



Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

Plataforma Integrada Para a Avaliação do Risco Devido
aos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas

Katherin Rocio Cano Bezerra da Costa, MSc

Orientador: Prof. André Pacheco de Assis, PhD

Coorientador: Prof. André Luís Brasil Cavalcante, DSc

Tese de Doutorado

Publicação: G.TD-195/2024

Brasília/DF – Maio/2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PLATAFORMA INTEGRADA PARA A AVALIAÇÃO DO RISCO DEVIDO AOS
DESLIZAMENTOS SUPERFICIAIS DEFLAGRADOS POR CHUVAS**

KATHERIN ROCIO CANO BEZERRA DA COSTA

**EXAME DE QUALIFICAÇÃO DE DOUTORADO SUBMETIDO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**PROF. ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)
(COORDINADOR)**

**PROF. JUAN FÉLIX RODRÍGUEZ REBOLLEDO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PROF. ROBERTO QUENTAL COUTINHO, DSc (UFPE)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**PROF. HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc (TETRA TECH)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 16 DE MAIO DE 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTA, KATHERIN ROCIO CANO BEZERRA DA

Plataforma Integrada para a Avaliação do Risco Devido aos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas [Distrito Federal] 2024

xxiii, 161 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2024)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estabilidade de taludes 2. Deslizamentos superficiais

3. Probabilidade de falha 4. Solos não saturados

I. ENC/FT/UnB

II. Doutor

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Costa, K.R.C.B. (2024). Plataforma Integrada para a Avaliação do Risco Devido aos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-195/2024, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Katherin Rocio Cano Bezerra da Costa

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Plataforma Integrada para a Avaliação do Risco Devido aos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas

GRAU / ANO: Doutor / 2024

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Katherin Rocio Cano Bezerra da Costa

QC 13 Torre M1 Apto 12

71687-676 – Brasília/DF – Brasil

DEDICATÓRIA

A Deus e ao Mateus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, meu Pai que está nos céus, dono da ciência e eterno inspirador da minha vida. Obrigada Deus pela força para finalizar este trabalho em meio às mudanças e às dificuldades da vida.

Agradeço ao meu esposo Mateus Bezerra, pelo seu apoio incondicional e seus infinitos incentivos cheios de amor. Obrigada amor pelo sacrifício e pela paciência, pelas suas palavras de encorajamento e pelo seu exemplo de homem cristão. Você me inspira. Te amo infinitamente!

Agradeço aos meus filhos, Israel e Samuel. Vocês, mesmo sendo bebês, deram força e alentos para a mamãe finalizar a pesquisa. Obrigada meus amores pelo sacrifício e o tempo doado.

Agradeço aos meus pais Carlos e Rocio e aos meus irmãos Carlos e Stefano que, mesmo estando longe, sempre se fizeram presentes com suas orações e apoio incondicional.

Agradeço à minha sogra Maria Helena, ao meu sogro José Roberto e aos meus cunhados André e Tiago, a família que o Brasil me deu, sempre vibrando e apoiando as nossas conquistas.

Agradeço aos meus orientadores, Professor André Assis e Professor André Brasil. Obrigada pela confiança e pela paciência que tiveram comigo neste processo de aprendizado.

Agradeço à Universidade de Brasília pela oportunidade de realizar o doutorado na área que sempre, como engenheira civil, sonhei em trabalhar.

Agradeço à minha psicóloga Clarissa Suassuna. Você é como um anjo que Deus enviou para me ajudar a colocar as ideias no lugar. Sou grata pelo seu cuidado e carinho que sempre tem comigo.

Agradeço à minha igreja ICE Jardins. Obrigada a todos os meus irmãos em Cristo pelas orações e pelas palavras de ânimo. Agradeço especialmente às minhas irmãs e amigas Raquel e Lydia, vocês foram a prova viva do amor que Jesus nos ensina. Mesmo com pouco tempo caminhando juntas pela estrada da fé, vocês foram usadas por Deus para ser suporte e alívio nos meus dias difíceis.

Agradeço aos meus colegas do grupo de pesquisa GeoFluxo pelas contribuições e parcerias feitas durante os anos de pesquisa. Agradeço, especialmente, à Mariana e à Ana Paola. Muitos momentos de estresse foram aliviados com o apoio e a companhia de vocês. Lembrarei sempre dos momentos no laboratório com muito carinho e saudade.

Obrigada à minha amiga e irmã Xiomara Osorio. Não importa a distância, você sempre tem sido a amiga que todo mundo gostaria de ter. Sensata, amorosa e encorajadora. Obrigada por acreditar sempre em mim. Saudade!

PLATAFORMA INTEGRADA PARA A AVALIAÇÃO DO RISCO DEVIDO AOS DESLIZAMENTOS SUPERFICIAIS DEFLAGRADOS POR CHUVAS

RESUMO

Nos últimos anos, os registros de perdas humanas associadas aos movimentos de massa aumentaram significativamente, tornando-se uma ameaça latente para as comunidades de regiões montanhosas. Tendo em vista que a ruptura de um maciço não é sempre atingida sob condições saturadas e que em alguns casos, a análise do fenômeno não saturado pode ser mais confiável, é proposta, nesta pesquisa, uma plataforma integrada para avaliar a probabilidade de falha na condição não saturada, sendo este, o *input* principal para a avaliação do risco de deslizamentos deflagrados por eventos de precipitação. Neste trabalho, as incertezas associadas aos parâmetros físicos, hidráulicos e de resistência que definem a estabilidade da encosta, são incorporadas por meio da aplicação do Método da Aproximação de Primeira Ordem da Variância (*First-Order Second-Moment Method* - FOSM). Para isto, é implementado o modelo analítico de estabilidade proposto por Cavalcante e Mascarenhas, em 2021, sendo este desenvolvido para meios porosos não saturados considerando uma análise transiente. Para a implementação do modelo, foi desenvolvida uma rotina computacional na linguagem de programação *Wolfram Mathematica*. A metodologia proposta nesta pesquisa é validada utilizando as informações do trabalho de Gerscovich publicado em 1994, no qual foi analisado um deslizamento associado às precipitações ocorridas na região do Rio de Janeiro. A implementação da metodologia desenvolvida na presente tese demonstrou a importância de migrar das análises determinísticas para as análises probabilísticas, facilitando o critério do engenheiro quando existem ferramentas que permitem determinar os momentos estatísticos das propriedades envolvidas nos fenômenos físicos e a sua importância no cenário escolhido para a análise da estabilidade. A utilização do FOSM desencadeou em bons resultados na obtenção da probabilidade de falha na seção transversal da encosta, obtendo, também, um desempenho positivo no custo computacional. As análises feitas para o caso de estudo mostraram a importância de analisar as chuvas antecedentes para definir o estado inicial prévio ao evento de falha, sendo este cenário indispensável para a obtenção de perfis da ameaça mais realistas. Finalmente, é demonstrado que a abordagem probabilística transiente da estabilidade das encostas é uma excelente alternativa para avaliar a ameaça associada à ocorrência de um movimento de massa, já que, em função dos eventos de precipitação, o estado de umidade e de

tensões varia no interior do maciço, mudando também a dispersão estatística das propriedades físicas ao longo do talude.

Palavras-chave: Estabilidade de Encostas, Probabilidade de Falha, Deslizamentos Superficiais, Talude Infinito, FOSM, Solos Não Saturados, Ameaça.

INTEGRATED PLATFORM FOR ASSESSMENT THE RISK OF SHALLOW LANDSLIDES TRIGGERED BY RAINFALL

ABSTRACT

In recent years, records of human losses associated with mass movements have increased significantly, becoming a latent hazard to communities in mountainous regions. Bearing in mind that the rupture of a massif is not always achieved under saturated conditions and that in some cases, the analysis of the unsaturated phenomenon may be more reliable, this research proposes an integrated platform for assessing the probability of failure in the unsaturated condition, which is the main input for assessing the risk of landslides triggered by precipitation events. In this work, the uncertainties associated with the physical, hydraulic and resistance parameters that define slope stability are incorporated by applying the First-Order Second-Moment Method (FOSM). To do this, the analytical stability model proposed by Cavalcante and Mascarenhas in 2021 is implemented, which was developed for unsaturated porous media considering a transient analysis. To implement the model, a computational routine was developed in the Wolfram Mathematica programming language. The methodology proposed in this research is validated using information from Gerscovich's work published in 1994, which analyzed a landslide associated with precipitation in the Rio de Janeiro region. The implementation of the methodology developed in this thesis demonstrated the importance of migrating from deterministic analysis to probabilistic analysis, making it easier for engineers to use tools that allow them to determine the statistical moments of the properties involved in the physical phenomena and their importance in the scenario chosen for stability analysis. The use of FOSM produced good results in obtaining the probability of failure in the cross-section of the slope, and had a positive performance in terms of computational cost. The analyses carried out for the case study showed the importance of analyzing the previous rainfall to define the initial state prior to the failure event, as this scenario is indispensable for obtaining more realistic hazard profiles. Finally, it is shown that the transient probabilistic approach to slope stability is an excellent alternative for assessing the hazard associated with the occurrence of a mass movement, since, depending on precipitation events, the state of humidity and stress varies within the massif, also changing the statistical dispersion of physical properties along the slope.

Keywords: Slope Stability, Probability of Failure, Surface Landslide, Infinite Slope, FOSM, Unsaturated Soils, Hazard.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	4
1.2. Estrutura da Tese.....	4
2. MOVIMENTOS DE MASSA	6
3. PANORAMA GERAL GEOTÉCNICO DA ESTABILIDADE DE TALUDES.....	12
3.1 Estabilidade de Taludes em Meios Porosos Não Saturados	16
3.2 Interação Solo-Atmosfera.....	25
4. RISCO ASSOCIADO AOS MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS	30
4.1. Ameaça.....	31
4.2. Consequências	34
4.3. Zoneamento ou mapeamento do risco devido aos deslizamentos	35
5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	38
5.1. Materiais: encosta da Lagoa – Rio de Janeiro (1988).....	38
5.2. Métodos	42
5.2.1. Módulo 1: dados de entrada - <i>inputs</i>	43
5.2.2. Módulo 2: interação solo-atmosfera	44
5.2.3. Módulo 3: fluxo não saturado e representação da frente de umidade	47
5.2.4. Módulo 4: estabilidade de talude transiente na condição Não Saturada	50
5.2.5. Módulo 5: probabilidade de falha na condição Não Saturada	51
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS MÓDULOS 1, 2 E 3.....	52
6.1. Módulo 1: processamento dos dados de entrada.....	52
6.2. Módulo 2: balanço hidrogeotécnico e definição do estado inicial do talude.....	58
6.3. Módulo 3: perfis de umidade em função do evento de precipitação.....	69
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS MÓDULOS 4 E 5.....	80
7.1. Módulo 4: perfis da estabilidade de taludes não saturada e transiente	80
7.1.1. Cenário de chuva 1: FS para a hora 1 com intensidade de precipitação de 0 mm/h .	82
7.1.2. Cenário de chuva 2: FS para a hora 4 com intensidade de precipitação de 1 mm/h .	87

7.1.3.	Cenário de chuva 3: FS para a hora 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h	92
7.1.4.	Cenário de chuva 4: FS para a hora 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h	96
7.1.5.	Cenário de chuva 5: FS para a hora 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h	100
7.1.6.	Cenário de chuva 6: FS para a hora 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h	104
7.2.	Módulo 5: perfis da probabilidade de falha não saturada e transiente	109
7.2.1.	Cenário de chuva 1: P_f para a hora 1 com intensidade de precipitação de 0 mm/h.	111
7.2.2.	Cenário de chuva 2: P_f para a hora 4 com intensidade de precipitação de 1 mm/h.	118
7.2.3.	Cenário de chuva 3: P_f para a hora 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h	123
7.2.4.	Cenário de chuva 4: P_f para a hora 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h	128
7.2.5.	Cenário de chuva 5: P_f para a hora 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h	134
7.2.6.	Cenário de chuva 6: P_f para a hora 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h	139
8.	CONCLUSÕES	145
8.1.	Sugestões para pesquisas futuras	147
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
	APÊNDICE	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama das forças envolvidas em uma fatia de solo de um talude infinito.	15
Figura 2. Curva característica ou curva de retenção de água no solo gerada pelo modelo constitutivo de Cavalcante e Zornberg (2017).	19
Figura 3. Curva da condutividade hidráulica não saturada gerada pelo modelo constitutivo de Cavalcante e Zornberg (2017).	19
Figura 4. Curva de retenção de água no solo bimodal gerada pelo modelo constitutivo de Costa e Cavalcante (2021).	21
Figura 5. Processo de infiltração, de empoçamento e de escoamento superficial ao longo de um evento de chuva com intensidade constante. Adaptado de Collischonn e Dornelles (2015). ..	28
Figura 6. Capacidade de infiltração de Green e Ampt (1911): (a) representação da condição de contorno e do avanço da frente de umidade para uma coluna de solo, (b) frente de umidade e capacidade de infiltração transiente. Adaptado de Collischonn e Dornelles (2015).	29
Figura 7. Localização do deslizamento da encosta da Lagoa no morro dos Cabritos, Rio de Janeiro, Brasil. Modificado de Gerscovich (1994).	38
Figura 8. Hietograma do evento de chuva associado ao movimento de massa ocorrido no dia 7 de novembro de 1988. Adaptado de Gerscovich (1994).	39
Figura 9. Seção transversal central da região escorregada da encosta da Lagoa. Adaptado de Gerscovich (1994).	40
Figura 10. Hietograma das chuvas antecedentes ao movimento de massa da encosta da Lagoa. Modificado Gerscovich (1994).	41
Figura 11. Esquema geral da metodologia proposta para a construção do software RISCO...	42
Figura 12. Esquema da coluna de solo instrumentada por quatro sensores de umidade de baixo custo (SU1, SU2, SU3 e SU4). Onde, (1) reservatório de água com capacidade de 50 L, (2) Dispositivo para a distribuição da água na superfície da coluna simulando três intensidades de chuva, (3) Coluna de acrílico com diâmetro interno de 10 cm e altura de 60 cm, (4) microprocessador Arduino para quatro sensores de umidade, (5) luzes indicadoras para três estados de umidade, (6) base de acrílico furada para a saída da água do sistema e, (7) Reservatório da água percolada. Adaptado de Silva e Cavalcante (2019).	45
Figura 13. Divisão das regiões da água no interior do solo.	46
Figura 14. Discretização do perfil do talude proposta pelo software RISCO.	48
Figura 15. Metodologia para a quantificação da frente de umidade de uma coluna de solo do perfil da encosta proposta pelo software RISCO.	49

Figura 16. Solução analítica para o fluxo não saturado de Cavalcante e Zornberg (2017): (a) representação das condições de contorno e condição inicial para uma coluna de solo finita, (b) frente de umidade transiente para quatro profundidades.	50
Figura 17. Representação do perfil da encosta da Lagoa, detalhando a massa de solo mobilizada. Imagem gerada pelo software RISCO.....	53
Figura 18. Ajuste dos dados experimentais para a SWRC para o a camada superficial (solo residual maduro) e para a camada interna (solo residual jovem) utilizando o modelo de Cavalcante e Zornberg (2017). Imagem gerada pelo software RISCO.....	54
Figura 19. Ajuste bimodal dos dados experimentais para a SWRC da camada superficial (solo residual maduro) e da camada interna (solo residual jovem) utilizando o modelo de Costa e Cavalcante (2021). Imagem gerada pelo software RISCO.	55
Figura 20. Curvas de condutividade hidráulica não saturada para os solos da encosta da Lagoa obtidas pelo modelo de Cavalcante e Zornberg (2017): (a) ajuste para o solo residual maduro e (b) ajuste para o solo residual jovem. Imagem gerada pelo software RISCO.	56
Figura 21. Condutividade hidráulica não saturada em função do θ : (a) ajuste para o solo residual maduro e (b) ajuste para o solo residual jovem. Imagem gerada pelo software RISCO.	57
Figura 22. Evento de chuva antecedente ao deslizamento da encosta da Lagoa com resolução horária. Imagem gerada pelo software RISCO.	58
Figura 23. Ensaio de infiltração e de fluxo para uma coluna de solo instrumentada considerando uma chuva constante.	59
Figura 24. Ensaio de infiltração e de fluxo para uma coluna de solo instrumentada considerando três eventos de chuva: i_1 = chuva fraca; i_2 = chuva moderada e i_3 = chuva forte.....	61
Figura 25. Escolha dos dados que serão utilizados pelo software RISCO para dar início a modelagem do caso de estudo da encosta da Lagoa. Imagem da interface do software RISCO.	65
Figura 26. Informação solicitada pelo software RISCO para dar início às modelagens relacionadas com o caso de estudo da encosta da Lagoa. Imagem da interface do software RISCO.....	65
Figura 27. Capacidade de infiltração da superfície do talude no instante prévio ao início do evento de chuva. Imagem gerada pelo software RISCO.....	66
Figura 28. Análise da capacidade de infiltração e do escoamento superficial do talude para uma chuva constante de 180 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	67
Figura 29. Análise da capacidade de infiltração e do escoamento superficial do talude para uma chuva constante de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	68

Figura 30. Lâmina de água escoada acumulada em função do tempo para um evento de chuva de 180 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	69
Figura 31. Velocidade do escoamento superficial durante o evento de chuva de 180 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	69
Figura 32. Coluna escolhida para a análise e escolha da melhor resolução espacial para a construção da malha discretizada do perfil do talude. Imagem gerada pelo software RISCO.	70
Figura 33. Análises pontual da frente de umidade para a definição da discretização espacial do talude considerando a camada Residual Maduro. Frente de umidade para profundidades com resolução de: (a) 2,5 cm, (b) 5 cm, (c) 10 cm e (d) 25 cm. Imagem gerada pelo software RISCO.	72
Figura 34. Análises pontual da frente de umidade para a definição da discretização espacial do talude considerando a camada Residual Jovem. Frente de umidade para profundidades com resolução de: (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 50 cm e (d) 150 cm. Imagem gerada pelo software RISCO.	73
Figura 35. Perfis da frente de umidade da encosta da Lagoa para diferentes intensidades de chuva. (a) intensidade de 0 mm/h durante a primeira hora de análise e (b) intensidade de 1 mm/h durante a quarta hora de análise. Imagem gerada pelo software RISCO.....	75
Figura 36. Perfis da frente de umidade da encosta da Lagoa para diferentes intensidades de chuva. (a) intensidade de 9 mm/h durante a 249 hora de análise e (b) intensidade de 0 mm/h durante a 360 hora de análise. Imagem gerada pelo software RISCO.....	76
Figura 37. Perfis da frente de umidade da encosta da Lagoa para diferentes intensidades de chuva. (a) intensidade de 7,9 mm/h durante a 393 hora de análise e (b) intensidade de 0 mm/h durante a 519 hora de análise. Imagem gerada pelo software RISCO.....	78
Figura 38. Hietograma dos cinco dias de chuva prévios ao movimento de massa. O ponto vermelho indica o dia da falha da encosta da Lagoa. Imagem gerada pelo software RISCO..	80
Figura 39. Perfil das variáveis fixas geotécnicas para cada tipo de solo. (a) perfil da condutividade hidráulica saturada e (b) perfil do teor de umidade volumétrica residual. Imagem gerada pelo software RISCO.....	81
Figura 40. Perfil das variáveis fixas geotécnicas para cada tipo de solo. (a) perfil do teor de umidade volumétrica saturada, (b) perfil do parâmetro de ajuste hidráulico δ , (c) perfil do peso específico da massa de solo, (d) perfil do ângulo de atrito efetivo e (e) perfil da coesão efetiva. Imagem gerada pelo software RISCO.....	82

Figura 41. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da primeira hora de precipitação com intensidade de 0 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO...	83
Figura 42. Perfis para a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.....	84
Figura 43. Perfil do FS do talude para a primeira hora de análise correspondente a precipitação com intensidade de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.	85
Figura 44. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 1 com uma intensidade de chuva de 0 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.....	86
Figura 45. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da quarta hora de precipitação com intensidade de 1 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO...	88
Figura 46. Perfis para a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.	89
Figura 47. Perfil do FS do talude para a quarta hora de análise correspondente a precipitação com intensidade de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.	90
Figura 48. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 2 com uma intensidade de chuva de 1 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.....	91
Figura 49. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 249 de precipitação com intensidade de 9 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.	92
Figura 50. Perfis para a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.	94
Figura 51. Perfil do FS do talude para a hora de análise 249, correspondente a precipitação com intensidade de 9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.	95
Figura 52. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 3 com uma intensidade de chuva de 9 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.....	96
Figura 53. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 360 de precipitação com intensidade de 0 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.	97

Figura 54. Perfis para a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.	98
Figura 55. Perfil do FS do talude para a hora de análise 360, correspondente a precipitação com intensidade de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.	99
Figura 56. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 4 com uma intensidade de chuva de 0 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.	100
Figura 57. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 393 de precipitação com intensidade de 7,9 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.	101
Figura 58. Perfis para a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.	102
Figura 59. Perfil do FS do talude para a hora de análise 393, correspondente a precipitação com intensidade de 7,9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.	103
Figura 60. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 5 com uma intensidade de chuva de 7,9 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.	104
Figura 61. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 519 de precipitação com intensidade de 0 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.	105
Figura 62. Perfis para a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.	106
Figura 63. Perfil do FS do talude para a hora de análise 519, correspondente a precipitação com intensidade de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.	107
Figura 64. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 6 com uma intensidade de chuva de 0 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.	108
Figura 65. Função de distribuição de probabilidade dos parâmetros estocásticos da camada de solo Residual Maduro. Imagem gerada pelo software RISCO.	110
Figura 66. Função de distribuição de probabilidade dos parâmetros estocásticos da camada de solo Residual Jovem. Imagem gerada pelo software RISCO.	111
Figura 67. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a primeira hora de análise com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m.	

(a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação da c' , (d) variação da γ_d , (e) variação da k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	112
Figura 68. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a primeira hora de análise com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação da c' , (d) variação da γ_d , (e) variação da k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	113
Figura 69. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.....	115
Figura 70. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	116
Figura 71. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a primeira hora de análise com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	117
Figura 72. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a quarta hora de análise com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação da γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	119
Figura 73. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a quarta hora de análise com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação da γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	120
Figura 74. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h para quatro	

profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.....	121
Figura 75. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	122
Figura 76. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a quarta hora de análise com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	123
Figura 77. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 249 com uma intensidade de precipitação de 9 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	124
Figura 78. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 249 com uma intensidade de precipitação de 9 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	125
Figura 79. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.....	126
Figura 80. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	127
Figura 81. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 249 com uma intensidade de precipitação de 9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	128
Figura 82. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 360 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f)	

variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	129
Figura 83. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 360 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	130
Figura 84. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.....	131
Figura 85. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	132
Figura 86. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 360 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	133
Figura 87. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 393 com uma intensidade de precipitação de 7,9 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	135
Figura 88. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 393 com uma intensidade de precipitação de 7,9 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.	136
Figura 89. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.....	137

Figura 90. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	138
Figura 91. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 393 com uma intensidade de precipitação de 7,9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	139
Figura 92. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 519 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.....	140
Figura 93. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 519 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.....	141
Figura 94. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.....	142
Figura 95. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	143
Figura 96. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 519 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.....	144
Figura 97. Formato da primeira aba do arquivo INPUTS_Local.xlsx.....	159
Figura 98. Aba correspondente aos dados de entrada da curva de retenção da água no solo SWRC.....	160
Figura 99. Formato para inserir os dados correspondentes ao evento de precipitação das chuvas antecedentes.	160
Figura 100. Detalhamento da geometria da seção transversal do caso de estudo.....	161
Figura 101. Formato do ASCII recebido pelo software RISCO.....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Critérios e características gerais das classificações para os movimentos de massa. . . 7	7
Tabela 2. Classificação dos movimentos de massa para o Brasil - Augusto Filho (1992). Adaptado de (Silveira, 2016; Arcos, 2020)..... 8	8
Tabela 3. Diagramas tridimensionais da classificação proposta por Augusto Filho (1992) – Modificado de http://www1.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/riscos/risco10.html 10	10
Tabela 4. Modelos consolidados na engenharia para o FS. Adaptado de Gerscovich (2016). 14	14
Tabela 5. Autores das relações constitutivas dos atributos não saturados mais consolidados na engenharia geotécnica. 18	18
Tabela 6. Tensão efetiva na condição não saturada. Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993). 23	23
Tabela 7. Classificação das chuvas segundo as suas intensidades horárias. 26	26
Tabela 8. Modelos de infiltração empíricos e numéricos mais consolidados. 29	29
Tabela 9. Principais métodos probabilísticos usados na prática. 32	32
Tabela 10. Níveis de desempenho esperados em função da probabilidade de falha e do índice de confiabilidade (USACE, 1999). 34	34
Tabela 11. Caracterização física, mecânica e hidráulica dos tipos de solo (Gerscovich, 1994). 40	40
Tabela 12. Resultado experimental da curva de retenção de água do solo Residual Jovem apresentado por Gerscovich (1994)..... 41	41
Tabela 13. Formato e resolução dos <i>inputs</i> necessários para a utilização da plataforma integrada para a avaliação do risco. 43	43
Tabela 14. Parâmetros estocásticos necessários para a abordagem probabilística do software RISCO. 44	44
Tabela 15. Publicações produzidas durante o desenvolvimento da pesquisa. 52	52
Tabela 16. Parâmetro δ para diferentes matérias aplicando o modelo constitutivo de Costa e Cavalcante (2020). Dados da pressão de entrada de ar (ψ_{ar}) tomados de Gerscovich (2001). 55	55
Tabela 17. Cenários da análise pontual da frente de umidade para definir a resolução espacial da encosta da Lagoa. 71	71
Tabela 18. Detalhamento dos momentos nos quais foram representadas as frentes de umidade da encosta da Lagoa. 74	74
Tabela 19. Profundidades para a análise pontual da estabilidade não saturada e transiente.... 81	81

Tabela 20. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h. .	116
Tabela 21. Faixas de desempenho da probabilidade de falha esperada.	117
Tabela 22. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h.....	122
Tabela 23. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h.....	127
Tabela 24. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h.....	132
Tabela 25. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h.....	138
Tabela 26. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h.....	143
Tabela 27. Resumo da correspondência das análises feitas para três indicadores de falha com a região definida como mobiliada durante o evento de falha da encosta da Lagoa.	146

LISTA DE SÍMBOLOS E DE ABREVIACÕES

Símbolo	Significado
A_b	Área da bacia de contribuição
A	Ameaça ou evento de risco em potencial
C	Custos associados aos danos
C	Consequências associadas ao evento ameaçante
c'	Coesão efetiva do solo
c	Coefficiente de escoamento superficial
e_s	Taxa de escoamento superficial
E_s	Escoamento superficial
F	Lâmina de água infiltrada
g	Aceleração da gravidade
G_s	Densidade dos sólidos
i	Taxa de infiltração
k_s	Condutividade hidráulica saturada
$k(\psi)$	Função da condutividade hidráulica não saturada
$k_z(\theta)$	Função da condutividade hidráulica não saturada
l	Comprimento do talude
N	Força normal
n_e	Porosidade efetiva do solo
n	Porosidade do meio poroso
P	Forças de empuxo equivalentes
p	Intensidade moderada de precipitação
Q	Vazão associada ao escoamento superficial
S_r	Grau de saturação
T	Força resistente ao cisalhamento
t	Tempo de duração das análises
u_a	Pressão do ar nos poros do solo
u_w	Pressão da água nos poros do solo
V	Vulnerabilidade associada à ocorrência do evento ameaçante
$v_{0,máx}$	Velocidade constante de descarga máxima

Símbolo	Significado
W	Peso da massa de solo
z	Profundidade da camada de solo
β	Inclinação do talude
γ_w	Peso específico da água
γ_{nat}	Peso específico natural do solo
δ	Parâmetro hidráulico de ajuste
$\Delta x,y,z$	Tamanho do pixel
$\Delta\theta$	Déficit inicial de umidade
θ	Teor de umidade volumétrica do solo
θ_r	Teor de umidade volumétrica residual
θ_s	Teor de umidade volumétrica saturada
σ'	Tensão normal efetiva
σ	Desvio padrão
τ	Força resistente ao cisalhamento
ϕ^b	Ângulo de atrito do solo relativo à sucção matricial
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo do solo
χ	Parâmetro de ajuste de Bishop Sucção total do solo
ψ_m	Sucção matricial do solo

Abreviação	Significado
ASCII	Formato cartográfico binário
CV	Coefficiente de variação
FS	Fator de segurança
SWRC	<i>Suction Water Retention Curve</i>

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência dos fenômenos naturais, como as chuvas, os furacões, os deslizamentos, os sismos, dentre outros, são inevitáveis. Quando estes eventos entram em contato com as comunidades, geram danos e prejuízos e são denominados desastres naturais. Deste modo, o crescimento acelerado da população e a falta de planejamento urbano combinado com o desconhecimento do risco nas áreas perigosas, tornaram-se agentes deflagradores de desastres naturais aumentando, consideravelmente, a severidade das consequências associadas à ocorrência dos fenômenos físicos (UNDRR, 2022; Krichen *et al.*, 2023).

Uma pesquisa geral dos desastres que acometeram o mundo nos últimos 50 anos evidenciou que os desastres naturais, principalmente os associados à ocorrência de eventos climáticos extremos, foram protagonistas no mundo afetando o desenvolvimento de algumas regiões. Um estudo realizado pela Organização Mundial de Meteorologia para o período de 1970-2019 revelou que, dos 22.326 desastres registrados, 11.072 (aproximadamente 50%) foram atribuídos à ocorrência de fenômenos meteorológicos, climáticos ou hidrológicos. Estes desastres foram responsáveis por 2,06 milhões de vítimas mortais, representando por volta de 45% das mortes associadas a todos os registros de desastres. Economicamente, esses eventos geraram 3,64 bilhões de dólares em perdas, o que representa 75% do total das perdas registradas no período de 50 anos em todo o mundo (World Meteorological Organization, 2019).

Outra pesquisa, feita pelo fórum econômico mundial, apresentou um estudo de previsão para os próximos dez anos (2023-2033), indicando que estes eventos climatológicos extremos continuaram se classificando dentro dos eventos mais perigosos, posicionando-se dentro dos três principais riscos no mundo até 2033 afetando, de maneira significativa, um total de 25 países, sendo os países costeiros em desenvolvimento na América Latina, na África e no Sudeste Asiático os mais afetados (Fórum Econômico Mundial, 2023).

Nas regiões sul e central do continente americano, os registros de desastres naturais indicam que, nos últimos anos, as inundações e as secas apresentaram uma maior frequência de ocorrência nas regiões tropicais, porém, os movimentos de massa, sejam superficiais ou profundos, quando considerados em conjunto, registraram em alguns locais danos de igual ou maior magnitude que as secas e as inundações. Considerando que os movimentos de massa são menos previsíveis fisicamente, é indiscutível aceitar que o seu potencial de dano é significativo

e que representam uma ameaça latente para as comunidades que habitam em regiões montanhosas (UNISDR, 2013; UNISDR *et al.*, 2016).

No Brasil, os desastres gerados pelos movimentos de massa de grande magnitude apresentam uma distribuição temporal aparentemente cíclica, como foi publicado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (Macedo; Sandre, 2022), onde foram analisados os registros de deslizamentos de quase 34 anos (1988-2022). Nesta pesquisa, foi identificado que, aproximadamente, a cada seis ou sete anos, ocorrem os deslizamentos de maior magnitude, responsáveis pelo maior número de mortes.

Em outros estudos, foi identificado que, nas décadas de 1990 e de 2000, os movimentos de massa apresentaram o maior aumento de registro de ocorrências em todo o território, sendo, depois das enxurradas, o segundo evento natural responsável pelo maior número de mortes associadas aos desastres naturais (CEPED-UFSC, 2013). Para a década de 2010, os registros de deslizamentos no período de 2013-2017 indicaram que 833 municípios no Brasil foram afetados pelos movimentos de massa tendo, como causa principal, a infiltração da água da chuva associada às mudanças das condições naturais do terreno (IBGE, 2017).

Sabe-se que, as instituições governamentais têm direcionado investimentos em pesquisas e inovações na área de desastres e gestão de riscos associados aos deslizamentos. Assim, há um constante incentivo para o registro de informações que permitam analisar a natureza, a magnitude, o agente detonante e os fenômenos físicos envolvidos nos movimentos de massa (Lade, 2010; UNISDR, 2013; Scolobig *et al.*, 2014).

A complexidade envolvida na previsão dos movimentos de massa deflagrados pelos eventos de precipitação está associada, diretamente, aos fenômenos hidrológicos que ocorrem a partir da interação solo-atmosfera e a sua influência no comportamento mecânico do solo. Para minimizar o grau de complexidade, a engenharia geotécnica tem consolidado, nas últimas décadas, o uso de modelos qualitativos ou conceituais, os quais, por meio de simplificações e hipóteses, permitem analisar a estabilidade de taludes em uma escala local e cartográfica, possibilitando o zoneamento da ameaça e do risco de deslizamentos.

Embora os modelos conceituais tenham uma grande aceitação e sejam muito empregados na prática, a análise do risco é complexa, já que depende das limitações existentes na

quantificação da vulnerabilidade, na obtenção de dados confiáveis e na modelagem da estabilidade.

Em outra possível abordagem, com o objetivo de obter representações mais realistas dos movimentos de massa e melhorar a acurácia da quantificação da ameaça, vários autores optaram pelas soluções numéricas de equações diferenciais que regem os fenômenos, as quais permitem acrescentar o fenômeno do fluxo ao problema de estabilidade incorporando mais características do meio físico. Alguns tipos de soluções numéricas, entretanto, apresentam limitações quando se deseja uma análise transiente, além de dificuldades de aplicações em grande escala ou escala regional e uma menor flexibilidade de parâmetros, deixando em evidência a necessidade da obtenção de soluções analíticas, cujo desenvolvimento tem sido, na engenharia geotécnica, um desafio constante nas últimas décadas.

Neste contexto, Cavalcante e Zornberg em 2017, propuseram algumas soluções analíticas para o problema do fluxo unidimensional transiente em um meio poroso não saturado. Esta nova proposta viabilizou o desenvolvimento de um novo modelo constitutivo para a avaliação da resistência ao cisalhamento no regime não saturado, proposto por Cavalcante e Mascarenhas, (2021). Com estas novas relações constitutivas, o cálculo da estabilidade de taludes em função do tempo e em função dos processos de infiltração foi possível, apresentando um novo modelo para a avaliação da estabilidade de talude considerando a ocorrência de eventos intensos de precipitação.

Vale ressaltar que, com esta nova abordagem de soluções analíticas, é possível obter excelentes resultados na representação dos fenômenos físicos envolvidos na instabilidade das encostas, necessitando de um menor custo computacional e tendo um melhor controle dos parâmetros da análise.

Considerando o panorama atual, faz-se necessário, então, avaliar as vantagens dos modelos construídos a partir de soluções analíticas, aqui denominados modelos analíticos, na construção de ferramentas integradas para a gestão do risco, possibilitando estudar em uma melhor resolução, o comportamento mecânico dos maciços em função do tempo e do grau de saturação, obtendo, com isso, um aperfeiçoamento da interação com as informações obtidas em tempo real e as informações históricas para a avaliação do risco associado aos deslizamentos deflagrados por chuvas.

1.1. Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é a criação de uma plataforma integrada para o auxílio na avaliação e na previsão da ameaça associada à ocorrência dos movimentos de massa deflagrados por chuvas em função da análise não saturada e transiente da estabilidade de encostas.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- ▮ Propor uma metodologia eficiente, em função das metodologias existentes, para a representação da interação solo-atmosfera;
- ▮ Incorporar a análise das chuvas antecedentes para a avaliação da estabilidade das encostas na condição não saturada e transiente;
- ▮ Definir e implementar um método probabilístico eficiente para a análise da ameaça em função dos eventos de precipitação;
- ▮ Apresentar uma plataforma integrada desenvolvida na linguagem de programação *Wolfram Mathematica* para a análise e representação da influência das chuvas na probabilidade de ocorrência dos movimentos de massa;
- ▮ Aplicar, a um caso real de movimento de massa gravitacional, a plataforma desenvolvida nesta tese, para avaliar e validar a capacidade de previsão e de representação da probabilidade de falha da encosta considerando o registro das chuvas antecedentes.

1.2. Estrutura da Tese

A presente tese está estruturada em sete capítulos, nos quais são apresentados, o problema e a motivação da tese, os objetivos, a fundamentação teórica necessária para o entendimento e para o desenvolvimento da pesquisa, a aplicação da metodologia proposta a um caso de estudo real, as conclusões e, as sugestões para futuras pesquisas.

O capítulo 1 descreve a motivação principal para a realização desta tese, como também, apresenta o panorama geral do impacto dos movimentos de massa nas sociedades, revelando a necessidade de metodologias eficientes e acessíveis para a quantificação do risco associado aos movimentos de massa gravitacionais sob a ocorrência de eventos de precipitação. Neste capítulo, é apresentado também, o objetivo geral e os objetivos específicos adotados para o desenvolvimento da pesquisa.

Os capítulos 2, 3 e 4 abrangem uma revisão bibliográfica objetiva relacionada ao problema da estabilidade de encostas na condição não saturada, aos modelos mais utilizados na prática da engenharia e, às soluções analíticas recentes, as quais permitem uma análise numérica mais refinada e realista. Nesta revisão, é apresentada também a inter-relação entre a engenharia geotécnica e a hidrologia, evidenciando a necessidade de compreender melhor a interação solo-atmosfera considerando as hipóteses e condições dos modelos geotécnicos para melhor representar o fenômeno da infiltração e, a sua influência no estado de tensões dos maciços quando expostos a eventos de precipitação.

Por último, a revisão bibliográfica expõe os conceitos básicos do risco, destacando que, é a quantificação da ameaça o foco principal da pesquisa como contribuição para a avaliação do risco. Neste contexto, são apresentados os modelos probabilísticos mais utilizados na prática com suas respectivas vantagens e limitações.

Os capítulos 5 e 6 foram destinados para a aplicação do caso de estudo real utilizando a metodologia desenvolvida nesta tese. No capítulo 5 a metodologia é apresentada, explicando as hipóteses e considerações essenciais para analisar o problema da estabilidade de encostas e, conseqüentemente, poder quantificar a ameaça na condição não saturada e transiente. Também, é detalhado o movimento de massa escolhido para a modelagem, especificando as suas características mais importantes.

O capítulo 6 mostra os resultados e as conclusões referentes as análises feitas com o caso de estudo. Neste capítulo, é possível entender como funciona o programa computacional desenvolvido na pesquisa e, quais são os produtos que ele oferece para o usuário. De igual modo, é feita uma discussão da importância das análises feitas com as chuvas antecedentes e como estas influenciam na avaliação do estado inicial da encosta antes da falha.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras, visando que o trabalho aqui apresentado possa ser continuado por outros pesquisadores, acrescentando algumas hipóteses e melhorando a escala de resolução do problema.

2. MOVIMENTOS DE MASSA

Movimento de massa, ou deslizamento, é o processo geológico onde um volume de solo e/ou de rocha se desloca como consequência da alteração do estado de tensões do maciço. Este processo acontece sob a ação da gravidade, podendo ser provocado por outros agentes externos, tais como a água, o vento, o gelo, os sismos ou as ações antrópicas (Carvalho Júnior *et al.*, 2022). Os movimentos de massa são fenômenos naturais necessários para o desenvolvimento morfológico das encostas, porém, nas regiões montanhosas urbanas, representam eventos altamente perigosos que afetam o desenvolvimento econômico e social das comunidades.

Com o objetivo de compreender melhor o fenômeno físico dos deslizamentos, alguns autores têm desenvolvido diferentes metodologias de classificação de movimentos de massa, levando em consideração as características particulares que condicionam os processos morfodinâmicos dos deslizamentos, sendo alguns deles a declividade do talude, o tipo de solo, a cobertura vegetal, a estrutura geológica, a geometria e os parâmetros hidroclimáticos (Bastos, 2012).

Dado que os deslizamentos apresentam uma grande dificuldade de classificação devido ao número de variáveis envolvidas no fenômeno físico, as classificações existentes não são unânimes, diferindo segundo o autor e os critérios estabelecidos para a construção das classificações. Mesmo assim, destacam-se alguns métodos de classificação, como os de Sharpe (1938), Varnes (1978), Guidicini e Nieble (1984) e Augusto Filho (1992) por terem um sistema de classificação mais amplo e abrangente, viabilizando o seu uso na realização dos estudos associados aos movimentos de massa.

Os principais critérios de classificação e as características mais relevantes destas metodologias são apresentadas na Tabela 1 (Silva, 2013; Silveira, 2016; Lima, 2019; Veloso, 2019; Arcos, 2020; Listo *et al.*, 2022).

Internacionalmente, uma das classificações mais utilizadas é a de Varnes (1978), sendo amplamente difundida pela *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG, 2022). Para definir os principais grupos, esta metodologia baseia-se no tipo de movimento e no tipo de material transportado gerando, assim, uma classificação de fácil aplicação permitindo o seu uso para diferentes movimentos de massa em diferentes regiões do mundo.

Tabela 1. Critérios e características gerais das classificações para os movimentos de massa.

Autor	Critérios para a classificação	Características gerais da classificação
Sharpe (1938)	<ul style="list-style-type: none"> - Natureza - Velocidade do movimento - Tipo de material - Quantidade de água no processo 	<ul style="list-style-type: none"> - Classificação generalista dividida em dois tipos básicos: escorregamentos e escoamentos - Agente deflagrador: água ou gelo
Varnes (1978)	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de movimento - Tipo de material transportado - Geometria da área de ruptura - Estruturas geológicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualquer movimento pode ser classificado por dois nomes: o material e o tipo de movimento - Apresentação de diagramas tridimensionais dos movimentos
Guidicini and Nieble (1984)	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidade do movimento - Tipo de deslocamento - Tipo de material transportado - Ambiente geomorfológico e climático 	<ul style="list-style-type: none"> - Classificação em três tipos básicos: escoamentos, escorregamentos e subsidências - De forma geral, os movimentos são contínuos e diferem na sua velocidade
Augusto Filho (1992)	<ul style="list-style-type: none"> - Dinâmica dos ambientes tropicais e subtropicais - Velocidade e tipo de movimento - Quantidade de água no solo - Planos de ruptura - Tipo de material 	<ul style="list-style-type: none"> - Classificação em quatro tipos de movimentos de massa: Rastejo, queda de blocos, fluxo ou corrida de detritos e deslizamento ou escorregamento

No Brasil, um país tropical com características hidroclimáticas demarcadas por longos períodos de chuva e de seca, os tipos de solos são diretamente influenciados pelo clima, desenvolvendo, por exemplo, os solos lateríticos ou tropicais após intensos processos de laterização. Este tipo de solo tem algumas características específicas, como a sua maior ou menor estabilidade na presença d'água, a redução da sua capacidade de absorção e a atuação como agente cimentante natural (Santos; Parreira, 2015). Essas características, geralmente, alteram o comportamento mecânico e hidráulico do solo, apresentado, então, uma maior sensibilidade às variações do grau de saturação fazendo-se relevante o entendimento deste tipo de material na condição não saturada.

Neste contexto, foi necessária uma classificação que levasse em consideração as peculiaridades dos deslizamentos das encostas que ocorrem com maior frequência no Brasil, como as propostas por Guidicini e Nieble (1984) e Augusto Filho (1992), sendo a última uma das mais populares na prática geotécnica (Silveira, 2016).

A proposta de Augusto Filho (1992) fundamenta-se na metodologia de Varnes (1978), agrupando de forma objetiva os principais tipos de movimentos de massa gravitacionais que ocorrem com maior frequência no Brasil, como é detalhado na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação dos movimentos de massa para o Brasil - Augusto Filho (1992).

Adaptado de (Silveira, 2016; Arcos, 2020).

Rastejo <i>Creep</i>	Escorregamentos <i>Slides</i>	Quedas <i>Falls</i>	Corridas <i>Flows</i>
Tipo de material transportado ou movimentado			
Solo, depósitos, rocha alterada ou fraturada	Pequenos a grandes volumes de material: - <u>Planares</u> : solos pouco espessos e solos e/ou rochas com um plano de fraqueza - <u>Circulares</u> : Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas - <u>Cunha</u> : Solos e/ou rochas com dois planos de fraqueza	- Material rochoso - Pequenos e médios volumes: - <u>Queda de blocos</u> - <u>Desplacamento rochoso</u> - <u>Rolamento de matacões</u> - <u>Tombamento de blocos</u>	- Solo, rocha, detritos, água - Grandes volumes de material
Velocidade do movimento			
- Muito baixa - baixa - Aprox. 1,6 cm/ano - Decrescente com a profundidade	- Médias - Altas - Aprox. 1,8 m/h – 3,0 m/min	- Muito altas - Aprox. 5,0 m/seg	- Médias – Altas - Aprox. 1,8 m/h – 5,0 m/seg
Características do movimento e da geometria			
- Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes	- Poucos planos de deslocamento (externos)	- Sem planos de deslocamento	- Muitas superfícies de deslocamento (interna e externas)

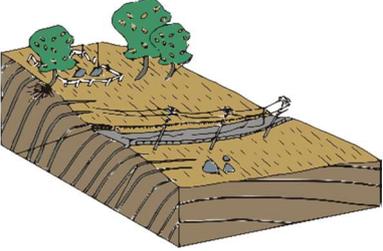
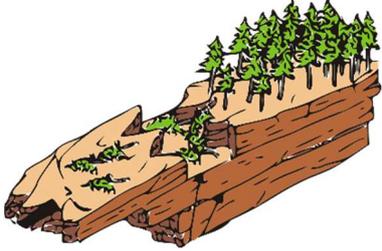
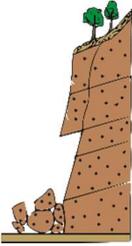
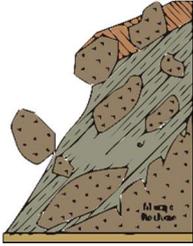
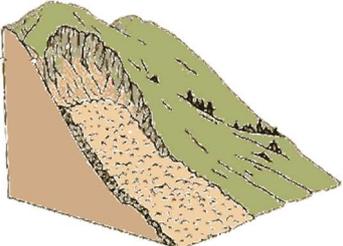
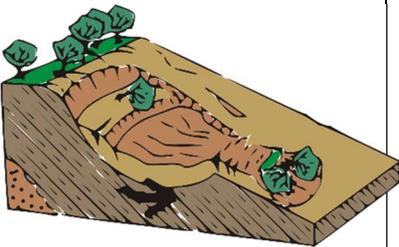
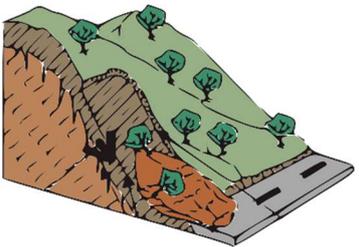
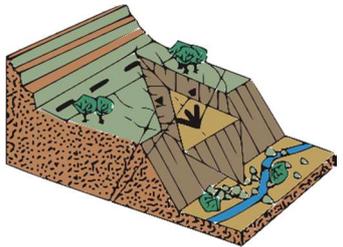
- Vários planos de deslocamento (internos) - Geometria indefinida	- Geometria e materiais variáveis	- Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado - Geometria variável: placas, lascas, blocos	- Movimento semelhante ao de um líquido viscoso - Desenvolvimento ao longo das drenagens - Extenso raio de alcance mesmo em áreas planas
--	-----------------------------------	---	--

Para o melhor entendimento dos quatro grupos de movimentos de massa definidos por Augusto Filho (1992), a Tabela 3 apresenta os diagramas e exemplo de eventos reais que permitem enxergar as principais diferenças entre os movimentos.

A instabilidade das encostas é o resultado de um conjunto de fatores que contribuem para a redução da resistência ao cisalhamento do solo provocando o movimento de massa gravitacional. De forma geral, para estudar a estabilidade das encostas, são analisadas diversas características, tais como a geometria, o tipo de material, as mudanças climáticas, o grau de saturação do solo, os eventos de precipitação intensos e a erosão, sendo esses os fatores condicionantes mais relevantes que causam a instabilidade dos taludes. Para o Brasil, porém, Augusto Filho e Virgili (1998 apud Duarte, 2015) sinalizaram os seguintes fatores condicionantes como sendo os mais importantes considerando a frequência de ocorrência dos eventos físicos:

- ▢ Características do clima, destacando o regime pluviométrico;
- ▢ Características e distribuição dos materiais que compõem as encostas;
- ▢ Características geomorfológicas, destacando a inclinação, a amplitude e a forma do perfil da encosta;
- ▢ Regime das águas de superfície e de subsuperfície;
- ▢ Características do uso e ocupação do solo, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas como cortes, aterros, drenagem, entre outras.

Tabela 3. Diagramas tridimensionais da classificação proposta por Augusto Filho (1992) – Modificado de <http://www1.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/riscos/risco10.html>.

Rastejo (<i>Creep</i>)	Quedas (<i>Falls</i>)	
	Tombamento	Desplacamento
		
Quedas (<i>Falls</i>)		Corridas (<i>Flows</i>)
Queda de blocos	Rolamento de blocos	
		
Escorregamento (<i>Slide</i>)		
Circular	Planar	Em cunha
		

Na realidade, identificar corretamente o tipo de movimento de massa e os fatores condicionantes associados ao evento ocorrido tornam-se as informações primárias mais relevantes para a avaliação e para a realização de uma previsão confiável para futuros deslizamentos. Como é explicado por Zuquette (2018), a previsão da instabilidade da encosta ou talude, pode ser feito por meio de métodos qualitativos, semiquantitativos ou quantitativos.

Os métodos qualitativos, de forma geral, são baseados na geomorfologia, nos atributos da natureza, nos agentes externos associados aos deslizamentos e na avaliação subjetiva do profissional que realiza o estudo. Por outro lado, os métodos semiquantitativos combinam aspectos qualitativos e quantitativos, gerando, normalmente, resultados por categorias, utilizando recursos como a Teoria Fuzzy. Finalmente, os métodos quantitativos, são baseados

nos modelos físicos matemáticos desenvolvidos pela engenharia geotécnica, utilizando os métodos estáticos e probabilísticos na avaliação da instabilidade da encosta (Zuquette, 2018).

Dependendo da escala adotada, os métodos quantitativos podem ter uma limitação computacional, de forma que o uso de outras metodologias, principalmente qualitativas, como as análises feitas por meio do geoprocessamento de mapas, se torna uma ferramenta viável para entender os problemas de instabilidade numa escala regional (Azevedo *et al.*, 2016).

3. PANORAMA GERAL GEOTÉCNICO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

Na engenharia prática, a avaliação da estabilidade das encostas é feita por meio do fator de segurança (FS). Ele avalia os esforços atuantes no maciço e a sua influência no estado de tensões indicando o momento de ruptura, momento em que os esforços resistentes do talude são menores ou iguais às forças externas deflagradoras (GEO-RIO, 2015). Essa análise envolve características geométricas, topográficas, mecânicas e hidráulicas pertinentes à encosta. Faz-se necessária, portanto, a execução de processos que permitam caracterizá-la adequadamente, como é indicado pela norma brasileira ABNT-NBR 11682. Quantitativamente, o FS é definido como:

$$FS = \frac{\tau_{\text{resistentes}}}{\tau_{\text{atuantes}}}; \begin{cases} FS > 1 \text{ marginalmente estável} \\ FS \leq 1 \text{ ruptura} \end{cases} \quad (1)$$

onde τ_{atuantes} = tensão cisalhante atuante [$ML^{-1}T^{-2}$] e $\tau_{\text{resistentes}}$ = tensão cisalhante máxima resistente [$ML^{-1}T^{-2}$].

Empregando o conceito de fator de segurança e levando em consideração os atributos que definem o comportamento de uma encosta, foram desenvolvidos, na engenharia geotécnica, vários métodos de avaliação de estabilidade que têm como base a análise do equilíbrio de uma massa ativa deslizante conhecida como a análise do equilíbrio limite, ou a análise de tensão-deformação conhecida como a análise de tensões.

De forma geral, os métodos fundamentados na análise de tensões levam em consideração a influência do estado inicial de tensões do maciço, a anisotropia, a estratigrafia heterogênea e o uso de modelos de tensão-deformação não lineares. Isso permite identificar no talude as regiões de plastificação, o desenvolvimento de tensões de tração e também quantificar a magnitude das deformações. Estas vantagens implicam em uma modelagem complexa que requer do uso de procedimentos numéricos para sua implementação, tais como os métodos dos elementos finitos (MEF) ou das diferenças finitas (MDF), porém, este tipo de análise é limitada pelo uso de softwares que demandam, na sua maioria, um alto custo computacional (Gerscovich, 2016).

Em contrapartida, os métodos fundamentados na análise do equilíbrio limite, pelas suas hipóteses e simplificações, apresentam soluções com um grau de complexidade menor, sendo os mais utilizados na engenharia prática (Fredlund; Rahardjo, 1993-). O método é

fundamentado na implementação da tensão cisalhante mobilizada ao longo da superfície de ruptura, a qual representa o estado de equilíbrio limite da instabilidade, e é definida a partir do FS como:

$$\tau_{\text{mobilizada}} = \frac{\tau_{\text{resistentes}}}{FS} \quad (2)$$

onde $\tau_{\text{mobilizada}}$ = tensão cisalhante mobilizada, estado no qual o talude se encontra no limite da instabilidade [$ML^{-1}T^{-2}$].

Como é apresentado por Gerscovich (2016), todos os modelos de estabilidade fundamentados no equilíbrio limite apresentam algumas hipóteses em comum, como:

- ▢ A ruptura se dá ao longo de uma superfície onde todos os elementos atingem simultaneamente o mesmo FS crítico;
- ▢ Fundamentados nos princípios da estática, é calculado o equilíbrio de forças e de momentos;
- ▢ O solo acima da superfície é considerado um corpo livre e é subdividido em fatias;
- ▢ O equilíbrio de forças e momentos, quando for o caso, é feito para cada fatia;
- ▢ O FS é admitido como constante em toda a superfície;
- ▢ Todos os pontos atingem simultaneamente a resistência ao cisalhamento;
- ▢ É adotado um modelo constitutivo rígido-plástico;
- ▢ Não são considerados os deslocamentos.

Existem inúmeros modelos de estabilidade fundamentados no equilíbrio limite propostos para diferentes geometrias de superfície de ruptura. Eles mostram resultados satisfatórios na avaliação da estabilidade de taludes em diferentes condições de análise, seja em termos das tensões efetivas ou totais. Alguns dos modelos mais consolidados na engenharia são apresentados na Tabela 4, porém é importante salientar que, os métodos desenvolvidos para identificar superfícies de ruptura não circulares têm um nível maior de sofisticação e permitem avaliar uma geometria qualquer, sendo também os mais utilizados nos softwares comerciais.

É importante destacar que a implementação de qualquer método de estabilidade requer o conhecimento prévio das condições as quais foram ou serão expostos os taludes e, também, o conhecimento da superfície de ruptura que os taludes poderão desenvolver em caso de instabilidade.

Tabela 4. Modelos consolidados na engenharia para o FS. Adaptado de Gerscovich (2016).

Superfície de Ruptura	Modelos Relevantes	Aplicações
Circular	Bishop simplificado (1955) Bishop e Morgenstern (1960)	Taludes homogêneos
	Hoek e Bray (1981)	Taludes inclinados de 10° a 90°
Plana	Talude Infinito	Escorregamentos longos com pequena espessura de massa
Não circulares	Janbu (1968)	Taludes Homogêneos
	Morgenstern e Price (1965)	Considerações mais precisas para estudos mais detalhados

Em alguns casos, o agente deflagrador externo aponta para a melhor escolha do modelo de avaliação da estabilidade, como acontece com os deslizamentos deflagrados pelos eventos de precipitação. Nestes, o fenômeno da infiltração permite que a água percole nas camadas superficiais da encosta favorecendo a instabilidade e provocando os movimentos de massa superficiais, classificados por Augusto Filho (1992) como escorregamentos, os quais apresentam, geralmente, superfícies de rupturas planas. Este tipo de deslizamento de natureza translacional pode ser representado pelo método do talude infinito, sendo um dos métodos mais utilizados e mais simples de implementar (Fredlund e Rahardjo, 1993; Cai *et al.*, 2017).

A Figura 1 apresenta o diagrama de forças envolvidas numa fatia de solo do talude quando considerado talude infinito. O método requer poucas hipóteses para sua implementação, tais como: o comprimento do talude tem de ser, no mínimo, dez vezes maior que a altura do solo, a inclinação do terreno é definida como uma constante e é desconsiderado o comprimento do talude (Travis *et al.*, 2010).

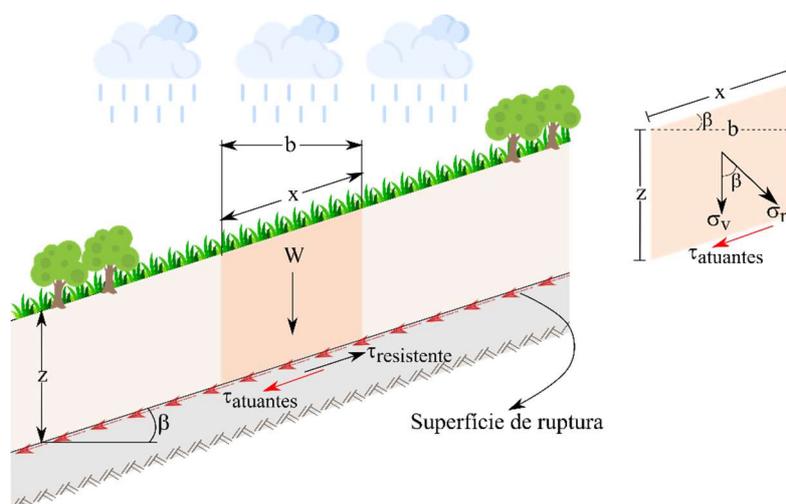


Figura 1. Diagrama das forças envolvidas em uma fatia de solo de um talude infinito.

Na Figura 1, z = profundidade da camada homogênea do talude [L]; x = comprimento da fatia de solo [L]; $\tau_{atuantes}$ = tensão cisalhante atuante no plano de ruptura [$ML^{-1}T^{-2}$]; W = peso da massa de solo [$ML^{-1}T^{-2}$]; σ_v = tensão vertical atuante no plano de ruptura [$ML^{-1}T^{-2}$]; $\tau_{resistente}$ = tensão cisalhante resistente do talude [$ML^{-1}T^{-2}$]; β = inclinação do talude [$^\circ$] e σ_n = tensão normal ao plano de ruptura [$ML^{-1}T^{-2}$].

Sabe-se que, pelo critério de resistência de Mohr Coulomb, o colapso ou ruptura do solo é modelado como uma envoltória geralmente curva, que quantifica o momento no qual a tensão cisalhante atuante no plano de resistência é igual à tensão resistente ao cisalhamento do material. A equação desta envoltória é aproximada pelo ajuste linear proposto por Mohr Coulomb, sendo então, o modelo constitutivo para a resistência ao cisalhamento do solo representado por:

$$\tau_{resistente} = \tau_r = c' + \sigma_n' \cdot \text{tg}(\phi') \quad (3)$$

onde, c' = coesão efetiva do solo [$ML^{-1}T^{-2}$]; ϕ' = ângulo de atrito efetivo do solo [-] e σ_n = tensão efetiva normal ao plano de ruptura [$ML^{-1}T^{-2}$].

Para quantificar as tensões atuantes no plano de ruptura da fatia de solo, é necessário conhecer a área (A) na qual estas atuam. Considerando que a largura do talude é de 1 m, a área é definida como:

$$A = x \cdot 1 = \frac{b}{\cos(\beta)} \quad (4)$$

Como é visualizado na Figura 1, a tensão vertical (σ_n) é a força exercida pelo próprio peso do solo sobre área de contato A . Dessa forma, a tensão vertical pode ser descrita em função do peso específico do solo (γ), da espessura do maciço (z) e da sua inclinação (β), como:

$$\sigma_v = \frac{F}{A} = \frac{W}{A} = \gamma \cdot z \cdot \cos(\beta) \quad (5)$$

Geometricamente, é possível definir as tensões normal e atuantes em função do ângulo de inclinação do talude e da tensão vertical, como é apresentado pelas seguintes equações:

$$\sigma_n = \cos(\beta) \cdot \sigma_v \quad (6)$$

$$\tau_{\text{atuantes}} = \tau_a = \sin(\beta) \cdot \sigma_v \quad (7)$$

Considerando a poropressão do solo diferente de zero, a tensão normal efetiva é definida como:

$$\sigma'_n = \sigma_n - u_w \quad (8)$$

onde, σ_n = tensão total normal ao plano de ruptura [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] e u_w = pressão da água nos poros do solo [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$].

Assim, levando em consideração as Eqs. (6) e (8), o FS é definido pelas Eqs. (3) e (7) da seguinte maneira:

$$\text{FS} = \frac{c' + \sigma'_n \cdot \text{tg}(\phi')}{\sin(\beta) \cdot \sigma_v} = \frac{c' + (\sigma_n - u_w) \cdot \text{tg}(\phi')}{\sin(\beta) \cdot \sigma_v} = \frac{c' + (\cos(\beta) \cdot \sigma_v - u_w) \cdot \text{tg}(\phi')}{\sin(\beta) \cdot \sigma_v} \quad (9)$$

Substituindo a Eq. (5) na (9), é obtido o FS empregando a análise do equilíbrio limite, como:

$$\text{FS} = \frac{c' + (\cos^2(\beta) \cdot \gamma_{\text{nat}} \cdot z - u_w) \cdot \text{tg}(\phi')}{\sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \cdot \gamma_{\text{nat}} \cdot z} \quad (10)$$

onde γ_{nat} = peso específico natural do solo [$\text{MT}^{-2}\text{L}^{-2}$].

3.1 Estabilidade de Taludes em Meios Porosos Não Saturados

O comportamento dos materiais depende diretamente da interação entre os grãos, pelo qual é geralmente feita a análise da estabilidade de taludes no estado das tensões efetivas, considerando a matriz de solo seca ou saturada. Porém, como é explicado por Nishimura e Fredlund (2000), Taha *et al.* (2000), no regime não saturado do solo, a poropressão negativa, que indica a quantidade de água presente nos vazios, influencia diretamente na interação dos grãos evidenciando, em alguns materiais, incrementos importantes na resistência ao cisalhamento associados ao aumento da sucção matricial.

A poropressão negativa é determinada pela diferença entre a pressão do ar (u_a) e a pressão da água (u_w) gerada nos vazios. Esta poropressão é conhecida também como sucção (ψ). Vários autores como Lu e Likos (2004), definem a sucção como o potencial termodinâmico da água contida nos poros em relação ao potencial da água livre. Outro autores, entretanto, definem a sucção como a capacidade que tem o solo na condição não saturada de absorver ou de reter

água, ou a dificuldade que se tem para remover a partícula líquida do solo, sendo esta última a definição mais comum no contexto da engenharia geotécnica (Ochoa, 2012).

A sucção é composta por duas parcelas, a sucção matricial (ψ_m) e a sucção osmótica (ψ_o). A sucção osmótica está associada à presença de sais dissolvidos na água, ocorrendo uma variação no volume total quando a quantidade de sal varia, afetando diretamente a tensão cisalhante entre os grãos (Fredlund; Rahardjo, 1993-; Lu; Likos, 2004).

A sucção matricial, é definida como o potencial que surge da interação da água com as partículas de solo e com a geometria do meio poroso. Esta interação é representada pela capilaridade, fenômeno físico que é determinado pela tensão superficial que se gera entre a água e a parede das partículas de solo, possibilitando, assim, a ascensão da água (Smiles, 1998; Paranhos *et al.*, 2008). Deste modo a sucção matricial é definida em função do grau de saturação do solo e da estrutura dos vazios, sendo representada por:

$$\Psi_m = u_a - u_w \quad (11)$$

onde, ψ_m = sucção matricial [$MT^{-2}L^{-1}$] e u_a = pressão do ar nos poros do solo [$MT^{-2}L^{-1}$].

O efeito da sucção no comportamento do solo é equivalente a uma pressão externa que provoca um acréscimo na resistência do solo quando este diminui a quantidade de água contida nos poros (Fredlund; Rahardjo, 1993-; Taha *et al.*, 2000). Neste sentido, os problemas associados aos solos não saturados decorrem, geralmente, da redução da sucção matricial, podendo assim desconsiderar a influência da sucção osmótica no comportamento do solo (Fredlund; Rahardjo, 1993-).

Um exemplo disso, são as chuvas intensas, onde a água que precipita infiltra na superfície do talude preenchendo os vazios e, conseqüentemente, diminui a tensão superficial existente entre os grãos e ocasiona a diminuição da sucção matricial do solo (Fredlund; Rahardjo, 1993-). Esta relação água-sucção é compreendida por meio da curva de retenção de água do solo (*SWRC - Soil Water Retention Curve*) e da curva de condutividade hidráulica não saturada (*k-function*).

Na prática da engenharia geotécnica, a obtenção dos atributos não saturados do solo, a *SWRC* e a *k-function* apresentam uma limitação associada à sua dificuldade para serem medidas experimentalmente. Este problema pode ser remediado pela criação dos modelos constitutivos

que relacionam, essencialmente, as variações volumétricas e o comportamento mecânico e hidráulico do solo com as mudanças de sucção e de saturação (Fredlund, 2000).

Os modelos constitutivos são indispensáveis para a implementação dos modelos matemáticos de fluxo e de estabilidade não saturados (Sheng *et al.*, 2008). A não linearidade das relações constitutivas, entretanto, limita a casos específicos a obtenção de soluções matemáticas analíticas ou fechadas que representem os fenômenos de fluxo e de resistência, podendo inviabilizar a análise transiente (Lai; Ogden, 2015; Zhang *et al.*, 2016). Na Tabela 5, são apresentadas as relações constitutivas mais utilizadas na prática para ambas as curvas.

Tabela 5. Autores das relações constitutivas dos atributos não saturados mais consolidados na engenharia geotécnica.

