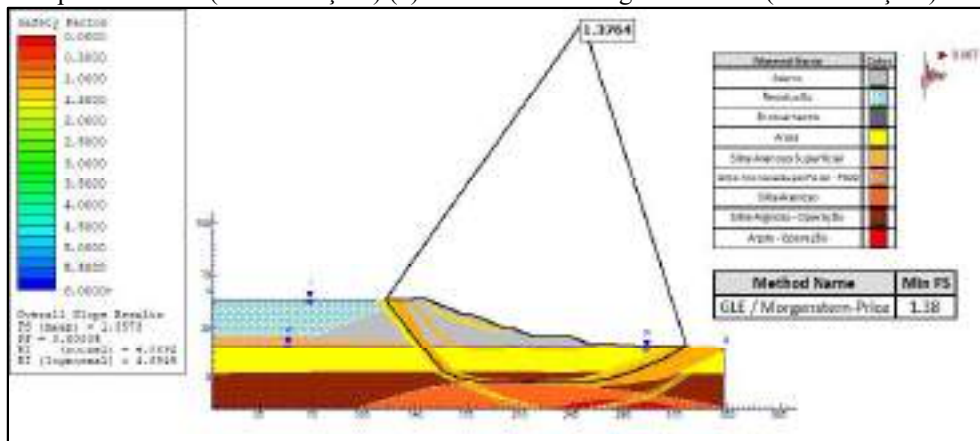
Fonte: Autora (2023)

Ao examinar os resultados da abordagem probabilística, apresentados na Figura 85-(a) e Figura 85-(c), observa-se uma consistência notável entre os valores derivados da abordagem determinística e probabilística em relação ao FS. Além disso, a Pr permaneceu inalterada em 0% para ambas as iterações, enquanto os índices de confiabilidade mínimos oscilaram entre 4,07 (valor normal) a 4,69 (valor log-normal), atendendo aos requisitos da USACE (1997). Destaca-se ainda, um declínio expressivo no comportamento desse índice, indicando que a introdução de cenários sísmicos pode exercer um impacto adverso no desempenho do talude desta seção crítica.

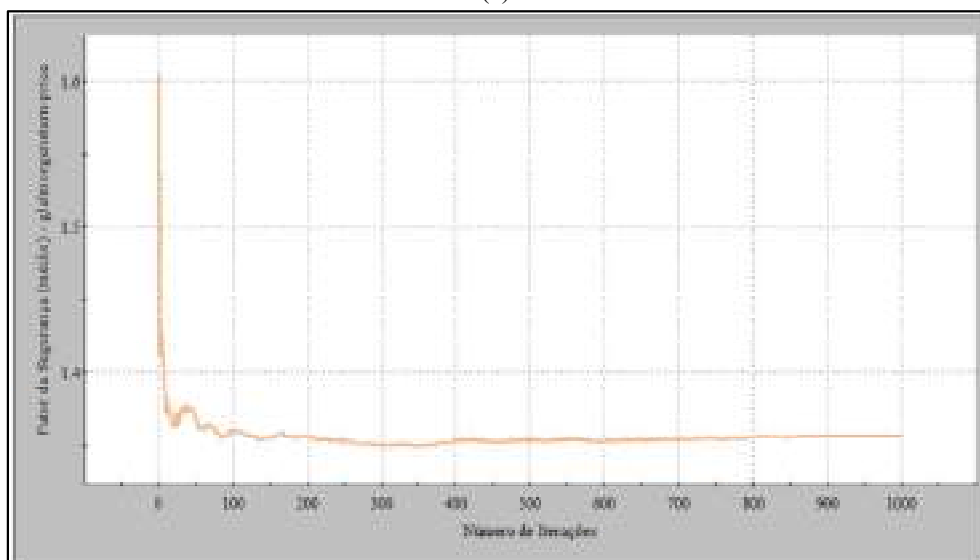
Ao examinar as curvas de convergência nas Figuras 85-(b) e Figura 85-(d) para ambas as quantidades de iterações avaliadas (1000 e 5000), é possível observar que a curva de convergência do FS tende a se estabilizar em torno de 1,36. Embora os resultados sugiram a

estabilidade do talude, é crucial ressaltar que o decréscimo no índice de confiabilidade, demanda atenção especial para garantir e controlar a segurança dessa estrutura.

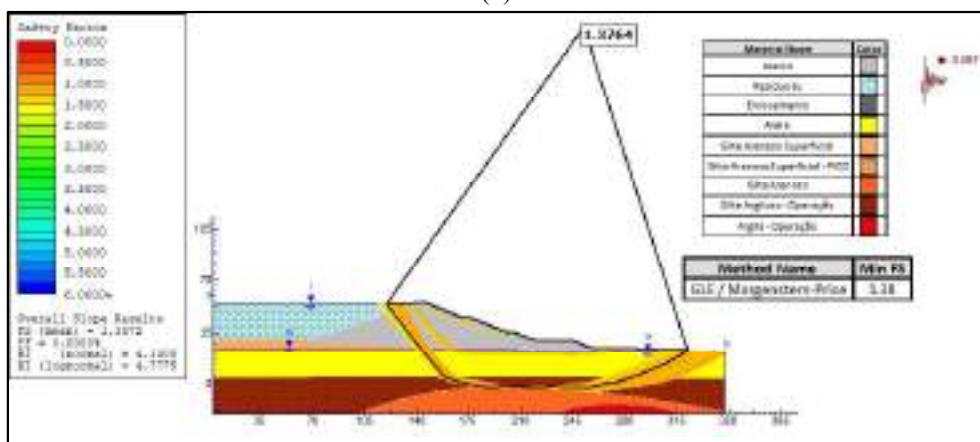
Figura 85 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



(a)

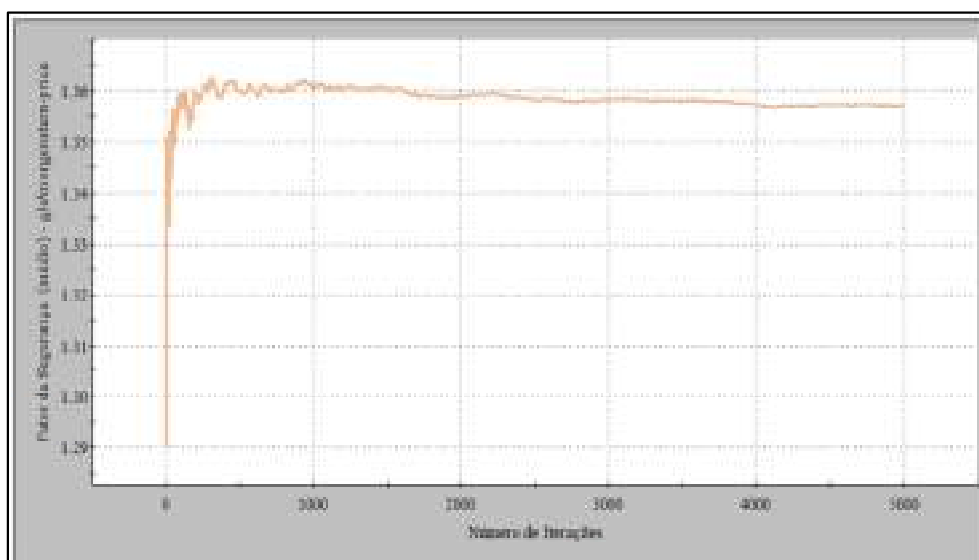


(b)



(c)



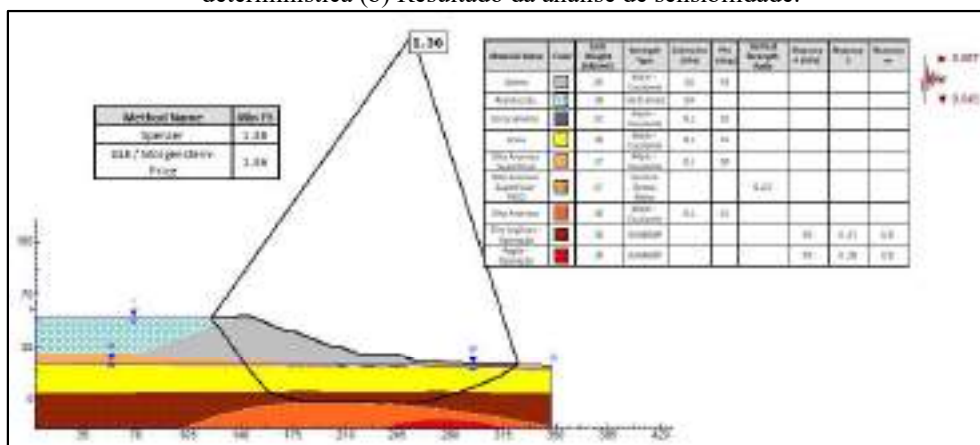


(d)

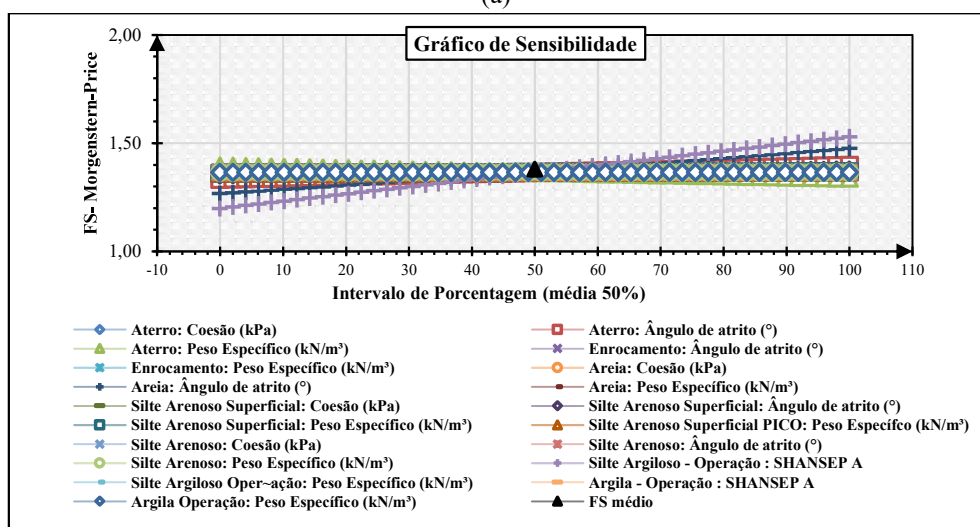
Fonte: Autora (2023)

Ao incorporar carregamentos verticais ao sistema, observa-se que o FS não sofre muitas variações. Além disso, tanto para o cenário da Figura 86-(b) quanto da Figura 87-(b), os resultados das análises de sensibilidade também são bastante semelhantes. No que se refere a estabilidade, para ambos os cenários os taludes se mantêm estáveis a ocorrência de uma solicitação pseudoestática pela abordagem determinística.

Figura 86 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



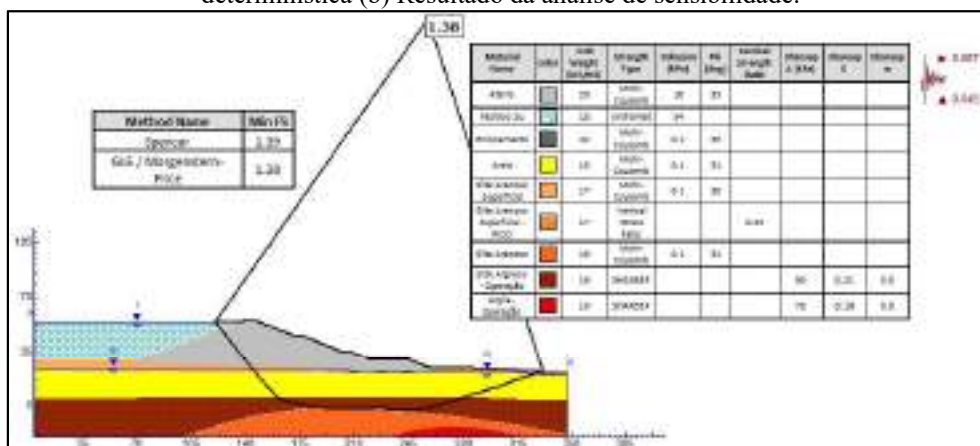
(a)



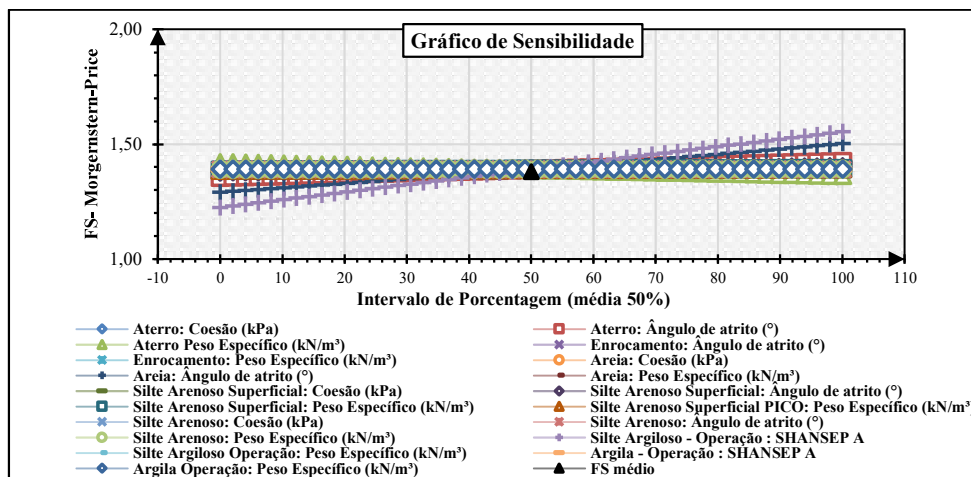
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 87 - Resultado da Seção - C-C Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



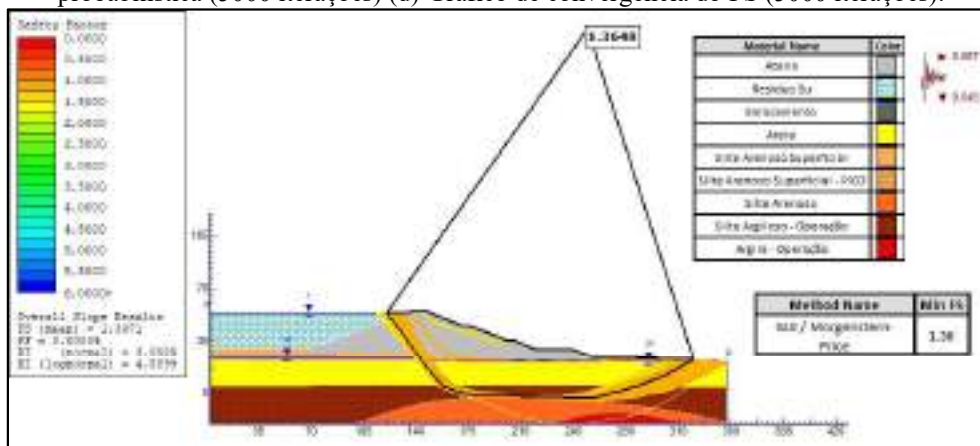
(b)

Fonte: Autora (2023)

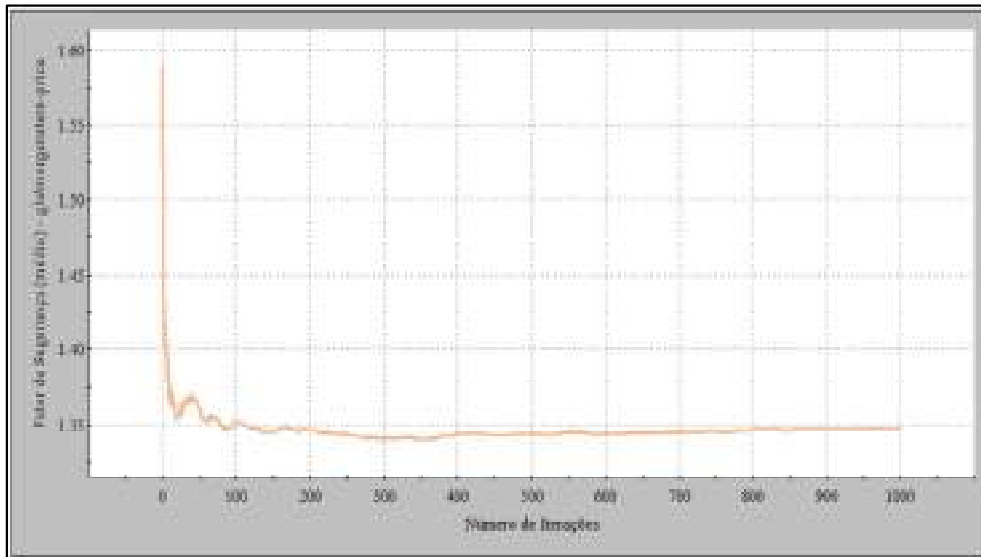
Quantos aos resultados da abordagem probabilística, ao analisar as Figuras 88-(a), Figura 88-(c), Figura 89-(a) e Figura 89-(c), nota-se a ausência de variações significativas nos FS identificados. Além disso, as probabilidades de rupturas e os índices de confiabilidade para ambos os cenários de carregamentos pseudoestáticos, também exibem valores próximos.

No que se refere as curvas de convergência, destacadas nas Figuras 88-(b), Figura 88-(d), Figura 89-(b) e Figura 89-(d), verifica-se que os resultados tendem a convergir a partir de 2000 iterações.

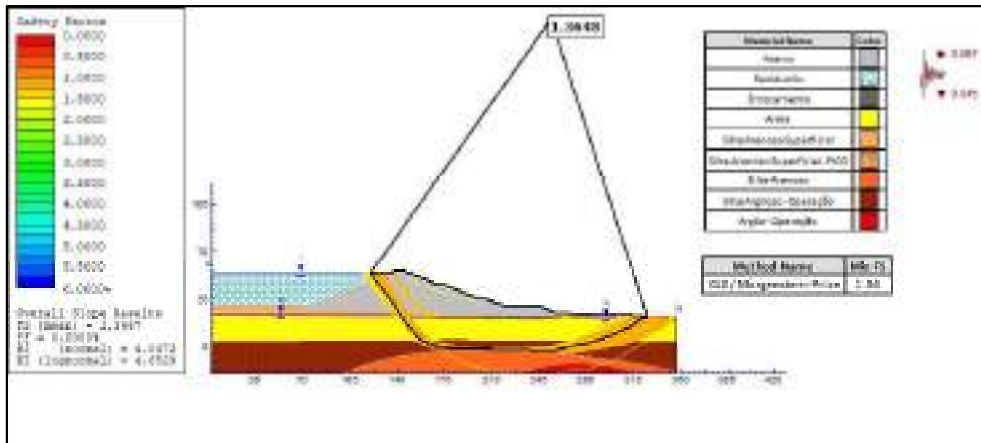
Figura 88 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



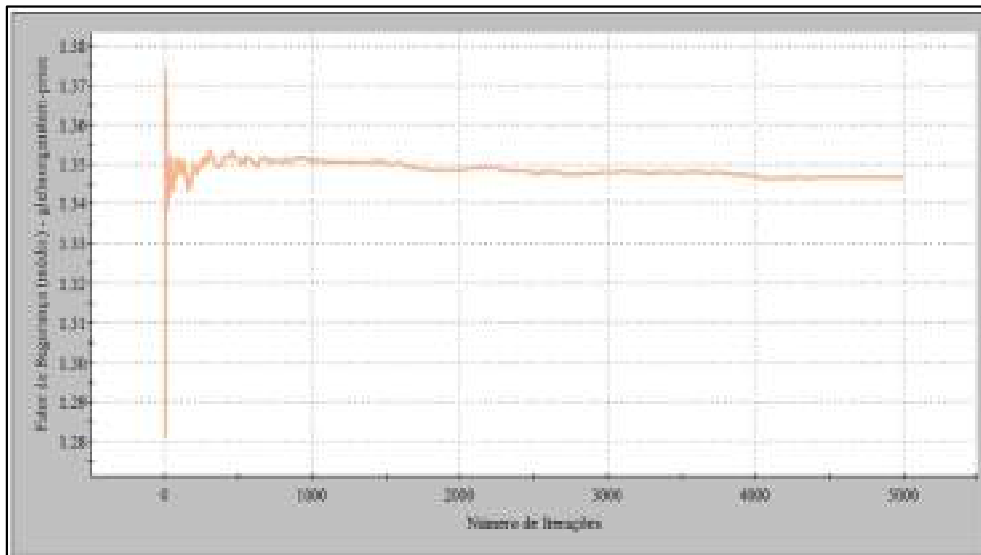
(a)



(b)



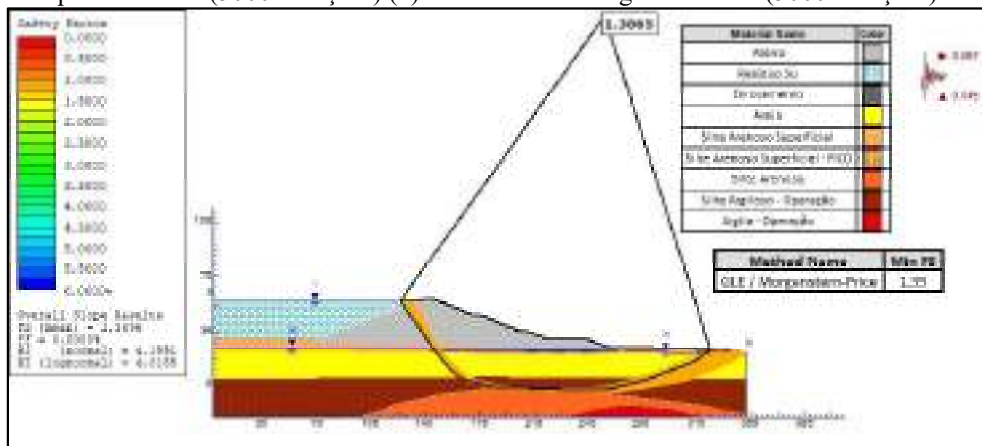
(c)



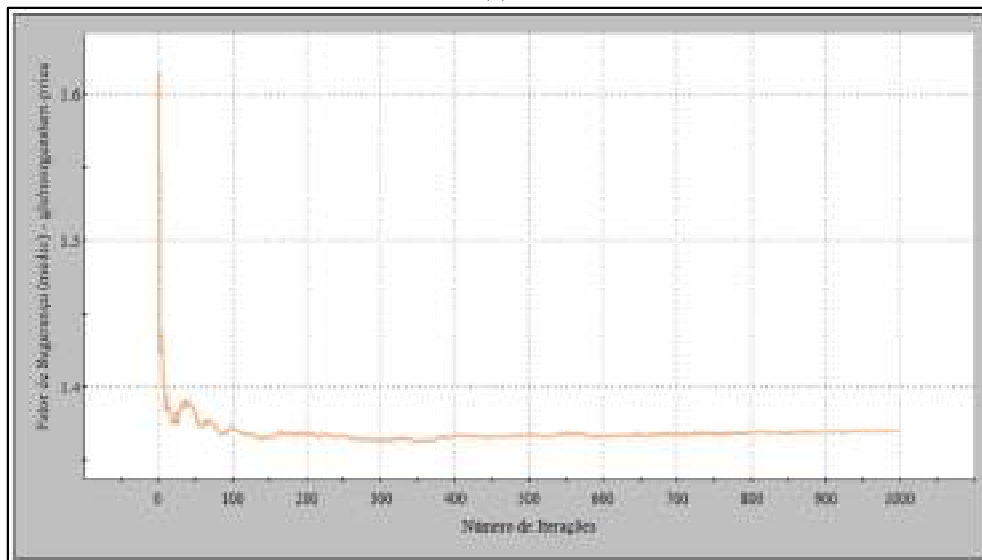
(d)

Fonte: Autora (2023)

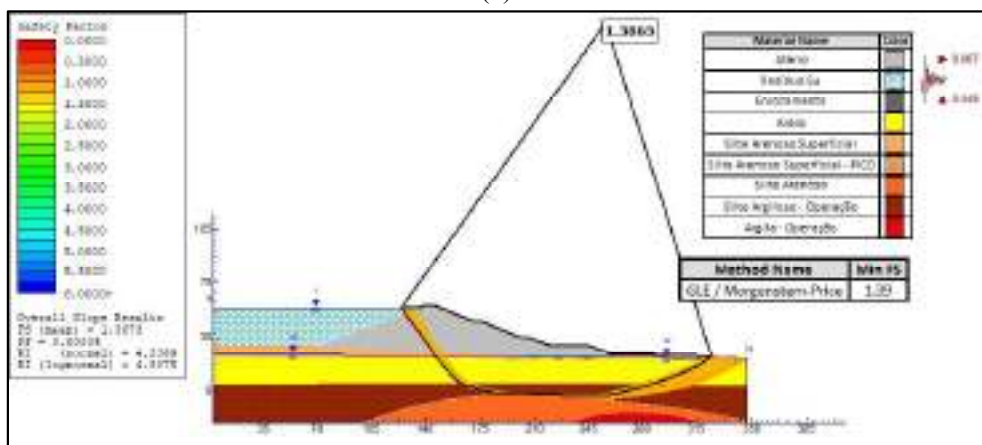
Figura 89 - Resultado da Seção C-C - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



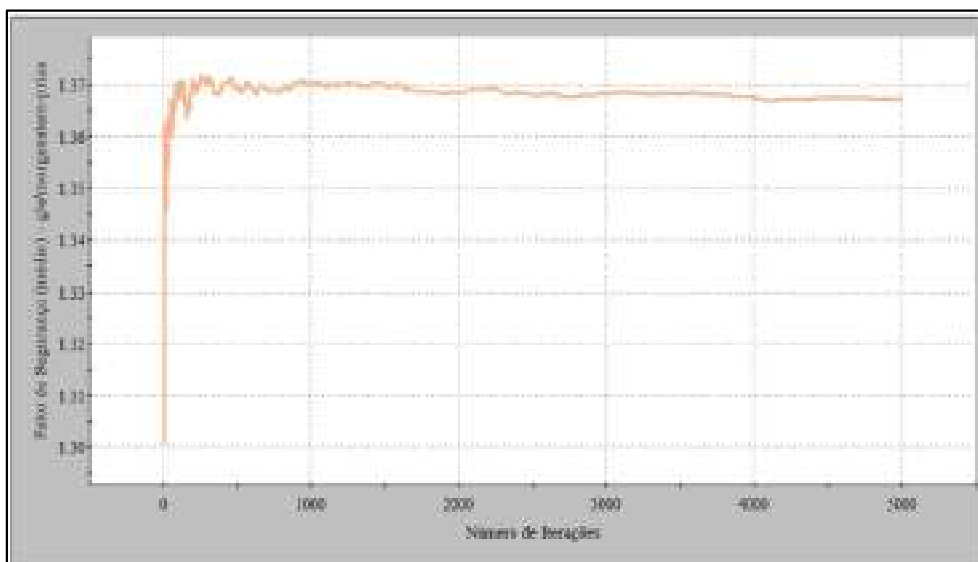
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

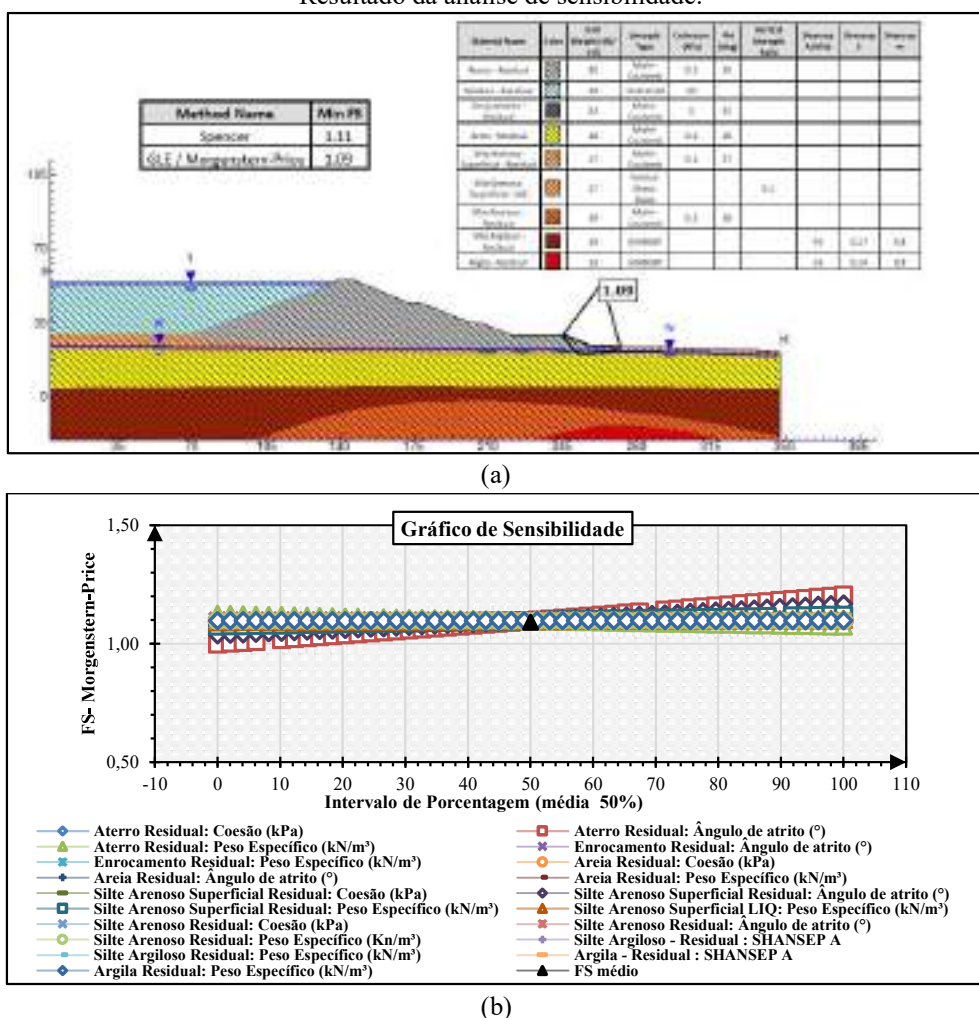
Ao considerar os três cenários de condição pseudoestática avaliados, torna-se evidente que o talude jusante da seção C, demonstra variações quanto a aplicação de carregamentos pseudoestáticos. Apesar desse comportamento, as condições geométricas e as propriedades dos materiais que o compõem contribuem para sua estabilidade, embora os valores se aproximem de limite crítico admissível. Nesse contexto, torna-se essencial cuidados adicionais com essa seção, buscando mantê-la com níveis de desempenhos satisfatórios.

### 5.2.8 Solicitação pós-sísmica

Por fim, a última condição analisada foi a de solicitação pós-sísmica. Os resultados encontrados estão apresentados nas Figuras 90 e 91.

Deterministicamente, os resultados desse cenário apontam para estabilidade do talude, uma vez que o FS encontrado está dentro do limite admissível definido pela ANCOLD (2019). Contudo, ao analisar o mesmo cenário por meio de uma abordagem probabilística, nota-se pelo resultado da Figura 91-(a), que embora o FS probabilístico também esteja dentro do limite considerado aceitável, ainda assim persiste uma Pr de 3,2%. Os resultados dessa análise revelaram ainda que, das 1000 iterações analisadas, foram identificados 32 cenários nos quais o FS registrou valores inferiores a um. Além disso, o índice de confiabilidade variou entre 1,35 (valor normal) a 1,46 (valor log-normal), o que, segundo a USACE (1997), denota um nível de desempenho insatisfatório.

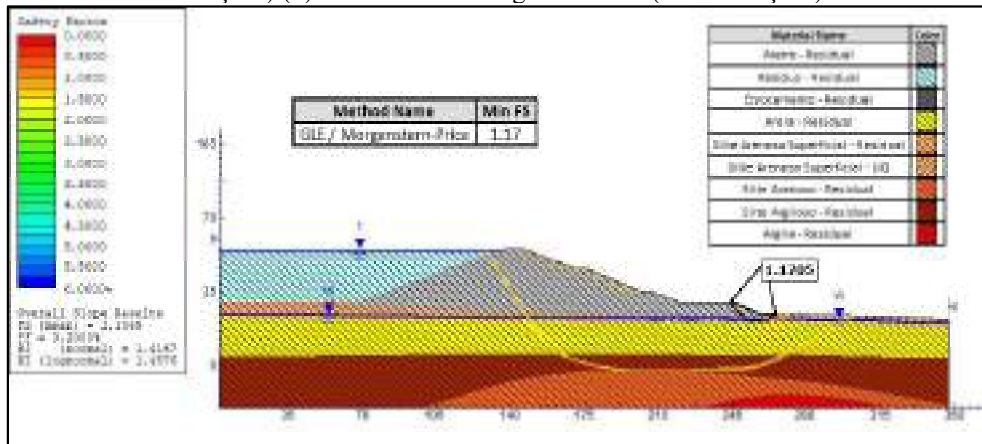
Figura 90 - Resultado da Seção C-C - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



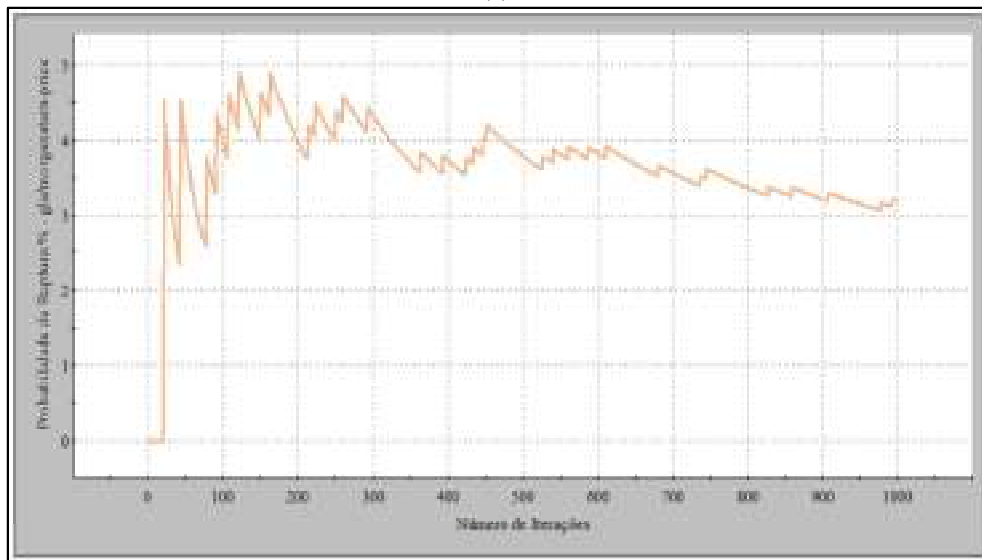
Fonte: Autora (2023)

Buscando compreender melhor esses resultados, a mesma seção foi reanalisada, considerando um número maior de iterações (5000), conforme é ilustrado nas Figuras 91-(b) e Figura 91-(d). Nota-se, pela Figura 91-(b), que embora o FS tenha sido equivalente ao obtido com 1000 iterações, a Pr aumentou para 3,96%. Em outras palavras, das 5000 situações analisadas, 198 cenários apresentaram FS inferior a um. Esta constatação é corroborada pela redução do índice de confiabilidade, evidenciando que o nível de desempenho do talude é considerado insatisfatório, conforme os critérios da USACE (1997). Contudo, ao avaliar os resultados complementares fornecidos pelas análises, é possível observar que a SPR se encontra restrita à berma de equilíbrio (ruptura local). Neste sentido, mesmo com a existência de uma Pr diferente de zero, as consequências desse resultado não são significativas.

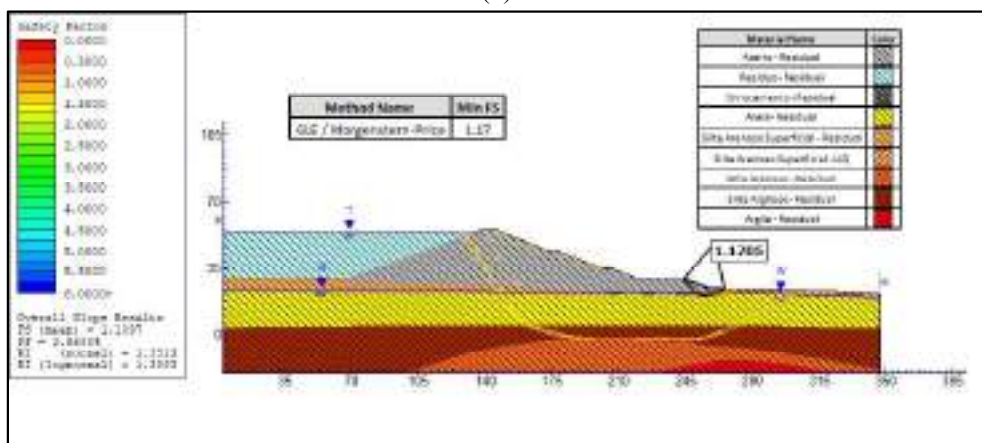
Figura 91 - Resultado da Seção C-C - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações).



(a)

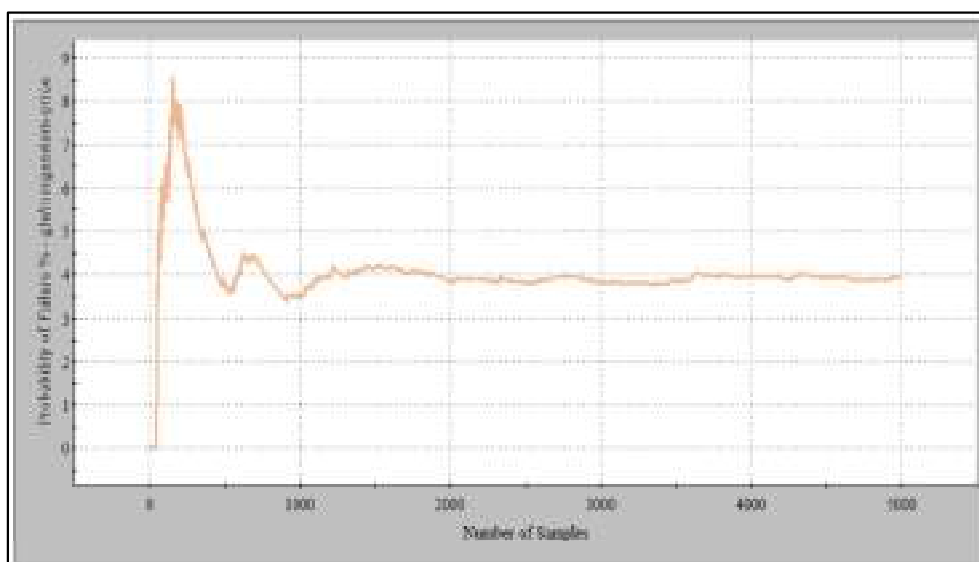


(b)



(c)





(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 22, estão organizados os resultados provenientes da aplicação de análise probabilística para a seção C, considerando 1000 e 5000 iterações. Ao examinar a tabela e utilizando os valores de referência do item 3.8, é possível inferir que os taludes da seção C demonstraram estabilidade apenas nos cenários que não envolviam a atuação de carregamentos pseudoestáticos e pós-sísmico. Nesse contexto, torna-se de extrema importância a implementação de ações que elevem o desempenho da estrutura, reduzindo ao mínimo possível as probabilidades de ruptura encontradas.

Tabela 22 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção C-C.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				5000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,97	1,94	0	7,66	10,46	1,95	0	7,70	10,51
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,74	1,70	0	4,75	6,08	1,60	0	5,60	6,99
Final de construção Sem Ru	J	1,3	1,73	1,70	0	6,92	8,90	1,70	0	6,88	8,84
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,66	1,61	0	6,33	7,94	1,61	0	6,23	7,79
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,31	2,2	0	6,38	9,19	2,2	0	6,31	9,09
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	1,82	1,8	0	7,26	9,59	1,8	0	7,37	9,72
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,38	1,36	0	4,07	4,69	1,36	0	4,14	4,78
			1,36	1,35	0	3,99	4,59	1,35	0	4,05	4,65
			1,38	1,37	0	4,16	4,82	1,37	0	4,24	4,91
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,09	1,11	3,2	1,42	1,46	1,11	3,96	1,35	1,39

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

## 5.4 SEÇÃO D

Para verificar o desempenho da seção D, análises determinística, de sensibilidade e probabilística foram realizadas para um número de 1000 a 3000 iterações. Os resultados desses estudos encontram-se apresentados nas Figuras 92 a 111.

### 5.4.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

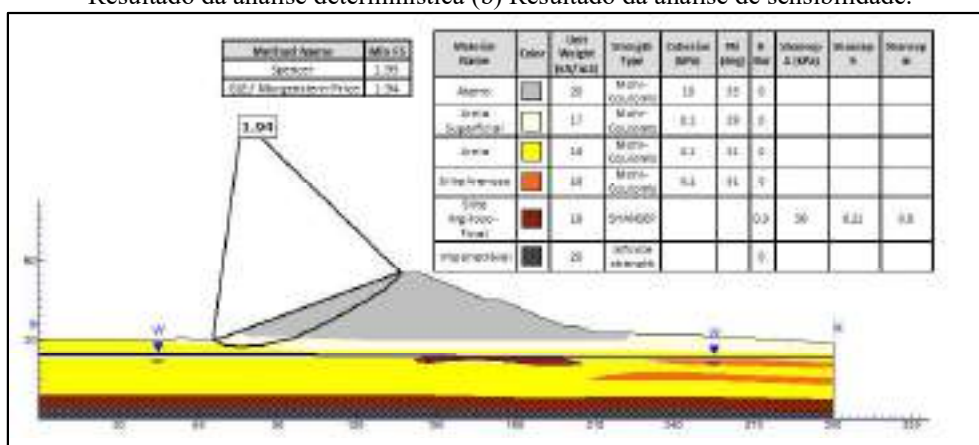
As Figuras 92 e 93 exibem os resultados das análises para a fase de final de construção do talude montante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro.

A fundação da seção D, conforme é mostrado na Figura 92-(a) é constituída por 5 camadas de materiais diferentes denominados de: areia superficial, areia, silte arenoso, silte-argiloso final e a camada impenetrável. Analisando o perfil dessa seção é possível observar que o aterro compactado está assentado em uma fundação com uma grande espessura de material arenoso com resistência  $N_{SPT}$  crescente com a profundidade, o qual se encontra apoiado sobre uma camada de material silte-argiloso de consistência dura, conforme relatados nos boletins de sondagem do relatório SLU-N-142759-001.

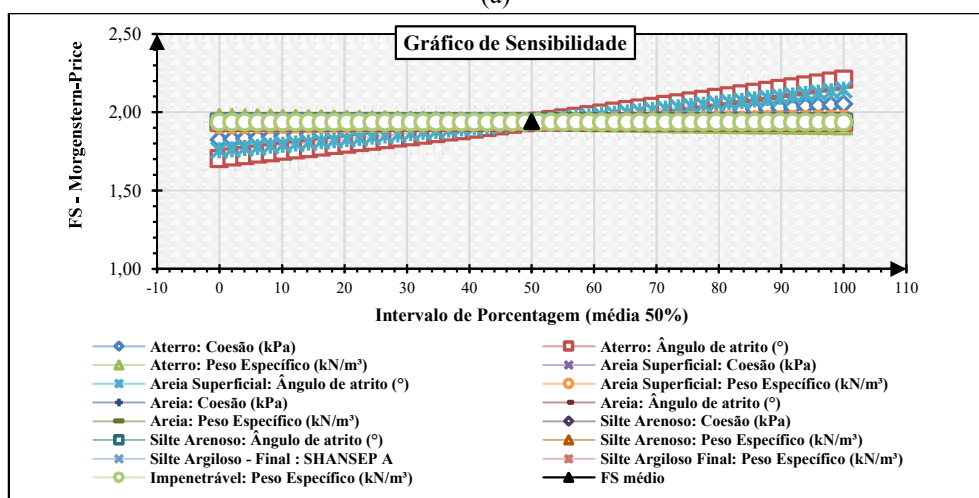
Por meio da análise da Figura 92-(a), verifica-se ainda que a SPR intercepta as camadas de aterro compactado e areia superficial, resultando em um FS de 1,94 pelo método de

Morgenstern-Price. Esse valor supera o limite mínimo estabelecido para esta condição de 1,3 de acordo com a NBR 13028/2017, indicando assim, a estabilidade do talude. No que concerne às análises de sensibilidade, os resultados da Figura 92-(b), mostram que os parâmetros que mais impactam o FS são o ângulo de atrito e a coesão do aterro compactado, bem como o ângulo de atrito da camada de areia superficial.

Figura 92 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

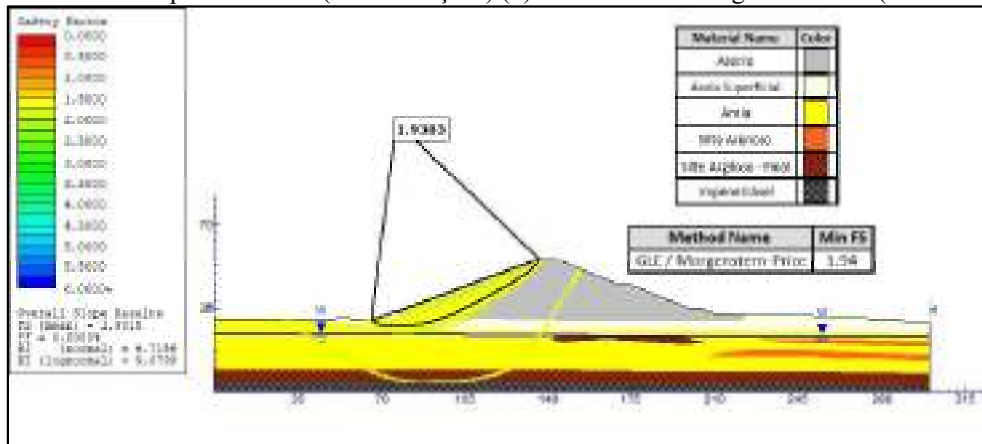


(b)

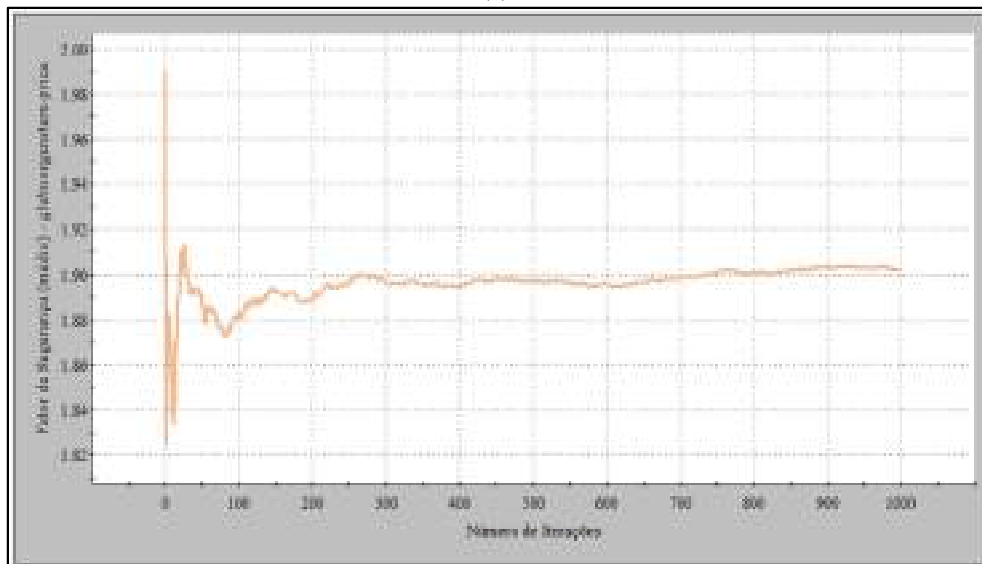
Fonte: Autora (2023)

Quanto aos resultados probabilísticos, destacados na Figura 93-(a) e 93-(c), estes revelam um FS médio probabilístico de aproximadamente 1,90. Adicionalmente, as análises de Monte Carlo, conduzidas com 1000 e 3000 iterações, revelaram uma Pr de 0% e índices de confiabilidade mínimos entre 6,56 (valor normal) a 8,84 (valor log-normal), ambos indicando um desempenho satisfatório do talude em conformidade com os padrões estabelecidos pela USACE (1997). Nas Figura 93-(b) e 93-(d), observa-se uma estabilização dos resultados a partir de 1000 iterações, com o FS mantendo-se em torno de 1,90. Esses achados respaldam a adequada estabilidade do talude nesse contexto.

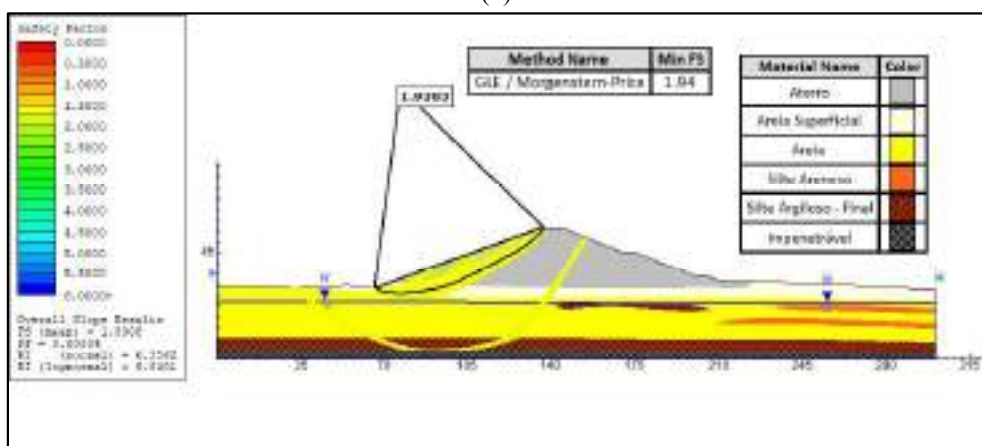
Figura 93 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



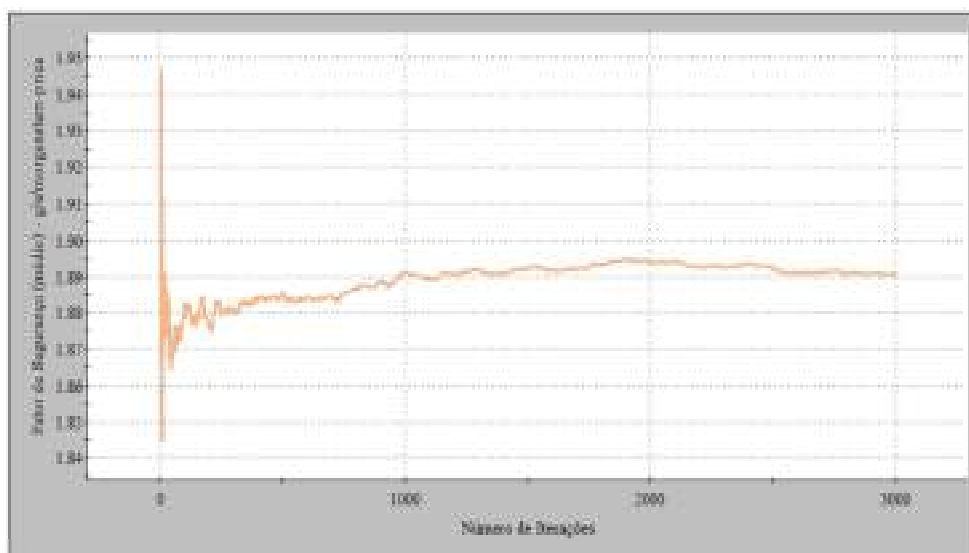
(a)



(b)



(c)



(d)

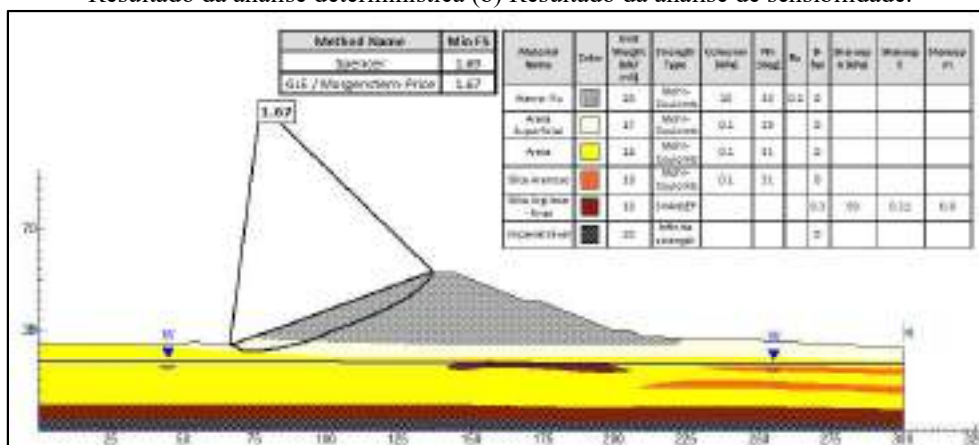
Fonte: Autora (2023)

#### 5.4.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

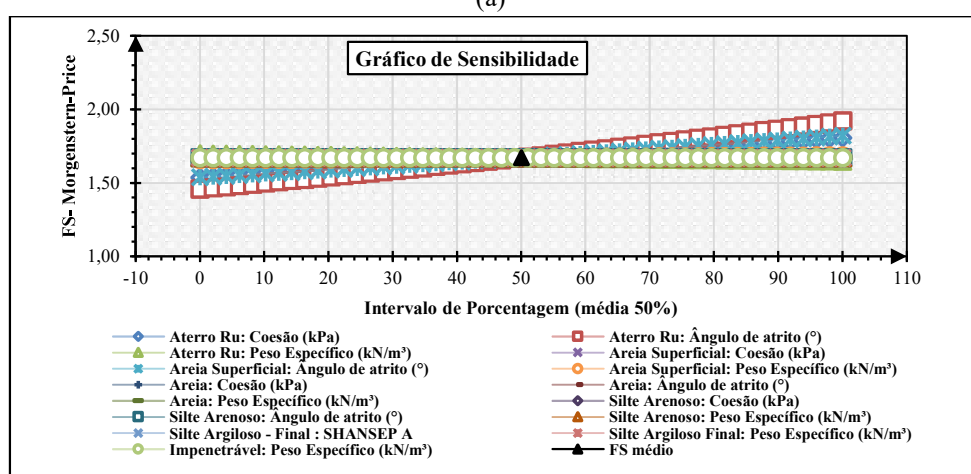
Os resultados para o talude montante considerando o Ru na camada de aterro compactado para a fase de final de construção são apresentados na Figura 94 e Figura 95.

Com base na Figura 94-(a), nota-se uma redução do FS passando de 1,94 para 1,67, devido a presença do parâmetro de poropressão. Essa redução foi verificada para as seções anteriores e pode possuir como causa principal a redução do contato entre as partículas do solo devido a presença da poropressão. Entretanto, mesmo havendo essa redução, o FS obtido é superior ao mínimo admissível de 1,3 para esta condição, conforme preconiza a NBR 13028/2017. Quanto as análises de sensibilidade, os resultados da Figura 94-(b), apontam para os mesmos parâmetros do cenário anterior, ou seja, variação do FS quanto a mudanças no ângulo de atrito e a coesão do aterro compactado, e o ângulo de atrito da camada de areia superficial.

Figura 94 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a)  
Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

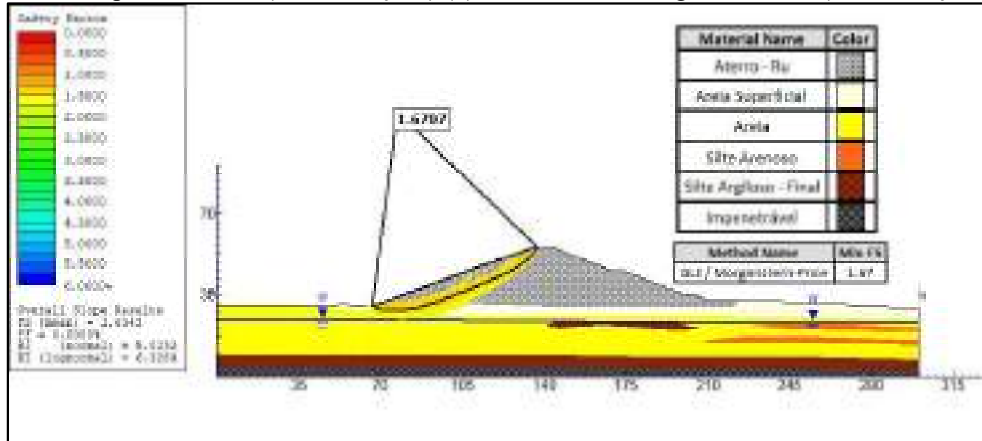


(b)

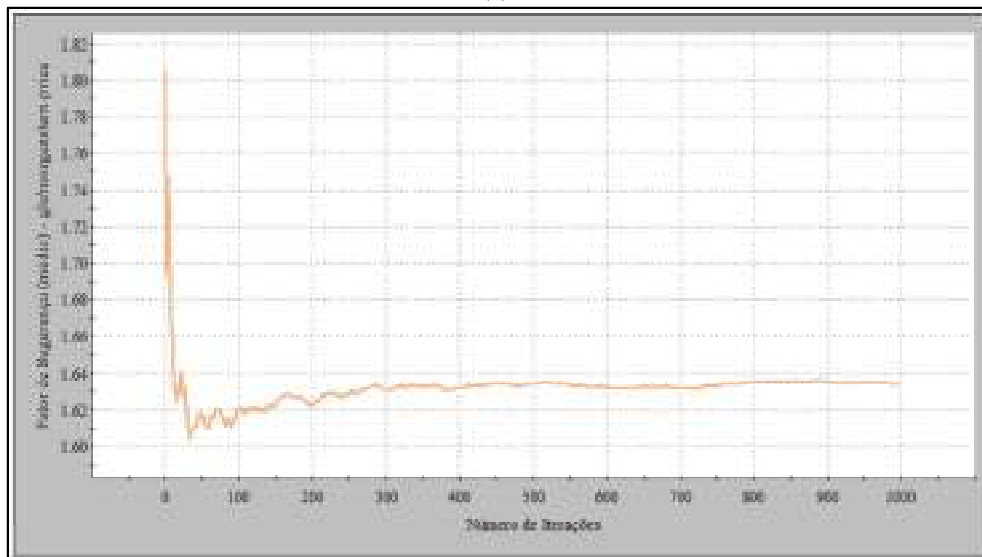
Fonte: Autora (2023)

Probabilisticamente, conforme é apresentado nas Figuras 95-(a) e 95-(c), os resultados não apresentaram variações significativas em relação aos resultados da abordagem determinística, tanto no valor do FS, quanto na localização da SPR. Ao empregar a abordagem probabilística com 1000 e 3000 iterações, constatou-se uma Pr igual a 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 4,86 (valor normal) a 6,13 (valor log-normal), sendo estes superior aos limites mínimos definidos pela USACE (1998). Ao analisar as curvas de convergências, exibidas nos gráficos das Figuras 95-(b) e 95-(d), observou-se que os resultados tenderam a se estabilizar a partir de 1000 iterações, com o ponto de convergência em torno do FS igual a 1,63. Assim como na abordagem determinística, a avaliação probabilística também sustenta a conclusão sobre a estabilidade do talude neste cenário.

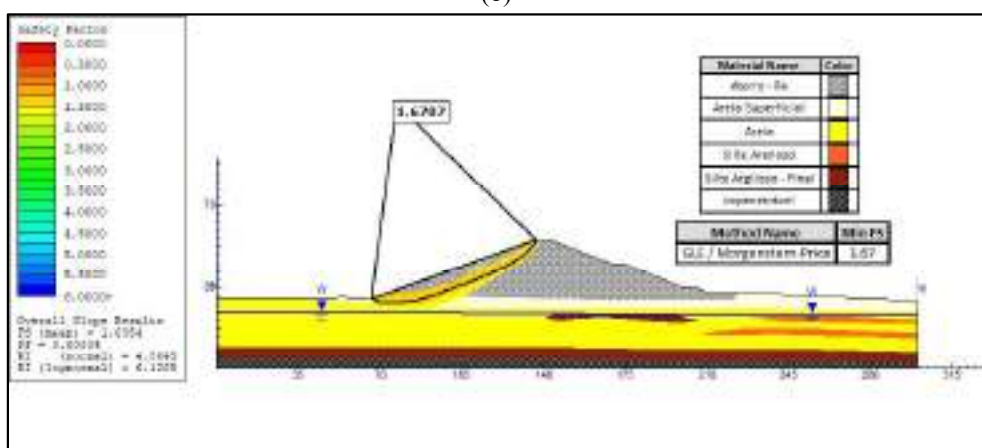
Figura 95 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



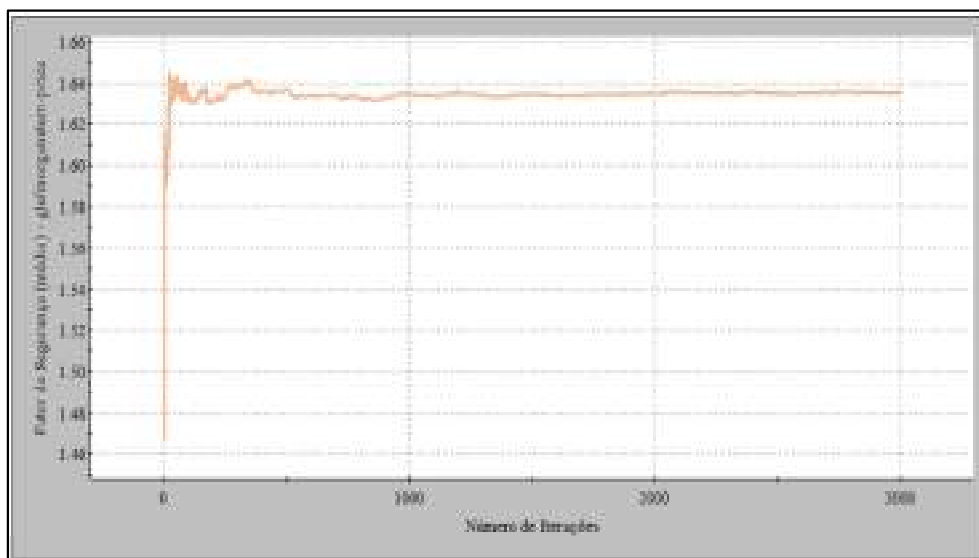
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

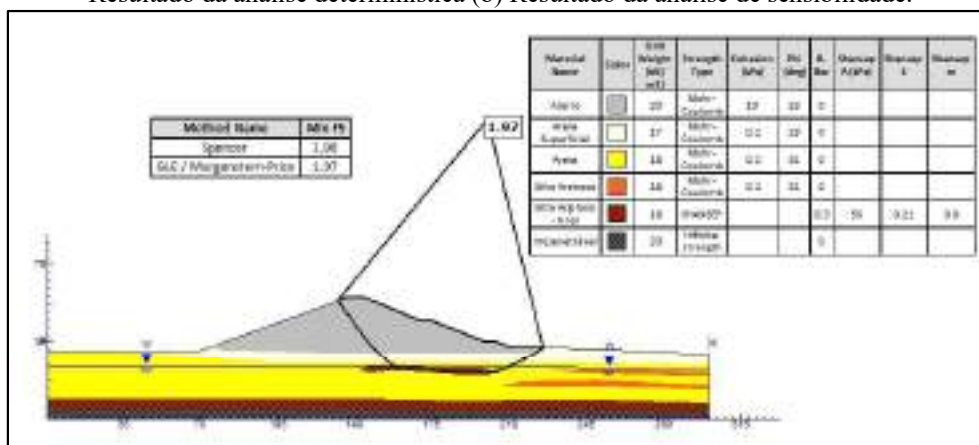
#### 5.4.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

Os resultados encontrados para a condição final de construção para o talude jusante, desconsiderando o parâmetro Ru são apresentados nas Figuras 96 e Figura 97.

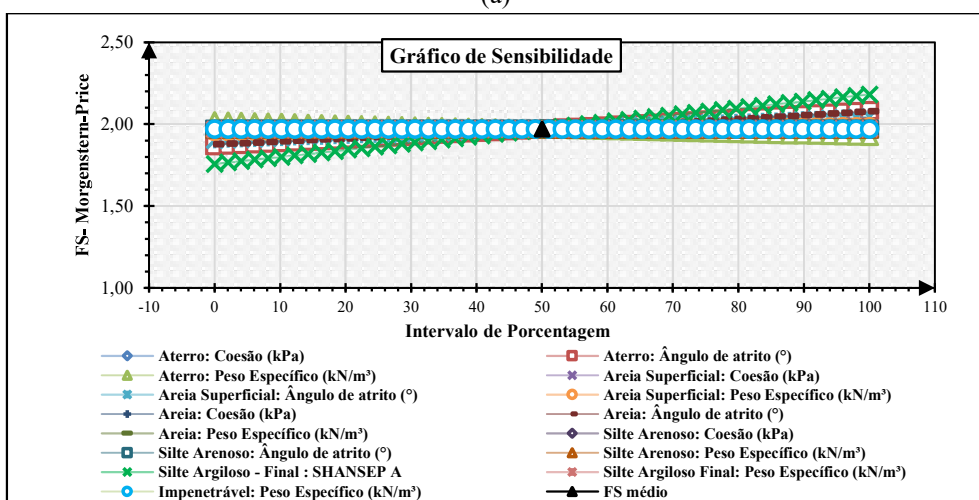
Com base na Figura 96-(a), as análises determinísticas revelaram um FS igual a 1,97 pelo método de Morgenstern-Price, indicando a estabilidade do talude e estando de acordo com a NBR 13028/17. Analisando a localização da SPR, observa-se que ela intercepta a camada de aterro compactado, areia superficial e a camada de silte-argiloso. A análise dos resultados dos boletins de sondagem revela que, que pra essas camadas, os valores de resistência  $N_{SPT}$  são iguais a 10, o que configura solos com compactidade média (ABNT, 2020). Quanto à análise de sensibilidade apresentada na Figura 96-(b), observa-se que os ângulos de atrito do aterro, da areia, da areia superficial e a resistência não-drenada do silte-argiloso, são as propriedades que mais influenciam nas variações no FS.



Figura 96 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

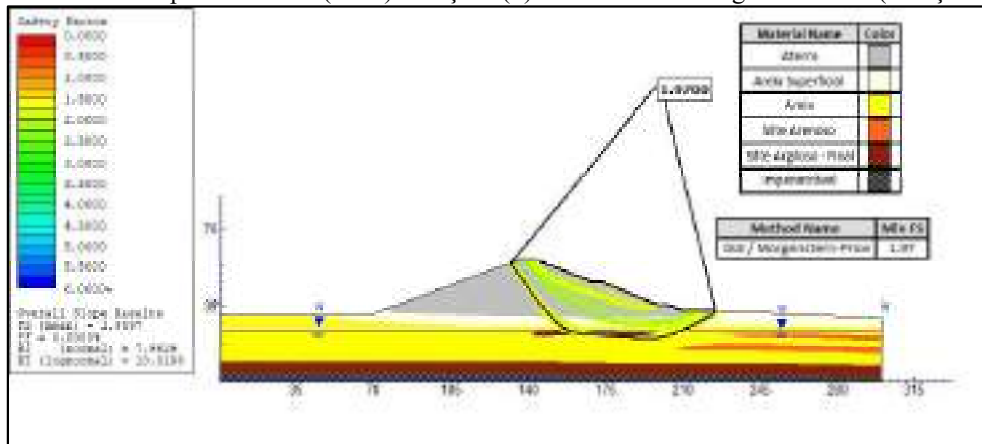


(b)

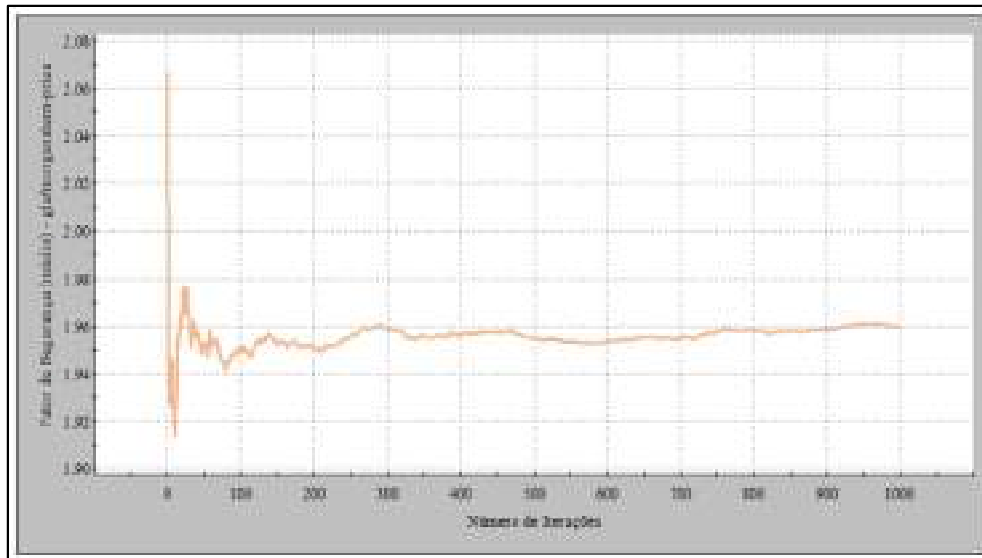
Fonte: Autora (2023)

Os resultados da análise probabilística, conforme ilustrado nas Figuras 97-(a) e 97-(c), evidenciam uma consistência notável nos FS obtidos em ambas as iterações. Além disso, os resultados também apontaram para uma Pr igual a 0% com índices de confiabilidade variando entre 7,96 (valor normal) a 10,92 (valor log-normal), indicando um elevado desempenho do talude, conforme estabelecido pela USACE (1997). No que se refere às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 97-(b) e 97-(d), nota-se uma tendência à estabilização dos resultados a partir de 1000 iterações.

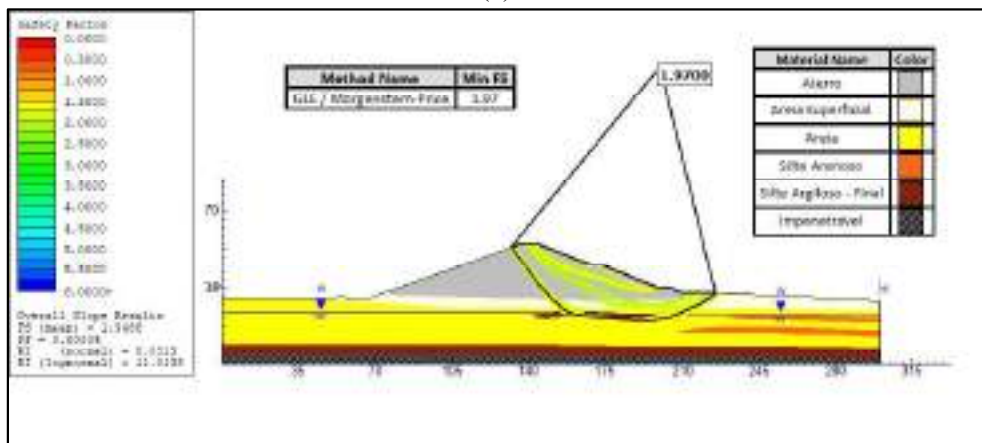
Figura 97 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000) iterações (b) Gráfico de convergência do FS (iterações 1000) (c) Resultado da análise probabilística (3000) iterações (d) Gráfico de convergência do FS (iterações 3000).



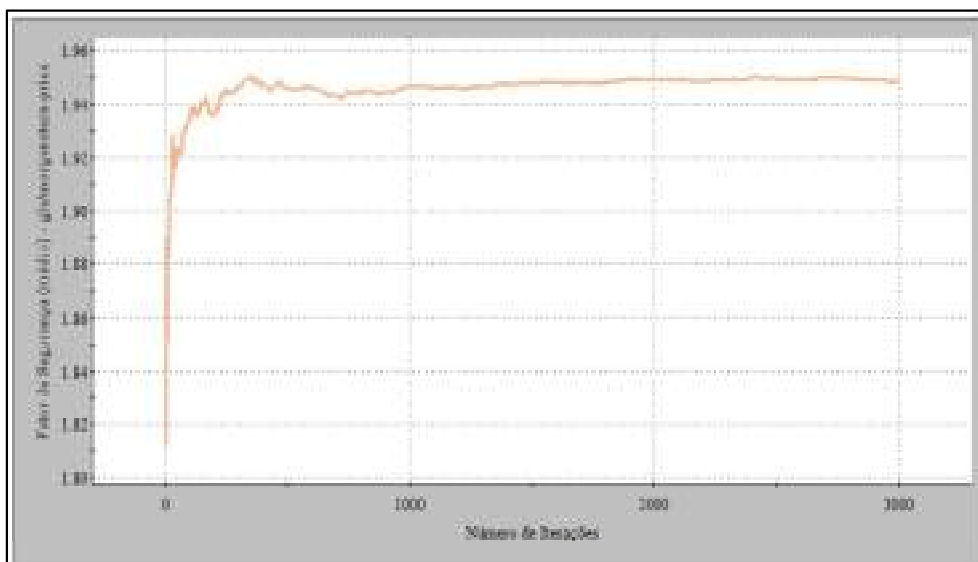
(a)



(b)



(c)



(d)

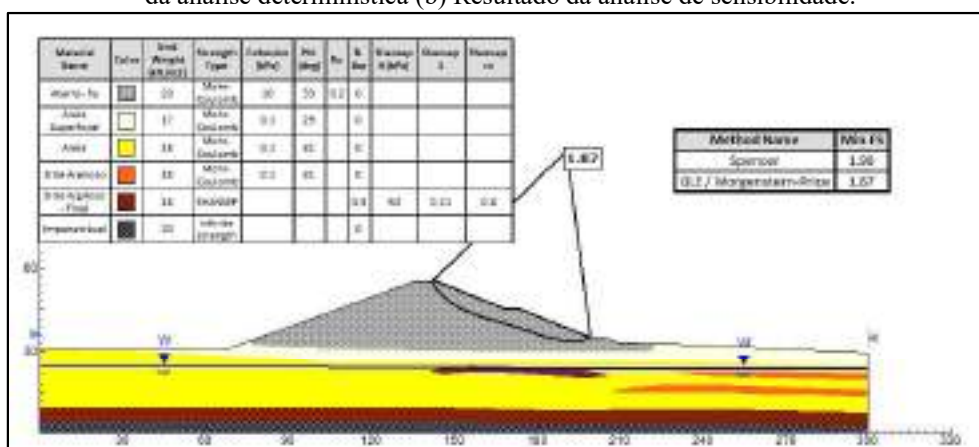
Fonte: Autora (2023)

#### 5.4.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

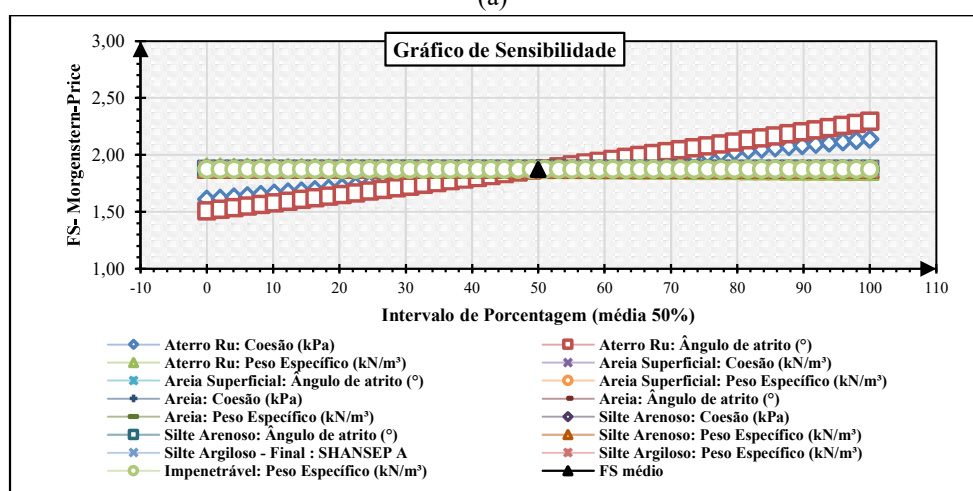
Os resultados para o cenário final de construção para o talude jusante, considerando o parâmetro Ru na camada de aterro compactado, são apresentados nas Figuras 98 e 99.

Com a inclusão do parâmetro de poropressão no aterro, observa-se, pela Figura 98-(a) uma diminuição no FS, resultando na completa contenção da SPR na camada de aterro compactado. Deterministicamente, o talude se encontra estável, alcançando um FS de 1,87, superando o mínimo recomendado pra este cenário de 1,3, conforme preconiza a NBR 13028/17. Quanto aos resultados da análise de sensibilidade, exibidos na Figura 98-(b), estes destacam que o FS se torna-se variável às mudanças da coesão e ângulo de atrito da camada de aterro compactado.

Figura 98 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



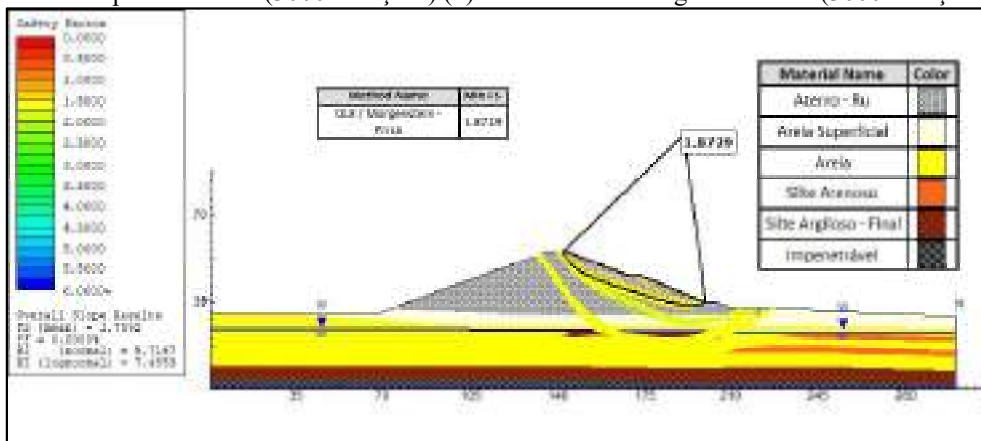
(b)

Fonte: Autora (2023)

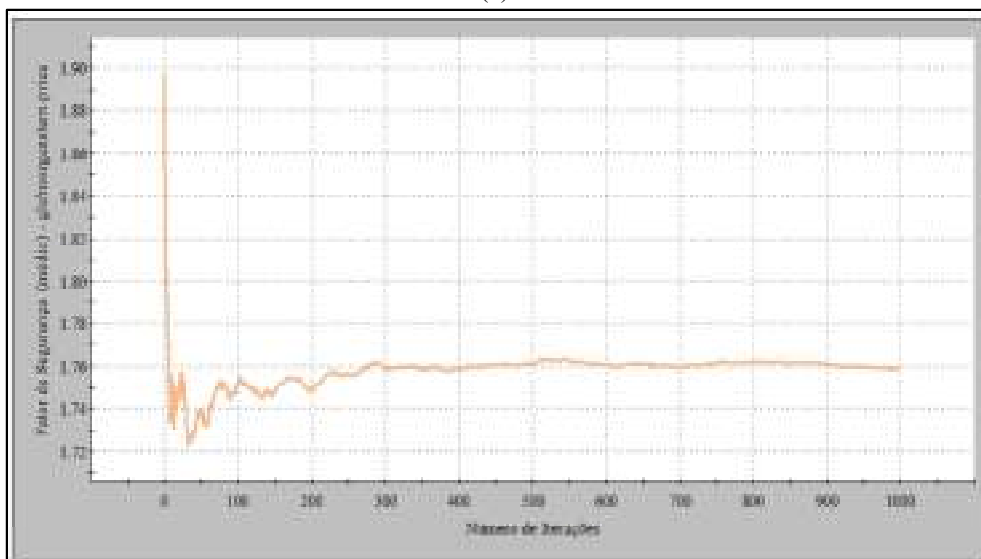
Em relação aos resultados da abordagem probabilística, conforme ilustrado na Figura 99-(a) e 99-(c), destaca-se que o FS médio probabilístico foi de 1,76, para ambas as iterações. Embora este valor seja inferior ao obtido pela abordagem determinística, ele ainda supera o mínimo recomendado para este cenário. Adicionalmente, os resultados também apontaram para uma Pr nula e índices de confiabilidade log-normal variando entre 7,34 a 7,46, configurando o desempenho do talude como elevado conforme a USACE (1997). Uma análise comparativa entre os resultados das Figuras 97-(a) e 99-(a), revelam uma redução significativa nos índices de confiabilidade para os cenários com e sem a presença do parâmetro de poropressão. Isso evidencia que a inclusão da poropressão na camada de aterro pode exercer um impacto significativo na condição de estabilidade dos taludes.

No que diz respeito aos resultados das Figuras 99-(b) e 99-(d), observa-se que a curva de convergência tende a se estabilizar a partir de 1000 iterações, mostrando a consistência das informações obtidas.

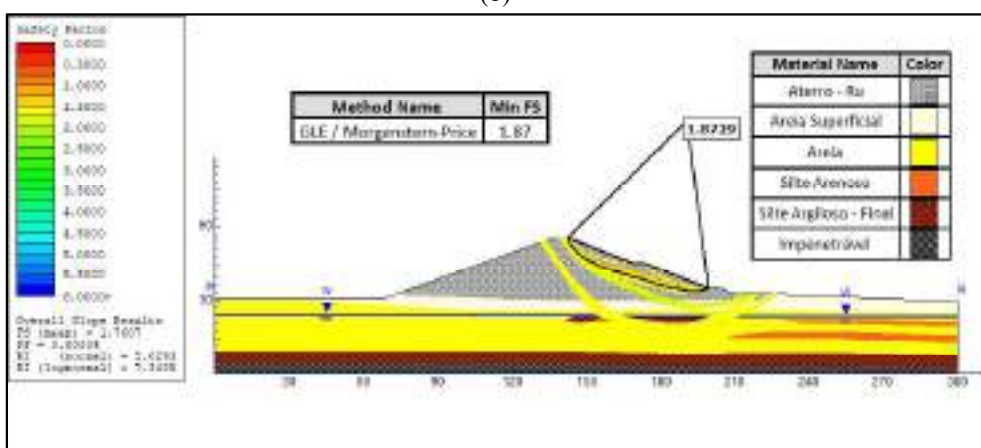
Figura 99 - Resultado da Seção D-D - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



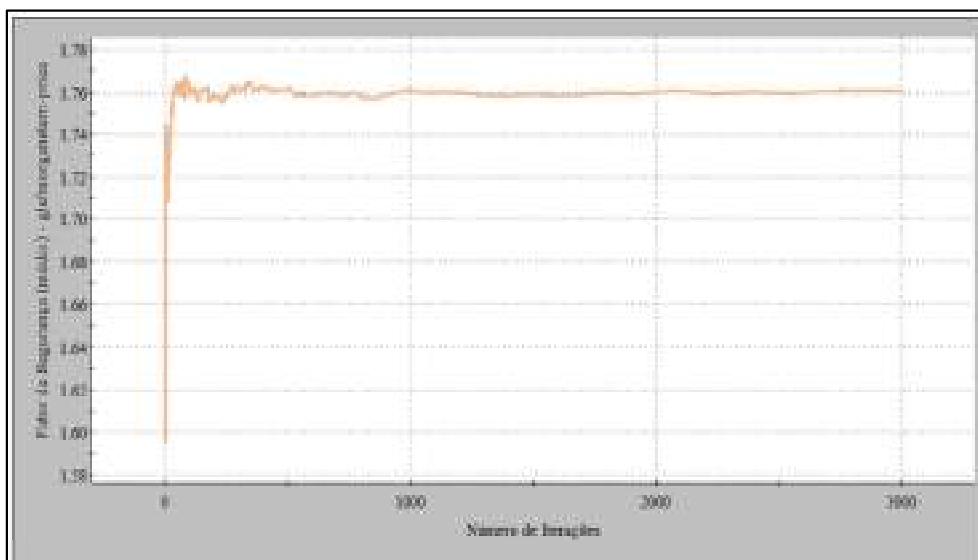
(a)



(b)



(c)



(d)

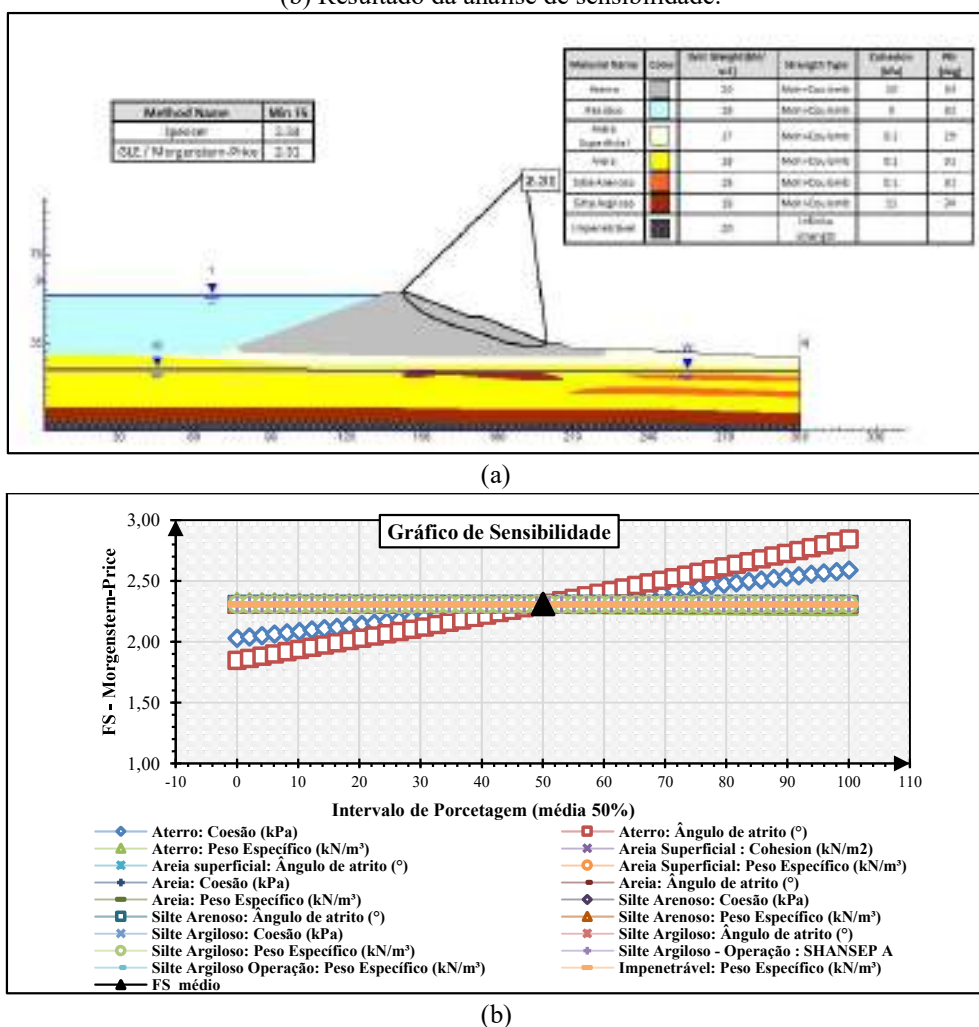
Fonte: Autora (2023)

#### 5.4.5 Operação Normal – Drenado

Os resultados encontrados para a fase de operação em condição normal drenada, são apresentados nas Figuras 100 e Figura 101.

Para este cenário, conforme evidenciado na Figura 100-(a), nota-se um aumento no FS devido ao ganho de resistência decorrente da maior interação entre as partículas do solo. Quanto aos resultados da Figura 100-(b), a análise de sensibilidade mostrou que o FS é variável as mudanças nas propriedades da camada de aterro, como o ângulo de atrito e a coesão. Deterministicamente, o talude se encontra estável para esse cenário, apresentando um FS de 2,31, superior ao mínimo admissível de 1,5 requerido pela NBR 13028/17.

Figura 100 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.

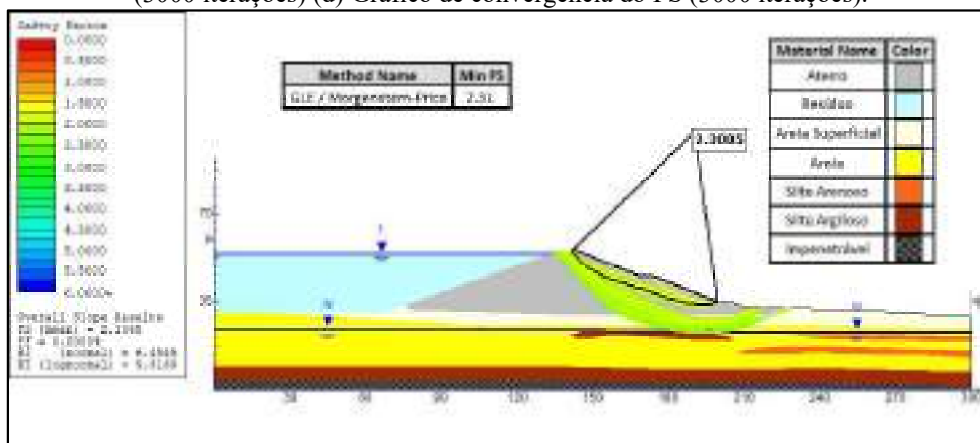


Fonte: Autora (2023)

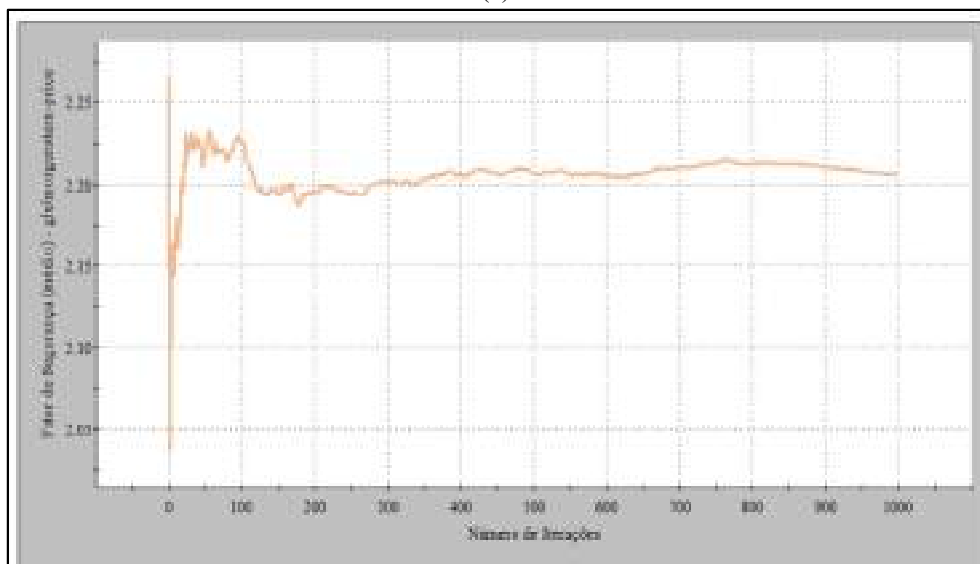
Em relação aos resultados da abordagem probabilística, observou-se uma redução no FS em comparação com o valor derivado da abordagem determinística. Conforme observado na Figura 101-(a) e 101-(c), o FS médio probabilístico foi aproximadamente de 2,20, apresentando uma Pr de 0%, com índices de confiabilidade variando entre 6,22 (valor normal) a 8,97 (valor log-normal), sendo estes valores superior aos limites definidos pela USACE (1997). Com base nesses dados, pode-se inferir que o talude se mantém estável diante dessa condição de carregamento.

No que diz respeito à estabilização dos resultados, as Figuras 101-(b) e 101-(d), indicam uma tendência a convergência dos resultados a partir de 1000 iterações, fixando-se em torno do valor de 2,20, mostrando que os resultados encontrados são estáveis.

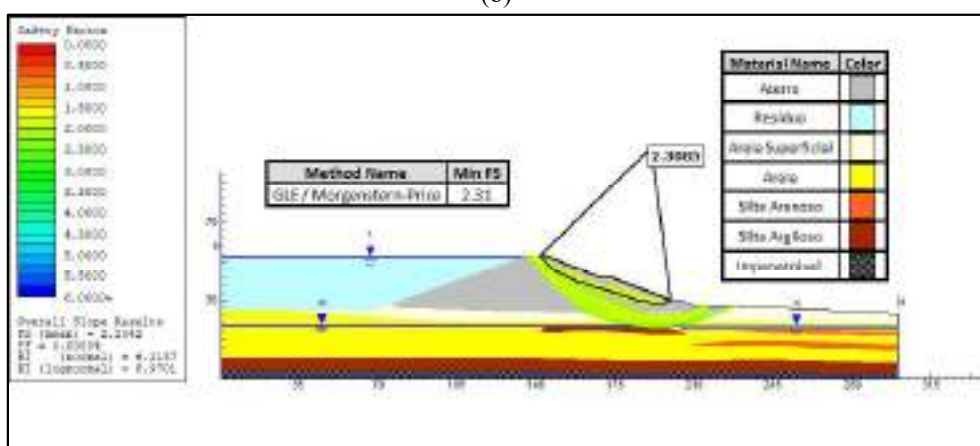
Figura 101 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



(a)

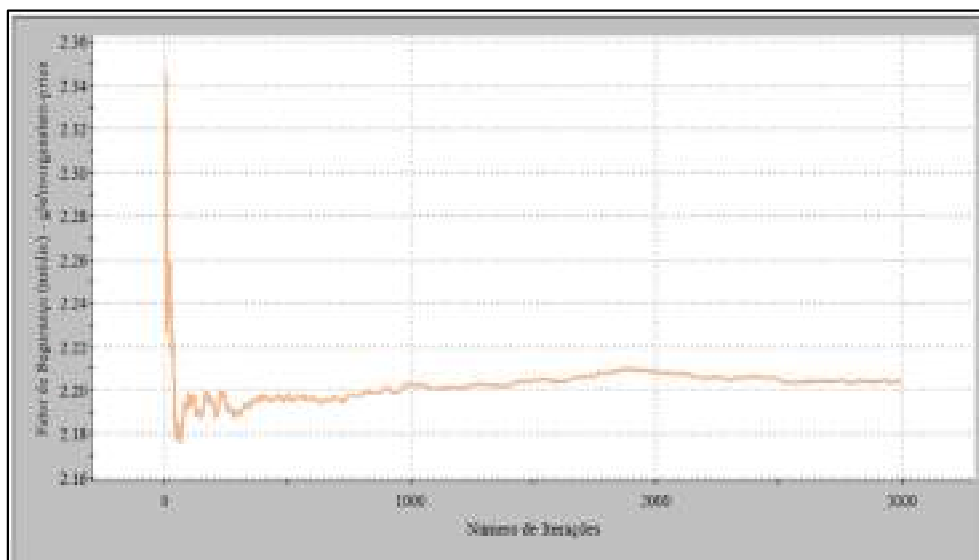


(b)



(c)





(d)

Fonte: Autora (2023)

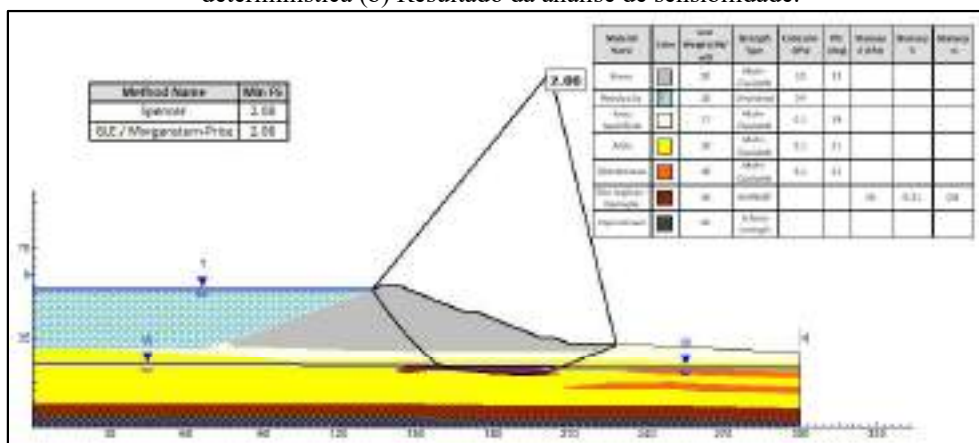
#### 5.4.6 Operação Normal – Não drenado

Os resultados encontrados para a fase de operação em condição normal não-drenada são apresentados nas Figuras 102 e 103.

