



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Stéfany Cristina Costa Gomes

ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE DE TALUDE NATURAL SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E DE FRATURAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO
SUBJACENTE

Rio de Janeiro
2025



UFRJ

Stéfany Cristina Costa Gomes

ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE DE TALUDE NATURAL SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E DE FRATURAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO
SUBJACENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador(es): Marcos Barreto de Mendonça

Wagner Nahas Ribeiro

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Rio de Janeiro

2025

Gomes, Stéfany Cristina Costa.

Análise numérica da estabilidade de talude natural sob diferentes condições pluviométricas e de fraturamento do maciço rochoso subjacente / Stéfany Cristina Costa Gomes. – 2025.

f. 195: il. 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2025.

Orientadores: Marcos Barreto de Mendonça, Wagner Nahas Ribeiro e Maria do Carmo Reis Cavalcanti

1. Estabilidade de Taludes. 2. Infiltração de Chuvas. 3. Solo Não Saturado. 4. Modelagem Numérica. I. Mendonça, Marcos Barreto de. Ribeiro, Wagner Nahas. Cavalcanti, Maria do Carmo Reis. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica e Escola de Química. III. Análise numérica da estabilidade de talude natural sob diferentes condições pluviométricas e de fraturamento do maciço rochoso subjacente.

Stéfany Cristina Costa Gomes

ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE DE TALUDE NATURAL SOB DIFERENTES
CONDIÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E DE FRATURAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO
SUBJACENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Prof. Dsc. Marcos Barreto de Mendonça

Prof. Dsc. Wagner Nahas Ribeiro

Prof. Dsc. Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Prof. Dsc. Luiz Augusto da Silva Florêncio

Prof. Dsc. Julián Asdrubal Buriticá García

Prof. Dsc. Rodrigo Moulin Ribeiro Pierott

Prof. Dsc. Rodrigo Vinagre Cintra da Costa

Rio de Janeiro
2025

A Deus.

A minha família,

Francisco, Marilene e Felipe.

Aos meus parceiros de vida,

João Victor e Guilherme Kanheski.

RESUMO

GOMES, Stéfany Cristina Costa. **Análise numérica da estabilidade de talude natural sob diferentes condições pluviométricas e de fraturamento do maciço rochoso subjacente.** Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

A cidade de Petrópolis, situada na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro, apresenta alta suscetibilidade a deslizamentos deflagrados por precipitações intensas, em função do relevo acidentado, das características geológico-geotécnicas e da ocupação urbana desordenada. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de modelagem numérica transiente de fluxo, a influência das condições de chuva e das propriedades do maciço rochoso sobre a estabilidade de uma encosta representativa do Monte Florido, em Petrópolis/RJ, composta por solo residual sobre rocha fraturada. As simulações foram realizadas no software de elementos finitos RS2, considerando o comportamento não saturado do solo e o método de *Shear Strength Reduction* (SSR) para determinar o fator de segurança (*Strength Reduction Factor* – SRF). Foram avaliados sete cenários de precipitação, definidos a partir de diferentes distribuições temporais e probabilidades de ocorrência de deslizamentos representativos para o município, além de três condições de permeabilidade do maciço rochoso ($k=1\times10^{-3}$, 1×10^{-2} e 1×10^{-1} m/s), representando distintos graus de fraturamento. Os resultados indicaram redução progressiva do fator de segurança, ao longo do tempo, com maior perda de estabilidade nos cenários de chuva intensa e em maciços de maior condutividade hidráulica. O aumento da poropressão na interface solo-rocha foi determinante para a instabilidade, concentrando deformações cisalhantes nessa região. Em maciços mais permeáveis, observaram-se possíveis inconsistências numéricas, enquanto nas menores permeabilidades o modelo apresentou resposta coerente e gradual, com redução ordenada do fator de segurança e comportamento fisicamente consistente. Apesar das limitações numéricas observadas, o estudo apresenta potencial para aprimorar a identificação de condições e momentos críticos de instabilidade e subsidiar análises mais robustas na previsão de deslizamentos.

Palavras-chave: Estabilidade de Taludes; Infiltração de Chuvas; Solo Não Saturado; Modelagem Numérica.

ABSTRACT

GOMES, Stéfany Cristina Costa. **Numerical analysis of the stability of a natural slope under different rainfall conditions and fracture patterns in the underlying rock mass.** Rio de Janeiro, 2025. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

The city of Petrópolis, located in the mountainous region of the state of Rio de Janeiro, is highly susceptible to landslides triggered by intense rainfall, due to its steep relief, geological–geotechnical characteristics, and unplanned urban occupation. In this context, the present study aims to assess, by means of transient numerical flow modelling, the influence of rainfall conditions and rock mass properties on the stability of a slope representative of Monte Florido, in Petrópolis/RJ, composed of residual soil over fractured rock. The simulations were performed with the RS2 finite element software, considering the unsaturated behaviour of the soil and the Shear Strength Reduction (SSR) method to determine the factor of safety, expressed by the Strength Reduction Factor (SRF). Seven rainfall scenarios were analysed, defined from different temporal distributions and probabilities of occurrence of landslides representative of the municipality, as well as three rock mass permeability conditions ($k = 1 \times 10^{-3}$, 1×10^{-2} and 1×10^{-1} m/s), representing different degrees of fracturing. The results indicated a progressive reduction in the factor of safety over time, with greater loss of stability in scenarios of intense rainfall and in rock masses with higher hydraulic conductivity. The increase in pore pressure at the soil–rock interface was decisive for instability, concentrating shear deformations in this region. In more permeable rock masses, possible numerical inconsistencies were observed, whereas for lower permeabilities the model showed a coherent and gradual response, with an orderly reduction in the factor of safety and physically consistent behaviour. Despite the numerical limitations observed, the study has the potential to improve the identification of critical conditions and timing of instability and to support more robust analyses for landslide prediction.

Keywords: Slope Stability; Rainfall Infiltration; Unsaturated Soil; Numerical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características dos principais movimentos de encosta na dinâmica ambiental brasileira.	26
Figura 2 – Principais categorias de movimentos de massa.	27
Figura 3 – Evoltória de Mohr.	28
Figura 4 – Envoltória de Mohr e plano de ruptura.	29
Figura 5 - Representação do critério de ruptura de Mohr Coulomb.	29
Figura 6 – Representação do solo não saturado	30
Figura 7 – Representação esquemática de uma malha no Método dos Elementos Finitos, composta por elementos e pontos nodais interligados	39
Figura 8 – Tipos de elementos finitos	39
Figura 9 - Fluxograma das etapas seguidas no trabalho	44
Figura 10 – Localização do município de Petrópolis e divisão administrativa em distritos. ...	45
Figura 11 – Deslizamento de solo raso em Morin (1º distrito).	48
Figura 12 – Movimento de corpos rochosos no Quitandinha (1º distrito)	49
Figura 13 – Deslizamento raso na Servidão Frei Leão, Alto da Serra em 2022 (1º Distrito). .	49
Figura 14 – Localização aproximada do Monte Florido no município de Petrópolis.	50
Figura 15 – Perfil topográfico do Monte Florido, em Petrópolis (RJ).	52
Figura 16 – Representação esquemática do Monte Florido, destacando o solo sobre rocha. ..	52
Figura 17 – Esquematização do perfil no RS2 com camada de solo (verde) sobre maciço rochoso (roxa).	53
Figura 18 – Influência da frequência na condutividade hidráulica (k) de maciços rochosos na direção de uma família de juntas paralelas.	54
Figura 19 – Perfil com malha discretizada na interface solo-maciço rochoso. Fonte: Autora (2025).	55
Figura 20 – Modelo numérico com detalhe da aplicação da carga hidráulica total (Total head) nas bordas laterais detalhando um dos lados apenas para melhor visualização.	56
Figura 21 – Probabilidades de ocorrência de pelo um deslizamento e níveis municipais de alerta.	57
Figura 22 – Função de condição de contorno no RS2 para inserção da chuva dependente do tempo.	58
Figura 23 – Gráficos da evolução da poropressão máxima (kPa) ao longo do tempo (0–96 h).	64

Figura 24 – Gráficos da evolução do SRF ao longo do tempo (0–96 h).....	68
Figura 25 – Tempo (h) do último estágio convergente, correspondente ao SRF acima de 1, para os diferentes cenários de precipitação considerados.	69
Figura 26 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 92 horas com SRF de 1,51.	77
Figura 27 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 92 horas com SRF de 1,51.	77
Figura 28 – Grau de saturação, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 92 horas com SRF de 1,51.	77
Figura 29 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 93 horas com SRF de 0,91.	78
Figura 30 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 93 horas com SRF de 0,91.	78
Figura 31 – Grau de saturação, Cenário 1, 1×10^{-3} , estágio de 93 horas com SRF de 0,91	78
Figura 32 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 90 horas com SRF de 1,53.	79
Figura 33 - Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 90 horas com SRF de 1,53.	79
Figura 34 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 90 horas com SRF de 1,53.	79
Figura 35 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 91 horas com SRF de 0,90.	80
Figura 36 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 91 horas com SRF de 0,90.	80
Figura 37 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 91 horas com SRF de 0,90.	80
Figura 38 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 86 horas com SRF de 3,85.	81
Figura 39 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 86 horas com SRF de 3,85.	81
Figura 40 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 86 horas com SRF de 3,85.	81
Figura 41 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 87 horas com SRF de 0,99.	82
Figura 42 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 87 horas com SRF de 0,99.	82
Figura 43 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 87 horas com SRF de 0,99.	82
Figura 44 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 90 horas com SRF de 1,01.....	83
Figura 45 – Poropressão, cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 90 horas com SRF de 1,01.....	83
Figura 46 – Grau de saturação, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 90 horas com SRF de 1,01.....	83

Figura 47 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 91 horas com SRF de 0,77.....	84
Figura 48 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 91 horas com SRF de 0,77.....	84
Figura 49 – Grau de saturação, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 91 horas com SRF de 0,77.....	84
Figura 50 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 87 horas com SRF de 1,51.....	85
Figura 51 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 87 horas com SRF de 1,51.....	85
Figura 52 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 87 horas com SRF de 1,51.....	85
Figura 53 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 88 horas com SRF de 0,88.....	86
Figura 54 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 88 horas com SRF de 0,88.....	86
Figura 55 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 88 horas com SRF de 0,88.....	86
Figura 56 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 84 horas com SRF de 1,05.....	87
Figura 57 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 84 horas com SRF de 1,05.....	87
Figura 58 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 84 horas com SRF de 1,05.....	87
Figura 59 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 85 horas com SRF de 0,89.....	88
Figura 60 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 85 horas com SRF de 0,89.....	88
Figura 61 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 85 horas com SRF de 0,89.....	88
Figura 62 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 88 horas com SRF de 3,88.	89
Figura 63 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 88 horas com SRF de 3,88.	89
Figura 64 – Grau de saturação, Cenário 1, 1×10^{-2} , estágio de 88 horas com SRF de 3,88.	89

Figura 65 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 89 horas com NC.....	90
Figura 66 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 89 horas com NC.....	90
Figura 67 – Grau de saturação, Cenário 1, 1×10^{-2} , estágio de 89 horas com NC.....	90
Figura 68 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 92 horas com SRF de 3,17.	91
Figura 69 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 92 horas com SRF de 3,17.	91
Figura 70 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 92 horas com SRF de 3,17.	91
Figura 71 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 93 horas com SRF NC.....	92
Figura 72 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 93 horas com SRF NC.....	92
Figura 73 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 93 horas com SRF NC.	92
Figura 74 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 84 horas com SRF de 3,80.	93
Figura 75 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 84 horas com SRF de 3,80.	93
Figura 76 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 84 horas com SRF de 3,80.	93
Figura 77 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 85 horas com SRF NC.....	94
Figura 78 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 85 horas com SRF NC.....	94
Figura 79 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 85 horas com SRF NC.	94
Figura 80 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 82 horas com SRF de 3,64.	95
Figura 81 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 82 horas com SRF de 3,64.	95
Figura 82 – Grau de saturação, Cenário 1, 1×10^{-1} , estágio de 82 horas com SRF de 3,64.	95
Figura 83 – Deformação plástica cisalhante máxima, cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 83 horas com NC.....	96
Figura 84 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 83 horas com NC.....	96
Figura 85 – Grau de saturação, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 83 horas com NC.	96
Figura 86 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 80 horas com SRF de 3,21.	97
Figura 87 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 80 horas com SRF de 3,21.	97
Figura 88 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 80 horas com SRF de 3,21.	97
Figura 89 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 81 horas com NC.....	98

Figura 90 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 81 horas com NC.....	98
Figura 91 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 81 horas com NC.	98
Figura 92 – Deformação plástica Cisalhante máxima, cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 77 horas com SRF 3,48.	99
Figura 93 - Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 77 horas com SRF 3,48.....	99
Figura 94 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 77 horas com SRF 3,48.	99
Figura 95 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 78 horas com NC.....	100
Figura 96 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 78 horas com NC.....	100
Figura 97 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 78 horas com NC.	100
Figura 98 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 70 horas com SRF de 1,06.	101
Figura 99 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 70 horas com SRF de 1,06.	101
Figura 100 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 70 horas com SRF de 1,06.	101
Figura 101 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 0,995.	102
Figura 102 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 0,995. ..	102
Figura 103 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 0,995.	102
Figura 104 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,06.	103
Figura 105 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,06.	103
Figura 106 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,06.	103
Figura 107 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,995.	104
Figura 108 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,995. ..	104
Figura 109 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,995.	104
Figura 110 – Deformação plástica cisalhante máxima, cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,05.	105
Figura 111 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,05.	105
Figura 112 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,05.	

.....	105
Figura 113 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,98.	106
Figura 114 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,98.	106
Figura 115 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,98.	106
Figura 116 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,20.	107
Figura 117 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,20.	107
Figura 118 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,20.	107
Figura 119 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,995.	108
Figura 120 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,995. ..	108
Figura 121 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 0,995.	108
Figura 122 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 1,22.....	109
Figura 123 – Poropressão, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 1,22.....	109
Figura 124 – Grau de saturação, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 1,22.	109
Figura 125 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 72 horas com SRF de 0,95.....	110
Figura 126 – Poropressão, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 72 horas com SRF de 0,95.....	110
Figura 127 – Grau de saturação, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 72 horas com SRF de 0,95.	110
Figura 128 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,25.....	111
Figura 129 – Poropressão, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,25.....	111
Figura 130 – Grau de saturação, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,25.	111

Figura 131 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,98.....	112
Figura 132 – Poropressão, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,98.....	112
Figura 133 – Grau de saturação, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,98.....	112
Figura 134 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,10.....	113
Figura 135 – Poropressão, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,10.....	113
Figura 136 – Grau de saturação, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,10.....	113
Figura 137 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,74.....	114
Figura 138 – Poropressão, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,74.....	114
Figura 139 – Grau de saturação, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,74.....	114
Figura 140 - Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,19.....	115
Figura 141 – Poropressão, Cenário 7, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,19.....	115
Figura 142 – Grau de saturação, Cenário 7, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,19.....	115
Figura 143 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,97.	116
Figura 144 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,97.	116
Figura 145 - Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,97.	116
Figura 146 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 76 horas com SRF de 2,65.	117
Figura 147 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 76 horas com SRF de 2,65.	117
Figura 148 - Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 76 horas com SRF de 2,65.	117

Figura 149 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 77 horas com NC.....	118
Figura 150 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 77 horas com NC.....	118
Figura 151 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 77 horas com NC.	118
Figura 152 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 62 horas com SRF de 1,71.	119
Figura 153 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 62 horas com SRF de 1,71.	119
Figura 154 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 62 horas com SRF de 1,71.	119
Figura 155 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 63 horas com NC.....	120
Figura 156 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 63 horas com NC.....	120
Figura 157 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 63 horas com NC.	120
Figura 158 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 53 horas com SRF 3,00.	121
Figura 159 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 53 horas com SRF 3,00.	121
Figura 160 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 53 horas com SRF 3,00.	121
Figura 161 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 54 horas com SRF de 0,78.	122
Figura 162 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 54 horas com SRF de 0,78.	122
Figura 163 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 54 horas com SRF de 0,78.	122
Figura 164 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 47 horas com SRF de 2,62.	123
Figura 165 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 47 horas com SRF de 2,62.	123
Figura 166 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 47 horas com SRF de 2,62.....	123
Figura 167 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 48 horas com SRF de 0,11.	124
Figura 168 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 48 horas com SRF de 0,11.	124
Figura 169 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 48 horas com SRF de 0,11.	124
Figura 170 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 36 horas com SRF de 3,27.	125
Figura 171 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 36 horas com SRF de 3,27.	125

Figura 172 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 36 horas com SRF de 3,27.	125
Figura 173 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 37 horas com SRF NC.....	126
Figura 174 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 37 horas com SRF NC.....	126
Figura 175 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 37 horas com SRF NC.	126
Figura 176 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 30 horas com SRF de 3,55.....	127
Figura 177 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 30 horas com SRF de 3,55.	127
Figura 178 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 30 horas com SRF de 3,55.	127
Figura 179 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 31 horas com SRF NC.....	128
Figura 180 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 31 horas com SRF NC.....	128
Figura 181 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 31 horas com SRF NC. .	128
Figura 182 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 26 horas com SRF 2,93.	129
Figura 183 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 26 horas com SRF 2,93.	129
Figura 184 - Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 26 horas com SRF 2,93..	129
Figura 185 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 27 horas com SRF NC.....	130
Figura 186 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 27 horas com SRF NC.....	130
Figura 187 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 27 horas com SRF NC. .	130
Figura 188 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 24 horas com SRF de 3,69.....	131
Figura 189 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 24 horas com SRF de 3,69.	131
Figura 190 - Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 24 horas com SRF de 3,69.	131
Figura 191 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 25 horas com NC.....	132
Figura 192 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 25 horas com NC.....	132
Figura 193 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 25 horas com NC.	132
Figura 194 - Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).	158
Figura 195 - Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s).....	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cenários de precipitação adotados no modelo, definidos a partir dos limiares de 24 h e 96 h propostos por Gonzalez et al. (2022).....	57
Tabela 2 – Intensidades de precipitação acumulada (72 h e 24 h finais) e respectivas conversões para infiltração em m/s utilizadas no modelo numérico.....	58
Tabela 3 – Propriedades geotécnicas do solo utilizadas na modelagem.	59
Tabela 4 – Parâmetros de Van Genuchten adotados para o solo: α (1/m), parâmetro de inverso da pressão de entrada de ar; n e m, parâmetros empíricos de forma; θ_r , teor de umidade residual e θ_s , teor de umidade de saturação.	60
Tabela 5 – Propriedades geotécnicas do maciço rochoso utilizadas na modelagem.....	60
Tabela 6 – Parâmetros do modelo de van Genuchten adotados para o maciço rochoso, conforme valores de referência fornecidos pelo software RS2.....	61
Tabela 7 – Configurações adotadas nos cenários de chuva e permeabilidade do maciço rochoso.	62
Tabela 8 – Valores máximos de poropressão (kPa) para os diferentes cenários simulados.....	63
Tabela 9 – Resultados simplificados de SRF da simulação numérica para diferentes cenários de chuva e inclinação de k_1 ao longo de 96 horas de simulação.	67
Tabela 10 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando três cenários de precipitação (1a, 2a e 3a) e $k_1 = 0^\circ$	70
Tabela 11 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando 4 cenários de precipitação (4a, 5a, 6a e 7a) para $k_1 = 0^\circ$	71
Tabela 12 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando 3 cenários de precipitação (1d, 2d e 3d) e $k_1 = 15^\circ$	72
Tabela 13 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando quatro cenários de precipitação (4d, 5d, 6d e 7d) para $k_1 = 15^\circ$	73
Tabela 14 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s, considerando três cenários de precipitação (1b, 2b e 3b) para $k_1 = 0^\circ$	73
Tabela 15 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s, considerando 4 cenários de precipitação (4b, 5b, 6b e 7b) para $k_1 = 0^\circ$	74
Tabela 16 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-1}$ m/s, considerando 3 cenários de precipitação (1c, 2c e 3c) para $k_1 = 0^\circ$	75
Tabela 17 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-1}$ m/s, considerando 4 cenários de precipitação (4c, 5c, 6c e 7c) para $k_1 = 0^\circ$	76

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

E	<i>East</i> (Leste)
EW	<i>East–West</i> (Leste–Oeste)
FS	Fator de segurança
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
MEF	Método dos Elementos Finitos
N	<i>North</i> (Norte)
NC	<i>No iterations Converged</i>
NE	<i>Northeast</i> (Nordeste)
NS	<i>North–South</i> (Norte–Sul)
NW	<i>Northwest</i> (Noroeste)
S	<i>South</i> (Sul)
SSR	<i>Shear Strength Reduction</i> (Redução da resistência ao cisalhamento)
SRF	<i>Strenght Reduction Factor</i> (Fator de redução de resistência)

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar
$C(\Psi)$	Função de correção da sucção
c'	Coesão efetiva do solo
e	Constante, igual a 2,71828
E	Módulo de elasticidade
g	Aceleração da gravidade
h	Carga hidráulica
h_i	Carga de sucção
h_p	Carga de pressão no ponto
i	Gradiente hidráulico
i	Número do intervalo de integração;
j	intervalo de integração correspondente à sucção ψ ;
$k(\psi)$	Condutividade hidráulica não saturada em função a sucção matricial
k_s	Coefficiente de permeabilidade na condição saturada
$k(\theta)_i$	Coefficiente de permeabilidade correspondente à umidade volumétrica θ_i
k_{sc}	Coefficiente de permeabilidade saturado calculado
m	Máximo intervalo de integração correspondente à umidade volumétrica na condição saturada
m	Parâmetro relacionado ao formato da curva característica
N	Número de intervalos de integração ao longo da curva característica de sucção
n	Número de intervalos de sucção considerados
n	Número total de intervalos de sucção considerados
n	Parâmetro relacionado à distribuição dos poros
p	Parâmetro cujo valor está no intervalo [1;2]
s_p	Inclinação da tangente à função no ponto
T	Tensão superficial da água
t	Tempo
u	Poropressão
u_a	Poropressão do ar
u_w	Poropressão da água
y_i	logaritmo da sucção no meio do intervalo $[i, i+1]$

v	Velocidade de Darcy, ou fluxo por unidade de área
χ	Parâmetro que quantifica a contribuição da sucção para a resistência do solo.
ξ	Porosidade na condição saturada
μ	Massa específica da água
η	Viscosidade da água
θ	Teor de umidade volumétrico
θ'	Derivada da função
θ_s	Teor de umidade volumétrico na condição saturada
θ_p	Umidade volumétrica no ponto
θ_s	Umidade volumétrica saturada
θ_r	Umidade volumétrica residual
φ'	Ângulo de atrito do solo
σ	Tensão total
σ'	Tensão efetiva
τ	Tensão cisalhante
ψ	Sucção
γ_w	Peso específico da água
∇	Operador diferencial (gradiente/divergência)
∇h	Gradiente hidráulico

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
1.2	OBJETIVO	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	MOVIMENTOS DE MASSA	25
2.2	ESTABILIDADE DE TALUDES	28
2.2.1	Análise Tensão-Deformação	28
2.2.2	Efeito da Água nas Encostas	30
2.2.2.1	<i>Relação entre a infiltração da água das chuvas e a estabilidade de encostas</i>	<i>31</i>
2.2.2.2	<i>Condutividade Hidráulica nos Solos não Saturados</i>	<i>33</i>
2.2.2.2.1	<i>Método de Fredlund, Xing (1994)</i>	<i>35</i>
2.2.2.2.2	<i>Método de Green e Corey (1971)</i>	<i>36</i>
2.2.2.2.3	<i>Método de Van Genuchten (1980)</i>	<i>37</i>
2.2.3	Aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF)	38
2.2.3.1	<i>Considerações Iniciais</i>	<i>38</i>
2.2.3.2	<i>Fundamentos Gerais do Método dos Elementos Finitos (MEF)</i>	<i>38</i>
2.2.3.3	<i>Método da redução da resistência ao cisalhamento - SSR</i>	<i>40</i>
2.2.3.4	<i>Software de elementos finitos – RS2</i>	<i>42</i>
3	METODOLOGIA	43
3.1	ÁREA DE ESTUDO	45
3.1.1	Características Gerais de Petrópolis	45
3.1.2	Contexto Ambiental	46
3.1.3	Contexto Geológico e Geomorfológico	47
3.1.4	Movimentos de massa na área de estudo	47
3.1.5	Características Gerais do Monte Florido	50
3.2	ESPECIFICAÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO	51
3.3	CONCEPÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	51
3.3.1	Construção da geometria no RS2	51
3.3.2	Geração da malha de discretização	54
3.3.3	Configuração das condições de contorno	55
3.3.3.1	<i>Cenários de Precipitação</i>	<i>56</i>
3.3.4	Seleção e inserção dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos	59
3.3.4.1	<i>Solo</i>	<i>59</i>
3.3.4.2	<i>Maciço rochoso</i>	<i>60</i>
3.4	ANÁLISES DE FLUXO E DE ESTABILIDADE	61

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	ANÁLISE DE FLUXO	63
4.2	RESULTADOS DO SRF NOS CENÁRIOS DEFINIDOS	66
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS DE CHUVA PARA UM MESMO VALOR DE PERMEABILIDADE DO MACIÇO ROCHOSO	69
4.3.1	Permeabilidade do maciço rochoso de 1×10^{-3} m/s.....	69
4.3.1.1	Valores padrões do RS2 para k_1 e k_2/k_1	69
4.3.1.2	$k_2/k_1=0,01$ e $k_1=15^\circ$	72
4.3.2	Permeabilidade do maciço rochoso de 1×10^{-2} m/s.....	73
4.3.2.1	Valores padrões do RS2 para k_1 e k_2/k_1	73
4.3.3	Permeabilidade do maciço de 1×10^{-1} m/s.....	75
4.3.3.1	Valores padrões do RS2 para k_1 e k_2/k_1	75
4.4	ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA.....	76
4.4.1	Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$	77
4.4.2	Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 0,01$ e $k_1 = 15^\circ$	82
4.4.3	Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-2}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$	89
4.4.4	Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-1}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$	95
4.4.5	Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$	100
4.4.6	Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 0,01$ e $k_1 = 15^\circ$	108
4.4.7	Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-2}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$	116
4.4.8	Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-1}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$	125
5	CONCLUSÕES	133
5.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	133
5.2	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	135
5.3	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	136

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nas últimas décadas, a intensificação de eventos naturais como inundações, escorregamentos e tempestades intensas tem evidenciado a vulnerabilidade de áreas urbanizadas diante de processos ambientais extremos (De praga Baião *et al.*, 2025). Entre esses fenômenos, destacam-se os movimentos de massa, que, embora naturais e importantes para a modelagem do relevo, tornam-se críticos quando associados à ocupação irregular em encostas íngremes sujeitas a chuvas intensas (Pinto, 2006).

No caso de regiões montanhosas tropicais, como Petrópolis-RJ, os deslizamentos induzidos por precipitação são recorrentes e frequentemente devastadores (Guerra, 1995). A estabilidade está diretamente condicionada ao grau de intemperismo, às descontinuidades do maciço e ao regime de infiltração. Em eventos de chuva intensa, a infiltração e a percolação pelas fraturas reduz a sucção, enfraquecem os solos e podem desencadear desde escorregamentos rasos até movimentos mais profundos, associados à elevação do nível freático (Lacerda, 1997).

Compreender os cenários de instabilidade de taludes é essencial para antecipar momentos críticos e orientar ações preventivas, dado que a estabilidade resulta da interação entre propriedades do solo, estado de saturação, regime de fluxo e geometria do terreno. Nesse contexto, abordagens numéricas baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF), com análise de fluxo-deformação com aplicação da técnica de *Shear Strength Reduction* (SSR), têm se mostrado promissoras por permitir acompanhar a evolução transiente da poropressão e seus efeitos no estado de deformação até a condição de ruptura (Potts; Zdravkovic, 1999; Griffiths; Lane, 1999).

Evidências recentes indicam que mesmo chuvas de baixa a moderada intensidade podem reduzir significativamente o fator de segurança, sobretudo quando o fluxo não saturado altera a sucção, a condutividade hidráulica e a distribuição espacial de umidade (Jiang *et al.*, 2025; Ren *et al.*, 2024). Nesse sentido, investigar a instabilidade de taludes sob efeito de chuvas em condições transiente de fluxo, com base em modelos numéricos que representem adequadamente os solos não saturados, é fundamental para o avanço científico e para a gestão do risco em áreas urbanas vulneráveis.

1.2 OBJETIVO

Avaliar, por meio de modelagem numérica por elementos finitos, a influência do padrão de fraturamento do maciço rochoso subjacente associado às condições de pluviometria sobre a

estabilidade de uma encosta representativa da região de Petrópolis (RJ), constituída por solo sobre rocha.

Como bjetivos específicos, tem-se:

- Analisar a influência da condutividade hidráulica do maciço rochoso e da intensidade de precipitação sobre a evolução da poropressão e seu efeito no fator de segurança, representado no trabalho pelo *Strength Reduction Factor* (SRF);
- Investigar efeitos da anisotropia hidráulica na redistribuição das poropressões e nos mecanismos de instabilidade simulados;
- Comparar os resultados numéricos obtidos com dados estatísticos de referência sobre limiares de pluviometria para deflagração de deslizamentos em Petrópolis com base em Gonzalez *et al.* (2022);
- Identificar os cenários críticos de instabilidade, relacionando o fator de segurança às condições de chuva e de condutividade hidráulica.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está estruturada em cinco partes. Inicialmente, são apresentadas as considerações iniciais e o objetivo do trabalho. Em seguida, reúne-se a fundamentação teórica, contemplando os movimentos de massa, os conceitos de estabilidade de taludes, a análise tensão-deformação, o efeito da água nas encostas e aplicações do Método dos Elementos Finitos em análises geotécnicas.

Na sequência, descreve-se a metodologia adotada, com a caracterização da área de estudo em Petrópolis e o detalhamento da concepção do modelo numérico no RS2, incluindo construção da geometria, geração de malha, definição de condições de contorno, seleção de parâmetros geotécnicos e hidráulicos e os procedimentos de análises de fluxo e estabilidade. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados, abrangendo a análise de fluxo, a evolução do SRF nos cenários definidos, a comparação entre padrões de chuva para diferentes valores de permeabilidade do maciço rochoso e a avaliação das superfícies de ruptura. Por fim, são sintetizadas as principais conclusões, as limitações do estudo e as recomendações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa destacam-se pela importância geomorfológica e pelas implicações práticas e econômicas (Guidicini; Nieble, 1993). Em termos conceituais, conforme Bigarella e Passos (2003), podem ser entendidos, de forma ampla, como processos gravitacionais que deslocam solo, rocha ou detritos encosta abaixo, com diferentes profundidades e estilos de mobilização.

Sob o ponto de vista dinâmica, os movimentos de massa podem ser entendidos como sistemas que evoluem por estágios: pré-ruptura, ruptura, pós-ruptura e reativação, o que organiza a leitura do fenômeno no tempo (Leroueil *et al.*, 1996). Na definição e na descrição desses eventos, são recorrentemente considerados condicionantes gerais como a geometria e a geomorfologia da encosta, a natureza do material, a cobertura e o uso do solo, além da atuação de agentes naturais, a exemplo de precipitação e sismos (Fernandes, 2001).

Quanto a classificação, trata-se de um arranjo multidimensional que, na prática, estrutura-se sobretudo em dois eixos principais: o tipo de material (rocha, terra ou detritos) e o tipo de movimento (queda, tombamento, deslizamento, espalhamento, fluxo), a partir dos quais se desdobram subcategorias e descritores operacionais, como velocidade de mobilização e volume deslocado (Cruden; Varnes, 1996; Terzaghi, 1960).

As características de cada tipo de movimento estão diretamente ligadas à metodologia de classificação e, portanto, dependem do sistema classificatório adotado. Além disso, diferentes disciplinas empregam definições e arranjos próprios, refletindo a complexidade do fenômeno e a diversidade de combinações de materiais, estruturas e agentes deflagradores (Highland; Bobrowsky, 2008; Nunes; Sayão, 2014).

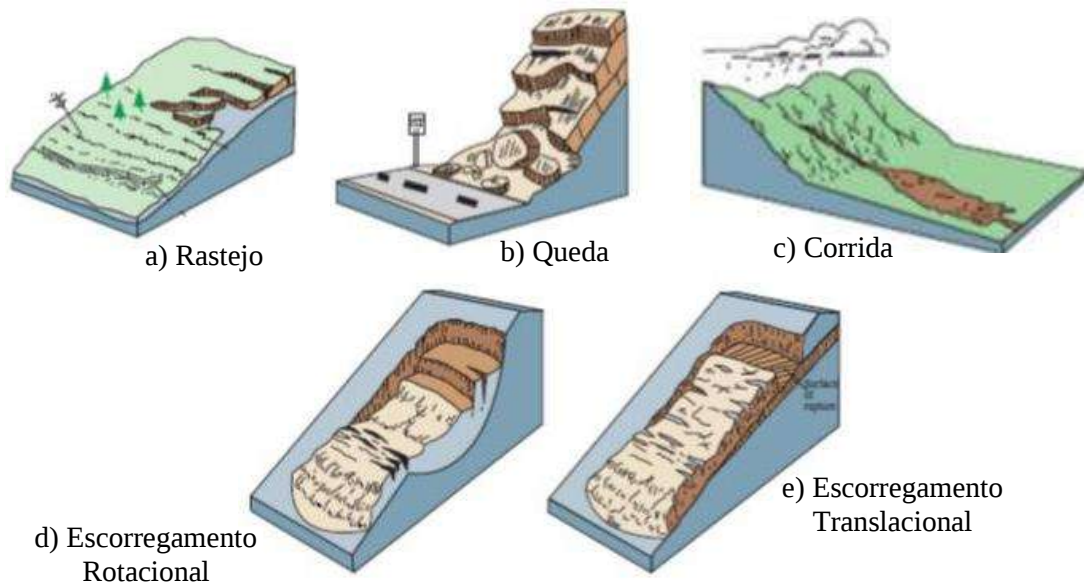
No Brasil, a classificação proposta por Augusto Filho (1992), apresentada na Figura 1, constitui um referencial importante. Essa proposta organiza os movimentos de massa em quatro classes principais: rastejos (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*). Cada classe abrange subdivisões que totalizam 24 tipos de movimentos, descritos a partir de suas características quanto ao material mobilizado, à velocidade de deslocamento e à geometria da ruptura, refletindo a diversidade de processos que compõem a dinâmica ambiental brasileira. Na Figura 2, é apresentada uma ilustração esquemática que auxilia na visualização dessas classes e suas subdivisões.

Figura 1 – Características dos principais movimentos de encosta na dinâmica ambiental brasileira.

Tipo de movimento	Características do movimento, material e geometria
Rastejos (<i>creep</i>)	• Vários planos de deslocamento (internos) • Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade • Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada • Geometria indefinida
Escorregamentos (<i>slides</i>)	• Poucos planos de deslocamento (externos) • Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) • Pequenos a grandes volumes de material. • Geometria e materiais variáveis • Planares – solos pouco espessos, solo e rochas com um plano de fraqueza • Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas • Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
Quedas (<i>falls</i>)	• Sem planos de deslocamento • Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado • Velocidades muito altas (vários m/s) • Material rochoso • Pequenos a médios volumes • Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. • Rolamento de matacão • Tombamento
Corridas (<i>flows</i>)	• Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) • Movimento semelhante ao de um líquido viscoso • Desenvolvimento ao longo das drenagens • Velocidades médias a altas • Mobilização de solo, rocha, detritos e água • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992)

Figura 2 – Principais categorias de movimentos de massa.



Fonte: Adaptado de USGS (2004)

Neste trabalho, o foco recai sobre os escorregamentos, devido à sua alta frequência e potencial destrutivo em áreas montanhosas urbanizadas, como no Sudeste do Brasil.

Os escorregamentos consistem em movimentos gravitacionais que ocorrem ao longo de uma superfície de ruptura bem definida, ao longo da qual a massa de solo se desloca. A dinâmica desse processo envolve, inicialmente, uma alta velocidade de movimento, que tende a diminuir progressivamente devido ao atrito gerado entre o material em deslocamento e a massa estática subjacente (IPT, 1991). Esse atrito pode levar à paralisação completa do movimento ou à sua transição para uma fase mais lenta, com características típicas de rastejo (Augusto filho, 1992).

Assim, tais eventos distinguem-se por sua natureza rápida e de curta duração, frequentemente associados a elevado potencial destrutivo (Guidicini; Nieble, 1993). A clareza na delimitação da superfície de ruptura permite identificar com precisão a separação entre os materiais mobilizados e os ainda estáveis, o que contribui para a adequada caracterização e classificação do tipo de escorregamento (Wicander; Monroe, 2009).

Nas regiões tropicais úmidas brasileiras, os escorregamentos planares ou translacionais constituem a forma mais recorrente de movimento de massa, comumente associados à atuação de agentes externos como a chuva intensa. Esses eventos caracterizam-se por mobilizar camadas superficiais de solo, geralmente menos espessas, e tendem a ocorrer com maior frequência em áreas com ocupação antrópica recente, baixa cobertura vegetal e acúmulo de material coluvionar (Dias; Grohmann, 2024).

2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES

2.2.1 Análise Tensão-Deformação

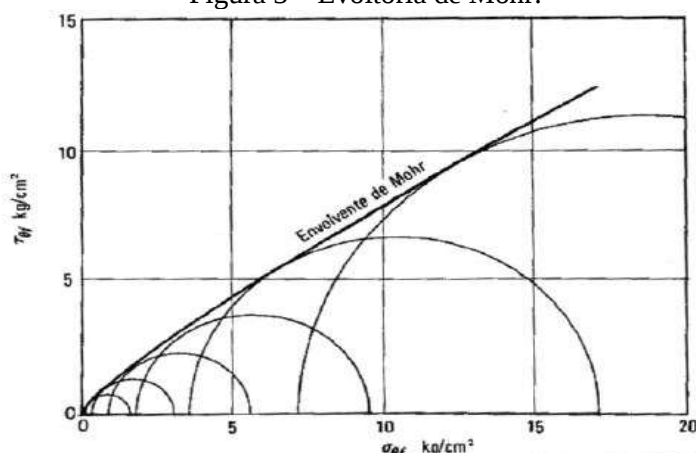
A avaliação da estabilidade de taludes requer, além dos aspectos geomorfológicos e hidrológicos, a compreensão do comportamento tensão–deformação dos solos, fundamental para explicar como o talude responde às solicitações externas. Essa abordagem permite interpretar desde as respostas iniciais do material até a ruptura, sendo essencial para representar de forma realista o desempenho do talude em condições de campo.

A análise de tensão e deformação parte do princípio de que ações externas mobilizam um campo interno de tensões, o qual condiciona a resposta do material desde as deformações iniciais até a ruptura, em função do carregamento aplicado e das restrições de contorno (Azevedo, 2007). Para representar adequadamente esse comportamento, é necessário a adoção de um modelo constitutivo que descreva a relação entre tensões e deformações do solo.

Entre os modelos mais empregados em estudos de estabilidade de taludes, destaca-se o modelo de Mohr–Coulomb, de formulação elasto-plástica simplificada, que assume rigidez constante em toda a camada do solo. Esse modelo adota um comportamento elástico–perfeitamente plástico, no qual o solo responde de forma linear elástica até a ruptura e, a partir das tensões de escoamento, mantém-nas constantes mesmo com o aumento das deformações plásticas (Pinto, 2006; Abramson *et al.*, 2002).

No critério de ruptura de Mohr–Coulomb, a resistência ao cisalhamento é definida como a máxima tensão desviadora que o solo pode suportar antes da ruptura, ou a tensão cisalhante atuante no plano de ruptura (Pinto, 2006). A partir da representação dos estados de tensão por círculos de Mohr, em diferentes condições de confinamento, traça-se uma envoltória que tangencia esses círculos, conhecida como envoltória de Mohr.

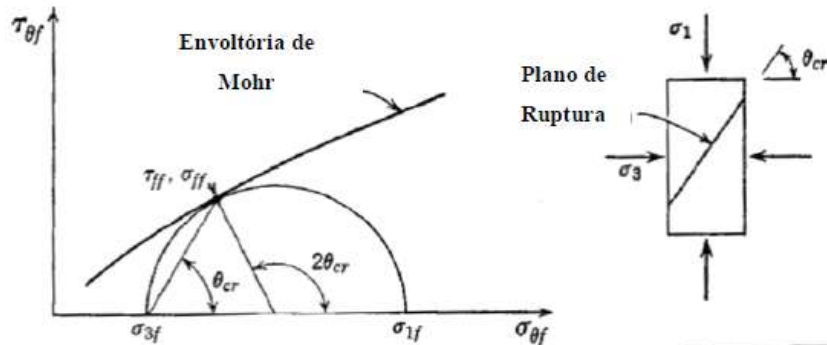
Figura 3 – Evoltória de Mohr.



Fonte: Lambe e Whitman (1969).

Lambe e Whitman (1969) destacam que, quando o círculo de Mohr de um estado de tensões encontra-se abaixo da envoltória, não ocorre ruptura, caracterizando uma condição estável para o solo. Por outro lado, se o círculo tangencia a envoltória, mobiliza-se a resistência máxima do solo, com a formação de um plano de ruptura que se orienta segundo um ângulo θ_{cr} em relação ao plano da tensão principal maior.

Figura 4 – Envoltória de Mohr e plano de ruptura.



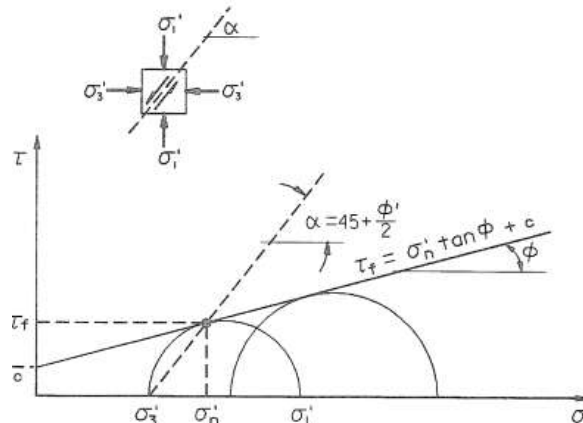
Fonte: Lambe e Whitman (1969).

Ainda de acordo com os autores, não é possível manter um estado de tensões em que o círculo de Mohr cruze a envoltória, pois isso levaria à ruptura com deformações ilimitadas. Como envoltórias curvas são pouco práticas, utilizam-se retas de ajuste, definidas para o nível de tensões do projeto. Assim, a envoltória de ruptura é representada pela lei de *Mohr-Coulomb* (Figura 5). Sendo sua equação dada pela equação (1):

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

Em que c é o intercepto de coesão (coeficiente linear da reta), e ϕ o ângulo de atrito interno do solo (coeficiente angular da reta).