Autor	Relação	Parâmetros de ajuste
Van Genuchten (1980)	$\theta \times \psi$	$a =$ relacionado a entrada do ar [kPa]
		$n =$ inclinação da SWRC no ponto de inflexão [-]
		$m = (1 - 1/n)$ [-]
Van Genuchten (1980)	$k \times \psi$	$n =$ inclinação da SWRC no ponto de inflexão [-]
		$m = (1 - 1/n)$ [-]
Fredlund e Xing (1994)	$\theta \times \psi$	$a =$ relacionado a entrada do ar [kPa]
		$n =$ inclinação da SWRC no ponto de inflexão [-]
		$m = (1 - 1/n)$ [-]
Brooks e Corey (1964)	$\theta \times \psi$	$b =$ inclinação da SWRC no ponto de inflexão [-]
		$\lambda =$ índice de distribuição de tamanho de poros [-]

Atualmente, alguns autores têm focado nas soluções matemáticas fechadas, com o intuito de ter modelos mais eficientes e realistas. Neste cenário, Cavalcante e Zornberg (2017), definiram novas relações constitutivas para a obtenção da SWRC e da k-function, viabilizando o desenvolvimento de quatro soluções analíticas para o problema do fluxo em solo não saturado unidimensional (Equação de Richards) considerando diferentes condições de contorno para representar o fenômeno do fluxo no interior do meio poroso não saturado. Os modelos constitutivos para a curva de retenção de água do solo e para a curva de condutividade hidráulica não saturada são representados pelas Eqs. (12) e (13) e pelas Figuras 2 e 3 respectivamente.

$$\psi(\theta) = \frac{1}{\delta} \ln \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \quad (12)$$

$$k_z(\theta) = k_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \quad (13)$$

onde, θ_s = teor de umidade volumétrica saturado [L^3L^{-3}]; θ_r = teor de umidade volumétrica residual [L^3L^{-3}]; δ = parâmetro de ajuste hidráulico [$M^{-1}LT^2$]; k_s = condutividade hidráulica saturada do solo [LT^{-1}] e $(\theta_s - \theta_r)$ = capacidade máxima de umedecimento do solo [L^3L^{-3}].

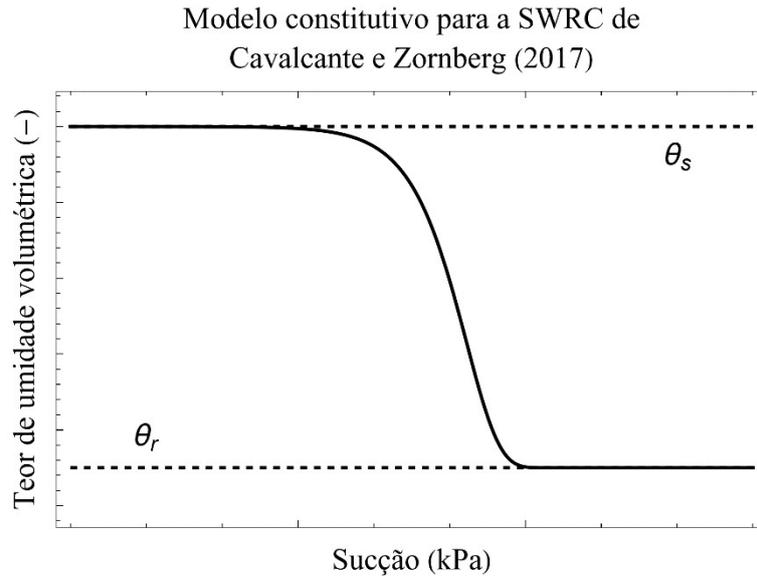


Figura 2. Curva característica ou curva de retenção de água no solo gerada pelo modelo constitutivo de Cavalcante e Zornberg (2017).

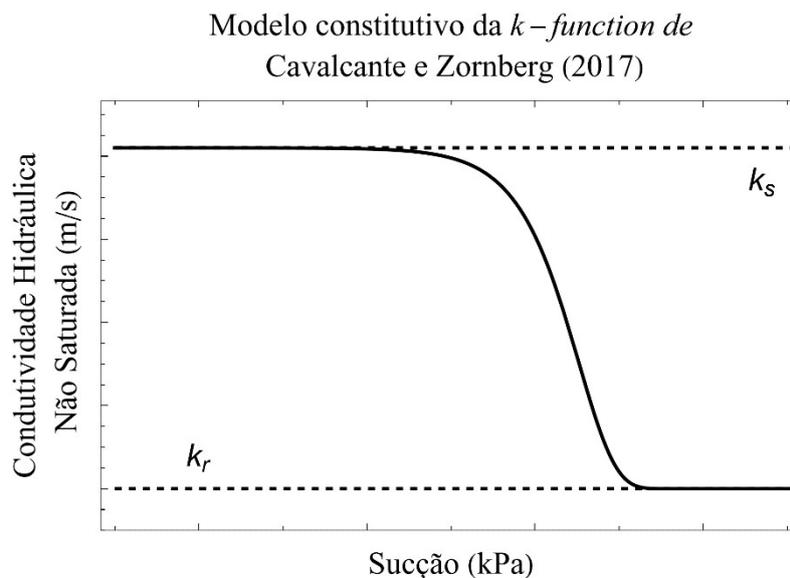


Figura 3. Curva da condutividade hidráulica não saturada gerada pelo modelo constitutivo de Cavalcante e Zornberg (2017).

Tal como foi falado no Capítulo 2, as regiões tropicais, como é o caso do Brasil, podem apresentar uma característica particular na formação dos perfis de solo, sendo os solos lateríticos assim denominados pelo seu alto nível de intemperização. Estes meios porosos formam geralmente uma estrutura porosa bimodal, formada por macroporos e microporos. Os macroporos, geralmente, são constituídos pelo agrupamento das partículas de solo durante os processos de laterização. Estas formações são comumente denominadas de aglomerações, as quais são altamente sensíveis as mudanças de umidade, mudando a distribuição de poros da matriz de solo. Esta característica faz com que os atributos não saturados dos solos tenham um comportamento diferente, sendo representados por curvas bimodais.

Deste modo, Costa e Cavalcante (2021) desenvolveram um modelo constitutivo para a obtenção da SWRC e da k-function para os solos bimodais. Estes modelos foram elaborados a partir da proposta de Cavalcante e Zornberg (2017), onde o parâmetro de ajuste hidráulico δ é proposto e, como foi constatado por Costa e Cavalcante (2020), o δ tem um significado físico quantitativo que está relacionado com a pressão de entrada de ar na matriz de solo. Em particular, o parâmetro de ajuste hidráulico é maior para solos arenosos e menor para solos mais finos, sendo representada esta relação pelo modelo constitutivo a seguir:

$$\psi_{ar}(\delta) = \frac{e^{1-e(1)}}{\delta} \quad (14)$$

onde ψ_{ar} = pressão de entrada de ar no solo [$ML^{-1}T^{-2}$].

Os modelos constitutivos bimodais para a curva característica e para a curva de condutividade hidráulico do solo, são representados pelas Eqs. (15) e (16). Igualmente, a Figura 4, apresenta a curva característica ajustada pelo modelo bimodal:

$$\theta(\psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\lambda \exp(-\delta_1 |\psi|) + (1 - \lambda) \exp(-\delta_2 |\psi|) \right] \quad (15)$$

$$k(\psi) = k_s \left[\lambda \exp(-\delta_1 |\psi|) + (1 - \lambda) \exp(-\delta_2 |\psi|) \right] \quad (16)$$

onde, δ_1 = parâmetro de ajuste hidráulico para a região dos macroporos ($M^{-1}LT^2$); δ_2 = parâmetro de ajuste hidráulico para a região dos microporos ($M^{-1}LT^2$) e λ = fator de peso correspondente à região dos macroporos.

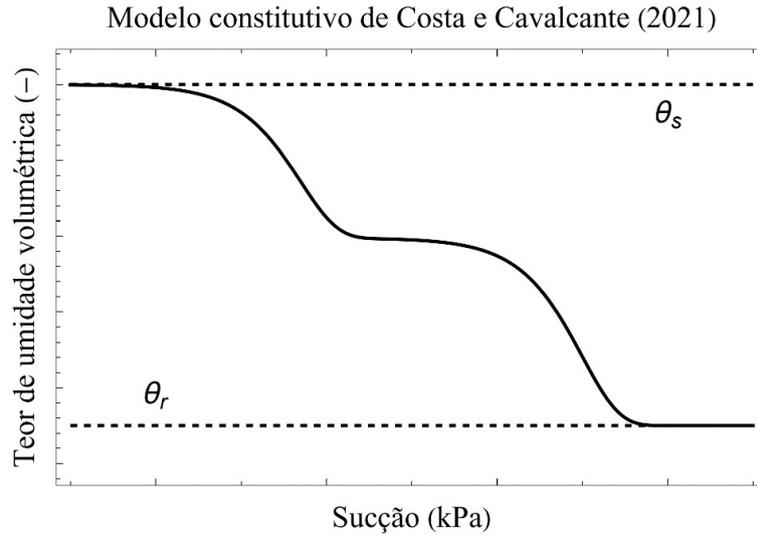


Figura 4. Curva de retenção de água no solo bimodal gerada pelo modelo constitutivo de Costa e Cavalcante (2021).

Tal como mencionado anteriormente, Cavalcante e Zornberg (2017) propuseram quatro soluções analíticas para a representação do fluxo no meio poroso não saturado. Considerando as condições de contorno e as hipóteses das quatro soluções, o cenário 4, é compatível com o fenômeno da água da chuva que infiltra na superfície do terreno. Esta solução contempla as seguintes hipóteses:

- ▮ O solo é uma coluna finita de comprimento L ;
- ▮ A condição inicial é definida por um teor de umidade uniforme em todo o domínio descrito por:

$$\theta(z,0) = \theta_i \quad (17)$$

onde, θ_i = teor de umidade volumétrica inicial constante (L^3L^{-3});

- ▮ Na fronteira superior é adotada uma condição de contorno que envolve a imposição de uma velocidade de descarga constante. Partindo desta imposição, os autores definem a velocidade máxima de descarga que o solo pode receber em função da condutividade hidráulica saturada e a capacidade de umedecimento máxima do solo:

$$v_{0,m\acute{a}x} = \frac{\theta_s \cdot k_s}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (18)$$

onde, v_0 = velocidade de descarga do fluido (LT^{-1});

- ▮ Na fronteira inferior é assumida uma condição de contorno de impermeabilidade onde, não se apresentam variações do conteúdo de umidade em relação ao espaço. Esta

condição de fronteira implica que, na profundidade L , o θ atinja um valor constante e, por consequência, a sucção também. Dessa forma, o potencial hidráulico no comprimento L alcança um valor unitário. Esta condição é representada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z}(L,t) = 0 \quad (19)$$

Finalmente, a solução analítica de Cavalcante e Zornberg (2017), permite a representação das frentes de umidade em qualquer profundidade do solo em função do tempo para um meio poroso não saturado. O modelo é dado por:

$$\theta(z,t) = \theta_i + \left[\frac{v_0}{k_s} (\theta_s - \theta_r) - \theta_i \right] D(z,t) \quad (20)$$

onde, v_0 = velocidade de descarga do fluido [LT^{-1}] e $D(z,t)$ = função auxiliar da solução analítica do cenário 4, dada por:

$$\begin{aligned} D(z,t) = & \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(Z_{-1}) + \sqrt{\frac{\bar{a}_s^2 t}{\pi \bar{D}_z}} \exp\left(-\frac{(z - \bar{a}_s t)^2}{4 \bar{D}_z t}\right) - \frac{1}{2} \left(-1 + \frac{\bar{a}_s z}{\bar{D}_z} + \frac{\bar{a}_s^2 t}{\bar{D}_z}\right) \\ & \times \exp\left(\frac{\bar{a}_s z}{\bar{D}_z}\right) \operatorname{erfc}(Z_{+1}) + \sqrt{4 \frac{\bar{a}_s^2 t}{\pi \bar{D}_z}} \left(1 + \frac{\bar{a}_s}{4 \bar{D}_z} (2L - z + \bar{a}_s t)\right) \\ & \times \exp\left(\frac{\bar{a}_s L}{\bar{D}_z} - \frac{1}{4 \bar{D}_z t} (2L - z + \bar{a}_s t)^2\right) \\ & - \frac{\bar{a}_s}{\bar{D}_z} \left(2L - z + \frac{3 \bar{a}_s t}{2} + \frac{\bar{a}_s}{4 \bar{D}_z} (2L - z + \bar{a}_s t)\right) \\ & \times \exp\left(-\frac{\bar{a}_s L}{\bar{D}_z}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{(2L - z + \bar{a}_s t)}{2 \sqrt{\bar{D}_z t}}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

onde, os termos auxiliares que constituem $D(z,t)$ são dados por:

$$Z_{\pm 1} = \frac{z \pm \bar{a}_s t}{2 \sqrt{\bar{D}_z t}} \quad (22)$$

$$\bar{D}_z = \frac{k_s}{\delta(\theta_s - \theta_r) \cdot \rho_w \cdot g} \quad (23)$$

$$\bar{a}_s = \frac{k_s}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (24)$$

Diante disso, para poder avaliar a estabilidade das encostas no regime não saturado é necessário definir as relações constitutivas para a resistência ao cisalhamento dos materiais. Assim, sendo validado o princípio das tensões efetivas de Terzaghi na condição não saturada, vários autores definem a tensão normal efetiva como a combinação de duas variáveis independentes do estado de tensões incorporando o ar. Na Tabela 6, são apresentadas as definições da tensão efetiva propostas por vários autores:

Tabela 6. Tensão efetiva na condição não saturada. Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993).

Equação	Parâmetros de ajuste	Autor
$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$	χ = parâmetro relacionado ao S	Bishop (1959)
$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	β' = fator de ligação	Croney <i>et al.</i> (1958)
$\sigma' = \sigma - \Psi p''$	Ψ = parâmetro de ajuste	Aitchison (1961)
	p'' = poropressão	
$\sigma' = \sigma - \beta p''$	β = fator estatístico	Jennings (1961)

Bishop propôs um modelo constitutivo para a resistência cisalhante do solo incorporando o princípio das tensões efetivas de Terzaghi na condição não saturada no modelo de resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb. Assim, a relação constitutiva de resistência para solos no regime não saturado é definido como:

$$\tau = c' + [(\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \text{tg}(\phi') \quad (25)$$

onde τ = resistência cisalhante do solo [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] e χ = parâmetro dependente do grau de saturação do solo [-] definido por:

$$\chi \text{tg}(\phi') = \text{tg}(\phi^b) \quad (26)$$

Este modelo apresenta uma limitação relacionada à determinação do parâmetro χ , definido como um valor contido no intervalo [0,1], sendo 0 estabelecido para a condição saturada e 1 para a condição seca. Este parâmetro apresenta um comportamento altamente não linear, dificultando a aplicação do modelo constitutivo.

Após isso, Fredlund *et al.* (1978) definiram a resistência ao cisalhamento não saturado como:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \text{tg}(\phi') + (u_a - u_w) \text{tg}(\phi^b) \quad (27)$$

A validade deste modelo tem sido questionada nas últimas décadas pela variabilidade que apresenta o ângulo ϕ quando se leva o solo a condições extremas de secagem onde, devido às altas pressões ou sucções, o ϕ apresenta uma diminuição, quando deveria continuar aumentando (Fredlund *et al.*, 1987). Mesmo assim, análises de vários autores para diferentes tipos de solo demonstram que, em experimentos laboratoriais, a obtenção do ϕ é possível. Sendo assim, o modelo constitutivo proposto por Fredlund *et al.* (1987) é o mais difundido e utilizado na prática geotécnica.

Diante deste panorama, a modelagem numérica tem sido a ferramenta matemática mais utilizada para a representação do fenômeno de fluxo não saturado transiente e, conseqüentemente, para a representação da estabilidade de taludes não saturados. Diversos autores, como Tsai *et al.* (2008); Cai *et al.* (2017); Cho (2016); Song *et al.* (2016) e Augusto Filho e Fernandes (2018), têm desenvolvido ou aplicado soluções numéricas específicas sob condições e simplificações ajustadas para cada caso de estudo de estabilidade, evidenciando a necessidade de soluções matemáticas fechadas para o entendimento do fluxo que, como o especifica Borges (2016), facilitariam a implementação computacional, a avaliação paramétrica e a validação das abordagens numéricas, permitindo uma melhor representação do fenômeno físico acoplado.

Considerando os argumentos termodinâmicos propostos por Lu *et al.* (2010) para expressar χ em função do grau de saturação, Cavalcante e Mascarenhas (2021) desenvolveram um modelo constitutivo para a resistência ao cisalhamento dos solos não saturados, implementando o modelo constitutivo para a SWRC proposto por Cavalcante e Zornberg (2017) apresentado na Eq. (12). Desta forma, é proposta uma relação analítica em função do parâmetro de ajuste δ como:

$$\chi = e^{-\delta|u_a - u_w|} \quad (28)$$

Substituindo a Eq. (28) na Eq. (26) e depois na Eq. (27), os autores definem o modelo constitutivo para a resistência do solos no saturados como:

$$\tau = c' + \left[(\sigma - u_a) + e^{-\delta|u_a - u_w|} \cdot (u_a - u_w) \right] \cdot \text{tg}(\phi') \quad (29)$$

Da Eq. (29), é possível representar a coesão do solo no estado não saturado como:

$$c_{\text{unsat}} = c' + e^{-\delta|u_a - u_w|} \cdot (u_a - u_w) \cdot \text{tg}(\phi') \quad (30)$$

Considerando estes modelos constitutivos que modelam analiticamente os atributos não saturados e, a resistência ao cisalhamento do solo na condição não saturada, é possível, então, obter um modelo para avaliar a estabilidade das encostas quando classificadas como susceptíveis a ocorrência de escorregamentos planares. Para isto, os autores Cavalcante e Mascarenhas (2021), reescrevem o modelo de talude infinito descrito na Eq. (10) da seguinte maneira:

$$FS(z,t) = \frac{\text{tg}(\phi')}{\text{tg}(\beta)} + \frac{c' - (u_a - u_w)(z,t) \cdot e^{-\delta |(u_a - u_w)(z,t)|} \cdot \text{tg}(\phi')}{(\gamma_d + \gamma_w \cdot \theta(z,t)) \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\beta) \cdot z} \quad (31)$$

onde, $(u_a - u_w)(z,t)$ = poropressão negativa em função da profundidade e do tempo ($ML^{-1}T^{-2}$); γ_d = peso específico do grãos ($MT^{-2}L^{-2}$) e γ_w = peso específico da água ($MT^{-2}L^{-2}$).

A Eq. (31), representa o modelo analítico de estabilidade de taludes não saturado e transiente com significado físico, que considera as variações da densidade do solo, as variações da poropressão negativa da água no solo, e as variações da coesão efetiva e em função de um único parâmetro de ajuste, o qual, como especificado anteriormente, tem significado físico e está relacionado diretamente com a estrutura interna nos grãos do solo. Exemplos de pesquisas que mostram a interferência do estado de saturação do solo na estabilidade de taludes, podem ser encontrados em Coutinho *et al.*(2019); Mendes *et al.* (2020) e Dantas (2024).

3.2 Interação Solo-Atmosfera

A relação chuva-deslizamentos é uma das relações mais estudadas na área de estabilidade de taludes e de encostas. Para isso, é necessário compreender os fenômenos responsáveis pela distribuição da água na atmosfera, na superfície do terreno e no interior do maciço. Estes fenômenos são analisados em um ciclo hidrológico fechado que obedece a lei da conservação da massa (Fetter, 1994). Na engenharia geotécnica e, especificamente no problema de estabilidade de taludes superficiais, geralmente, o ciclo hidrológico é menos rigoroso sendo representado pelos fenômenos físicos de precipitação, de evapotranspiração, de escoamento superficial e de infiltração.

A evapotranspiração é o conjunto de dois fenômenos físicos: a evaporação e a transpiração. É também, fisicamente, o parâmetro mais difícil de quantificar (Suarez, 2010). Porém, como o mostram alguns autores (Chirico *et al.*, 2013; Gariano; Guzzetti, 2016), o aumento da evapotranspiração na superfície da encosta produz efeitos positivos para a

estabilidade das camadas superficiais, precisando de maiores quantidades de água para atingir a instabilidade. Deste modo é possível obter uma análise mais conservadora desconsiderando a ação da evapotranspiração, definindo o ciclo hidrogeotécnico como a soma de duas parcelas:

$$p = e_s + i \quad (32)$$

onde p = intensidade da chuva [LT^{-1}], i = taxa de infiltração [LT^{-1}] e e_s = taxa de escoamento superficial [LT^{-1}].

A precipitação é a principal entrada de água na análise do balanço hidrogeotécnico. O seu conhecimento é fundamental na definição dos processos físicos que distribuem a água no solo (Collischonn; Dornelles, 2015). É entendida como a altura de água líquida que cai numa superfície plana unitária e impermeável, expressa em milímetros de água por unidade de superfície (1 m x 1 m) e, geralmente, representada em intervalos de tempo de uma hora. Como é apresentado pela Organização Meteorológica Mundial, as precipitações são, geralmente, classificadas em quatro tipos de eventos segundo a suas intensidades (Tabela 7):

Tabela 7. Classificação das chuvas segundo as suas intensidades horárias.

Chuva Violenta	Chuva Intensa	Chuva Moderada	Chuva Fraca
> 50 mm/h	10 mm/h – 50 mm/h	2,5 mm/h – 10 mm/h	< 2,5 mm/h

As precipitações podem ser monitoradas de forma pontual ou espacial. As medições pontuais são feitas por pluviômetros ou pluviógrafos. Estes instrumentos são de baixa precisão, já que o volume coletado por eles é pequeno comparado ao volume total precipitado. De forma espacial, a instrumentação pluviométrica é feita com o radar meteorológico, o qual é um sensor remoto fundamentado nos princípios da física de ondas. O radar meteorológico pode detectar as massas de água na atmosfera antes de precipitar e interpretar a quantidade de água que cai em qualquer lugar dentro do seu raio de cobertura (Sepúlveda, 2015).

A água da chuva que não consegue se infiltrar no solo e que começa a se acumular na superfície do terreno, gerando córregos temporários, é denominada de escoamento superficial. Na hidrologia clássica, o escoamento superficial é regido por duas situações principais, quando se tem precipitação sobre os solos saturados e quando a intensidade de precipitação é superior à capacidade de infiltração do solo (Collischonn; Dornelles, 2015).

Esta última situação é conhecida como o processo de escoamento Hortoniano, sendo o processo mais relevante nas bacias urbanas para a determinação das vazões de escoamento que

contribuem em uma bacia hidrográfica. Comumente este processo é determinado pelo método racional, que depende do coeficiente de escoamento c :

$$Q = c \cdot p \cdot A_b \quad (33)$$

onde, Q = vazão associada ao escoamento superficial [L^3T^{-1}]; A_b = área da bacia de contribuição [L^2] e c = coeficiente de escoamento superficial em função da ocupação do solo, da topografia, dos usos do solo e da cobertura das superfícies dos taludes [-].

Outro método usado para definir o escoamento superficial em função da capacidade de infiltração do solo é o método de Mein e Larson (1973). Este método usa a equação de infiltração proposta por Green e Ampt (1911) para estimar a quantidade de chuva que escoou durante um evento de precipitação constante. Assim, o escoamento superficial é dado por:

$$E_s(t) = p \cdot t - F(t) \quad (34)$$

onde, $E_s(t)$ = escoamento superficial [L]; t = tempo de duração da chuva de intensidade constante [T] e $F(t)$ = lâmina de água infiltrada acumulada calculada pelo método de Green e Ampt (1911) [L].

Mein e Larson (1973) consideram duas situações para a análise do escoamento superficial durante uma chuva constante:

▢ Quando $p < k(\psi)$, a água é transportada mais rapidamente no interior do maciço, impossibilitando a saturação da camada superficial durante o evento de chuva tendo, assim, um escoamento superficial nulo.

▢ Quando $p > k(\psi)$, a água da chuva infiltra inicialmente na camada superficial diminuindo a capacidade de infiltração do solo no tempo. Quando é atingida a capacidade máxima de infiltração do solo, se inicia o fenômeno de empoçamento na superfície do terreno e, conseqüentemente, o escoamento superficial.

A quantidade de água infiltrada no solo no tempo de empoçamento é definida por:

$$F_e = p \cdot t_e \quad (35)$$

onde, F_e = lâmina total infiltrada no tempo de empoçamento [L] e t_e = tempo de empoçamento [T]. O tempo de empoçamento é dado por Mein e Larson (1973) como:

$$t_e = \frac{k(\psi) \cdot \psi \cdot \Delta\theta}{p \cdot (p - k(\psi))} \quad (36)$$

onde, ψ = sucção matricial em coluna de água [L]; $k(\psi)$ = condutividade hidráulica não saturada do solo [LT^{-1}] e $\Delta\theta$ = déficit inicial da umidade do solo em relação a saturação do material [L^3L^{-3}], dada por:

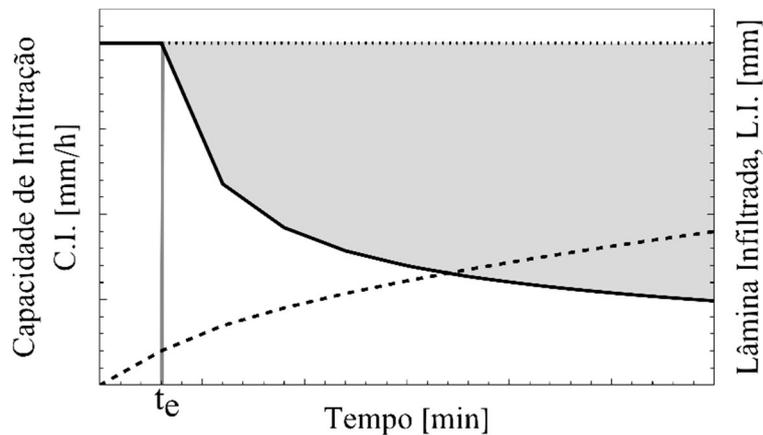
$$\Delta\theta = (1 - S_r) \cdot n_e \quad (37)$$

onde, S_r = grau de saturação do solo [-] e n_e = porosidade efetiva do solo que representa o volume de poros no qual a água se move livremente [-].

Assim, relacionando a capacidade de infiltração de Green e Ampt com o conceito de empoçamento na superfície, Mein e Larson (1973) definiram a lâmina total infiltrada na superfície do terreno durante um evento de chuva constante como:

$$F(t) - F_c - \psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln \left(\frac{\psi \cdot \Delta\theta + F(t)}{\psi \cdot \Delta\theta + F_c} \right) = k(\psi) \cdot (t - t_e) \quad (38)$$

Substituindo o valor de $F(t)$ na Eq. (34), é obtida a quantidade de água que escoou durante um evento de chuva constante. Como é apresentado na Figura 5, o modelo de Mein e Larson (1973) permite quantificar o processo de infiltração transiente, o início do processo de empoçamento na superfície do terreno, a lâmina de água infiltrada e, conseqüentemente, o escoamento superficial representado pela área cinza.



— C.I. [mm/h] - - - - L.I. [mm] Chuva [mm/h]

Figura 5. Processo de infiltração, de empoçamento e de escoamento superficial ao longo de um evento de chuva com intensidade constante. Adaptado de Collischonn e Dornelles (2015).

O fluxo da água em um meio poroso não saturado é representado pela equação de Richards (1931). Esta equação permite a análise transiente e tridimensional do fluxo, porém a dificuldade associada à obtenção de soluções analíticas, como foi mencionado no Capítulo 3.1, dificulta a modelagem dando origem assim, aos modelos empíricos e numéricos. Estes modelos são limitados ao entendimento da infiltração da água na superfície do terreno, porém, são os mais consolidados na prática (Tabela 8):

Tabela 8. Modelos de infiltração empíricos e numéricos mais consolidados.

Equação	Tipo de solução	Autor
$F(t) = fc + (fo - fc) \cdot e^{-\beta t}$	Empírica	Horton (1939)
$F(t) = \frac{1}{2} \cdot S \cdot t^{-\frac{1}{2}} + A$	Empírica	Philip (1957)
$F(t) - \psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\psi \cdot \Delta\theta}\right) = k(\psi) \cdot t$	Numérica	Green e Ampt (1911)

Os modelos apresentados na Tabela 8 são fundamentados no ensaio do infiltrômetro de anéis concêntricos. Este ensaio de campo permite avaliar a capacidade de infiltração do solo na camada superficial. Neste sentido, o modelo de Green e Ampt (1911) tem sido bastante utilizado na prática, já que descreve o processo do avanço de umidade ao longo do tempo e define a profundidade da lâmina de água infiltrada na superfície em função da condutividade hidráulica não saturada, da porosidade e da umidade do solo, como é apresentado na Figura 6.

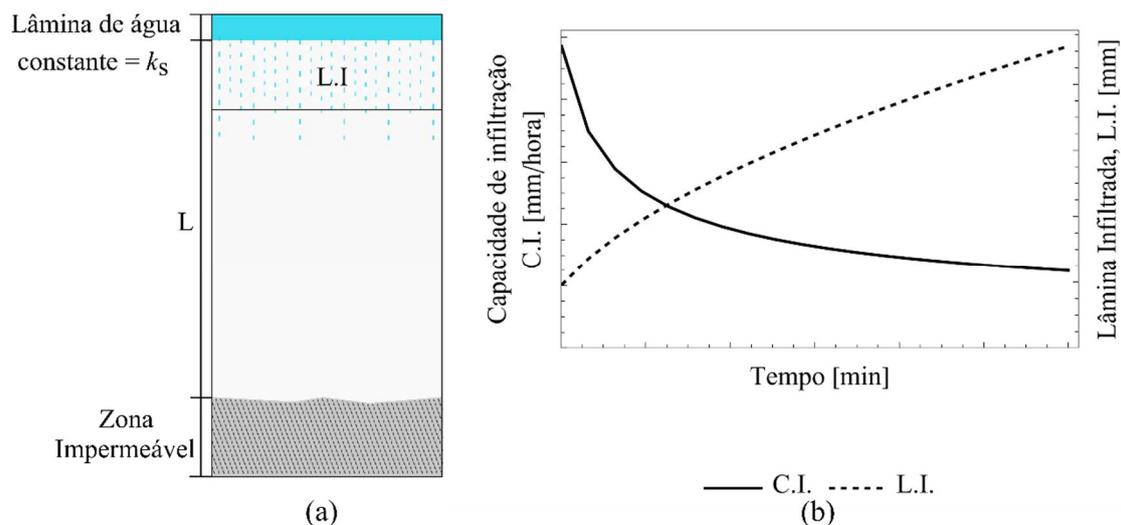


Figura 6. Capacidade de infiltração de Green e Ampt (1911): (a) representação da condição de contorno e do avanço da frente de umidade para uma coluna de solo, (b) frente de umidade e capacidade de infiltração transiente. Adaptado de Collischonn e Dornelles (2015).

4. RISCO ASSOCIADO AOS MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS

O risco de desastres é definido pelo relatório da ONU (2016) como a possibilidade de que lesões, danos materiais ou mortes, aconteçam e atinjam uma sociedade ou uma comunidade em um período de tempo determinado. Seguindo esta definição, o risco deve ser calculado de forma probabilística em função da exposição, da vulnerabilidade e da capacidade de recuperação que tem um elemento frente à ocorrência de um evento natural ou antrópico. Ele é, então, definido como:

$$R = A \times C \quad (39)$$

onde R = risco total; A = ameaça ou evento de risco em potencial e C = consequências associadas ao evento ameaçante em função da vulnerabilidade e, se necessário, ao custo de recuperação dos elementos.

De forma geral, como é apresentado por Assis *et al.* (2019) no livro *Gestão de Riscos – Empreendimentos Complexos*, os métodos mais utilizados para a análise de riscos são, o método FEMECA (*Failure Error Mode, Effect and Criticality Analysis*) e, as combinações das Análise da Árvore de Falhas ou FTA (*Fault Tree Analysis*). A primeira metodologia é a evolução de outra técnica qualitativa criada para a análise de riscos. Desta forma a FEMECA avalia quantitativamente, o modo de falha, a probabilidade da falha, a severidade e, a frequência de ocorrência do evento negativo (Souza e Mezzomo, 2012; Nicholas e Fonseca, 2018).

Por outro lado, a metodologia FTA, altamente utilizada em diferentes campos para a análise de riscos, é uma ferramenta dedutiva que parte da designação de um evento negativo ou indesejável para assim poder quantificar a probabilidade de ocorrência deste evento. Esta metodologia permite, também, qualitativamente, avaliar a vulnerabilidade associada ao evento negativo escolhido para a análises (Lima *et al.*, 2013).

O uso dessas ou de outras metodologias dependem de ferramentas externas focadas na quantificação dos elementos associados ao risco. Assim, na análise de risco associado aos movimentos de massa gravitacionais deflagrados por um evento de precipitação, o objetivo principal é a quantificação da ameaça ou da probabilidade de ocorrência do fenômeno físico fazendo uso de modelos refinados para a quantificação da falha.

4.1. Ameaça

Na quantificação do risco devido aos movimentos de massa deflagrados por chuvas, a ameaça está relacionada à possibilidade de ocorrer um deslizamento em função de um ou de vários eventos de precipitação. Desta forma, a probabilidade de que o evento ameaçante transcorra é associada à ameaça geológica detonada pela ameaça hidrometeorológica, sendo este um exemplo de uma ameaça múltipla e condicionada (ISSMGE, 2004; Shroder *et al.*, 2015).

A quantificação da ameaça deve incorporar os conceitos de magnitude, de localização geográfica, de frequência, de probabilidade e de tempo de recorrência do fenômeno ou do evento negativo. Além destes conceitos, a análise das chuvas antecedentes ou das chuvas acumuladas é importante, posto que, na presença de eventos de chuvas prolongadas ou na ocorrência de vários eventos separados por intervalos de tempo muito pequenos, podem-se produzir fenômenos de acumulação progressiva de água na zona subterrânea e superficial, afetando o comportamento mecânico dos solos, uma vez que as altas vazões impedem a drenagem natural do talude (Suarez, 2010).

Por outro lado, diversas metodologias foram desenvolvidas para sistematizar a quantificação da probabilidade de falha das encostas considerando só a susceptibilidade associada aos deslizamentos em uma escala local e regional (Lee; Chi, 2011; UNISDR, 2015; Vega; Hidalgo, 2016). A susceptibilidade depende das características próprias da encosta sem a influência de um evento externo, ou seja, depende das suas condições naturais, como a cobertura do solo, a declividade, a origem geológica, o uso do solo, entre outras (Hidalgo, 2013).

Na engenharia geotécnica, a susceptibilidade é definida pela avaliação da estabilidade da encosta, fundamentada nos modelos numéricos e analíticos desenvolvidos fornecendo, assim, o *input* principal para a quantificação do evento ameaçante. Neste sentido, é priorizada a utilização de modelos refinados para a melhor representação do fenômeno físico em função de suas propriedades, de sua situação avaliada em campo e do evento deflagrador.

A quantificação da ameaça pode ser interpretada como o índice de confiabilidade, como a probabilidade de fracasso ou como a probabilidade de desempenho da encosta, mostrando que a função da abordagem probabilística vai além de complementar as análises tradicionais, e

permite aprimorar a avaliação da confiabilidade das encostas por meio de indicadores em função do espaço e do tempo (Chowdhury, 2010-; Griffiths *et al.*, 2011).

Na avaliação da probabilidade de falha de uma encosta, os métodos mais rotineiramente aplicados são: o método de Monte Carlo, o método da Aproximação de Primeira Ordem da Variância (FOSM) e o método das Estimativas Pontuais, apresentados na Tabela 9 (Gitirana Jr., 2005; Chowdhury, 2010; Azevedo, 2015; Botero *et al.*, 2015; Silva, 2015, 2018).

Tabela 9. Principais métodos probabilísticos usados na prática.

Método	Principais características
Monte Carlo	<ul style="list-style-type: none"> • Método exato • Custo computacional alto • Requer todas as funções de distribuição de probabilidade
FOSM	<ul style="list-style-type: none"> • Método aproximado • Custo computacional baixo • Dificuldade no cálculo das derivadas
Estimativas Pontuais	<ul style="list-style-type: none"> • Método aproximado • Custo computacional baixo • Fácil implementação

Como é descrito na Tabela 9, o FOSM apresenta vantagens compatíveis quando se tem modelos analíticos. Isto permite a inclusão, por exemplo, da dispersão estatística associada aos parâmetros hidráulicos envolvidos no problema da estabilidade de taludes na condição não saturada. O tempo computacional exigido para a obtenção das probabilidades de falha, portanto, é menor quando comparado aos outros dois modelos mencionados anteriormente.

O FOSM (*First Order, Second Moment*) é um método probabilístico aproximado que utiliza a série de Taylor para determinar os valores dos momentos das distribuições estatísticas que representam as variáveis envolvidas nas análises. Para determinar a função de distribuição de probabilidade (PDF) da variável dependente, o método requer os valores médios e as derivadas das variáveis independentes em função da variável dependente (Wong, 1985).

Os momentos estatísticos obtidos pelo FOSM para a construção da PDF são, a média ($E[x]=\bar{X}$) como medida de tendência central e a variância ($V[x]=\sigma^2$) como medida de variação ou de dispersão em função do desvio padrão (σ). Quando não se tem correlação entre as variáveis independentes, estes momentos são determinados por:

$$E[f(\mathbf{x})] = f(\bar{\mathbf{x}}) \quad (40)$$

$$V[f(\mathbf{x})] = \sum \left(\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad (41)$$

O FOSM não estima o tipo de função de distribuição de probabilidade (PDF) das variáveis independentes, portanto, é necessário ter o conhecimento prévio da distribuição de probabilidade que melhor represente as variáveis físicas envolvidas no problema. Neste caso, sabe-se que, a distribuição normal, sendo uma das distribuições mais utilizadas para modelar fenômenos naturais, representa eficientemente a PDF dos parâmetros físicos e mecânicos do solo envolvidos na análise de estabilidade de encostas (Ering; Babu, 2016; Marin *et al.*, 2021).

Sabe-se que a condutividade hidráulica saturada (k_s) é melhor representada por uma distribuição de densidade de probabilidade lognormal como é apresentado por vários autores (Bong; Son, 2019; Cooke *et al.*, 1995; Gitirana Jr., 2005; Mesquita *et al.*, 2002; Mesquita, 2001; Silva, 2015). Neste caso, se faz necessário utilizar uma transformação básica que permite representar os momentos estatísticos de uma distribuição lognormal para uma distribuição normal, possibilitando que seja considerada a propriedade hidráulica como uma variável estocástica na análise da probabilidade de falha como apresentado nas Eqs. (42) e (43).

$$E[k_s]_{\text{normal}} = \log(k_s) \quad (42)$$

$$V[k_s]_{\text{normal}} = \log \left(\frac{V(k_s)}{k_s^2} + 1 \right) \quad (43)$$

No contexto dos movimentos de massa, um índice muito utilizado, é o índice de confiabilidade β' , o qual, facilita as interpretações quando se trata das análises estatísticas do FS das encostas ou taludes. O índice de confiabilidade normaliza a distância entre o FS e o seu indicador de desempenho ou FS crítico ($FS_{\text{crítico}}$) definido para as análises em função do desvio padrão. Esta teoria foi desenvolvida para uma distribuição de probabilidade normal onde, para um maior β' , menor é a probabilidade de falha (P_f). Assim, o β' é definido como (Assis *et al.*, 2019):

$$\beta' = \frac{E[FS] - FS_{\text{crítico}}}{\sigma[FS]} \quad (44)$$

Como é apresentado por Malkawi *et al.* (2000), o índice de confiabilidade do FS pode ser diretamente à probabilidade de falha para uma distribuição normal:

$$P_f(\beta') = P(FS \leq FS_{\text{critico}}) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{\beta'}{\sqrt{2}}\right) \quad (45)$$

É importante ressaltar que, quantificando a probabilidade de falha em função do índice de confiabilidade, estaria se considerando apenas o valor médio do fator de segurança obtendo, assim, a superfície de ruptura para esse valor específico. Nesta situação, portanto, não se leva em consideração outros cenários com combinações de medias críticas para os parâmetros, sendo assim, difícil, assegurar que é o índice de confiabilidade aquele que representaria a situação mais crítica.

Para visualizar as regiões de desempenho da encosta ou do talude, é necessário ter uma referência dos níveis de desempenho em função da probabilidade de falha ou do índice de confiabilidade como os apresentados pela USACE (*United States Army Corps of Engineers*) apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Níveis de desempenho esperados em função da probabilidade de falha e do índice de confiabilidade (USACE, 1999).

Nível de desempenho	$P(FS \leq FS_c)$	β'
Alto	3.0×10^{-7}	5.5
Bom	3.0×10^{-5}	4.0
Acima da média	3.0×10^{-3}	3.0
Abaixo da média	6.0×10^{-3}	2.5
Pobre	2.5×10^{-2}	2.0
Insatisfatório	7.0×10^{-2}	1.5
Perigoso	1.6×10^{-1}	1.0

4.2. Consequências

O segundo elemento na quantificação do risco são as consequências que, no contexto dos movimentos de massa, determinam o nível de dano ou o grau de perda que o fenômeno natural pode gerar nos elementos avaliados (Dai *et al.*, 2002). Este elemento pode ser interpretado como o produto entre, a vulnerabilidade e os custos associados aos danos, definindo o risco como:

$$R = A \times (V \times C) \quad (46)$$

onde, V = vulnerabilidade associada à ocorrência do evento ameaçante [-] e C = custos associados aos danos [\$].

A avaliação da vulnerabilidade pode ser qualitativa e sujeita aos registros históricos e às observações. Nesta situação, a vulnerabilidade é expressa em uma escala de valores entre 0 e 1, sendo 0 a condição na qual o elemento não é afetado e 1 a condição de prejuízo total. A engenharia, nos últimos anos, tem implementado as técnicas probabilísticas para a avaliação da vulnerabilidade, possibilitando a contribuição na construção de métodos de decisão para estimar um melhor índice de vulnerabilidade e, também, para a determinação da importância dos parâmetros estudados e da probabilidade de ocorrência de um dano baseado em dados históricos (Dai *et al.*, 2002; Einstein; Sousa, 2006; Vega; Hidalgo, 2016). Pode-se, também, abordar a vulnerabilidade como a probabilidade de se ter um dano ou uma perda condicionada à probabilidade da ocorrência do evento deflagrador (Chowdhury, 2010; Li *et al.*, 2010; Du *et al.*, 2013).

De outro lado, o vetor econômico C possibilita quantificar economicamente os danos, as perdas ou os processos de recuperação de um elemento ou uma sociedade, sendo essa uma abordagem necessária para o gerenciamento do risco.

No gerenciamento do risco, um elemento importante é a construção e a implementação dos sistemas de alerta. Estes sistemas acionam contramedidas, fornecem informações e permitem que as pessoas evitem ameaças ou, pelo menos, diminuam suas possíveis consequências (Einstein; Sousa, 2006). Os sistemas de alerta têm sido o foco principal das instituições governamentais, destacando-se como uma necessidade atual pelo aperfeiçoamento dos sistemas e pela inclusão das análises em tempo real.

É importante destacar que, na gestão de riscos associados a instabilidade de encostas, a avaliação da vulnerabilidade é dificultada pela impossibilidade de quantificar o alcance da massa deslizante. Em outras palavras, nas encostas e taludes de solo as metodologias existentes não avaliam até onde vai a massa rompida que, em algumas situações, em função da quantidade de água e do tipo de material, podem-se tornar em corridas de detritos ou em avalanches. Desta maneira é cada vez mais importante acurar os sistemas de monitoramento em tempo real, já que não é possível prever o comportamento dos materiais depois da falha.

4.3. Zoneamento ou mapeamento do risco devido aos deslizamentos

O reconhecimento do passado, na geologia, é o principal indicador do que pode acontecer no futuro (Highland; Bobrowsky, 2008). Partindo deste princípio, no risco associado aos

deslizamentos deflagrados por eventos de chuva, o mapeamento das regiões que já foram impactadas pelos movimentos de massa é relevante para o zoneamento do risco. Como é definido pelo Projeto GIDES (2018), o processo de mapeamento é feito usando, principalmente, as seguintes metodologias: o reconhecimento aéreo, o reconhecimento de campo, a instrumentação *in situ* e o registros de eventos passados.

Além disso, avaliar as condições atuais das encostas e realizar previsões em função da ocorrência de eventos de precipitação numa escala regional, facilita o zoneamento do risco, fornecendo, assim, diferentes cenários de ocorrência de desastres para a gestão do risco. Assim, para a avaliação da ameaça em escala regional, os métodos quantitativos, como são as redes neurais artificiais, tem se popularizado e permitem o zoneamento da susceptibilidade, com a qual é possível identificar regiões onde o risco associado aos movimentos de massa são maiores ou menores (Stanley e Kirschbaum, 2017; Berhane *et al.*, 2020; Hong *et al.*, 2020; Wang, Yi *et al.*, 2020; Wang, Yumiao *et al.*, 2020).

Selecionar o modelo de previsão apropriado depende de muitos fatores, incluindo as condições geoambientais e climáticas do local, os tipos de deslizamento de terra, os parâmetros de disparo, a quantidade de dados, a precisão dos dados e também a escala de análise. No contexto de deslizamentos superficiais deflagrados por chuvas, recentemente, Rojas (2017) implementou as soluções analíticas descritas para a representação da estabilidade das encostas na ocorrência de eventos de precipitação em uma escala regional.

Nesta proposta, verificou-se a importância da análise na condição não saturada mostrando resultados positivos e validando a eficiência dos modelos analíticos como modelos físico-matemáticos na representação dos deslizamentos superficiais. Sendo um modelo analítico, requer baixo custo computacional. Isto representou uma vantagem no mapeamento da estabilidade contribuindo para o refinamento dos modelos clássicos utilizados na abordagem probabilística do problema, podendo quantificar a ameaça associada aos movimentos de massa.

Neste contexto, destaca-se o desenvolvimento dos modelos numéricos, os quais permitem a análise de problemas complexos, como o fenômeno da infiltração e a estabilidade das encostas no meio poroso não saturado. Entretanto, estes modelos apresentam desvantagens, já que, ao incorporar um maior número de variáveis no aperfeiçoamento da representação dos fenômenos físicos, aumentam-se as incertezas e o custo computacional das implementações em uma escala

cartográfica. De forma geral, devido a esse custo computacional, restringe-se a modelagem numérica à solução de problemas pontuais, expondo a necessidade do uso de soluções analíticas para representar os fenômenos em escalas regionais.

5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, é apresentada a metodologia desenvolvida para a construção da plataforma de quantificação do risco associado aos escorregamentos decorrentes dos eventos de precipitação. Da mesma forma, é apresentado o caso de estudo utilizado com a finalidade de avaliar a metodologia proposta nesta pesquisa.

5.1. Materiais: encosta da Lagoa – Rio de Janeiro (1988)

Os materiais correspondem às informações obtidas do deslizamento da encosta da Lagoa, ocorrido na cidade do Rio de Janeiro, no Brasil, no ano de 1988. Este escorregamento foi registrado como um movimento de massa gravitacional causado, principalmente, por um evento prévio de precipitação de aproximadamente cinco dias (Gerscovich, 1994).

A encosta da Lagoa, localizada na vertente sul do morro dos cabritos no Rio de Janeiro, como é apresentado na Figura 7, apresentou um movimento de massa de aproximadamente 5000 m³, no dia sete de novembro de 1988 às 15h.

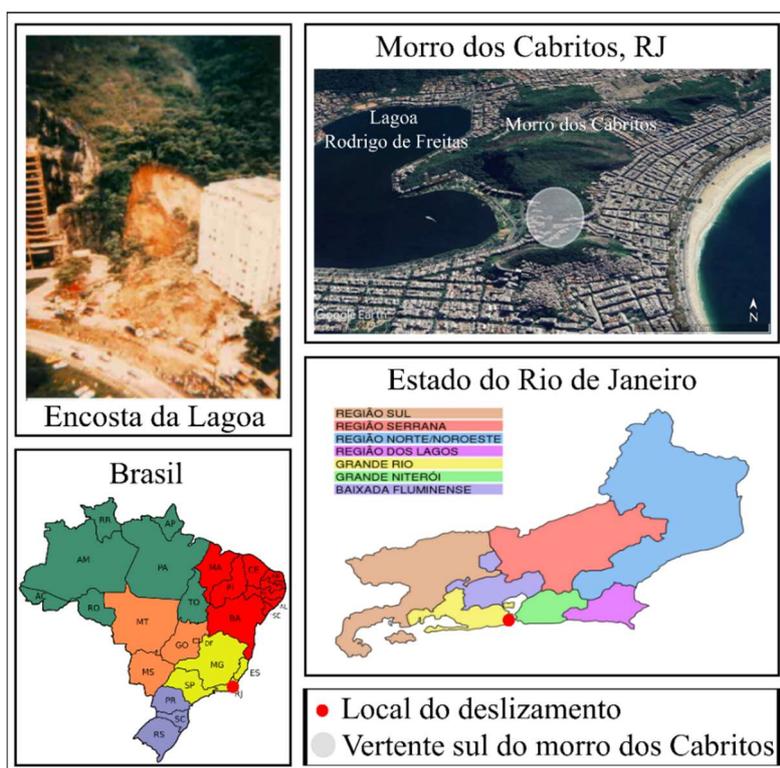


Figura 7. Localização do deslizamento da encosta da Lagoa no morro dos Cabritos, Rio de Janeiro, Brasil. Modificado de Gerscovich (1994).

Tal e qual está especificado no trabalho de Gerscovich (1994), este movimento de massa gravitacional gerou danos estruturais ao prédio adjacente a encosta falhando, assim, um dos pilares da estrutura, um dos apartamentos e, destroçando também, carros localizados na área externa e interna da edificação. Este evento não gerou perdas humanas. O evento de chuva associado ao movimento de massa é mostrado na Figura 8, tendo uma chuva acumulada de 140 mm durante o evento de precipitação. A chuva no dia do deslizamento atingiu uma intensidade de 50 mm/dia, sendo este o segundo dia de chuva mais intenso durante o evento.

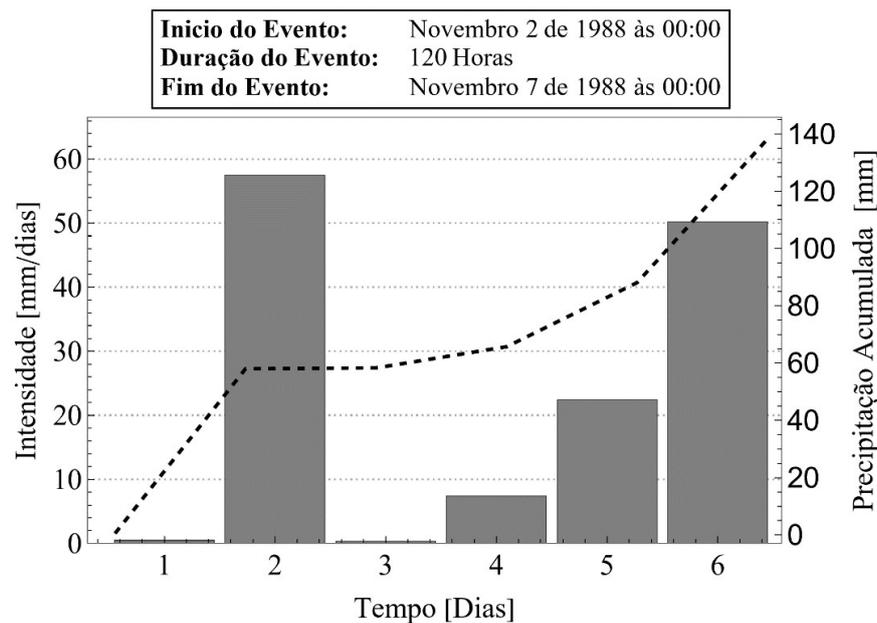


Figura 8. Hietograma do evento de chuva associado ao movimento de massa ocorrido no dia 7 de novembro de 1988. Adaptado de Gerscovich (1994).

No decorrer das investigações de campo realizadas na época para avaliar o fator deflagrador e as possíveis intervenções de estabilização do talude, foram definidas várias seções transversais da encosta afetada realizando, assim, a instrumentação geotécnica pertinente (piezômetros e inclinômetros) para a construção do perfil e para a caracterização do maciço. Além das sondagens mecânicas, se realizaram estudos geofísicos para a delimitação da profundidade do manto rochoso. Como é detalhado no trabalho de Gerscovich (1994), durante as investigações de campo, não foi detectada a presença de água associada ao nível freático, mesmo durante a época de chuva.

Na Figura 9, observa-se que, o talude é composto por dois tipos de solos residuais: um jovem e um maduro. Estes materiais foram caracterizados por Gerscovich (1994), definindo uma camada superficial de material residual maduro com uma espessura constante de

aproximadamente 1 m ao longo do talude e, uma camada de solo residual jovem com xistosidade bem definida e matriz arenosa, com uma espessura máxima de 11 m variando ao longo do perfil do talude.

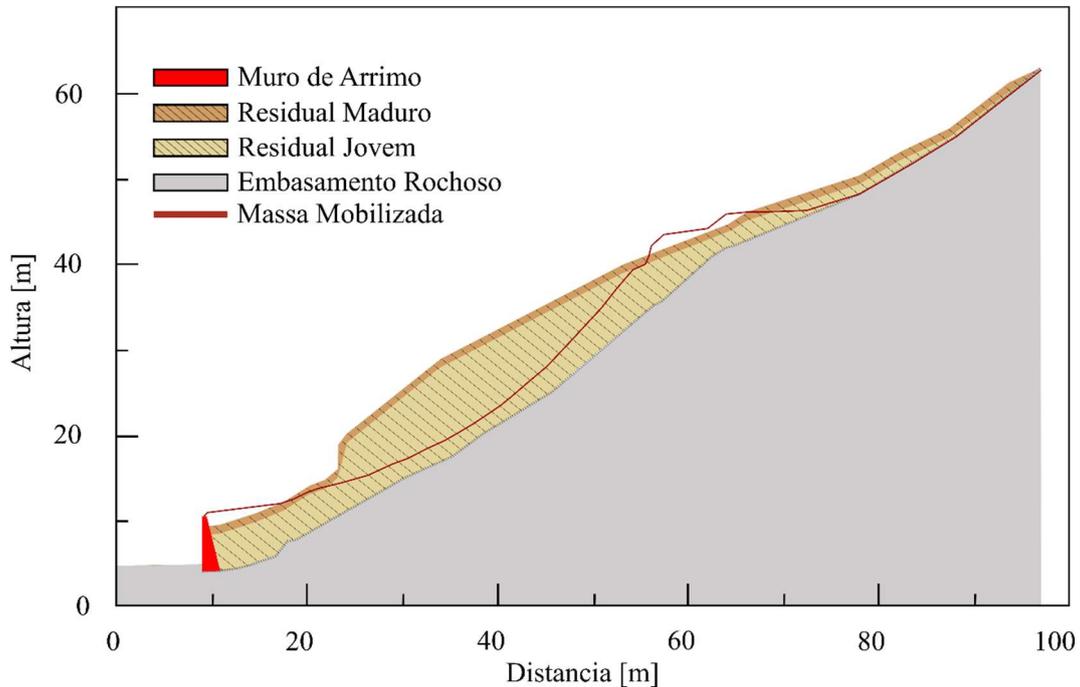


Figura 9. Seção transversal central da região escorregada da encosta da Lagoa. Adaptado de Gerscovich (1994).

As propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas de cada tipo de solo são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Caracterização física, mecânica e hidráulica dos tipos de solo (Gerscovich, 1994).

Material	Parâmetros Físicos				
	Areia [%]	Silte [%]	Argila [%]	LL [%]	LP [%]
Residual Maduro	56,0	34,0	10,0	39,5	24,7
Residual Jovem	84,0	10,0	4,0	-	-
Material	Parâmetros Físicos				
	Gs [-]	γ_{nat} [kN/m ³]	θ_r [m ³ /m ³]	θ_s [m ³ /m ³]	
Residual Maduro	2,6	17,5	0,54	0,05	
Residual Jovem	2,7	17,5	0,54	0,05	
Material	Parâmetros Mecânicos		Parâmetro Hidráulico		
	c' [kPa]	ϕ' [°]	k _s [m/s]		
Residual Maduro	4,8	27,5	1 × 10 ⁻⁵		
Residual Jovem	9,6	34,0	3 × 10 ⁻⁶		

Em função das características ou atributos não saturados dos materiais, é apresentado, no trabalho de Gerscovich (1994), a curva de retenção de água do solo para a camada residual jovem. Devido à indisponibilidade de dados referentes à curva de retenção de água para a camada residual madura, adotou-se a mesma curva para ambos solos, como é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Resultado experimental da curva de retenção de água do solo Residual Jovem apresentado por Gerscovich (1994).

Sucção [kPa]	196,8	68,63	24,51	4,9	0,1
θ [m³/m³]	0,08	0,12	0,35	0,38	0,54

Tecnicamente, a infiltração da água da chuva foi atribuída como uma das principais causas do movimento de massa favorecendo o deslizamento ao longo do contato solo-rocha, o qual pode indicar superfícies de ruptura de natureza translacional ou planar. Neste sentido, se faz relevante entender o efeito das chuvas antecedentes, considerando então, as informações do histórico de chuvas proporcionadas no trabalho de Gerscovich (1994).

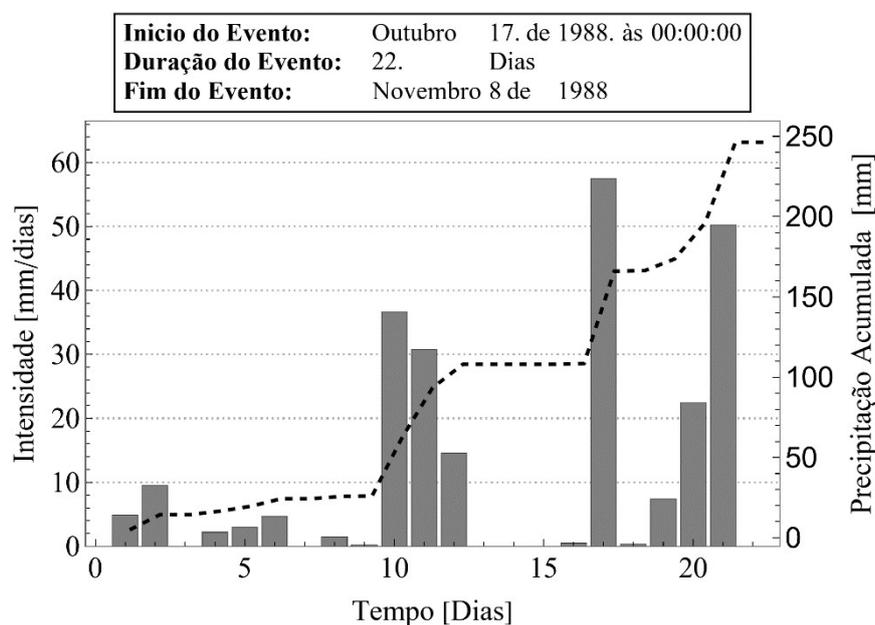


Figura 10. Hietograma das chuvas antecedentes ao movimento de massa da encosta da Lagoa. Modificado Gerscovich (1994).

No parecer do laudo técnico, a hipótese de uma das causas do deslizamento ser a ruptura do muro de arrimo localizado no pé do talude é vista como improvável desde a perspectiva que

a superfície de ruptura sugere um escorregamento que inicia acima do muro, devendo causar este movimento de massa a falha do mesmo. Embora, no laudo técnico, também fosse apontado a falta de conservação do sistema de drenagem superficial, a infiltração da água da chuva continua sendo a causa mais plausível para o escorregamento (Gerscovich, 1994).

5.2. Métodos

A metodologia proposta nesta pesquisa tem o objetivo de proporcionar uma ferramenta para auxiliar na quantificação da ameaça associada aos deslizamentos deflagrados por chuvas. A plataforma faz parte do grupo de programas desenvolvidos dentro do grupo de pesquisa Inovações e Tecnologias Aplicadas em Geotecnia Ambiental - GeoFluxo, coordenado pelo professor André Luís Brasil Cavalcante do programa de pós-graduação de Geotecnia da Universidade de Brasília. O programa computacional proposto nesta pesquisa é denominado de software RISCO, estruturado em cinco módulos, como apresentado na Figura 11.

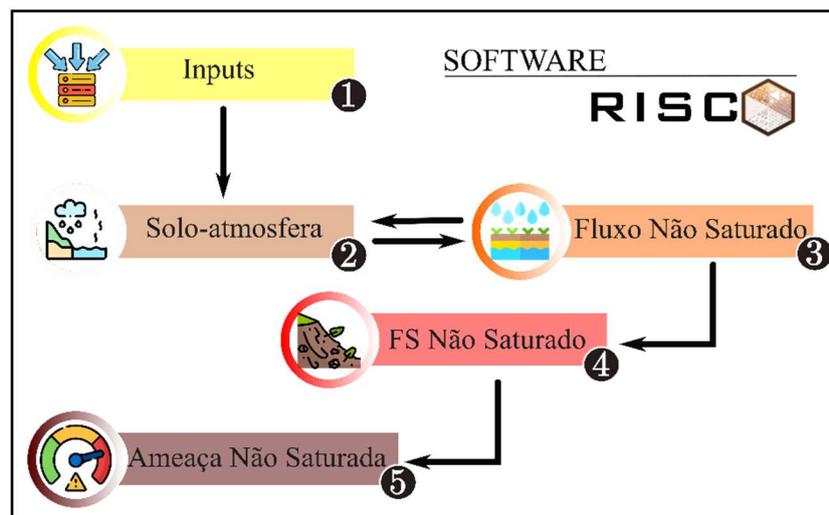


Figura 11. Esquema geral da metodologia proposta para a construção do software RISCO.

Os módulos representam os processos indispensáveis para a quantificação da probabilidade de falha (ameaça) não saturada do talude. Este produto é um dos insumos para a quantificação do risco, permitindo, assim, que o usuário após avaliar a vulnerabilidade possa, consequentemente, quantificar o risco.

A plataforma integrada foi construída na linguagem computacional *Wolfram Mathematica*, assim como, também, foram feitas todas as implementações e representações gráficas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. O funcionamento, os fundamentos

teóricos e as hipóteses consideradas para a construção de cada um dos módulos, são detalhados nos subcapítulos seguintes.

Para o desenvolvimento desta pesquisa, é utilizada a classificação dos movimentos de massa gravitacionais proposta por Augusto Filho (1992). Considerou-se neste trabalho, o movimento como sendo um escorregamento ou deslizamento planar, que tem como principal fator condicionante a ocorrência prévia de um evento intenso de precipitação.

5.2.1. Módulo 1: dados de entrada - *inputs*

Como qualquer modelo, a escolha das informações de entrada para a avaliação do problema é indispensável. Desta maneira, neste módulo, é realizada a importação das informações relacionadas à encosta e ao evento de precipitação. Na Tabela 13 são apresentados os tipos de formato de cada uma das informações necessárias para o funcionamento da plataforma. Do mesmo modo, é indicada a resolução necessária de cada parâmetro. No APÊNDICE A, encontram-se exemplificados cada um dos formatos apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Formato e resolução dos *inputs* necessários para a utilização da plataforma integrada para a avaliação do risco.

Parâmetro ou atributo	Tipo de parâmetro	Formato	Resolução
c' [kPa]	Resistência	Dado	Para cada camada de solo
ϕ' [°]			
k_s [m/s]	Hidráulico		
γ_{nat} [kN/m ³]	Físico		
θ_s [m ³ /m ³]			
θ_r [m ³ /m ³]			
G_s [-]			
ψ [kPa]	Não saturado		
θ [m ³ /m ³]			
Geometria	Geométricos		
Superfície de falha			
Declividade [°]			
Intensidade [mm/h]	Evento de chuva	Dado	Hora

Para as análises da probabilidade de falha, é necessário proporcionar o coeficiente de variação (CV) dos parâmetros estocásticos ou probabilísticos definidos pelo software como é

apresentado na Tabela 14. No caso de não se ter a informação do CV dos parâmetros, o software RISCO recomenda os valores apresentados na Tabela 14, os quais foram adotados dos autores Assis *et al.* (2019) e Gitirana Jr. (2005).

Tabela 14. Parâmetros estocásticos necessários para a abordagem probabilística do software RISCO.

Parâmetro estocástico	ϕ' [°]	c' [kPa]	γ_{nat} [kN/m ³]	k_s [m/s]	θ_s [m ³ /m ³]	θ_r [m ³ /m ³]	θ_i [m ³ /m ³]
CV [%]	9	30	5	80	13	10	10

No que concerne aos atributos não saturados dos solos, o Módulo 1 utiliza os modelos constitutivos de Cavalcante e Zornberg (2017) e de Costa e Cavalcante (2021) para a construção das curvas de retenção de água do solo e da condutividade hidráulica não saturada. Para isto, é necessário obter o parâmetro de ajuste hidráulico δ , o qual, como foi apresentado no subcapítulo 3.1, tem um significado físico quantitativo, sendo maior para solos arenosos e menor para solos mais finos. O ajuste é realizado implementando a função *FindFit* do *Wolfram Mathematica*, que implementa o critério do mínimo erro quadrático.

A plataforma proposta neste trabalho leva em consideração os modelos constitutivos pertinentes aos solos unimodais e bimodais, sendo estes últimos ajustados por três parâmetros, o λ , δ_1 e δ_2 (Costa; Cavalcante, 2021). Ainda que, o Módulo 1, realize o ajuste para os solos com distribuição bimodal, o modelo de estabilidade de taludes utilizado na plataforma está escrito em função da distribuição unimodal de poros, restringido, no caso dos solos bimodais, o ajuste para uma única região. É importante salientar que a plataforma proposta, permite ao usuário a escolha da região de poros na qual deseja realizar as análises de estabilidade, escolhendo o parâmetro de ajuste δ_1 ou δ_2 , segundo a necessidade do caso de estudo.

Sabe-se, observacionalmente, que os solos das encostas, principalmente nas regiões tropicais, permanecem a maior parte do tempo no estado não saturado, atingindo poropressões na ordem de centenas de kPa. Recomenda-se, portanto, ao usuário do software, no caso de curvas de retenção de água bimodais, utilizar a faixa dos macroporos para as análises.

5.2.2. Módulo 2: interação solo-atmosfera

O objetivo principal deste módulo é quantificar a interação solo-atmosfera por meio do balanço hidrogeotécnico. Este processo é indispensável na determinação da água disponível

para infiltrar na superfície do terreno e, assim, posteriormente, poder representar a frente de umidade do solo. Além disso, sabe-se que o conhecimento do estado de umidade do maciço na iminência da ruptura é relevante para a análise da estabilidade e, por isso, a análise das chuvas antecedentes para a definição do estado de umidade em qualquer momento prévio à ruptura é incorporada por meio do balanço hidrogeotécnico.

A fim de compreender melhor o fenômeno de infiltração na superfície do terreno, foi proposta a metodologia de uma coluna de solo instrumentada com sensores de baixo custo (Figura 12). Esta fase experimental foi realizada no laboratório do programa de Pós-graduação de Geotecnia da Universidade de Brasília, em parceria com a pesquisa de pós-doutorado de Góis e Cavalcante (2019). A construção, a montagem, as especificações técnicas, a calibração dos sensores e a quantidade de ensaios realizados no processo de validar os resultados, assim como a instrumentação da coluna, foram divulgadas nos relatórios e publicações de, Moreira e Cavalcante (2018), Silva e Cavalcante (2019), Ohofugi *et al.* (2020) e Ohofugi *et al.* (2021).