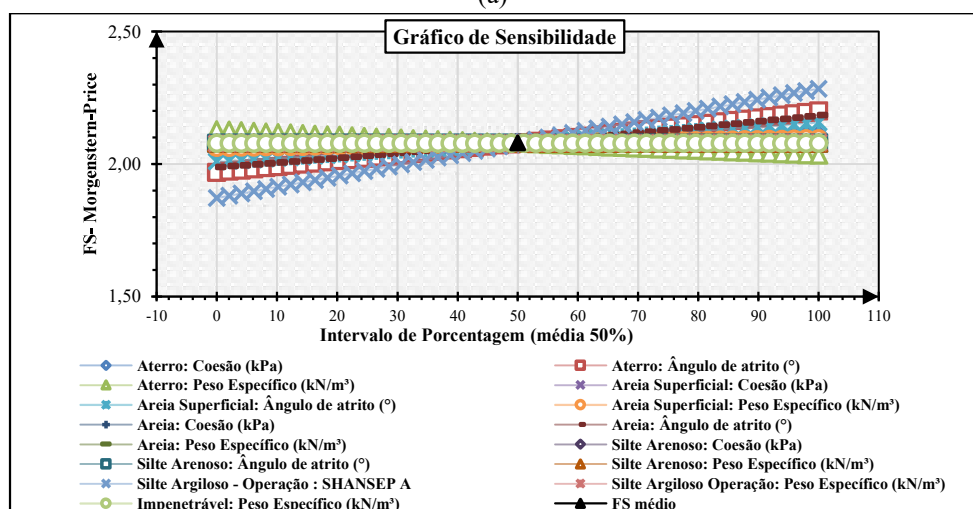
Na condição não drenada, conforme ilustrado na Figura 102-(a), observa-se uma redução no FS. Essa diminuição pode ser atribuída à presença de água entre as partículas sólidas, interferindo na capacidade de resistência dos materiais. Nota-se ainda que a localização da SPR acaba interceptando quatro camadas de materiais denominados de: aterro, areia superficial, areia e silte-argiloso. Considerando que em condições não drenadas, a liberação do excesso de poropressão é dificultada, verifica-se, nesse contexto, que SPR tenderá a interceptar as camadas em que essa condição é mais acentuada. Nesse caso como parte do aterro será apoiada em uma pequena camada de material silte-argiloso em condição não drenada, o comportamento dessa camada tenderá ser o mais crítico, justificando assim a localização da superfície.

Com base nessa condição, a análise determinística ainda apresentou um FS de 2,08, conforme ilustra a Figura 102-(a), sendo este inferior ao obtido pela condição drenada, porém superior ao mínimo exigido pela NBR 13028/17. No que se refere aos resultados da Figura 102-(b), observa-se que o FS apresenta uma leve variação às mudanças no ângulo de atrito do aterro, da areia superficial e da camada de areia, assim como da resistência não-drenada do silte-argiloso.

Figura 102 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

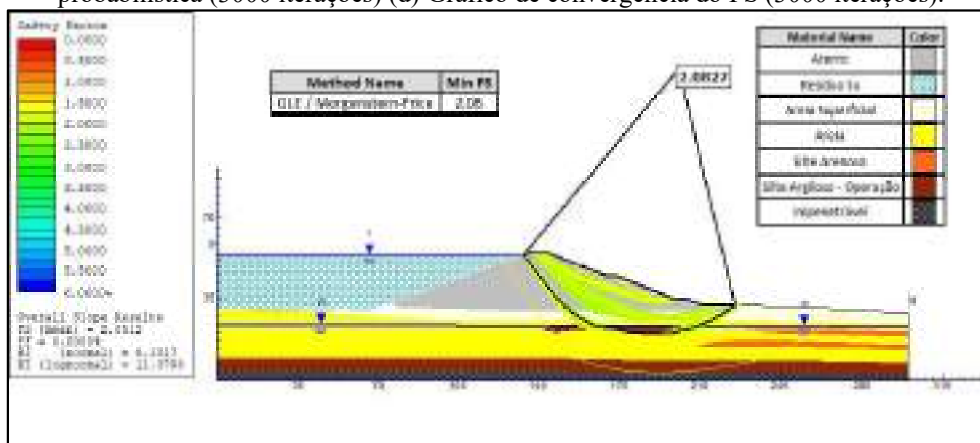


(b)

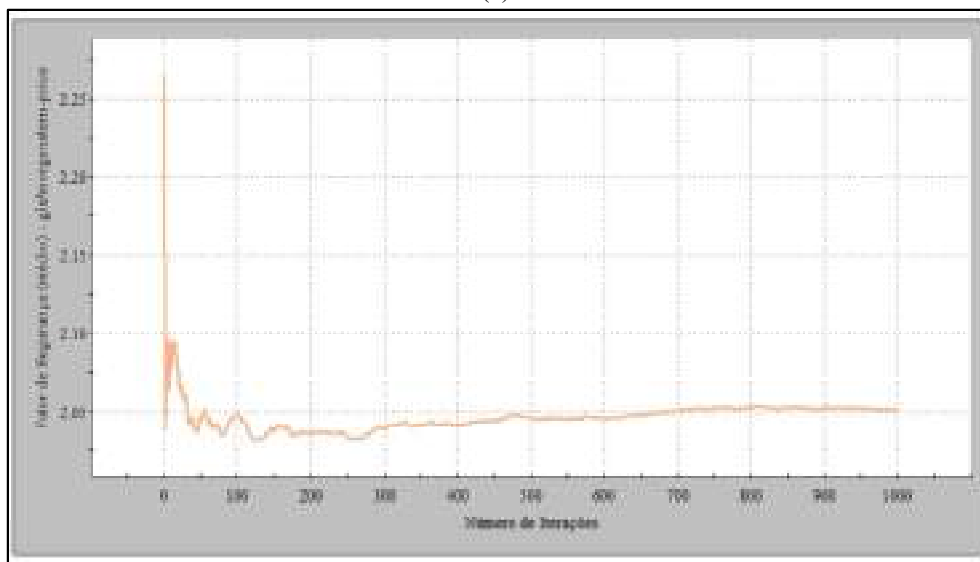
Fonte: Autora (2023)

Em relação aos resultados probabilísticos apresentados nas Figuras 103-(a) e 103-(c), observa-se uma pequena redução no FS probabilístico em comparação com o resultado determinístico, fixando-se em torno de 2,05. Adicionalmente, a Pr para 1000 e 3000 iterações permaneceram em 0%, acompanhadas por índices de confiabilidade variando entre 8,13 (valor normal) a 11,38 (valor log-normal). Esses parâmetros revelam um comportamento estável do talude jusante da seção D, estando em conformidade com os critérios definido pela USACE (1997). No que tange a convergência dos resultados, as curvas apresentadas nas Figuras 103-(b) e 103-(d), revelam um padrão estável dos resultados a partir de 1500 iterações.

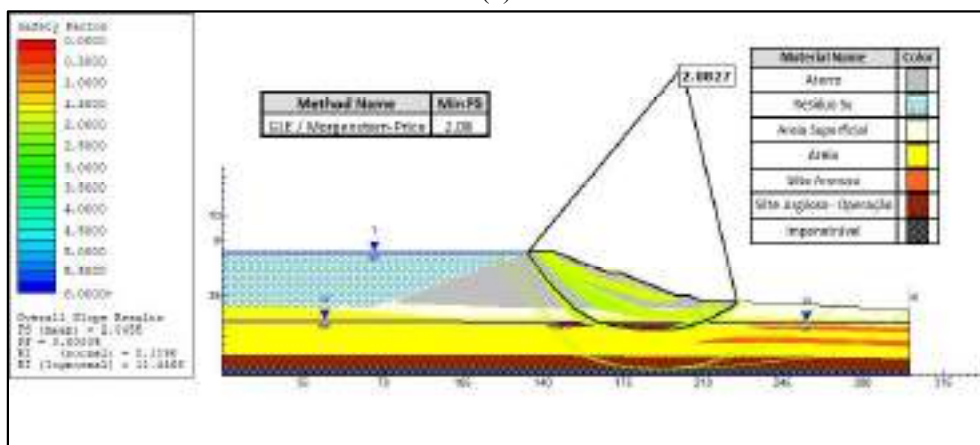
Figura 103 - Resultado da Seção D-D - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



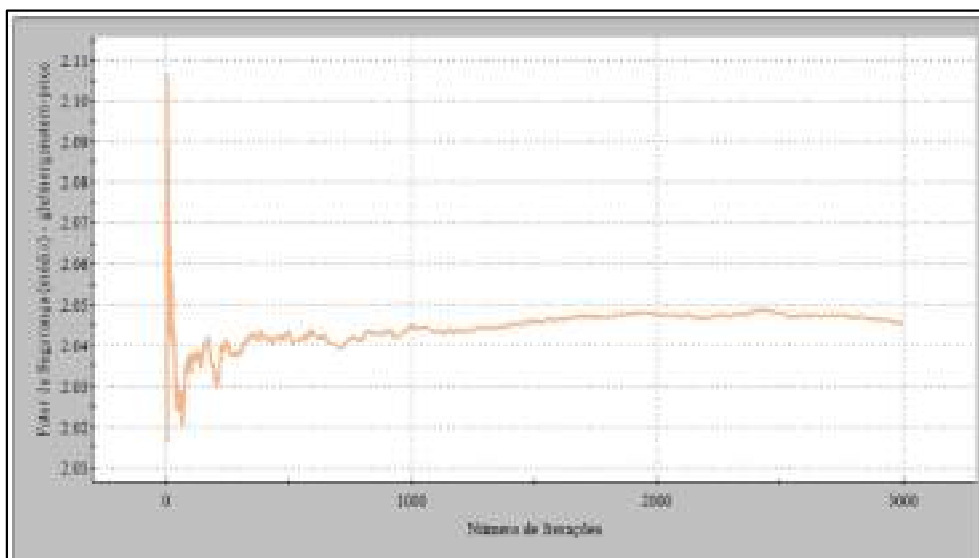
(a)



(b)



(c)



(d)

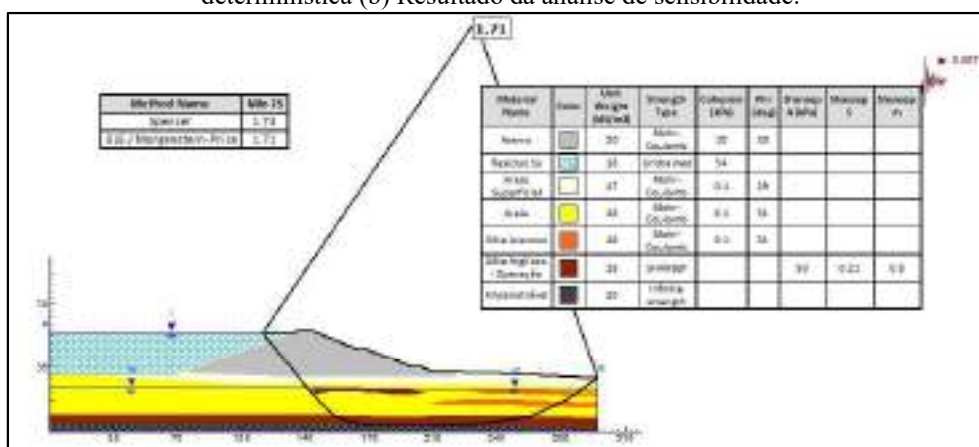
Fonte: Autora (2023)

#### 5.4.7 Solicitação Pseudoestática

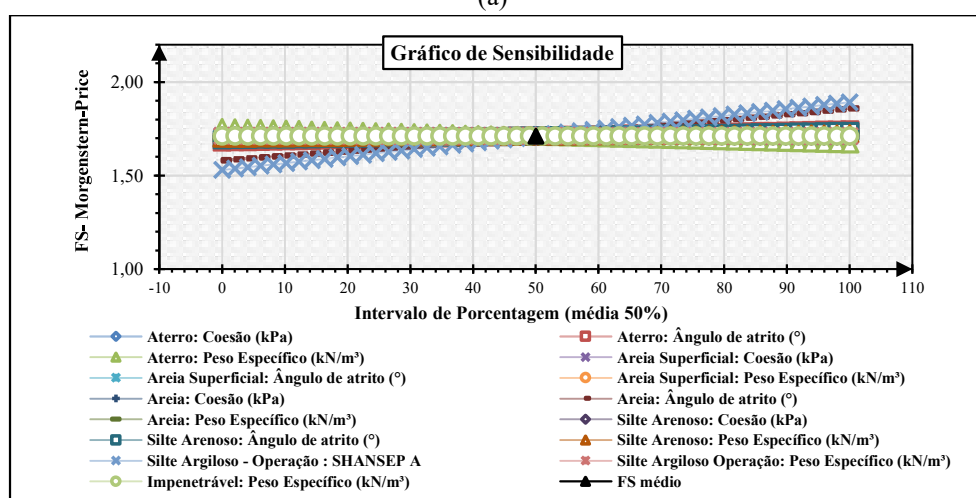
Os resultados encontrados para as fases de solicitação pseudoestática realizadas na seção D são apresentados nas Figuras 104 a 109.

A partir da análise da Figura 104-(a), observa-se que o FS determinístico, considerando exclusivamente a carga horizontal de solicitação pseudoestática, alcança um valor de 1,71, atendendo aos valores mínimos da NBR 13028/17. Em relação aos resultados da análise de sensibilidade, é possível observar pela Figura 104-(b), que o FS é variável as mudanças no ângulo de atrito da camada de areia, assim como da resistência não-drenada da camada de silte argiloso.

Figura 104 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

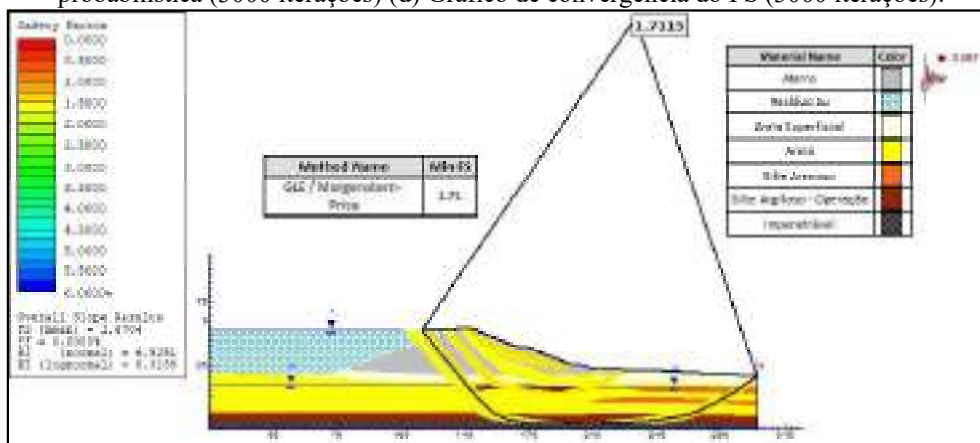


(b)

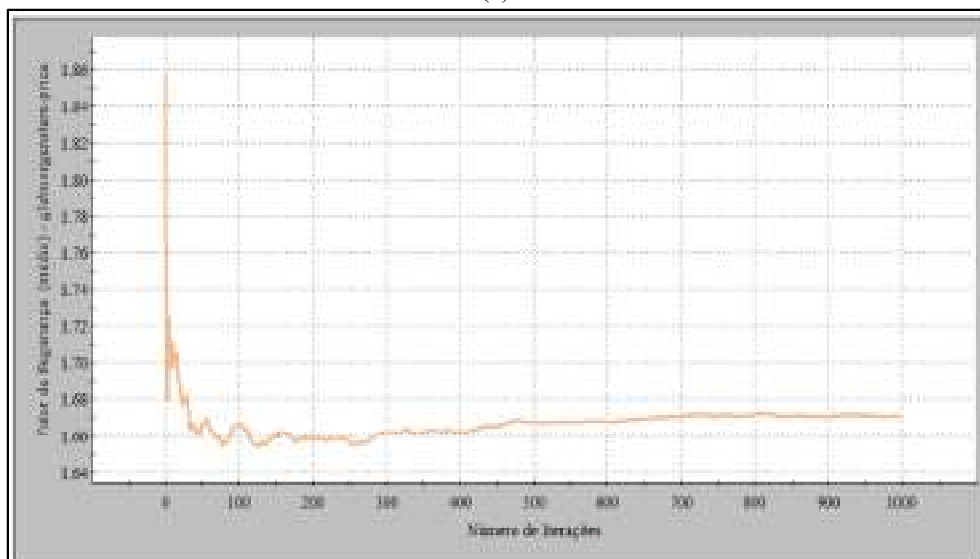
Fonte: Autora (2023)

Sob a perspectiva probabilística, observa-se pelas Figuras 105-(a) e 105-(c), que o FS médio probabilístico apresentou valor igual a 1,67, com Pr nula para ambas as iterações. Quanto aos índices de confiabilidade mínimos, estes variaram entre 6,49 (valor normal) a 8,27 (valor log-normal). De acordo com os valores estabelecidos pela USACE (1997), os parâmetros encontrados pela abordagem probabilística, apontam para um talude com nível de desempenho satisfatório, considerando a condição a qual a análise foi conduzida. No que se refere às curvas de convergência, observa-se pelas Figuras 105-(b) e 105-(d), que os resultados tendem a se estabilizar entorno de 1,67 a partir de 1500 iterações.

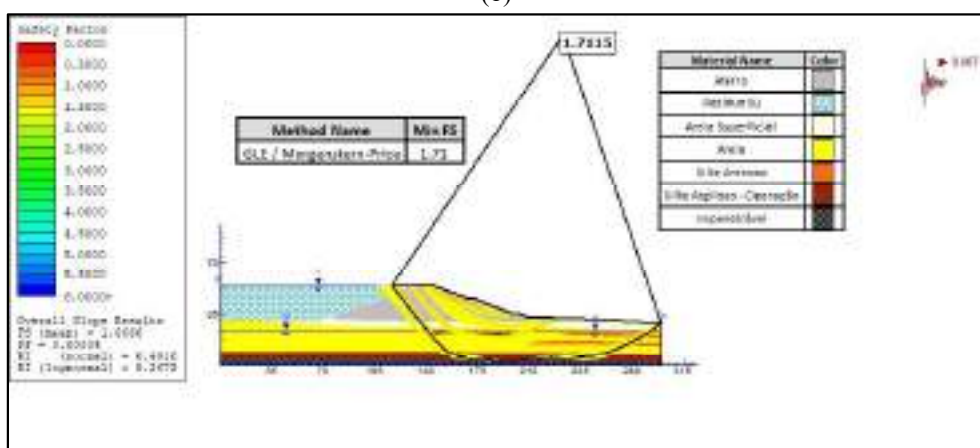
Figura 105 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



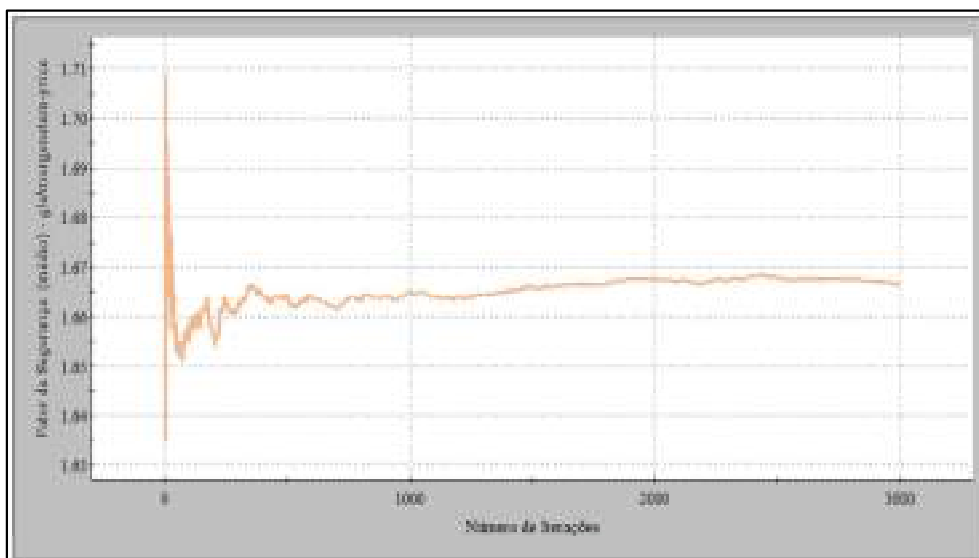
(a)



(b)



(c)

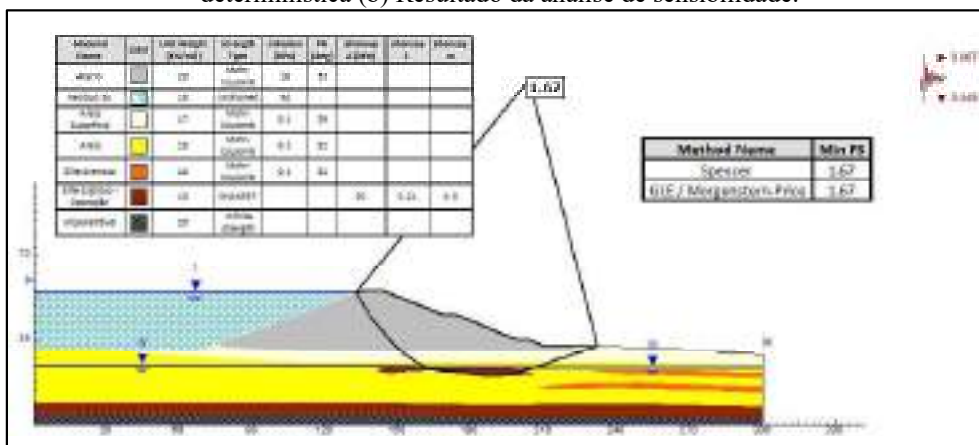


(d)

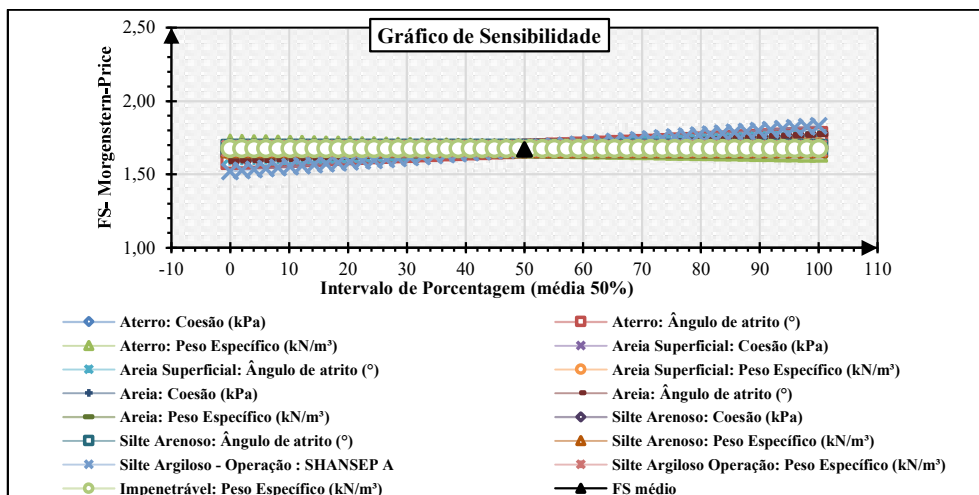
Fonte: Autora (2023)

Ao introduzir carregamentos verticais ao sistema, observa-se que o FS determinístico varia entre 1,67 a 1,71. Além disso, tanto para o cenário da Figura 106-(b) quanto da Figura 107-(b), os resultados das análises de sensibilidade também são bastante similares. No que se refere a estabilidade, em ambos os cenários, os taludes permanecem estáveis a ocorrência de solicitações pseudoestáticas, conforme mostra a abordagem determinística.

Figura 106 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



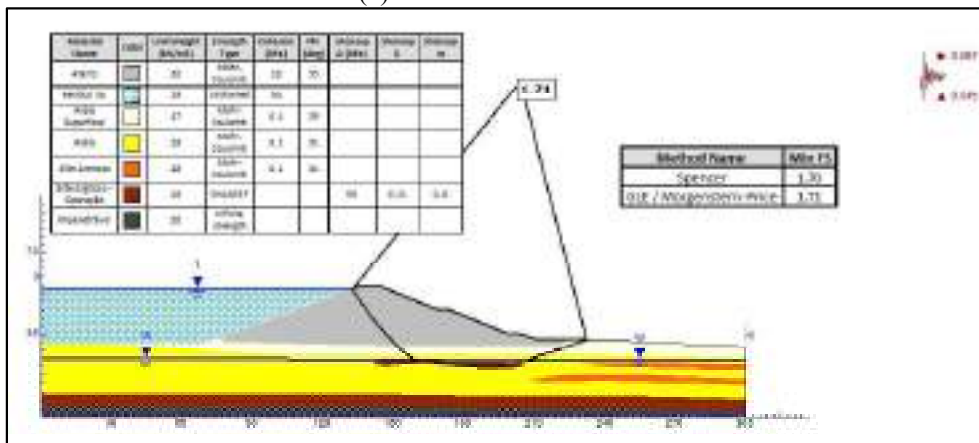
(a)



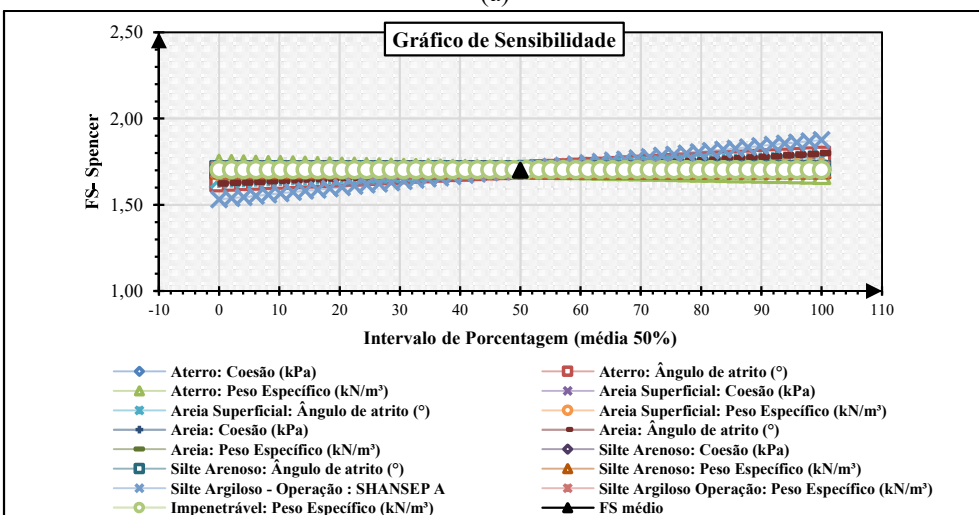
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 107 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

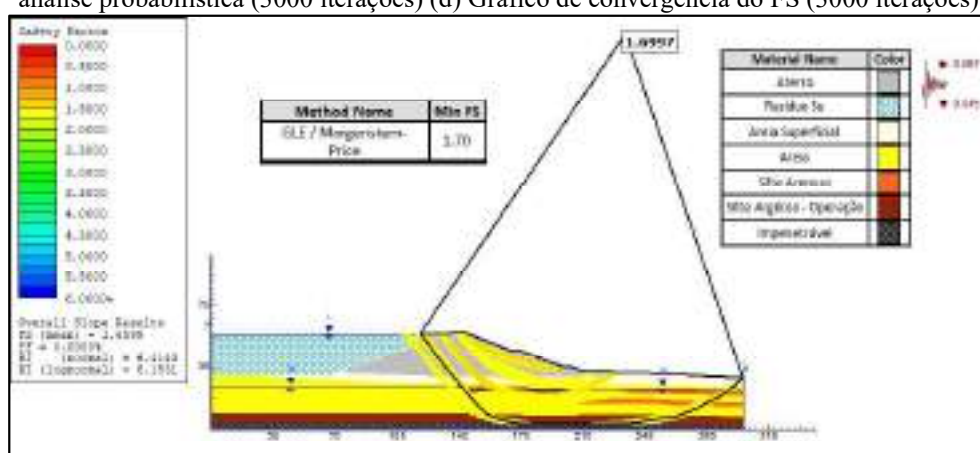
Fonte: Autora (2023)



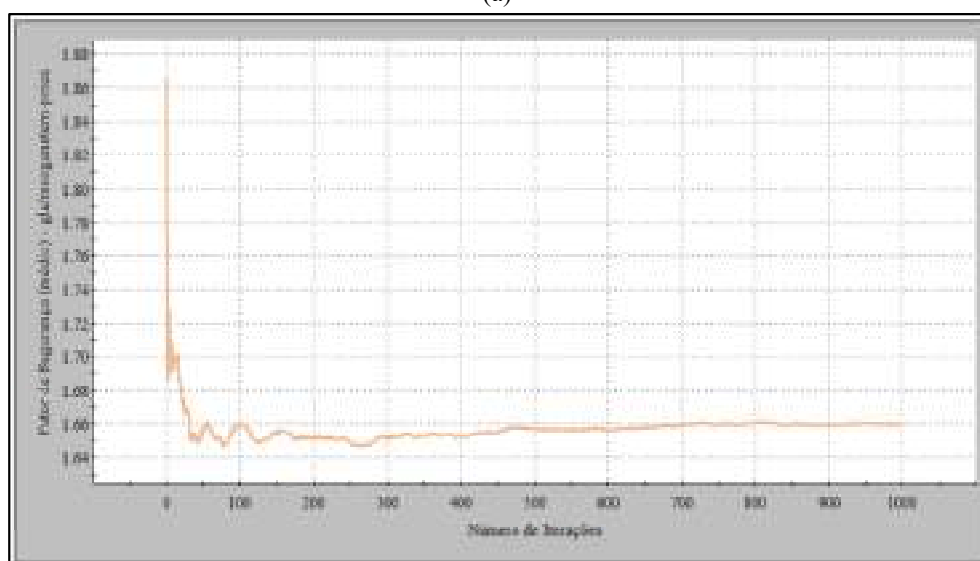
Com relação aos resultados probabilísticos, apresentados nas Figuras 108-(a), 108-(c), 109-(a) e 109-(c), destaca-se que, nas duas condições de carregamento analisadas, o menor FS probabilístico encontrado permaneceu constante em 1,66 ao longo de 1000 e 3000 iterações. Adicionalmente, constatou-se que as probabilidades de ruptura foram nulas, enquanto os índices de confiabilidade log-normal variaram entre 6,37 a 6,49 (valor normal) assim como entre 8,09 e 8,38 (valor log-normal). Quanto às curvas de convergência exibidas nas Figuras 108-(b), 108-(d), 109-(b) e 109-(d), nota-se uma tendência a estabilização dos resultados a partir de 1500 iterações.

Ao analisar os resultados probabilísticos obtidos e considerando os limites mínimos estabelecidos pela USACE (1997), é plausível inferir que, sob uma perspectiva probabilística, o talude da seção D mantém-se estável diante das condições de carregamento analisadas.

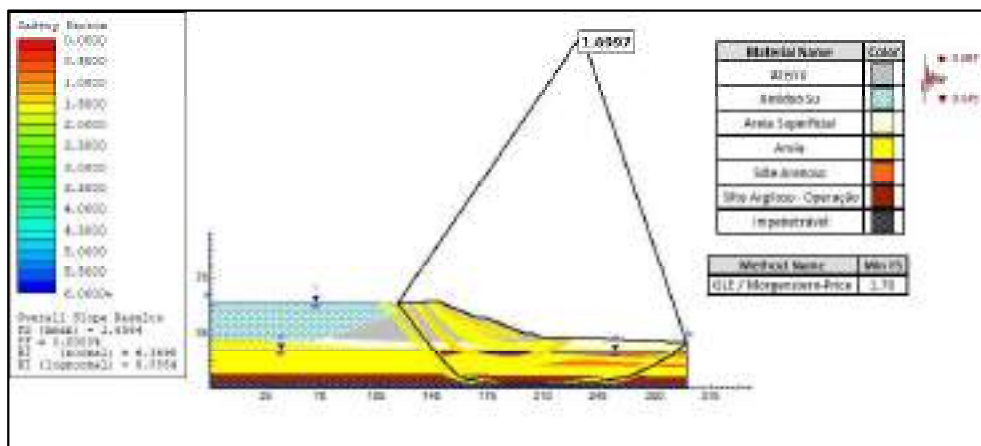
Figura 108 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



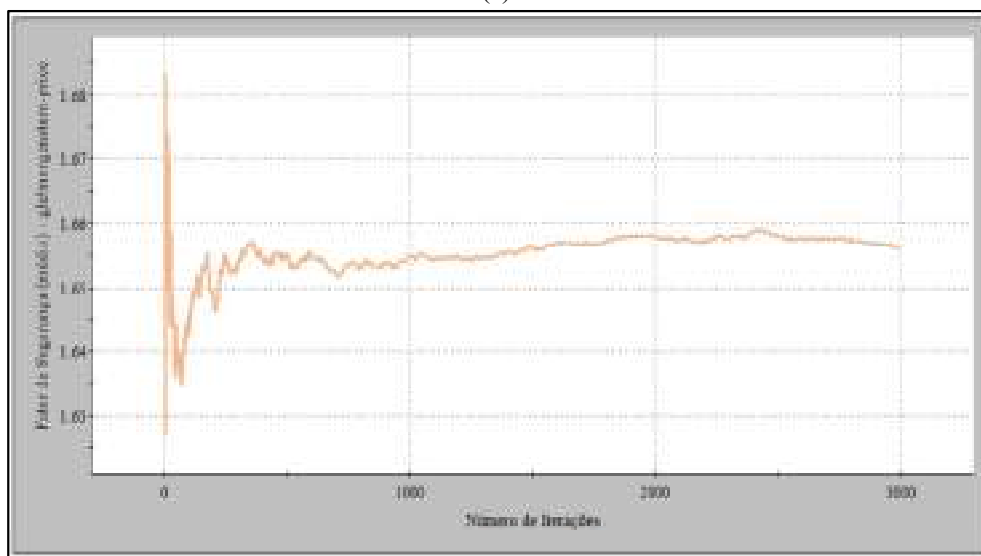
(a)



(b)



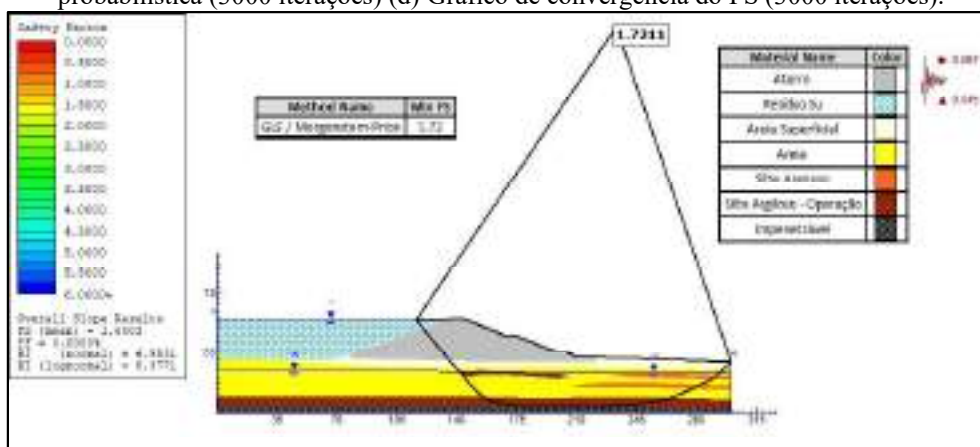
(c)



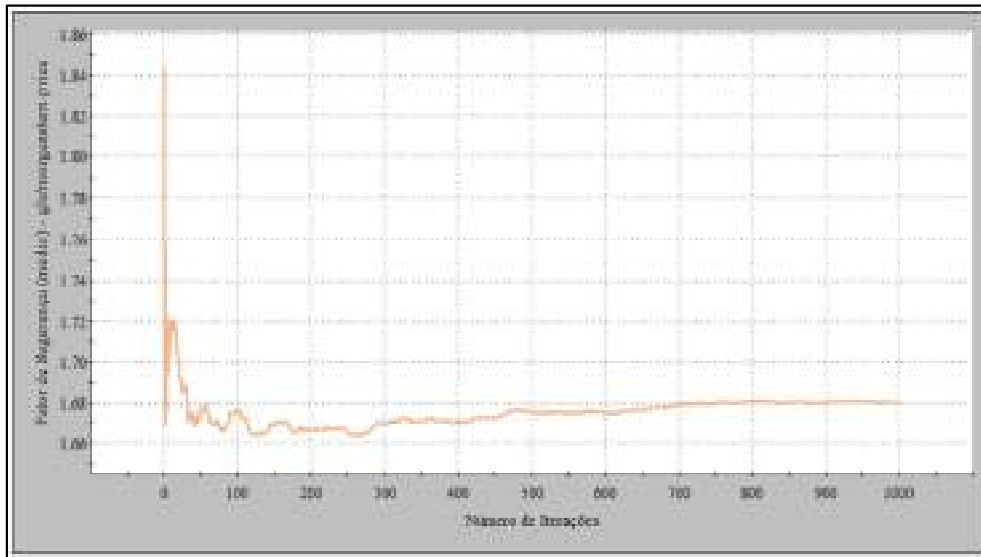
(d)

Fonte: Autora (2023)

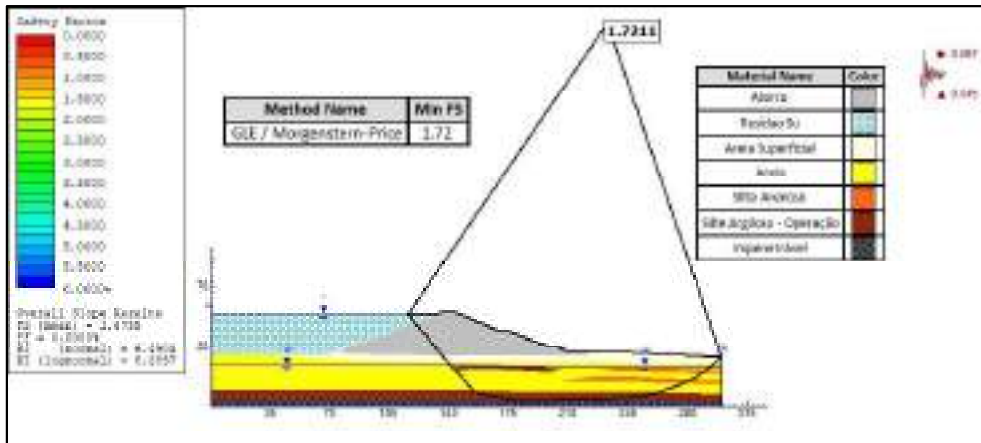
Figura 109 - Resultado da Seção D-D - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



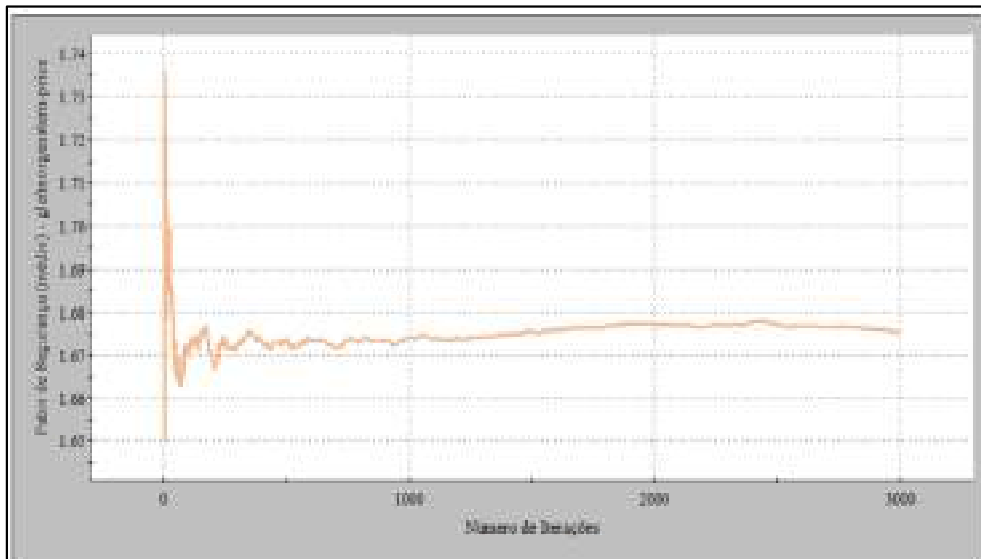
(a)



(b)



(c)



(d)

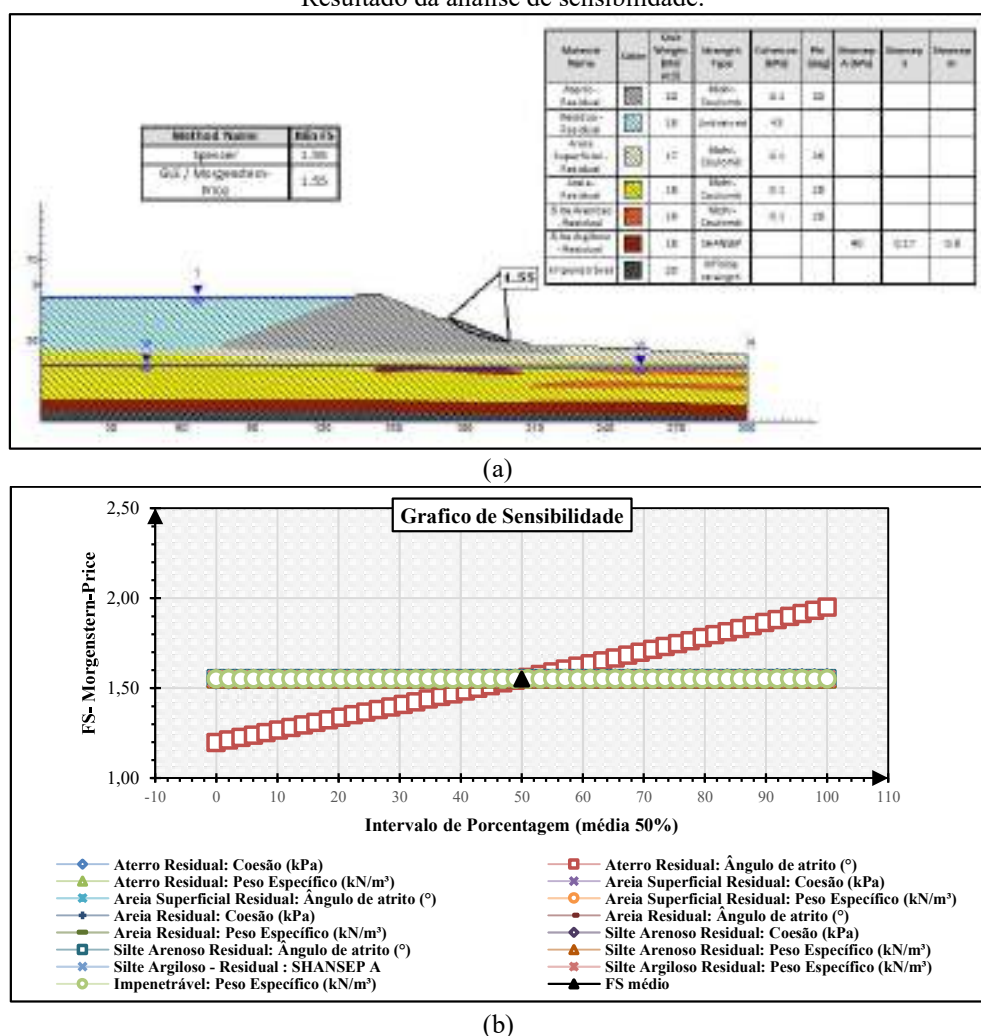
Fonte: Autora (2023)

### 5.4.8 Solicitação pós-sísmica

Os resultados referentes à condição com solicitação pós-sísmica são apresentados nas Figuras 110 e 111.

Conforme é apresentado na Figura 110-(a), a análise determinística revelou um FS de 1,55, superando o mínimo exigido de 1,00 pela ANCOLD (2019) e evidenciando a estabilidade do talude nessa condição específica. Na análise de sensibilidade, destacada na Figura 110-(b), observa-se que a variável que mais influencia o FS é o ângulo de atrito da camada de aterro compactado. Essa influência é atribuída à localização da SPR, a qual se encontra integralmente dentro dessa camada de material.

Figura 110 - Resultado da Seção D-D - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



Fonte: Autora (2023)

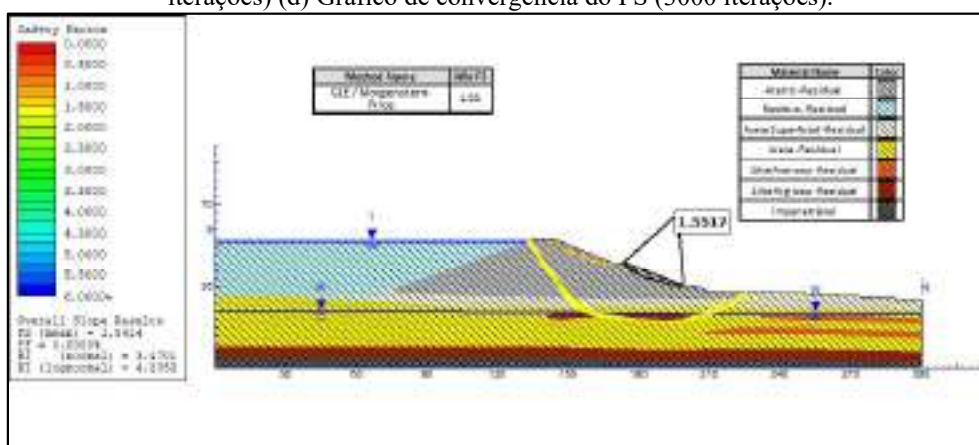
No que diz respeito aos resultados provenientes da abordagem probabilística, evidenciadas na Figura 111-(a) e 111-(c), verifica-se uma consistência nos valores dos FS tanto determinístico quanto probabilístico, mantendo-se em torno de 1,54. A Pr derivada de 1000 e

3000 iterações, revelou-se nula, indicando a ausência de riscos de incidentes. Quanto ao índice de confiabilidade estes variaram entre 3,46 (valor normal) a 4,22 (valor log-normal), mantendo-se dentro dos limites admissíveis, conforme os critérios estabelecidos pela USACE (1997).

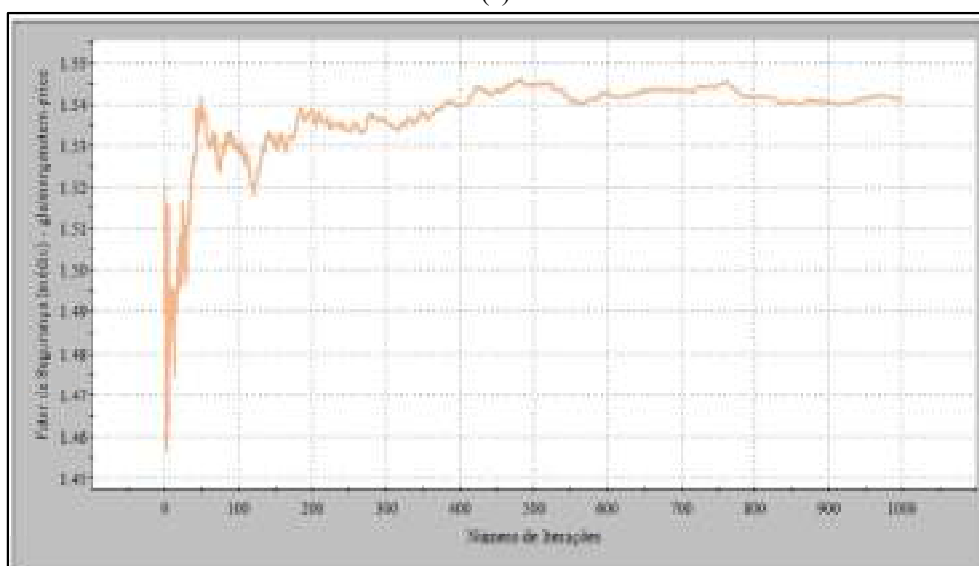
Ao avaliar esses parâmetros, é possível inferir que o talude mantém sua estabilidade em condições pós-sísmicas. No entanto, é pertinente manter um nível de atenção em relação a esse cenário, uma vez que os índices de confiabilidade encontrados são relativamente baixos em comparação com os demais cenários analisados para esta seção.

No que concerne às curvas de convergência, observa-se pelas Figuras 111-(b) e 111-(d), que os resultados tendem a apresentar um comportamento estável a partir de 1000 iterações, indicando a consistência dos resultados descritos.

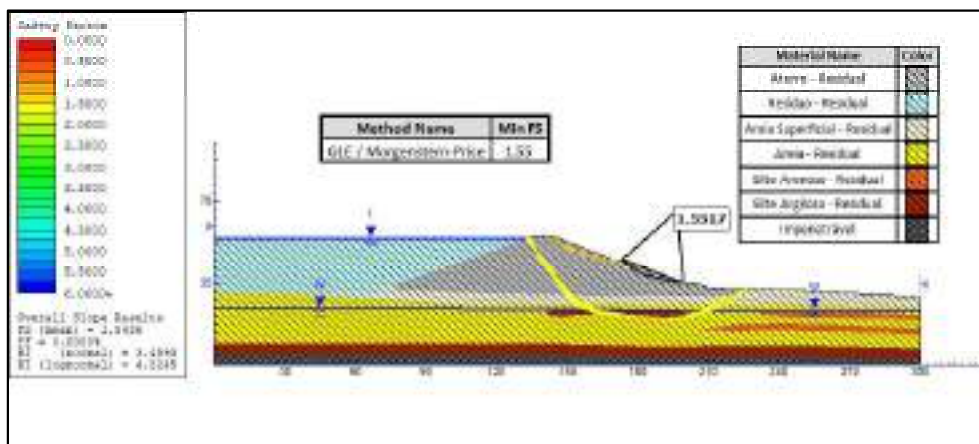
Figura 111 - Resultado da Seção D-D - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



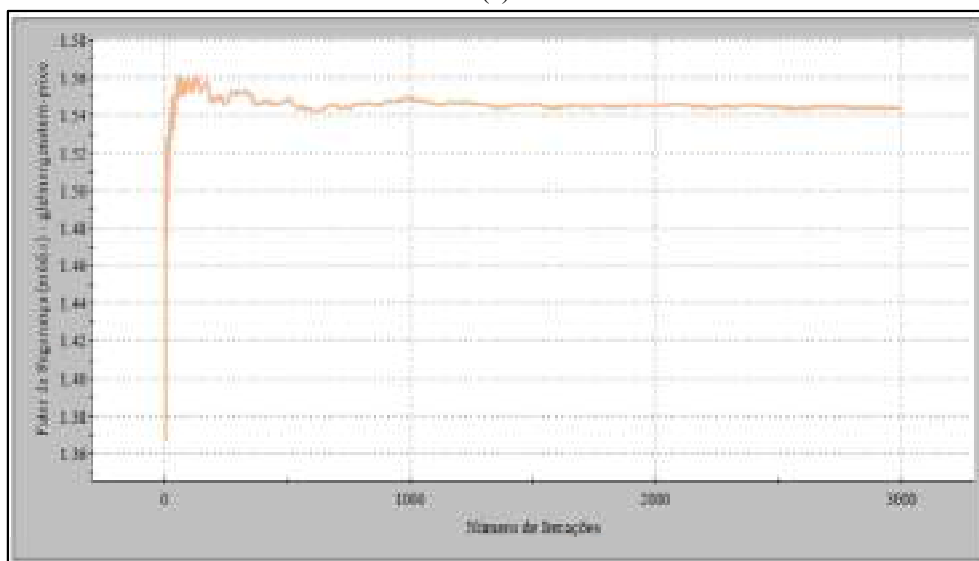
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 23, encontram-se organizado os resultados encontrados a partir da aplicação das análises probabilísticas para a seção D, considerando 1000 e 3000 iterações. Ao examinar os resultados da tabela, e, tomando como referência os valores descritos no item 3.8, é possível inferir que os taludes da seção D demonstraram estabilidade diante dos dez cenários de carregamentos avaliados, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística. No entanto, é importante adotar precauções adicionais em relação ao cenário de solicitação pós-sísmica, uma vez que seus índices de confiabilidade foram significativamente inferiores aos dos demais cenários.

Tabela 23 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção D-D.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				3000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,94	1,90	0	6,72	9,08	1,89	0	6,56	8,84
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,67	1,63	0	5,02	6,33	1,64	0	4,86	6,13
Final de construção Sem Ru	J	1,3	1,97	1,96	0	7,96	10,92	1,95	0	8,05	11,01
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,87	1,76	0	5,72	7,46	1,76	0	5,63	7,34
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,31	2,21	0	6,45	9,32	2,2	0	6,22	8,97
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	2,08	2,05	0	8,13	11,38	2,05	0	8,19	11,45
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,71	1,67	0	6,53	8,32	1,67	0	6,49	8,27
			1,67	1,66	0	6,41	8,15	1,66	0	6,37	8,09
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,71	1,68	0	6,55	8,38	1,68	0	6,49	8,29
			1,55	1,54	0	3,47	4,24	1,54	0	3,46	4,22

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

## 5.5 SEÇÃO E

Com o propósito de avaliar a estabilidade desta seção, foram conduzidas análises determinísticas e de sensibilidade, bem como análises probabilísticas para 1000 e 3000 iterações. Os resultados destas análises são apresentados nas Figuras 112 a Figura 131.

### 5.5.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

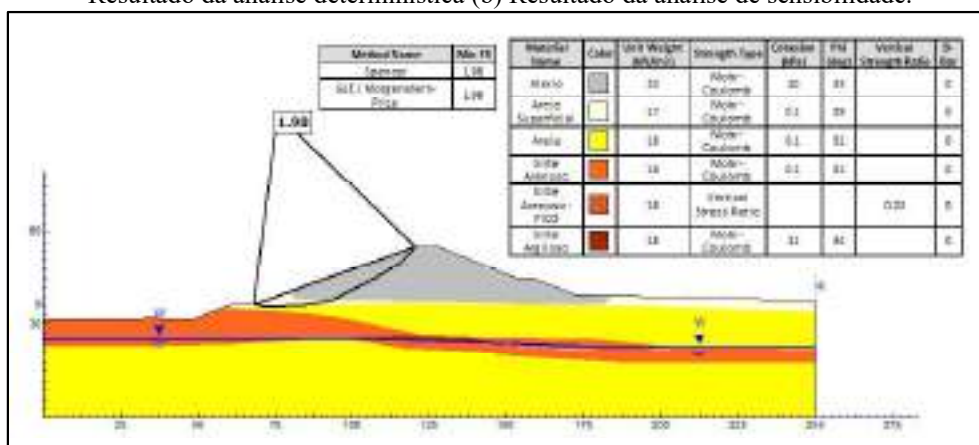
Os resultados das análises para a fase de final de construção do talude montante, desconsiderando o parâmetro de proressão (Ru) na camada de aterro, são apresentados nas Figuras 112 e 113.

A fundação da seção E, conforme pode ser observado na Figura 112-(a), é constituída por quatro estratos de materiais distintos denominados de: areia superficial, areia, silte arenoso e silte-argiloso. Sondagens SPT realizadas nas proximidades desta seção revelaram  $N_{SPT}$  crescente com a profundidade, com as camadas de até 10 m sendo classificadas como materiais de compactidade fofa a medianamente compacta.

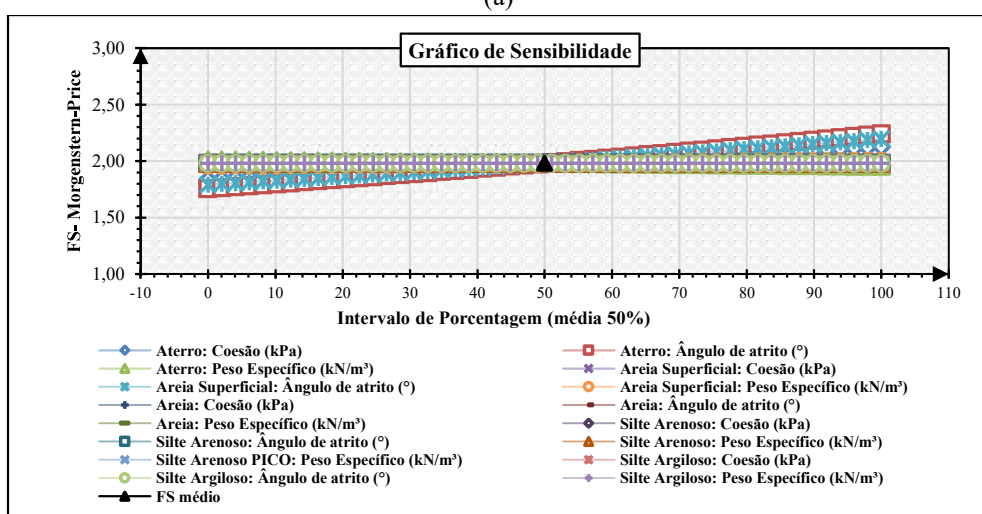
Pela abordagem determinística, conforme demonstrado na Figura 112-(a), constatou-se que o menor FS encontrado para esta condição foi de 1,98, obtido tanto pelos métodos de

Morgenstern-Price quanto pelo de Spencer. Sob uma perspectiva determinística, esse valor indica a estabilidade do talude, estando em conformidade com o exigido pela NBR 13028/17. No que se refere a análise de sensibilidade, apresentada na Figura 112-(b), está revela que o FS é particularmente sensível as variações da coesão e ângulo de atrito da camada de aterro, bem como do ângulo de atrito da camada de areia superficial, materiais nos quais a SPR encontra-se inserida.

Figura 112 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



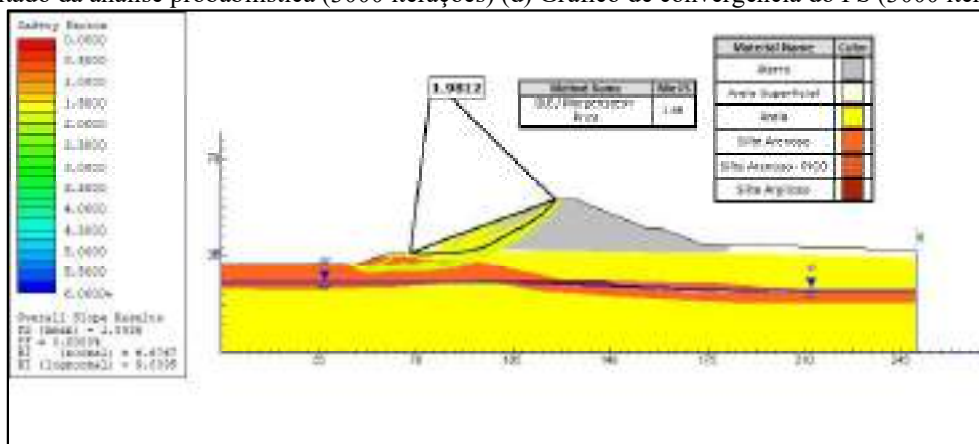
(b)

Fonte: Autora (2023)

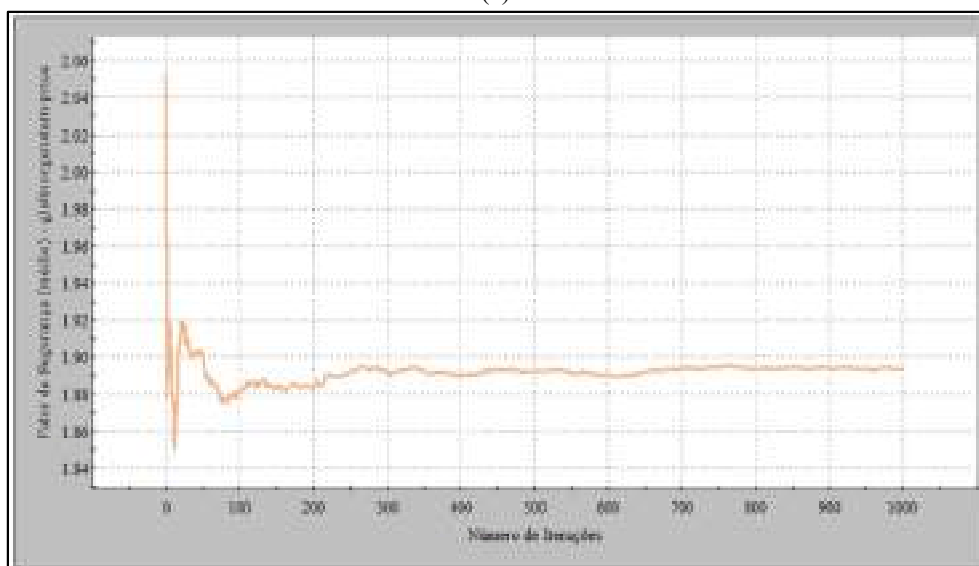
Ao adotar uma perspectiva probabilística, a Figura 113-(a) revela que o FS médio probabilístico foi de 1,89, inferior ao obtido pela abordagem determinística. Adicionalmente, foi encontrado para ambas as iterações uma Pr nula, com índices de confiabilidade 6,68 (valor normal) a 9,01 (valor log-normal). Ao considerar os critérios de desempenho definidos pela USACE (1997), conforme exposto no item 3.8, o talude é classificado como de alto desempenho, não exibindo, nas condições da avaliação, quaisquer indícios de instabilidade.



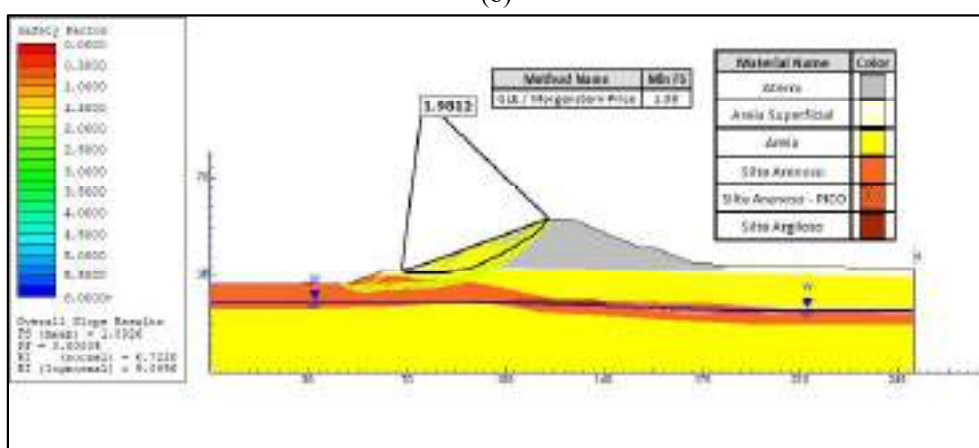
Figura 113 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



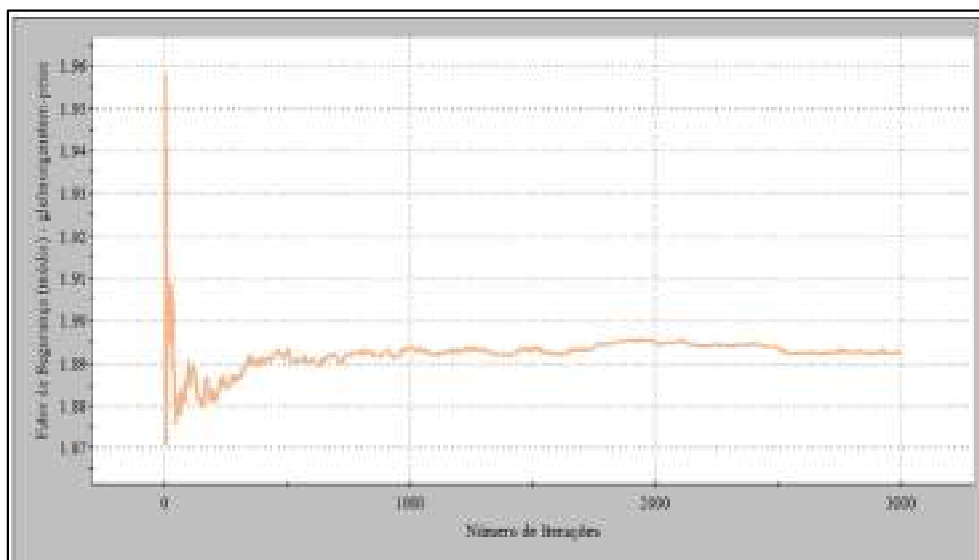
(a)



(b)



(c)



(d)

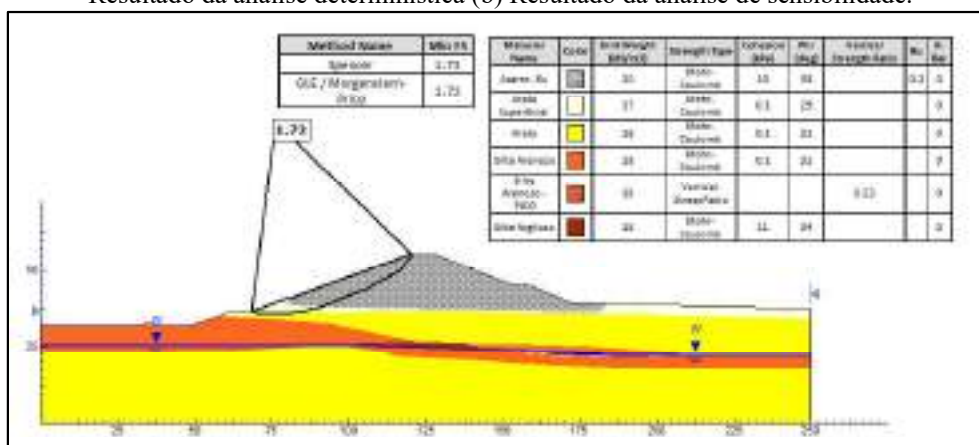
Fonte: Autora (2023)

### 5.5.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

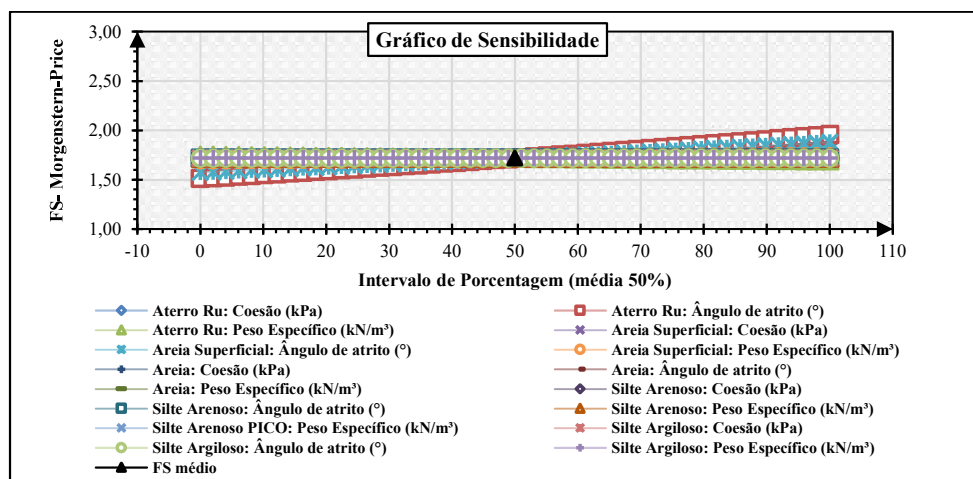
Os resultados para a fase de final de construção do talude montante, considerando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 114 e 115.

Mediante à aplicação de uma abordagem determinística, a Figura 114-(a) revela um FS de 1,72, superando os limites considerados adequados pela NBR 13028/17. Similarmente à condição anterior, nota-se que o FS se torna variável a mudanças dos parâmetros de resistência da camada de aterro e do ângulo de atrito da camada de areia superficial, conforme evidenciado na Figura 114-(b).

Figura 114 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



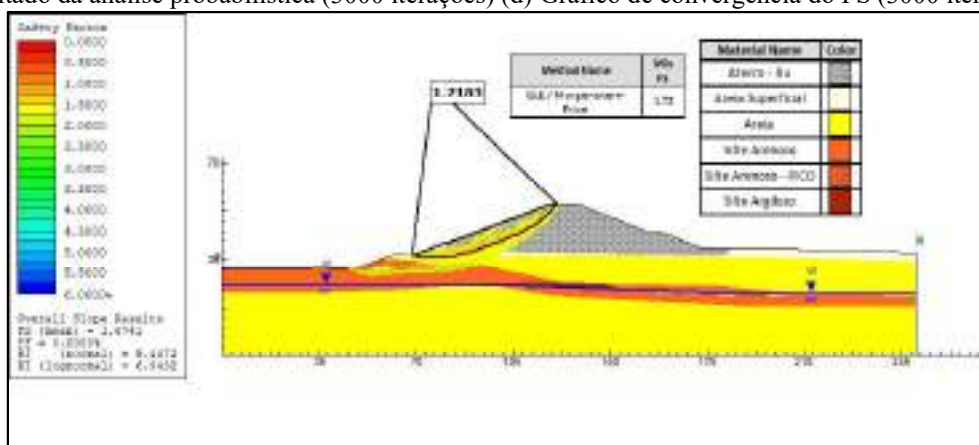
(b)

Fonte: Autora (2023)

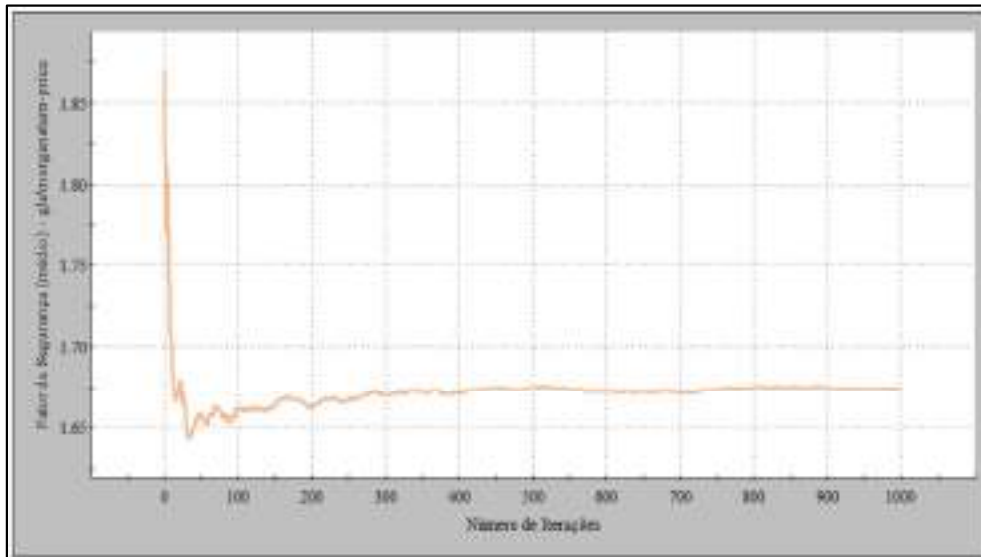
Ao realizar uma análise probabilística, é evidente, por meio das Figuras 115-(a) e 115-(c), que o FS probabilístico novamente se mostrou inferior ao determinístico alcançando o valor de 1,67 para ambas as iterações. Os resultados também destacam uma Pr nula e índices de confiabilidade variando entre 5,31 (valor normal) a 6,77 (valor log-normal), ambos indicativos de alto desempenho conforme a USACE (1997).

Em relação às curvas de convergência dos resultados, apresentadas nas Figuras 115-(b) e 115-(d), nota-se que os resultados tendem a exibir um comportamento estável a partir de 1000 iterações. Nesse contexto, é possível dizer que tanto pela abordagem determinística, quanto pela probabilística, o talude se mantém estável para este cenário.

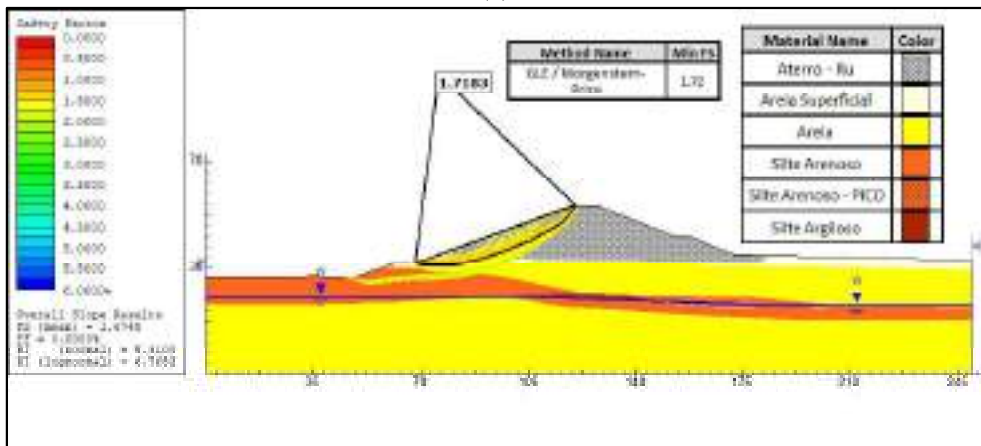
Figura 115 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



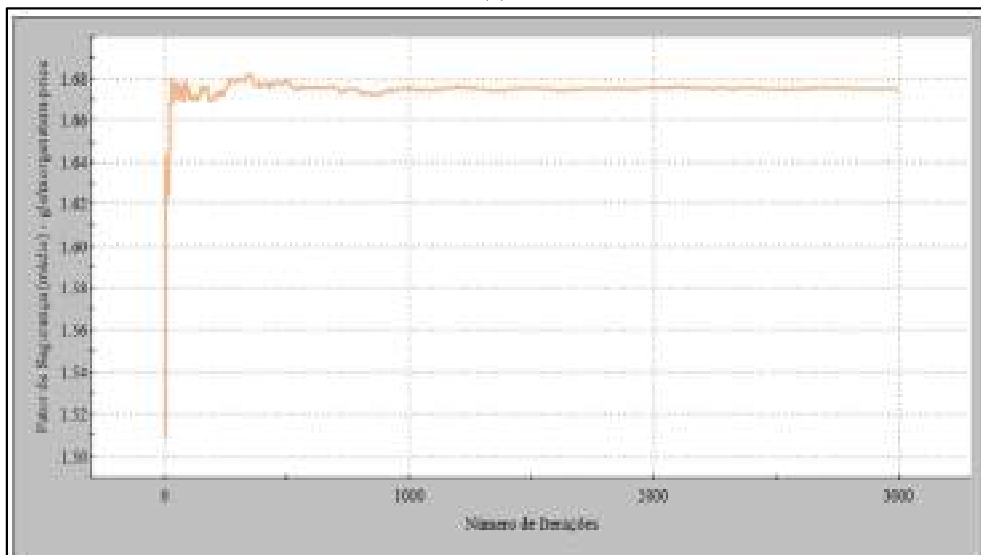
(a)



(b)



(c)



(d)

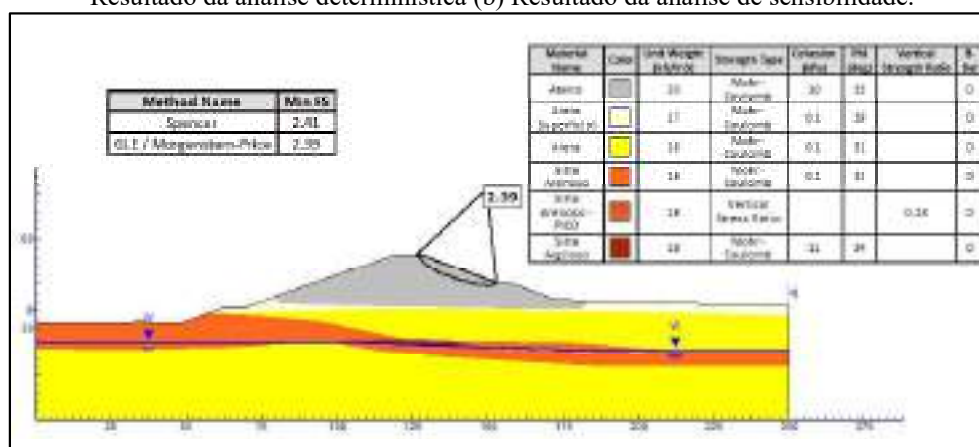
Fonte: Autora (2023)

### 5.5.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

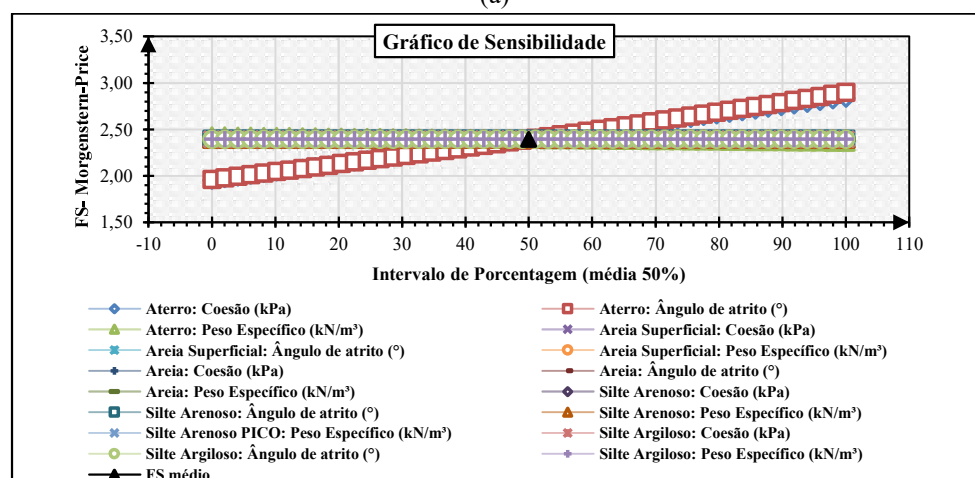
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude jusante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 116 e 117.

No que diz respeito ao talude jusante, a análise da Figura 116-(a) revela que a SPR se encontra inserida na camada de aterro compactado, apresentado um FS de 2,39 pelo método de Morgenstern-Price. Sob um olhar determinístico, esse valor é considerado elevado, ultrapassando o limite de 1,3 estabelecido pela NBR 13028/17. Em relação aos resultados das análises de sensibilidade, conforme ilustrado na Figura 116-(b), nota-se que a maior variação do FS, decorre das oscilações nos parâmetros de resistência da camada de aterro compactado (ângulo de atrito e coesão), enquanto os parâmetros das demais camadas existentes na geometria da seção E, não apresentam influência significativa nessas variações.

Figura 116 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



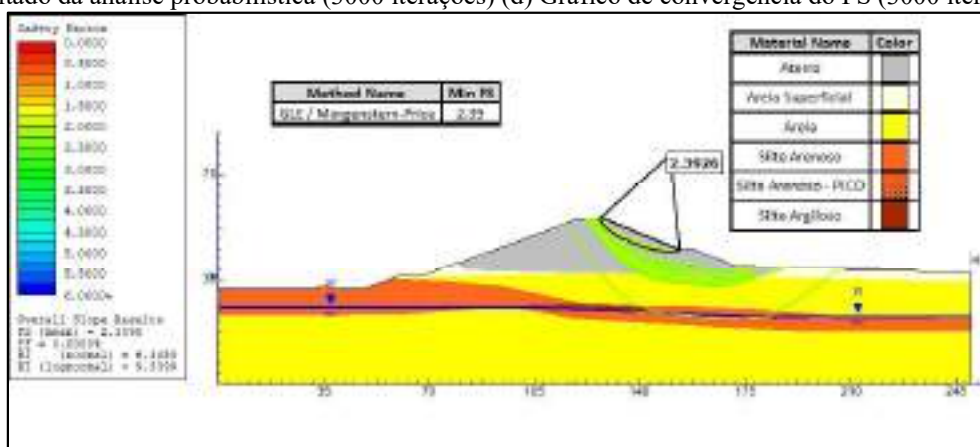
(b)

Fonte: Autora (2023)

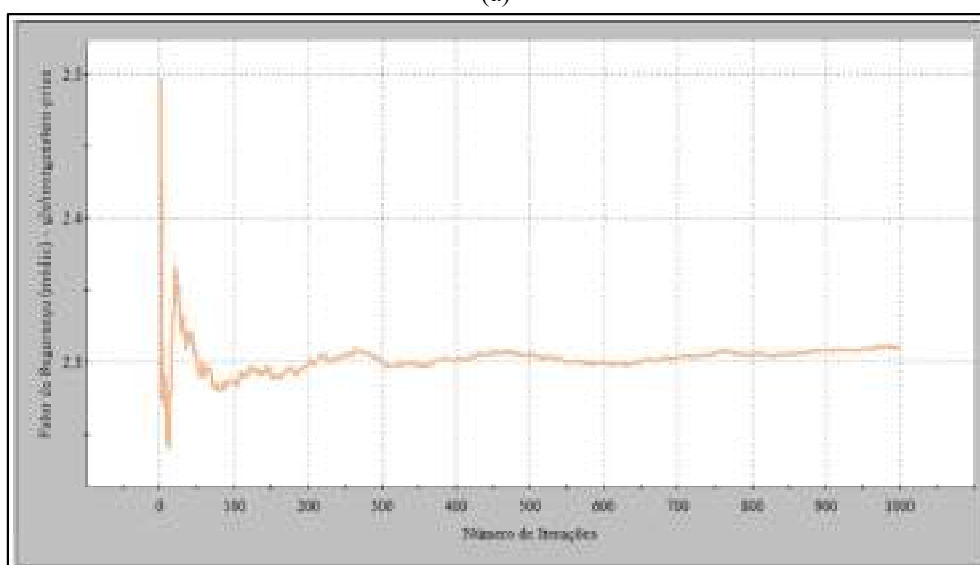
Sob uma perspectiva probabilística, os resultados apresentados nas Figuras 117-(a) e 117-(c), revelam que o menor FS médio probabilístico encontrado para ambas as iterações foi igual a 2,29, com probabilidades de ruptura nula e índices de confiabilidade variando entre 6,03 (valor normal) a 8,85 (valor log-normal), atendendo as exigências da USACE (1997). No que diz respeito às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 117-(b) e 117-(d), observa-se que a partir de 1500 iterações os resultados das análises tendem a convergir em torno de 2,29, indicando a consistência dos dados apresentados.

Com base nesses resultados, é possível afirmar que os parâmetros encontrados pela abordagem probabilística apontam para um talude com elevado desempenho e estabilidade. Sendo assim tanto pela abordagem determinística, quanto pela probabilística, o talude se mantém estável para este cenário.

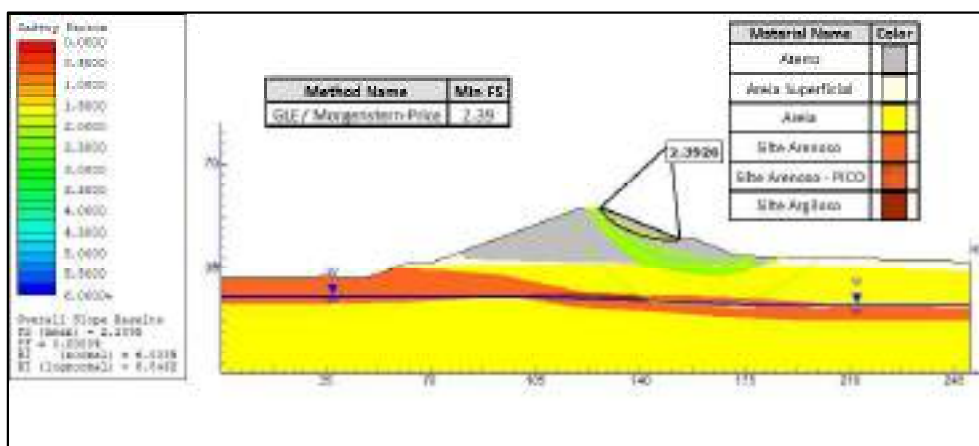
Figura 117 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



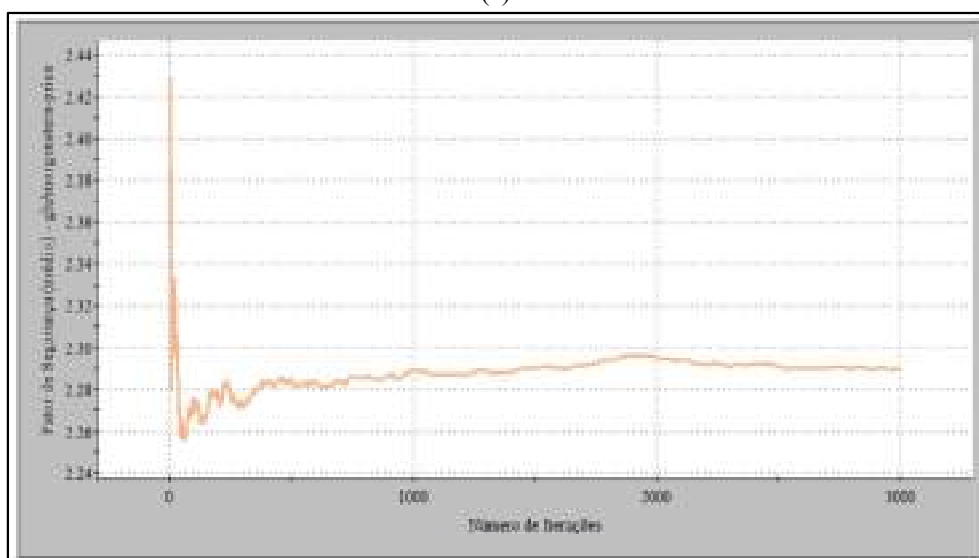
(a)



(b)



(c)



(d)

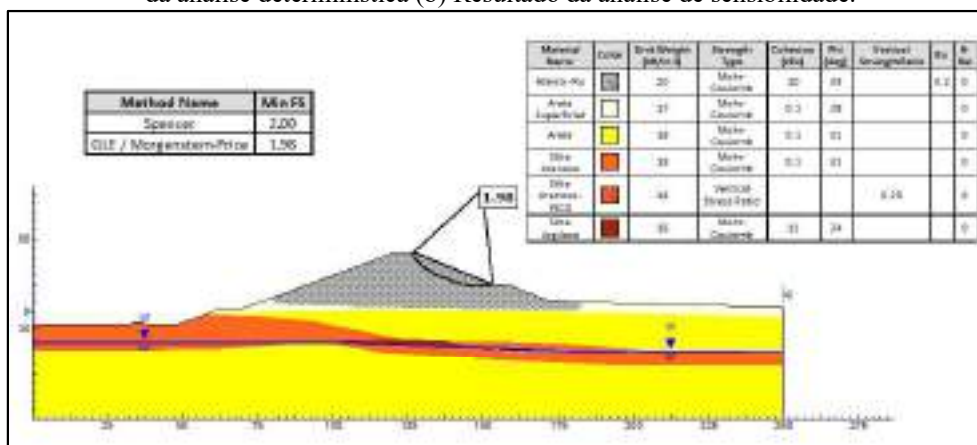
Fonte: Autora (2023)

#### 5.5.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

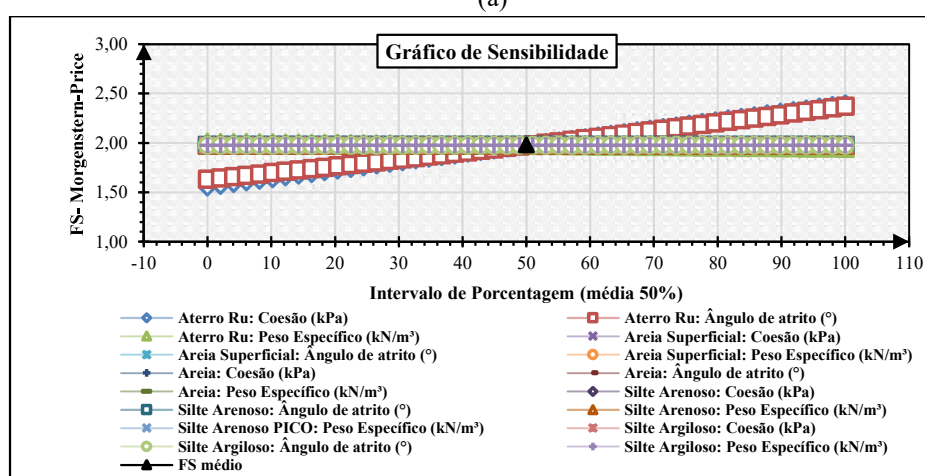
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude jusante, considerando o parâmetro de propressão ( $R_u$ ) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 118 e 119.

Ao analisar a Figura 118-(a), destaca-se que o menor FS determinístico encontrado foi de 1,98, pelo método de cálculo de Morgenstern-Price, sendo este considerado adequado pela NBR 13028/17. Adicionalmente, observa-se que a SPR se encontra completamente inserida na camada de aterro compactado, indicando que esta é considerada a camada mais crítica. Com base na Figura 118-(b), observa-se pela análise de sensibilidade, que o FS é de fato variável as mudanças nos parâmetros dessa camada, como por exemplo o ângulo de atrito e a coesão.

Figura 118 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

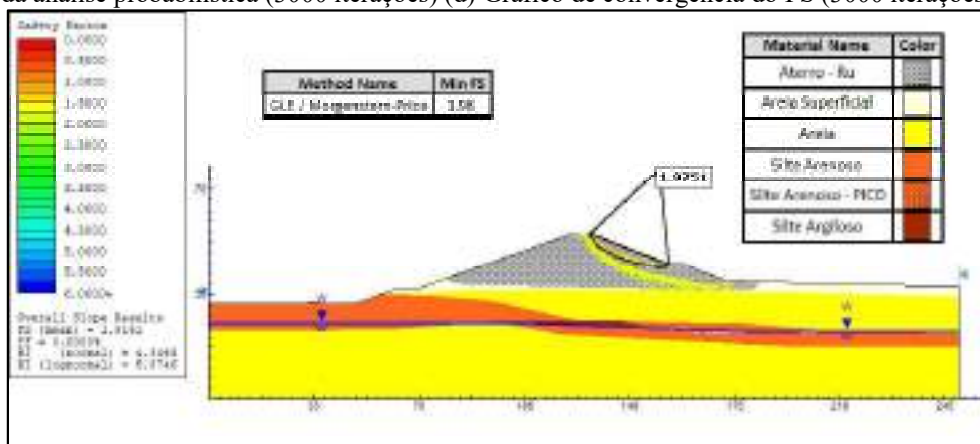
Fonte: Autora (2023)

Sob uma perspectiva probabilística, as Figuras 119-(a) e 119-(c), revelam uma redução do FS, agora fixado em 1,92 para ambas as iterações. Além disso, foram encontradas Pr nulas e índices de confiabilidade mínimos variando entre 4,29 (valor normal) a 5,81 (valor log-normal), sendo esses valores considerados satisfatórios pela USACE (1997). Quanto às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 119-(b) e 119-(d), nota-se uma significativa variação dos resultados, indicando uma tendência a estabilização a partir de 1000 iterações.

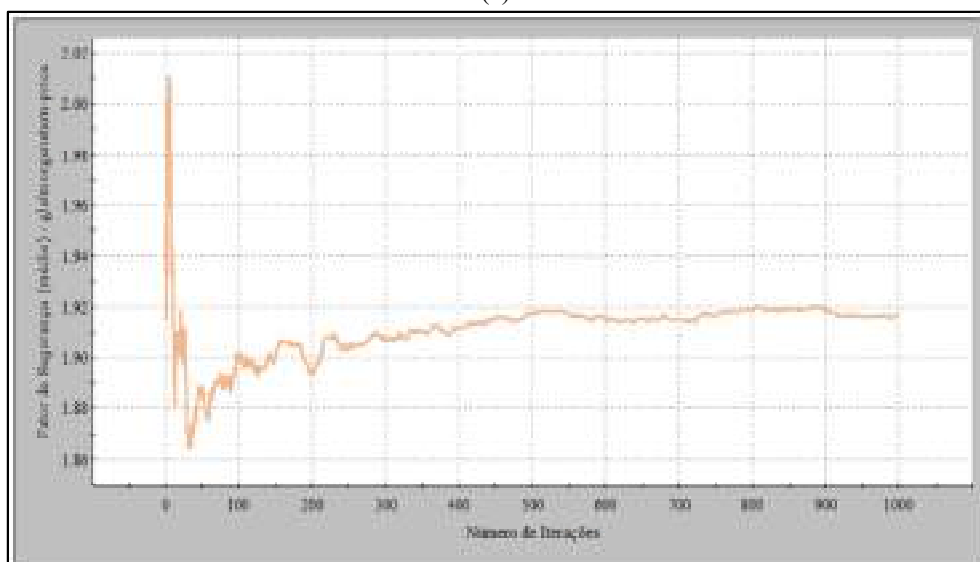
Com base nos dados consolidados na literatura detalhados no item 3.8, verifica-se que tanto os resultados da análise determinística, quanto o da probabilística convergem para uma condição de estabilidade do talude. Em outras palavras, não se observam indícios de ruptura, levando em consideração as condições nas quais o talude foi avaliado.