Figura 5 - Representação do critério de ruptura de Mohr Coulomb.



Fonte: Lambe e Whitman (1969).

2.2.2 Efeito da Água nas Encostas

A avaliação da estabilidade de encostas envolve, além da análise tensão–deformação, a consideração dos processos hidrológicos que condicionam a resposta do maciço. Tradicionalmente, essa análise é feita em solos saturados. No entanto, essa abordagem não é suficiente para representar de forma realista o comportamento das encostas, sendo essencial considerar também os solos não saturados.

Os solos não saturados apresentam um comportamento distinto da mecânica clássica dos solos saturados por constituírem um meio multifásico, formado por partículas sólidas, água, ar e uma interface ar-água (Fredlund; Morgenstern, 1977) conforme a Figura 6 abaixo.



Fonte: Adaptado de Fredlund e Rahardjo (1993).

A fase sólida é formada por partículas minerais, que apresentam diferentes formas e dimensões, a fase líquida corresponde à água presente no solo, e a fase gasosa refere-se ao ar livre que ocupa os poros não preenchidos por água. Já a película contrátil atua como uma membrana elástica sob tensão, distribuída ao longo da estrutura do solo com influência dos fenômenos capilares (Nilsen *et al.*, 1986).

Nos solos não saturados, uma característica marcante é a presença da poropressão da água inferior à poropressão do ar. A coesão aparente resultante desse efeito muitas vezes é desconsiderada devido às dificuldades práticas de medição dessas poropressões negativas. A hipótese de solo totalmente saturado simplifica os cálculos, mas pode não ser adequada em cenários com lençóis freáticos mais profundos ou em rupturas rasas, nos quais os acréscimos de resistência proporcionados pela coesão aparente tornam-se relevantes (Fredlund; Rahardjo, 1993; LI *et al.*, 2022).

2.2.2.1 Relação entre a infiltração da água das chuvas e a estabilidade de encostas

A infiltração de água proveniente da chuva desempenha papel central nos processos de instabilidade de encostas, destacando-se como o principal agente desencadeador de escorregamentos (Guidicini; Nieble, 1993; Ren *et al.*, 2024), especialmente quando associada a solos altamente intemperizados e encostas íngremes em áreas urbanizadas (De Praga Baião *et al.*, 2025). A recorrência de eventos extremos evidencia a necessidade de se compreender os efeitos da precipitação na estabilidade de taludes.

Do ponto de vista geotécnico, os efeitos da infiltração estão diretamente relacionados à mecânica entre a água e o solo, como a poropressão, a sucção matricial e o peso específico úmido, que controlam sua resistência ao cisalhamento e estabilidade (Fredlund; Rahardjo, 1993).

Quando a precipitação incide sobre o terreno, parte da água escoar superficialmente, enquanto outra parte penetra no solo, modificando progressivamente o estado de tensões internas. Esse processo compromete a resistência ao cisalhamento ao elevar a poropressão, condição crítica para a deflagração de instabilidades em taludes naturais ou antropizados (Ren *et al.*, 2024). Além disso, o aumento do grau de saturação resulta na elevação do peso específico da massa de solo, contribuindo para a mobilização ao longo de potenciais superfícies de ruptura (Gu *et al.*, 2022).

A poropressão é a pressão exercida pelo fluido que preenche os vazios do solo, atuando diretamente sobre os grãos de solo. Conforme Guidicini e Nieble (1993), é definida pela equação (2):

$$u = \gamma_w \cdot h_p \quad (2)$$

Em que:

u = poropressão;

γ_w = peso específico da água;

h_p = carga de pressão nesse ponto.

A influência da poropressão na resistência ao cisalhamento do solo pode ser expressa pela equação de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas, a equação (3) a seguir:

$$\tau = (\sigma - u) \tan \varphi' + c' \quad (3)$$

Em que:

τ = resistência ao cisalhamento;

σ = tensão normal total do solo;

φ' = ângulo de atrito do solo;

c' = coesão efetiva do solo.

Nessa formulação, o termo $(\sigma - u)$ representa a tensão efetiva, obtida pela subtração da poropressão (u) da tensão normal total (σ). Assim, o aumento da poropressão durante a infiltração reduz a tensão efetiva atuante na estrutura do solo, resultando em menor resistência ao cisalhamento (τ).

A concepção original desse conceito foi introduzida por Terzaghi (1936), que definiu a tensão efetiva em solos totalmente saturados como a diferença entre a tensão total e a poropressão da água nos poros, estabelecendo a base para a Mecânica dos Solos moderna. Contudo, essa definição não é suficiente para descrever o comportamento de solos não saturados.

Para superar essa limitação, Bishop (1959) propôs uma generalização do conceito de tensão efetiva, incorporando o efeito da sucção matricial ($u_a - u_w$) por meio de um coeficiente de ponderação χ , dependente do grau de saturação.

A sucção matricial é definida como a diferença entre a pressão de ar nos poros (u_a) e a pressão de água u_w , representando a força de retenção que o solo exerce sobre a água em seus poros. Esse parâmetro é fundamental em solos não saturados, pois atua como uma coesão aparente, aumentando temporariamente a resistência ao cisalhamento até que seja reduzida pela infiltração de água (Fredlund; Rahardjo, 1993).

A expressão da tensão efetiva generalizada proposta por Bishop (1959) é (4) :

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (4)$$

Em que:

σ' = tensão efetiva;

σ = tensão total;

u_a = pressão de ar nos poros;

u_w = pressão da água nos poros, a poropressão, e

χ = parâmetro que quantifica a contribuição da sucção para a resistência do solo.

A partir da definição de tensão efetiva generalizada de Bishop (1959), a resistência ao cisalhamento de um solo não saturado pode ser expressa por uma forma estendida do critério de Mohr–Coulomb, incorporando explicitamente a sucção matricial. Assim, a tensão de cisalhamento na ruptura pode ser escrita como (5):

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan(\phi') \quad (5)$$

Em que τ_f é a resistência ao cisalhamento na ruptura; c' é a coesão efetiva; σ é a tensão total; u_a é a pressão do ar nos poros; u_w é a pressão da água nos poros (poropressão); ϕ é o ângulo de atrito efetivo; e χ é o parâmetro de Bishop que pondera a contribuição da sucção matricial ($u_a - u_w$) para a resistência, variando com o grau de saturação (Bishop, 1959).

Na prática, quanto maior a infiltração, maior o incremento de poropressão e menor a influência da sucção matricial, resultando em uma queda progressiva da resistência ao cisalhamento. Esse mecanismo explica por que taludes não saturados perdem estabilidade durante chuvas intensas ou prolongadas, especialmente em solos tropicais residuais com elevada porosidade (Fredlund; Rahardjo, 1993; Rocscience, 2023). Dessa forma, mesmo utilizando a formulação clássica de Mohr-Coulomb, os efeitos da sucção matricial são considerados indiretamente no cálculo da resistência, refletindo sua importância no comportamento de encostas não saturadas.

Portanto, entende-se que a suscetibilidade à ruptura de taludes está diretamente relacionada à intensidade e à duração das precipitações, além das propriedades hidráulicas do solo, como a permeabilidade e a estrutura porosa, que controlam a taxa de infiltração e a redistribuição da água no perfil (Ren *et al.*, 2024). Além disso, a resposta hidromecânica de uma encosta depende diretamente das características do solo, da presença de descontinuidades estruturais e das condições prévias de umidade, onde em encostas já fragilizadas por chuvas anteriores, até mesmo episódios pluviométricos moderados podem desencadear rupturas por superação de limiares críticos de poropressão (Rahardjo *et al.*, 2001).

Em contextos nos quais o solo se sobrepõe a maciços rochosos fraturados, o escoamento subsuperficial tende a concentrar-se ao longo de descontinuidades estruturais, intensificando-se em determinadas direções e favorecendo a saturação localizada. Esse processo pode desempenhar papel determinante na deflagração de escorregamentos rasos, ao reduzir a resistência ao cisalhamento dos materiais e aumentar as forças atuantes na vertente (Costa Nunes *et al.*, 1988).

A relação entre precipitação e instabilidade deve ser compreendida não como um fenômeno pontual, mas como um processo cumulativo que degrada gradualmente a estabilidade do maciço ao longo do tempo.

2.2.2.2 Condutividade Hidráulica nos Solos não Saturados

A condutividade hidráulica é o parâmetro que define a capacidade do solo em transmitir água através de seus poros. Em condições saturadas, essa propriedade é representada pela

condutividade hidráulica saturada (k_s), assumida como constante, uma vez que todos os poros estão preenchidos por água e o fluxo pode ser descrito pela Lei de Darcy clássica, a equação (6):

$$v = -k_s i \quad (6)$$

Em que:

v = velocidade de Darcy, ou fluxo por unidade de área;

$i = \nabla h$ = gradiente hidráulico, sendo h a carga hidráulica total ($h = \psi + z$).

Nos solos não saturados, entretanto, parte dos poros encontra-se ocupada por ar, e a condutividade hidráulica não pode mais ser considerada constante. O fluxo de água é reduzido à medida que o grau de saturação diminui, uma vez que a continuidade dos caminhos de percolação é progressivamente interrompida. Nessa condição, a formulação clássica de Darcy é estendida para o meio não saturado, originando a chamada Lei de Darcy–Buckingham, expressa pela equação (7) na forma vetorial:

$$\vec{v} = -k(\psi) \nabla h \quad (7)$$

Em que $k(\psi)$ é a condutividade hidráulica não saturada (m/s), dependente do estado de umidade do solo, podendo ser expressa em função do teor volumétrico de água (θ), do grau de saturação (S) ou da sucção matricial (ψ) (Fredlund; Rahardjo, 1993).

Essa formulação não garante a descrição completa do processo de percolação, pois não contempla a variação temporal do conteúdo de água no solo. Para isso, aplica-se a equação da continuidade (equação 8), que assegura a conservação de massa no meio poroso, relacionando a divergência do fluxo com a taxa de variação da umidade volumétrica (θ).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (8)$$

Ou seja, a taxa de variação de θ no tempo é igual ao divergente do fluxo.

A combinação dessas duas abordagens resulta na equação diferencial governante do fluxo em meios não saturados, conhecida como Equação de Richards (Richards, 1931). De modo mais geral, em problemas bidimensionais ou tridimensionais, a equação pode ser expressa como na equação (9):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [k(\psi) \nabla h] \quad (9)$$

Em que:

t = tempo (s);

∇ = operador diferencial (gradiente/divergência);

$k(\psi)$ = condutividade hidráulica não saturada (m/s), função da sucção matricial ψ ;

h = carga hidráulica total (m).

Representando a interação entre gradiente hidráulico, condutividade não saturada e variação temporal do conteúdo de água no solo (Richards, 1931; Rocscience, 2023). Essa equação exige como dado de entrada fundamental a condutividade hidráulica não saturada, cuja determinação pode ser realizada por meio de métodos diretos e indiretos.

Os métodos diretos baseiam-se em ensaios de laboratório e de campo, nos quais a condutividade é medida a partir do próprio escoamento de água no solo, podendo ser conduzidos em regime permanente ou transiente. Já os métodos indiretos utilizam correlações com a curva característica de retenção de água (SWCC) e com a condutividade hidráulica saturada, permitindo estimar a função $k(\psi)$ por meio de modelos matemáticos de predição (Fredlund; Rahardjo, 1993; Lu; Likos, 2004).

Dentre as formulações mais difundidas encontram-se as propostas para representar a condutividade hidráulica não saturada em função do teor de umidade volumétrica ou da sucção do solo. A seguir, são apresentadas algumas das principais funções aplicadas a solos não saturados.

2.2.2.2.1 Método de Fredlund, Xing (1994)

Esse método possibilita calcular, por meio da equação (10), a permeabilidade (k) associada ao teor de umidade volumétrica (θ) por meio da integração, ou soma, da função de retenção proposta por Fredlund e Xing (1994) no intervalo de sucção entre 0 a 116kPa.

$$k(\psi) = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta(\psi)}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^{y_i}) - \theta_s}{e^{y_i}} \theta'(e^{y_i})} \quad (10)$$

Em que:

$k(\psi)$ = coeficiente de permeabilidade na sucção ψ (m/s);

k_s = coeficiente de permeabilidade na condição saturada (m/s);

θ = teor de umidade volumétrico;

θ_s = teor de umidade volumétrico na condição saturada;

N = número de intervalos de integração ao longo da curva característica de sucção;

e = constante, igual a 2,71828;
 y_i = logaritmo da sucção no meio do intervalo $[i, i+1]$;
 i = número do intervalo de integração;
 j = intervalo de integração correspondente à sucção ψ ;
 ψ = sucção correspondente a j-ésimo intervalo;
 θ' = derivada da função.

A umidade volumétrica é dada pela equação (11):

$$\theta = C(\psi) \cdot \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (11)$$

Sendo:

a : parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar;
 n : parâmetro relacionado à distribuição dos poros;
 m : parâmetro relacionado ao formato da curva característica;
 e : número exponencial e;
 $C(\psi)$: Função de correção.

A função de correção é definida como (Equação (12)):

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{C_r} \right)}{\ln \left(1 + \left(\frac{10^6}{C_r} \right) \right)} \quad (12)$$

Em que:

C_r = Constante associada à sucção matricial correspondente à umidade volumétrica residual, cujo valor típico é da ordem de 1.500 kPa.

2.2.2.2.2 Método de Green e Corey (1971)

O método de Green e Corey (1971) é utilizado para estimar a condutividade hidráulica não saturada a partir da função característica de sucção.

$$k(\theta)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} \cdot \frac{30T^2}{\mu g \eta} \cdot \frac{\zeta^p}{n^2} \cdot \sum_{j=i}^m [(2j + 1 - 2i) \cdot h_i^{-2}] \quad (13)$$

Sendo:

$k(\theta)_i$ = coeficiente de permeabilidade correspondente à umidade volumétrica θ_i ;

k_s/k_{sc} = razão entre o coeficiente de permeabilidade saturado medido (k_s) e calculado (k_{sc});

n = número de intervalos de sucção considerados;

h_i = carga de sucção, em cm

m = máximo intervalo de integração (soma), correspondente à umidade volumétrica na condição saturada;

n = número total de intervalos, entre i e m ;

T = tensão superficial da água, em (dyn/cm);

ξ = porosidade na condição saturada;

η = viscosidade da água;

g = aceleração da gravidade, em (m/s²)

μ = massa específica da água, em (g/cm³)

p = parâmetro cujo valor está no intervalo [1;2].

O termo $\frac{30T^2}{\mu g \eta} \cdot \frac{\xi^p}{n^2}$ é constante e, no processo de definição da função de condutividade hidráulica, pode ser considerado igual a 1. Assim, a geometria da curva é essencialmente determinada pelo termo presente no somatório da equação. Uma vez estabelecido o formato da função, sua posição final é ajustada de modo que a curva passe pelo valor de K_s correspondente à condição de saturação.

2.2.2.2.3 Método de Van Genuchten (1980)

Van Genuchten (1980) desenvolveu uma equação analítica para estimar a condutividade hidráulica não saturada $k(\psi)$ expressando-a em função da sucção mátrica (14).

$$k_\psi = k_s \frac{[1 - (a\psi^{(n-1)}) \cdot (1 + (a\psi)^n)^{-m}]^2}{[(1 + (a\psi)^n)]^{\frac{m}{2}}} \quad (14)$$

Sendo:

k_s = coeficiente de permeabilidade na condição saturada;

ψ = sucção mátrica; e

a, n, m = parâmetros para o ajuste da curva, com $m = 1 - (1/n)$ e $n > 1$.

Da Equação (14), observa-se que a condutividade hidráulica pode ser definida a partir do coeficiente de permeabilidade saturada e de dois parâmetros de ajuste da curva (a, n ou a, m). Segundo Van Genuchten (1980), esses parâmetros podem ser estimados pela função umidade

volumétrica, considerando um ponto P equidistante entre as condições saturada e residual.

Se θ_p representa a umidade volumétrica no ponto P e ψ_p a sucção mátrica correspondente, a inclinação S_p da tangente nesse ponto pode ser obtida a partir de (15):

$$s_p = \frac{1}{(\theta_s - \theta_r)} \cdot \left[\frac{d\theta_p}{d(\log \psi_p)} \right] \quad (15)$$

Sendo:

θ_p = Umidade volumétrica no ponto P ;

θ_s = Umidade volumétrica saturada;

θ_r = Umidade volumétrica residual;

ψ_p = Valor da sucção mátrica;

s_p = Inclinação da tangente à função no ponto P .

2.2.3 Aplicação do Método de Elementos Finitos (MEF)

2.2.3.1 Considerações Iniciais

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consolidou-se como uma das principais ferramentas numéricas para análises de estabilidade de taludes, pois permite incorporar geometrias complexas, condições de contorno irregulares e o comportamento não linear dos materiais geotécnicos (Alves Filho, 2013). Além disso, destaca-se pela flexibilidade em considerar a heterogeneidade do meio e pela eficiência na resolução de sistemas em múltiplas dimensões (Nielsen *et al.*, 1986).

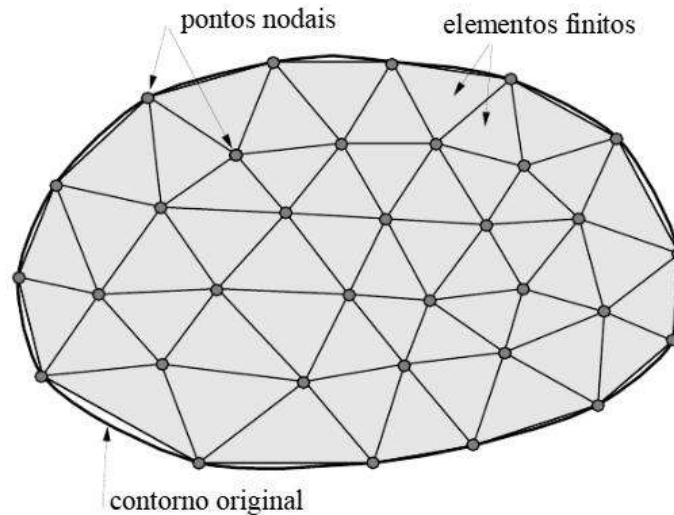
No contexto desta pesquisa, a aplicação do MEF abrange desde a compreensão de seus fundamentos até o emprego de análises transientes de fluxo, que permitem simular o comportamento do talude considerando a variação de propriedades como permeabilidade, sucção matricial, poropressão e resistência ao cisalhamento ao longo do tempo (Lu; Likos, 2004). Além disso, será abordada a utilização do método de redução de resistência SSR como recurso para estimar o fator de segurança.

2.2.3.2 Fundamentos Gerais do Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF baseia-se na subdivisão de um meio contínuo em pequenos elementos com geometria definida e propriedades materiais associadas, permitindo a formulação matemática do seu comportamento (Alves Filho, 2013). A discretização do domínio origina uma malha composta por elementos interligados por nós, responsáveis por transmitir cargas, deslocamentos

e pressões ao longo do sistema (Duncan *et al.*, 2014).

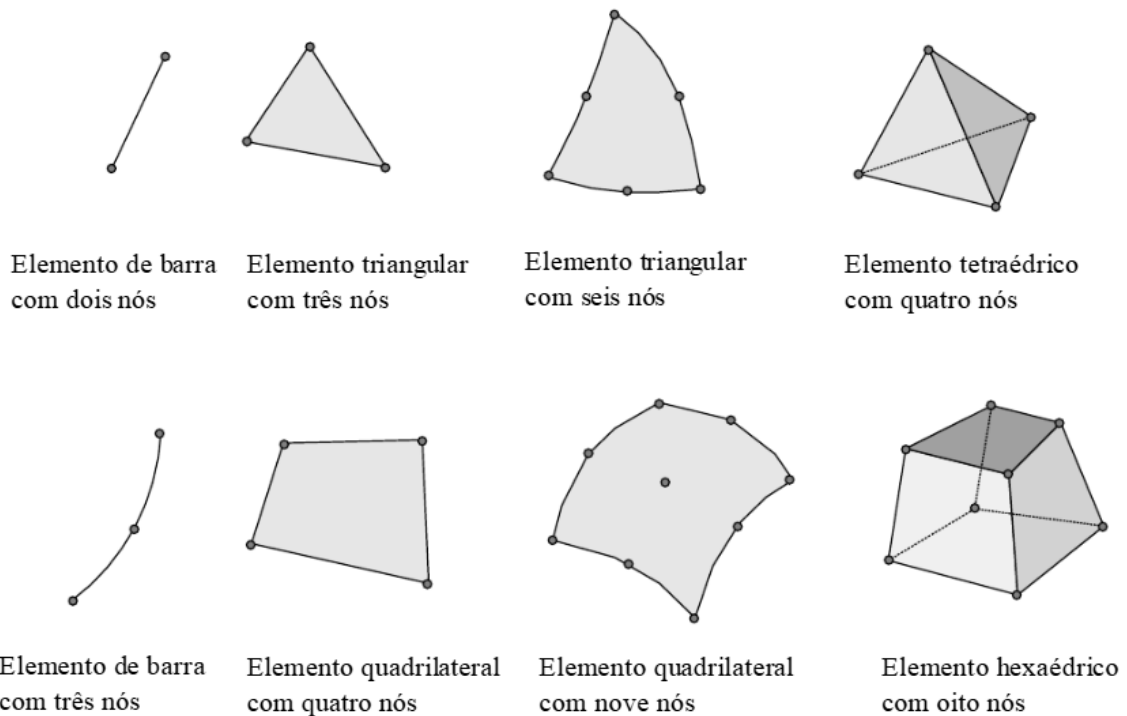
Figura 7 – Representação esquemática de uma malha no Método dos Elementos Finitos, composta por elementos e pontos nodais interligados



Fonte: Souza (2003)

A precisão da solução depende do número, do tipo e do tamanho dos elementos e nós, escolhidos conforme a geometria do problema e os objetivos da análise (Souza, 2003). A Figura 8 ilustra os tipos de elementos finitos comumente empregados.

Figura 8 – Tipos de elementos finitos



Fonte: Souza (2003)

De acordo com Desai e Christian (1977), a escolha do tipo de elemento depende da dimensionalidade do problema: em análises unidimensionais utilizam-se elementos de barra com dois nós, enquanto problemas bidimensionais normalmente empregam elementos triangulares ou quadriláteros. Já em modelos tridimensionais, são utilizados elementos do tipo tetraédrico ou hexaédrico. Esses elementos, interconectados por nós, compõem a malha de discretização que define a geometria e o comportamento do sistema.

À luz dessas escolhas de elementos e da consequente malha de discretização, é possível realizar o refinamento da malha, que consiste em reduzir o tamanho dos elementos para aprimorar a qualidade da solução. Contudo, esse detalhamento adicional nem sempre gera melhorias significativas na precisão dos resultados (Griffiths; Marquez, 2007), tornando essencial buscar um equilíbrio entre a qualidade da resposta numérica e o custo computacional, especialmente em análises transientes.

A formulação matemática do MEF, em sua forma mais comum, baseia-se no princípio dos trabalhos virtuais ou na minimização da energia potencial total do sistema. Esses princípios conduzem à obtenção de um sistema de equações algébricas que relaciona os deslocamentos nodais às forças aplicadas, permitindo a avaliação dos campos de tensão e deformação em meios contínuos (Alves Filho, 2013). A abordagem é particularmente adequada para resolver problemas estruturais e geotécnicos, sendo capaz de representar com precisão a distribuição de esforços em geometrias complexas e condições de carregamento variadas (Zienkiewicz; Taylor, 2005).

Além disso, o MEF é amplamente empregado em análises não lineares, que envolvem variações significativas nas propriedades do material, nas condições de contorno ou na geometria do domínio. Isso inclui, por exemplo, o estudo de rupturas progressivas, deformações plásticas e rupturas estruturais, aspectos relevantes para a avaliação da estabilidade de taludes naturais e artificiais (Desai; Christian, 1977; Alves Filho, 2013).

2.2.3.3 Método da redução da resistência ao cisalhamento - SSR

Os métodos numéricos baseados no MEF têm se consolidado como ferramentas robustas para investigar o comportamento de encostas submetidas a processos transientes de infiltração, especialmente quando associadas a chuvas intensas ou prolongadas (Lu; Likos, 2004). Entre as técnicas numéricas aplicadas à avaliação da segurança de encostas, destaca-se o método de redução da resistência ao cisalhamento (*Shear Strength Reduction* – SSR), inicialmente descrito por Matsui e San (1992).

Por definição, o fator de segurança (FS) de um talude corresponde à razão entre a resistência real ao cisalhamento e a resistência mínima necessária para evitar a ruptura (Duncan, 1996). No SSR, isso equivale ao fator pelo qual os parâmetros de resistência devem ser reduzidos para que o modelo atinja a condição de instabilidade. A instabilidade é geralmente identificada por critérios de não convergência do modelo, aumento contínuo da energia de deformação ou crescimento acentuado dos deslocamentos nodais (Matsui; San, 1992).

Uma das principais vantagens do SSR é não exigir a definição prévia da superfície de ruptura, diferentemente dos métodos de equilíbrio limite, nos quais essa geometria deve ser assumida antes da análise. No SSR, a própria simulação numérica identifica, de forma automática, a superfície ou zona de falha que se desenvolve à medida que o fator de resistência é reduzido. Essa característica permite detectar o mecanismo crítico de instabilidade mesmo em geometrias complexas ou em condições em que múltiplas superfícies potenciais possam existir, resultando em uma avaliação mais realista do comportamento do talude e de sua segurança (Griffiths; Lane, 1999; Dawson; Roth; Drescher, 1999).

Para materiais que seguem o critério de Mohr-Coulomb, a redução progressiva é aplicada simultaneamente à coesão (c) e ao ângulo de atrito (ϕ), ou seja, a resistência ao cisalhamento reduzida por um fator (SRF), pode ser determinada pela equação (16):

$$\frac{\tau}{SRF} = \frac{c'}{SRF} + \frac{\tan \phi'}{SRF} \quad (16)$$

Pode ser reescrita como (17):

$$\frac{\tau}{SRF} = c^* + \tan \phi^* \quad (17)$$

Nesse caso, (18 e 19)

$$c^* = \frac{c'}{SRF} \quad (18)$$

$$\phi^* = \tan^{-1} \frac{\tan \phi'}{SRF} \quad (19)$$

O cálculo do SSR em condições não saturadas segue a mesma lógica iterativa de redução progressiva da resistência até a instabilidade, porém a resistência mobilizável do solo passa a considerar explicitamente a sucção matricial (poropressão negativa).

Então, de forma básica, o SSR envolve três etapas principais (Dawson; Roth; Drescher, 1999):

- I. Modelagem inicial: desenvolver o modelo do talude com as propriedades originais e calcular as deformações iniciais;
- II. Aplicação do fator de redução: reduzir simultaneamente c e o fator ϕ pelo mesmo valor e recalculas as deformações;
- III. Iteração até a instabilidade: Repetir o processo, aumentando SRF progressivamente até que o modelo não convirja ou apresente deslocamentos crescentes sem estabilização. O maior valor de SRF no qual o modelo permanece estável é denominado SRF crítico.

2.2.3.4 Software de elementos finitos – RS2

Na aplicação de métodos numéricos por Elementos Finitos à avaliação da estabilidade de taludes sob infiltração transiente, destaca-se o uso de softwares capazes de integrar, de forma consistente, a análise hidráulica e a resposta tensão–deformação do maciço ao longo do tempo. Entre essas ferramentas, o RS2 que é um programa bidimensional de Elementos Finitos voltado à modelagem geotécnica, sendo particularmente útil quando a estabilidade de taludes precisa ser investigada a partir da distribuição interna de tensões, deformações e variáveis hidráulicas no maciço. A estrutura em módulos, *Model/Compute/Interpret*, organiza o fluxo de trabalho desde a definição da geometria, malha e propriedades dos materiais até o pós-processamento com visualização por contornos e consultas de resultados (Rocscience, 2023).

Nesse contexto, o RS2 em estudos de instabilidade permite que o mecanismo de ruptura seja interpretado não apenas por um “número” (fator de segurança), mas também pela localização e evolução espacial de zonas críticas no talude, compatibilizando a análise de estabilidade com a resposta tensão–deformação do modelo. Para problemas em que a chuva atua como gatilho, o RS2 incorpora análise de percolação por Elementos Finitos de forma integrada, contemplando condições de regime permanente e, sobretudo, transiente. Em análises transientes, o software possibilita avaliar os resultados em cada estágio de tempo, com contornos de poropressão e carga hidráulica total, além de gradientes hidráulicos, velocidades e vetores de fluxo, que é aplicável à representação de eventos de precipitação e à leitura da resposta hidráulica do talude ao longo do tempo (Rocscience, 2023).

Adicionalmente, o programa prevê modelagem de comportamentos em zona não saturada, reconhecendo que a sucção matricial (poropressões negativas) pode influenciar simultaneamente a resistência e a permeabilidade do solo, aspecto relevante para encostas naturais nas quais a transição entre estados não saturados e saturados governa a perda de estabilidade durante a infiltração (Rocscience, 2004).

Na avaliação direta da estabilidade, o RS2 implementa o método de Redução de Resistência ao Cisalhamento (SSR). A documentação do software descreve o procedimento como automatizado e associado ao comportamento numérico de estabilidade/instabilidade, o que favorece análises em que a condição crítica emerge da interação entre estado de tensões, critérios de resistência e condições hidráulicas impostas (Rocscience, 2023).

No procedimento, a condição de estabilidade em cada iteração do SSR é verificada pela convergência da análise tensão–deformação, conforme o critério numérico adotado no solver (com tolerâncias e número máximo de iterações), sendo a ruptura associada à perda de convergência para um determinado nível de redução.

O incremento de redução é controlado pelo passo de SRF entre iterações, podendo ser ajustado pelo usuário (passo fixo) ou definido automaticamente pelo programa (passo variável) para localizar o SRF crítico com a tolerância estabelecida. Assim, a deformação crítica é interpretada a partir do comportamento numérico próximo ao colapso, tipicamente evidenciado por crescimento abrupto de deslocamentos/deformações e pela impossibilidade de atingir equilíbrio convergente no estágio analisado.

3 METODOLOGIA

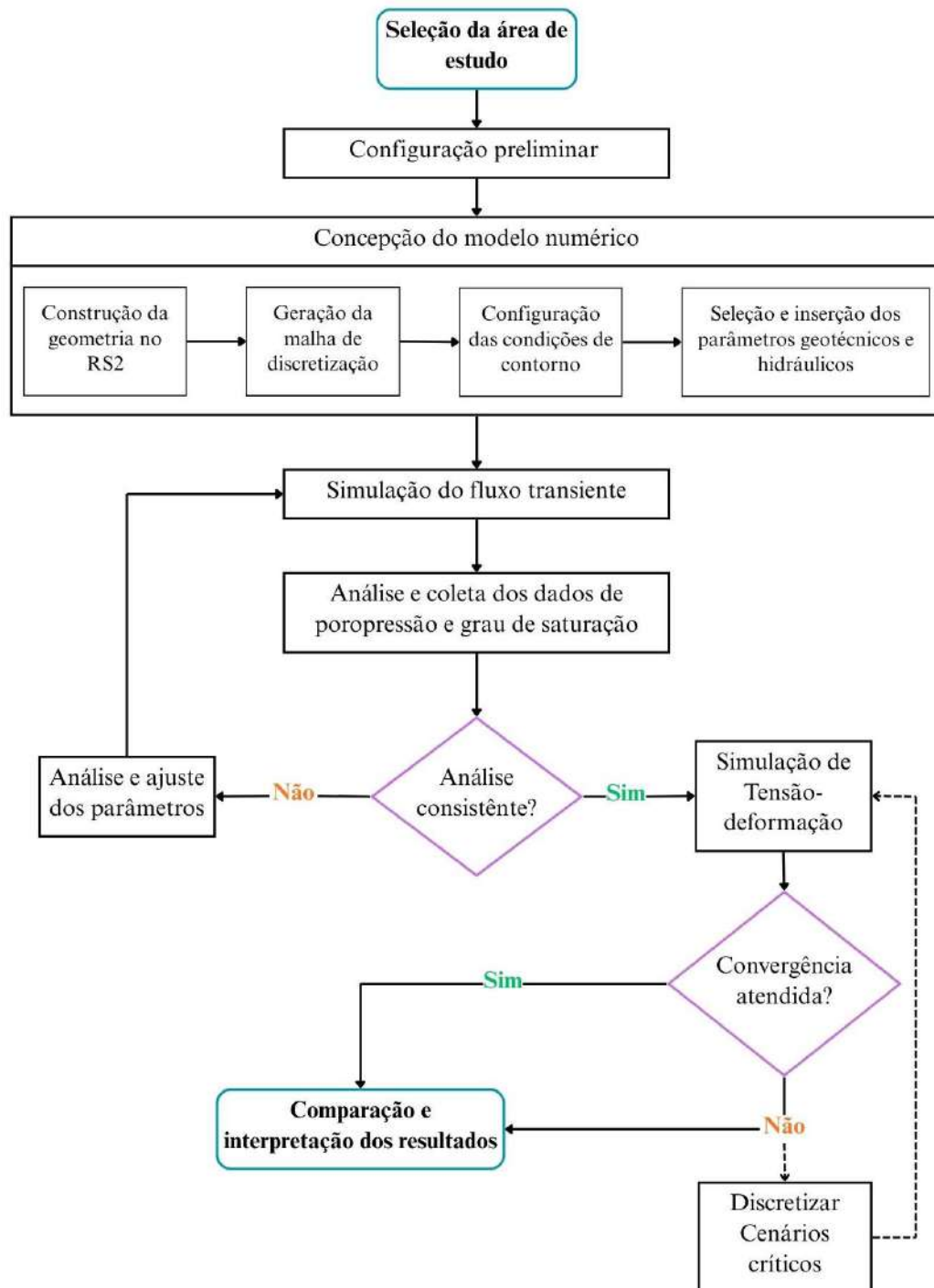
A metodologia baseou-se na elaboração e execução de um modelo numérico representativo da encosta do Monte Florido, localizada em Petrópolis (RJ), desenvolvido no software RS2. O modelo foi construído a partir de informações locais referentes à geometria do terreno e às propriedades geotécnicas dos solos residuais da região.

O procedimento envolveu a definição da geometria da encosta, a atribuição de parâmetros geotécnicos característicos do material, e a configuração das condições de contorno hidráulicas e mecânicas. Em seguida, foram realizadas simulações numéricas acopladas de fluxo e estabilidade, utilizando o método de SSR para a avaliação da estabilidade global.

O modelo foi executado considerando três condições distintas de permeabilidade do maciço, analisadas sob sete cenários de precipitação, com o objetivo de reproduzir a resposta hidromecânica do sistema frente a diferentes intensidades e durações de chuva.

A Figura 9 abaixo traz as etapas seguidas no processo metodológico.

Figura 9 - Fluxograma das etapas seguidas no trabalho



Fonte: Autora (2025)

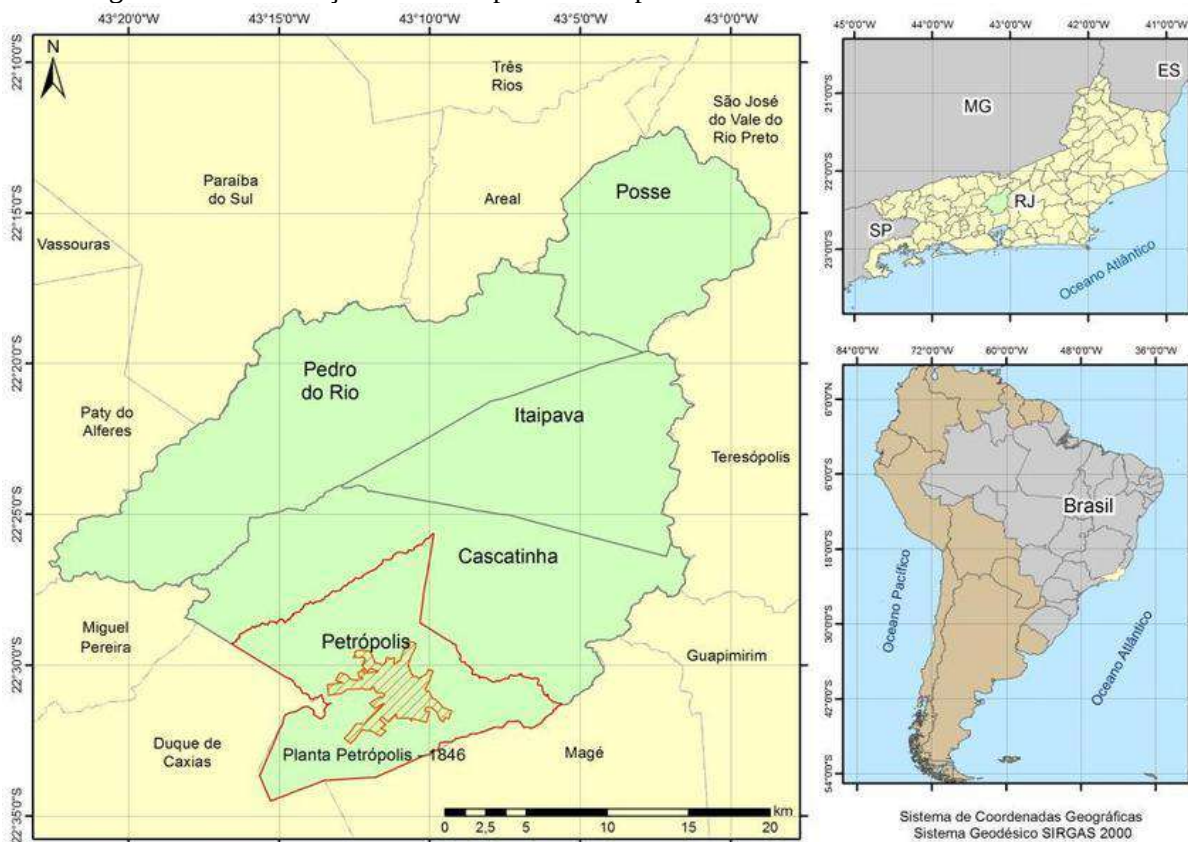
3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 Características Gerais de Petrópolis

O município de Petrópolis situa-se entre as coordenadas de 43° 04' – 43°14'W e 22° 33' – 22° 35'S, com altitude média de 845 metros. Está localizado na Serra do Mar, na Região Serrana do estado do Rio de Janeiro, a cerca de 65 km da capital fluminense. Sua sua área territorial é de 791,144 km², inserida na mesorregião Metropolitana do Rio de Janeiro e na microrregião Serrana. Possui 279.183 habitantes, resultando em uma densidade demográfica de 353,0 habitantes por km² (IBGE, 2022).

Administrativamente, o município de Petrópolis, mostrado na Figura 10, é dividido em cinco distritos: o primeiro é o distrito-sede, Petrópolis, com 143 km² que concentra a maior densidade populacional e abriga o núcleo urbano mais consolidado; o segundo é Cascatinha, com 274 km²; o terceiro é Itaipava, com 121 km²; o quarto é Pedro do Rio, com 210 km²; e o quinto é Posse, com 63 km² (IBGE, 2022).

Figura 10 – Localização do município de Petrópolis e divisão administrativa em distritos.



Fonte: Dos Santos *et al.*, (2017).

3.1.2 Contexto Ambiental

O Território de Petrópolis abriga a Área de Proteção Ambiental (APA) Petrópolis, integrada a um conjunto de Unidades de Conservação que conferem ao município um importante arcabouço legal de proteção. Entre elas, destacam-se o Parque Nacional da Serra dos Órgãos, a Reserva Biológica do Tinguá, a Reserva Biológica de Araras, a Reserva Ecológica da Alcobaça, a Zona de Vida Silvestre da Maria Comprida e a Zona de Vida Silvestre de Araras (Guerra *et al.*, 2007). Apesar dessas restrições, a expansão urbana frequentemente avança sobre áreas protegidas, desconsiderando limitações legais de uso e agravando a exposição a riscos ambientais (De Praga Baião, 2025).

O bioma predominante em Petrópolis é a Mata Atlântica, formada por florestas tropicais úmidas que atualmente se encontram fortemente fragmentadas em decorrência da urbanização (INPE, 2022). A supressão da vegetação, intensificada a partir da década de 1950, contribuiu para a ocupação de encostas naturalmente suscetíveis e ampliou a vulnerabilidade do município a deslizamentos e inundações em que estimativas indicam que mais de 72 mil pessoas residiam em áreas de risco (IBGE, 2010).

Além do componente socioespacial, a perda de cobertura vegetal compromete funções eco-hidrológicas relevantes, como a interceptação das chuvas e a redistribuição da precipitação que efetivamente alcança o solo, favorecendo maior escoamento superficial e erosão em eventos intensos (Arcova, 2003). Do ponto de vista mecânico-hidrológico, a vegetação também atua no reforço do solo por raízes e na modulação do regime de umidade/poropressão. Assim, sua remoção tende a reduzir a resistência adicional e a aumentar a predisposição a instabilidades (Masi, 2021).

Quanto ao clima, Petrópolis enquadra-se no tipo tropical de altitude (Koppen, 1948), com verões úmidos e invernos relativamente secos. Os totais anuais de precipitação situam-se em torno de 2.400 mm e a temperatura média anual é próxima de 19 °C. Por estar em faixa de transição entre influências tropicais e temperadas no Sudeste, a região é modulada pela atuação de frentes frias e por sistemas convectivos mais frequentes no período quente, o que intensifica os índices pluviométricos entre novembro e março.

Petrópolis é influenciada predominantemente pela massa Tropical Atlântica, mas, em determinados períodos, também sofre a atuação da massa Polar Atlântica, associada à passagem de frentes frias e à formação de linhas de instabilidade. Em geral, o confronto entre essas massas ocorre no inverno, resultando em queda de temperatura, formação de nevoeiro e redução da umidade; contudo, quando essa interação se estabelece no verão, tende a intensificar a

instabilidade atmosférica, favorecendo a ocorrência de chuvas fortes acompanhadas de tempestades elétricas (ICMBIO, 2006).

A associação entre relevo montanhoso, altitude e maritimidade favorece ainda a ocorrência de chuvas orográficas e a acentuada variabilidade espacial da precipitação (BLAUDT *et al.*, 2023; NIMER, 1972).

3.1.3 Contexto Geológico e Geomorfológico

O relevo de Petrópolis é formado por montanhas abruptas de topos aplainados, compartimentadas em serras e vales, onde predominam perfis de solo rasos, ainda que em alguns trechos ocorram perfis mais profundos (Filho, 1999).