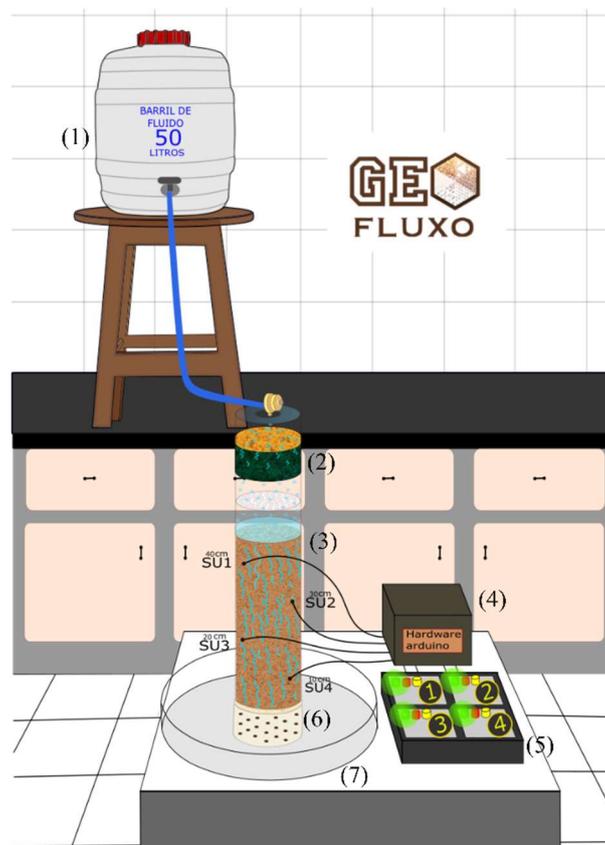


Figura 12. Esquema da coluna de solo instrumentada por quatro sensores de umidade de baixo custo (SU1, SU2, SU3 e SU4). Onde, (1) reservatório de água com capacidade de 50 L, (2) Dispositivo para a distribuição da água na superfície da coluna simulando três intensidades de

chuva, (3) Coluna de acrílico com diâmetro interno de 10 cm e altura de 60 cm, (4) microprocessador Arduino para quatro sensores de umidade, (5) luzes indicadoras para três estados de umidade, (6) base de acrílico furada para a saída da água do sistema e, (7) Reservatório da água percolada. Adaptado de Silva e Cavalcante (2019).

Esta fase experimental proporcionou ferramentas para a elaboração da metodologia deste módulo, entendendo, na prática, as melhores hipóteses para a representação da infiltração, do empocamento e do escoamento da água, quando considerado um evento de precipitação heterogêneo. Desta forma, o panorama de distribuição da água no solo, onde é desenvolvido o modelo de balanço hidrogeotécnico, é representado por quatro zonas principais, a zona de saturação, a zona de transmissão, a zona não saturada e a zona saturada, como apresentado na Figura 13.

A distribuição da água no processo de infiltração é representada pela zona de saturação (Figura 13). Inicialmente, em um solo seco, a capacidade de infiltração na superfície do terreno é máxima, determinando a lâmina de água que entra na superfície do solo durante uma chuva constante. O modelo estabelece uma discretização temporal horária. Durante este processo de infiltração, a zona de saturação é comumente formada completamente durante eventos de chuva intensos que geram escoamento superficial.

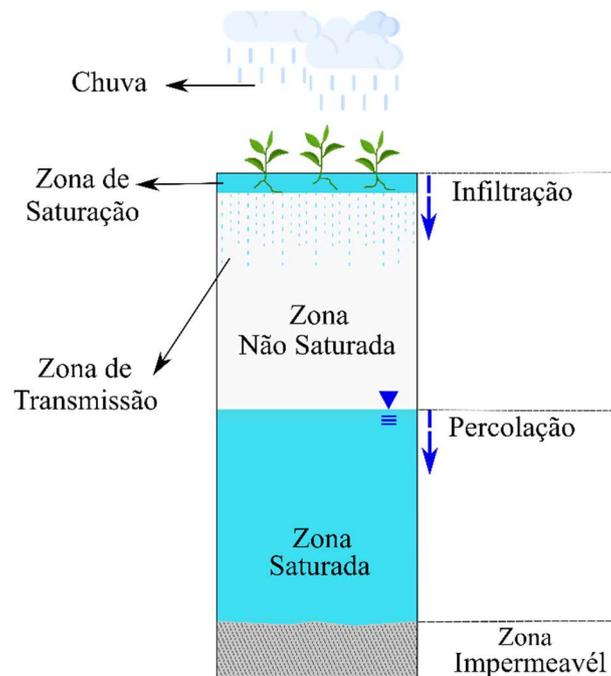


Figura 13. Divisão das regiões da água no interior do solo.

Paralelo à formação da zona de saturação, inicia-se o processo de fluxo, que é a capacidade do solo para transferir água até as camadas mais profundas, tendo como fronteira superior uma descarga constante (zona de saturação). Este processo é explicado no Módulo 3 definindo, assim, a região de transmissão apresentada na Figura 13.

O fenômeno de infiltração, explicado anteriormente, é concebido matematicamente pela junção dos modelos de capacidade de infiltração de Green e Ampt (1911) e de Mein e Larson (1973), com o modelo de fluxo unidimensional não saturado e transiente de Cavalcante e Zornberg (2017). Desta forma, o software quantifica a água disponível para entrar no solo em dois possíveis cenários:

 O primeiro cenário é definido quando só ocorre o fenômeno de infiltração no tempo de análise com chuva constante. Isto significa que, durante esse período de tempo, o solo tem a capacidade de receber toda a água que cai na superfície, sendo a capacidade de infiltração do solo maior que a intensidade de precipitação. Contudo, é necessário verificar as condições de contorno do modelo de fluxo de Cavalcante e Zornberg (2017), onde é considerado que a fronteira superior tem uma velocidade de descarga máxima definida pela Eq. (18).

 O segundo cenário acontece quando o solo consegue infiltrar a água da chuva, mas, em algum momento, durante o evento de chuva constante, é atingida a saturação na superfície do terreno gerando escoamento superficial. Nesta situação, a verificação das condições de contorno do modelo de fluxo é feita levando em consideração a quantidade de água que infiltra no tempo de empoçamento definido pelo modelo de Mein e Larson (1973).

5.2.3. Módulo 3: fluxo não saturado e representação da frente de umidade

Este módulo quantifica o fenômeno do fluxo no interior do talude considerando o efeito das chuvas antecedentes na variação da umidade ao longo do perfil da encosta. Neste processo são criados os perfis de umidade para cada instante de tempo implementado o balanço hidrogeotécnico proposto no módulo 2, junto ao modelo de fluxo de Cavalcante e Zornberg (2017) apresentado no subitem 3.1.

A metodologia proposta requer de uma discretização no tempo e no espaço. A discretização do tempo é predefinida pelo evento de precipitação e a discretização do espaço é determinada por uma malha 2D de elementos $\Delta_x \times \Delta_z$ como é apresentado na Figura 14. A representação gráfica bidimensional do perfil de umidade é realizada utilizando, além da

discretização, a informação correspondente à geometria do perfil da encosta dada no início da modelagem (subitem 5.2.1.).

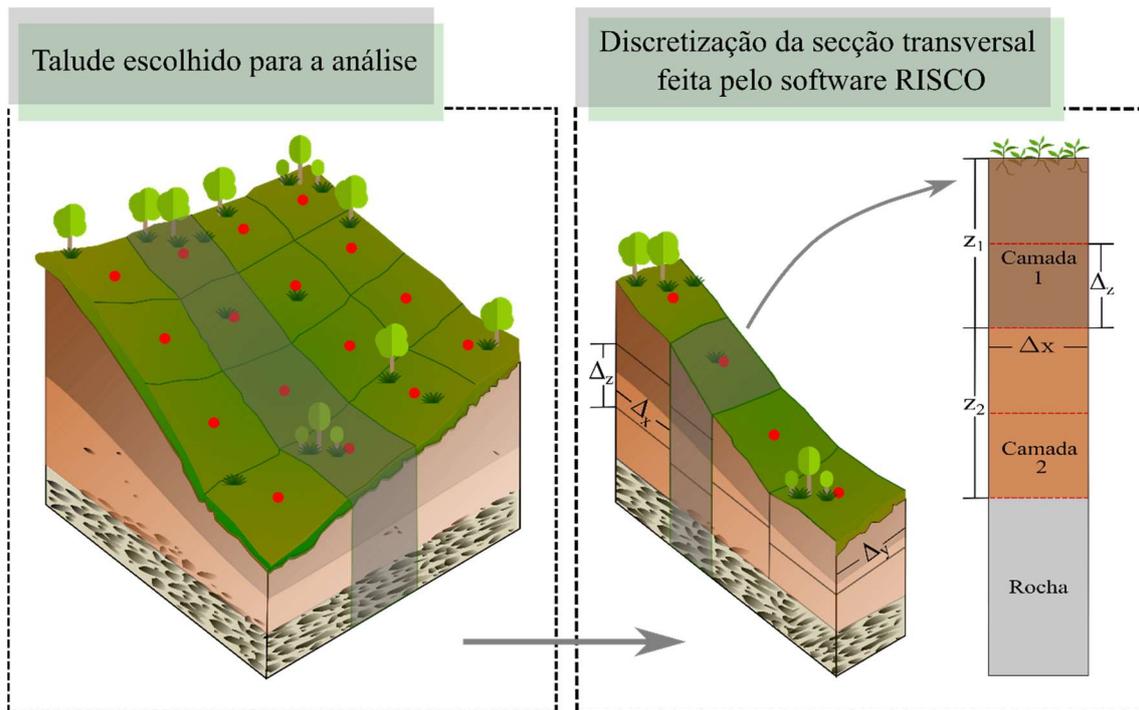


Figura 14. Discretização do perfil do talude proposta pelo software RISCO.

Durante todas as análises, a profundidade do talude é considerada como unitária, sendo assim a dimensão do eixo y igual a 1 m ($\Delta y = 1$ m). Esta proposta também considera o talude heterogêneo, possibilitando uma análise para solos com diferentes propriedades físicas, mecânicas, hidráulicas e não saturadas.

A primeira etapa deste módulo é a determinação da resolução da malha da secção transversal do talude. Para isto, foi implementada uma metodologia de calibração que avalia a resposta do modelo de fluxo para uma coluna de solo em várias profundidades (Figura 15). Esta calibração permite detectar a espessura Δz mínima ou eficiente com a qual é possível visualizar as variações da frente de umidade para cada caso de estudo.

A Figura 15, apresenta graficamente a forma com que o software RISCO decompõe a coluna de solo segundo os tipos de materiais definidos na sua estratigrafia, delimitando, assim, o início e o fim de cada camada de solo. Desta maneira, no instante prévio (t_0) a primeira chuva, o programa atribui a umidade inicial definida no módulo 1 para cada material. Seguidamente, no tempo correspondente à primeira hora de chuva, o software aplica o balanço hidrogeotécnico

proposto nesta pesquisa, quantificando a taxa de infiltração (i_c) na superfície da coluna de solo e, conseqüentemente, determinando a água disponível para percolar no sistema.

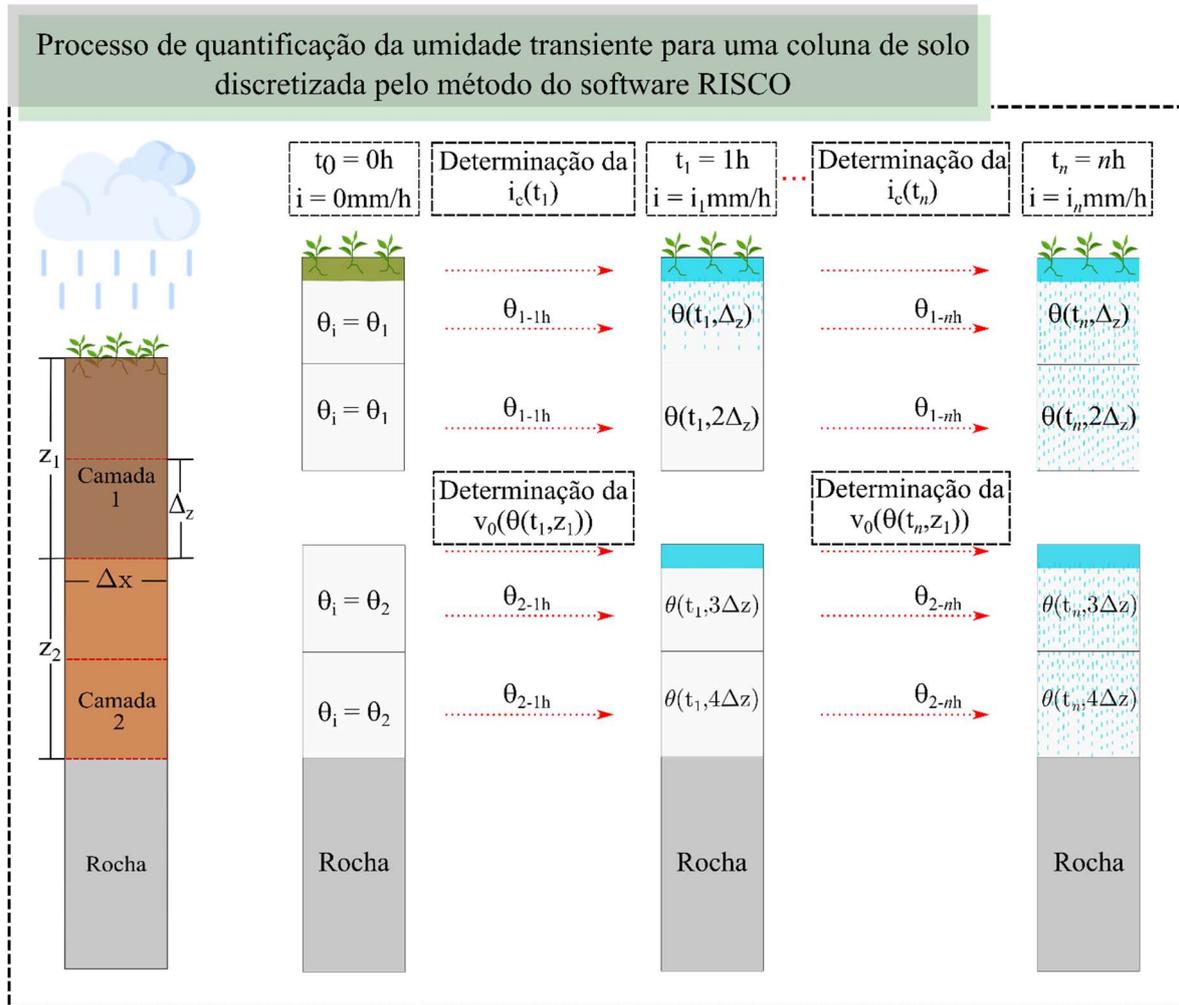


Figura 15. Metodologia para a quantificação da frente de umidade de uma coluna de solo do perfil da encosta proposta pelo software RISCO.

Implementando o modelo de fluxo não saturado e transiente de Cavalcante e Zornberg (2017) apresentado na Eq. (20), é avaliado o fluxo em qualquer profundidade do solo como mostrado na Figura 16. Assim, implementando esta solução analítica, o software RISCO quantifica a umidade para cada profundidade (Δz) da primeira camada de solo, até atingir a sua fronteira inferior que delimita com o início da camada subsequente.

Como é representado na Figura 15, nas camadas internas, a zona de saturação é definida no topo da camada, por meio da velocidade de descarga máxima ou mínima (v_0) que o solo pode receber como descrito na Eq. (18). Esta velocidade de descarga está em função da condutividade hidráulica saturada do solo, da capacidade de umedecimento máxima do solo e

do estado de umidade inicial do material que corresponde a água que chega no final da camada anterior, determinando assim, a água disponível para percolar na segunda camada de solo.

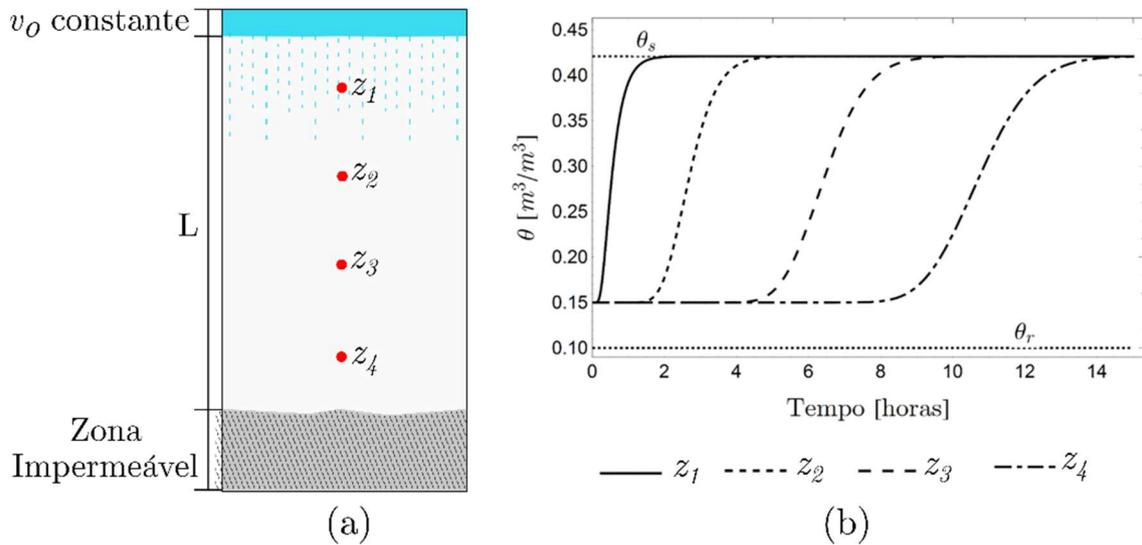


Figura 16. Solução analítica para o fluxo não saturado de Cavalcante e Zornberg (2017): (a) representação das condições de contorno e condição inicial para uma coluna de solo finita, (b) frente de umidade transiente para quatro profundidades.

De tal modo, a metodologia utilizada para a análise da chuva antecedente consiste em mudar as condições de contorno para cada material em função da água precipitada segundo o evento de chuva. Neste processo, para cada intervalo de tempo com chuva constante, é determinada a evolução do estado de umidade.

5.2.4. Módulo 4: estabilidade de talude transiente na condição Não Saturada

Neste módulo é avaliada a estabilidade das encostas implementando o modelo não saturado e transiente, definido na Eq. (31). Este modelo, como foi explicado anteriormente, está em função de um único parâmetro de ajuste, o qual tem sentido físico e é quantificado pelo ajuste dos dados experimentais da curva de retenção de água no solo.

O modelo proposto pelo software RISCO, representa a estabilidade da encosta no perfil do talude proporcionado no início da modelagem. Esta representação gráfica segue a discretização espacial e temporal definida no Módulo 2 e no Módulo 3, sendo possível, também, avaliar a estabilidade em qualquer ponto no espaço da matriz discretizada de coordenadas (x,y)

para qualquer tempo. Igualmente, se for requerido pelo usuário, pode ser representada a estabilidade transiente, para uma chuva constante em várias profundidades do talude.

5.2.5. Módulo 5: probabilidade de falha na condição Não Saturada

A probabilidade de falha é obtida implementando o método probabilístico FOSM apresentado anteriormente no subcapítulo 3.1.1. O software RISCO considera a contribuição da condutividade hidráulica saturada dos materiais, na variância total do problema de estabilidade. A transformação da PDF lognormal para a PDF normal é, então, implementada, como apresentado nas Eqs. (42) e (43).

A primeira etapa deste módulo consiste em processar as informações das variáveis estocásticas representando as funções de densidade de probabilidade de cada parâmetro para cada tipo de solo que compõe a encosta. Após isto, é construído o perfil de probabilidades de ruptura considerando os níveis de desempenho apresentados na Tabela 10 para cada hora do evento de precipitação.

Aplicando a mesma metodologia do Módulo 4, o usuário pode também analisar a probabilidade de falha em um ponto específico da matriz discretizada para qualquer instante de tempo. Assim, é possível ter uma resolução maior do problema para as áreas de interesse segundo cada caso de estudo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS MÓDULOS 1, 2 E 3

Neste capítulo, são apresentados os resultados pertinentes aos módulos 1, 2 e 3 obtidos para o caso de estudo da encosta da Lagoa implementando o software RISCO proposto nesta pesquisa. Durante o desenvolvimento da tese, foram geradas algumas publicações produto de parcerias desta autora com outros pesquisadores do grupo de pesquisa GeoFluxo (Tabela 15).

Tabela 15. Publicações produzidas durante o desenvolvimento da pesquisa.

Autores	Título da Publicação	Etapa da Pesquisa
Costa, K.R.C.B. e Cavalcante, A.L.B. (2018)	Estudo dos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas Implementando a Análise Não Saturada e Transiente	Módulo 4
Ohofugi, N.G.; Gois, M.S.; Costa, K.R.C.B. e Cavalcante, A.L.B. (2020)	Experimentos para Instrumentação de Baixo Custo em Coluna de Solo Durante os Fenômenos de Ascensão Capilar e Infiltração	Módulo 2
Góis, M.S.; Matos, M.M.O; Ohofugi, N.G.; Costa, K.R.C.B.; Moreira, G.R.; Silva, A.C.N. e Cavalcante, A.L.B. (2021)	Instrumentation of soil columns for time-lapse monitoring of the phenomenon of capillary rise through spontaneous potential, soil moisture sensor, electrical resistivity, and GPR measurements	Módulo 2
Ohofugi, N.G.; Gois, M.S.; Costa, K.R.C.B. e Cavalcante, A.L.B. (2021)	Instrumentação de Baixo Custo em Coluna de Solo para Monitoramento Time-Lapse da Ascensão Capilar	Módulo 2
Góis, M.S.; Costa, K.R.C.B. e Cavalcante, A.L.B. (2023)	Prediction of hydraulic and petrophysical parameters from indirect measurements of electrical resistivity to determine soil-water retention curve – studies in granular soils	Módulo 2
Costa, K.R.C.B.; Dantas, A.P.N.; Cavalcante, A.L.B. e Assis, A.P. (2023)	Probabilistic Approach to Transient Unsaturated Slope Stability Associated with Precipitation Event	Módulo 5

6.1. Módulo 1: processamento dos dados de entrada

Neste processo, são interpretadas as informações proporcionadas nos arquivos INPUTS_Local.xlsx, GEOMETRIA.txt e DECLIVIDADE.txt, como detalhado no APÊNDICE A. Inicialmente, é feito o reconhecimento da geometria da encosta da Lagoa identificando o contorno de cada camada que compõe a estratigrafia, os elementos externos ao talude e a área

do material mobilizado durante o deslizamento. Desta maneira, o perfil da encosta da Lagoa é representado pelo software RISCO como apresentado na Figura 17.

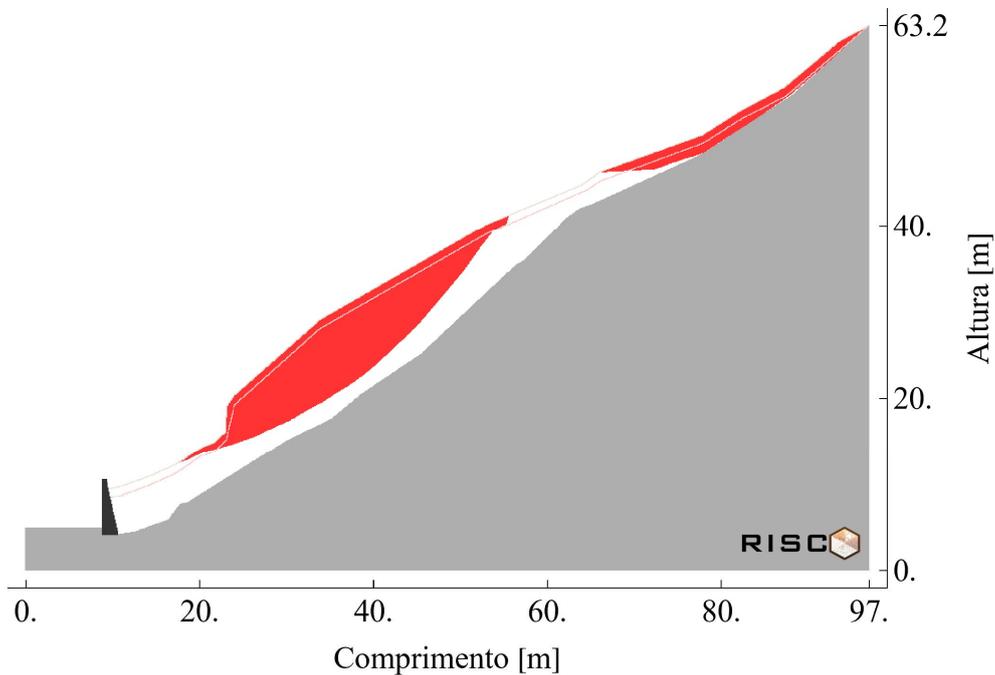


Figura 17. Representação do perfil da encosta da Lagoa, detalhando a massa de solo mobilizada. Imagem gerada pelo software RISCO.

O segundo passo na importação de dados, é a atribuição das propriedades dos materiais para cada tipo de solo. Como foi explicado anteriormente, referente aos atributos não saturados dos solos, o software RISCO dá a possibilidade ao usuário de analisar os ajustes dos dados experimentais da SWRC, podendo escolher entre os modelos de Cavalcante e Zornberg (2017) e de Costa e Cavalcante (2021). Na Figura 18 e na Figura 19, são apresentados os ajustes dos respectivos modelos constitutivos.

Na Figura 18, é obtida a curva de retenção de água do solo com um parâmetro de ajuste hidráulico δ de $0,0261106 \text{ kPa}^{-1}$. Este ajuste forneceu um coeficiente de determinação de aproximadamente 0,98, que significa que o modelo conseguiu explicar 98% dos dados experimentais e, define satisfatoriamente, a curva de retenção de água no solo para os materiais do caso de estudo da encosta da Lagoa.

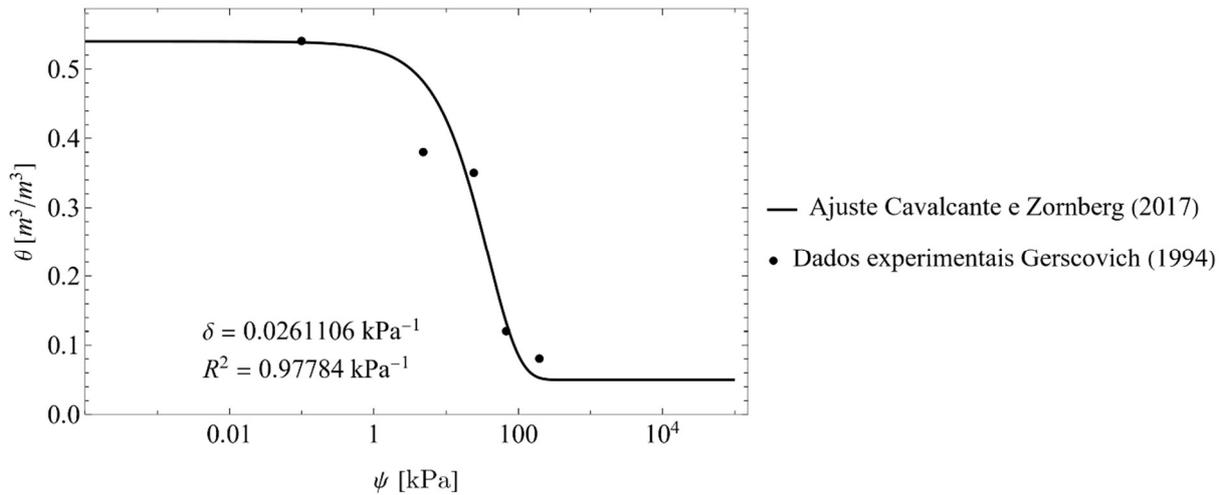


Figura 18. Ajuste dos dados experimentais para a SWRC para o a camada superficial (solo residual maduro) e para a camada interna (solo residual jovem) utilizando o modelo de Cavalcante e Zornberg (2017). Imagem gerada pelo software RISCO.

Como foi explicado no subcapítulo 5.1, os dados experimentais da SWRC, correspondem ao solo residual jovem, sendo estes, pela indisponibilidade de informação, atribuídos ao solo residual maduro. Deste modo, entendendo que, pela pedogênese do solo, a camada interna deve apresentar um grau de intemperismo menor, é escolhido com maior confiança o parâmetro de ajuste hidráulico unimodal de $0,0261106 \text{ kPa}^{-1}$ para as análises da encosta da Lagoa.

Atendendo ao trabalho de Costa e Cavalcante (2020), onde os autores validam o significado físico do parâmetro de ajuste hidráulico, propondo um modelo constitutivo que relaciona o δ com a pressão da entrada de ar no solo (Eq. (14)), é possível verificar se a atribuição de dados dada para o solo residual maduro é coerente, levando em consideração a distribuição granulométrica do solo.

Em contrapartida, na Figura 19, o coeficiente de determinação é ligeiramente melhor, sendo de 99%. Porém, pela quantidade limitada de dados experimentais, optou-se por não considerar este solo com distribuição de poros bimodal.

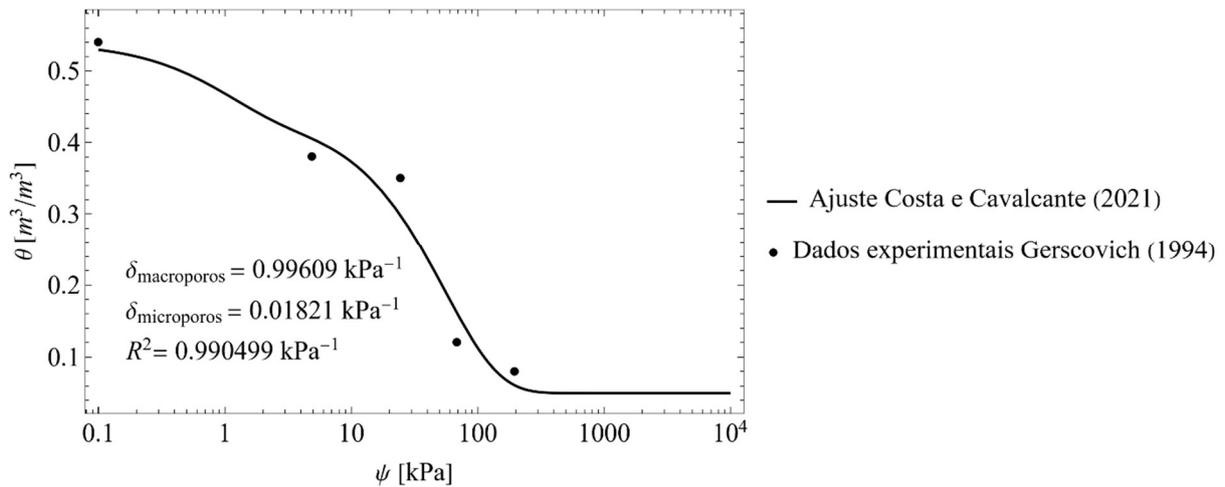


Figura 19. Ajuste bimodal dos dados experimentais para a SWRC da camada superficial (solo residual maduro) e da camada interna (solo residual jovem) utilizando o modelo de Costa e Cavalcante (2021). Imagem gerada pelo software RISCO.

Foi utilizada a informação do trabalho de Gerscovich (2001), onde é apresentada a pressão de entrada de ar (ψ_{ar}) para diferentes tipos de solo. Com esta informação e, implementando o modelo constitutivo de Costa e Cavalcante (2020) mostrado na Eq. (14), foi possível definir as faixas de δ para cada material em função da sua fração de grão predominante, apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Parâmetro δ para diferentes matérias aplicando o modelo constitutivo de Costa e Cavalcante (2020). Dados da pressão de entrada de ar (ψ_{ar}) tomados de Gerscovich (2001).

Solo	Areias Grossas	Areias Meias	Areias Finas	Siltes	Argilas
ψ_{ar} [kPa]	0,2 – 1	1 – 3,5	3,5 – 7,5	7 – 25	> 25
δ [kPa ⁻¹]	0,8969 – 0,1794	0,1794 – 0,0512	0,0512 – 0,0239	0,0256 – 0,0071	<0,0071

Desta forma, seguindo a Tabela 16, conclui-se que o δ escolhido para as análises da encosta da Lagoa encontra-se na faixa correspondente aos materiais que, na sua granulometria, tem predominância dos siltes.

Sabendo que a camada de solo residual maduro é classificado como um solo areno-argiloso (Gerscovich, 1994), pode-se considerar que o parâmetro escolhido, pode representar o comportamento mecânico não saturado do solo, haja vista que, o δ do ajuste se enquadra no limite superior das areias finas, indicando a predominância de grãos muito finos e, no limite

inferior dos siltes, que, embora não sejam o δ representativo dos solos argilosos, é mais coerente com a classificação dada ao solo residual maduro, que sugere um solo com predominância de areias e não só de material fino.

Neste caso, utilizando o δ de $0,0261106 \text{ kPa}^{-1}$ para a obtenção das curvas de condutividade hidráulica não saturada de cada tipo de solo e a relação constitutiva de Cavalcante e Zornberg (2017) apresentada na Eq. (13), a *k-function* de cada solo, é apresentada na Figura 20.

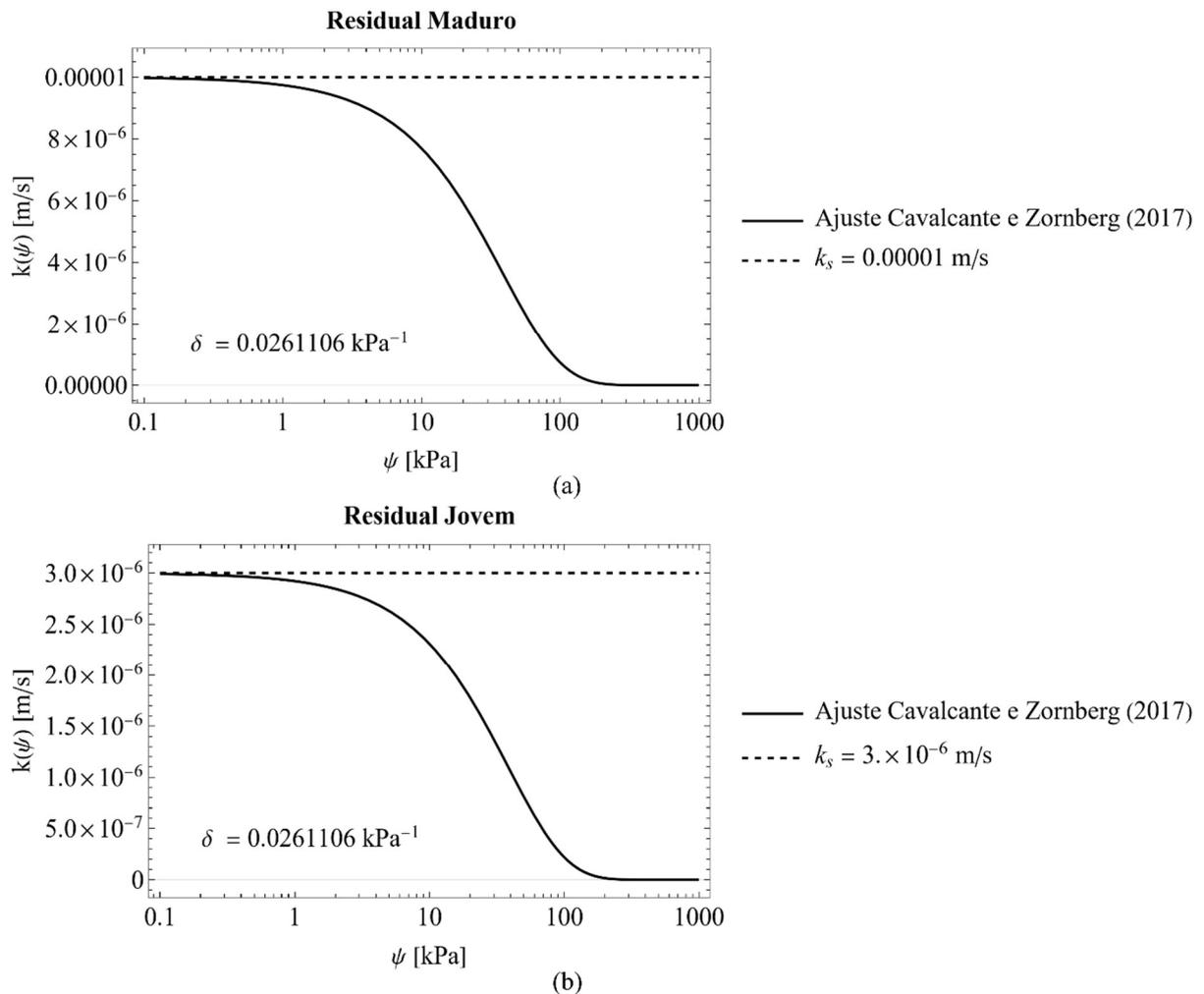


Figura 20. Curvas de condutividade hidráulica não saturada para os solos da encosta da Lagoa obtidas pelo modelo de Cavalcante e Zornberg (2017): (a) ajuste para o solo residual maduro e (b) ajuste para o solo residual jovem. Imagem gerada pelo software RISCO.

Observa-se na Figura 20 que independentemente de aplicar o mesmo parâmetro de ajuste hidráulico para ambos tipos de solo, a condutividade hidráulica saturada dos materiais é diferente, apresentando diferentes velocidades de percolação para os mesmos valores de

poropressão negativa. Este resultado é importante já que, para a modelagem não saturada, identificar os solos com maior ou com menor capacidade de condução da água, ajudam para uma representação mais próxima ao fenômeno real.

Na Figura 21, é apresentada a curva de condutividade hidráulica do solo em função do teor de umidade volumétrica da água. Esta representação, embora, não seja a mais comum, pode facilitar ao usuário o entendimento da condutividade hidráulica do solo na engenharia prática, já que, geralmente, só se tem disponível os dados relativos ao teor de umidade volumétrica do solo.

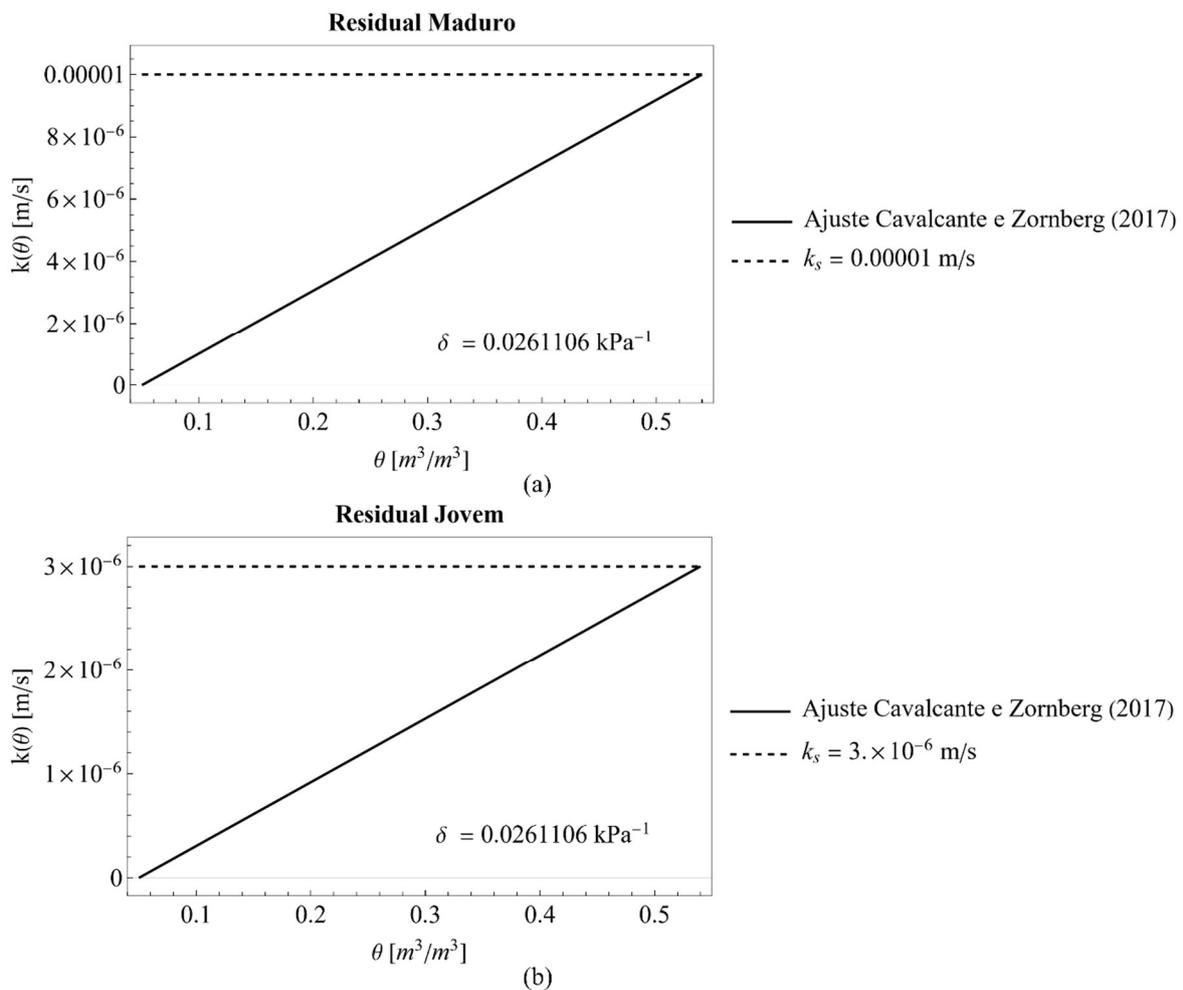


Figura 21. Condutividade hidráulica não saturada em função do θ : (a) ajuste para o solo residual maduro e (b) ajuste para o solo residual jovem. Imagem gerada pelo software RISCO.

O terceiro e último passo na importação de dados está relacionado ao evento de precipitação. Para o estudo da encosta da Lagoa, tem-se a informação de um evento de chuva de 22 dias com uma resolução de intensidade diária como é apresentado na Figura 10.

Este evento de precipitação não tem a resolução compatível com o software RISCO, que demanda uma discretização maior do que o medido e, devido a esta limitação, foi dividida a intensidade diária em 24 intensidades horárias implementando a ferramenta *Random* do *Wolfram Mathematica*, obtendo assim, as novas intensidades de forma aleatória e não tendenciosa, como é apresentado na Figura 22.

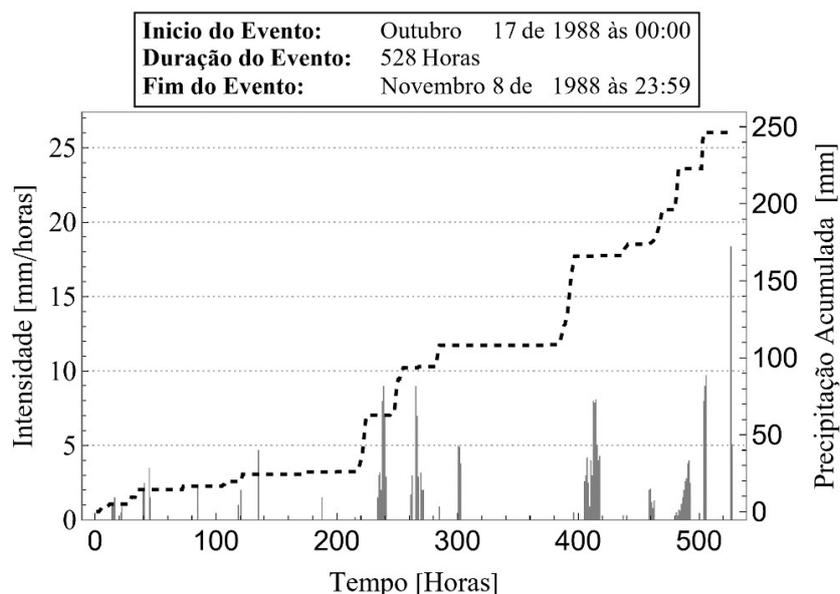


Figura 22. Evento de chuva antecedente ao deslizamento da encosta da Lagoa com resolução horária. Imagem gerada pelo software RISCO.

6.2. Módulo 2: balanço hidrogeotécnico e definição do estado inicial do talude

Neste módulo, o software RISCO realiza o balanço hidrogeotécnico para cada hora de precipitação do evento de chuvas antecedentes mostrado na Figura 22. Ele também determina as condições iniciais do talude antes do começo do evento de precipitação. Como foi mencionado no subcapítulo 5.2.2, a concepção deste modelo foi feita após uma etapa experimental onde se monitorou o fenômeno da infiltração e do fluxo numa coluna de solo (areia) instrumentada com sensores resistivos de baixo custo.

O primeiro ensaio, mostrado na Figura 23, consistiu em simular o fenômeno da infiltração e do fluxo numa coluna de areia inicialmente seca, impondo as seguintes condições de contorno e de molhamento:

Na fronteira superior foi induzido o molhamento por 30 minutos. Este processo foi feito com o objetivo de simular uma chuva constante com uma intensidade maior à capacidade de infiltração da superfície da coluna gerando o empocamento da água. No decorrer do ensaio,

garantiu-se que durante o tempo de molhamento não existisse erosão na superfície e que se mantivesse uma coluna de água de aproximadamente 1 cm, impondo assim a descarga constante.

Na fronteira inferior, foi implementada uma barreira permeável (brita) possibilitando a saída da água do sistema pela base da coluna. Isto foi feito com a intenção de simular o fluxo em uma coluna de solo infinita, onde não existe umedecimento pelo fenômeno da capilaridade.

Os sensores resistivos utilizados na coluna de solo medem a diferença do potencial elétrico do meio poroso, quantificando a resistividade elétrica em dígitos binários (*bits*). O valor máximo de *bits* é de 1023, correspondente a um meio altamente resistivo (solo seco), onde a água tem dificuldade de se movimentar. Essa velocidade é representada pela condutividade hidráulica não saturada do solo. O valor mínimo de *bits* é de 0, correspondente a um meio sem resistividade (solo saturado). Nesta situação, a água se movimenta na sua velocidade máxima representada pela condutividade hidráulica saturada do solo.

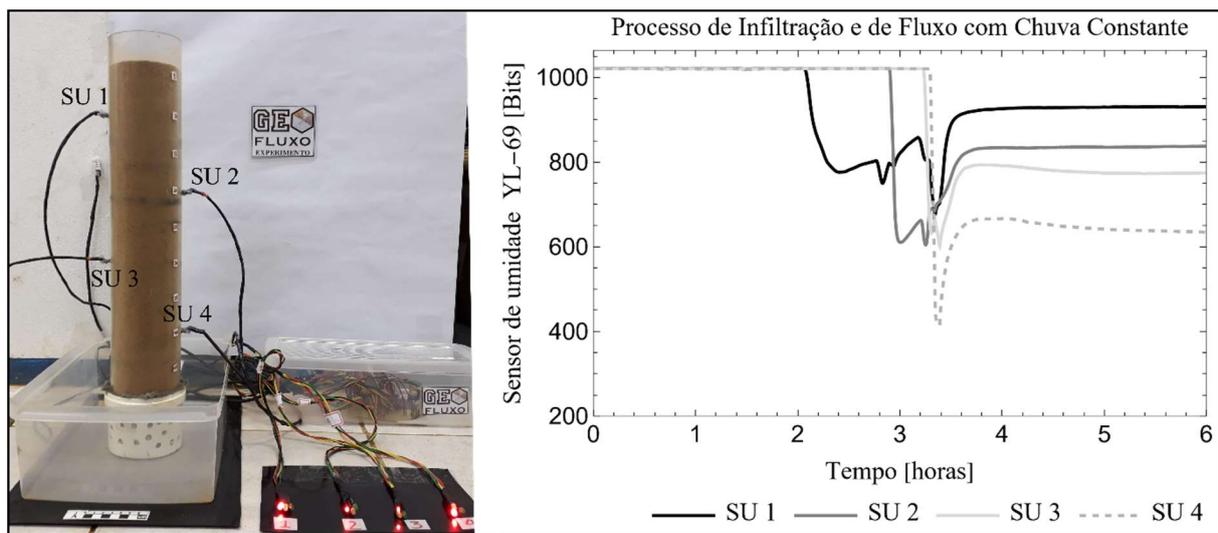


Figura 23. Ensaio de infiltração e de fluxo para uma coluna de solo instrumentada considerando uma chuva constante.

Como é observado na Figura 23, após duas horas de monitoramento do solo no estado seco, é incorporada a água no sistema. Esta água infiltra e começa a ser conduzida ao interior da coluna por meio do fenômeno de fluxo. O sensor de umidade que se encontra mais perto da superfície (SU1) registra a infiltração da água poucos minutos após iniciar o molhamento na fronteira superior.

Durante o ensaio, foi possível observar que a água infiltrada se distribuiu nos primeiros milímetros de solo superficial, gerando uma região de saturação que tem a função de disponibilizar a água ao interior da coluna. Desta maneira, foi evidente que, devido a velocidade do fluxo de entrada ser maior à capacidade de infiltração do solo, o empoçamento na superfície é inevitável, permanecendo a região de saturação constante. Este processo indica que, efetivamente, o solo só pode conduzir água na sua velocidade máxima (k_s).

Logo após ser interrompido o molhamento, a região de descarga se manteve por aproximadamente 10 minutos, distribuindo a água para as outras profundidades da coluna. Neste instante de tempo, como é observado na Figura 23, os sensores SU2, SU3 e SU4, não registraram a presença da água.

Nos 30 minutos subsequentes à suspensão do molhamento, foi observado que, o SU1 tende a estabilizar-se numa umidade específica, retendo assim uma quantidade de água nos seus vazios. Paralelo a isto, a água começa a ser identificada pelo SU2, atingindo menores valores de *bits*, indicando um teor de umidade maior que o registrado pelo SU1. Este fenômeno pode ser explicado pelo estado de tensões gerados nessa profundidade, uma vez que, diferente da camada superficial, existe o esforço gerado pelo próprio peso da camada superior, dificultando a saída do ar que preenche os vazios e, conseqüentemente, dificultando a ocupação dos poros com água.

Visualmente, durante o ensaio, foi percebido que, entre o SU1 e o SU2, formou-se uma região de descarga, aparentemente, com o mesmo comportamento da região de saturação formada na superfície. Assim, só até quando a água percolou até a profundidade do SU3, a região de saturação formada no interior da coluna começou a dissipar-se. Na Figura 23, identifica-se que o processo de infiltração entre os sensores SU2 – SU3 e SU3 – SU4, precisaram de menor tempo para atingir os mesmos teores de umidade.

Este comportamento pode ser esclarecido uma vez que, se entende o fenômeno de fluxo no interior do solo como sendo heterogêneo onde, durante o processo de infiltração, alguns vazios na zona de transmissão são preenchidos com maior facilidade gerando caminhos preferenciais para o fluxo até maiores profundidades. Embora a umidade destes vazios não seja suficiente para ser detectada pelos sensores, sabe-se que, quando maiores volumes de água

percolam em direção as camadas que já contem água em alguns poros, a passagem do fluido é facilitada devido ao aumento da condutividade hidráulica não saturada do solo.

Finalmente, foi observado durante o ensaio que, independentemente de ter uma fronteira inferior permeável, permitindo a saída da água do sistema, algumas partículas de água se aderem entre as paredes dos vazios favorecendo a retenção de maior quantidade do fluido percolado no solo mais profundo. Sabendo que a saída de ar nos solos mais superficiais, é influenciada pela pressão atmosférica, facilitando a entrada da água, pode-se observar que o processo de infiltração pode ser mais rápido, mas também, na ausência de molhamento, a formação de poropressões negativas menores favorece a redução da umidade, tal como foi registrado pelo SU1 (Figura 23), onde horas após a finalização do molhamento da coluna, a distribuição da água é heterogênea, sendo maior nas camadas mais profundas e menor na camada superficial.

Para entender melhor o fenômeno do fluxo durante um evento de precipitação com intensidades de chuvas variáveis, foi realizado um ensaio na coluna instrumentada considerando as mesmas hipóteses do ensaio apresentado na Figura 23 com três molhamentos de diferentes intensidades, como é apresentado na Figura 24.

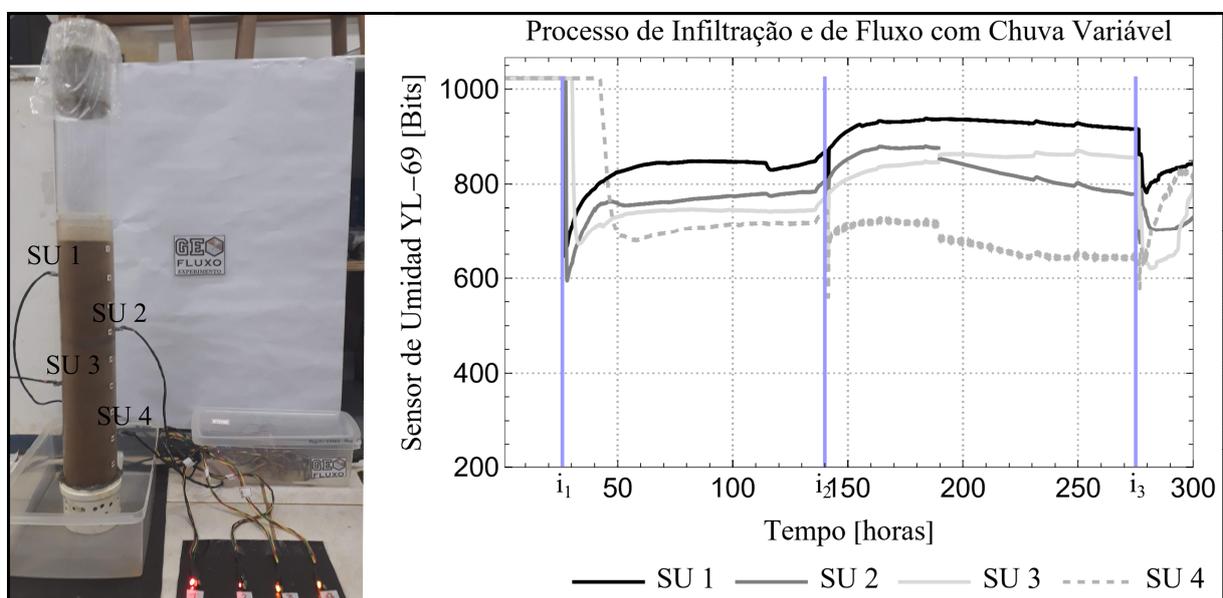


Figura 24. Ensaio de infiltração e de fluxo para uma coluna de solo instrumentada considerando três eventos de chuva: i_1 = chuva fraca; i_2 = chuva moderada e i_3 = chuva forte.

O começo do ensaio (Figura 24) foi executado de igual maneira que o ensaio detalhado anteriormente, monitorando previamente o estado seco do solo até o início do molhamento com

a chuva de intensidade fraca (i_1). Este processo de molhagem iniciou-se na hora 26, onde, diferente ao ensaio anterior, a velocidade da água precipitada é menor que a capacidade de infiltração do solo. A água consegue, assim, penetrar o solo sem gerar empocamento.

Como era esperado neste cenário, o fluxo da água no meio poroso não saturado foi mais devagar, demorando aproximadamente 20 horas para percolar até a base da coluna. Além disso, as respostas dos sensores ao fluxo induzido pela primeira chuva mostram que, as umidades nas profundidades maiores (SU3 e S4) são menores em comparação às profundidades mais perto da superfície (SU1 e S2). Este comportamento valida o fato de que, durante o processo de fluxo, pelo solo estar no estado de umidade residual, parte da água transportada no interior da coluna fica retida entre os vazios do solo conduzindo menor volume até a base.

Aproximadamente 25 horas depois da finalização da chuva i_1 , a umidade se estabiliza em todas as profundidades instrumentadas, apresentando o mesmo padrão detectado no ensaio da Figura 23. O segundo molhamento com intensidade moderada (i_2), ocorreu na hora 140 do ensaio (Figura 24). Neste cenário, o solo não se encontra mais no estado seco, sendo assim a resposta dos sensores à infiltração da água da chuva coerente, pois o processo foi mais rápido se comparado com os *bits* registrados para a i_1 , pois, neste caso, os sensores apresentaram o mesmo comportamento do ensaio apresentado na Figura 23, onde, com um maior volume de água no interior da coluna, a sua distribuição fica sendo de maior umidade para os sensores perto da base e menor umidade para os sensores perto da superfície.

Aproximadamente, 36 horas depois da finalização da chuva i_2 , foi possível observar que, as zonas de saturação continuavam se formando na região interna da coluna. Este fenômeno pode direcionar a água para regiões específicas, como é observado pelo registro dos sensores SU2 e SU3. Nesta situação foi percebido que, contrário ao comportamento observado até então, o solo da região do SU3 ficou mais seco que o solo da região do SU2.

Desta maneira, a zona de saturação presente entre os sensores SU1 e SU2 favoreceu o fluxo para a região mais perto da superfície (SU2), uma vez que, a condução da água da camada de solo existente entre os sensores SU2 e SU3 era menor que a do solo existente entre os sensores SU3 e SU4. Em outras palavras, a saída de água pela base da coluna, foi maior que a velocidade do fluxo das camadas internas. É importante ressaltar que, este fenômeno foi observado por um período de tempo entre o final da i_2 e o início da i_3 , evidenciando que, em

função das intensidades de chuva, do rearranjo das partículas do solo e do estado de umidade inicial, o fluxo pode apresentar diferentes comportamentos em função da profundidade.

Finalmente, a chuva com intensidade forte (i_3) é aplicada na hora 275 do ensaio, tendo uma resposta dos sensores similar ao cenário com o molhamento de intensidade i_2 . Sabe-se que estes tipos de sensores não são muito precisos, e que, para umidades mais altas, não conseguem detectar, em alguns casos, as variações de umidade. Porém, neste caso, o comportamento similar pode estar atrelado também a capacidade que o solo tem de receber e de conduzir água, já que para o evento de chuva i_3 o empoçamento ocorreu ao igual que durante a chuva i_2 , mostrando a dependência do fluxo com capacidade que tem o solo de reter água na sua superfície em função do seu estado de umidade inicial.

Nesta etapa experimental foi possível compreender melhor o fenômeno da infiltração e, por sua vez, validar o modelo analítico de fluxo de Cavalcante e Zornberg (2017). Assim, após os entendimentos obtidos na fase experimental, foi definido o modelo hidrogeotécnico do software RISCO da seguinte maneira:

A água disponível para infiltrar no solo é definida por:

$$i_c = \begin{cases} i_{c1}, & \text{se } t \leq t_e \text{ (só infiltração)} \\ i_{c2}, & \text{se } t > t_e \text{ (escoamento e infiltração)} \end{cases} \quad (47)$$

onde, i_c = taxa de infiltração na superfície do terreno no cenário c [LT^{-1}]; t_e = tempo de empoçamento [T] e t = tempo de análise com chuva constante [T].

Como é apresentado na Eq. (47), a água disponível para infiltrar depende de dois cenários. O primeiro i_{c1} , é para quando só ocorre o fenômeno da infiltração no tempo de análise t . Isto significa que, durante esse período de tempo o solo tem a capacidade de receber toda a água que precipita na superfície (capacidade de infiltração do solo é maior que a taxa de precipitação). Mesmo assim, é necessário verificar as condições de contorno do modelo de fluxo de Cavalcante e Zornberg (2017), determinando o cenário i_{c1} como:

$$i_{c1} = \begin{cases} 0 & \text{se } p = 0 \\ 0 & \text{se } p < k(\psi) \\ v_{0,\text{mín}} & \text{se } p < v_{0,\text{mín}} \\ v_{0,\text{máx}} & \text{se } p > v_{0,\text{máx}} \\ p & \text{se } v_{0,\text{mín}} \leq p \leq v_{0,\text{máx}} \end{cases} \quad (48)$$

onde $v_{0,\min}$ = velocidade mínima de descarga constante [LT^{-1}]; $v_{0,\max}$ = velocidade máxima de descarga constante [LT^{-1}] e $k(\psi)$ = condutividade hidráulica não saturada do solo [LT^{-1}].

O segundo cenário, i_{c2} , acontece quando o solo consegue infiltrar a água da chuva, mas, em algum momento, durante o evento de chuva constante, é atingida a saturação na superfície, gerando o escoamento superficial. Nesta situação, a verificação das condições de contorno do modelo de fluxo é feita com a quantidade de água que infiltra na superfície do terreno durante o tempo de empoçamento, definindo-a como:

$$F'(t) = \frac{F(t)}{t - t_e} \quad (49)$$

onde $F'(t)$ = água infiltrada no terreno durante um evento de chuva constante com formação de escoamento superficial [LT^{-1}] e $F(t)$ = a lâmina de água infiltrada [L].

Assim, o cenário i_{c2} é determinado como:

$$i_{c2} = \begin{cases} 0 & \text{se } p = 0 \\ v_{0,\min} & \text{se } p < k(\psi) \\ v_{0,\max} & \text{se } F'(t) > v_{0,\max} \\ v_{0,\min} & \text{se } F'(t) < v_{0,\min} \\ F'(t) & \text{se } v_{0,\min} \leq F'(t) \leq v_{0,\max} \end{cases} \quad (50)$$

Finalmente, o balanço hidrogeotécnico para um tempo de análise t com chuva constante, é definido por:

$$p(t) = i_c(t) + E_s(t) \quad (51)$$

onde $p(t)$ = intensidade de chuva constante durante um tempo t [LT^{-1}], $i_c(t)$ = taxa de infiltração constante durante um tempo t no cenário c [LT^{-1}] e $E_s(t)$ = taxa de escoamento superficial constante durante um tempo t [LT^{-1}].

Implementando o balanço hidrogeotécnico do software RISCO, é possível quantificar a interação solo-atmosfera na superfície do talude. Este processo, faz parte da definição do estado inicial da encosta, o qual para ser executado, precisa das seguintes informações solicitadas ao usuário:

Escolha dos parâmetros que serão utilizados para a modelagem. Nesta seção, o usuário pode escolher o melhor ajuste para os parâmetros não saturados dos materiais, o qual foi apresentado previamente nos resultados do subcapítulo 6.1. Nesta seção do software RISCO, o usuário pode visualizar de maneira resumida os dados informados no arquivo INPUTS_Local.xlsx. Essa escolha é feita utilizando a ferramenta *CheckboxBar* do *Wolfram Mathematica*:

ESCOLHER

Out[118]//TableForm=

1. Já tenho os Parâmetros Completos

2. Ajuste δ unimodal

3. Ajuste δ bimodal

PARÂMETROS	Resistencia		Hidraulicos	Físicos				Geométricos			Não Saturado
CAMADA	C' [kPa]	ϕ' [°]	ks [m/s]	γ_{nat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	θ_{sat} [m ³ /m ³]	θ_{res} [m ³ /m ³]	Gs [-]	β [°]	Z [m]	δ [kPa ⁻¹]
Residual Maduro	4.8	27.5	0.00001	17.5	10.	0.54	0.05	2.63	43.	1.	0.0261106
Residual Jovem	9.6	34.	$3. \times 10^{-6}$	17.5	10.	0.54	0.05	2.7	43.	10.	0.0261106
COV [%]	30.	9.	80.	5.	0.	13.	10.	0.	0.	0.	0.

Figura 25. Escolha dos dados que serão utilizados pelo software RISCO para dar início a modelagem do caso de estudo da encosta da Lagoa. Imagem da interface do software RISCO.

Fornecimento das informações pertinentes ao estado de umidade do talude, o momento da ruptura em função do evento de precipitação, a resolução temporal para as análises de fluxo e do balanço hidrogeotécnico, entre outras. Na Figura 26 são apresentadas as informações dadas ao software RISCO para o caso de estudo da encosta da Lagoa:

QUAL FOI A TABELA DE PARÂMETROS ESCOLHIDA? 1 ou 2 ou 3?	2
RESOLUÇÃO TEMPORAL FIXA PARA A ANÁLISE DA CHUVA EFETIVA [horas]	1
RESOLUÇÃO MÍNIMA TEMPORAL PARA A ANÁLISE DA CHUVA EFETIVA [minutos]	5
QUAL É A CAMADA SUPERFICIAL PARA A ANÁLISE DA CHUVA EFETIVA?	1
QUAL É A UMIDADE INICIAL θ ?. SE NÃO SOUVER, USAR $1.1 \cdot \theta_{residual}$ [m ³ /m ³]	0.06
DIA DA RUPTURA NO HIETOGRAMA COMPLETO	21
ULTIMO DIA SEM CHUVA ANTES DA RUPTURA	15

Figura 26. Informação solicitada pelo software RISCO para dar início às modelagens relacionadas com o caso de estudo da encosta da Lagoa. Imagem da interface do software RISCO.

Após o fornecimento das informações solicitadas pelo software RISCO (Figura 25 e Figura 26), o programa quantifica a capacidade máxima de infiltração da superfície do terreno implementando o modelo de Green e Ampt (1911), como apresentado na Figura 27.

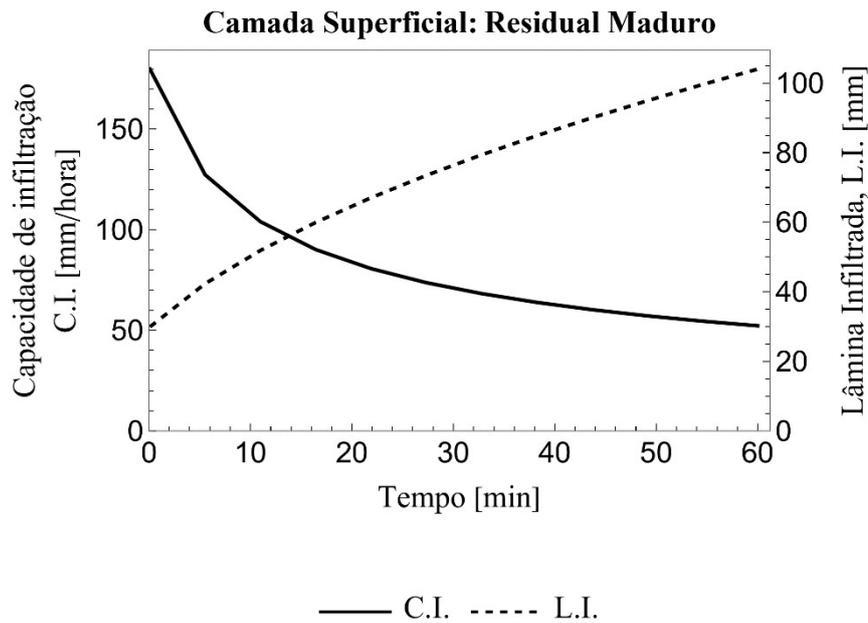


Figura 27. Capacidade de infiltração da superfície do talude no instante prévio ao início do evento de chuva. Imagem gerada pelo software RISCO.

Nesta situação, no primeiro instante de tempo, com uma umidade de 6%, a superfície do terreno tem uma capacidade de infiltração de 180 mm/h. Depois de 60 minutos, a capacidade de infiltração do terreno diminui para aproximadamente 50 mm/h. Nesta situação, o modelo de Green e Ampt (1911) não considera a chuva no sistema e sim uma fronteira com uma velocidade de descarga igual a capacidade de infiltração inicial gerando uma lâmina de água de aproximadamente 10 cm (Figura 13).