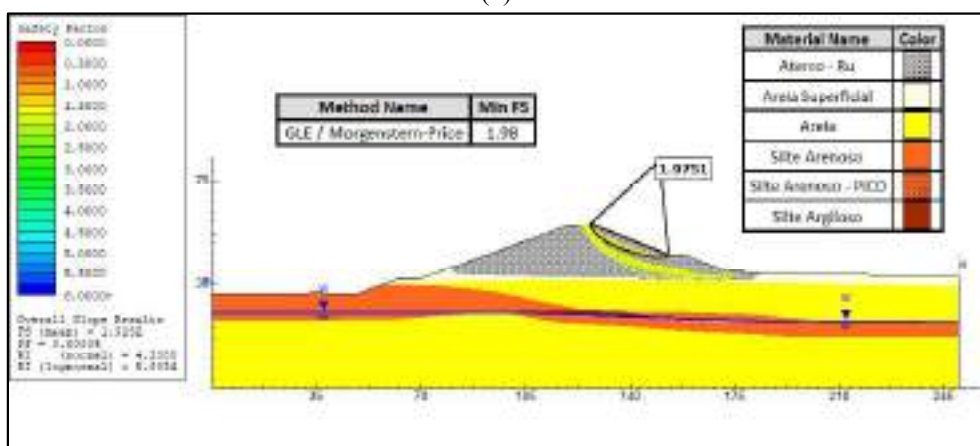
Figura 119 - Resultado da Seção E-E - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



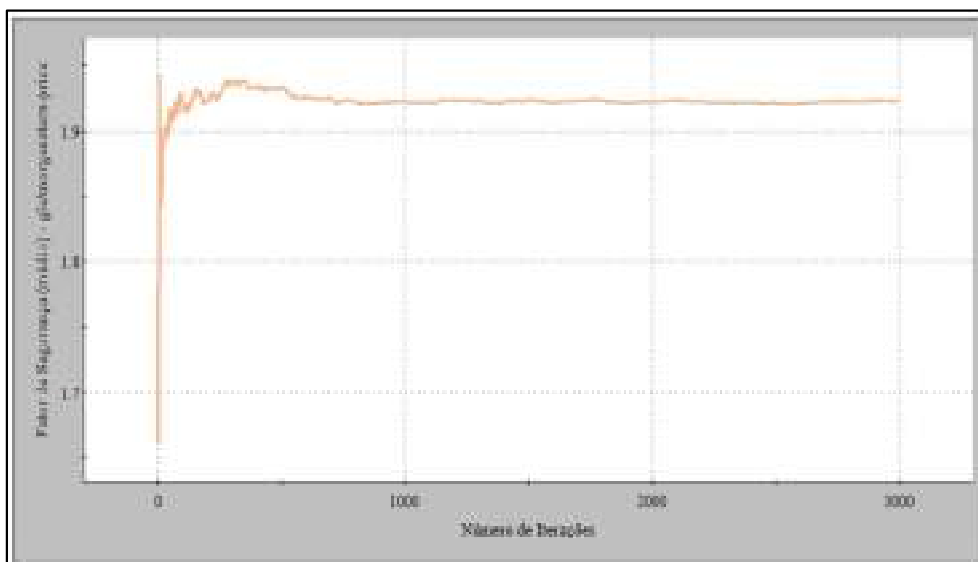
(a)



(b)



(c)



(d)

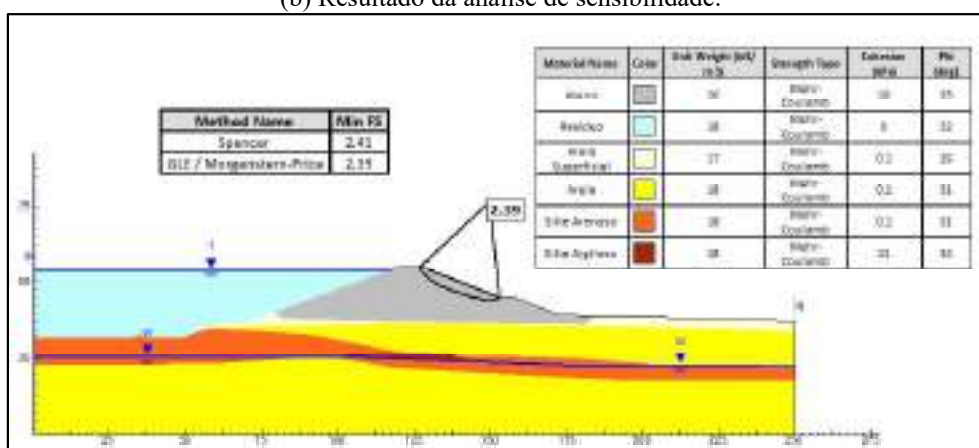
Fonte: Autora (2023)

### 5.5.5 Operação Normal – Drenado

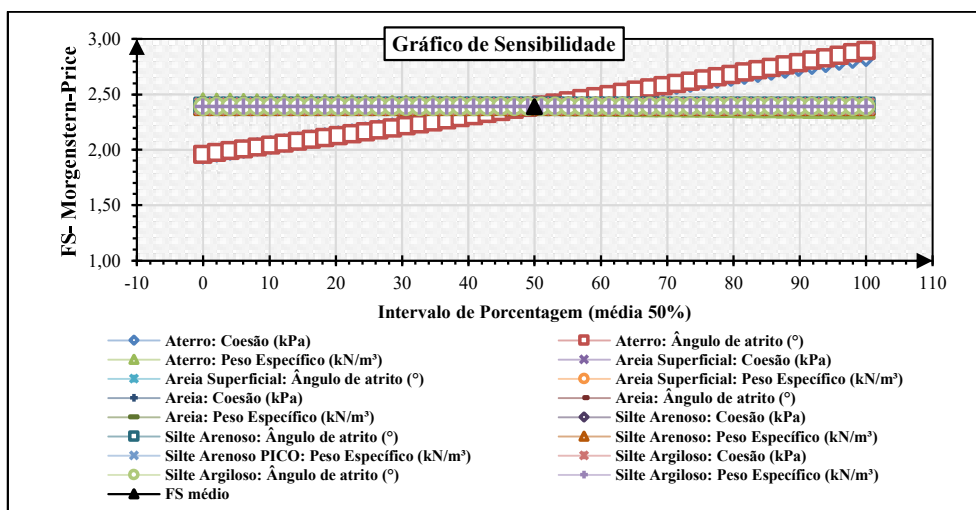
Os resultados das análises para a fase de operação, considerando a condição drenada dos materiais são apresentados nas Figuras 120 e 121.

Na análise determinística desta condição, conforme ilustrado na Figura 120-(a), o resultado revelou um FS mínimo de 2,39, obtido pelo método de Morgenstern-Price, sendo este considerado adequado pela NBR 13028/17. Na Figura 120-(b), é apresentado os resultados encontrados na análise de sensibilidade, evidenciando que mais uma vez o FS demonstra variações quanto a mudanças nos parâmetros de resistência da camada de aterro compactado.

Figura 120 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



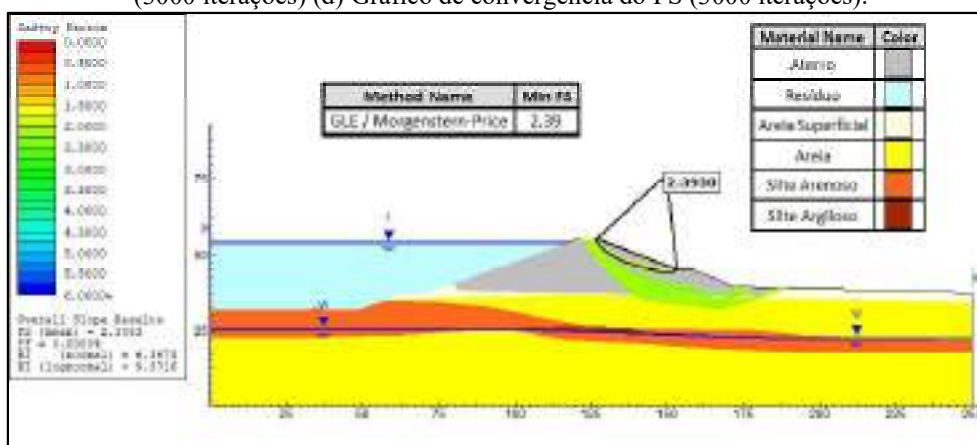
(b)

Fonte: Autora (2023)

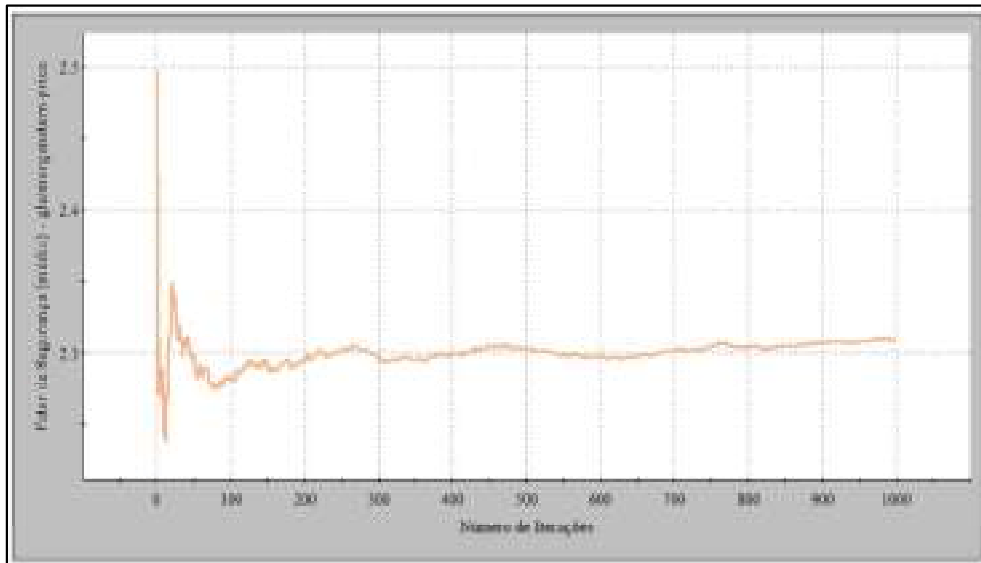
No que diz respeito aos resultados provenientes da abordagem probabilística, conforme é demonstrado nas Figuras 121-(a) e 121-(c), observa-se uma ligeira diminuição do FS, fixando em 2,29 a partir de 3000 iterações. Além disso, a Pr encontrada foi nula, com índices de confiabilidade variando entre 5,99 (valor normal) a 8,78 (valor log-normal). Quanto às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 121-(b) e 121-(d), estas indicam que os resultados das análises tendem a se estabilizar a partir de 1500 iterações.

Com base nos resultados apresentados por essas análises, e considerando os limites admissíveis estabelecidos pela USACE (1997), é possível inferir que o talude se mantém estável, diante das condições as quais foi avaliado.

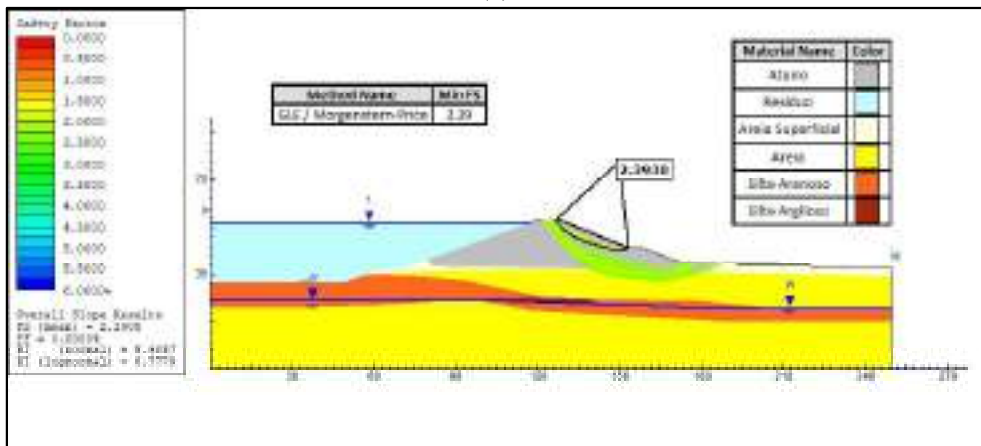
Figura 121 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



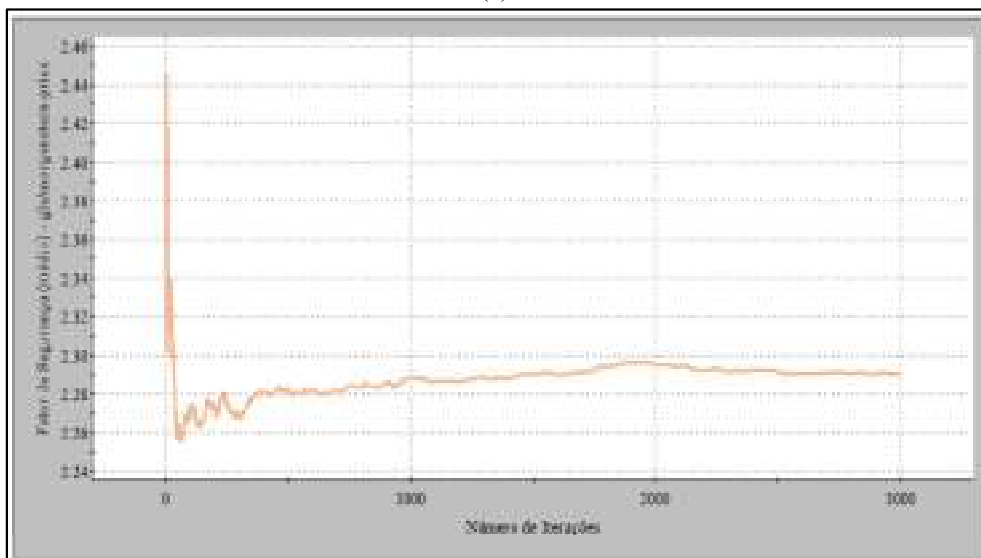
(a)



(b)



(c)



(d)

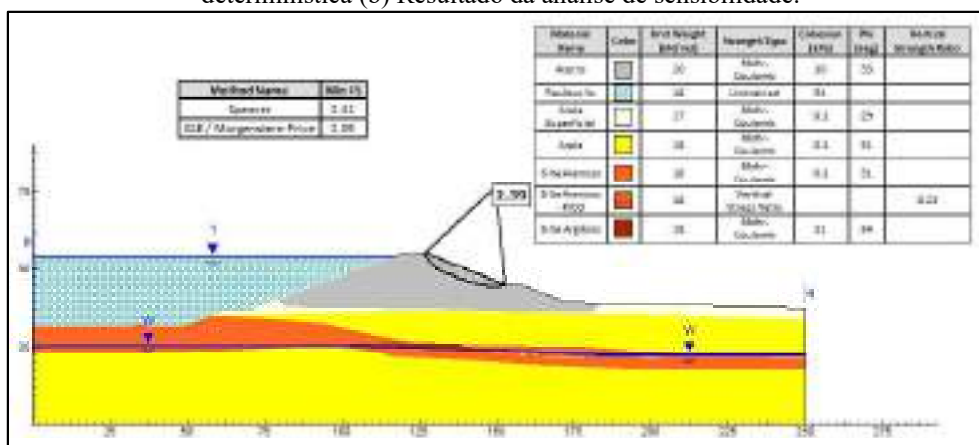
Fonte: Autora (2023)

### 5.5.6 Operação Normal – Não drenado

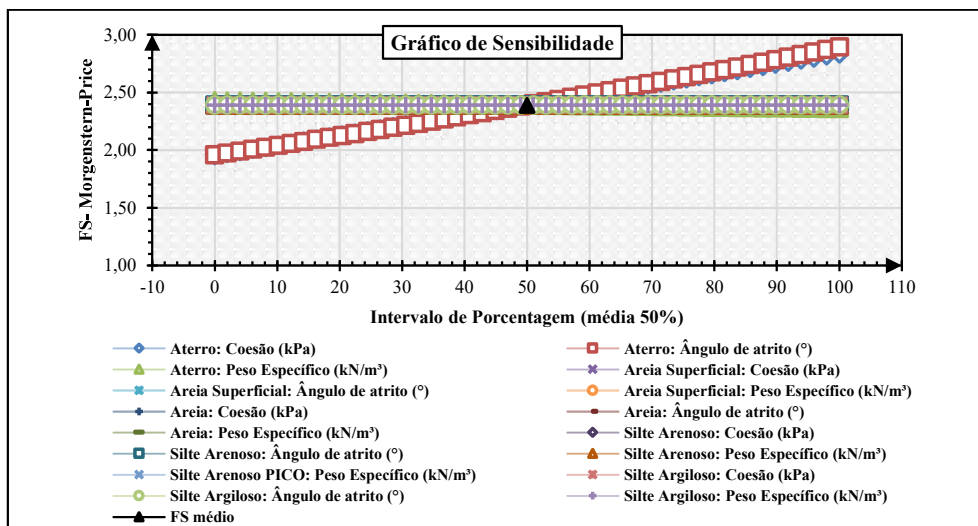
Os resultados das análises para a fase de operação, considerando condições drenada dos materiais são apresentados nas Figuras 122 e 123.

Ao avaliar os resultados da Figura 122-(a), destaca-se que o menor FS determinístico obtido foi através do método de Morgenstern-Price, atingindo valor igual 2,39, sendo este superior ao admissível para essa condição conforme recomenda a NBR 13028/17. É importante ressaltar que, para essa condição, os resultados apresentaram semelhanças com os obtidos na análise para a condição drenada, tanto em termos de comportamento quanto de magnitude. A possível explicação para essa consistência reside nos materiais que compõe a geometria da seção. Conforme evidenciado pela Figura 122-(a), existe uma pequena camada de material silte argiloso, cuja influência no cálculo do FS é mínima, resultando em uma equivalência nos resultados de ambas as condições. No que concerne aos resultados da análise de sensibilidade, observa-se pela Figura 122-(b) que novamente os parâmetros ângulo de atrito e coesão da camada de aterro, são os maiores responsáveis pela variação do FS.

Figura 122 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



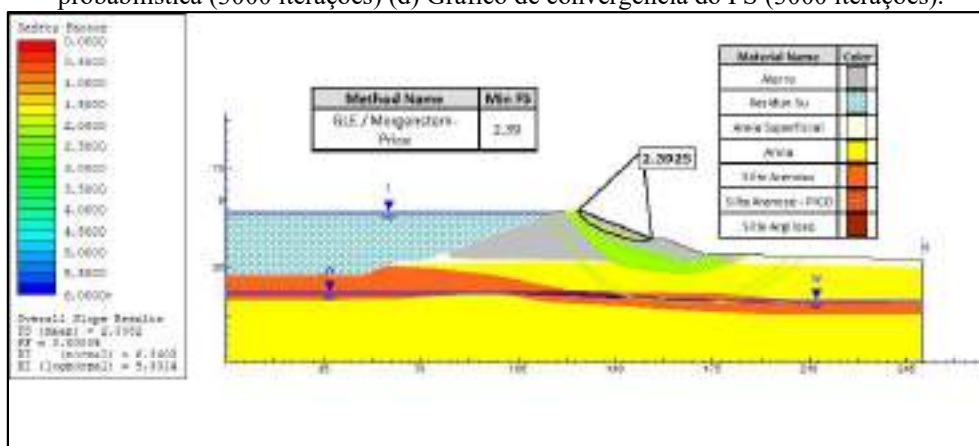
(b)

Fonte: Autora (2023)

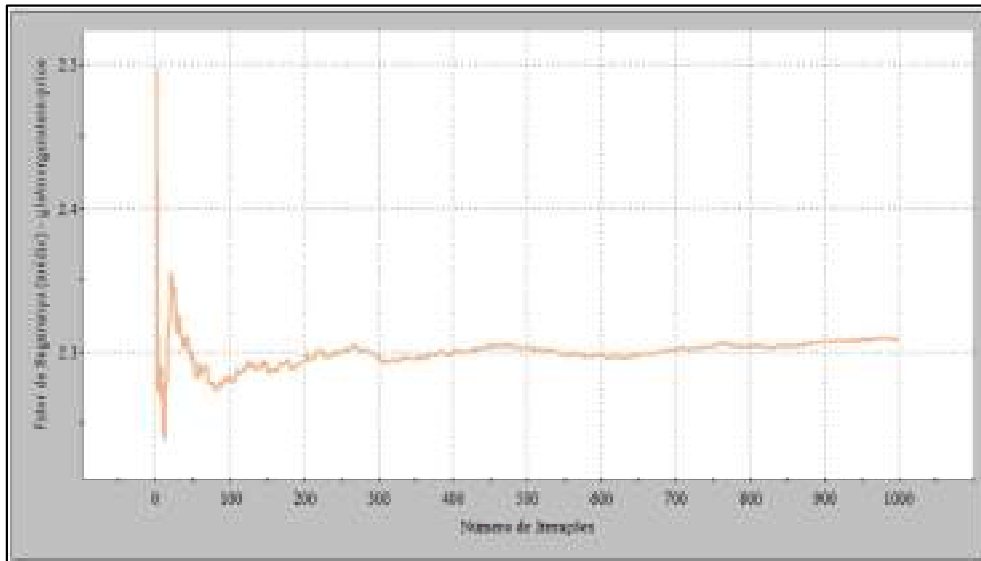
A partir de uma perspectiva probabilística, observa-se pelas Figuras 123-(a) e 123-(c), que o menor FS registrado foi de 2,29 após 3000 iterações. Adicionalmente, as probabilidades encontradas foram nulas, com índices de confiabilidade variando entre 6,01 (valor normal) a 8,81 (valor log-normal). Ao examinar às curvas exibidas nas Figuras 123-(b) e 123-(d), nota-se que os resultados desta análise tendem a convergir após 1500 iterações, indicando uma estabilização nos resultados apresentados.

A partir dos dados descritos, e, considerando as diretrizes estabelecidas pela NBR 13028/17 e pela USACE (1997), é plausível inferir que tanto os resultados da abordagem determinística, quanto da probabilística apontam para um talude com um bom nível de desempenho e de estabilidade.

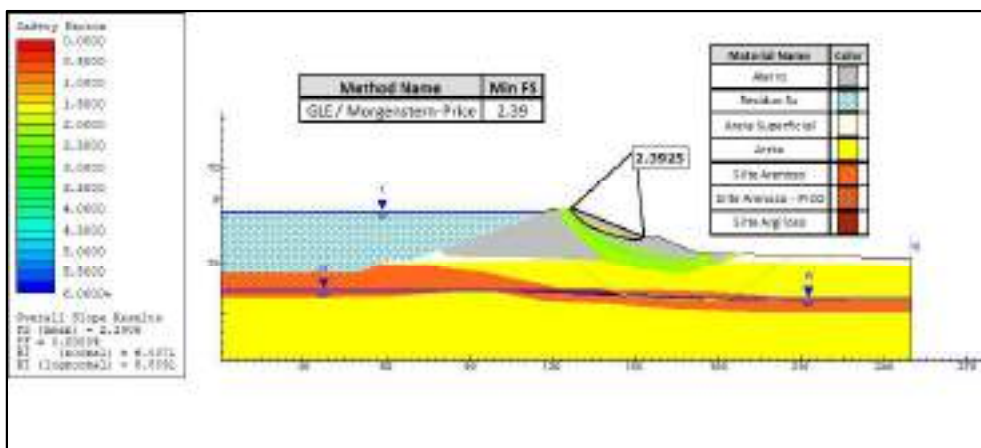
Figura 123 - Resultado da Seção E-E - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



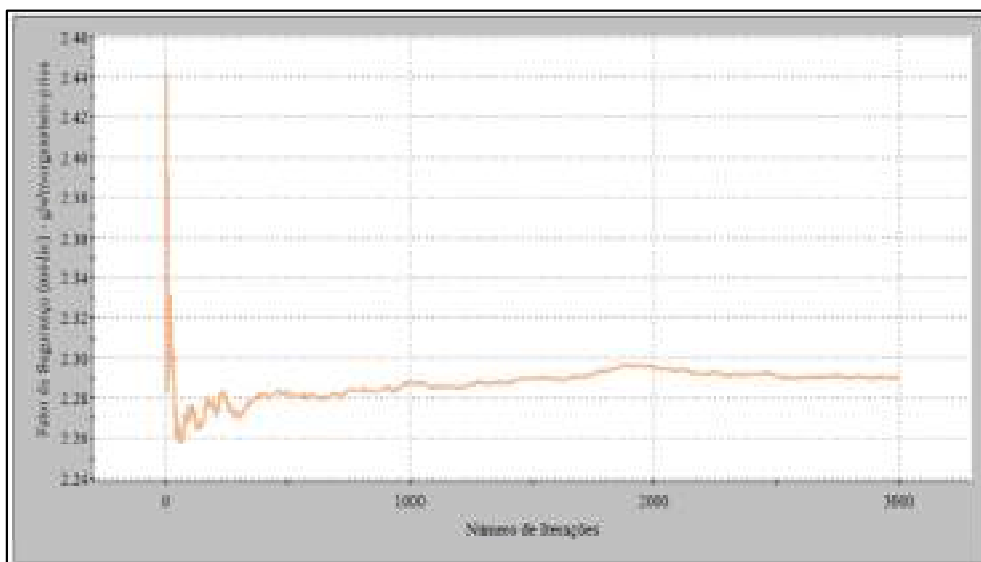
(a)



(b)



(c)



(d)

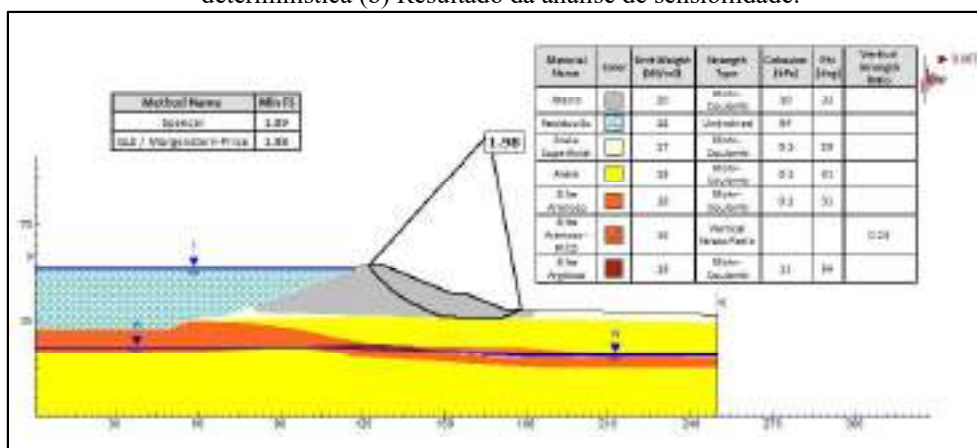
Fonte: Autora (2023)

### 5.5.7 Solicitação Pseudoestática

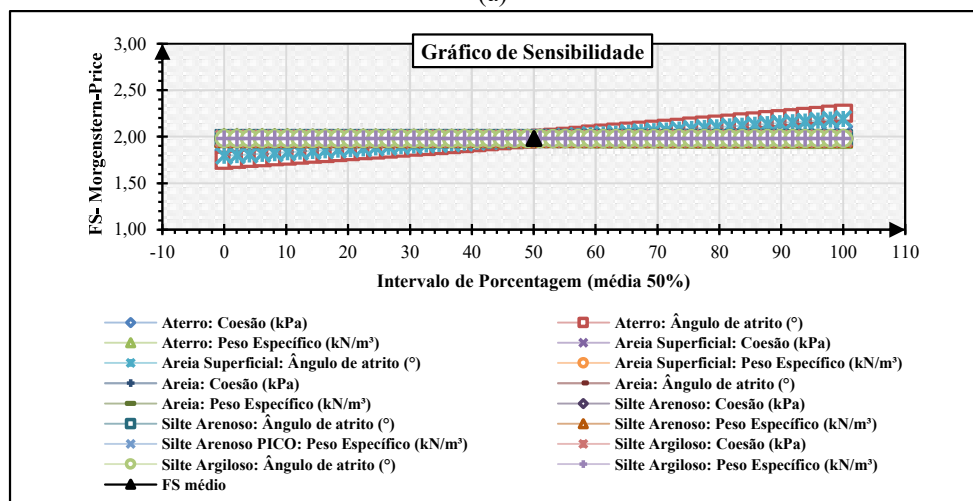
Os resultados encontrados para as três condições de solicitação pseudoestática são apresentados nas Figuras 124 a Figura 129.

Ao analisar a Figura 124-(a), observa-se que o FS determinístico, calculado para a condição de solicitação pseudoestática com carregamento apenas horizontal, atingiu o valor de 1,98, sendo este considerado adequado pela NBR 13028/17. No que se refere ao resultado da análise de sensibilidade, apresentada na Figura 124-(b), observa-se que o FS é variável a mudanças nos parâmetros de resistência da camada de aterro (ângulo de atrito e coesão), bem como ao ângulo de atrito da camada de areia superficial.

Figura 124 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2023)

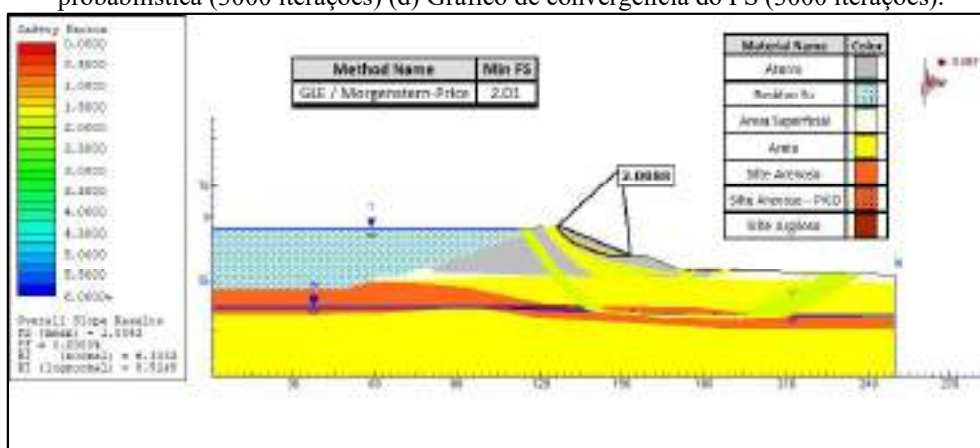
Em relação aos resultados da análise probabilística, observa-se pelas Figuras 125-(a) e 125-(c), que o FS médio encontrado foi igual a 1,88. As Pr encontradas foram nulas para ambos os números de iterações, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,01 (valor



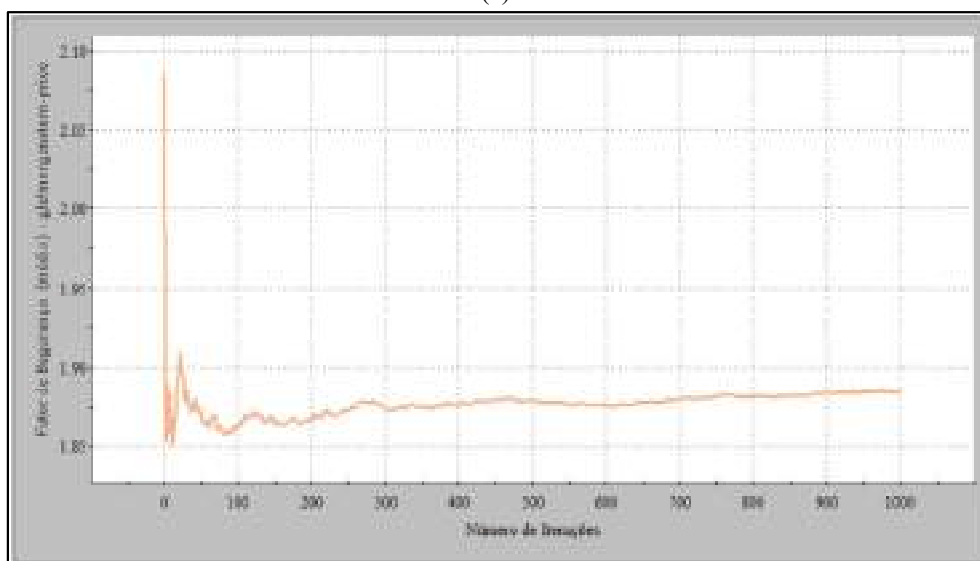
normal) a 8,05 (valor log-normal). No que diz respeito às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 125-(b) e 125-(d), observa-se uma tendência a estabilização dos dados a partir de 1500 iterações. A partir dos resultados apresentados pela abordagem probabilística, nota-se parâmetros elevados, estando esses em conformidade com o estabelecido pela USACE (1997).

Dito isso, é possível inferir que tanto pela abordagem determinística, quanto pela probabilística, o talude mantém seu equilíbrio considerando as condições as quais foi avaliado.

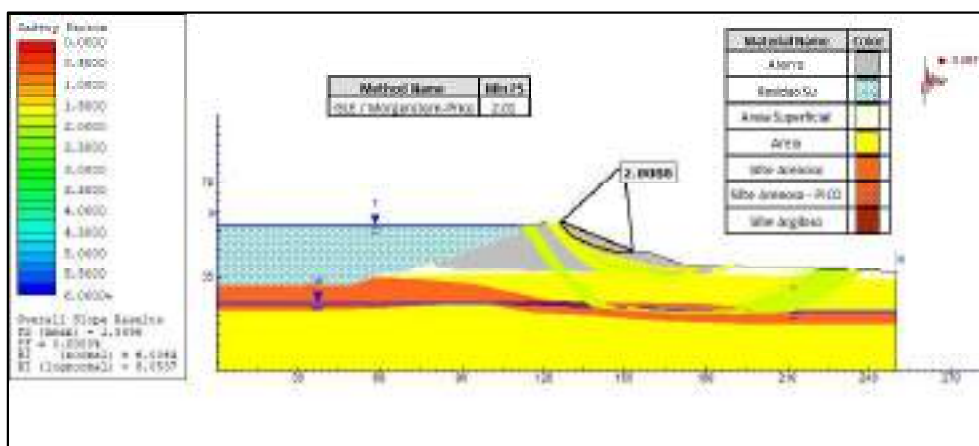
Figura 125 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



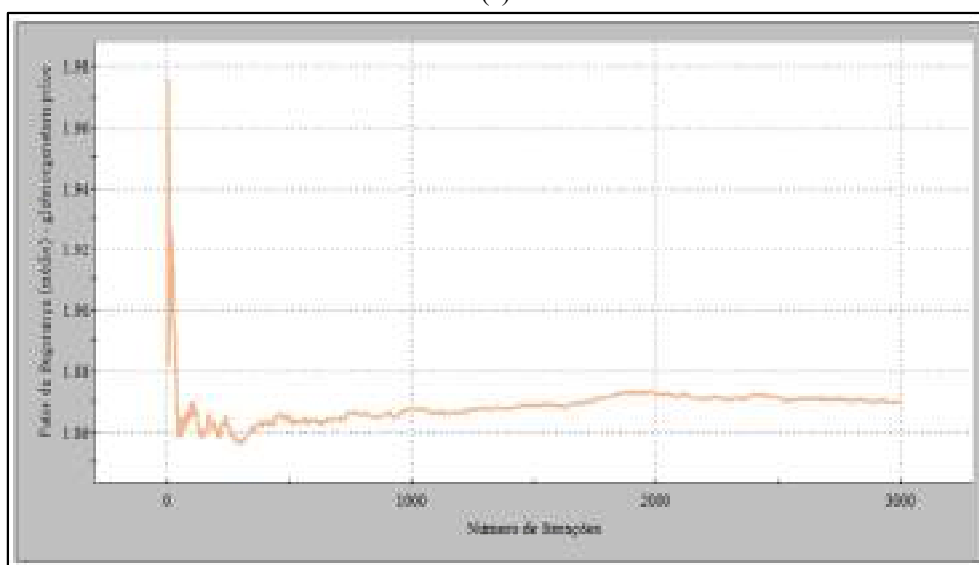
(a)



(b)



(c)

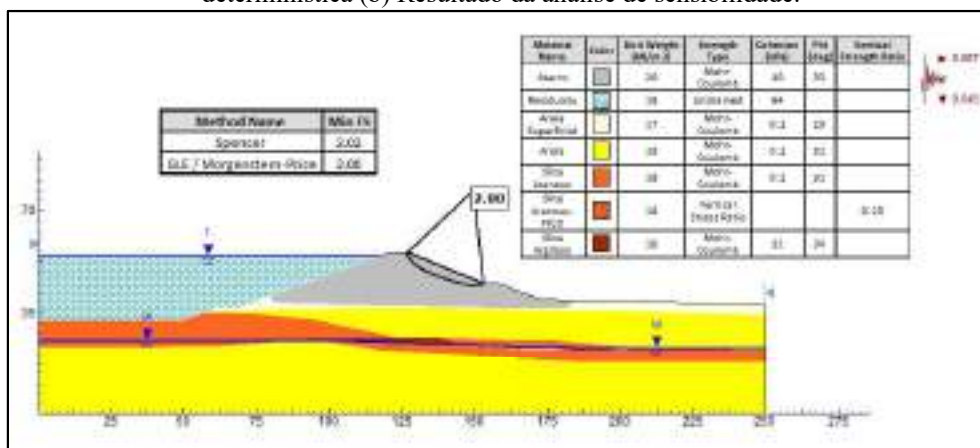


(d)

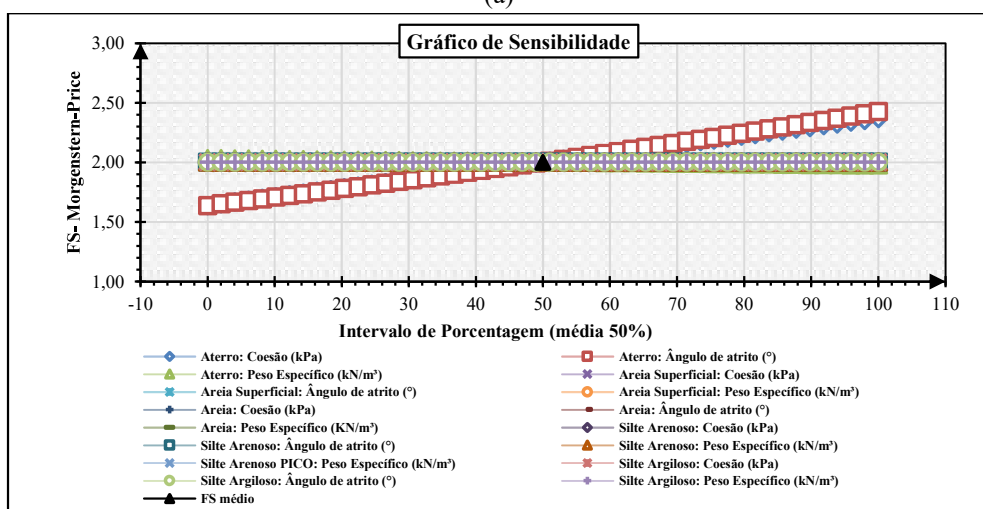
Fonte: Autora (2023)

Ao introduzir carregamentos verticais ao sistema, observa-se que o menor FS determinístico encontrado foi igual a 1,97, conforme pode ser visto nas Figuras 126-(a) e 127-(a). Em relação as análises de sensibilidade, observa-se pelas Figuras 126-(b) e 127-(b), que o FS é variável a mudanças na coesão e ângulo de atrito da camada de aterro, como também ao ângulo de atrito da camada de areia superficial. No que se refere a estabilidade, para ambas às condições de carregamento, os taludes permanecem estáveis a ocorrência de sollicitação pseudoestáticas, de acordo com a abordagem determinística.

Figura 126 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



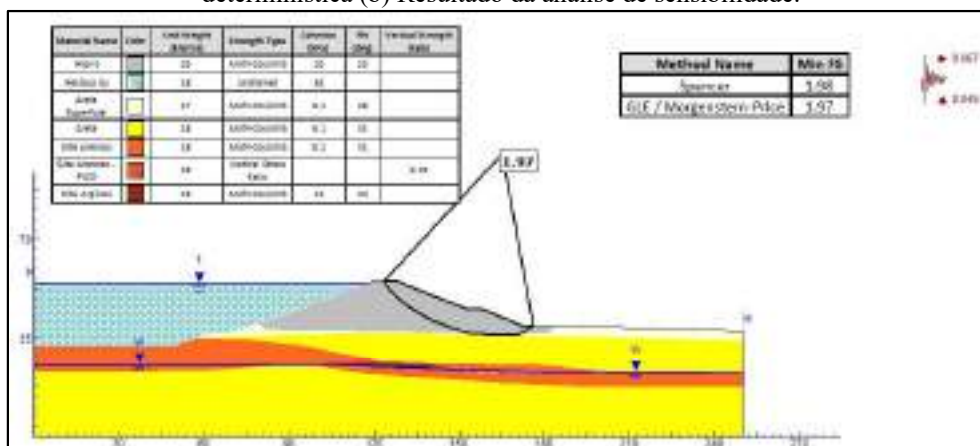
(a)



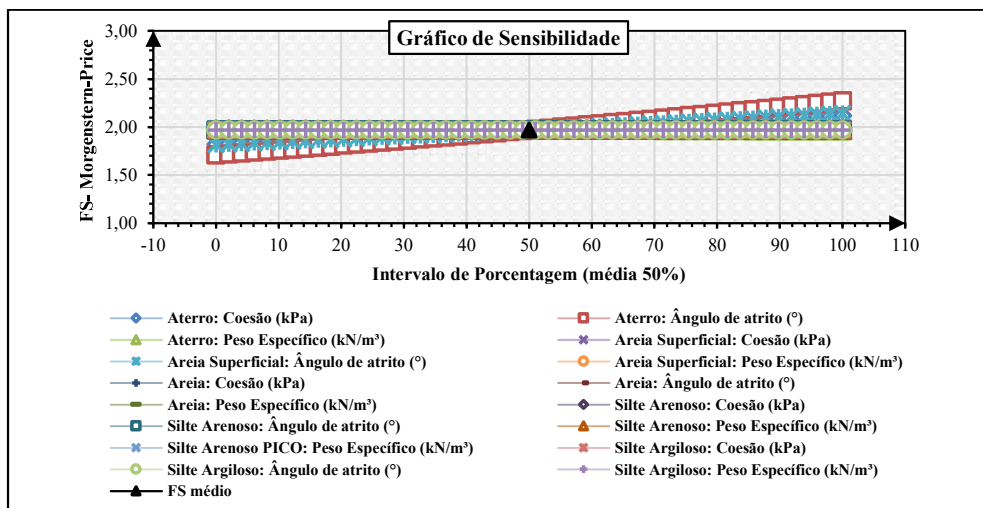
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 127 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



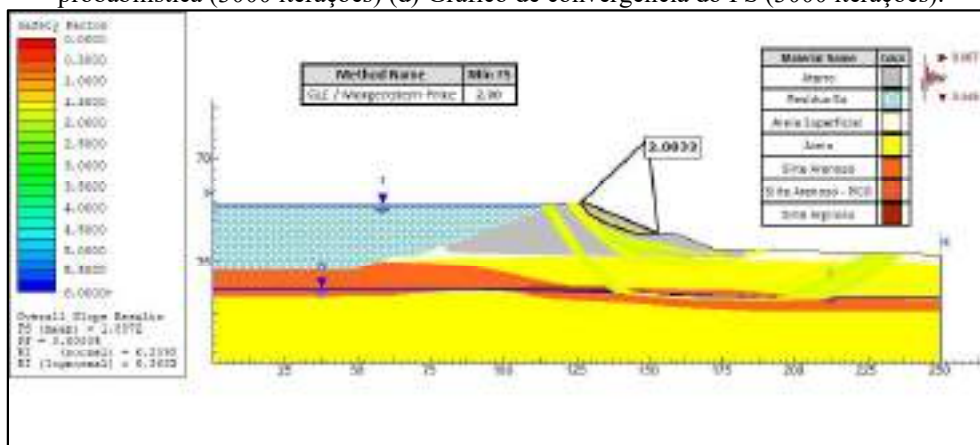
(b)

Fonte: Autora (2023)

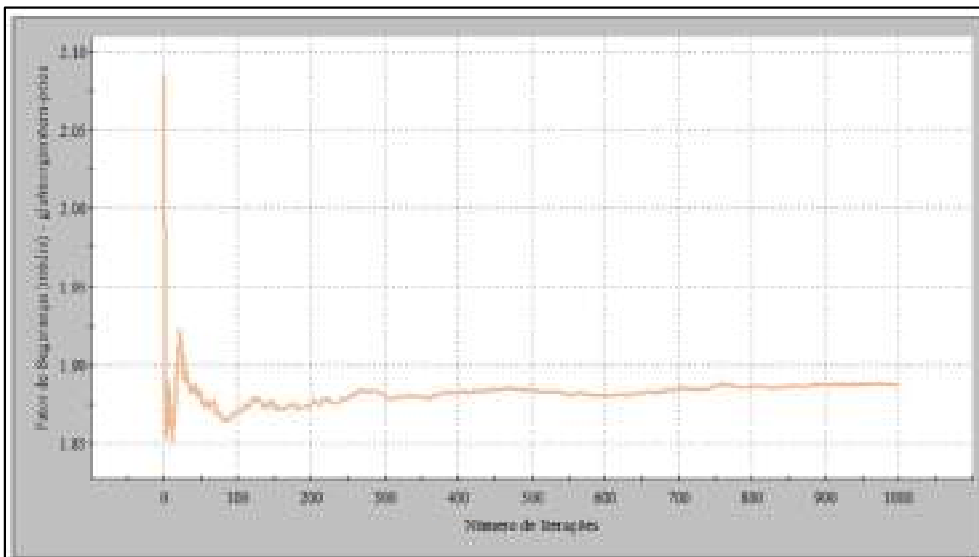
Com relação aos resultados probabilísticos, apresentados nas Figuras 128-(a), 128-(c), 129-(a) e 129-(c), destaca-se que, nas duas condições de carregamento analisadas, o menor FS probabilístico encontrado permaneceu constante em 1,87 ao longo de 1000 e 3000 iterações. Adicionalmente, constatou-se que as Pr foram nulas, enquanto os índices de confiabilidade mínimos variaram entre 5,90 (valor normal) a 7,91 (valor log-normal).

No que diz respeito às curvas de convergência exibidas nas Figuras 128-(b), 128-(d), 129-(b) e 129-(d), nota-se uma tendência a estabilização dos dados a partir de 1000 iterações. Ao analisar os resultados probabilísticos obtidos e considerando os limites mínimos estabelecidos pela USACE (1997), é plausível inferir que, sob uma perspectiva probabilística, o talude da seção E mantém-se estável diante de ambas as condições de carregamento analisadas.

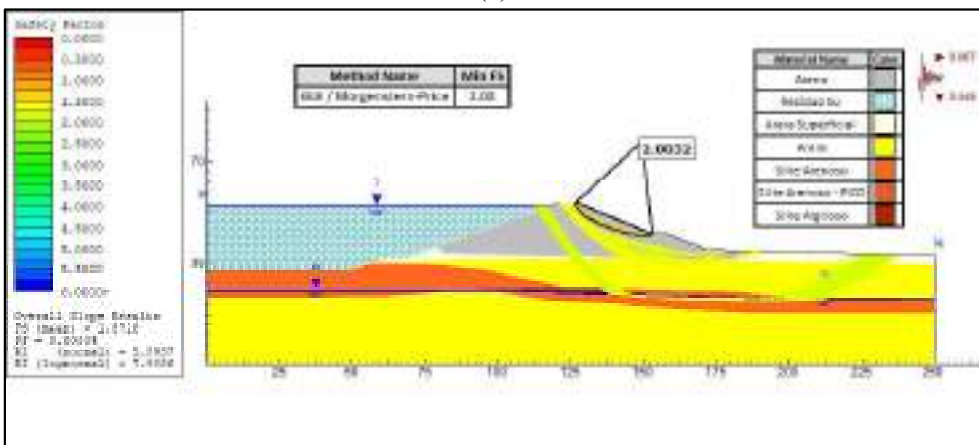
Figura 128 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



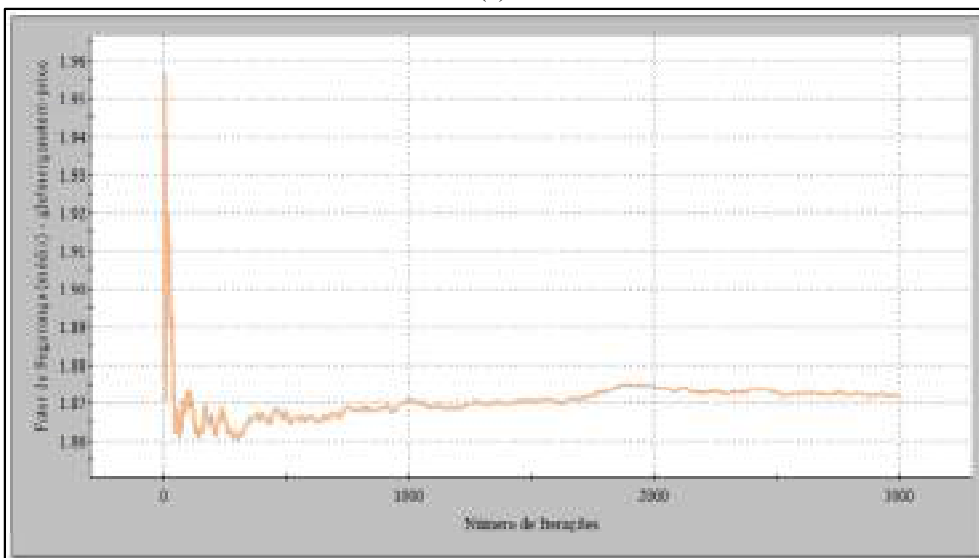
(a)



(b)



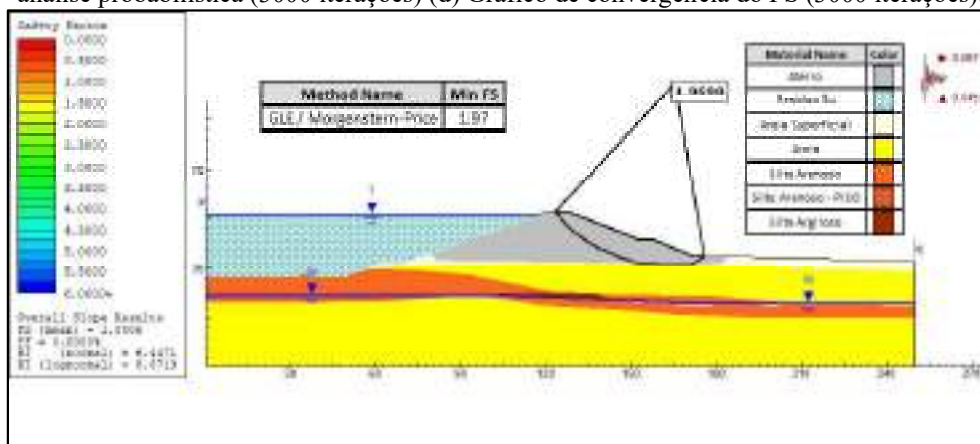
(c)



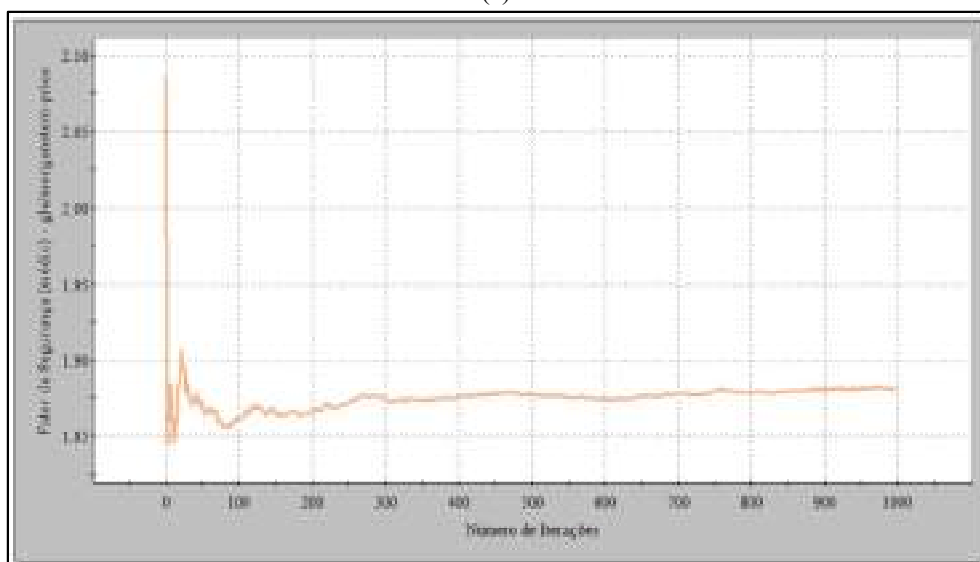
(d)

Fonte: Autora (2023)

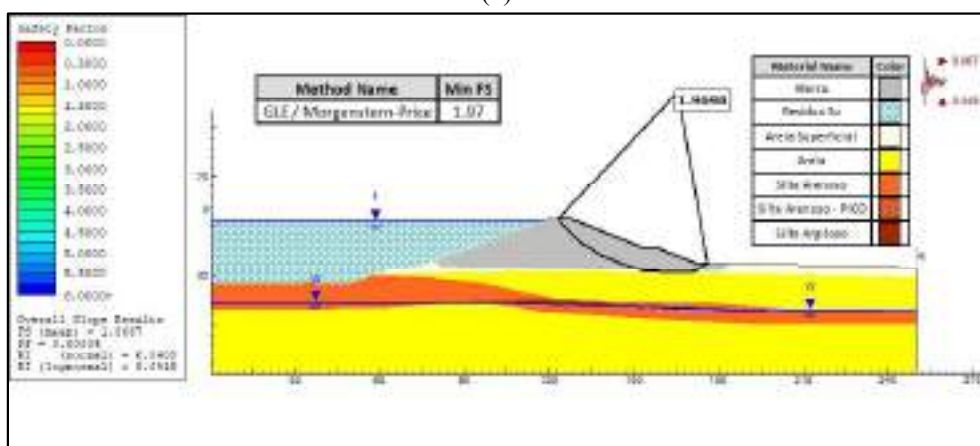
Figura 129 - Resultado da Seção E-E - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



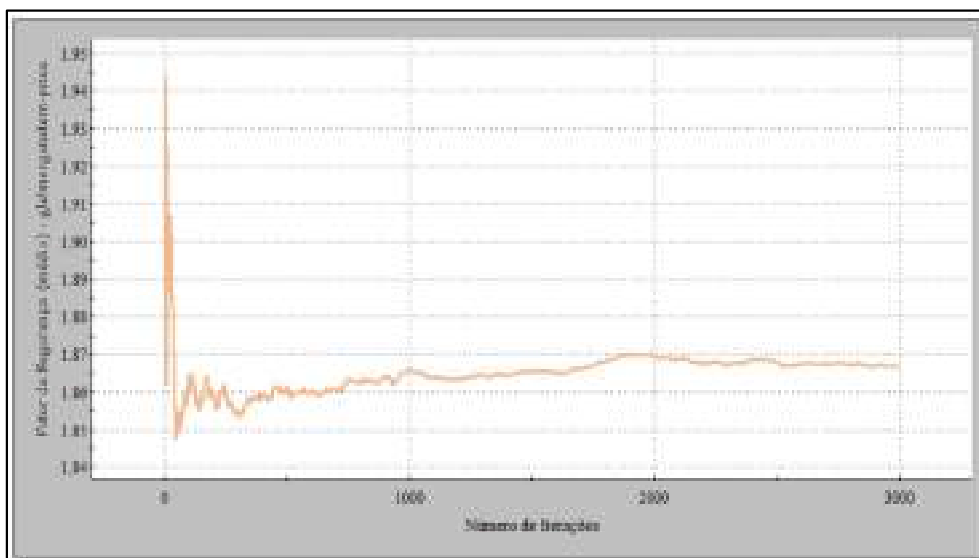
(a)



(b)



(c)



(d)

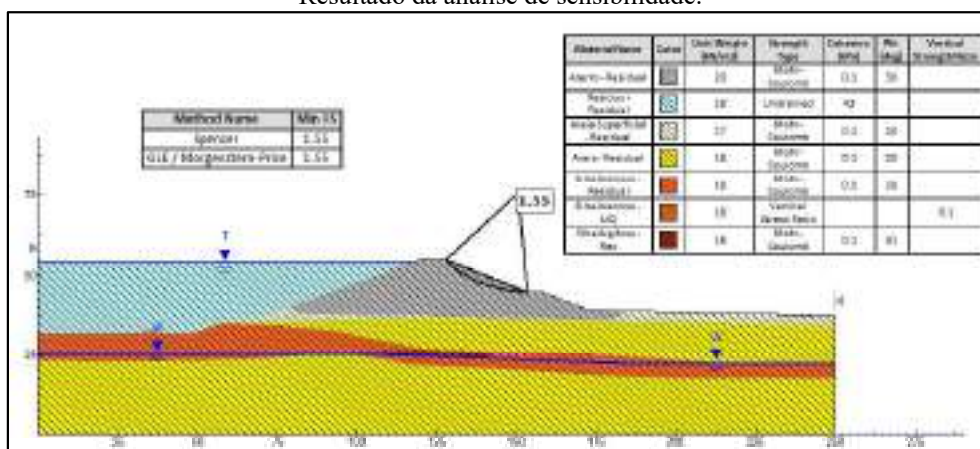
Fonte: Autora (2023)

### 5.5.8 Solicitação pós-sísmica

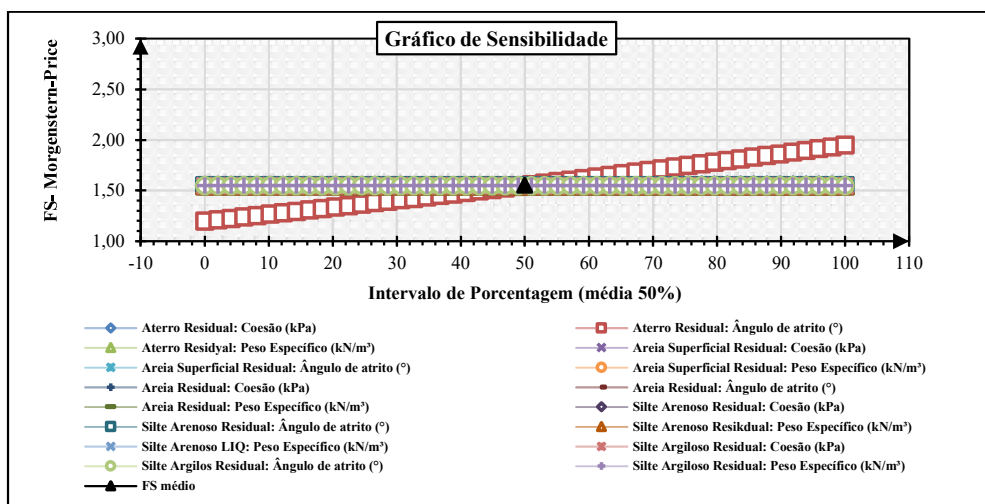
Os resultados referentes à condição com solicitação pós-sísmica são apresentados nas Figuras 130 e 131.

Conforme é apresentado na Figura 130-(a), a análise determinística revelou um FS de 1,55, superando o mínimo exigido de 1,00 pela ANCOLD (2019), evidenciando a estabilidade do talude nesse cenário específico. Na análise de sensibilidade, destacada na Figura 130-(b), observa-se que a variável que mais influencia o FS é o ângulo de atrito do aterro compactado. Essa influência é atribuída à localização da SPR, a qual se encontra integralmente dentro dessa camada de material.

Figura 130 - Resultado da Seção E-E - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2023)

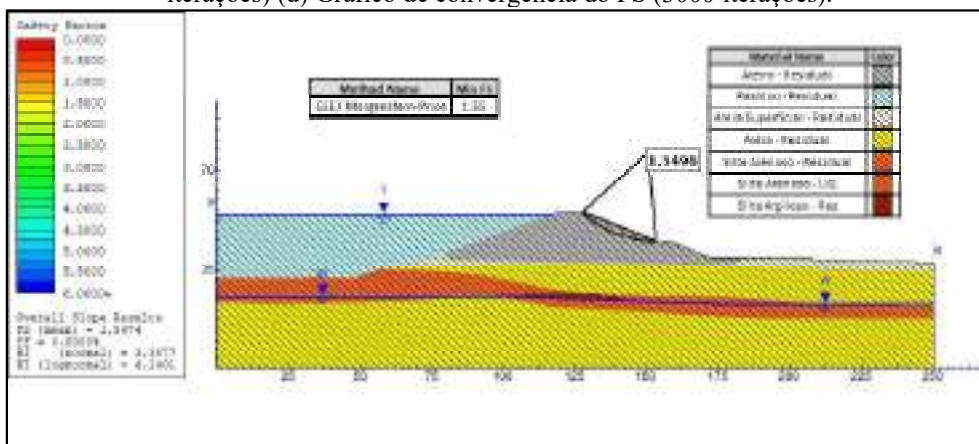
No que diz respeito aos resultados provenientes da abordagem probabilística, evidenciadas nas Figuras 131-(a) e 131-(c), verifica-se uma consistência nos valores dos FS tanto determinístico quanto probabilístico, mantendo-se em torno de 1,55. As Pr derivada de 1000 e 3000 iterações, revelaram-se nulas, indicando a ausência de riscos de incidentes. Quanto aos índices de confiabilidade mínimos, observou-se pouca variação entre os resultados de ambas as iterações, sendo o menor valor registrado igual a 3,33, mantendo-se dentro dos limites admissíveis, conforme os critérios estabelecidos pela USACE (1997).

Ao avaliar esses parâmetros, é possível inferir que o talude mantém sua estabilidade em condições pós-sísmicas. No entanto, é pertinente manter um nível de atenção em relação a esse cenário, uma vez que os índices de confiabilidade encontrados são relativamente baixos em comparação com as demais condições analisadas para esta seção.

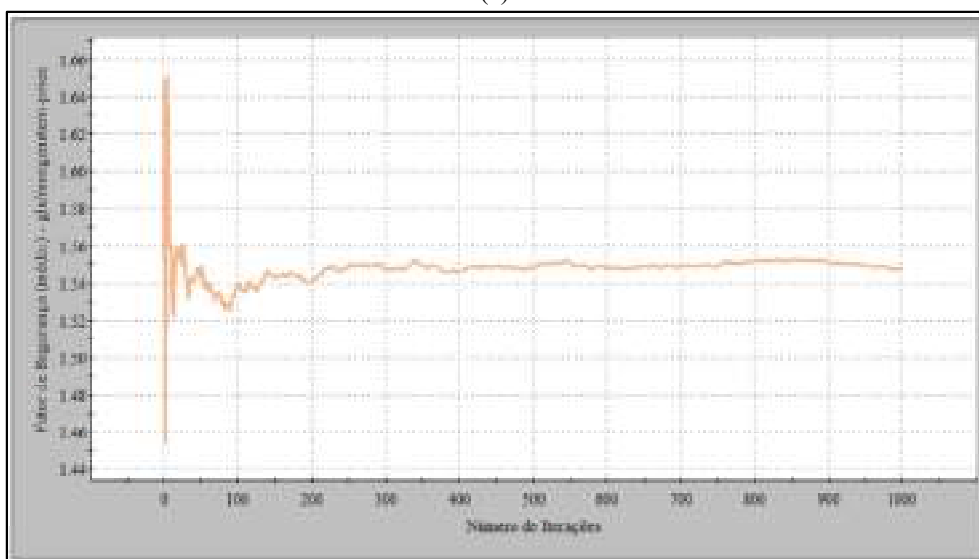
No que concerne às curvas de convergência, observa-se nas Figuras 131-(b) e 131-(d), que os resultados tendem a apresentar um comportamento estável a partir de 1000 iterações, indicando a consistência dos resultados descritos.



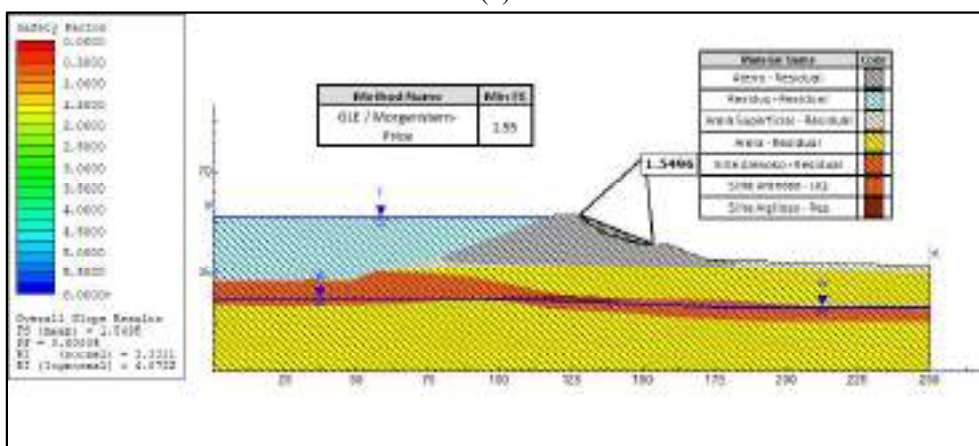
Figura 131 - Resultado da Seção E-E - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



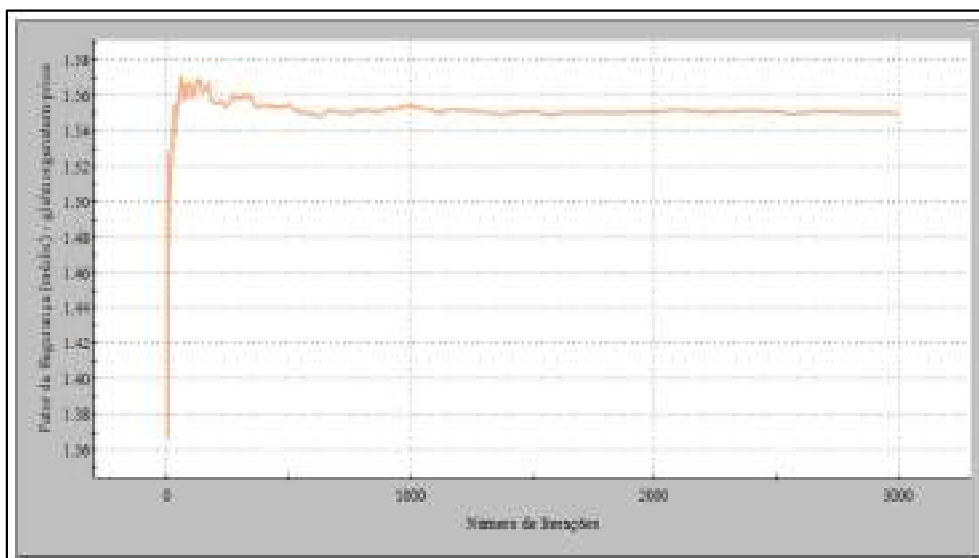
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 24, encontram-se organizado os resultados encontrados a partir da aplicação das análises probabilísticas para a seção E, considerando 1000 e 3000 iterações. Ao examinar os resultados da tabela, e, tomando como referência os valores descritos no item 3.8, é possível inferir que os taludes da seção E demonstraram estabilidade diante dos dez cenários de carregamentos avaliados, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística. No entanto, é importante adotar precauções adicionais em relação ao cenário de solicitação pós-sísmica, uma vez que seus índices de confiabilidade foram significativamente inferiores aos dos demais cenários.

Tabela 24 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção E-E.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				3000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,98	1,89	0	6,68	9,01	1,89	0	6,72	9,07
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,72	1,67	0	5,45	6,94	1,67	0	5,31	6,77
Final de construção Sem Ru	J	1,3	2,39	2,31	0	6,34	9,34	2,29	0	6,03	8,85
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,97	1,92	0	4,35	5,87	1,92	0	4,29	5,81
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,39	2,31	0	6,37	9,37	2,29	0	5,99	8,78
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	2,39	2,31	0	6,34	9,33	2,29	0	6,01	8,81
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,98	1,88	0	6,33	8,52	1,87	0	6,01	8,05
			2,00	1,89	0	6,21	8,36	1,87	0	5,90	7,91
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,97	1,88	0	6,45	8,67	1,87	0	6,04	8,09
			1,55	1,55	0	3,39	4,14	1,55	0	3,33	4,07

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

## 5.6 SEÇÃO F

Com o propósito de avaliar a estabilidade desta seção, foram conduzidas análises determinísticas e de sensibilidade, bem como análises probabilísticas para 1000 e 3000 iterações. Os resultados destas análises são apresentados nas Figuras 134 a Figura 151.

### 5.6.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

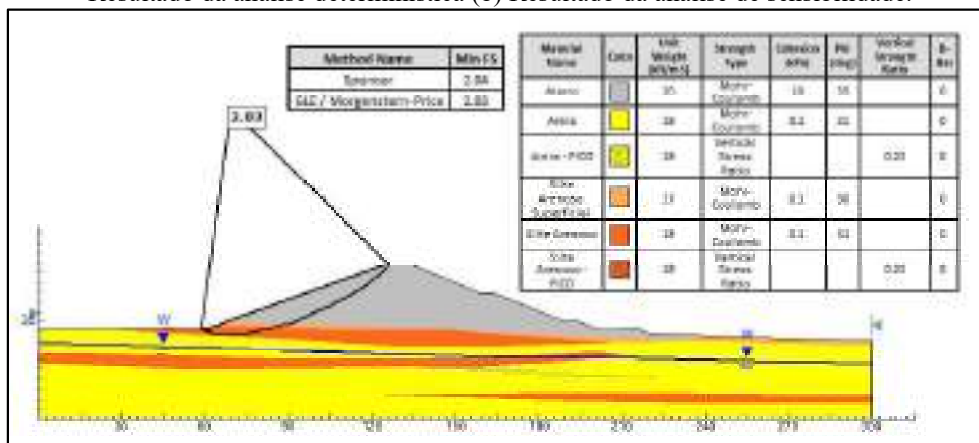
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude montante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro, são apresentados nas Figuras 132 e 133.

A fundação da seção F, conforme pode ser observado na Figura 132-(a), é constituída por quatro estratos de materiais distintos denominados de: areia, areia pico, silte arenoso superficial, silte arenoso, silte arenoso pico. De acordo com os boletins de sondagens realizados nas proximidades desta seção, foi observado um  $N_{SPT}$  crescente com a profundidade, com camadas de até 10 m sendo classificadas como materiais medianamente compactos.

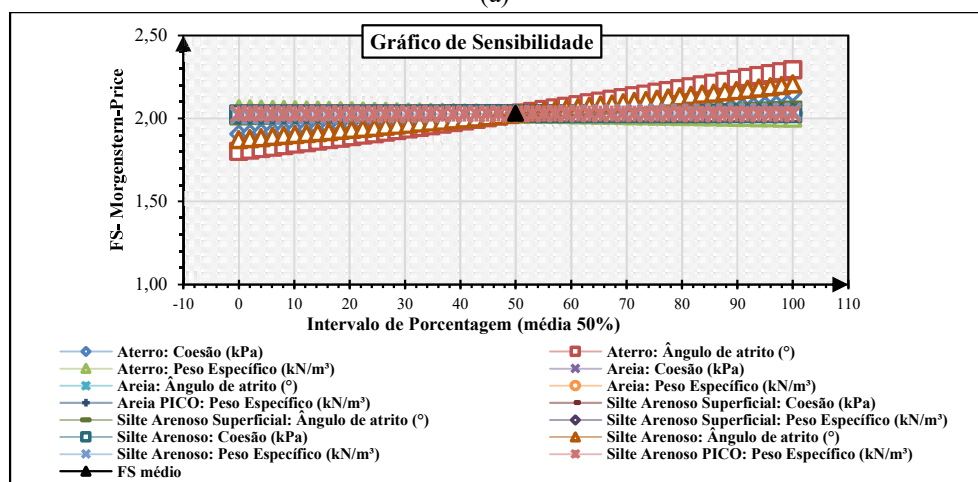
Pela abordagem determinística, conforme demonstrado na Figura 132-(a), constatou-se um FS encontrado para esta condição igual a 2,03, obtido pelo método de Morgenstern-Price. Sob uma perspectiva determinística, esse valor indica a estabilidade do talude, estando em

conformidade com que é estabelecido pela NBR 13028/17. No que se refere a análise de sensibilidade, apresentada na Figura 132-(b), está revela que o FS é particularmente variável as mudanças na coesão e ângulo de atrito da camada de aterro bem como do ângulo de atrito da camada de silte arenoso, materiais nos quais a SPR encontra-se inserida.

Figura 132 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



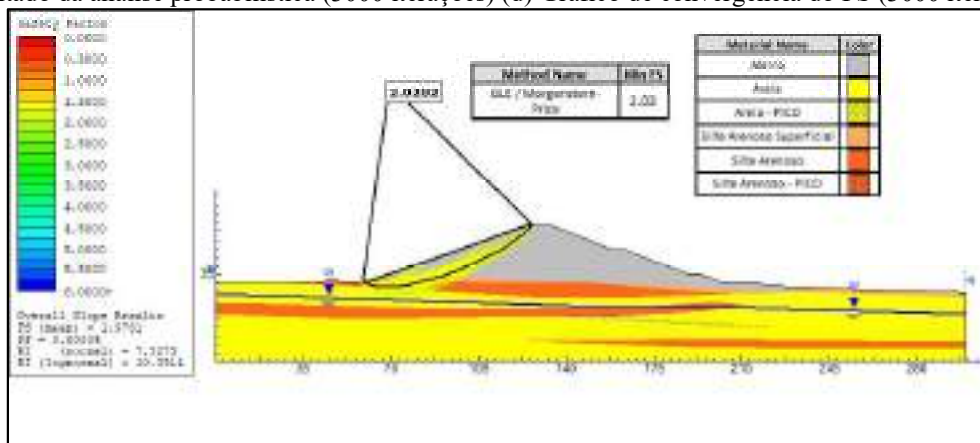
(b)

Fonte: Autora (2023)

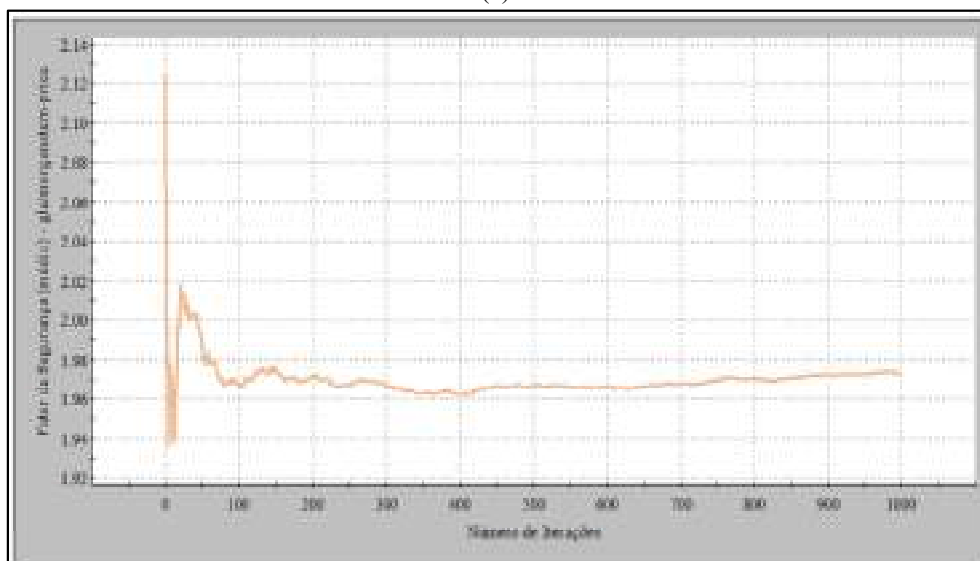
Ao adotar uma perspectiva probabilística, as Figuras 133-(a) e 133-(c), revelam que o menor FS médio probabilístico encontrando tanto para 1000 quanto para 3000 iterações foi de 1,96, inferior ao obtido pela abordagem determinística. Adicionalmente, foi encontrado para ambas as iterações, uma Pr nula, com índices de confiabilidade variando entre 7,53 (valor normal) a 9,88 (valor log-normal). No que se refere às curvas de convergências, observa-se pelas Figuras 133-(b) e 133-(d), que a estabilização dos resultados acontece após a 1000 iterações.

Ao considerar os critérios de desempenho definidos pela USACE (1997), conforme exposto no item 3.8, o talude é classificado como de alto desempenho, não exibindo, nas condições de avaliação, quaisquer indícios de instabilidade.

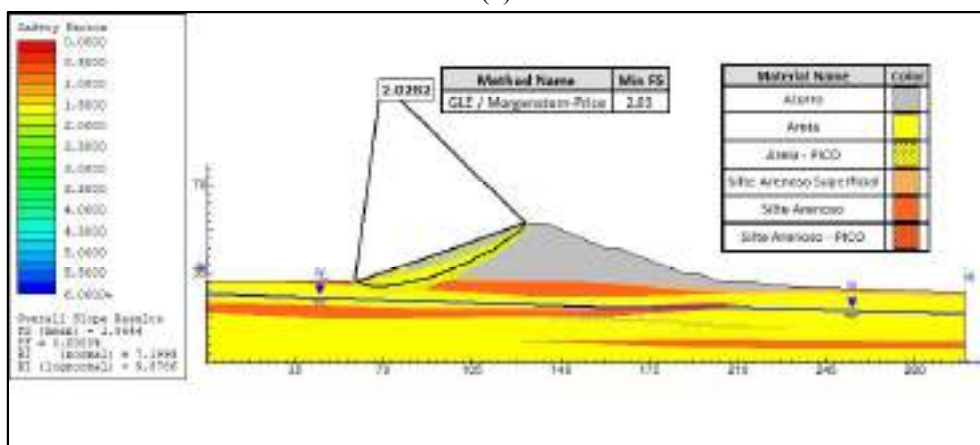
Figura 133 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



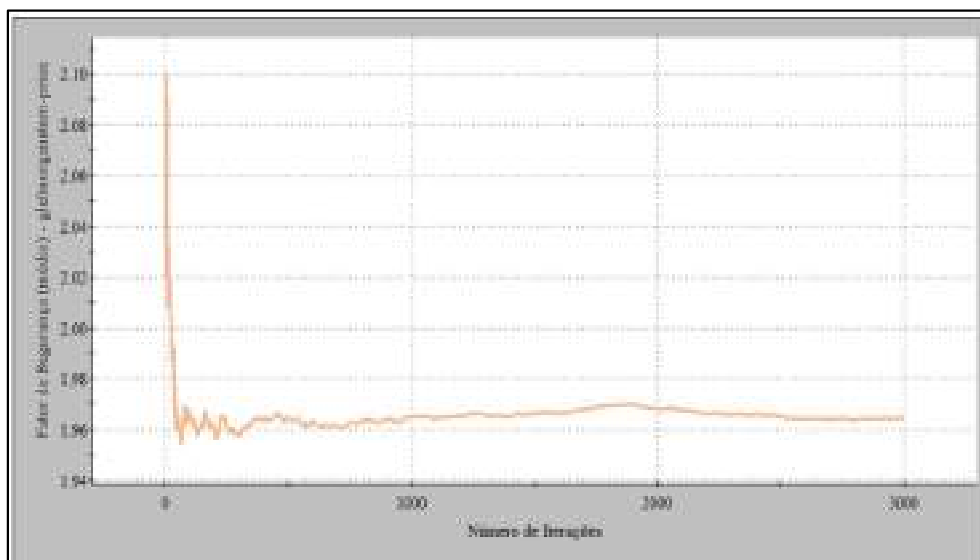
(a)



(b)



(c)



(d)

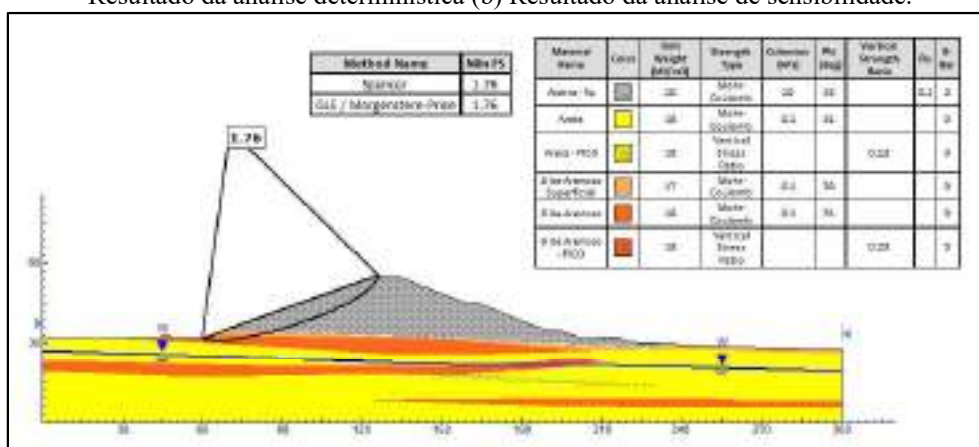
Fonte: Autora (2023)

### 5.6.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

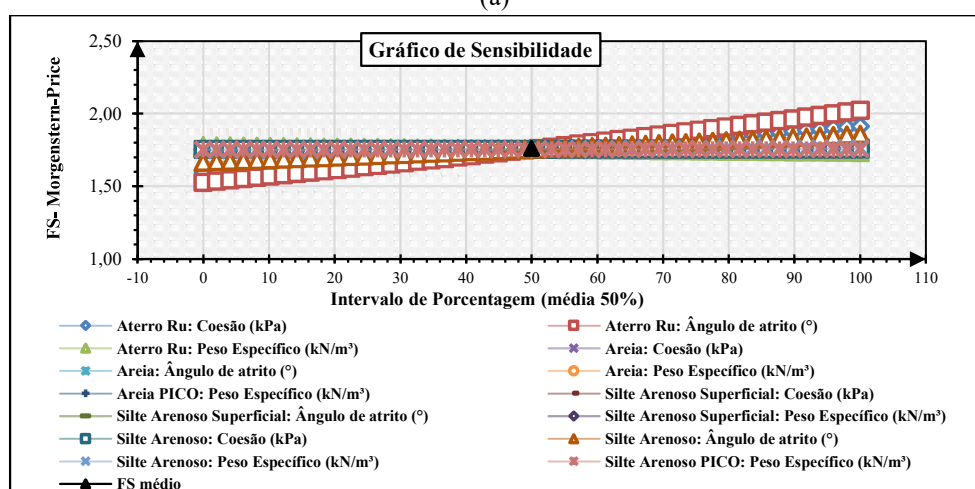
Os resultados das análises para a fase de final de construção do talude montante, considerando o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ) na camada de aterro, são apresentados nas Figuras 134 e 135.

Os resultados da análise determinística, apresentados na Figura 134-(a), revelam um FS igual a 1,76 obtido pelo método de Morgenstern-Price, alinhando-se com as diretrizes estabelecidas pela NBR 13028/17. Subsequentemente, conduziu-se uma análise de sensibilidade, a qual revelou que o FS sofre variações devido a flutuações nos parâmetros de resistência da camada de aterro, como ângulo de atrito e coesão, assim como do ângulo de atrito da camada de silte arenoso, conforme ilustrado na Figura 134-(b).

Figura 134 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



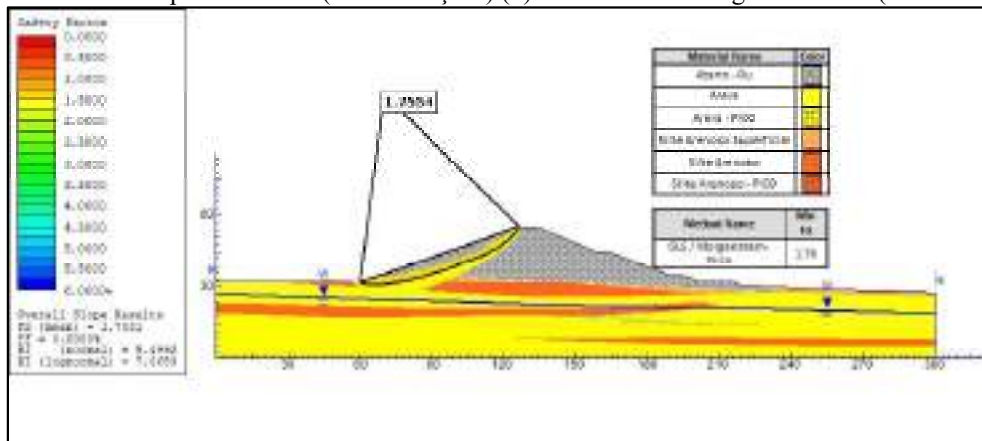
(b)

Fonte: Autora (2023)

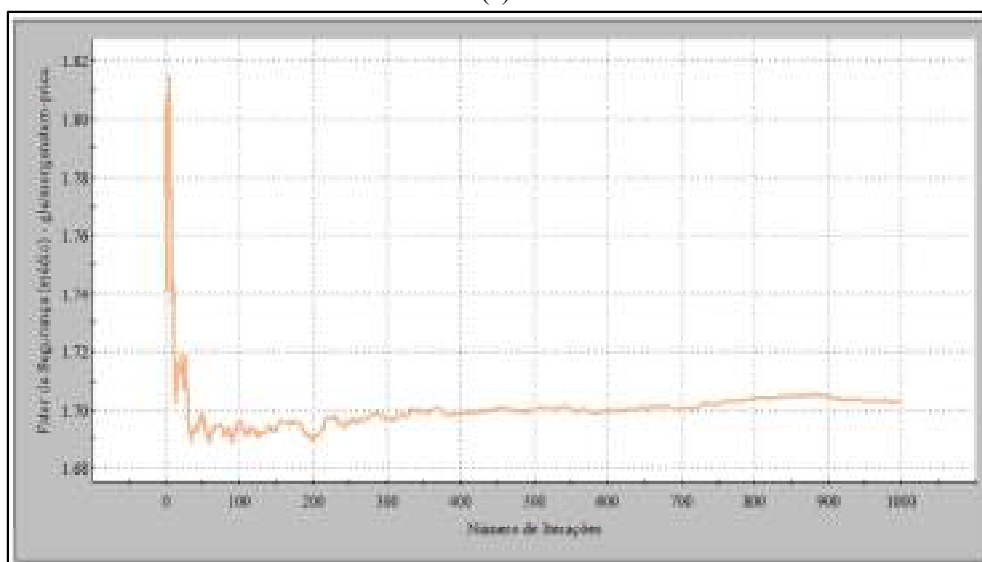
No que se refere aos resultados da abordagem probabilística, ao examinar as Figuras 135-(a) e 135-(c), destaca-se que o menor valor médio do FS, obtido após 1000 e 3000 iterações, foi de 1,70. Adicionalmente, foram encontradas  $P_r$  nulas e índices de confiabilidade variando entre 5,32 (valor normal) a 6,84 (valor log-normal). Em relação às curvas de convergência, nota-se pelas Figuras 135-(b) e 135-(d), que os resultados tendem a estabilizar após 1000 iterações.

De acordo com os critérios da USACE (1997), os resultados obtidos pela abordagem probabilística, não revelaram indícios de instabilidade do talude, considerando as condições nas quais a análise foi conduzida.

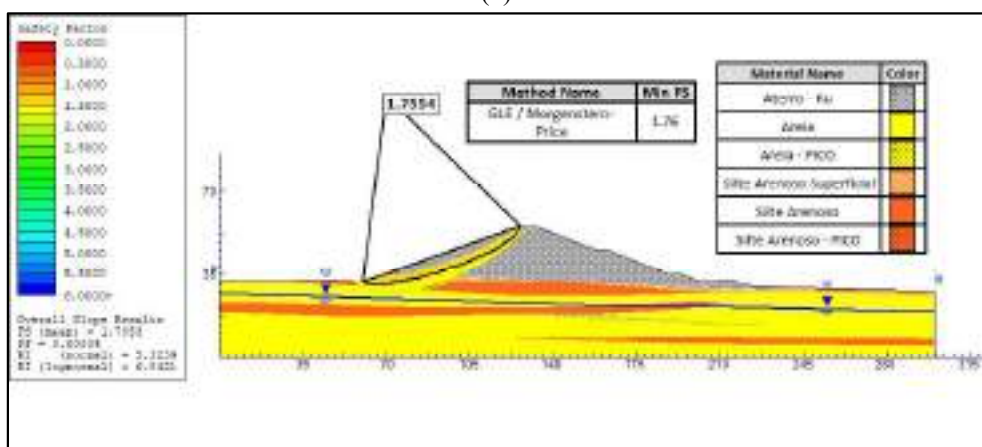
Figura 135 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



(a)

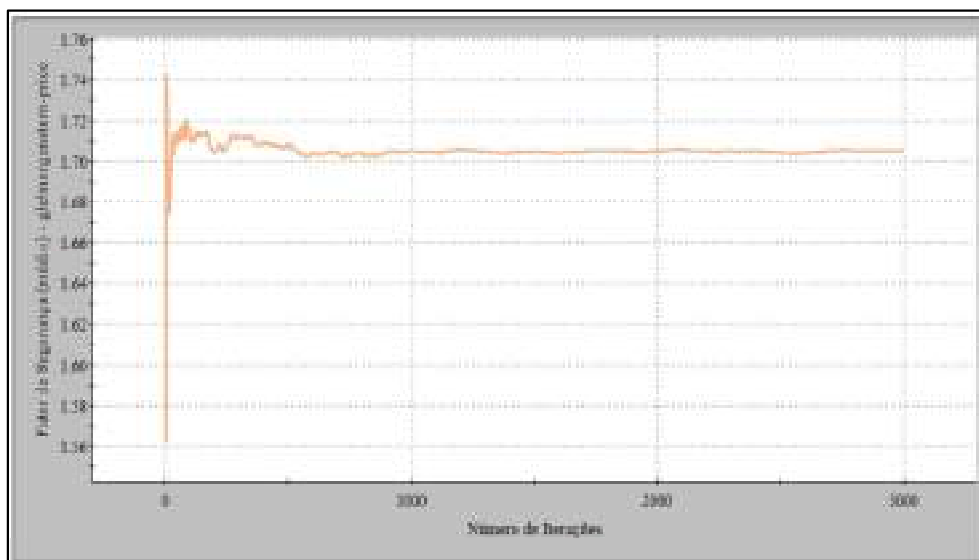


(b)



(c)





(d)

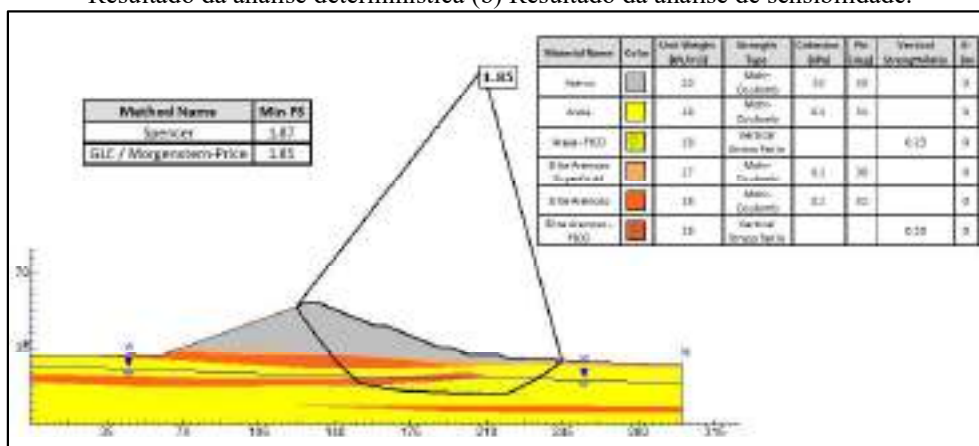
Fonte: Autora (2023)

### 5.6.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

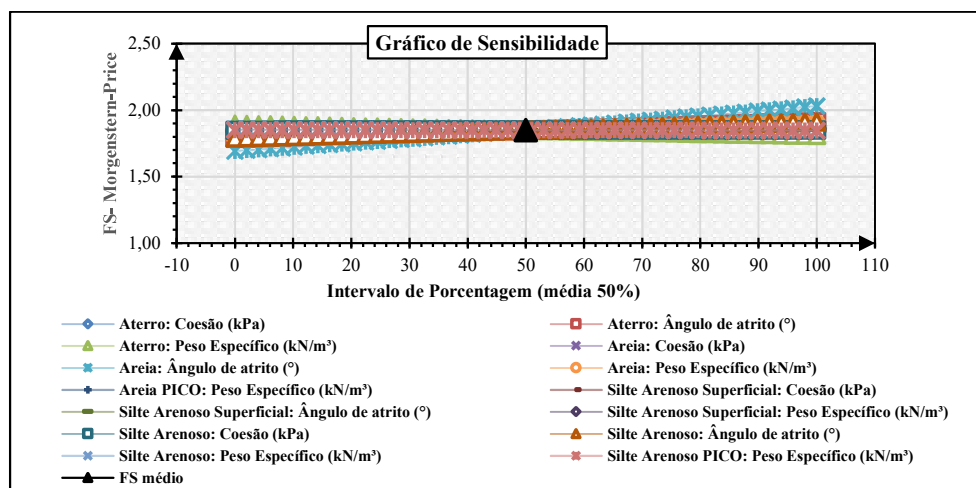
Os resultados das análises para a fase de final de construção do talude a jusante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro, são apresentados nas Figuras 136 e 137.

A partir de uma análise determinística, conforme evidenciado na Figura 136-(a), observa-se que o menor FS encontrado foi de 1,85, obtido pelo método de Morgenstern-Price, superando o mínimo exigido pela NBR13028/17 para esta condição. Ao realizar uma análise de sensibilidade, como ilustrado pela Figura 136-(b), destaca-se que a maior variação da magnitude do FS ocorre devido às oscilações do ângulo de atrito da camada de areia.

Figura 136 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

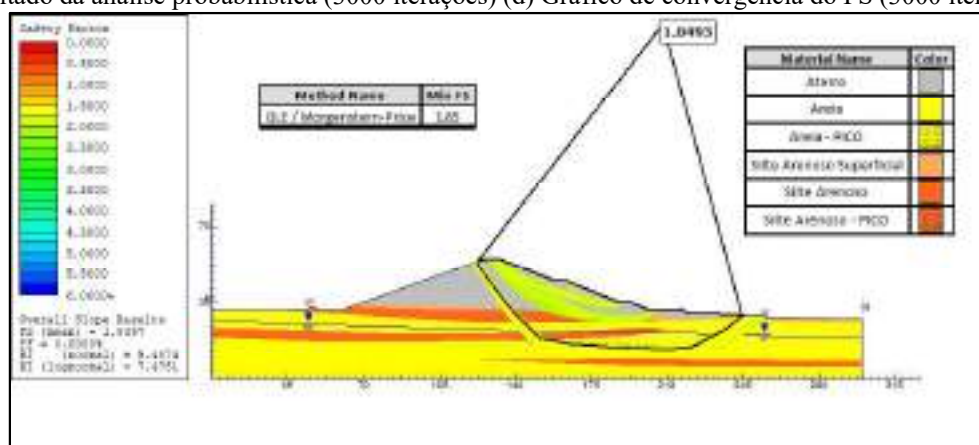


(b)

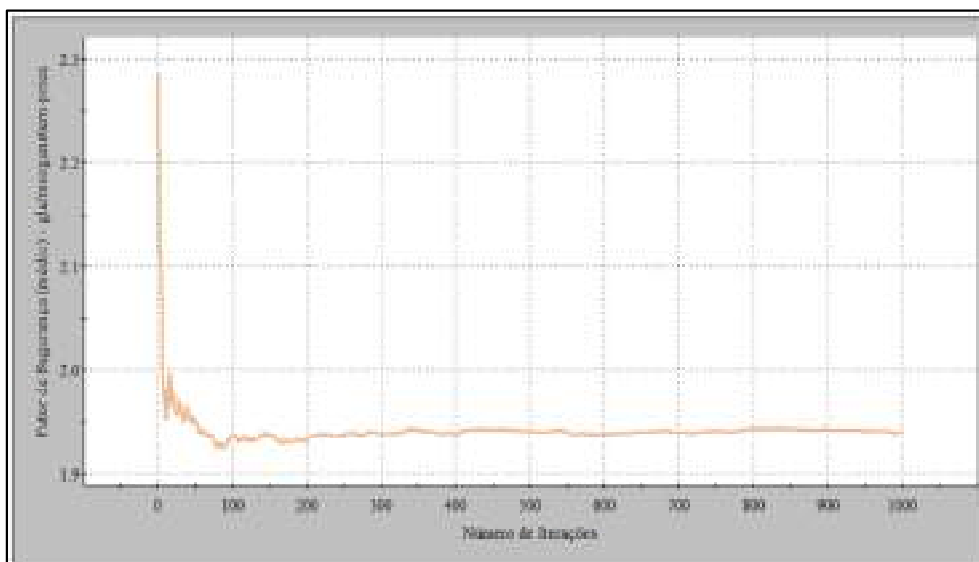
Fonte: Autora (2023)

Sob uma perspectiva probabilística, analisando as Figuras 137-(a) e 137-(c), nota-se que o menor FS médio probabilístico encontrado foi de 1,93 para ambas as iterações. Adicionalmente, foram identificadas Pr nulas, com índices de confiabilidade variando entre 5,73 (valor normal) a 7,48 (valor log-normal). Seguindo os critérios da USACE (1997), esses resultados indicam um comportamento estável do talude. Ao observar o comportamento das curvas de convergência, ilustradas nas Figuras 137-(b) e 137-(d), observa-se que a estabilização dos resultados tende a ocorrer após 1000 iterações. Dessa forma, é possível inferir que, para a condição de análise, tanto a abordagem determinística quanto a probabilística convergem para a estabilidade do talude.