Geologicamente, o município insere-se no Complexo Rio Negro, embasamento pré-cambriano composto pelas unidades Santo Aleixo e Bingen, marcado por fraturas e falhas de extensão regional que condicionam a topografia atual, resultante de antigos eventos tectônicos. (Costa Nunes *et al.*, 1990; Fonseca *et al.*, 1998).

Conforme Guerra e Gonçalves (2001), a morfologia regional reflete o tectonismo e ciclos erosivos sucessivos, com dobramentos, reativações de falhas e remobilização de blocos. Esses controles estruturais explicam vales alongados, drenagens retilíneas, maciços graníticos, cristas paralelas, grandes desníveis, escarpas íngremes e alvéolos intermontanos.

A geomorfologia é controlada pela litologia, pelo padrão de fraturamento e pela posição em relação à escarpa principal. Em geral, migmatitos sustentam relevos menos acidentados que os granitos, já zonas de falha orientam os vales (NS/EW ao norte e NE/NW ao sul), gerando drenagem em treliça com vales separados por morros alongados (Guerra; Gonçalves, 2001).

A porção sul do município, Centro, Quitandinha, Bingen, Siméria, Independência, concentra maior densidade de falhas e fraturas, resultando em relevo muito acidentado, caracterizado por morros escarpados, paredões rochosos e vales profundamente entalhados que seguem as principais zonas de falhamento (Penha *et al.*, 1979).

3.1.4 Movimentos de massa na área de estudo

Em Petrópolis, a recorrência de desastres está historicamente associada a episódios de chuva intensa, com impactos socioambientais expressivos. De modo sintético, essa recorrência decorre da conjugação de três condicionantes: topografia acidentada, índices pluviométricos elevados e ocupação urbana irregular em encostas e fundos de vale (Blaudt *et al.*, 2023).

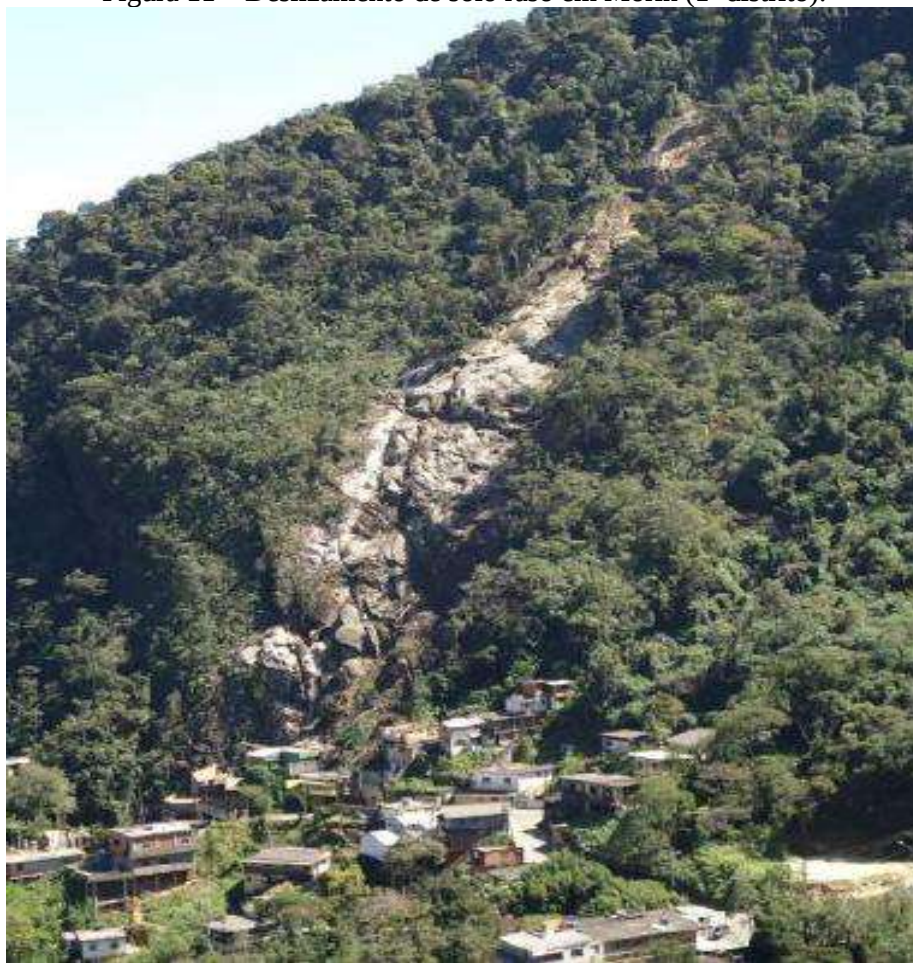
Em razão dessas condicionantes o “perfil” dos movimentos observados tende a ser de evolução rápida. Conforme Nakazawa e Cerri (1990), os movimentos de massa mais frequentes

em Petrópolis são de ocorrência rápida com destaque para escorregamentos de solo e rocha, especialmente os planares e quedas de blocos, no 1º distrito do município.

Como a maior parte das encostas do município tem declividades entre 10° e 45° (Varanda, 2006), espera-se a predominância de escorregamentos entre os registros de movimentos de massa. Em declividades acima de 60°, predominam quedas de fragmentos/blocos, movimentos rápidos e de curto alcance (Varanda, 2006).

Avelar *et al.* (2011) identificam o escorregamento translacional como o movimento de massa mais comum na Região Serrana do RJ, com ocorrência também de corrida de detritos, escorregamento rotacional e queda de bloco. Em consonância, Dutra (2014), ao analisar os distritos de Petrópolis, concluiu a partir de registros que, predominam escorregamentos e quedas/rolamentos de blocos. As Figura 11, Figura 12 e Figura 13 ilustram alguns dos principais exemplos dessas formações, apresentadas a seguir para melhor contextualizar a área de estudo.

Figura 11 – Deslizamento de solo raso em Morin (1º distrito).



Fonte: Dutra (2014).

Figura 12 – Movimento de corpos rochosos no Quitandinha (1º distrito)



Fonte: G1 (2017).

Figura 13 – Deslizamento raso na Servidão Frei Leão, Alto da Serra em 2022 (1º Distrito).

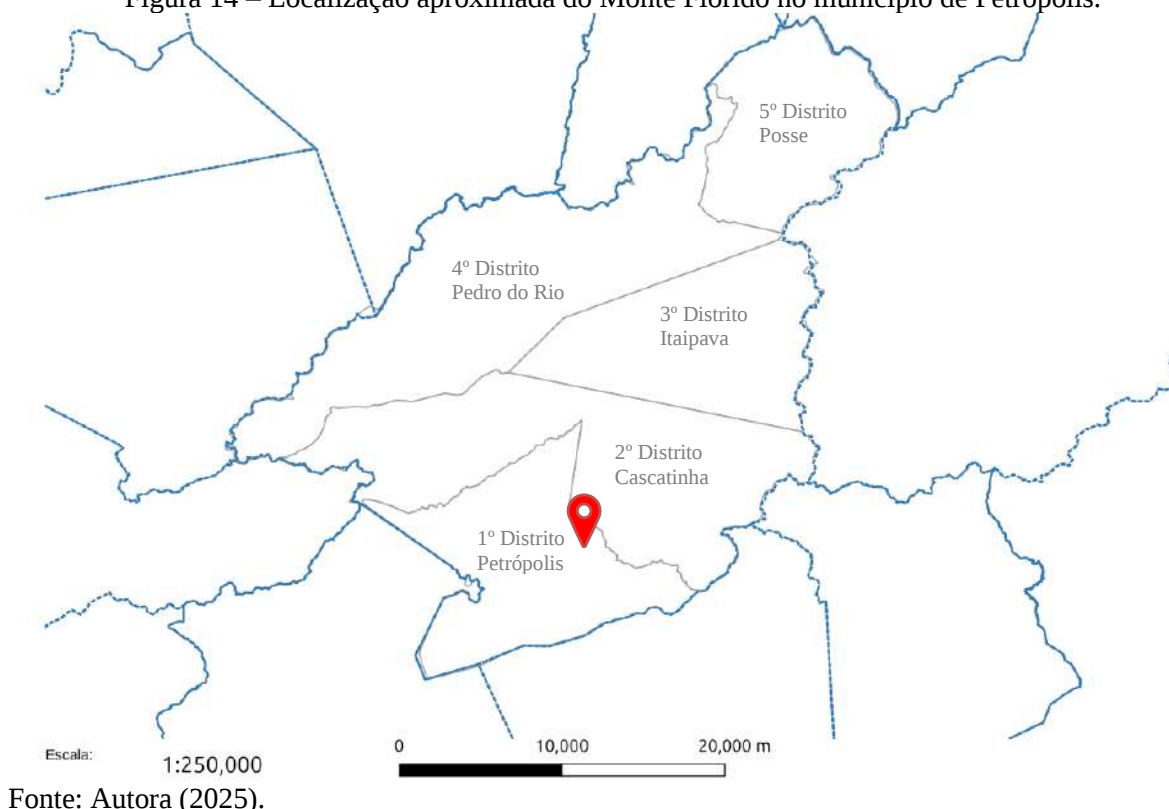


Fonte: Blaudt *et al.*, (2023).

3.1.5 Características Gerais do Monte Florido

O Monte Florido situa-se no distrito de Petrópolis (RJ), abrangendo vertentes que se desenvolvem tanto em direção à Avenida Barão do Rio Branco quanto à Estrada da Saudade, inseridas no domínio de encostas íngremes e vales encaixados característicos da Serra do Mar (Costa Nunes *et al.*, 1988). Na figura 14 é apresentado sua localização aproximada.

Figura 14 – Localização aproximada do Monte Florido no município de Petrópolis.



Trata-se de um ambiente serrano com forte controle do relevo sobre a dinâmica hidrológica, no qual a elevada declividade, a drenagem concentrada em fundos de vale e a ocupação urbana em setores de encosta e sopé tornam o sistema particularmente sensível à intensificação das chuvas.

Do ponto de vista da inserção urbana e acessos, a área apresenta conexão com o Centro por vias que integram o itinerário bairro–Centro, com passagem pela Rua Fonseca Ramos e pela própria Estrada da Saudade, enquanto a Avenida Barão do Rio Branco se configura como um dos principais eixos viários do município, articulando o Centro e os distritos e servindo como referência no entorno mais amplo da área de estudo (Petrópolis, 2021).

Do ponto de vista geológico-geotécnico, o local é descrito como uma área em que o regolito/solo raso recobre um maciço rochoso fraturado, no qual duas famílias principais de fraturas compartimentam a rocha granítica e condicionam o regime de escoamento interno. Essa

compartimentação tende a favorecer a infiltração e a condução preferencial de água no maciço, com repercussões diretas na interface solo-rocha, onde pode ocorrer excesso de poropressão na base do regolito, configurando uma condição predisponente à instabilidade, mesmo antes da deflagração de eventos críticos (Costa Nunes *et al.*, 1988).

3.2 ESPECIFICAÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO

O modelo foi desenvolvido no software de elementos finitos bidimensionais da Rocscience Inc. (Toronto, Canadá) RS2 *Modeler*, versão 11.025, *Build* 2024-11-18. Trata-se de uma ferramenta voltada para análises geotécnicas avançadas, permitindo simulações de fluxo em meios porosos saturados e não saturados, acoplamento hidro-mecânico, análises de tensões e deformações e avaliação de estabilidade pelo método de SSR.

A escolha do RS2 se deve à sua capacidade de integrar, em um mesmo ambiente computacional, análises de fluxo transiente acopladas a modelos de tensão-deformação, o que é fundamental para a investigação da estabilidade de encostas sujeitas à infiltração de chuvas. Além disso, a aplicação do método de SSR no programa assegura a determinação consistente do fator de segurança global, permitindo identificar não apenas a condição de ruptura, mas também as regiões críticas de concentração de tensões e deformações no interior do talude.

3.3 CONCEPÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.3.1 Construção da geometria no RS2

A concepção do modelo geométrico iniciou-se com a definição de um perfil representativo da encosta do Monte Florido. A escolha desse perfil foi fundamentada na caracterização geomorfológica e geológico-geotécnica apresentada por Costa Nunes *et al.* (1988), que reconhece o setor como referência para a compreensão dos condicionantes de instabilidade na área, especialmente pela relação entre regolito/solo raso e maciço rochoso fraturado. Com base nesse enquadramento, foi extraído um perfil altimétrico no Google Earth (Figura 15) e, em seguida, os pontos foram digitalizados, compondo um traçado do relevo local e possíveis irregularidades superficiais associadas à camada de solo superior.

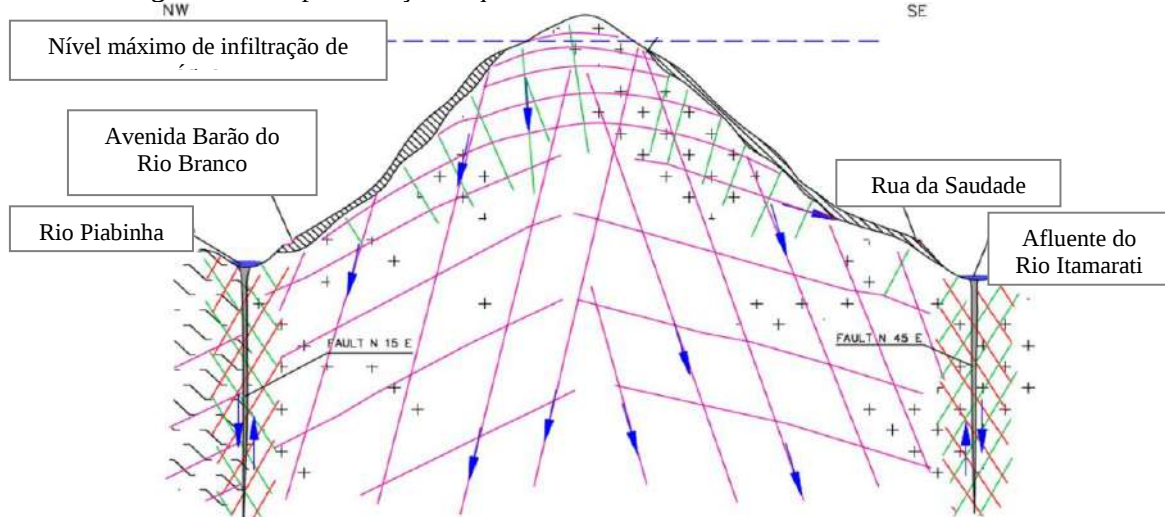
Figura 15 – Perfil topográfico do Monte Florido, em Petrópolis (RJ).



Fonte: Google Earth (2021)

A configuração geológica adotada no modelo fundamentou-se na descrição de Costa Nunes (1990), que caracteriza o Monte Florido como constituído por uma camada delgada de solo sobre maciço fraturado. Essa condição é considerada importante para o desencadeamento de instabilidades, uma vez que o regolito funciona como horizonte crítico de ruptura, enquanto as descontinuidades estruturais da rocha atuam como condutos preferenciais para o fluxo subsuperficial e para a geração de poropressões. A Figura 16, apresentada por Mendonça *et al.* (2020) feita com base na representação de Costa Nunes (1990), foi utilizada como referência para a configuração do modelo, permitindo mapear a relação entre o solo e o maciço fraturado no Monte Florido.

Figura 16 – Representação esquemática do Monte Florido, destacando o solo sobre rocha.



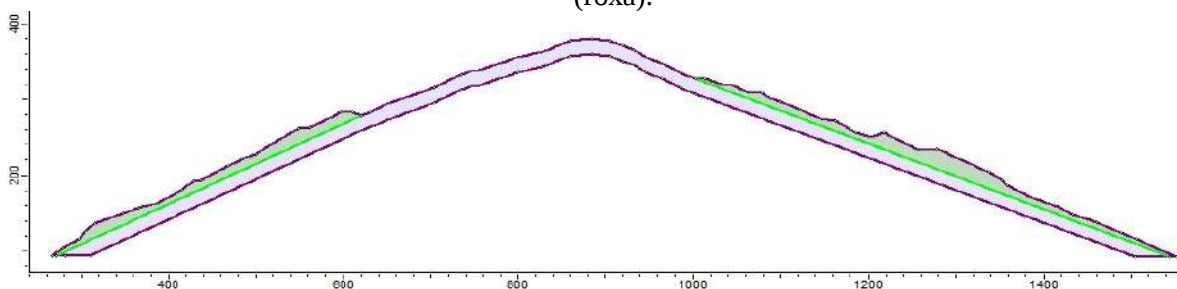
Fonte: Adaptado de Mendonça *et al.* (2020)

Assim, a configuração geométrica e estrutural do modelo desenvolvido foi estabelecida de forma simplificada, considerando apenas duas camadas principais: o solo residual sobrejacente e o maciço rochoso subjacente. As interfaces entre solo e rocha foram simplificadas e tratadas de forma simplificada, buscando manter a coerência geométrica do modelo sem introduzir níveis de complexidade não suportados pelas informações disponíveis.

Para fins de modelagem, foram considerados apenas os 20 metros imediatamente abaixo da camada de solo como zona ativa do maciço rochoso, abrangendo a porção mais relevante para o comportamento hidromecânico da encosta. O restante do embasamento foi tratado como hidráulica e mecanicamente inativo, opção que reduziu a sobrecarga computacional sem comprometer a representatividade da encosta.

A Figura 17 traz a esquematização do perfil da encosta feito no programa utilizado.

Figura 17 – Esquematização do perfil no RS2 com camada de solo (verde) sobre maciço rochoso (roxa).

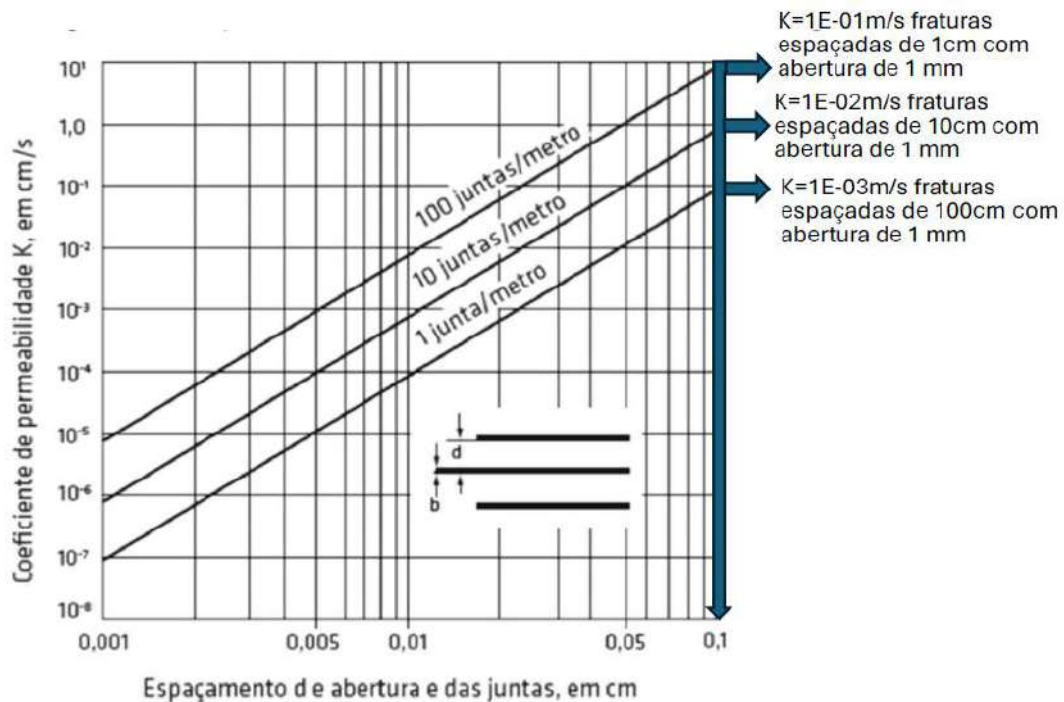


Fonte: Autora (2025).

Para a caracterização física do maciço rochoso, considerou-se a presença de fraturas como elemento determinante para sua capacidade de condução de água. Essa condição foi incorporada ao modelo por meio da atribuição de diferentes valores de permeabilidade hidráulica, definidos a partir da correlação gráfica de Hoek e Bray (1981). Assim, foram adotados três cenários de condutividade, $k = 1 \times 10^{-1}$ m/s, $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s e $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, que representam distintos graus de fraturamento do maciço e permitem avaliar sua influência tanto na circulação interna de água quanto na geração de poropressões na interface solo-rocha.

A Figura 18 relaciona o espaçamento e a abertura das fraturas com os valores de permeabilidade hidráulica (k), originalmente expressos em cm/s. Para aplicação no modelo numérico, esses valores foram convertidos para m/s, possibilitando sua inserção direta no software.

Figura 18 – Influência da frequência na condutividade hidráulica (k) de maciços rochosos na direção de uma família de juntas paralelas.



Fonte: Adaptado de Hoek e Bray (1981).

Observa-se no gráfico que, mantendo-se a abertura constante em 1 mm, a redução do espaçamento entre fraturas aumenta substancialmente a condutividade hidráulica. Por exemplo, o cenário das faturas mais próximas (≈ 1 cm) resulta em $k = 1 \times 10^{-1}$ m/s (valor convertido de 10^1 cm/s), enquanto espaçamentos de 10 cm e 100 cm correspondem, respectivamente, a $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s e $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s. Essa parametrização reflete diferentes graus de fraturamento do maciço.

Além dessa parametrização, a permeabilidade do maciço também foi avaliada a partir dos dados apresentados por Costa Nunes (1990), variando-se a anisotropia por meio da razão k_2/k_1 no RS2. Para essa análise, considerou-se a orientação das descontinuidades em 15° no sentido anti-horário em relação à horizontal, de modo a representar de forma mais realista a influência da direção preferencial de fluxo associada ao fraturamento.

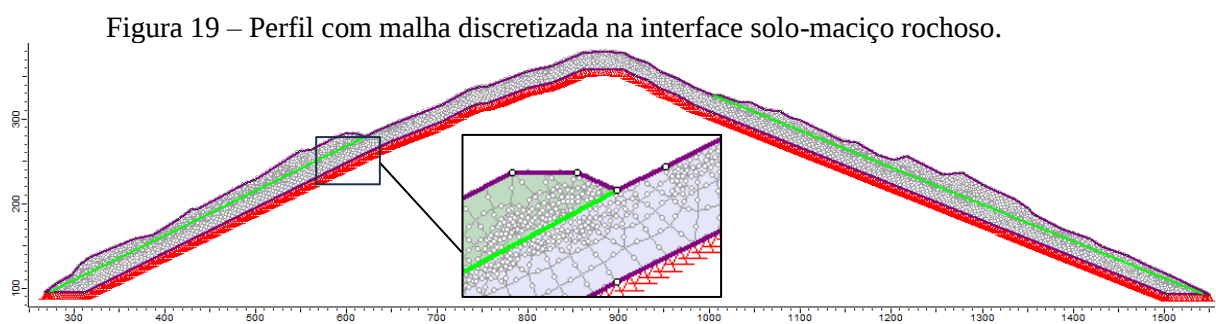
3.3.2 Geração da malha de discretização

Para o funcionamento do modelo numérico, tornou-se necessária a aplicação da malha de discretização, etapa fundamental para a definição das condições de contorno e a execução das análises subsequentes. No RS2, essa malha é gerada automaticamente a partir de parâmetros definidos pelo usuário, como o tipo de malha, o tipo de elemento e o número aproximado de elementos da malha, que controla o nível de refinamento inicial.

Foi selecionada uma malha do tipo uniforme, composta por elementos quadrilaterais de 8 nós. A adoção desse tipo de elemento se justifica pela maior precisão na representação das tensões e deformações em análises bidimensionais, além de oferecer melhor estabilidade numérica em comparação às malhas triangulares.

Além disso, foi feito um refinamento da malha concentrado na interface solo-maço, por se tratar da região mais crítica à deflagração de instabilidades, onde o contraste entre os materiais exerce papel decisivo na geração de poropressões e na propagação de superfícies potenciais de ruptura. Discretizou-se também o topo da encosta, a fim de captar com maior precisão o efeito da infiltração da chuva, uma vez que essa região apresenta permeabilidade significativamente mais elevada do que o solo residual, funcionando como zona preferencial de entrada do fluxo no sistema. O modelo é apresentado na Figura 19.

O modelo resultante apresentou aproximadamente 14.115 nós e 4.620 elementos, configuração previamente testada em estudos preliminares, nos quais demonstrou resultados consistentes de SRF com tempo de processamento adequado. Diante desse desempenho, essa discretização foi definida como base para as análises subsequentes do modelo numérico.



Fonte: Autora (2025).

3.3.3 Configuração das condições de contorno

As condições de contorno foram definidas de modo a representar adequadamente o regime hidromecânico do modelo. Na análise de fluxo, foram estabelecidas condições de contorno hidráulicas compatíveis com o regime de precipitação e drenagem, enquanto na análise de tensões foram adotadas restrições mecânicas que garantem o equilíbrio do sistema.

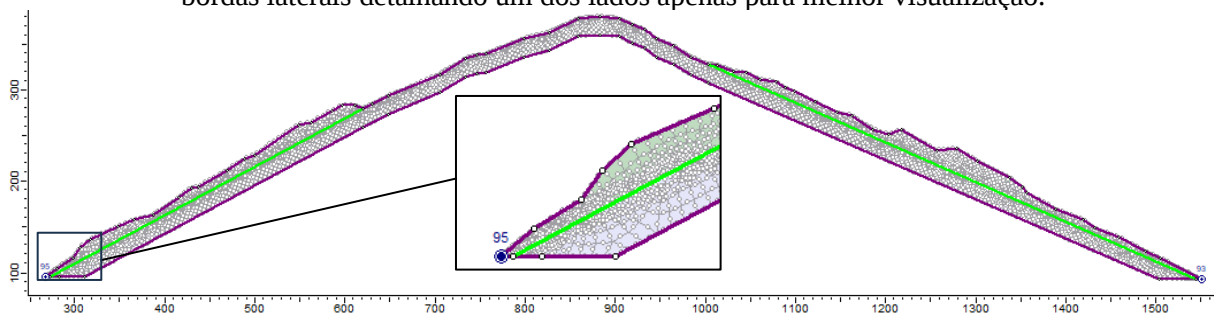
Na parte inferior do modelo, em vermelho na

Figura 19 19, correspondente à base do maciço, foram aplicadas restrições em x e y, impedindo deslocamentos horizontais e verticais, de modo a simular as condições reais de apoio. Já a parte superior do talude foi mantida livre, sem restrições adicionais, permitindo que o modelo reproduzisse de forma mais realista o comportamento da encosta em superfície.

Nas condições de contorno hidráulicas, foi atribuído um *total head* de 95 m e 93 m na

base do modelo, aplicado nos nós externos de cada lateral, mostrado Figura 20. Esse parâmetro corresponde à carga hidráulica total em um ponto, dada pela soma da carga de pressão e da carga de posição. Como na base do modelo a pressão é nula, o valor aplicado correspondeu apenas à altura piezométrica, representando a carga de posição. A opção por utilizar apenas um nó em cada extremidade foi escolhida por simplificar a representação do gradiente hidráulico natural da encosta, evitando superdimensionar a drenagem lateral e mantendo o foco na permeabilidade do maciço.

Figura 20 – Modelo numérico com detalhe da aplicação da carga hidráulica total (*Total head*) nas bordas laterais detalhando um dos lados apenas para melhor visualização.



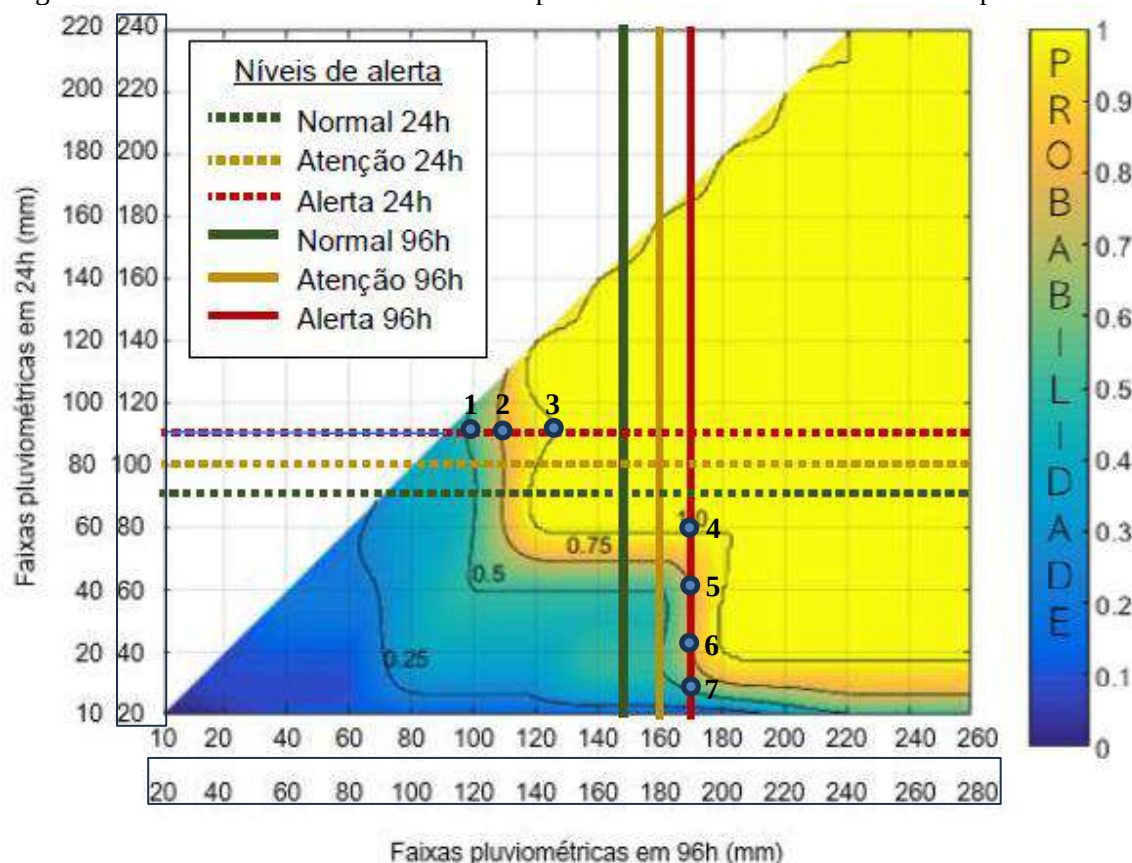
Fonte: Autora (2025).

Na superfície do modelo, foi aplicada, no RS2, a condição de contorno de infiltração vertical, em regime transiente, para representar as chuvas simuladas. Essa configuração permitiu que a taxa de infiltração variasse ao longo do tempo de acordo com os cenários de precipitação definidos. Para garantir maior realismo ao processo, adotou-se a condição *Seepage Face*, que limita a pressão de água nos nós à cota topográfica, impedindo a entrada de volumes irreais no sistema. Assim, o modelo reproduziu de forma consistente a infiltração da chuva no solo, sem superestimar a recarga hídrica.

3.3.3.1 Cenários de Precipitação

Os cenários de precipitação considerados no modelo foram definidos com base no trabalho de Gonzalez *et al.* (2022), que propõe limiares pluviométricos associados a diferentes níveis de alerta para deslizamentos em Petrópolis com probabilidade de ocorrência de pelo menos um deslizamento. A partir desse critério, foram selecionados sete cenários, distribuídos entre as retas referentes a alerta 24 h e alerta 96 h. A partir disso, foi selecionado os pontos correspondentes às linhas de probabilidade 0,5, 0,75 e 1,0. Na Figura 21 é possível a visualização desses pontos destacados.

Figura 21 – Probabilidades de ocorrência de pelo um deslizamento e níveis municipais de alerta.



Fonte: Adaptado de Gonzalez *et al.* (2022).

Para melhor visualização dos valores, esses limiares pluviométricos são apresentados a seguir na Tabela 1. Ressalta-se que o acumulado de 96 horas representa o período total analisado, subdividido em dois intervalos: 72 horas iniciais e 24 horas finais. O valor das 72 horas iniciais foi obtida pela diferença entre o acumulado de 96 horas e o das 24 horas finais, permitindo uma caracterização mais precisa da distribuição temporal da precipitação.

Tabela 1 – Cenários de precipitação adotados no modelo, definidos a partir dos limiares de 24 h e 96 h propostos por Gonzalez *et al.* (2022).

Cenário	Acumulado 96h (mm)	Acumulado 72h iniciais (mm)	Acumulado 24h finais (mm)	Probabilidade associada
1	120	10	110	0,5
2	130	20	110	0,75
3	148	38	110	1
4	190	110	80	1
5	190	130	60	0,75
6	190	150	40	0,75
7	190	162	28	0,5

A média por dia nos três dias iniciais corresponde ao valor acumulado em 72 horas dividido por três, de modo a expressar a precipitação diária média nesse período. Para fins de

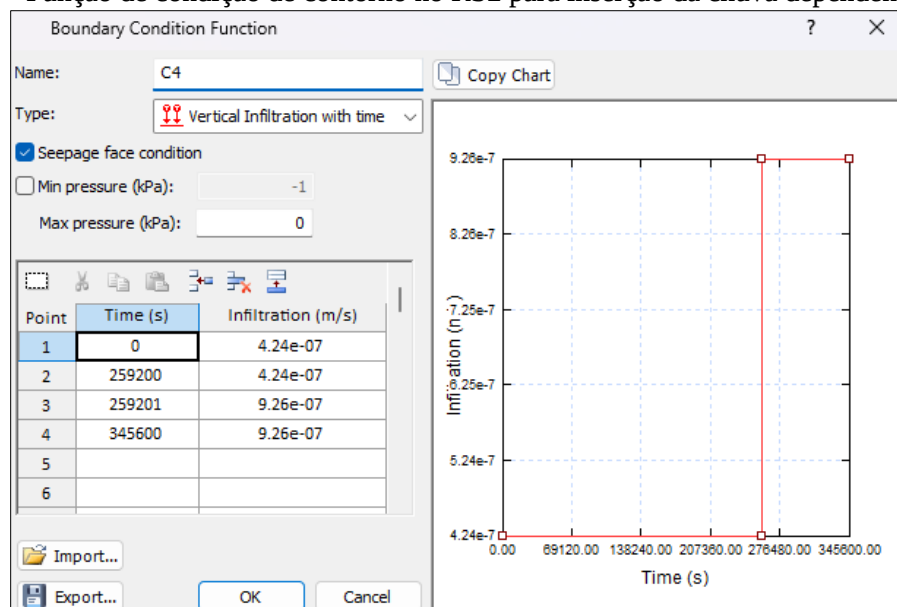
inserção no RS2, esses valores foram convertidos para unidades de infiltração em m/s. Já a coluna referente às 24 horas finais apresenta a intensidade diária de precipitação correspondente ao último dia do período analisado, igualmente acompanhada de sua conversão para m/s, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Intensidades de precipitação acumulada (72 h e 24 h finais) e respectivas conversões para infiltração em m/s utilizadas no modelo numérico.

Cenário de chuva	Média por dia nos 3 dias iniciais		Média por dia 24 horas finais	
	(mm/d)	(m/s)	(mm/d)	(m/s)
1	3,33	3,86E-08	110	1,27E-06
2	6,67	7,72E-08	110	1,27E-06
3	12,67	1,47E-07	110	1,27E-06
4	36,67	4,24E-07	80	9,26E-07
5	43,33	5,02E-07	60	6,94E-07
6	50	5,79E-07	40	4,63E-07
7	54	6,25E-07	28	3,24E-07

A Figura 22 ilustra a função de condição de contorno definida no RS2 para representar a chuva como infiltração vertical variável no tempo (*Vertical Infiltration with time*). Observa-se que a precipitação foi inserida por meio de valores constantes por intervalos (função em degraus), isto é, mantendo-se uma mesma taxa de infiltração ao longo de cada etapa e alterando-a apenas no instante de transição entre períodos. No exemplo mostrado, a infiltração permanece constante de 0 a 259200 s (72 h) e, em seguida, assume um novo patamar constante até 345600 s (96 h). Além disso, nessa etapa, a opção *Seepage face condition* é ativada.

Figura 22 – Função de condição de contorno no RS2 para inserção da chuva dependente do tempo



Fonte: Autora (2025).

3.3.4 Seleção e inserção dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos

3.3.4.1 Solo

A definição dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos utilizados no modelo baseou-se em dados experimentais e de referência aplicáveis às condições do 1º distrito de Petrópolis.

Para o solo residual sobrejacente, foram adotados parâmetros geotécnicos com base no estudo de Silva (2006), que caracterizou dois tipos de materiais a partir de uma amostra coletada no bairro Quitandinha, em Petrópolis, junto à cicatriz de um escorregamento ocorrido em dezembro de 2001. Entre as amostras descritas, optou-se pelo solo classificado como areia silto-argilosa, por representar a condição mais crítica à estabilidade.

No que se refere às condições iniciais do solo, adotou-se porosidade de 0,519 e peso específico de 15,04 kN/m³, obtidos a partir dos resultados de Silva (2006). O valor do peso específico foi definido considerando o intervalo entre o estado seco (12,32 kN/m³) e o saturado (17,75 kN/m³), resultando na adoção de um valor médio representativo do solo em condição natural.

O solo no modelo foi caracterizado segundo o critério de resistência de Mohr-Coulomb, que relaciona a tensão cisalhante de ruptura aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito do material. O material foi configurado como plástico, com ângulo de atrito máximo de 39° e coesão máxima de 5,55 kPa. As condições residuais foram mantidas iguais, com ângulo de atrito residual de 39° e coesão residual de 5,55 kPa. Esses dados também foram obtidos por meio dos resultados de Silva (2006).

Nos parâmetros de deformabilidade, o Módulo de Young (E) foi adotado a partir dos valores apresentados por Ribeiro (2013). Já o coeficiente de Poisson foi fixado em 0,3, adotando o valor de referência indicado por Schmertmann (1988) para o tipo de solo analisado. A Tabela 3 apresenta reúne e organiza esses valores, dispostos conforme suas respectivas fontes de referência.

Tabela 3 – Propriedades geotécnicas do solo utilizadas na modelagem.		
Tipo	Valor	Fonte de referência
Peso específico do solo - γ (kN/m ³)	15,04	Silva (2006)
Porosidade - n	0,519	
Ângulo de atrito - ϕ (°)	39,0	
Coesão - c (kPa)	5,55	
Coeficiente de Poisson - ν	0,3	Schmertmann (1988)
Módulo de Young - E (kpa)	11745,5	Ribeiro (2013)

Para a condição não saturada, foi adotada a formulação de *Single Effective Stress* com base no método de Bishop, que considera a contribuição da sucção na resistência ao cisalhamento do solo.

Os parâmetros hidráulicos do solo foram definidos com o modelo de retenção de água de Van Genuchten, apropriado para representar o comportamento de solos não saturados por capturar a variação contínua de conteúdo de água e condutividade ao longo da faixa de sucção. A condutividade hidráulica saturada foi fixada em $8,75 \times 10^{-6}$ m/s, conforme a referência de Silva (2006) utilizada para o material adotado. A caracterização da autora permitiu seu enquadramento na classe *Topsoils – Medium* da tabela de Wösten *et al.* (1999), correspondente a materiais com teor de argila < 18% e fração de areia entre 15% e 65%, representativos de solos com retenção moderada de umidade. A Tabela 4 reúne os parâmetros de entrada de van genuchten utilizados no modelo numérico.

Tabela 4 – Parâmetros de Van Genuchten adotados para o solo: α (1/m), parâmetro de inverso da pressão de entrada de ar; n e m, parâmetros empíricos de forma; θ_r , teor de umidade residual e θ_s , teor de umidade de saturação.

α (1/m)	n	m	θ_r	θ_s
0,0314	1,1804	0,1528	0,010	0,439

3.3.4.2 Maciço rochoso

Para o maciço rochoso, os valores de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) foram definidos conforme a Classe III do *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1989), representando maciços graníticos de qualidade intermediária. Os demais parâmetros foram definidos a partir dos valores de referência disponibilizados pelo software, os quais representam faixas típicas e de caráter geral para materiais rochosos. Dessa forma, sua adoção teve por finalidade assegurar consistência com a classe geomecânica considerada e viabilizar a comparação entre os cenários simulados. A Tabela 5 sintetiza os parâmetros geotécnicos adotados no modelo numérico em relação ao maciço rochoso.

Tabela 5 – Propriedades geotécnicas do maciço rochoso utilizadas na modelagem.

Tipo	Valor	Fonte
Peso específico do solo - γ (kN/m ³)	27	RS2
Porosidade - n	0,5	
Coeficiente de Poisson - ν	0,3	
Modulo de Young - E (Mpa)	20000	
Ângulo de atrito - ϕ (°)	35	Bieniawski (1989)
Coesão - c (kPa)	300	

Os parâmetros hidráulicos foram definidos a partir dos cenários de fraturamento já discutidos. Para a definição das propriedades hidráulicas do maciço rochoso, foi adotado o modelo de van Genuchten. A adoção desse modelo mostrou-se adequada porque, em simulações preliminares realizadas no presente trabalho, os resultados de infiltração obtidos apresentaram

comportamento mais próximo do esperado para maciços rochosos fraturados, quando comparados a outras formulações mais simplificadas.

De forma geral, foram adotados parâmetros do modelo de van Genuchten disponibilizados pelo próprio RS2, os quais são apresentados Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 – Parâmetros do modelo de van Genuchten adotados para o maciço rochoso, conforme valores de referência fornecidos pelo software RS2.

α (1/m)	n	m	θ_r	θ_s
14,5	2,68	0,63	0	0

3.4 ANÁLISES DE FLUXO E DE ESTABILIDADE

Para a etapa de análise, inicialmente foi realizada a simulação de fluxo transiente em 97 estágios sucessivos, cada um correspondendo a um marco temporal de 1 hora no avanço do tempo. O estágio 1 representa o tempo inicial (0 hora) e o estágio 97 o tempo final, totalizando 96 horas de simulação contínua.

Após a conclusão da simulação de fluxo, foram analisados os resultados de poropressão e grau de saturação ao longo do tempo, de modo a verificar a coerência do comportamento hidráulico do modelo. Essa verificação permitiu confirmar a evolução dos valores, a estabilização do regime de fluxo e a consistência numérica entre os estágios simulados. Uma vez validada essa etapa, o modelo foi então submetido à análise de estabilidade pelo método SSR a fim de determinar os valores dos fatores de segurança, expressos pelo SRF neste trabalho.