Esta análise inicial (Figura 27), serve para entender qual seria a capacidade máxima do solo para receber água nas condições iniciais de saturação do talude. Com tal informação, o usuário pode entender melhor o comportamento da infiltração, considerando uma chuva igual a capacidade máxima de infiltração obtida pelo modelo de Mein e Larson (1973) como apresentado na Figura 28.

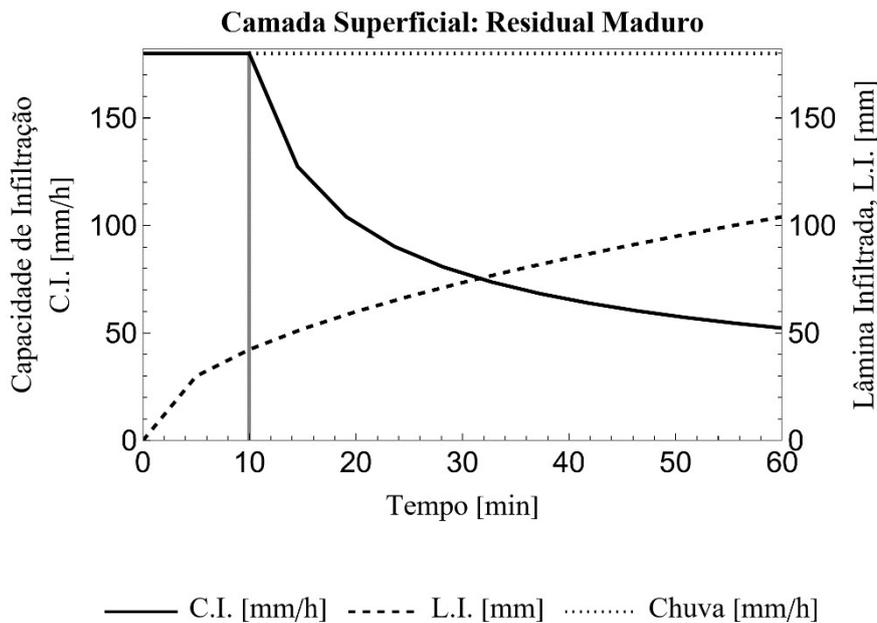


Figura 28. Análise da capacidade de infiltração e do escoamento superficial do talude para uma chuva constante de 180 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Na Figura 28, entende-se que, nos primeiros 10 minutos de chuva, o solo apresenta uma capacidade de infiltração igual à intensidade de precipitação, gerando uma lâmina de água de aproximadamente 3 cm. Esta lâmina de água define a zona de saturação do modelo que, por sua vez, representa a fronteira de descarga constante para a zona de transmissão (Figura 13).

Neste cenário, é observado também que, no final da hora de análise, a lâmina total infiltrada no terreno é de aproximadamente 10 cm, como era esperado pela análise anterior (Figura 27). É possível entender a importância de avaliar o efeito da chuva no fenômeno da infiltração já que, quando não é considerada, é ignorada a formação da zona de saturação, a qual muda a velocidade de infiltração em função do tempo.

A Figura 29 mostra a infiltração durante a quarta hora de chuva do evento de precipitação, na qual foram registradas as primeiras precipitações com uma intensidade de 1 mm/h. Como era esperado, esta chuva de baixa intensidade não iria gerar empocamento na superfície do solo, sendo a capacidade de infiltração do solo igual a intensidade da chuva. Toda a água precipitada, infiltrada na superfície do solo, gera uma lâmina de água de 1mm.

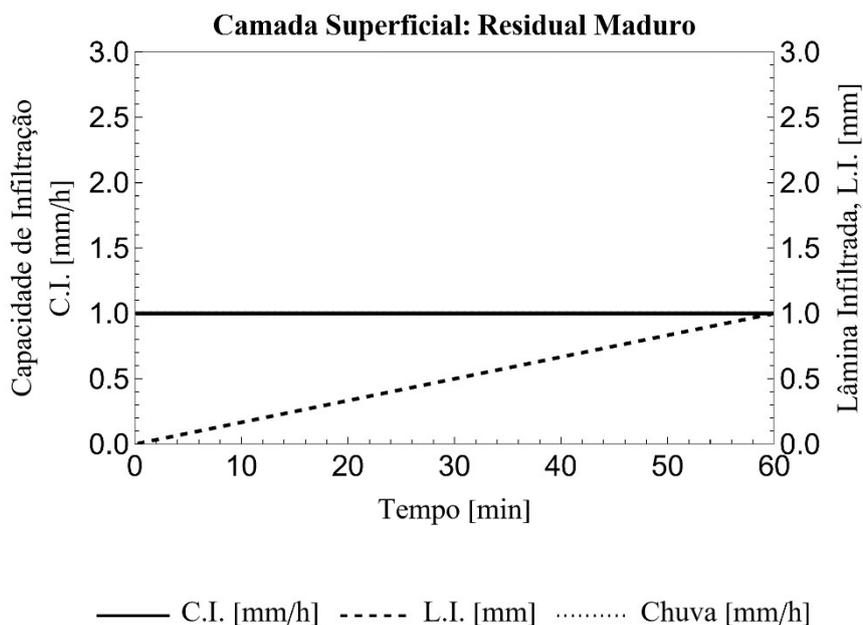


Figura 29. Análise da capacidade de infiltração e do escoamento superficial do talude para uma chuva constante de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

A partir dos conceitos anteriores de escoamento, e de infiltração, é possível quantificar a lâmina de água acumulada que escoou pela superfície do terreno durante um intervalo de tempo, como é apresentado na Figura 30.

A Figura 30 apresenta o escoamento superficial considerando o evento máximo de chuva encontrado pela análise anterior (Figura 28). Nesta situação, o empoçamento da água começa no minuto 10, porém, o escoamento superficial se dá após os primeiros 10 minutos do início do empoçamento. Assim, durante os 40 minutos restantes da análise, é observado um total de 76 mm de água que não conseguiram infiltrar no interior do maciço, sendo drenada pela superfície da encosta.

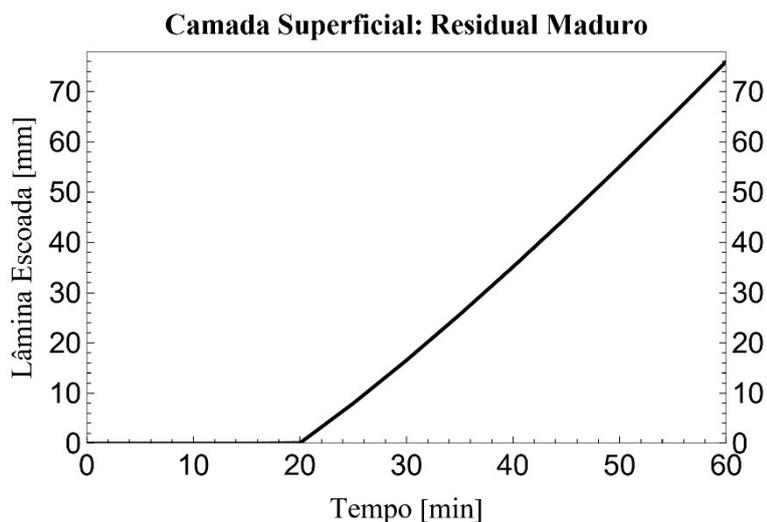


Figura 30. Lâmina de água escoada acumulada em função do tempo para um evento de chuva de 180 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO

O software RISCO, apresenta também a taxa de velocidade do escoamento superficial durante o evento de chuva constante como apresentado na Figura 31.

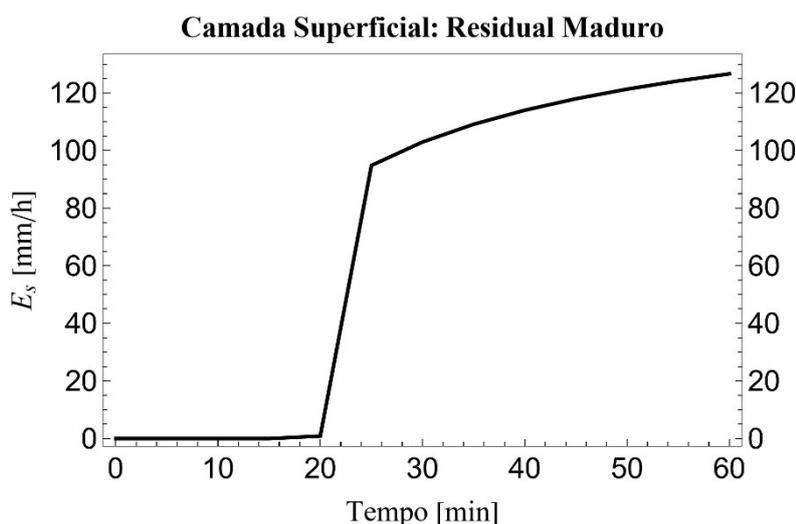


Figura 31. Velocidade do escoamento superficial durante o evento de chuva de 180 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

6.3. Módulo 3: perfis de umidade em função do evento de precipitação

Como foi explicado anteriormente na metodologia, o passo prévio à implementação do modelo proposto para avaliar a interação solo-atmosfera e, para avaliar a frente de umidade durante todo o evento de chuva na seção transversal do talude, é a definição da resolução espacial do modelo. Neste processo é analisada a frente de umidade do solo numa resolução pontual (x,y) para várias profundidades.

O primeiro passo é definido pelo usuário, onde, deve ser escolhida a coluna do perfil do talude para realizar a análise pontual da umidade transiente. Sugere-se escolher uma coluna que contenha todos os tipos de solo do talude com uma espessura considerável, sendo assim, para este caso de estudo, foi escolhida a coluna 350, como é apresentado na Figura 32.

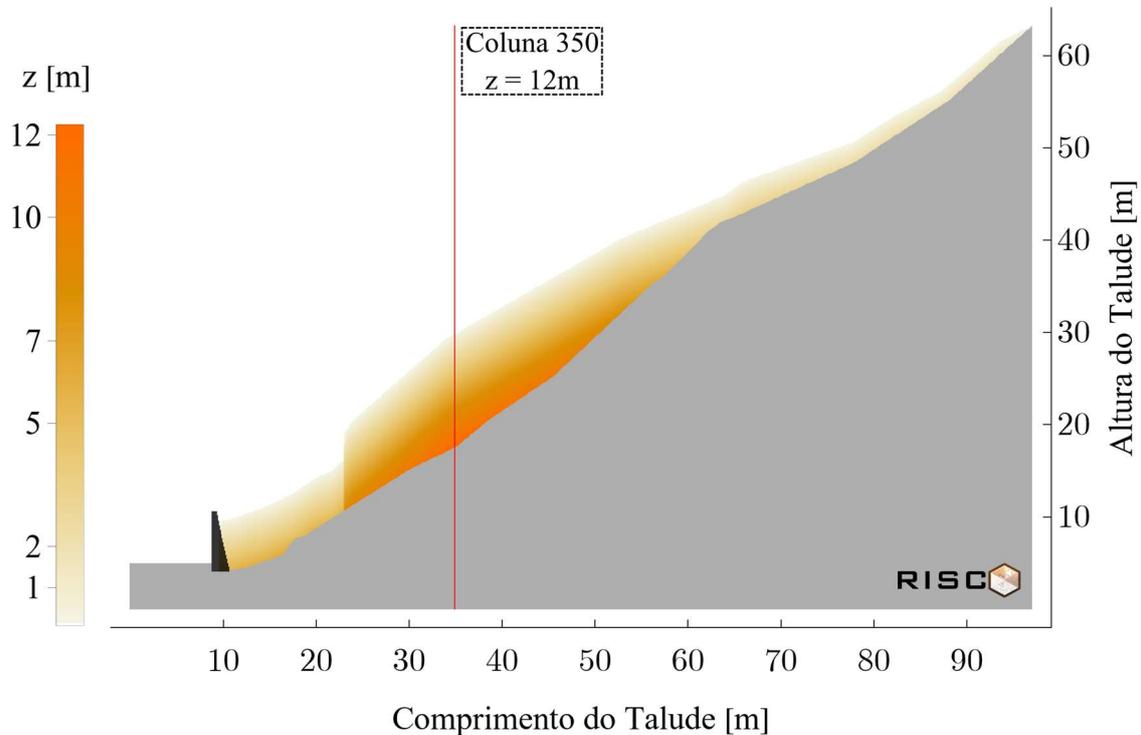


Figura 32. Coluna escolhida para a análise e escolha da melhor resolução espacial para a construção da malha discretizada do perfil do talude. Imagem gerada pelo software RISCO.

Após a escolha da coluna, é necessário proporcionar ao software RISCO quatro cenários de análise com quatro profundidades diferentes para cada tipo de solo. Para isto, o software proporciona a informação da espessura de cada camada de solo, com o objetivo de não analisar uma profundidade que não seja compatível com a geometria da estratigrafia do talude.

Na Tabela 17, são apresentados os cenários definidos para cada camada de solo da coluna 350 considerando suas respectivas espessuras.

Tabela 17. Cenários da análise pontual da frente de umidade para definir a resolução espacial da encosta da Lagoa.

Camada Residual Maduro – Espessura = 1,0 m				
Profundidades (m)	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
z ₁	0,025	0,05	0,1	0,25
z ₂	0,050	0,10	0,2	0,50
z ₃	0,075	0,15	0,3	0,75
z ₄	0,100	0,20	0,4	1,00
Camada Residual Jovem – Espessura = 10,0 m				
Profundidades (m)	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4
z ₁	0,10	0,20	0,50	1,50
z ₂	0,20	0,40	1,00	3,00
z ₃	0,30	0,60	1,50	4,50
z ₄	0,40	0,80	2,00	6,00

A Figura 33 apresenta as análises pontuais para os quatro cenários definidos para a camada de solo Residual Maduro. Esta camada tem uma profundidade máxima de 1 m. Observa-se que, quando são considerados pontos com distâncias até 5 cm, não é possível visualizar uma mudança na frente de umidade durante o evento de precipitação. Com uma discretização de 10 cm, porém, a diferença nas umidades nas primeiras horas do evento de chuva começa a ser perceptível. Isto significa que a resolução de 10 cm é a mínima para começar a visualizar, no perfil transversal da camada Residual Maduro, as mudanças nas umidades. Caso contrário, definindo distâncias menores que 10 cm, o software RISCO estaria realizando um gasto operacional desnecessário.

Para a camada de solo Residual Jovem, com uma espessura máxima de 11 m, foram obtidas as frentes de umidade apresentadas na Figura 34. Nesta situação, onde a estratigrafia é maior, é coerente analisar uma resolução menor, ou seja, considerar maiores distâncias entre as profundidades de análise. Nesse contexto se observa que, para uma discretização de 10 cm, não é possível enxergar mudanças na frente de umidade e, só começa a ser perceptível dita variação numa resolução de 20 cm.

No caso, em que todas as camadas do talude têm a mesma capacidade de percolação, seria possível ter então, o mesmo comportamento das frentes de umidade. Porém, neste caso de

estudo, a encosta da Lagoa apresenta uma estratigrafia heterogênea, sendo necessário escolher a máxima resolução (distancias menores) entre as duas camadas sendo de 10 cm.

Como pode ser observado na Figura 33 e na Figura 34, a resolução de 20 cm também seria uma excelente opção para discretizar o perfil do talude, porém, com o objetivo de testar a capacidade do software RISCO para gerar resultados com malhas mais refinadas, foi escolhido este tamanho de elemento de 10 cm. É necessário destacar que, sempre deve-se considerar como mínima resolução a espessura da menor camada, já que perderia sentido físico discretizar o perfil com elementos maiores que uma camada de solo especifica.

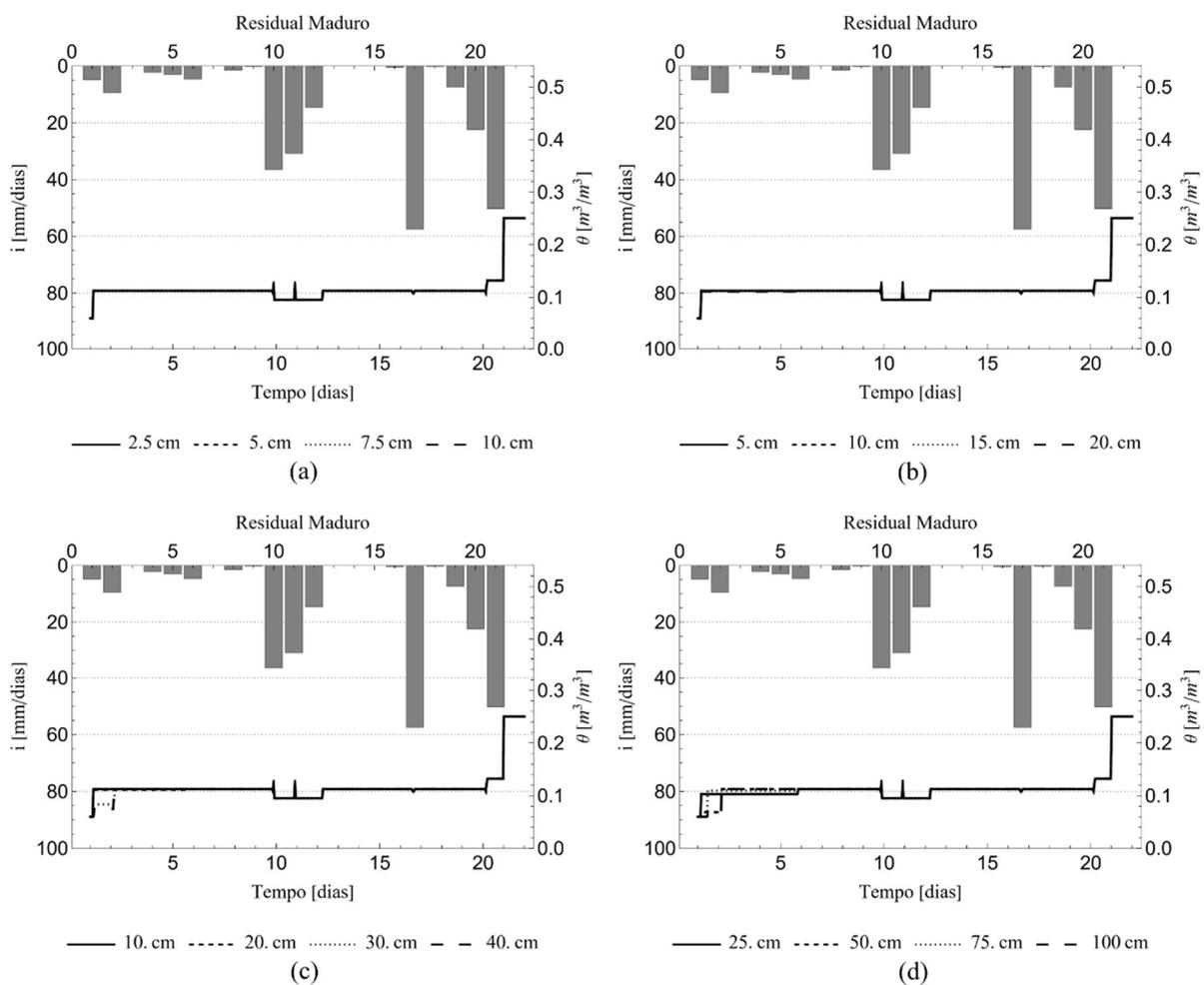


Figura 33. Análises pontual da frente de umidade para a definição da discretização espacial do talude considerando a camada Residual Maduro. Frente de umidade para profundidades com resolução de: (a) 2,5 cm, (b) 5 cm, (c) 10 cm e (d) 25 cm. Imagem gerada pelo software RISCO.

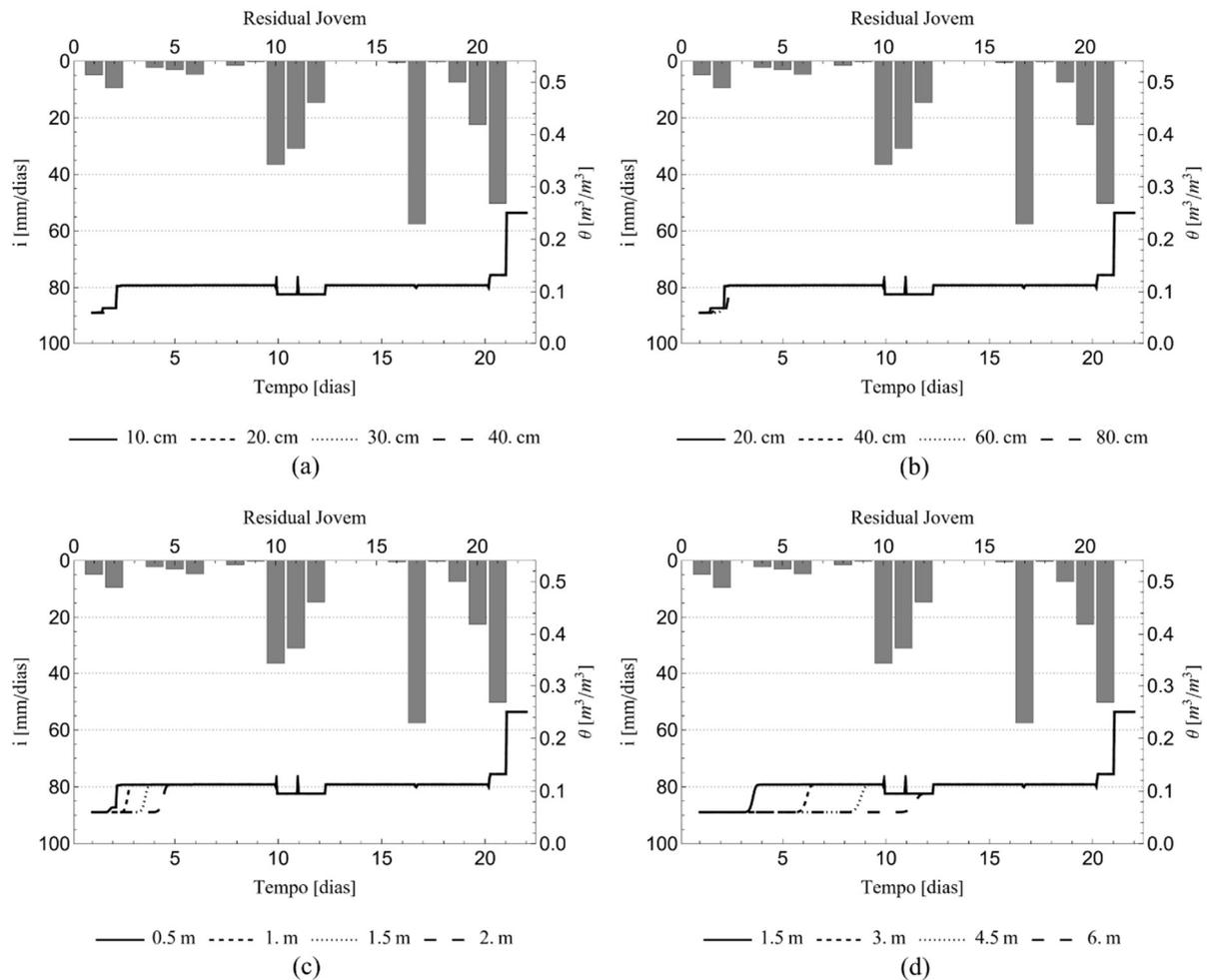


Figura 34. Análises pontual da frente de umidade para a definição da discretização espacial do talude considerando a camada Residual Jovem. Frente de umidade para profundidades com resolução de: (a) 10 cm, (b) 20 cm, (c) 50 cm e (d) 150 cm. Imagem gerada pelo software RISCO.

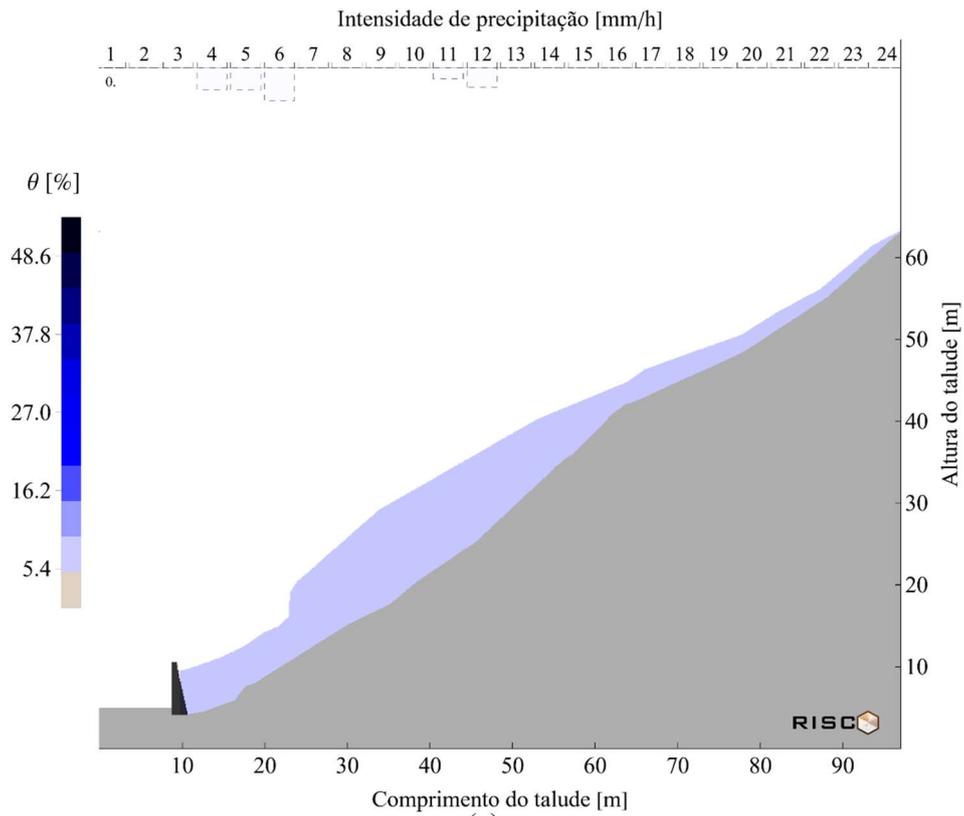
Aplicando a metodologia proposta no subitem 5.2.3, com a resolução de malha definida, é possível obter os perfis de umidade da encosta da Lagoa para qualquer instante de tempo. Levando em consideração que o evento de chuva analisado contém 528 horas de precipitação, foram escolhidos seis momentos no histórico de chuvas para analisar as frentes de umidade do talude (Tabela 18).

Tabela 18. Detalhamento dos momentos nos quais foram representadas as frentes de umidade da encosta da Lagoa.

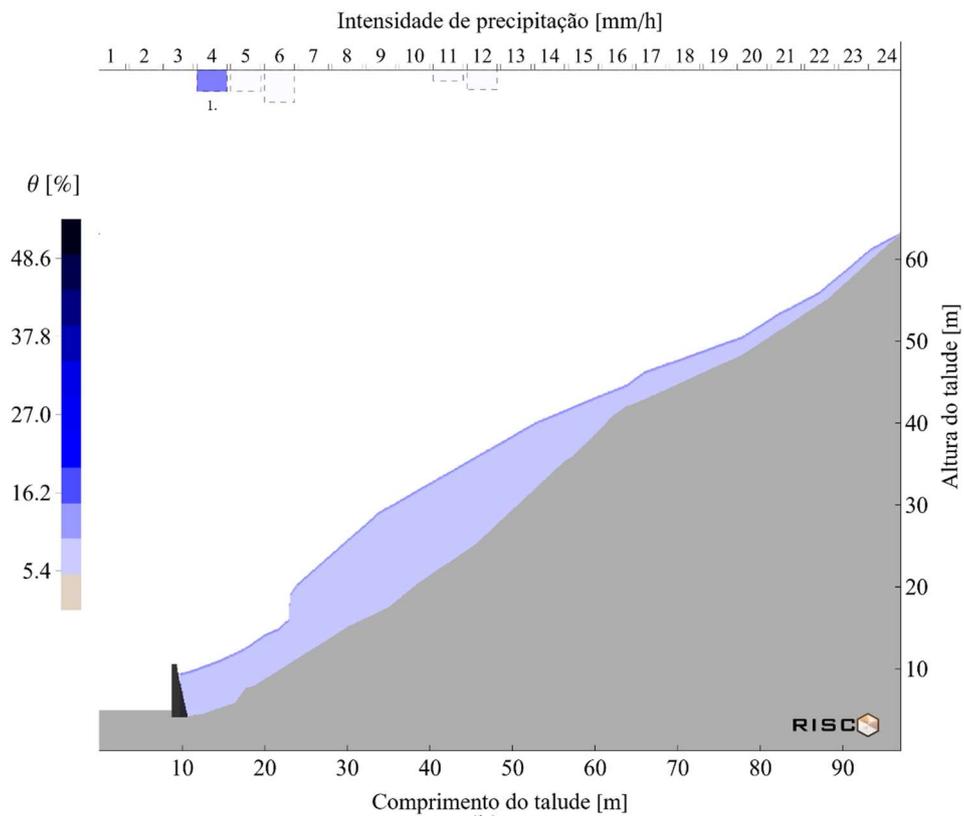
Chuva Nº	Dia do evento	Hora do evento	Observação
1	1	1	Primeira hora do evento de precipitação com 0 mm/h de chuva. Estado seco do talude
2	1	4	Primeira hora com registro de precipitação de 1 mm/h
3	10	249	Chuva com intensidade de 9 mm/h registrada às 9 h do dia 10 do evento de precipitação
4	15	360	Chuva com intensidade de 0 mm/h registrada às 0 h do dia 15 do evento de precipitação
5	16	393	Chuva com intensidade de 7,9 mm/h registrada às 9 h do dia 16 do evento de precipitação
6	21	519	Chuva com intensidade de 0 mm/h registrada às 15 h do dia 21 do evento de precipitação, momento da ruptura.

Na Figura 35a o perfil de umidade correspondente à primeira hora de análise, mostra a frente de umidade inicial de 6% definida no módulo 1 para este caso de estudo. Assim, as análises iniciam-se com um teor de umidade volumétrica homogênea em toda a secção do talude. Por outro lado, a Figura 35b representa a frente de umidade obtida no final da quarta hora de análise com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h. Nesta análise, é notório que, pelo estado de umidade inicial do solo, devido à chuva de baixa intensidade, a água infiltrada aumentou o teor de umidade volumétrica só da superfície do talude, atingindo umidades de aproximadamente 16%. Este comportamento era esperado, como foi apresentado no resultado da interação solo-atmosfera apresentado na Figura 29.

Ao transcorrer o evento de precipitação, a umidade do talude apresenta uma distribuição heterogênea na secção transversal, observando-se o avanço da umidade em direção às camadas mais profundas. Este comportamento é representado claramente pela Figura 36a onde, a intensidade de chuva de 9 mm/h ocorrida na hora de análise 249, não é a única responsável pela distribuição da água no maciço, e sim, o histórico das 248 chuvas antecedentes a esse momento específico. Neste perfil, são definidas claramente três regiões com diferentes umidades, variando entre a umidade inicial de 6% até aproximadamente 16% de umidade volumétrica.



(a)



(b)

Figura 35. Perfis da frente de umidade da encosta da Lagoa para diferentes intensidades de chuva. (a) intensidade de 0 mm/h durante a primeira hora de análise e (b) intensidade de 1 mm/h durante a quarta hora de análise. Imagem gerada pelo software RISCO.

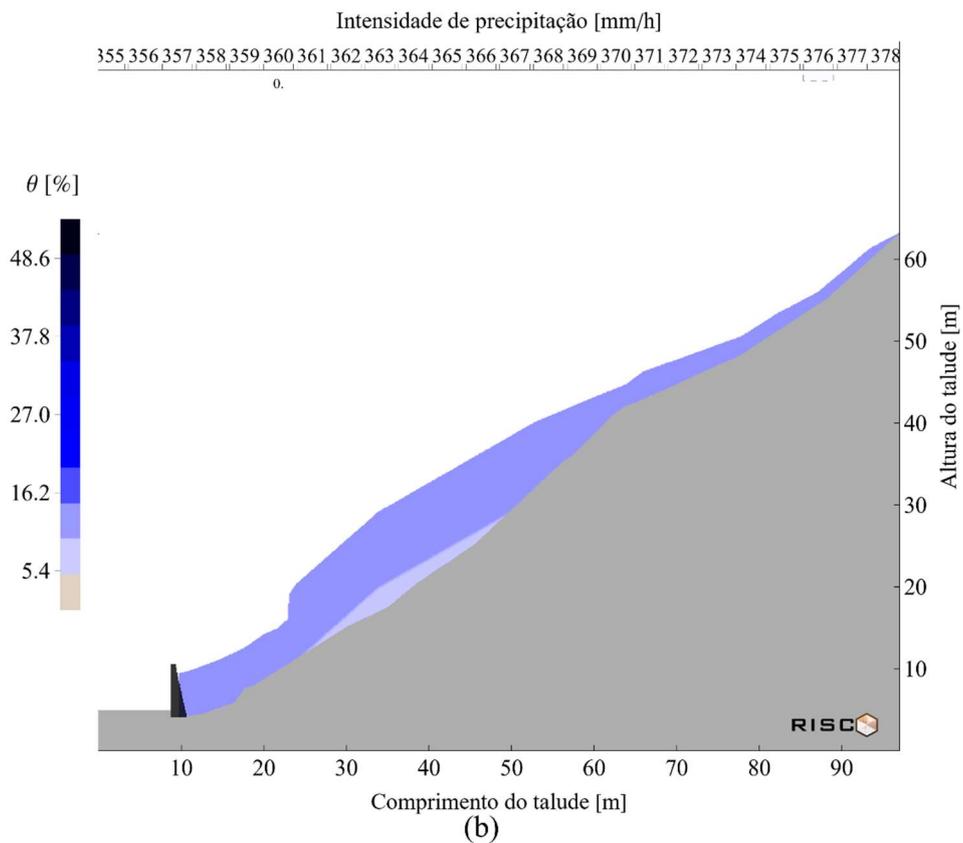
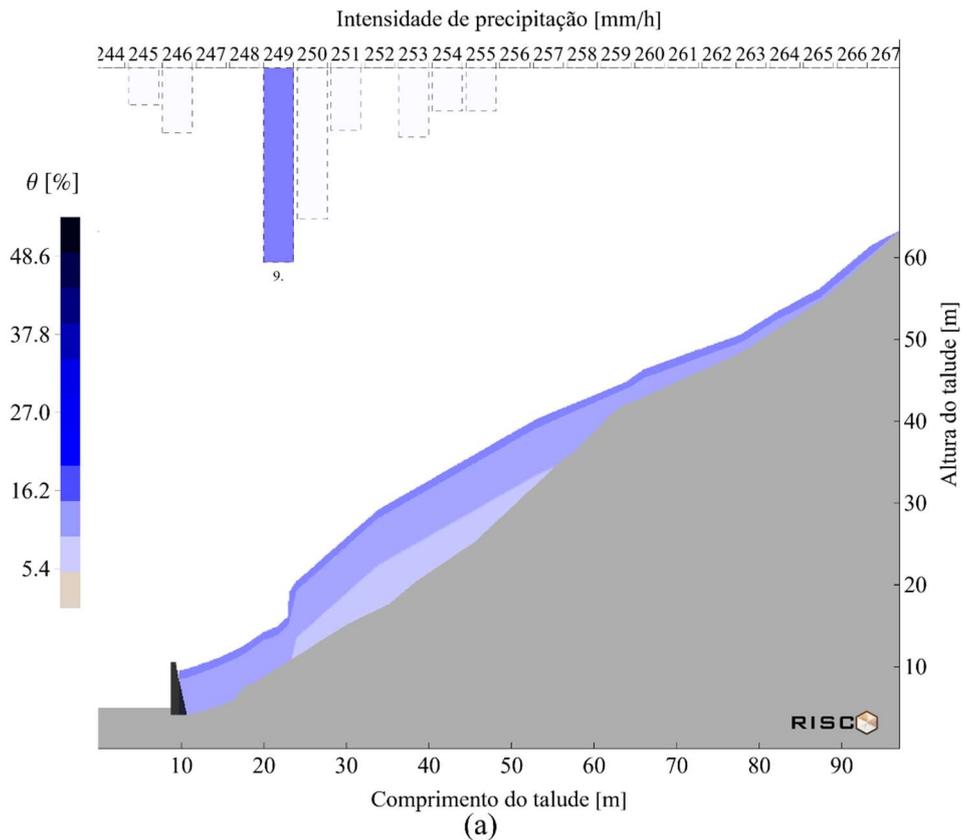


Figura 36. Perfis da frente de umidade da encosta da Lagoa para diferentes intensidades de chuva. (a) intensidade de 9 mm/h durante a 249 hora de análise e (b) intensidade de 0 mm/h durante a 360 hora de análise. Imagem gerada pelo software RISCO.

A Figura 36b mostra o avanço da umidade depois de aproximadamente quatro dias após a hora 249. Neste momento, o perfil de umidade fica homogêneo em quase todo o talude, e mostra que, durante as horas que não se teve precipitações, a água que já tinha sido infiltrada previamente na superfície do solo e, a água já contida nas diferentes profundidades do talude, continuaram percolando pelo interior do maciço, se distribuindo por toda a seção transversal.

Este comportamento é coerente já que, como foi explicado anteriormente, a velocidade com a qual é transferida a água no interior do maciço está relacionada à capacidade do solo de receber e transportar água e não só à quantidade de água que precipita na superfície do terreno. Mesmo assim, a água contida na encosta não foi suficiente para mudar a umidade do perfil em sua totalidade.

Continuando com o evento de precipitação, na Figura 37a no final da análise correspondente à hora 393, a umidade do talude continua avançando em direção ao manto rochoso, apresentando uma distribuição quase que homogênea em toda a seção transversal com uma umidade aproximada de 10%. Neste instante de tempo, pode-se notar que, mesmo com chuvas heterogêneas a cada hora, quem define a água que entra no talude é a capacidade de infiltração da superfície combinada com a intensidade de precipitação, tendo esta última, registros moderados até esta hora de análise.

Finalmente, analisando o perfil corresponde à hora 519 (Figura 37b), no momento da ruptura do maciço e, após a hora 503, correspondente ao registro de chuva com maior intensidade durante todo o evento de precipitação (18 mm/h), observa-se que o solo consegue receber uma maior quantidade de água, se movimentando até o final da camada Residual Jovem, atingindo uma umidade homogênea na totalidade do talude de aproximadamente 25%.

É interessante observar que uma vez atingida a homogeneização da umidade do talude para cada camada de solo, elas passam a ter condutividade hidráulica homogênea. Neste caso, como os materiais são fisicamente parecidos, no final do evento de chuva a água consegue se distribuir homogeneamente, comportando-se como um talude de estratigrafia única.

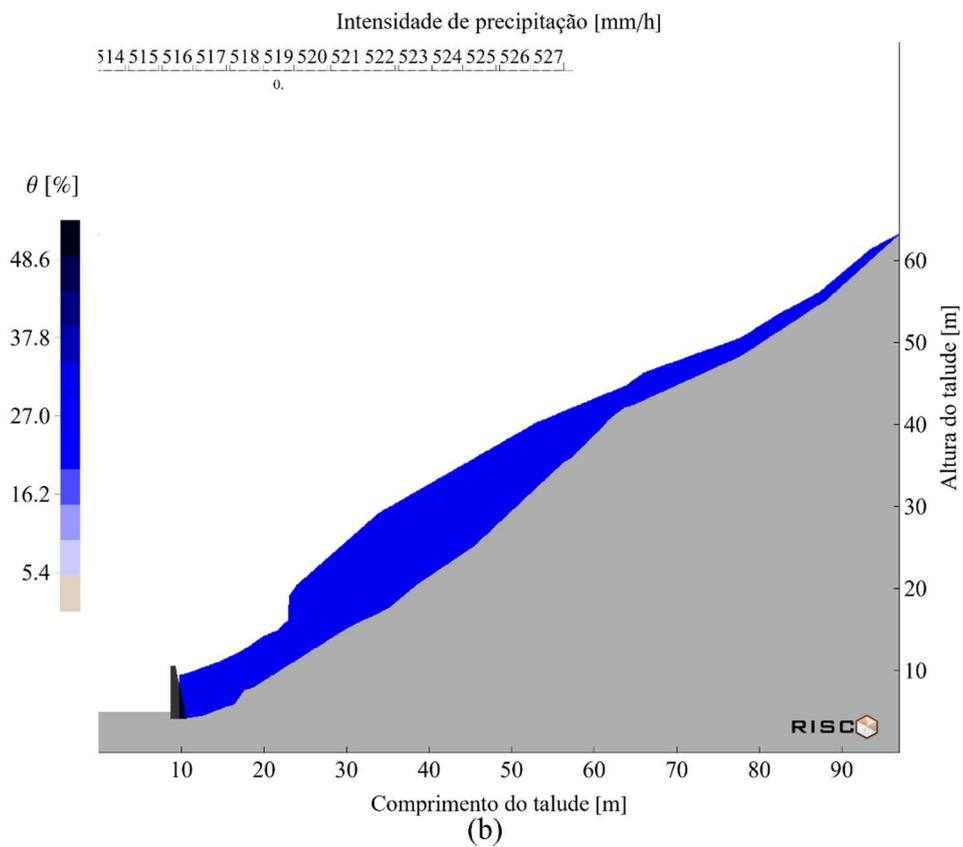
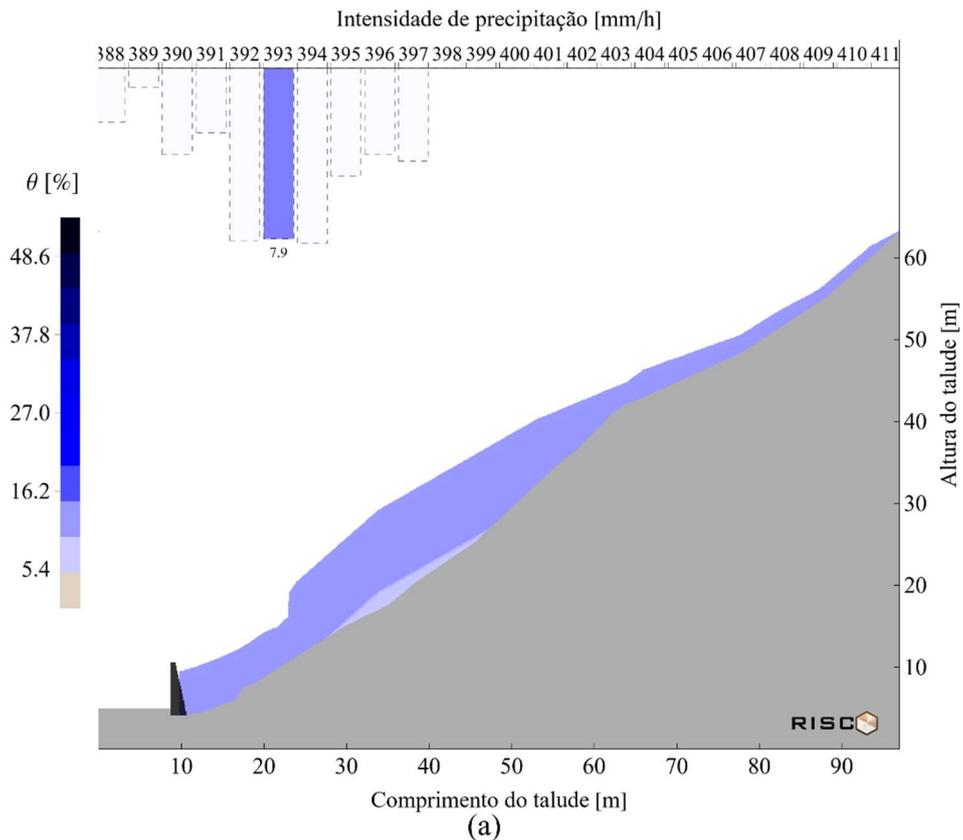


Figura 37. Perfis da frente de umidade da encosta da Lagoa para diferentes intensidades de chuva. (a) intensidade de 7,9 mm/h durante a 393 hora de análise e (b) intensidade de 0 mm/h durante a 519 hora de análise. Imagem gerada pelo software RISCO.

Comparando a Figura 33 e a Figura 34 com a Figura 36a é possível entender que, a metodologia proposta para representar os perfis de umidade do talude considerando uma discretização eficiente, é relevante posto que, nas análises da frente de umidade pontual, para a hora 249, correspondente ao dia 10 da análise, só é possível perceber uma mudança de umidade na resolução de 150 cm proposta para a camada Residual Jovem. Porém, construindo os perfis de umidade, é observado que, o talude não tem uma distribuição homogênea de umidade e, pelo contrário, apresenta, minimamente, três estados de umidades diferentes. A localização das umidades formadas pode ser identificada no espaço da seção transversal.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS MÓDULOS 4 E 5

Neste capítulo, são apresentados os resultados pertinentes aos módulos 4 e 5 obtidos para o caso de estudo da encosta da Lagoa implementando o software RISCO proposto nesta pesquisa. Estes módulos quantificam a estabilidade não saturada da encosta e a ameaça associada ao evento de precipitação adotado.

7.1. Módulo 4: perfis da estabilidade de taludes não saturada e transiente

O trabalho de Gerscovich (1994), relatou que, o deslizamento da encosta da Lagoa foi associado às chuvas ocorridas durante os cinco dias prévios ao movimento de massa, as quais, em intensidades horárias, são definidas pelo hietograma da Figura 38. Neste tempo, o registro de chuva acumulada foi de 140mm, com uma intensidade máxima de 18 mm/h registrada na hora 503 do evento de chuva, é dizer, 16 horas antes do evento de falha. Esta chuva, segundo a Tabela 7, é intensa e, no histórico de precipitação, é o penúltimo registro de chuva obtido antes do movimento de massa.

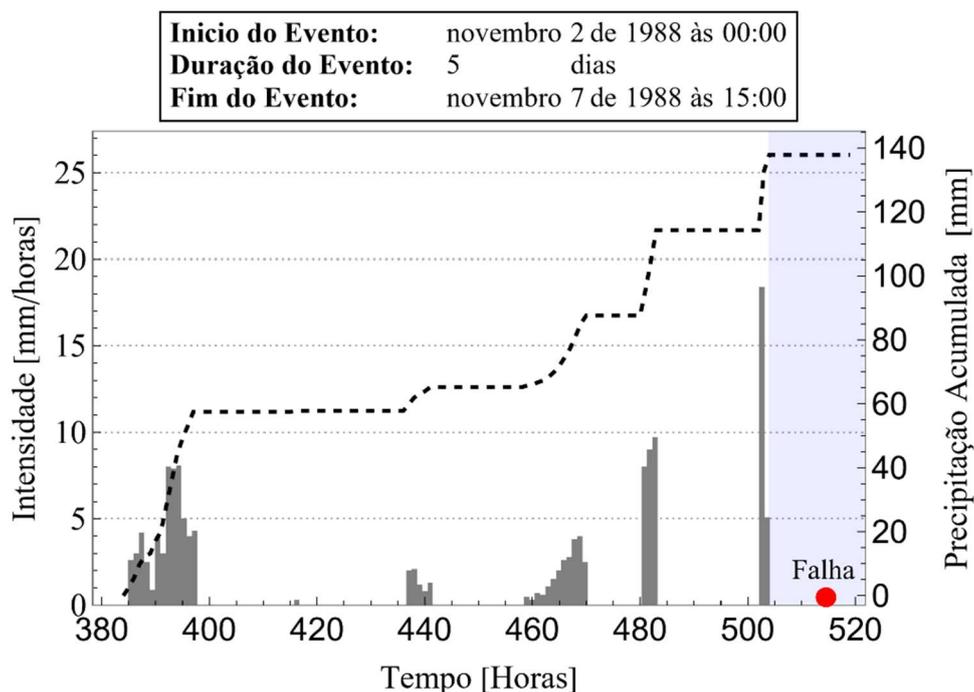


Figura 38. Hietograma dos cinco dias de chuva prévios ao movimento de massa. O ponto vermelho indica o dia da falha da encosta da Lagoa. Imagem gerada pelo software RISCO.

Mesmo que, o deslizamento esteja associado as chuvas dos cinco dias prévios ao evento de falha, nesta análise, com o objetivo de entender a evolução da estabilidade na condição não saturada, serão analisados os seis cenários de chuva definidos na Tabela 17.

Cada cenário de chuva contempla as análises de estabilidade representadas no perfil da seção transversal para três fatores de segurança críticos, $FS_c = 1$, $FS_c = 1,3$ e $FS_c = 1,5$. Estes indicadores de falha foram adotados da pesquisa de Gerscovich (1994), onde foram feitas análises bidimensionais e tridimensionais para o deslizamento da encosta da Lagoa. Também, para cada cenário de chuva, é feita a análise pontual da coluna 350 definida previamente no subcapítulo 6.3 nas seguintes profundidades:

Tabela 19. Profundidades para a análise pontual da estabilidade não saturada e transiente.

Camada Residual Maduro – Espessura da camada= 1.0m		
Profundidades (m)	Nº fila	Nº coluna
0,05	335	350
0,55	340	350
Camada Residual Jovem – Espessura da camada = 11.0m		
Profundidades (m)	Nº fila	Nº coluna
0,05	346	350
5,05	396	350

Antes de construir os perfis de estabilidade, o software RISCO apresenta os perfis das propriedades e dos parâmetros geotécnicos que não dependem da variação da umidade do solo na Figura 39 e na Figura 40.

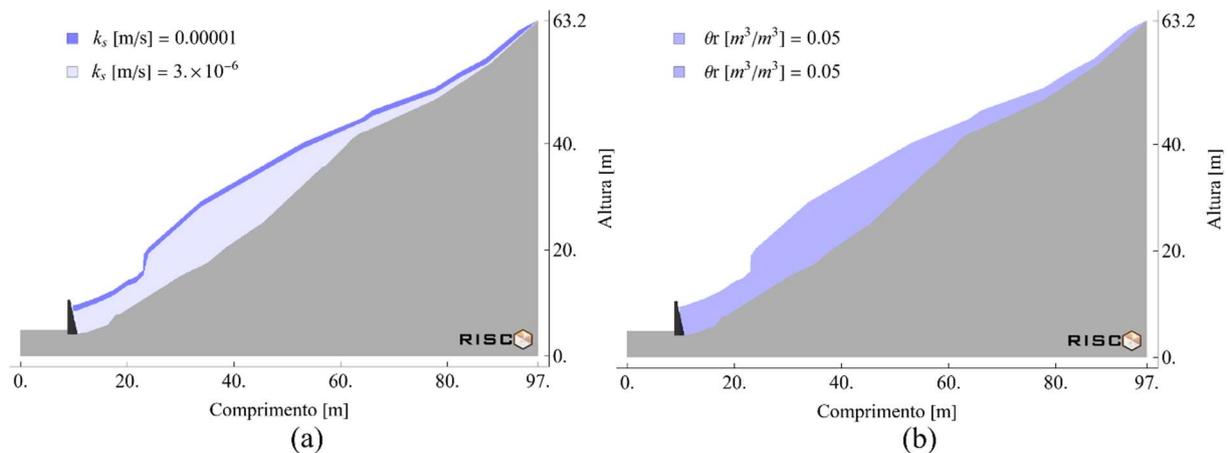


Figura 39. Perfil das variáveis fixas geotécnicas para cada tipo de solo. (a) perfil da condutividade hidráulica saturada e (b) perfil do teor de umidade volumétrica residual.

Imagem gerada pelo software RISCO.

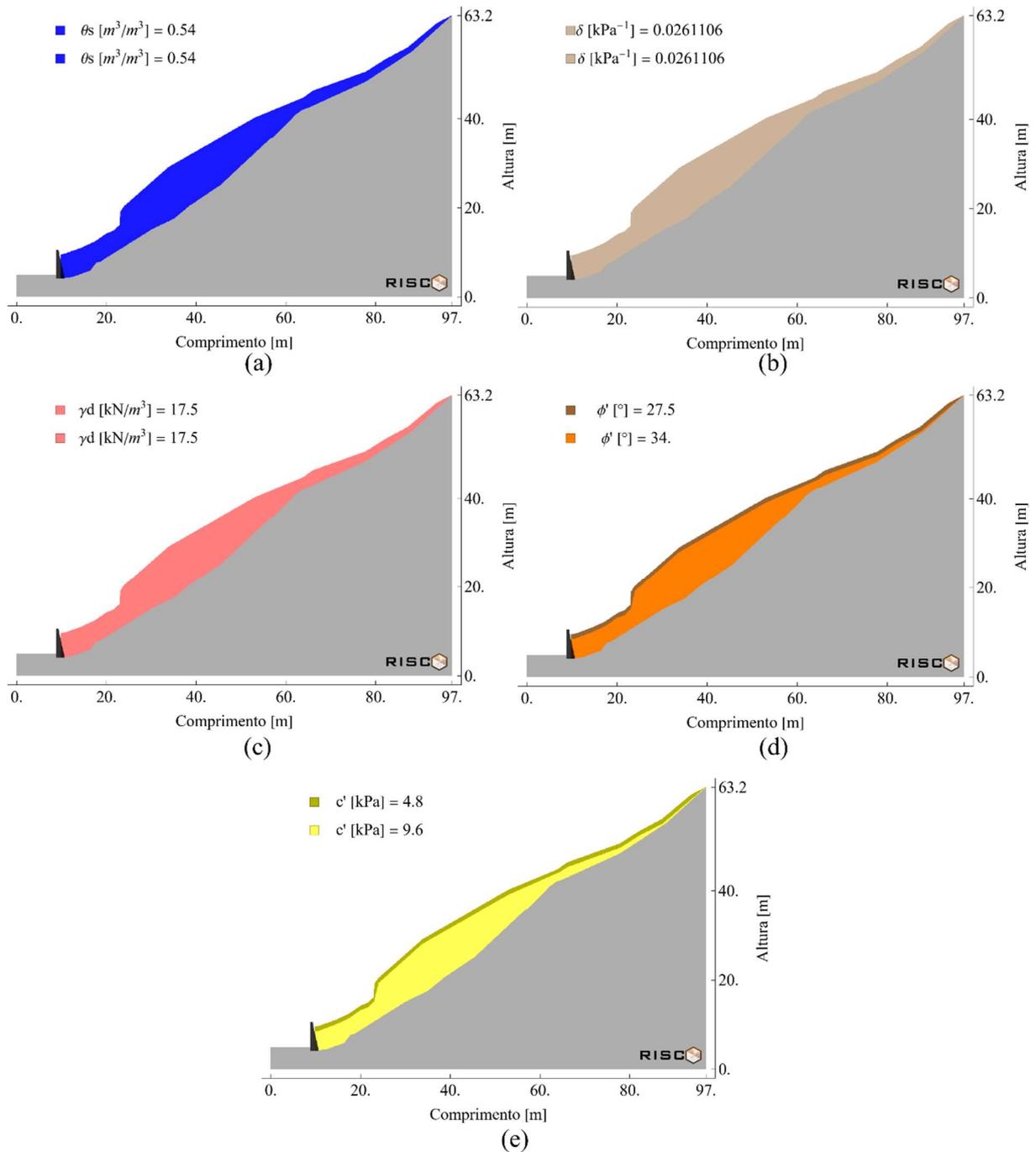


Figura 40. Perfil das variáveis fixas geotécnicas para cada tipo de solo. (a) perfil do teor de umidade volumétrica saturada, (b) perfil do parâmetro de ajuste hidráulico δ , (c) perfil do peso específico da massa de solo, (d) perfil do ângulo de atrito efetivo e (e) perfil da coesão efetiva. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.1.1. Cenário de chuva 1: FS para a hora 1 com intensidade de precipitação de 0 mm/h

A primeira hora da análise tem um registro de chuva de 0 mm/h. O talude encontra-se nas condições iniciais de umidade e de resistência.

Como foi falado anteriormente, a informação do estado de umidade e do estado de poropressão do talude prévios à ruptura é desconhecido e, por isso, a condição inicial da modelagem adota um estado seco próximo à umidade residual para ambos tipos de solo, obtendo, na análise pontual e transiente durante 24 horas, como apresentado na Figura 41, um FS constante.

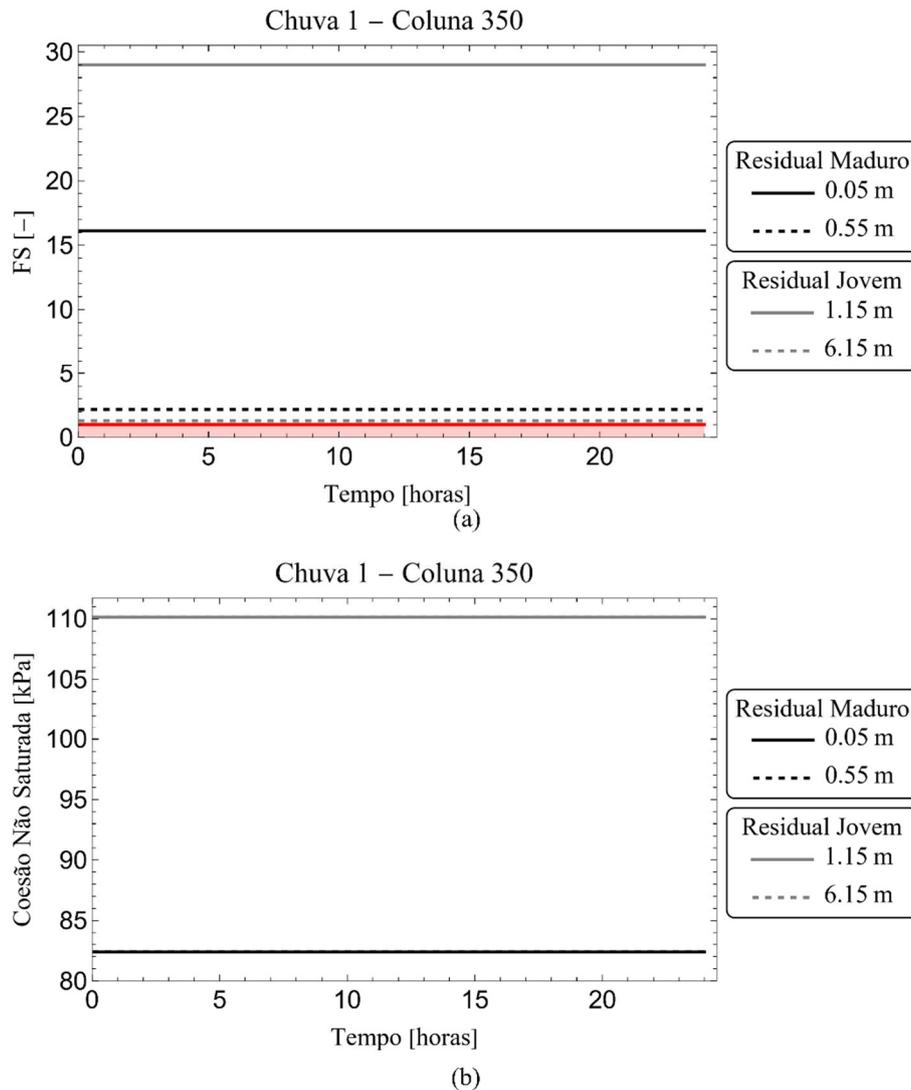
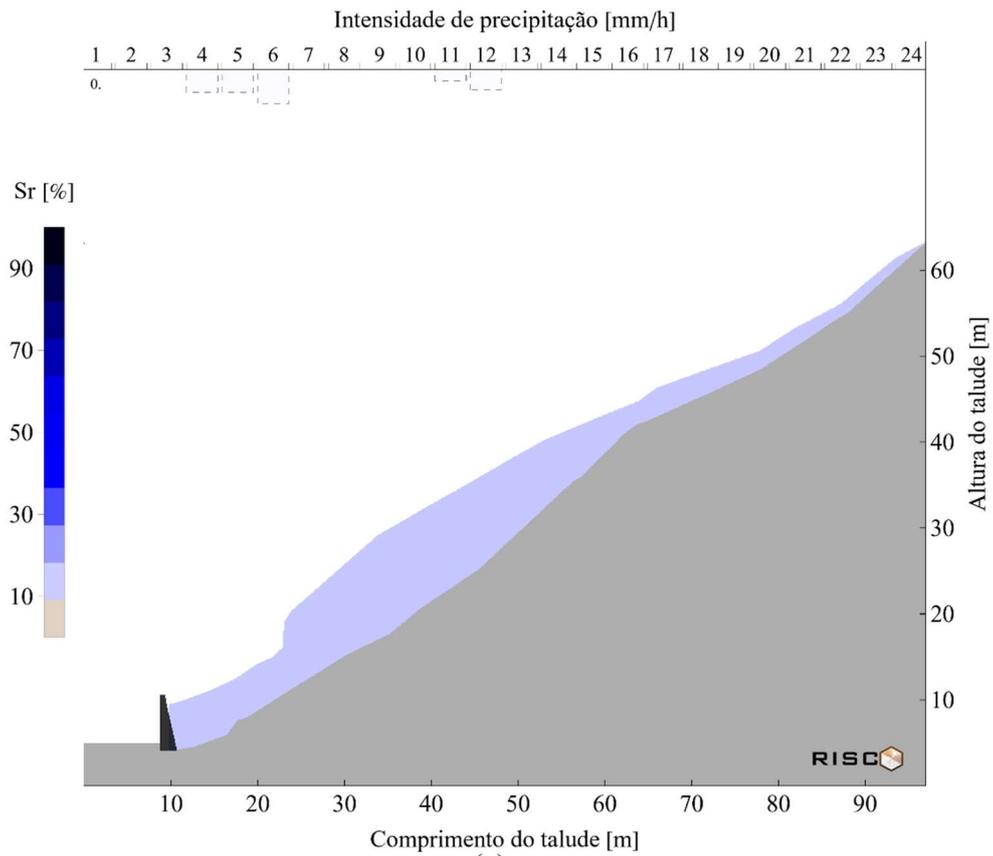
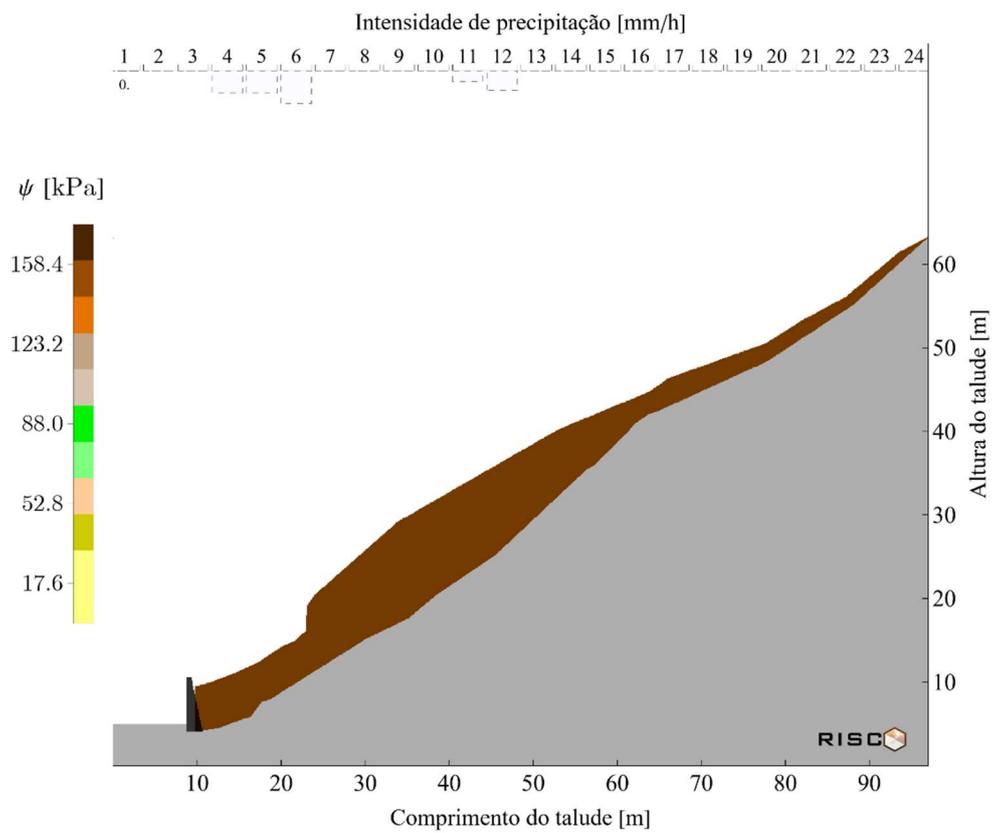


Figura 41. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da primeira hora de precipitação com intensidade de 0 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.

Na Figura 41b, é apresentado o comportamento da coesão não saturada do solo em função do tempo e das variações de umidade. Nesta situação, porém, onde não se tem alteração no conteúdo da água na matriz porosa, a coesão não saturada ou total permanece constante.



(a)



(b)

Figura 42. Perfis para a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.

Na Figura 42a, é apresentado o perfil do grau de saturação do talude, sendo este homogêneo com um valor de 11% para toda a secção transversal.

O perfil do estado inicial da poropressão negativa do talude é mostrado na Figura 42b, evidenciando, como era esperado, um perfil homogêneo com um valor de 149 kPa. O estado inicial da sucção, por estar no estado de umidade próximo ao teor de umidade residual, é aproximadamente o maior valor de sucção matricial que o maciço pode atingir.

Finalmente, aplicando o modelo de estabilidade não saturada e transiente no perfil do talude, com a discretização espacial definida anteriormente, o software RISCO, construiu o perfil de estabilidade de encosta para o cenário 1 indicado na Figura 43.