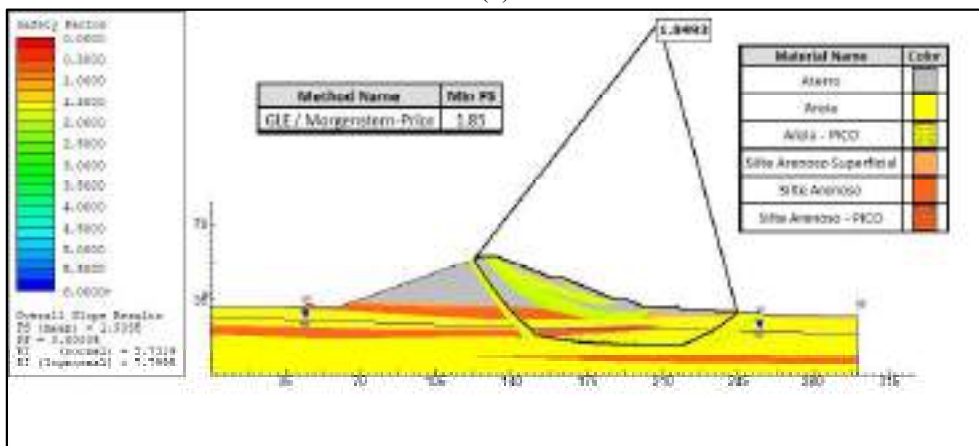
Figura 137 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



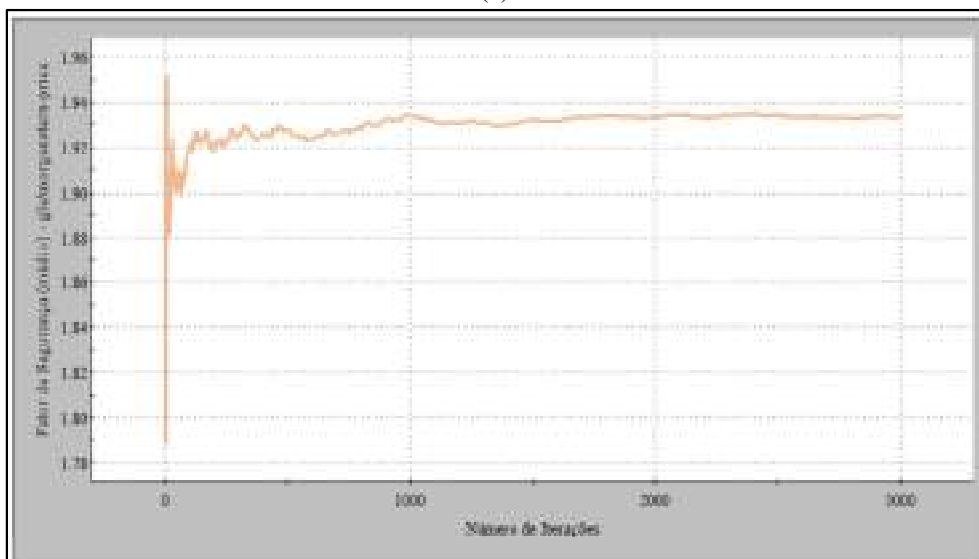
(a)



(b)



(c)



(d)

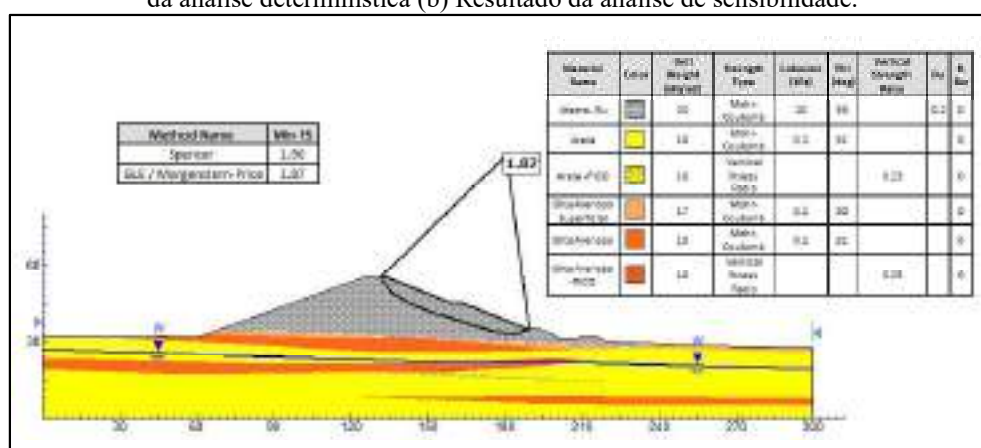
Fonte: Autora (2023)

#### 5.6.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

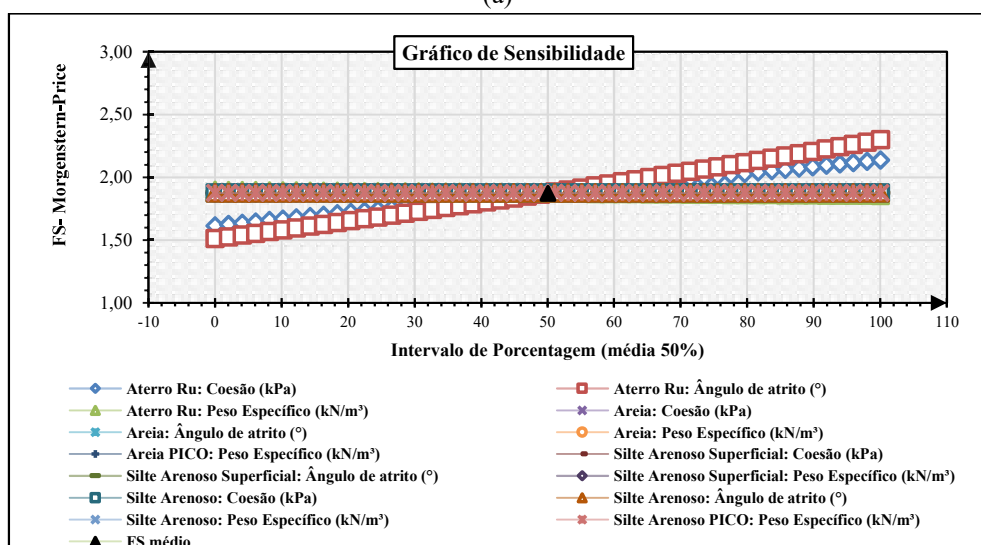
Os resultados das análises para a fase de final de construção do talude jusante, considerando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro, são apresentados nas Figuras 138 e 139.

Os resultados da aplicação da abordagem determinística, revelaram um FS igual a 1,87, conforme evidenciado na Figura 138-(a). Com relação a análise de sensibilidade realizada, observa-se pela Figura 138-(b), que o FS sofre variações significativas ao modificar os valores dos parâmetros de resistência da camada de aterro compactado. Sob a perspectiva determinística, é possível inferior que o talude mantém sua estabilidade, atendendo às recomendações da NBR 13028/17.

Figura 138 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



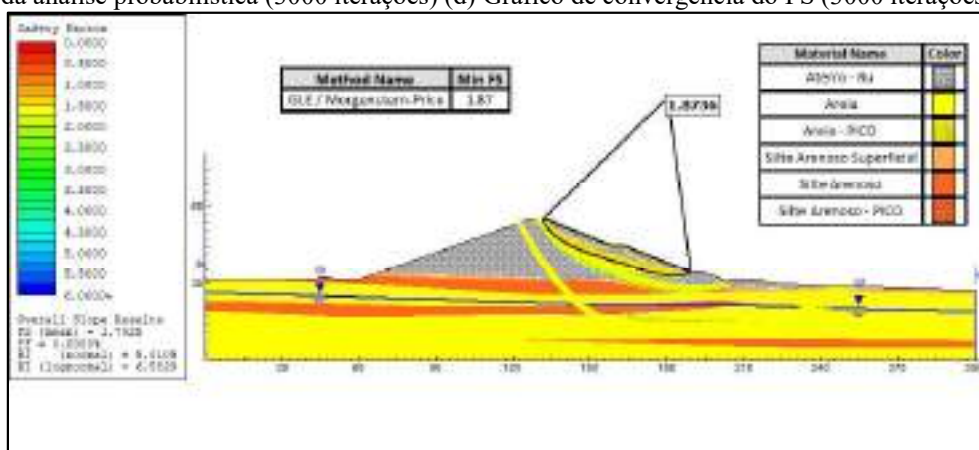
(b)

Fonte: Autora (2023)

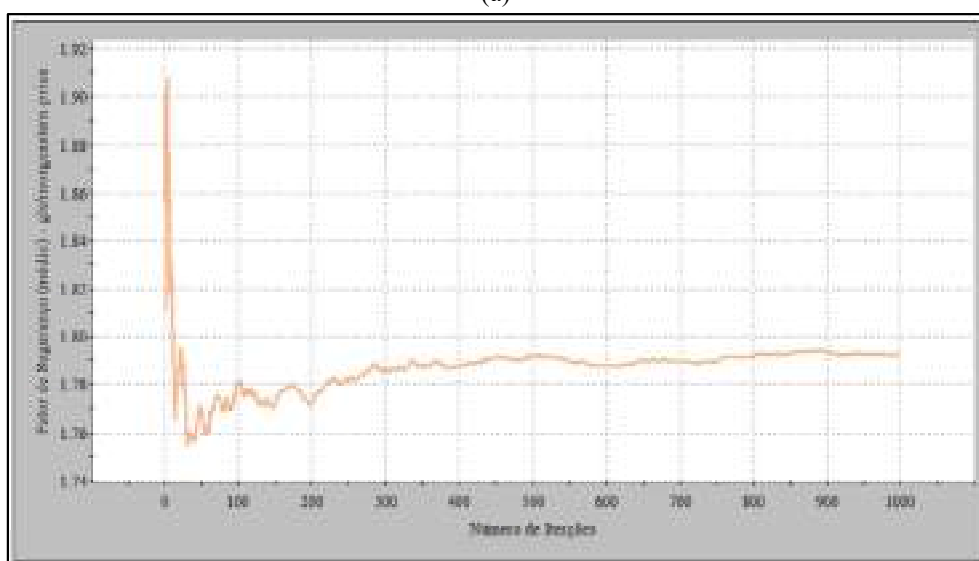
Com relação aos resultados da abordagem probabilística, observa-se pelas Figuras 139-(a) e 139-(c), que o FS médio observado foi igual a 1,79 para ambas as iterações testadas. Adicionalmente, as Pr foram nulas, com índices de confiabilidade oscilando entre 4,92 (valor normal) a 6,58 (valor log-normal). Quanto às curvas de convergências, ilustradas nas Figuras 139-(b) e 139-(d), observa-se uma tendência a estabilização dos resultados a partir de 1000 iterações.

Ao confrontar os resultados da abordagem probabilística com os limites definidos pela USACE (1997), é possível inferir que os resultados encontrados apontam para um talude com nível de desempenho considerado adequado. Dessa forma, é possível dizer que os resultados de ambas as abordagens convergem para a estabilidade do talude, considerando as condições nas quais a análise foi conduzida.

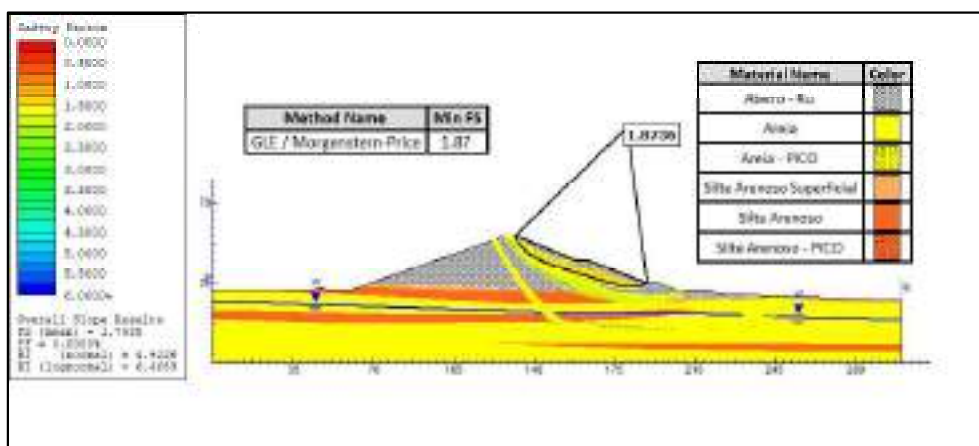
Figura 139 - Resultado da Seção F-F - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



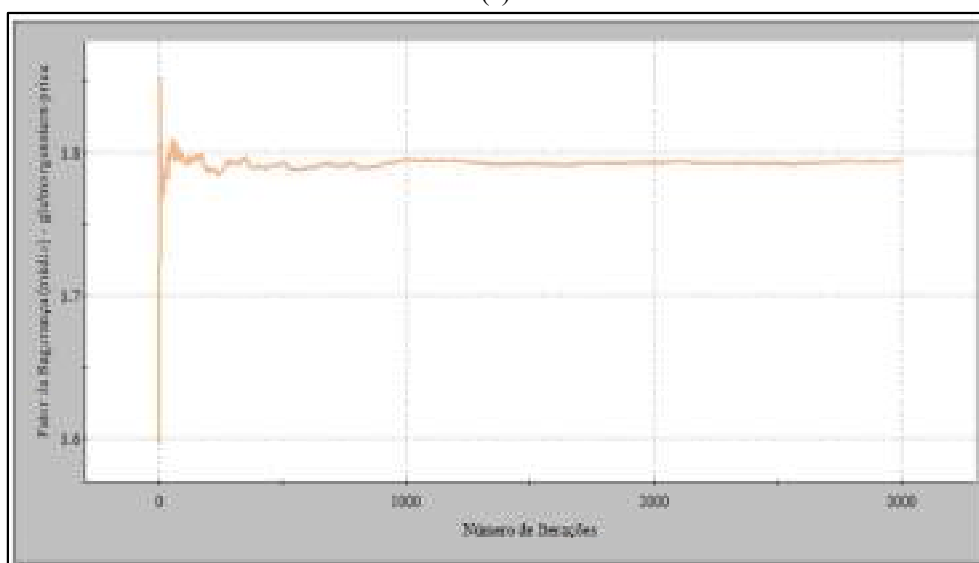
(a)



(b)



(c)



(d)

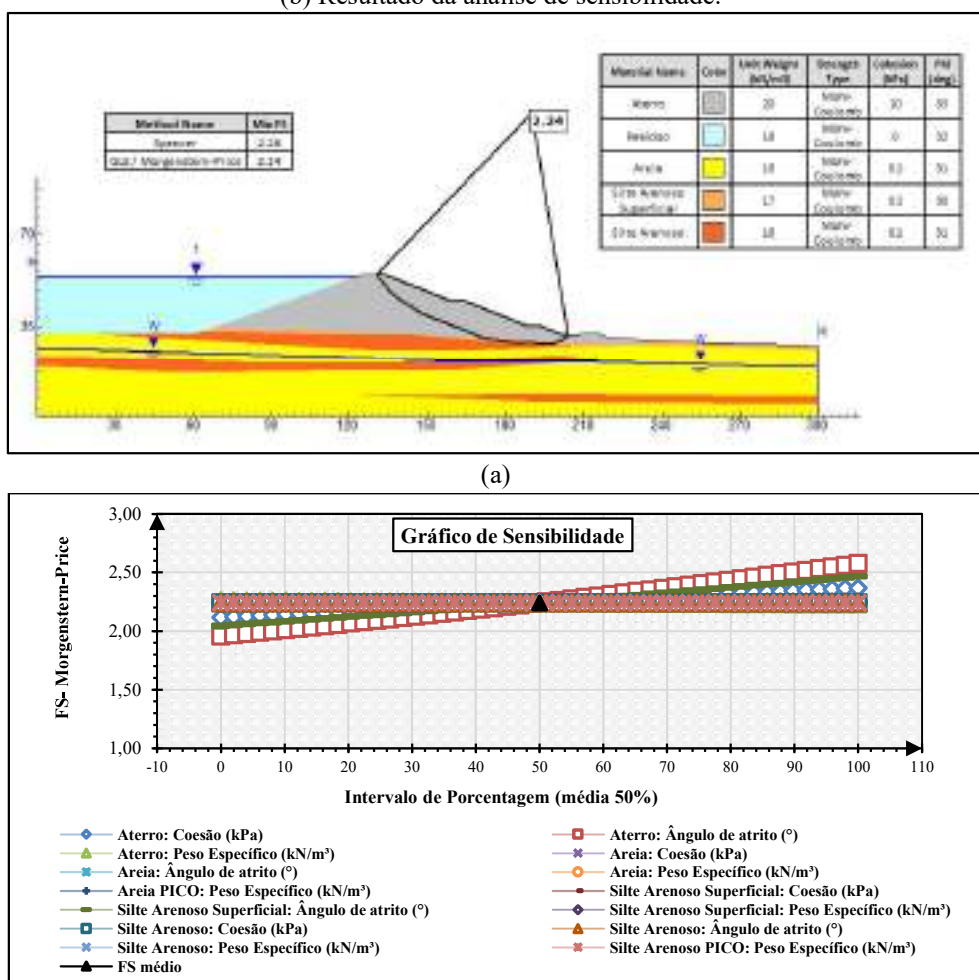
Fonte: Autora (2023)

### 5.6.5 Operação Normal – Drenado

Os resultados das análises para a fase de operação, considerando a condição drenada dos materiais são apresentados nas Figuras 140 e 141.

Para esta condição, conforme evidenciado na Figura 140-(a), nota-se um aumento no FS devido ao ganho de resistência decorrente da maior interação entre as partículas do solo. Quanto aos resultados da Figura 140-(b), a análise de sensibilidade mostrou que o FS é sensível às variações das propriedades da camada de aterro, como o ângulo de atrito e a coesão, bem como às variações do ângulo de atrito da camada de silte arenoso superficial. Deterministicamente, o talude se encontra estável para esse cenário, apresentando um FS de 2,24, superior ao mínimo admissível de 1,5 requerido pela NBR 13028/17.

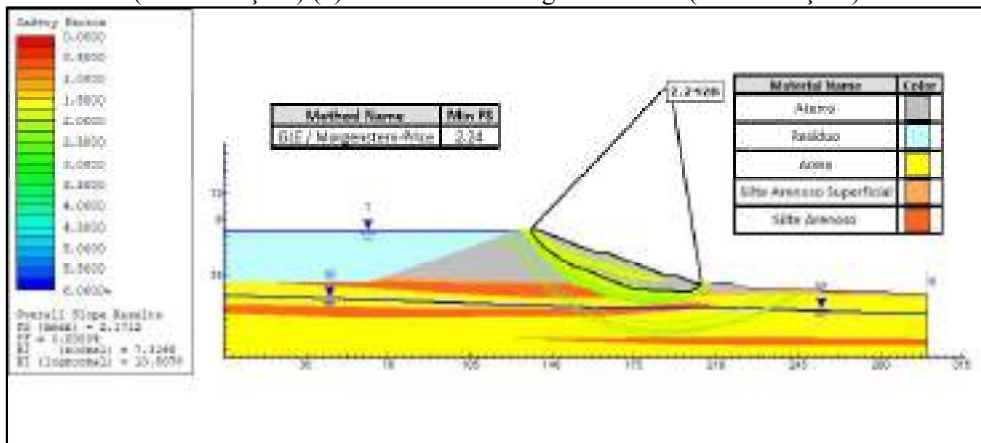
Figura 140 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



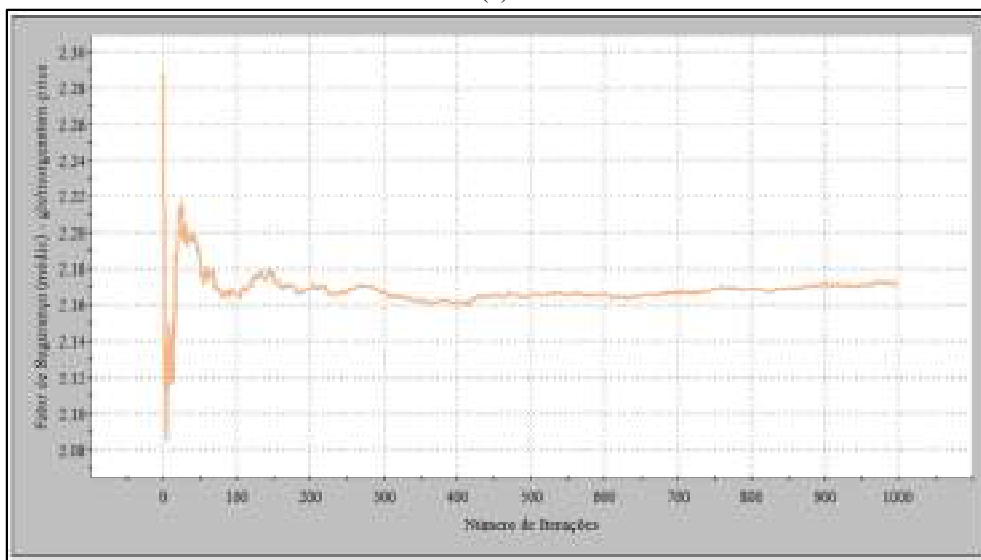
(b)  
Fonte: Autora (2023)

Em relação aos resultados da abordagem probabilística, observou-se uma redução no FS em comparação com o valor derivado da abordagem determinística. Conforme evidenciado nas Figuras 141-(a) e 141-(c), o FS médio probabilístico foi aproximadamente de 2,16, apresentando uma Pr de 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,88 (valor normal) a 9,85 (valor log-normal). Com base nesses dados, e considerando os limites estabelecidos pela USACE (1997), pode-se inferir que o talude se mantém estável diante desse cenário de carregamento. Quanto à estabilização dos dados, as Figuras 141-(b) e 141-(d), indicam uma tendência a convergência dos resultados a partir de 1000 iterações, convergindo em torno do valor de 2,16, mostrando que os resultados encontrados são estáveis.

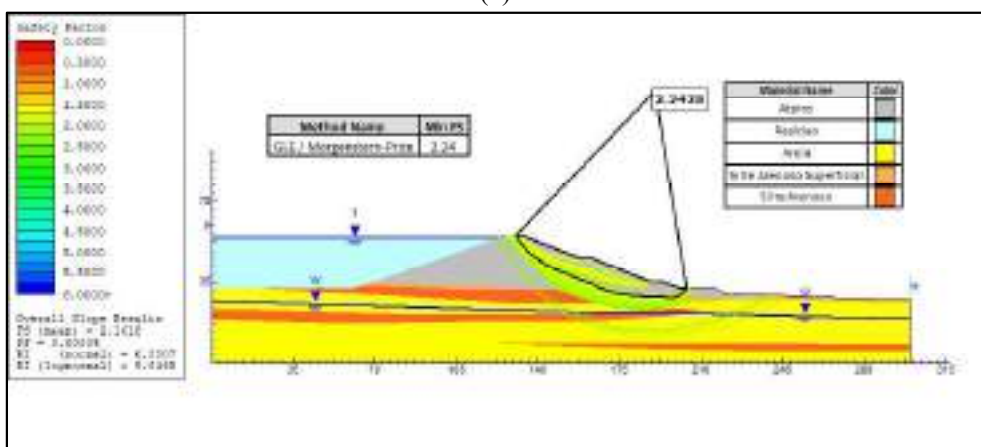
Figura 141 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



(a)

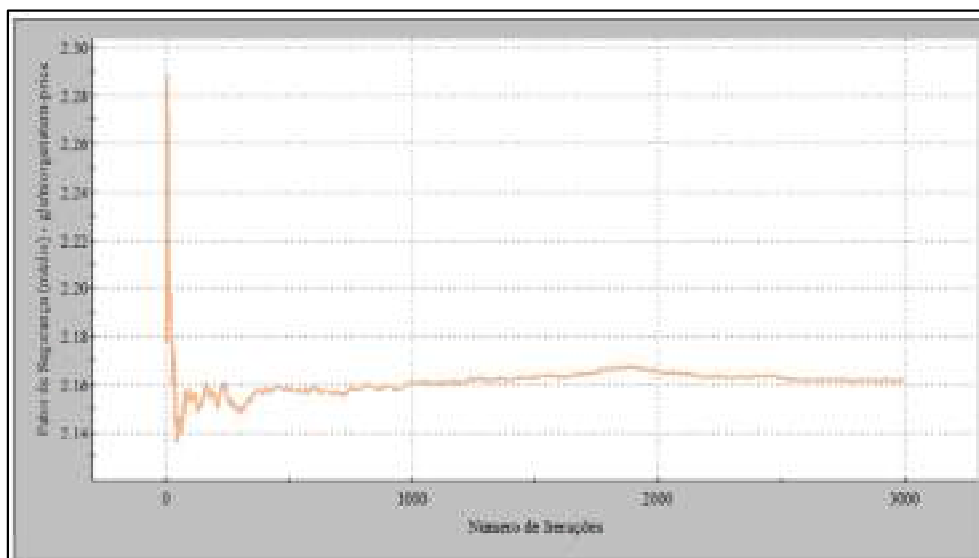


(b)



(c)





(d)

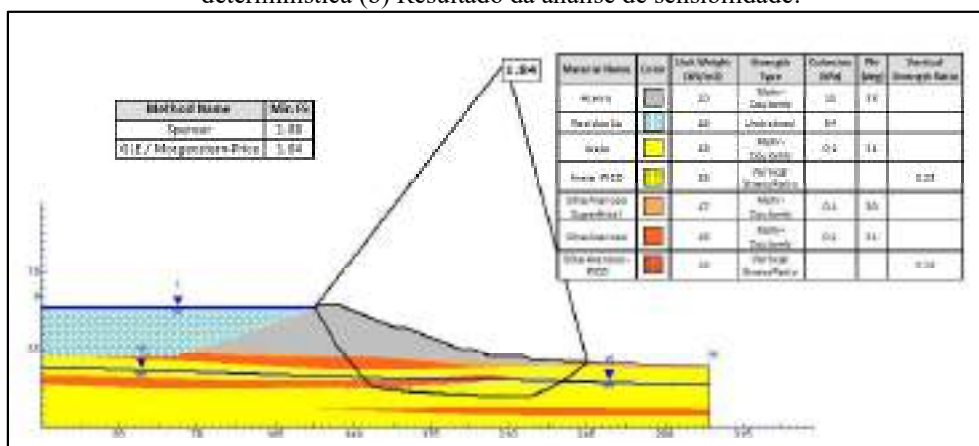
Fonte: Autora (2023)

### 5.6.6 Operação normal – Não drenado

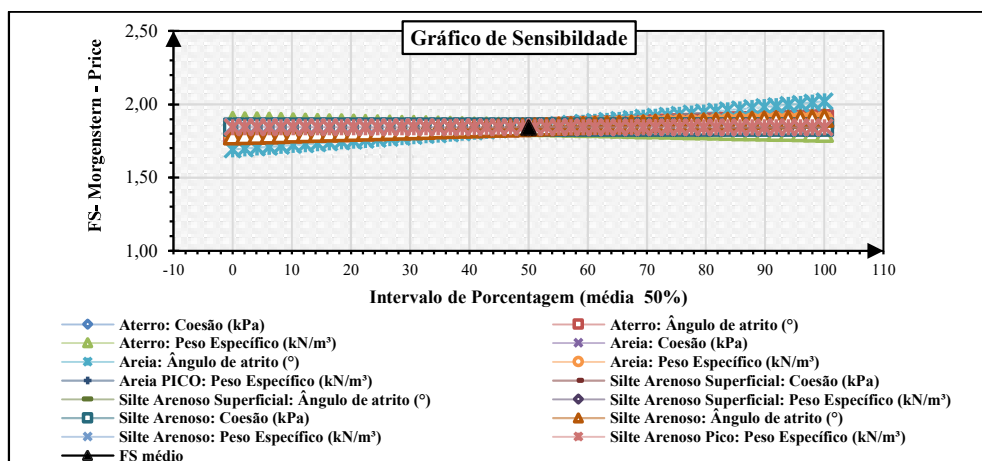
Os resultados das análises para a fase de operação, considerando a condição não-drenada dos materiais são apresentadas nas Figuras 142 e 143.

Observa-se no resultado apresentado na Figura 142-(a) que o talude analisado apresentou um FS igual a 1,84, superando o limite mínimo de 1,5 estabelecido pela NBR 13028/17. Quanto aos resultados referentes a análise de sensibilidade, exibidos na Figura 142-(b), é observado uma variação do FS quanto a oscilação do ângulo de atrito da camada de areia.

Figura 142 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

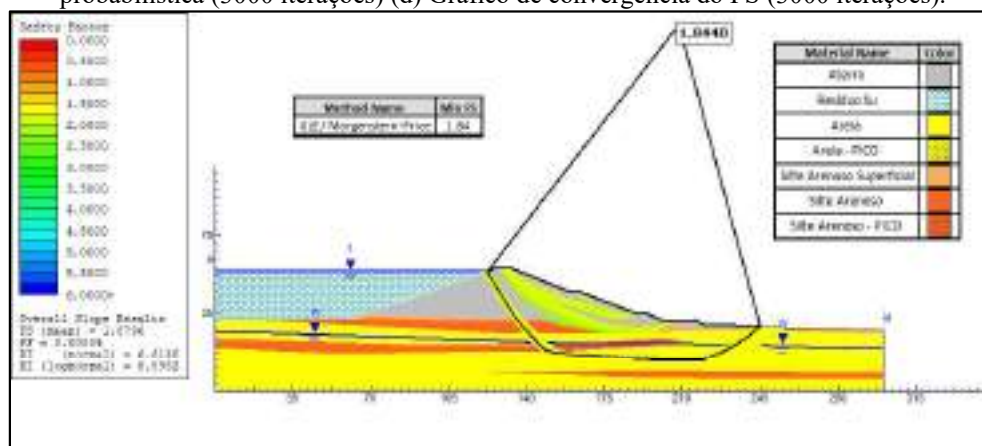


(b)

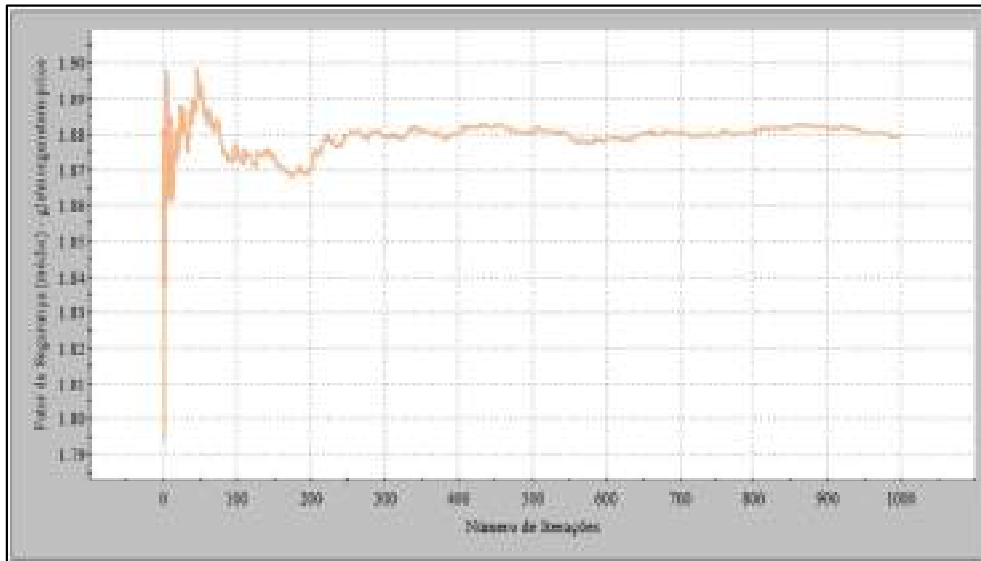
Fonte: Autora (2023)

Ao examinar os resultados das Figuras 143-(a) e 143-(c), nota-se que o FS probabilístico obtido para ambas as iterações foi aproximadamente 1,88. Além disso, os resultados probabilísticos revelaram Pr iguais a 0% e índices de confiabilidade variando entre 6,62 (valor normal) a 8,90 (valor log-normal), o que, segundo a referência da USACE (1997), indica uma alta confiabilidade do FS e um bom nível de desempenho do talude. Quanto as curvas de convergência, ilustradas nas Figuras 143-(b) e 143-(d), observa-se uma tendência a estabilização dos resultados a partir de 1000 iterações.

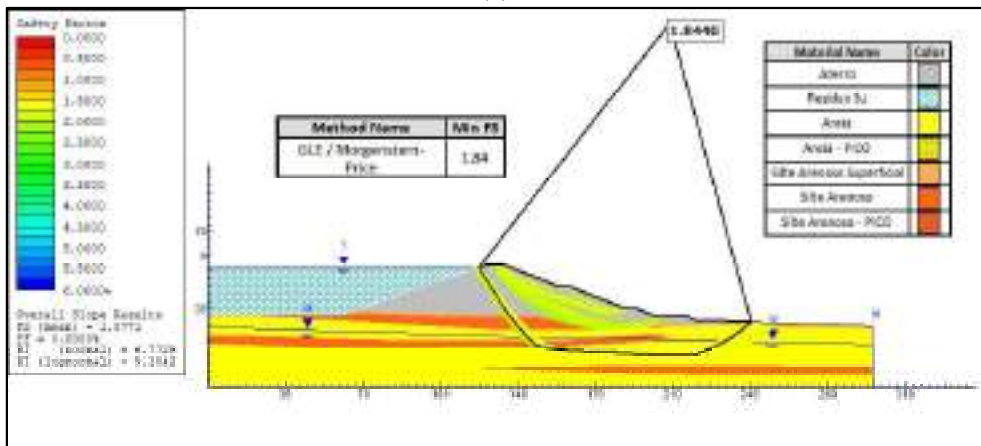
Figura 143 - Resultado da Seção F-F - Operação Normal – Não drenado(a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



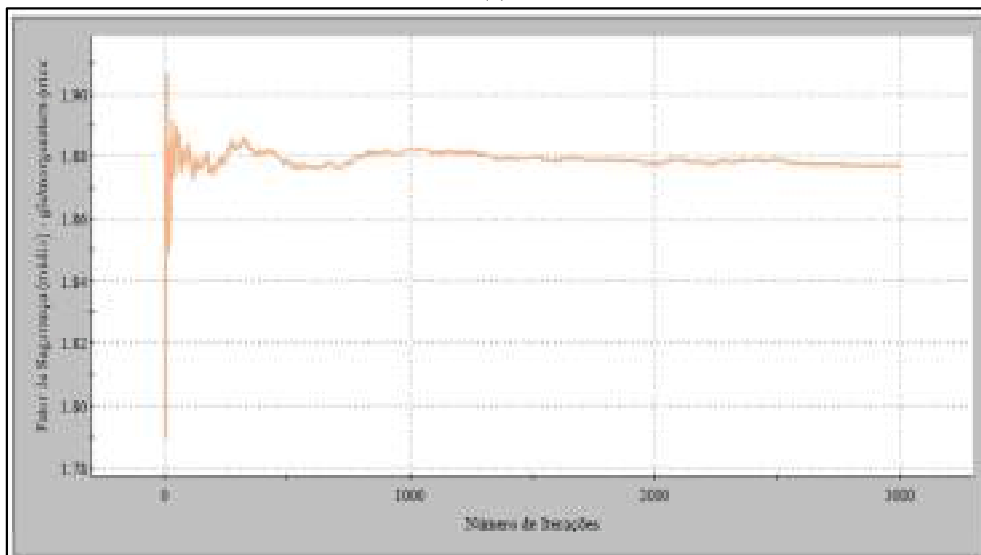
(a)



(b)



(c)



(d)

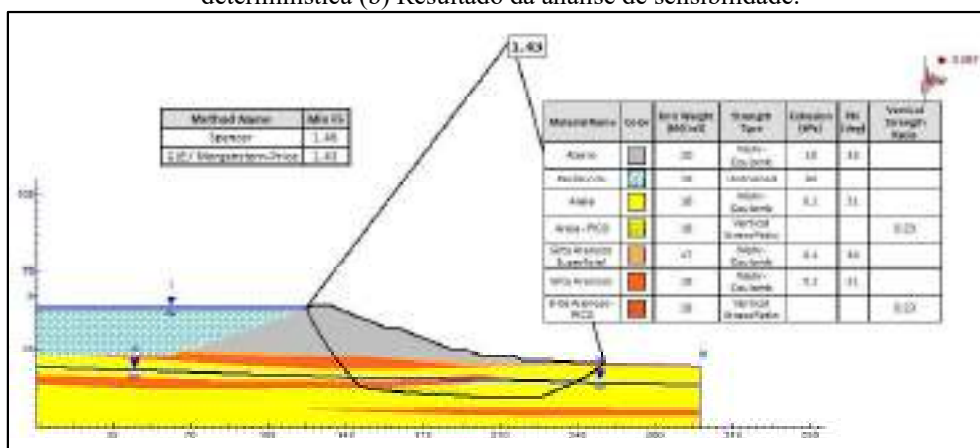
Fonte: Autora (2023)

### 5.6.7 Solicitação Pseudoestática

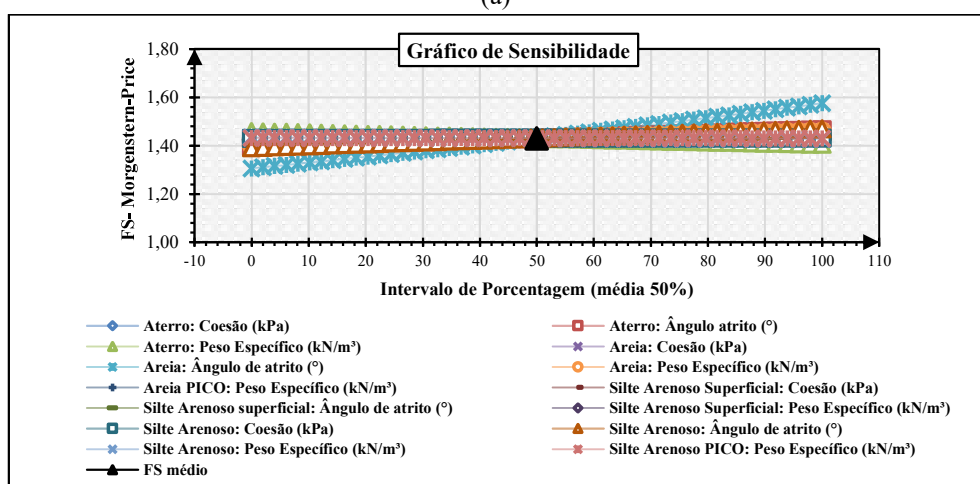
Os resultados encontrados para as três condições de solicitação pseudoestática são apresentados nas Figuras 144 a 149.

A introdução de um carregamento pseudoestático horizontal na seção F durante a fase de operação, ocasionou uma redução no FS passando de 1,84 do cenário de condição não drenada para 1,43 com a aplicação desse carregamento, conforme é mostrado na Figura 144-(a). Contudo, apesar dessa diminuição, o FS encontrado pela abordagem determinística ultrapassou o valor mínimo estabelecido para esta condição de 1,10 conforme definido pela NBR 13028/17. Quanto aos resultados da análise de sensibilidade, ilustrados na Figura 144-(b), estes revelam uma variação do FS em relação as mudanças no ângulo de atrito da camada areia.

Figura 144 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



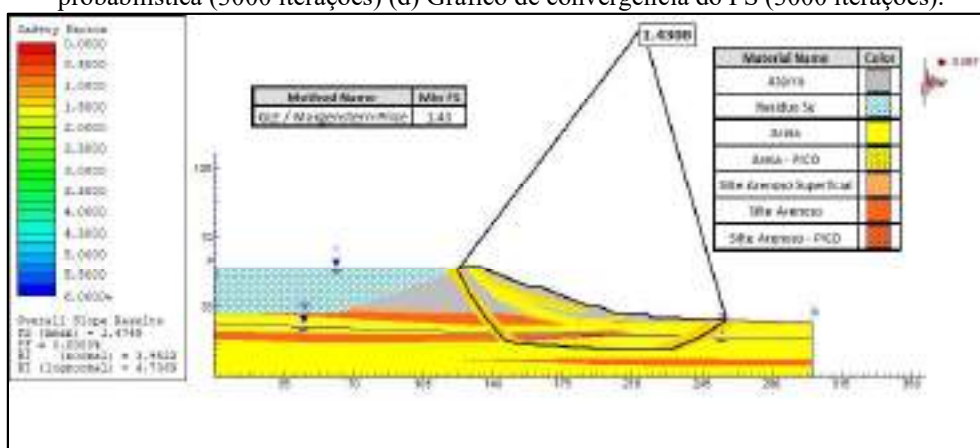
(b)

Fonte: Autora (2023)

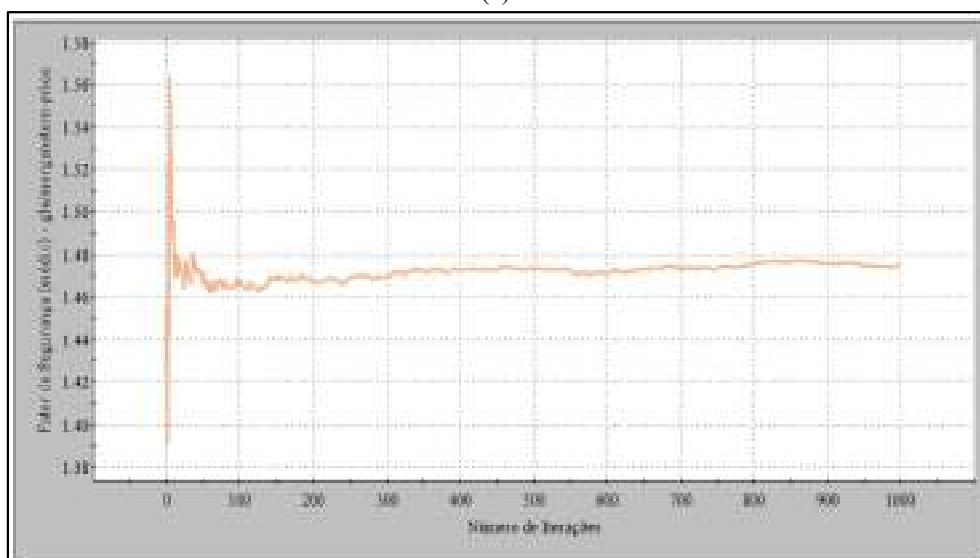
Em relação aos resultados obtidos pela abordagem probabilística, conforme evidenciado nas Figuras 145-(a) e 145-(c), destaca-se um FS médio probabilístico de

aproximadamente 1,48. Essa análise revelou ainda uma Pr nula, juntamente com índices de confiabilidade variando entre 3,93 (valor normal) a 4,71 (valor log-normal), ambos enquadrados como parâmetros aceitáveis de desempenho, conforme estabelecido pela USACE (1997). No que concerne às curvas apresentadas nas Figuras 145-(b) e 145-(d), nota-se um comportamento inicialmente instável até 1000 iterações, evoluindo para uma estabilidade em torno de 1,48 a partir desse ponto.

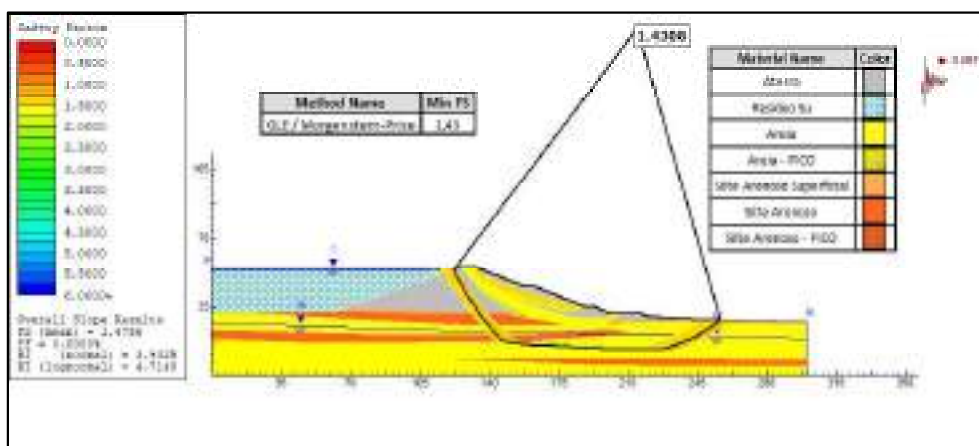
Figura 145 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



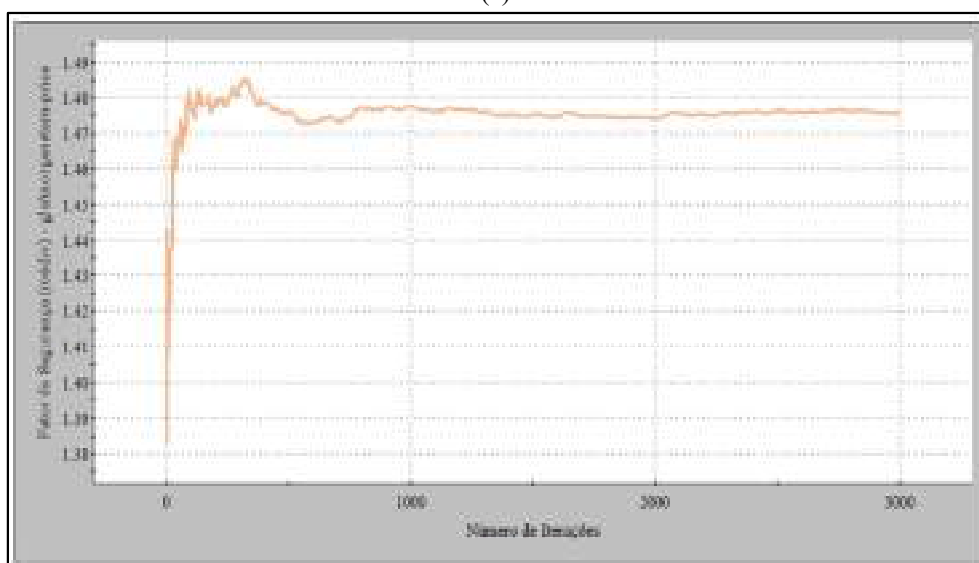
(a)



(b)



(c)

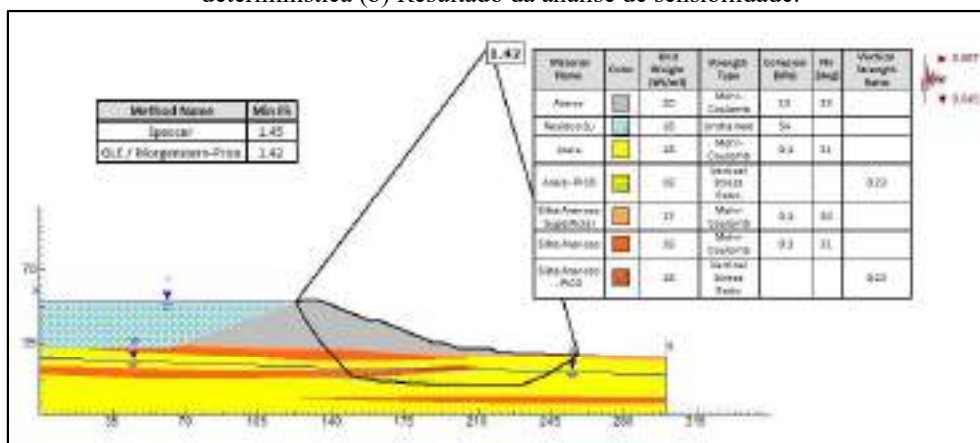


(d)

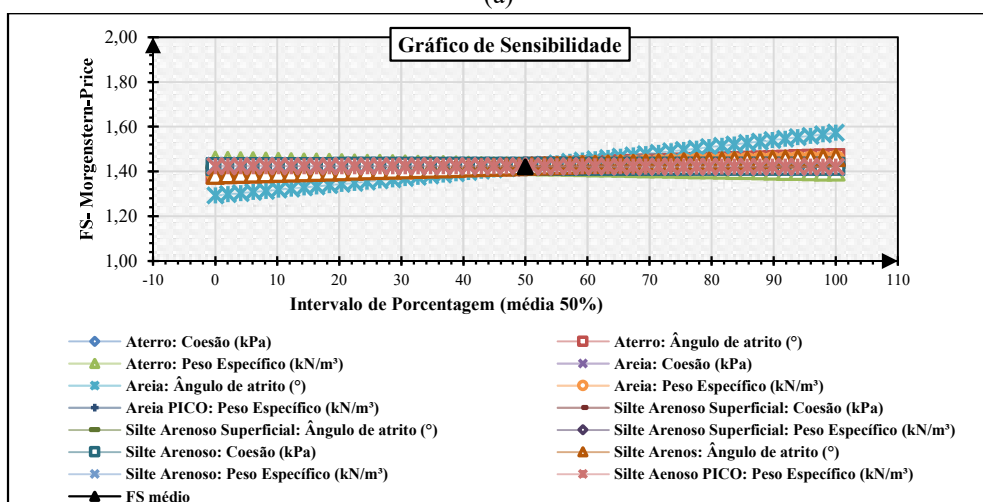
Fonte: Autora (2023)

Ao introduzir carregamentos verticais ao sistema, observa-se que o menor FS determinístico encontrado foi igual a 1,42, conforme pode ser visto nas Figuras 146-(a) e 147-(a). Em relação as análises de sensibilidade, observa-se pelas Figuras 146-(b) e 147-(b), que os resultados foram semelhantes, revelando que o FS é mais variável as oscilações do ângulo de atrito da camada de areia. No que se refere a estabilidade, para ambas às condições de carregamento, os taludes permanecem estáveis a ocorrência de solicitação pseudoestáticas, de acordo com a abordagem determinística.

Figura 146 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



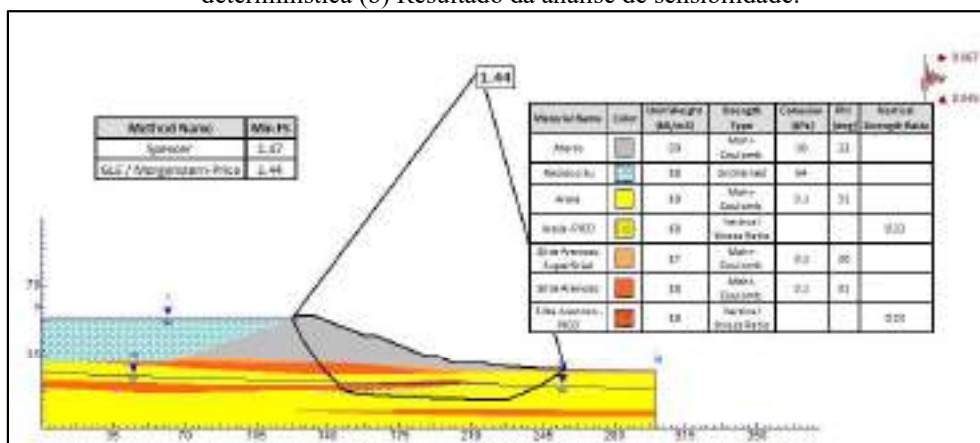
(a)



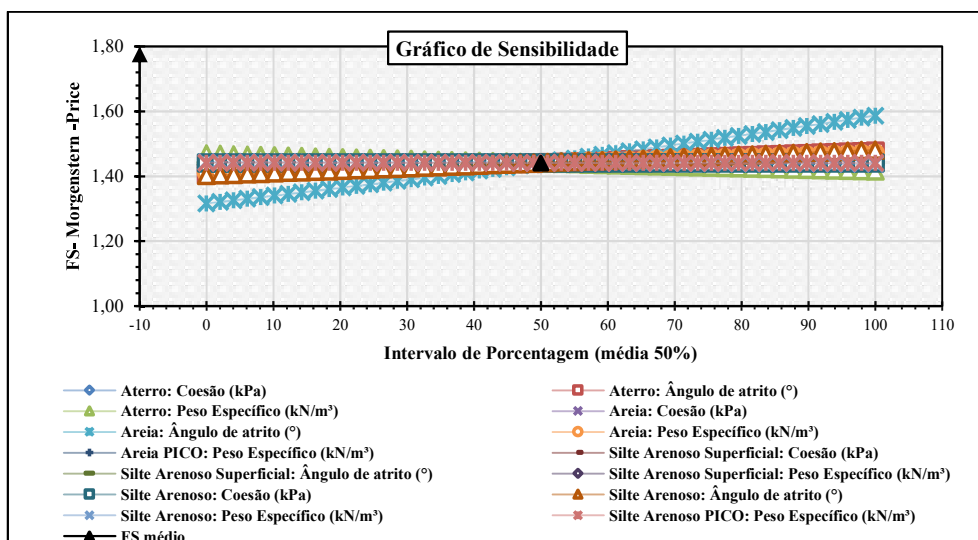
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 147 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



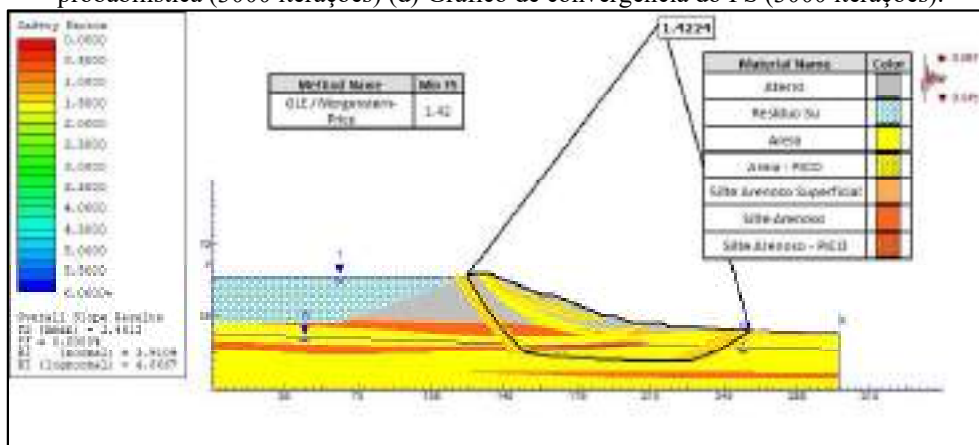
(b)

Fonte: Autora (2023)

Com relação aos resultados probabilísticos, apresentados nas Figuras 148-(a), 148-(c), 149-(a) e 149-(c), destaca-se que, nas duas condições de carregamento analisadas, o menor FS probabilístico encontrado foi igual a 1,47. Adicionalmente, constatou-se que as Pr foram nulas, enquanto os índices de confiabilidade mínimos variaram entre 4,04 (valor normal) a 4,58 (valor log-normal). No que diz respeito às curvas de convergência exibidas nas Figuras 148-(b), 148-(d), 149-(b) e 149-(d), nota-se uma tendência a estabilização dos resultados a partir de 1500 iterações.

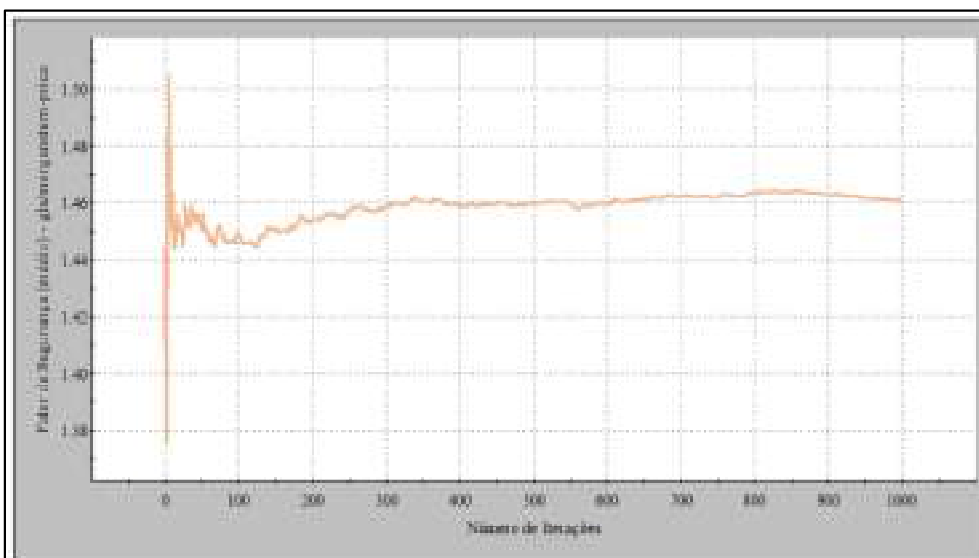
Considerando os resultados probabilísticos obtidos e utilizando como referência os limites mínimos estabelecidos pela USACE (1997), é possível inferir que, sob uma perspectiva probabilística, o talude da seção F mantém-se estável diante de ambas as condições de carregamento analisadas.

Figura 148 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).

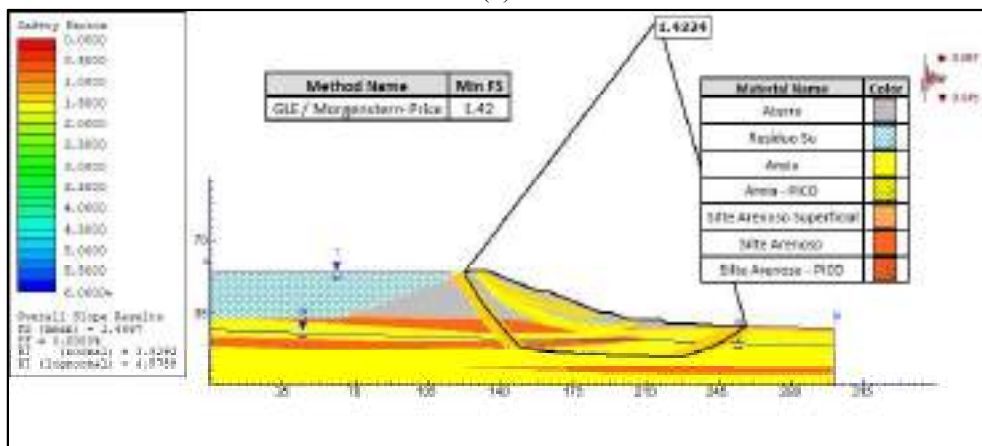


(a)

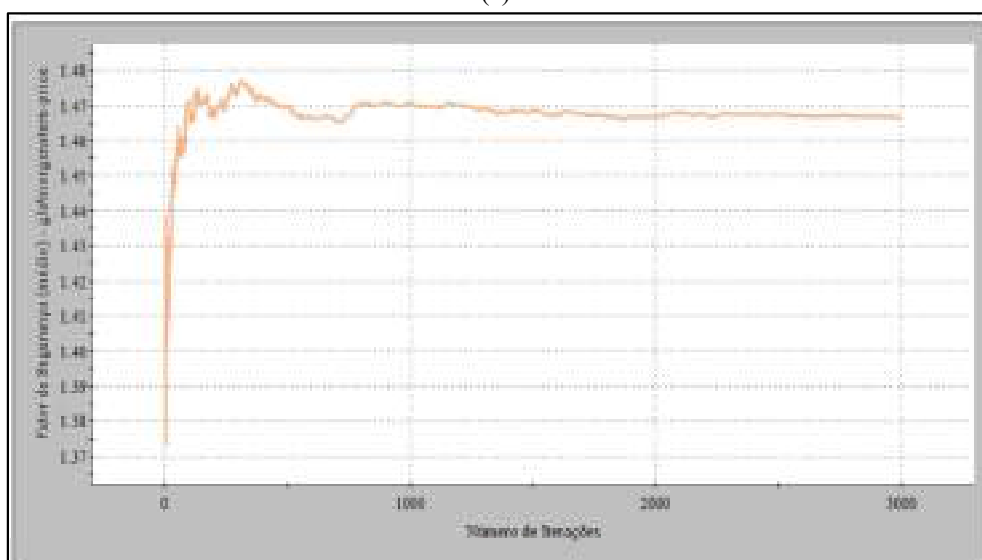




(b)



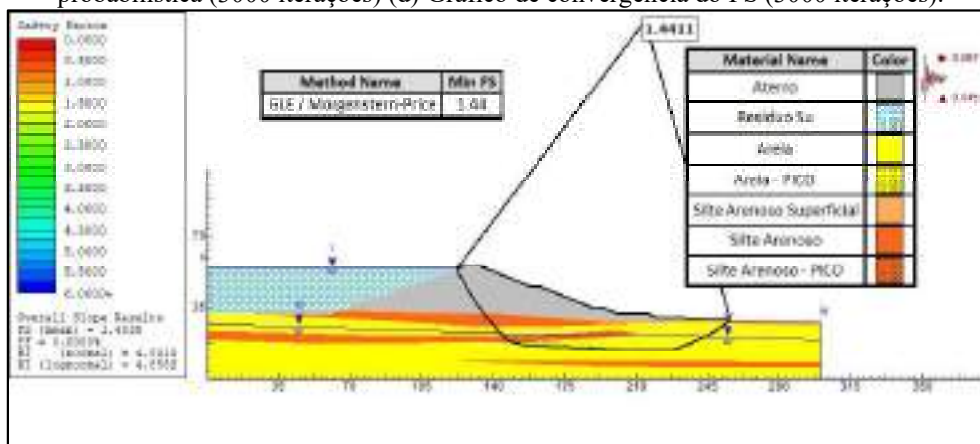
(c)



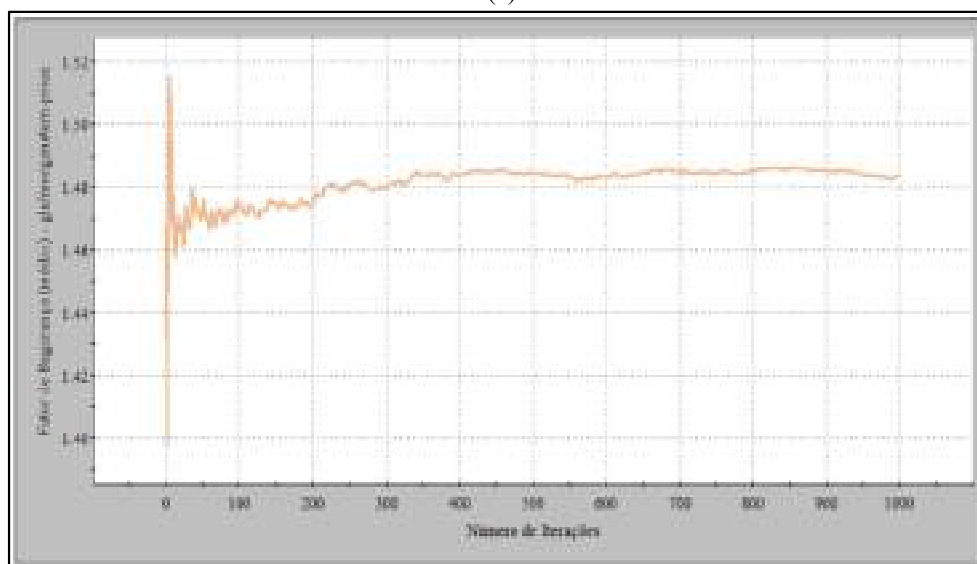
(d)

Fonte: Autora (2023)

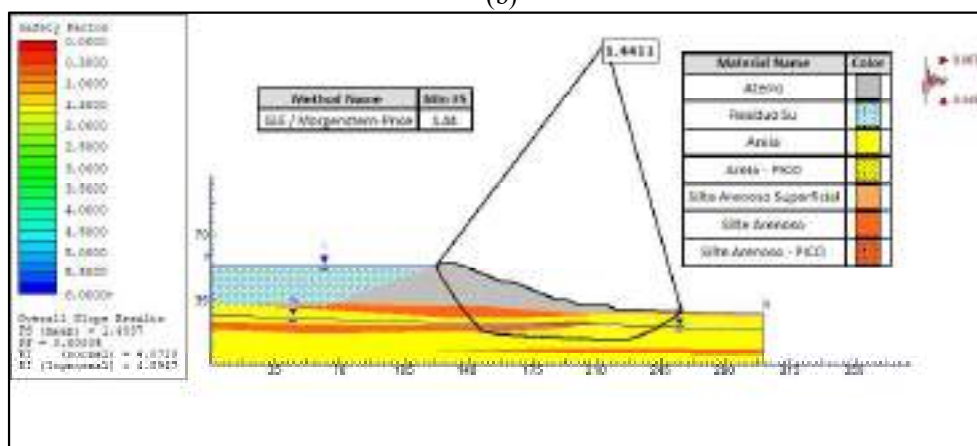
Figura 149 - Resultado da Seção F-F - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



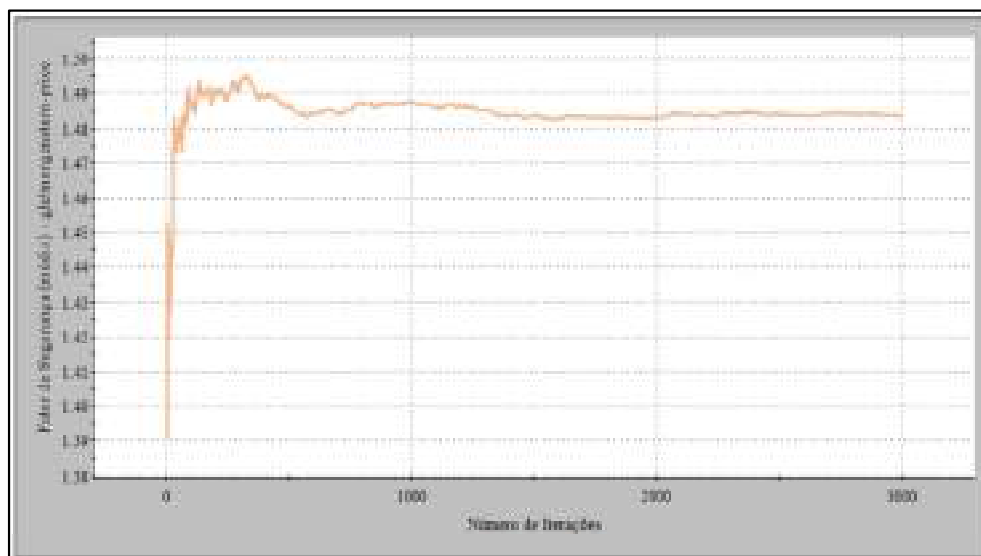
(a)



(b)



(c)



(d)

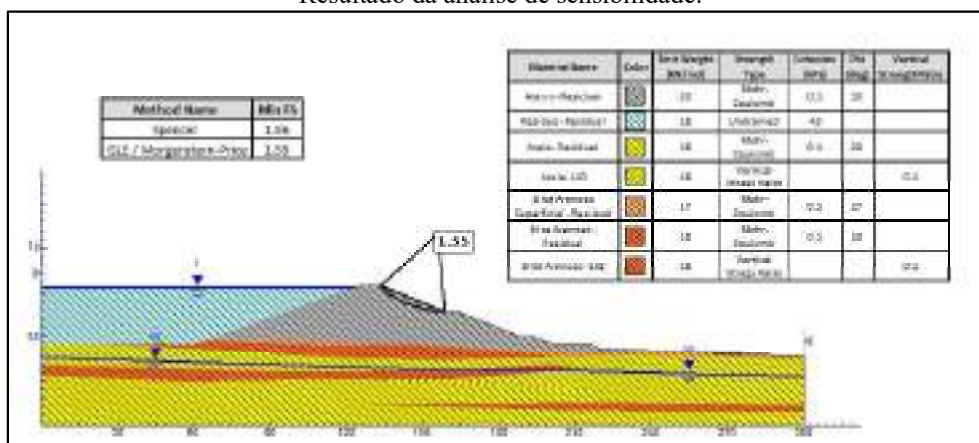
Fonte: Autora (2023)

### 5.6.8 Solicitação pós-sísmica

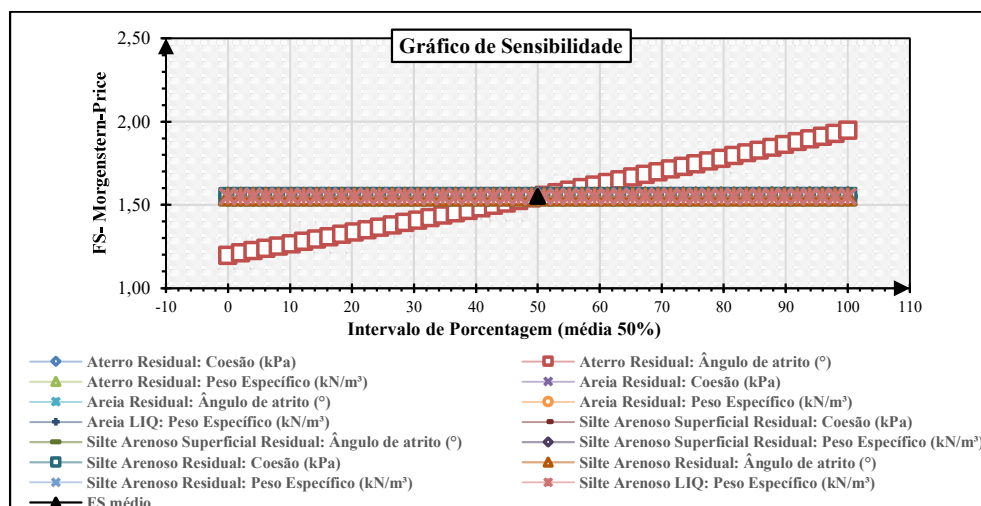
Os resultados referentes à condição com solicitação pós-sísmica são apresentados nas Figuras 150 e 151.

Conforme é apresentado na Figura 150-(a), a análise determinística revelou um FS de 1,55, superando o mínimo exigido de 1,00 pela ANCOLD (2019) e evidenciando a estabilidade do talude para esta condição. Na análise de sensibilidade, destacada na Figura 150-(b), observa-se que a variável que mais influencia o FS é o ângulo de atrito do aterro compactado. Essa influência é atribuída à localização da SPR, a qual se encontra integralmente dentro dessa camada de material.

Figura 150 - Resultado da Seção F-F- Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



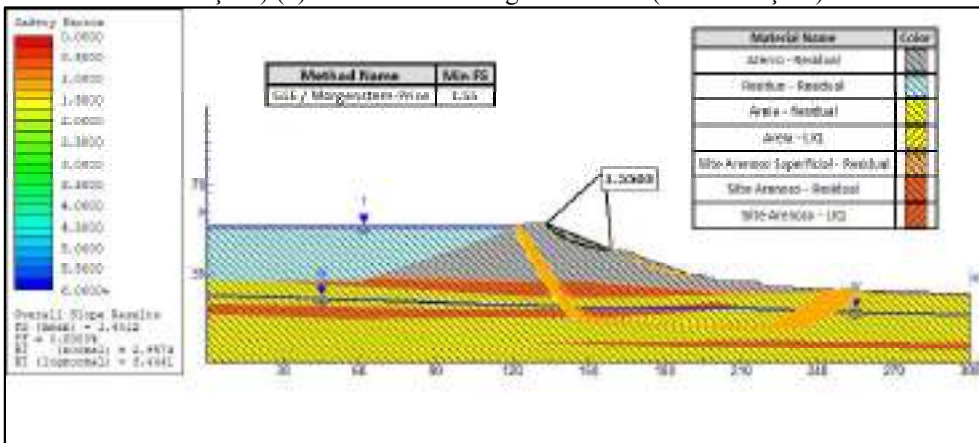
(b)

Fonte: Autora (2023)

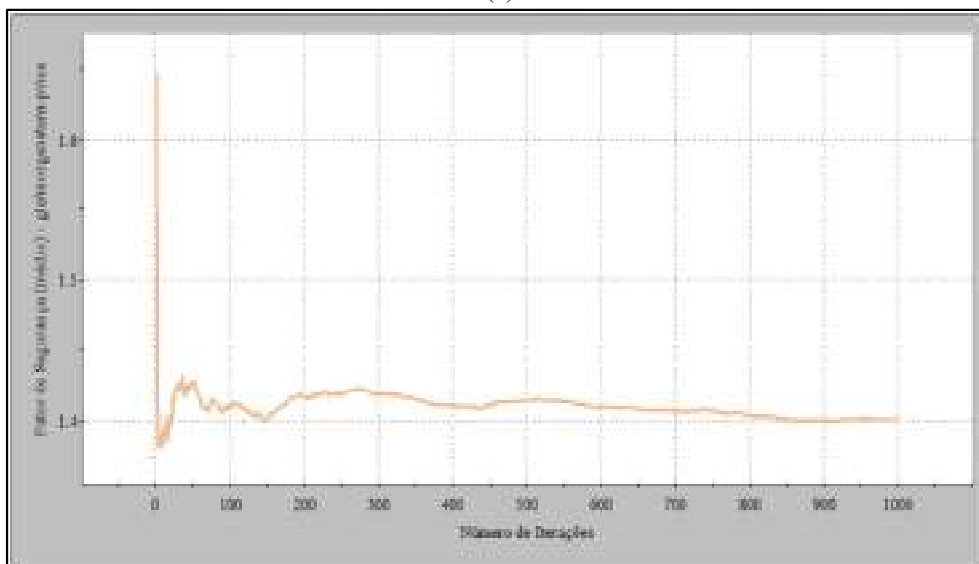
No que diz respeito aos resultados provenientes da abordagem probabilística, evidenciadas na Figura 151-(a) e 151-(c), verifica-se uma redução nos valores dos FS se comparado com o resultado determinístico, sendo este igual 1,40 para ambas as iterações. As Pr derivada de 1000 e 3000 iterações, revelaram-se nulas, enquanto os índices de confiabilidade mínimos sofreram poucas variações, sendo o menor valor registrado igual a 2,93, mantendo-se um pouco abaixo do limite admissível estabelecidos pela USACE (1997). No que concerne às curvas de convergência, observa-se pelas Figuras 151-(b) e 151-(d), que os resultados tendem a apresentar um comportamento estável a partir de 1000 iterações, indicando a consistência dos dados apresentados.

Ao avaliar esses parâmetros da abordagem probabilística, é possível inferir que o talude mantém sua estabilidade em condições pós-sísmicas. No entanto, é pertinente manter um nível de atenção em relação a essa condição, uma vez que os índices de confiabilidade encontrados são relativamente baixos em comparação com as demais condições analisadas para esta seção.

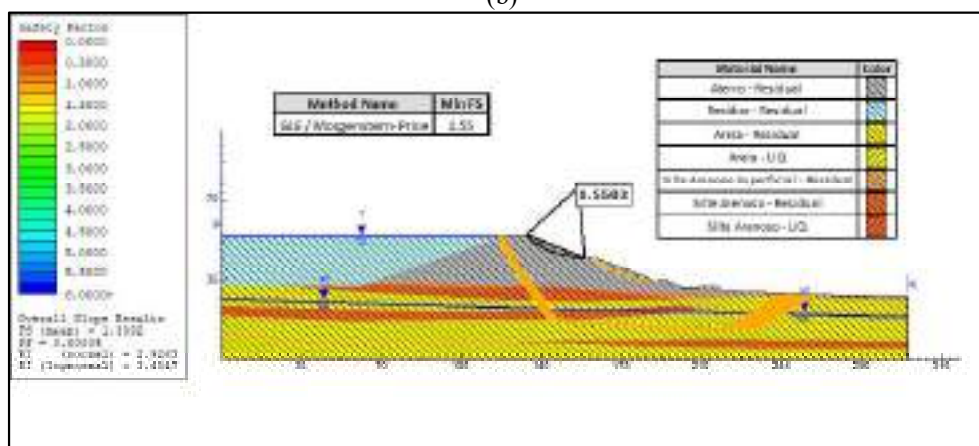
Figura 151 - Resultado da Seção F-F- Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



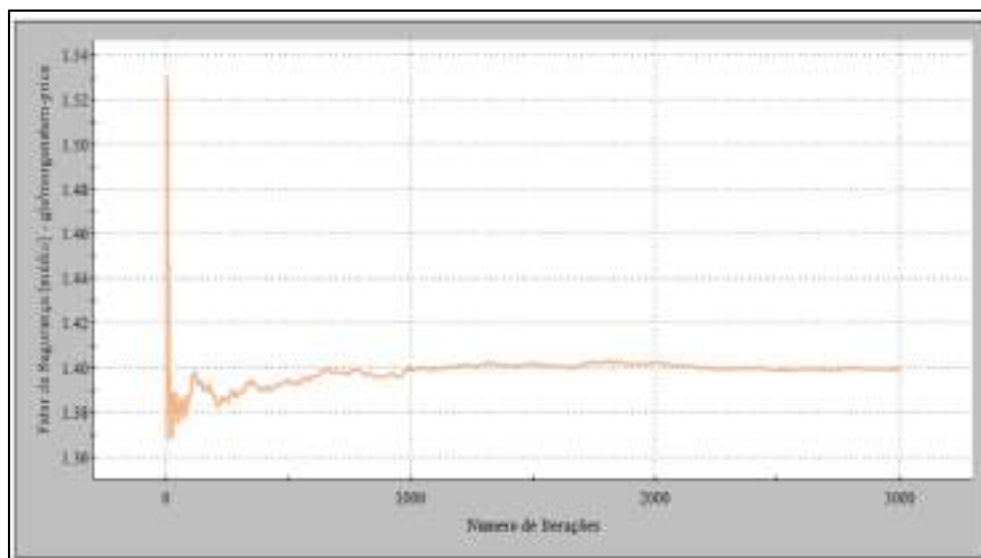
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 25, encontram-se organizado os resultados encontrados a partir da aplicação das análises probabilísticas para a seção F, considerando 1000 e 3000 iterações. Ao examinar os resultados da tabela, e, tomando como referência os valores descritos no item 3.8, é possível inferir que os taludes da seção F demonstraram estabilidade diante dos dez cenários de carregamentos avaliados, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística. No entanto, é importante adotar precauções adicionais em relação ao cenário de solicitação pós-sísmica, uma vez que seus índices de confiabilidade foram significativamente inferiores aos dos demais cenários.

Tabela 25 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção F-F.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				3000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	2,03	1,97	0	7,53	10,35	1,96	0	7,20	9,88
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,76	1,70	0	5,50	7,07	1,71	0	5,32	6,84
Final de construção Sem Ru	J	1,3	1,85	1,94	0	5,49	7,48	1,93	0	5,73	7,80
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,87	1,79	0	5,01	6,58	1,79	0	4,92	6,47
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,24	2,17	0	7,33	10,51	2,16	0	6,88	9,85
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	1,84	1,88	0	6,62	8,9	1,88	0	6,77	9,1
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,43	1,47	0	3,95	4,74	1,48	0	3,93	4,71
			1,42	1,46	0	3,91	4,67	1,47	0	3,83	4,58
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,55	1,40	0	2,96	3,44	1,40	0	2,93	3,40

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

## 5.7 SEÇÃO G

A seguir são expostos os resultados das análises determinísticas, de sensibilidade e probabilísticas realizados na geometria da seção G para 1000 e 5000 iterações. Alguns cenários necessitaram ser analisados com um número maior de iterações, sendo trabalhado para estes casos número de simulações de 10000 e 32000. Os resultados dessas análises são apresentados nas Figuras 152 a 171.

### 5.7.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru.

Os resultados das análises para a fase final construção do talude montante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são exibidas nas Figuras 152 e 153.

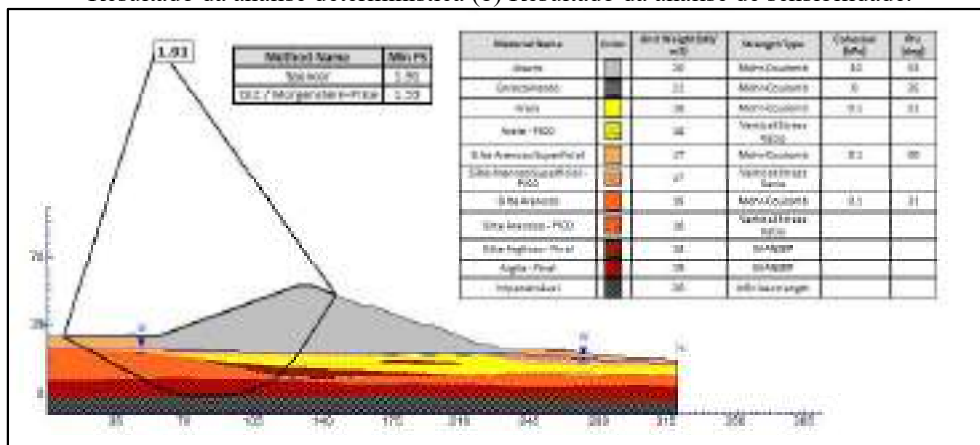
A fundação da seção G, conforme é ilustrado na Figura 152-(a) é composta por sete estratos de materiais distintos denominados de: enrocamento, areia, silte arenoso superficial, silte arenoso, silte-argiloso, argila e uma camada classificada como impenetrável. Ao examinar o perfil dessa seção, constatou-se que o aterro compactado repousa sobre uma fundação caracterizada por ampla variação de materiais e resistências, fatores que contribuem para a

complexidade do cálculo do FS. Além disso, algumas camadas da fundação apresentaram propensão à liquefação, intensificando a sua criticidade.

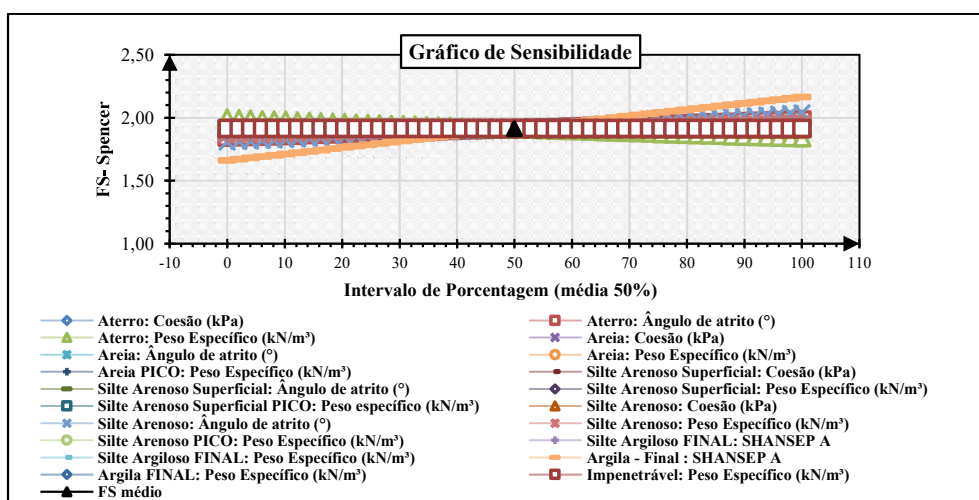
Ao examinar a seção, conforme ilustrado Figura 152-(a), é perceptível que a SPR formada indica um estado de ruptura global que se estende até o talude jusante do aterro. O FS calculado para essa condição, por meio do método de Spencer, atingiu 1,91, superando o mínimo exigido de 1,3 conforme estabelece a NBR 13028/17. Dessa forma, pela abordagem determinística o talude se mantém estável, exibindo um bom FS.

Com relação a análise de sensibilidade, apresentada na Figura 152-(b), os resultados mostram que o FS é variável a mudanças no ângulo de atrito das camadas de aterro e silte arenoso, da resistência não-drenada da argila e, em menor grau, ao peso específico do silte arenoso. Assim, qualquer variação nesses parâmetros influenciará no seu nível de desempenho.

Figura 152 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

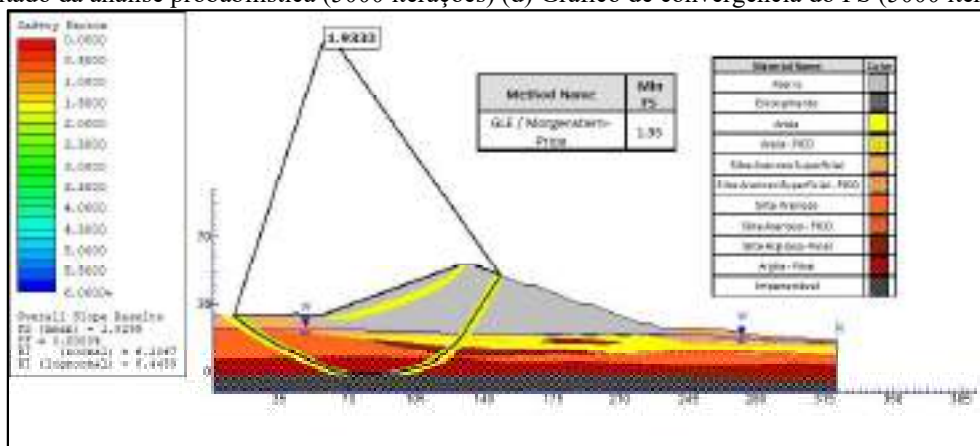
Fonte: Autora (2023)



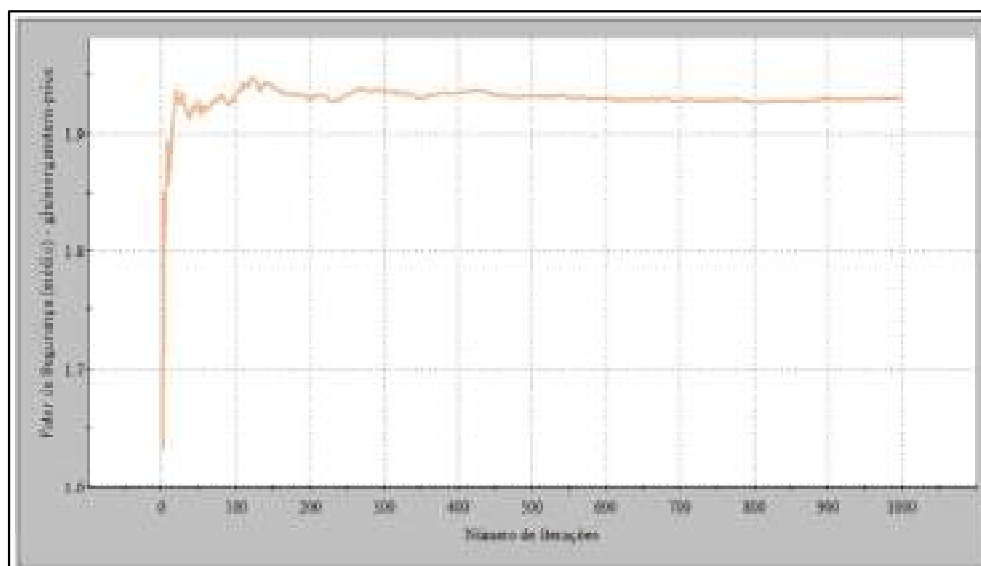
No que se refere aos resultados das abordagens probabilísticas, observa-se pelas Figuras 153-(a) e 153-(c), que o FS médio probabilístico apresentou variação mínima em relação aos números de iterações empregados. Além disso, as Pr encontradas foram nulas, com índices de confiabilidade variando entre 6,21 (valor normal) a 8,44 (valor log-normal). Quanto às curvas de convergências apresentadas nas Figuras 153-(b) e 153-(d), nota-se que os resultados tendem a convergir a partir de 2000 iterações.

Com base nesses resultados e utilizando como referências os limites recomendados pela USACE (1997), é possível afirmar que, nas condições em que a seção foi analisada, não há evidências probabilísticas de instabilidade do talude para este cenário.

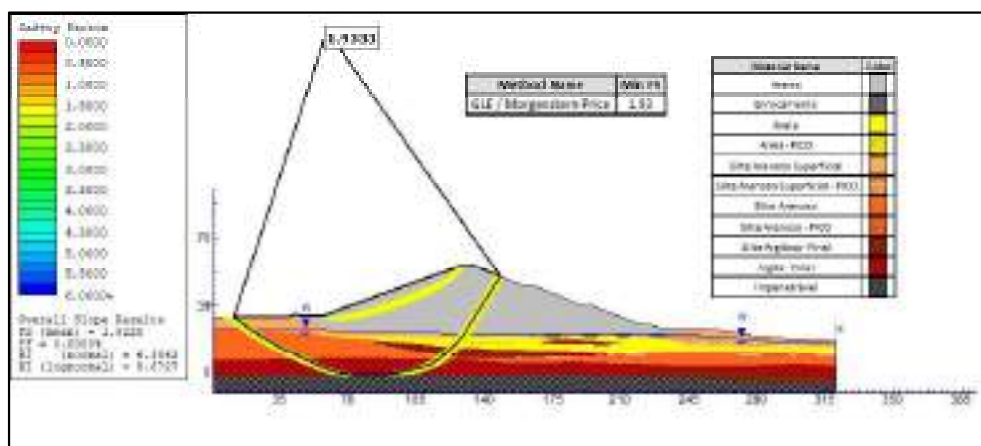
Figura 153 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



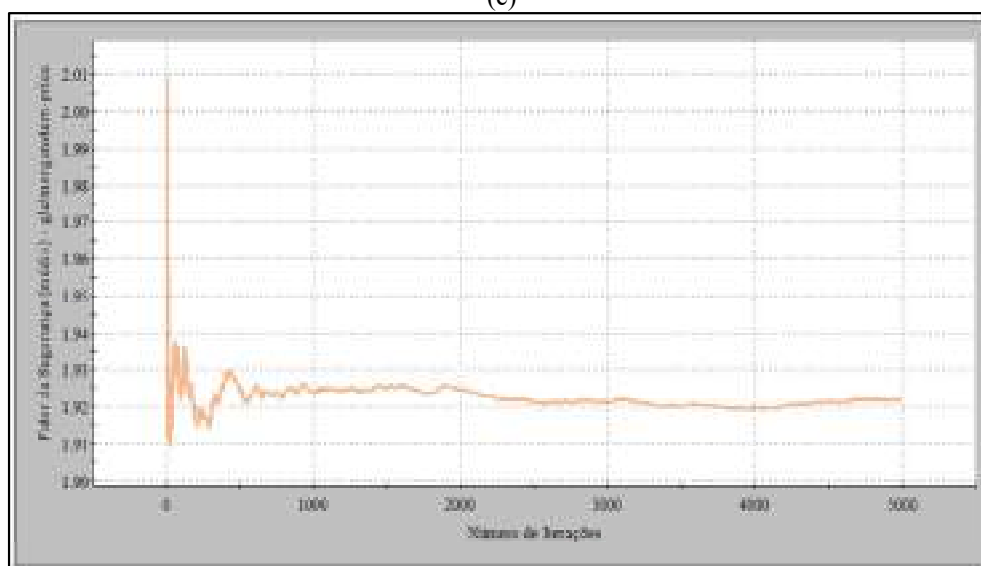
(a)



(b)



(c)



(d)

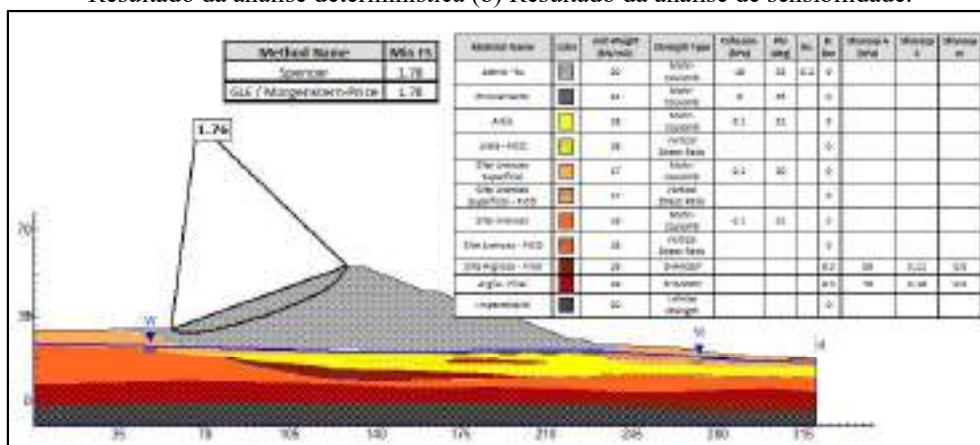
Fonte: Autora (2023)

### 5.7.2 Final de construção – Talude montante considerando $R_u$

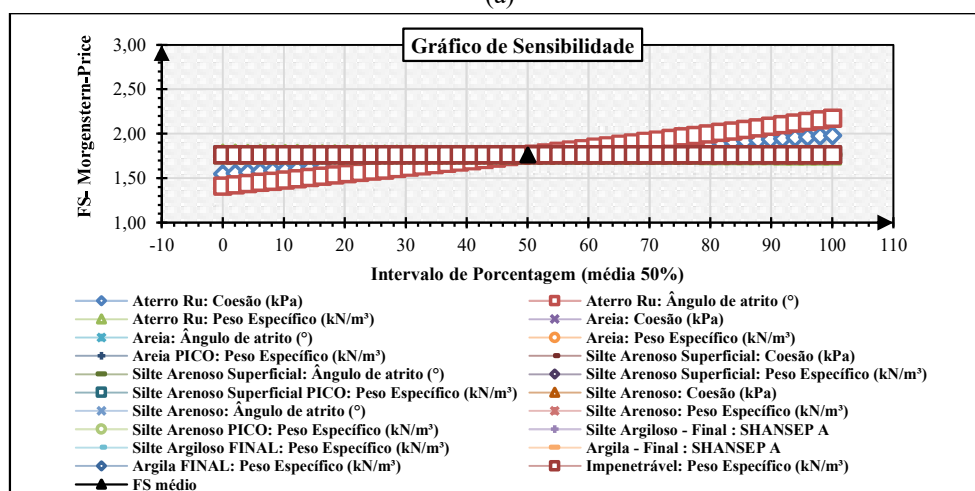
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude montante, considerando o parâmetro de propressão ( $R_u$ ) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 154 e 155.