Inicialmente, as análises de estabilidade pelo SSR foram realizadas a cada 24 horas, totalizando cinco estágios de avaliação ao longo das 96 horas simuladas. Entretanto, esse intervalo de tempo mostrou-se muito amplo para identificar com precisão o instante de ruptura. Diante disso, adotou-se um refinamento temporal progressivo. Sempre que o modelo apresentava não convergência ou quando o SRF caía abaixo de 1, inseria-se um novo estágio intermediário entre o último passo estável e o primeiro instável. Esse processo era repetido de forma iterativa, incluindo o intermediário do intermediário, até que o intervalo entre os dois estágios fosse reduzido a 3 horas.

A partir desse ponto, as simulações passaram a ser executadas com intervalos de 1 hora dentro dessa janela crítica, permitindo localizar com maior precisão o instante de ruptura e refinar a estimativa do SRF. Essa estratégia garantiu uma análise mais detalhada e realista da evolução da estabilidade ao longo do tempo.

Eventualmente, nas simulações de SSR, pode ocorrer não convergência (*No iterations converged*, NC), que corresponde à situação em que o modelo não atinge o equilíbrio entre as

forças internas e externas durante o processo iterativo. Esse estado pode decorrer tanto de inconsistências numéricas quanto de instabilidade física do sistema, devendo ser interpretado a partir da análise conjunta dos resultados hidráulicos e mecânicos.

Para fins de organização e interpretação dos resultados, adotou-se um sistema padronizado de nomenclatura. Cada cenário foi identificado por um número, seguido de uma letra que indica a condição de permeabilidade ou de orientação da anisotropia do maciço rochoso. As variações “a”, “b” e “c” correspondem, respectivamente, às permeabilidades $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s e $k = 1 \times 10^{-1}$ m/s, mantendo-se a direção principal de permeabilidade (k_1) horizontal, ou seja, igual a 0° . A variação “d” foi utilizada para representar a condição com k_1 inclinado a 15° em relação à horizontal. Essa convenção foi aplicada nas tabelas e figuras, a fim de padronizar a identificação dos resultados e facilitar a comparação entre as diferentes condições hidráulicas e anisotrópicas simuladas. A Tabela 7 a seguir apresenta a síntese dessa nomenclatura adotada.

Tabela 7 – Configurações adotadas nos cenários de chuva e permeabilidade do maciço rochoso.

Teste	Cenário de chuva	(k) Maciço Rochoso	Média diária dos 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	k_1 ($^\circ$)	k_2/k_1
1a	1	1×10^{-3}	3,33	110	0	1
1b	1	1×10^{-2}	3,33	110	0	1
1c	1	1×10^{-1}	3,33	110	0	1
1d	1	1×10^{-3}	3,33	110	15	0,01
2a	2	1×10^{-3}	6,67	110	0	1
2b	2	1×10^{-2}	6,67	110	0	1
2c	2	1×10^{-1}	6,67	110	0	1
2d	2	1×10^{-3}	6,67	110	15	0,01
3a	3	1×10^{-3}	12,67	110	0	1
3b	3	1×10^{-2}	12,67	110	0	1
3c	3	1×10^{-1}	12,67	110	0	1
3d	3	1×10^{-3}	12,67	110	15	0,01
4a	4	1×10^{-3}	36,67	80	0	1
4b	4	1×10^{-2}	36,67	80	0	1
4c	4	1×10^{-1}	36,67	80	0	1
4d	4	1×10^{-3}	36,67	80	15	0,01
5a	5	1×10^{-3}	43,33	60	0	1
5b	5	1×10^{-2}	43,33	60	0	1
5c	5	1×10^{-1}	43,33	60	0	1
5d	5	1×10^{-3}	43,33	60	15	0,01
6a	6	1×10^{-3}	50	40	0	1
6b	6	1×10^{-2}	50	40	0	1
6c	6	1×10^{-1}	50	40	0	1
6d	6	1×10^{-3}	50	40	15	0,01
7a	7	1×10^{-3}	54	28	0	1
7b	7	1×10^{-2}	54	28	0	1
7c	7	1×10^{-1}	54	28	0	1
7d	7	1×10^{-3}	54	28	15	0,01

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DE FLUXO

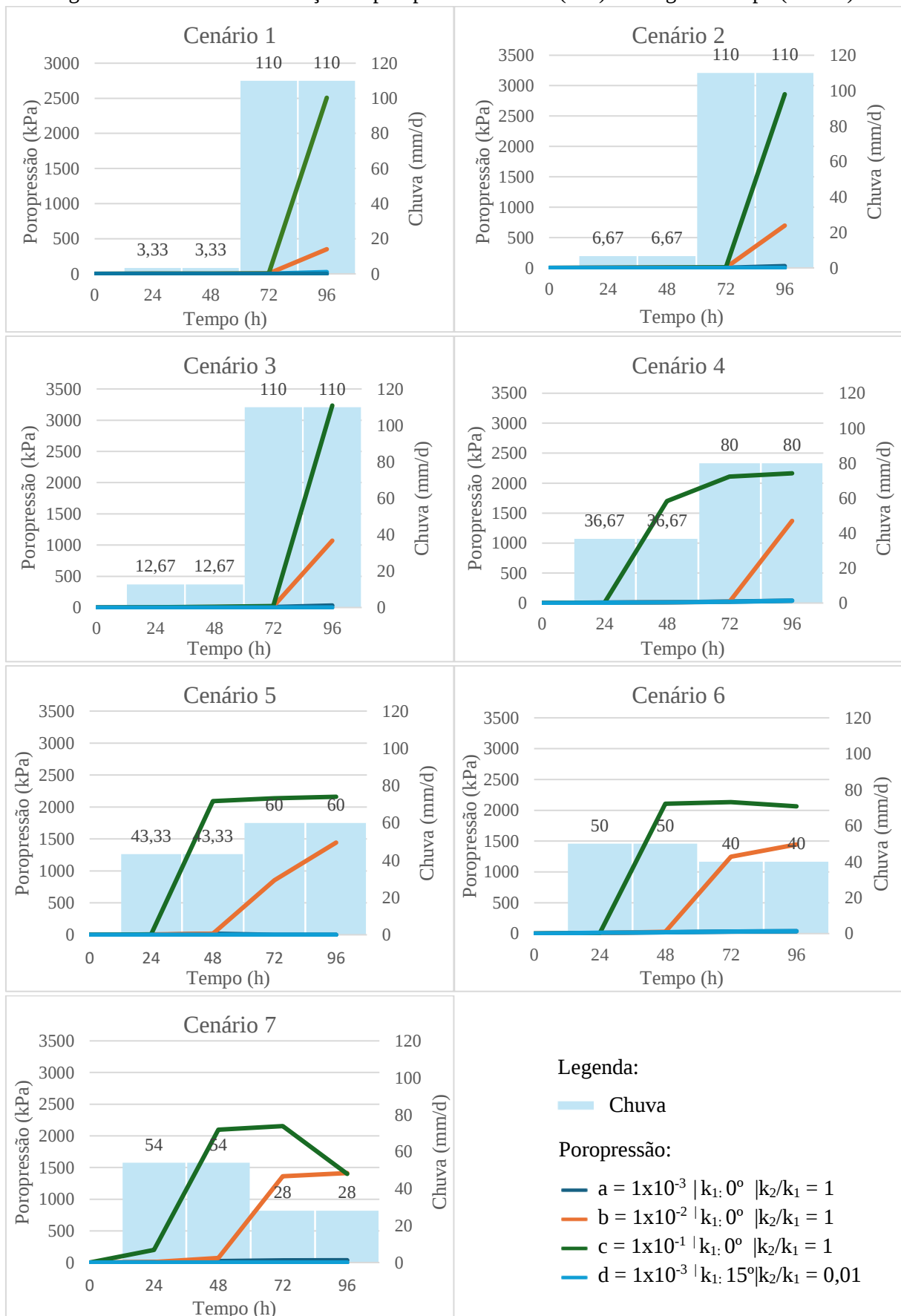
Nesta análise de fluxo são avaliados, de forma isolada, os campos transientes de poropressão e grau de saturação. Na Tabela 8, são apresentados, de forma resumida, os valores máximos de poropressão obtidos para todos os cenários simulados, agrupados em intervalos de 24 horas, a fim de oferecer uma visão geral da evolução do comportamento hidráulico ao longo do tempo. Os resultados da simulação permitem observar o avanço da infiltração e seus efeitos sobre a distribuição de poropressão. Os gráficos correspondentes a esses resultados estão reunidos no Apêndice A.

Tabela 8 – Valores máximos de poropressão (kPa) para os diferentes cenários simulados.

Tabela 6 – Valores máximos de poropressão (kPa) para os diferentes cenários simulados.								
Poropressão máxima (kPa)	Cenário	(k) Maciço Rochoso	Tempo (h)					
			0	24	48	72	96	
	1	a	1×10^{-3}	0	0,60	1,29	1,98	25,30
		b	1×10^{-2}	0	0,53	1,20	1,91	325,44
		c	1×10^{-1}	0	0,51	1,16	1,87	2157,02
		d	1×10^{-3}	0	1,13	1,76	2,38	29,79
	2	a	1×10^{-3}	0	1,19	2,49	3,88	29,67
		b	1×10^{-2}	0	1,00	2,35	3,84	667,09
		c	1×10^{-1}	0	1,03	2,38	3,81	2162,22
		d	1×10^{-3}	0	2,06	3,39	4,55	31,54
	3	a	1×10^{-3}	0	2,22	4,73	7,37	32,81
		b	1×10^{-2}	0	2,02	4,63	7,24	1038,58
		c	1×10^{-1}	0	1,98	4,58	7,19	2163,50
		d	1×10^{-3}	0	3,87	6,02	8,16	33,39
	4	a	1×10^{-3}	0	6,58	13,82	22,75	39,66
		b	1×10^{-2}	0	5,99	13,67	22,13	1370,85
		c	1×10^{-1}	0	5,90	1702,33	2108,46	2164,38
		d	1×10^{-3}	0	9,86	14,96	23,98	39,79
	5	a	1×10^{-3}	0	7,82	17,16	27,17	38,69
		b	1×10^{-2}	0	7,15	16,61	853,15	1442,56
		c	1×10^{-1}	0	7,04	2092,77	2135,44	2159,67
		d	1×10^{-3}	0	11,32	19,12	28,90	39,69
	6	a	1×10^{-3}	0	8,94	21,99	32,70	37,49
		b	1×10^{-2}	0	8,31	27,29	1248,62	1445,5
		c	1×10^{-1}	0	7,75	2107,48	2132,79	2063,34
		d	1×10^{-3}	0	12,52	22,10	32,18	39,34
	7	a	1×10^{-3}	0	9,49	23,12	35,01	36,57
		b	1×10^{-2}	0	8,54	71,05	1362,12	1412,54
		c	1×10^{-1}	0	197,71	2097,08	2154,37	1399,3
		d	1×10^{-3}	0	13,25	24,67	34,09	38,80

São apresentados a seguir, na Figura 23, os gráficos para melhor visualização da progressão dos valores.

Figura 23 – Gráficos da evolução da poropressão máxima (kPa) ao longo do tempo (0–96 h).



Fonte: Autora (2025).

Nos três primeiros cenários (1, 2 e 3), a poropressão manteve-se baixa até 72 h para todas as combinações de k , com a resposta concentrando-se no intervalo 72–96 h devido ao pulso final de 110 mm. Para a (1×10^{-3} m/s), os valores cresceram de forma moderada e não ultrapassaram 40 kPa ao fim das 96 h. Em d, os valores são semelhantes aos de a, porém ligeiramente superiores, indicando que a anisotropia com k_1 inclinado (15°) favorece uma acumulação local discreta de água.

Já para b (1×10^{-2} m/s), nos mesmos cenários, observou-se incremento expressivo apenas no último dia, com clara sensibilidade ao aumento da chuva inicial. O comportamento mais crítico ocorreu em c (1×10^{-1} m/s), que apresentou salto abrupto em 96 h, partindo de valores residuais até 72 h para valores maiores de 2000 kPa nos três cenários. Em síntese, com chuva fraca até 72 h e um pulso intenso no fim, a e d permanecem em dezenas de kPa, b mostra uma reação mais intensa no último intervalo, enquanto c concentra praticamente toda a sua resposta nesse mesmo período, atingindo valores da ordem de MPa.

Nos cenários 4 e 5, as chuvas iniciais, 36,67 e 43,33 mm/d respectivamente, são menos intensas que nas 24 horas finais, e cenários 6 e 7 o quadro se inverte, com chuvas mais intensas no início e redução nas 24 h finais. Nesses quatro casos, a resposta hidráulica passou a ocorrer antes de 72 h, sobretudo nas combinações de maior permeabilidade.

Para a (1×10^{-3} m/s), a evolução foi lenta com poropressões sempre na ordem de dezenas de kPa e máximos entre 36 e 40 kPa em 96 h. O caso d reproduziu a mesma trajetória, porém com valores final ligeiramente superiores, indicando uma acumulação local discreta decorrente da anisotropia.

Para $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s (caso b), observou-se um salto claro entre 48 e 72 h nos cenários com chuvas iniciais mais altas: no Cenário 5, de 16,61 kPa (48 h) para 853,15 kPa (72 h); no Cenário 6, de 27,29 kPa para 1.248,62 kPa; e no Cenário 7, de 71,05 kPa para 1.362,12 kPa. No Cenário 4, o incremento mais expressivo concentrou-se apenas no último intervalo, alcançando 1.370 kPa em 96 h. Esses resultados mostram que, sob chuvas iniciais elevadas, a permeabilidade intermediária (10^{-2} m/s) antecipa a resposta hidráulica, concentrando o crescimento entre 48–72 h e sustentando valores altos até 96 h.

Para c (1×10^{-1} m/s), a resposta foi precoce e intensa: no Cenário 4, em 48 h a poropressão máxima atinge 1.702,33 kPa, nos Cenários 5, 6 e 7, os valores no mesmo intervalo também se mostraram muito elevados, ultrapassando 2.000 kPa entre 48–72 h.

No Cenário 7 ($c = 1 \times 10^{-1}$ m/s): a poropressão máxima cai de 2.154,37 kPa (72 h) para 1.399,53 kPa (96 h). Essa redução está associada ao menor volume nas 24 h finais (28 mm), que interrompe o carregamento e favorece redistribuição/drenagem do excesso de água,

reduzindo o pico local entre 72–96 h. Já em b (1×10^{-2} m/s) há elevação no mesmo intervalo (1.362,12 para 1.412,54 kPa), enquanto a e d permanecem na faixa de dezenas de kPa.

Vale ressaltar que os gráficos aparecem linear porque o intervalo de tempo adotado é amplo. Para evidenciar uma curvatura mais realista, seria necessário utilizar uma discretização temporal mais refinada.

Para o grau de saturação, os valores máximos permaneceram próximos de 85% em todos os cenários, sem diferenças significativas entre as condições analisadas. As variações observadas ocorreram apenas de forma sutil nos gráficos de distribuição espacial. Por esse motivo, não são apresentados resultados detalhados nesta seção, uma vez que os gráficos completos encontram-se reunidos no Apêndice A.

4.2 RESULTADOS DO SRF NOS CENÁRIOS DEFINIDOS

A Tabela 9 apresenta uma síntese dos resultados obtidos nas simulações numéricas referentes à análise de estabilidade pelo método SSR, para os diferentes cenários de precipitação, valores de permeabilidade do maciço rochoso e inclinações analisadas ao longo de 96 horas. São apresentados os valores de SRF de forma resumida (0, 24, 48, 72 e 96 horas), permitindo visualizar a evolução geral da estabilidade do talude em função da chuva antecedente, da intensidade das últimas 24 horas e das condições de permeabilidade adotadas. O objetivo é fornecer um panorama inicial dos resultados, que servirá de base para análises mais detalhadas nas seções seguintes.

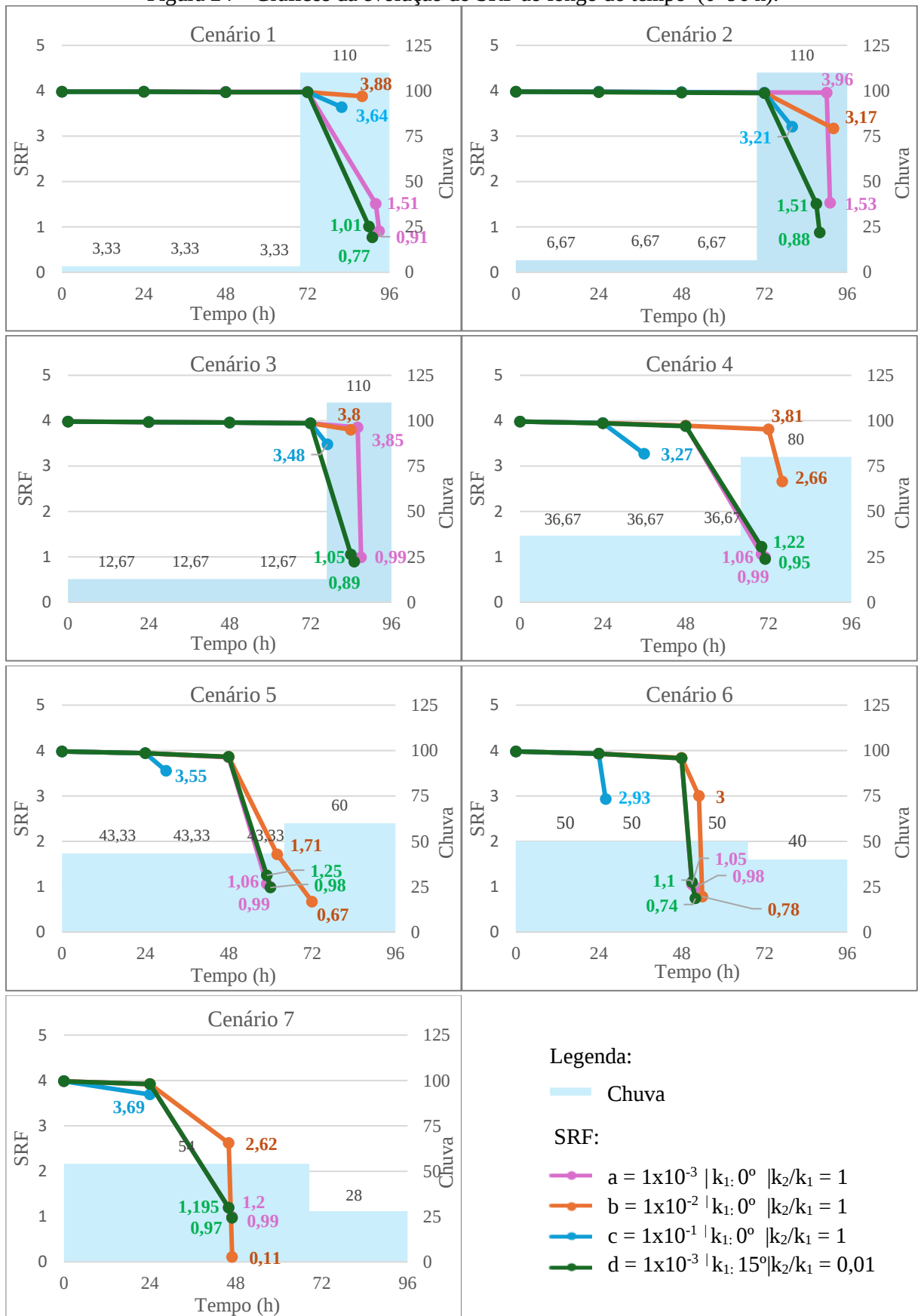
Em seguida, na Figura 24, é apresentada a evolução do SRF ao longo do tempo para cada cenário. Para destacar a proximidade da ruptura, foram indicados os intervalos de instabilidade, definidos como o último estágio com $\text{SRF} > 1,0$ e o primeiro estágio com $\text{SRF} < 1,0$, adotando-se entre eles um passo temporal de 1 h. Quando a etapa seguinte resultou em Não Convergência (NC), foi plotado apenas o último valor convergente de SRF, sem representação dos pontos NC. Na seção seguinte esses valores serão melhores analisados.

No testes d ($k_1=15^\circ$ e $k_2/k_1=0,01$), apenas a configuração com $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s pôde ser avaliada, pois as demais apresentaram elevada instabilidade numérica no acoplamento fluxo–deformação durante o SSR. Assim, optou-se por analisar exclusivamente esse caso, considerado o mais representativo e estável, além de permitir a comparação direta com os resultados obtidos para as condições com k_1 orientado a 0° .

Tabela 9 – Resultados simplificados de SRF da simulação numérica para diferentes cenários de chuva e inclinação de k_1 ao longo de 96 horas de simulação.

Teste	(k) Maciço Rochoso	Média diária dos 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Precipitação/tempo (m/s) 3 dias anteriores	Precipitação/tempo (m/s) 24 horas finais	SRF				
						Tempo (horas)				
						0	24	48	72	96
1a	1×10^{-3}	3,33	110	3,86E-08	1,27E-06	3,98	3,98	3,98	3,98	0,59
1b	1×10^{-2}					3,98	3,98	3,97	3,97	NC
1c	1×10^{-1}					3,98	3,98	3,97	3,97	NC
1d	1×10^{-3}					3,98	3,98	3,97	3,97	0,42
2a	1×10^{-3}	6,67	110	7,72E-08	1,27E-06	3,98	3,98	3,97	3,96	0,41
2b	1×10^{-2}					3,98	3,98	3,97	3,96	NC
2c	1×10^{-1}					3,98	3,98	3,97	3,96	NC
2d	1×10^{-3}					3,98	3,97	3,96	3,95	0,41
3a	1×10^{-3}	12,67	110	1,47E-07	1,27E-06	3,98	3,97	3,96	3,94	0,36
3b	1×10^{-2}					3,98	3,97	3,96	3,94	NC
3c	1×10^{-1}					3,98	3,97	3,96	3,94	NC
3d	1×10^{-3}					3,98	3,97	3,96	3,94	0,36
4a	1×10^{-3}	36,67	80	4,24E-07	9,26E-07	3,98	3,95	3,89	0,93	0,29
4b	1×10^{-2}					3,98	3,95	3,89	3,81	NC
4c	1×10^{-1}					3,98	3,95	NC	NC	NC
4d	1×10^{-3}					3,98	3,94	3,88	0,95	0,32
5a	1×10^{-3}	43,33	60	5,02E-07	6,94E-07	3,98	3,94	3,85	0,52	0,29
5b	1×10^{-2}					3,98	3,94	3,86	0,67	NC
5c	1×10^{-1}					3,98	3,94	NC	NC	NC
5d	1×10^{-3}					3,98	3,94	3,86	0,49	0,32
6a	1×10^{-3}	50,00	40	5,79E-07	4,63E-07	3,98	3,93	3,83	0,35	NC
6b	1×10^{-2}					3,98	3,93	3,84	NC	NC
6c	1×10^{-1}					3,98	3,93	NC	NC	NC
6d	1×10^{-3}					3,98	3,93	3,83	0,39	NC
7a	1×10^{-3}	54,00	28	6,25E-07	3,24E-07	3,98	3,92	0,82	0,33	NC
7b	1×10^{-2}					3,98	3,92	0,11	NC	NC
7c	1×10^{-1}					3,98	3,69	NC	NC	NC
7d	1×10^{-3}					3,98	3,92	0,90	0,36	NC

Figura 24 – Gráficos da evolução do SRF ao longo do tempo (0–96 h).



Fonte: Autora (2025).

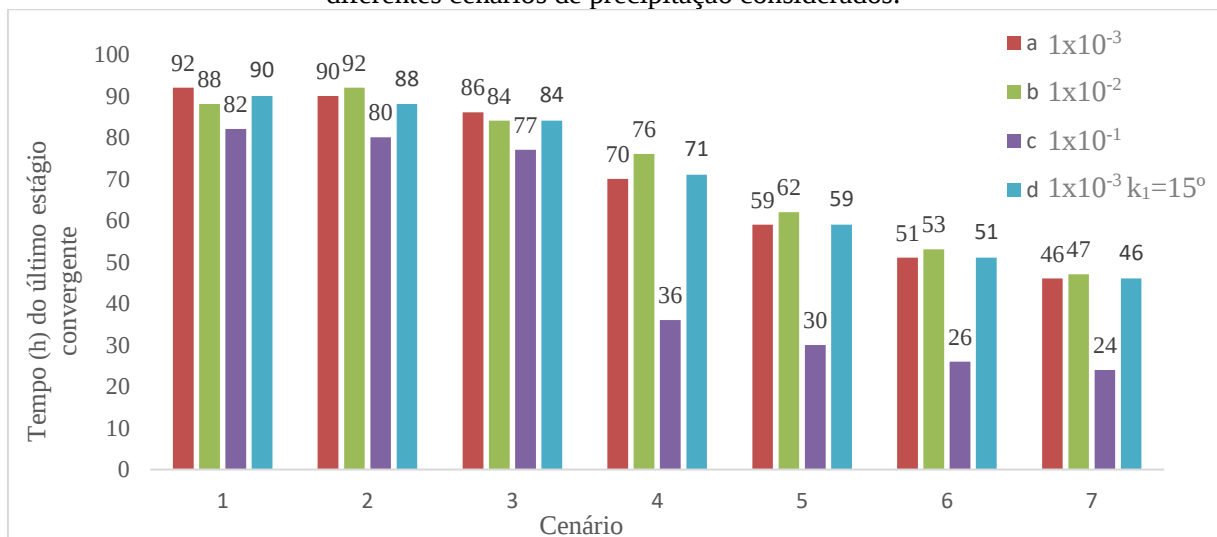
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CENÁRIOS DE CHUVA PARA UM MESMO VALOR DE PERMEABILIDADE DO MACIÇO ROCHOSO

Para cada valor de permeabilidade do maciço rochoso (k) será apresentado um tópico específico. Dentro de cada tópico de k , são apresentados os valores de SRF obtidos para $k_1 = 0^\circ$ e $k_2/k_1 = 1$, que serão identificados nos próximos tópicos como valores padrão. No caso específico do $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, será seguido pelos resultados da condição com k_1 inclinado a 15° em relação à horizontal e $k_2/k_1 = 0,01$.

Em ambas as configurações (0° e 15°), são realizadas duas análises: A primeira compara os cenários 1, 2 e 3, caracterizados por acumulados antecedentes baixos e acumulado fixo nas últimas 24 horas (110 mm). A segunda abrange os cenários 4, 5, 6 e 7, definidos por acumulados antecedentes mais elevados.

A Figura 25 apresenta um resumo dos resultados obtidos para cada cenário, destacando o último tempo em que o modelo convergiu ou manteve o SRF acima de 1,00. Esses valores são detalhados e comparados, nos tópicos seguintes, com a hierarquia de suscetibilidade proposta por Gonzalez *et al.* (2022), a fim de avaliar a correspondência entre os resultados numéricos e os limiares empíricos de ocorrência de deslizamentos.

Figura 25 – Tempo (h) do último estágio convergente, correspondente ao SRF acima de 1, para os diferentes cenários de precipitação considerados.



Fonte: Autora (2025).

4.3.1 Permeabilidade do maciço rochoso de 1×10^{-3} m/s

4.3.1.1 Valores padrões do RS2 para k_1 e k_2/k_1

Para esta etapa, comparam-se os testes 1a, 2a e 3a, simulados com permeabilidade de 1×10^{-3} m/s que compartilham a mesma configuração: totais acumulados baixos nos três

primeiros dias e acumulado fixo de 110 mm nas últimas 24 h. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos. Cabe destacar que os traços (-) anteriores aos momentos críticos indicam os tempos para os quais as simulações não foram executadas, pois o foco foi identificar com precisão o último instante em que o SRF permaneceu acima de 1 (em negrito vermelho) e o primeiro instante em que caiu abaixo desse limiar (em negrito preto).

Tabela 10 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando três cenários de precipitação (1a, 2a e 3a) e $k_1 = 0^\circ$.

Teste	Média 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Tempo (h)											
			0	24	48	72	84	86	87	90	91	92	93	
1a	3,33	110	3,98	3,98	3,98	3,98	3,92	-	-	3,87	-	1,51	0,91	
2a	6,67	110	3,98	3,98	3,97	3,96	3,90	-	3,87	1,53	0,90			
3a	12,67	110	3,98	3,97	3,96	3,94	3,86	3,85	0,99					

Observa-se que, embora haja uma tendência esperada de redução do SRF com o aumento do acumulado antecedente, as variações observadas até 72 h são muito pequenas e compatíveis com a variabilidade do próprio método numérico, não permitindo, por si só, conclusões robustas sobre perda efetiva de segurança.

A partir das 84 h, nota-se uma ligeira diferenciação entre os cenários, com o SRF do caso de maior acumulado começando a decair de forma um pouco mais acentuada. Entretanto, essa diferença ainda é sutil e de baixa magnitude.

Entende-se, portanto, que a hierarquia de risco sugerida pelo gráfico de probabilidades trazido por Gonzalez *et al.* (2022) é coerente com a trajetória do SRF, na medida em que todos os cenários efetivamente atingem condição de deslizamento ($\text{SRF} < 1$) ao final de 96 h. Contudo, como todos cruzam esse limiar, o decréscimo progressivo perde poder discriminante entre casos. Assim, a variável mais útil para comparação passa a ser o tempo até o cruzamento do limiar de instabilidade, o que justificou empregar maior discretização temporal para identificar o momento crítico de cada um dos testes.

Nesse contexto, observa-se que os resultados obtidos para os cenários 1a, 2a e 3a reproduzem adequadamente a hierarquia de probabilidade de ocorrência de deslizamentos proposta pelos autores, com probabilidades de 0,5, 0,75 e 1,0, respectivamente. O cenário 1a, de menor probabilidade, apresentou ruptura apenas entre 92 e 93 horas, enquanto o 2a rompeu entre 90 e 91 horas, e o 3a, de maior probabilidade, atingiu instabilidade mais cedo, por volta de 86 a 87 horas. Ainda que todos representem condições críticas de estabilidade, essa correspondência entre o tempo de ruptura e a escala crescente de probabilidade confirma a

consistência entre o comportamento numérico e os limiares empíricos definidos para a região de Petrópolis.

Na sequência, são apresentados os resultados referentes ao segundo grupo de cenários (4a, 5a, 6a e 7a), caracterizados por acumulados antecedentes mais elevados em comparação aos testes anteriores. A Tabela 11 organiza a variação do SRF ao longo das 96 horas de simulação, permitindo avaliar os efeitos combinados do acumulado nos três dias anteriores e do acumulado nas últimas 24 horas sobre a estabilidade do talude.

Tabela 11 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando 4 cenários de precipitação (4a, 5a, 6a e 7a) para $k_1 = 0^\circ$.

Teste	Média 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Tempo (h)											
			0	24	46	47	48	51	52	59	60	66	70	71
4a	36,67	80	3,98	3,95	-	-	3,89	-	-	-	3,85	3,83	1,06	0,99
5a	43,33	60	3,98	3,94	-	-	3,85	-	-	1,06	0,99			
6a	50,00	40	3,98	3,93	-	-	3,83	1,05	0,98					
7a	54,00	28	3,98	3,92	1,20	0,99								

Observa-se que todos os cenários apresentaram valores de SRF inferiores a 1 já nas 72 horas de simulação, indicando que a ruptura ocorreu antes do término do período analisado.

De modo geral, o comportamento foi o esperado: os testes tiveram ruptura progressivamente mais cedo à medida que o acumulado de chuva aumentava. Assim, nesta série, apenas a chuva inicial condicionou o momento de ruptura, sem influência adicional perceptível da chuva nas últimas 24 horas.

A situação observada nesta etapa é semelhante ao comportamento descrito anteriormente, uma vez que a hierarquia de risco proposta por Gonzalez *et al.* (2022) permanece coerente com a trajetória do SRF ao longo dos cenários analisados. Todos os casos atingiram condição de instabilidade ($\text{SRF} < 1$) dentro do período de 96 h.

Contudo, assim como nos resultados anteriores, o fato de todos os cenários cruzarem o limiar de ruptura faz com que o decréscimo progressivo do SRF deixe de ser um bom discriminante entre as simulações. Dessa forma, a variável mais adequada para comparação passa novamente a ser o tempo necessário para atingir o limiar de instabilidade. Nesse sentido, apesar de o cenário 4a estar associado à maior probabilidade de ruptura (1,0), verificou-se que o instante crítico do SRF ocorreu antes de 72 h, isto é, antes do período em que se inicia a precipitação mais intensa. Assim, os resultados foram predominantemente controlados pela chuva inicial, e o comportamento observado mantém-se coerente com os acumulados de precipitação considerados em cada cenário.

4.3.1.2 $k_2/k_1=0,01$ e $k_1=15^\circ$

Na sequência, na Tabela 12, são apresentados os resultados referentes à configuração com $k_2/k_1=0,01$ e inclinação de 15° (k_1), correspondente à condição anisotrópica de permeabilidade com orientação inclinada em relação à horizontal. Essa variação buscou representar o efeito da direção preferencial de fluxo associada a descontinuidades do maciço rochoso, avaliando como a inclinação do principal eixo de permeabilidade influencia o comportamento do talude sob infiltração e a evolução do SRF ao longo do tempo.

Tabela 12 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando 3 cenários de precipitação (1d, 2d e 3d) e $k_1 = 15^\circ$.

Teste	Média 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Tempo (h)									
			0	24	48	72	84	85	87	88	90	91
1d	3,33	110	3,98	3,98	3,97	3,97	3,91	-	-	-	1,01	0,77
2d	6,67	110	3,98	3,97	3,97	3,96	3,90	-	1,51	0,88		
3d	12,67	110	3,98	3,97	3,96	3,94	1,05	0,89				

Observa-se na Tabela 12 que, para a configuração com k_1 inclinado a 15° , o cenário com menor precipitação inicial (1d) apresentou ruptura entre 90 e 91 horas, momento em que o SRF reduziu de 1,01 para valores inferiores a 1. Já o cenário com maior precipitação antecedente (3d) atingiu a instabilidade mais cedo, entre 87 e 88 horas, quando o SRF decaiu de 1,05 para valores abaixo da unidade. Essa antecipação do momento de ruptura corrobora a tendência observada nas análises anteriores, em que o aumento do acúmulo de chuva prévia favoreceu a redução progressiva da estabilidade do talude.

Comparando com os resultados da Tabela 10 ($k_1 = 0^\circ$), nota-se que a inclinação do eixo principal de permeabilidade influenciou o momento de ruptura e a trajetória do SRF ao longo do tempo. Para $k_1 = 0^\circ$, o cenário com menor precipitação antecedente (1a) apresentou ruptura entre 91 e 92 horas, enquanto o de maior precipitação (3a) rompeu entre 86 e 87 horas. Já na condição inclinada ($k_1 = 15^\circ$), as rupturas ocorreram mais cedo: entre 90 e 91 horas para o cenário menos chuvoso e entre 84 e 85 horas para o mais chuvoso.

Esse comportamento evidencia que a anisotropia associada à inclinação do eixo de permeabilidade influenciou a resposta do talude, resultando em uma antecipação do momento de ruptura. Assim, observa-se que tanto o aumento do acumulado inicial quanto a inclinação de k_1 atuaram de forma combinada para reduzir o SRF e antecipar o processo de instabilidade.

A seguir, apresenta-se a segunda parte da análise. A Tabela 13 reúne a variação do SRF ao longo de 96 h para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s com $k_1 = 15^\circ$, nos cenários 4d–7d.

Tabela 13 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, considerando quatro cenários de precipitação (4d, 5d, 6d e 7d) para $k_1 = 15^\circ$.

Teste	Média 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Tempo (h)										
			0	24	46	47	48	51	52	59	60	71	72
4d	36,67	80	3,98	3,94	-	-	3,88	-	-	-	-	1,22	0,95
5d	43,33	60	3,98	3,94	-	-	3,86	-	-	1,25	0,980		
6d	50,00	40	3,98	3,93	-	-	3,83	1,10	0,74				
7d	54,00	28	3,98	3,92	1,195	0,97							

Comparando com os valores da Tabela 11, verifica-se um leve aumento dos valores de SRF em 72 e 96 h para $k_1 = 15^\circ$, porém os instantes críticos mantiveram-se nos mesmos estágios. No teste 7d, por exemplo, a ruptura permaneceu entre 46 e 47 h. Apesar da pequena e insignificante diferença do SRF nesta configuração, o momento crítico não se alterou.

Nos cenários 1a, 2a e 3a, os resultados seguiram a hierarquia de suscetibilidade proposta por Gonzalez *et al.* (2022), com antecipação progressiva da ruptura à medida que aumentam as probabilidades de ocorrência de deslizamentos. Já nos cenários 4, 5, 6 e 7, a resposta do modelo foi condicionada predominantemente pela chuva inicial, uma vez que o instante crítico ocorreu antes do período de maior intensificação pluviométrica, de modo que a comparação entre esses casos refletiu sobretudo o acúmulo antecedente.

4.3.2 Permeabilidade do maciço rochoso de 1×10^{-2} m/s

4.3.2.1 Valores padrões do RS2 para k_1 e k_2/k_1

Na condição de permeabilidade do maciço igual a 1×10^{-2} m/s, buscou-se avaliar o comportamento do talude frente a maior capacidade de infiltração em comparação ao anterior.

Tabela 14 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s, considerando três cenários de precipitação (1b, 2b e 3b) para $k_1 = 0^\circ$.

SRF $k = 1 \times 10^{-2}$ ($K_1 = 0^\circ$)														
Teste	Média 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Tempo (h)											
			0	24	48	72	84	85	88	89	91	92	93	96
1b	3,33	110	3,98	3,98	3,97	3,97	3,92	-	3,88	NC				
2b	6,67	110	3,98	3,98	3,97	3,96	3,90	-	-	-	3,38	3,17	NC	
3b	12,67	110	3,98	3,97	3,96	3,94	3,80	NC						

Observa-se que o teste 3b, com maior precipitação antecedente, apresentou a instabilidade mais cedo, com transição para não convergência entre 84 e 85 horas. O teste 1b, com menor precipitação, seguiu em sequência, apresentando perda de solução entre 88 e 89

horas. Nota-se ainda uma queda abrupta do SRF, de valores elevados ($\approx 3,8$) para abaixo de zero em um único intervalo de 1 hora, comportamento que será analisado com maior detalhe na avaliação da superfície de ruptura.

Já o teste 2b apresentou comportamento ligeiramente divergente da hierarquia de suscetibilidade proposta por Gonzalez *et al.* (2022), mantendo estabilidade até 92 horas (com SRF ainda superior a 1) e evoluindo para não convergência apenas posteriormente, contrariando a tendência esperada de antecipação da ruptura com o aumento do acumulado antecedente. Esse desvio pode estar associado a variações no caminho de escoamento transiente e na distribuição de saturação, à ativação de uma superfície crítica distinta ou à sensibilidade à discretização temporal e espacial. Tal hipótese será verificada no tópico de análise da superfície de ruptura.

Na sequência, na Tabela 15, são apresentados os resultados correspondentes ao segundo grupo de cenários (4b, 5b, 6b e 7b), também simulados para $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s e avaliados após 96 horas de infiltração. Esses cenários complementam a análise anterior, permitindo observar a evolução das condições de instabilidade sob diferentes configurações de precipitação e suas respectivas respostas.

Tabela 15 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-2}$ m/s, considerando 4 cenários de precipitação (4b, 5b, 6b e 7b) para $k_1 = 0^\circ$.

Teste	Média 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Tempo (h)										
			0	24	46	47	48	53	54	62	63	76	77
4b	36,67	80	3,98	3,95	-	-	3,89	-	-	-	-	2,66	NC
5b	43,33	60	3,98	3,94	-	-	3,86	-	-	1,71	NC		
6b	50,00	40	3,98	3,93	-	-	3,84	3,00	0,78				
7b	54,00	28	3,98	3,92	2,99	2,62	0,11						

O teste 4b apresentou uma redução gradual do fator de segurança ao longo do tempo, partindo de 3,98 no instante inicial e atingindo 2,66 em 76 horas, mostrando que o modelo para de convergir entre 76 e 77 horas. Em 96 horas o modelo não convergiu, o que indica a tendência de instabilidade sob as condições simuladas.

O teste 5b apresentou instabilidade entre 62 e 63 horas, com redução do SRF de 1,71 para NC nesse intervalo. Após esse ponto, o modelo deixou de convergir, indicando possivelmente a perda completa de estabilidade.

O teste 6b mostrou comportamento semelhante, com ruptura entre 53 e 54 horas. Esses resultados reforçam a tendência de antecipação da ruptura com o aumento do acumulado inicial.

O teste 7b apresentou instabilidade entre 47 e 48 horas de simulação, evidenciando a redução significativa do fator de segurança nesse intervalo e indicando a não convergência do

modelo a partir desse período.

De forma semelhante ao observado para a permeabilidade anterior (1×10^{-3} m/s), nos cenários 4b, 5b, 6b e 7b verificou-se uma redução progressiva do tempo até a ruptura. O instante crítico ocorreu predominantemente na fase inicial do evento, antes do período de maior intensificação pluviométrica, esse comportamento esteve principalmente associado ao acúmulo antecedente efetivamente atuante.

4.3.3 Permeabilidade do maciço de 1×10^{-1} m/s

4.3.3.1 Valores padrões do RS2 para k_1 e k_2/k_1

Na condição de condutividade hidráulica do maciço rochoso igual a 1×10^{-1} m/s, buscou-se avaliar a influência de um maciço significativamente mais permeável na resposta hidromecânica do talude. Trata-se, portanto, de um cenário mais crítico em relação aos anteriores, pois a maior condutividade tende a favorecer a transmissão/infiltração do fluxo no meio, intensificando os efeitos da precipitação aplicada. A Tabela 16 traz esses valores.

Tabela 16 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-1}$ m/s, considerando 3 cenários de precipitação (1c, 2c e 3c) para $k_1 = 0^\circ$.

Teste	Média 3 dias anteriores (mm/d)	24 horas finais (mm/d)	Tempo (h)										
			0	24	48	72	77	78	79	80	81	82	83
1c	3,33	110	3,98	3,98	3,97	3,97	-	3,95	-	-	3,94	3,64	NC
2c	6,67	110	3,98	3,98	3,97	3,96	-	3,94	3,93	3,21	NC		
3c	12,67	110	3,98	3,98	3,97	3,96	3,48	NC					

O teste 1c apresentou comportamento estável até aproximadamente 82 horas, quando o SRF reduziu de 3,94 para 3,64, seguido de não convergência a partir de 83 horas, indicando possível ruptura entre 82 e 83 horas.