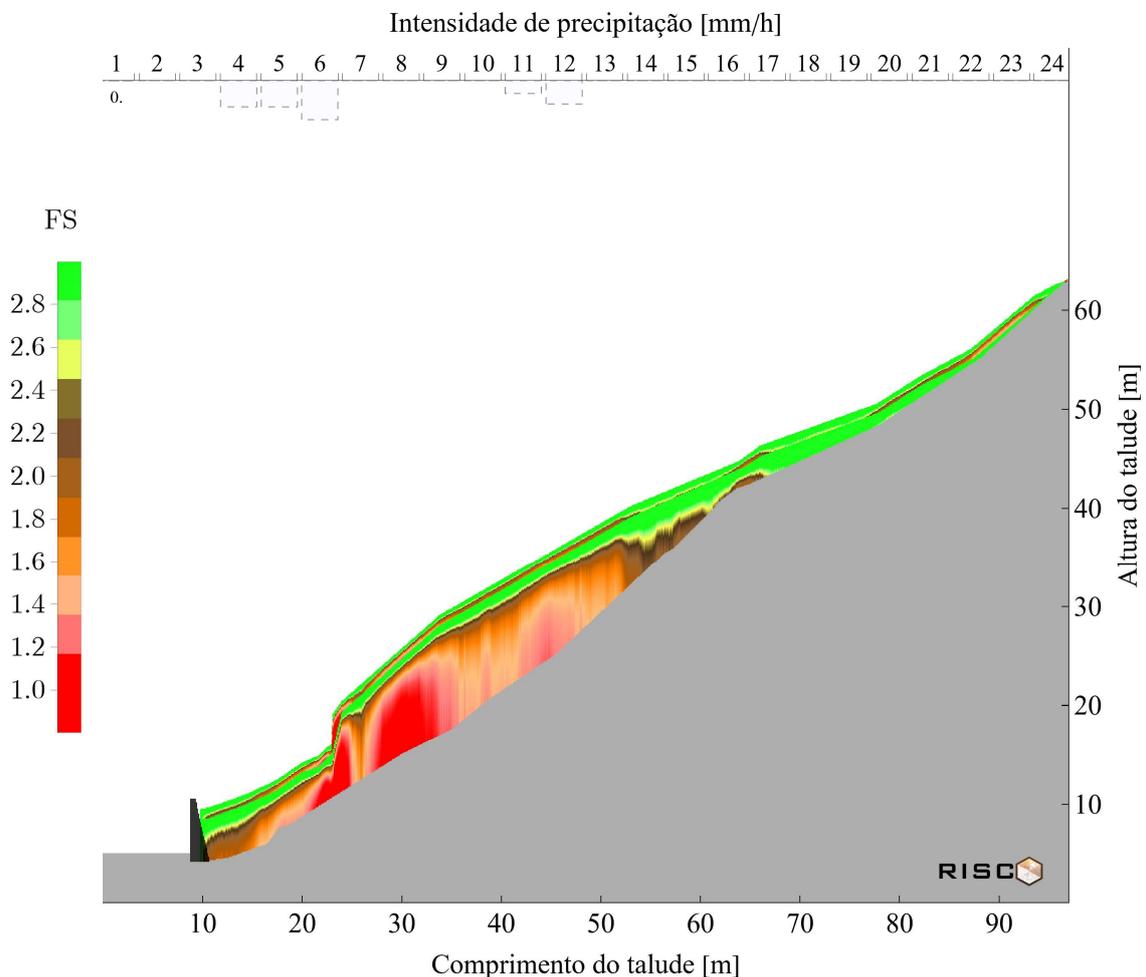


Figura 43. Perfil do FS do talude para a primeira hora de análise correspondente a precipitação com intensidade de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Nesta representação é considerada uma escala de cores para o FS na faixa de 0 até 3, sendo possível enxergar que, no estado natural, sem a influência da precipitação, a encosta pode

apresentar regiões em estado de plastificação que não necessariamente implicam no desenvolvimento de um mecanismo ou superfície de falha. Esta situação pode ser explicada também pela própria geometria do talude ou pela falta de informação que se tem dos atributos não saturados do solo.

Por outro lado, pelo trabalho de Gerscovich (1994), sabe-se que, a estrutura de contenção existente no pé do talude contém drenos sub-horizontais adjacentes a uma cortina atirantada que trabalham como estrutura de estabilização da encosta. O efeito positivo do muro de arrimo e da cortina atirantada na estabilidade da encosta não é considerado nesta análise.

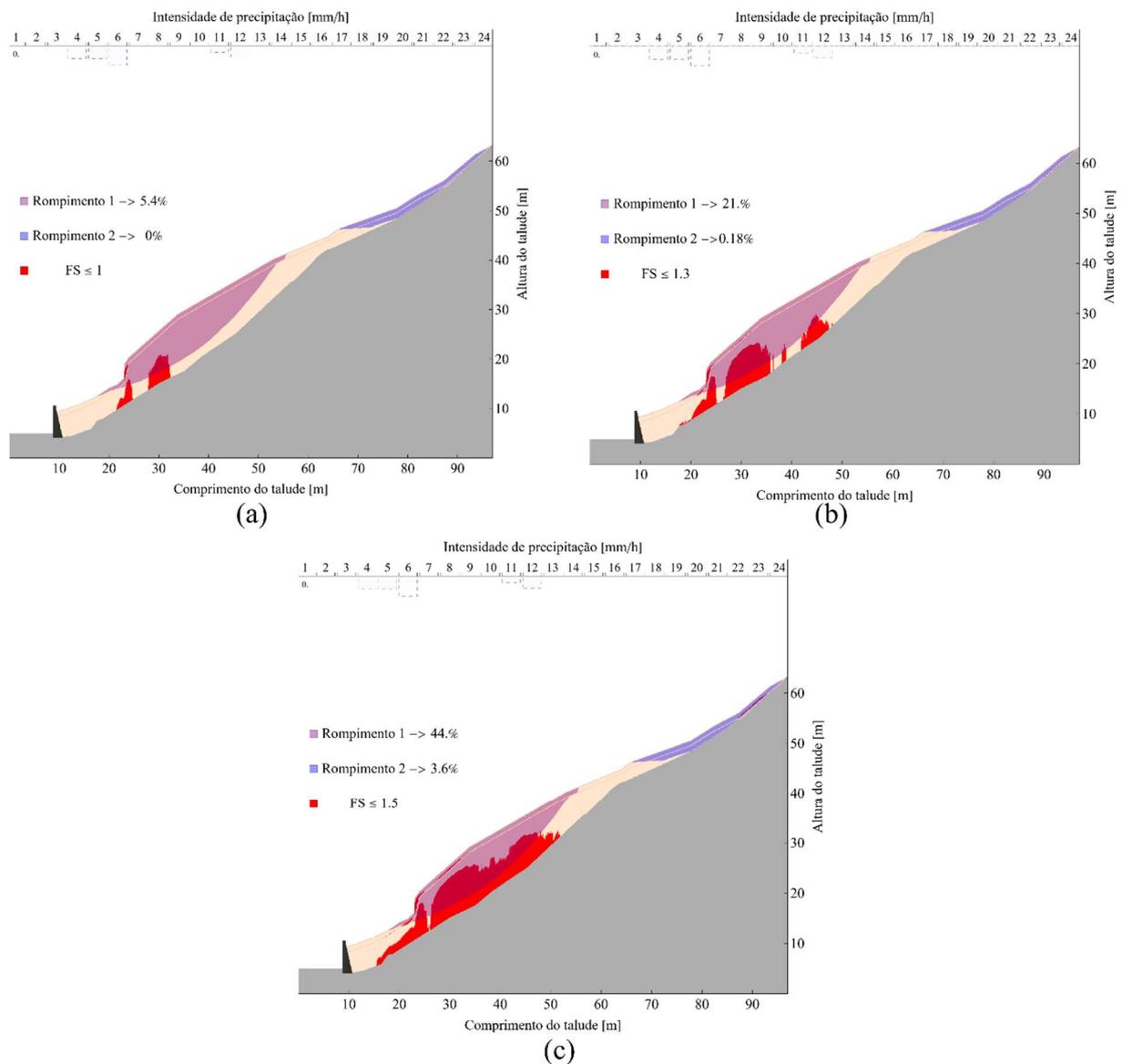


Figura 44. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 1 com uma intensidade de chuva de 0 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.

As comparações dos três indicadores de falha $FS_c=1$, $FS_c=1,3$ e $FS_c=1,5$, são apresentadas na Figura 44, quantificando a correspondência entre as análises feitas pelo software RISCO e, as áreas da massa mobilizada apresentadas no trabalho de Gerscovich (1994).

Para este cenário inicial, era esperado obter uma correspondência de 0%, já que, intuitivamente, teríamos um talude estável na condição seca. Porém, como é observado na Figura 44a, para um indicador de falha de 1, tem-se duas áreas onde o FS indica a perda do equilíbrio, o que correspondem em 5,4% com a massa de solo mobilizada durante o evento de falha.

Considerando o indicador de falha de 1,3 (Figura 44b), a instabilidade da encosta aumenta, tendo uma correspondência de 21% com a área do rompimento 1. Nesta situação, subestimando a resistência do talude, a área rompida aumenta fora da área definida na pesquisa de Gerscovich (1994), concentrando-se principalmente nas regiões mais profundas da camada do solo residual jovem e no contato com o manto rochoso. Igualmente, no cenário com um FS_c de 1,5 (Figura 44c), no contato entre as duas camadas de solo, na região mais perto à crista do talude, é encontrada uma instabilidade, que pode indicar uma alta susceptibilidade à ocorrência dos movimentos de massa de natureza translacional.

7.1.2. Cenário de chuva 2: FS para a hora 4 com intensidade de precipitação de 1 mm/h

Para este cenário, quando começa a ocorrer a chuva, é alterado o estado de umidade da superfície do solo, principalmente nos primeiros 5 cm de material responsáveis por receber a água precipitada. Nesta situação, o FS diminui, porém, por ser uma chuva de intensidade baixa, a estabilidade constitua sendo alta na camada de solo residual maduro e na primeira profundidade analisada do solo residual jovem Figura 45a.

Na Figura 45b, pode-se observar com maior clareza a influência da água no rompimento da coesão dos grãos, diminuindo, consideravelmente, até os 55 cm da primeira camada. Como falado anteriormente, porém, se a chuva acontecesse durante 24 horas, como é feita a análise transiente pontual, a intensidade de 1 mm/h não seria suficiente para romper totalmente a coesão aparente dos grãos na camada de solo residual maduro. Por outro lado, é notório que, a aparente instabilidade na profundidade de 6.15 m não parece estar, inicialmente, associada à coesão total do solo.

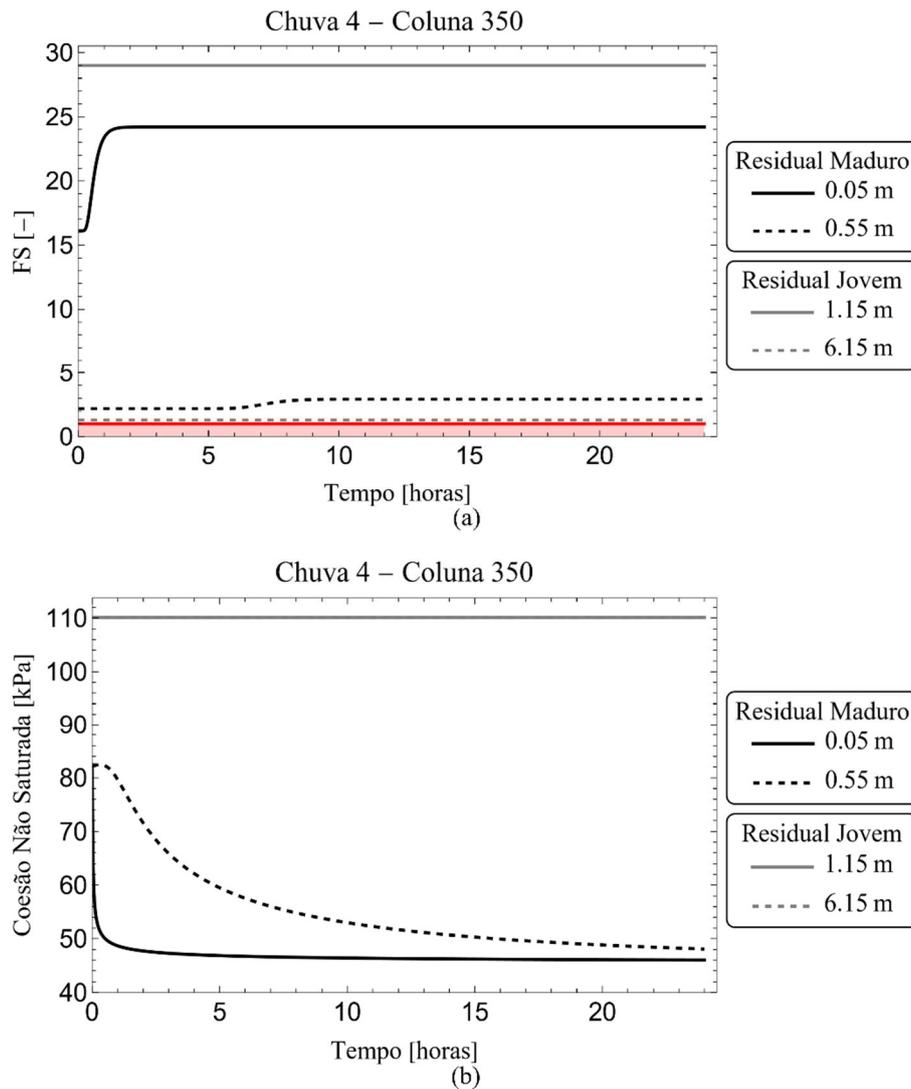
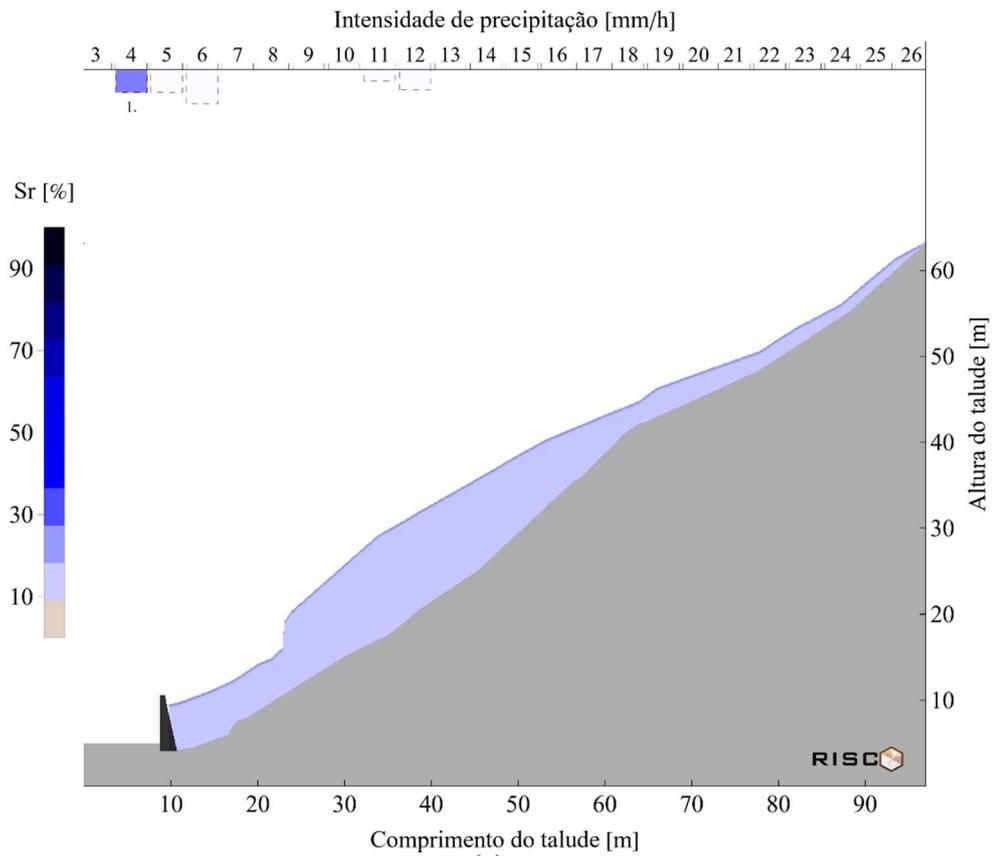
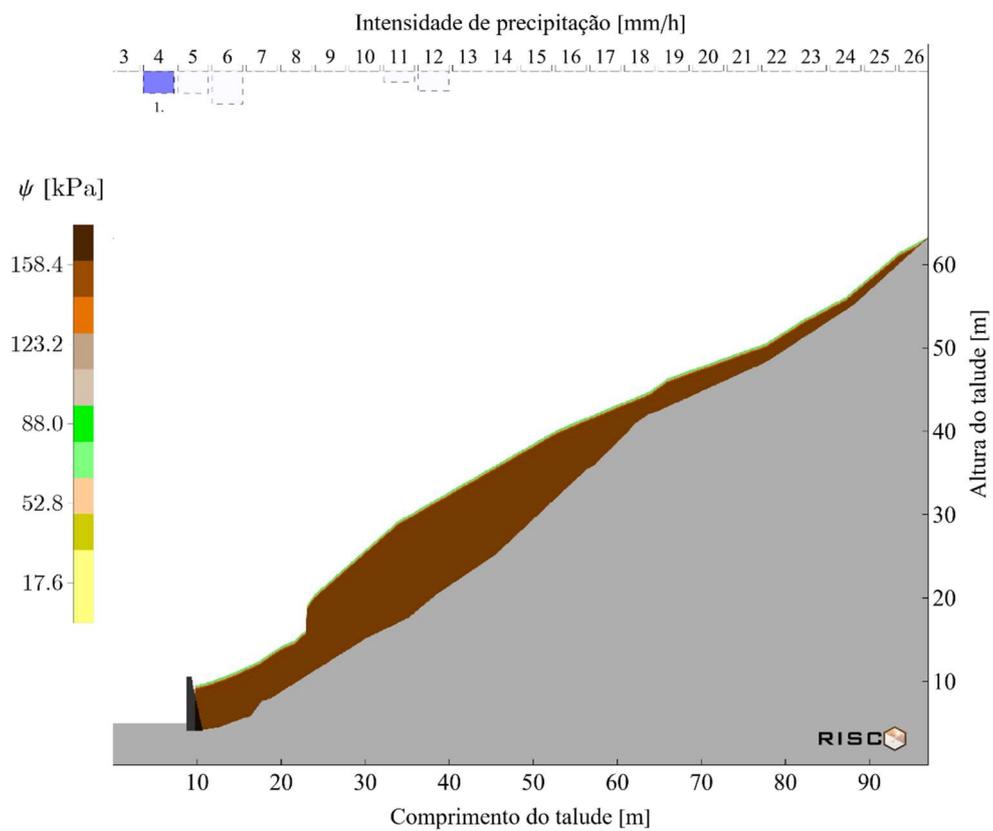


Figura 45. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da quarta hora de precipitação com intensidade de 1 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.

O perfil do grau de saturação do talude apresentado na Figura 46a, mostra claramente a infiltração da água da chuva na superfície do talude, que atinge valores de 20% de saturação no final da hora de análise. Neste sentido, o perfil de sucção começa a variar (Figura 46b), tendo uma poropressão negativa na superfície de 80 kPa.



(a)



(b)

Figura 46. Perfis para a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.

Na pesquisa feita por Gerscovich (1994) é relatado que, para as simulações correspondentes as respostas de poropressões do talude em função do evento de precipitação, foi desconsiderada a camada superficial do solo residual maduro e, também, foi diminuída a porosidade do material residual jovem, condicionando uma capacidade de infiltração menor para o solo e, também, um teor de umidade volumétrica saturado menor, provendo um maior grau de saturação para menores quantidades de água preenchendo o meio poroso. No entanto, nesta pesquisa, essas hipóteses não foram aplicadas, com o objetivo de entender a evolução da frente de umidade em função da capacidade de infiltração da superfície real do terreno e dos dados proporcionados pelo levantamento das informações em campo.

Finalmente, o software RISCO construiu o perfil de FS para o cenário 2 apresentado na Figura 47, mostrando que a diminuição da poropressão negativa na superfície não afetou negativamente a estabilidade da encosta nessa região.

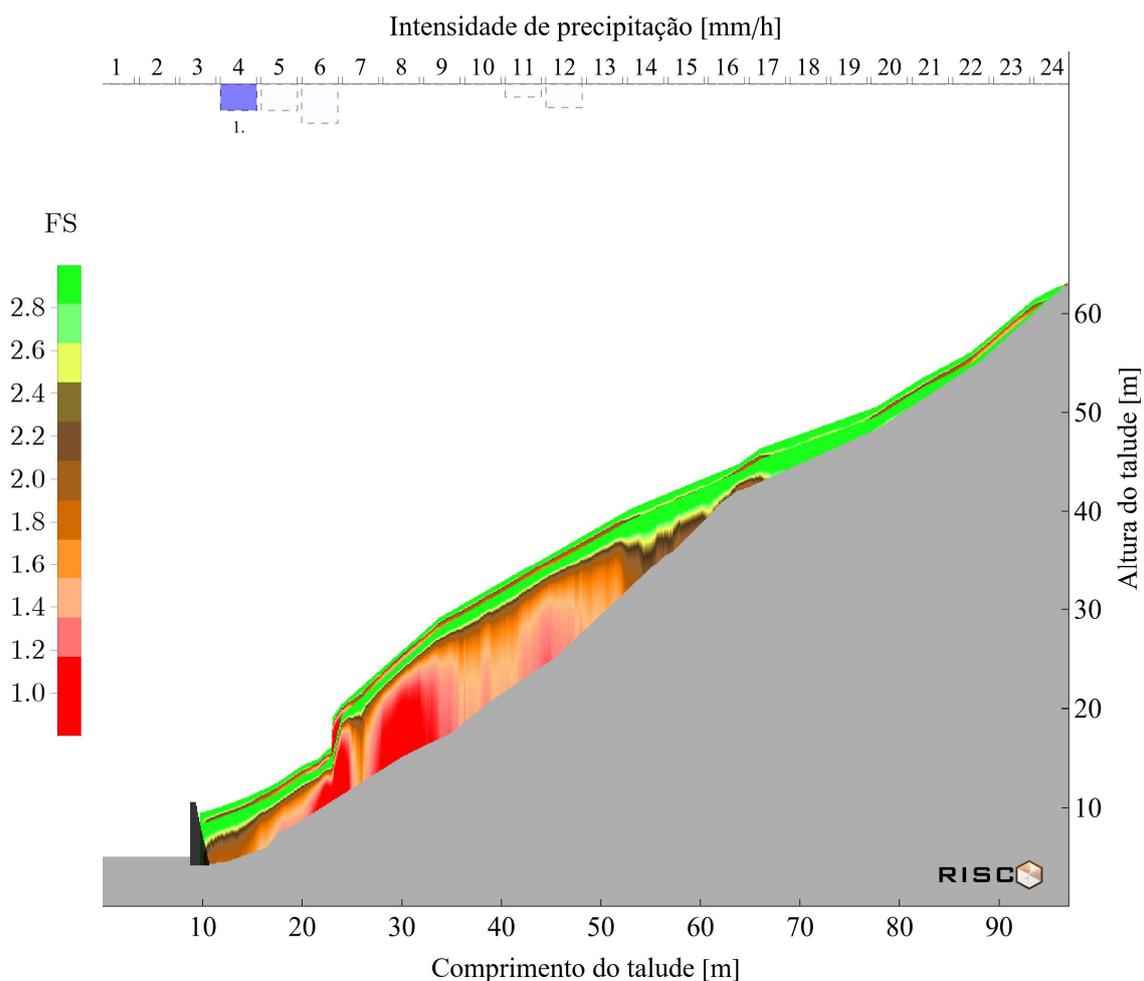


Figura 47. Perfil do FS do talude para a quarta hora de análise correspondente a precipitação com intensidade de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Tal qual é observado na susceptibilidade quantificada anteriormente no cenário 1, a instabilidade é identificada nas regiões mais profundas do talude no contato com a matriz de rocha. Isto se deve ao estado de umidade que, neste cenário, permanece igual ao estado inicial em praticamente todo o talude. Por esta razão, na Figura 48, a correspondência das análises feitas com os três indicadores de falha, apresenta os mesmos valores obtidos para a análise do cenário 1.

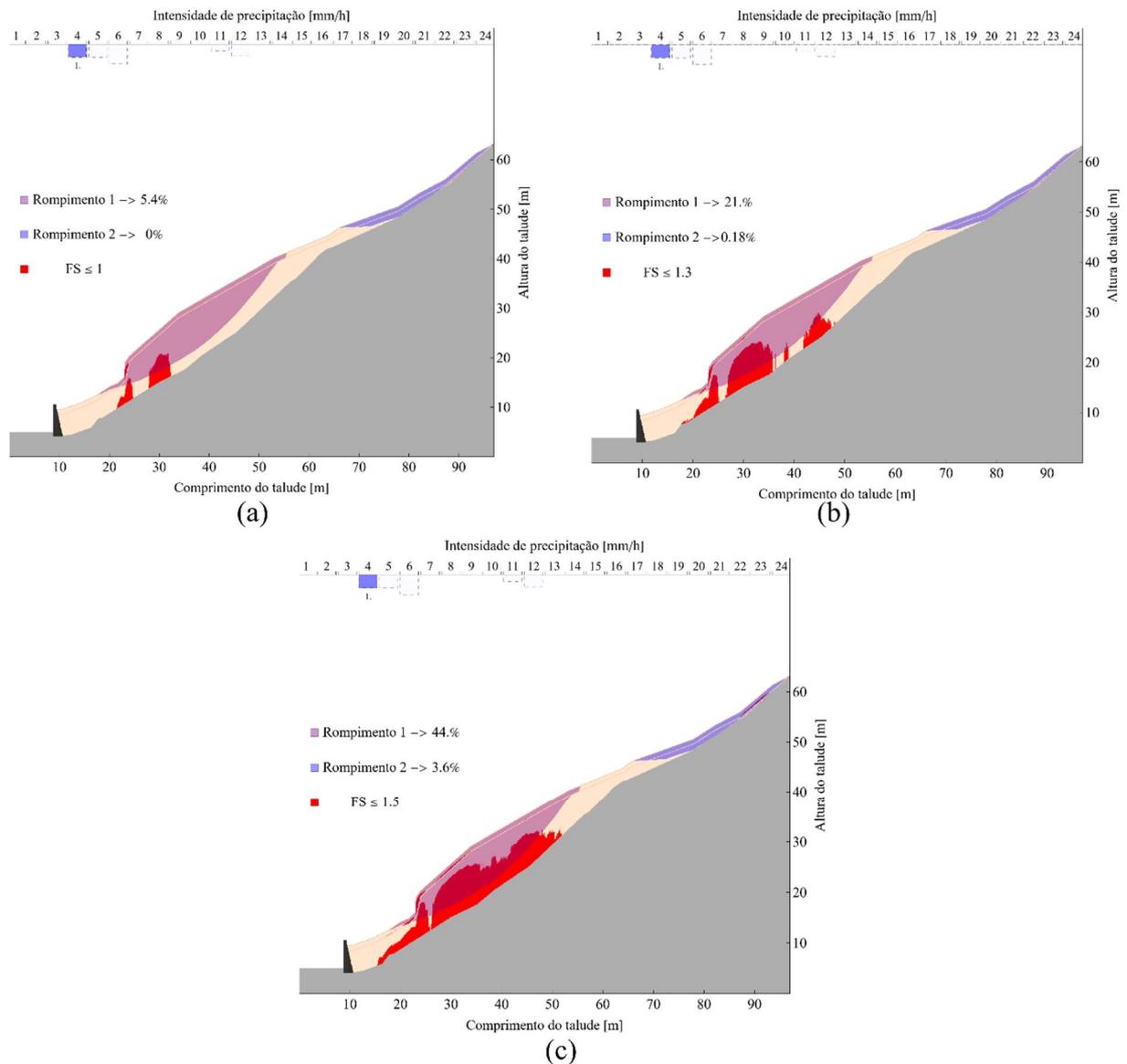


Figura 48. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 2 com uma intensidade de chuva de 1 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.1.3. Cenário de chuva 3: FS para a hora 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h

Neste cenário, com uma intensidade de chuva de 9 mm/h, a estabilidade pontual da coluna 350 da secção transversal da encosta da Lagoa, apresenta no tempo, uma diminuição da estabilidade na superfície da coluna. Continua, entretanto, sem ser uma diminuição significativa.

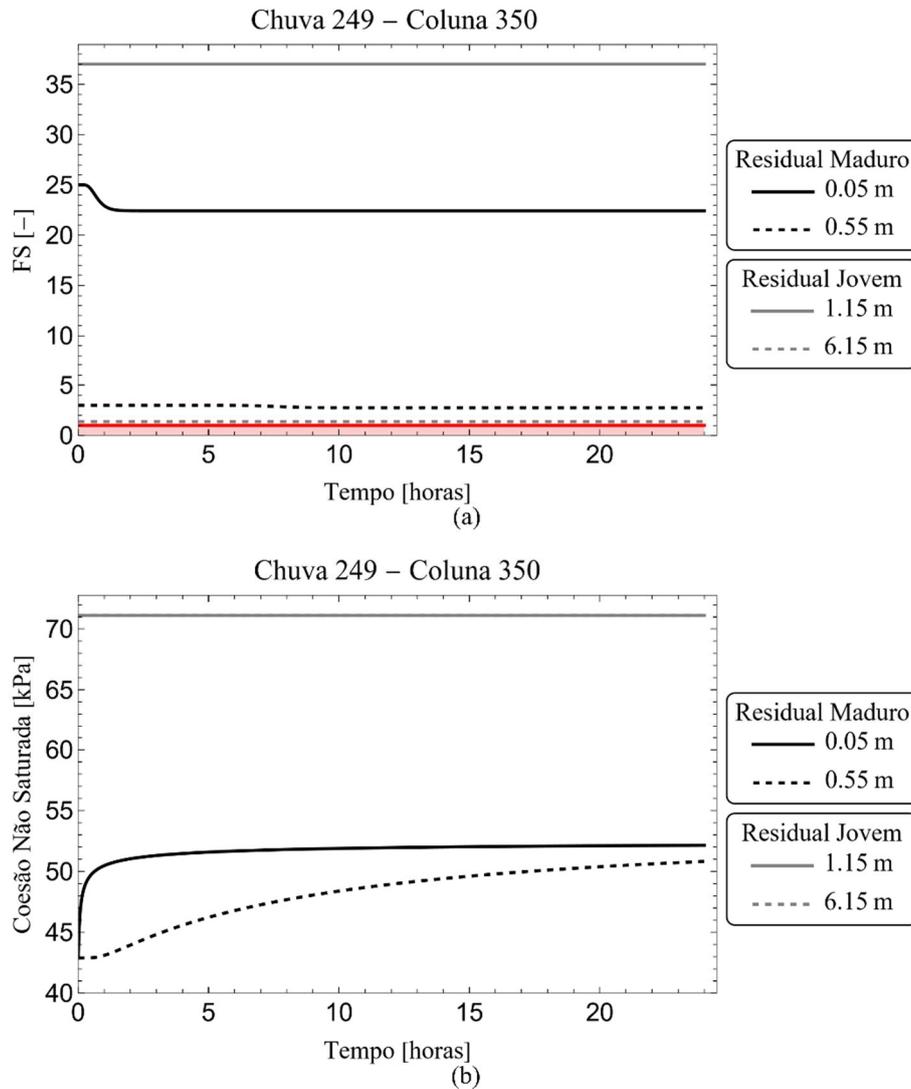


Figura 49. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 249 de precipitação com intensidade de 9 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.

Ao contrário do cenário anterior, a coesão não saturada é afetada positivamente na presença da água voltando à coesão atingida durante a chuva de 1 mm/h. Este comportamento pode indicar que, as chuvas antecedentes à hora 249, tinham modificado o estado de umidade,

diminuindo a coesão total dos materiais, evidenciando um melhor desempenho na resistência do material residual maduro na presença da água comparado ao estado totalmente seco.

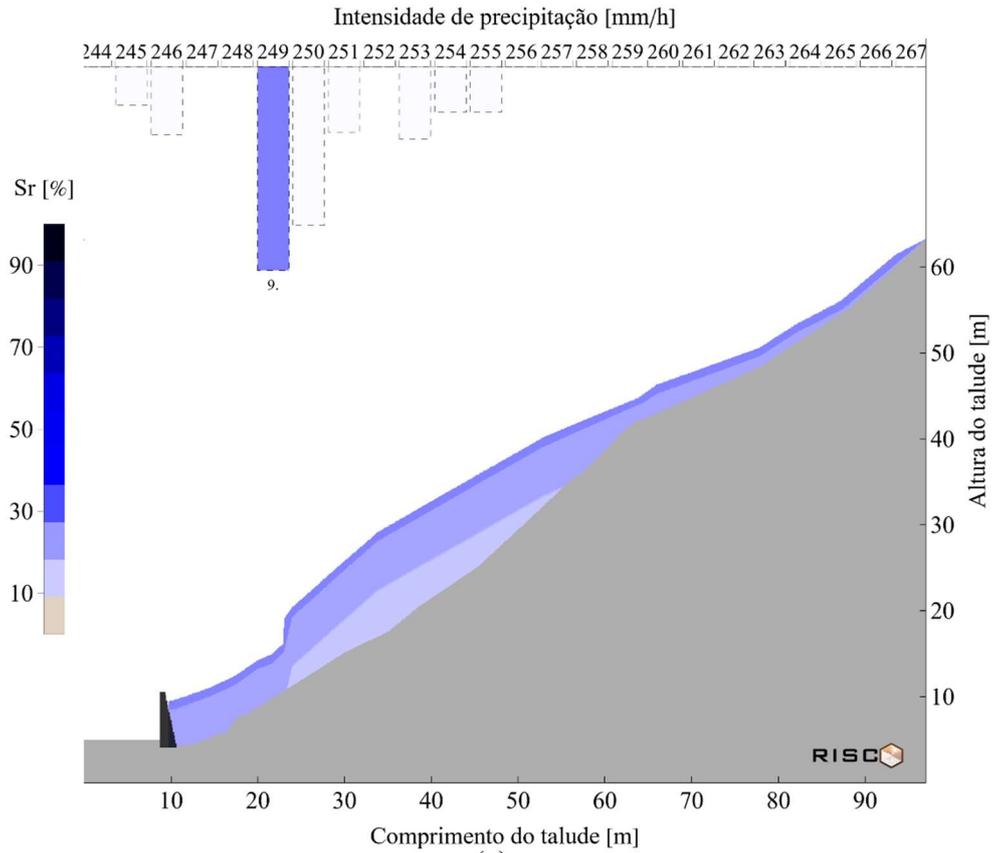
As análises feitas durante a chuva 249, correspondem a uma hora de precipitação no decimo dia do hietograma completo de precipitação (Figura 10). Isto significa que, o perfil obtido neste instante de tempo, foi influenciado pelas chuvas antecedentes dos dez dias anteriores. Neste momento, como é apresentado no subcapitulo 6.3, o estado de umidade do talude apresenta uma distribuição de água heterogênea, destacando-se três regiões principais que variam, em termos do grau de saturação, entre 11% e 22,6% (Figura 50a).

Neste sentido, a distribuição da poropressão negativa apresenta o mesmo comportamento, gerando três linhas de pressão principais com valores de 73 kPa até 150 kPa (Figura 50b).

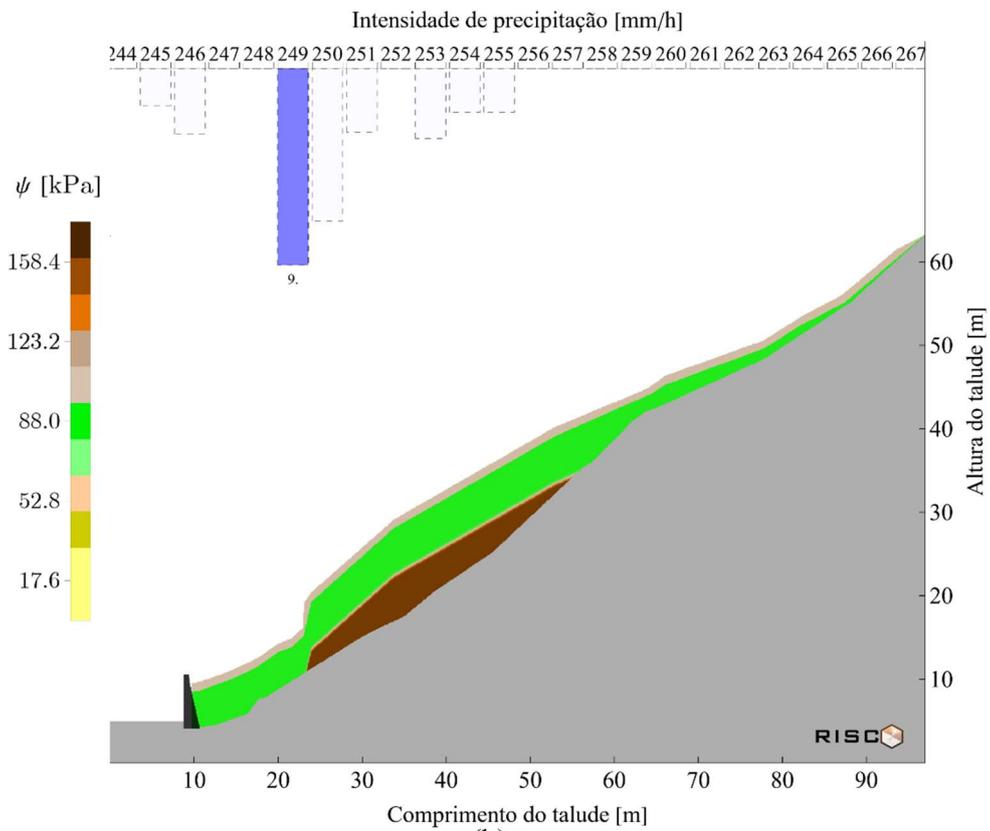
Comparando esta análises com as apresentadas no trabalho da Gerscovich (1994), é vista uma semelhança na construção das linhas de pressão distribuídas no interior do talude durante o evento de chuva. No presente trabalho, porém, a distribuição heterogênea é encontrada depois dos primeiros 10 dias da análise da chuva antecedente, o qual difere das análises de Gerscovich (1994), onde este perfil é obtido no final do evento de precipitação com variações entre 10 kPa até 30 kPa.

É importante ressaltar que, nesta pesquisa, as condições iniciais para as simulações e, a resolução temporal do evento de precipitação, divergem das definidas no trabalho de Gerscovich (1994), onde a poropressão inicial foi considerada como 60 kPa e a resolução do evento de precipitação foi de 24 horas.

Como consequência da alteração do estado de sucção inicial, onde são desenvolvidas as maiores poropressões negativas, a Figura 51 apresenta o perfil de estabilidade da encosta, no qual é perceptível uma diminuição da instabilidade do talude na região da crista e em alguns pontos no meio do maciço. Isto mostra que, a presença da água no interior no meio poroso causou um efeito positivo na estabilidade de algumas regiões da encosta, o qual pode ser contra intuitivo, porém, este fenômeno é explicado pelo fato de que as envoltórias de resistência ao cisalhamento nos meios porosos não saturados podem ser não lineares, tendo situações onde o acréscimo da sucção gerada por menores quantidades de água no solo consegue gerar a quebra da interligação entre os grãos, prejudicando a resistência ao cisalhamento do solo no estado seco (Campos; Motta, 2015-).



(a)



(b)

Figura 50. Perfis para a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.

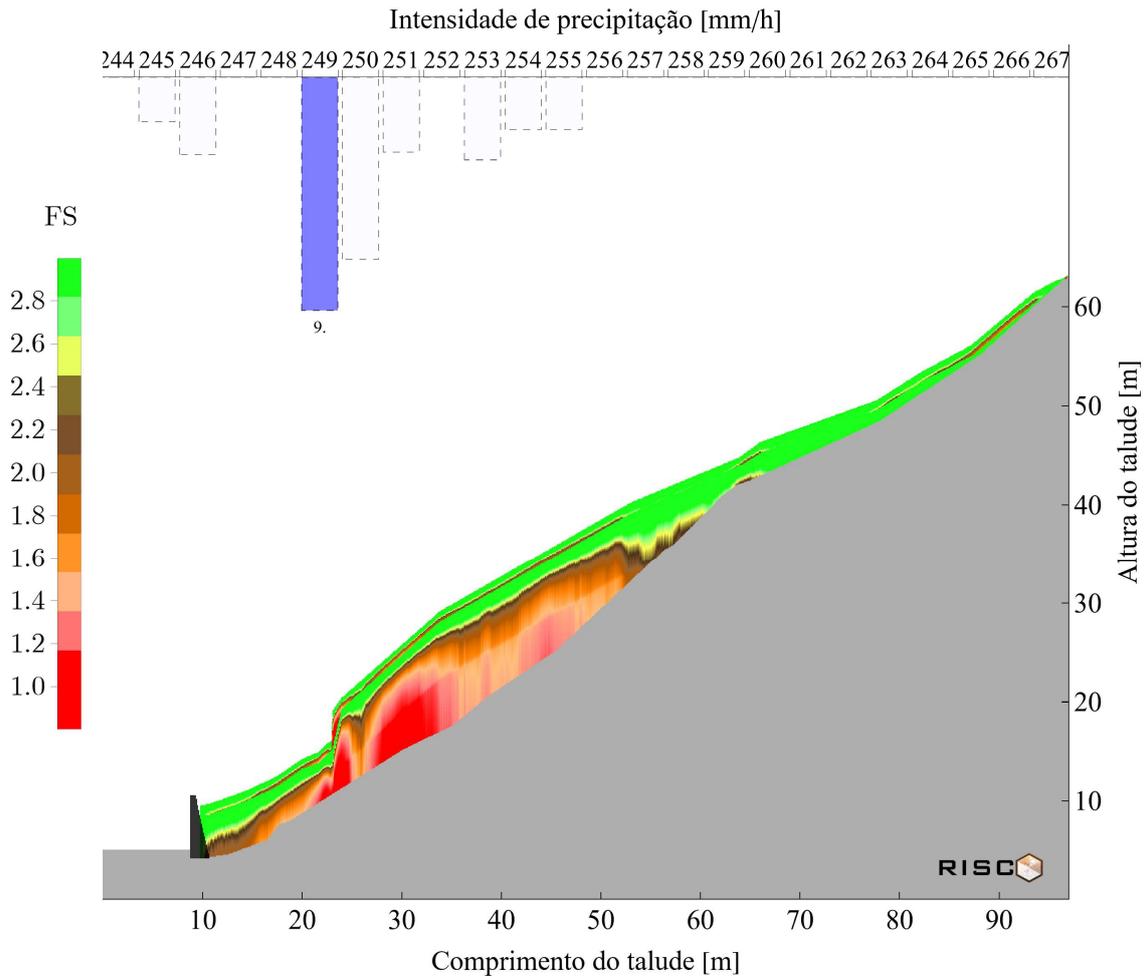


Figura 51. Perfil do FS do talude para a hora de análise 249, correspondente a precipitação com intensidade de 9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Para entender melhor o ganho de estabilidade na condição não saturada do cenário 3, é possível comparar os valores obtidos na análise da correspondência dos indicadores de falha na Figura 52. Neste cenário, é apresentado uma diminuição na correspondência das análises com a superfície de falha original da encosta, sendo favorecida a região de contato entre as camadas perto da crista do talude e, a região central mais profunda da camada residual jovem.

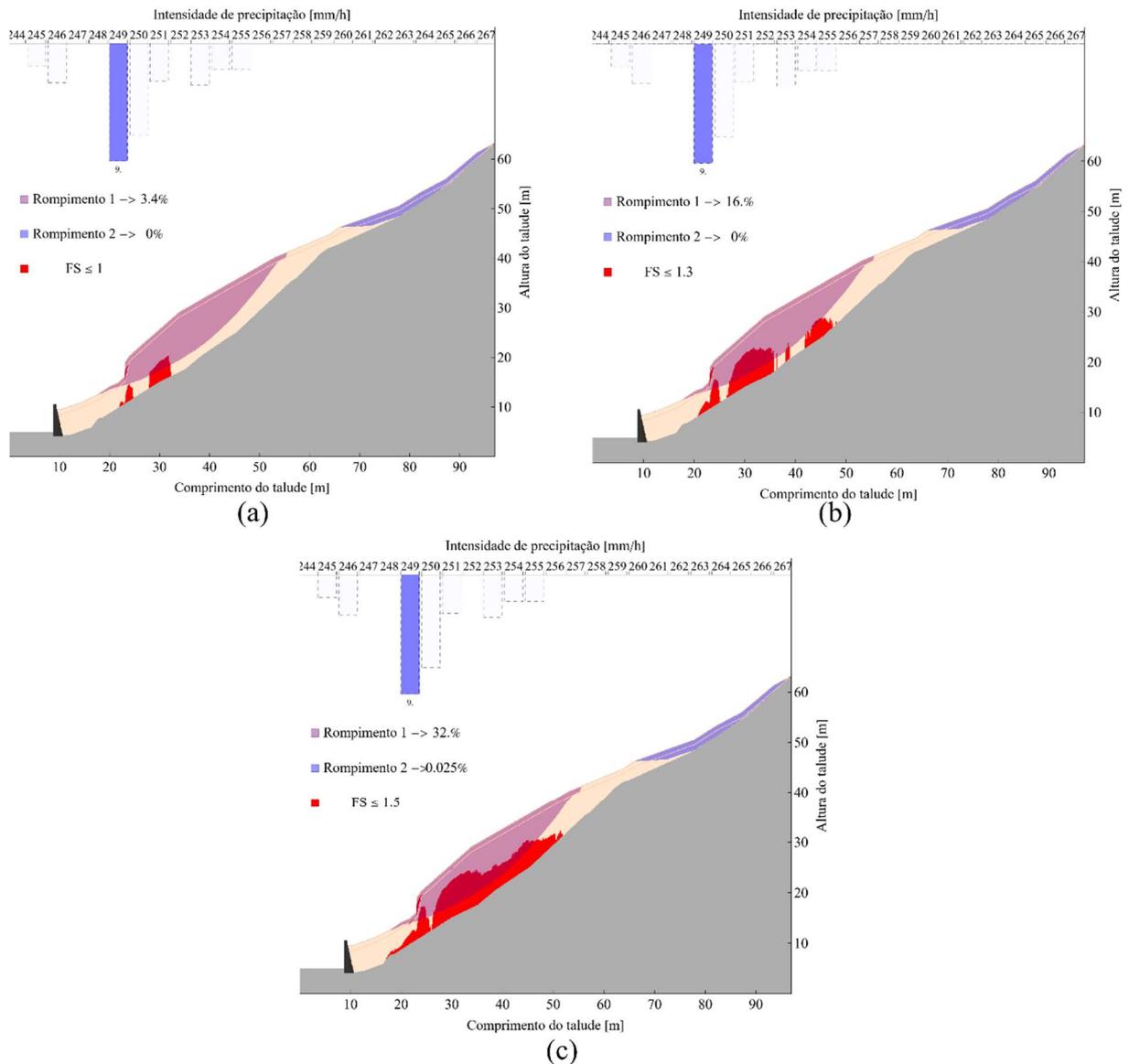


Figura 52. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 3 com uma intensidade de chuva de 9 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.1.4. Cenário de chuva 4: FS para a hora 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h

Nesta situação, onde o talude não está submetido a nenhuma precipitação da água da chuva, é observado que a estabilidade transiente e não saturada é constante durante as 24 horas de análise. Porém, como é apresentado na Figura 53a, diferente do cenário 1, onde o solo estava totalmente seco, o desempenho do talude é maior, atingindo, na profundidade de 1,15 m um fator de segurança de aproximadamente 40.

Igualmente, na Figura 53b, as coesões totais dos materiais atingem valores menores comparados com o cenário 1, corroborando que, em situações extremas de secagem, as partículas de solo rompem suas ligações, diminuindo sua resistência.

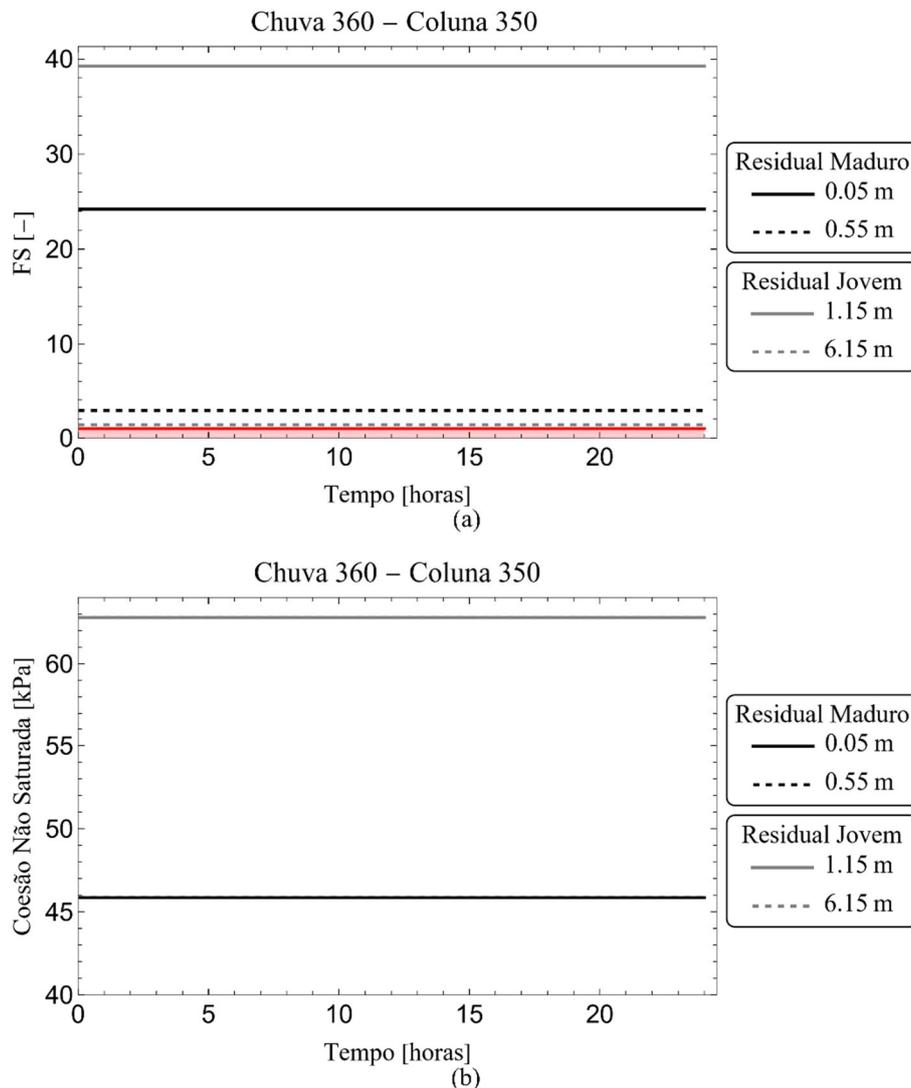
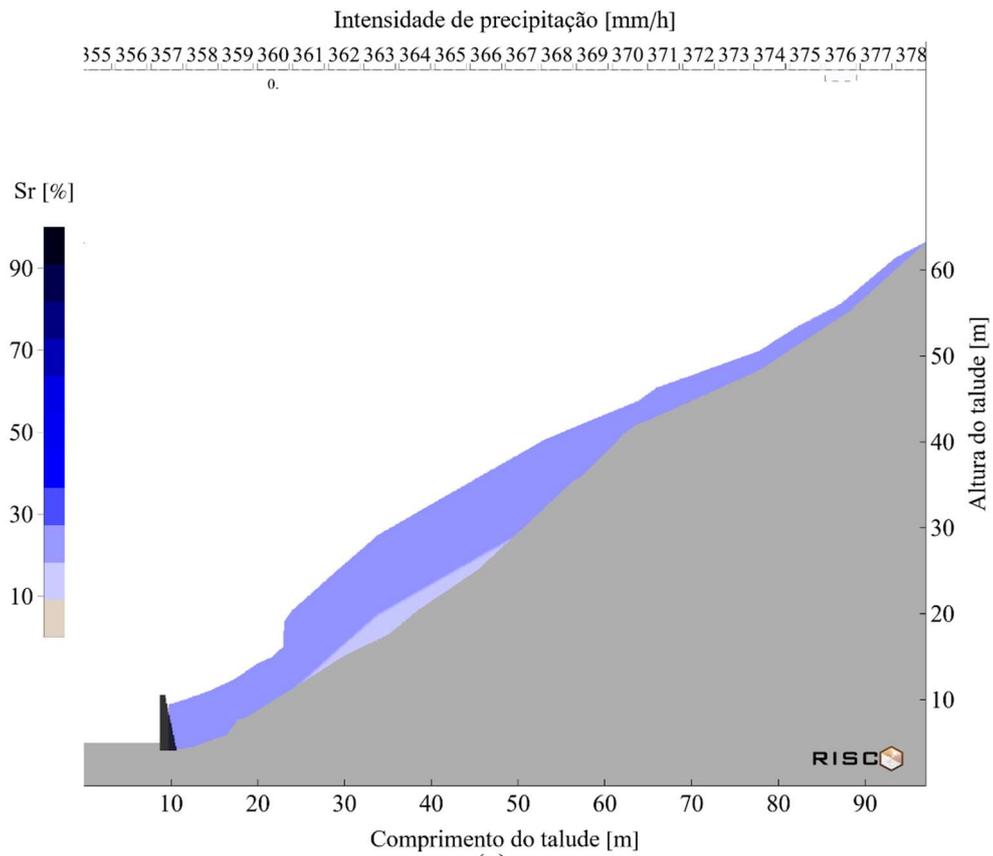
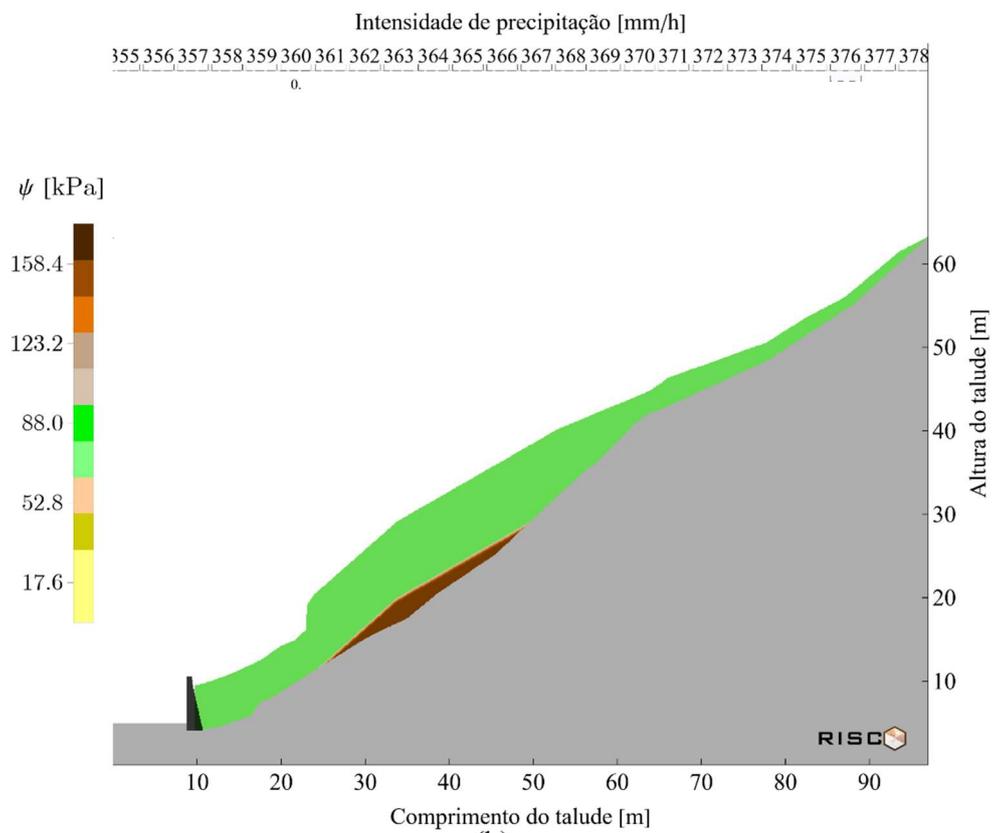


Figura 53. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 360 de precipitação com intensidade de 0 mm/h. (a) FS transiente e não saturada e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.

Esta hora de análise, corresponde ao estado do talude após 15 dias de chuvas antecedentes. Para este tempo, a distribuição da água no talude é mais homogênea, como é observado na Figura 54a, onde, basicamente, são formadas duas regiões com o mesmo grau de saturação correspondentes a 20% e 11%. Este mesmo comportamento é observado no perfil da sucção matricial apresentado na Figura 54b, onde as duas regiões de poropressão negativas correspondem a 79 kPa e 149 kPa.



(a)



(b)

Figura 54. Perfis para a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.

O perfil de estabilidade apresentado na Figura 55 é muito similar ao obtido no cenário 3, onde a crista se encontra mais estável, da mesma forma que o centro da encosta. Para melhor entender a evolução positiva do perfil de FS, são analisadas as correspondências na Figura 56.

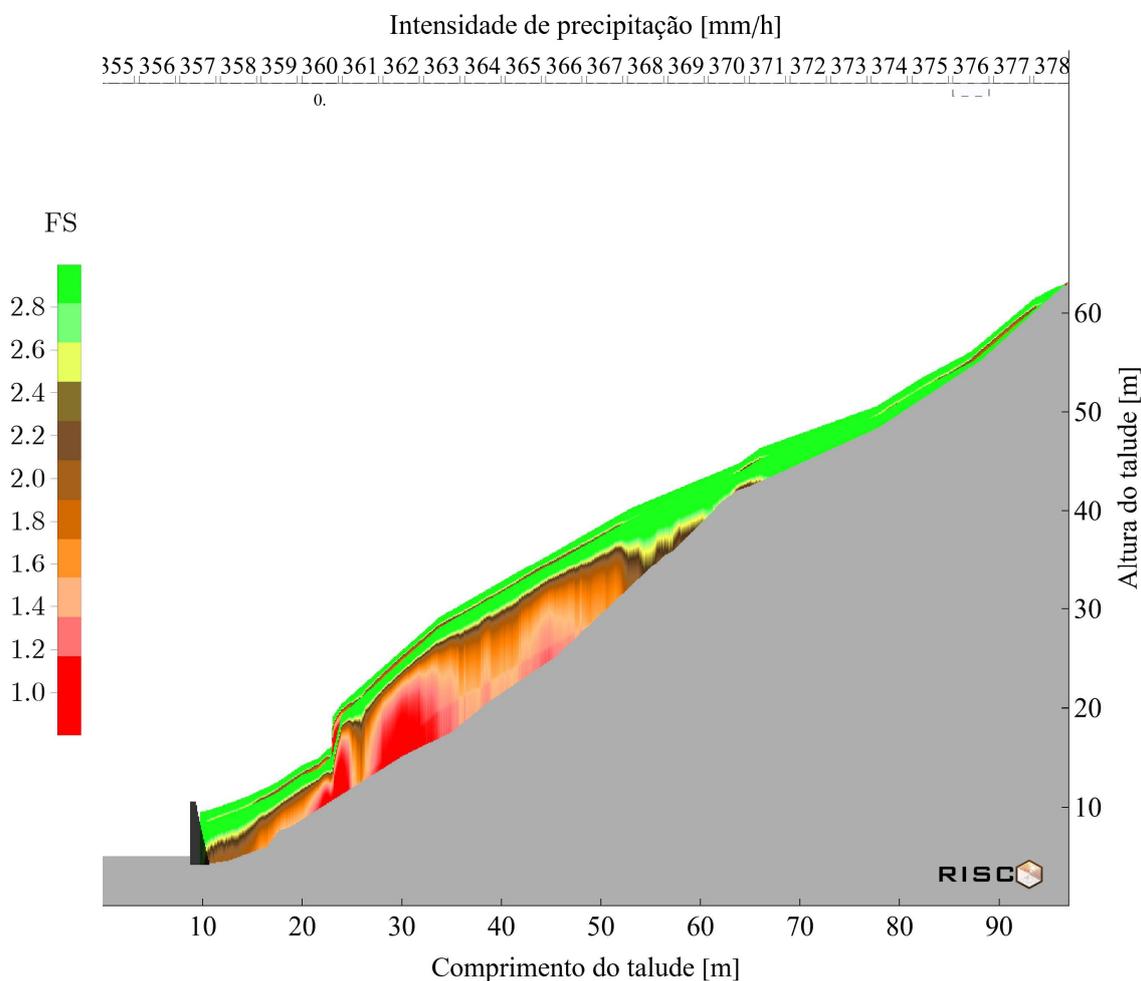


Figura 55. Perfil do FS do talude para a hora de análise 360, correspondente a precipitação com intensidade de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Neste cenário, quando analisado um indicador de falha 1, a estabilidade da encosta, comparada ao cenário 1, totalmente seco, é muito mais estável, tendo só 1,8% de concordância com a área de falha original e apresenta uma pequena área instável no contato rocha e solo residual jovem perto a região do pé do talude. Pode-se identificar que, a saturação de 20%, que corresponde a um teor de umidade volumétrica de 11%, gera um estado de poropressão negativa favorável à estabilidade da encosta. O mesmo comportamento é percebido para as análises apresentadas na Figura 56b e na Figura 56c, apresentando-se a região da crista totalmente estável e uma menor correspondência no rompimento 1 associado ao centro do talude.

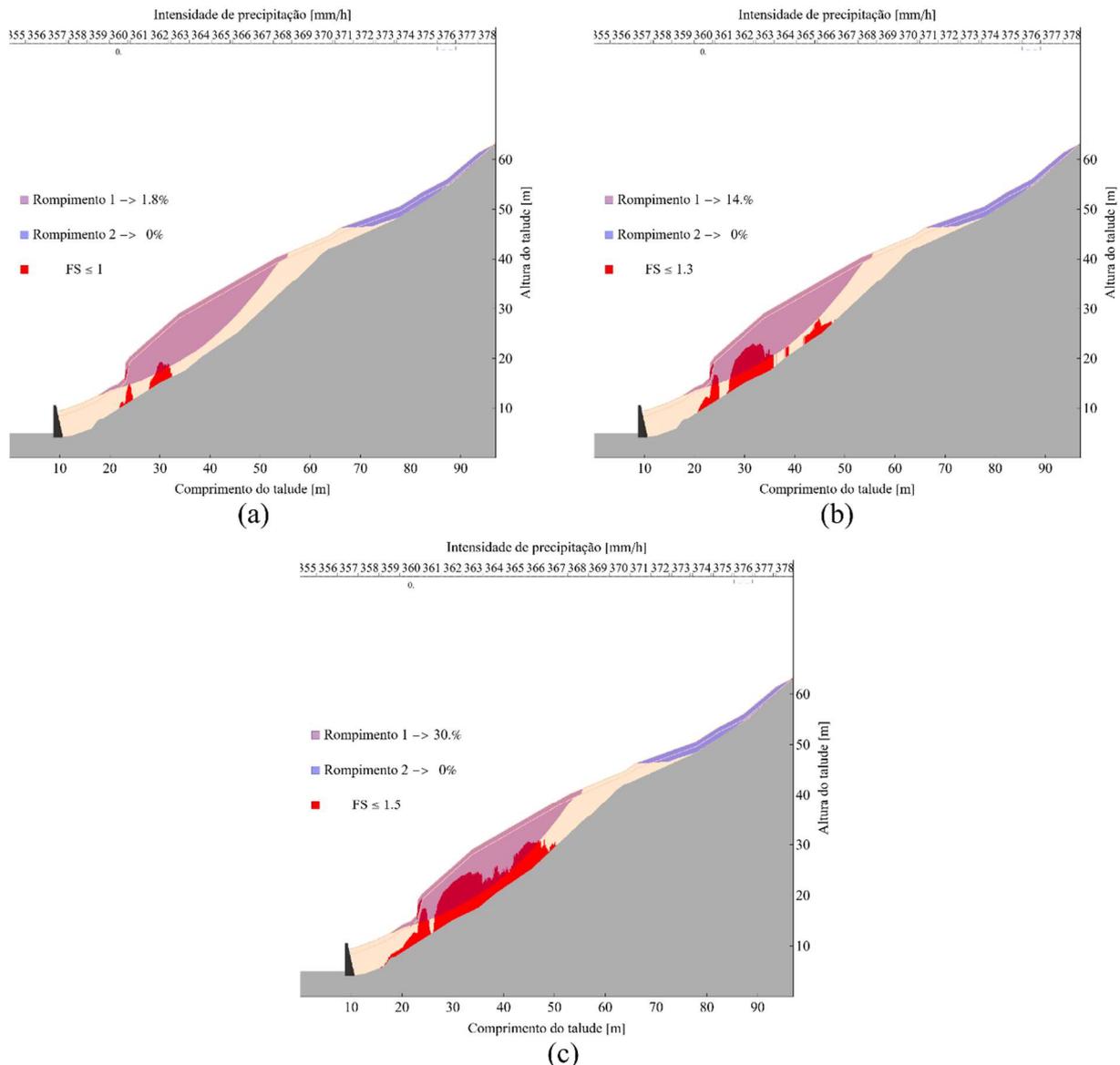


Figura 56. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 4 com uma intensidade de chuva de 0 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.1.5. Cenário de chuva 5: FS para a hora 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h

Na Figura 57, o desempenho da coesão não saturada e, conseqüentemente, da estabilidade não saturada da coluna 350, não muda significativamente, se comparado ao cenário anterior. Nesta oportunidade, ocorre uma chuva intensa, a qual é considerada como constante durante 24 horas na análise pontual, porém, não é suficiente para a alterar o estado de tensões do maciço nas profundidades analisadas.