Conforme a Figura 154-(a) revela, a SPR está localizada na camada de aterro compactado, apresentando um FS determinístico equivalente a 1,76, superior ao mínimo exigido pela NBR 13028/17. Esse valor é inferior a condição anterior, devido à perda de resistência causada pela presença de propressão nessa camada. Quanto a análise de sensibilidade, conforme visualizado na Figura 154-(b), destaca-se que o FS é variável às alterações no ângulo de atrito e coesão da camada de aterro.

Figura 154 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

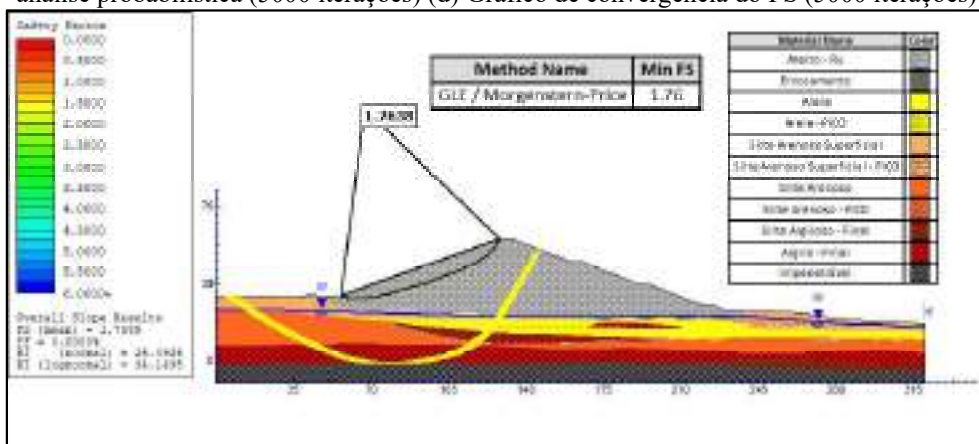


(b)

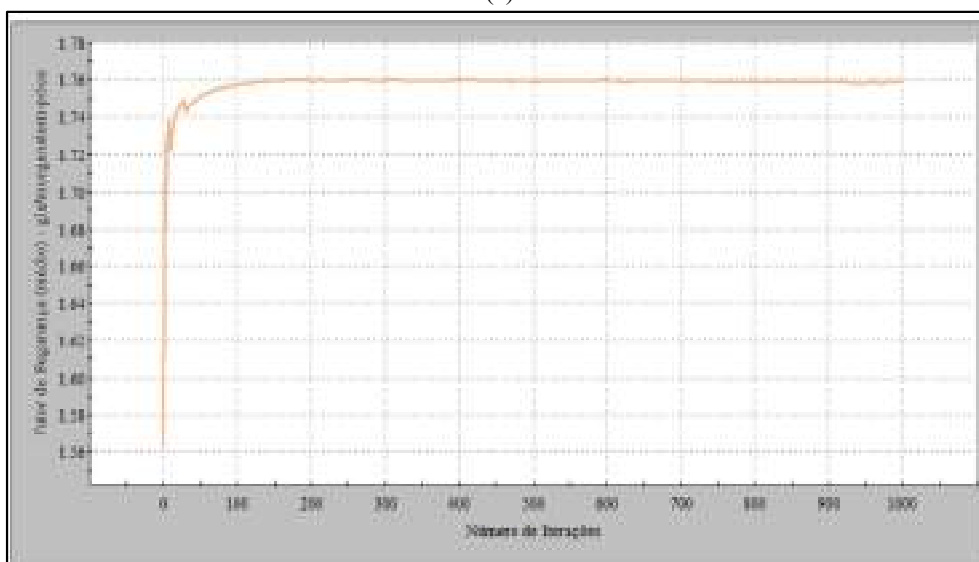
Fonte: Autora (2023)

Em relação à aplicação de uma abordagem probabilística, os resultados apresentados nas Figuras 155-(a) e 155-(c), revelam um FS probabilístico de 1,76, e uma Pr nula para ambos os números de iterações testadas. Em relação aos índices de confiabilidade, os resultados demonstraram valores consideravelmente elevados, variando entre 24,84 (valor normal) a 34,14 (valor log-normal), com nível de desempenho satisfatório conforme a USACE (1997). Quanto a estabilização dos resultados, as Figuras 155-(b) e 155-(d), mostram uma tendência à estabilização dos dados a partir de 1000 iterações. Sob uma perspectiva probabilística, os resultados sugerem a estabilidade do talude para este cenário. No entanto, devido à elevada magnitude dos índices de confiabilidade, seria interessante reanalisar a seção com um número maior de iterações para compreender melhor o comportamento desses resultados. Devido às limitações do tempo de pesquisa, não foi possível trabalhar com números maiores de iterações.

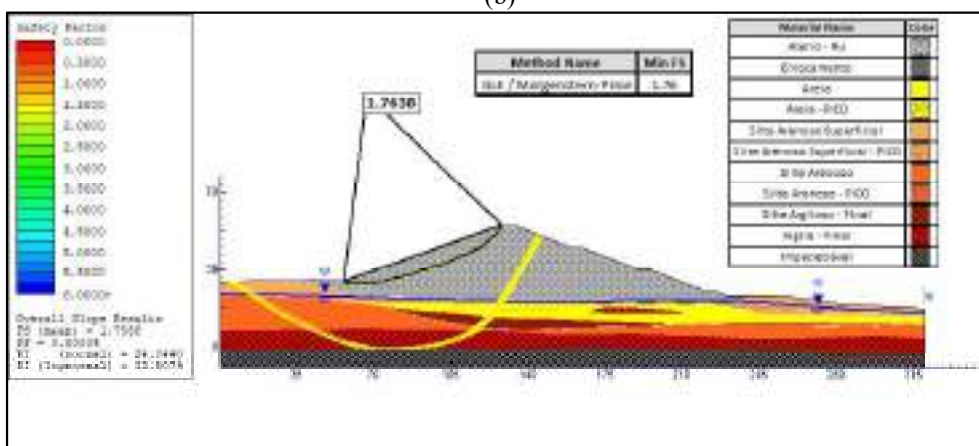
Figura 155 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



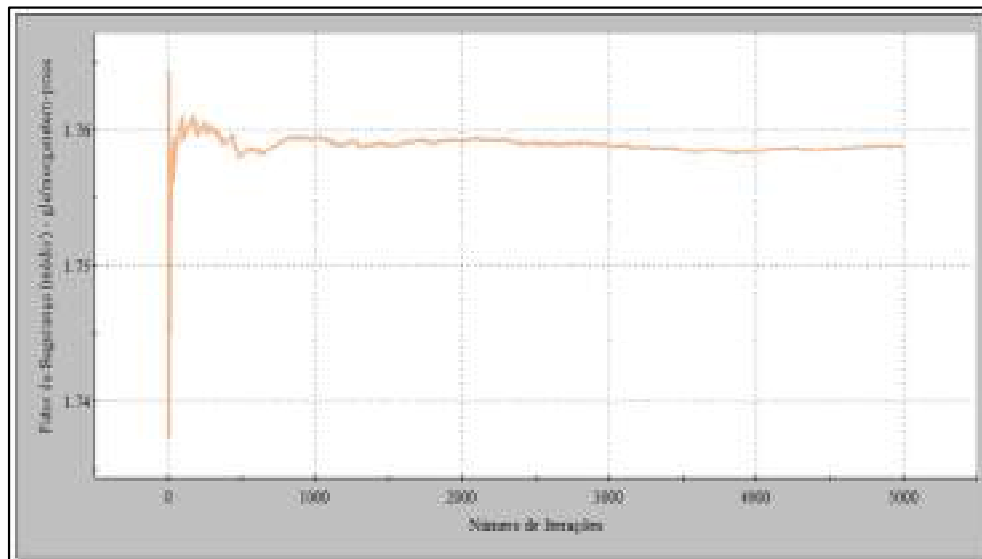
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

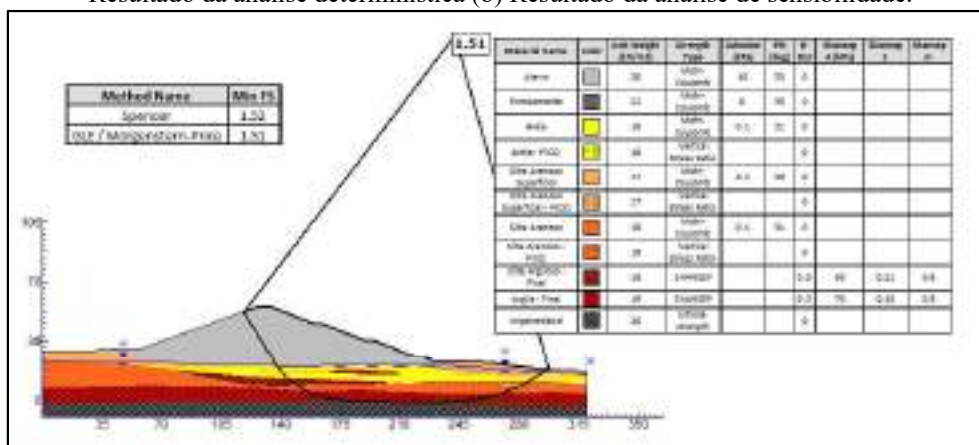
### 5.7.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

Os resultados das análises para o talude jusante em final de construção sem a presença do parâmetro de poropressão Ru na camada de aterro compactado são apresentados nas Figuras 156 e 157.

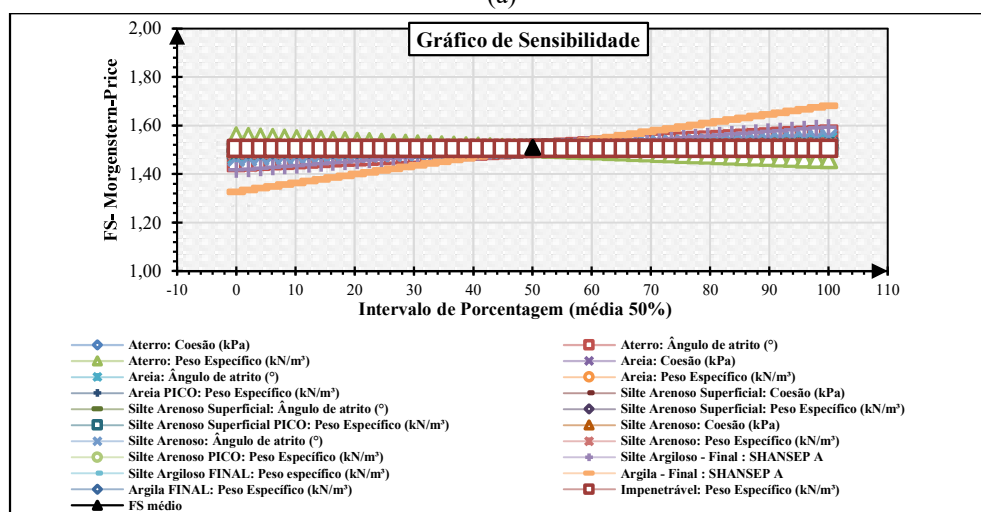
Pela Figura 156-(a), observa-se que o menor FS, obtido por meio da abordagem determinística, atinge o valor de 1,51, superando as recomendações da NBR 13028/17 para essa condição. Já os resultados da análise de sensibilidade, representada na Figura 156-(b), revelam que o FS é variável as mudanças da resistência não-drenada da argila e silte argiloso, do ângulo de atrito da camada de aterro e do silte arenoso, e em menor escala, do peso específico da camada de aterro.

A heterogeneidade significativa dos materiais na fundação evidencia a dependência do FS em relação as diversas variáveis, conforme destacado na análise de sensibilidade. Isso significa que situações que envolvem fundações semelhante requerem um nível maior de compreensão. A fim de complementar os resultados da análise determinística, análises probabilísticas foram executadas com 1000 e 5000 iterações.

Figura 156 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



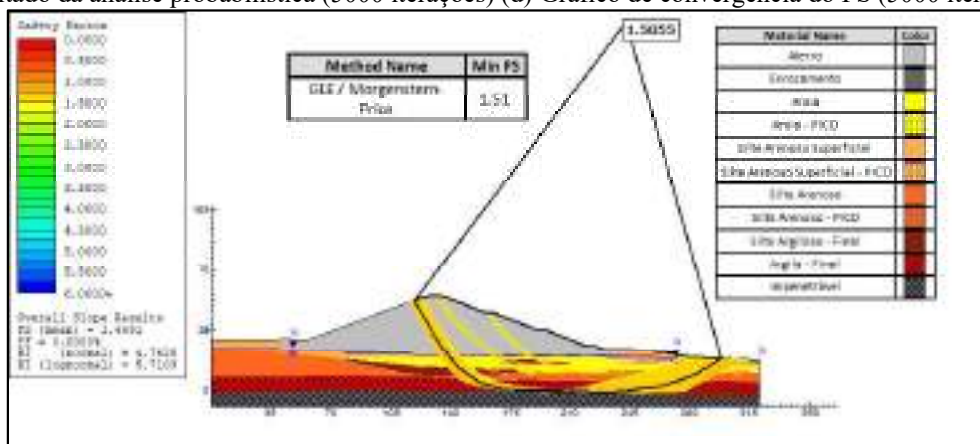
(b)

Fonte: Autora (2023)

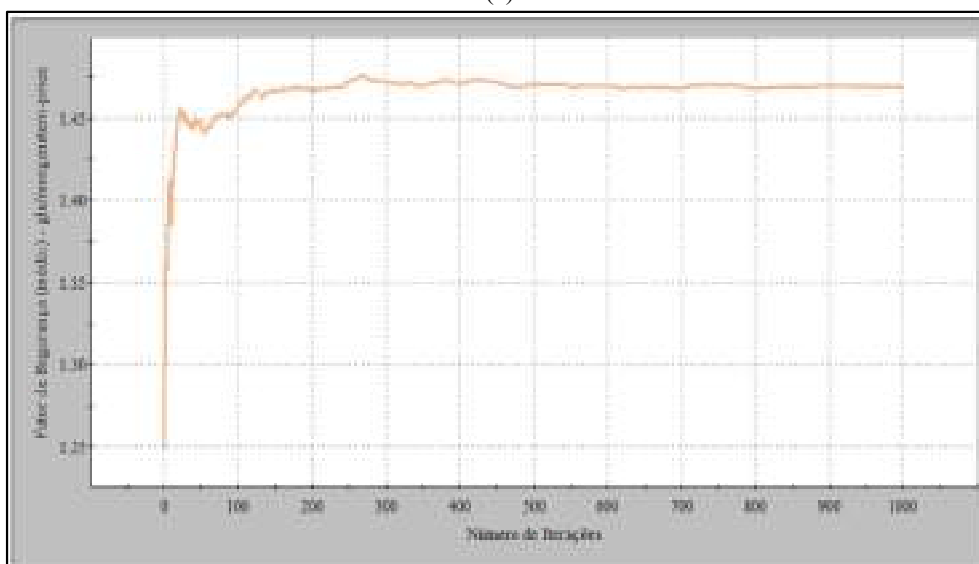
Com base nas Figuras 157-(a) e 157-(c), o FS probabilístico encontrado foi de 1,47, aproximando-se do valor obtido pela abordagem determinística. Quanto às Pr, estas permaneceram nulas para ambos os números de iterações, enquanto os índices de confiabilidade mínimos variaram entre 4,76 (valor normal) a 5,71 (valor log-normal). Além disso, as curvas de convergências, ilustradas nas Figuras 157-(b) e 157-(d), revelam que os resultados encontrados apresentam um comportamento estável a partir de 2000 iterações.

Do ponto de vista probabilístico, seguindo os critérios estabelecidos pela USACE (1997), não há indícios de instabilidade para este cenário, considerando as condições em que o talude foi analisado.

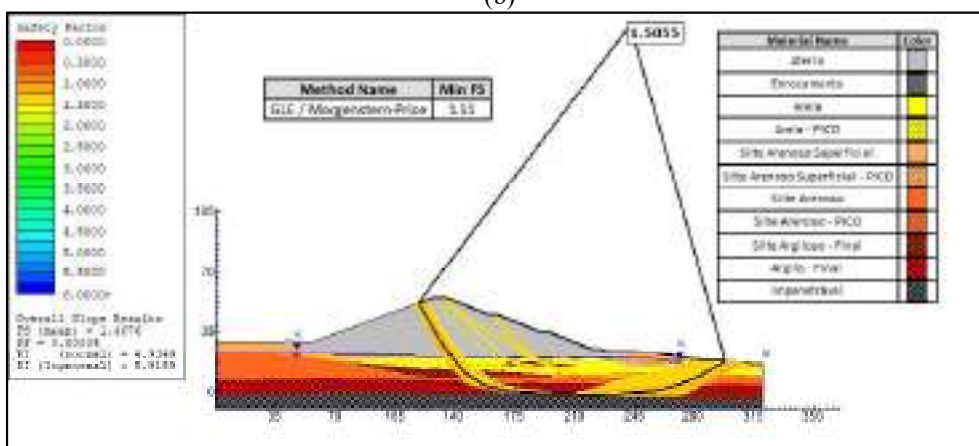
Figura 157 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude Jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



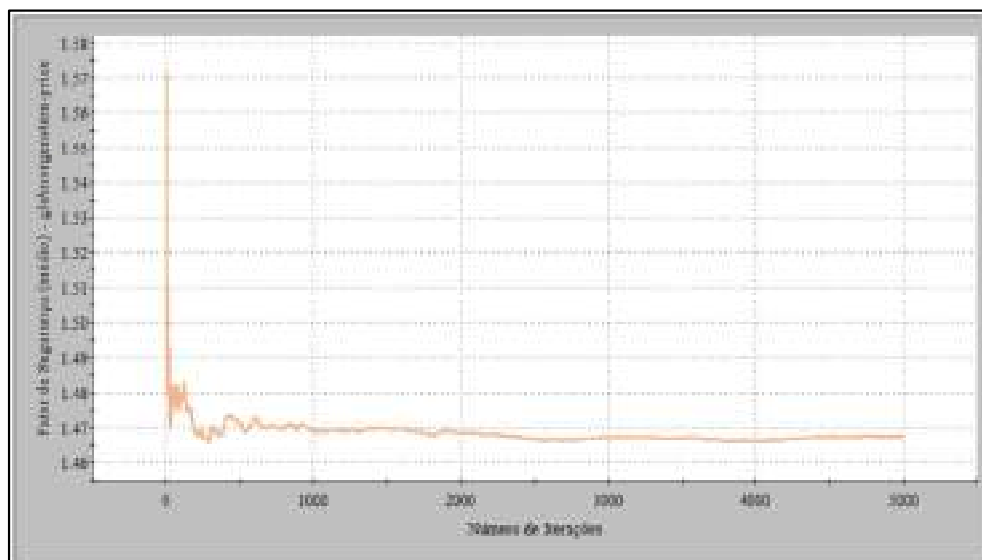
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

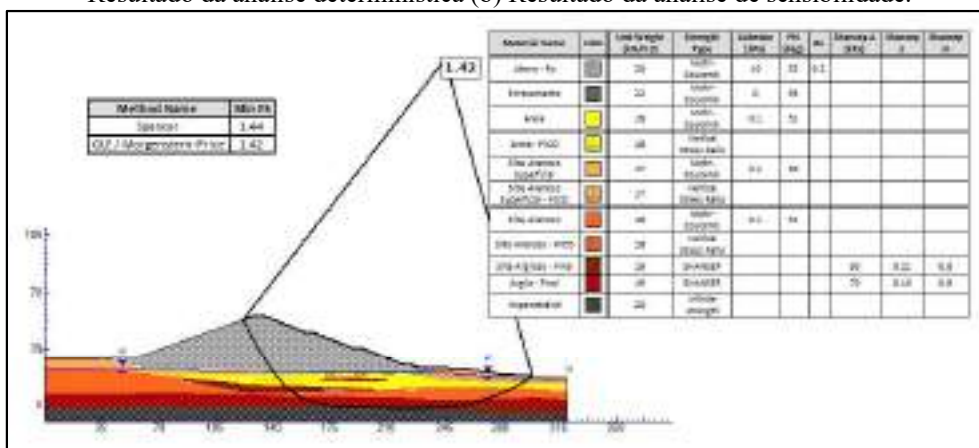
#### 5.7.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

Os resultados das análises para o talude jusante em final de construção com a presença do parâmetro de poropressão Ru na camada de aterro são apresentados nas Figuras 158 e 159.

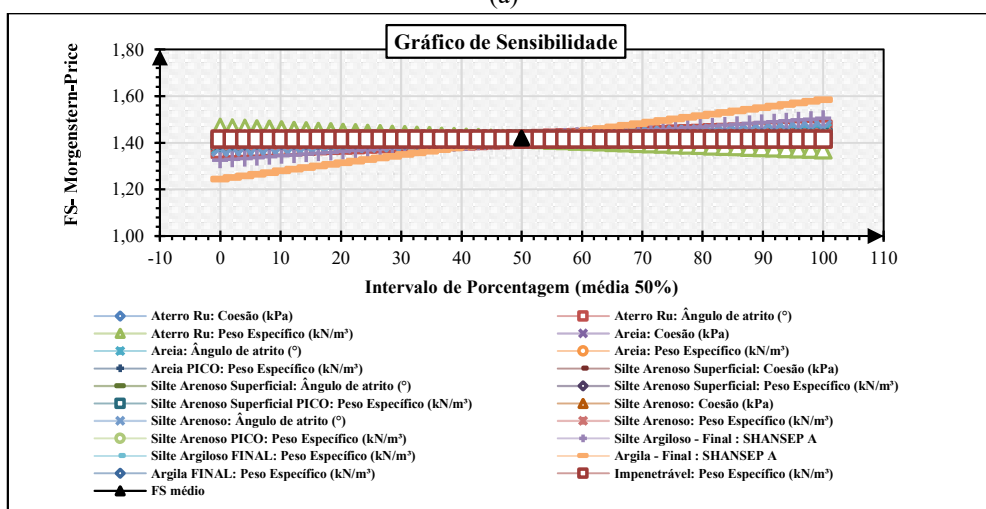
Os resultados destacados na Figura 158-(a) revelam que, na análise determinística, o menor FS calculado foi igual a 1,42, superando o mínimo recomendado de 1,3 pela NBR 13028/17. É importante observar que esta condição não segue o mesmo padrão das demais seções quanto a presença do Ru. Nota-se que a SPR intercepta a maioria dos materiais, em vez de permanecer completamente contida na camada de aterro. Essa particularidade pode estar associada à presença de materiais sensíveis na fundação, como materiais argilosos e aqueles sujeitos à liquefação, podendo estes contribuir para possíveis problemas de instabilidade. As análises de sensibilidade, ilustradas na Figura 158-(b), evidenciam que, de fato, o comportamento do FS fica dependente das variações dos parâmetros das camadas de argila, silte argiloso, aterro e silte arenoso.



Figura 158 - Resultado da Seção G-G - Final de construção – Talude Jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



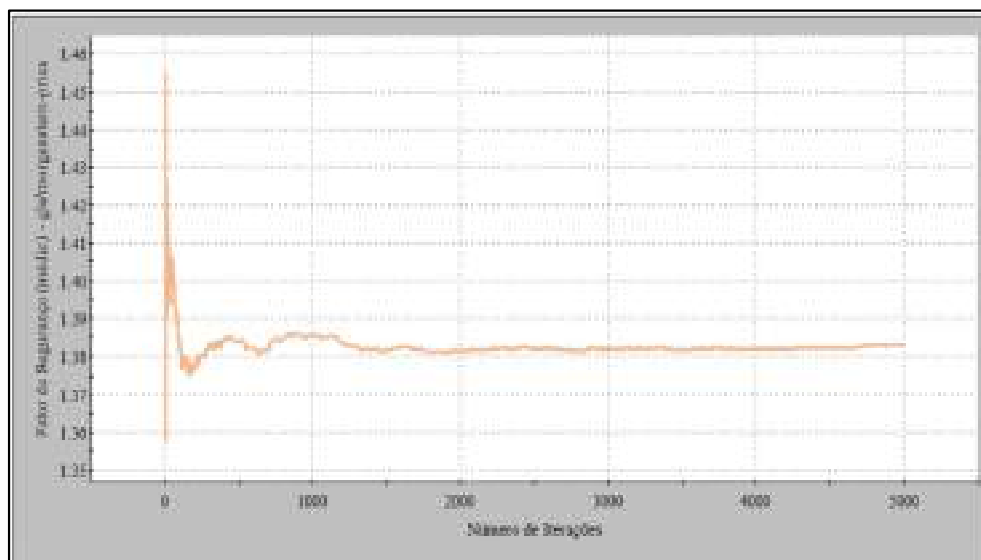
(b)

Fonte: Autora (2023)

Em relação aos resultados das análises probabilísticas, as Figuras 159-(a) e 159-(c), revelam que o menor FS probabilístico encontrado foi de 1,38, situando-se abaixo do obtido pela abordagem determinística. As Pr permaneceram nulas, e os índices de confiabilidade mínimos variaram entre 4,16 (valor normal) a 4,84 (valor log-normal). No que concerne as curvas de convergências, apresentadas nas Figuras 159-(b) e 159-(d), a estabilidade dos resultados torna-se mais evidente a partir de 2000 iterações.

Conforme os critérios estabelecidos pela USACE (1997), os valores encontrados atendem aos requisitos mínimos estabelecidos para uma abordagem probabilística, afirmando, assim, a estabilidade do talude.





(d)

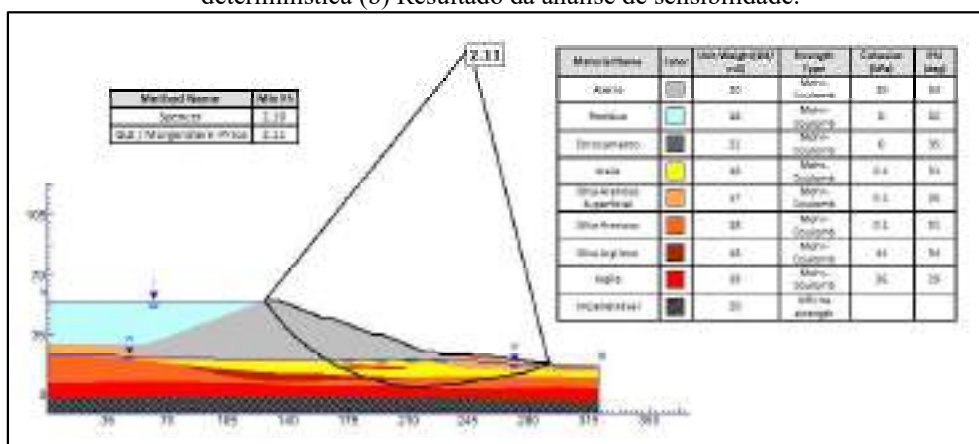
Fonte: Autora (2023)

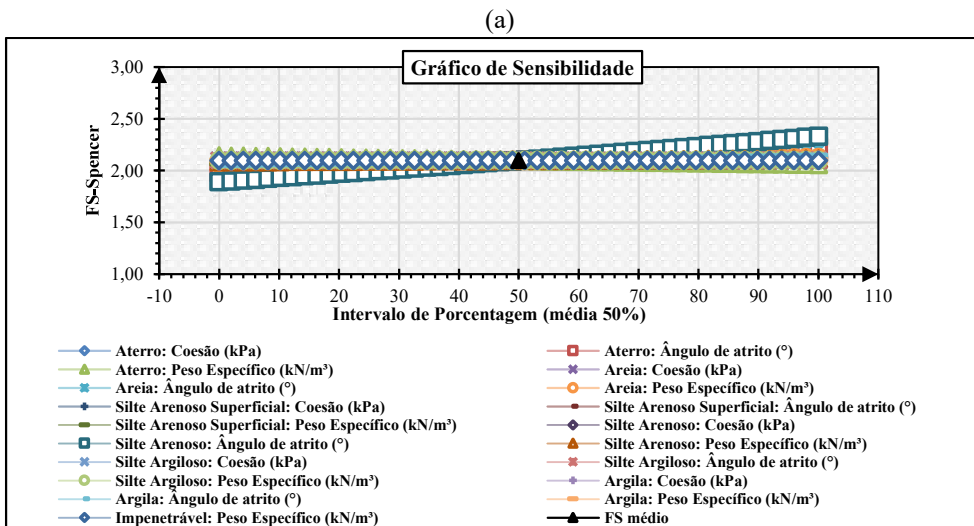
### 5.7.5 Operação Normal – Drenado

Os resultados das análises para a fase de operação, considerando a condição drenada dos materiais são apresentados nas Figuras 160 e 161.

A partir da Figura 160-(a), destaca-se que valor encontrado pela abordagem determinística de 2,11, ultrapassa o valor estabelecido pela NBR 13028/17 para esta condição. Esse aumento no FS, em comparação com as condições anteriores, pode ser atribuído à intensificação da interação entre as partículas sólidas dos materiais, decorrente da drenagem da água nos vazios do solo. No que se refere ao resultado da análise de sensibilidade, a Figura 160-(b) revela que os parâmetros que mais influenciam na variação no FS são o ângulo de atrito da camada de aterro, areia e silte arenoso, com o peso específico da camada de aterro sendo um contribuinte em menor grau. Dessa forma, os resultados encontrados pela abordagem determinística, apontam para a estabilidade do talude.

Figura 160 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.

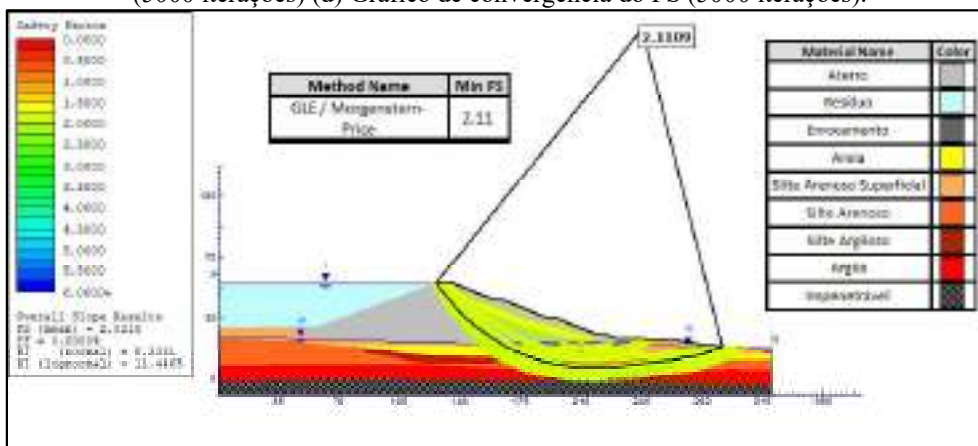


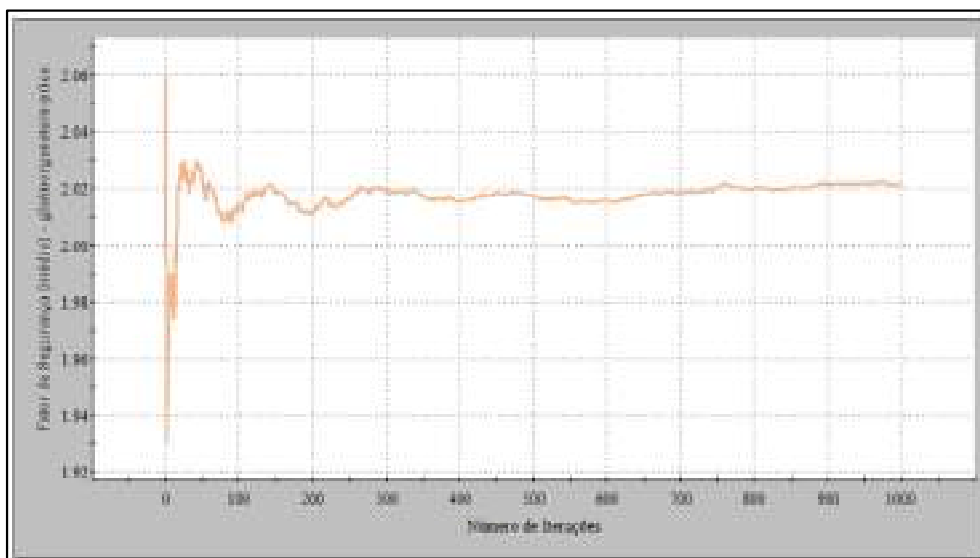


(b)  
Fonte: Autora (2023)

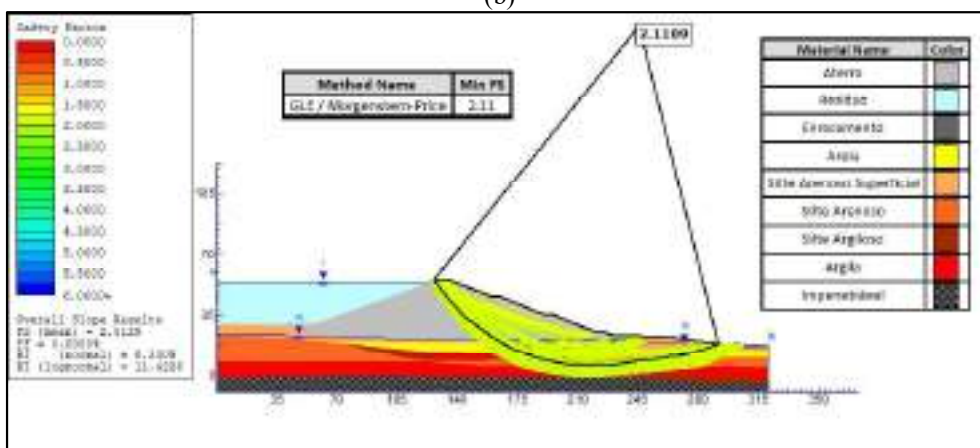
Em relação aos resultados da análise probabilística, ilustrados nas Figuras 161-(a) e 161-(c), estes relevam que o FS probabilístico, é ligeiramente inferior ao encontrado na análise determinística. Quanto aos resultados adicionais, foram obtidas Pr nulas e índices de confiabilidade elevados, variando entre 8,23 (valor normal) a 11,42 (valor log-normal), estando de acordo com a USACE (1997). Quanto aos gráficos de convergência, observa-se pelas Figuras 161-(b) e 161-(d), que a estabilidade dos resultados é mais efetivamente alcançada a partir de 2000 iterações. Sob a perspectiva probabilística, não foram identificados sinais de instabilidade do talude, dadas as condições nas quais a análise foi conduzida.

Figura 161 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).

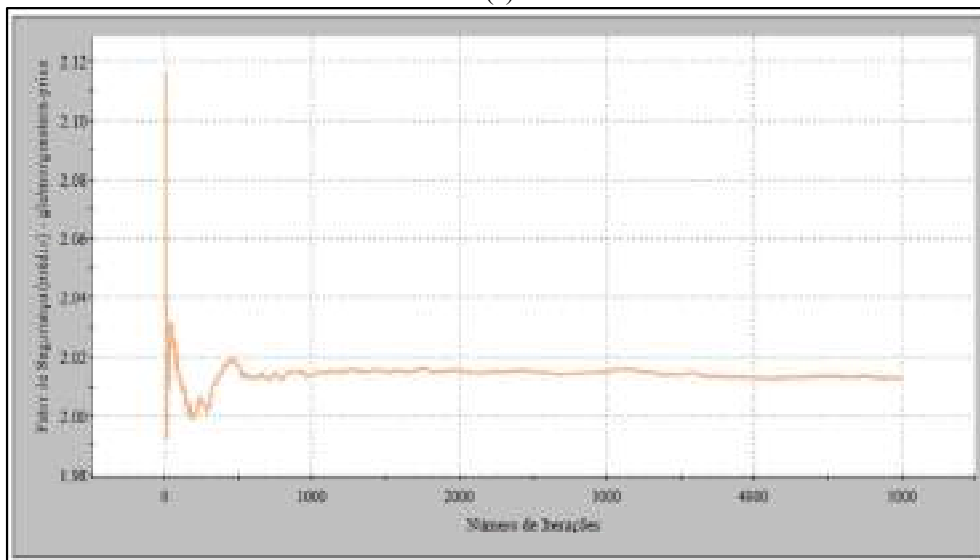




(b)



(c)



(d)

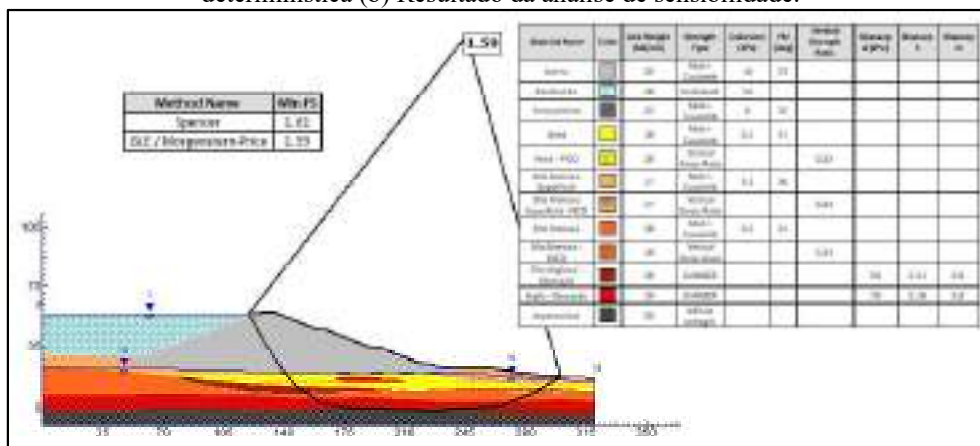
Fonte: Autora (2023)

5.7.6 Operação Normal – Não drenado

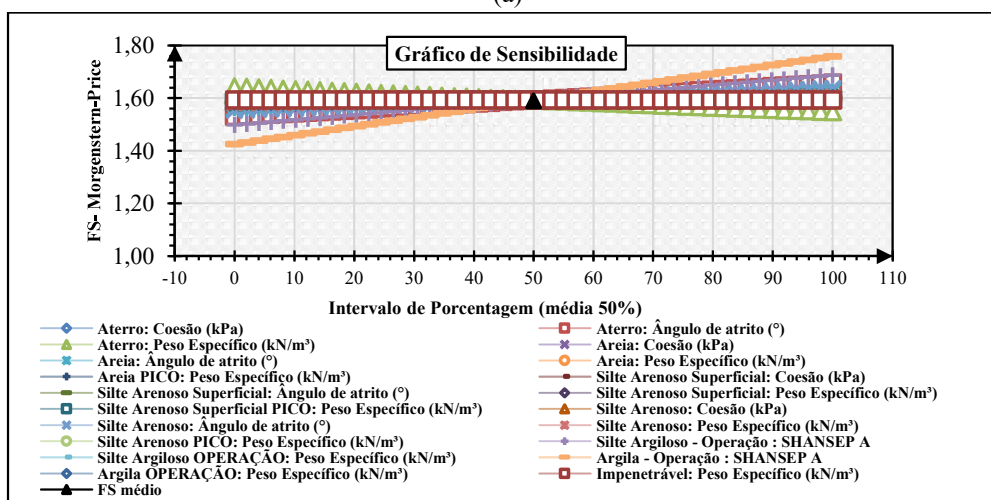
Os resultados das análises para a fase de operação, considerando a condição drenada dos materiais são apresentados nas Figuras 162 e 163.

Considerando a operação em condição não-drenada, observa-se, a partir da Figura 162-(a), uma redução significativa no FS devido à diminuição da resistência associada a presença de água nos vazios do solo. Contudo, mesmo com essa redução, o valor obtido para o FS, permanece dentro dos limites aceitáveis pela NBR 13028/17. Em relação à análise de sensibilidade, apresentada na Figura 162-(b), percebe-se um comportamento bastante semelhante ao observado nos cenários anteriores, onde o FS torna-se mais variável a mudanças na resistência não-drenada da camada de argila e silte argiloso, bem como do ângulo de atrito da camada de aterro.

Figura 162 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



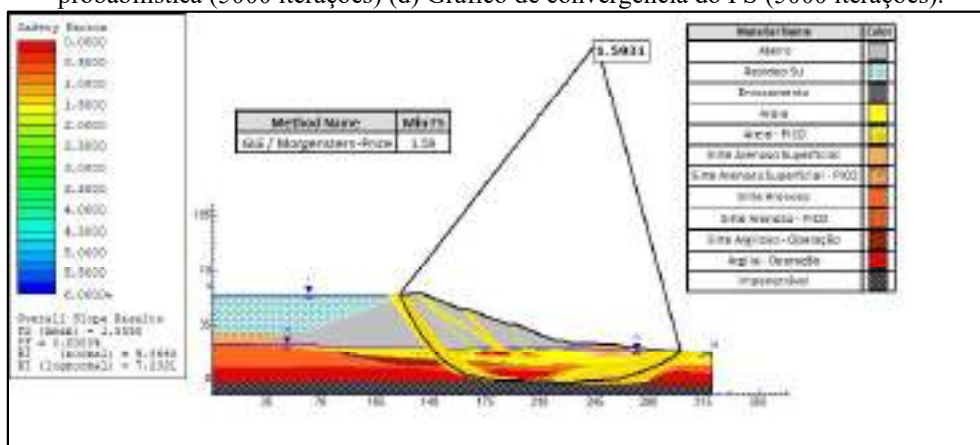
(b)

Fonte: Autora (2023)

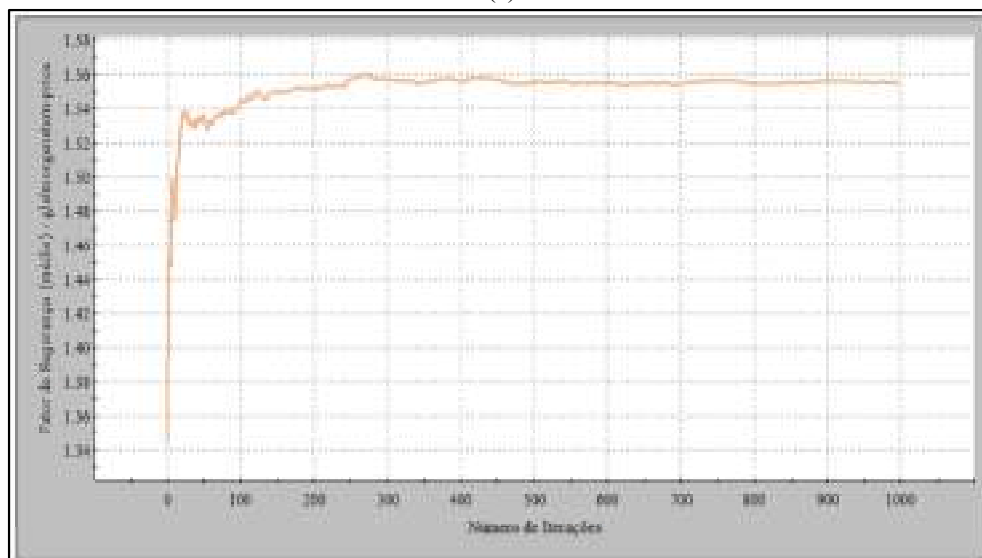
Em relação aos resultados das análises probabilísticas, destacados nas Figuras 163-(a) e 163-(c), estes revelam que os FS e as probabilidades de rupturas encontradas para ambos os números de iterações foram semelhantes, atingindo respectivamente 1,55 e 0% respectivamente. Os índices de confiabilidade mínimos variaram entre 5,87 (valor normal) a 7,23 (valor log-normal), sendo inferiores aos obtidos para a condição drenada. Quanto a convergência dos resultados, as Figuras 163-(b) e 163-(d) apontam que a estabilização se inicia a partir de 2000 iterações.

Sob uma perspectiva probabilística, os resultados encontrados sugerem que o talude apresenta comportamento estável. Adicionalmente os índices de confiabilidade indicam um nível de desempenho considerado elevado conforme estabelece a USACE (1997).

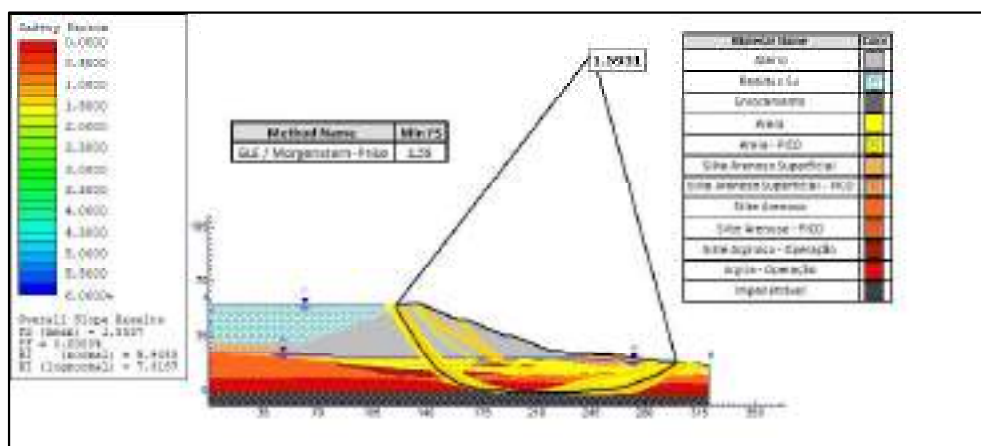
Figura 163 - Resultado da Seção G-G - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (5000 iterações).



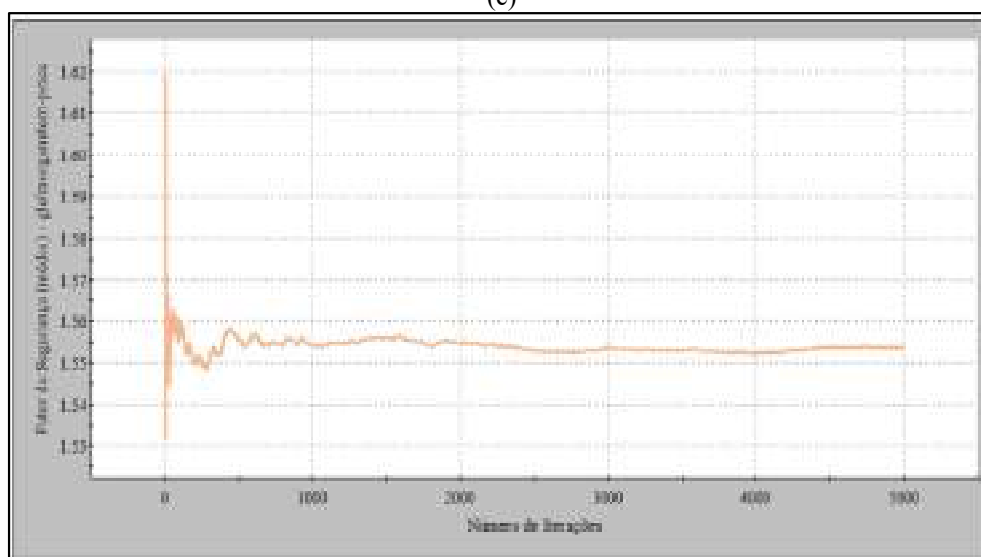
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

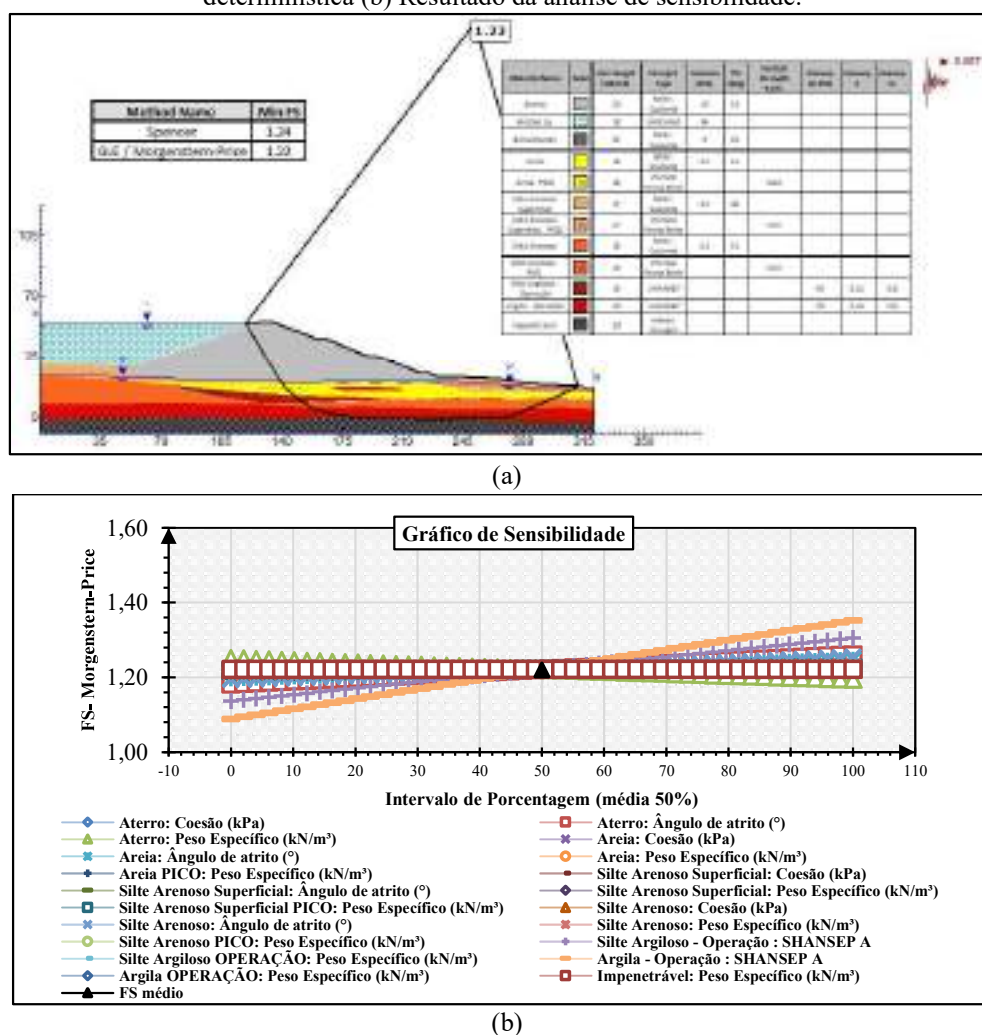
### 5.7.7 Solicitação Pseudoestática

Os resultados encontrados para as três condições de solicitação pseudoestática são apresentados nas Figuras 164 a 169.

Com base na Figura 164-(a), é possível observar que o menor FS determinístico encontrado considerando apenas o carregamento horizontal foi de 1,22, sendo este resultado superior ao mínimo admissível de 1,10 conforme estabelece a NBR 13028/17. Em relação ao resultado da análise de sensibilidade, nota-se pela Figura 164-(b), que o FS é variável quanto as mudanças nas resistências não-drenadas das camadas de argila e silte argiloso, bem como do ângulo de atrito das camadas de areia e aterro compactado.



Figura 164 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



Fonte: Autora (2023)

No que se refere aos resultados das análises probabilísticas, observa-se pelas Figuras 165-(a) e 165-(c), um FS igual a 1,17 para todos os números de iterações avaliadas. Com relação as Pr os resultados encontrados para este cenário apresentaram probabilidade de 0,10% para 1000 iterações, 0,18% para 5000 iterações e 0,17% para 10000 iterações.

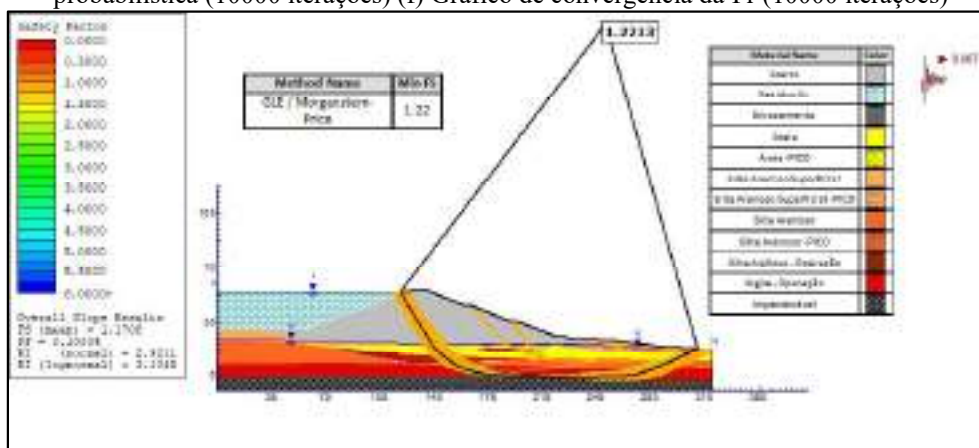
Os índices de confiança também sofreram variações em função do número de iterações variando 2,85 (valor normal) a 3,13 (valor log-normal). De acordo com os limites definidos pela USACE (1997), a valor mínimo para que uma barragem possua um desempenho considerado adequado é quando esse índice atinge valor superior a 3. Neste sentido, considerando os valores encontrados, tem-se que pela USACE (1997) o nível de desempenho do talude é considerado abaixo da média para um número de iterações inferiores a 1000.

Em relação às curvas de convergências, observa-se pelas Figuras 165-(b), 165-(d), 165-(f) e 165-(h), que a estabilização dos resultados não foi alcançada, mesmo dobrando o número

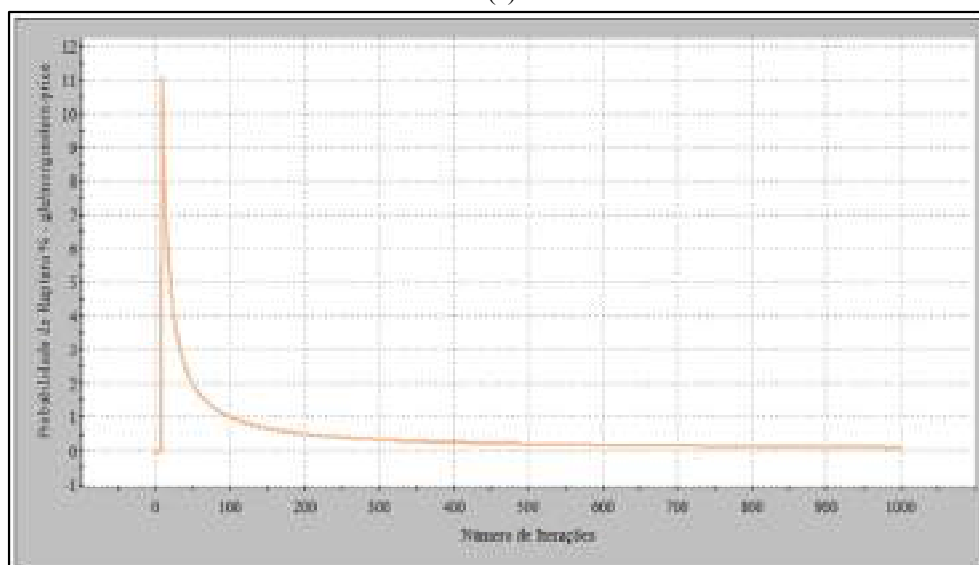
de análises para 10.000 iterações. O ideal para este cenário seria elevar o número de iterações para 32.000, a fim de verificar o real comportamento destes resultados. Devido à extensão do tempo necessário de processamento desse número (duração de 4 dias e meio de processamento), não foi viável apresentar os resultados referentes a este valor.

Contudo, ao observar as Figuras 165-(a), 165-(c), e 165-(e), tanto o FS quanto a Pr não apresentaram alterações significativas à medida em que foi elevado o número de simulações (geralmente as mudanças acontecem a partir da segunda casa decimal).

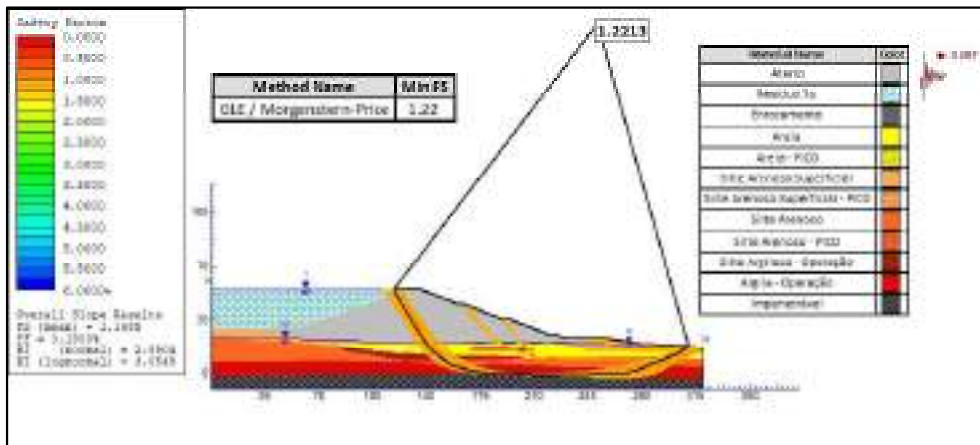
Figura 165 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (10000 iterações) (f) Gráfico de convergência da Pr (10000 iterações)



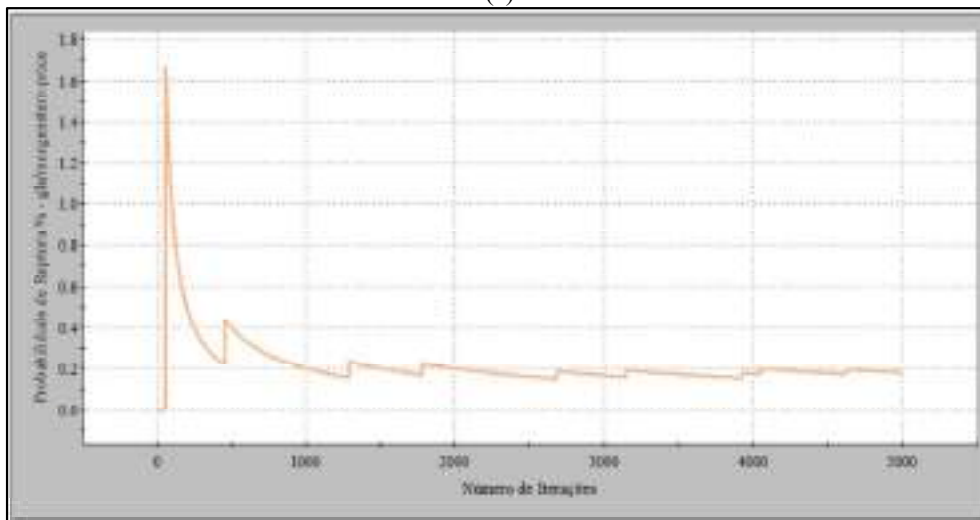
(a)



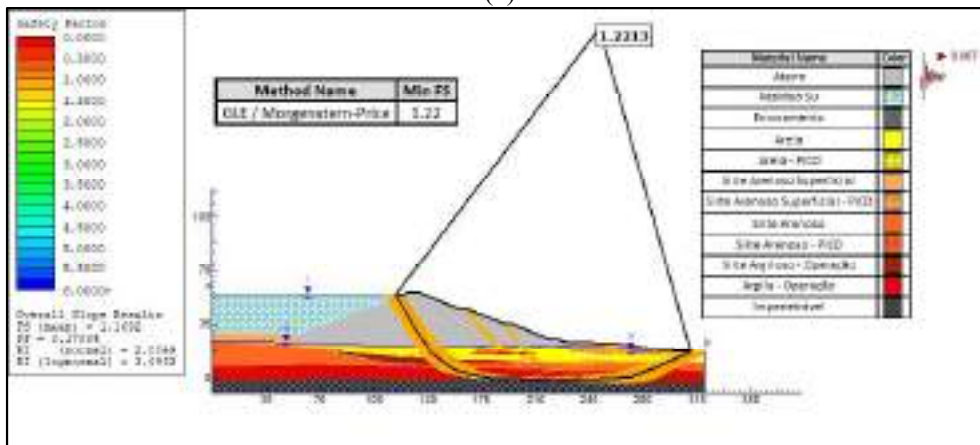
(b)



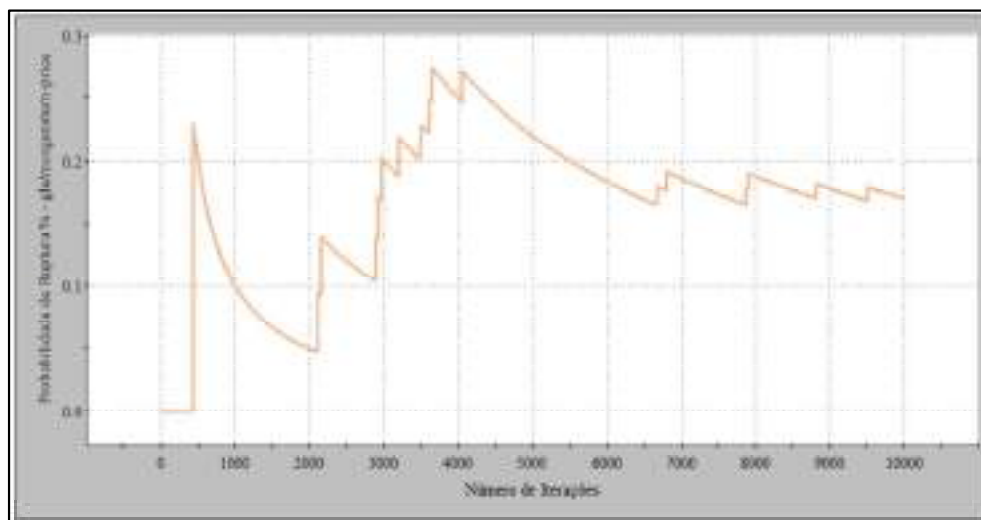
(c)



(d)



(e)

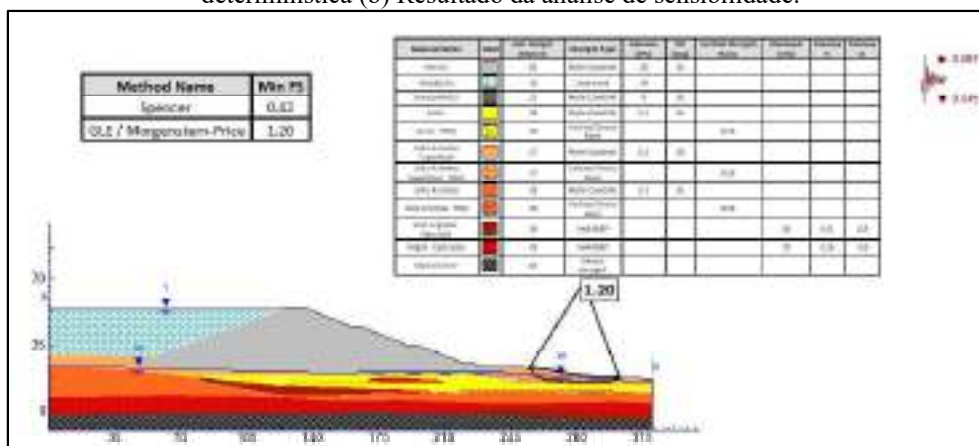


(f)

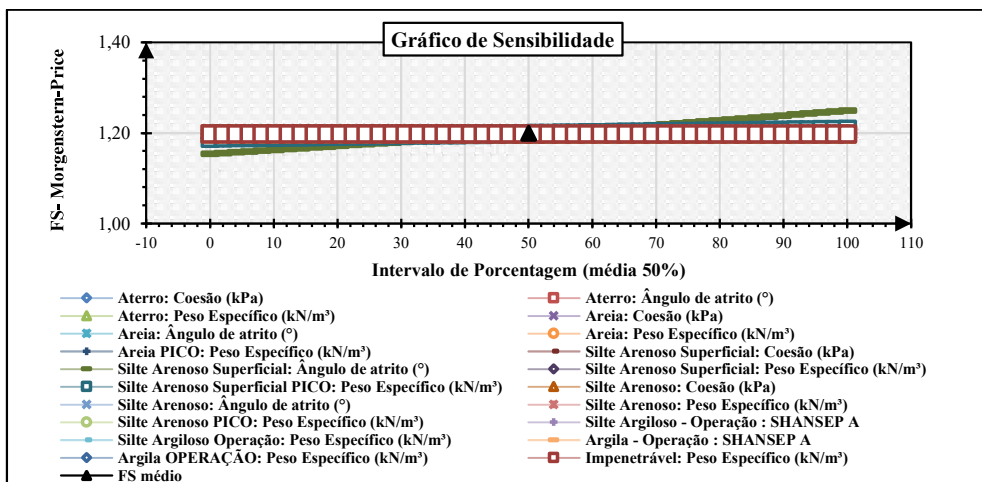
Fonte: Autora (2023)

Ao incorporar carregamentos verticais ao sistema, observa-se que o FS variou entre 1,20 a 1,25, conforme mostra as Figuras 166-(a) e 167-(a). Além disso, tanto para o cenário da Figura 166-(b) quanto da Figura 167-(b), os resultados das análises de sensibilidade também são bastante semelhantes. No que se refere a estabilidade, para ambos os cenários os taludes se mantêm estáveis a ocorrência de uma solicitação pseudoestática pela abordagem determinística.

Figura 166 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



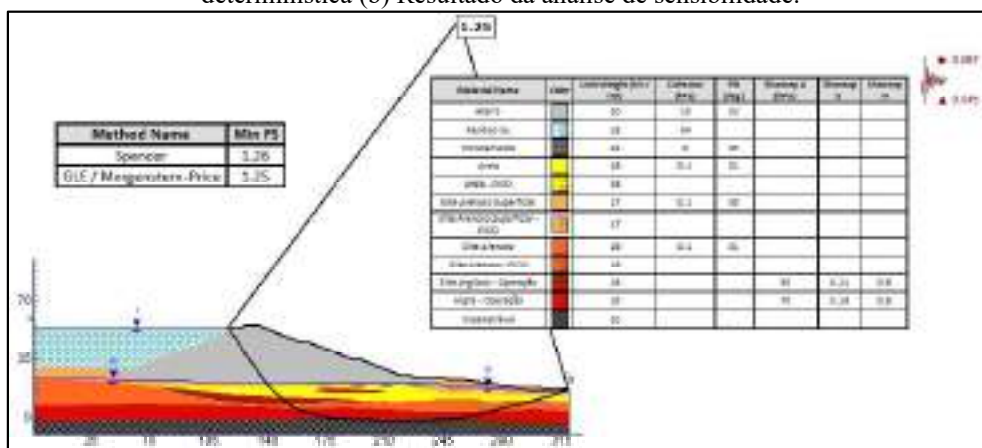
(a)



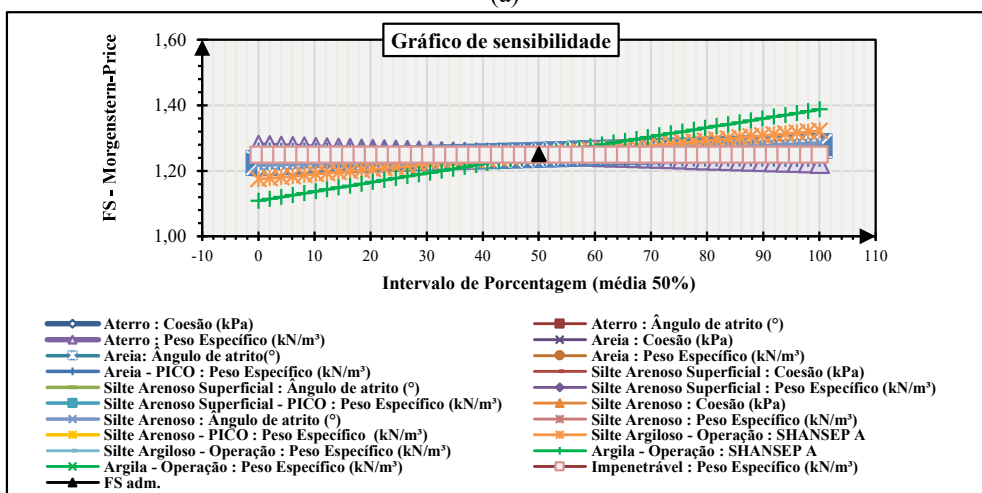
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 167 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



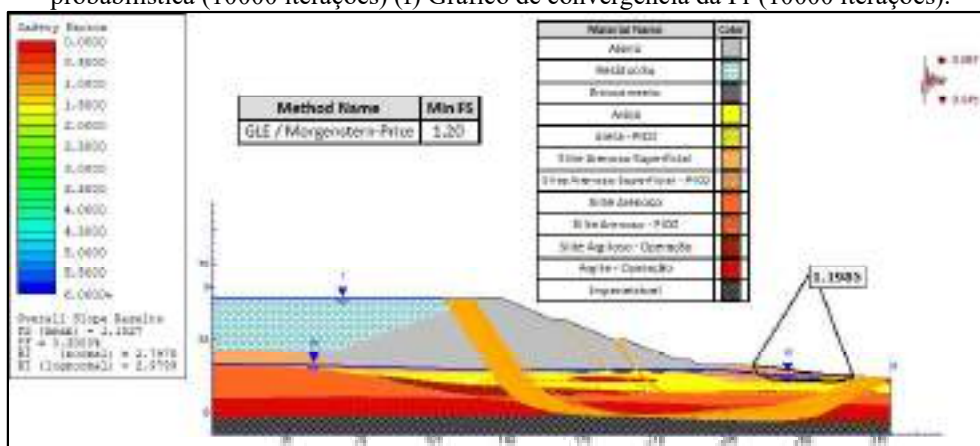
(b)

Fonte: Autora (2023)

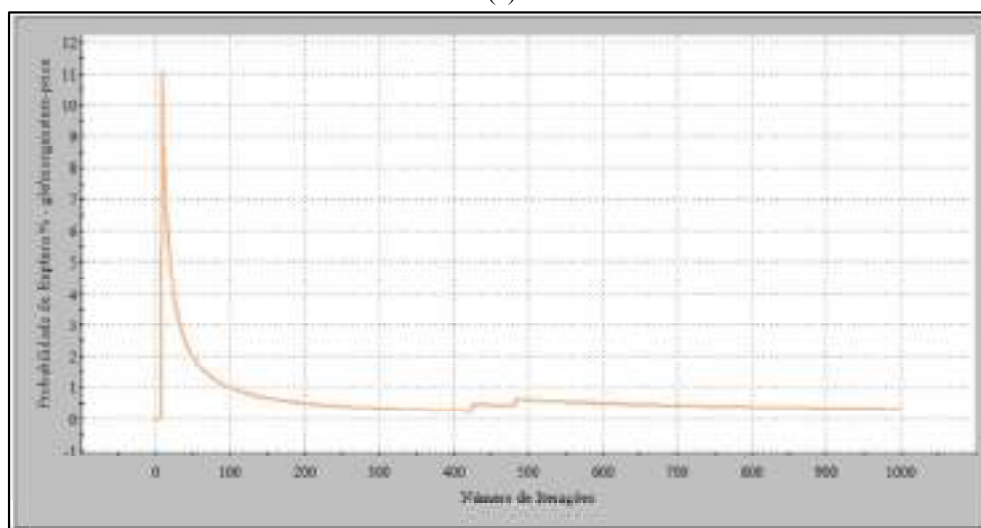
Quanto aos resultados da abordagem probabilística, ao analisar as Figuras 168-(a), 168-(c), 168-(e), 169-(a), 169-(c) e 169-(e), não se constataram variações significativas nos fatores

de segurança conforme o aumento do número de iterações. Adicionalmente, é possível observar que as Pr para ambos os cenários foram diferentes de zero, sendo verificado uma Pr a 0,44% para o cenário 2, Figura 168-(c), e de 0,06% para o cenário 3, Figura 169-(c). Dentre esses dois resultados, apenas o cenário 2 de solicitação pseudoestática foi classificado com nível de desempenho abaixo da média, conforme estabelecido pela USACE (1997). No que se refere as curvas de convergência, destacadas nas Figuras 168-(b), Figura 168-(d), 168-(f), Figura 169-(b), 169-(d) e 169-(f), assim como foi observado para o primeiro cenário de análises pseudoestática não ocorreu a convergência dos resultados, sendo necessário a realização de novas análises considerando um número de iteração maior.

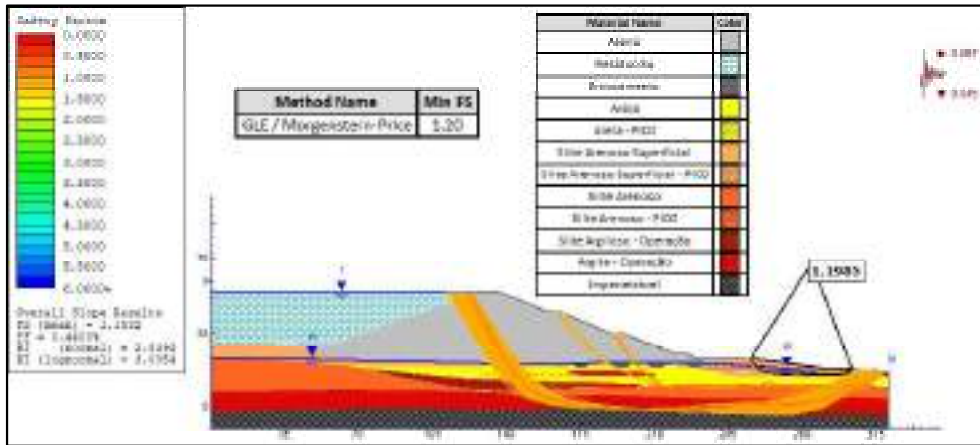
Figura 168 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (10000 iterações) (f) Gráfico de convergência da Pr (10000 iterações).



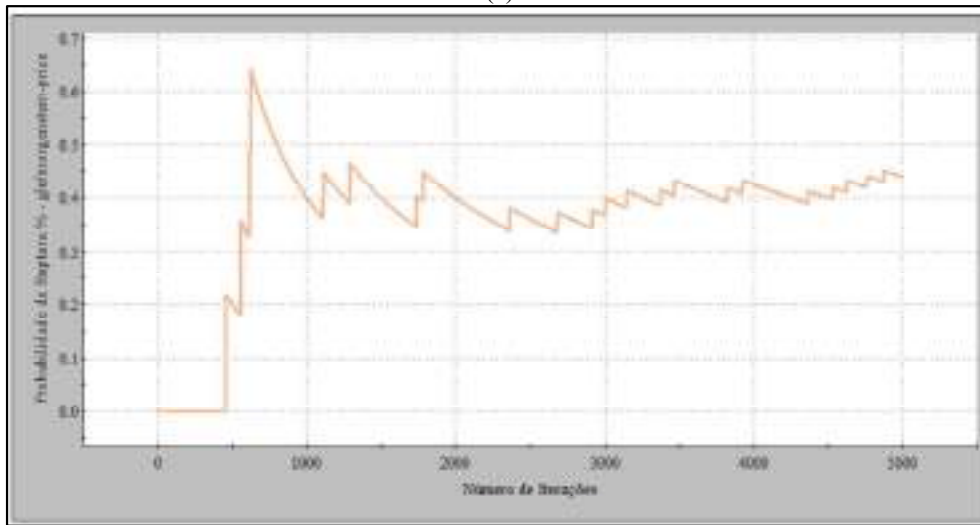
(a)



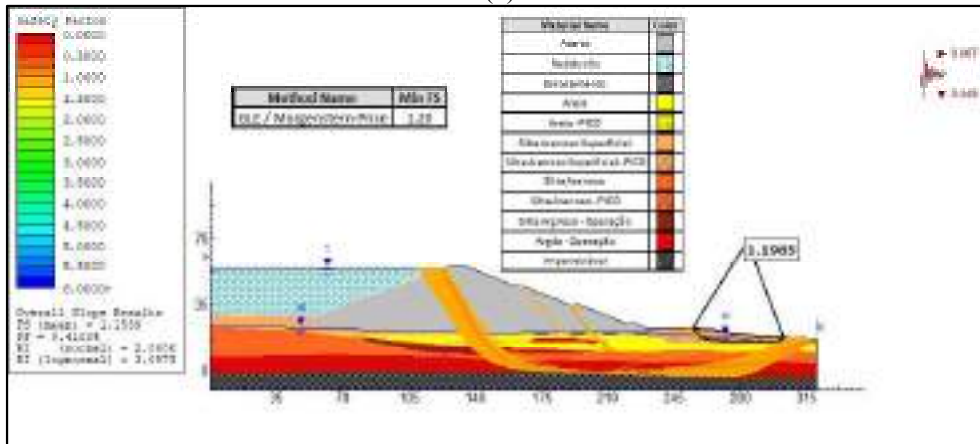
(b)



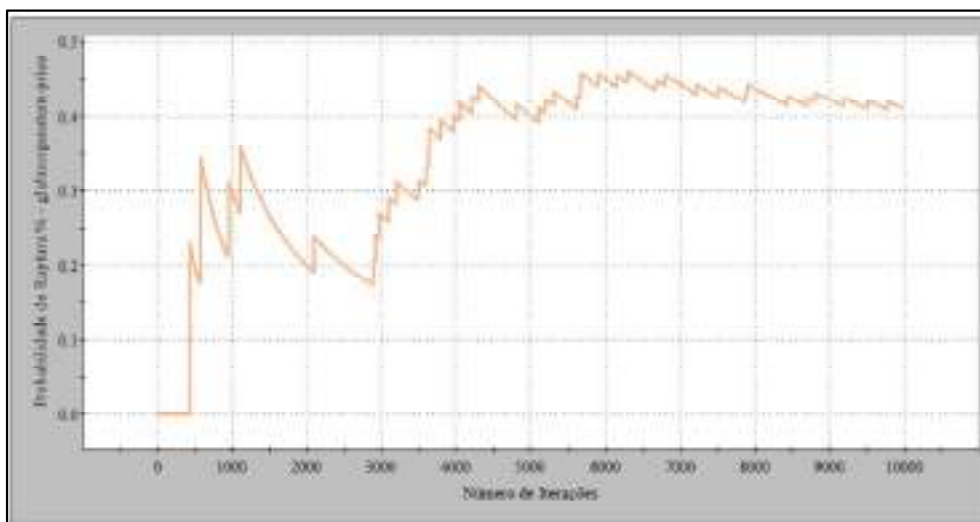
(c)



(d)

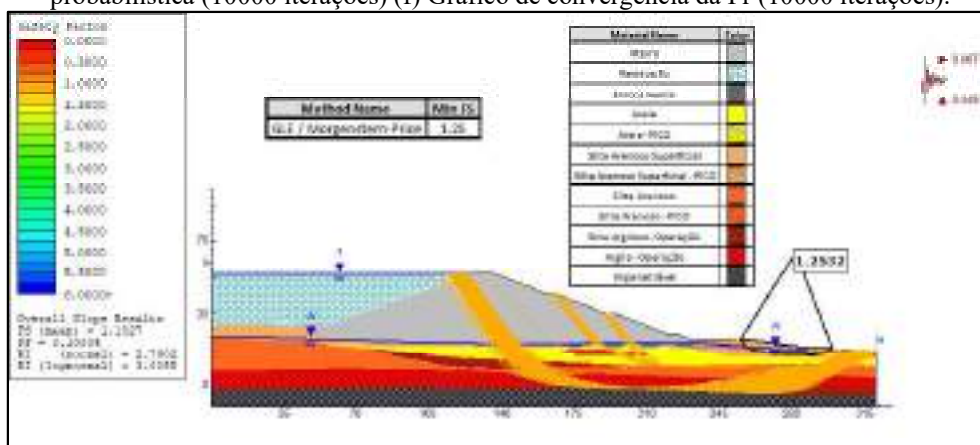


(e)

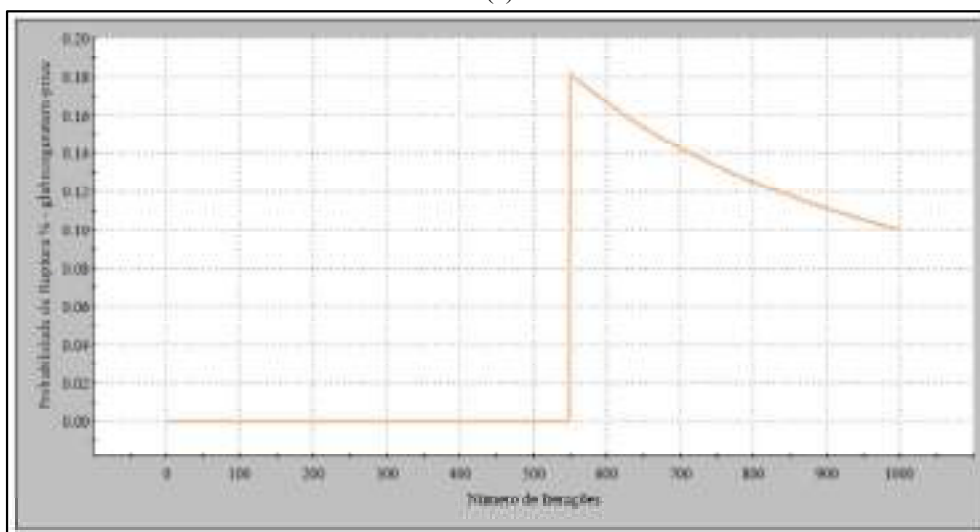


(f)  
Fonte: Autora (2023)

Figura 169 - Resultado da Seção G-G - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (10000 iterações) (f) Gráfico de convergência da Pr (10000 iterações).

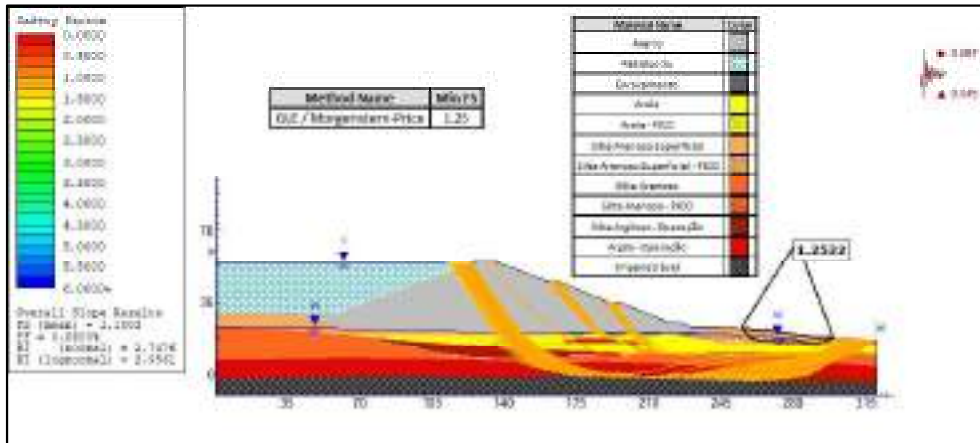


(a)

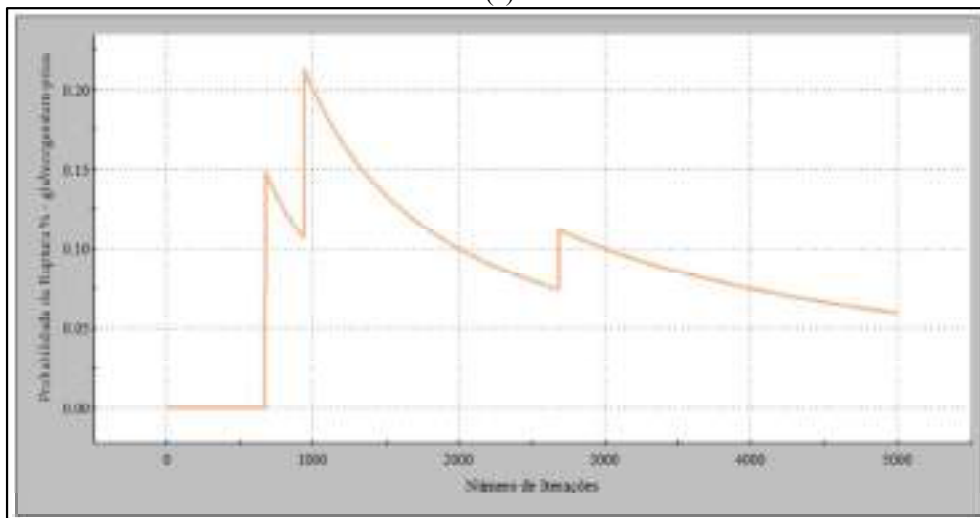


(b)

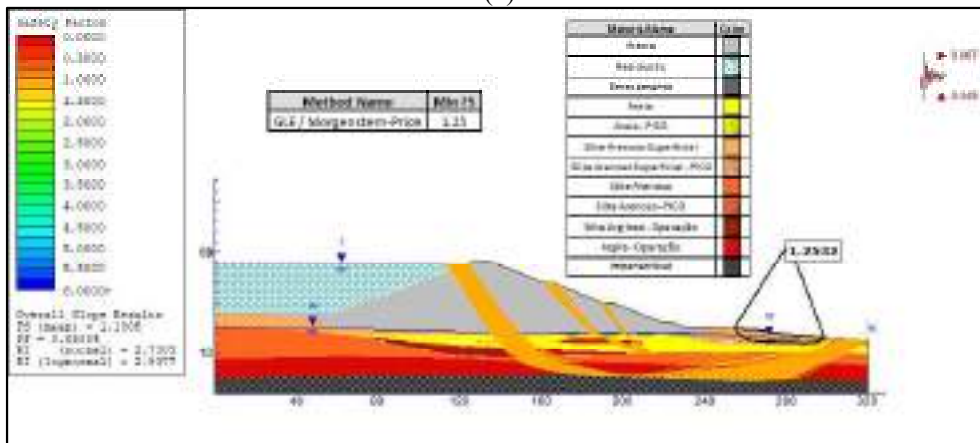




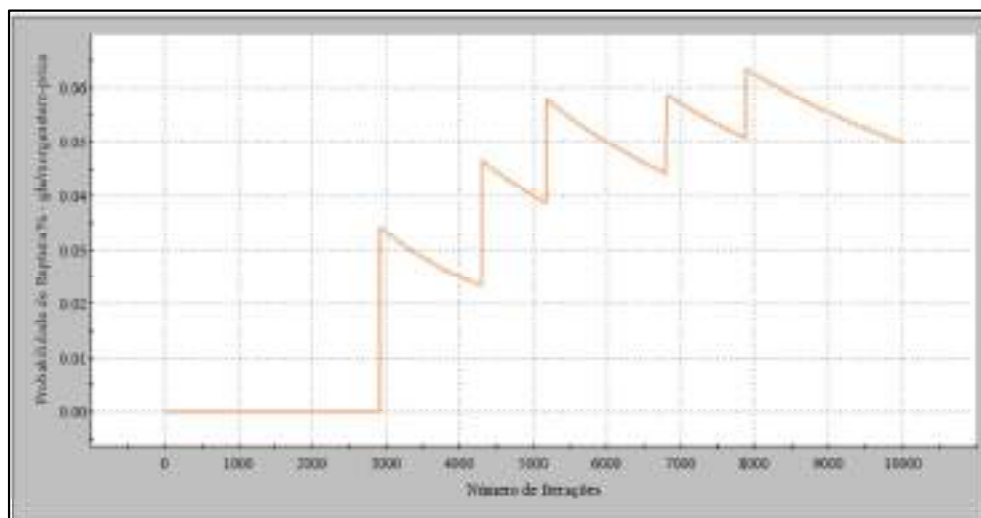
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autora (2023)

Ao considerar os três cenários de condição pseudoestática avaliados, torna-se evidente que o talude jusante da seção G, demonstra reduções nos FS, Pr e  $\beta$  quando submetidos a aplicação de carregamentos pseudoestáticos.

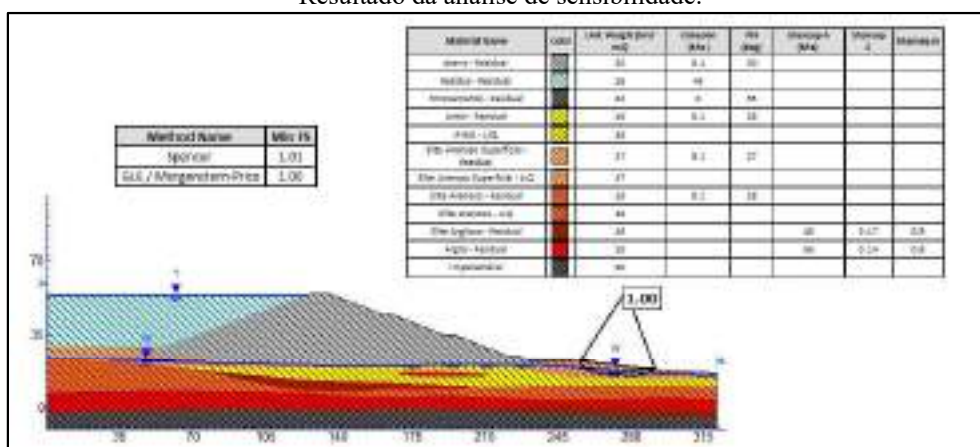
#### 5.7.8 Solicitação pós-sísmica

Os resultados encontrados para a condição de solicitação pós-sísmica são apresentados nas Figuras 170 a 171.

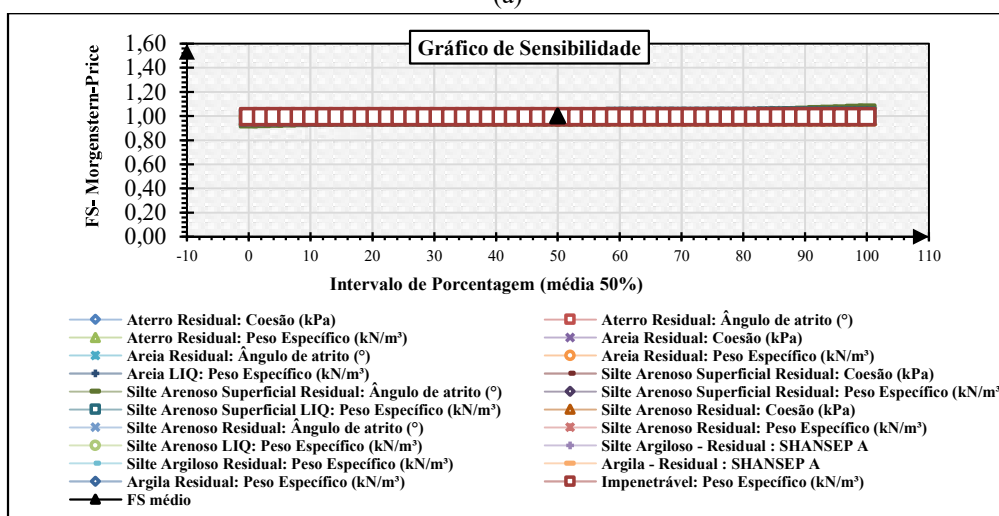
O resultado da análise determinística, apresentado na Figura 170-(a), revelou um FS de 1,00 com SPR indicando ruptura local próximo à base do talude. Conforme é estabelecido pela ANCOLD (2019), o FS mínimo para um cenário pós-sísmico varia entre 1,0 a 1,2, sendo este primeiro considerado o resultado mais crítico. Em relação ao resultado da análise de sensibilidade, exibida na Figura 170-(b), nota-se que o FS é mais variável a alterações no ângulo de atrito da camada de silte arenoso superficial, camada a qual a SPR encontra-se localizada.

Sob a perspectiva determinística, embora os resultados não sugiram um evento de grandes proporções em virtude da localização da SPR está passando fora do dique, é importante estabelecer um estado de alerta, pois qualquer alteração que venha a ocorrer na propriedade apontada pela análise de sensibilidade, bem como na geometria do talude, poderá desencadear um eventual incidente. Além disso, recomenda-se que após um cenário de solicitação sísmica, a estrutura monitorada para detecção de quaisquer sinais de instabilidade.

Figura 170 - Resultado da Seção G-G - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



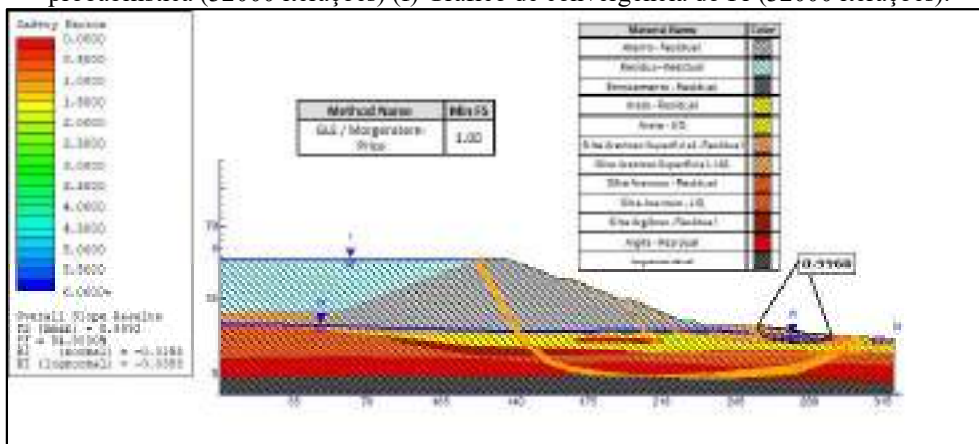
(b)

Fonte: Autora (2023)

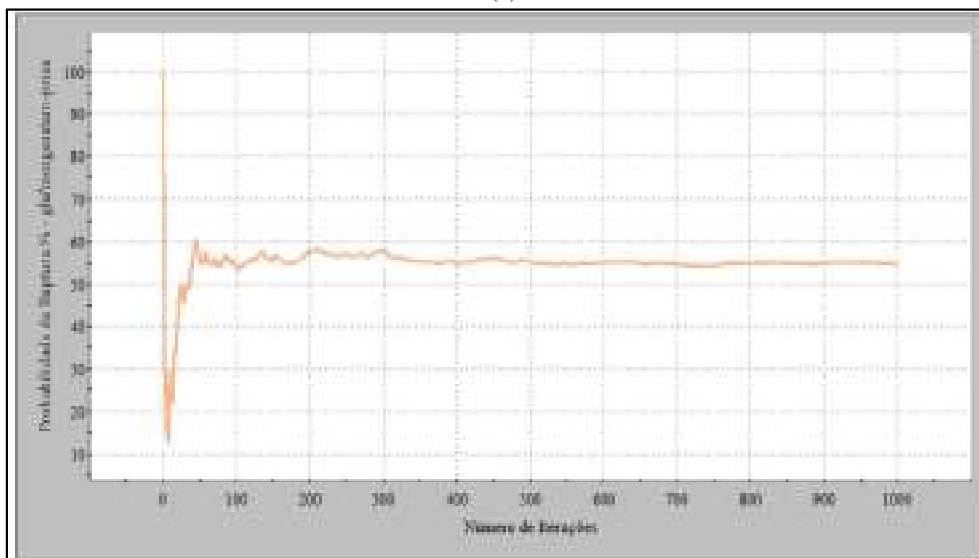
A fim de complementar os resultados apresentados pela abordagem determinística, análises probabilísticas foram conduzidas considerando diferentes números de iterações. Conforme evidenciado nas Figuras 171-(a), 171-(c) e 171-(e), destaca-se que os FS médio probabilístico foram consistentes com o observado na abordagem determinística. No entanto, as Pr revelaram-se consideravelmente altas, variando entre 54,80% a 58,12%. De acordo com a classificação da USACE (1997), tais resultados classificam o talude com nível de desempenho potencialmente preocupante. Entretanto, observa-se que essas probabilidades encontradas não foram referentes ao corpo do aterro, mas sim para uma área externa ao talude. Neste sentido, mesmo que o *software* tenha gerado valores altos de Pr, estes não estão dizem respeito a um comportamento instável do talude da seção G.