No 2c, a perda de estabilidade ocorreu de forma mais precoce, com instabilidade entre 80 e 81 horas, com não convergência a partir de 81 horas. Já o cenário 3c, correspondente à maior precipitação inicial, apresentou o menor tempo até a ruptura, com instabilidade entre 77 e 78 horas, seguido de não convergência total a partir de 78 horas.

Em todos os casos, os modelos não convergiram até 96 horas, indicando que, sob a maior condição de permeabilidade do maciço ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s), o talude evolui rapidamente para a ruptura. Esse comportamento está em consonância com a hierarquia de suscetibilidade proposta por Gonzalez *et al.* (2022), evidenciando que a estabilidade diminui com o aumento do acúmulo de chuva antecedente. Ainda assim, a diferença entre os tempos de instabilidade

foi relativamente pequena, indicando que, nessa condição, o maciço apresenta alta sensibilidade à infiltração.

Na sequência, na Tabela 17, são apresentados os resultados referentes ao segundo conjunto de cenários (4c, 5c, 6c e 7c) para a condição de permeabilidade do maciço igual a 1×10^{-1} m/s.

Tabela 17 – Variação do SRF ao longo de 96 horas para $k = 1 \times 10^{-1}$ m/s, considerando 4 cenários de precipitação (4c, 5c, 6c e 7c) para $k_1 = 0^\circ$.

Teste	Média 3 dias anteriores	24 horas finais	Tempo (h)								
			0	24	25	26	27	30	31	36	37
4c	36,67	80	3,98	3,95	-	-	-	-	-	3,27	NC
5c	43,33	60	3,98	3,93	-	-	-	3,55	NC		
6c	50,00	40	3,98	3,93	-	2,93	NC				
7c	54,00	28	3,98	3,69	NC						

Observa-se que todos os cenários apresentaram não convergência antes das 48 horas de simulação, indicando instabilidade precoce sem que o modelo alcançasse o período correspondente à chuva das últimas 24 horas. Essa resposta mostra que, sob a maior condição de permeabilidade ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s), o maciço torna-se altamente sensível à infiltração, resultando em rápida perda de estabilidade desde as etapas iniciais.

Apesar de os resultados representarem condições extremamente críticas de estabilidade, o padrão observado manteve coerência com a tendência esperada, uma vez que quanto maior o acumulado de chuva na fase inicial do evento, mais precoce foi a ocorrência da ruptura.

4.4 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DE RUPTURA

Nesta etapa, são apresentadas as análises referentes à superfície de ruptura obtida nas simulações de estabilidade, com base nos resultados do método SSR. O objetivo é identificar o comportamento do talude nos estágios críticos, observando a formação e a propagação das zonas de plastificação associadas ao cisalhamento.

Para cada cenário, foram avaliados o local de deformação plástica cisalhante máxima, bem como os campos de poropressão e grau de saturação nos estágios que delimitam a transição entre estabilidade e ruptura, isto é, o último estágio convergente ($\text{SRF} > 1$) e o primeiro não convergente ou com $\text{SRF} < 1$. Essa abordagem permite visualizar com maior clareza o desenvolvimento da falha e a evolução do processo de instabilidade ao longo do tempo de simulação.

4.4.1 Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$

No Cenário 1, com $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, os valores obtidos de SRF indicam que o modelo atingiu a ruptura entre 92 e 93 horas,. Assim, são apresentados na Figura 26, Figura 27 e Figura 28, o local de deformação plástica cisalhante máxima, os gráfico de poropressão e grau de saturação respectivamente, correspondentes no ultimo estágio com SRF acima de 1,51 horas.

Figura 26 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 92 horas com SRF de 1,51.

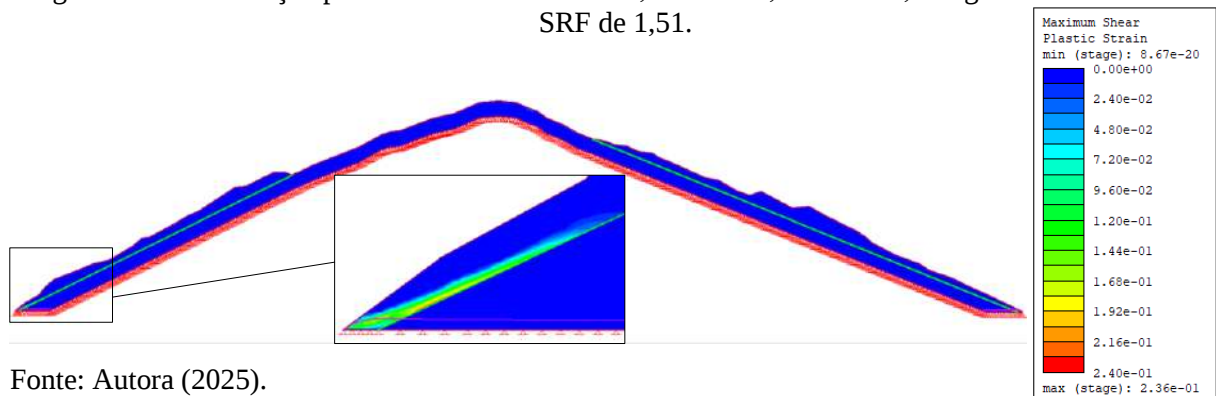


Figura 27 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 92 horas com SRF de 1,51.

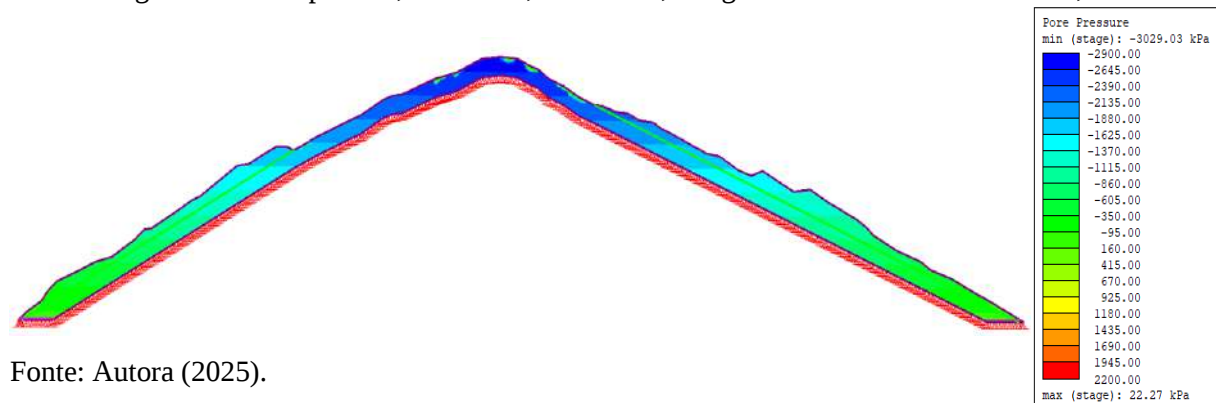
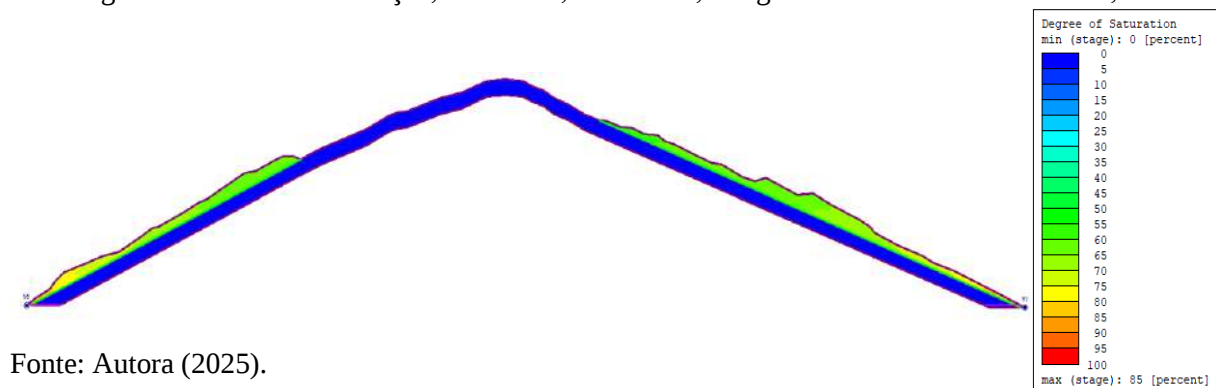


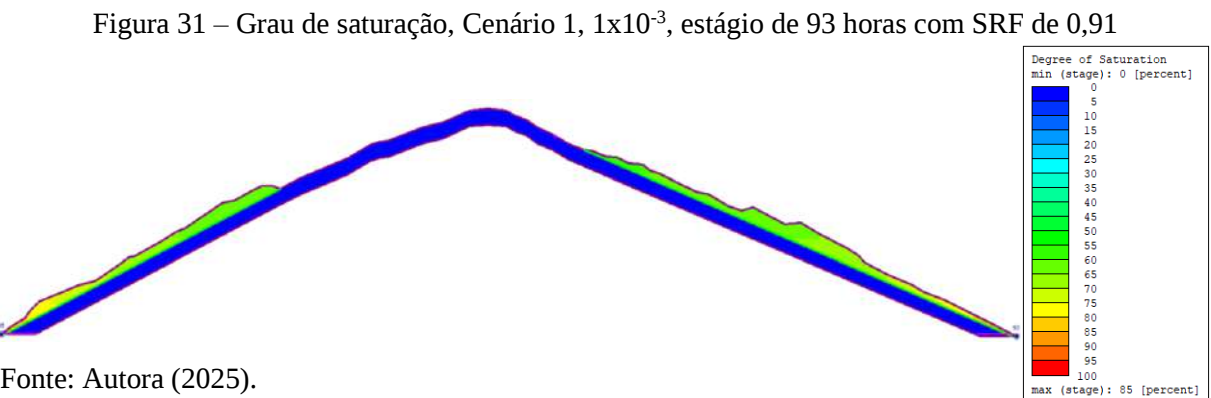
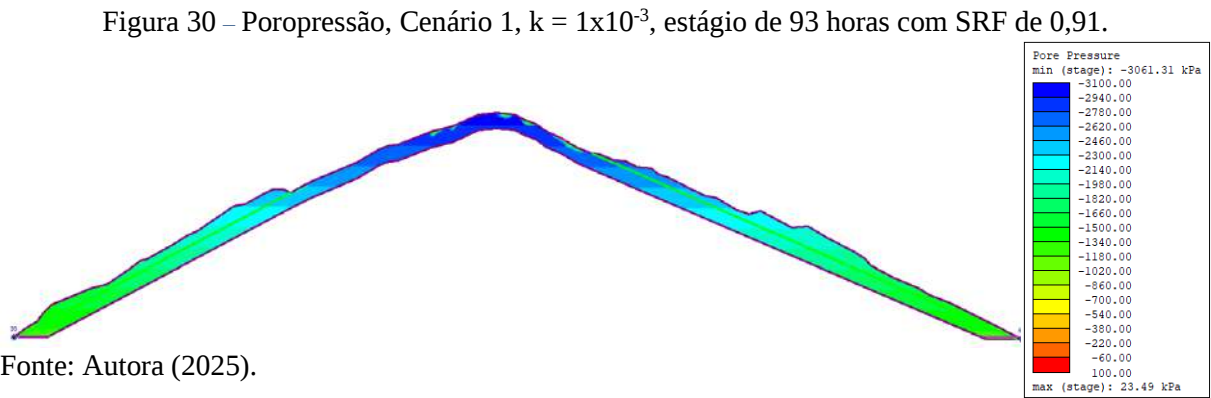
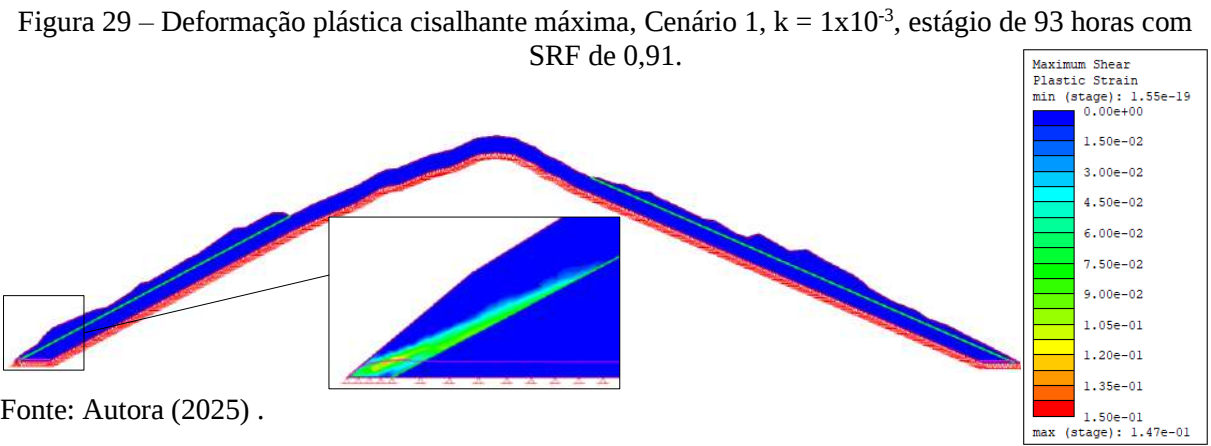
Figura 28 – Grau de saturação, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 92 horas com SRF de 1,51.



Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, coincidindo com a região de maior poropressão. Essa sobreposição entre os

campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base pode indicar que houve redução das tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

A seguir são apresentados na Figura 29, Figura 30 e Figura 31, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 93, o primeiro estágio com SRF abaixo de 1.



Neste estágio, observa-se um leve aumento da poropressão em relação ao instante anterior, especialmente na base do talude, onde também se concentra a deformação plástica cisalhante máxima. Esse acréscimo, ainda que discreto, foi suficiente para reduzir as tensões efetivas e provocar a queda do SRF para valores inferiores a 1, indicando a deflagração da

ruptura no modelo.

São apresentados na Figura 32, Figura 33 e Figura 34 os gráficos referentes ao Cenário 2 para $k = 1 \times 10^{-3}$ onde a ruptura ocorreu entre 90 e 91 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 90 horas.

Figura 32 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 90 horas com SRF de 1,53.

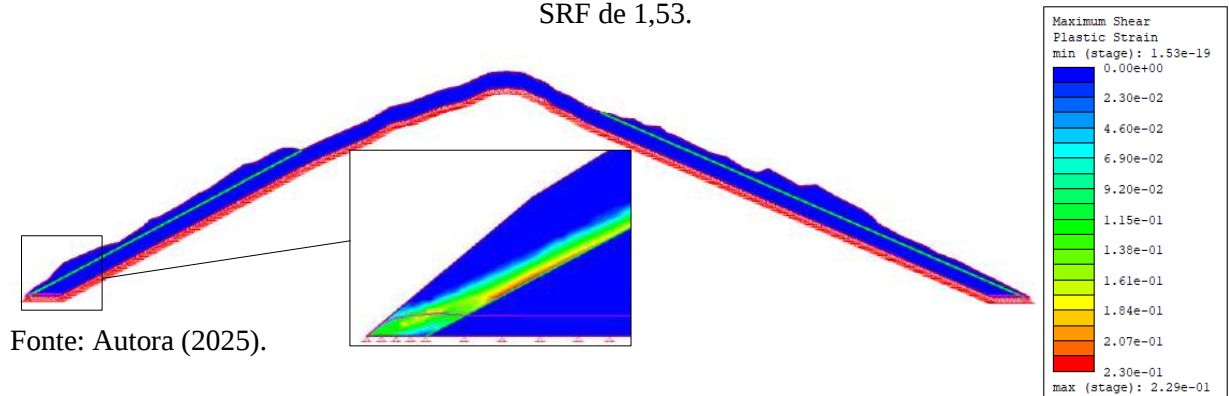


Figura 33 - Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 90 horas com SRF de 1,53.

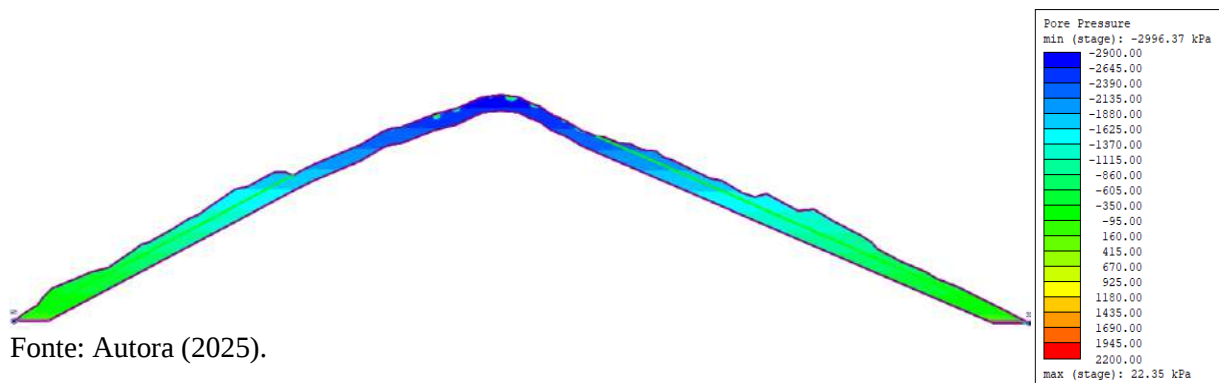
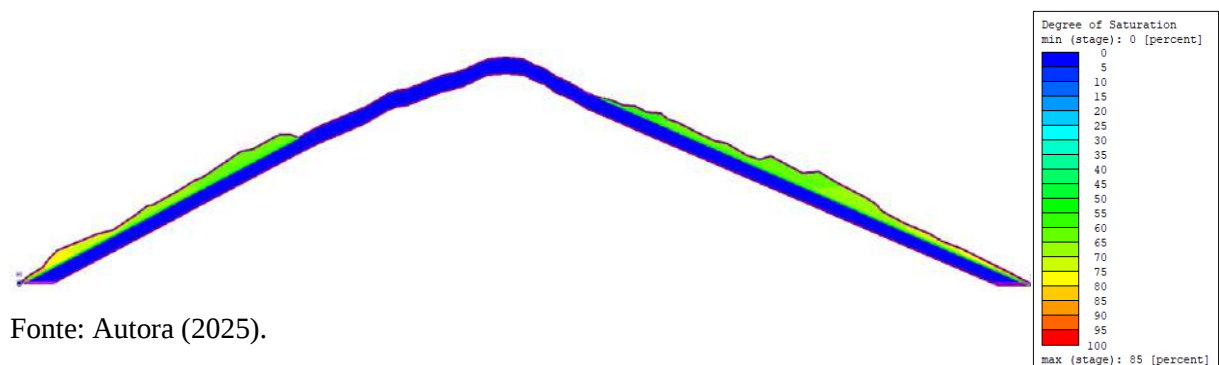


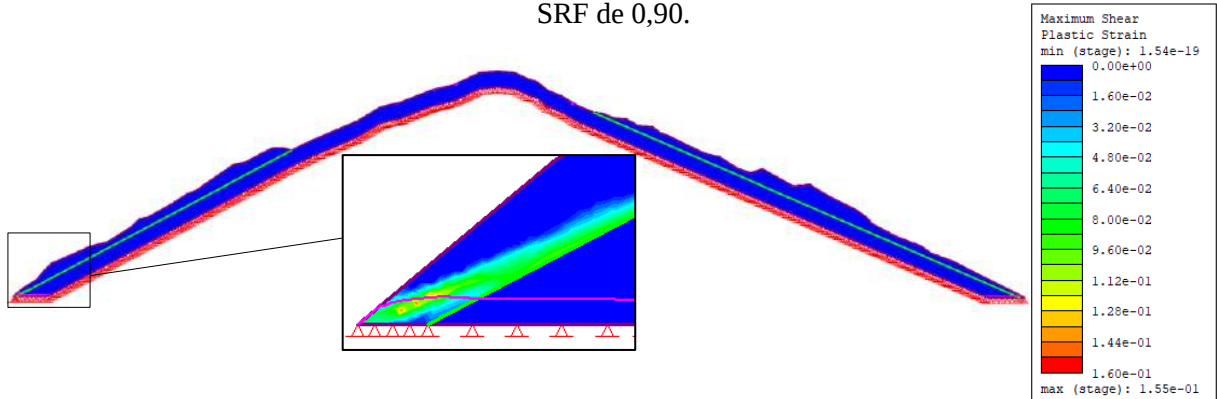
Figura 34 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 90 horas com SRF de 1,53.



Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, coincidindo com a região de maior poropressão. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indicando que o aumento da poropressão na base pode ter reduzido as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

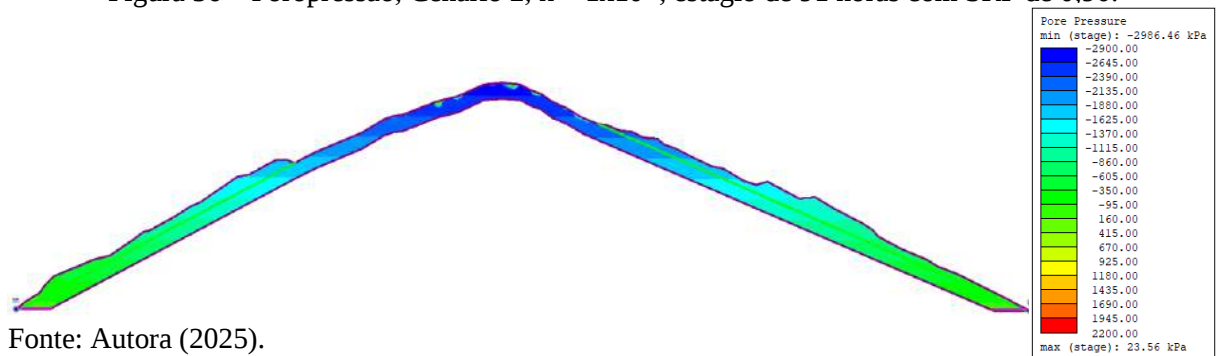
A seguir são apresentados na Figura 35, Figura 36 e Figura 37 os gráficos referentes ao próximo estágio, de 91 horas, o primeiro estágio com SRF abaixo de 1.

Figura 35 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 91 horas com SRF de 0,90.



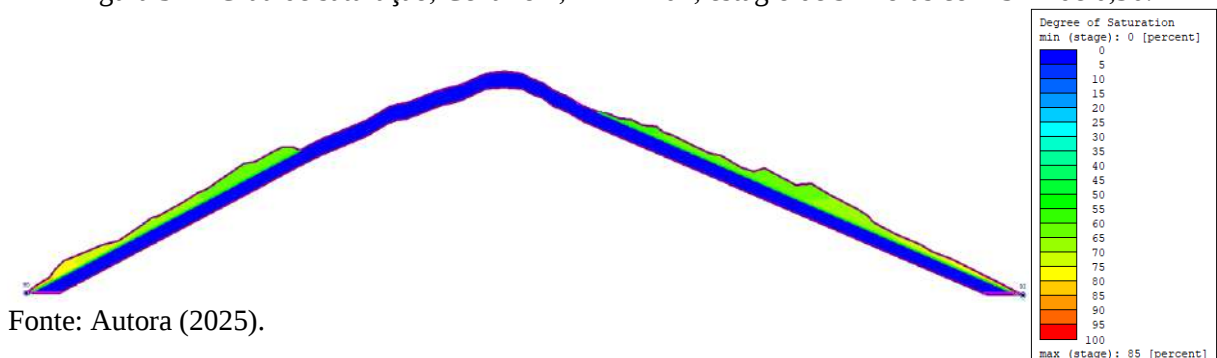
Fonte: Autora (2025).

Figura 36 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 91 horas com SRF de 0,90.



Fonte: Autora (2025).

Figura 37 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 91 horas com SRF de 0,90.



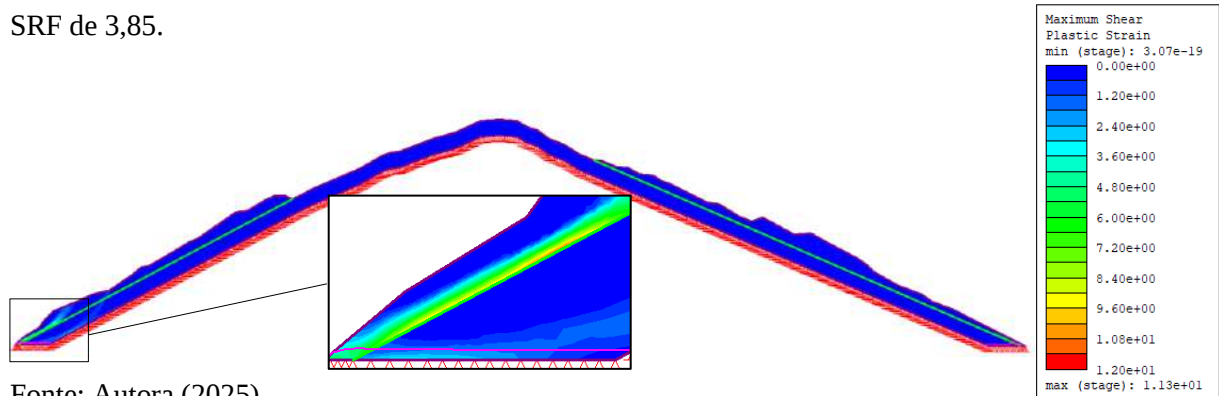
Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se um leve aumento da poropressão em relação ao instante anterior, especialmente na base do talude, onde também se concentra a deformação plástica cisalhante máxima. Esse acréscimo, ainda que discreto, foi suficiente para reduzir as tensões efetivas e provocar a queda do SRF para valores inferiores a 1, indicando a deflagração da ruptura no modelo.

São apresentados na

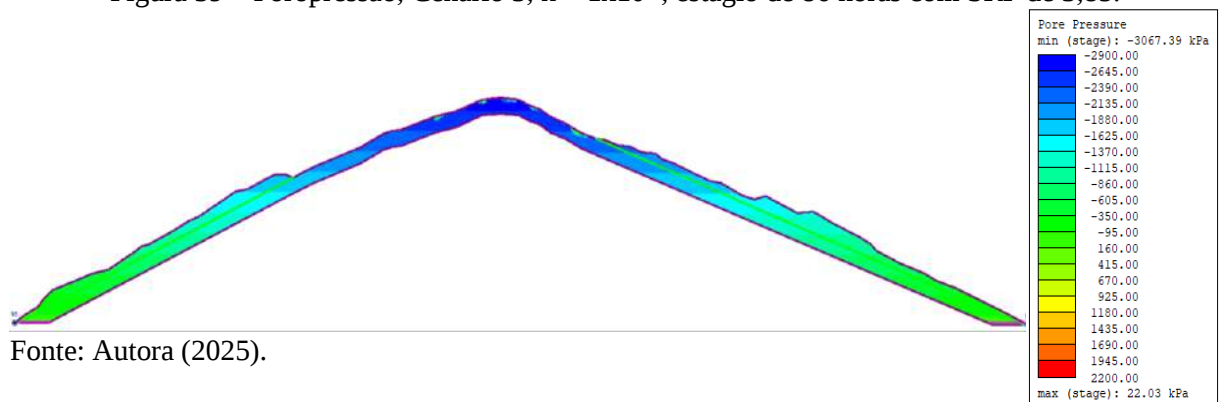
Figura 38, Figura 39 e Figura 40, os gráficos referentes ao cenário 3 para $k = 1 \times 10^{-3}$ onde a ruptura ocorreu entre 86 e 87 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 86 horas.

Figura 38 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 86 horas com SRF de 3,85.



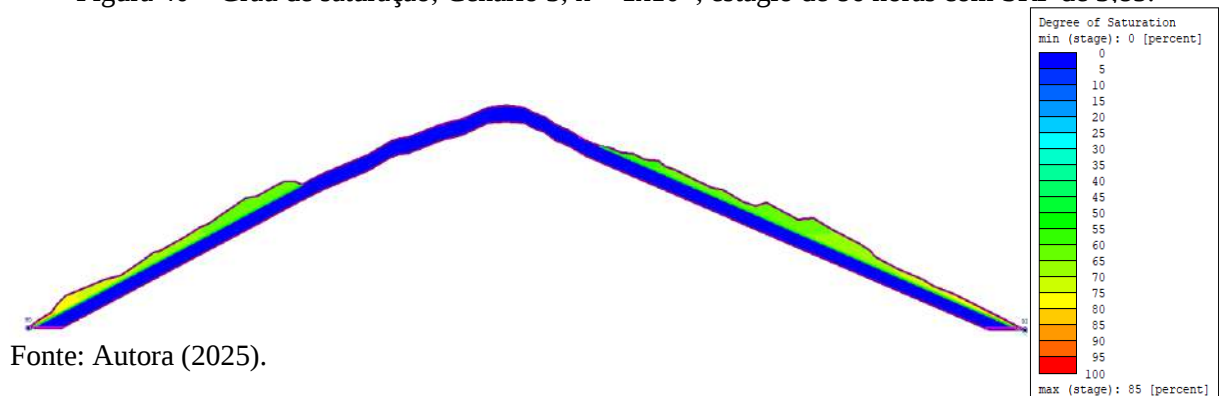
Fonte: Autora (2025).

Figura 39 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 86 horas com SRF de 3,85.



Fonte: Autora (2025).

Figura 40 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 86 horas com SRF de 3,85.



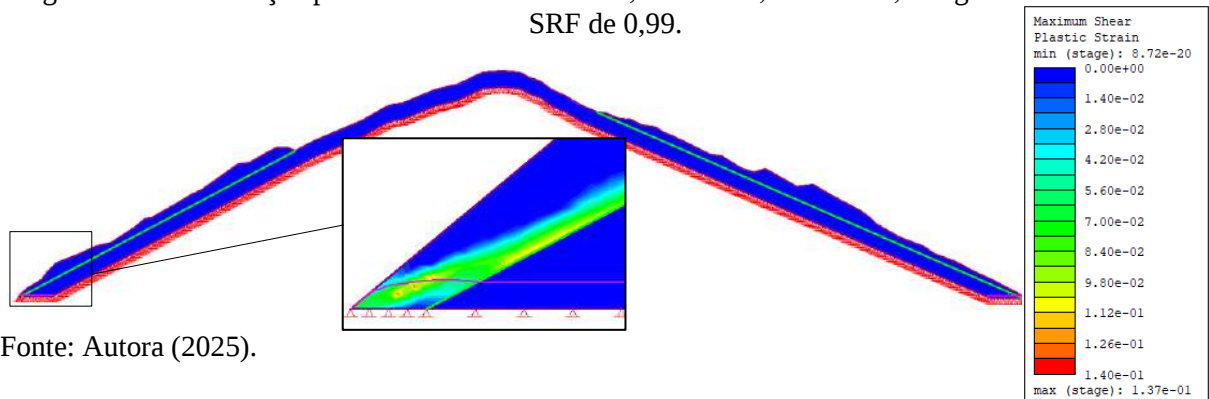
Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a poropressão máxima ocorre na região da base do talude, entretanto, os valores mais elevados não parecem ter alcançado diretamente a zona de deformação plástica cisalhante máxima. Essa separação entre as áreas de maior poropressão e de maior deformação pode justificar a manutenção do SRF elevado, indicando que, apesar da infiltração e do acúmulo de água, a estabilidade global do modelo ainda não foi comprometida.

A seguir são apresentados na Figura 41, Figura 42 e Figura 43, os gráficos referentes

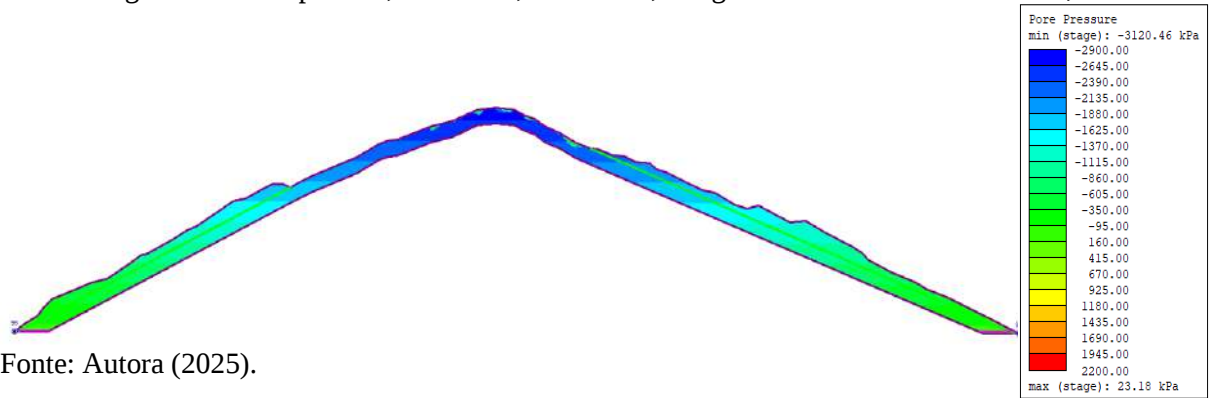
ao próximo estágio, de 87 horas, o primeiro estágio com SRF abaixo de 1.

Figura 41 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 87 horas com SRF de 0,99.



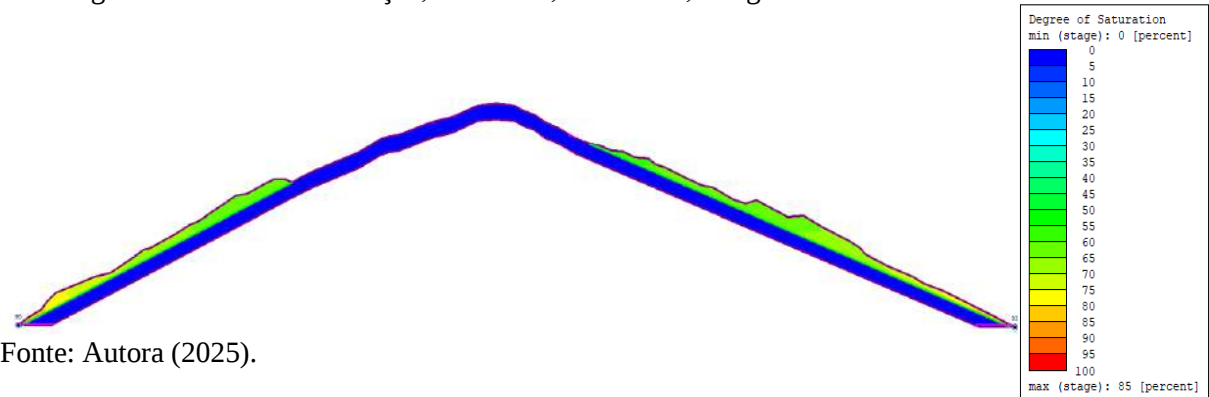
Fonte: Autora (2025).

Figura 42 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 87 horas com SRF de 0,99.



Fonte: Autora (2025).

Figura 43 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 87 horas com SRF de 0,99.



Fonte: Autora (2025).

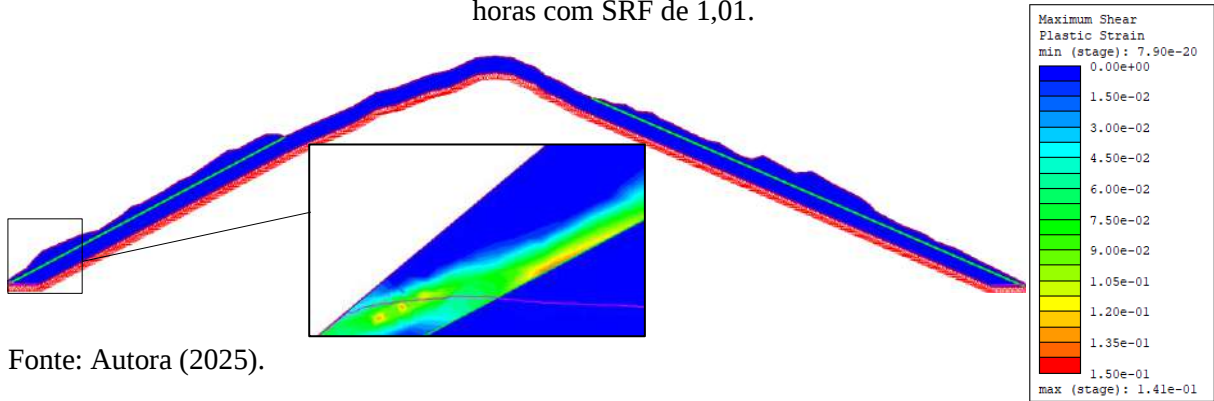
Neste estágio, observa-se um pequeno aumento da poropressão que deve ter se concentrado justamente na área de deformação plástica cisalhante máxima. Embora essa variação seja discreta, sua ocorrência nessa zona crítica provavelmente intensificou a redução das tensões efetivas, diminuindo a resistência ao cisalhamento e levando à instabilidade observada no estágio seguinte.

4.4.2 Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 0,01$ e $k_1 = 15^\circ$

Considerando a configuração anisotrópica com inclinação de 15° , são apresentados, a

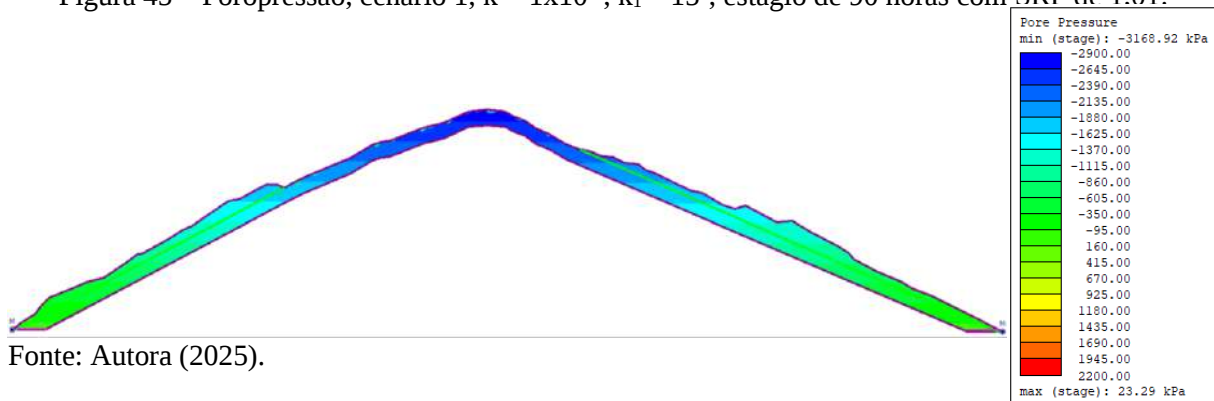
seguir, os gráficos referentes ao Cenário 1, para $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, condição em que a ruptura ocorreu entre 90 e 91 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados na Figura 44, Figura 45 e Figura 46, correspondentes a 90 horas.

Figura 44 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 90 horas com SRF de 1,01.



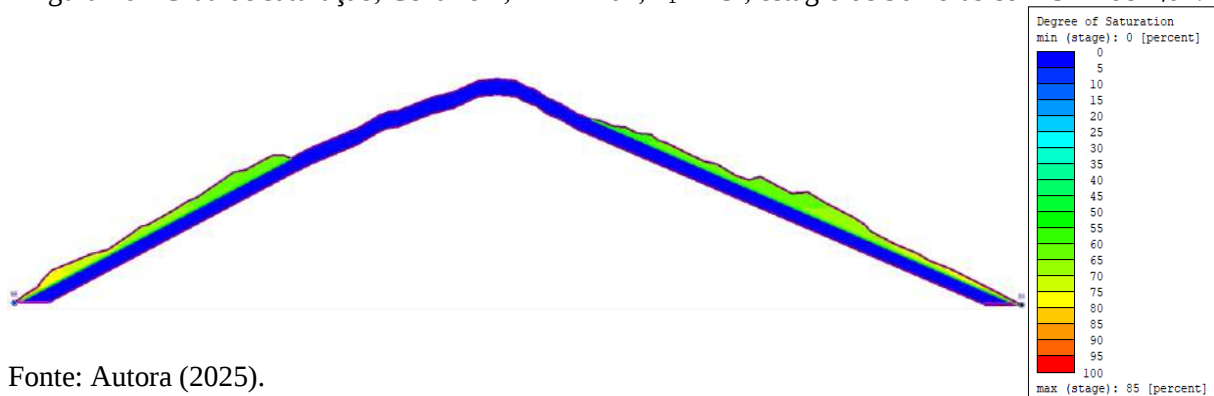
Fonte: Autora (2025).

Figura 45 – Poropressão, cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 90 horas com SRF de 1.01.



Fonte: Autora (2025).

Figura 46 – Grau de saturação, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 90 horas com SRF de 1,01.