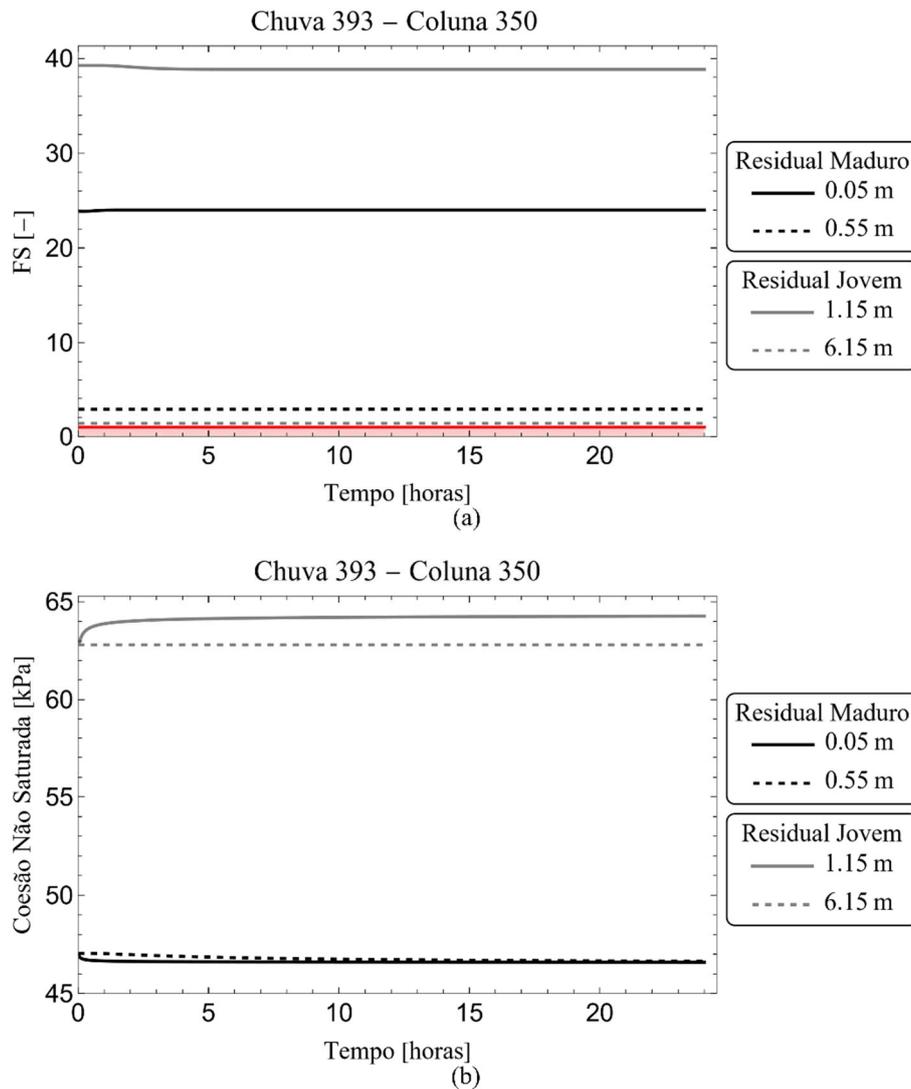
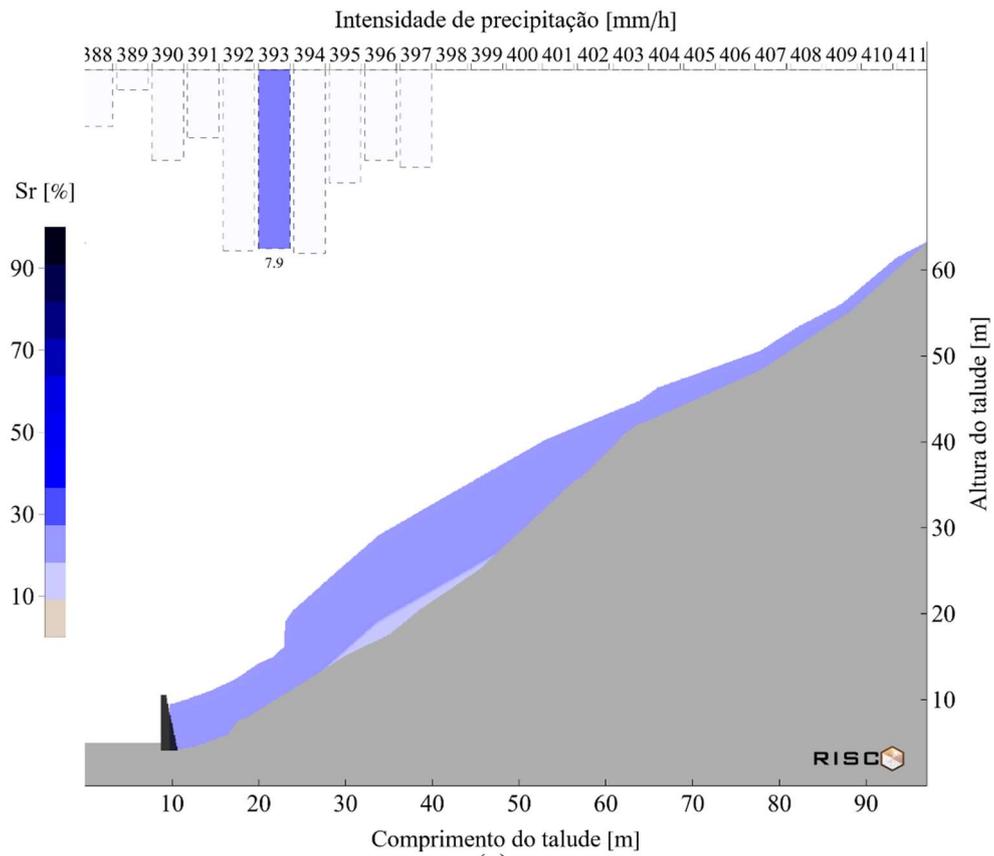


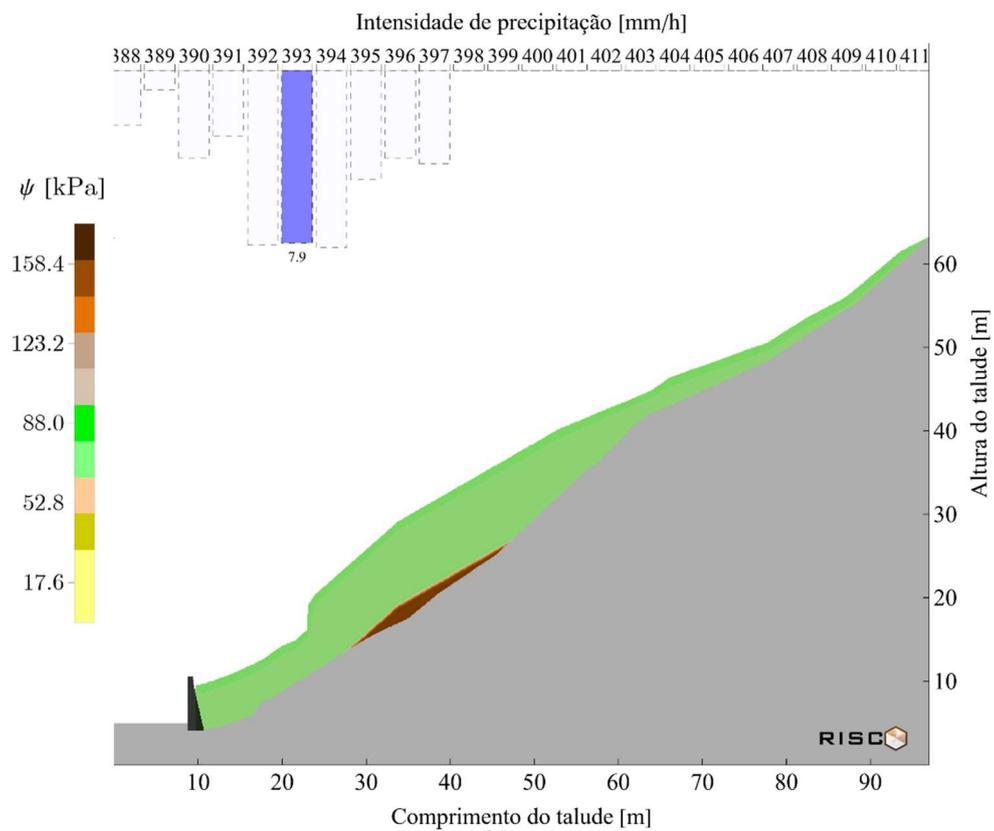
Figura 57. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 393 de precipitação com intensidade de 7,9 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.

Este cenário corresponde a uma hora de precipitação do dia 16, onde, após várias horas sem registro de chuva, é registrado um evento com intensidade alta. Nesta hora, o perfil de umidade não apresenta variações significativas comparado ao estado do cenário 4 (Figura 58a).

Este comportamento pode ser justificado pelo fato que, durante as horas analisadas com as chuvas antecedentes, a superfície do talude diminuiu sua capacidade de infiltração, já que tem 20% dos poros saturados, impedindo a água precipitada de entrar no talude para gerar a zona de saturação do talude.



(a)



(b)

Figura 58. Perfis para a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.

Neste sentido, mesmo sendo uma chuva com intensidade alta, a água escoar, e só conseguirá penetrar o solo quando os vazios da camada superficial fiquem disponíveis para receber mais água. O mesmo comportamento é observado no perfil da sucção Figura 58b, continuando com as duas regiões definidas no cenário 5.

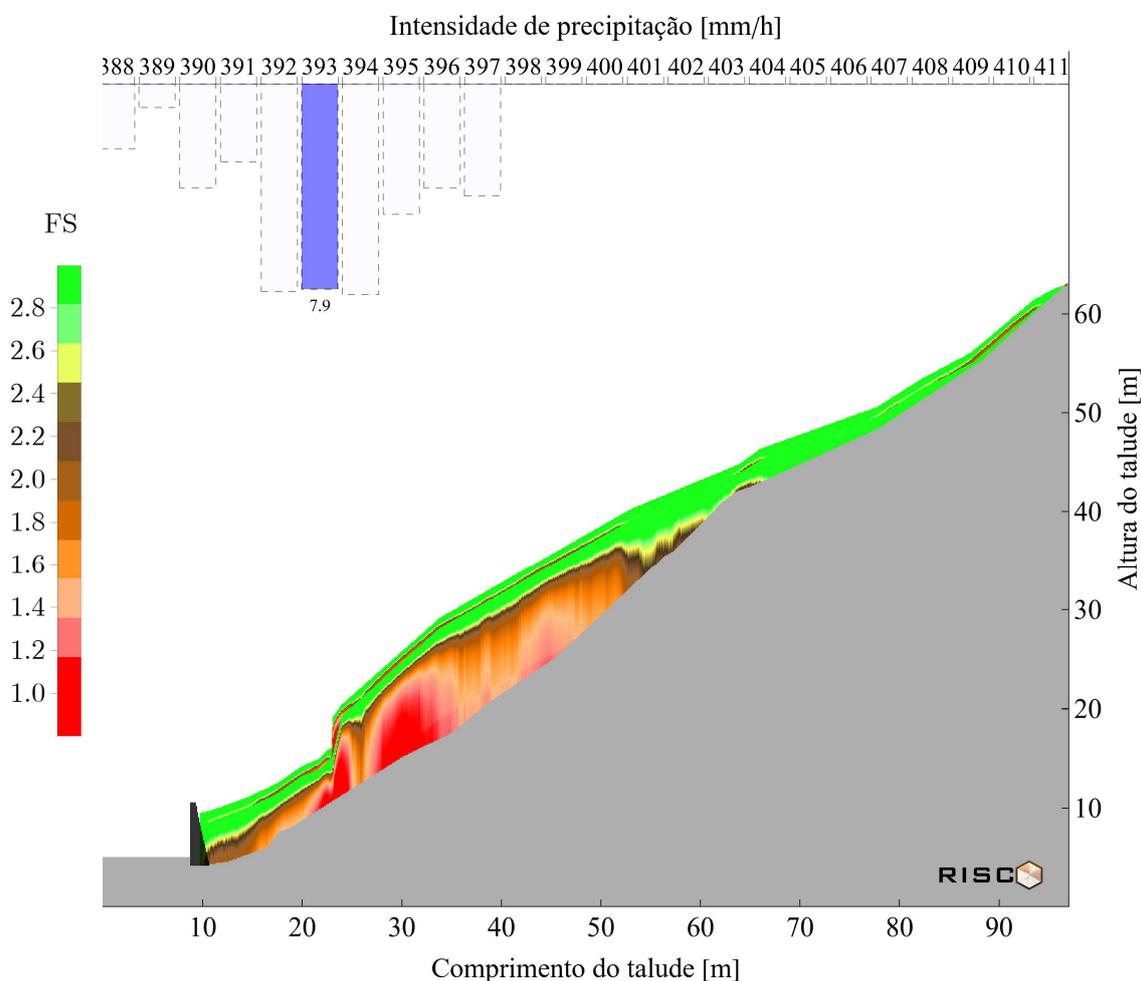


Figura 59. Perfil do FS do talude para a hora de análise 393, correspondente a precipitação com intensidade de 7,9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Na Figura 60, as correspondências das análises feitas para os três indicadores de falha obtiveram a mesma resposta do cenário 4. No entanto, é importante ressaltar que neste cenário, embora, o perfil do FS não apresente mudanças significativas, é explícito nas análises do perfil de umidade, a importância de entender o comportamento da interação solo atmosfera. Isto porque, na situação de o talude ter uma umidade menor, a intensidade de chuva ocorrida neste tempo teria infiltrado na superfície da encosta, distribuindo de maneira diferente a água no interior do maciço.

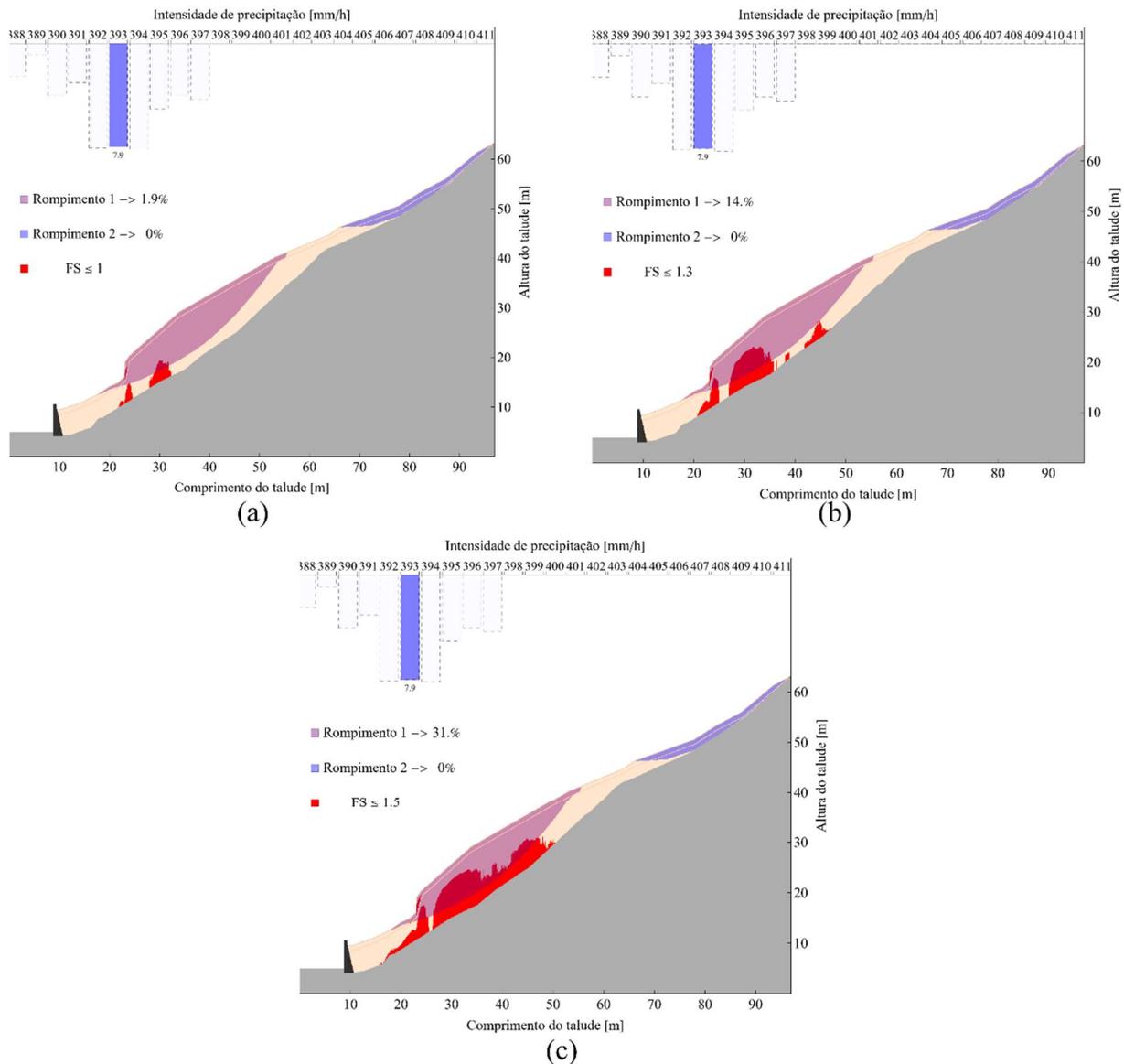


Figura 60. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 5 com uma intensidade de chuva de 7,9 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.1.6. Cenário de chuva 6: FS para a hora 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h

O cenário 6, representa o estado do talude na hora em que foi registrada a sua ruptura. Como é apresentado na Figura 61a, porém, a instabilidade não é evidente, tendo um desempenho perto ao indicador de falha de 1, apenas na profundidade de 6,15 m correspondente ao material da camada residual jovem. No mesmo sentido, como observado na Figura 61b, a coesão total apresenta o menor valor durante toda a análise do problema, sendo ainda alta e favorável a estabilidade de aproximadamente os primeiros 115 cm de solo da coluna 350.

Esta análise pontual, indica a necessidade de se fazer análises completas nas secções ou perfis das encostas, para entender corretamente a distribuição da água e, também, o desempenho final da resistência dos materiais em função do espaço.

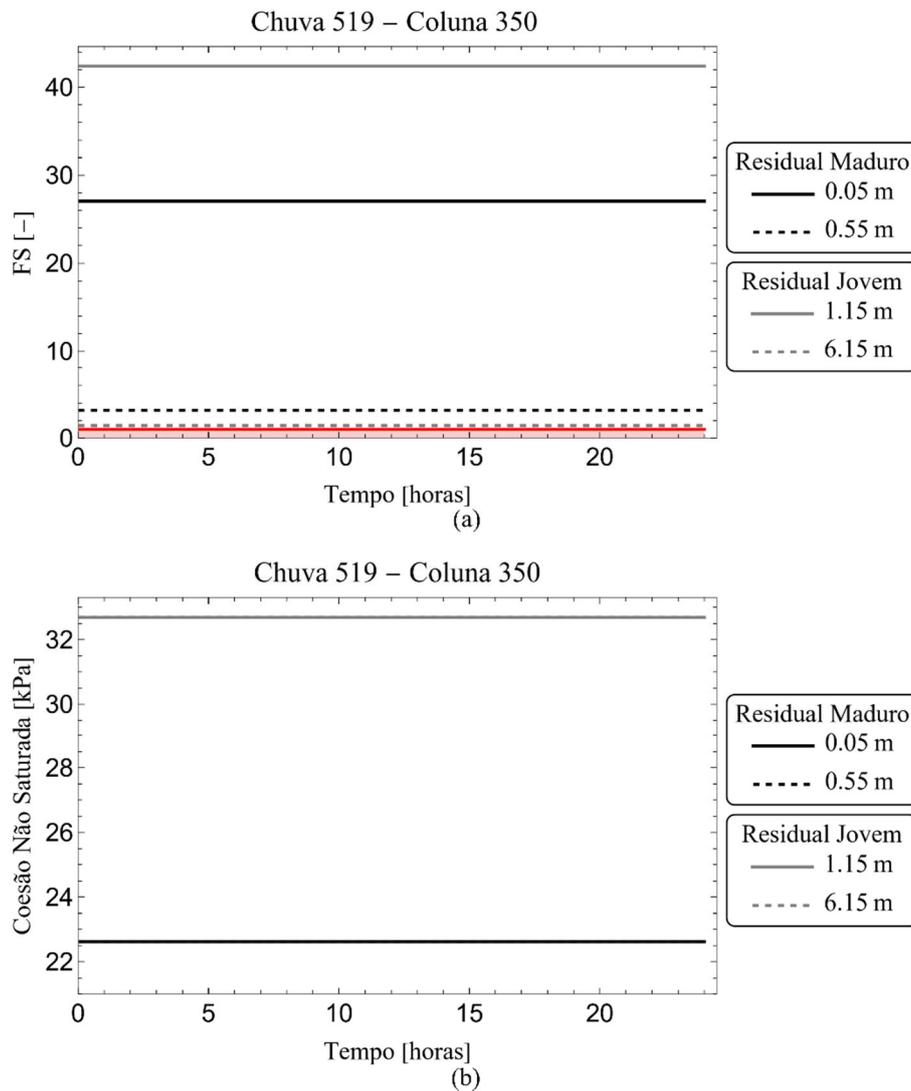


Figura 61. Análise pontual da coluna 350 para quatro profundidades diferentes considerando o estado inicial da hora 519 de precipitação com intensidade de 0 mm/h. (a) FS transiente e não saturado e (b) coesão não saturada e transiente. Imagem gerada pelo software RISCO.

Neste instante de tempo, o talude, havia recebido previamente a maior intensidade de chuva registrada durante todo o evento de precipitação, ocorrida na hora 503 com uma intensidade de 18 mm/h, influenciando o estado de saturação prévio a ruptura como é apresentado na Figura 62a.

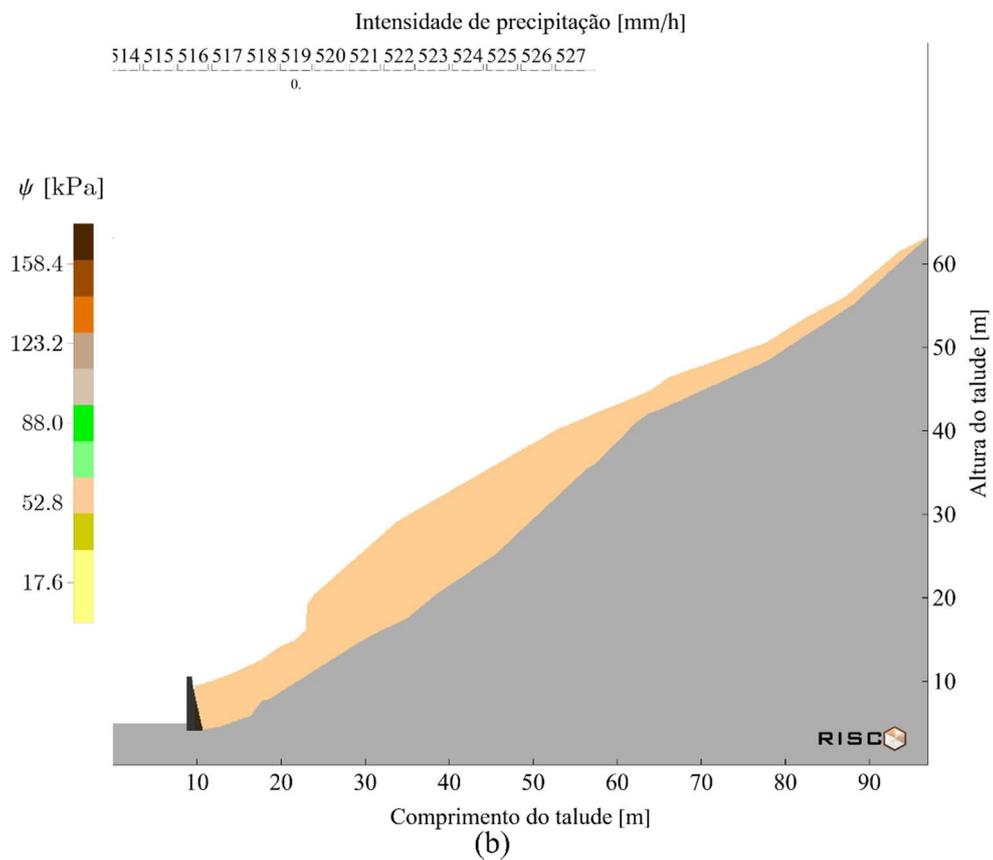
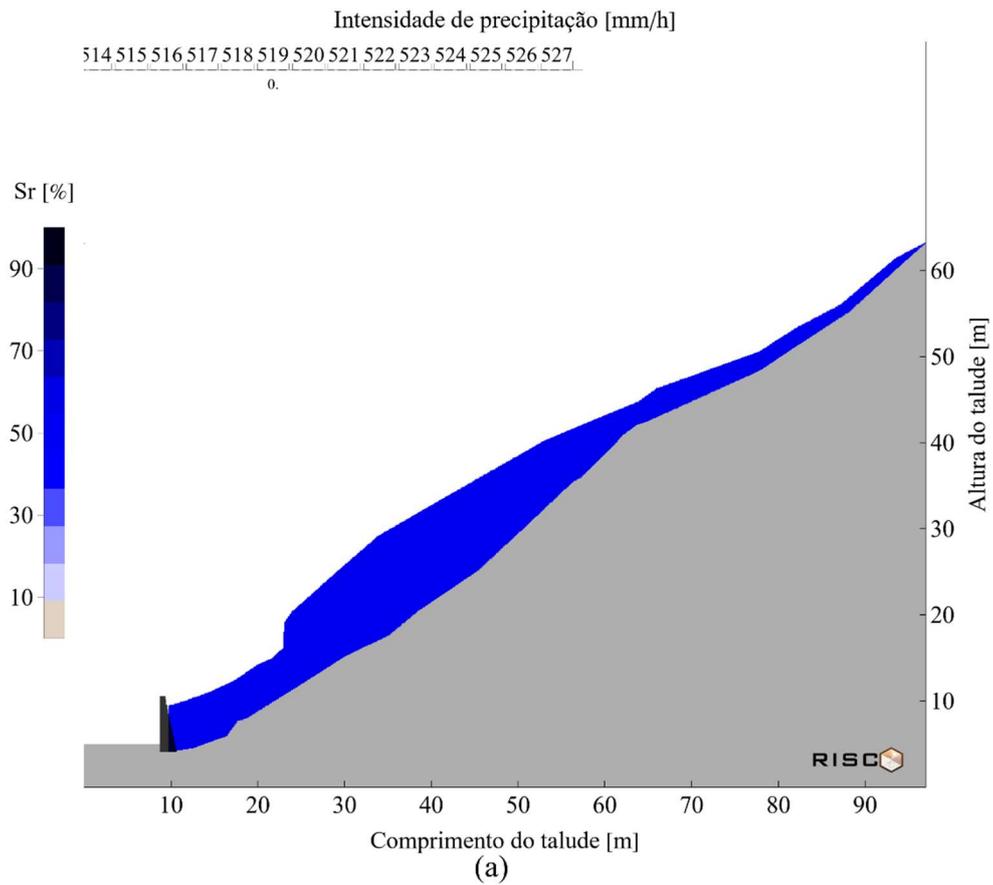


Figura 62. Perfis para a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. (a) grau de saturação e (b) sucção matricial. Imagem gerada pelo software RISCO.

O talude atinge, portanto, homoganeamente, uma saturação de 46%, correspondente a um teor de umidade volumétrica de 25%. Na Figura 62b, o perfil da sucção no momento da ruptura é também homogêneo, gerando poropressões negativas de 34 kPa. Nesta situação, o perfil de FS, contrário ao esperado, não se vê afetado drasticamente pelas mudanças de umidade no maciço, mostrando as mesmas regiões susceptíveis à ruptura das análises anteriores (Figura 63).

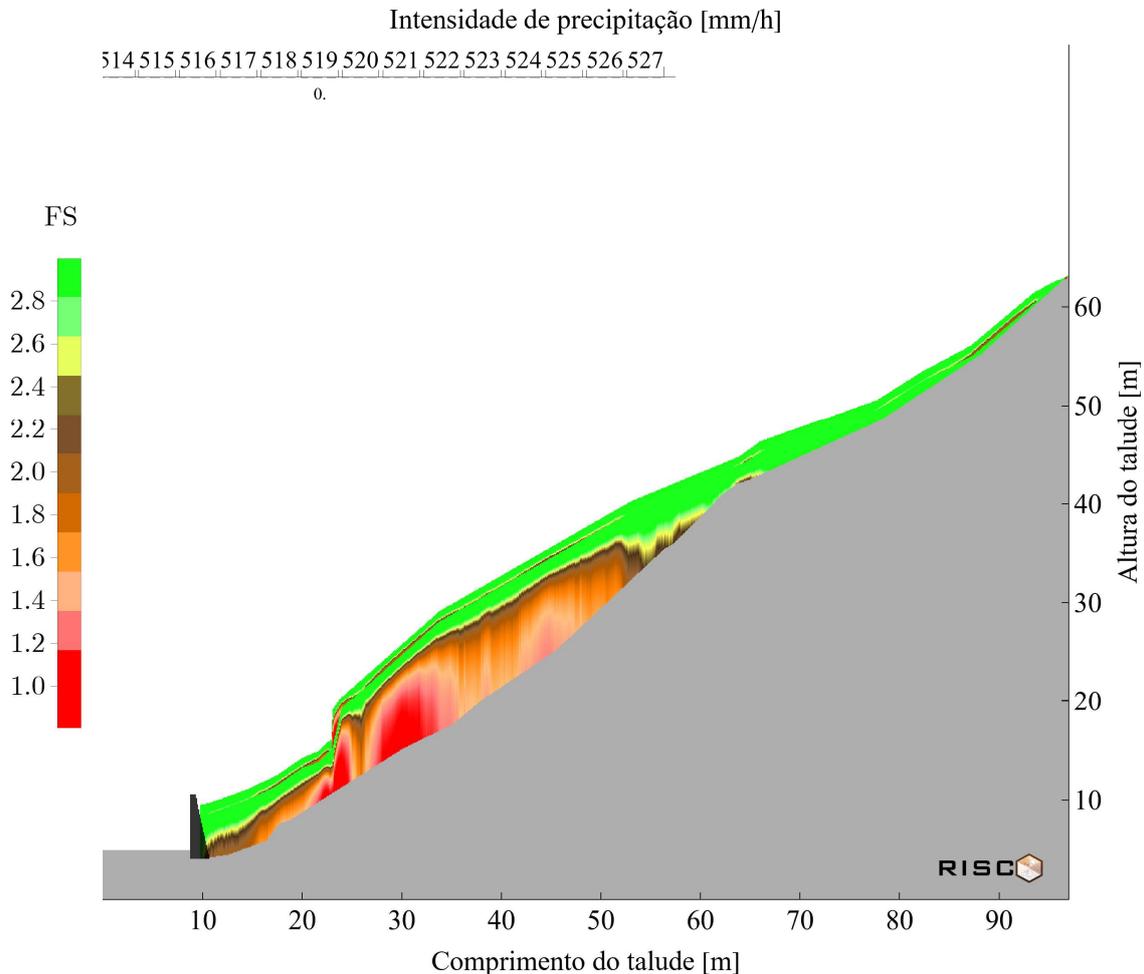


Figura 63. Perfil do FS do talude para a hora de análise 519, correspondente a precipitação com intensidade de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Analisando as correspondências dos indicadores de falha neste cenário, apresentadas na Figura 64, é observado que, embora o talude apresente uma estabilidade maior quando comparado com o cenário inicial (subcapítulo 6.4.1), o aumento da água na matriz do solo não favoreceu significativamente a estabilidade do talude, já que, para cenários anteriores com saturações menores (cenários 3, 4 e 5), a instabilidade é muito similar.

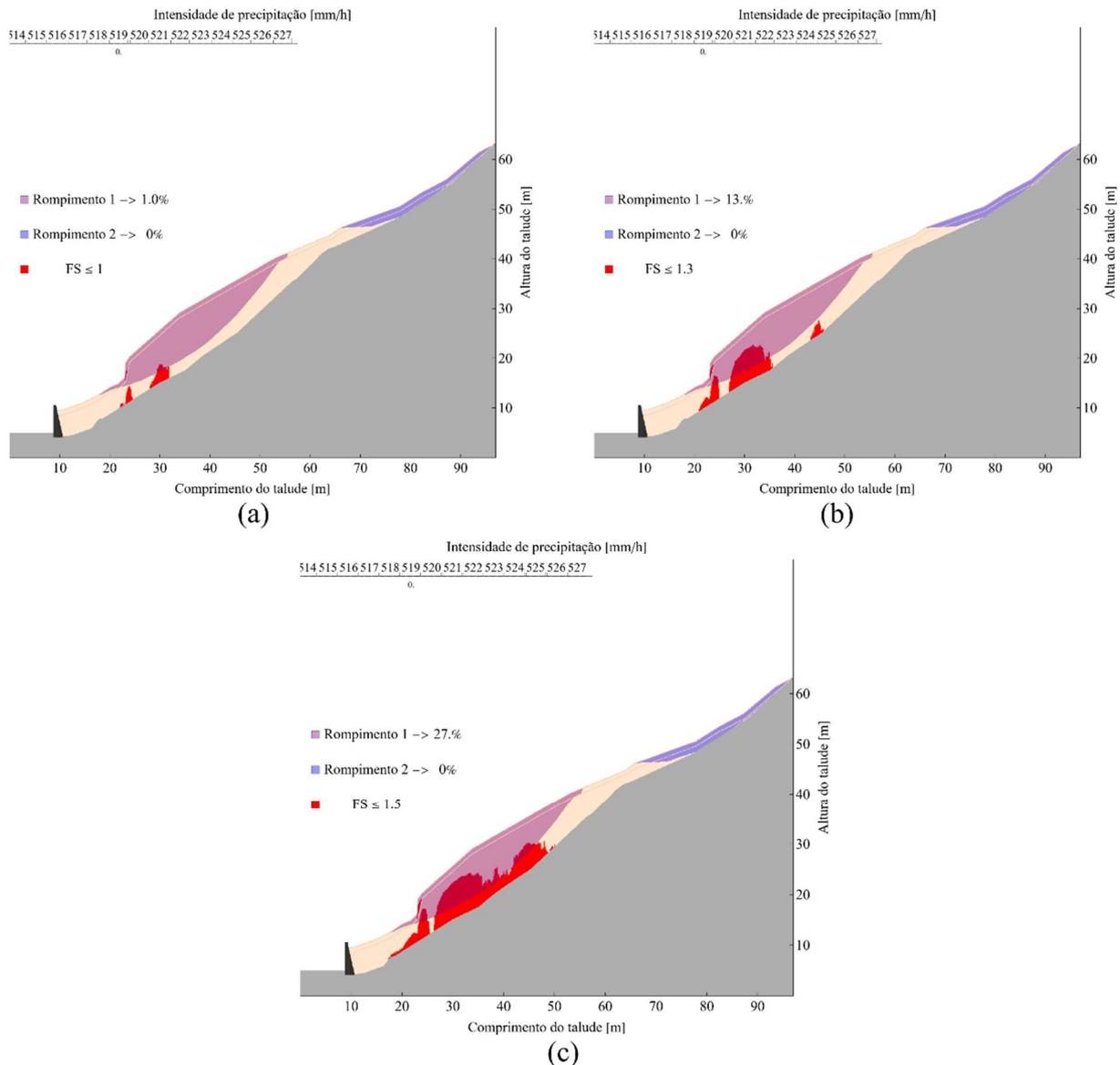


Figura 64. Correspondência da área movimentada pela falha do talude com a análise de estabilidade feita para o cenário 6 com uma intensidade de chuva de 0 mm/h. (a) $FS_c = 1$, (b) $FS_c = 1,3$ e (c) $FS_c = 1,5$. Imagem gerada pelo software RISCO.

É possível entender que, as chuvas analisadas aumentaram a saturação do talude, porém, não seriam as responsáveis diretas pela instabilidade da encosta, já que, desde o início, no estado seco, o talude apresenta uma região de plastificação ou pontos onde o FS é menor a 1. Este comportamento diverge do apresentado na pesquisa de Gerscovich (1994) onde, implementando o método de estabilidade de Bishop Simplificado, considerando os esforços verticais e os momentos para uma superfície bidimensional é atingido um valor mínimo de FS de 1,3.

Por outro lado, ambas pesquisas convergem nas análises de poropressão, onde, utilizando metodologias diferentes, encontram que, as chuvas dos 22 dias prévios a ruptura, não são suficientes para desenvolver poropressões positivas no maciço no momento prévio a ruptura. Essas análises são importantes, posto que, no levantamento de campo, foram identificadas zonas com acúmulos de água significativos, indicando uma saturação total nessas regiões. Isto indica, talvez, uma fonte diferente da água encontrada no talude, associando assim o evento de falha a alguma ação antrópica.

7.2. Módulo 5: perfis da probabilidade de falha não saturada e transiente

Neste módulo são apresentadas as análises feitas considerando as incertezas associadas aos parâmetros envolvidos no problema de instabilidade das encostas. Para isto, como foi explicado no subcapítulo 4.1, são transformados os momentos estatísticos da condutividade hidráulica para uma distribuição normal. Desta maneira, o modelo de fluxo não saturado e transiente para a análise probabilística é representado por:

$$\theta(z,t) = \theta_i + \left[\frac{V_i}{10^{E[K_s]_{\text{normal}}}} (\theta_s - \theta_s) - \theta_i \right] D(z,t) \quad (52)$$

Na análise da estabilidade das encostas não saturadas, como tem sido apresentado no decorrer desta pesquisa, conhecer a resposta transiente da estabilidade em função das mudanças do teor de umidade do solo, é relevante e importante para a compreensão das condições físicas e hidráulicas que conduzem as falhas nas encostas. Neste contexto, a pesquisa propõe também, a análise transiente da probabilidade de falha tendo em conta o índice de confiabilidade apresentado na Eq. (44) e na Eq. (45).

Assim, tendo a solução analítica para o FS transiente apresentado na Eq. (31), é possível definir a variância total transiente do FS como sendo:

$$V[\text{FS}(t,z)] = \sum \left(\frac{\partial \text{FS}(t,z)}{\partial x_i} \right)^2 V(x_i) \quad (53)$$

Substituindo a Eq.(53) e a Eq. (31) na Eq. (44), é definido o índice de confiabilidade transiente da encosta como apresentado na Eq. (54):

$$\beta'(t,z) = \frac{E[\text{FS}(t,z)] - \text{FS}_c}{\sqrt{V[\text{FS}(t,z)]}} \quad (54)$$

Conseqüentemente, é possível ter a probabilidade de ruptura transiente para o problema da estabilidade de encostas não saturadas como:

$$P_f(t, z) = P(FS \leq FS_c) = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{\beta'(t, z)}{\sqrt{2}} \right) \quad (55)$$

Para realizar as análises estocásticas da estabilidade, o software RISCO construiu as funções de distribuição de probabilidade das variáveis aleatórias para cada tipo de solo apresentadas na Figura 65 e na Figura 66, implementando as informações dos momentos estatísticos proporcionadas no Módulo 1. Para obter o desvio padrão (σ), é utilizada a relação existente entre o coeficiente de variação (CV) e a média estatística apresentada na seguinte equação:

$$\sigma = E[f(x)] \cdot CV \quad (56)$$

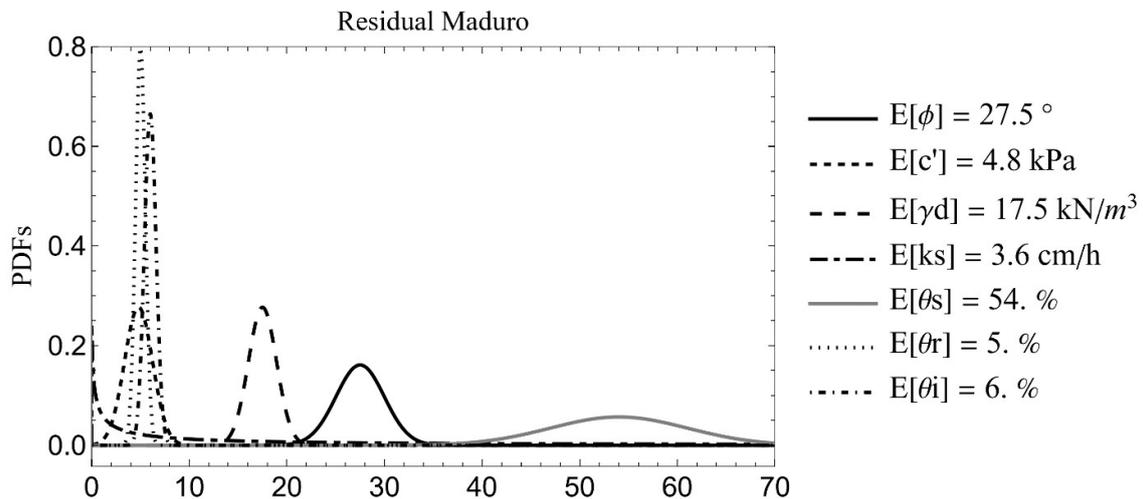


Figura 65. Função de distribuição de probabilidade dos parâmetros estocásticos da camada de solo Residual Maduro. Imagem gerada pelo software RISCO.

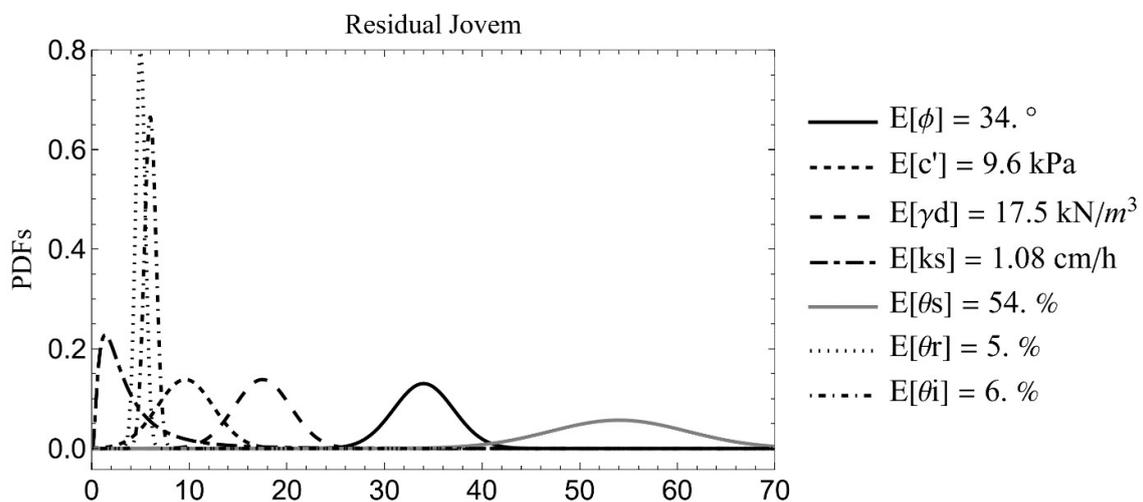


Figura 66. Função de distribuição de probabilidade dos parâmetros estocásticos da camada de solo Residual Jovem. Imagem gerada pelo software RISCO.

As análises probabilísticas são apresentadas, da mesma forma que no subcapítulo 6.4, para cada cenário de chuva com a finalidade de compreender as mudanças do talude em função do evento de precipitação. De igual maneira, as análises pontuais são feitas na coluna de solo escolhida previamente no subcapítulo 6.3, para quatro profundidades diferentes definidas na Tabela 19.

7.2.1. Cenário de chuva 1: P_f para a hora 1 com intensidade de precipitação de 0 mm/h

As análises da probabilidade de falha da encosta da Lagoa começam pelas análises paramétricas da resposta do FS para cada cenário de chuva quando, são modificadas as médias estatísticas correspondentes às variáveis aleatórias independentes. Assim, para este cenário, a Figura 67 e a Figura 68, apresentam as variações dos parâmetros para cada tipo de solo nas profundidades definidas previamente na Tabela 19.

A Figura 67e e a Figura 67g, correspondentes às variações da condutividade hidráulica saturada e às variações do teor de umidade volumétrica residual da camada de solo residual maduro, não influenciam na resposta do FS apresentada na Figura 67a. Neste cenário onde o talude se encontra no estado seco e não se tem um evento de precipitação, os parâmetros que mudam significativamente o fator de segurança são a coesão efetiva, e o peso específico do material, tendo melhor desempenho com uma coesão maior na profundidade de 5 cm e melhor desempenho para um peso específico menor na superfície da coluna e solo.

Analisando a influência da umidade inicial do talude na análise de estabilidade apresentada na Figura 67h é notório que, as mudanças de umidade correspondentes a valores maiores do θ_r , afetam positivamente a estabilidade da encosta pelas primeiras horas de análise, alcançando, em ambas as profundidades, um FS constante. Isto mostra o efeito das análises transientes, que consideram as variações do estado de umidade no tempo.

As análises correspondentes a camada de solo residual jovem, são apresentadas na Figura 68, onde vê-se, nos primeiros 5 cm da camada de solo, correspondentes a uma profundidade total da coluna de 1,15 m, o mesmo comportamento relatado na camada de solo residual maduro. Para a maior profundidade da coluna, porém, é observado que a instabilidade é iminente e não se vê influenciada pela variação de nenhum parâmetro. Isto pode indicar que,

nessa profundidade, a estabilidade da encosta pode estar sendo influenciada por alguma variável independente determinística que não está sendo considerada nas atuais análises estocásticas.

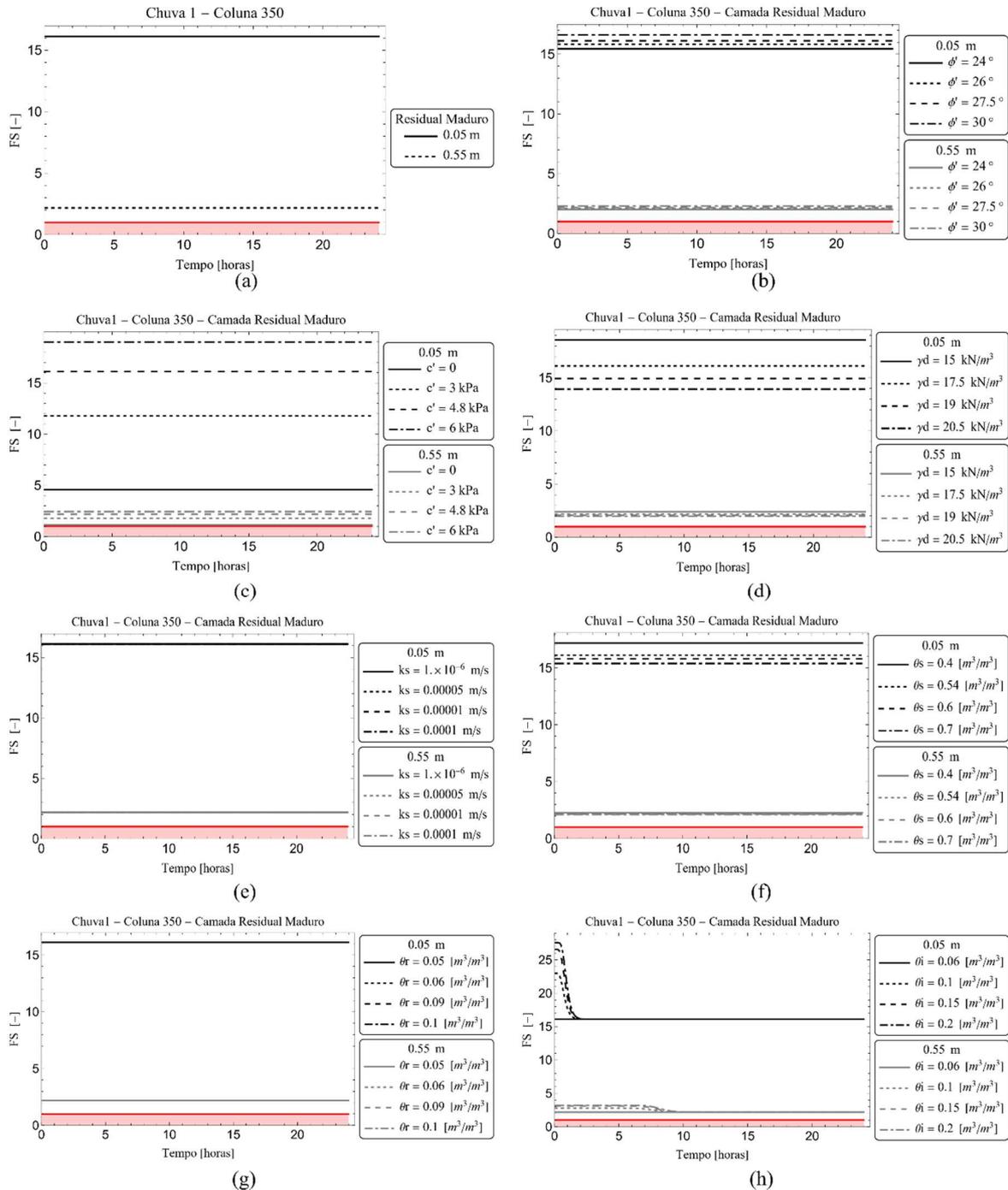


Figura 67. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a primeira hora de análise com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação da c' , (d) variação da γ_d , (e) variação da k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software

RISCO.

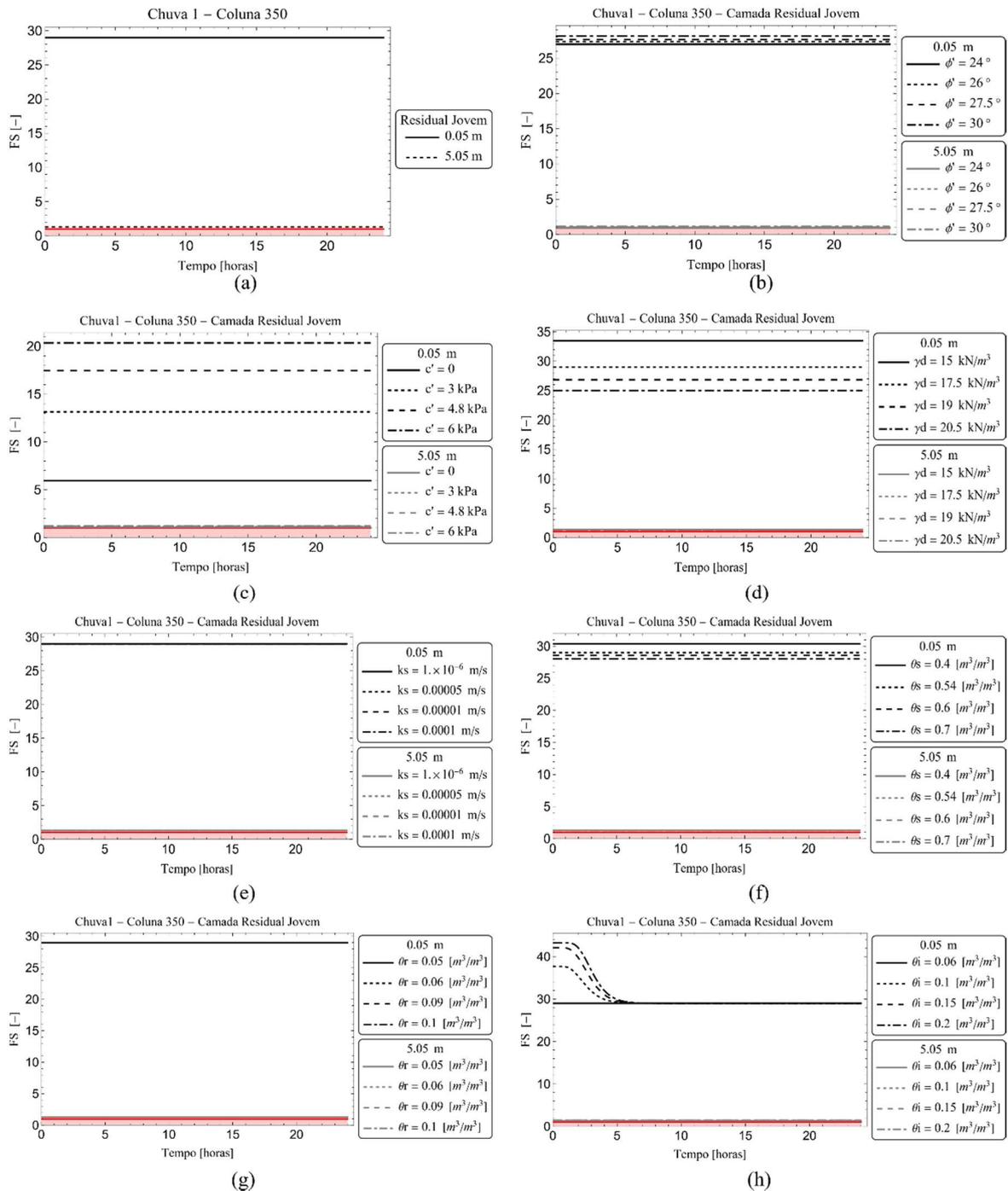


Figura 68. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a primeira hora de análise com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação da c' , (d) variação da γ_d , (e) variação da k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.

Após as análises paramétricas, o software RISCO realiza as análises de probabilidade implementando o método probabilístico FOSM seguindo a metodologia definida no subcapítulo 5.2.5. Na Figura 69, são apresentadas as funções de densidade de probabilidade e as funções de distribuição acumulada, para as quatro profundidades das análises pontuais, obtendo um desempenho desfavorável na maior profundidade analisada correspondente a 6,15 m (Figura 69h).

Outra abordagem possibilitada pelo FOSM, é a análise de sensibilidade das variáveis aleatórias. Nesta abordagem, é quantificada a contribuição individual de cada parâmetro na variância total da probabilidade de falha. Considerando que a variância (V) é uma medida de dispersão que indica a distância dos dados à média estatística, é relacionado então um valor maior de variância a maiores distâncias e menores valores de variância a menores distâncias. Esta análise permite ao usuário entender, para cada cenário particular, qual é o parâmetro que mais contribui na dispersão da estabilidade, podendo, em algumas situações ser responsáveis pelo aumentando da probabilidade de falha.

Deste modo, na Figura 70, é notório que, no estado seco, nas primeiras três profundidades, a maior contribuição na variância total do FS ($V(FS)$) é atribuída à coesão efetiva dos materiais, porém, para o ponto mais profundo a variância maior é contribuída pelo ângulo de atrito do solo residual jovem. Isto quer dizer que, a dispersão espacial destes dois parâmetros, tem um desvio padrão maior, requerendo, quando possível, uma maior amostra de dados para corroborar se a dispersão está racionada com a natureza do parâmetro ou com a falta de informação.

As análises paramétricas apresentadas na Figura 69 mostram-se diferentes, pois a umidade inicial não contribui na dispersão do problema, fato este que é corroborado com a PDF deste parâmetro apresentada na Figura 65 e na Figura 66, tendo uma função de distribuição normal mais fechada. Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos durante a análise FOSM para cada profundidade no cenário 1 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h.

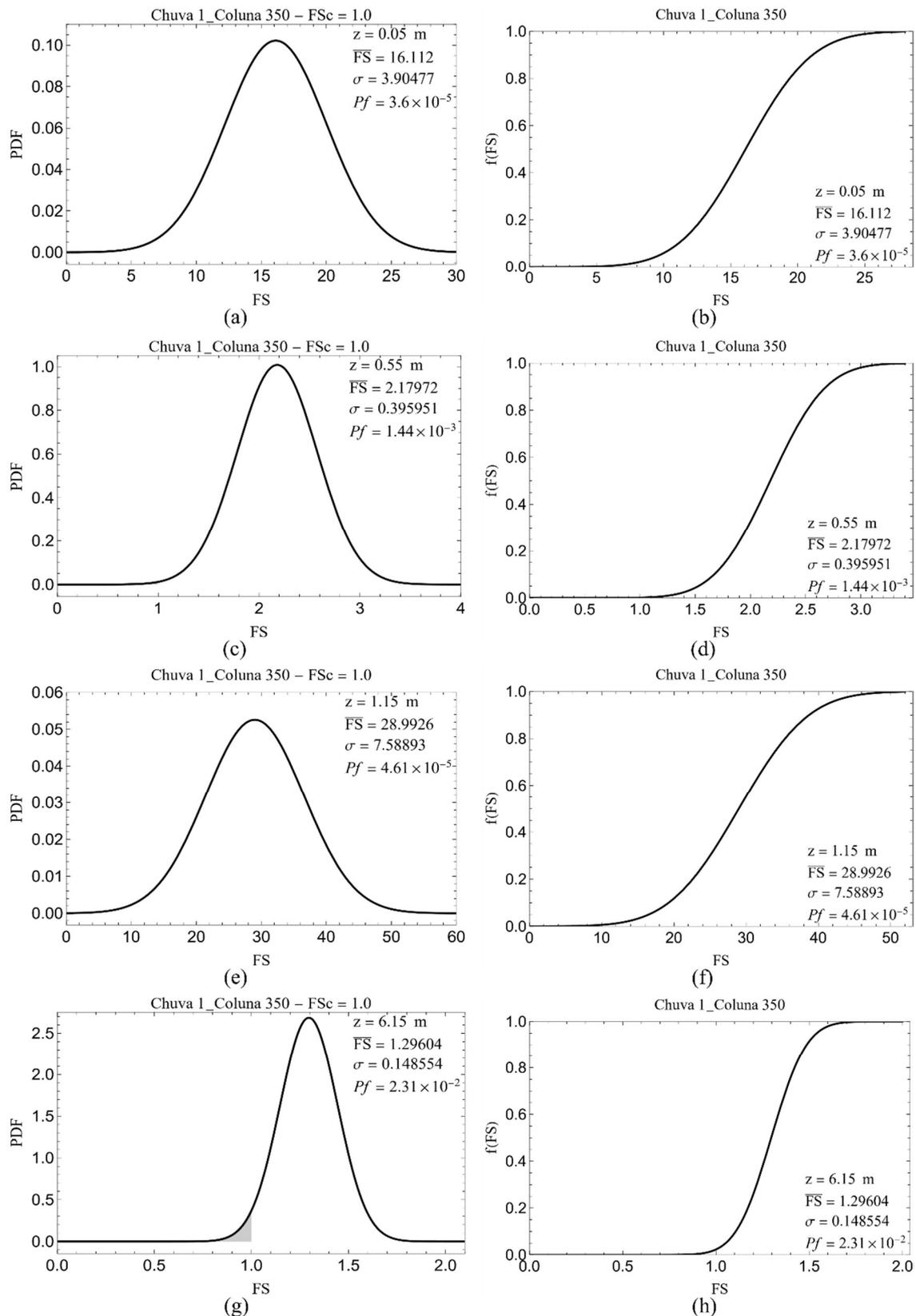


Figura 69. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.

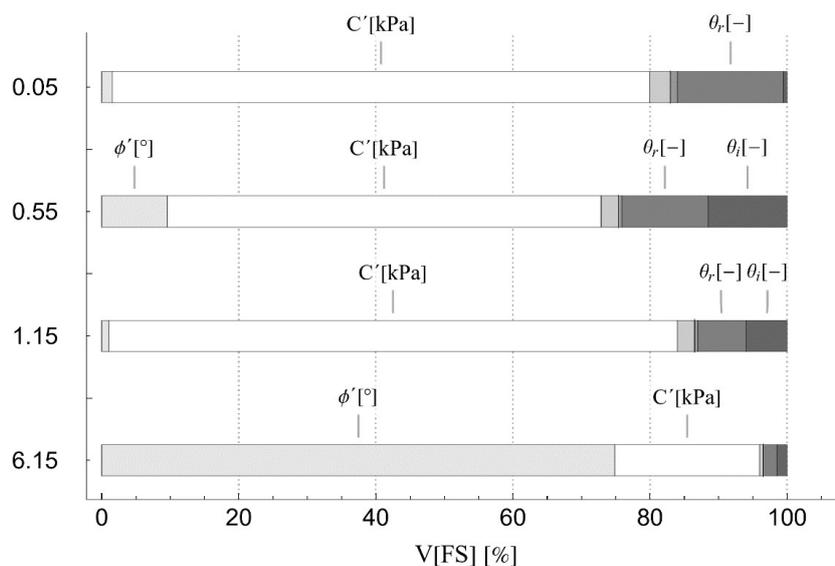


Figura 70. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Tabela 20. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a primeira hora de análise com intensidade de precipitação de 0 mm/h.

z [m]	0,05	0,55	1,15	6,15	
\overline{FS}	16,1	2,2	29	1,3	
σ	3,9	0,39	7,6	0,15	
$p(FS \leq 1)$ [%]	$3,6 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-2}$	
θ [m^3/m^3]	0,06	0,06	0,06	0,06	
ψ [kPa]	149,05	149,05	149,05	149,05	
Contribuição [%]	ϕ' [°]	1,6	9,6	0,9	74,6
	C' [kPa]	78,4	63,0	83,0	21,2
	γ_d [kN/ m^3]	3,0	2,4	2,6	0,7
	k_s [m/s]	0,0	0,0	0,0	0,0
	θ_s [m^3/m^3]	0,9	0,7	0,4	0,10
	θ_r [m^3/m^3]	15,6	12,6	6,9	1,8
	θ_i [m^3/m^3]	0,5	11,7	6,1	1,6

Seguindo a informação dos índices de desempenho da probabilidade de falha apresentada na Tabela 10, foram definidas três faixas de desempenho representadas por três cores

diferentes, para facilitar a visualização do perfil da probabilidade de falha associada aos eventos de precipitação:

Tabela 21. Faixas de desempenho da probabilidade de falha esperada.

Desempenho Bom	Desempenho Mediano	Desempenho Insatisfatório
$P(FS \leq FS_c) \leq 3 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-7} \leq P(FS \leq FS_c) \leq 2,5 \times 10^{-2}$	$P(FS \leq FS_c) \geq 2,5 \times 10^{-2}$

Na Figura 71, o perfil da probabilidade de falha no estado seco da encosta da lagoa, acusa, como era esperado, uma região com desempenho insatisfatório. Esta região, se comparada com as análises de estabilidade apresentadas no subcapítulo 6.5.1, é maior. Isso evidenciando uma probabilidade maior de ruptura na região perto da crista do talude para um indicador de falha de 1.

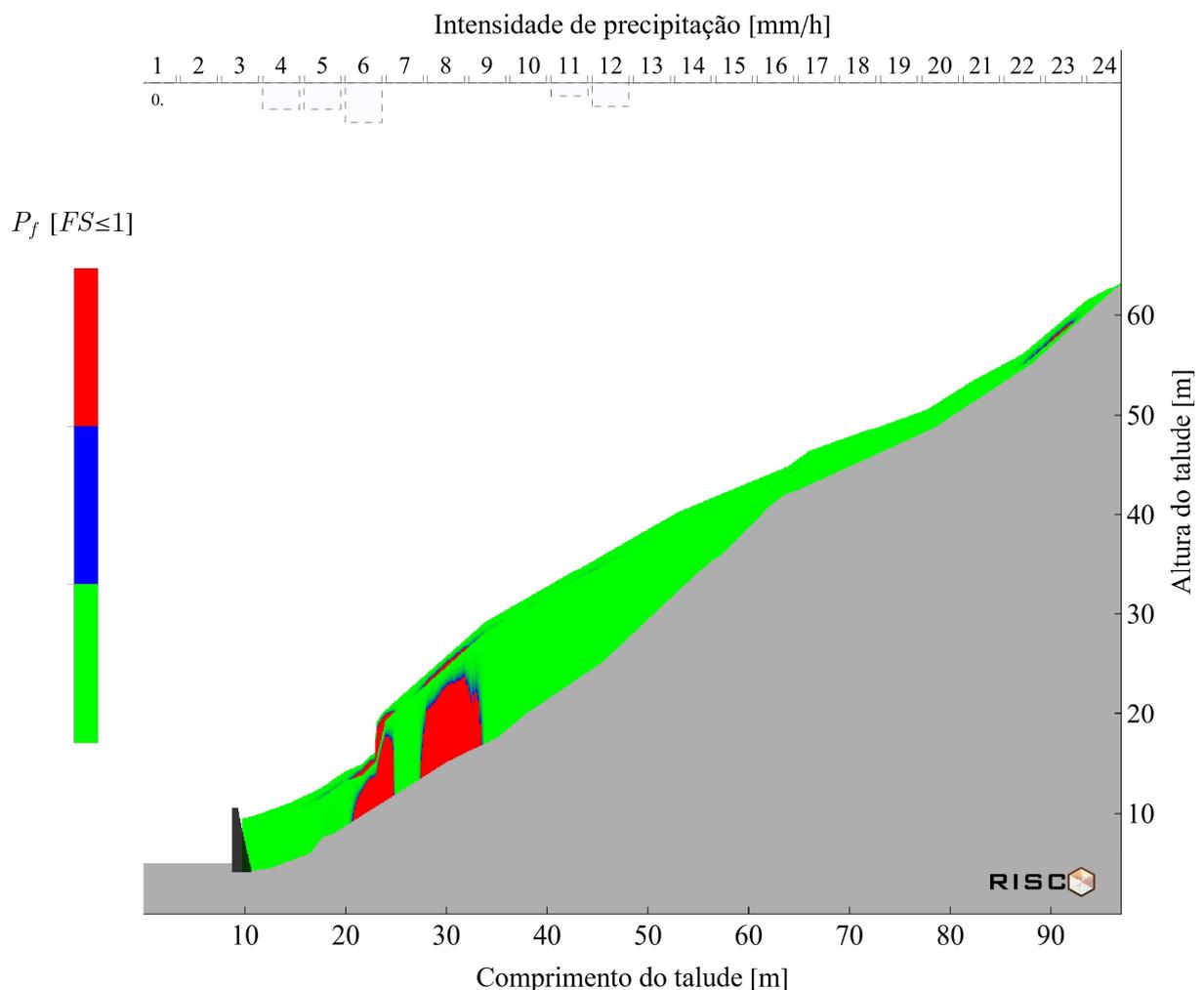


Figura 71. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a primeira hora de análise com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.2.2. Cenário de chuva 2: P_f para a hora 4 com intensidade de precipitação de 1 mm/h

Neste cenário, com o início das chuvas, observa-se uma melhoria na estabilidade da encosta na profundidade da camada residual madura como é apresentado na Figura 72a. Nesta situação, a variação de todos os parâmetros influencia na resposta do FS, mostrando claramente, como a presença da água no meio poroso é a responsável direta das alterações do comportamento dos materiais. Nas primeiras duas profundidades de análise, em função do tempo, o c' e o γ_d continuam influenciando no desempenho do FS, porém, o ϕ' , só altera a estabilidade, quando o teor de umidade volumétrica se estabiliza no tempo para ambas profundidades. É importante ressaltar que, para ambas profundidades, em nenhum caso da análise paramétrica, é obtida a falha.

Diferente do cenário inicial, os parâmetros hidráulicos como o k_s , tem uma melhor resposta à estabilidade, mostrando que, para maiores velocidades de percolação, a água contida nos poros, favorecem o desempenho do FS, fazendo nesses pontos, o talude mais estável. Este comportamento é igual ao apresentado para o θ_i e para o θ_s , onde, nos cenários com maior água, o material aumenta a sua resistência ao cisalhamento. Isto já foi abordado anteriormente, corroborando uma vez mais que o estado seco pode, sim, representar uma situação desfavorável à estabilidade do talude.

Para a camada de solo residual jovem, o comportamento continua sendo o mesmo ao apresentado na Figura 68. Isto se deve ao fato de que a chuva, por ser de uma intensidade baixa, não atinge profundidades superiores a aproximadamente 1m.

Na Figura 74, as análises correspondentes à probabilidade de falha, acusam instabilidade na última profundidade análise, análogo à análise anterior. Porém, nas outras profundidades, a probabilidade de rompimento diminui, tendo um melhor índice de desempenho.

Mesmo que, a análise paramétrica evidencie uma influência dos parâmetros hidráulicos na resposta do FS, a análise de sensibilidade, apresentada na Figura 75, evidencia que, na dispersão da função de densidade de probabilidade do FS, os parâmetros que mais contribuem na $V(FS)$ são a coesão e o ângulo de atrito, da mesma maneira que acontece no cenário 1. Na Tabela 22, são apresentados os resultados obtidos durante a análise FOSM para cada profundidade no cenário 2 com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h.