No que concerne às curvas de convergências, apresentadas as Figuras 171-(b), 171-(d), 171(f), nota-se que a estabilização dos resultados ocorreu a partir das 1000 iterações.

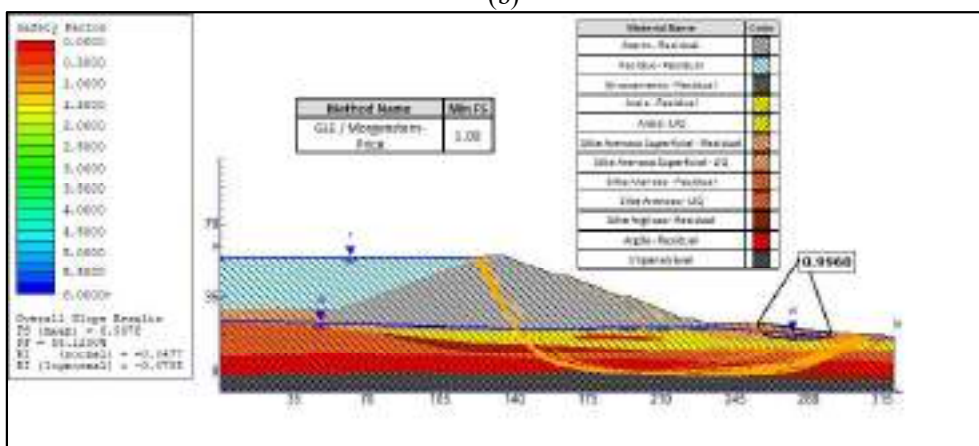
Figura 171 - Resultado da Seção G-G - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência da Pr (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (5000 iterações) (d) Gráfico de convergência da Pr (5000 iterações) (e) Resultado da análise probabilística (32000 iterações) (f) Gráfico de convergência do Pr (32000 iterações).



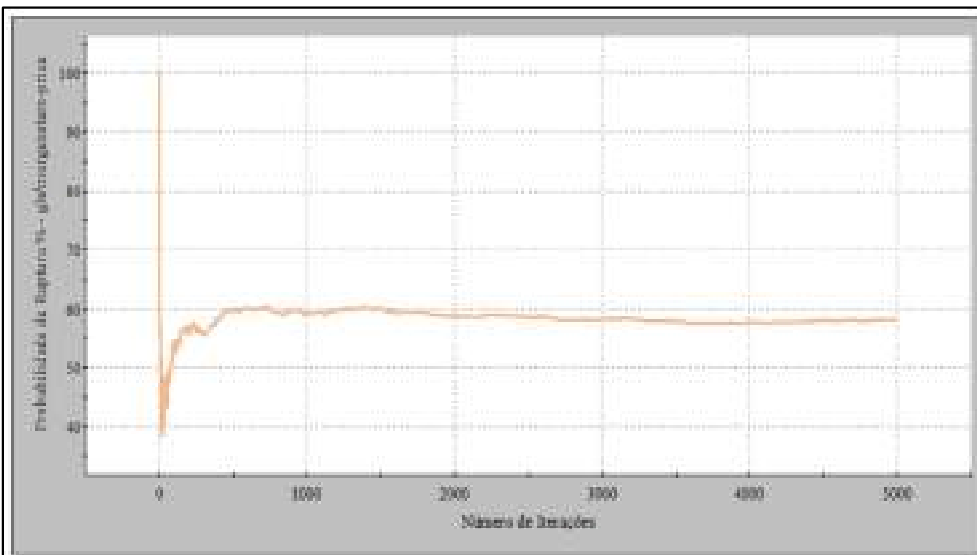
(a)



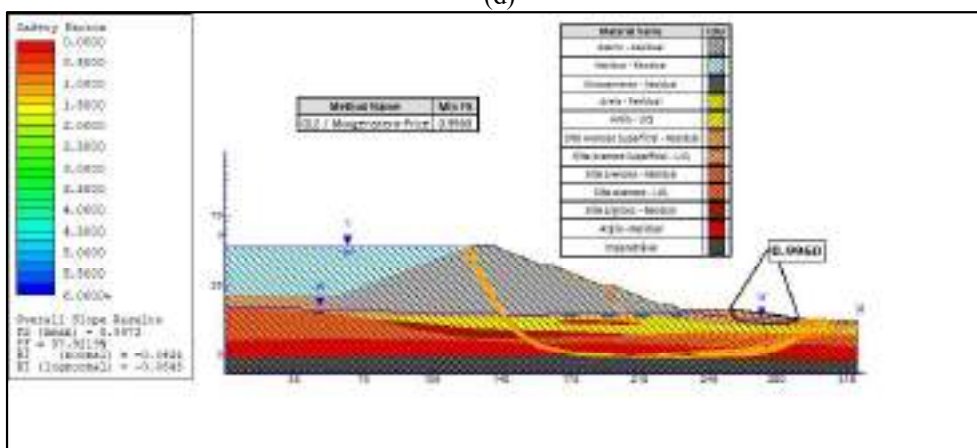
(b)



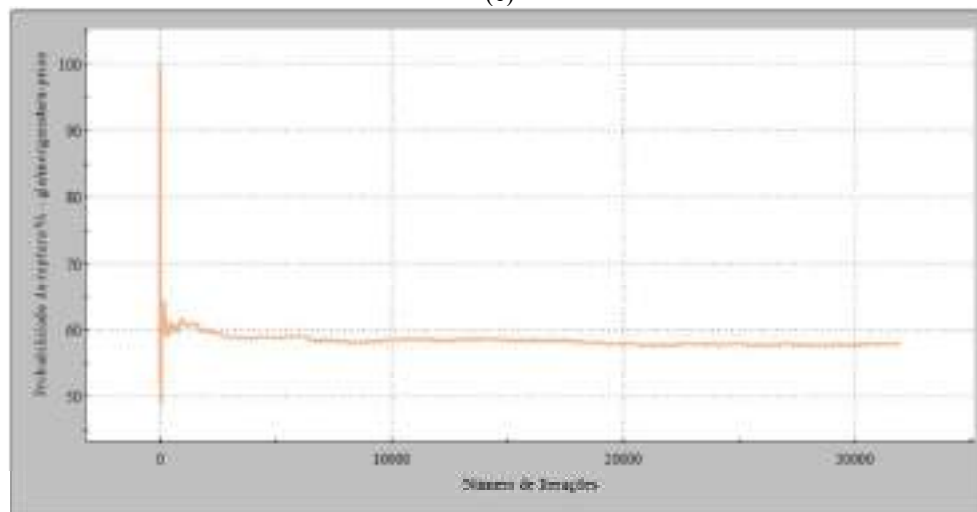
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autora (2023)

Os dados provenientes da aplicação da análise probabilística para a seção G, considerando 1000 e 5000 iterações, encontram-se apresentados na Tabela 26. Ao examinar a Tabela 26 e utilizando os valores de referência do item 3.8, é possível inferir que os taludes da

seção G demonstraram estabilidade apenas nos cenários que não envolviam a atuação de carregamentos pseudoestáticos e pós-sísmico. Nesse contexto, torna-se de extrema importância a implementação de ações que elevem esses FS, reduzindo ao mínimo possível as Pr encontrada.

Tabela 26 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção G-G.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				5000 iterações				10.000 iterações				32.000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,91	1,93	0	6,21	8,44	1,92	0	6,39	8,67	x	x	x	x	x	x	x	x
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,76	1,76	0	26,09	34,14	1,76	0	24,84	32,51	x	x	x	x	x	x	x	x
Final de construção Sem Ru	J	1,3	1,51	1,47	0	4,76	5,71	1,47	0	4,93	5,92	x	x	x	x	x	x	x	x
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,42	1,39	0	4,25	4,96	1,38	0	4,16	4,84	x	x	x	x	x	x	x	x
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,11	2,02	0	8,23	11,45	2,01	0	8,23	11,42	x	x	x	x	x	x	x	x
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	1,59	1,55	0	5,87	7,23	1,55	0	5,94	7,32	x	x	x	x	x	x	x	x
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,22	1,17	0,1	2,92	3,13	1,17	0,18	2,85	3,05	1,17	0,17	2,88	3,09	x	x	x	x
			1,20	1,15	0,3	2,80	2,98	1,15	0,44	2,85	3,04	1,15	0,41	2,87	3,06	x	x	x	x
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,25	1,18	0,1	2,79	3,01	1,18	0,06	2,75	2,96	1,18	0,05	2,73	2,94	x	x	x	x
			1,00	1,00	54,8	-0,02	-0,04	1,00	58,12	-0,05	-0,07	x	x	x	x	1,0	57,92	-0,06	-0,08

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

## 5.8 SEÇÃO H

A seguir são expostos os resultados das análises determinísticas, de sensibilidade e probabilísticas realizados na geometria da seção H para 1000 e 3000 iterações.

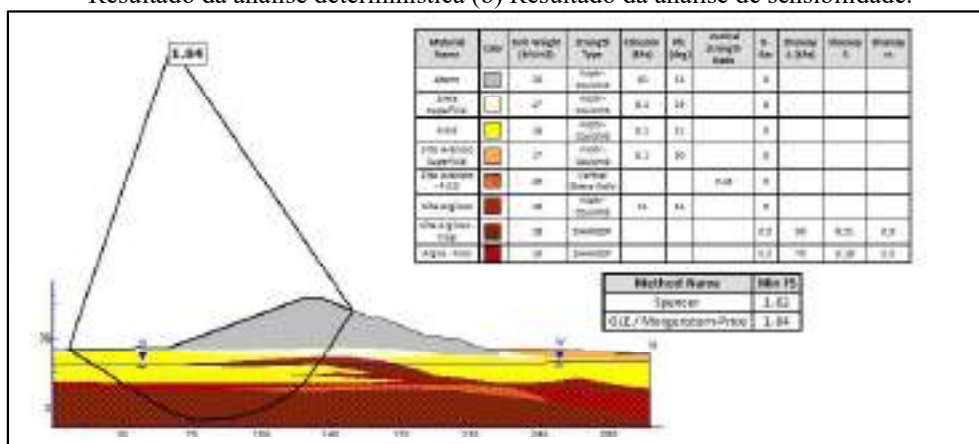
### 5.8.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

Os resultados das análises para a fase final de construção do talude montante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 172 e 173.

A fundação da seção H, conforme é mostrado na Figura 172-(a) é constituída por 7 camadas de materiais diferentes denominadas de: areia superficial, areia, silte arenoso superficial, silte arenoso pico, silte argiloso, silte argiloso final e argila final. Analisando o perfil dessa seção é possível observar que o aterro compactado se encontra apoiado em uma fundação heterogênea, com camadas de materiais arenosos com resistência  $N_{SPT}$  crescente com a profundidade, as quais encontram-se se apoiada sobre uma camada de material argiloso de consistência dura conforme relatados nos boletins de sondagem presentes no relatório SLU-N-142759-001.

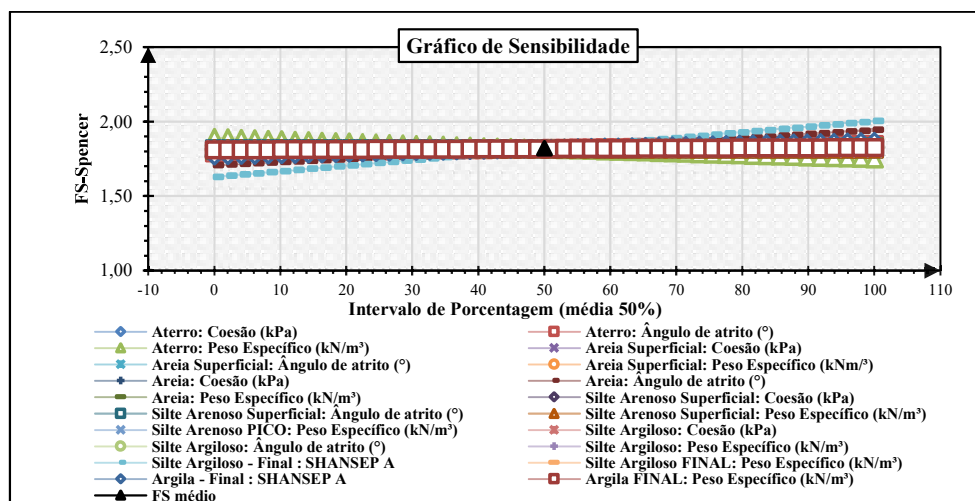
Com base nos resultados apresentados na Figura 172-(a), observa-se que, para a fase final de construção desconsiderando o parâmetro Ru, o talude se mantém estável obtendo um FS de 1,84 superior ao mínimo exigido de 1,3 conforme preconizado pela NBR 13028/17. No que diz respeito às análises de sensibilidade, a Figura 172-(b), revela que o ângulo de atrito da areia e a resistência não-drenada do silte-argiloso são os parâmetros responsáveis pela maior variação do FS.

Figura 172 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



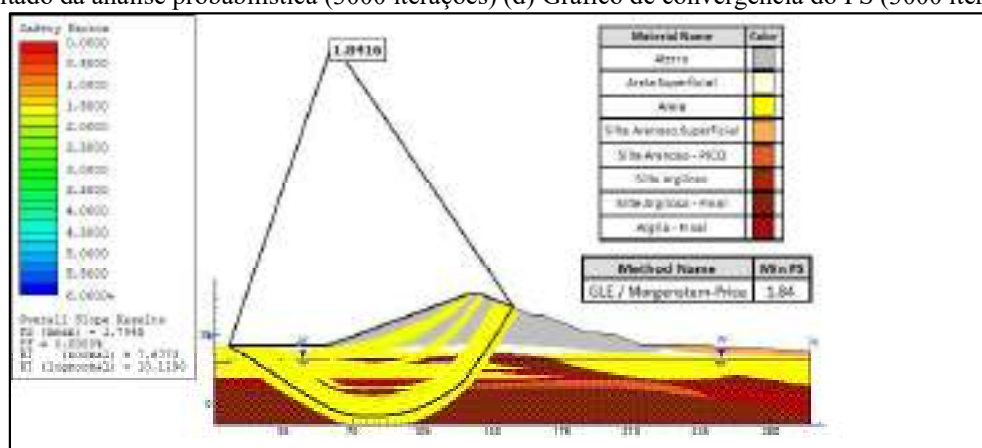


(b)

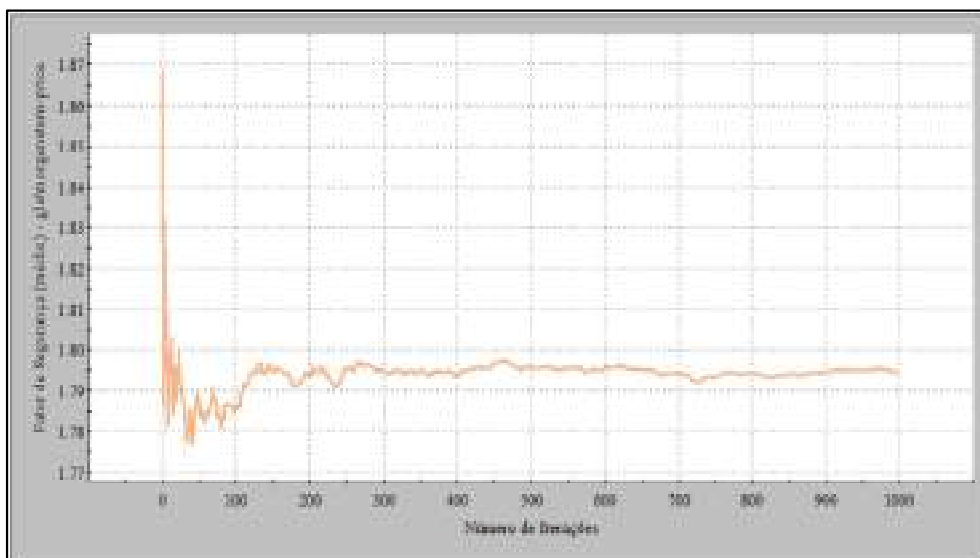
Fonte: Autora (2023)

Os resultados da análise probabilística, evidenciados nas Figuras 173-(a) e 173-(c), destacam um FS médio probabilístico igual a 1,79, com Pr iguais a 0% para ambos os números de iterações. Quanto aos índices de confiabilidade mínimos, observou-se uma variação entre 7,68 (valor normal) e 10,12 (valor log-normal), classificando o desempenho do talude como alto, conforme estabelecido pela USACE (1997). No que concerne às curvas de convergência do FS, percebe-se pelas Figuras 173-(b) e 173-(d), que a curva tende a convergir em torno de 1,79, indicando estabilização dos resultados após 1000 iterações. Dessa forma, é possível inferir que, a partir dos resultados obtidos para essa condição, o talude apresenta ser estável por ambas as metodologias de análise de estabilidade.

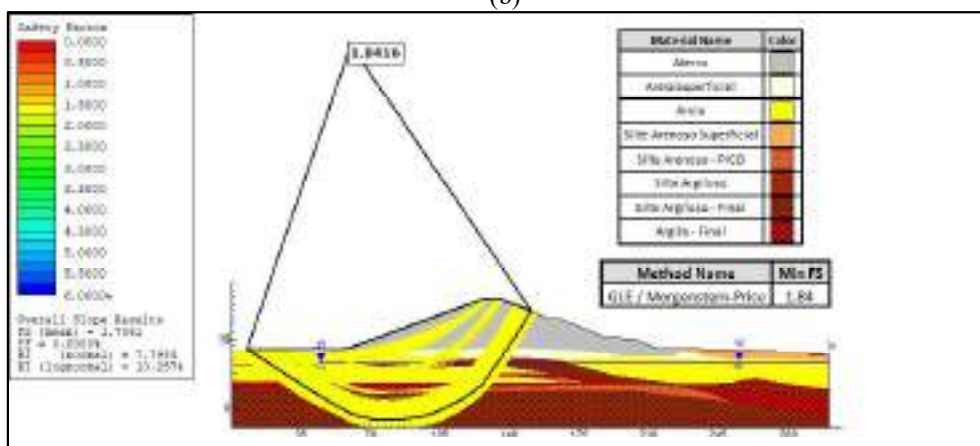
Figura 173 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude Montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



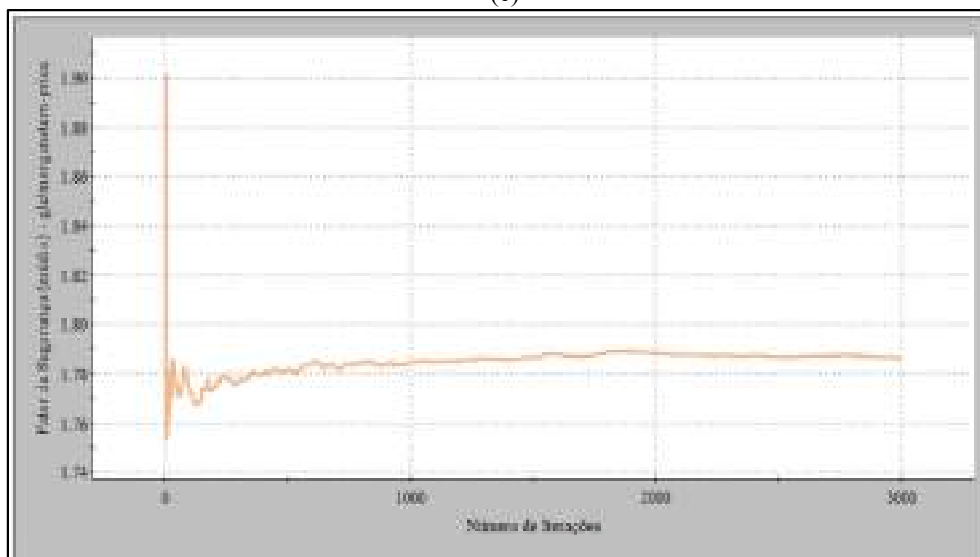
(a)



(b)



(c)



(d)

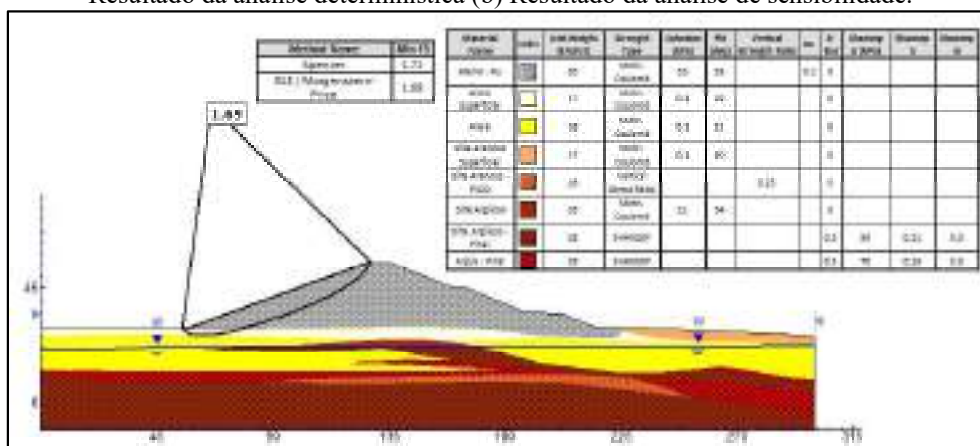
Fonte: Autora (2023)

5.8.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

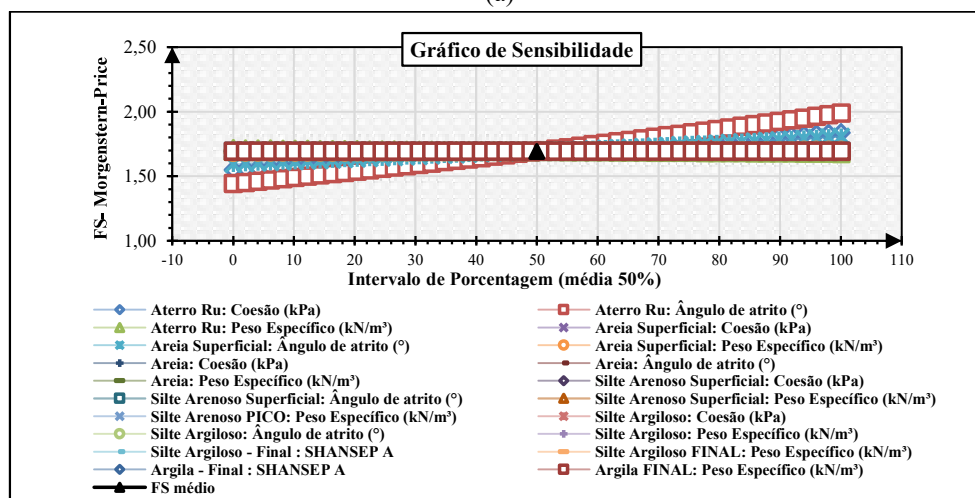
Os resultados das análises para a fase de conclusão da construção do talude montante, considerando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são apresentadas nas Figuras 174 e 175.

Analisando os resultados da Figura 174-(a), percebe-se que a presença do parâmetro Ru na camada do aterro, trouxe mudanças significativas no resultado do FS, além de alterar a localização da SPR. Observa-se também que por ambos os métodos determinísticos o talude se mantém estável possuindo um FS mínimo de 1,69 superior ao exigido de 1,3 conforme recomenda a NBR 13028/17. No que diz respeito aos resultados da análise de sensibilidade, observa-se que a variação do FS é mais significativa devido ao ângulo de atrito da camada de areia superficial, seguido do ângulo de atrito e da coesão do aterro compactado, conforme é mostrado na Figura 174-(b).

Figura 174 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

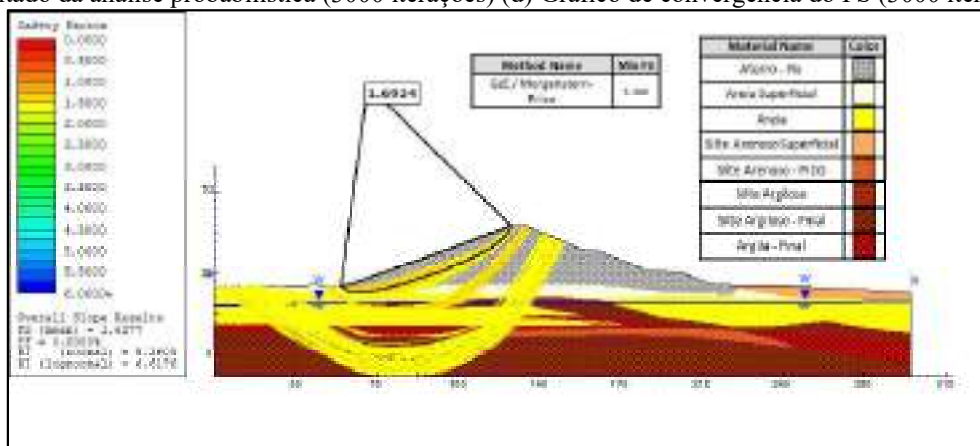


(b)

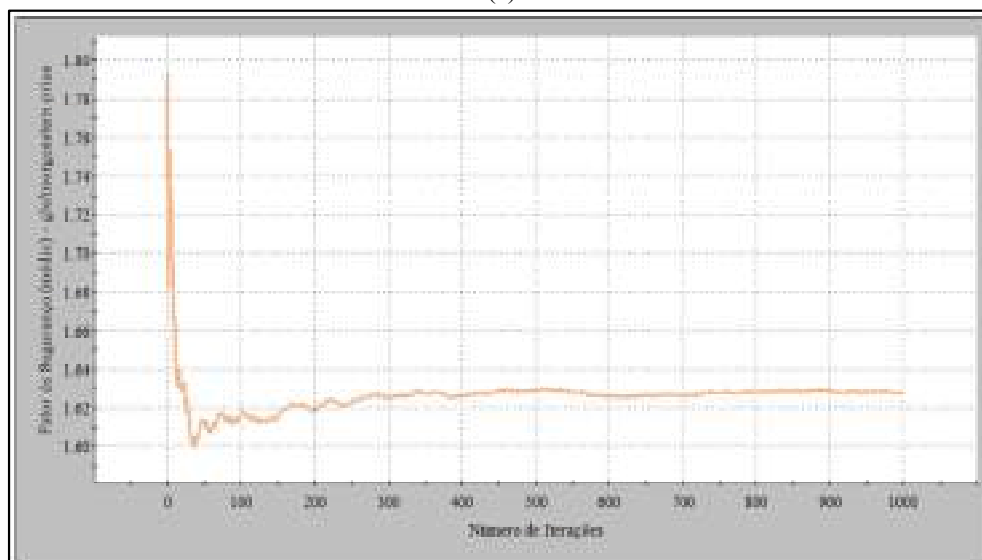
Fonte: Autora (2023)

Os resultados da análise probabilística, exibidos nas Figuras 175-(a) e 175-(c), apresentaram aproximadamente um FS médio probabilístico igual a 1,63, com Pr igual a 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 5,26 (valor normal) a 6,62 (valor log-normal). Esses dados revelam que considerando uma avaliação probabilística deste cenário, o talude montante da seção H se apresenta estável considerando os valores de referência da USACE (1997). Quanto as curvas de convergências, apresentadas nas Figuras 175-(b) e 175-(d), observa-se que os resultados tendem a se estabilizar a partir de 1000 iterações. Neste sentido, pode-se inferir que, com base nos resultados encontrados para essa condição, que o talude apresenta comportamento estável por ambas as metodologias de análise.

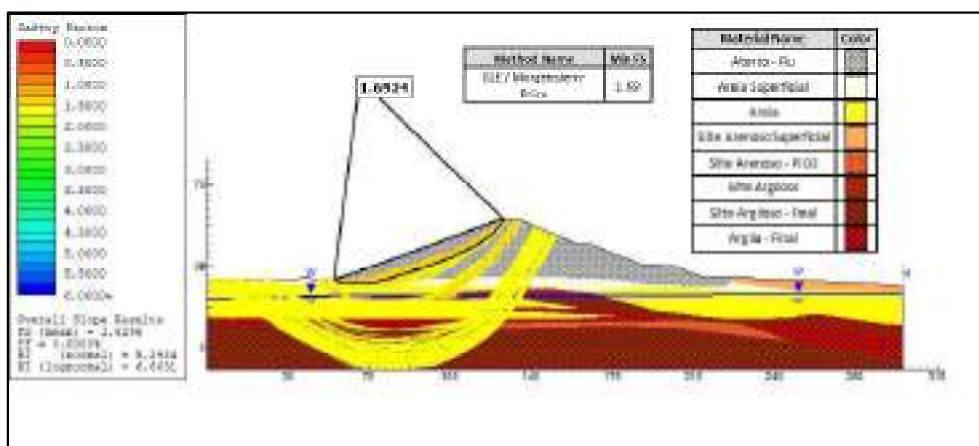
Figura 175 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



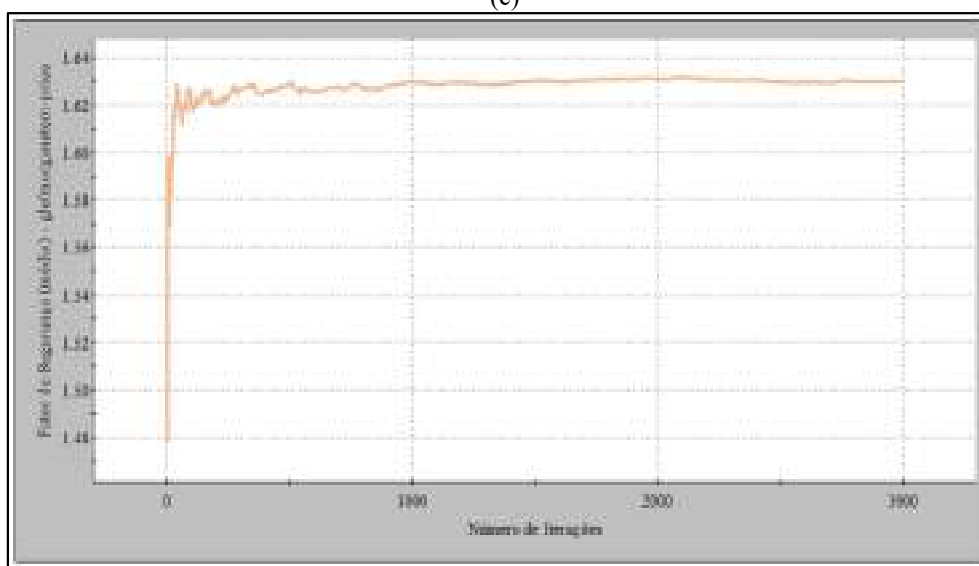
(a)



(b)



(c)



(d)

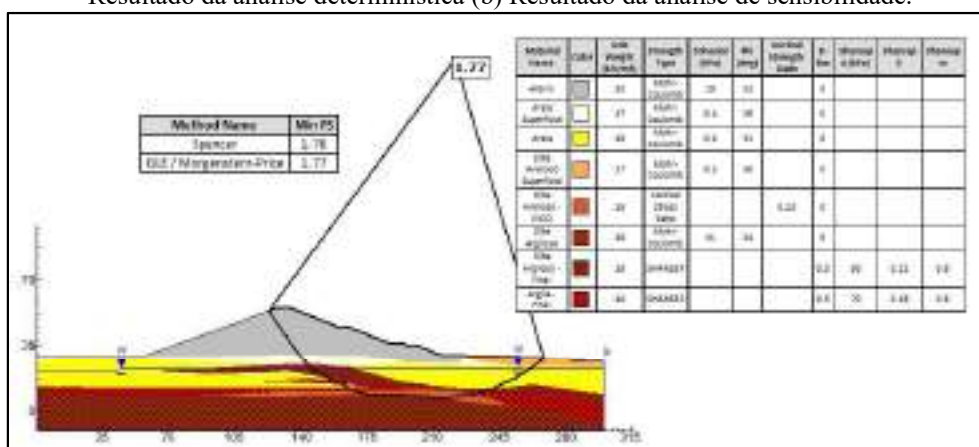
Fonte: Autora (2023)

### 5.8.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

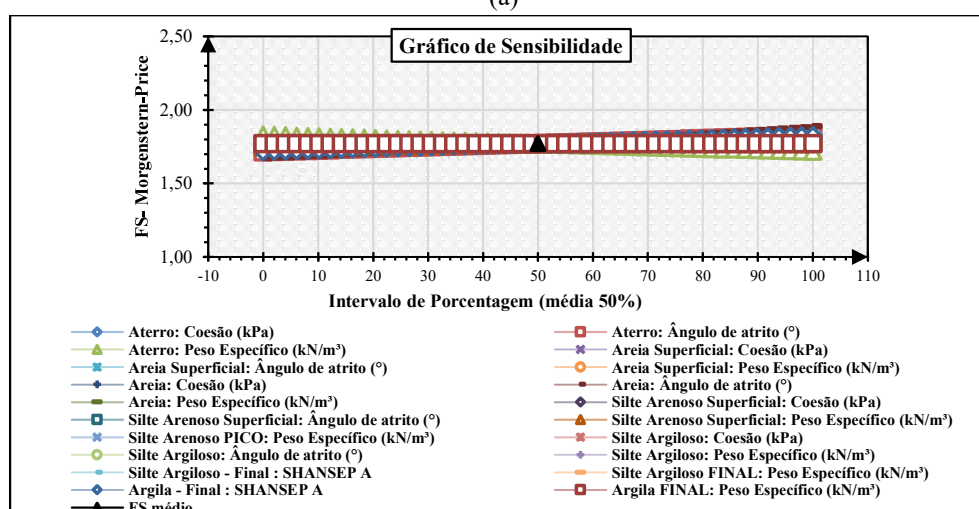
Os resultados das análises para a fase final construção do talude jusante, desconsiderando o parâmetro de propressão (Ru) na camada de aterro são apresentadas nas Figuras 176 e 177.

No que diz respeito ao talude jusante, a análise da Figura 176-(a) revela que a SPR encontra-se interceptando todas as camadas de materiais, apresentando um FS de 1,77. Sob um olhar determinístico, esse valor é considerado elevado, ultrapassando o limite de 1,3 estabelecido pela NBR 13028/17. Em relação aos resultados das análises de sensibilidade, conforme ilustrado na Figura 176-(b), nota-se uma pequena variação do FS frente as mudanças dos parâmetros das camadas que constituem a geometria da seção H. Contudo, as variações que observadas foram devidas as mudanças do ângulo de atrito da camada de areia e aos parâmetros de resistência da camada de aterro compactado. Os demais parâmetros das camadas existentes, não apresentaram influência significativa sobre o FS.

Figura 176 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



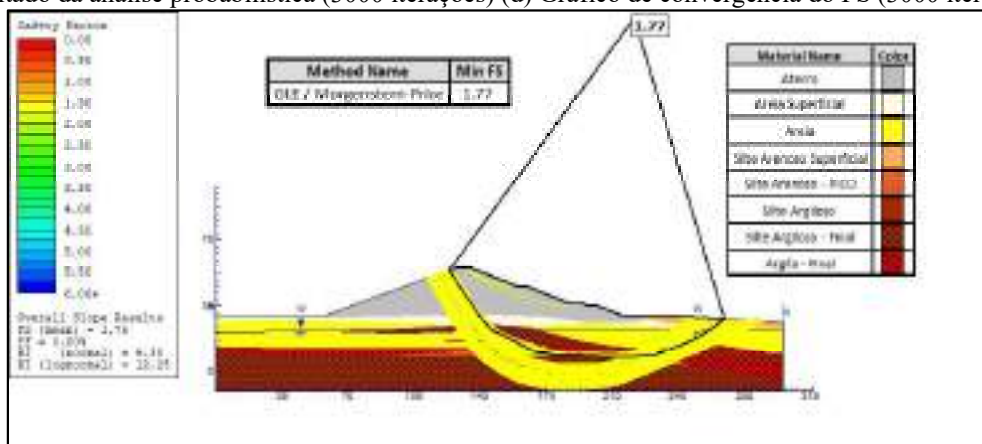
(b)

Fonte: Autora (2023)

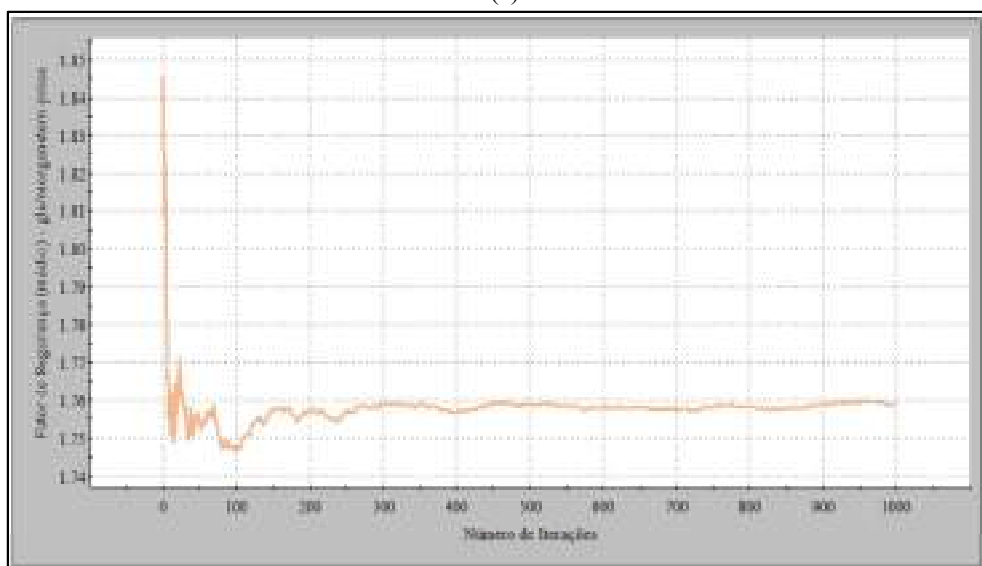
Sob a perspectiva probabilística, os resultados apresentados nas Figuras 177-(a) e 177-(c), revelam que o menor FS probabilístico encontrado para ambas as iterações foi igual a 1,75, com Pr nula e índices de confiabilidade mínimos variando entre 9,38 (valor normal) a 12,25 (valor log-normal), ambos indicando níveis de desempenho satisfatório segundo a USACE (1997). No que diz respeito às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 177-(b) e 177-(d), observa-se que a partir de 1000 iterações os resultados das análises tendem a convergir, indicando a consistência dos dados apresentados.

Com base nesses resultados, é possível afirmar que os parâmetros encontrados pela abordagem probabilística apontam para um talude com elevado desempenho e estabilidade. Sendo assim tanto pela abordagem determinística, quanto pela probabilística, o talude se mantém estável para esta condição.

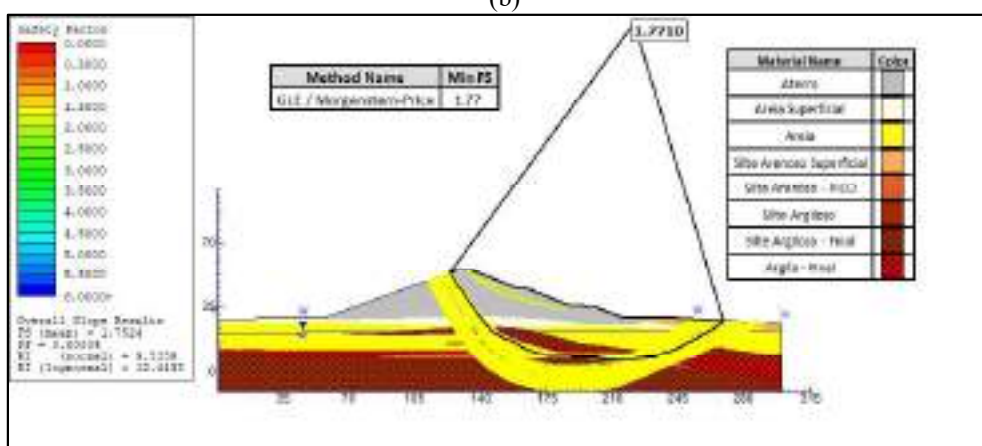
Figura 177 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



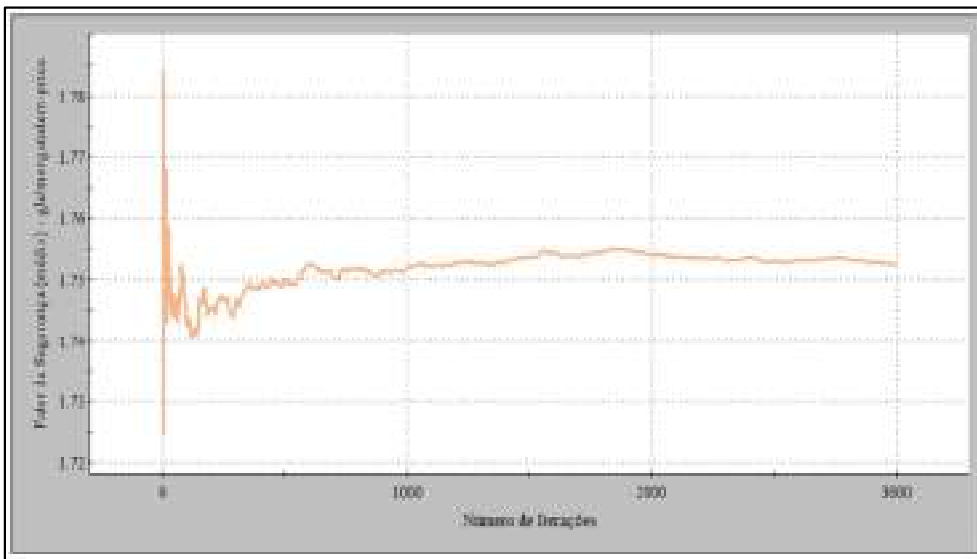
(a)



(b)



(c)



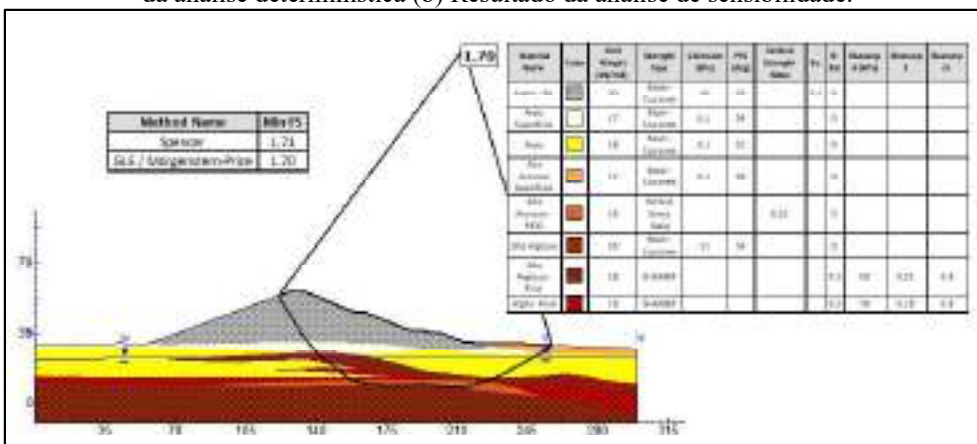
(d)  
Fonte: Autora (2023)

5.8.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

Os resultados das análises para a fase final de construção do talude jusante, considerando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 178 e 179.

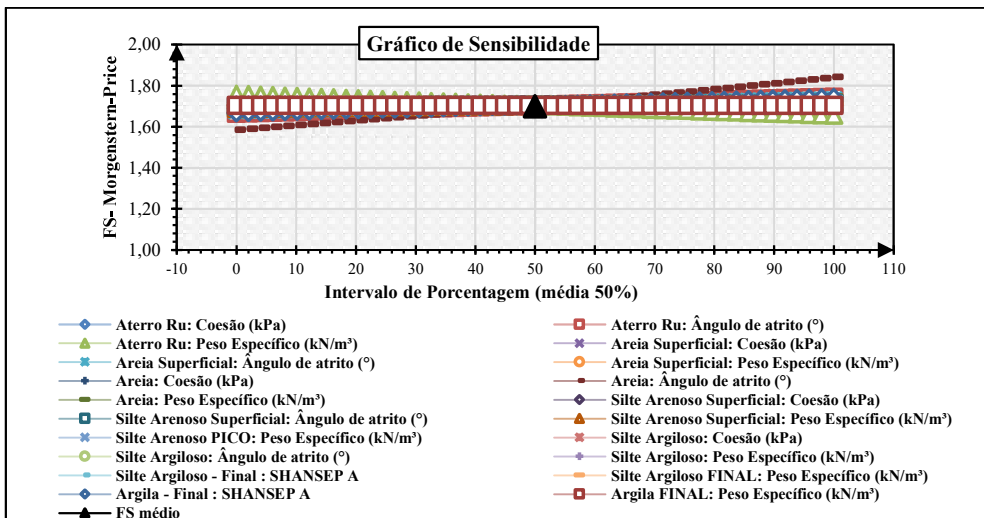
Ao analisar a Figura 178-(a), destaca-se que o menor FS determinístico encontrado foi de 1,70, pelo método de cálculo de Morgenstern-Price, sendo este considerado adequado pela NBR 13028/17. Ao examinar a Figura 178-(b), observa-se pela análise de sensibilidade, que as variações mais pronunciadas no FS decorrem das mudanças no ângulo de atrito da camada de areia, enquanto o peso específico do aterro compactado exerce uma influência menos expressiva.

Figura 178 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



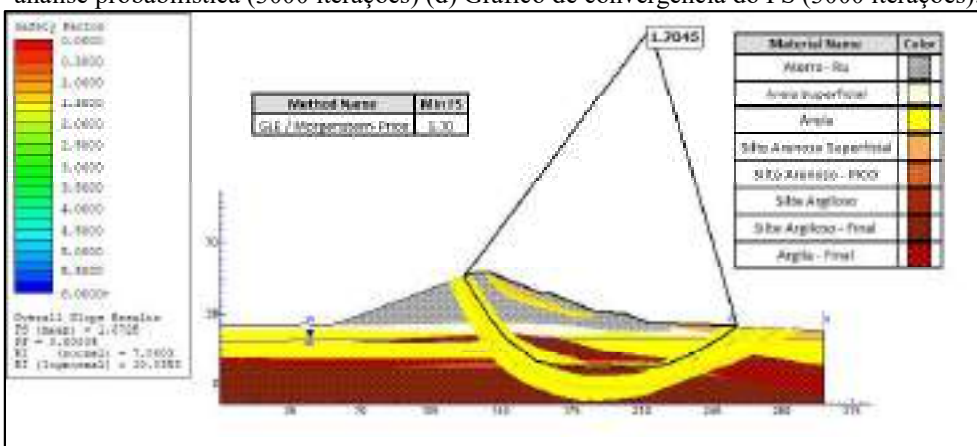


(b)  
Fonte: Autora (2023)

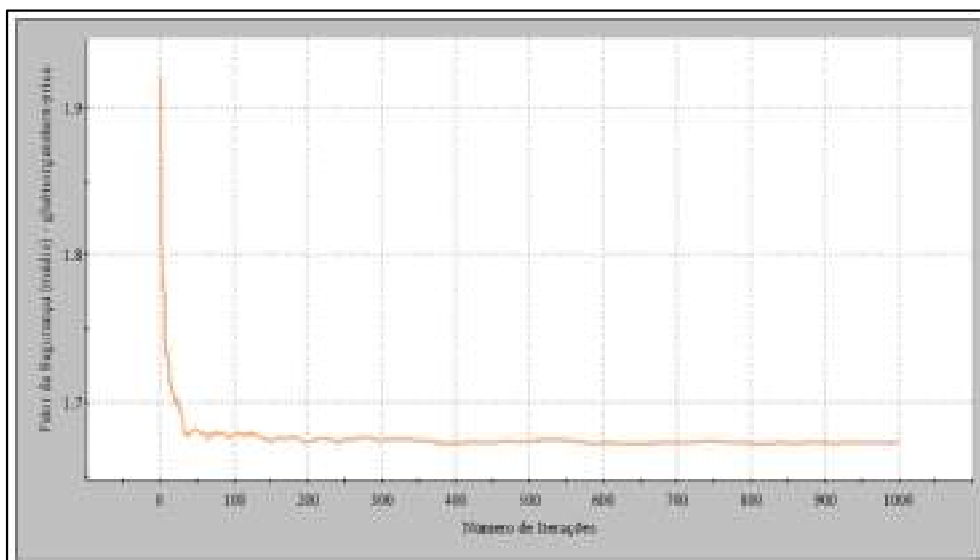
Sob uma perspectiva probabilística, a Figura 179-(a) e 179-(c), revelam uma pequena redução do FS, agora fixado em 1,68. Além disso, foram encontradas Pr nulas e índices de confiabilidade mínimos 7,86 (valor normal) a 10,04 (valor log-normal). Quanto às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 179-(b) e 179-(d), nota-se uma convergência dos resultados, indicando uma tendência a estabilização a partir de 1000 iterações.

Com base nos dados consolidados na literatura, conforme detalhados no item 3.8, verifica-se que tanto os resultados da análise determinística, quanto o da probabilística convergem para uma condição de estabilidade do talude. Em outras palavras, não se observam tendência a ruptura, levando em consideração as condições nas quais o talude foi avaliado.

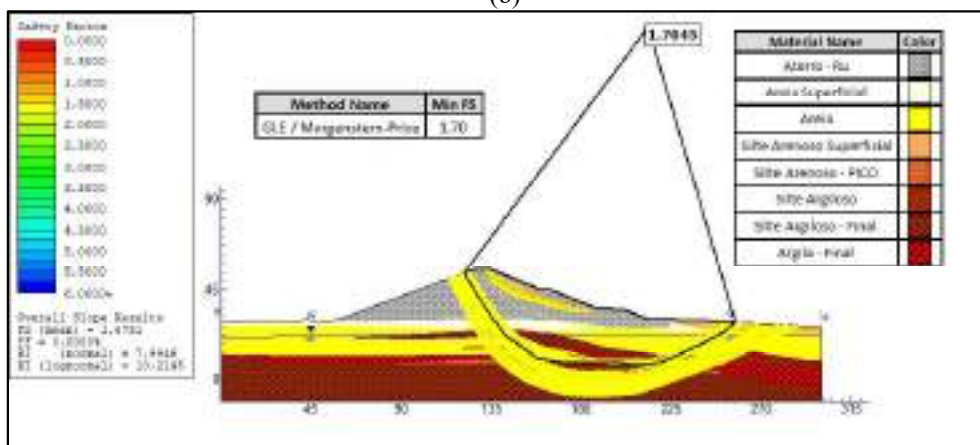
Figura 179 - Resultado da Seção H-H - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



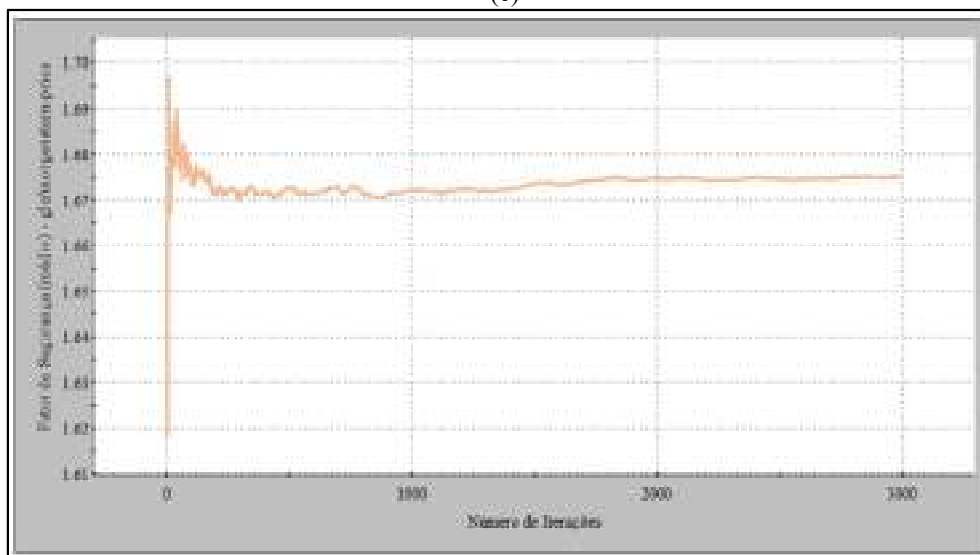
(a)



(b)



(c)



(d)

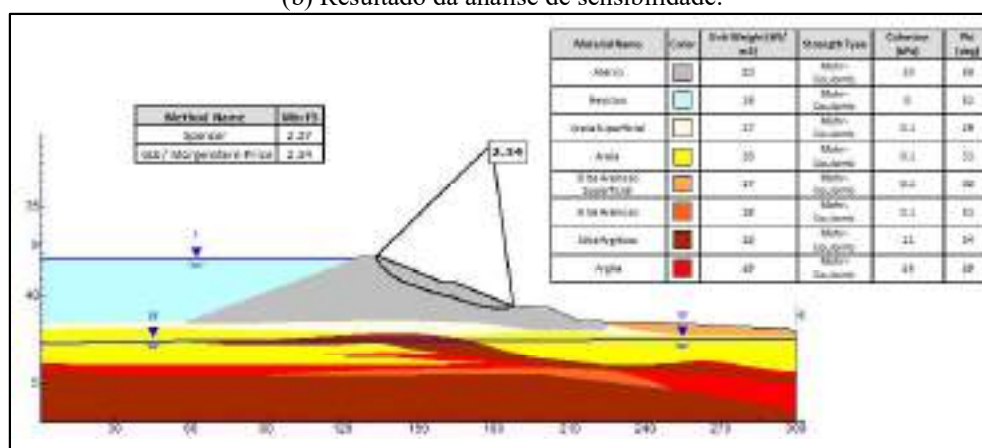
Fonte: Autora (2023)

### 5.8.5 Operação Normal – Drenado

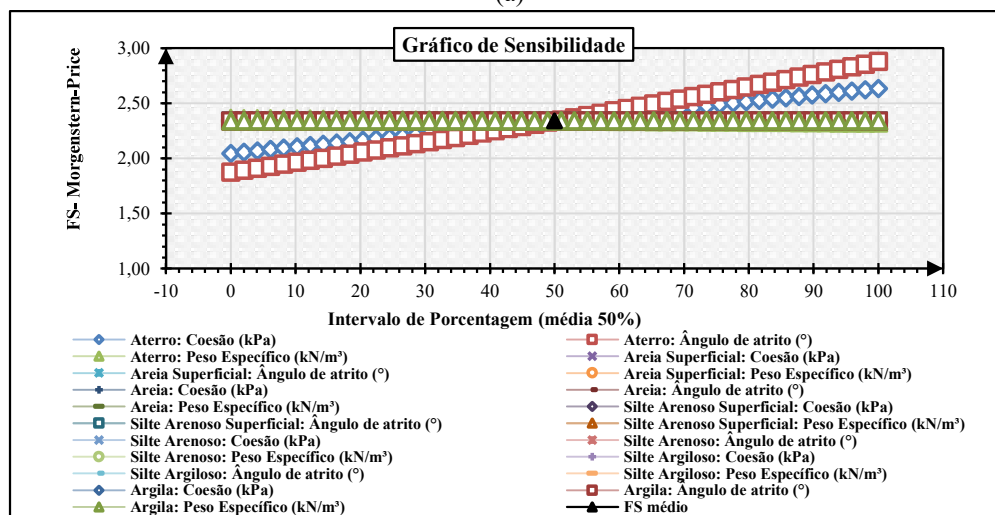
Os resultados obtidos para a fase de operação em condição normal drenada são destacados nas Figuras 180 e 181.

Para esta condição, conforme evidenciado na Figura 180-(a), nota-se um aumento no FS devido ao ganho de resistência decorrente da maior interação entre as partículas do solo. Quanto aos resultados da Figura 180-(b), a análise de sensibilidade mostrou que o FS é variável às mudanças nas propriedades da camada de aterro, como o ângulo de atrito e a coesão. Deterministicamente, o talude se encontra estável para esse cenário, apresentando um FS de 2,34, superior ao mínimo admissível de 1,5 requerido pela NBR 13028/17.

Figura 180 - Resultado da Seção H-H - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



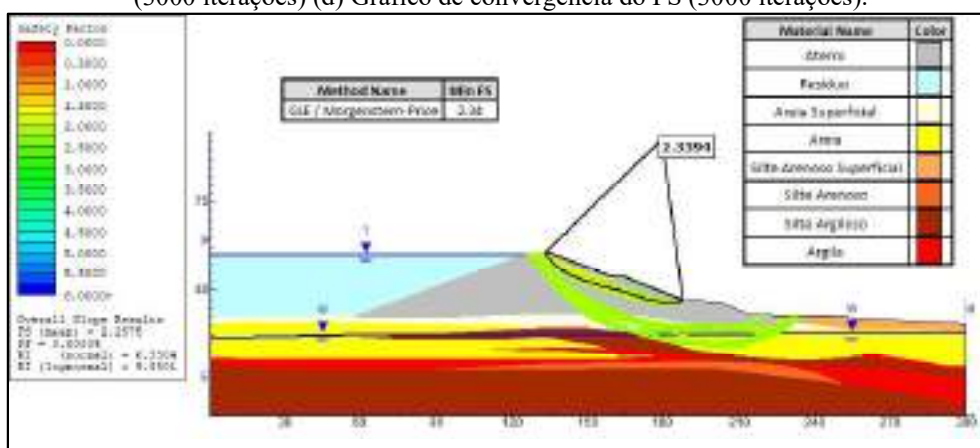
(b)

Fonte: Autora (2023)

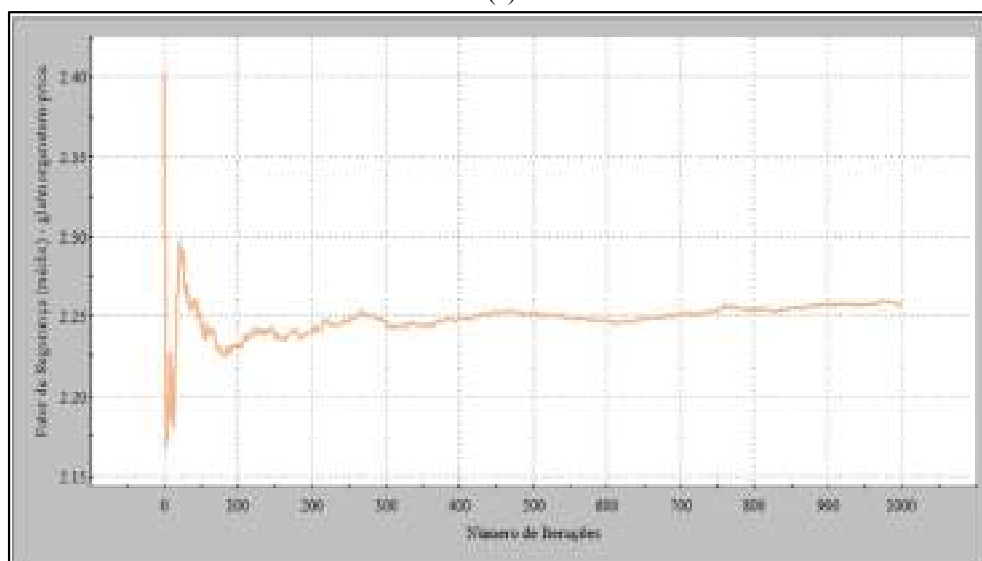
Em relação aos resultados da abordagem probabilística, observou-se uma redução no FS em comparação com o valor derivado da abordagem determinística. Conforme evidenciado nas Figuras 181-(a) e 181-(c), o FS médio probabilístico foi aproximadamente igual a 2,24,

apresentando uma Pr de 0% e índices de confiabilidade mínimos variando entre 6,21 (valor normal) e 9,03 (valor log-normal), ambos indicando nível de desempenho satisfatório de acordo com a USACE (1997). No que diz respeito à estabilização dos resultados, as Figuras 181-(b) e 181-(d), indicam uma tendência a convergência a partir de 1000 iterações, mostrando que os resultados encontrados são estáveis. Com base nesses dados, pode-se inferir que o talude se mantém estável diante dessa condição de carregamento.

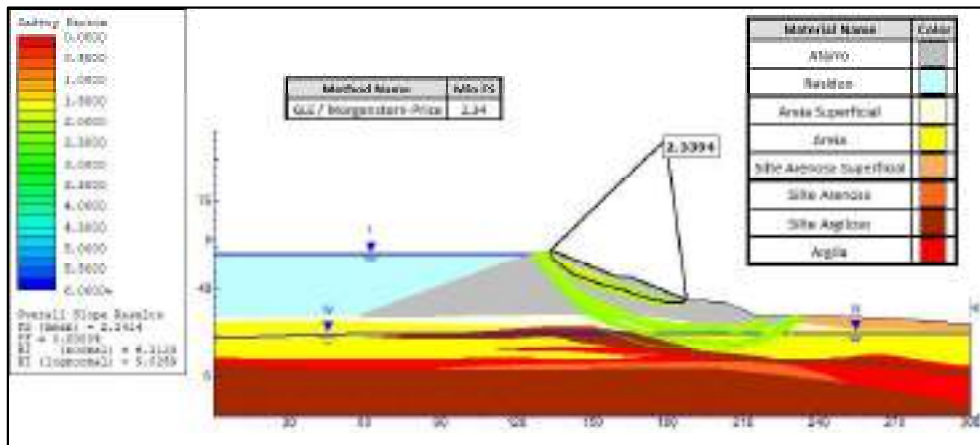
Figura 181 - Resultado da Seção H-H - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



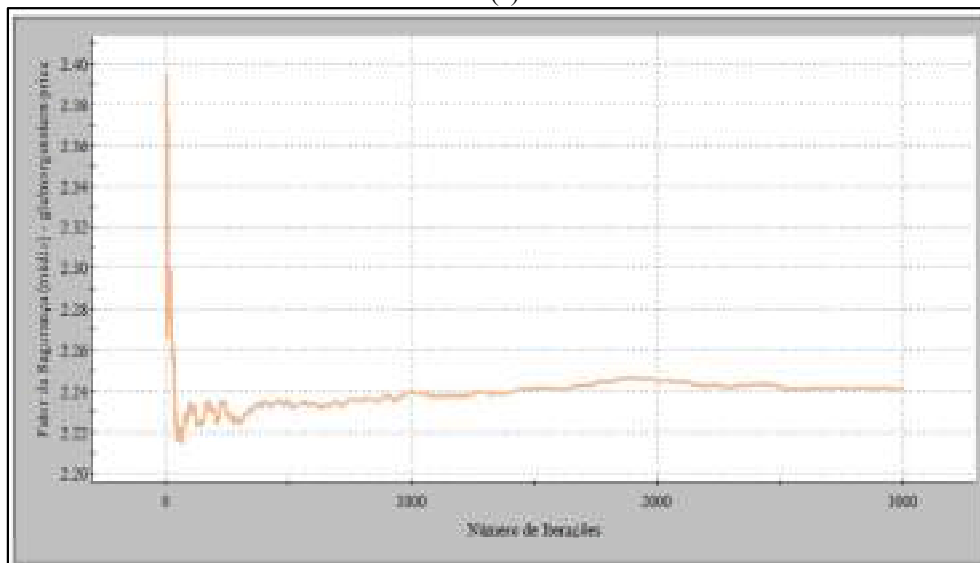
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

### 5.8.6 Operação Normal – Não drenado

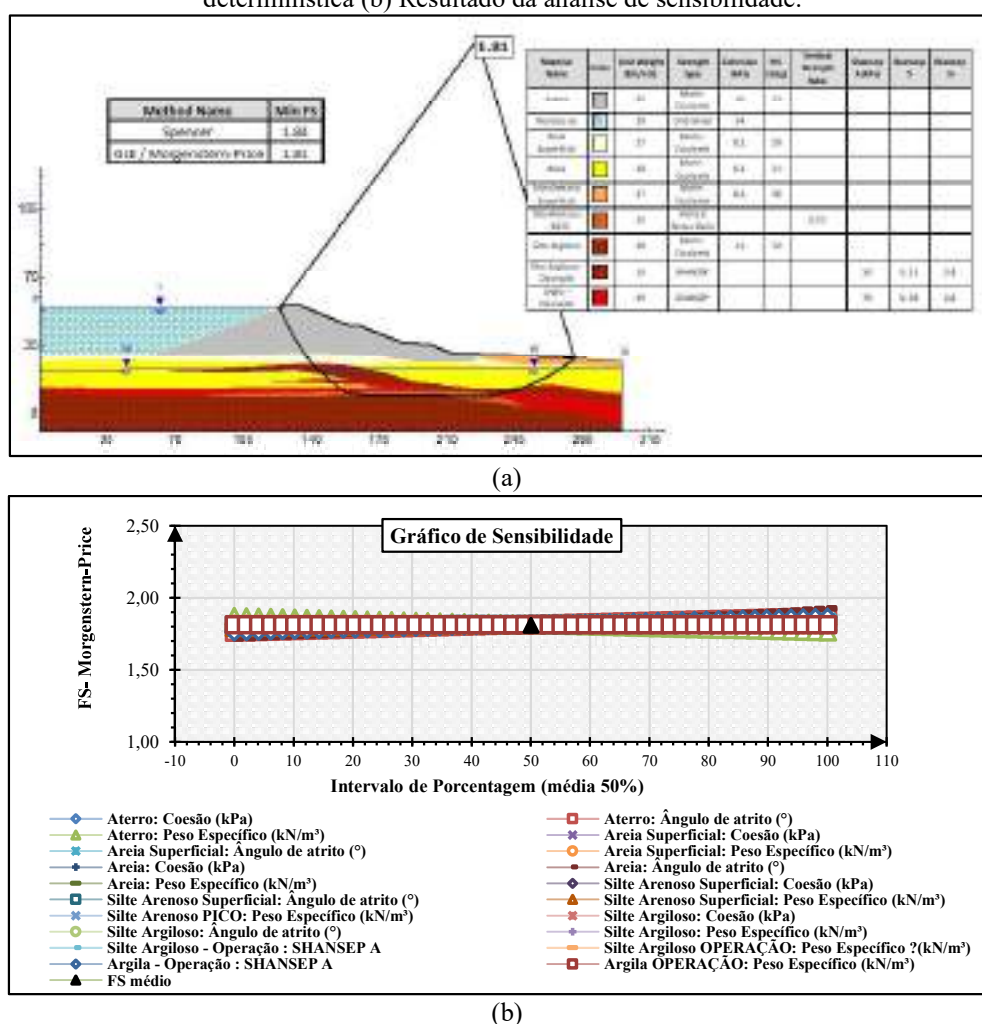
Os resultados encontrados para a fase de operação em condição normal não-drenada são apresentados nas Figura 182 e Figura 183.

Na condição não drenada, conforme ilustrado na Figura 182-(a), observa-se uma redução no FS. Essa diminuição pode ser atribuída à presença de água entre as partículas sólidas, interferindo na capacidade de resistência dos materiais. Nota-se ainda que a localização da SPR acaba se alterando, passando a incluir alguns materiais da fundação. Considerando que em condições não drenadas, a liberação do excesso de poropressão é dificultada, verifica-se, nesse contexto, que a superfície potencial tenderá a interceptar as camadas em que essa condição é mais acentuada. No entanto, observa-se que SPR acaba não englobando a camada extensa de material silte-argiloso. Tal comportamento pode ser justificado devido a esse tipo

de material ser classificado pelos boletins de sondagens como materiais de consistência rija a muito rija.

A partir destas condições, a análise determinística apresentou um FS de 1,81, conforme ilustra a Figura 182-(a), sendo este inferior ao obtido pela condição drenada, porém superior ao mínimo exigido pela NBR 13028/17. No que se refere aos resultados da Figura 182-(b), observa-se que o FS apresenta uma leve variação a mudanças no ângulo de atrito da camada de areia, e em menor magnitude, aos parâmetros de resistência da camada de aterro compactado.

Figura 182 - Resultado da Seção H-H- Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.

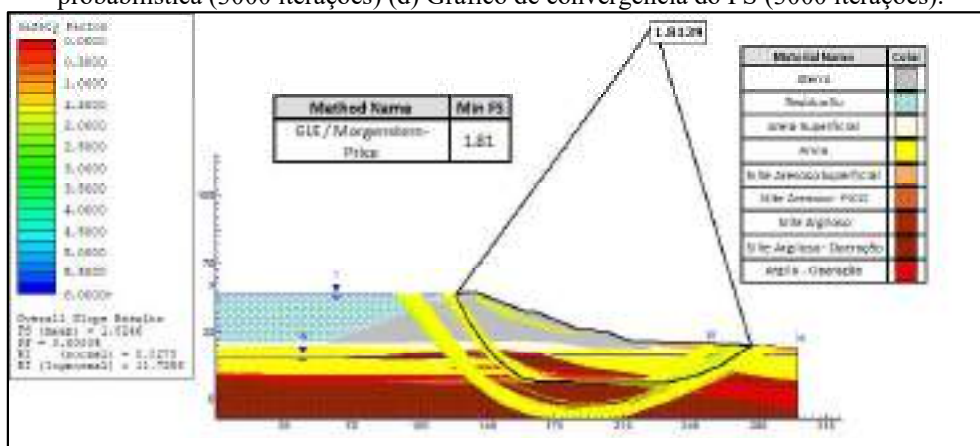


Fonte: Autora (2023)

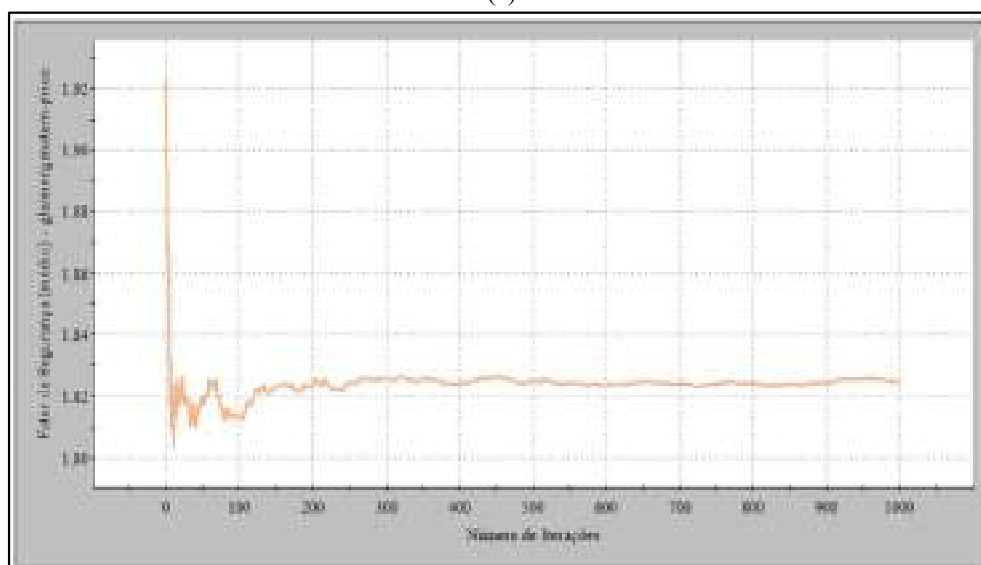
Em relação aos resultados probabilísticos apresentados na Figura 183-(a) e 183-(c), observa-se pouca variação no FS probabilístico em comparação com o resultado determinístico, fixando-se em torno de 1,82. Adicionalmente, a Pr para 1000 e 3000 iterações permaneceu em 0%, acompanhada por índices de confiabilidades mínimos variando entre 8,83 (valor normal) e 11,73 (valor log-normal). Esses parâmetros revelam um comportamento

estável do talude jusante da seção H, em conformidade com os critérios definidos pela USACE (1997). No que tange a convergência dos resultados, as curvas apresentadas nas Figuras 183-(b) e 183-(d), revelam um padrão estável dos resultados a partir de 1000 iterações.

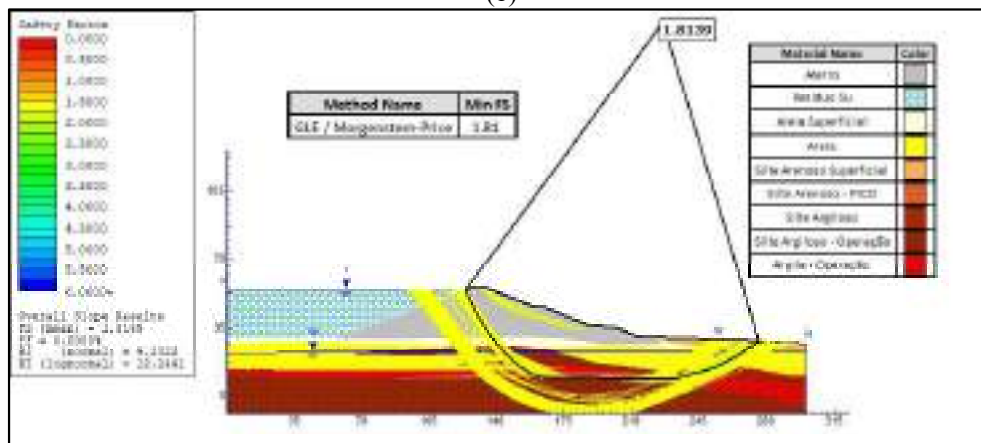
Figura 183 - Resultado da Seção H-H- Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



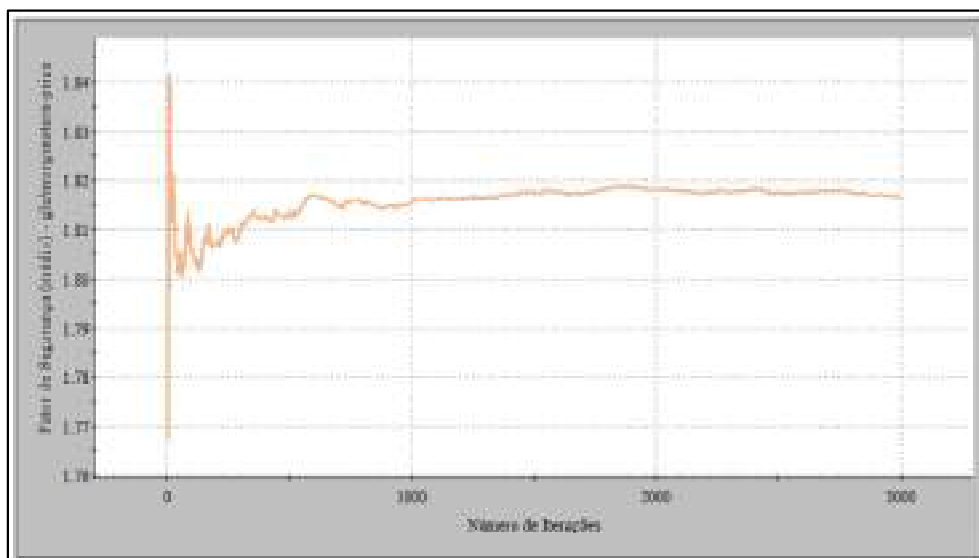
(a)



(b)



(c)



(d)

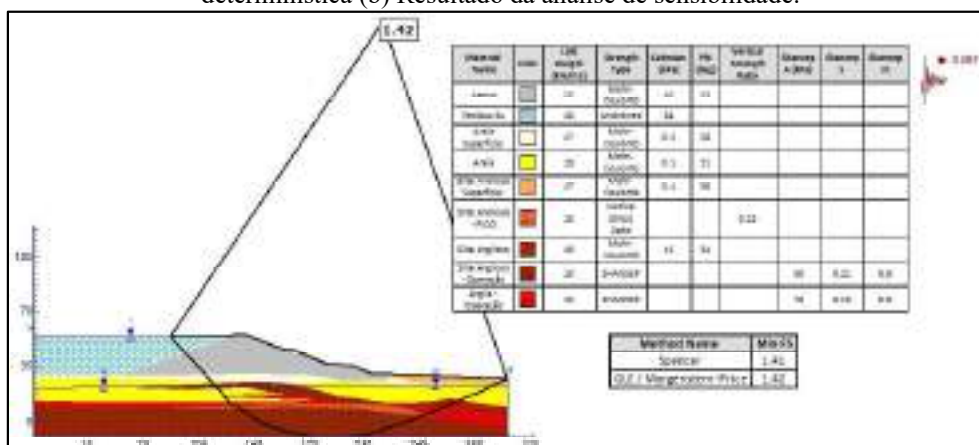
Fonte: Autora (2023)

### 5.8.7 Solicitação Pseudoestática

Os resultados encontrados para as três condições de solicitação pseudoestática são apresentados nas Figuras 184 a 189.

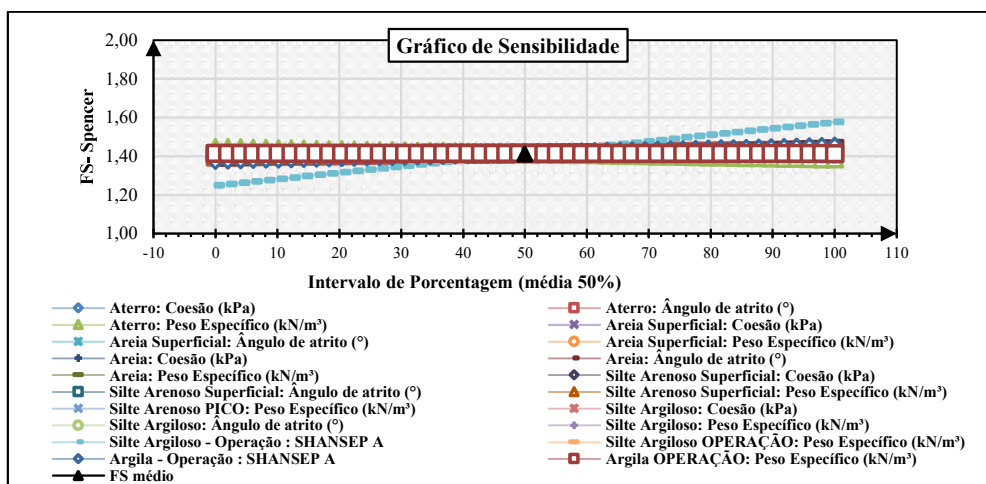
Ao analisar a Figura 184-(a), observa-se que o FS determinístico, calculado para a condição de solicitação pseudoestática com carregamento horizontal, atingiu o valor de 1,42, sendo este considerado adequado pela NBR 13028/17. No que se refere ao resultado da análise de sensibilidade, apresentada na Figura 184-(b), observa-se que o FS é variável às alterações da resistência não-drenada da camada de silte-argiloso.

Figura 184 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)





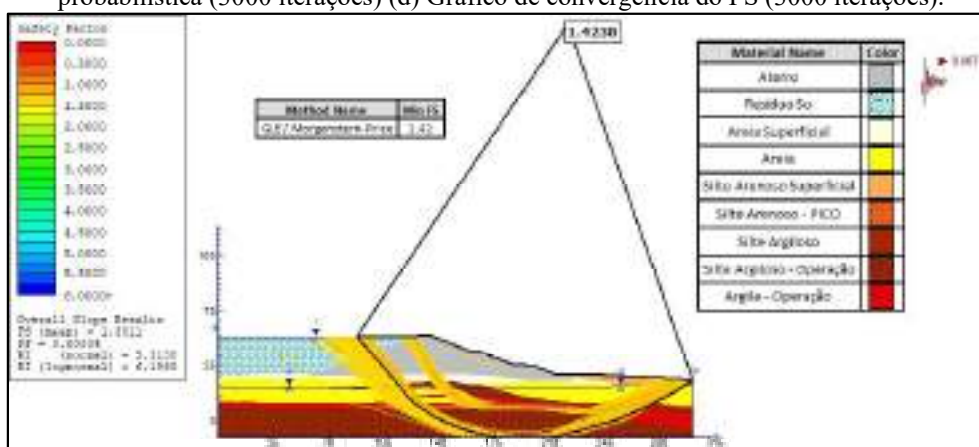
(b)

Fonte: Autora (2023)

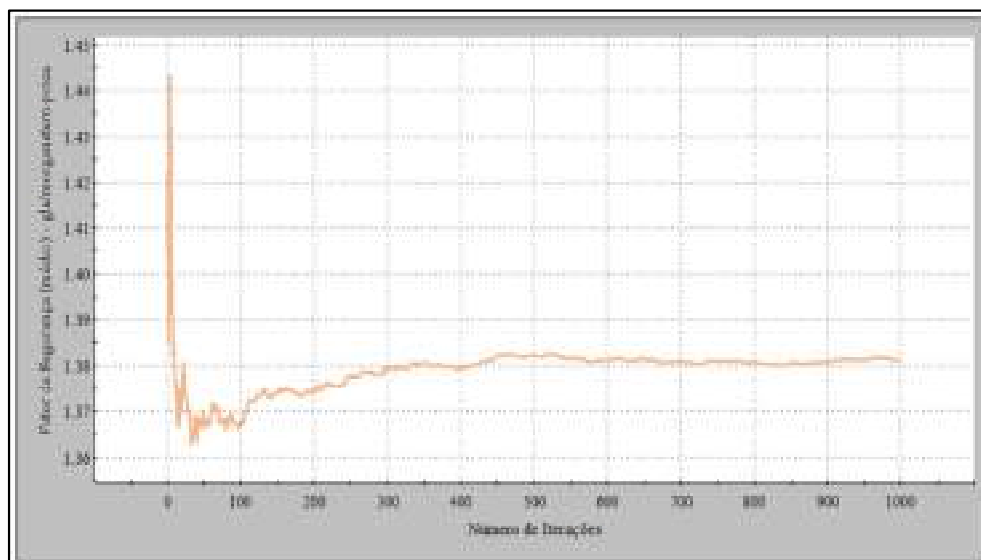
Em relação aos resultados da análise probabilística, observa-se pelas Figuras 185-(a) e 185-(c), que o FS médio encontrado foi igual a 1,38. As Pr encontradas foram nulas para ambos os números de iterações, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 5,31 (valor normal) a 8,20 (valor log-normal). No que diz respeito às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 185-(b) e 185-(d), observa-se uma tendência a estabilização dos resultados a partir de 1000 iterações. Com base nos resultados apresentados pela abordagem probabilística, nota-se parâmetros considerados adequados e em conformidade com o estabelecido pela USACE (1997), classificando o nível de desempenho do talude como satisfatório.

Neste sentido, é possível inferir que tanto pela abordagem determinística, quanto pela probabilística, o talude consegue manter seu equilíbrio considerando as condições as quais este foi avaliado.

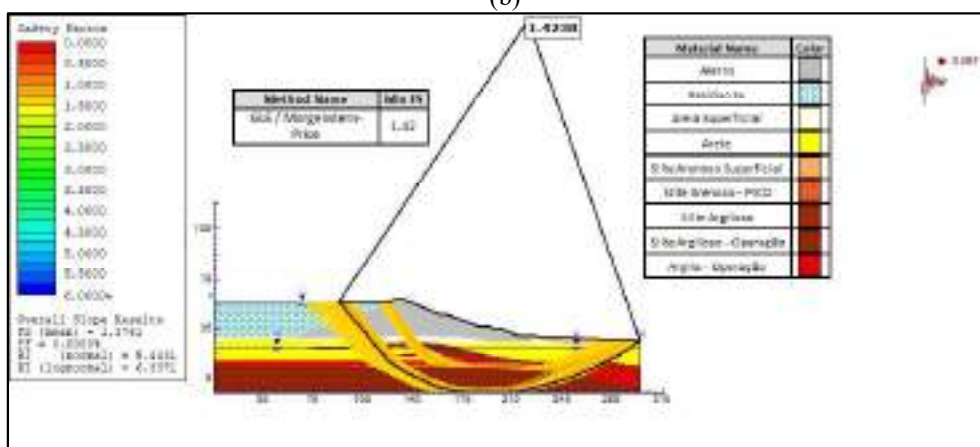
Figura 185 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



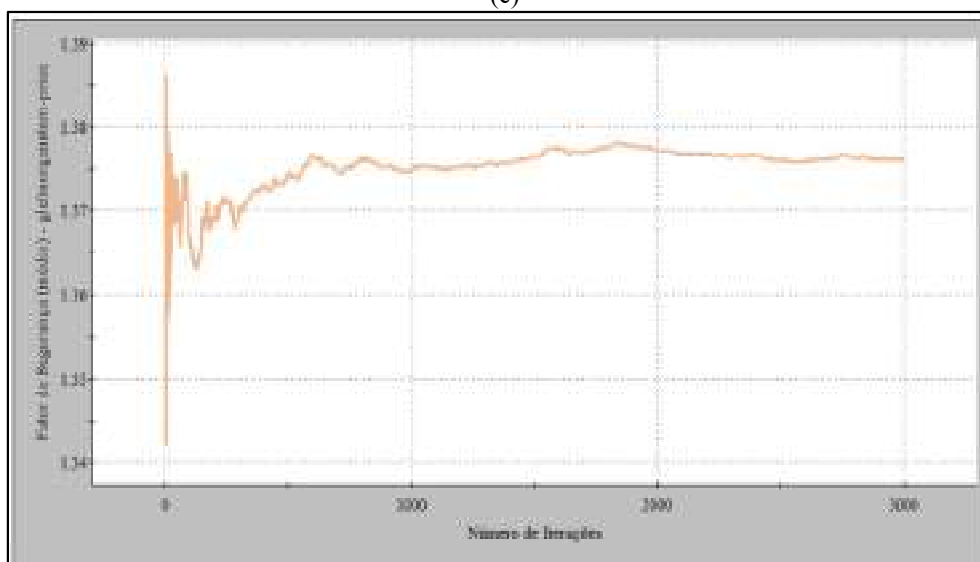
(a)



(b)



(c)



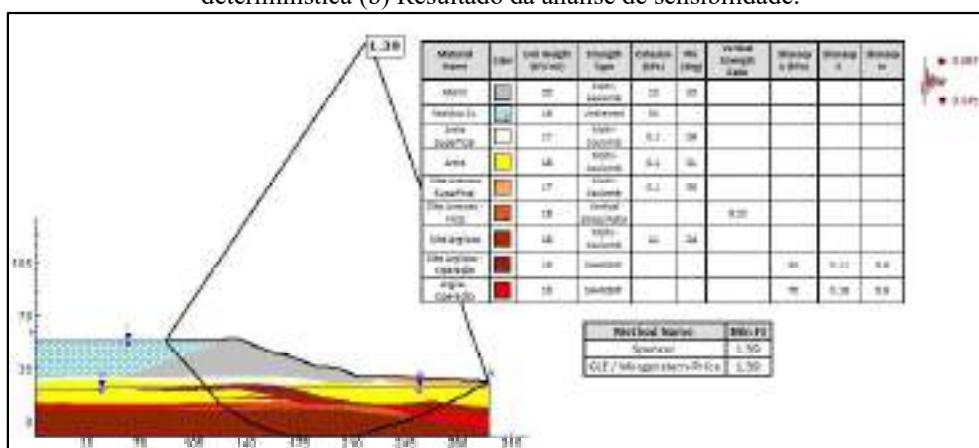
(d)

Fonte: Autora (2023)

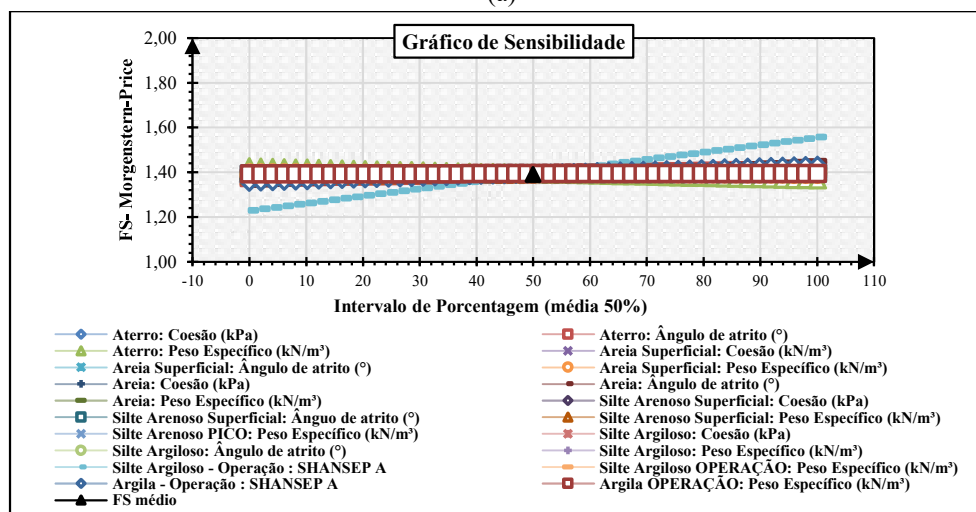
Ao introduzir carregamentos verticais ao sistema, observa-se que o menor FS determinístico encontrado foi igual a 1,39, conforme pode ser visto nas Figuras 186-(a) e 187-

(a). Em relação as análises de sensibilidade, observa-se pelas Figuras 186-(b) e 187-(b), que ambos os FS sofrem variações devido a alterações da resistência não-drenada da camada de silte argiloso, camada está de maior espessura na geometria da seção H. No que se refere a estabilidade, para ambos os cenários de carregamento, os taludes permanecem estáveis a ocorrência de sollicitação pseudoestáticas, de acordo com a abordagem determinística.

Figura 186 - Resultado da Seção H-H - Sollicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



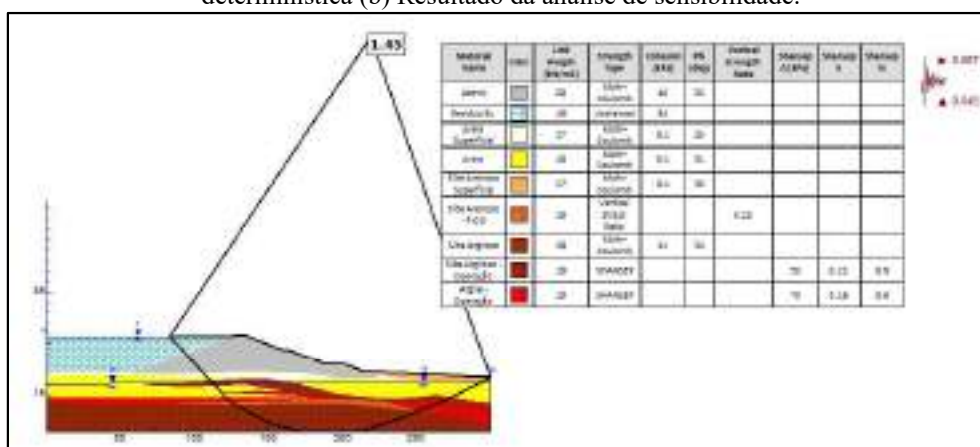
(a)



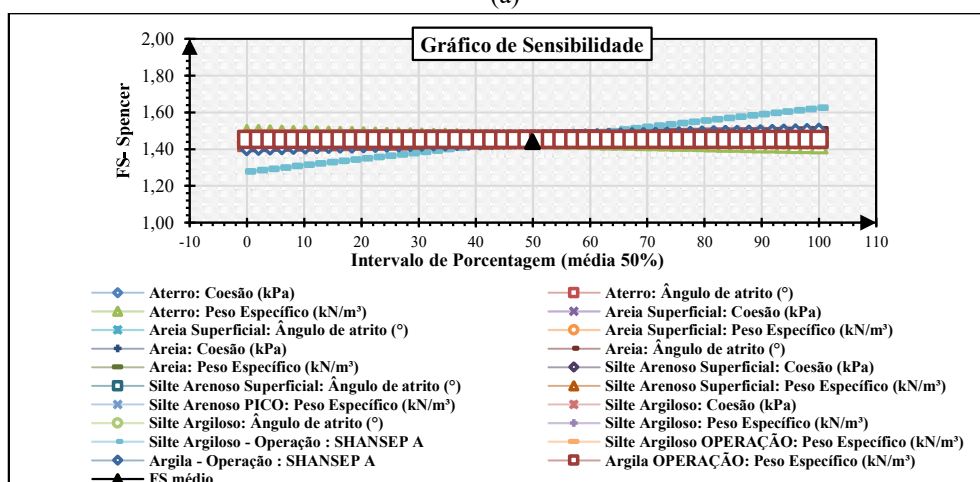
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 187 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



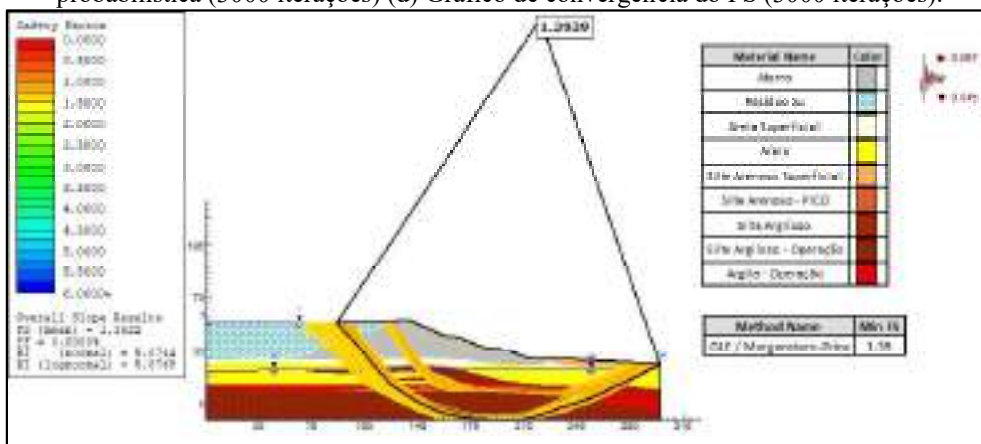
(b)

Fonte: Autora (2023)

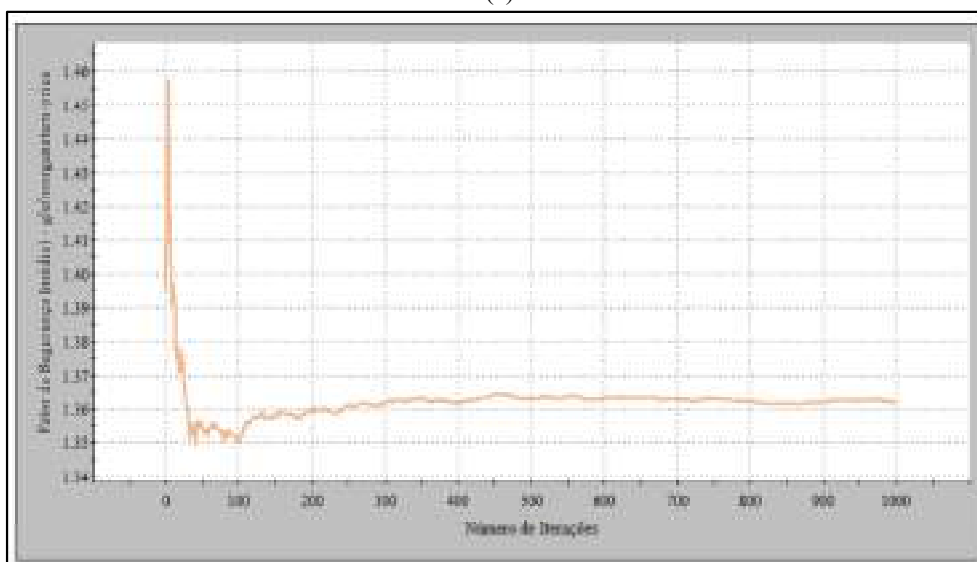
Com relação aos resultados probabilísticos, apresentados nas Figuras 188-(a), 188-(c), 189-(a) e 189-(c), destaca-se que, nas duas condições de carregamento analisadas, o menor FS probabilístico encontrado foi igual a 1,36 ao longo de 1000 e 3000 iterações. Adicionalmente, constatou-se que as Pr foram nulas, enquanto os índices de confiabilidade variaram entre 5,07 (valor normal) a 6,58 (valor log-normal). No que diz respeito às curvas de convergência exibidas nas Figuras 188-(b), 188-(d), 189-(b) e 189-(d), nota-se uma tendência a estabilização dos resultados a partir de 1000 iterações.