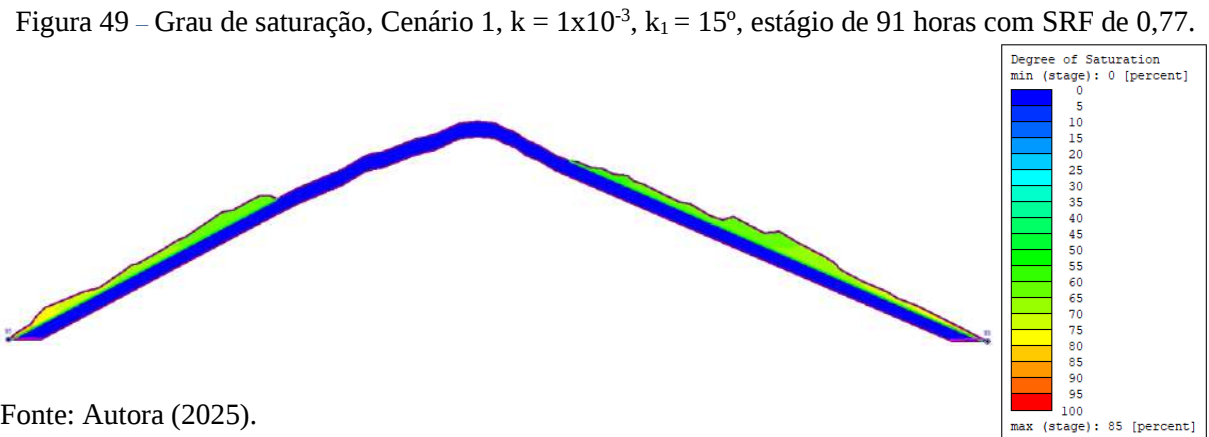
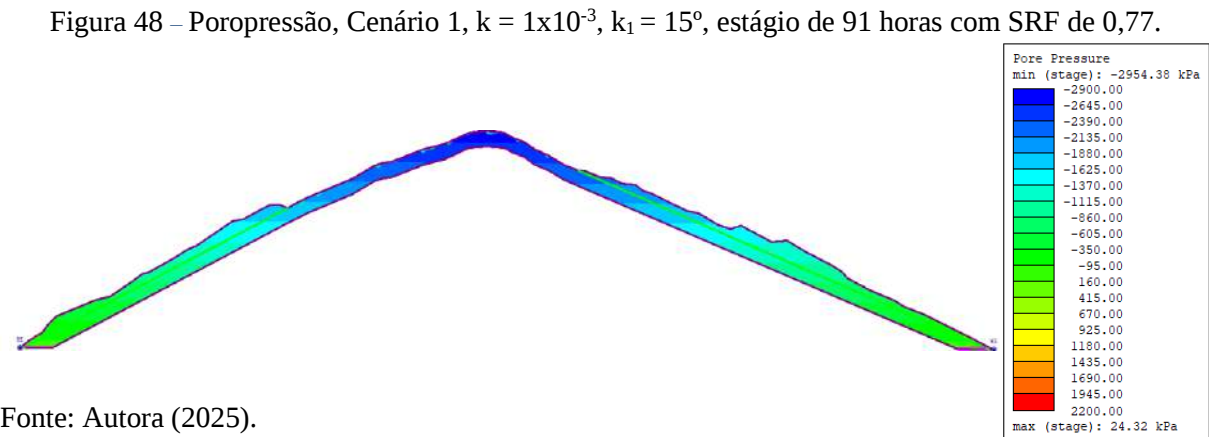
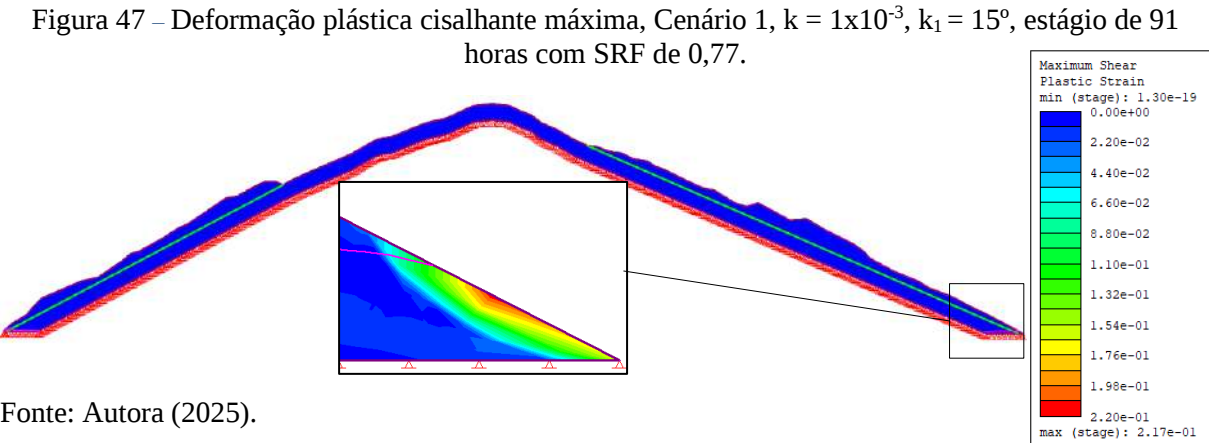


Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima e a poropressão mais elevada ocorrem na mesma região da base do talude, ao longo da interface solo-rocha. Essa coincidência espacial entre os campos hidráulico e mecânico pode indicar a mobilização simultânea das tensões efetivas e das pressões neutras, resultando na redução da resistência ao cisalhamento nessa zona crítica. O valor de SRF igual a 1,01 confirma que o modelo se encontra em condição

limite de equilíbrio, ou seja, no limiar da ruptura, quando a resistência mobilizada do solo praticamente se iguala às tensões atuantes.

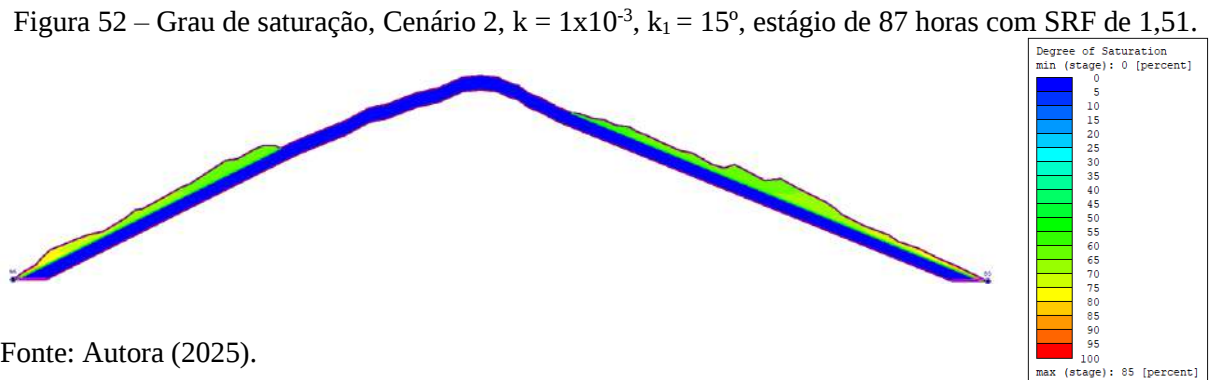
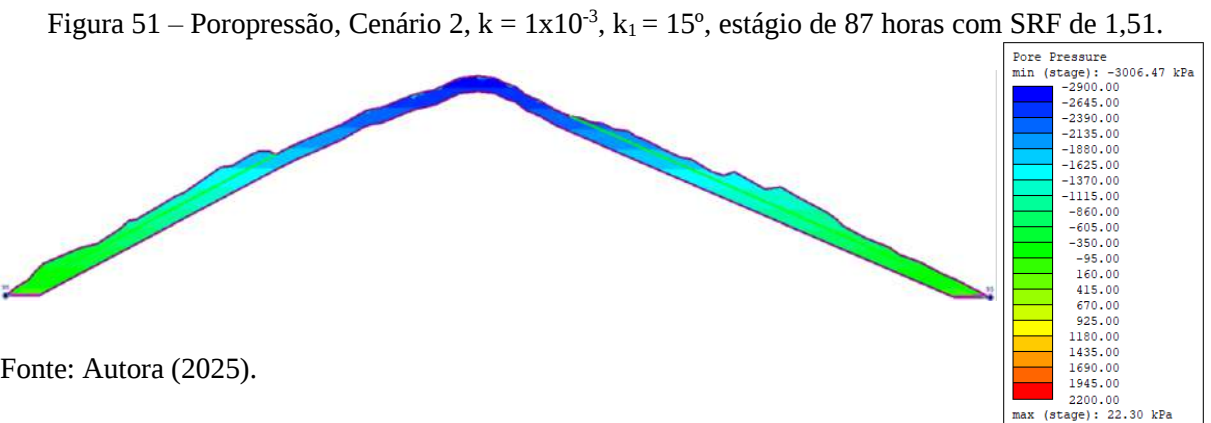
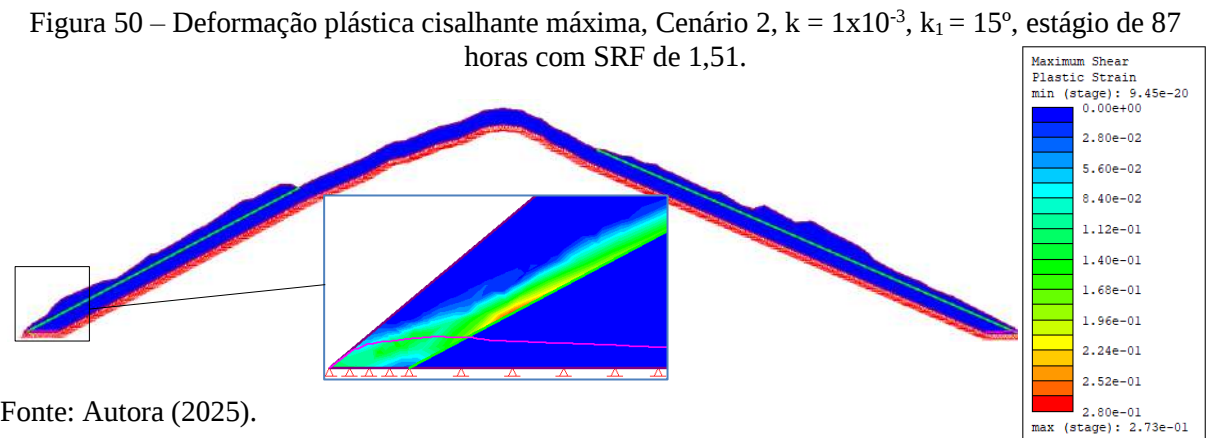
A seguir são apresentados na Figura 47, Figura 48 e Figura 49, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 91 horas, o primeiro estágio com SRF abaixo de 1.



No estágio de 91 horas, a zona de deformação plástica máxima apresentou deslocamento para o lado direito do talude. As poropressões máximas permaneceram concentradas na base do talude, o que pode indicar acúmulo de pressão neutra nas camadas inferiores. Esse

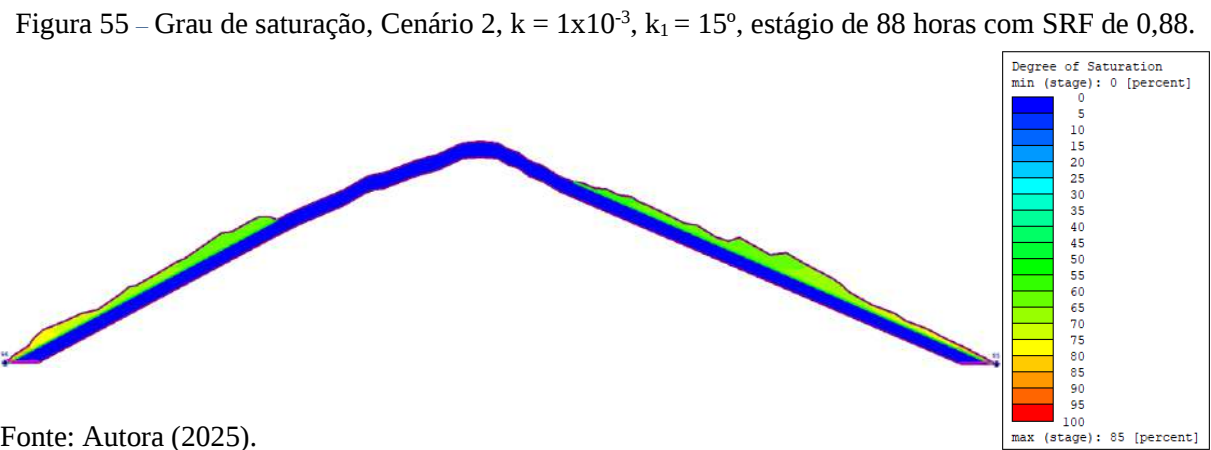
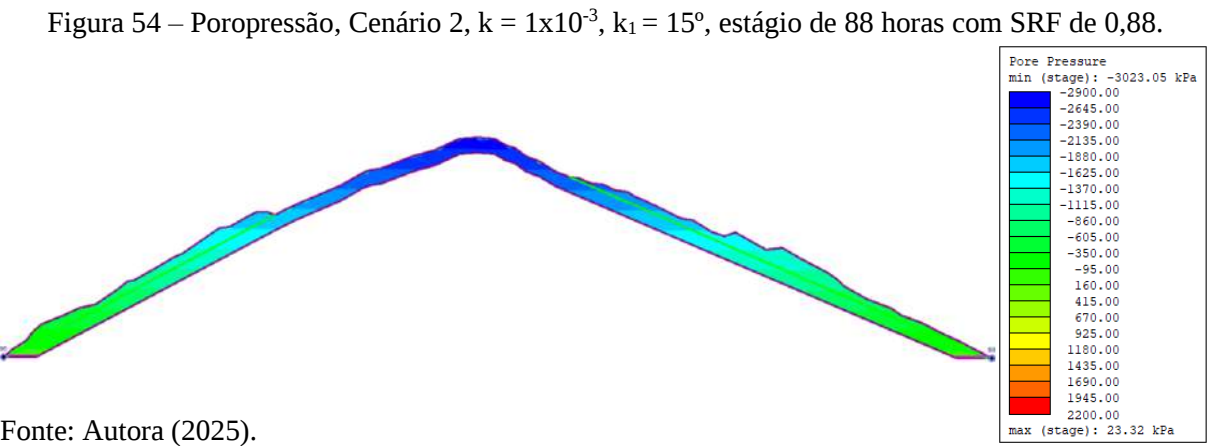
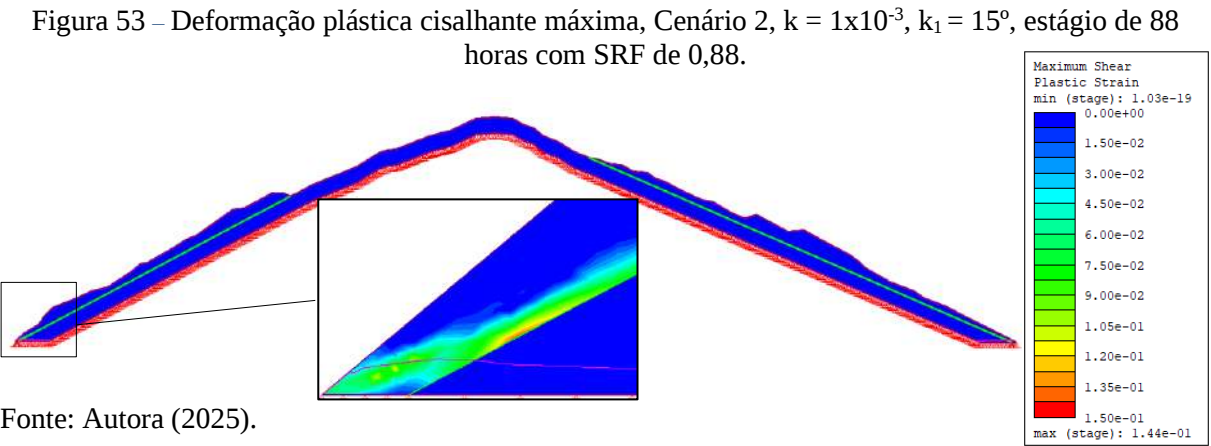
comportamento pode estar relacionado à redistribuição das tensões efetivas após o início da plastificação, o que tende a transferir esforços para regiões adjacentes ainda estáveis, bem como a variações locais no gradiente hidráulico, que podem ter concentrado a poropressão e reduzido a resistência ao cisalhamento nesse setor. Além disso, a sensibilidade da malha e o regime transiente de infiltração podem ter contribuído para pequenas diferenças no avanço da saturação entre os lados do talude, resultando no desvio da direção preferencial de instabilidade, mesmo sob a mesma configuração de anisotropia.

São apresentados na Figura 50, Figura 51 e Figura 52, os gráficos referentes ao Cenário 2 para $k = 1 \times 10^{-3}$ onde a ruptura ocorreu entre 87 e 88 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 87 horas.



Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima e a poropressão mais elevada ocorrem na mesma região da base do talude. Essa coincidência espacial entre os campos hidráulico e mecânico pode indicar a mobilização simultânea das tensões efetivas e das pressões neutras, resultando na redução da resistência ao cisalhamento nessa zona crítica.

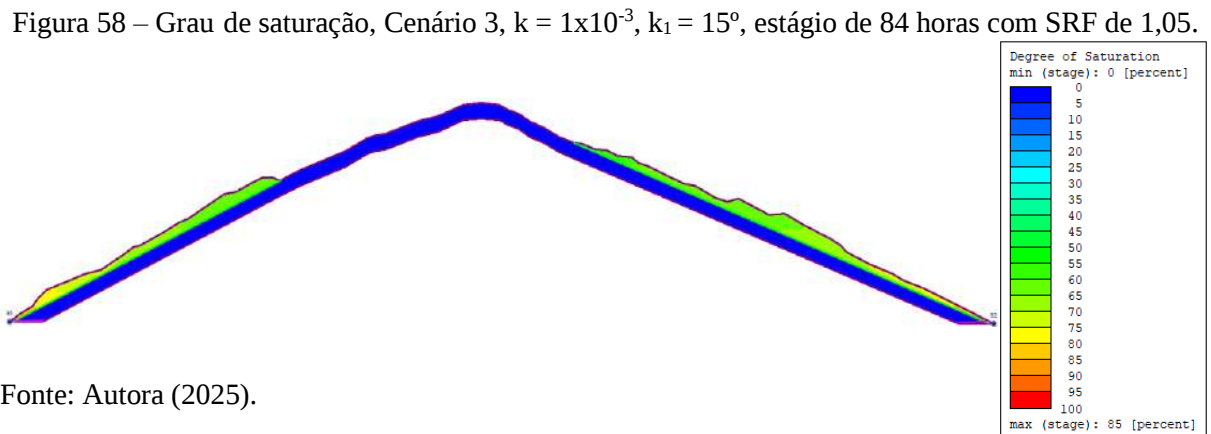
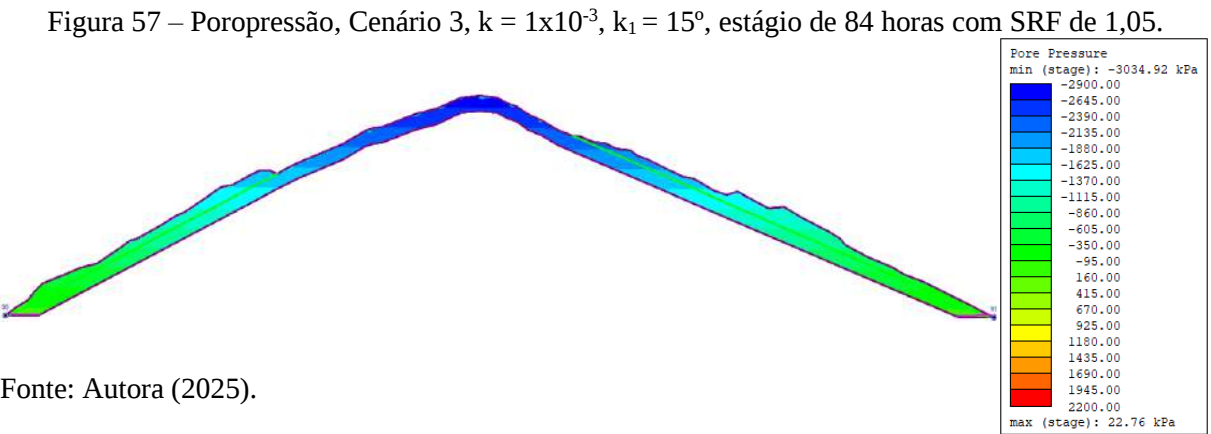
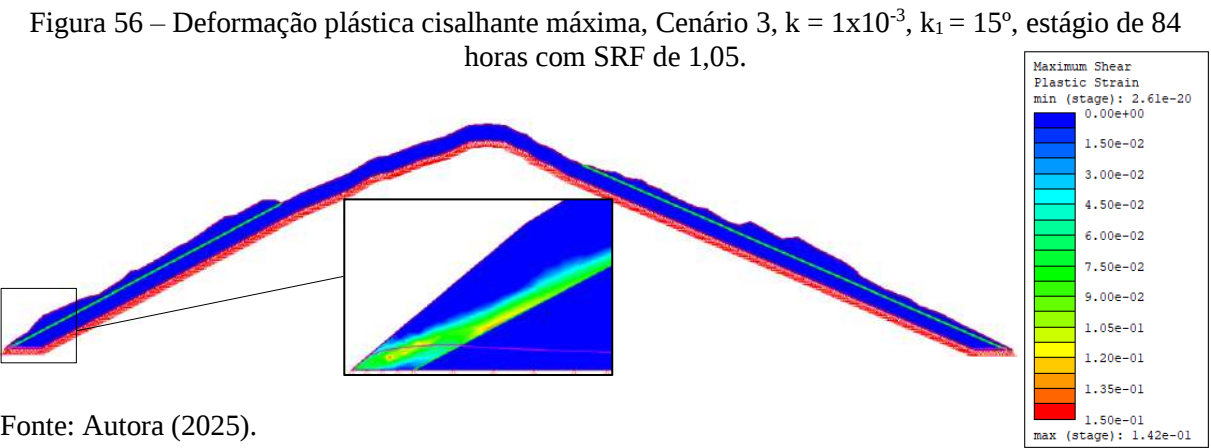
A seguir são apresentados na Figura 53, Figura 54 e Figura 55, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 88 horas, o primeiro estágio com SRF abaixo de 1.



Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima e a poropressão mais elevada

continuam ocorrendo na mesma região da base do talude. A poropressão apresentou um leve aumento em relação ao estágio anterior, enquanto a deformação manteve-se no mesmo lado, indicando a continuidade da mobilização das tensões efetivas e das pressões neutras nessa zona crítica, com redução progressiva da resistência ao cisalhamento.

São apresentados na Figura 56, Figura 57 e Figura 58, os gráficos referentes ao Cenário 3 para $k = 1 \times 10^{-3}$ onde a ruptura ocorreu entre 84 e 85 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 84 horas.

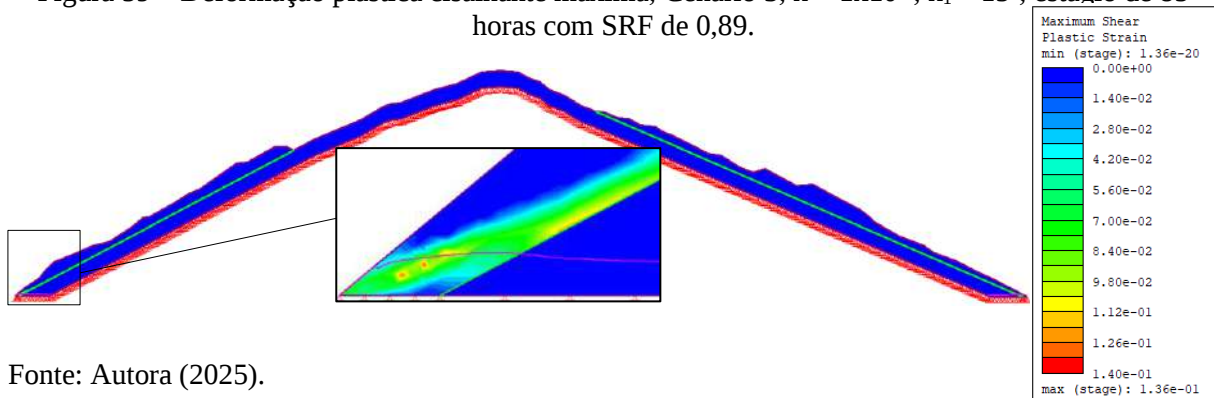


Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima e a poropressão mais elevada

ocorrem na mesma região da base do talude. Essa coincidência espacial entre os campos hidráulico e mecânico pode indicar a mobilização simultânea das tensões efetivas e das pressões neutras, resultando na redução da resistência ao cisalhamento nessa zona crítica.

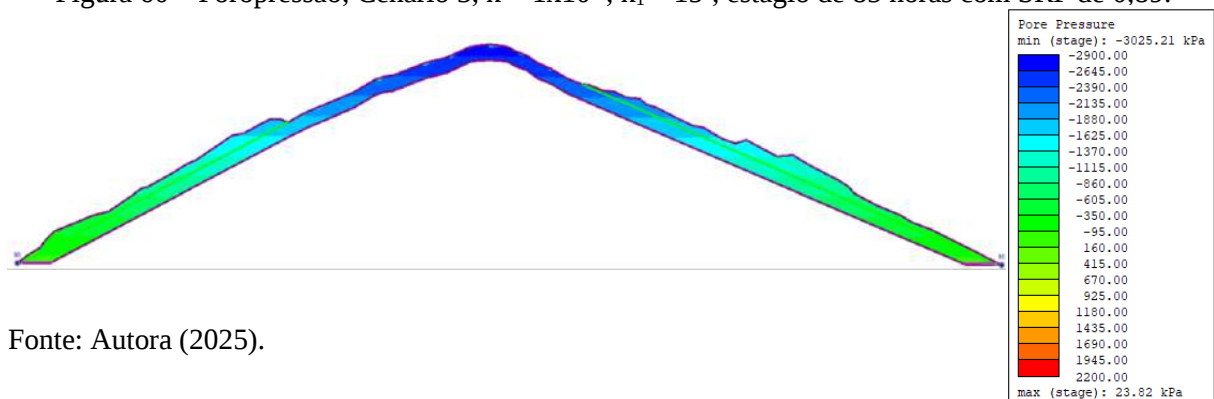
A seguir são apresentados na Figura 59, Figura 60 e Figura 61, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 85 horas, o primeiro estágio com SRF abaixo de 1.

Figura 59 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 85 horas com SRF de 0,89.



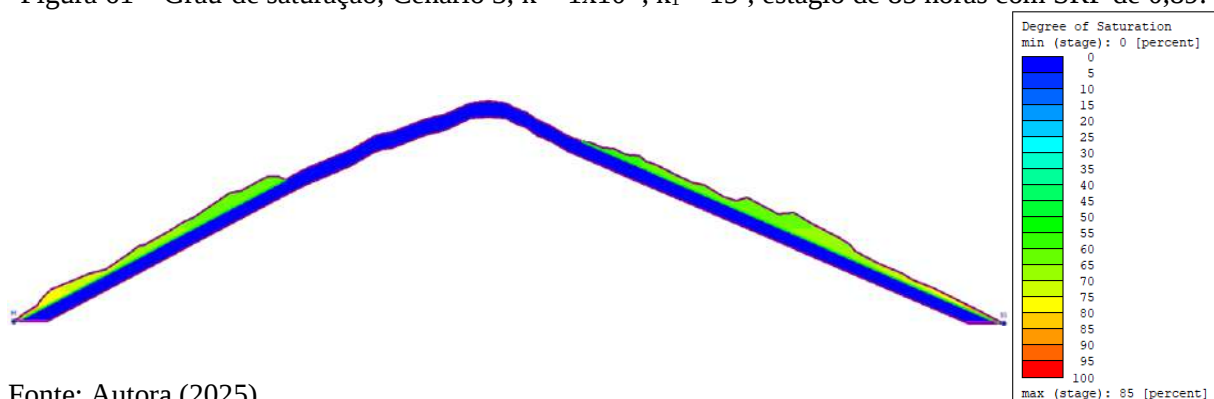
Fonte: Autora (2025).

Figura 60 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 85 horas com SRF de 0,89.



Fonte: Autora (2025).

Figura 61 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_1 = 15^\circ$, estágio de 85 horas com SRF de 0,89.



Fonte: Autora (2025).

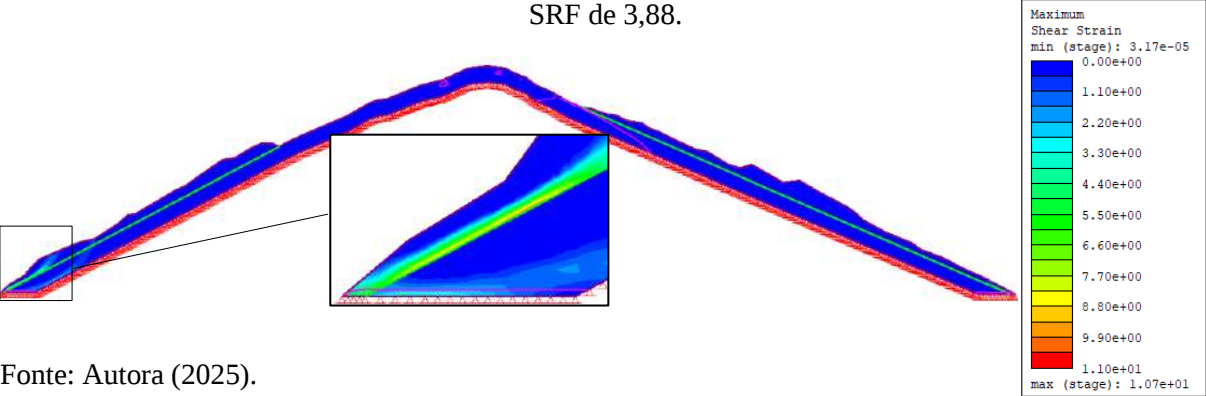
Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima manteve-se na mesma região da base do talude, sem alteração significativa em relação ao estágio anterior. A poropressão apresentou leve aumento, concentrando-se novamente ao longo da interface solo-rocha, o que

pode ter contribuído para a redução adicional das tensões efetivas e, consequentemente, para a condição de ruptura observada nesse instante.

4.4.3 Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-2}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$

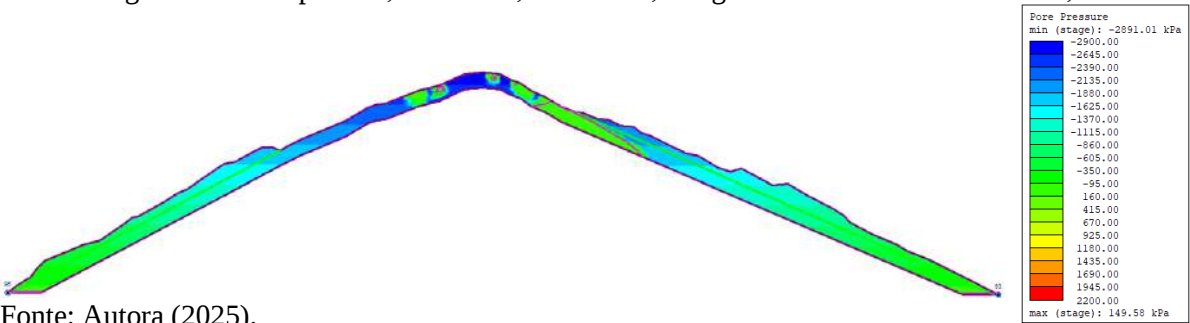
São apresentados os gráficos referentes ao Cenário 1 para 1×10^{-2} onde a ruptura ocorreu entre 88 e 89 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 88 horas nas figuras 62, 63 e 64.

Figura 62 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 88 horas com SRF de 3,88.



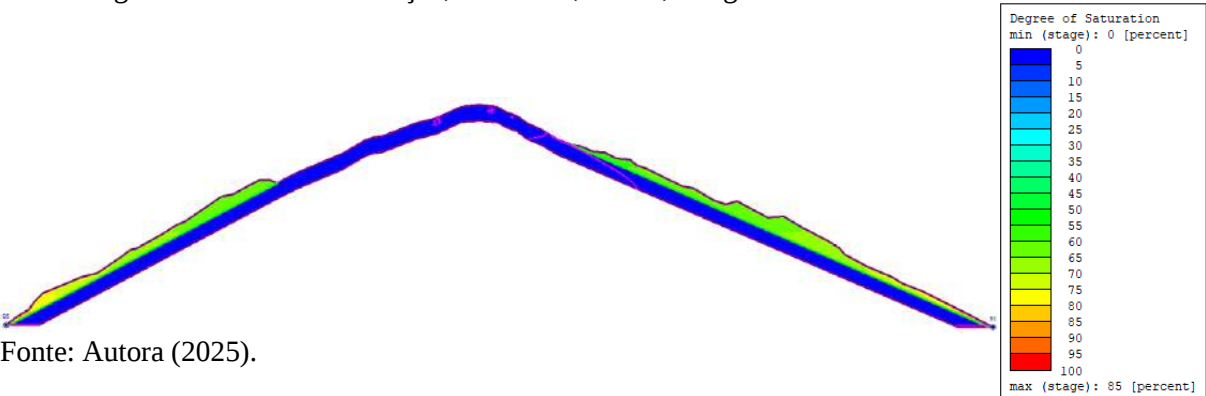
Fonte: Autora (2025).

Figura 63 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 88 horas com SRF de 3,88.



Fonte: Autora (2025).

Figura 64 – Grau de saturação, Cenário 1, 1×10^{-2} , estágio de 88 horas com SRF de 3,88.



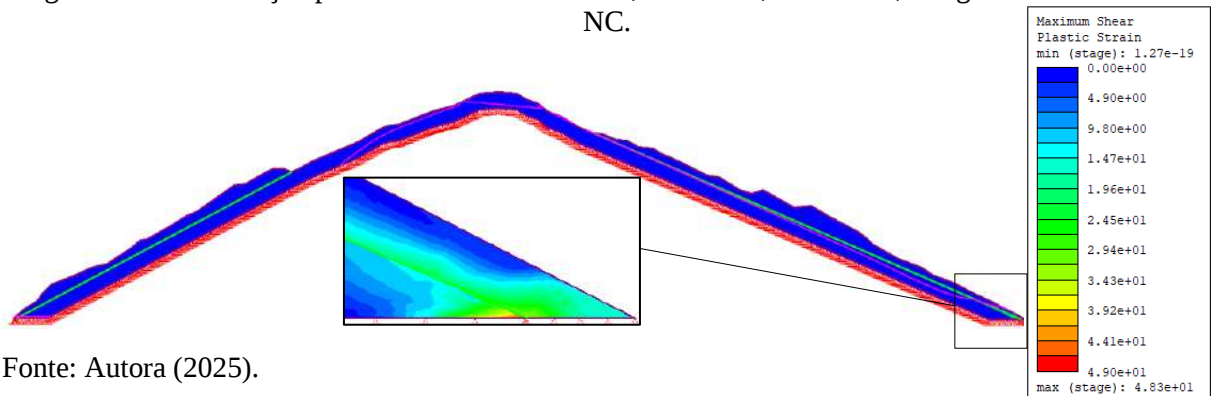
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a poropressão máxima não ocorreu no mesmo ponto em que se concentrou a deformação plástica cisalhante máxima. Enquanto a deformação se destacou na base do talude, a maior poropressão manifestou-se em uma região mais superficial do maciço.

Essa diferença espacial entre os campos hidráulico e mecânico pode indicar que o aumento da poropressão não atuou diretamente sobre a zona crítica de cisalhamento, o que pode justificar a manutenção do SRF elevado.

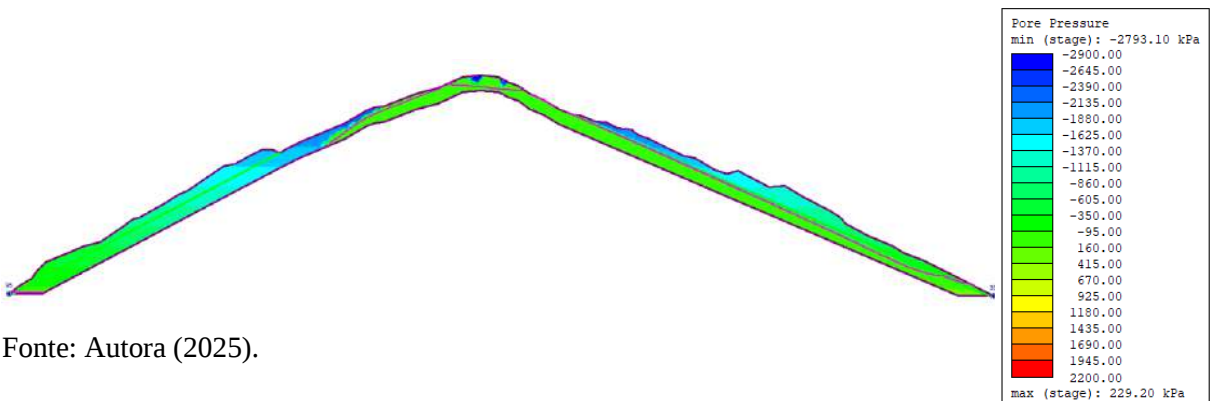
A seguir são apresentados na Figura 65, Figura 66 e Figura 67, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 89 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 65 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 89 horas com NC.



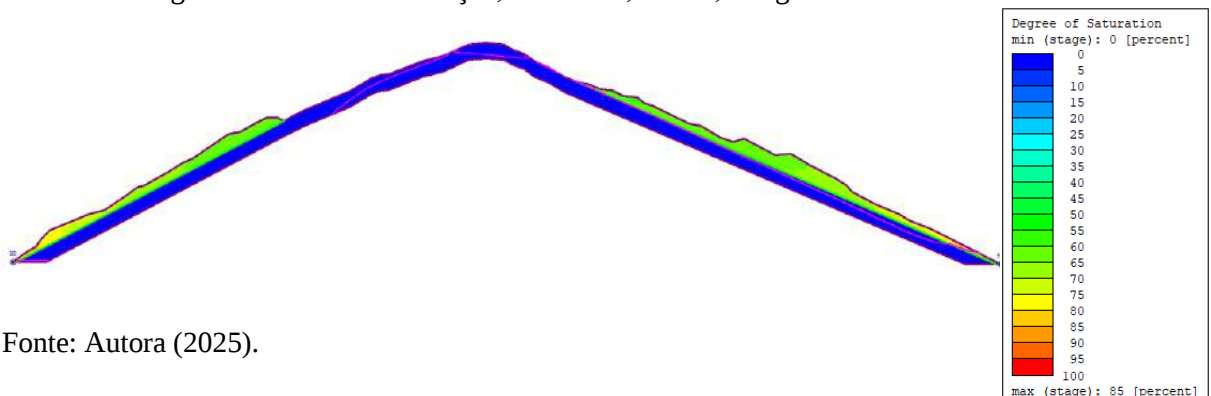
Fonte: Autora (2025).

Figura 66 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 89 horas com NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 67 – Grau de saturação, Cenário 1, 1×10^{-2} , estágio de 89 horas com NC.



Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se no interior do maciço, próxima à base do lado oposto ao anteriormente identificado. As poropressões máximas distribuíram-se ao longo de toda a lateral direita e do topo do maciço rochoso, apresentando valores anormalmente elevados, o que pode indicar inconsistências numéricas no cálculo ou

acúmulo artificial de pressão associado à evolução para a instabilidade. Contudo, seriam necessárias análises complementares, como o refinamento da malha e a verificação das condições de contorno, para confirmar isso.

São apresentados na Figura 68, Figura 69 e Figura 70, os gráficos referentes ao Cenário 2 para $k = 1 \times 10^{-2}$ onde a ruptura ocorreu entre 92 e 93 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 92 horas.

Figura 68 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 92 horas com SRF de 3,17.

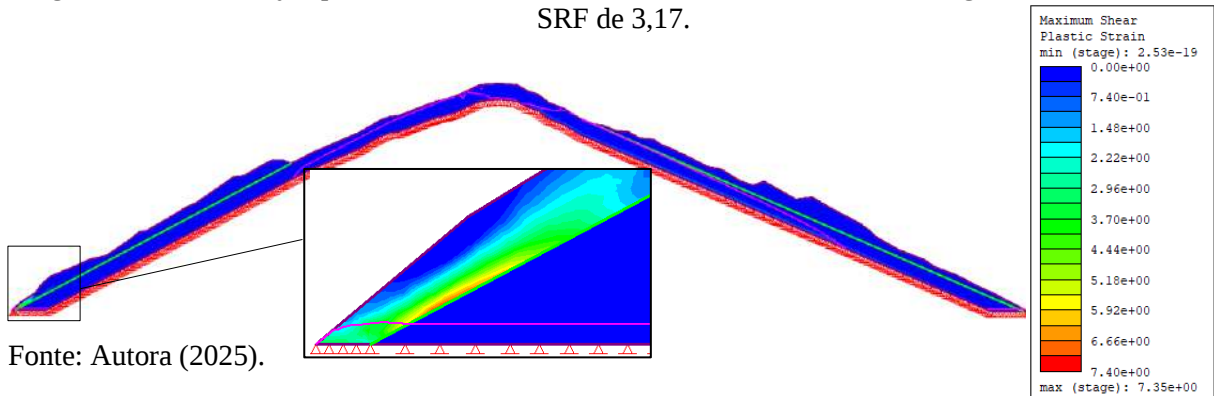


Figura 69 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 92 horas com SRF de 3,17.

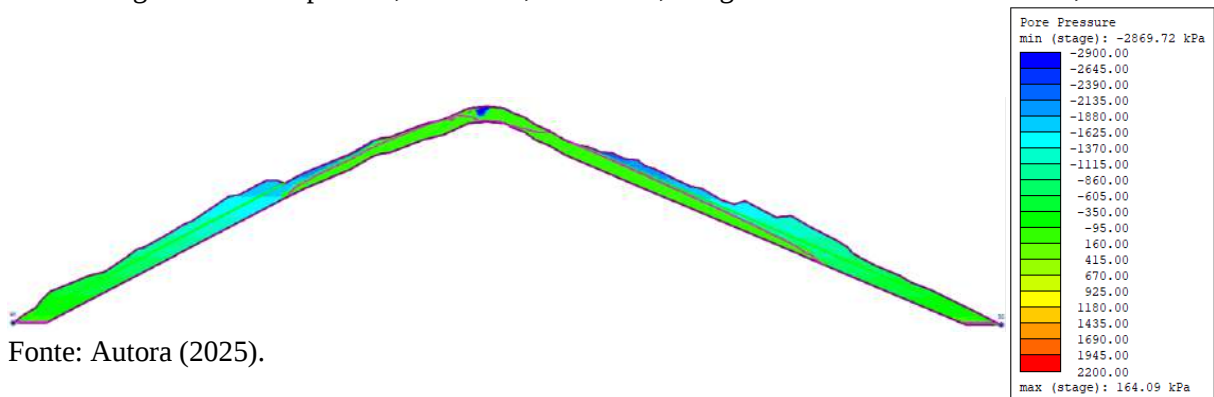
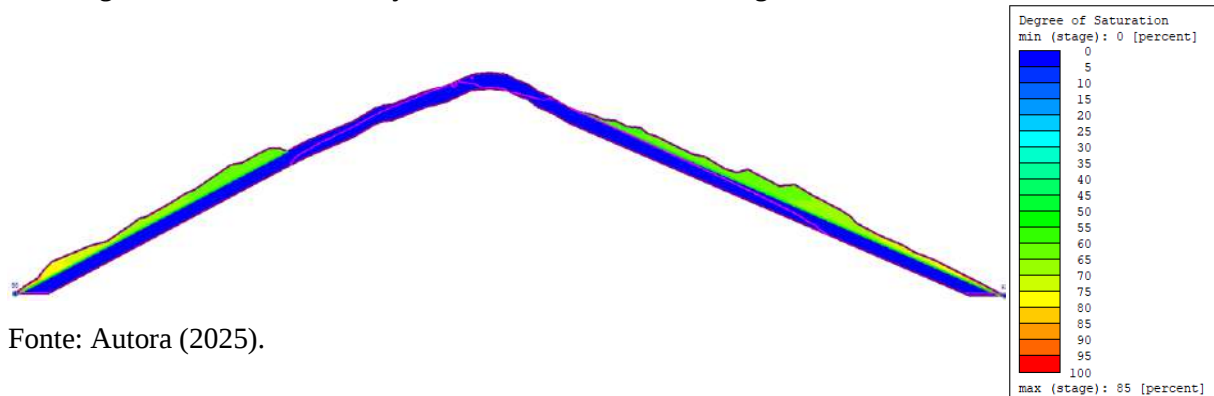


Figura 70 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 92 horas com SRF de 3,17.