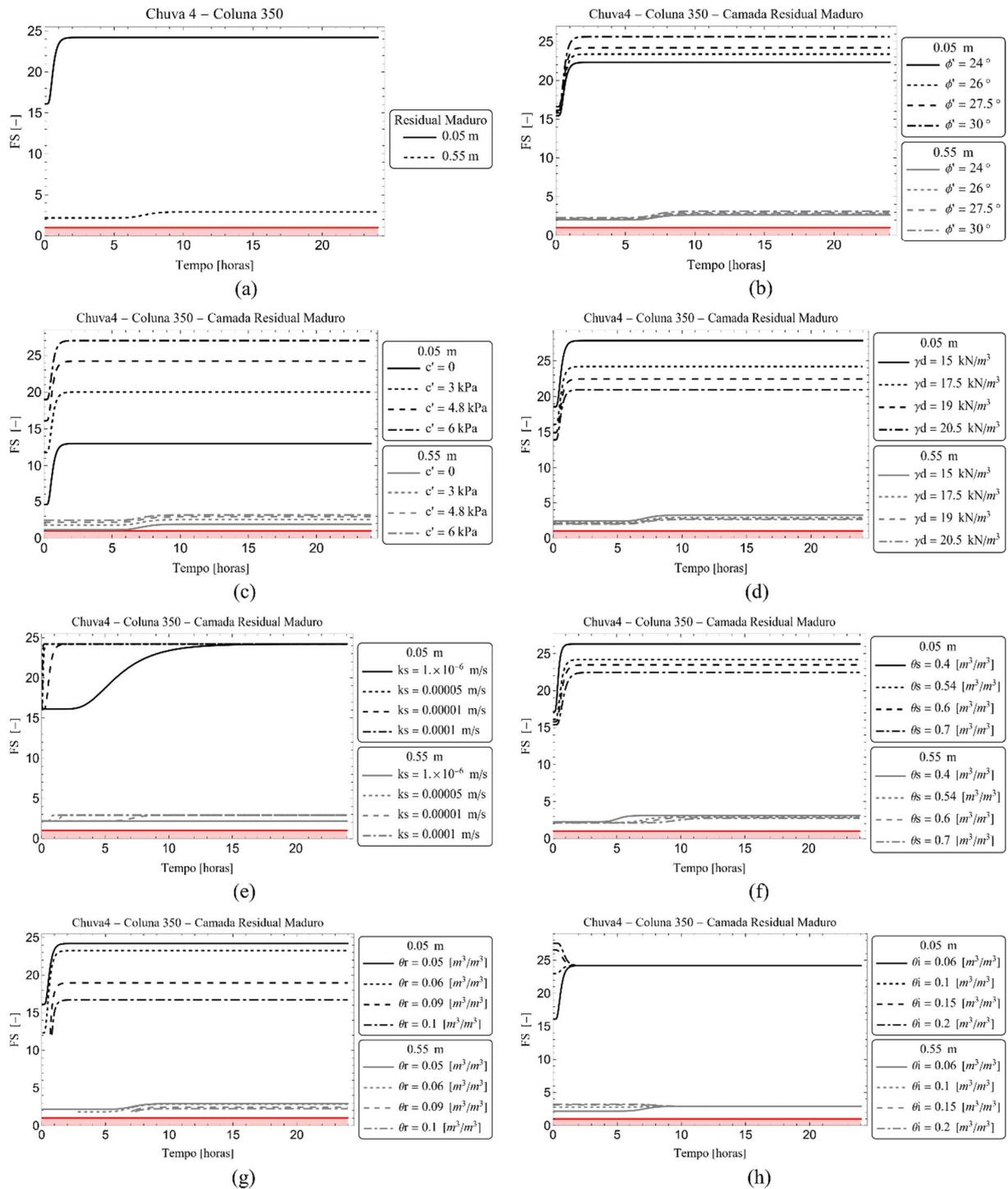


Figura 72. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a quarta hora de análise com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação da γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software

RISCO.

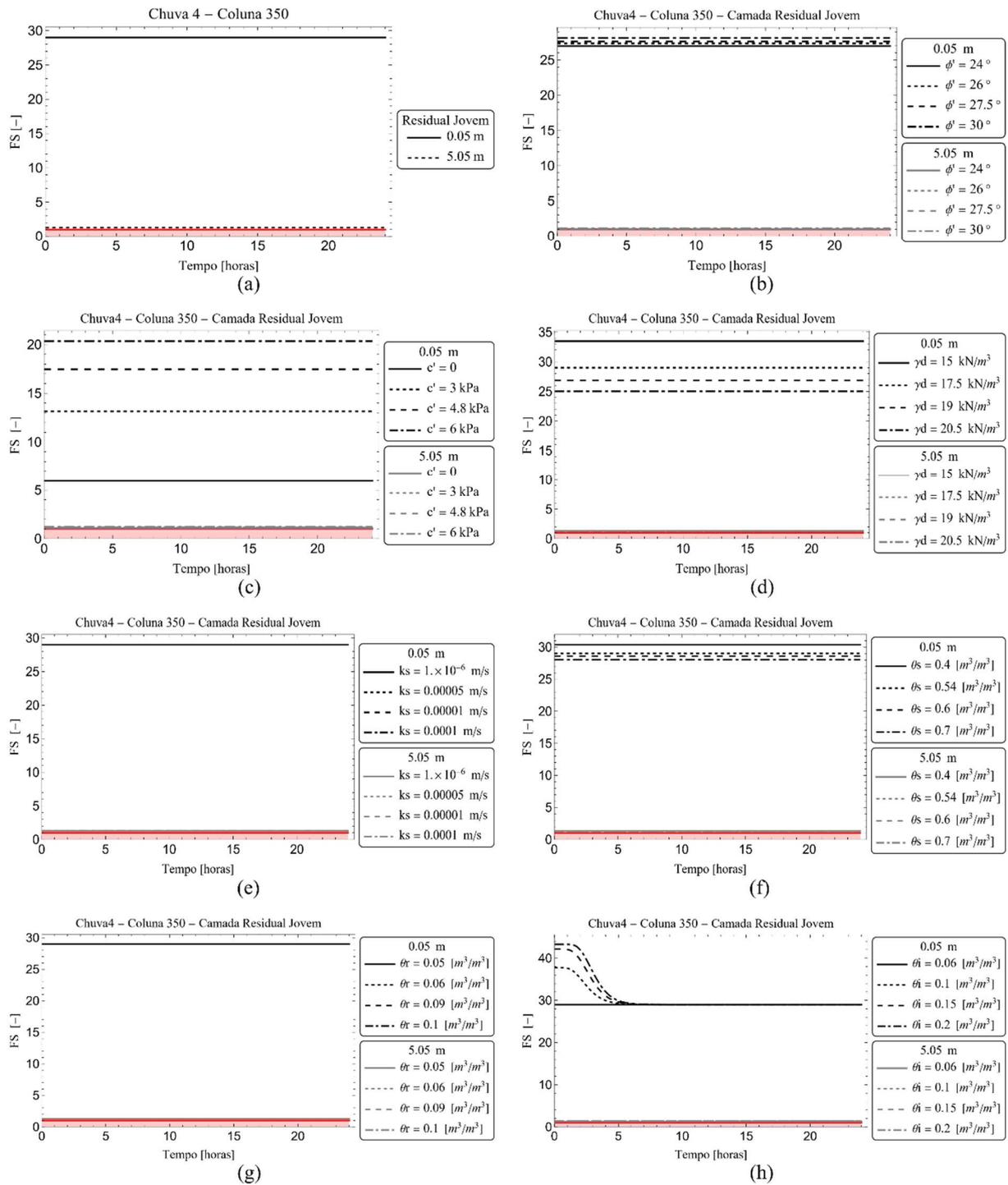


Figura 73. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a quarta hora de análise com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação da γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.

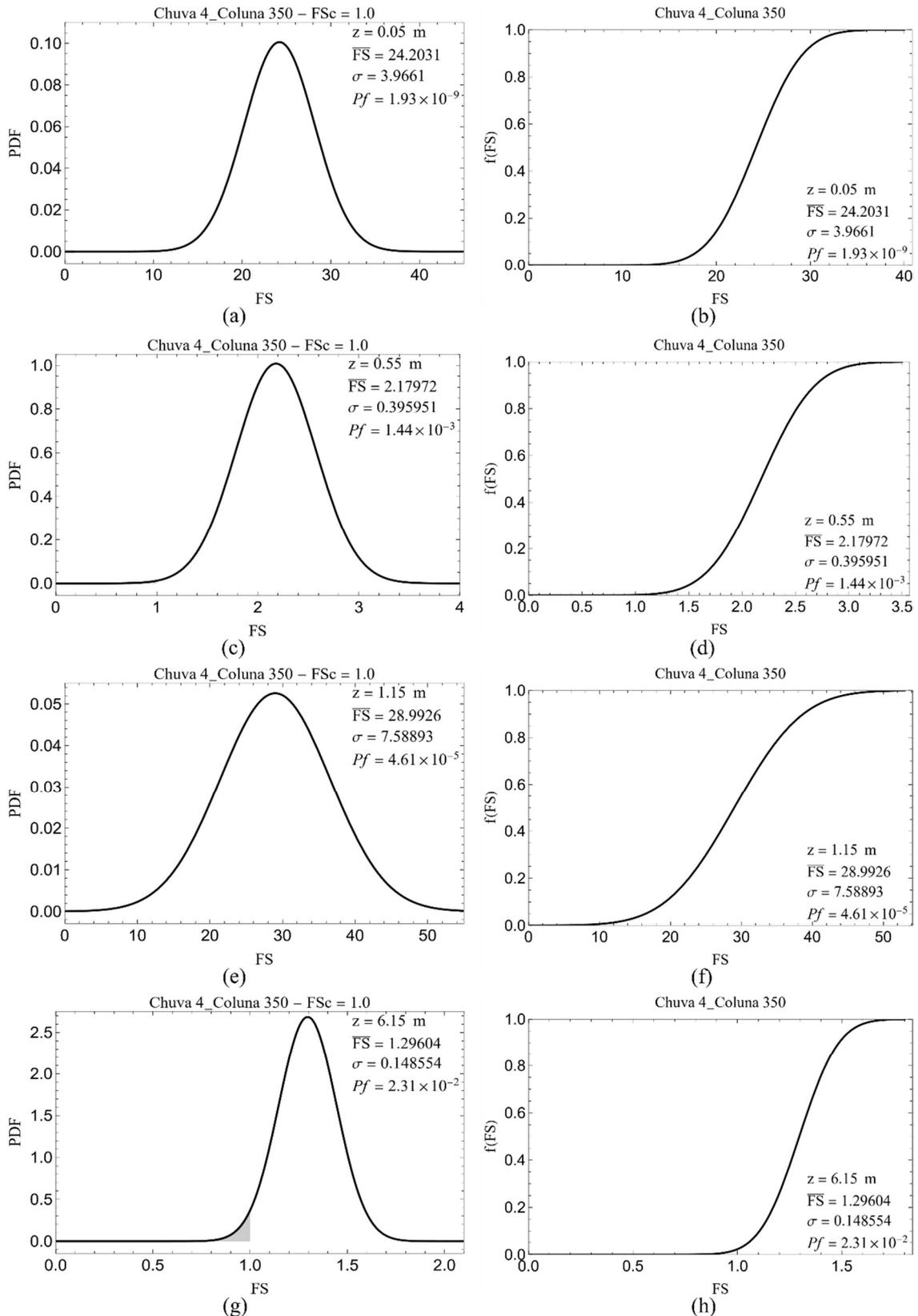


Figura 74. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.

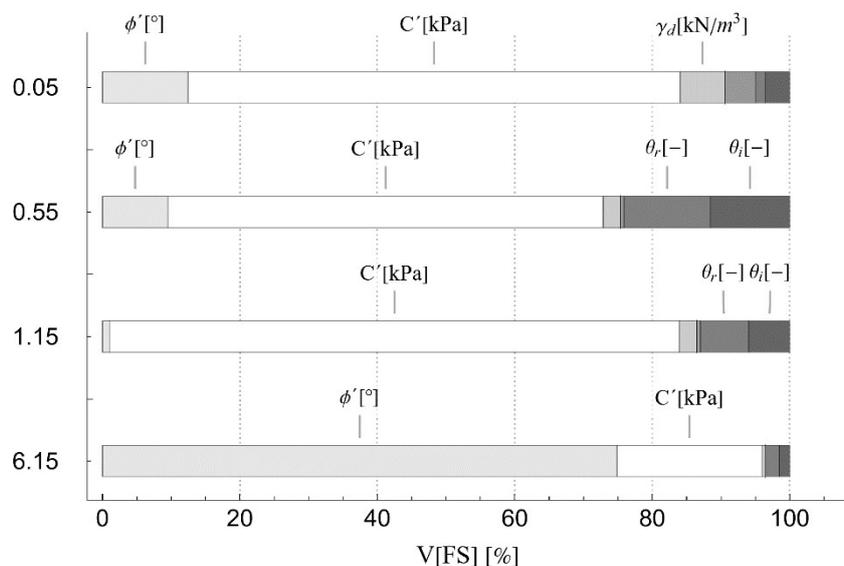


Figura 75. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Tabela 22. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a quarta hora de análise com intensidade de precipitação de 1 mm/h.

z [m]		0,05	0,55	1,15	6,15
\overline{FS}		24,2	2,2	29,0	1,3
σ		4,0	0,40	7,6	0,15
$p(FS \leq 1)$ [%]		$1,9 \times 10^{-9}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-2}$
θ [m ³ /m ³]		0,11	0,06	0,06	0,06
ψ [kPa]		78,9	148,9	146,7	149,05
Contribuição [%]	ϕ' [°]	12,6	9,6	0,9	74,6
	C' [kPa]	71,8	63,0	83,0	21,2
	γ_d [kN/m ³]	6,4	2,4	2,6	0,7
	k_s [m/s]	0,0	0,0	0,0	0,0
	θ_s [m ³ /m ³]	4,6	0,73	0,4	0,1
	θ_r [m ³ /m ³]	1,3	12,6	6,9	1,8
	θ_i [m ³ /m ³]	3,3	11,7	6,1	1,6

Na Figura 76, o perfil da probabilidade de falha no início das precipitações, é similar ao perfil do estado seco da encosta da Lagoa, mostrando que, embora a água comece a alterar os

índices de desempenho da estabilidade e da probabilidade de falha da encosta, não é suficiente para que o perfil mude a distribuição das regiões com bom e baixo desempenho.

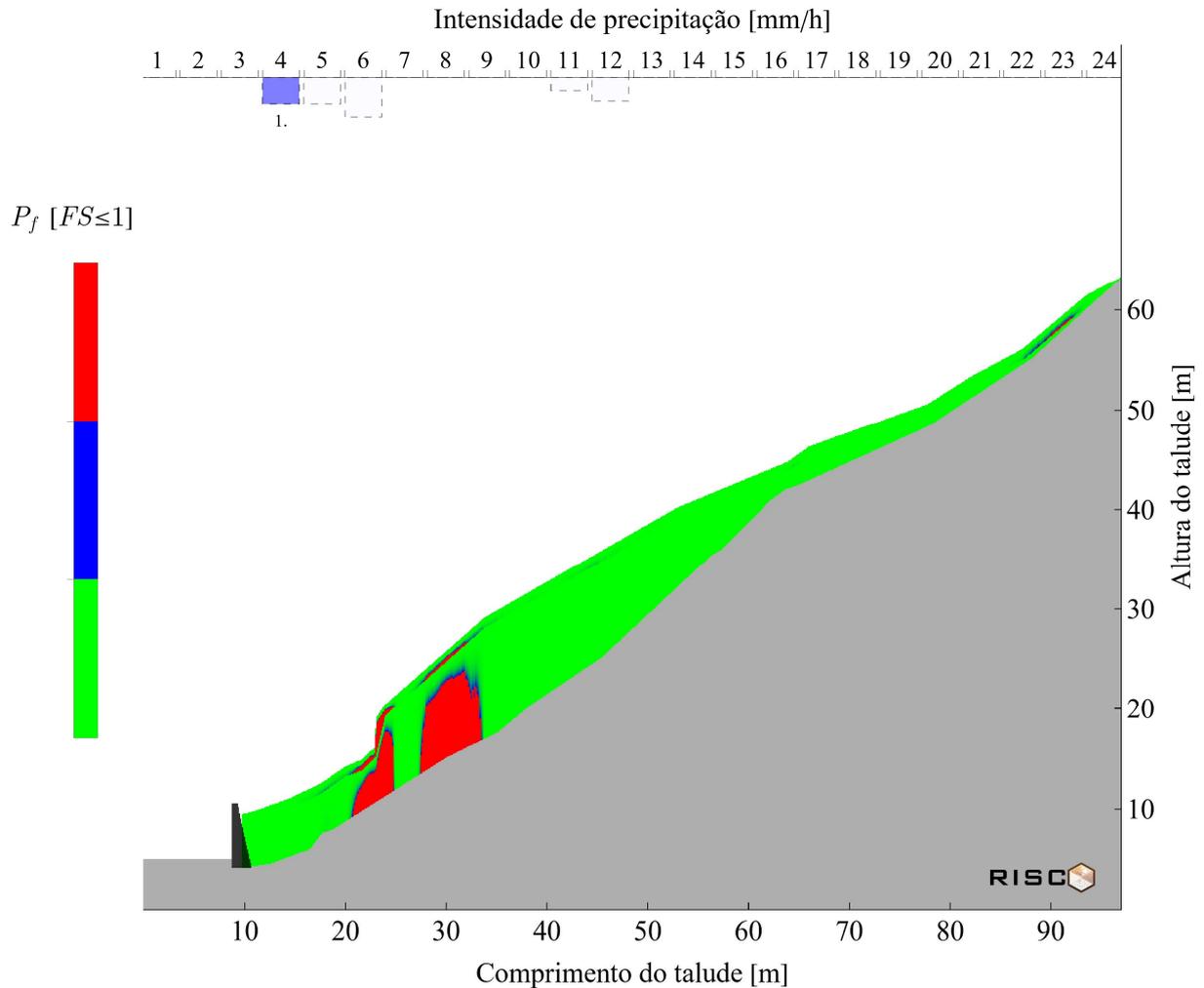


Figura 76. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a quarta hora de análise com uma intensidade de precipitação de 1 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.2.3. Cenário de chuva 3: P_f para a hora 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h

Neste cenário, as análises consideram um maior histórico de chuvas, alterando a distribuição da água no interior do maciço. Mesmo assim, a análise paramétrica da camada superficial não indica um cenário onde a variação dos parâmetros gere instabilidade (Figura 77). O mesmo comportamento é identificado na análise paramétrica da camada residual jovem apresentada na Figura 78, onde, a instabilidade da maior profundidade analisada, não está associada a variação paramétrica. Os resultados do FOSM da análise pontual (Figura 79), não mostram uma variação significativa, indicando, inicialmente, que o talude continua com uma distribuição de probabilidade semelhante ao cenário inicial.

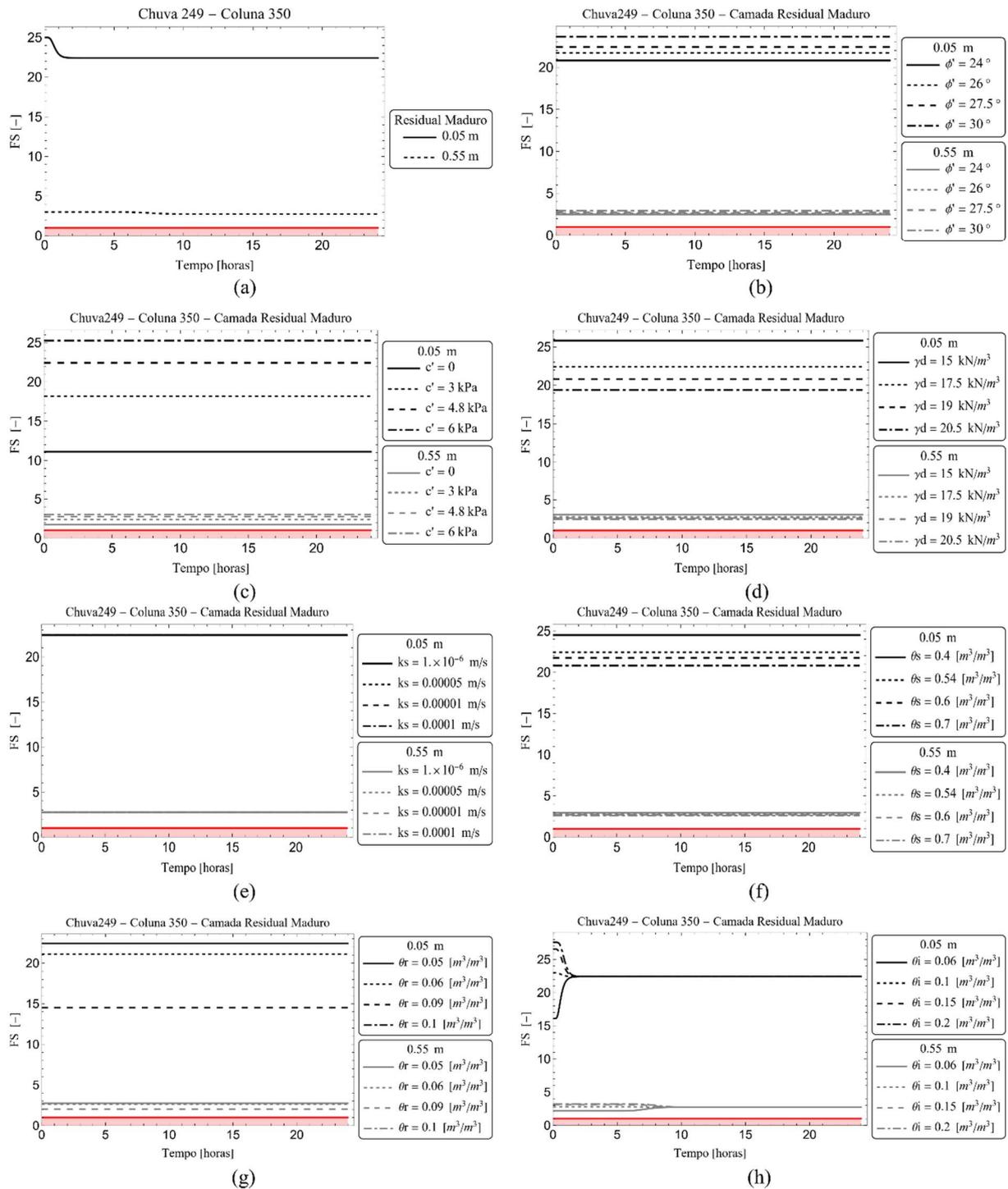


Figura 77. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 249 com uma intensidade de precipitação de 9 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software

RISCO.

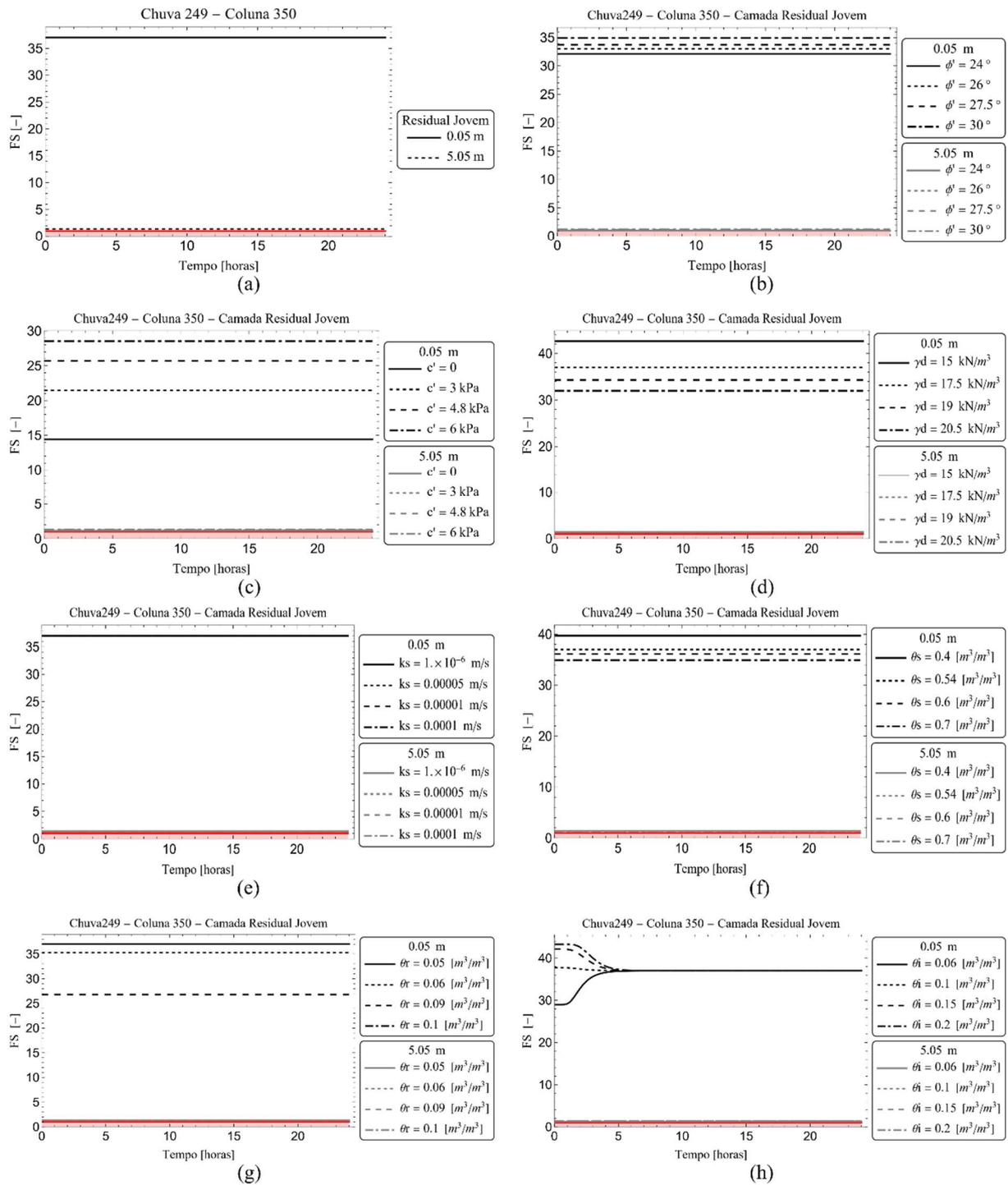


Figura 78. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 249 com uma intensidade de precipitação de 9 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software

RISCO.

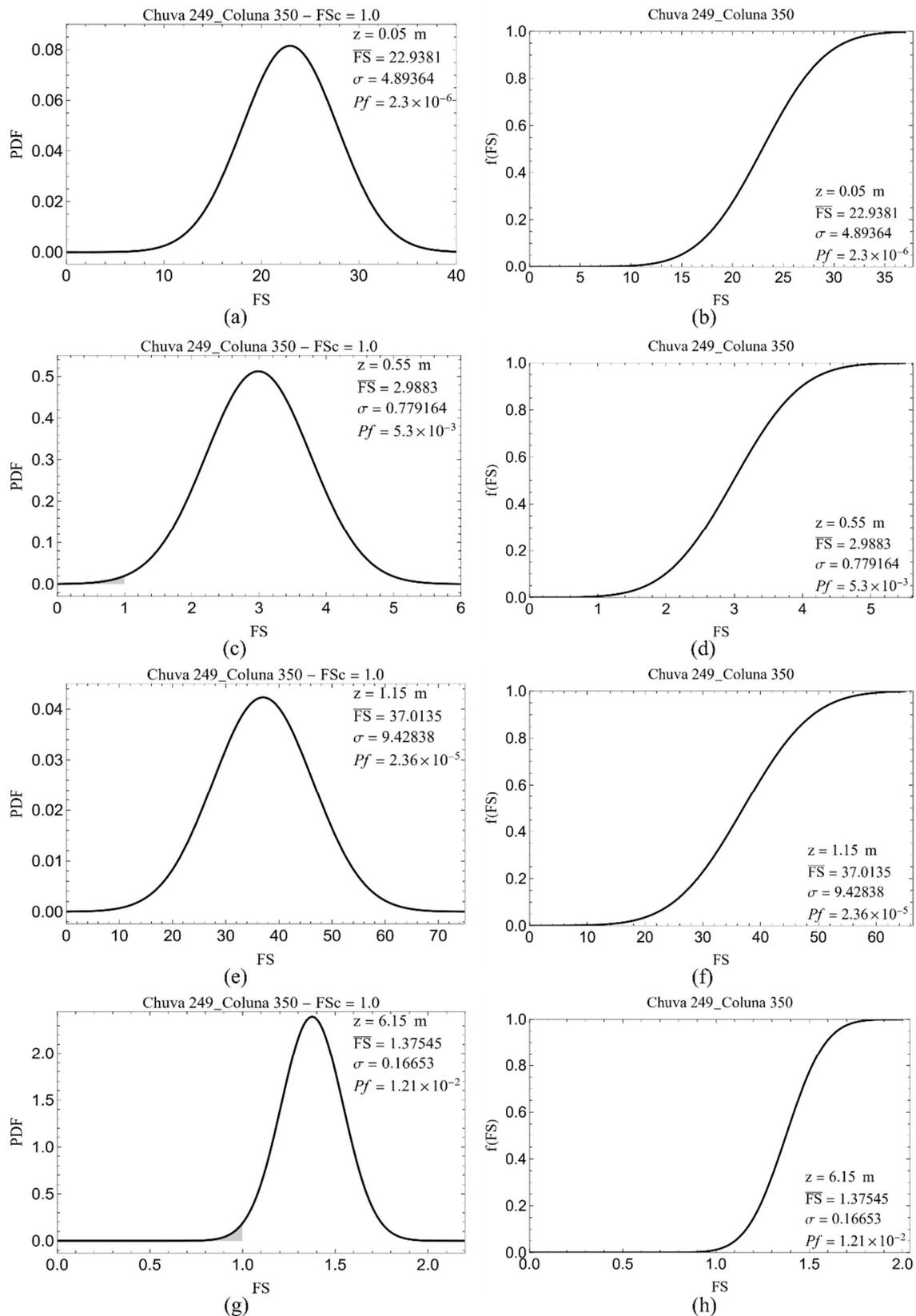


Figura 79. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.

A análise de sensibilidade, apresentada na Figura 80, é muito mais clara, comparada com a análise paramétrica, e mostra que, neste caso, como era esperado, um parâmetro associado à presença da água no talude, o que mais contribui na variância total.

Chuva 249_Coluna 350

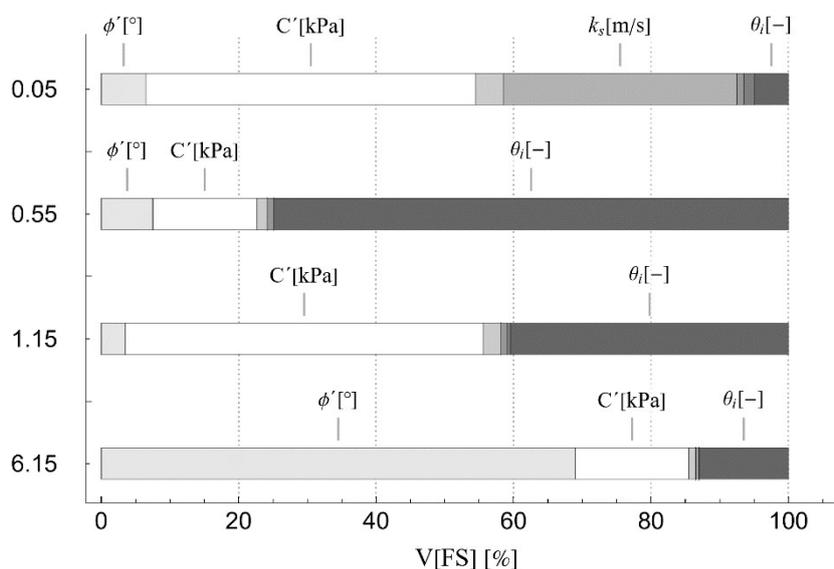


Figura 80. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Tabela 23. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 249 com intensidade de precipitação de 9 mm/h.

z [m]	0,05	0,55	1,15	6,15	
\overline{FS}	22,9	3,0	37,0	1,4	
σ	4,9	0,8	9,4	0,2	
$p(FS \leq 1)$ [%]	$2,3 \times 10^{-6}$	$5,3 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-2}$	
θ [m^3/m^3]	0,12	0,12	0,10	0,10	
ψ [kPa]	91,21	91,21	73,18	73,37	
Contribuição [%]	ϕ' [°]	6,6	7,5	3,4	69,0
	C' [kPa]	47,8	15,2	51,7	16,2
	γ_d [kN/m^3]	3,8	1,4	2,7	0,9
	k_s [m/s]	33,8	0,0	0,0	0,0
	θ_s [m^3/m^3]	1,2	0,9	1,2	0,4
	θ_r [m^3/m^3]	1,5	0,2	0,7	0,2
	θ_i [m^3/m^3]	5,2	74,6	40,1	13,2

Na Figura 81, é evidente que a dispersão que a umidade inicial fornece, na avaliação da estabilidade, é refletida diretamente na probabilidade de falha. Isso mostra que, em quase todo o perfil, na camada superficial, o desempenho é insatisfatório, podendo-se prever neste cenário uma possível ruptura translacional definida pelo contato dos dois tipos de material.

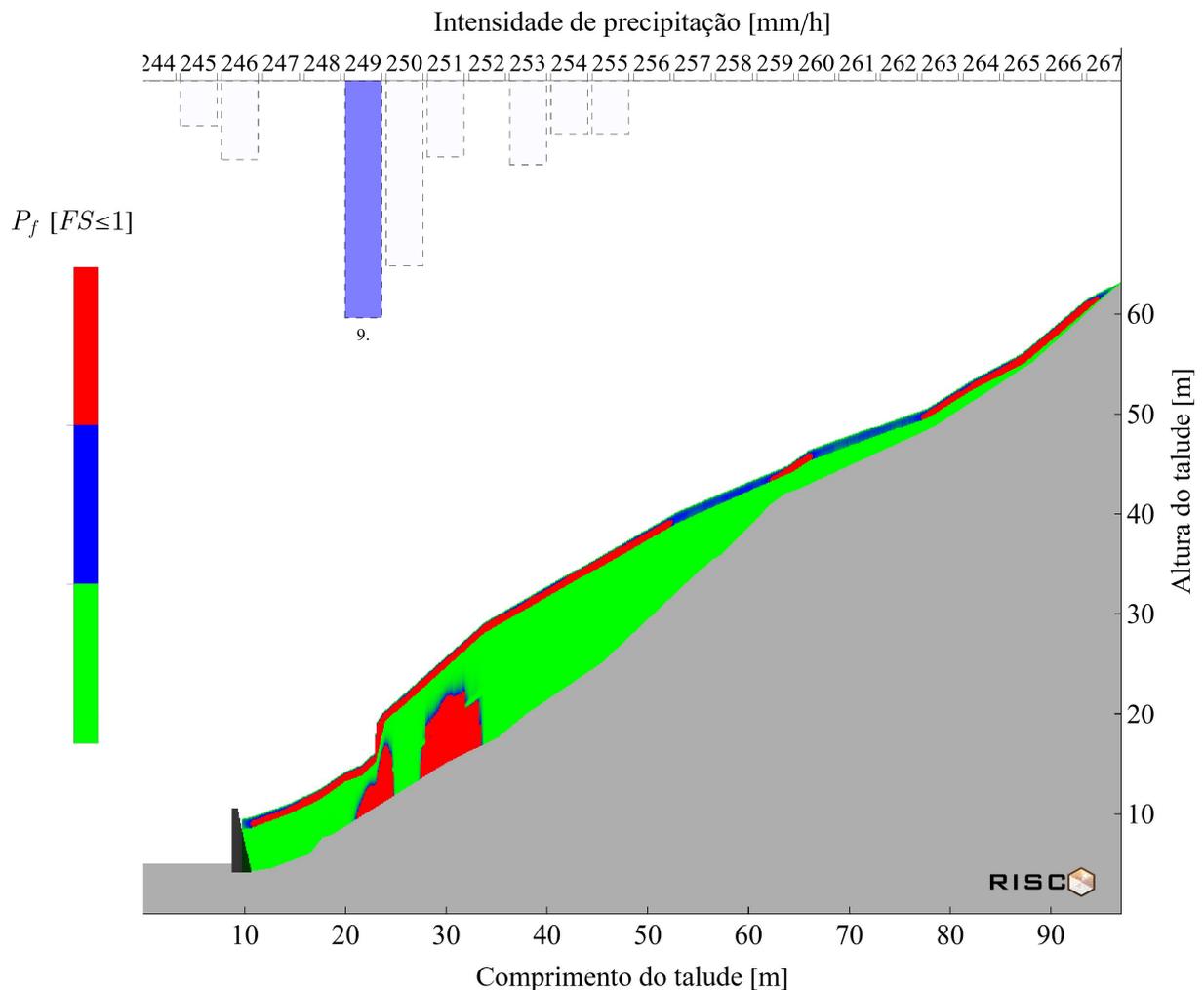


Figura 81. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 249 com uma intensidade de precipitação de 9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.2.4. Cenário de chuva 4: P_f para a hora 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h

As análises paramétricas correspondentes ao cenário 4, onde não se tem registro de precipitação, apresentam um comportamento similar ao cenário inicial, onde as variações mais significativas, porém não críticas, estão relacionadas com a variação da umidade inicial definida para as análises (Figura 82 e Figura 83). O mesmo acontece com o FOSM aplicado à coluna 350, apresentando um comportamento similar ao cenário 1, com instabilidade evidente na maior profundidade analisada (Figura 84).

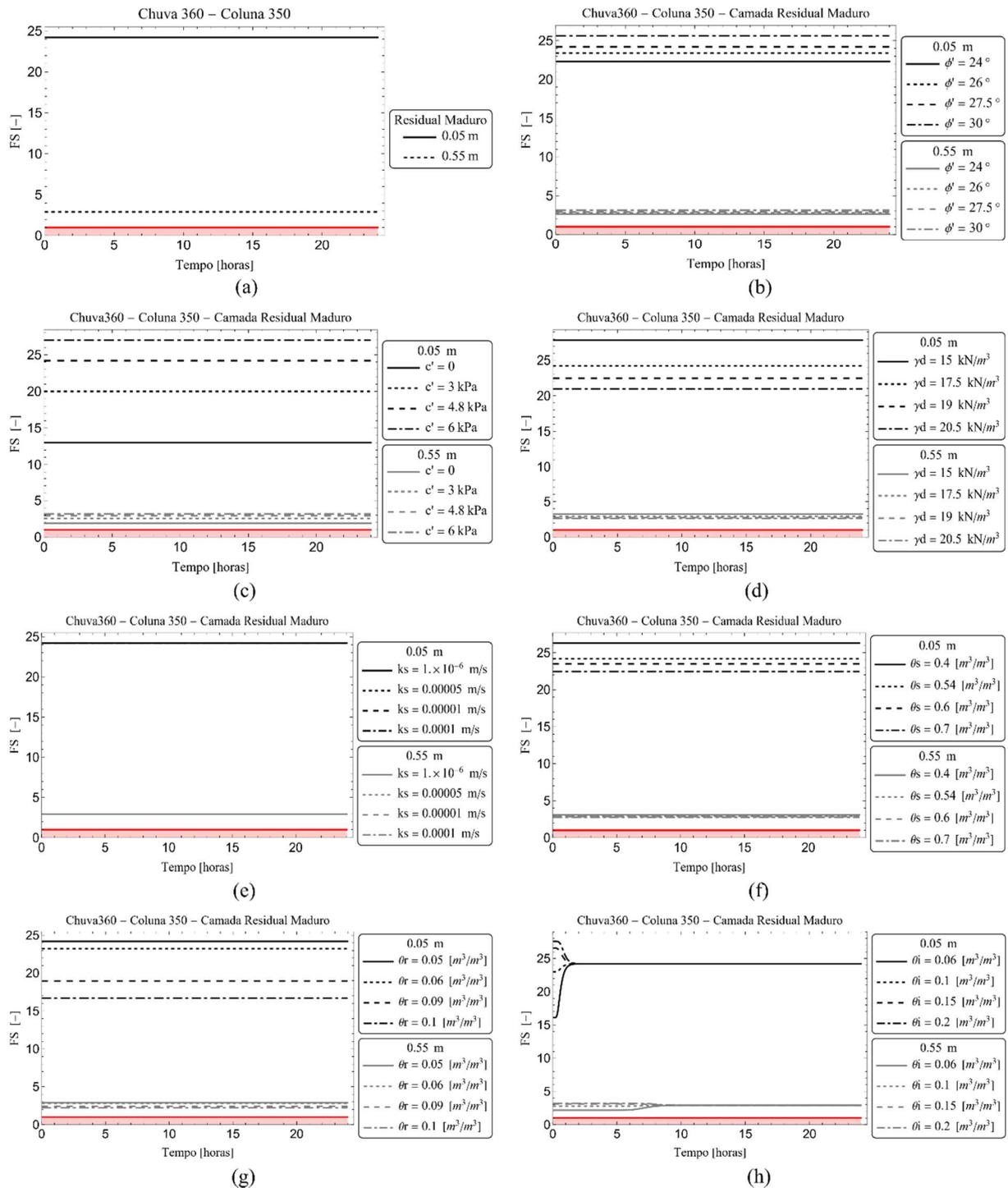


Figura 82. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 360 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software

RISCO.

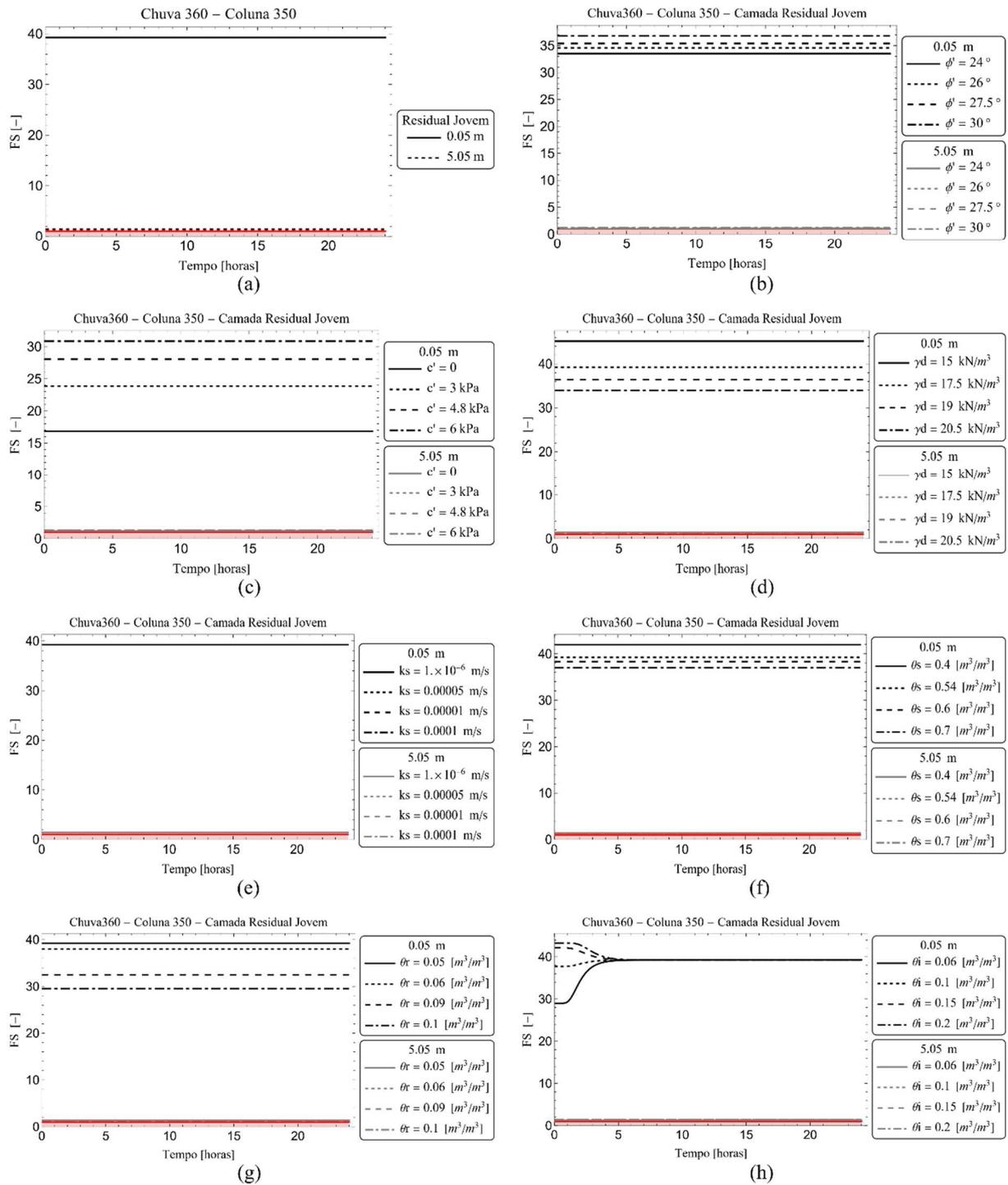


Figura 83. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 360 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.

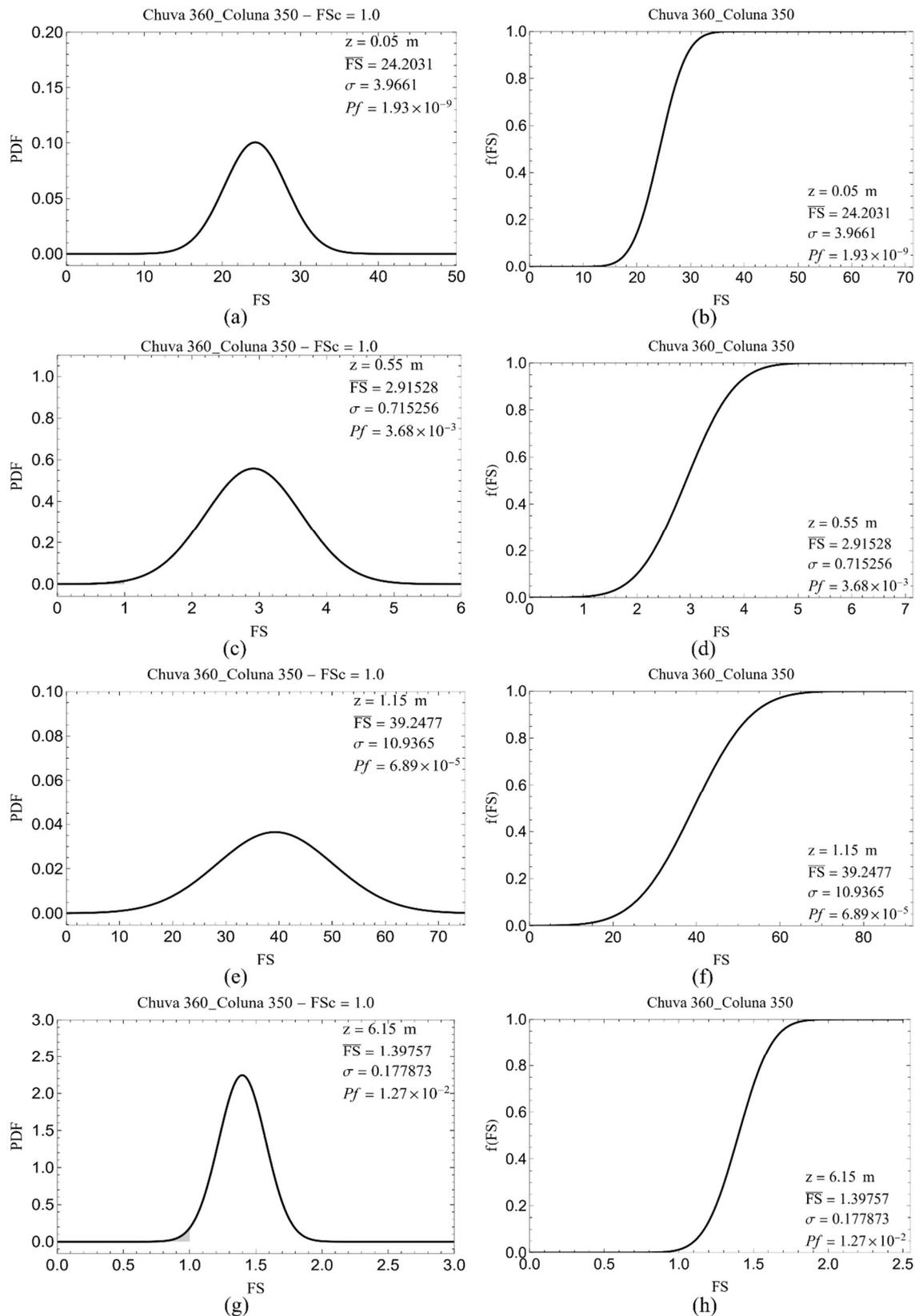


Figura 84. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.

Neste cenário, as contribuições dos parâmetros na variância total (Figura 85), diferente ao cenário anterior, mostram uma maior parcela de influência da coesão efetiva para a primeira profundidade de análise, relacionada à diminuição da umidade nesta região do talude.

Chuva 360_Coluna 350

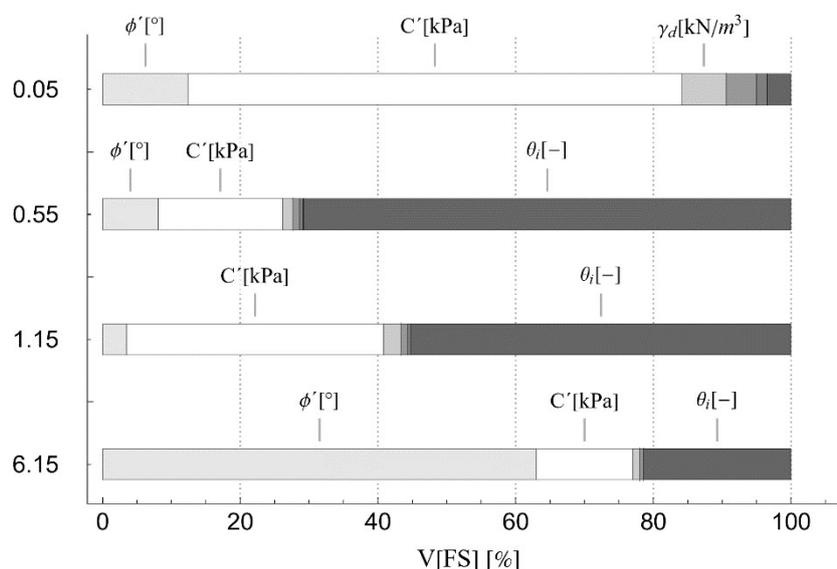


Figura 85. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Tabela 24. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 360 com intensidade de precipitação de 0 mm/h.

z [m]	0,05	0,55	1,15	6,15	
\overline{FS}	24,2	2,9	39,2	1,4	
σ	4,0	0,7	11,0	0,2	
$p(FS \leq 1)$ [%]	$1,9 \times 10^{-9}$	$3,7 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-2}$	
θ [m^3/m^3]	0,11	0,11	0,11	0,11	
ψ [kPa]	78,9	78,9	78,9	78,9	
Contribuição [%]	ϕ' [°]	12,6	8,2	3,4	63,1
	C' [kPa]	71,8	18,2	37,8	14,0
	γ_d [kN/m^3]	6,4	1,6	2,2	0,9
	k_s [m/s]	0,0	0,0	0,0	0,0
	θ_s [m^3/m^3]	4,6	1,2	1,0	0,4
	θ_r [m^3/m^3]	1,3	0,3	0,3	0,1
	θ_i [m^3/m^3]	3,3	70,4	55,3	21,6

De forma geral, as contribuições continuam semelhantes às obtidas no cenário 3, onde a distribuição heterogênea da água se faz evidente na análise de sensibilidade.

Relacionado ao perfil da probabilidade de falha para o cenário atual, apresentado na Figura 86, o desempenho da encosta melhora, sendo bom para a camada superficial, que anteriormente tinha sido desfavorecida pelo aumento da umidade no solo. Porém, como tem sido avaliado desde o início da modelagem, a região interna, perto ao pé do talude, continua apresentado um desempenho insatisfatório, provavelmente associado à própria geometria da encosta.

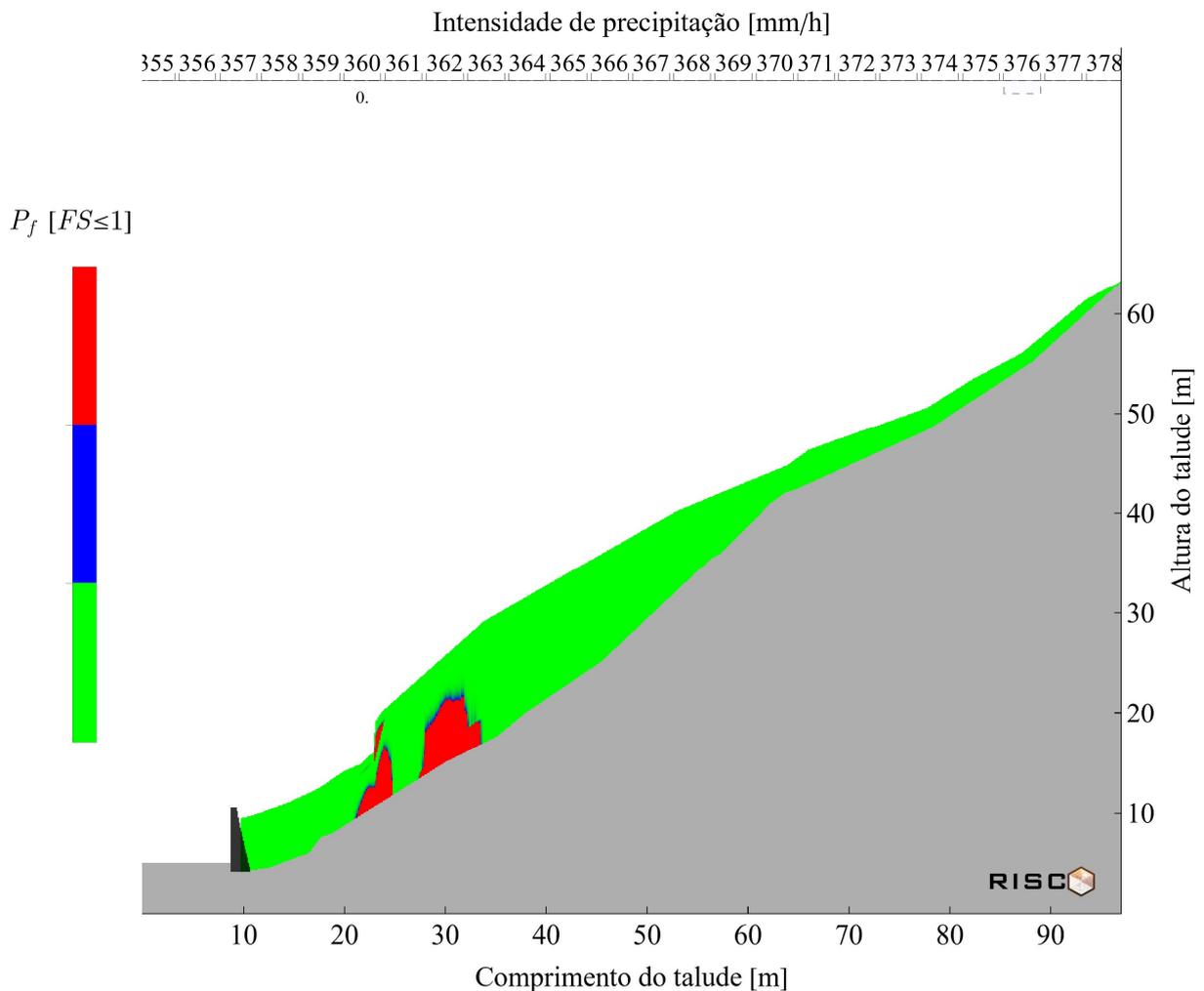


Figura 86. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 360 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.2.5. Cenário de chuva 5: P_f para a hora 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h

Neste cenário, com uma precipitação de alta intensidade, o desempenho do fator de segurança não apresenta grandes alterações. Isto pode ser explicado pelo fato de que, o perfil do talude já tem uma umidade maior que a umidade inicial da modelagem e, conseqüentemente, a capacidade de infiltração do terreno é menor que a infiltração durante a primeira hora de chuva. Assim, como é apresentado na Figura 87 e na Figura 88, as análises paramétricas continuam apresentando um comportamento similar às apresentadas anteriormente, tendo somente uma pequena diminuição do fator de segurança nas primeiras horas da análise, devido à água que consegue entrar na superfície da encosta.

Na Figura 89, as análises correspondentes à probabilidade de falha pontual, continuam apresentando um desempenho similar se comparado aos cenários anteriores, tendo uma maior probabilidade de falha no ponto mais profundo de cada camada de solo. Isto continua sendo consistente, já que, o estado de umidade do solo não atinge valores muito altos, continuando na faixa de 11% de umidade volumétrica.

Na análise de sensibilidade, porém, vê-se como para as três últimas profundidades analisadas, esta umidade é suficiente para contribuir na variância total do problema, associando-se, assim, a maiores probabilidades de falha quando temos teores de umidade maiores que 10% como apresentado na Figura 90. Na superfície do terreno, no entanto, com a mesma umidade, a contribuição maior na dispersão da análise probabilística da estabilidade é dada pela coesão efetiva, como detalhado na Tabela 25. Este comportamento ressalta a importância das análises de sensibilidade para várias profundidades, posto que, o estado de esforços de cada ponto do maciço é diferente, mesmo tendo-se uma distribuição homogênea da umidade no talude.

A Figura 91 apresenta o perfil do desempenho da probabilidade de falha da encosta da Lagoa, mostrando que, o talude, de forma geral, tem bons índices, corroborando com a estabilidade mesmo após um evento de alta intensidade de precipitação.

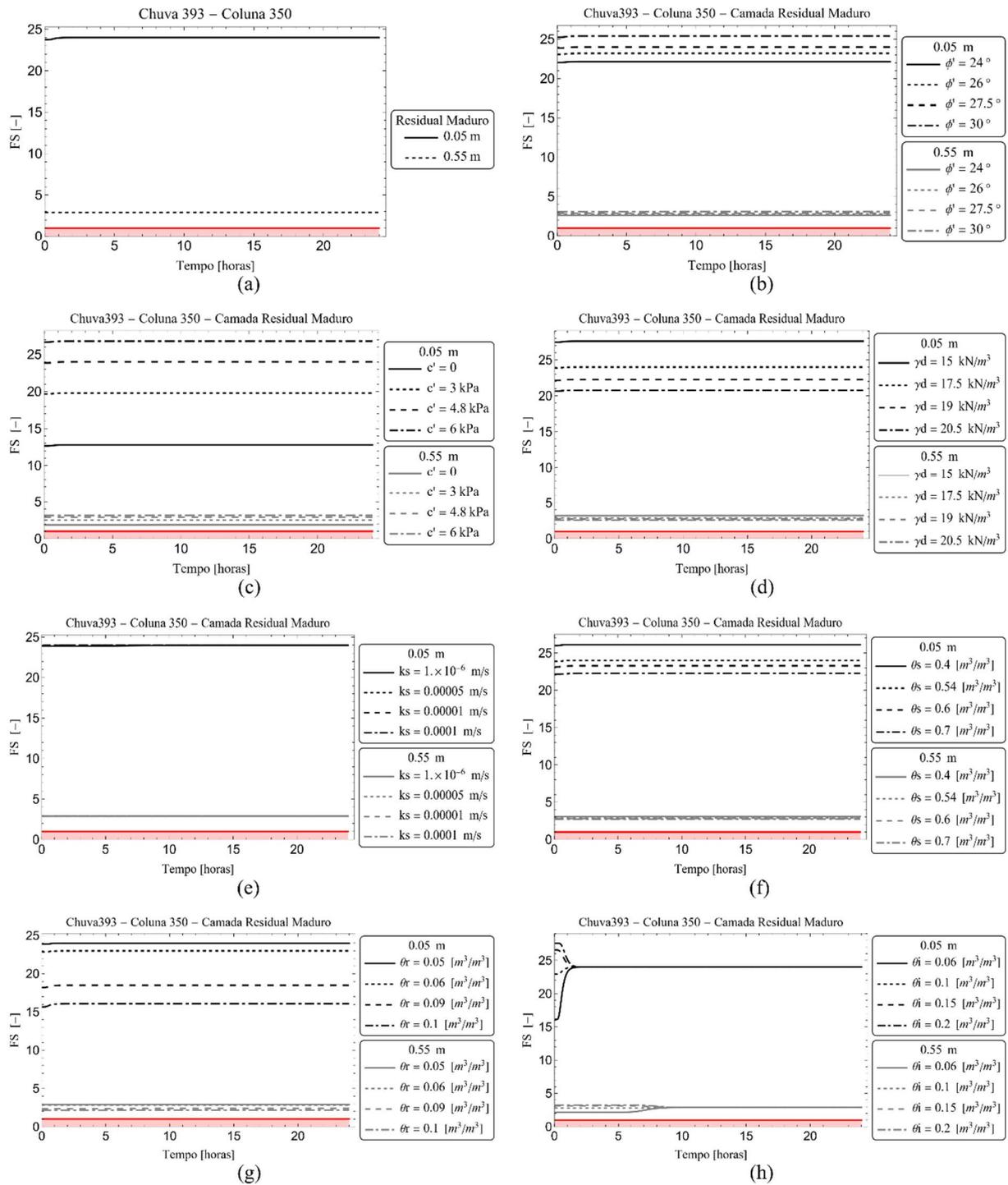


Figura 87. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 393 com uma intensidade de precipitação de 7,9 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.

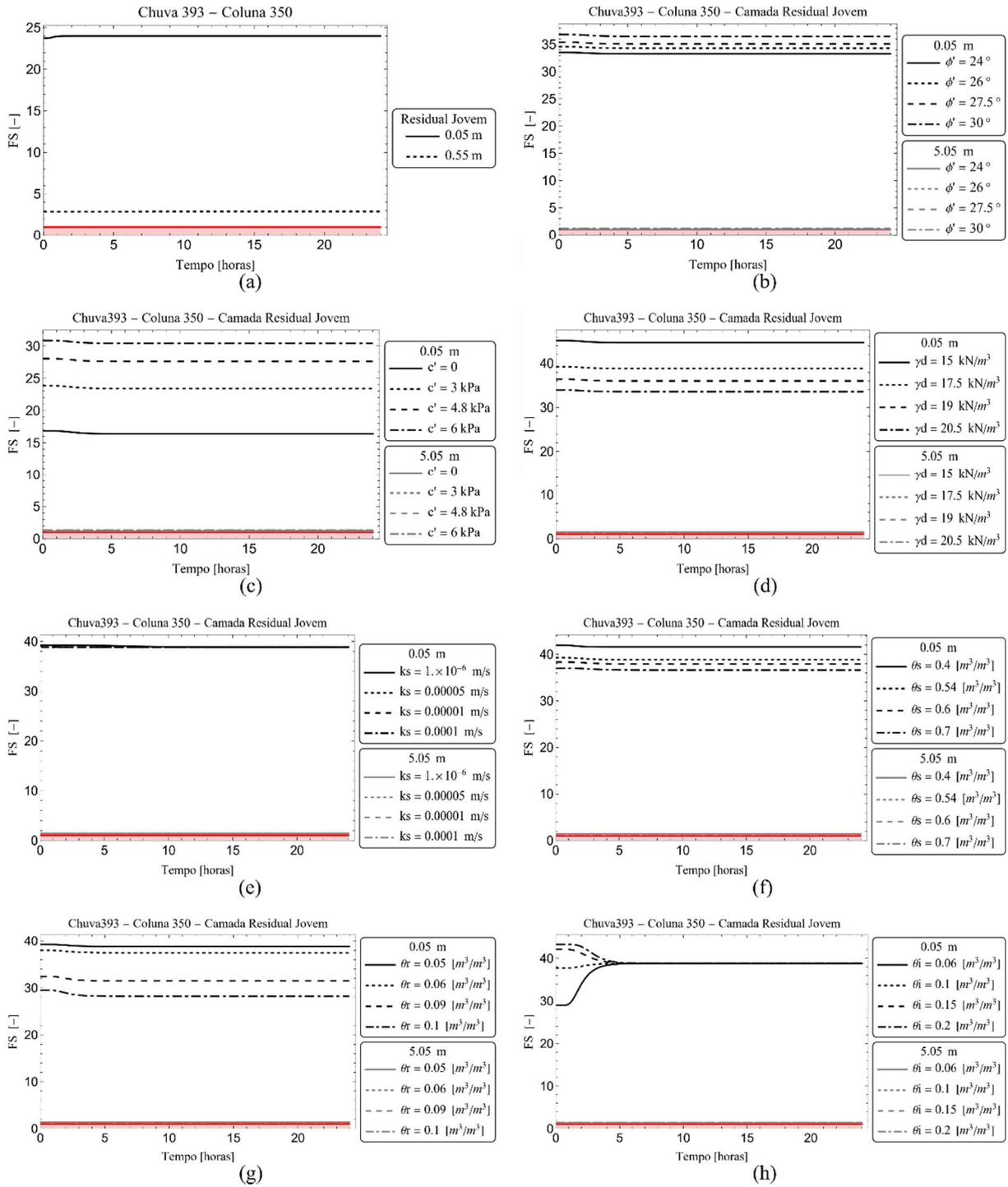


Figura 88. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 393 com uma intensidade de precipitação de 7,9 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.

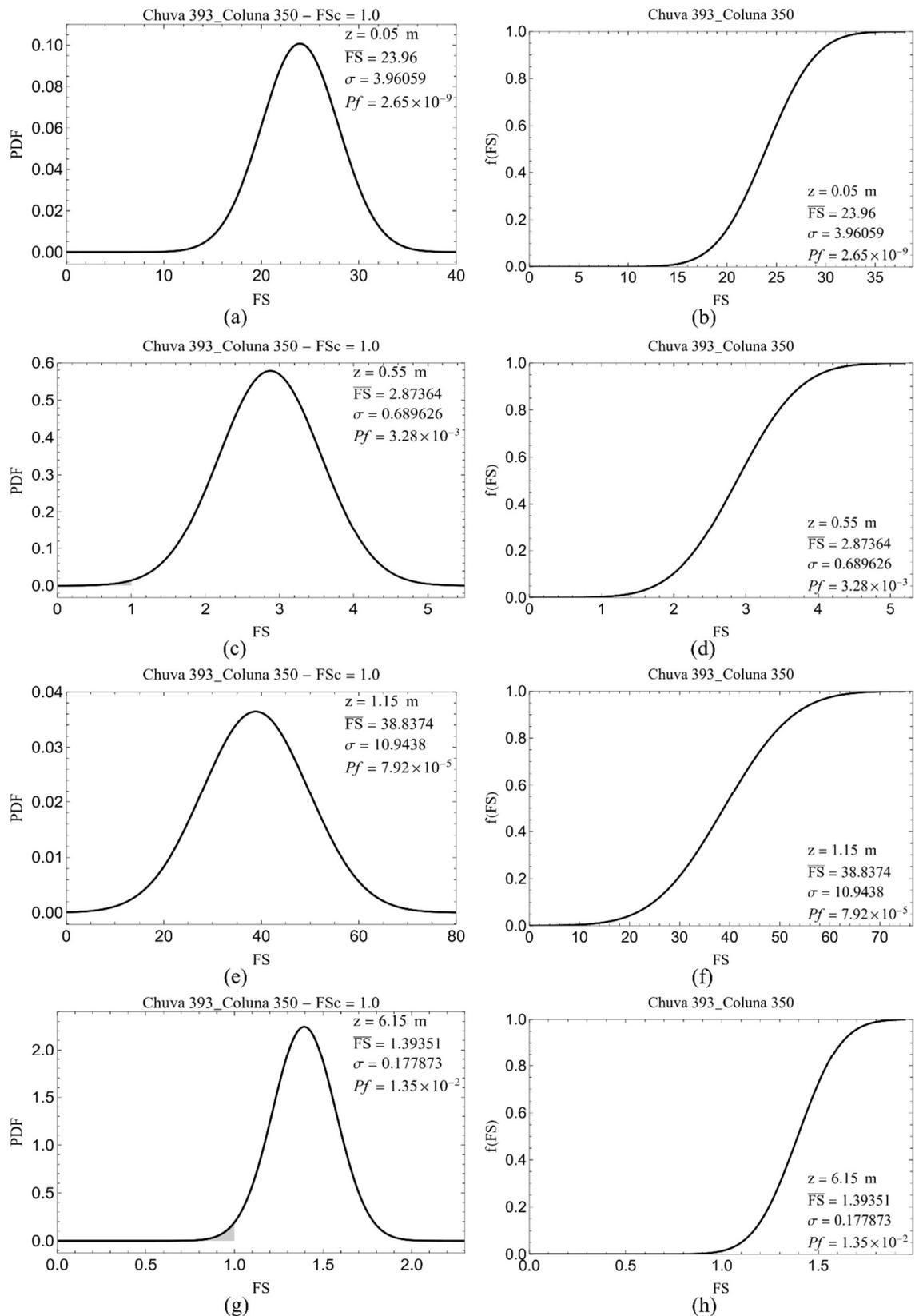


Figura 89. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.