Ao analisar os resultados probabilísticos obtidos e considerando os limites mínimos estabelecidos pela USACE (1997), é possível inferir que, sob uma perspectiva probabilística, que o talude da seção H mantém-se estável diante de ambas as condições de carregamento pseudoestáticas.

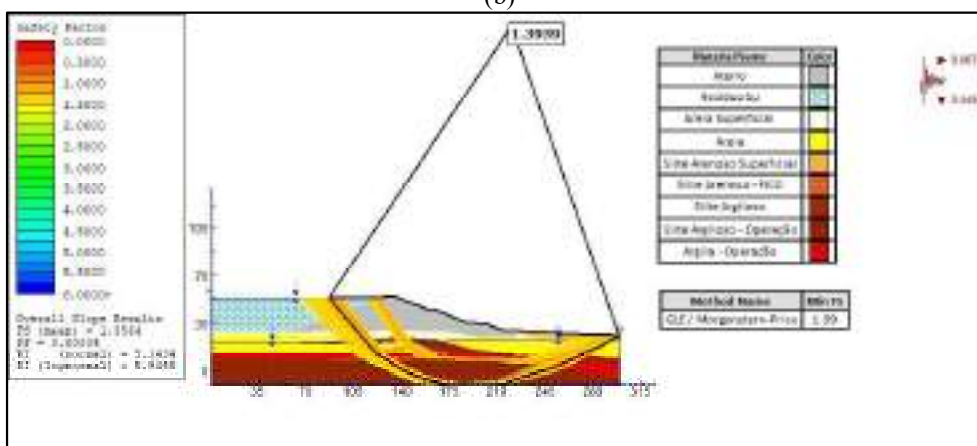
Figura 188 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



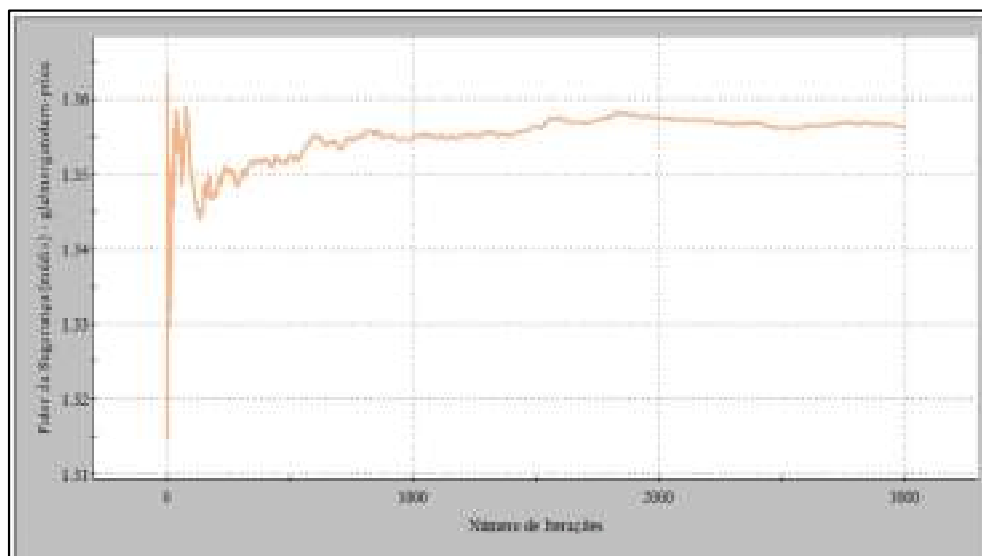
(a)



(b)



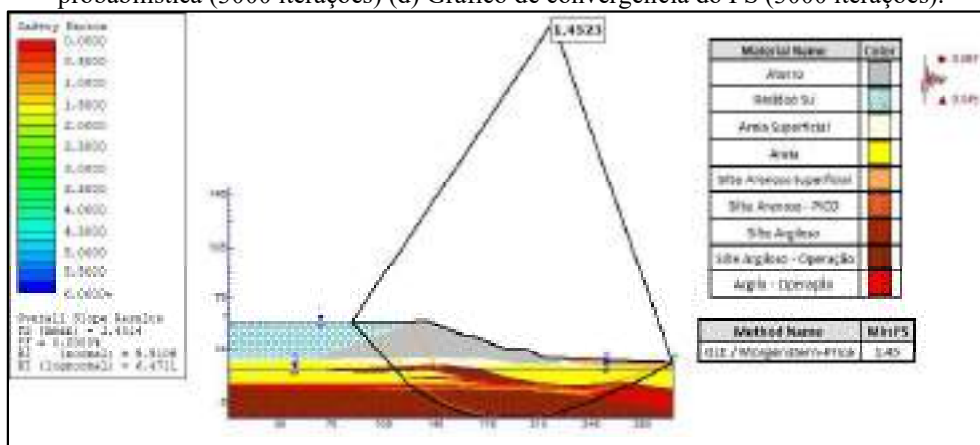
(c)



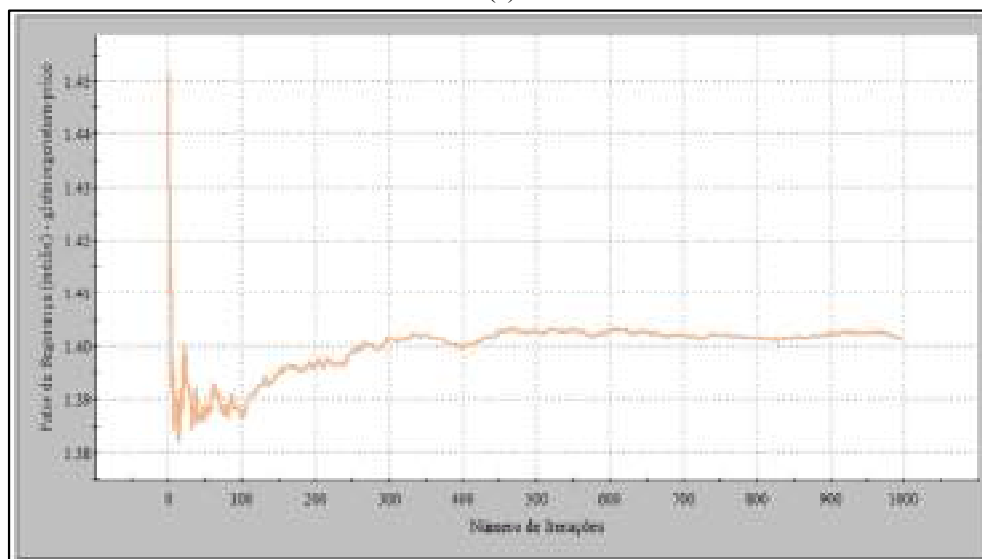
(d)

Fonte: Autora (2023)

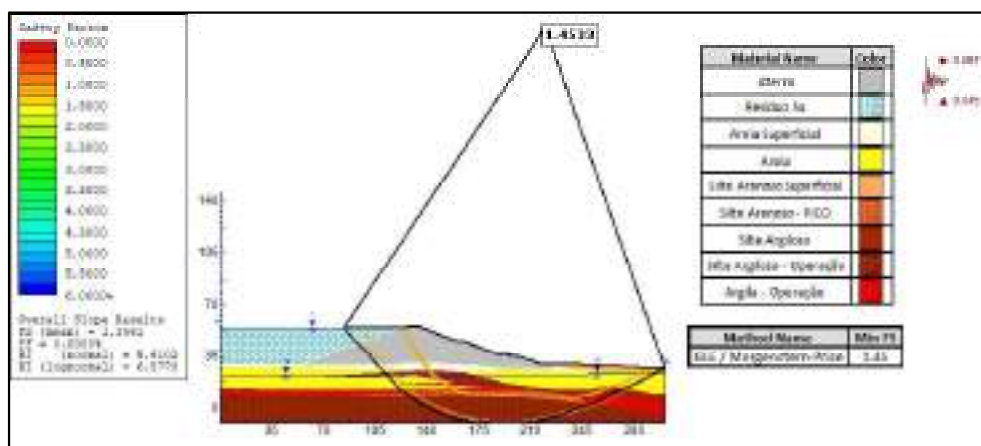
Figura 189 - Resultado da Seção H-H - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



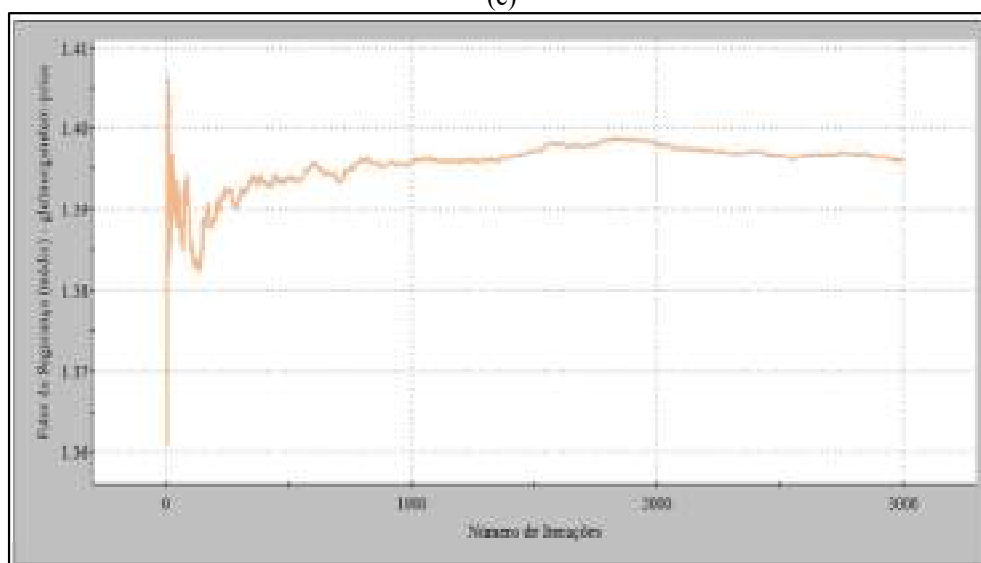
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

### 5.8.8 Solicitação pós-sísmica

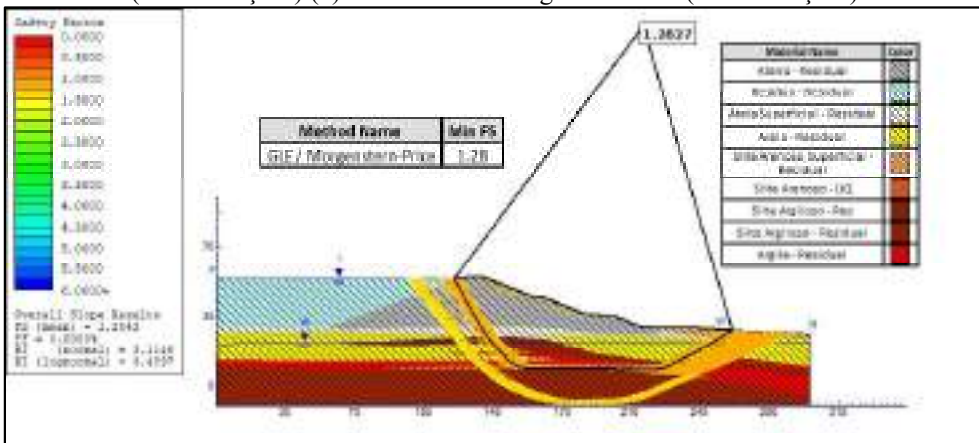
A avaliação da estabilidade para uma condição pós-sísmica também foi estudada, sendo seus resultados apresentados nas Figuras 190 e 191.

Avaliando os resultados da Figura 190-(a), nota-se uma redução do FS determinístico, assumindo valor igual a 1,28 para a condição pós-sísmica, estando em conformidade com o valor mínimo estabelecido pela ANCOLD (2012). Esse comportamento se deve a redução dos parâmetros geotécnicos em resposta ao carregamento sísmico, fazendo com que os materiais operem com seus valores residuais. Em relação ao resultado da análise de sensibilidade apresentada na Figura 190-(b), destaca-se que o FS é influenciado em maior magnitude pela variação do ângulo de atrito da camada de areia.

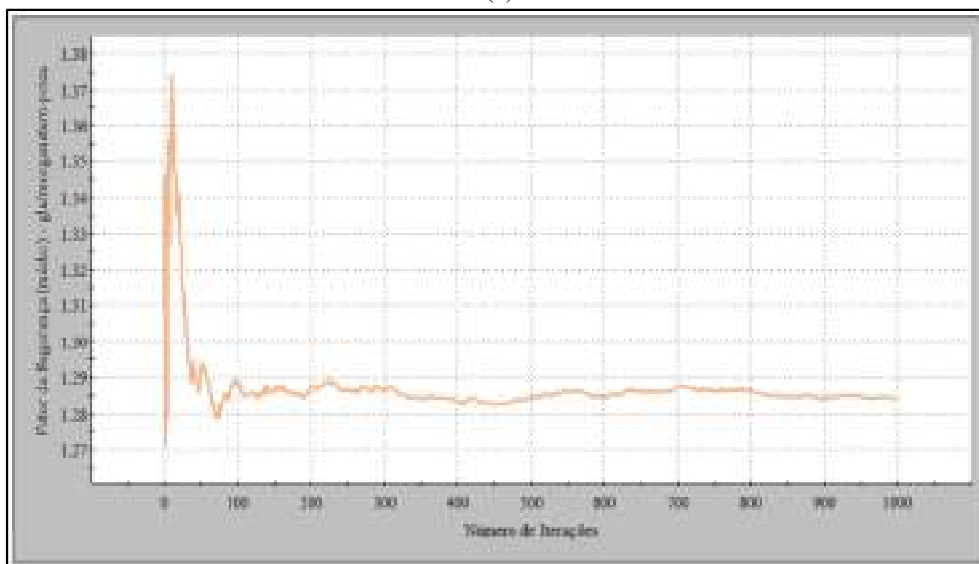




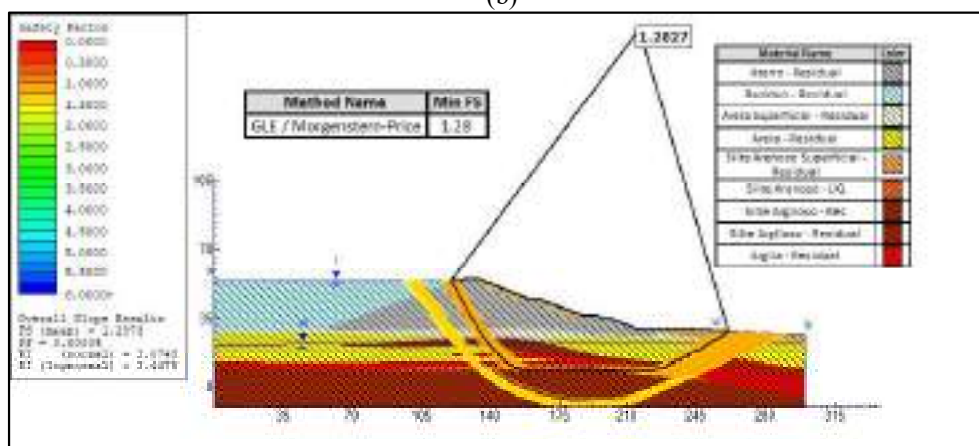
Figura 191 - Resultado da Seção H-H - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



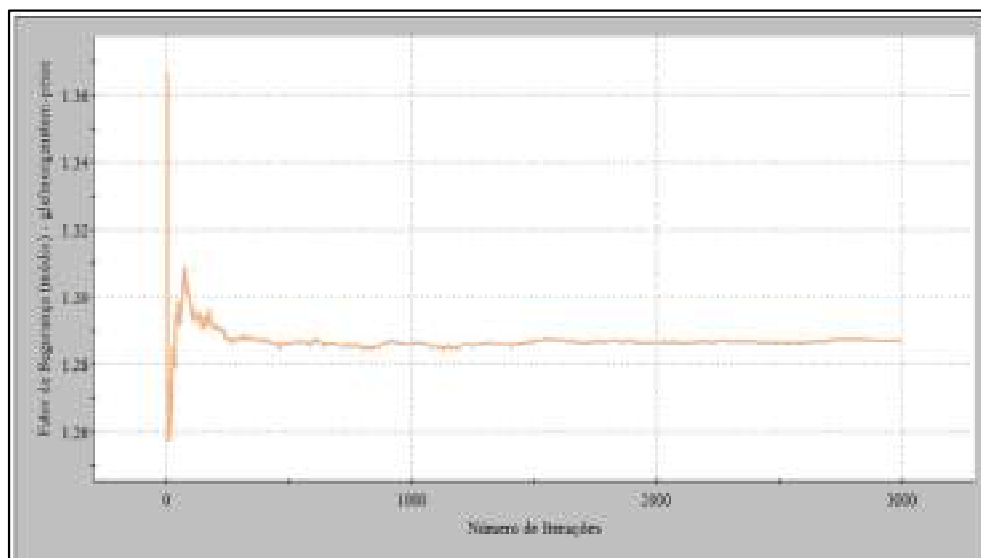
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 27, estão organizados os resultados encontrados a partir da aplicação da análise probabilística para a seção H, considerando um número de iterações variado entre 1000 e 3000. Ao examinar a tabela e utilizar os valores de referência do item 3.8, é possível inferir que os taludes da seção H demonstraram estabilidade diante das dez condições de carregamentos avaliados, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística. No entanto, assim como as demais seções que já foram analisadas, é importante adotar precauções adicionais em relação ao cenário de solicitação pós-sísmica, uma vez que seus índices de confiabilidade foram significativamente inferiores aos dos demais cenários.

Tabela 27 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção H-H.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				3000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,84	1,79	0	7,68	10,12	1,79	0	7,80	10,26
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,69	1,63	0	5,26	6,62	1,63	0	5,29	6,66
Final de construção Sem Ru	J	1,3	1,77	1,76	0	9,38	12,25	1,75	0	9,54	12,44
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,70	1,67	0	7,86	10,04	1,68	0	7,99	10,21
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,34	2,26	0	6,55	9,55	2,24	0	6,21	9,03
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	1,81	1,82	0	8,83	11,73	1,82	0	9,23	12,24
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,42	1,38	0	5,31	6,20	1,38	0	5,44	6,34
			1,39	1,36	0	5,07	5,88	1,36	0	5,14	5,95
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,45	1,40	0	5,51	6,47	1,40	0	5,61	6,58
			1,28	1,28	0	3,11	3,49	1,29	0	3,07	3,45

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

## 5.9 SEÇÃO I

Para verificar o desempenho da seção I, análises determinística, de sensibilidade e probabilística foram realizadas. Os resultados desses estudos encontram-se apresentados da Figura 192 a 211.

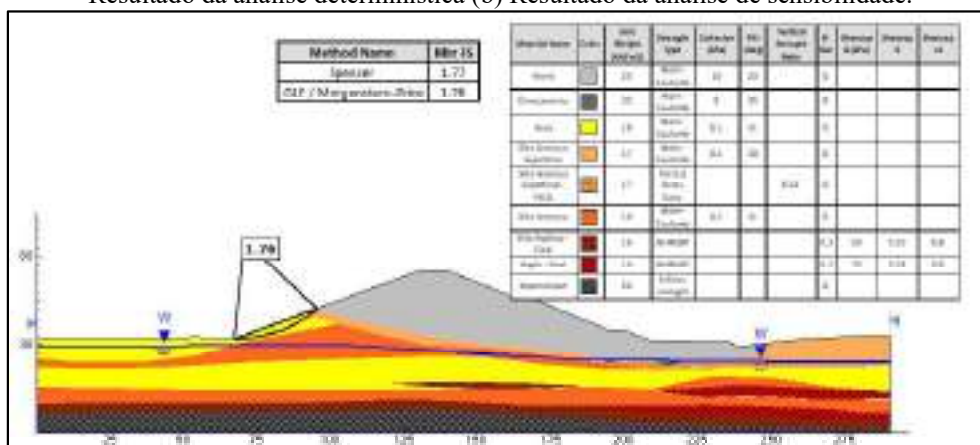
### 5.9.1 Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru

Os resultados das análises para a fase final de construção do talude montante, desconsiderando o parâmetro de poropressão (Ru) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 192 e 193.

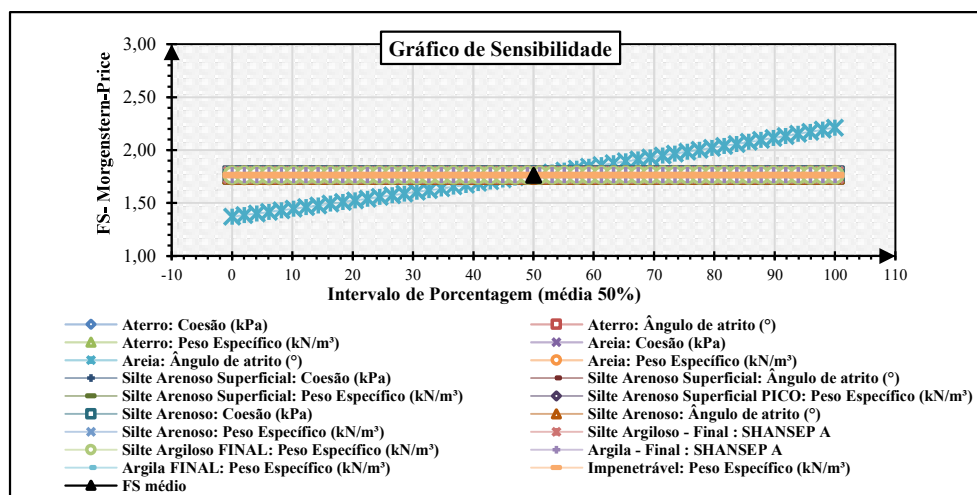
A fundação da seção I, conforme é mostrado na Figura 192-(a) é constituída por 7 camadas de materiais diferentes denominados de: areia, silte arenoso superficial, silte arenoso superficial pico, silte arenoso, silte argiloso final, argila final e uma camada impenetrável. Analisando o perfil dessa seção é possível observar que a fundação é constituída por uma grande quantidade de materiais com propriedades e comportamento diferentes. Além disso, o aterro compactado está assentado em uma fundação com uma espessura considerável de material arenoso com compactidade variando entre pouco compacta a compacta para camadas até 10 m.

Pela abordagem determinística, conforme demonstrado na Figura 192-(a), constatou-se que o menor FS encontrado para este cenário foi de 1,76, obtido pelo método de Morgenstern-Price. Sob uma perspectiva determinística, esse valor indica a estabilidade do talude, estando em conformidade com que é estabelecido pela NBR 13028/17. No que se refere a análise de sensibilidade, apresentada na Figura 192-(b), está revela que o FS é particularmente variável às alterações no ângulo de atrito da camada de areia, material no qual a SPR encontra-se inserida.

Figura 192 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

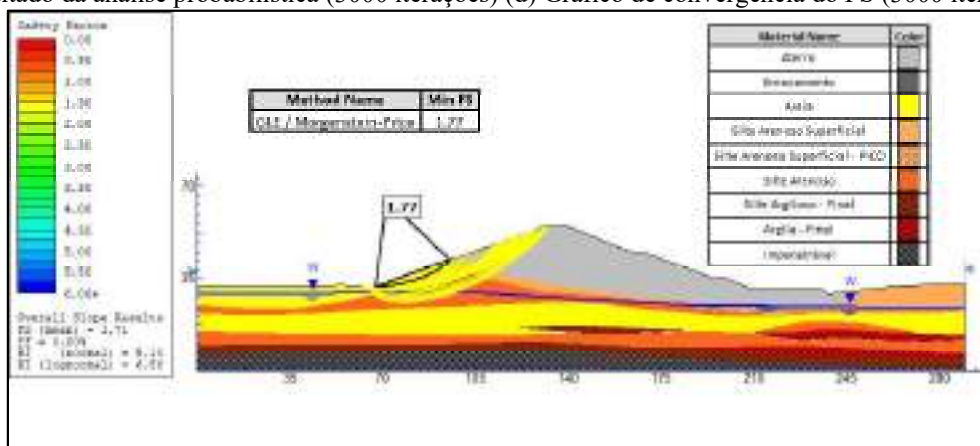
Fonte: Autora (2023)

Com base nos resultados apresentados na Figura 193-(a) e 193-(c), observa-se que o FS médio probabilístico foi igual a 1,71 para ambas as iterações, sendo este resultado próximo ao valor determinístico. Observa-se ainda que as Pr encontradas foram iguais a 0%, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 5,02 (valor normal) e 6,56 (valor log-normal), indicando que o talude montante apresenta um comportamento estável para essa condição tomando como referência os valores aceitáveis de desempenho da USACE (1997). Quanto as

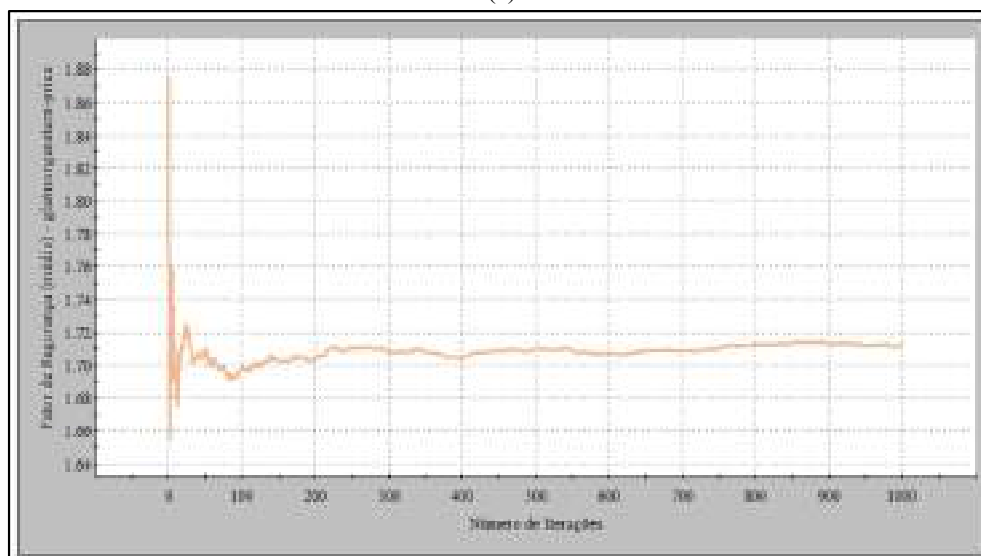
curvas apresentadas nas Figura 193-(b) e Figura 193-(d), é possível observa que os dados tendem a se estabilizando a partir de 1000 iterações.

Com fundamento nos resultados apresentados, e levando em consideração os valores estabelecidos como aceitáveis apresentado no item 3.8, é possível concluir que, no contexto desse cenário, o talude analisado se mantém estável.

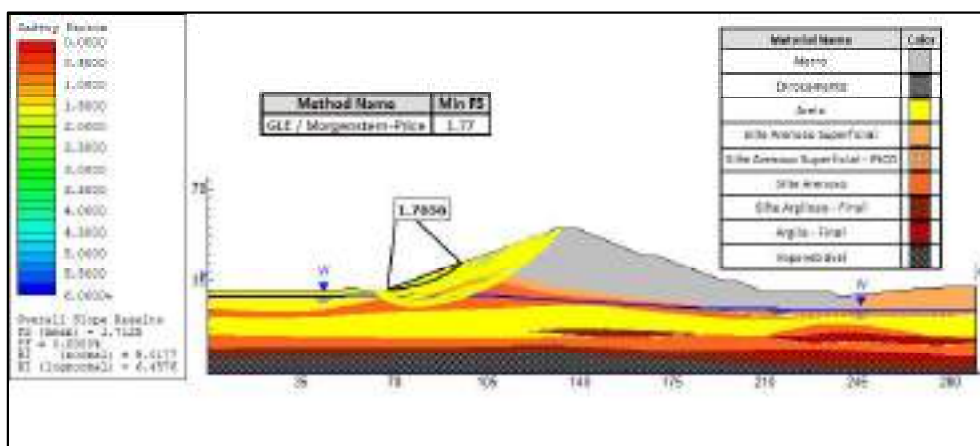
Figura 193 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)



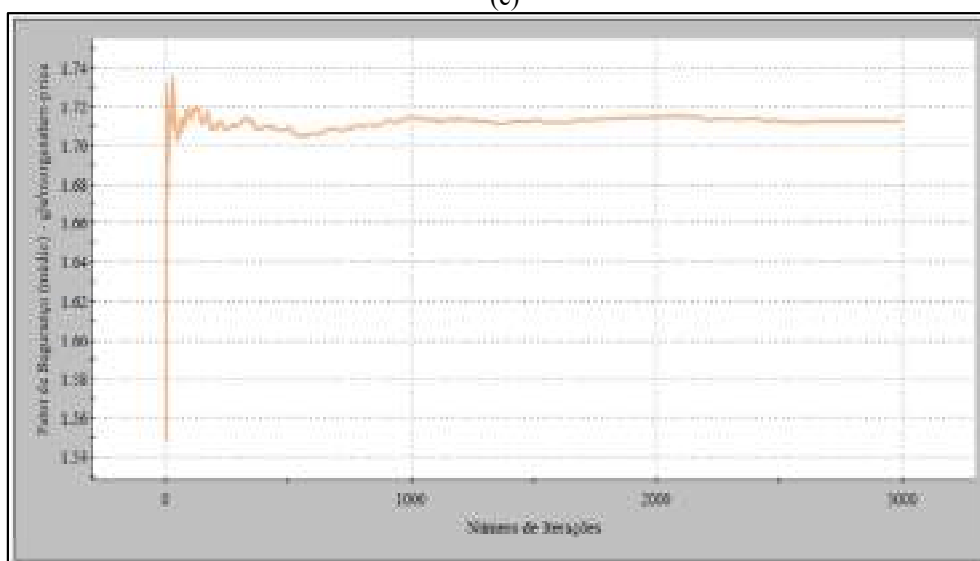
(a)



(b)



(c)



(d)

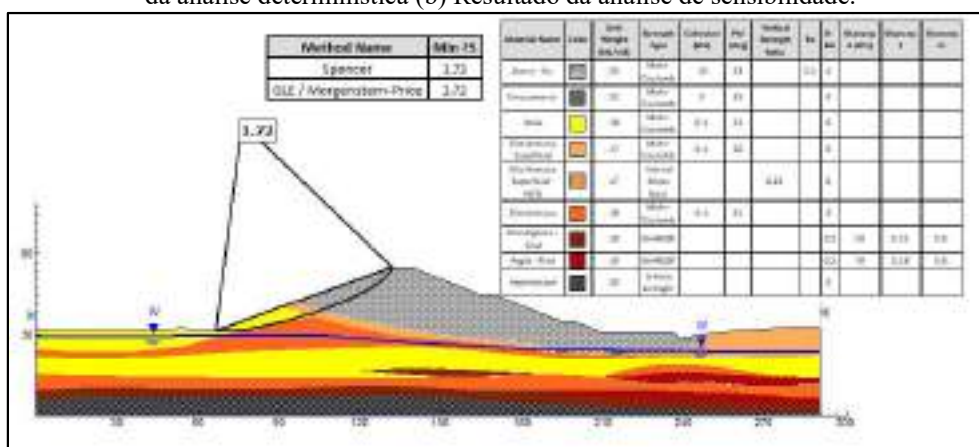
Fonte: Autora (2023)

### 5.9.2 Final de construção – Talude montante considerando Ru

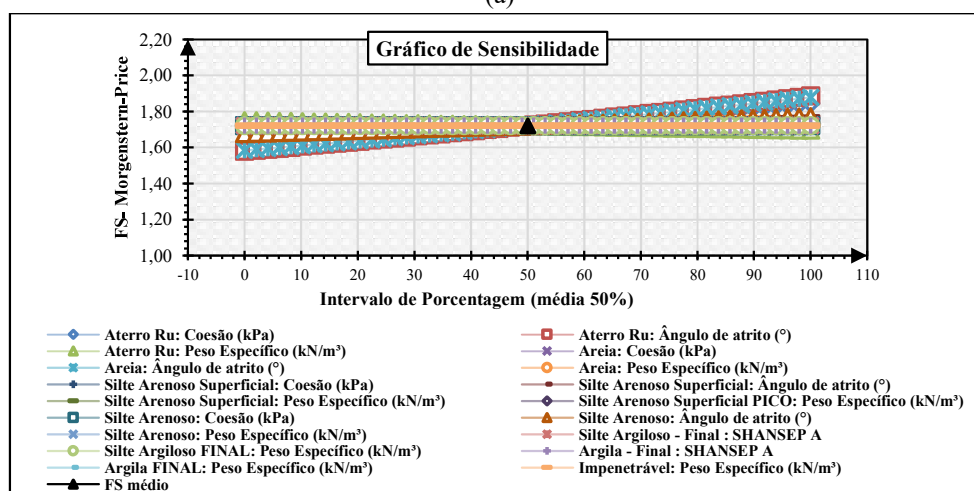
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude montante, considerando o parâmetro de propressão (Ru) na camada de aterro são apresentados nas Figuras 194 e 195.

Por meio da análise da Figura 194-(a), verifica-se que a SPR intercepta as camadas de aterro compactado, areia e silte arenoso superficial, resultando em um FS de 1,72 pelo método de Morgenstern-Price. Esse valor supera o limite mínimo estabelecido para esta condição de 1,3 de acordo com a NBR 13028/2017, indicando, assim a estabilidade do talude. No que concerne às análises de sensibilidade, os resultados da Figura 194-(b), mostram que os parâmetros que mais impactam o FS são o ângulo de atrito e a coesão do aterro compactado, bem como o ângulo de atrito da camada de areia.

Figura 194 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

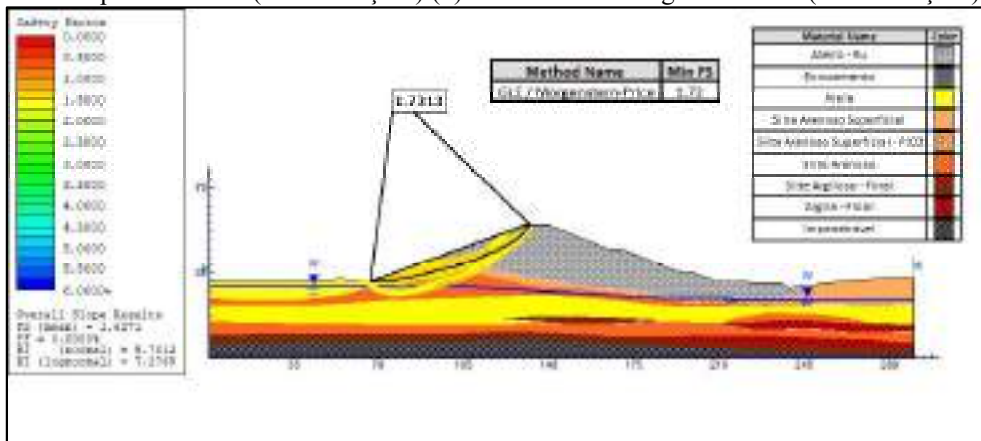


(b)

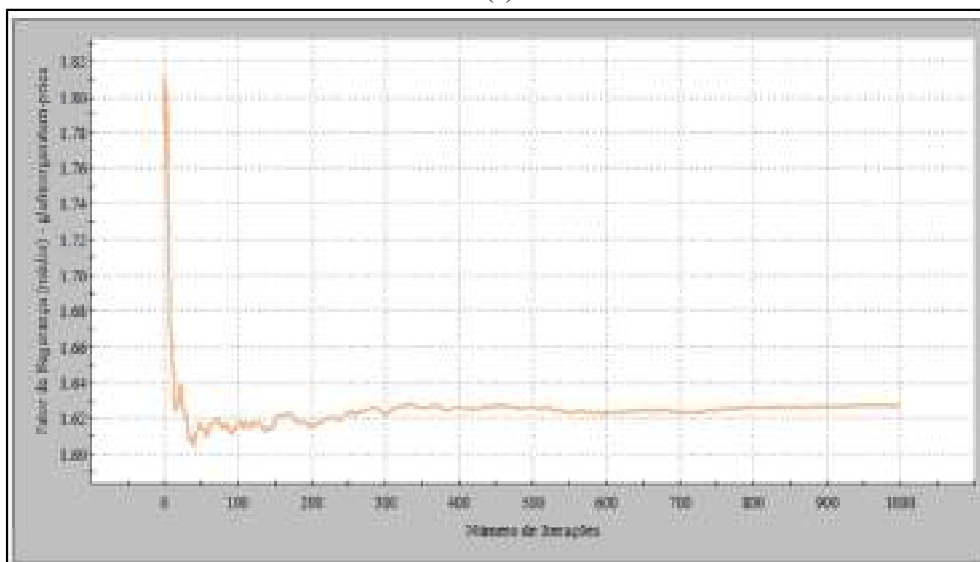
Fonte: Autora (2023)

Ao adotar uma perspectiva probabilística, a Figura 195-(a) revela que o FS probabilístico foi igual 1,63 para ambas as iterações, sendo inferior ao obtido pela abordagem determinística. Adicionalmente, foi encontrado para ambas as iterações uma Pr nula, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 5,60 (valor normal) a 7,04 (valor log-normal). Ao considerar os critérios de desempenho definidos pela USACE (1997), conforme exposto no item 3.8, o talude é classificado como de alto desempenho, não exibindo, nas condições de avaliação, quaisquer indícios de instabilidade.

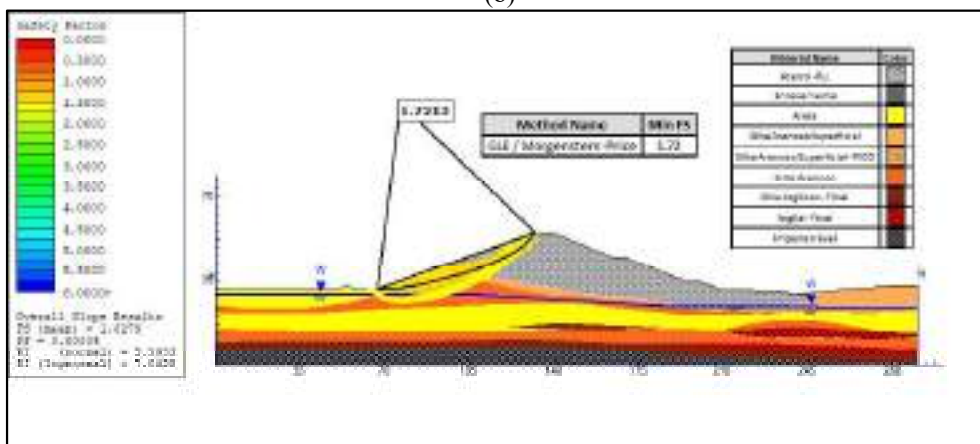
Figura 195 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude montante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)



(a)

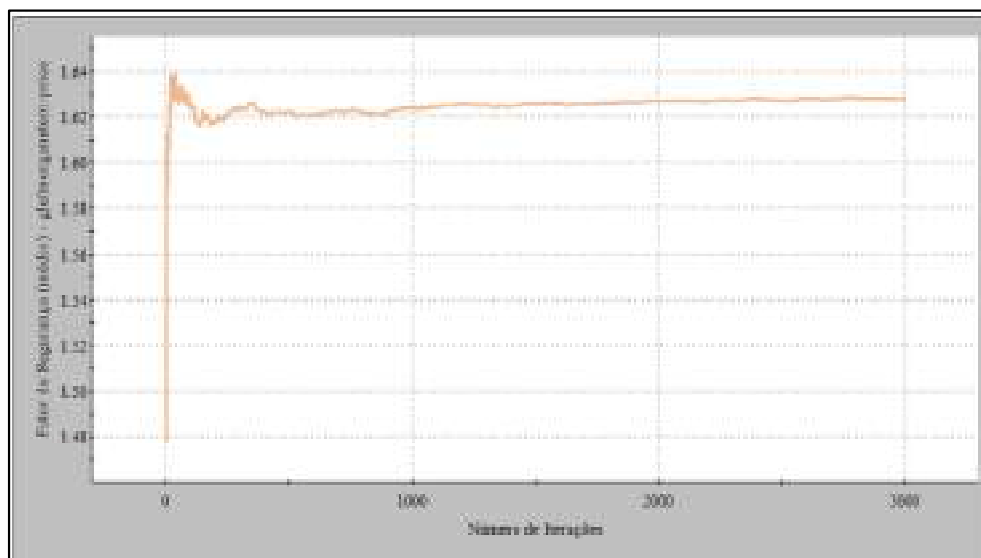


(b)



(c)





(d)

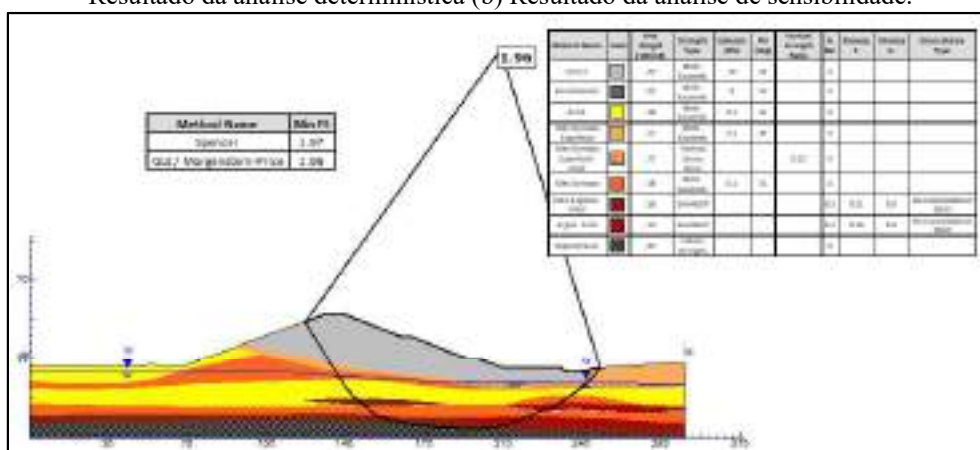
Fonte: Autora (2023)

### 5.9.3 Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru

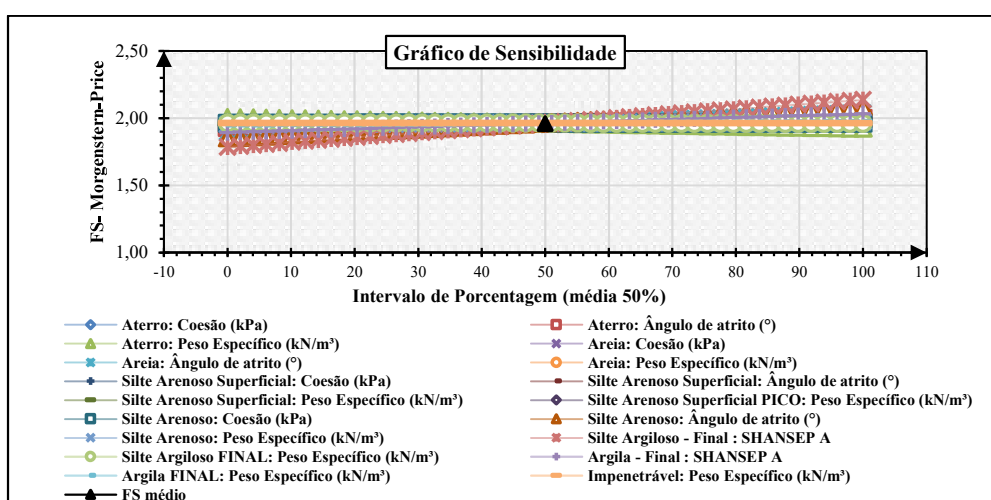
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude jusante, desconsiderando o parâmetro de poropressão ( $R_u$ ) na camada de aterro são exibidos nas Figuras 196 e 197.

Com base na Figura 196-(a), pode-se observar que o FS mínimo determinístico encontrado foi igual a 1,96, obtido pelo método de Morgenstern-Price, sendo este superior ao limite estabelecido pela NBR 13028/17 de 1,3. Observando a localização da SPR, nota-se que ela intercepta todas as camadas de materiais, tanto do aterro quanto da fundação. Contudo, ao realizar uma análise de sensibilidade foi notado, assim como é exibido na Figura 196-(b), que o FS se torna mais variável a mudanças dos parâmetros das camadas de silte argiloso (Resistência não-drenada), silte arenoso (ângulo de atrito), areia (coesão e ângulo de atrito), argila (resistência não-drenada) e aterro (ângulo de atrito). Os únicos parâmetros que não foram notadas qualquer tipo de influência significativa, foram os referentes à camada de silte arenoso.

Figura 196 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)

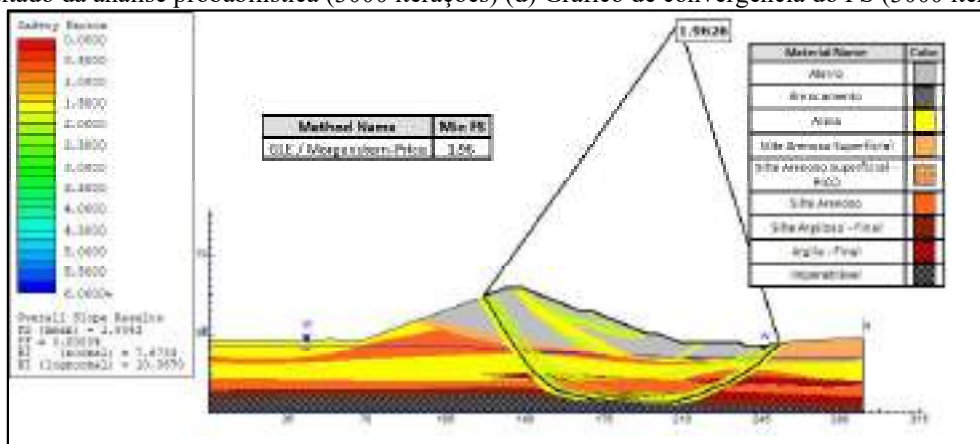


(b)

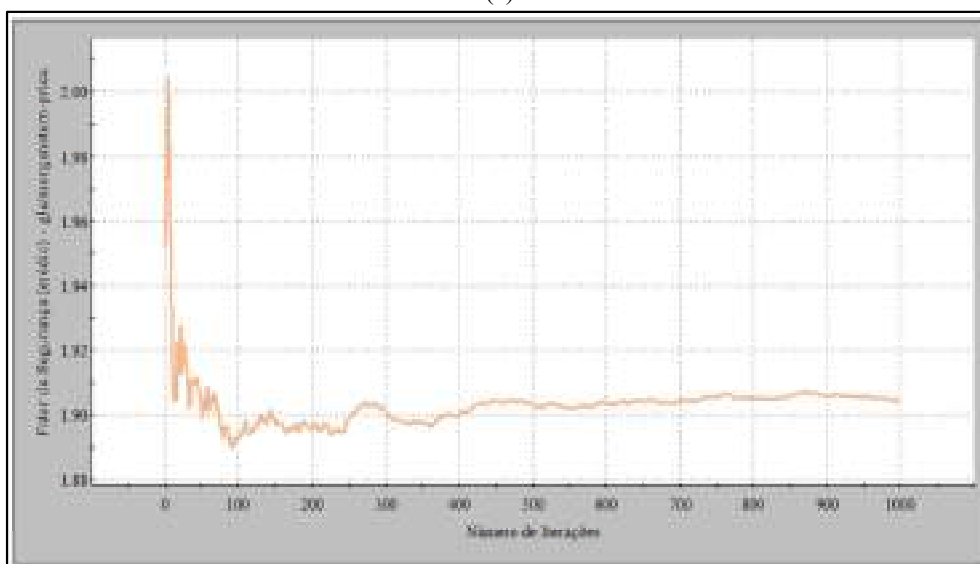
Fonte: Autora (2023)

No que concerne, aos resultados da aplicação probabilística, observa-se pela Figuras 197-(a) e 197-(c), que o FS médio probabilístico encontrado foi de 1,90, para ambas as iterações testadas. Quanto às Pr, estas foram nulas. Os índices de confiabilidade mínimos, por sua vez, sofreram variações entre 7,67 (valor normal) a 10,39 (valor log-normal), classificando o talude com nível de desempenho satisfatório conforme estabelece a USACE (1997). Com base nos resultados encontrados, não existe indícios de que, nas condições em que o talude foi avaliado, de instabilidade. Quanto às curvas de convergência, as Figuras 197-(b) e 197-(d), revelam que os resultados da abordagem com até 3000 simulações, tende a estabilizar a partir de 1000 iterações.

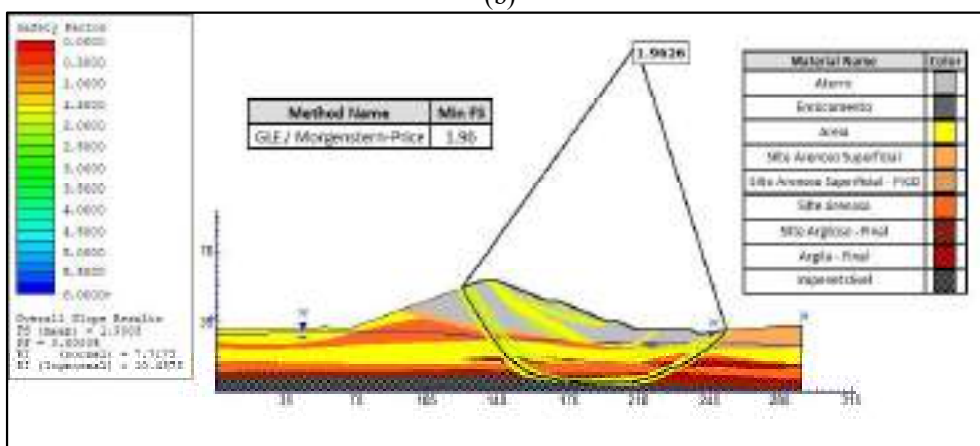
Figura 197 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante desconsiderando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)



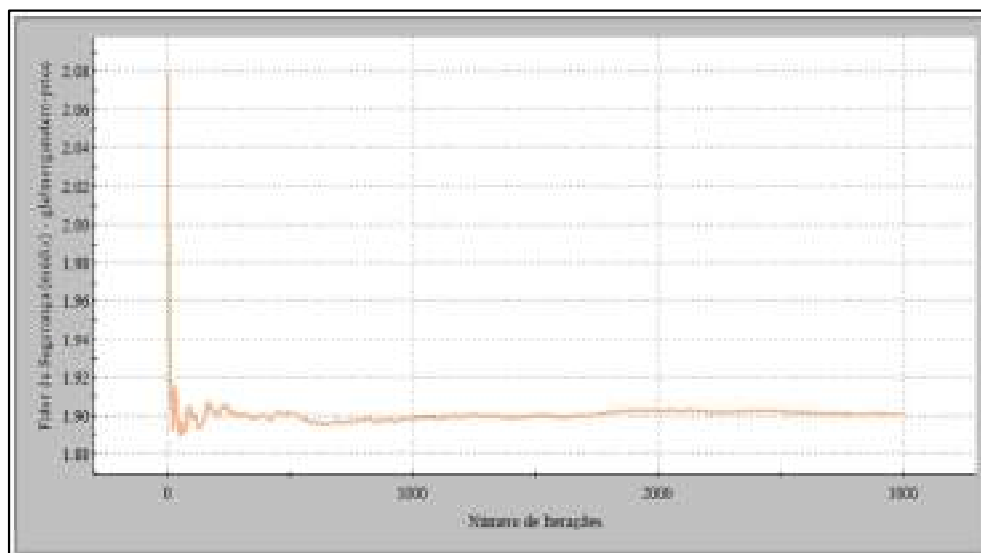
(a)



(b)



(c)



(d)

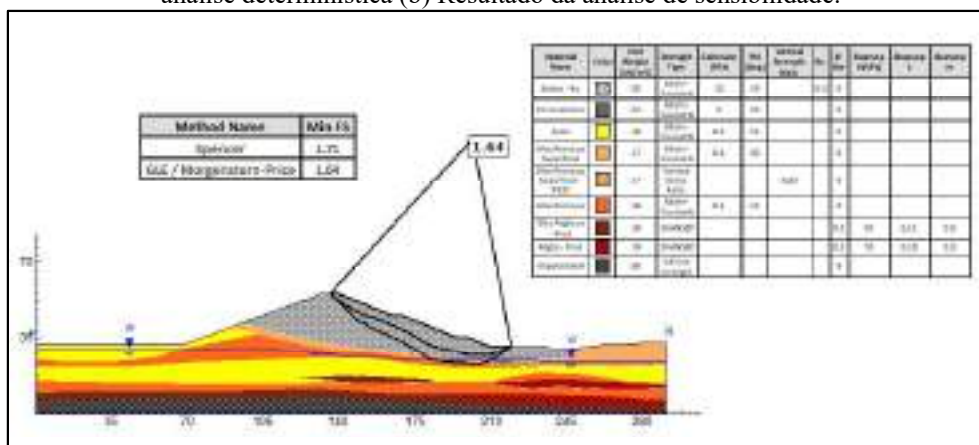
Fonte: Autora (2023)

#### 5.9.4 Final de construção – Talude jusante considerando Ru

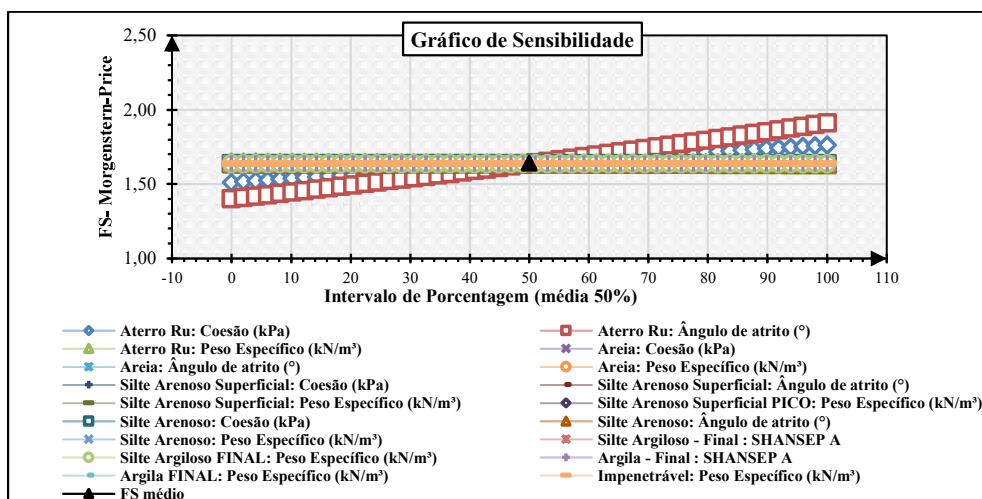
Os resultados das análises para a fase final de construção do talude jusante, considerando o parâmetro de propressão ( $R_u$ ) na camada de aterro são exibidos nas Figuras 198 e 199.

Ao analisar os resultados determinístico da Figura 198-(a), observa-se que o FS obtido foi igual a 1,64 encontrado pelo método de Morgenstern-Price, sendo este acima do valor mínimo admissível pela NBR 13028/17. Diferente da condição anterior a localização da SPR se limita apenas as camadas do aterro compactado e de silte arenoso superficial. No entanto, ao realizar uma análise de sensibilidade, verificou-se assim como é ilustrado na Figura 198-(b), que o FS sofre maiores variações quando se altera a coesão e o ângulo de atrito da camada de aterro compactado.

Figura 198 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



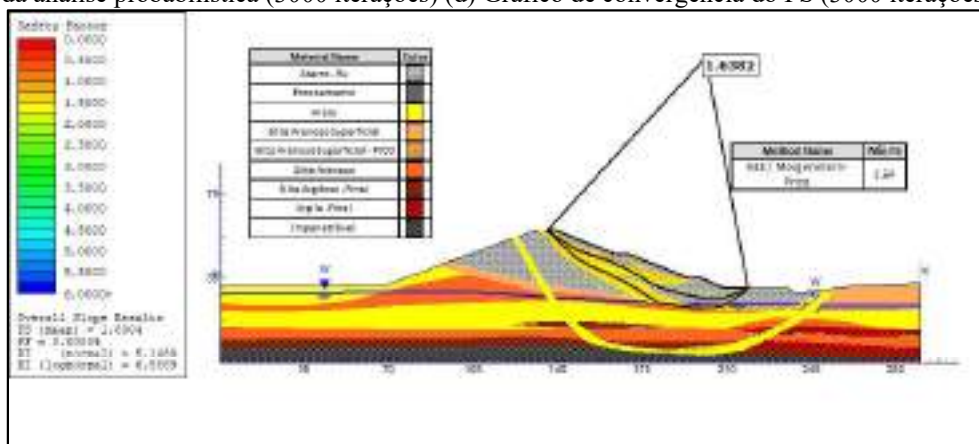
(b)

Fonte: Autora (2023)

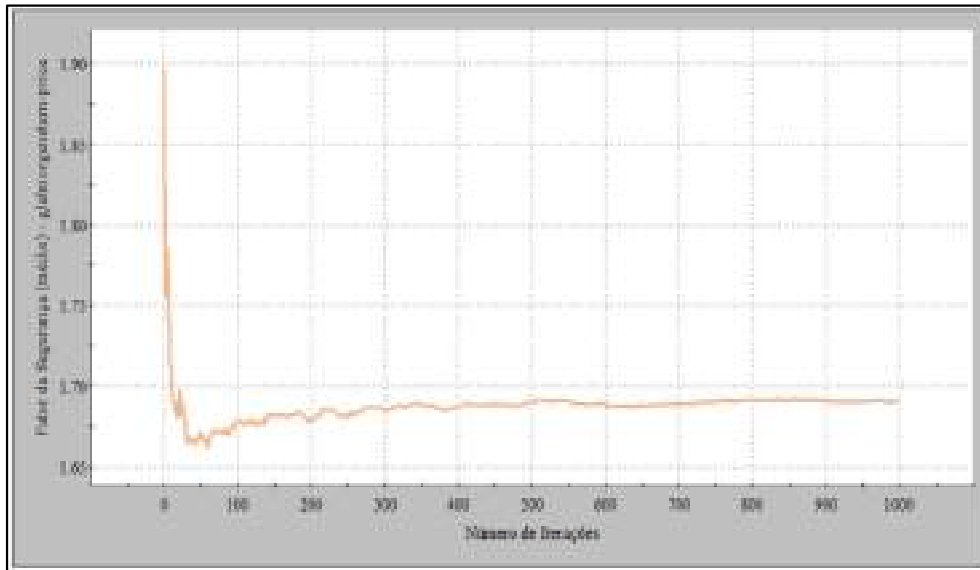
Com relação aos resultados da abordagem probabilística, apresentados nas Figuras 199-(a) e 199-(c), é possível observar que o FS foi igual a 1,69 para ambas as iterações testadas. Em relação aos resultados complementares do método probabilístico, foram encontradas Pr nulhas, com índices de confiabilidade mínimos variando entre 4,98 (valor normal) a 6,37 (valor log-normal). Quanto às curvas de convergência, apresentadas nas Figuras 199-(b) e 199-(d), observou-se que para um número de 3000 iterações a estabilização dos resultados aconteciam após 1000 simulações.

Conforme os limites estabelecidos pela USACE (1997) o nível de desempenho do talude é classificado como alto, não havendo dessa forma, indícios de instabilidade do talude considerando as condições em que este foi analisado.

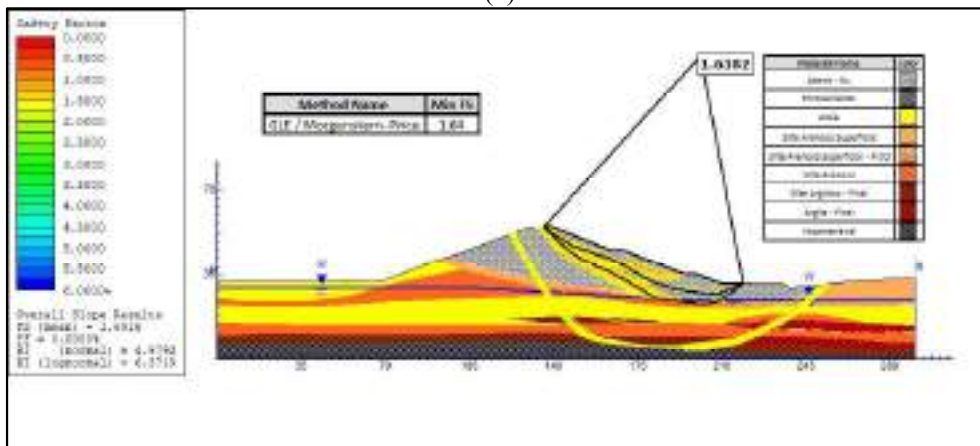
Figura 199 - Resultado da Seção I-I - Final de construção – Talude jusante considerando Ru (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



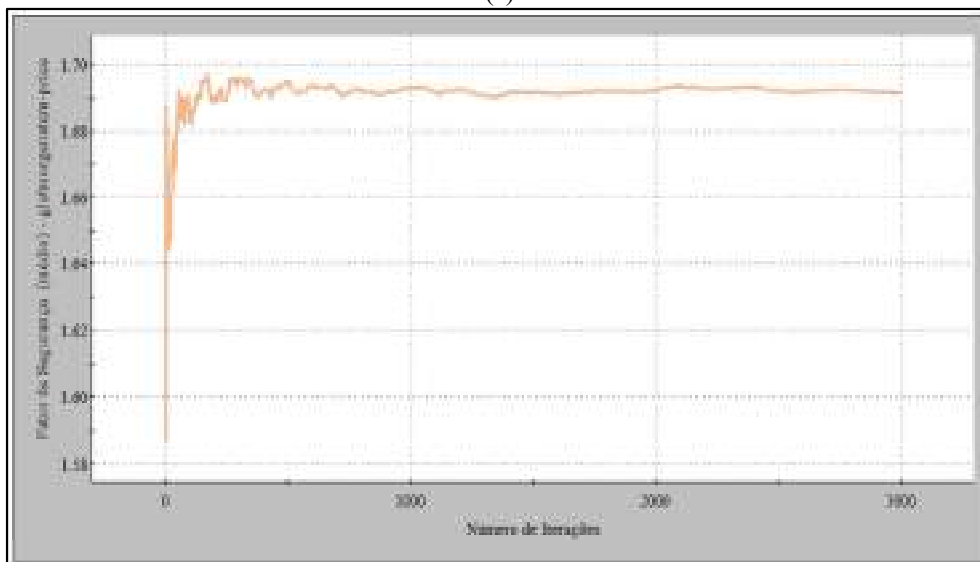
(a)



(b)



(c)



(d)

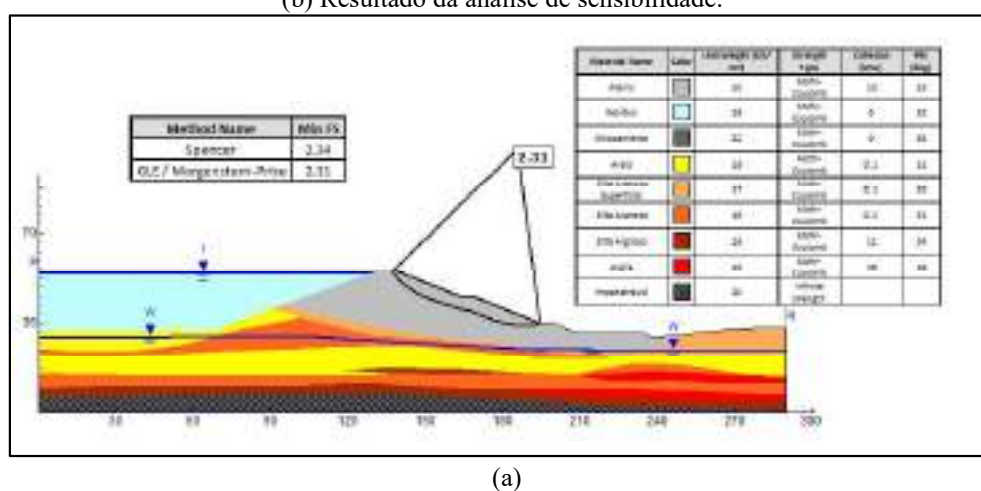
Fonte: Autora (2023)

### 5.9.5 Operação Normal – Drenado

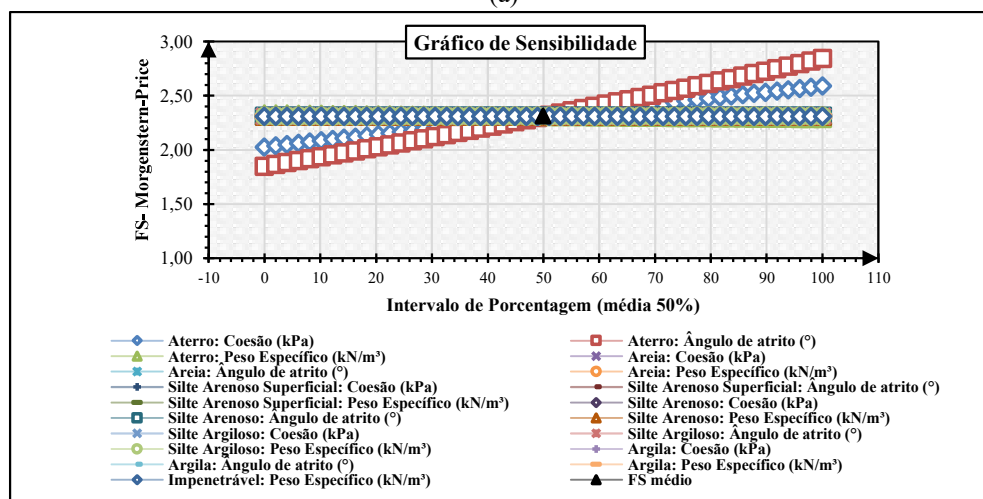
Os resultados das análises para a fase de operação, considerando a condição drenada dos materiais encontram-se expostos nas Figuras 200 e 201.

A partir da Figura 200-(a), é possível observar que o FS determinístico foi igual 2,31, sendo este superior ao mínimo admissível pela NBR 13028/17 de 1,5. Com relação aos resultados das análises de sensibilidade, é possível notar pela Figura 200-(b), que o FS é variável as alterações nos parâmetros de resistência da camada de aterro compactado. Deterministicamente, os resultados encontrados não apontam para um cenário de instabilidade.

Figura 200 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

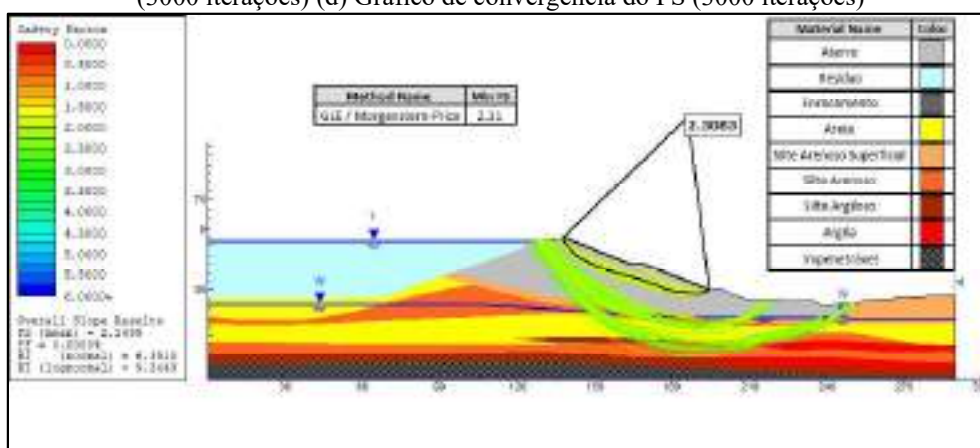
Fonte: Autora (2023)

No que concerne aos resultados probabilísticos, estes encontram-se apresentados nas Figuras 201-(a) e 201-(c). Observa-se por essas figuras que o menor FS probabilístico obtido foi de 2,23 para as análises com 3000 iterações. As Pr encontradas foram nulas, com índices de confiabilidade variando entre 6,07 (valor normal) a 8,80 (valor log-normal).

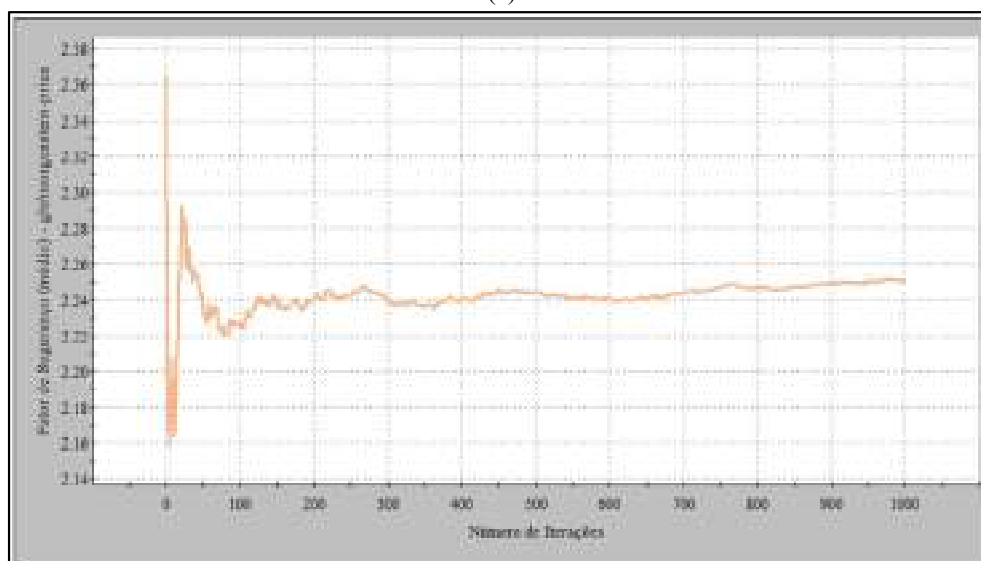
Probabilisticamente, os resultados encontrados não apontam para um cenário de instabilidade do talude jusante, sendo o talude classificado com nível de desempenho satisfatório conforme estabelece a USACE (1997).

Quanto aos resultados das curvas de convergência, observa-se pelas Figuras 201-(b) e 201-(d), que para análises considerando 3000 iterações a convergência acontece a partir de 1500 iterações.

Figura 201 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)

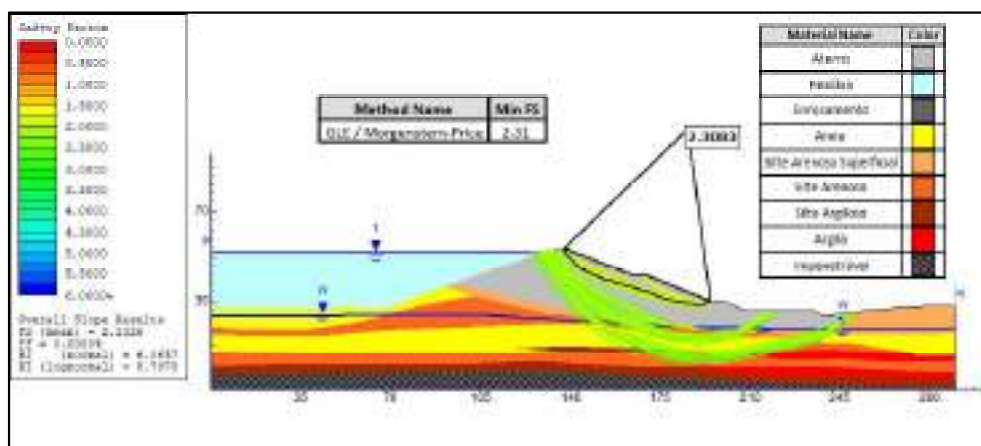


(a)

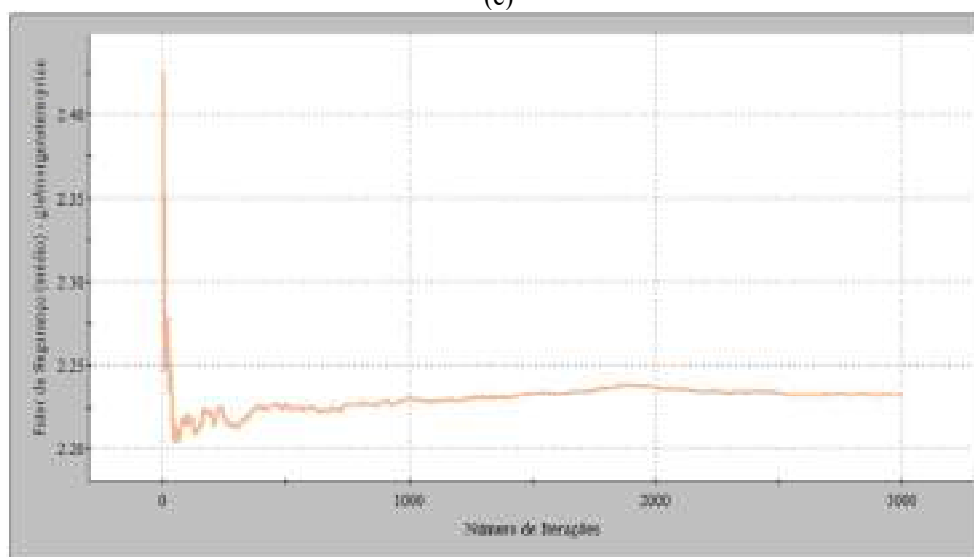


(b)





(c)



(d)

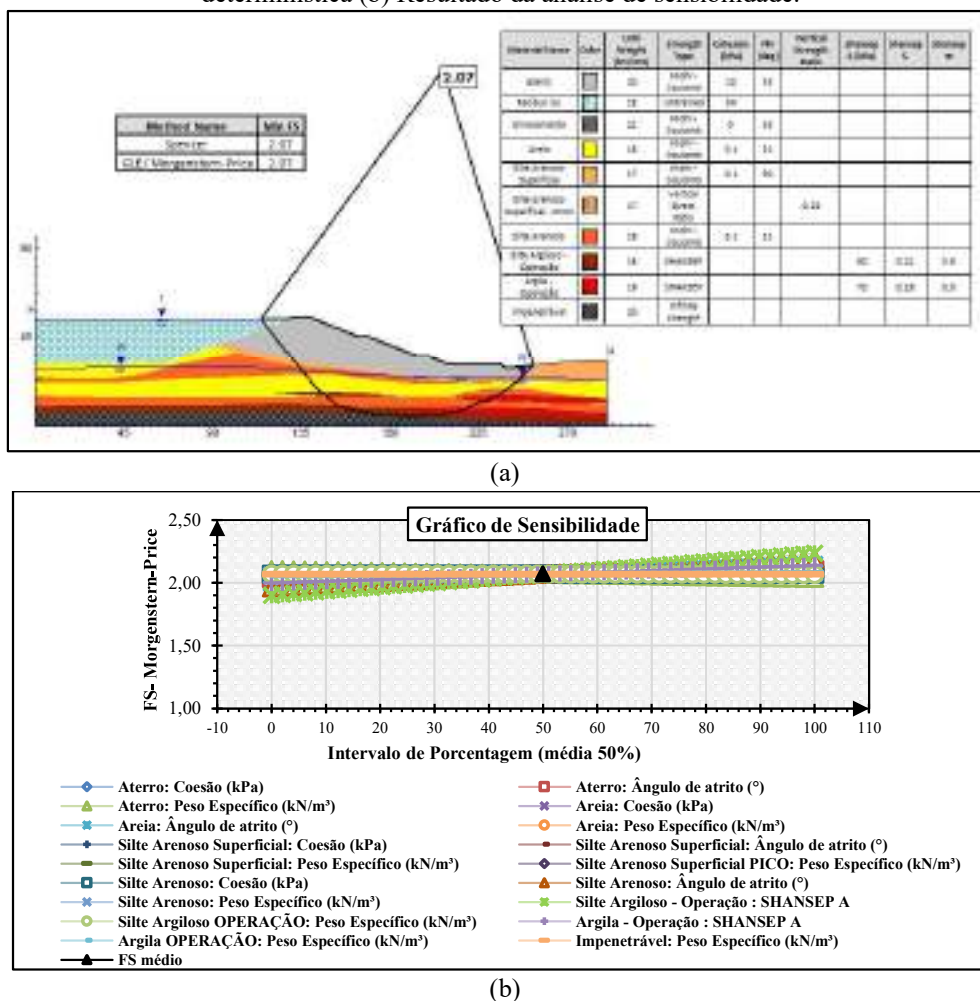
Fonte: Autora (2023)

### 5.9.6 Operação Normal – Não drenado

Os resultados das análises para a fase de operação, considerando a condição não-drenada dos materiais encontram-se apresentados nas Figuras 202 e 203.

Observando as informações da Figura 202-(a), nota-se que o FS encontrado pela abordagem determinística foi igual a 2,07, menor do que o observado para a condição drenada, porém superior ao mínimo admissível para este cenário de 1,5 conforme a NBR 13028/17. Ao observar a localização da SPR, nota-se que novamente ela acaba interceptando todas as camadas de materiais existentes na geometria da seção. No entanto, ao aplicar uma análise de sensibilidade, foi observado por meio da Figura 202-(b), que o FS sofre variações significativas quando se altera os ângulos de atrito das camadas de areia e silte arenoso, bem como a resistência não-drenada das camadas de argila e silte argiloso. Deterministicamente, os resultados encontrados estão de acordo com a NBR 13028/17.

Figura 202 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Não drenado– (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.

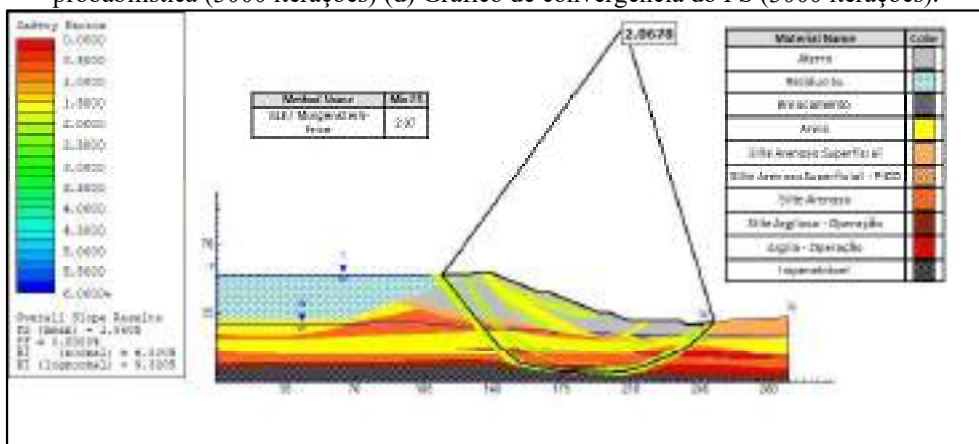


Fonte: Autora (2023)

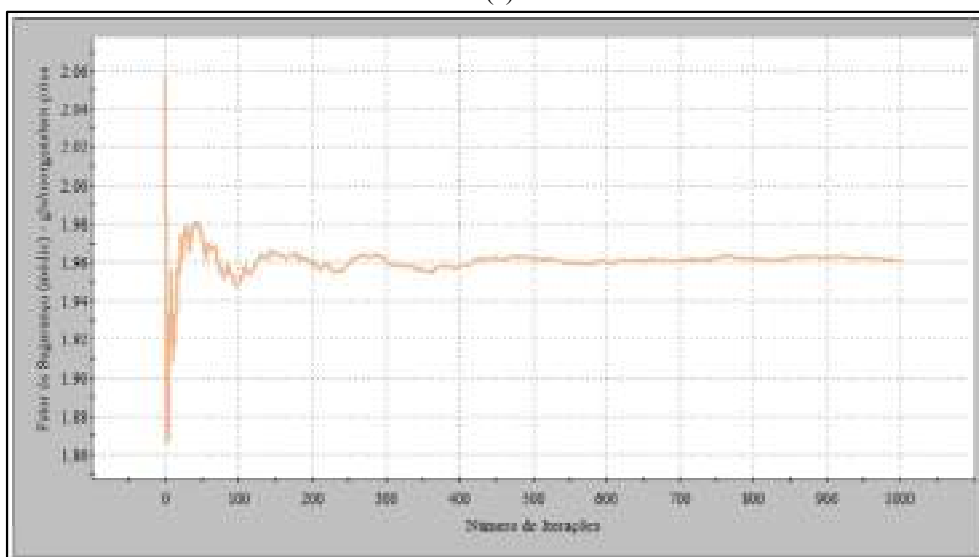
Com relação aos resultados da aplicação probabilística, observa-se pelas Figuras 203-(a) e 203-(c), que os FS probabilísticos foram aproximadamente iguais a 1,95 para ambas as iterações. Com relação aos resultados complementares, foi verificado Pr nula. Os índices de confiabilidade mínimos, por sua vez, apresentaram variações entre 6,63 (valor normal) a 9,07 (valor log-normal). Os resultados encontrados para esta condição estão em acordo com faixa de desempenho considerados adequada pela USACE (1997).

No que concerne às curvas de convergência, apresentadas nas Figura 203-(b) e 203-(d), é possível dizer que ao analisar o cenário com 3000 iterações, a estabilização dos resultados ficou melhor definida a partir de 1000 iterações.

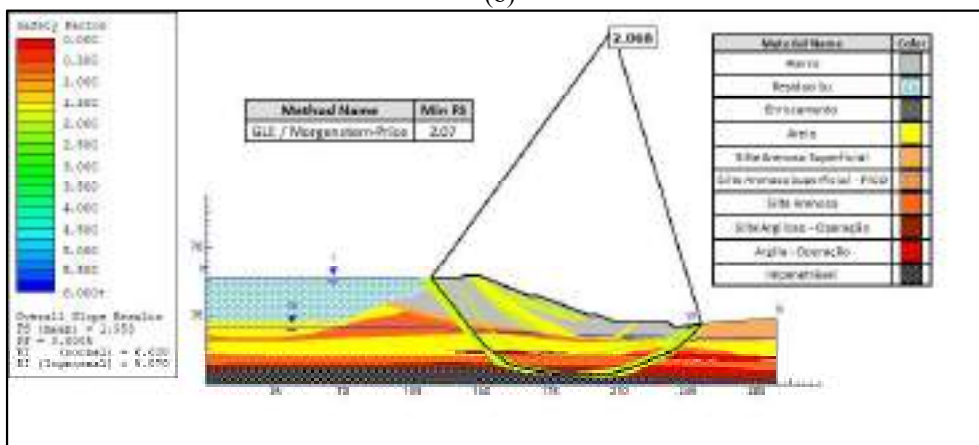
Figura 203 - Resultado da Seção I-I - Operação Normal – Não drenado (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações).



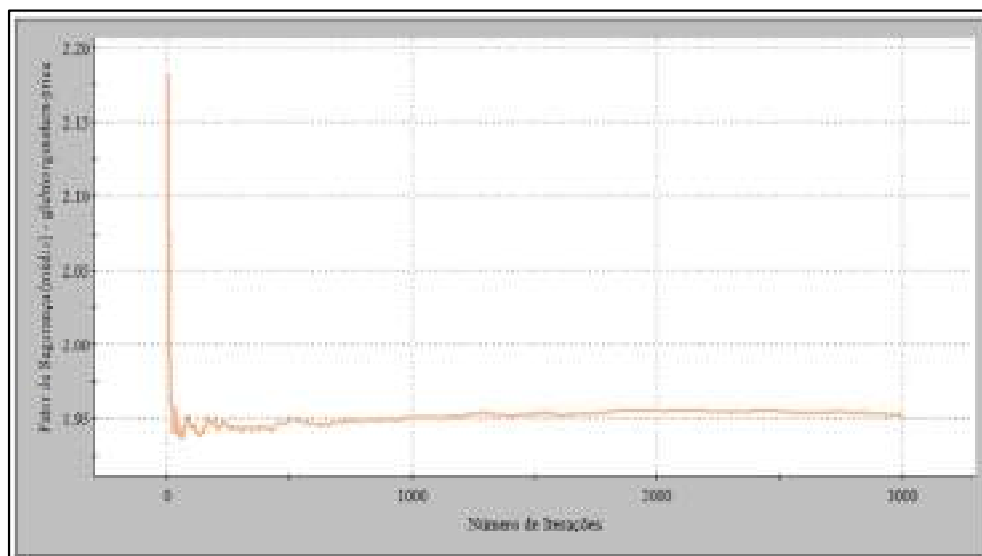
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autora (2023)

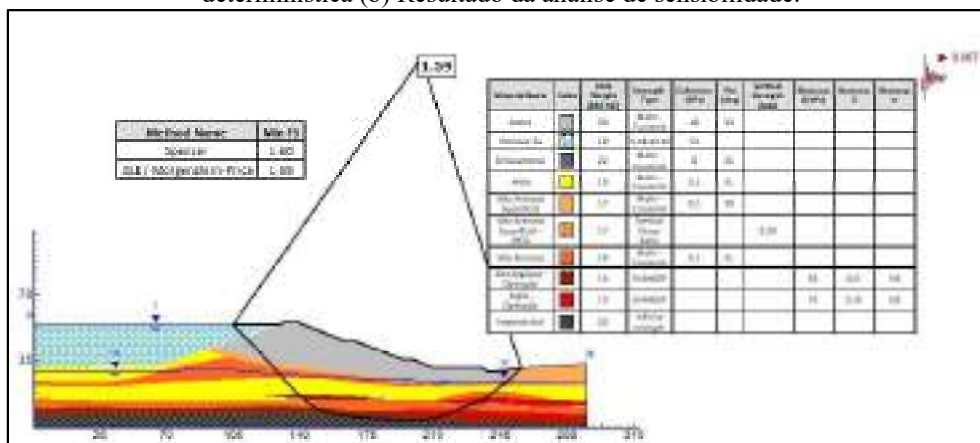
### 5.9.7 Solicitação Pseudoestática

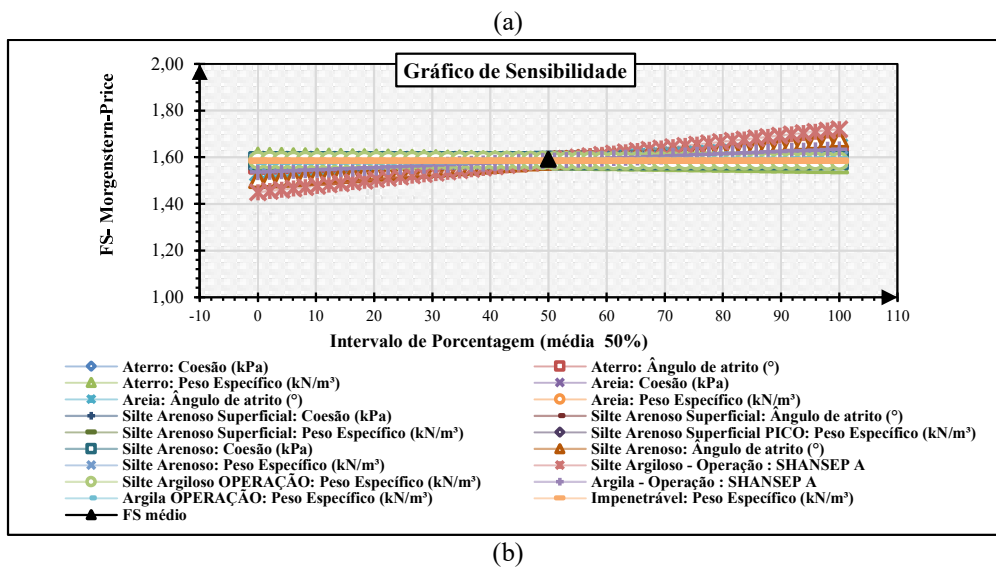
Os resultados das análises referentes as condições de operação sujeitas a solicitações pseudoestática, são destacados nas Figuras 204 a 209.

A introdução de um carregamento pseudoestática horizontal, Figura 204-(a), na seção I durante a fase de operação, ocasionou uma redução no FS, passando de 2,06 do cenário de condição não drenada para 1,59 com a aplicação desse carregamento. Entretanto, apesar dessa diminuição, o FS encontrado pela abordagem determinística ultrapassou o valor mínimo estabelecido para este cenário de 1,10 conforme definido pela NBR 13028/17.

Quanto aos resultados da análise de sensibilidade, ilustrados na Figura 204-(b), observa-se que o FS sofre pequenas variações relacionadas as mudanças dos ângulos de atrito das camadas de areia e silte arenoso, bem como da resistência não-drenada das camadas de silte argiloso e argila.

Figura 204 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



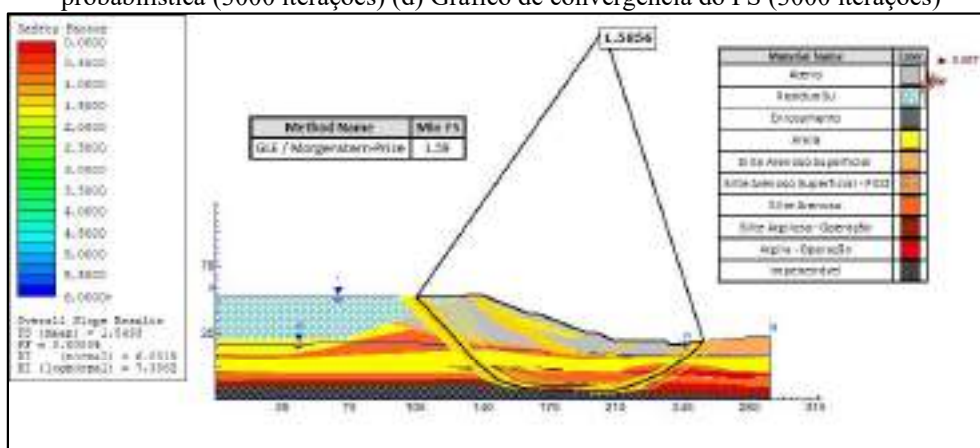


Fonte: Autora (2023)

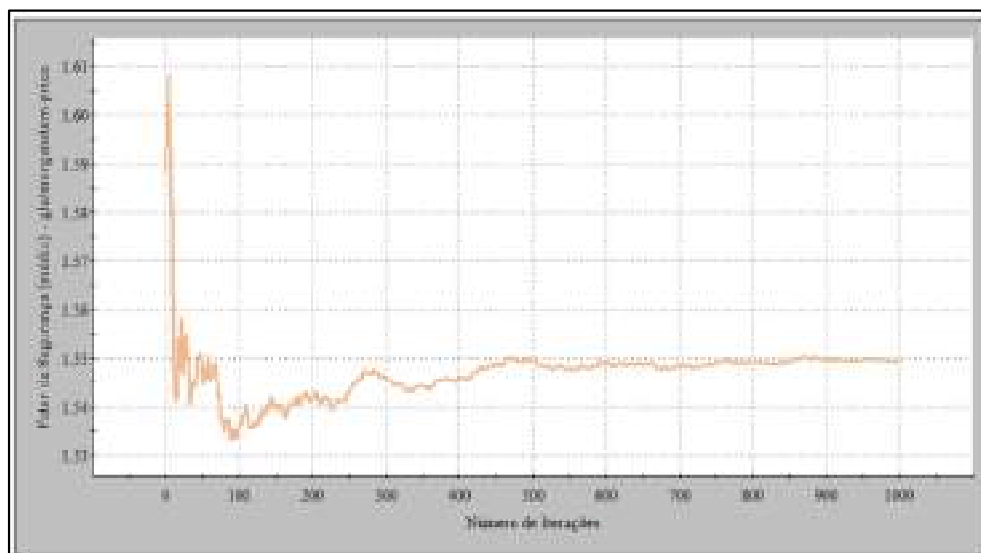
Em relação aos resultados obtidos pela abordagem probabilística, conforme evidenciado nas Figuras 205-(a) e 205-(c), destaca-se um FS médio probabilístico igual a 1,55 para ambas as iterações. Essa análise revelou ainda uma Pr nula, juntamente com índices de confiabilidade mínimo variando entre 6,00 (valor normal) e 7,39 (valor log-normal)

Com relação aos resultados encontradas para ambas as iterações, tem-se que os resultados obtidos são enquadrados como parâmetros aceitáveis de desempenho, conforme estabelecido pela USACE (1997). No que concerne às curvas apresentadas nas Figuras 205-(c) e 205-(d), nota-se que para um número de 3000 iterações, a convergência tem início após 1000 iterações.