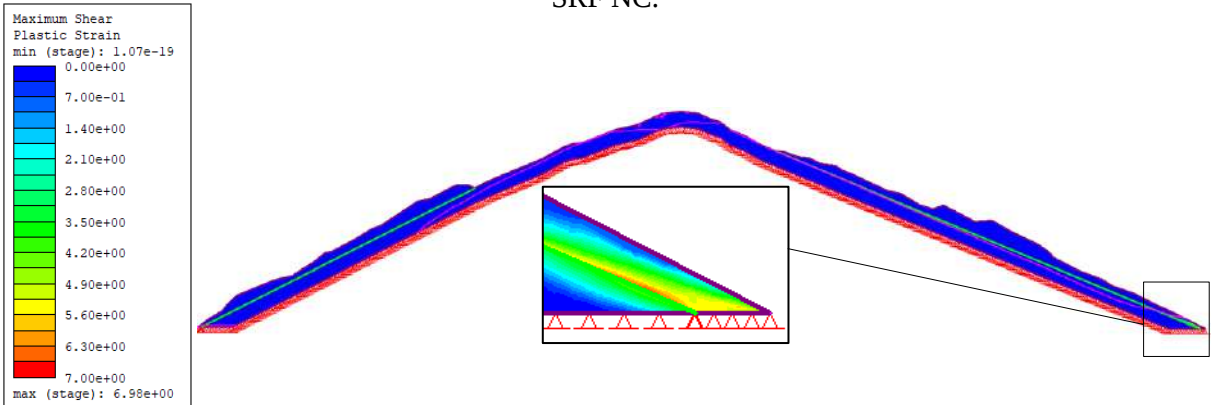


Observa-se que a poropressão máxima localiza-se no topo do maciço e não coincide com a zona de deformação plástica cisalhante máxima, situada na base do talude. Ainda assim, observa-se um incremento discreto de poropressão também na base, suficiente para reduzir

levemente as tensões efetivas naquela região e, por consequência, provocar a pequena queda do SRF registrada.

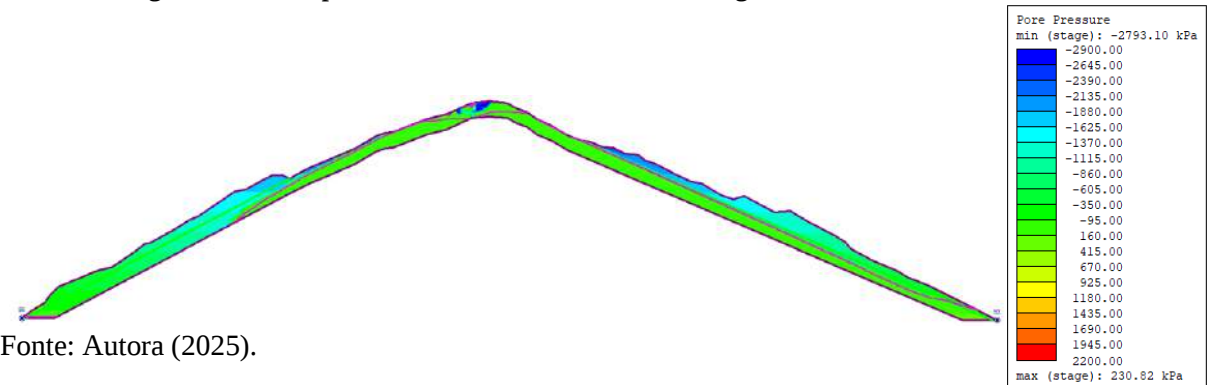
Agora são apresentados na Figura 71, Figura 72 e Figura 73, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 93 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 71 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 93 horas com SRF NC.



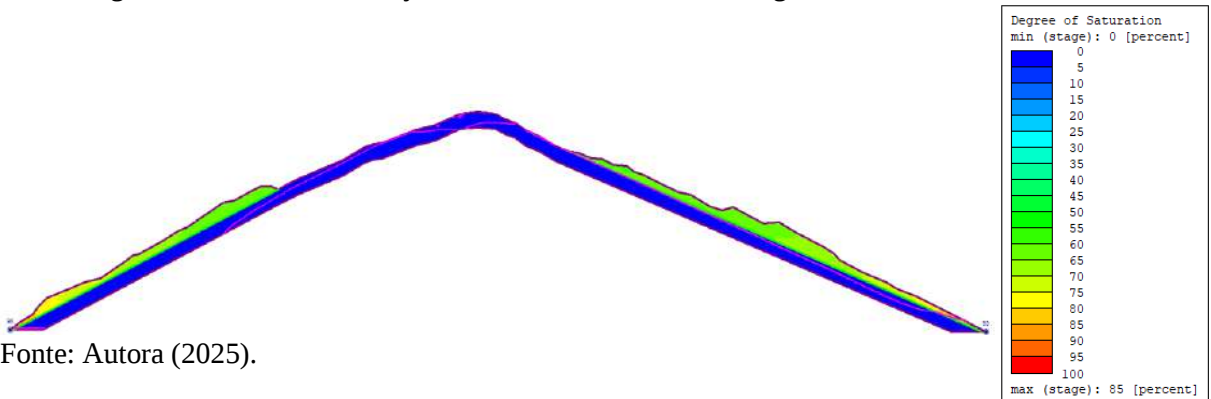
Fonte: Autora (2025).

Figura 72 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 93 horas com SRF NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 73 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 93 horas com SRF NC.



Fonte: Autora (2025).

No estágio de 93 horas, observa-se que a zona de deformação plástica cisalhante mudou de lado em relação ao instante anterior, enquanto a poropressão máxima permaneceu concentrada no topo e base do maciço rochoso. Os maiores valores ficaram no topo, mas o acúmulo na base

pode ter sido suficiente para reduzir as tensões efetivas na região de contato solo-rocha, levando à não convergência (NC) do modelo.

São apresentados na Figura 74, Figura 75 e Figura 76, os gráficos referentes ao Cenário 3 para $k = 1 \times 10^{-2}$ onde a ruptura ocorreu entre 84 e 85 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 84 horas.

Figura 74 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 84 horas com SRF de 3,80.

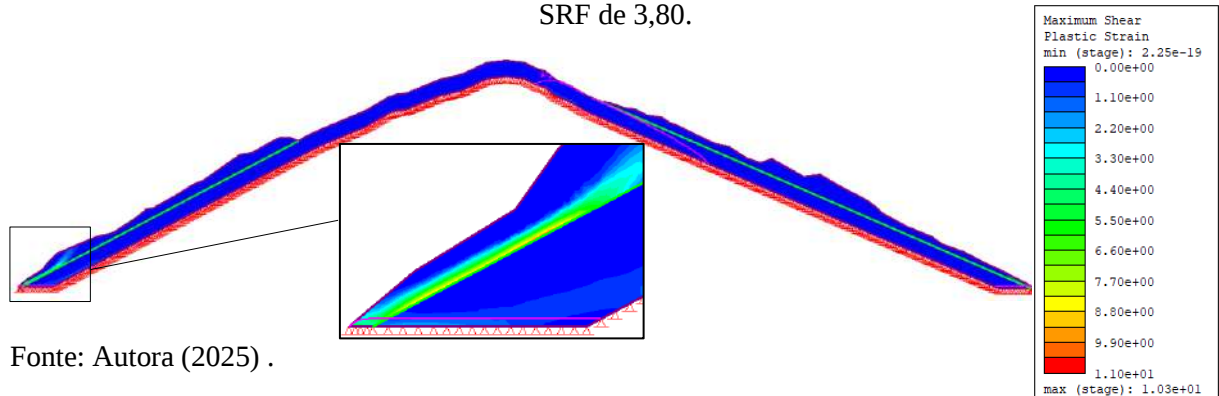


Figura 75 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 84 horas com SRF de 3,80.

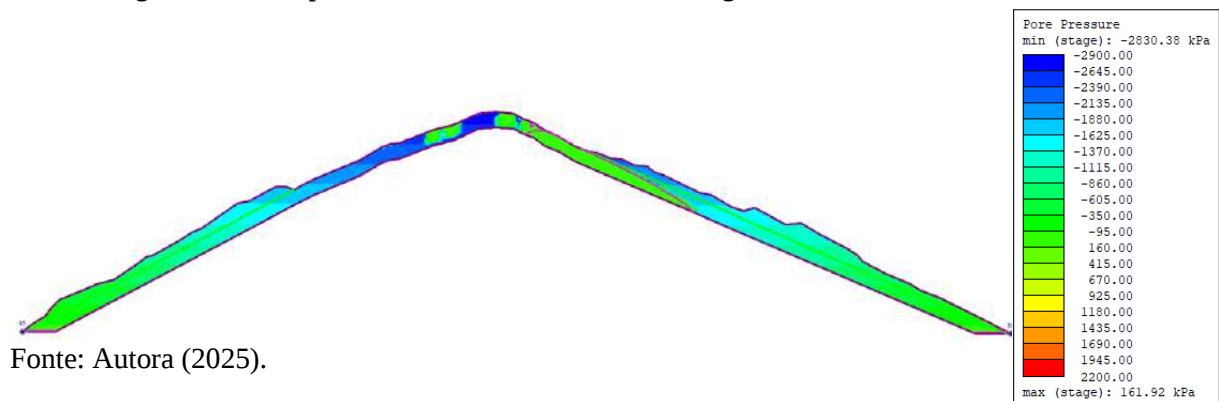
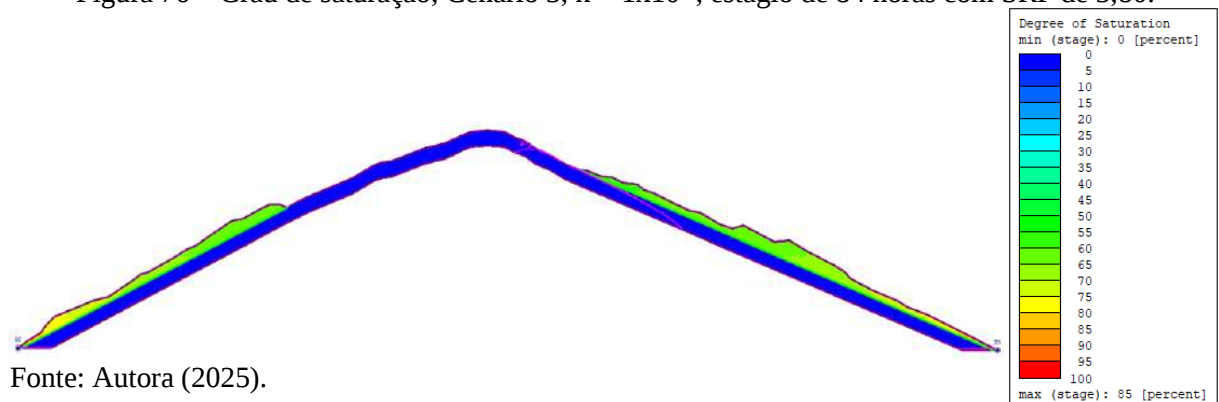


Figura 76 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 84 horas com SRF de 3,80.



Neste estágio, observa-se que o valor máximo de poropressão localiza-se no topo do maciço, não coincidindo com a região de deformação plástica cisalhante máxima, que se concentra na base do talude. Essa diferença espacial entre os campos hidráulico e mecânico

pode indicar que o aumento da poropressão ocorreu em uma zona distinta da principal área de mobilização das tensões de cisalhamento, o que contribui para a manutenção do SRF elevado.

Agora são apresentados na Figura 77, Figura 78 e Figura 79, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 85 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 77 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 85 horas com SRF NC.

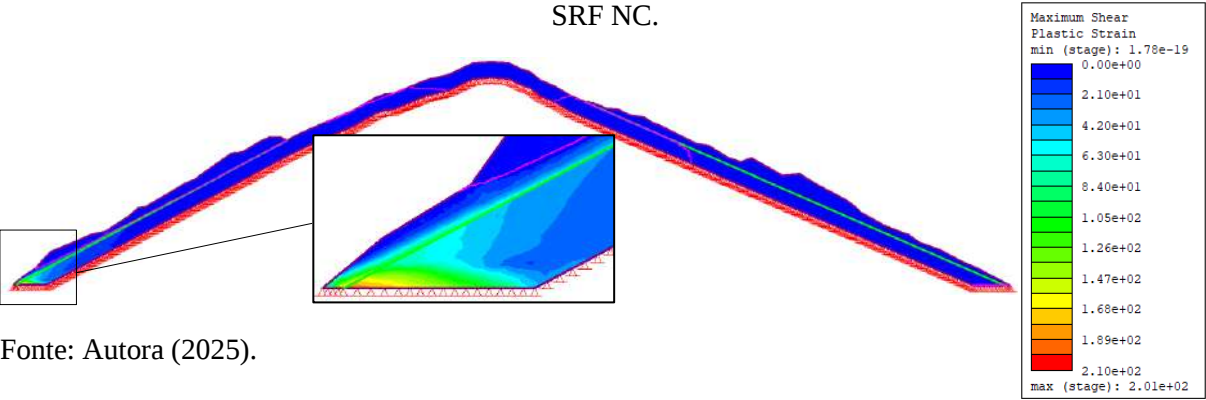


Figura 78 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 85 horas com SRF NC.

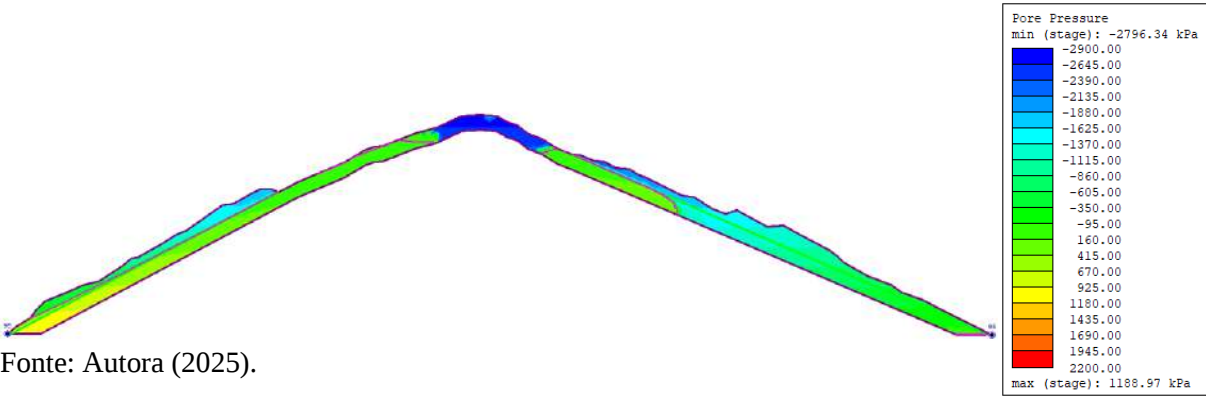
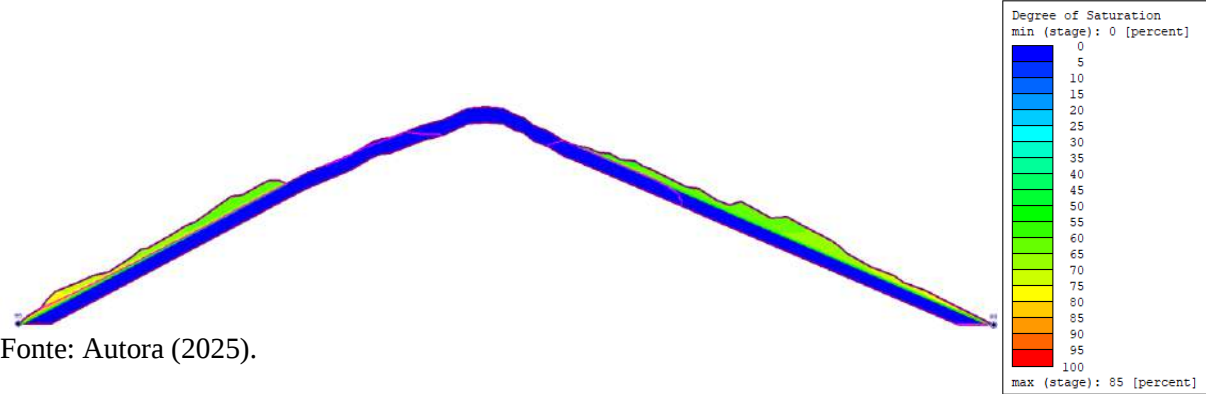


Figura 79 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 85 horas com SRF NC.



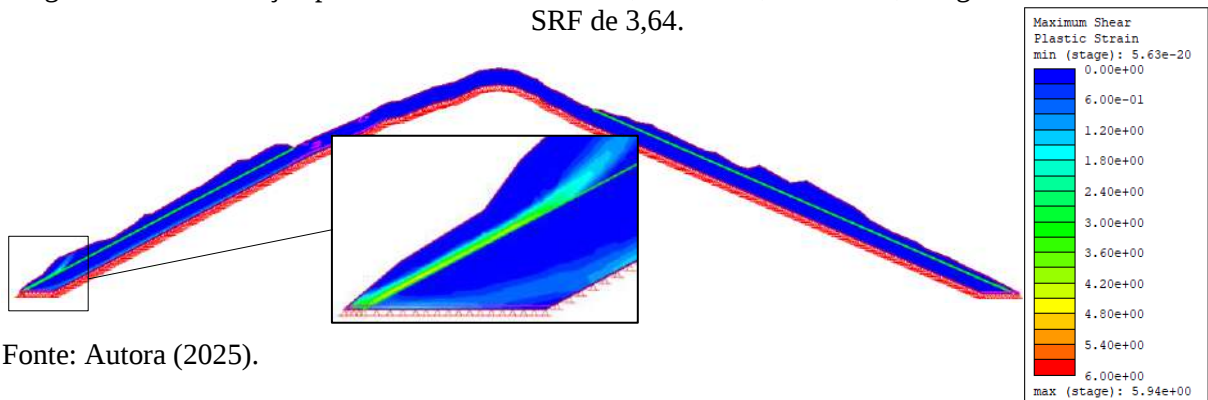
Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se no interior do maciço, próxima à base do talude. As poropressões mais elevadas também ocorreram nessa região, porém com valores anormalmente altos, o que pode indicar inconsistências numéricas. Para confirmar essa hipótese, seriam necessários ajustes no modelo, como o refinamento da

malha, a redução do passo de tempo e a verificação das condições de contorno.

4.4.4 Cenário 1, 2 e 3 com $k = 1 \times 10^{-1}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$

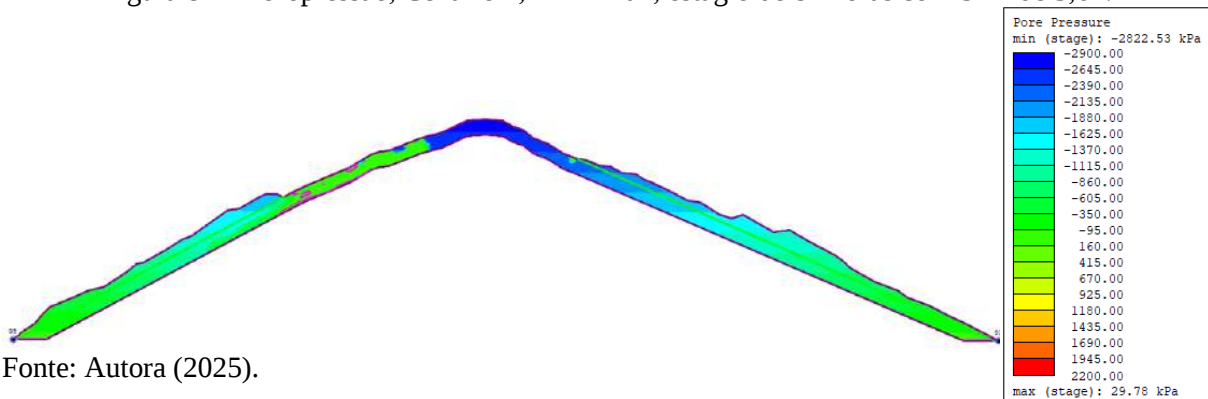
Inicialmente são apresentados os gráficos referentes ao Cenário 1 para $k = 1 \times 10^{-1}$ onde a ruptura ocorreu entre 82 e 83 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 82 horas nas figuras 80, 81 e 82.

Figura 80 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 82 horas com SRF de 3,64.



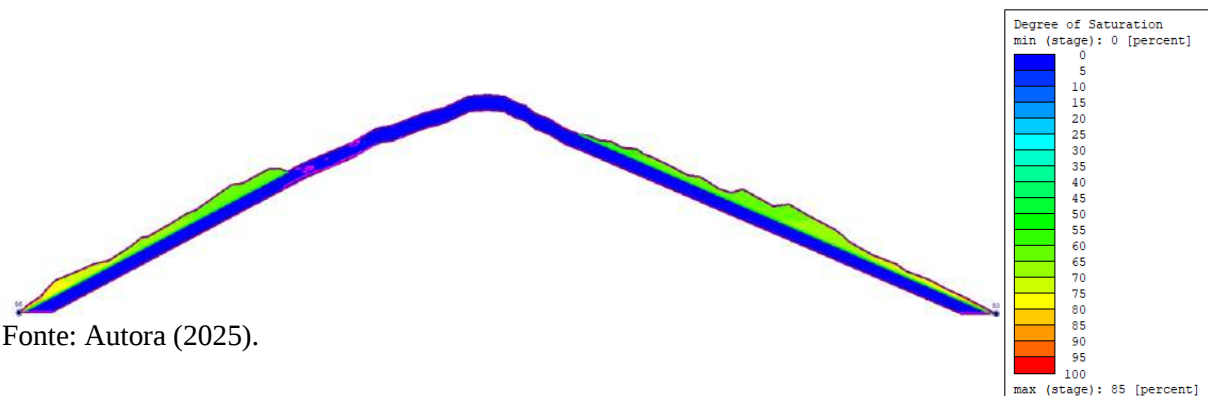
Fonte: Autora (2025).

Figura 81 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 82 horas com SRF de 3,64.



Fonte: Autora (2025).

Figura 82 – Grau de saturação, Cenário 1, 1×10^{-1} , estágio de 82 horas com SRF de 3,64.



Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, a deformação plástica cisalhante máxima concentra-se no interior do maciço, próxima à lateral superior. A poropressão alcançou a base, porém com magnitudes moderadas. Assim, a redução das tensões efetivas na zona crítica foi limitada, o que justifica a

pequena variação do SRF.

Agora são apresentados na Figura 83, Figura 84 e Figura 85, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 83 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 83 – Deformação plástica cisalhante máxima, cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 83 horas com NC.

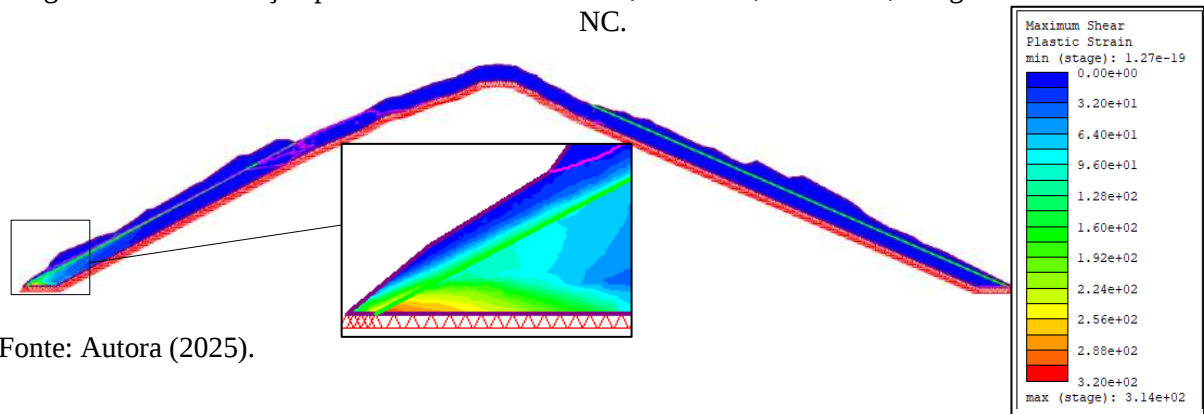


Figura 84 – Poropressão, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 83 horas com NC.

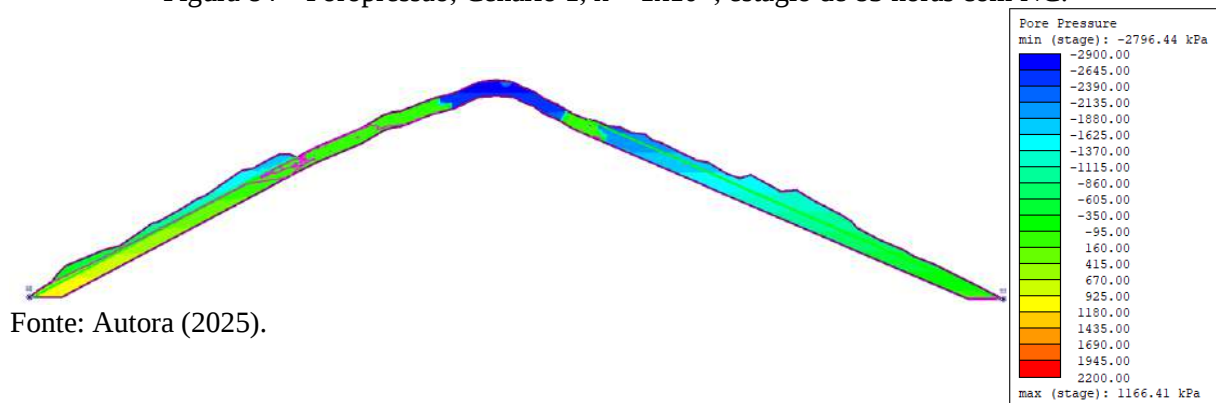
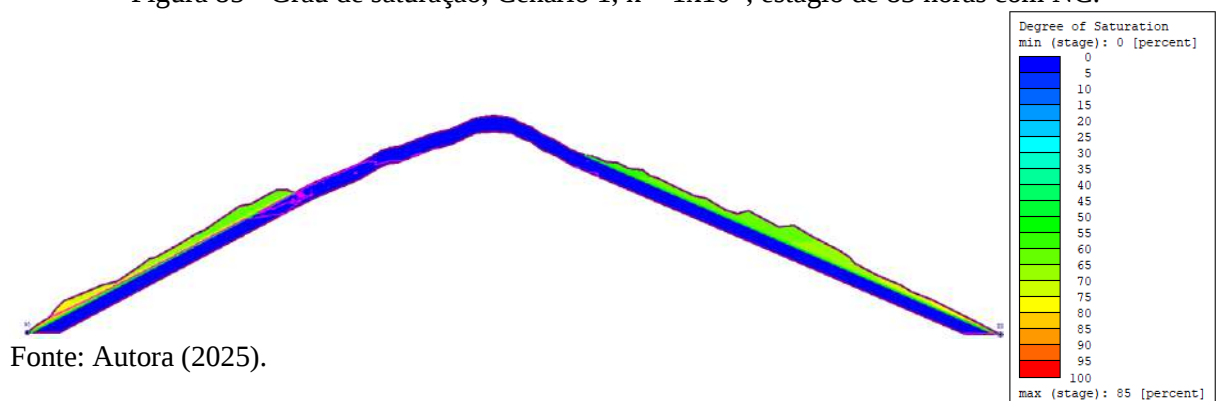


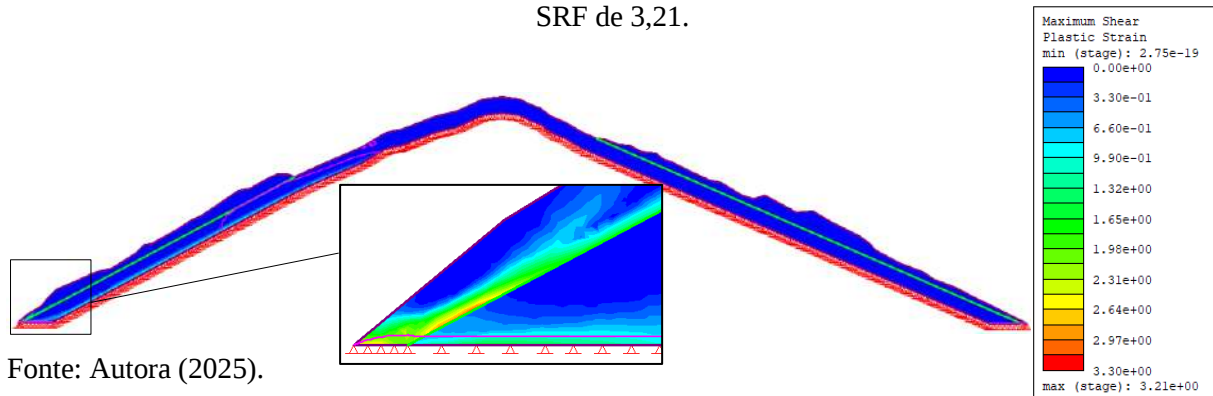
Figura 85 – Grau de saturação, Cenário 1, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 83 horas com NC.



Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base e no interior do maciço rochoso, enquanto a poropressão apresentou valores muito elevados nessa mesma região. Aliados à ocorrência de NC, esses fatores sugerem possíveis inconsistências numéricas, cuja confirmação requer o refinamento da malha, a redução do passo de tempo e a verificação das condições de contorno para assegurar a coerência dos resultados.

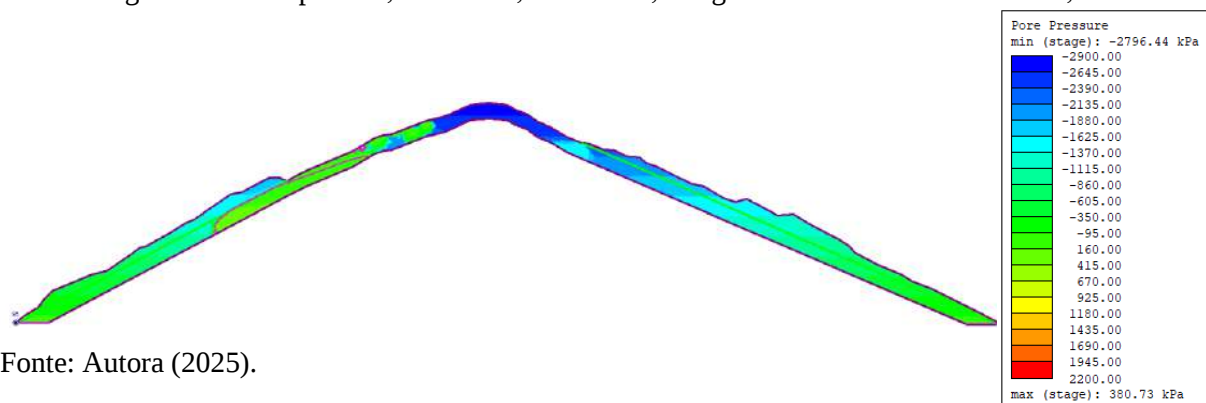
São apresentados na Figura 86, Figura 87 e Figura 88, os gráficos referentes ao Cenário 2 para $k = 1 \times 10^{-1}$ onde a ruptura ocorreu entre 80 e 81 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados de 80 horas.

Figura 86 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 80 horas com SRF de 3,21.



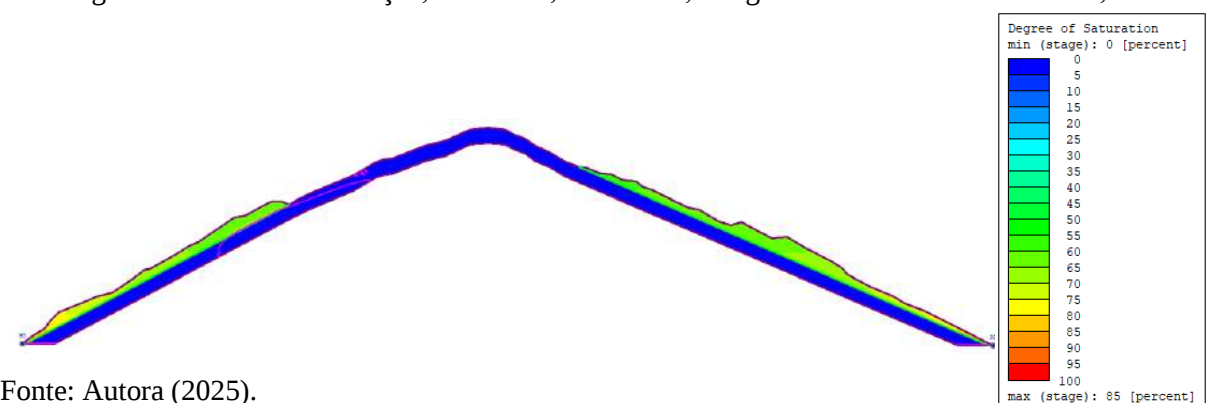
Fonte: Autora (2025).

Figura 87 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 80 horas com SRF de 3,21.



Fonte: Autora (2025).

Figura 88 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 80 horas com SRF de 3,21.



Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, enquanto a poropressão apresentou seu valor mais elevado na porção central do modelo. Apesar disso, nota-se a presença de valores moderados de poropressão também na base, o que pode ter contribuído para a leve redução do SRF registrada neste estágio.

Agora são apresentados na Figura 89, Figura 90 e Figura 91, os gráficos referentes ao

próximo estágio, de 81 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 89 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 81 horas com NC.

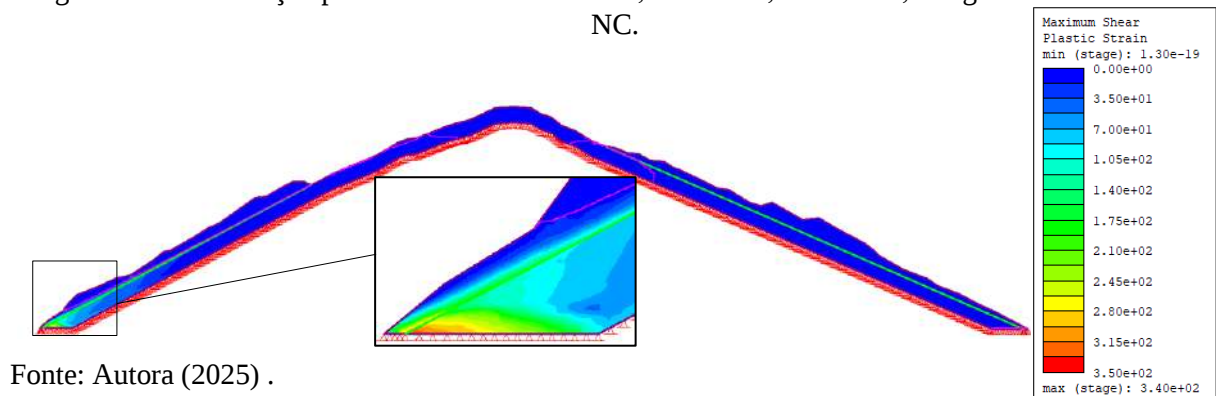


Figura 90 – Poropressão, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 81 horas com NC.

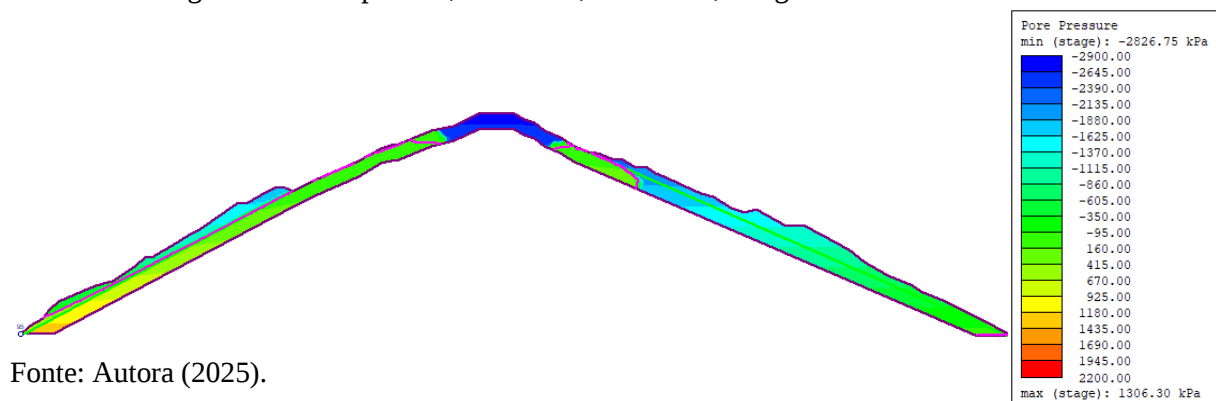
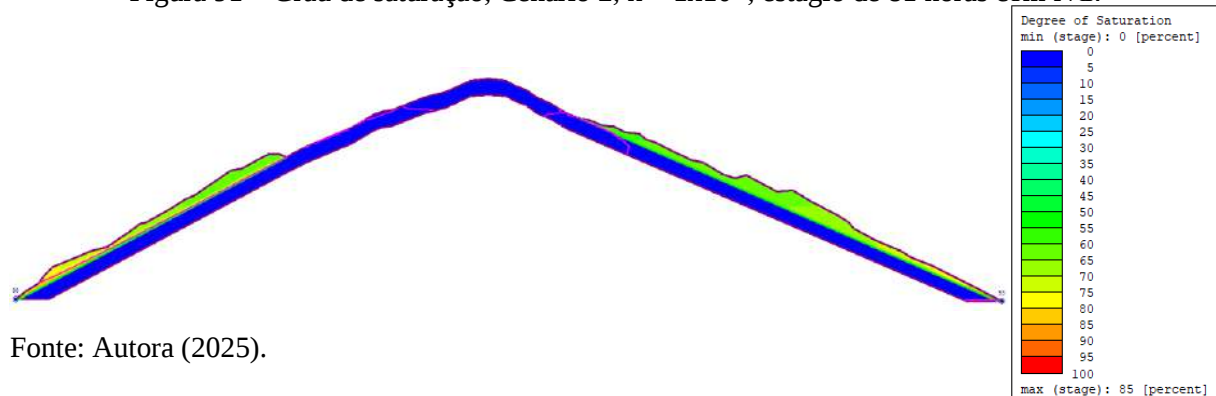


Figura 91 – Grau de saturação, Cenário 2, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 81 horas com NC.



A deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base e no interior do maciço rochoso, enquanto a poropressão apresentou valores muito elevados nessa mesma região. Aliados à ocorrência de NC, esses fatores sugerem possíveis inconsistências numéricas, cuja confirmação requer o refinamento da malha, a redução do passo de tempo e a verificação das condições de contorno para assegurar a coerência dos resultados.

São apresentados na Figura 92, Figura 93 e Figura 94, os gráficos referentes ao Cenário 3 para $k = 1 \times 10^{-1}$ onde a ruptura ocorreu entre 77 e 78 horas. Inicia-se, portanto, com os resultados

de 77 horas.

Figura 92 – Deformação plástica Cisalhante máxima, cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 77 horas com SRF 3,48.

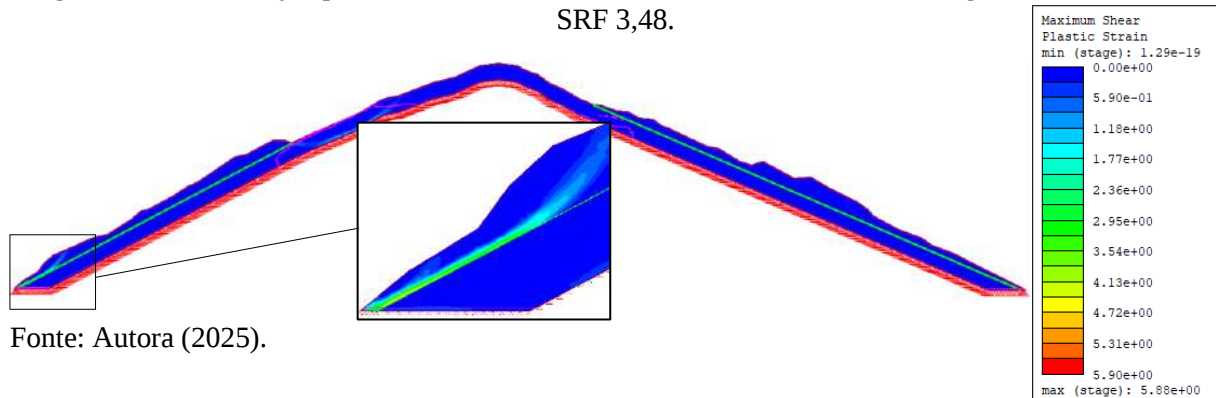


Figura 93 - Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 77 horas com SRF 3,48.