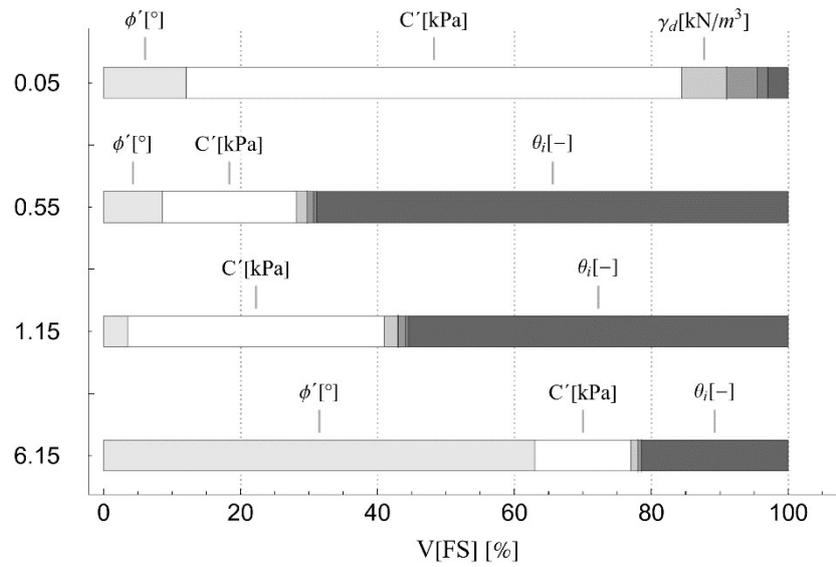


Figura 90. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Tabela 25. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 393 com intensidade de precipitação de 7,9 mm/h.

z [m]		0,05	0,55	1,15	6,15
\overline{FS}		23,4	2,9	38,8	1,4
σ		4,0	0,7	10,9	0,2
$p(FS \leq 1)$ [%]		$2,7 \times 10^{-9}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$7,9 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-2}$
θ [m ³ /m ³]		0,11	0,11	0,11	0,11
ψ [kPa]		80,3	80,3	82,0	82,0
Contribuição [%]	ϕ' [°]	12,2	8,6	3,4	63,0
	C' [kPa]	72,1	19,7	37,7	14,0
	γ_d [kN/m ³]	6,3	1,7	2,2	0,8
	k_s [m/s]	0,1	0,0	0,0	0,0
	θ_s [m ³ /m ³]	4,7	1,2	1,0	0,4
	θ_r [m ³ /m ³]	1,5	0,4	0,3	0,1
	θ_i [m ³ /m ³]	3,0	68,4	55,3	21,6

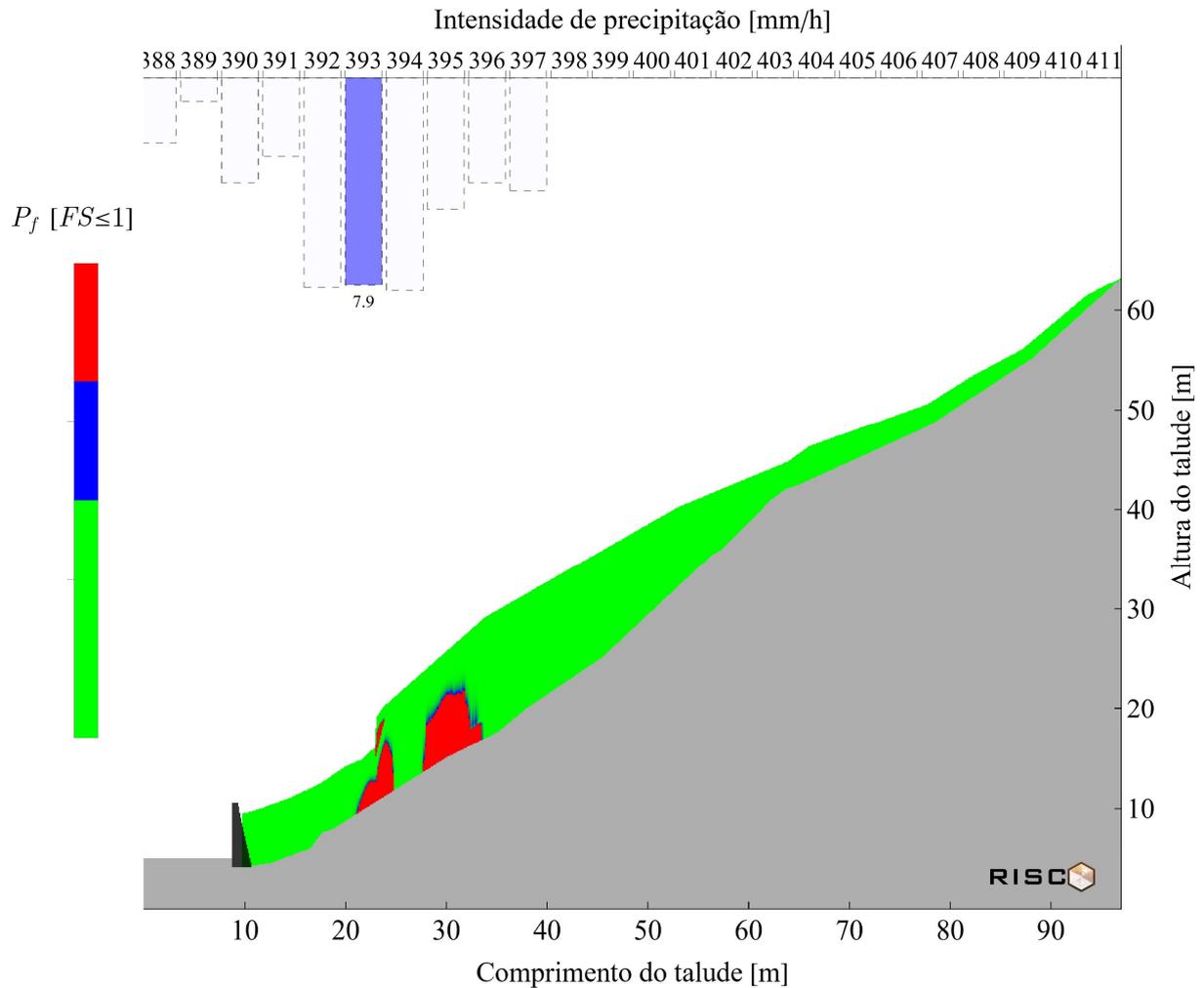


Figura 91. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 393 com uma intensidade de precipitação de 7,9 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

7.2.6. Cenário de chuva 6: P_f para a hora 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h

Finalmente, as análises paramétricas feitas na hora em que foi registrado o movimento de massa da encosta da Lagoa, hora na que no se teve registro de precipitação, é observado que o único parâmetro que afeta significativamente a estabilidade é a umidade inicial, como apresentado na Figura 92h, tendo melhor desempenho quando se iniciam as modelagens com um talude mais úmido. O mesmo comportamento é observado para as análises paramétricas feitas na camada residual jovem (Figura 93).

Diferente dos outros cenários, a análise FOSM feita para a coluna de solo 350, apresentou uma instabilidade evidente na profundidade de 55 cm (Figura 94c). Este comportamento mostra que, com saturações próximas ao 50%, em algumas profundidades, o talude pode perder o ganho de resistência associado ao estado no saturado do solo.

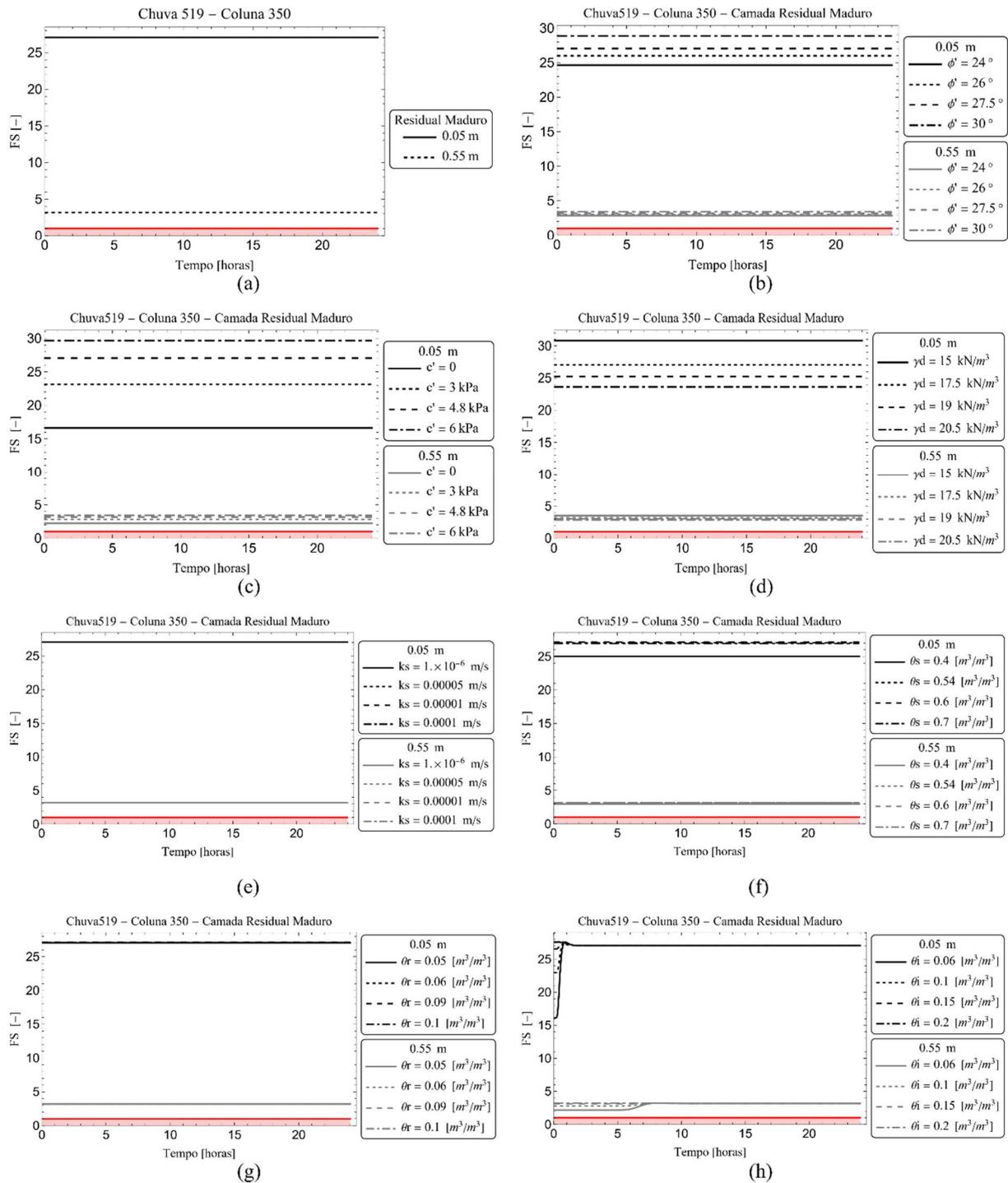


Figura 92. Análises paramétricas das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 519 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Maduro na profundidade de 0,05 m e 0,55 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.

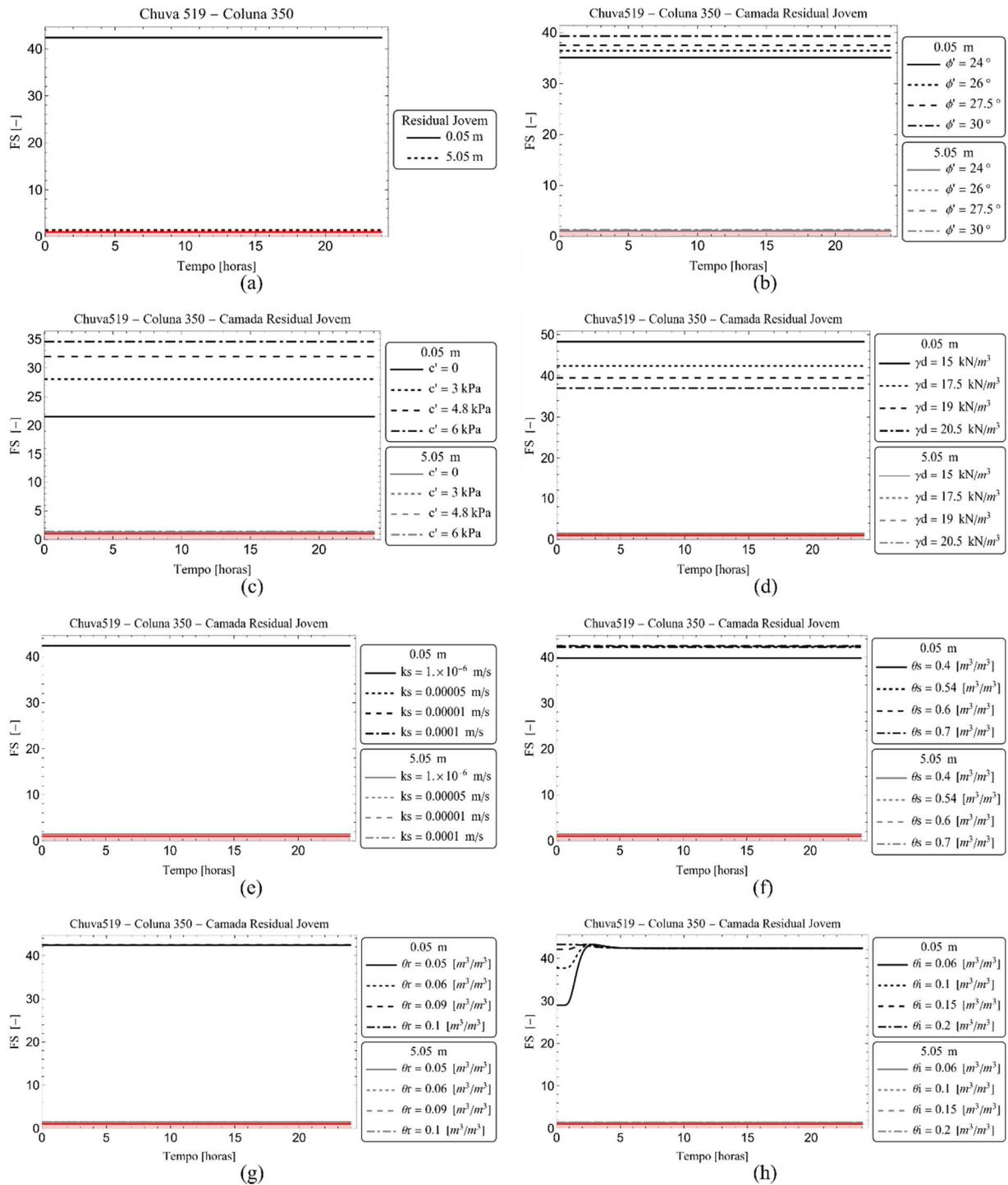


Figura 93. Análises paramétrica das variáveis estocásticas implementadas na probabilidade de falha da encosta da Lagoa durante a hora de análise 519 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h para a camada Residual Jovem na profundidade de 0,05 m e 5,05 m. (a) FS transiente, (b) variação do ϕ' , (c) variação do c' , (d) variação do γ_d , (e) variação do k_s , (f) variação do θ_s , (g) variação do θ_r e (h) variação do θ_i . Imagem gerada pelo software RISCO.

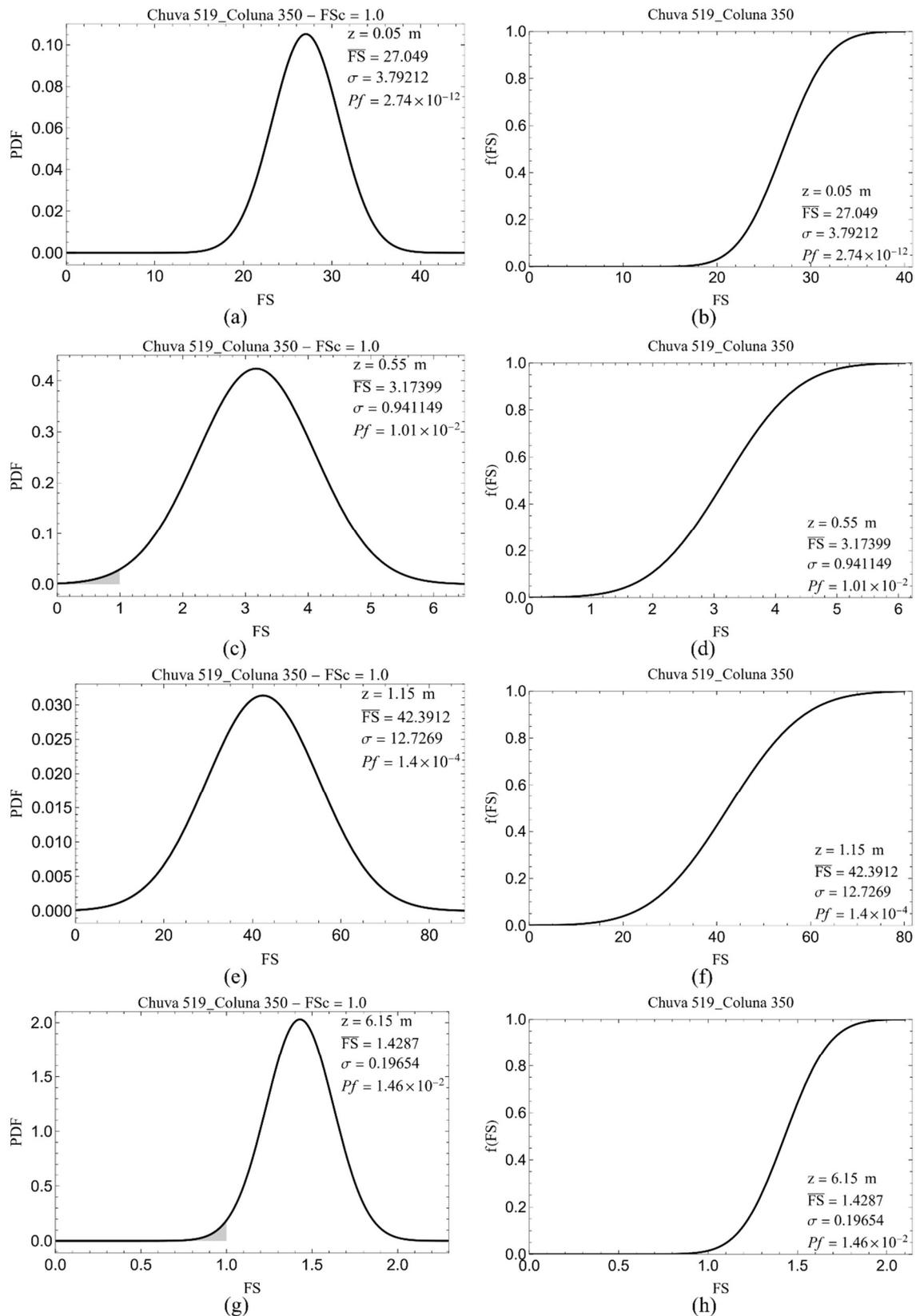


Figura 94. Função densidade de probabilidade (PDF) e função de distribuição acumulada durante a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h para quatro profundidades. (a) e (b) 0,05 m; (c) e (d) 0,55 m; (e) e (f) 1,15 m e (g) e (h) 6,15 m. Imagem gerada pelo software RISCO.

Continuando com as análises de sensibilidade, observa-se, na Figura 95, uma contribuição predominante do estado de umidade inicial na avaliação da estabilidade do talude.

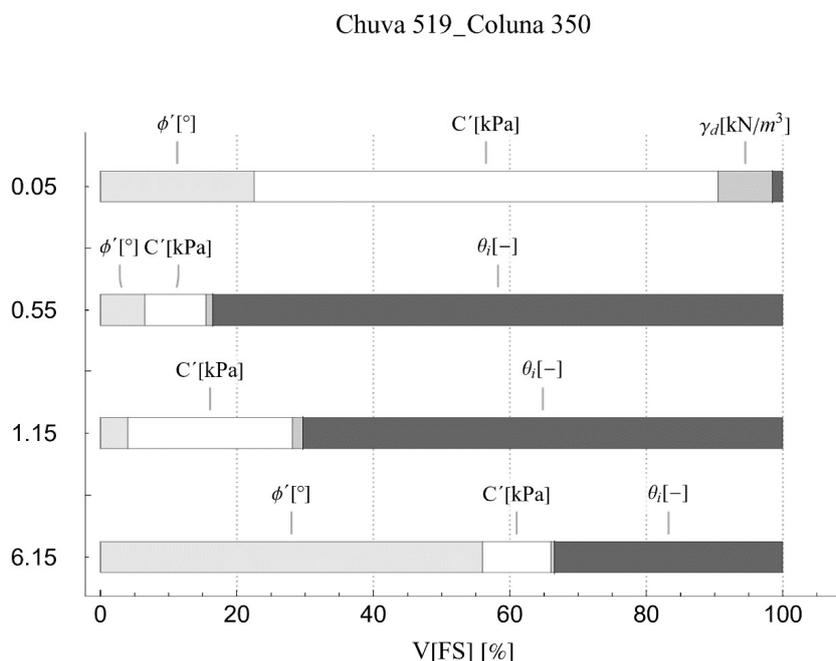


Figura 95. Contribuição de cada parâmetro estocástico na variância total da estabilidade da encosta da Lagoa para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

Tabela 26. Resumo dos resultados obtidos aplicando o FOSM para quatro profundidades diferentes durante a hora de análise 519 com intensidade de precipitação de 0 mm/h.

z [m]	0,05	0,55	1,15	6,15	
\bar{FS}	27,0	3,2	42,4	1,4	
σ	3,8	0,9	12,7	0,2	
$p(FS \leq 1)$ [%]	$2,7 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,5 \times 10^{-2}$	
θ [m ³ /m ³]	0,25	0,25	0,25	0,25	
ψ [kPa]	34,2	34,2	34,2	34,2	
Contribuição [%]	ϕ' [°]	22,5	6,5	4,1	55,8
	C' [kPa]	68,0	9,1	24,2	9,9
	γ_d [kN/m ³]	7,8	1,0	1,7	0,7
	k_s [m/s]	0,0	0,0	0,0	0,0
	θ_s [m ³ /m ³]	0,1	0,0	0,0	0,0
	θ_r [m ³ /m ³]	0,0	0,0	0,0	0,0
	θ_i [m ³ /m ³]	1,6	83,2	70,0	33,5

Na Tabela 26, é detalhado este comportamento, mostrando a pouca contribuição da umidade residual e da umidade de saturação dos materiais, da mesma forma que dá condutividade hidráulica saturada, quando existem saturações maiores no talude. Assim, se faz necessário, ter um maior rigor na imposição do parâmetro de entrada da umidade inicial para as análises de probabilidade, já que dele depende a definição do desvio padrão que representa a PDF do FS quando se tem uma maior quantidade de água distribuída nos poros da matriz de solo não saturada.

A Figura 96, apresenta o perfil de probabilidade durante a hora de falha. Nestas análises, o talude não apresenta um desempenho desfavorável, fato que corrobora com a ideia de que a ruptura da massa superficial da encosta não esteve associada à água da chuva precipitada e que, pela instabilidade iminente presente no contato com a rocha perto ao pé do talude, algum fator externo pode ter sido o responsável pelo movimento de massa.

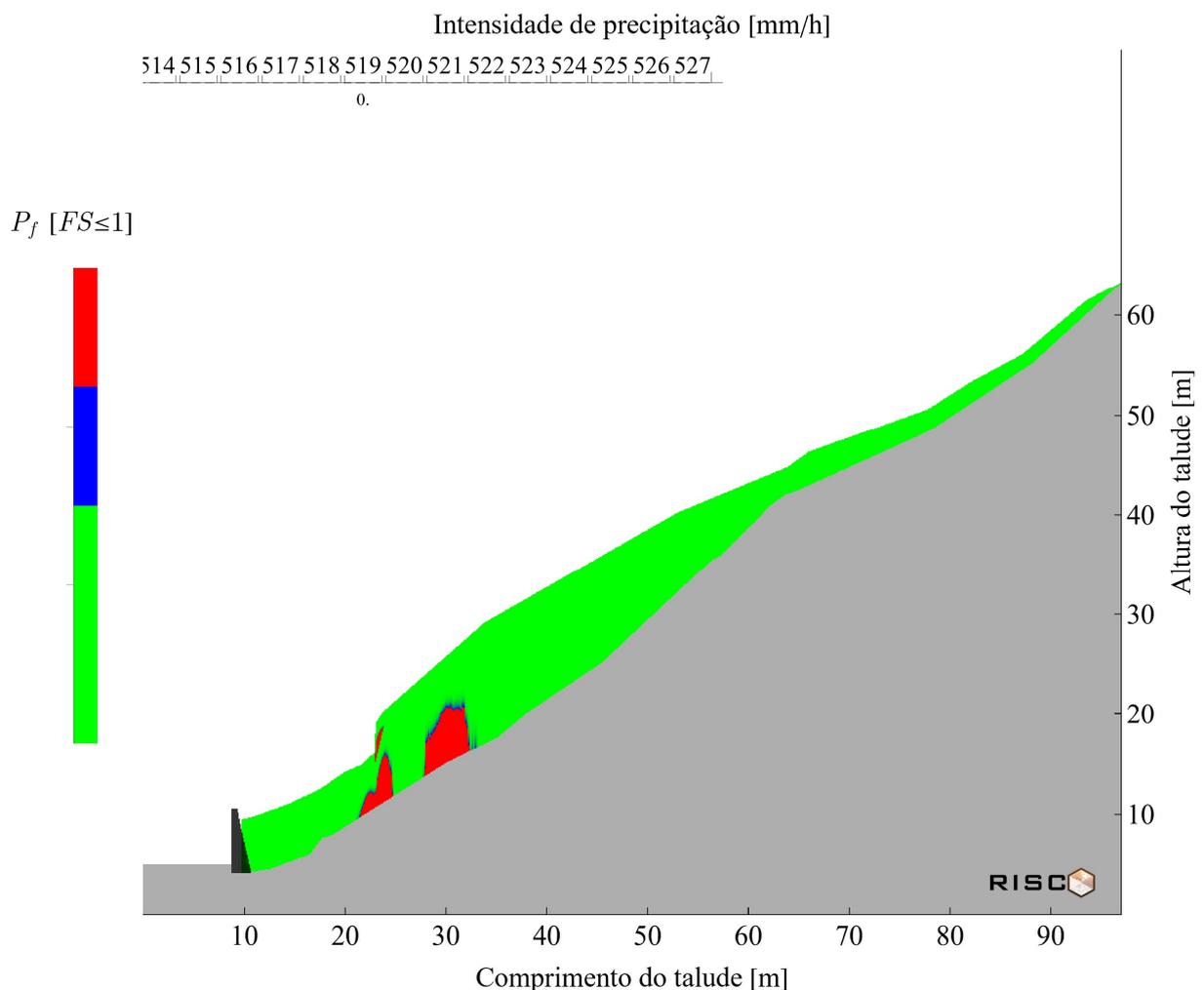


Figura 96. Perfil da probabilidade de falha não saturada para a hora de análise 519 com uma intensidade de precipitação de 0 mm/h. Imagem gerada pelo software RISCO.

8. CONCLUSÕES

A presente pesquisa se encontrou satisfatória nos resultados alcançados, já que, para o caso de estudo escolhido foram obtidas respostas semelhantes às analisadas na pesquisa de Gerscovich (1994), onde foi utilizado o método do Bishop Simplificado para a análise da estabilidade da encosta, o qual é um modelo mais robusto comparado ao modelo de talude infinito.

Uma das principais vantagens da metodologia proposta nesta tese, está associada ao tempo computacional, sendo possível analisar uma seção transversal completa, com uma resolução na ordem de centímetros, para um evento de precipitação longo, num computador convencional. Isto faz da metodologia, uma boa ferramenta para a quantificação da ameaça associada aos eventos de movimento de massa deflagrados por chuvas, permitindo assim, análises de muitos cenários em pouco tempo.

Relacionado ao caso de estudo, foi observado, desde o início da modelagem, que pelo modelo de estabilidade utilizado não considerar os momentos e os esforços externos ao talude, se encontra uma instabilidade iminente desde o início das análises no estado seco. Porém, este comportamento se faz coerente, já que esta encosta específica tinha uma obra de contenção. Neste contexto, durante as análises, procurava-se alterações no maciço além desta zona com instabilidade inicial.

Como foi apresentado no módulo 6.4, a instabilidade da encosta foi analisada para três indicadores de falha diferentes, mostrando uma estabilidade maior na presença da água da chuva quando comparados aos resultados obtidos com a reconstrução da área associada à massa mobilizada durante o evento de chuva. É importante ressaltar que ao mesmo tempo que durante as análises foram identificadas regiões e momentos específicos de instabilidade no estado no saturado, de forma geral, pode-se associar um melhor desempenho dos materiais quando interagem com a água como apresentado na Tabela 27.

Neste caso de estudo, o evento de precipitação antecedente à hora da falha, não foi suficiente para saturar o talude. Este resultado difere ao obtido pelas análises de Gerscovich, (1994) já que, a imposição do estado de umidade inicial foi diferente em ambos trabalhos e, como foi observado nas análises de sensibilidade, a umidade inicial requer de um cuidado

especial, já que ela contribui generosamente com a dispersão estatística da estabilidade, podendo induzir, se utilizada arbitrariamente, a análises duvidosas.

Tabela 27. Resumo da correspondência das análises feitas para três indicadores de falha com a região definida como mobiliada durante o evento de falha da encosta da Lagoa.

Hora da análise	Indicador de falha [FS _c]	Correspondência [%]	
		Superfície de Falha 1	Superfície de Falha 2
Chuva 1 – 0 mm/h	1	5,40	0,0
	1,3	21,0	0,18
	1,5	44,0	3,60
Chuva 4 – 1 mm/h	1	5,40	0,0
	1,3	21,0	0,18
	1,5	44,0	3,60
Chuva 249 – 0 mm/h	1	3,40	0,0
	1,3	16,0	0,0
	1,5	32,0	0,025
Chuva 360 – 0 mm/h	1	1,8	0,0
	1,3	14,0	0,0
	1,5	30,0	0,0
Chuva 393 – 0 mm/h	1	1,9	0,0
	1,3	14,0	0,0
	1,5	31,0	0,0
Chuva 519 – 0 mm/h	1	1,0	0,0
	1,3	13,0	0,0
	1,5	27,0	0,0

Outra conclusão obtida durante a pesquisa, foi a necessidade de se analisar o perfil completo do talude e não pontos específicos. Isto se faz evidente ao analisar a distribuição espacial da estabilidade, enxergando variações significativamente, quando se incorpora as incertezas dos parâmetros associados ao problema da instabilidade das encostas.

A verificação dos fenômenos físicos em laboratório, como foi feito nesta pesquisa para o entendimento do fenômeno da infiltração associado aos eventos de chuva, corroboraram a importância de compreender melhor os cenários que podem ser obtidos em função da interação do solo com a água, permitindo a concepção de modelos matemáticos mais acurados com a realidade.

Neste contexto, e sabendo da necessidade que se tem na prática da engenharia civil e na gestão do risco associado aos movimentos de massa devidos aos eventos de precipitação, o presente trabalho fornece uma nova ferramenta com fundamentação matemática e física para analisar a estabilidade das encostas, principalmente para aquelas que, pela sua geometria ou estratigrafia, apresentam uma maior tendência a gerar movimentos de massa planares.

8.1. Sugestões para pesquisas futuras

De maneira geral, o objetivo da pesquisa foi atingido, porém, fazem-se sugestões para pesquisas futuras, com o intuito de continuar o aperfeiçoamento da plataforma aqui construída, fazendo dela, uma ferramenta robusta para a análise da ameaça e, conseqüentemente, para a análise do risco associado aos movimentos de massa deflagrados por chuvas:

- ▢ Estudar o tempo ideal mínimo do histórico das chuvas antecedentes necessárias para melhor definir o estado de umidade inicial da modelagem da estabilidade e da ameaça;
- ▢ Criar uma metodologia de validação, onde as análises feitas dos casos de estudos consolidados, aperfeiçoem e quantifiquem a capacidade de previsão da instabilidade das encostas;
- ▢ Comparar os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta pelo software RISCO, com outros modelos numéricos mais robustos, para assim, compreender melhor as limitações e os cenários nos quais pode ser aplicado o software;
- ▢ Utilizar a metodologia desenvolvida na pesquisa para validar modelos físicos de encostas feitos em laboratório, com o objetivo de se entender melhor a frente de umidade e de estabilidade, tendo maior controle dos parâmetros físicos, hidráulicos e mecânicos dos materiais;
- ▢ Incorporar, na plataforma, um módulo específico para a quantificação da vulnerabilidade e, assim, fornecer ao usuário uma análise completa do risco para qualquer cenário de previsão ou de análise;
- ▢ Entender a metodologia para uma escala cartográfica, podendo gerar mapas de zoneamento do risco, os quais são muito utilizados na gestão do risco associado aos movimentos de massa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. NBR 11682: Estabilidade de Encostas. Brasil, 2009.
- AITCHISON, G.D. Relationship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils Pore pressure and Suction in Soils. London, 1961.
- ARCOS, Frank Oliveira. Movimentos de Massa Sobre Depósitos Sedimentares da Formação Solimões na Cidade de Rio Branco (AC) - SW da Amazônia - Brasil. 2020. 180 f. - Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2020.
- ASSIS, André Pacheco de; FRANCISS, Fernando Olavo e RABECHINI JR, Roque. Gestão de Riscos - Empreendimentos Complexos. Curitiba, Brasil, 2019.
- AUGUSTO FILHO, Oswaldo. Caracterização Geológico-Geotécnica Voltada à Estabilização de Encostas: uma Proposta Metodológica. *In:* , 1992, Rio de Janeiro, Brasil. (V.2 Anais, ABMS/ABGE, Org.)1a. COBRAE. Rio de Janeiro, Brasil, 1992. p. 721–733.
- AUGUSTO FILHO, Oswaldo e FERNANDES, Mariana Alher. Landslide analysis of unsaturated soil slopes based on rainfall and matric suction data. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 78, n. 6, p. 4167–4185, 2018.
- AZEVEDO, George Fernandes. Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais. 2015.
- AZEVEDO, George Fernandes; CARVAJAL, Hernán Eduardo Martínez; REBOLLEDO, Juan Felix Rodriguez; DE SOUZA, Newton Moreira e DE ASSIS, André Pacheco. Landslide susceptibility mapping using GIS and probabilistic methods. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 21, n. 26, p. 10281–10298, 2016.
- BASTOS, Frederico de Holanda. Movimentos De Massa No Maciço De Baturité (Ce) E Contribuições Para Estratégias De Planejamento Ambiental. p. 257, 2012.
- BERHANE, Gebremedhin; KEBEDE, Mulubrhan; ALFARAH, Nawal; HAGOS, Ermias; GRUM, Berhane; GIDAY, Amanuel e ABERA, Tesfahunegn. Landslide susceptibility zonation mapping using GIS-based frequency ratio model with multi-class spatial data-sets in the Adwa-Adigrat mountain chains, northern Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, v. 164, p. 103795, 2020.
- BISHOP, A. W. The principal of effective stress. *Teknisk ukeblad*, v. 39, p. 859–863, 1959.
- BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, v. 5(1), p. 7–17, 1955.
- BISHOP, A.W e MORGENSTERN, N.R. Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, v. 10(4), p. 129–150, 1960.

- BONG, Taeho e SON, Younghwan. Impact of probability distribution of hydraulic conductivity on groundwater contaminant transport. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 23(5), p. 1963–1973, 2019.
- BORGES, Lucas Parreira de Farias. Método Discreto Iota-Delta: Uma Nova Abordagem Numérica Para o Problema de Fluxo Não Saturado Em Meios Porosos e Fraturados. 2016. 132 f. - Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 132, Brasília, Brasil, 2016.
- BOTERO, Eduardo Montoya; CARVAJAL, Hernán Eduardo Martínez e ARISTIZÁBAL, Edwin Fabian Garcia. Aplicação de Métodos Probabilísticos na Previsão Espacial de Escorregamentos Deflagrados por Chuvas – Estudo de caso : Pajarito, Medellín, Colômbia. *Fundamentals to Applications in Geotechnics*, 2015.
- BROOKS, R H e COREY, A T. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Papers*, Fort Collins, Colorado, USA, v. 3, p. 27, 1964.
- CAI, Jing Sen; YAN, E. Chuan; YEH, Tian Chyi Jim; ZHA, Yuan Yuan; LIANG, Yue; HUANG, Shao Yang; WANG, Wen Ke e WEN, Jet Chau. Effect of spatial variability of shear strength on reliability of infinite slopes using analytical approach. *Computers and Geotechnics*, v. 81, p. 77–86, 2017.
- CAMPOS, Tácio Mauro Pereira e MOTTA, Mariana Ferreira Benessiuti. Resistência ao cisalhamento de solos não saturados. São Paulo, Brazil, 2015-. ISSN 1098-6596.
- CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio (org); GOMES, Maria Carolina Villaça (org); GUIMARÃES, Renato Fontes (org) e GOMES, Roberto Arnaldo Trancoso (org). *Revisões de literatura da geomorfologia brasileira*. 2022.
- CAVALCANTE, André Luís Brasil e MASCARENHAS, Pedro Victor Serra. Efficient approach in modeling the shear strength of unsaturated soil using soil water retention curve. *Acta Geotechnica*, v. 16(10), p. 3177–3186, 2021.
- CAVALCANTE, André Luís Brasil e ZORNBERG, Jorge Gabriel. Efficient Approach to Solving Transient Unsaturated Flow Problems . I: Analytical Solutions. *International Journal of Geomechanics*, p. 1–17, 2017.
- CEPED-UFSC. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012 Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catalina. 2013.
- CHIRICO, Giovanni B.; BORGA, Marco; TAROLLI, Paolo; RIGON, Riccardo e PRETI, Federico. Role of Vegetation on Slope Stability under Transient Unsaturated Conditions. *Procedia Environmental Sciences*, v. 19, p. 932–941, 2013.
- CHO, Sung Eun. Stability analysis of unsaturated soil slopes considering water-air flow caused by rainfall infiltration. *Engineering Geology*, v. 211, p. 184–197, 2016.

- CHOWDHURY, Robin. Geotechnical Slope Analysis, 2010-. ISSN 1470-9236.
- COLLISCHONN, Walter e DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. 2. ed. Porto Alegre, Brasil, 2015.
- COOKE, Richard A.; MOSTAGHIMI, Saied e WOESTE, Frank. Effect of hydraulic conductivity probability distribution function on simulated solute leaching. *Water Environment Research*, v. 67, n. 2, p. 159–168, 1995.
- COSTA, Mateus Bezerra Alves da e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Bimodal Soil–Water Retention Curve and k -Function Model Using Linear Superposition . *International Journal of Geomechanics*, v. 21, n. 7, p. 1–9, 2021.
- COSTA, Katherin Rocio Cano Bezerra e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Estudo dos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas Implementando a Análise Não Saturada e Transiente. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano, v. 4, n. 1, 2018.
- COSTA, Mateus Bezerra Alves Da e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Novel Approach to Determine Soil-Water Retention Surface. *International Journal of Geomechanics*, v. 20, n. 6, p. 1–9, 2020.
- COSTA, Katherin Rocio Cano Bezerra da; DANTAS, Ana Paola do Nascimento; CAVALCANTE, André Luís Brasil e ASSIS, André Pacheco de. Probabilistic Approach to Transient Unsaturated Slope Stability Associated with Precipitation Event. *Sustainability*, v. 15, n. 21, p. 15260, 2023.
- COUTINHO, Roberto Quental; SILVA, Marilia Mary; SANTOS, Amabelli Nunes dos e LACERDA, Willy Alvarenga. Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granite Residual Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n. 8, p. 1–16, 2019.
- CRONEY, D; COLEMAN, JD e BLACK, WPM. Studies of the movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. Highway Research Board, Special Report 40. Washington D.C., 1958.
- DAI, F C; LEE, C F e NGAI, Y Y. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, p. 64(1):65-87, 2002.
- DANTAS, Ana Paola do Nascimento. Proposição de um Equipamento em Modelo Físico a 1G para a Simulação de Deslizamentos Superficiais em Talude Não Saturado Induzidos por Precipitação Artificial. 2024. - Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade de Brasília., 2024.

- DU, J; YIN, K; NADIM, F e LACASSE, S. Quantitative vulnerability estimation for individual landslides. *In:* , 2013, Paris, France, 2181-2184. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris, France, 2181-2184. 2013.
- DUARTE, Cristina Coutinho. Eventos Extremos De Chuva E Análise Da Suscetibilidade a Movimentos De Massa No Município de Ipojuca - PE. 2015. 275 f. - Universidade Federal De Pernambuco-Ufpe Centro De Filosofia E Ciências Humanas-Cfch Departamento De Ciências Geográficas-Dcg Programa De Pós-Graduação Em Geografia-Ppgeoç, 2015.
- EINSTEIN, Herbert H. e SOUSA, Rita L. Warning System for Natural Threats. *In:* , 2006. Engineering Conferences International. 1:1-37., 2006.
- ERING, Pinom e BABU, G. Sivakumar. Probabilistic back analysis of rainfall induced landslide- A case study of Malin landslide, India. *Engineering Geology*, v. 208, p. 154–164, 2016.
- FETTER, C. W. *Applied Hydrogeology*. 3. ed. New York, New York. 691, 1994.
- FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. The Global Risks Report 2023 Energy Conversion and Management. 2023. www.weforum.org.
- FREDLUND, D. G. The Implementation of Unsaturated Soil Mechanics Into Geotechnical Engineering. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 37, n. 5, p. 963–986, 2000.
- FREDLUND, D G; MORGENSTERN, N R e WIDGER, R A. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 15, p. 313–321, 1978.
- FREDLUND, D G e RAHARDJO, H. Soil mechanics for unsaturated soils. 1993-. ISSN 02677261.v. 12 .
- FREDLUND, D.G.; RAHARDJO, H. e GAN, J.K.-M. Non-linearity of strength envelope for unsaturated soils. *Proceedings of the 6th international conference on expansive soils*, New Delhi, India, v. 1, 1987.
- FREDLUND, D. G. e XING, Anqing. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1994.
- GARIANO, Stefano Luigi e GUZZETTI, Fausto. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, v. 162, p. 227–252, 2016.
- GEO-RIO. Drenagem. *In: MANUAL TÉCNICO DE ENCOSTAS VOLUME 1*. Rio de Janeiro, 2015. p. 271.
- GERSCOVICH, Denise Maria Soares. Equações para Modelagem da Curva Característica aplicadas a Solos Brasileiros. *In:* , 2001, Porto Alegre, RS, Brasil. IV Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

- GERSCOVICH, Denise Maria Soares. Estabilidade de Taludes. 2. ed. Oficina de textos, 2016.
- GERSCOVICH, Denise Maria Soares. Fluxo em Meios Porosos Saturados-Não Saturados: Modelagem Numérica com Aplicações ao Estudo da Estabilidade de Encostas do Rio de Janeiro. 1994. 244 f. - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 1994.
- GITIRANA JR., Gilson De Farias Neves. Weather-related geo-hazard assessment model for railway embankment stability. 2005. 439 f. - Doctoral Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2005.
- GÓIS, Manuelle Santos e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Estudo Quantitativo das Concentrações de Solute e Níveis de Saturação de Fluidos a Partir de Estudos Hidrogeofísicos na Zona Não Saturada. Relatório Anual de Pós-Doutorado. 2019.
- GÓIS, Manuelle Santos; DA COSTA, Katherin Rocio Cano Bezerra e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Prediction of hydraulic and petrophysical parameters from indirect measurements of electrical resistivity to determine soil-water retention curve – studies in granular soils. *Soils and Rocks*, v. 46, n. 3, p. 1–14, 2023.
- GÓIS, Manuelle Santos; DE MATOS, Moara Maria Oliveira; GUIMARÃES, Nicolas Ohofugi; DA COSTA, Katherin Rocio Cano Bezerra; MOREIRA, Gabriela Rodrigues; DA SILVA, Ana Carla Netto e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Instrumentation of soil columns for time-lapse monitoring of the phenomenon of capillary rise through spontaneous potential, soil moisture sensor, electrical resistivity, and GPR measurements. *MATEC Web of Conferences*, v. 337, p. 01010, 2021.
- GREEN, W Heber e AMPT, G A. Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, v. 4, n. 1, p. 1–24, 1911.
- GRIFFITHS, D. V.; HUANG, Jinsong e FENTON, Gordon A. Probabilistic infinite slope analysis. *Computers and Geotechnics*, p. 38(4):577-584, 2011.
- GUIDICINI, Guido e NIEBLE, Carlos M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo, Brasil, 1984.
- HIDALGO, César Augusto Montoya. Incertezas, Vulnerabilidade e Avaliação de Risco Devido a Deslizamentos em Estradas. 2013. Tese de Doutorado, UnB, Brasília, Brasil, 250p., 2013.
- HIGHLAND, Lynn M. e BOBROWSKY, Peter. O manual de deslizamento - um guia para a compreensão de deslizamentos US Geological Survey Circular. 2008.
- HOEK, E e BRAY, J.W. Rock slope engineering. Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- HONG, Haoyuan; TSANGARATOS, Paraskevas; ILIA, Ioanna; LOUPASAKIS, Constantinos e WANG, Yi. Introducing a novel multi-layer perceptron network based on stochastic

- gradient descent optimized by a meta-heuristic algorithm for landslide susceptibility mapping. *Science of the Total Environment*, v. 742, p. 140549, 2020.
- HORTON, R. E. Analysis of runoff-plat experiments with varying infiltration-capacity. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 20(4), p. 693–711, 1939.
- IAEG. IAEG comission C37 - Landslide Nomenclature. Report Activities in the period 2021-2022.
- IBGE. Perfil dos Municípios Brasileiros Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2017.
- ISSMGE. Risk assessment-Glossary of terms Technical Committee on Risk Assessment and Management. 2004.
- JANBU, N. Slope stability Computations Soil Mechanics and Foundation Engineering Report. 1968.
- JENNINGS, J.E. A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils. *In:* , 1961, London. Poro Pressure and Suction in Soils. London, 1961. p. 26–30.
- KRICHEN, Moez; ABDALZAHER, Mohamed S.; ELWEKEIL, Mohamed e FOUDA, Mostafa M. Managing natural disasters: An analysis of technological advancements, opportunities, and challenges. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 2023.
- LADE, Poul V. The mechanics of surficial failure in soil slopes. *Engineering Geology*, v. 114, n. 1–2, p. 57–64, 2010.
- LAI, Wencong e OGDEN, Fred L. A Mass-Conservative Finite Volume Predictor – Corrector Solution of The 1D Richards Equation. *Journal of Hydrology*, v. 523, p. 119–127, 2015.
- LEE, Ya Fen e CHI, Yun Yao. Rainfall-induced landslide risk at Lushan, Taiwan. *Engineering Geology*, p. 123(1-2):113-121, 2011.
- LI, Zhihong; NADIM, Farrokh; HUANG, Hongwei; UZIELLI, Marco e LACASSE, Suzanne. Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, p. 7(2):125-134, 2010.
- LIMA, Laís Costa. Avaliação de áreas vulneráveis a movimento de massa na cidade de João pessoa – pb. 2019. 124 f. - Universidade Federal da Paraíba, 2019.
- LIMA, Fernando Neves; NAGHETTINI, Mauro e ESPÓSITO, Terezinha. Aplicação Do Método Da Árvore De Falhas (FTA) Para Avaliação Da Probabilidade De Falha Das Comportas Do Vertedouro De Uma Barragem. p. 1–8, 2013.
- LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito; NERY, Tullius Dias; BISPO, Carlos de Oliveira; FERREIRA, Fabiana Souza e SANTOS, Edwilson Medeiros dos. Movimentos De Massa: Estado Da

- Arte, Escalas De Abordagem, Ensaio De Campo E Laboratório E Diferentes Modelos De Revisão. *In: REVISÕES DE LITERATURA DA GEOMORFOLOGIA BRASILEIRA*. 2022. p. 564–596.
- LU, Ning; GODT, Jonathan W. e WU, David T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, v. 46(5), 2010.
- LU, Ning. e LIKOS, William J. State of Unsaturated Soil. *In: UNSATURATED SOIL MECHANICS*. 2004. p. 6.
- MACEDO, Eduardo Soares de e SANDRE, Lucas Henrique. Mortes por deslizamentos no Brasil: 1988 a 2022. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 12, n. 1, p. 110–117, 2022.
- MALKAWI, Abdallah I Husein; HASSAN, Waleed F. e ABDULLA, Fayez A. Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. *Structural Safety*, v. 22(2), p. 161–187, 2000.
- MARIN, Roberto J.; VELÁSQUEZ, María Fernanda e SÁNCHEZ, Oscar. Applicability and performance of deterministic and probabilistic physically based landslide modeling in a data-scarce environment of the Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 108, 2021.
- MEIN, Russell G. e LARSON, Curtis L. Modeling Infiltration during a Steady Rain. *Water Resources Research*, v. 9, n. 2, p. 384–394, 1973.
- MENDES, Thiago Augusto; GITIRANA, Gilson de Farias Neves; REBOLLEDO, Juan Félix Rodriguez; VAZ, Emílio Farias e DA LUZ, Marta Pereira. Numerical evaluation of laboratory apparatuses for the study of infiltration and runoff. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, p. 1–16, 2020.
- MESQUITA, Maria da Glória Bastos de Freitas. Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo. 2001. 121 f. - Doctoral Thesis, School of Agriculture Luiz de Queiroz, São Paulo, Brazil., 2001.
- MESQUITA, M D G B D Freitas; MORAES, Sérgio Oliveira e CORRENTE, José Eduardo. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. *Scientia Agricola*, v. 59, p. 789–793, 2002.
- MOREIRA, Gabriela R e CAVALCANTE, André Luís Brasil. No Proposta de Caracterização e Montagem de Colunas de Solo Instrumentadas para Análise de Infiltração e Percolação de Fluidos na Zona Não Saturada. *Relatório Anual FAPDF*. 2018.
- MORGENSTERN, N.R e PRICE, V.E. The analysis of the stability of general slip sur- faces. *Géotechnique*, v. 15(1), p. 79–93, 1965.

- NICHOLAS, Marcus e FONSECA, Esquivel. Análise Dos Modos De Falha E Efeitos (FMEA) Para Avaliação De Um Acidente Em Barragem De Rejeitos: Um Evento De Mineração No Brasil. 2018. - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial. Dissertação de Mestrado., 2018.
- NISHIMURA, T e FREDLUND, DG. Relationship between shear strength and matric suction in an unsaturated silty soil. Asian Conference on Unsaturated Soils, UNSAT ASIA 2000, p. 563–568, 2000.
- OCHOA, Victoria Elena Meza. Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. Boletín de ciencias de la tierra, n. 31, p. 23–38, 2012.
- OHOFUGI, Nicolas Guimarães; GÓIS, Manuelle Santos; COSTA, Katherin Rocio Cano Bezerra da e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Experimentos para Instrumentação de Baixo Custo em Coluna de Solo Durante os Fenômenos de Ascensão Capilar e Infiltração. Revista Científica de Pesquisa Aplicada à Engenharia, 2020.
- OHOFUGI, Nicolas Guimarães; GÓIS, Manuelle Santos; COSTA, Katherin Rocio Cano Bezerra da e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Instrumentação de Baixo Custo em Coluna de Solo para Monitoramento Time-Lapse da Ascensão Capilar / Low Cost Soil Column Instrumentation for Time-Lapse Monitoring of Rising Damp. Brazilian Applied Science Review, v. 5, n. 1, p. 226–240, 2021.
- ONU. Informe del grupo de trabajo intergubernamental de expertos de composición abierta sobre los indicadores y la terminología relacionados con la reducción del riesgo de desastres. 2016.
- PARANHOS, Aline.; VECHIA, Daniel. e BELTRAME, Milton. Capilaridade: Um fenômeno de superfície com COM APLICAÇÕES COTIDIANAS. In: , 2008. XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. 2008. p. 1–2.
- PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil science, v. 83(5), p. 345–358, 1957.
- PROJETO GIDES. Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de MassaCPRM-Serviços geológicos do Brasil. 2018.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Journal of Applied Physics, v. 1, n. 5, p. 1(5):318-333, 1931.
- ROJAS, Katherin Rocio Cano. Estudo dos Deslizamentos Superficiais Deflagrados por Chuvas Implementando a Análise Não Saturada e Transiente. 2017. 91 f. - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

- SANTOS, Eliana Fernandes dos e PARREIRA, Alexandre Benetti. Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas Aos Solos Tropicais. *In:* , 2015, Foz do Iguaçu, PR. 44^a RAPv – Reunião anual de Pavimentação e 18^o ENACOR – Encontro nacional de conservação rodoviária. Foz do Iguaçu, PR, 2015. p. 12.
- SCOLOBIG, Anna; LINNEROOTH-BAYER, Joanne e PELLING, Mark. Drivers of transformative change in the Italian landslide risk policy. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 9, p. 124–136, 2014.
- SEPÚLVEDA, Julián Berrío. Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de Radar Meteorológico del Area Metropolitana del Valle de Aburrá. 2015. - Departamento de Ciencias y Medioambiente, Universidad Nacional de Colombia. 90, 2015.
- SHARPE, Charles Farquharson Stewart. *Landslide an Related Phenomena*. Columbia University Press, p. 137, 1938.
- SHENG, Daichao; GENS, Antonio; FREDLUND, Delwyn G. e SLOAN, Scott W. Unsaturated soils: From constitutive modelling to numerical algorithms. *Computers and Geotechnics*, v. 35, n. 6, p. 810–824, 2008.
- SHRODER, John F; ELLIS, Jean e SHERMAN, Douglas. *Hazards and Disasters Series: Volcanic Hazards , Risks , and Disasters*. 2015.
- SILVA, Arlam Carneiro. Abordagem rítmica porbabilistica aplicada em analises de fluxo e estabilidade de taludes. 2015. 137 f. 2015.
- SILVA, Rodrigo Ferreira. Análise de Magnitude e Frequencia Espacial de Movimentos de Massa em Caraguatuba-SP. 2013. 96 f. - Universidade de São Paulo, 2013.
- SILVA, Ana Paola do Nascimento e. Probabilidade de Ruptura Transiente de Encostas Medida Durante Eventos Significativos de Precipitação. 2018. 100 f. - Universidade de Brasília, Brasília,Brasil, 2018.
- SILVA, Ana Carla Neto da e CAVALCANTE, André Luís Brasil. Estudo das Concentrações de Solute e Níveis de Saturação de Fluidos na Zona Não Saturada. Relatório Final de Iniciação Ciêntífica. 2019.
- SILVEIRA, Rodrigo Moraes da. Comportamento Geotécnico das Encostas. p. 1–62, 2016.
- SMILES, D. E. Water flow in filter paper and capillary suction time. *Chemical Engineering Science*, v. 53, n. 12, p. 2211–2218, 1998.
- SONG, Young Suk; CHAE, Byung Gon e LEE, Jintae. A method for evaluating the stability of an unsaturated slope in natural terrain during rainfall. *Engineering Geology*, v. 210, p. 84–92, 2016.

- SOUZA, M.A e MEZZOMO, F. Aplicação do FMECA no Gerenciamento de Risco em uma Empresa de Transporte Rodoviário de Cargas. *Revista de Contabilidade e Controladoria*, n. 31, p. 131–149, 2012.
- STANLEY, Thomas e KIRSCHBAUM, Dalia. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*, 2017.
- SUAREZ, Jaime. Efecto del agua. *In: DESLIZAMIENTOS: ANALISIS GEOTECNICO*. Colombia, 2010. p. 209–266.
- TAHA, Mohd. Raihan; HOSSAIN, Md. Kamal e MOFIZ, Syed Abdul. Effect of Suction on the Strength of Unsaturated Soils. *In:* , 2000, Denver, Colorado, United States. *Geo-Denver 2000*. Denver, Colorado, United States, 2000. p. 521–587.
- TRAVIS, Quentin B.; HOUSTON, Sandra L.; MARINHO, Fernando a. M. e SCHMEECKLE, Mark. Unsaturated Infinite Slope Stability Considering Surface Flux Conditions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 136(7):963-974, 2010.
- TSAI, Tung Lin; CHEN, Hung En e YANG, Jinn Chuang. Numerical modeling of rainstorm-induced shallow landslides in saturated and unsaturated soils. *Environmental Geology*, v. 55, n. 6, p. 1269–1277, 2008.
- UNDRR. *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022: Our World at Risk: Transforming Governance for a Resilient Future*. 2022.
- UNISDR. *América del Sur: una visión regional de la situación de riesgo de desastres Oficina de las Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres (UNIRDS)*. 2013.
- UNISDR. *Prepared for the 2015 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. 2015.
- UNISDR; AECID e CORPORACIÓN OSSO. *Impacto de Los Desastres en América Latina y el Caribe 1990-2013 Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Corporación OSSO*. 2016.
- USACE. *Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies*. 1999.
- VAN GENUCHTEN, M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.
- VARNES, David J. *Slope Movement Types and Processes*. Special report, v. 176, p. 11–33, 1978.
- VEGA, Johnny Alexander e HIDALGO, Cesar Augusto. Quantitative risk assessment of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings. *Geomorphology*, p. 273:217–235, 2016.

- VELOSO, Vinicius Queiroz. Proposta De Gestão De Risco Associado À Ocorrência De Corridas De Detrito Em Bacias Hidrográficas Na Serra Do Mar-Cubatão-Sp. 2019. 114 f. - Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2019.
- WANG, Yi; FANG, Zhice; WANG, Mao; PENG, Ling e HONG, Haoyuan. Comparative study of landslide susceptibility mapping with different recurrent neural networks. *Computers and Geosciences*, v. 138, 2019.
- WANG, Yumiao; FENG, Luwei; LI, Sijia; REN, Fu e DU, Qingyun. A hybrid model considering spatial heterogeneity for landslide susceptibility mapping in Zhejiang Province, China. *Catena*, v. 188, n. December 2019, p. 104425, 2020.
- WONG, Felix S. First-order, second-moment methods. *Computers and Structures*, v. 20(4), p. 779–791, 1985.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes. Geneva, Switzerland, 2019.
- ZHANG, Zaiyong; WANG, Wenke; YEH, Tian chyi Jim; CHEN, Li; WANG, Zhoufeng; DUAN, Lei; AN, Kedong e GONG, Chengcheng. Finite analytic method based on mixed-form Richards' equation for simulating water flow in vadose zone. *Journal of Hydrology*, v. 537, p. 146–156, 2016.
- ZUQUETTE, Lázaro Valentin. Riscos, Desastres e Eventos Naturais Perigosos. 1. ed. São Paulo, Brasil, 2018.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Formato dos arquivos de entrada para a utilização do software RISCO.

Neste apêndice, é apresentada a estrutura de cada tipo de arquivo necessário para utilizar o software RISCO proposto nesta pesquisa. Para isto, na pasta onde se localiza o código executável na linguagem *Wolfram Mathematica*, deve ser criada uma pasta chamada de INPUTS. Nesta pasta, serão destinados os arquivos de entrada com os seguintes nomes INPUTS_Local.xlsx, Declividade.txt, Geometria.txt e ENCOSTA.png.

Na Figura 97, é apresentada a primeira aba correspondente ao arquivo INPUTS_Local.xlsx. Este arquivo deve ser preenchido com as informações da encosta sem sofrer alterações na disposição, já definida, dos dados de entrada. No caso de se ter mais de três camadas de solo, o usuário deverá acrescentar as informações das outras camadas em filas subsequentes às já existentes, deixando sempre a fila inferior com as informações correspondentes aos coeficientes de variação dos parâmetros estocásticos.

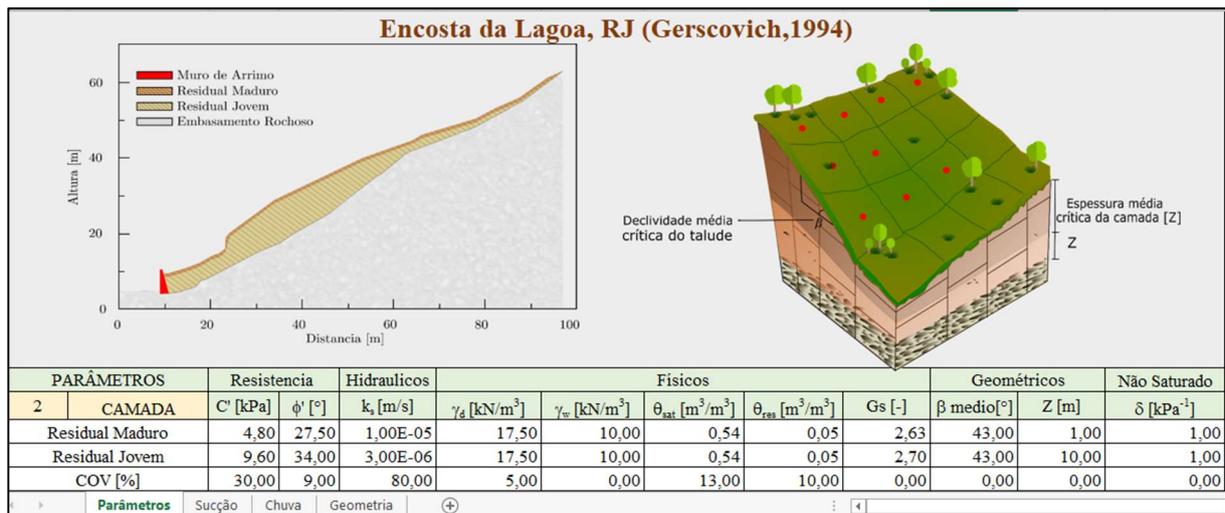


Figura 97. Formato da primeira aba do arquivo INPUTS_Local.xlsx.

Na segunda aba, destinada para as informações da curva de retenção da água no solo para cada tipo de material, é importante que o usuário não gere espaços em branco após o último dado inserido (Figura 98).

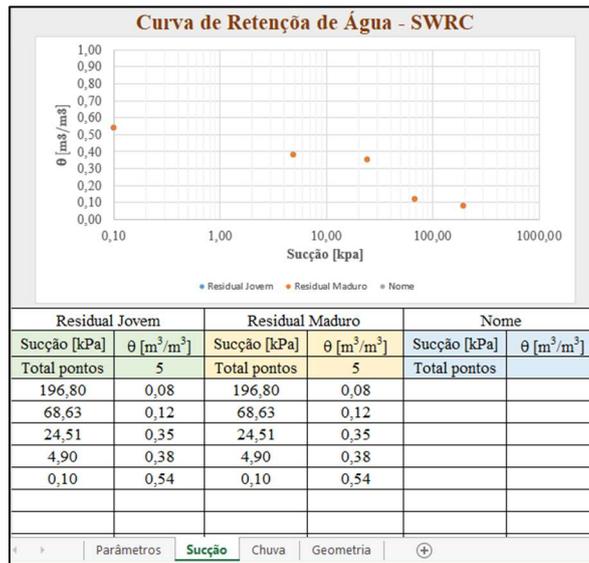


Figura 98. Aba correspondente aos dados de entrada da curva de retenção da água no solo SWRC.

O evento de chuva, como já foi explicado anteriormente, deve conter uma resolução de horas, porém, no caso de não se ter as informações discretizadas nesta resolução, o software RISCO realiza a própria discretização. Para isso, como apresentado na Figura 99, é importante indicar o número associado à resolução do evento de precipitação fornecido.

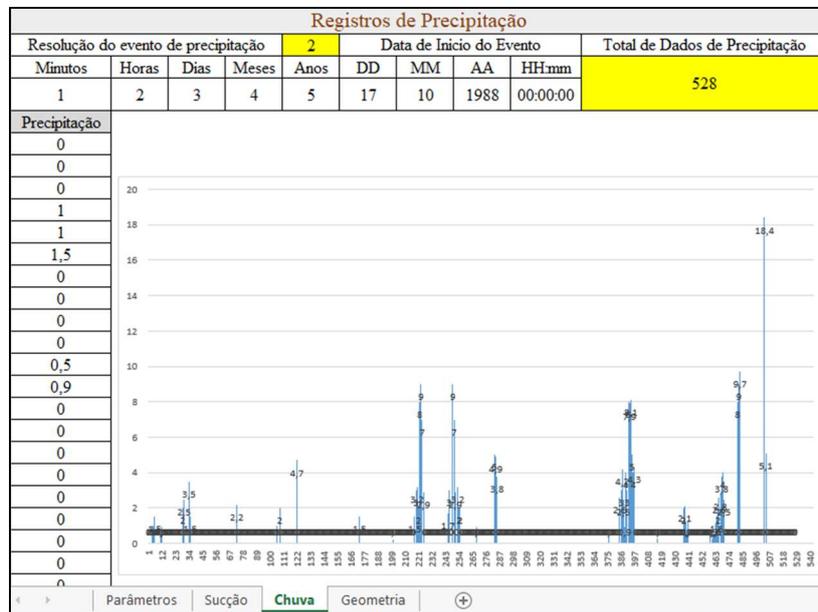


Figura 99. Formato para inserir os dados correspondentes ao evento de precipitação das chuvas antecedentes.

Finalmente, a última aba, corresponde a geometria do talude e geometria dos elementos que nele se encontram. Nesta aba, como apresentado na Figura 100, se o caso de estudo