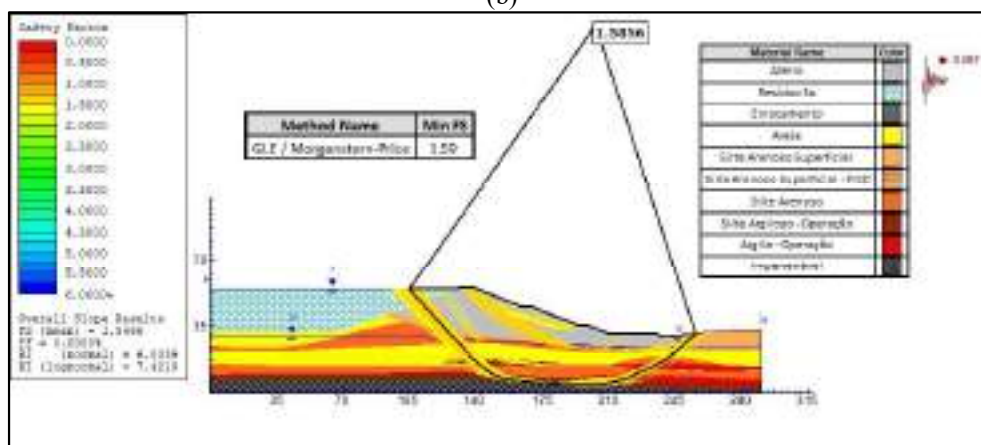
Figura 205 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 1) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)



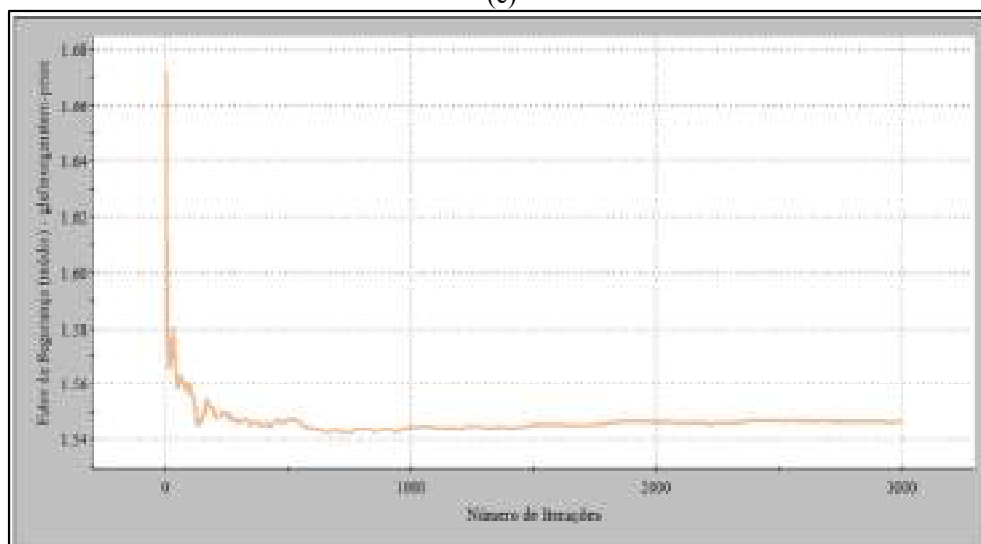
(a)



(b)



(c)



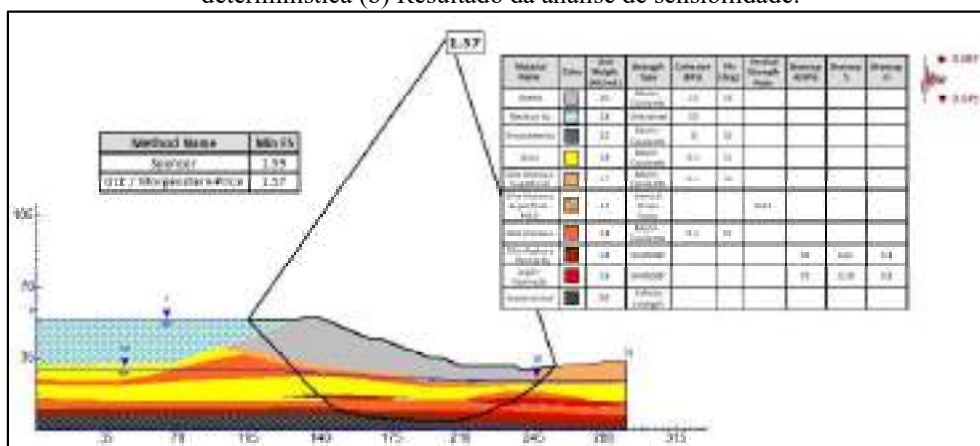
(d)

Fonte: Autora (2023)

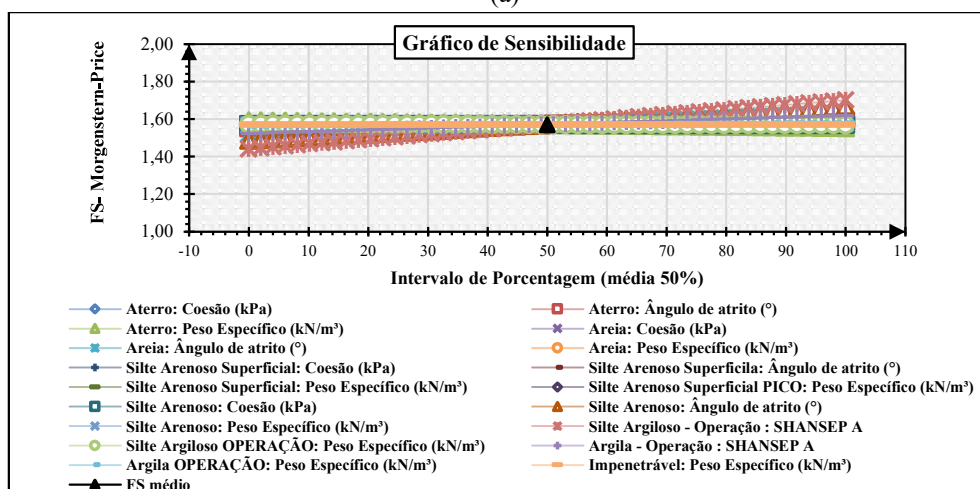
Ao introduzir carregamentos verticais ao sistema, observa-se pelas Figuras 206-(a) e 207-(a), que o FS determinístico variou entre 1,57 a 1,61. Além disso, tanto para o cenário da Figura 206-(b) quanto da Figura 207-(b), os resultados das análises de sensibilidade também

apresentaram ser bastante similares com os apresentados com aplicação de apenas do carregamento horizontal. No que se refere a estabilidade, em ambos os cenários, os taludes permanecem estáveis a ocorrência de uma solicitação pseudoestática, conforme foi mostrado pela abordagem determinística.

Figura 206 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



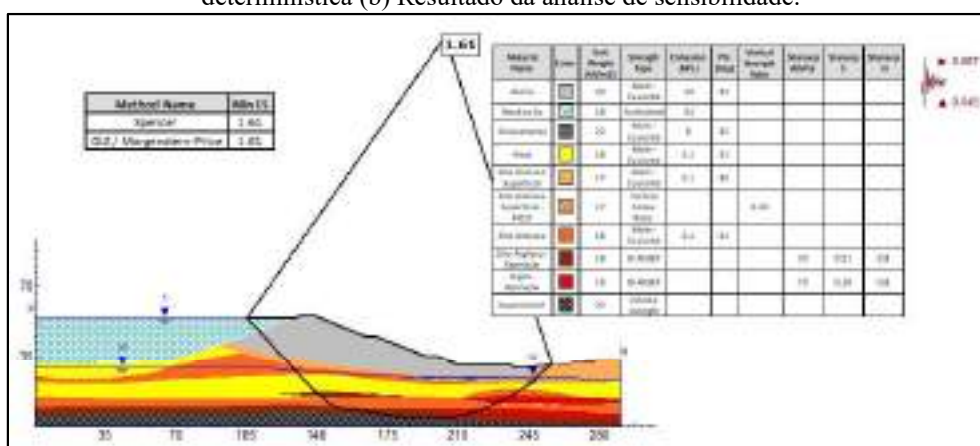
(a)



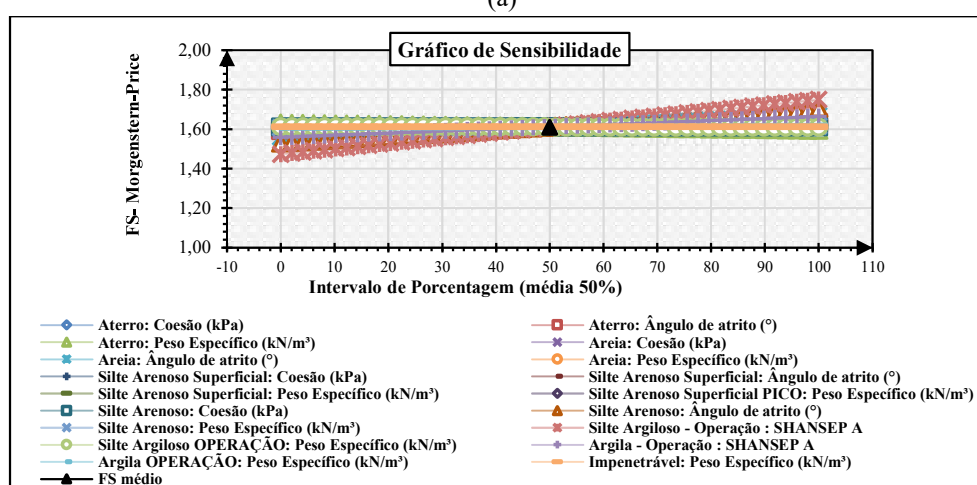
(b)

Fonte: Autora (2023)

Figura 207 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



(b)

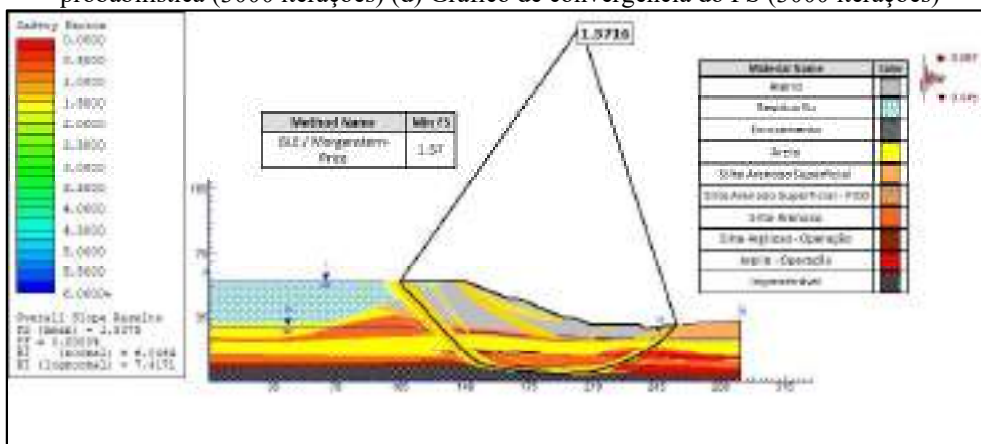
Fonte: Autora (2023)

Com relação aos resultados probabilísticos, apresentados nas Figuras 208-(a), 208-(c), 209-(a) e 209-(c), destaca-se que, nas duas condições de carregamento analisadas, o menor FS probabilístico encontrado para ambas as condições de carregamento foi igual 1,54. Adicionalmente, constatou-se que as probabilidades de ruptura foram nulas, enquanto os índices de confiabilidade mínimos variaram 5,85 (valor normal) a 7,22 (valor log-normal). No que diz respeito às curvas de convergência exibidas nas Figuras 208-(b), 208-(d), 209-(b) e 209-(d), nota-se uma tendência a estabilização dos resultados a partir de 1000 iterações.

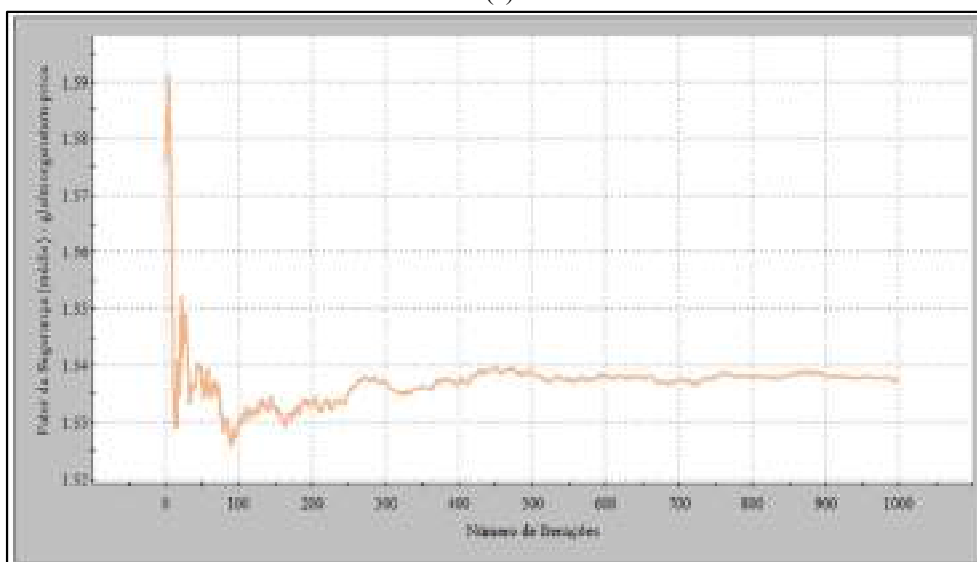
Analisando estes resultados e considerando os limites mínimos estabelecidos pela NBR 13028/17 e a USACE (1997), é plausível inferir que, sob uma perspectiva probabilística, o talude da seção I mantém-se estável diante de ambas as condições de carregamento pseudoestáticos.



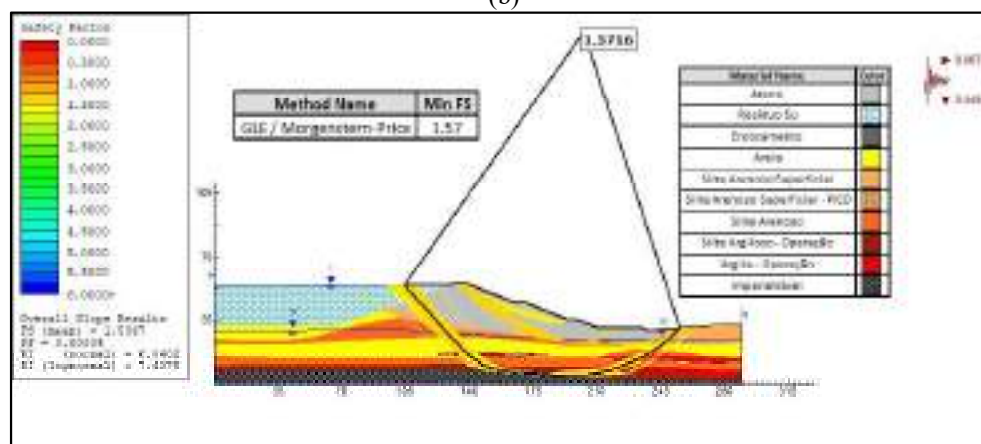
Figura 208 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 2) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)



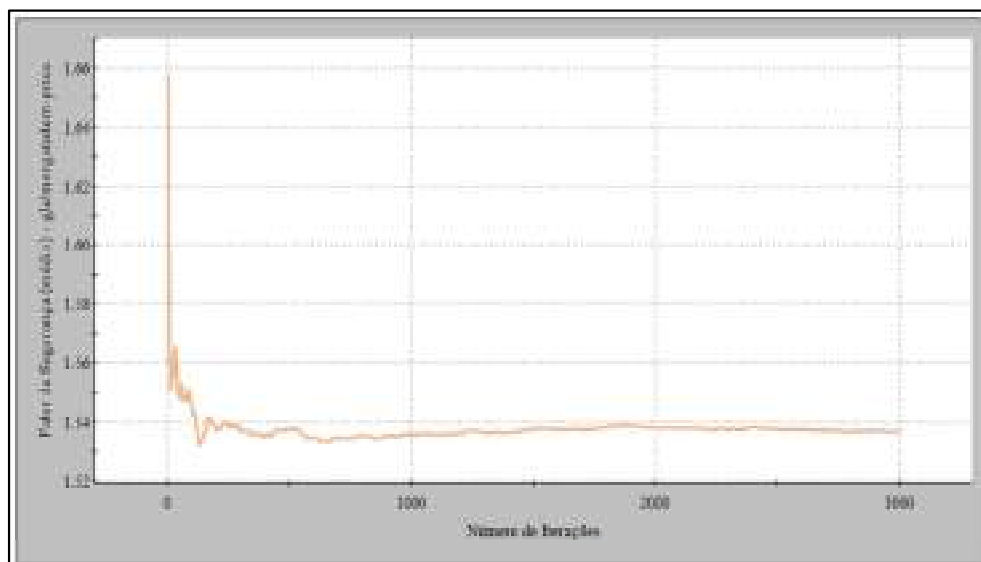
(a)



(b)



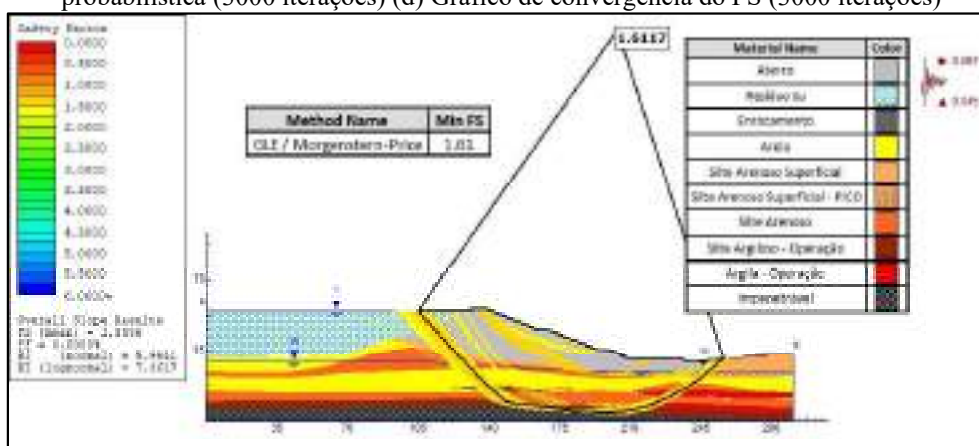
(c)



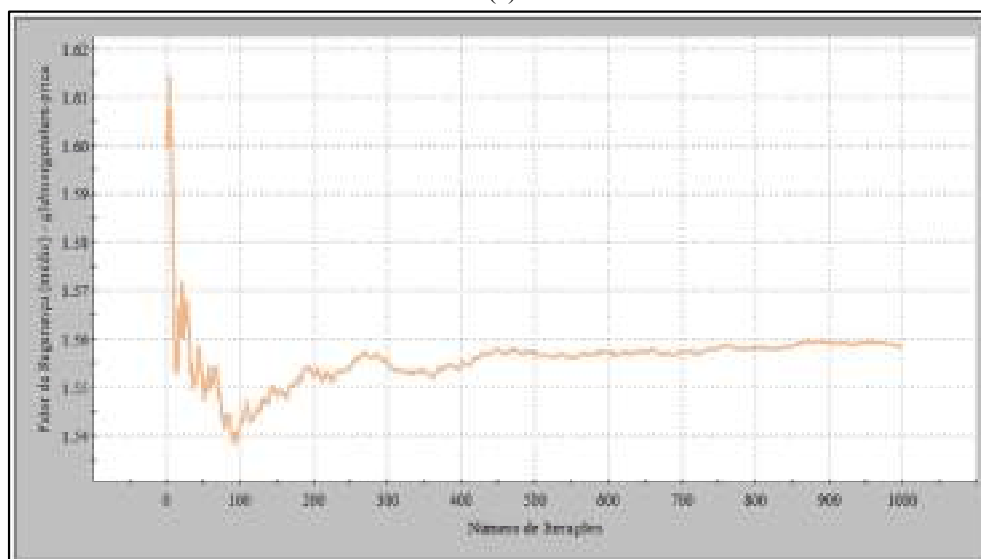
(d)

Fonte: Autora (2023)

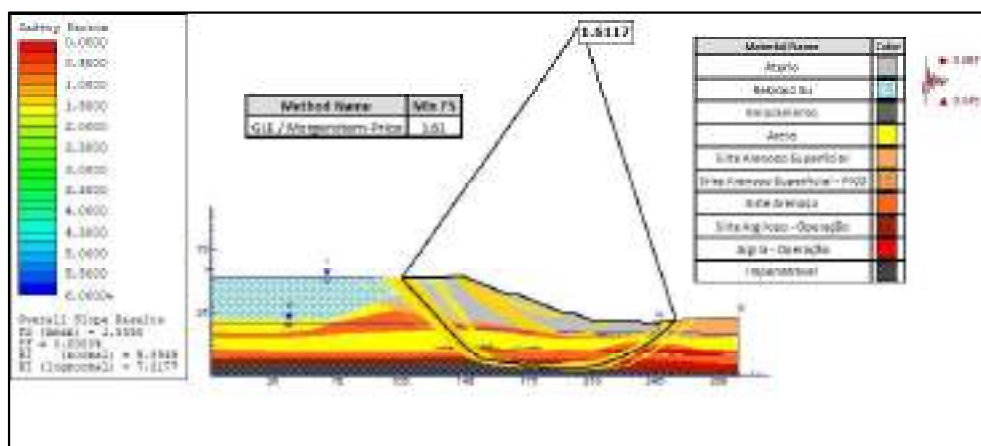
Figura 209 - Resultado da Seção I-I - Solicitação Pseudoestática (Cenário 3) (a) Resultado da análise probabilística (1000 iterações) (b) Gráfico de convergência do FS (1000 iterações) (c) Resultado da análise probabilística (3000 iterações) (d) Gráfico de convergência do FS (3000 iterações)



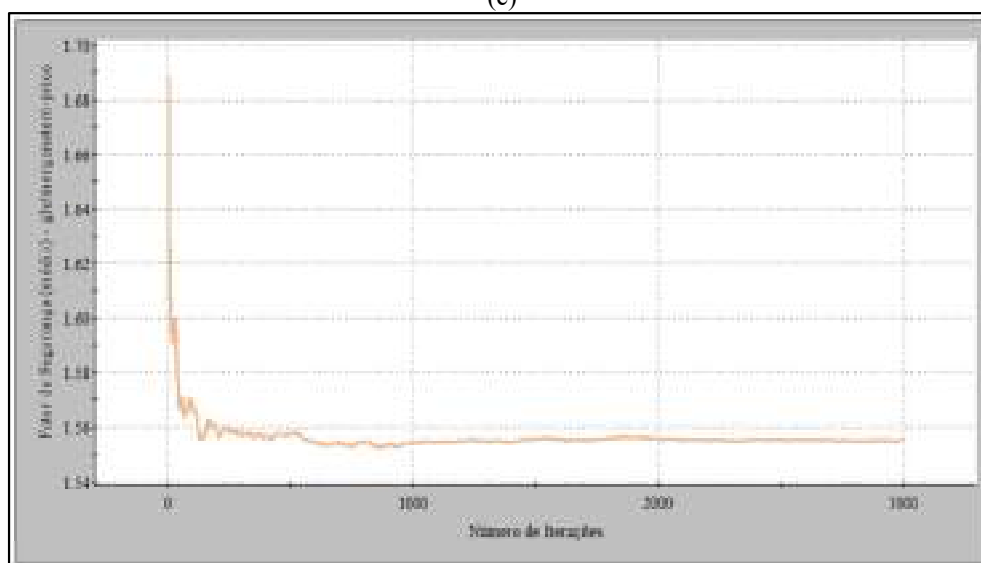
(a)



(b)



(c)



(d)

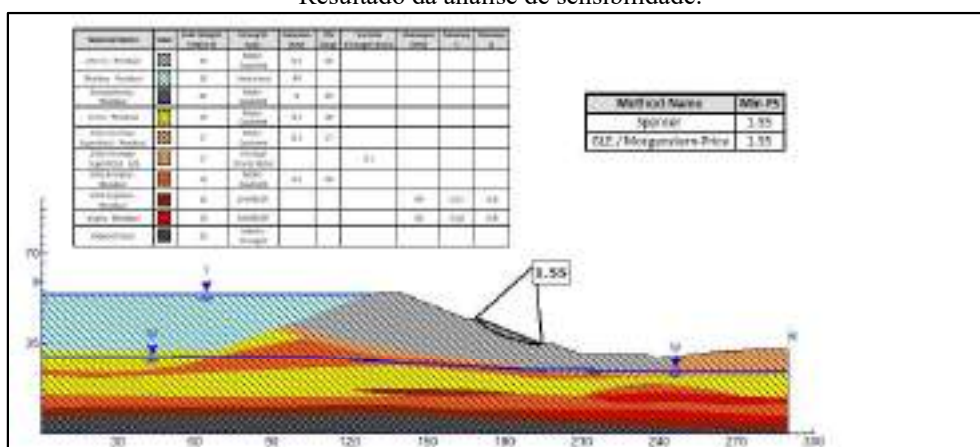
Fonte: Autora (2023)

### 5.9.8 Solicitação pós-sísmica

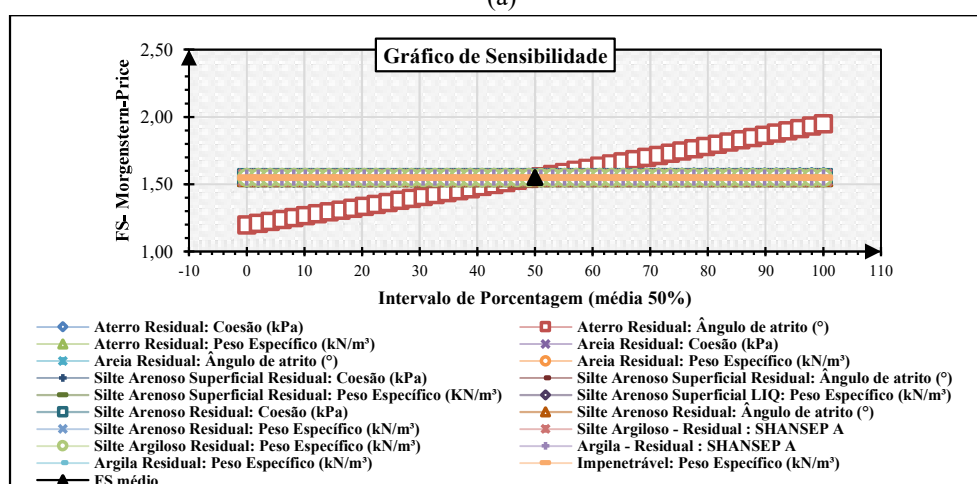
Os resultados referentes à condição com solicitação pós-sísmica são apresentados na Figura 210 e 211.

Conforme é apresentado na Figura 210-(a), a análise determinística revelou um FS de 1,55, superando o mínimo exigido de 1,00 pela ANCOLD (2019) e evidenciando a estabilidade do talude para esta condição. Na análise de sensibilidade, destacada na Figura 210-(b), observa-se que a variável que mais influencia o FS é o ângulo de atrito da camada de aterro compactado. Essa influência é atribuída à localização da SPR, a qual se encontra integralmente dentro dessa camada de material.

Figura 210 - Resultado da Seção I-I - Solicitação pós-sísmica (a) Resultado da análise determinística (b) Resultado da análise de sensibilidade.



(a)



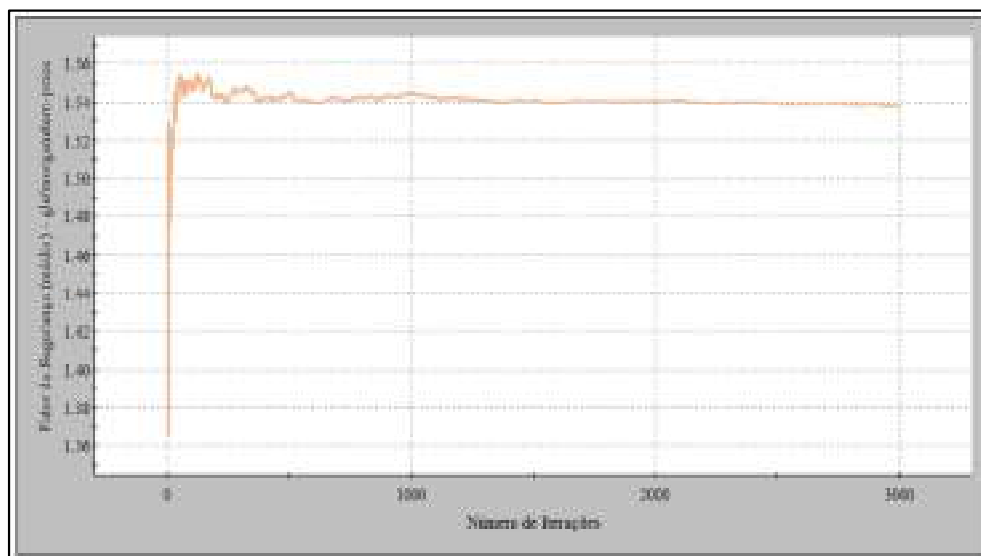
(b)

Fonte: Autora (2023)

No que diz respeito aos resultados provenientes da abordagem probabilística, evidenciadas na Figura 211-(a) e 211-(c), verifica-se o mesmo valor de FS do resultado determinístico, sendo este igual 1,54 para ambas as iterações. As Pr derivada de 1000 e 3000 iterações, revelaram-se nulas, indicando a ausência de riscos de incidentes.

Quanto aos índices de confiabilidade mínimos, observou-se pouca variação entre os resultados de ambas as iterações, sendo o menor valor registrado igual a 3,60, mantendo-se dentro dos limites admissíveis, conforme os critérios estabelecidos pela USACE (1997). Ao avaliar esses parâmetros, é possível inferir por meio de uma análise probabilística que o talude mantém sua estabilidade em condições pós-sísmicas. No entanto, é pertinente manter um nível de atenção em relação a esse cenário, uma vez que os índices de confiabilidade encontrados são relativamente baixos, assim como também foi observado para as demais seções críticas.





(d)

Fonte: Autora (2023)

Na Tabela 28, encontram-se organizado os resultados encontrados a partir da aplicação das análises probabilísticas para a seção I, considerando 1000 e 3000 iterações. Ao examinar os resultados da tabela, e, tomando como referência os valores descritos no item 3.8, é possível inferir que os taludes da seção I demonstraram estabilidade diante das dez condições de carregamentos avaliados, tanto pela abordagem determinística quanto pela probabilística. No entanto, é importante adotar precauções adicionais em relação ao cenário de solicitação pós-sísmica, uma vez que seus índices de confiabilidade foram significativamente inferiores aos dos demais cenários, assim como observado para as demais seções já analisadas.

Tabela 28 - Resultados das análises de estabilidade probabilística seção I-I.

Condição	Lado	FS adm.	FS deter.	1000 iterações				3000 iterações			
				FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)	FS prob.	Pr (%)	$\beta$ (nor.)	$\beta$ (log.)
Final de construção Sem Ru	M	1,3	1,76	1,71	0	5,10	6,56	1,71	0	5,02	6,46
Final de construção Com Ru	M	1,3	1,72	1,63	0	5,78	7,28	1,63	0	5,60	7,04
Final de construção Sem Ru	J	1,3	1,96	1,9	0	7,67	10,39	1,9	0	7,72	10,44
Final de construção Com Ru	J	1,3	1,64	1,69	0	5,15	6,59	1,69	0	4,98	6,37
Operação em condição normal drenado	J	1,5	2,31	2,25	0	6,35	9,24	2,23	0	6,07	8,80
Operação em condição normal não drenado	J	1,5	2,07	1,96	0	6,80	9,32	1,95	0	6,63	9,07
Solicitação Pseudoestática	J	1,1	1,59	1,55	0	6,00	7,39	1,55	0	6,03	7,42
			1,57	1,54	0	6,05	7,42	1,54	0	6,04	7,41
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,61	1,56	0	5,96	7,36	1,55	0	5,85	7,22
Solicitação Pós-Sísmica.	J	1,0	1,55	1,54	0	3,63	4,43	1,54	0	3,60	4,40

M = Montante; J = Jusante; FSadm. = Fator de segurança admissível; FSdeter. = Fator de segurança determinístico; FSprob. = Fator de segurança probabilístico; Pr = Probabilidade de ruptura;  $\beta$ nor. = Índice de confiabilidade normal;  $\beta$ log. = Índice de confiabilidade log-normal.

Fonte: Autora (2023)

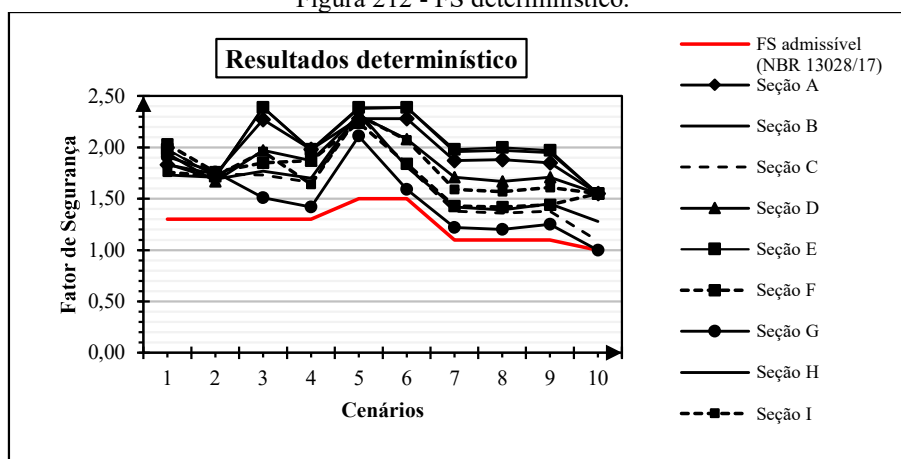
## 6 DISCUSSÕES

Neste capítulo é feita uma síntese dos resultados apresentados no item 5, destacando os pontos importantes observados durante a realização dos estudos de estabilidade.

Inicialmente, ao analisar os resultados determinísticos presentes na Figura 212, pode-se observar que os FS encontrados pela abordagem determinística foram superiores ao mínimo recomendado pela NBR 13028/17, com ressalva para o cenário de solicitação pós-sísmica da Seção G, que foi igual ao limite admissível de 1,0.

A respeito desse cenário, foi observado a partir da geometria da seção G a existência de uma heterogeneidade das camadas na fundação, muitas das quais foram identificados materiais com suscetibilidade à liquefação e que podem estar influenciando o desempenho do talude diante de um cenário pós-sísmico. Outra consideração importante e que pode estar contribuindo para a redução desse FS, é a posição do nível do lençol freático, o qual encontra-se localizado passando próximo as bases dos diques.

Figura 212 - FS determinístico.



Fonte: Autora (2023)

Em relação as análises probabilísticas, foi importante definir os parâmetros que seriam considerados como variáveis aleatórias. Para isso, a realização de uma análise de sensibilidade se fez necessária, onde verificou-se o comportamento do FS em relação às variações nos parâmetros de resistência. Neste sentido, foram executadas análises de sensibilidade para as dez condições executadas nas análises determinística, variando o ângulo de atrito, a coesão, o peso específico e a resistência não drenada, dentro de uma faixa de 2 desvios padrões para mais e para menos do valor médio de cada variável, observando sempre a influência dessa variação sobre o FS.

Analisando os resultados encontrados, observou-se, assim como Braga (2019) que o FS se torna variável aos parâmetros de resistências dos materiais a qual a SPR intercepta.

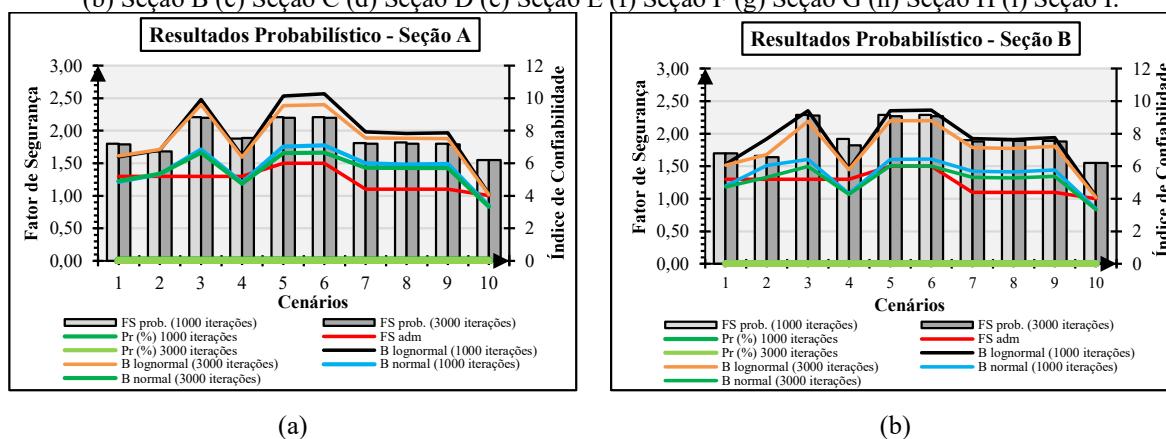


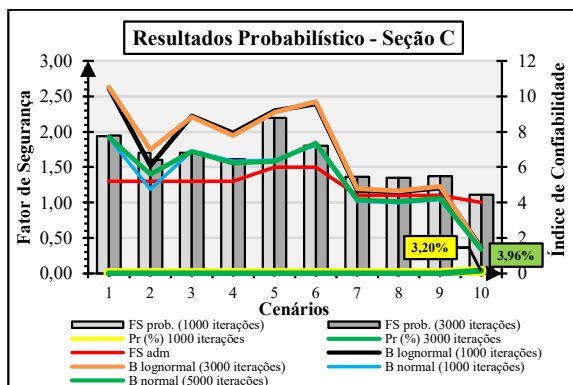
Adicionalmente, foi observado que os parâmetros de resistência que mais causam variações no valor do FS é a coesão e o ângulo de atrito, ambos apresentado uma correlação positiva com o FS. Dessa forma, ao aumentar o valor dessas variáveis ocorre uma elevação na resistência e consequentemente um aumento do FS, assim como também foi notado por López (2017) e Silva (2015).

Comportamento semelhante também foi identificado para o parâmetro de resistência não drenada ( $S_u$ ) das seções que apresentaram em sua geometria materiais argilosos, corroborando com as descobertas de Radinz (2018), ao estudar a estabilidade de talude construídos sobre solos de baixa consistência. Correlações negativas, ou seja, diminuição da resistência com o aumento do valor da variável, foram observadas para o peso específico, sendo esta variável de menor interferência assim como verificado por Costa (2005), Flores (2008), Vilhete (2017) e Silva (2019). Com relação aos parâmetros das demais camadas de materiais que a SPR não interceptava, não houve influência significativa na variação do FS, apresentando dessa forma retas praticamente horizontais ou sem inclinação.

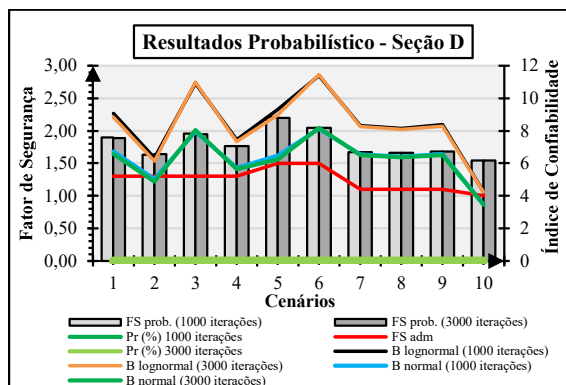
Nas Figuras 213-(a) a 213-(i), são apresentados uma visão geral do comportamento dos FS probabilísticos e do índice de confiabilidade para cada seção crítica analisada, considerando as dez condições destacadas na Tabela 17.

Figura 213 - Comportamento do FS e índice de confiabilidade probabilístico para cada cenário. (a) Seção A (b) Seção B (c) Seção C (d) Seção D (e) Seção E (f) Seção F (g) Seção G (h) Seção H (i) Seção I.

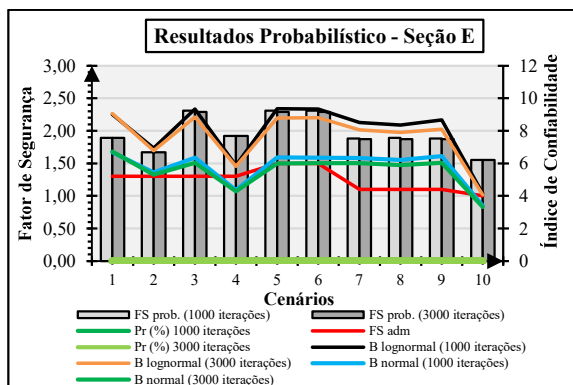




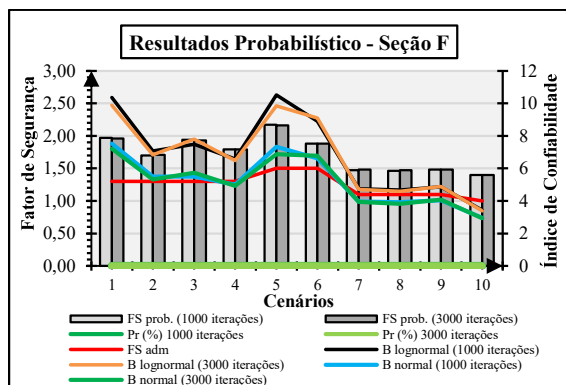
(c)



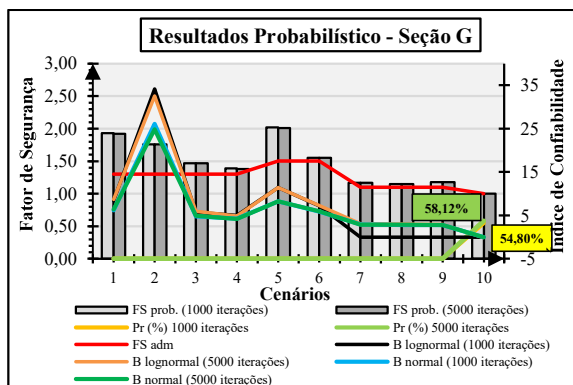
(d)



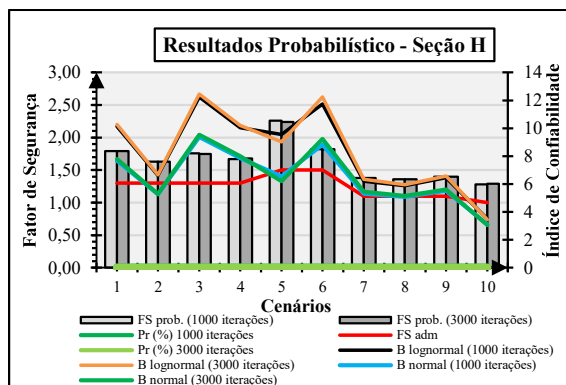
(e)



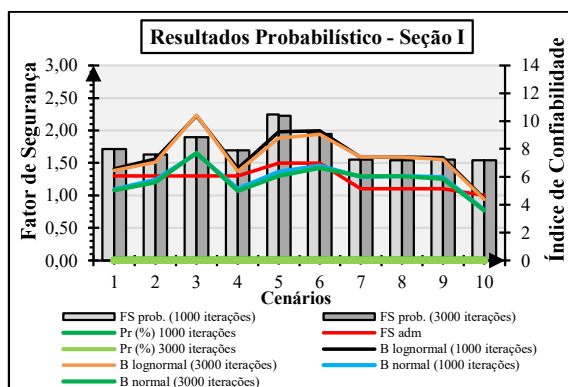
(f)



(g)



(h)



(i)

Fonte: Autora (2023)

Com base nas Figuras 213-(a) a 213-(i), verifica-se que, em relação ao FS probabilístico, a maioria dos resultados encontrados atenderam ao limite mínimo adotado para abordagem determinística, mesmo nas condições em que índice de confiabilidade foi baixo e a Pr foi diferente de zero. Adicionalmente, foi observado que os resultados do FS probabilístico, divergiram do FS determinísticos. De acordo com Góis e Assis (2022), os FS médios encontrados pelo método de Monte Carlo, não são iguais aos obtidos deterministicamente, porém tendem a apresentar valores próximos. Conforme explica Netto e Farias (2022), em uma análise probabilística, as diferentes combinações das variáveis de entrada podem gerar um FS médio maior do que a observada pela aplicação determinística, contribuindo positivamente na condição de estabilidade do talude. Todavia, tal comportamento não foi verificado nos resultados deste estudo. Ao contrário, foi observado que as combinações geradas pela abordagem probabilística, promoveram a redução de até 10% no FS probabilístico.

No que se refere às variações em relação à presença ou ausência do Ru nas camadas de aterro (cenários 2 e 4), notou-se que, na maioria das seções, os cenários que não consideram esse parâmetro, apresentaram níveis de segurança elevados, sendo a maior redução do FS probabilístico para um cenário com e sem a presença do Ru igual a 18%. De acordo com Amaral *et. al* (2022), ao observar os efeitos da água em um talude de solo não saturado, os autores notaram que a presença desse elemento nos materiais que compõem o talude, quer seja ela derivada de chuvas, infiltrações ou até mesmo excessos de poropressões, afetam negativamente a estabilidade de estrutura provocando reduções significativas em seus FS. Segundo Vilhete (2017), qualquer variação na poropressão provoca mudanças na resistência ao cisalhamento dos solos. Neste caso, o que se observou foi a redução da resistência ao cisalhamento impactando negativamente no valor do FS.

Comportamento semelhante também foi presenciado por Silva (2021), onde ao trabalhar com dois métodos probabilísticos, o autor verificou que além do aumento do FS e do índice de confiabilidade, observou-se também um decréscimo da probabilidade, sendo essa redução atribuída ao ganho de resistência resultante do aumento das tensões efetivas dos materiais. Essas observações destacam a relevância de conduzir análises não apenas para a fase de operação, mas também para a fase de final de construção.

Ao passar para as fases de operação em condição drenada e não-drenada (cenário 5 e 6), nota-se que para as seções A, B e E houve poucas variações tanto do FS quanto do índice de confiabilidade. Analisando os perfis dessas seções, é possível observar que a localização da SPR encontra inserida nas camadas de materiais arenosos, tanto para as análises considerando condição drenada, quanto para não drenada, sendo essas condições, portanto, pouco influenciáveis no valor do FS. Com relação as demais seções, o comportamento variável entre ambos os cenários é resultado da presença de camadas argilosas na SPR, as quais interferem significativamente no cálculo do FS, ao realizar análise considerando o cenário não drenado. Para essas condições, foram observadas reduções de 24% no FS probabilístico não drenado, atribuída a presença de poropressões. Tal comportamento também foi registrado por Bezerra (2019), onde ao aplicar análises de estabilidade em encostas considerando cenários naturais e saturados, observou-se a redução não só do FS determinístico e probabilístico, mas também do índice de confiabilidade, corroborando com as descobertas de Passafaro, Assis e Nogueira (2022).

Observa-se que considerando apenas os resultados dos FS todos as seções apresentam comportamento estável. No entanto, ao considerar os resultados probabilísticos a conclusão é diferente. Por meio dos demais parâmetros gerados pela abordagem probabilística foi possível identificar  $P_r$  consideráveis para as seções. Inicialmente dando destaque ao cenário pseudoestático, tem-se que neste cenário o que ocorre é uma simulação de aplicação de cargas que venham representar as cargas provenientes de um evento sísmicos. De acordo com Bray e Travarrou (2009), embora a metodologia adotada para uma análise pseudoestáticas seja simples e de fácil execução, sua capacidade de fornecer uma avaliação confiável é limitada, restringindo-se a indicação apenas da condição de movimento incipiente da estrutura.

Com relação aos resultados pseudoestáticos, foram encontradas  $P_r$  nulas para a seção C, e para a seção G o maior resultado foi igual 0,44%. De acordo com El Ramly (2001) à obtenção de uma  $P_r$  diferente de zero, não significa necessariamente à ocorrência de ruptura ou de um incidente catastrófico, mas sim de um desempenho insatisfatório da estrutura, sendo importante considerar as consequências do evento analisado. Com base na localização da SPR,

nota-se que no cenário em que Pr foi igual 0,44%, ela está próxima a base do aterro, indicando um potencial de impacto pequeno na estrutura. No entanto, para o cenário em que a Pr foi de 0,18%, observa-se que a SPR encontra-se interceptando todo o corpo do aterro.

Em relação a essa situação, destaca-se que a Pr encontrada difere apenas na segunda casa decimal do valor considerado adequado pela USACE (1997). Neste sentido, o resultado apresentado pode ser compreendido como próximo o suficiente do valor de referência, sugerindo uma boa concordância entre os resultados obtidos e as expectativas estabelecidas pelos padrões da USACE (1997).

Sobre as análises pseudoestáticas, Duarte (2016) recomenda a adoção de métodos mais complexos como análises sísmica pseudodinâmicas, métodos empíricos de deslocamentos e métodos dinâmicos, para averiguar o comportamento das deformações permanentes decorrentes das aplicações desses carregamentos, de forma mais detalhada.

Ainda sobre as análises pseudoestáticas (cenários 7, 8 e 9), observou-se poucas variações entre os FS e os índices de confiabilidade. Contudo avaliando os resultados desses cenários com os valores obtidos nas condições de 1 a 6, observa-se uma redução expressiva desses parâmetros. Conforme explica García *et al.* (2020), ao considerar os efeitos sísmicos em uma análise de estabilidade de talude, o FS tende a diminuir significativamente, mesmo para mudanças mínimas do coeficiente de aceleração horizontal.

As maiores reduções ocorreram de fato para a condição 10 de solicitação pós-sísmica, principalmente para seção G, onde é possível notar uma queda expressiva no seu índice de confiabilidade. De acordo com Netto e Farias (2022), quanto maior o valor numérico do índice de confiabilidade, maior a precisão e confiança nos resultados obtidos. Caso contrário, resultados menores indicam a necessidade de mais informações para avaliação da segurança da estrutura. Neste sentido, examinando os resultados das seções C e G, observa-se que os índices de confiabilidades principalmente para o cenário pós-sísmico foram reduzidos, sendo em alguns casos inferiores ao mínimo estabelecido pela USACE (1997). Os comportamentos desses resultados, revelam que apenas a aplicação da análise determinística não é suficiente para expressar o verdadeiro comportamento dos taludes.

No que concerne aos resultados das análises pós-sísmicas, ambas as seções apresentaram Pr elevadas. Para a seção C, as Pr variaram entre 3,20% e 3,92%. Já para a seção G, as Pr variaram entre 54,8% a 58,12%. Em relação aos FS encontrados para ambas as seções, estes se encontraram próximo do limite mínimo admissível tanto pela abordagem determinística, quanto pela probabilística. De acordo com García *et al.* (2020), em análises de estabilidades que consideram os efeitos sísmicos, os FS sofrem uma redução significativa em

virtude da redução dos parâmetros de resistência. De acordo com o *Guidelines for Design of Dams and Appurtenant structures for Earthquake*, da ANCOLD (2019), ao considerar os efeitos de movimentos sísmicos em uma análise geotécnica, a informação mais importante a ser avaliada são as deformações permanentes que o aterro sofrerá e não sua estabilidade. Nesse sentido, o documento ainda ressalta que mesmo que sejam notadas deformações, isso não significará necessariamente uma condição de ruptura.

Adicionalmente, ainda com base nessas Pr elevadas encontradas para a condição pós-sísmica da seção G, a ANCOLD (2019) comenta que ao apresentar os resultados de uma análise de estabilidade devem ser considerados além do FS mínimo, a forma e a localização da SPR, para a correta interpretação do comportamento do talude. De acordo com as Figuras 172, 173-(a), 173-(c), 173-(e), é possível observar que as SPR para o cenário pós-sísmico da seção G não interceptam o corpo do aterro, mas sim uma área localizada próximo a base do dique. Do ponto de vista do impacto, mesmo que as Pr encontradas sejam altas, isso não implica necessariamente na ocorrência de eventos de grandes proporções.

Analisando ainda os resultados da seção G, observa-se que tanto os FS determinístico, quanto probabilístico foram iguais a 1,0. Neste sentido, qualquer variação nas resistências dos materiais a qual a SPR está interceptando, promoverá uma Pr alta, conforme foi observado nos resultados encontrados. Com base nisso, é possível inferir que as análises de estabilidade pós-sísmica se tornam um limitador para a aplicação do Método de Equilíbrio Limite, tanto determinísticas quanto as probabilísticas.

De acordo com a ANCOLD (2019), em barragens que se enquadram na categoria de consequências altas e extremas, deverá ser adotadas análises numéricas para condições pós-sísmicas para obtenção de estimativas mais precisas das deformações. Neste sentido, para o cenário de solicitação pós-sísmicas tanto da seção C, quanto da seção G, é recomendado que elas sejam reavaliadas também por métodos numéricos de tensão x deformação, fornecendo assim, uma compreensão profunda da magnitude das deformações e da geração de poropressão, a fim de entender o comportamento das deformações e estabilidade dessas seções.

Por fim, no que diz respeito a convergência dos resultados, foi observado que, ao realizar tentativas com 1000 iterações, a convergência ocorria a partir de 300 iterações, próximo ao número mínimo ótimo de 500 simulações sugerido Kalantari *et al.* (2023). Ao passo que o número de simulações foi elevado para 3000 e 5000 iterações, notou-se uma nova tendência de convergência dos resultados, os quais apresentaram variações significativas antes de 1000 iterações, e estabilização após esse valor, conforme observadas também por Mendes (2019) e Campello (2020). Posto isso, com relação ao comportamento de convergência dos

resultados, pode-se inferir que o número mínimo de simulações que deve ser adotado na metodologia por tentativas, mencionadas no item 3.8.3, deve ser a partir de 1000 iterações. Números abaixo disso podem gerar resultados sem estabilidade ou com estabilidade falsa.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a aplicação dos métodos probabilísticos para o cálculo de estabilidade de taludes de barragem para contenção de resíduos de mineração, como complemento à abordagem tradicional determinísticas.

Inicialmente, foram abordados elementos relacionados a análises de estabilidade de talude, bem como uma comparação entre os estudos determinísticos e probabilísticos. Em seguida, foram discutidos conceitos básicos de probabilidade e estatística, juntamente com aspectos relacionados a variabilidade geotécnica. Durante a elaboração da revisão bibliográfica, pode-se perceber que a aplicação prática de análises de estabilidade por abordagens probabilísticas ainda é uma área em desenvolvimento, porém que apresenta um grande potencial no tratamento das incertezas na engenharia geotécnica.

Deterministicamente, observou-se pouca variação entre a localização das superfícies potenciais de ruptura encontradas por ambos os métodos determinísticos utilizados: Spencer e Morgenstern-Price. Adicionalmente, os resultados das análises apresentaram pouca diferença na magnitude do fator de segurança encontrado. Com relação aos critérios estabelecidos pelas normativas, os fatores de segurança excederam os valores mínimos admissíveis pela NBR 13028/17 e ANCOLD (2019), com exceção do último cenário na seção G, onde o fator de segurança foi igual ao limite mínimo admissível para a condição pós-sísmica.

Com relação às análises de sensibilidade, foi observado que ao variar os parâmetros, como o ângulo de atrito, a coesão, a resistência não drenada e, em menor grau o peso específico das camadas de materiais, o fator de segurança apresentava um comportamento variavelmente significativo. Além disso, observou-se que os parâmetros que mais influenciavam nesse comportamento, eram aqueles na qual superfície potencial de ruptura estava interceptando.

No que concerne às análises probabilísticas, foi notado um ganho de informações referente às análises de estabilidade. Parâmetros como o índice de confiabilidade e a probabilidade de ruptura permitiram uma avaliação profunda dos resultados, fornecendo informações a respeito da qualidade dos dados obtidos, e sugerindo reajustes nas análises quando necessárias. Esse ganho de informações é perceptível nos casos de solicitação pseudoestática e pós-sísmica nas seções C e G. Enquanto as análises determinísticas indicaram estabilidade nos taludes, as análises probabilísticas destacaram a importância de investigações mais detalhadas quanto a estabilidade desses taludes.

No contexto das análises probabilísticas, a maioria das seções, com exceção das seções C e G, apresentaram índices de confiabilidade alto e probabilidade de ruptura nulas, mostrando-



se estar conformidade aos limites definidos pela USACE (1997). As seções C e G, por sua vez apresentaram  $Pr$  diferentes de zero, tanto para as condições de solicitação pseudoestática, quanto para a pós-sísmica. Quanto às simulações de Monte Carlo, assim como verificado pela literatura, este método tornou-se uma ferramenta útil nas análises probabilísticas. Contudo, o esforço computacional e o tempo requerido para o processamento das análises, ainda são questões a serem trabalhadas.

O uso da abordagem probabilística desenvolvidas nesse trabalho revelou que a inclusão de conceitos probabilísticos e estatísticos pode ser incorporado nas análises geotécnicas, por meio de procedimentos simples, proporcionando ganhos consideráveis. Por fim, defende-se que as análises probabilísticas não sejam vistas como substitutas às análises determinísticas, mas sim, como um complemento adicional as análises de estabilidade de taludes. Adicionalmente ressalta-se que os resultados encontrados nessa pesquisa são referentes às condições de contorno consideradas nas análises, de modo que, qualquer alteração nas configurações analisadas, seria necessário a reavaliação da estabilidade dos taludes.

## REFERÊNCIAS

ABRAMSON, L. W. *et al.* **Slope stability and stabilization methods**. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002.

ADAMSON, K. A.; PRION, S. Making sense of methods, and measurement: measures of central tendency. **Clinical Simulation in Nursing**, [S.L.], v. 9, n. 12, p. 617-618, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecns.2013.04.003>.

AEP, ALBERTA ENVIRONMENT PROTECTION. **Inspection of small dams**. 1998. Disponível em: <https://open.alberta.ca/dataset/416e3214-d05f-42a4-9c26-ddb59db9eebd/resource/3a9ccdb7-dec5-4f87-bebd-f14f66226205/download/1998-inspectionssmalldams-oct1998.pdf>. Acessado em 26 set. de 2023.

ALAM, S. *et al.* **Strength and durability characteristic of alkali activated GGBS stabilized red mud as geo-material**. Construction and Building Materials, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.261>. Acessado em 10 de mar. de 2023.

AL-KARNI, A. A.; AL-SHAMRANI, M. A. Study of the effect of soil anisotropy on slope stability using method of slices. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 83-103, mar. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-352x\(99\)00046-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-352x(99)00046-4).

AMARAL *et al.* A influência da infiltração em solo não saturado na estabilidade de talude. *In*: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos**. Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/a-influencia-da-infiltracao-em-solo-nao-saturado-na-estabilidade-de-talude?lang=pt-br> Acesso em: 04 fev. 2024.

AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS - ANCOLD. **Guidelines for Design of Dams and Appurtenant Structures for Earthquake**. (2017).

AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS - ANCOLD. **Guidelines for Design of Dams and Appurtenant structures for Earthquake**. (2019).

AUSTRALIAN NATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS - ANCOLD. **Guidelines on Tailings Dams: Planning, Design, Construction, Operation and Closure**. (2012).

APAZA, M. F.; BARROS, J. M. C. **Análise probabilística de estabilidade de taludes pelo Método de Monte Carlo**. *In*: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia, 2014.

ASSIS, A. P. *et al* (2018). **Métodos estatísticos e probabilísticos aplicados à geotecnia**. Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental / FT – Geotecnia, Brasília, 278 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de Encostas. Rio de Janeiro: Moderna, 2009. 33 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028/17**: Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos. Rio de Janeiro: Moderna, 2017.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

AUVINET, G; GONZÁLEZ, J.L. Three-dimensional reliability analysis of earth slopes. **Computers and Geotechnics**, [S.L.], v. 26, n. 3-4, p. 247-261, abr. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-352x\(99\)00041-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-352x(99)00041-5).

ÁVILA, J. P. **Barragens de rejeitos no Brasil**. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2011.

ÁVILA, J. P.; SAWAYA, M.; SAYÃO, A.; FERREIRA, L. Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes. **Geotecnia**, [S.L.], n. 152, p. 435-464, 12 ago. 2021. Coimbra University Press. [http://dx.doi.org/10.14195/2184-8394\\_152\\_13](http://dx.doi.org/10.14195/2184-8394_152_13).

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. **Geotechnical News**, 2010, 28.4: 50-54.

AZEVEDO, P. R. M. **Introdução à estatística**. 3. ed. Natal: EDUFRN, 2016.

BAECHER, G. B.; CHRISTIAN, J. T. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. England: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

BAECHER, G. Statistical analysis of geotechnical data. US Army Corpy of Engineers. Vicksburg. 1987.

BARDHAN, A.; SAMUI, P. Probabilistic slope stability analysis of Heavy-haul freight corridor using a hybrid machine learning paradigm. **Transportation Geotechnics**, [S.L.], v. 37, p. 100815, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100815>.

BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. 2010. 205 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BEZERRA, L. T. V. **Mapeamento de risco e análise de estabilidade de movimentos de massa na comunidade São José do Jacó, Natal/RN**. 2019. 336 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

BILALI, A. E. *et al.* A practical probabilistic approach for simulating life loss in an urban area associated with a dam-break flood. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 76, p. 103011, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103011>.

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. **Géotechnique**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 7-17, mar. 1955. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>.

BISHOP, A.W; MORGENSTERN, N. Stability coefficients for earth slopes. **Géotechnique**, v. 10. P 129-153. 1960.

BRAGA, V. P. C. **Análise probabilística de estabilidade de uma barragem de rejeito**. 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

BRASIL. Lei nº 12334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. **Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Brasília.

BRASIL. Lei nº 14066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). **Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Brasília.

BRAY, J. D.; TRAVASAROU, T. Pseudostatic coefficient for use in simplified seismic slope stability evaluation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.L.], v. 135, n. 9, p. 1336-1340, set. 2009. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000012](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000012).

BROMHEAD, E. N. **The stability of slope**. New York: Taylor & Francis E-Library, 2005.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 6. ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

CAMPELLO, I. C. **Abordagem probabilística aplicada ao estudo da variabilidade geotécnica dos solos**. 2020. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

CAMPELLO, I. C.; ÁVILA, J. P.; VECCI, A. N.; MACHADO, J. L. M. **Variabilidade de propriedades geotécnicas**. Em: XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens – Comitê Brasileiro de Barragens, 2019, Salvador.

CAMPOS, A. A. C. **Condicionantes dos processos erosivos na área urbana de Buriticupu-MA: O caso da voçoroca do bairro Santos Dumont**. 2019. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019.

CARVALHO, G. B. **Incidências de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito**. 2018. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CASTRO, P. V. S. A.; Reinaldo, R. L. Análise probabilística da estabilidade de taludes em barragens de contenção de rejeito: Estudo de Caso. *In: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. Anais eletrônicos*. Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-probabilistica-da-stabilidade-de-taludes-em-barragens-de-contencao-de-r?lang=pt-br>> Acesso em: 03 fev. 2024.

CHENG, H. *et al.* Risk assessment of slope failure considering the variability in soil properties. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 103, p. 61-72, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.07.006>.

CHO, S. E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, [S.L.], v. 136, n. 7, p. 975-984, jul. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000309](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000309).

CHO, S. E. Probabilistic stability analyses of slopes using the ANN-based response surface. **Computers and Geotechnics**, [S.L.], v. 36, n. 5, p. 787-797, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.01.003>.

CHOWDHURY, R. N.; XU, D. W. Rational polynomial technique in slope-reliability analysis. **Journal of Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 119, n. 12, p. 1910-1928, dez. 1993. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1993\)119:12\(1910\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1993)119:12(1910)).

CHOWDHURY, Robin. **Geotechnical slope analysis**. London: Taylor & Francis Group, 2010.

CORDIER, M. *et al.* Structural stability of gravity dams: a progressive assessment considering uncertainties in shear strength parameters. **Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 109-122, 15 nov. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/17499518.2017.1395464>.

COSTA, A. M. **Estudo de tensão deformação para o 3º alteamento da barragem Itabiruçu**. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

COSTA, E. A. **Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicado à estabilidade de taludes**. 2005. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CUENTAS, R. E. S. **Análise da estabilidade dinâmica de taludes de solo**. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de O Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

CZAJKOWSKI, M. *et al.* Estimating environmental and cultural/heritage damages of a tailings dam failure: the case of the Fundão dam in Brazil. **Journal of Environmental Economics and Management**, [S.L.], v. 121, p. 102849, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102849>.

DAY, Robert W. **Geotechnical earthquake engineering handbook**. 2. ed. Washington, D.C: ICC, 2012.

DELL'AVANZI, E.; SAYÃO, A.S. Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. In: COBRAMSEG, 11, 1998, Brasília, **Anais**. Brasília, 1998. v. 2, p. 1289-1295.

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

DUARTE, S. C. H. **Estudo comparativo de diferentes abordagens na análise sísmica de barragens de aterro**. 2016. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.

DUNCAN, J. M. 2000. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Vol 126: pp 307- 314.

DUNCAN, J. M. State of the art: Limit Equilibrium and Finite-Element analysis of slopes. **Journal of Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 122, n. 7, p. 577-596, jul. 1996. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:7(577)).

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. **Soil strength and slope stability**. New Jersey: Wiley, 2014.

EINSTEIN, H. H. Risk and risk analysis in rock engineering. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 141-155, abr. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798\(96\)00014-4](http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(96)00014-4).

EL-RAMLY, H. 2001. **Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: Bridging theory and practice**. Ph.D. Thesis, University of Alberta, Canada.

ESPÓSITO, T. J.; DUARTE, A. P. Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S.L.], v. 63, n. 2, p. 393-398, jun. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672010000200026>.

FARIAS, M. M.; ASSIS, A. P. **Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), 11, 1998, Brasília. Anais... Brasília, 1998. v. 2, p. 1305–1313.

FELLENIUS, W. 1936. Calculation of the Stability of Earth Dams, Transactions, 2nd International Congress on Large Dams, International Commission on Large Dams, Washington, DC, pp 445-459.

FERNÁNDEZ, W.; VILLALOBOS, S.; KING, R. Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelos residuales de granito completamente descompuesto. **Revista Ingeniería de Construcción**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 5-14, abr. 2018. Pontificia Universidad Católica de Chile. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50732018000100005>.

FERREIRA, J. L. F. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Especialização em Geotecnia, Universidade do Porto, Porto, 2012.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FLORES, E. A. F. **Análise probabilística da estabilidade de taludes considerando a variabilidade espacial do solo**. 2008. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FONTENELLE, A. S. **Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nordeste brasileiro - estudo de caso: barragens do estado do Ceará**. 2007. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. The statistics of embankment dam failures and accidents. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v. 37, n. 5, p. 1000-1024, 1 out. 2000. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t00-030>.

GARCÍA, J. A. B. *et al.* Estabilidade dos taludes de uma barragem de terra homogênea considerando sismos. **Brazilian Applied Science Review**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 2484-2493, 2020. Brazilian Applied Science Review. <http://dx.doi.org/10.34115/basrv4n4-025>.

GARCIA, L. C. *et al.* Brazil's worst mining disaster: corporations must be compelled to pay the actual environmental costs. **Ecological Applications**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 5-9, jan. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/eap.1461>.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GIACON JUNIOR, A. J. **Análise probabilística da estabilidade de taludes via teoria da confiabilidade**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2018.

GÓIS, F.; ASSIS, A. Análise probabilística de estabilidade de taludes - Barragem no Estado de Minas Gerais. *In*: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos**. Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-probabilistica-de-estabilidade-de-taludes-barragem-no-estado-de-minas-ge?lang=pt-br>> Acesso em: 03 fev. 2024.

GUIMARÃES, F. C. F. **Análise de desempenho de uma barragem de rejeito considerando interferências de detonações em uma mina à céu aberto**. 2020. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós - Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

GUO, X. *et al.* A comparative study of different reliability methods for high dimensional stochastic problems related to earth dam stability analyses. **Engineering Structures**, v. 188, p. 591-602, jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.056>.

GUO, X. *et al.* Probabilistic stability analysis of an embankment dam considering soil spatial variability. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 113, p. 103093, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103093>.

GUO, X.; DIAS, D. Kriging based reliability and sensitivity analysis – Application to the stability of an earth dam. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 120, p. 103411, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103411>.

GUTIERREZ, M. *et al.* Normalized undrained shear strength of clay shales. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 99, n. 1-2, p. 31-39, jun. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.002>.

HANCOCK, G.R.; COULTHARD, T.J. Tailings dams: assessing the long-term erosional stability of valley fill designs. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v. 849, p. 157692, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157692>.

International Aluminum Institute (IAI). **Sustainable Bauxite Residue Management Guidance**. 2022. Disponível em: <<https://international-aluminium.org/resources/bauxite-use/>>. Acessado em 24 de mai. de 2023.

International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Programme, and Principles for Responsible Investment. 2020. **Global Industry Standard on Tailings Management (GISTM)**. St Gallen, Switzerland: Global Tailings Review. Disponível em: <[https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-tailings-standard\\_spreads\\_PT.pdf](https://globaltailingsreview.org/wp-content/uploads/2020/08/global-tailings-standard_spreads_PT.pdf)>. Acesso em 06 jun. de 2023.

JANBU, N. Slope stability computations. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, [S.L.], v. 12, n. 4, p. 67, abr. 1975. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90139-4](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(75)90139-4).

JEFFRIES, M.; BEEN, K. **Soil liquefaction: A critical state approach**. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016.

JIANG, S. *et al.* Advances in reliability and risk analyses of slopes in spatially variable soils: a state-of-the-art review. **Computers and Geotechnics**, [S.L.], v. 141, p. 104498, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104498>.

JIANG, S. *et al.* Efficient sampling of the irregular probability distributions of geotechnical parameters for reliability analysis. **Structural Safety**, [S.L.], v. 101, p. 102309, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2022.102309>.

JIMENEZ-RODRIGUEZ, R.; SITAR, N.; CHACÓN, J. System reliability approach to rock slope stability. **International Journal of Rock Mechanics And Mining Sciences**, [S.L.], v. 43, n. 6, p. 847-859, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.11.011>.



JOHARI, A. *et al.* An investigation into application of jointly distributed random variables method in reliability assessment of rock slope stability. **Computers and Geotechnics**, [S.L.], v. 47, p. 42-47, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2012.07.003>.

JOHARI, A.; GHOLAMPOUR, A. A practical approach for reliability analysis of unsaturated slope by conditional random finite element method. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 102, p. 79-91, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.06.004>.

JOSHI, A. S. *et al.* Cuckoo Search Optimization-A review. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 4, n. 8, p. 7262-7269, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.055>.

JUANG, C. H. *et al.* Reliability-based assessment of stability of slopes. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 26, p. 012006, 9 set. 2015. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/26/1/012006>.

KALANTARI, A.R. *et al.* Effect of spatial variability of soil properties and geostatistical conditional simulation on reliability characteristics and critical slip surfaces of soil slopes. **Transportation Geotechnics**, [S.L.], v. 39, p. 100933, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100933>.

KOLMOGOROV, A.N. **Foundations of the theory of probability**. New York: Chelsea Publishing Company, 1956.

LADD, C. C.; FOOTT, R. New design procedure for stability of soft clays. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, [S.L.], v. 100, n. 7, p. 763-786, jul. 1974. American Society of Civil Engineers (ASCE). <http://dx.doi.org/10.1061/ajgeb6.0000066>.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

LEÃO, S. R.; SANTIAGO, A. M. S. Cenário das barragens de rejeito: conhecer para evitar novas catástrofes. **Ambiente & Sociedade**, [S.L.], v. 25, p. 1-21, 2022. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210066r1vu202212ao>.

LIU, L. *et al.* Conditional random field reliability analysis of a cohesion-frictional slope. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 82, p. 173-186, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.014>.

LIU, Shuai *et al.* The roles of red mud as desulfurization and denitrification in flue gas: a review. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 109770, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.109770>.

LÓPEZ, C. N. M. **Métodos probabilísticos aplicados na análise da estabilidade de taludes em solo**. 2017. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MALKAWI, A. I. H. *et al.* Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. **Structural Safety**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 161-187, jun. 2000.

MALKAWI, A. I. H.; ABDULLA, F. A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. **Structural Safety**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 161-187, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-4730\(00\)00006-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-4730(00)00006-0).

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MELO NETO, M. V. **Classificação e caracterização geotécnica de dois movimentos de massa no estado de Pernambuco**. 2005. 235 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

MENDES, L. O. **Análise probabilística do potencial de falha por liquefação estática e dinâmica de barragens**. 2019. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

MORALES, C.; BARD, A.; PALMA, C. The impact of considering the vertical seismic coefficient kv on the pseudostatic slope stability analysis of downstream tailings sand dams. **Obras y Proyectos**, [S.L.], n. 32, p. 25-33, dez. 2022. Universidad Catolica de la Santisima Concepcion. <http://dx.doi.org/10.21703/0718-51620202203203>.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. **Géotechnique**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 79-93, mar. 1965. Thomas Telford Ltd.. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>.

MOUYEAUX, A. *et al.* Probabilistic stability analysis of an earth dam by Stochastic Finite Element Method based on field data. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 101, p. 34-47, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.017>.

NATH, H.; SAHOO, P.; SAHOO, A. Characterization of red mud treated under high temperature fluidization. **Powder Technology**, [S.L.], v. 269, p. 233-239, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.09.011>.

NERY, K. D. **Caracterização geotécnica e avaliação da compactação de um resíduo da produção de alumina (lama vermelha) desaguado por filtro prensa**. 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

NETTO, S. A.; FARIAS, M. M. Abordagem probabilística na análise de estabilidade de uma barragem de terra. *In*: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos**. Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/abordagem-probabilistica-na-analise-de-estabilidade-de-uma-barragem-de-terra?lang=pt-br>> Acesso em: 03 fev. 2024.

NIERWINSKI, H. P. **Caracterização e comportamento geomecânico de rejeitos de mineração**. 2019. 222 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

NIERWINSKI, H. P. Potencial de liquefação de resíduos de mineração estimado através de ensaios de campo. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

paOLIVEIRA, L. A. *et al.* Improving tailings dam risk management by 3D characterization from resistivity tomography technique: case study in São Paulo-Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, [S.L.], v. 210, p. 104924, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104924>.

OLSON, S. M. **Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance**. 2001. 546 f. Thesis (Doctorate) - Course de Philosophy In Civil Engineering, University Of Illinois At Urbana-Champaign, Illinois, 2001.

PASSAFARO, G. S.; ASSIS, H. B.; NOGUEIRA, C. G. Análise determinística e de confiabilidade da estabilidade de taludes por meio de acoplamento direto entre métodos de equilíbrio limite e o FORM: estudo da influência do nível d'água, sobrecarga e grau de compactação do solo. *In*: ANAIS DO XX COBRAMSEG, 2022, Campinas. **Anais eletrônicos**. Campinas, Galoá, 2022. Disponível em: <<https://proceedings.science/cobramseg-2022/trabalhos/analise-deterministica-e-de-confiabilidade-da-estabilidade-de-taludes-por-meio-d?lang=pt-br>> Acesso em: 03 fev. 2024.

PEDROSA, P. T. *et al.* Análises de estabilidade por equilíbrio limite em modelos bi e tridimensionais. **Geotecnia**, [S.L.], n. 158, p. 3-23, 26 jul. 2023. Coimbra University Press. [http://dx.doi.org/10.14195/2184-8394\\_158\\_1](http://dx.doi.org/10.14195/2184-8394_158_1).

PEREIRA, D. M. **Retroanálise de talude rodoviário – abordagens determinísticas e probabilística**. 2022. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

PHOON, K. *et al.* Geotechnical uncertainty, modeling, and decision making. **Soils and Foundations**, [S.L.], v. 62, n. 5, p. 101189, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101189>.

PHOON, K.; KULHAWY, F. H. Characterization of geotechnical variability. **Canadian Geotechnical Journal**, [S.L.], v. 36, n. 4, p. 612-624, 22 nov. 1999. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/t99-038>.

PICIULLO, L. *et al.* A new look at the statistics of tailings dam failures. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 303, p. 106657, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106657>.

PINE, R. J.; ROBERDS, W. J. A risk-based approach for the design of rock slopes subject to multiple failure modes—illustrated by a case study in Hong Kong. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, [S.L.], v. 42, n. 2, p. 261-275, fev. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.014>.

POPESCU, M. E. A suggested method for reporting landslide causes. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, 71–74 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF02594958>

QUEIROZ, R. C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Paulo: Blucher, 2016.

RADINZ, G. A. M. D. **Análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade em aterros sobre solos de baixa consistência**. 2018. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

ROCSCIENCE. *Critical Slip Surface Search Methods in Slide 7.0 – A Guide to Search Methods in Slide 7.0*. (2016).

ROSE, R. L.; MUGI, S. R.; SALEH, J. H. Accident investigation and lessons not learned: accimap analysis of successive tailings dam collapses in Brazil. **Reliability Engineering & System Safety**, [S.L.], v. 236, p. 109308, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2023.109308>.

ROSENBLUETH, E. Point estimates for probability moments. **Proceedings of the national academy of sciences**, [S.L.], v. 72, n. 10, p. 3812-3814, out. 1975. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.72.10.3812>.

SANDOVAL, M. A. P. **Análise determinística e probabilística da estabilidade de taludes**. 2012. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SANDRONI, S. S.; SAYAO, A. S. F. J. **Avaliação estatística do coeficiente de segurança de taludes**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias (COBRAE), 1, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS), Rio de Janeiro, 1992. p. 523-536.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

SANTOS JUNIOR, M. P.; RIGATTO, I. B.; PINTO, G. H. S. Caracterização da resistência não drenada de um solo residual argiloso por meio de ensaios de campo e laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 20., 2020, Campinas. **Proceedings [...]**. Campinas: Galoá, 2020. p. 1-8.

SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. **Landslides analysis and control**. Washington D.C: TRB, 1978.

SILVA, B. M. F. **Análise probabilística de estabilidade de falésias no litoral do RN**. 2019. 241 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SILVA, C. C. **Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística**. 2015. 104 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SILVA, F. M. **Avaliação probabilística da estabilidade de uma barragem de rejeitos**. 2021. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

SILVA, P. H. A. **Simulação numérica das poropressões em aterros construídos com resíduo da produção de alumina desaguado por filtros prensa**. 2020. 187 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SOUSA, T. F. P. **Abordagem Monte Carlo para a análise probabilística da estabilidade de taludes durante rebaixamento rápido de reservatório.** 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

SPENCER, E. A Method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. **Geotechnique**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 11-26, mar. 1967. Thomas Telford Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11>.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1997). **Engineering and design introduction to probability and reability methods for use in geotechnical engineering.** Engineering Technical Letter N 1110-2-547, Department of the Army, U. S., Washington, DC.

UZIELLI, M. *et al.* Soil variability analysis for geotechnical practice. **Characterization and engineering properties of natural soils**, [S.L.], p. 1-103, 7 nov. 2006. Taylor & Francis. <http://dx.doi.org/10.1201/noe0415426916.ch3>

VARGAS, M. Introdução a mecânica dos solos. São Paulo, MCgraw-Hill do Brasil, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977. 509 p

VARKEY, D.; HICKS, M.A.; VARDON, P.J. An improved semi-analytical method for 3D slope reliability assessments. **Computers And Geotechnics**, [S.L.], v. 111, p. 181-190, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.020>.

VARNES, D.J., 1978, Slope movement types and processes, in Schuster, R.L., and Krizek, R.J., eds., *Landslide Analysis and Control*: Washington, D.C., National Academy Press, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 176, p. 12–33.

VECCI, A. N. **Análise probabilística da estabilidade de um talude de mineração.** 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

VICK, S. G. **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams.** Vancouver: Bitech Publishers, 1990.

VILHETE, D. F. **Retroanálise da ruptura do talude de montante da Barragem do Açú no final do período construtivo.** 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

WHITMAN, R. V. Evaluating calculated risk in geotechnical engineering. **Journal of Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 110, n. 2, p. 143-188, fev. 1984. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1984\)110:2\(143\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1984)110:2(143)).

YANG, R. *et al.* Optimal geotechnical site investigations for slope reliability assessment considering measurement errors. **Engineering Geology**, [S.L.], v. 297, p. 106497, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106497>.

YOKOZAWA, S. Y. **Avaliação dos métodos probabilísticos aplicados na análise de risco devido à instabilidade de barragens**. 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

ZHANG, J.; HUANG, H.W. Risk assessment of slope failure considering multiple slip surfaces. **Computers and Geotechnics**, [S.L.], v. 74, p. 188-195, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.011>.

ZHOU, X. *et al.* Analysis of slope stability with imprecise soil properties using unncertain sets. **Mathematical Problems in Engineering**, [S.L.], v. 2019, p. 1-9, 13 mar. 2019. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2019/1062347>.

ZUFFO, M. S. R. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens**. 2005. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

## APÊNDICE A

### A.1 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Quadro A.1.1 - Resultados encontrados nos ensaios realizados nas amostras coletadas à trado.

Local	Amostra	Prof. (m)	Ensaio Cis. Dir		Ensaio CID		Ensaio CIU				Ensaio UU	
			Tensões Efetivas		Tensões Efetivas		Tensões Efetivas		Tensões Totais		Tensões Totais	
			c' (kPa)	φ' (graus)	c' (kPa)	φ' (graus)	c' (kPa)	φ' (graus)	c (kPa)	φ (graus)	Su (kPa)	φ (graus)
Jazida	TR01 + TR02 (natural) (A)	1m a 2m	23.8	39	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR01 + TR02 (inundado) (A)	1m a 2m	21.6	36.7	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR 01+02	3m a 4m	x	x	x	x	18.9	34.7	*	*	33.5	0
	TR - 07+08 (inundado) (A)	1m a 2m	24.2	35.7	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR 07+08	3m a 4m	x	x	32.5	30.6	27.6	29.9	27	21.6	X	X
Média			23.2	37.1	32.5	30.6	23.3	32.3	27	21.6	33.5	X
Desvio Padrão			1.4	1.7	x	x	6.15	3.39	x	x	x	x
Fundo do reservatório	TR - 13+14 (natural) (B)	3m a 4m	22.7	40.2	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR - 13+14 (inundado) (B)	3m a 4m	0.7	36.9	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR 13+14	3m a 4m	x	x	x	x	35.1	31.7	61	29.5	85.3	2.9
	TR 15+16	1m a 2m	x	x	x	x	10.7	33.5	*	*	x	x
	TR - 15+16 (natural) (B)	3m a 4m	10.6	39.5	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR - 15+16 (inundado) (B)	3m a 4m	12.9	31.7	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR 17+18	1m a 2m	x	x	x	x	x	x	x	x	38.9	0
	TR - 17+18 (natural) (B)	3m a 4m	45.9	34.9	x	x	x	x	x	x	x	x
	TR - 17+18 (inundado) (B)	3m a 4m	17.4	33.4	x	x	x	x	x	x	x	x
Média			18.4	36.1	x	x	<b>22.9</b>	<b>32.6</b>	61.0	29.5	62.1	1.5
Desvio Padrão			15.4	3.4	x	x	<b>17.3</b>	<b>1.3</b>	x	x	32.8	2.1

Fonte: Adaptado do relatório de investigações geotécnicas da “Empresa A” (relatório SLU-N-142790-001)

Quadro A.1.2 - Resultados das resistências encontrados nos ensaios triaxiais realizados em amostras dos Poços de Inspeção e coletadas com o tubo Shelby.

Material	Amostra	CID			CIU					UU		
		c'(kPa)	$\phi'$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c'(kPa)	$\phi'$ (°)	c(kPa)	$\phi$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Su (kPa)	$\phi$ (°)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Silte arenoso superficial	PI-01 B1 (2m)	18	29	16	30	22	45	8	18	43	1	18
	PI-01 C1 (3m)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	SH-01 A	32	30	19	x	x	x	x	x	x	x	x
	SH-06B	x	x	x	31	22	65	16	21	x	x	x
	SH-08A	x	x	x	38	22	52	13	20	x	x	x
Média		<b>25*</b>	<b>29</b>	<b>18</b>	<b>33*</b>	22	54	13	<b>19</b>	43	1	18
Desvio Padrão		<b>10</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	5	0	10	4	<b>1</b>	0	0	0
Silte arenoso	SH-06A	x	x	x	56	31	148	28	18	x	x	x
	SH-07A	22	31	15	x	x	x	x	x	x	x	x
	SH-03 A	x	x	x	28	24	23	18	19	x	x	x
Média		<b>22*</b>	<b>31</b>	<b>15</b>	<b>42*</b>	28	85	23	19	x	x	x
Desvio Padrão		<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	20	5	88	7	1	x	x	x
Areia superficial	PI-02 C1 (3m)	x	x	x	24	21	30	10	17	42	1	17
	PI-03 B1 (2m)	17	25	16	21	23	26	13	17	41	0	16
	PI-04 B1 (2m)	x	x	x	18	21	23	11	16	38	1	16
	PI-04 C1 (3m)	26	26	18	x	x	x	x	x	x	x	x
	PI-05 B1 (2m)	21	27	14	x	x	x	x	x	25	1	15
	PI-05 C1 (3m)	x	x	x	22	19	20	12	14	X	X	X
	PI-06 C1 (3m)	x	x	x	23	18	21	12	16	28	2	15
	SH-02A	x	x	x	x	38	x	36	20	x	x	x
SH-02C	x	x	x	x	x	x	x	x	54	2	19	
Média		<b>21*</b>	<b>26</b>	<b>16</b>	<b>21*</b>	23	24	16	17	38	1	16
Desvio Padrão		<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	2	7	4	10	2	10	1	2
Areia	SH-01B (7m)	x	x	x	33	33	142	31	20	x	x	x
	SH-04A	x	x	x	x	x	x	x	x	88	3	19
	SH-05A	29	34	19	x	x	x	x	x	x	x	x
	SH-07B	x	x	x	x	x	x	x	x	23	0	19
	SH-08B	29	30	19	x	x	x	x	x	x	x	x
Média		<b>29*</b>	<b>32</b>	<b>19</b>	<b>33*</b>	33	142	31	20	55	2	19
Desvio Padrão		<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	x	x	x	x	x	46	2	0
Silte argiloso	SH-02B (20 m)	30	30	19	x	x	x	x	x	x	x	x
	SH-02D (23 m)	x	x	x	27	28	53	14	19	x	x	x
Média		<b>30*</b>	<b>30</b>	<b>19</b>	<b>27*</b>	<b>28</b>	<b>53</b>	<b>14</b>	<b>19</b>	x	x	x



Desvio Padrão		0	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	x	x	x
Argila	SH-08C	x	x	x	22	33	45	16	17	x	x	x
	SH-08D	x	x	x	x	x	x	x	x	65	1	20
Média		x	x	x	<b>22*</b>	<b>33</b>	45	16	<b>17</b>	<b>65</b>	1	20
Desvio Padrão		x	x	x	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0

\*A coesão para os materiais granulares como areia e silte arenoso serão consideradas como nulas, evitando trabalhar com valores de coesão aparente.

Fonte: Adaptado do relatório de investigações geotécnicas da “Empresa A” (Relatórios SLU-N-142790-001, SLU-F-153917-001 E SLU-F-155939-001)

## A.2 PARÂMETROS PROBABILÍSTICOS ADOTADOS

Quadro A.2.1 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção A.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4	8	8
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,3	6,6	6,6
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,6	1,2	1,2
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3	6	6
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,6	1,2	1,2
7	Areia Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	29,0	2,9	5,8	5,8
9	Areia Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
10	Areia Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	26,0	2,6	5,2	5,2
12	Areia Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
13	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
14	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,1	6,2	6,2
15	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
16	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
17	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,8	5,6	5,6
18	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
19	Areia - PICO	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
20	Areia - LIQ	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
21	Silte Arenoso	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
22	Silte Arenoso	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,1	6,2	6,2
23	Silte Arenoso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
24	Silte Arenoso - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
25	Silte Arenoso - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,8	5,6	5,6
26	Silte Arenoso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08

Fonte: Autora (2023)

Quadro A.2.2 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção B.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4,00	8,00	8,00
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,30	6,60	6,60
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,10	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	0,03	6,00	6,00
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,06	1,20	1,20
7	Areia Superficial	Coesão	Log-normal	0,10	0,04	0,08	0,08
8	Areia Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	29,0	2,90	5,80	5,80
9	Areia Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
10	Areia Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	26,0	2,60	5,20	5,20
12	Areia Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
13	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
14	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
15	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
16	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
17	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
18	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
19	Silte Argiloso - Operação	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
20	Silte Argiloso - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	40,0	12,00	24,00	24,00
21	Silte Argiloso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
22	Impenetrável	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20

Fonte: Autora (2023)

Quadro A.2.3 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção C.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4,00	8,00	8,00
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,30	6,60	6,60
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
7	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
9	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
10	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
12	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
13	Silte Arenoso Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
14	Silte Arenoso Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
15	Silte Arenoso Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
16	Silte Arenoso Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
17	Silte Arenoso Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	27,0	2,70	5,40	5,40
18	Silte Arenoso Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
19	Silte Arenoso Superficial - PICO	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
20	Silte Arenoso Superficial - LIQ	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
21	Silte Arenoso	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
22	Silte Arenoso	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,20	6,20	6,20
23	Silte Arenoso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
24	Silte Arenoso - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
25	Silte Arenoso - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
26	Silte Arenoso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
27	Silte Argiloso - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	50,0	15,00	30,00	30,00
28	Silte Argiloso - Operação	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
29	Silte Argiloso - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	40,0	12,0	24,00	24,00
30	Silte Argiloso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
31	Argila - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	70,0	21,0	42,00	42,00
32	Argila - Operação	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14
33	Argila - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	56,0	16,8	33,60	33,60
34	Argila - Residual	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14

Fonte: Autora (2023)

Quadro A.2.4 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção D.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4,00	8,00	8,00
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,30	6,60	6,60
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
7	Areia Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	29,0	2,90	5,80	5,80
9	Areia Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
10	Areia Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	26,0	2,60	5,20	5,20
12	Areia Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
13	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
14	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
15	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
16	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
17	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
18	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
19	Silte Arenoso	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
20	Silte Arenoso	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
21	Silte Arenoso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
22	Silte Arenoso - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
23	Silte Arenoso - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
24	Silte Arenoso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
25	Silte Argiloso - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	50,0	15,0	30,0	30,0
26	Silte Argiloso - Operação	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
27	Silte Argiloso - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	40,0	12,00	24,0	24,0
28	Silte Argiloso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
29	Impenetrável	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20

Fonte: Autora (2023)

Quadro A.2.5 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção E.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4,00	8,00	8,00
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,30	6,60	6,60
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
7	Areia Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	29,0	2,90	5,80	5,80
9	Areia Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
10	Areia Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	26,0	2,60	5,20	5,20
12	Areia Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
13	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
14	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
15	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
16	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
17	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
18	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
19	Silte Arenoso	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
20	Silte Arenoso	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
21	Silte Arenoso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
22	Silte Arenoso - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
23	Silte Arenoso - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
24	Silte Arenoso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
25	Silte Arenoso - PICO	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
26	Silte Arenoso - LIQ	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
27	Silte Argiloso	Coesão	Log-normal	11,0	4,40	8,80	8,80
28	Silte Argiloso	Ângulo de atrito	Log-normal	34,0	3,40	6,80	6,80
29	Silte Argiloso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
30	Silte Argiloso - Res	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
31	Silte Argiloso - Res	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
32	Silte Argiloso - Res	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08

Fonte: Autora (2023)

Quadro A.2.6 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção F.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4,00	8,00	8,00
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,30	6,60	6,60
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
7	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
9	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
10	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
12	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
13	Areia - PICO	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
14	Areia - LIQ	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
15	Silte Arenoso Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
16	Silte Arenoso Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
17	Silte Arenoso Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
18	Silte Arenoso Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
19	Silte Arenoso Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	27,0	2,70	5,40	5,40
20	Silte Arenoso Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
21	Silte Arenoso	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
22	Silte Arenoso	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
23	Silte Arenoso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
24	Silte Arenoso - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
25	Silte Arenoso - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
26	Silte Arenoso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
27	Silte Arenoso - PICO	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
28	Silte Arenoso - LIQ	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08

Fonte: Autora (2023)



Quadro A.2.7 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção G.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4	8	8
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3.3	6.6	6.6
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0.6	1.2	1.2
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0.04	0.08	0.08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3	6	6
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
7	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
9	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
10	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
12	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
13	Areia - PICO	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
14	Areia - LIQ	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
15	Silte Arenoso Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
16	Silte Arenoso Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
17	Silte Arenoso Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
18	Silte Arenoso Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
19	Silte Arenoso Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	27,0	2,70	5,40	5,40
20	Silte Arenoso Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
21	Silte Arenoso Superficial - PICO	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
22	Silte Arenoso Superficial - LIQ	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
23	Silte Arenoso	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
24	Silte Arenoso	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
25	Silte Arenoso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
26	Silte Arenoso - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
27	Silte Arenoso - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
28	Silte Arenoso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
29	Silte Arenoso - PICO	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
30	Silte Arenoso - LIQ	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
31	Silte Argiloso - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	50,0	15,00	30,00	30,00
32	Silte Argiloso - Operação	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
33	Silte Argiloso - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	40,0	12,00	24,00	24,00
34	Silte Argiloso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
35	Argila - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	70,0	21,00	42,00	42,00
36	Argila - Operação	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14
37	Argila - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	56,0	16,80	33,60	33,6
38	Argila - Residual	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14
39	Impenetrável	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20

Fonte: Autora (2023)

Quadro A.2.8 - Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção H.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4,00	8,00	8,00
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,30	6,60	6,60
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
7	Areia Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	29,0	2,90	5,80	5,80
9	Areia Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
10	Areia Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	26,0	2,60	5,20	5,20
12	Areia Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
13	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
14	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
15	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
16	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
17	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
18	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
19	Silte Arenoso Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
20	Silte Arenoso Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
21	Silte Arenoso Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
22	Silte Arenoso Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
23	Silte Arenoso Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	27,0	2,70	5,4	5,40
24	Silte Arenoso Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
25	Silte Arenoso - PICO	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
26	Silte Arenoso - LIQ	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
27	Silte Argiloso	Coesão	Log-normal	11,0	4,40	8,80	8,80
28	Silte Argiloso	Ângulo de atrito	Log-normal	34,0	3,40	6,80	6,80
29	Silte Argiloso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
30	Silte Argiloso - Res	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
31	Silte Argiloso - Res	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
32	Silte Argiloso - Res	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
33	Silte Argiloso - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	50,0	15,00	30,0	30,00
34	Silte Argiloso - Operação	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
35	Silte Argiloso - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	40,0	12,00	24,00	24,00
36	Silte Argiloso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
37	Argila - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	70,0	21,00	42,00	42,00
38	Argila - Operação	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14
39	Argila - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	56,0	16,80	33,60	33,60
40	Argila - Residual	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14

Fonte: Autora (2023)

Quadro A.2.9- Dados estatísticos usados nas análises probabilísticas da Seção I.

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
1	Aterro	Coesão	Log-normal	10,0	4,00	8,00	8,00
2	Aterro	Ângulo de atrito	Log-normal	33,0	3,30	6,60	6,60
3	Aterro	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
4	Aterro - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
5	Aterro - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
6	Aterro - Residual	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20
7	Areia	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
8	Areia	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
9	Areia	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
10	Areia - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
11	Areia - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
12	Areia - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
13	Silte Arenoso Superficial	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
14	Silte Arenoso Superficial	Ângulo de atrito	Log-normal	30,0	3,00	6,00	6,00
15	Silte Arenoso Superficial	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
16	Silte Arenoso Superficial - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
17	Silte Arenoso Superficial - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	27,0	2,70	5,40	5,40
18	Silte Arenoso Superficial - Residual	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
19	Silte Arenoso Superficial - PICO	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
20	Silte Arenoso Superficial - LIQ	Peso Específico	Log-normal	17,0	0,51	1,02	1,02
21	Silte Arenoso	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
22	Silte Arenoso	Ângulo de atrito	Log-normal	31,0	3,10	6,20	6,20
23	Silte Arenoso	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
24	Silte Arenoso - Residual	Coesão	Log-normal	0,1	0,04	0,08	0,08
25	Silte Arenoso - Residual	Ângulo de atrito	Log-normal	28,0	2,80	5,60	5,60
26	Silte Arenoso - Residual	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08
27	Silte Argiloso - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	50,0	15,0	30,00	30,00
28	Silte Argiloso - Operação	Peso Específico	Log-normal	18,0	0,54	1,08	1,08

#	Nome	Propriedades	Distribuição	Média	Desvio Padrão	Mínimo Relativo	Máximo Relativo
29	Argila - Operação	Resistência não-drenada	Log-normal	70,0	21,0	42,00	42,00
30	Argila - Operação	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14
31	Argila - Residual	Resistência não-drenada	Log-normal	56,0	16,8	33,60	33,6
32	Argila - Residual	Peso Específico	Log-normal	19,0	0,57	1,14	1,14
33	Impenetrável	Peso Específico	Log-normal	20,0	0,60	1,20	1,20

Fonte: Autora (2023)