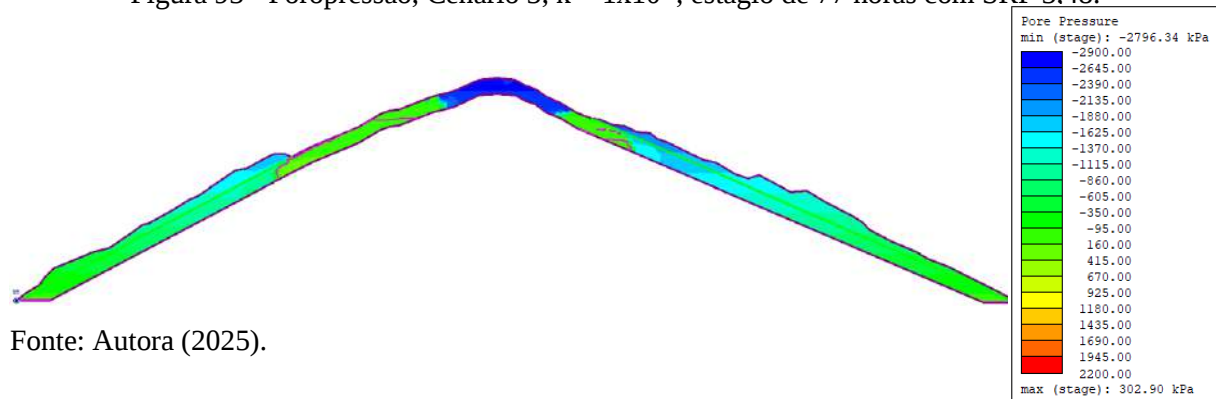
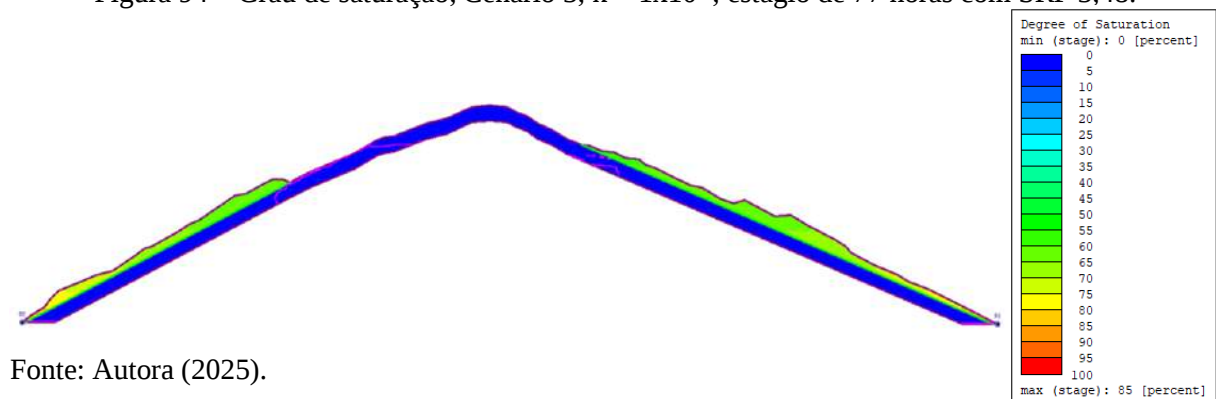


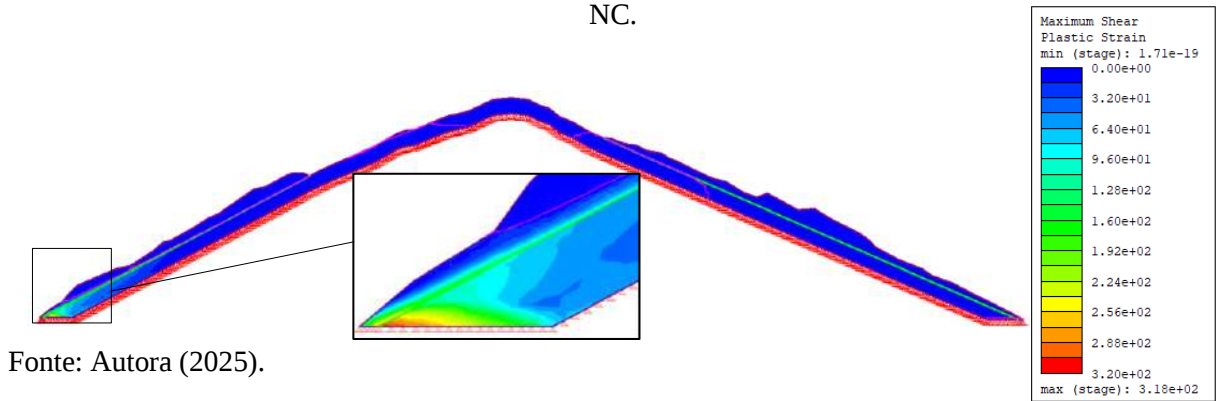
Figura 94 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 77 horas com SRF 3,48.



Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, enquanto a poropressão apresentou seu valor mais elevado na porção central do modelo. Apesar disso, nota-se a presença de valores moderados de poropressão também na base, o que pode ter contribuído para a leve redução do SRF registrada neste estágio.

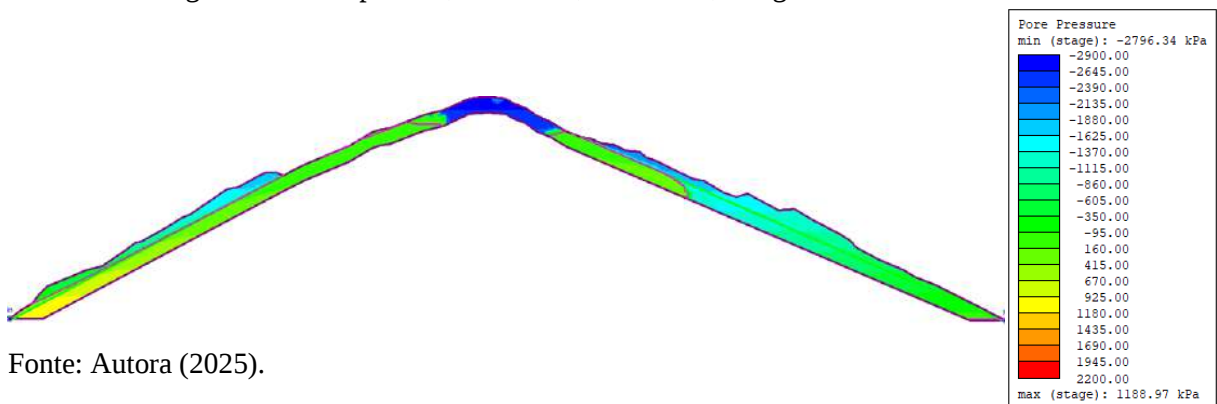
Agora são apresentados na Figura 95, Figura 96 e Figura 97, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 78 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 95 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 78 horas com NC.



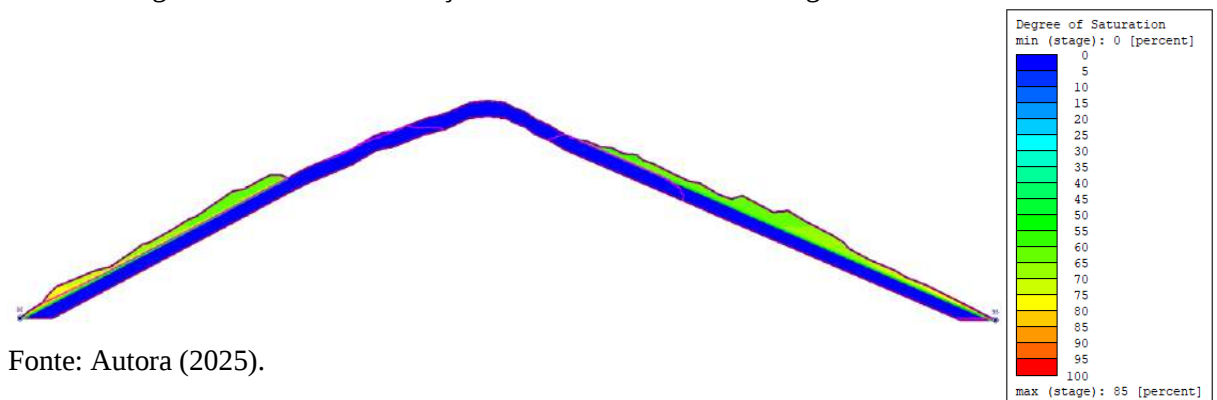
Fonte: Autora (2025).

Figura 96 – Poropressão, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 78 horas com NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 97 – Grau de saturação, Cenário 3, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 78 horas com NC.



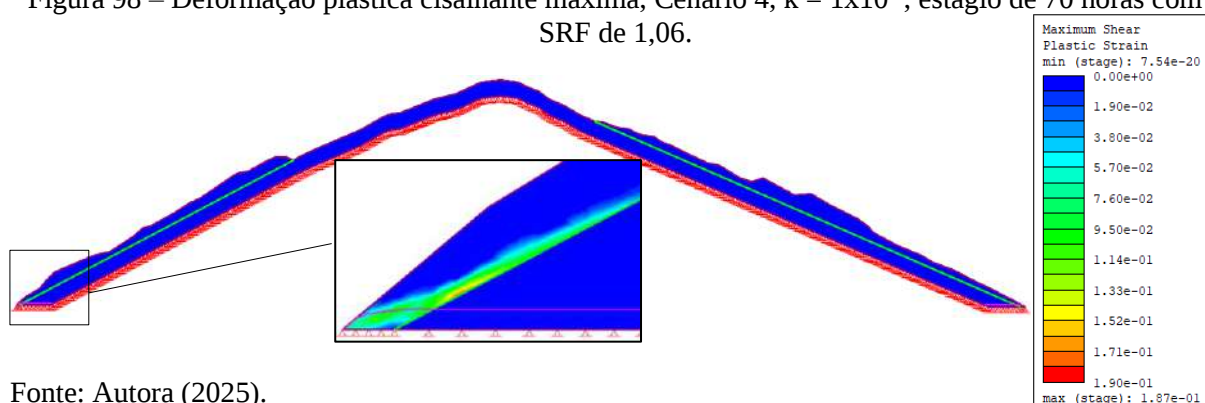
Fonte: Autora (2025).

A deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base e no interior do maciço rochoso, enquanto a poropressão apresentou valores muito elevados nessa mesma região. Aliados à ocorrência de NC, esses fatores sugerem possíveis inconsistências numéricas, cuja confirmação requer o refinamento da malha, a redução do passo de tempo e a verificação das condições de contorno para assegurar a coerência dos resultados.

4.4.5 Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$

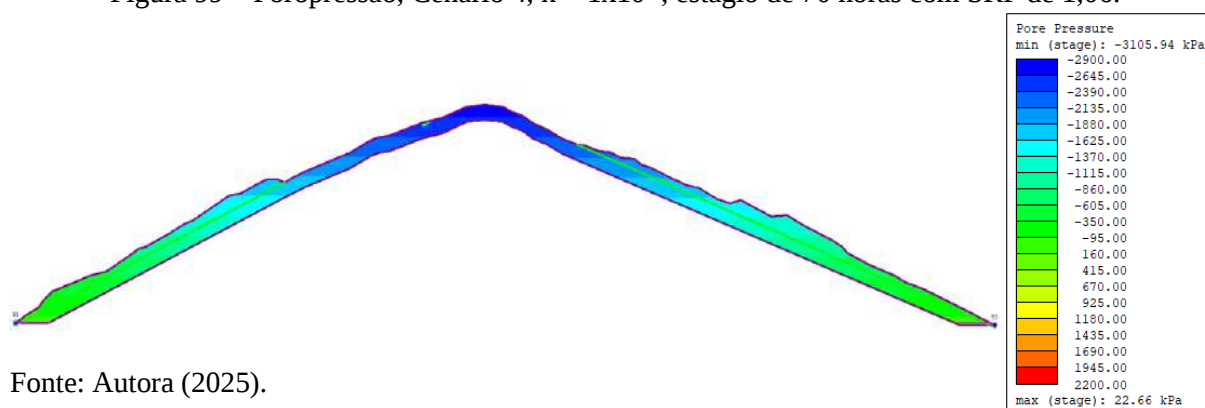
No Cenário 4 com $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, a transição para a instabilidade foi identificada entre 70 h e 71 h. Assim, apresenta-se primeiro os resultados em 70 h nas figuras 98, 99 e 100.

Figura 98 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 70 horas com SRF de 1,06.



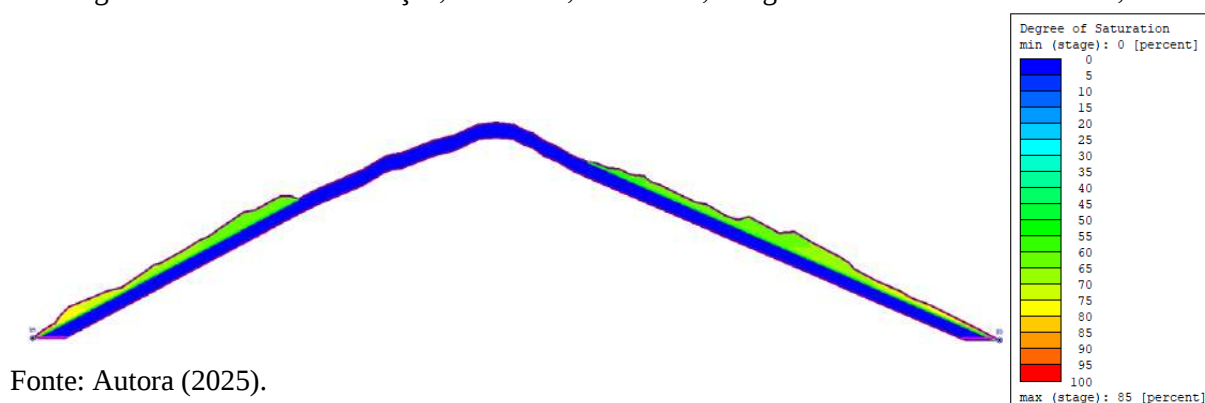
Fonte: Autora (2025).

Figura 99 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 70 horas com SRF de 1,06.



Fonte: Autora (2025).

Figura 100 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 70 horas com SRF de 1,06.

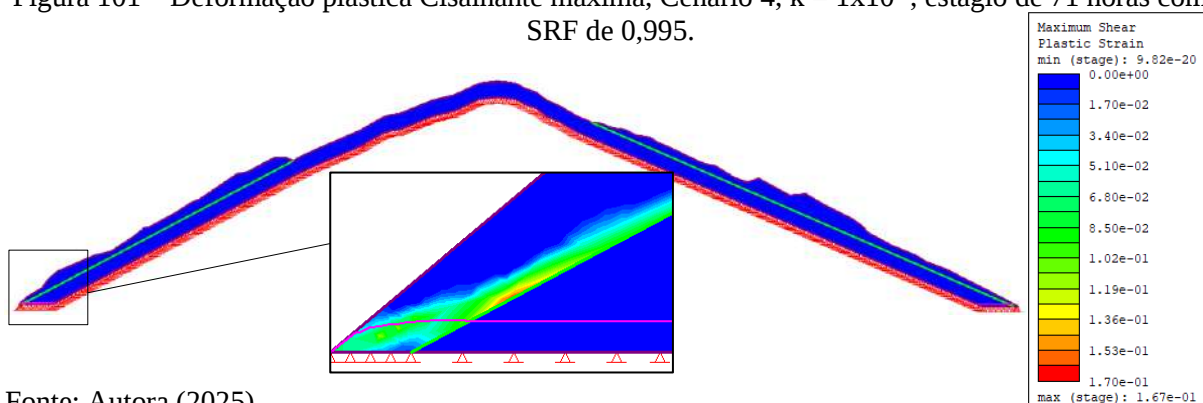


Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, coincidindo com a região de maior poropressão. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

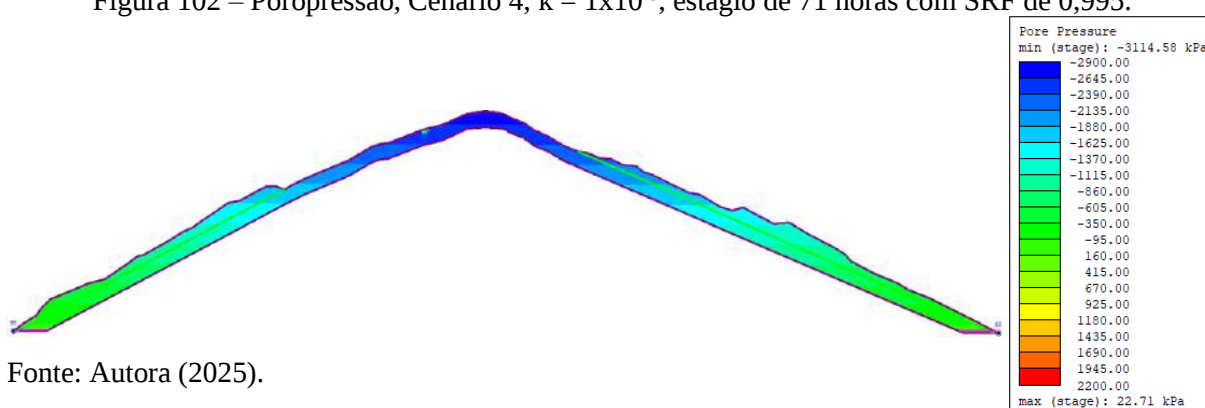
Agora são apresentados na Figura 101, Figura 102 e Figura 103, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 71 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 101 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 0,995.



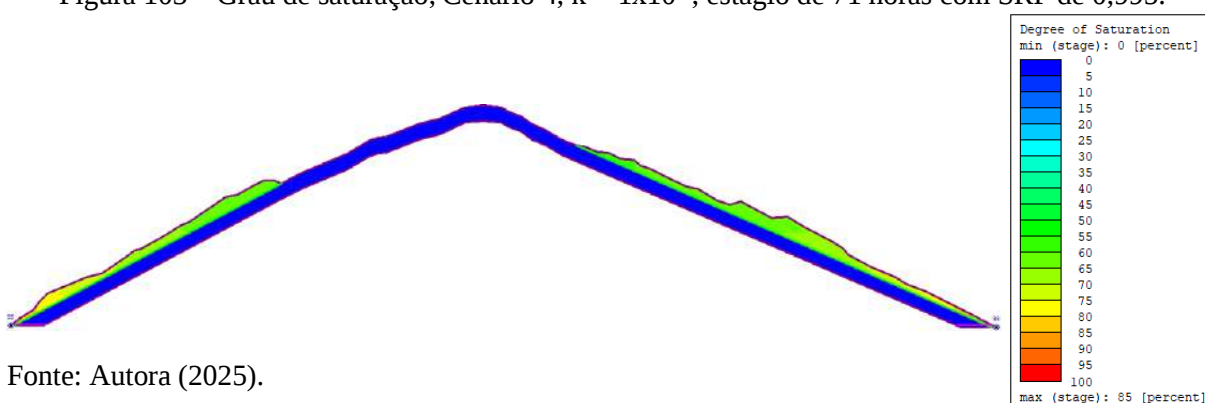
Fonte: Autora (2025).

Figura 102 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 0,995.



Fonte: Autora (2025).

Figura 103 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 0,995.

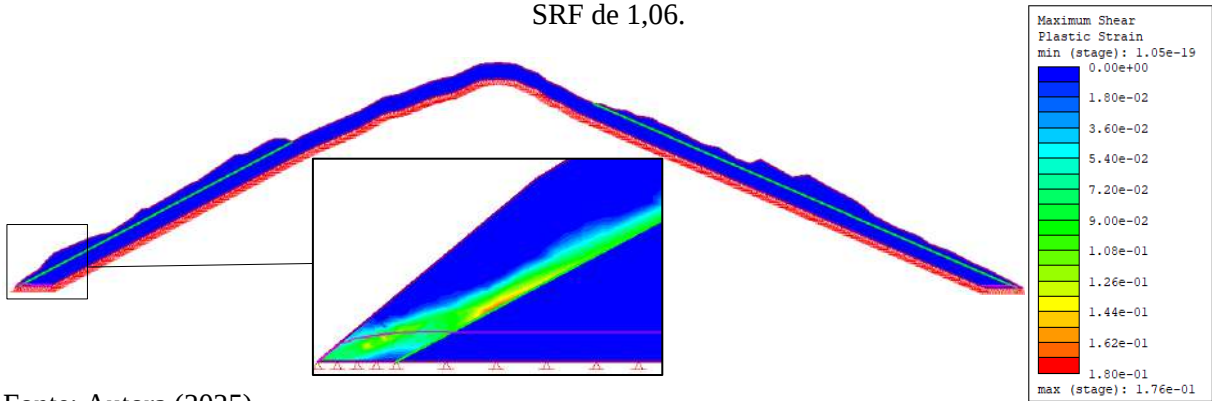


Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se um leve aumento da poropressão em relação ao instante anterior, especialmente na base do talude, onde também se concentra a deformação plástica cisalhante máxima. Esse acréscimo, ainda que discreto, foi suficiente para reduzir as tensões efetivas e provocar a queda do SRF para valores inferiores a 1, indicando a deflagração da ruptura no modelo.

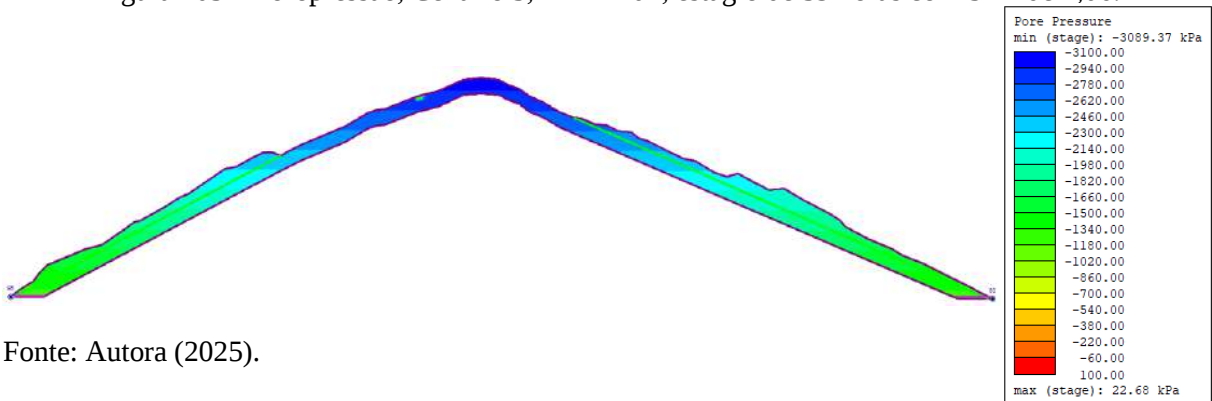
São apresentados na Figura 104, Figura 105 e Figura 106, os resultados referentes ao Cenário 5 para $k = 1 \times 10^{-3}$. A ruptura ficou entre 59 e 60 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 59 horas.

Figura 104 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,06.



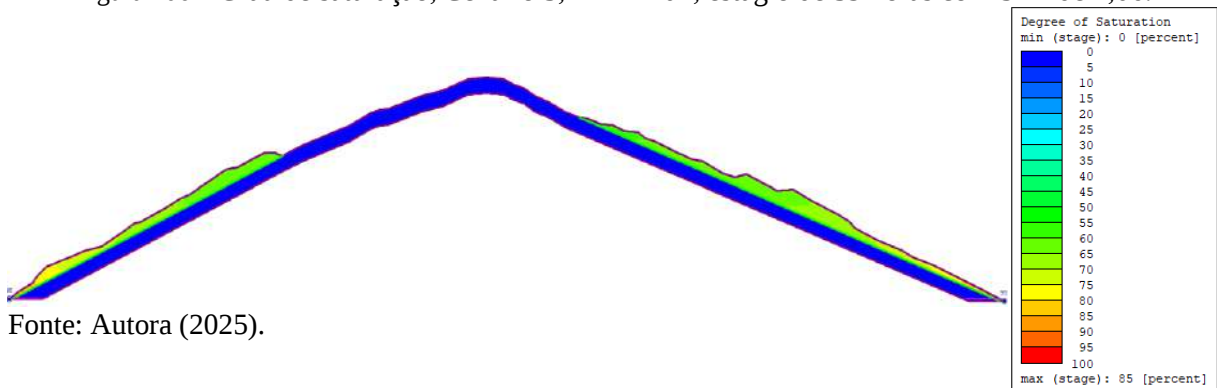
Fonte: Autora (2025).

Figura 105 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,06.



Fonte: Autora (2025).

Figura 106 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,06.

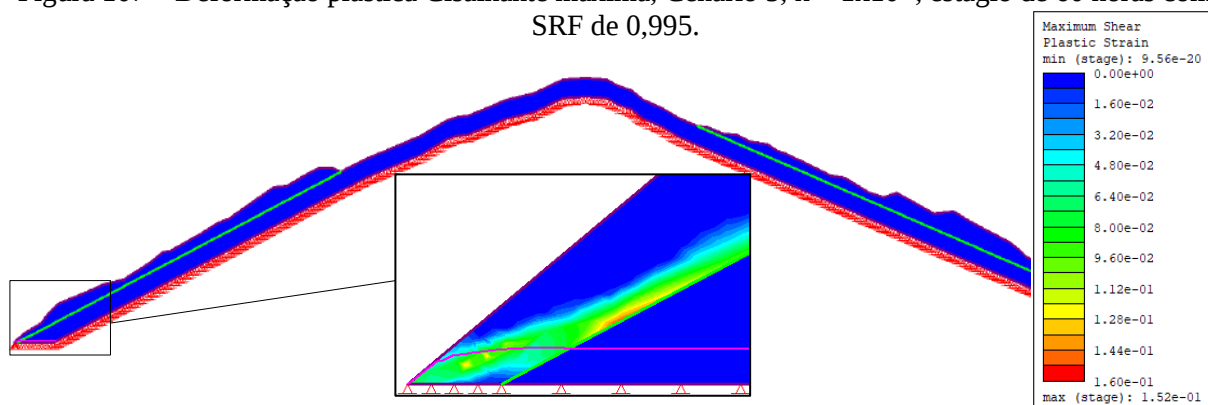


Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, coincidindo com a região de maior poropressão. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

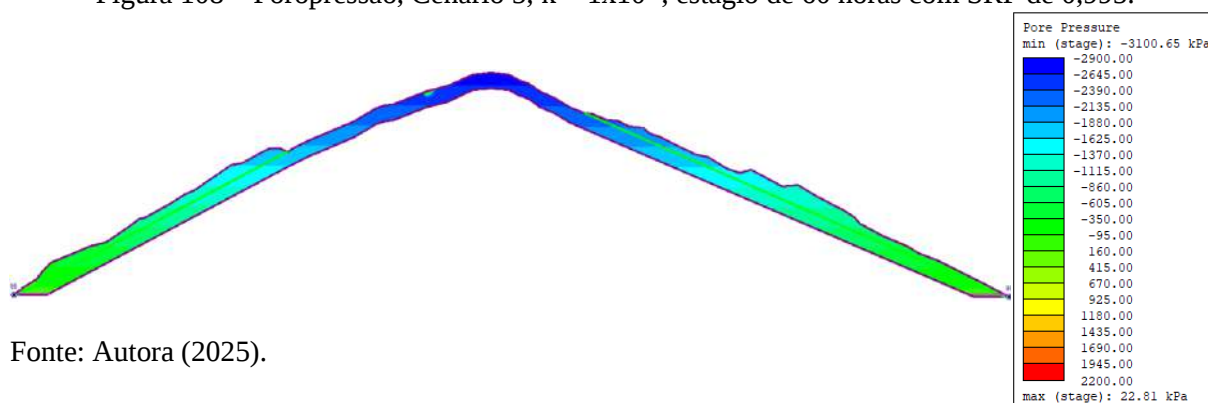
Agora são apresentados na Figura 107, Figura 108 e Figura 109, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 60 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 107 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,995.



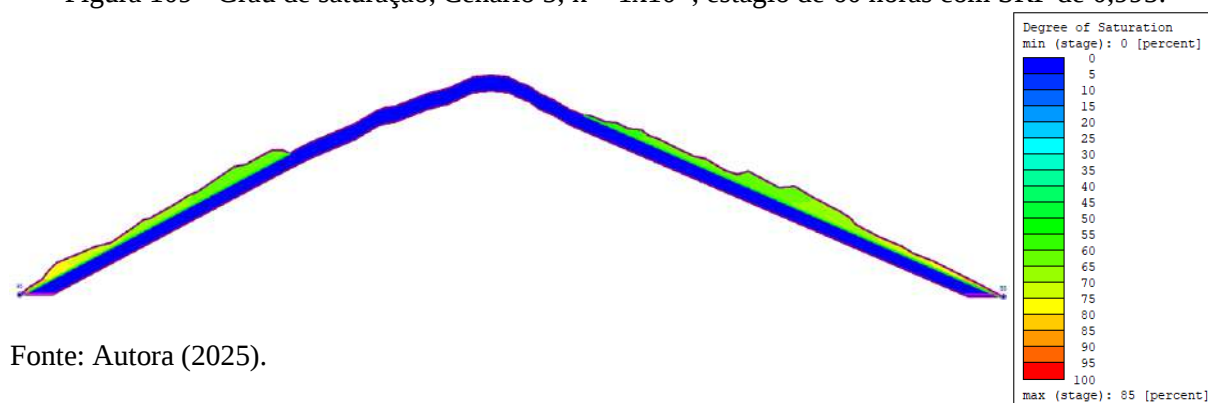
Fonte: Autora (2025).

Figura 108 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,995.



Fonte: Autora (2025).

Figura 109 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,995.

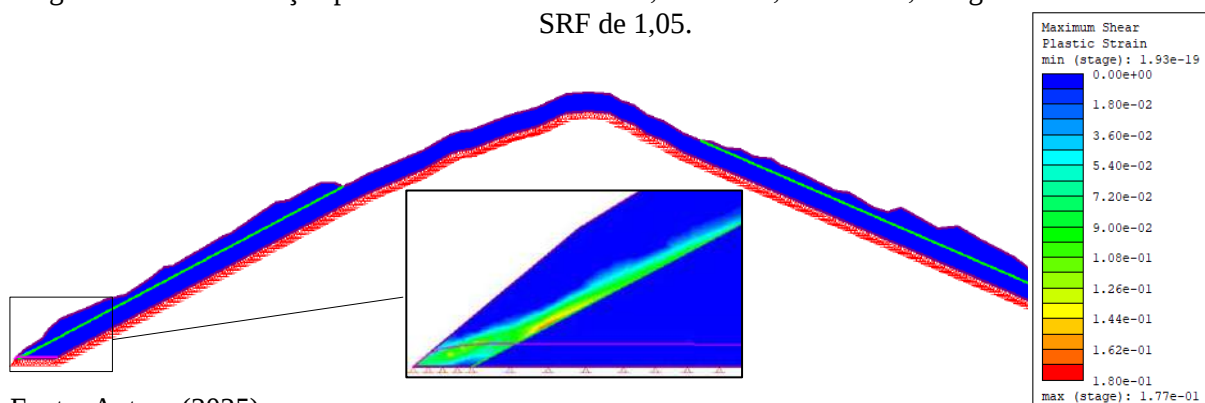


Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se um leve aumento da poropressão em relação ao instante anterior, especialmente na base do talude, onde também se concentra a deformação plástica cisalhante máxima. Esse acréscimo, ainda que discreto, foi suficiente para reduzir as tensões efetivas e provocar a queda do SRF para valores inferiores a 1, indicando a deflagração da ruptura no modelo.

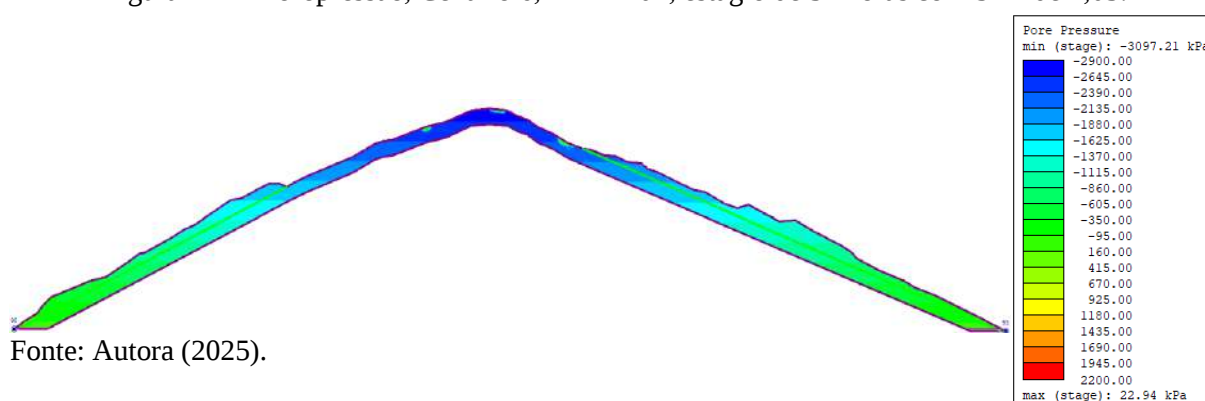
São apresentados na Figura 110, Figura 111 e Figura 112, os resultados referentes ao Cenário 6 para $k = 1 \times 10^{-3}$. A ruptura ficou entre 51 e 52 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 51 horas.

Figura 110 – Deformação plástica cisalhante máxima, cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,05.



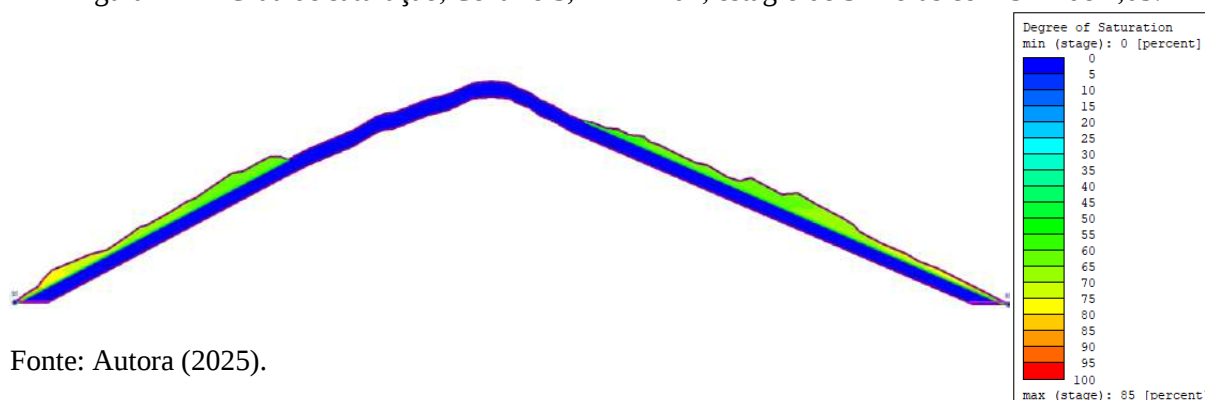
Fonte: Autora (2025).

Figura 111 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,05.



Fonte: Autora (2025).

Figura 112 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,05.

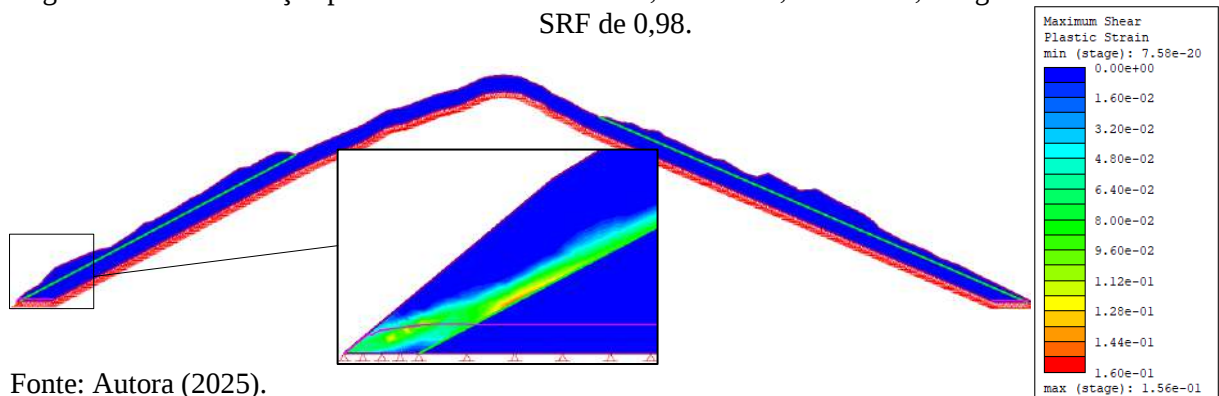


Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, coincidindo com a região de maior poropressão. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

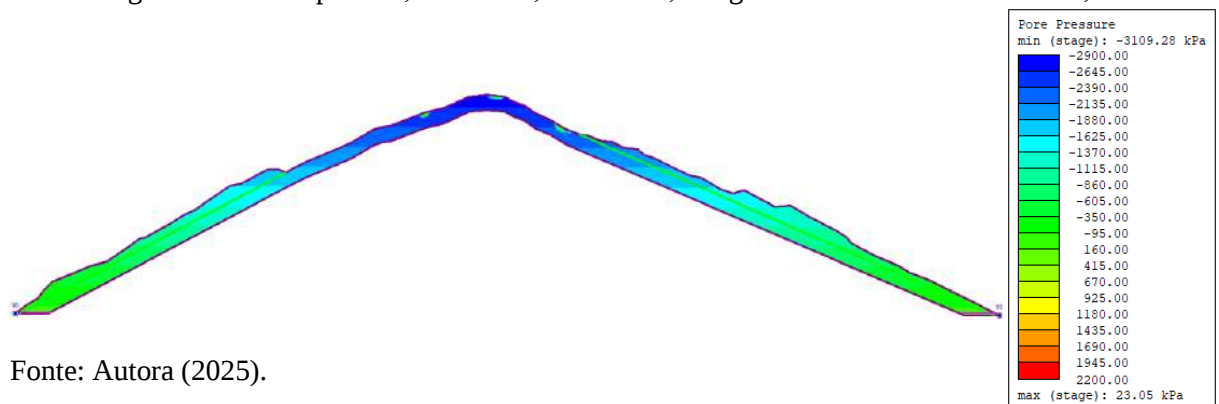
Agora são apresentados na Figura 113, Figura 114 e Figura 115, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 52 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 113 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,98.



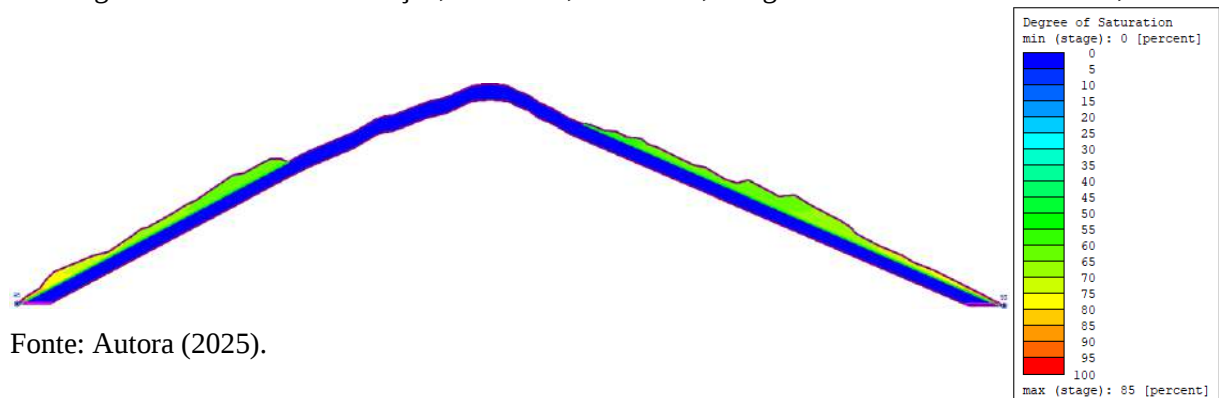
Fonte: Autora (2025).

Figura 114 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,98.



Fonte: Autora (2025).

Figura 115 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,98.

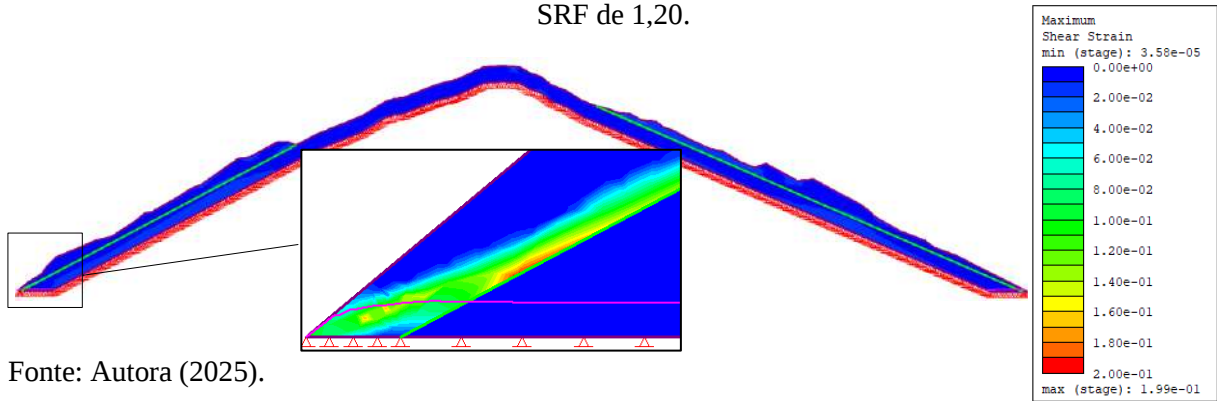


Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se um leve aumento da poropressão em relação ao instante anterior, especialmente na base do talude, onde também se concentra a deformação plástica cisalhante máxima. Esse acréscimo, ainda que discreto, foi suficiente para reduzir as tensões efetivas e provocar a queda do SRF para valores inferiores a 1, indicando a deflagração da ruptura no modelo.

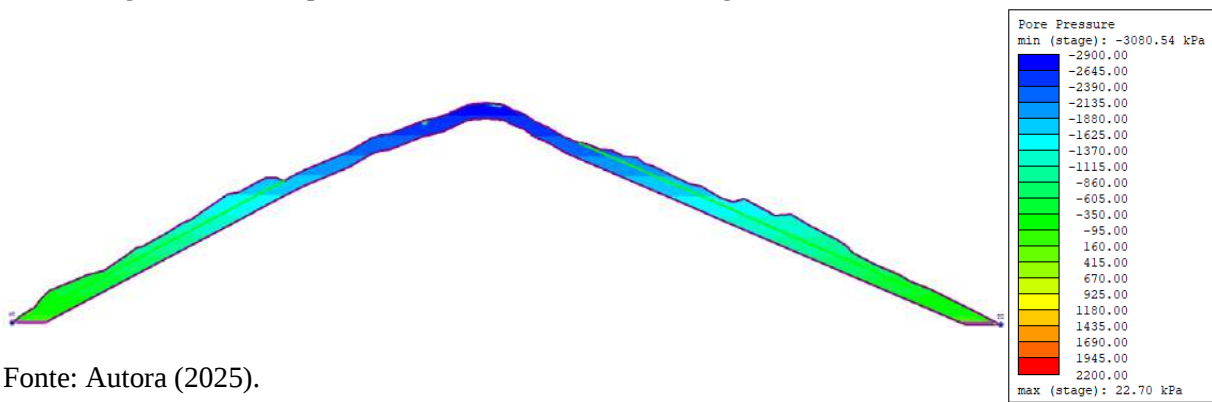
São apresentados na Figura 116, Figura 117 e Figura 118, os resultados referentes ao Cenário 7 para $k = 1 \times 10^{-3}$. A ruptura ficou entre 46 e 47 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 46 horas.

Figura 116 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,20.



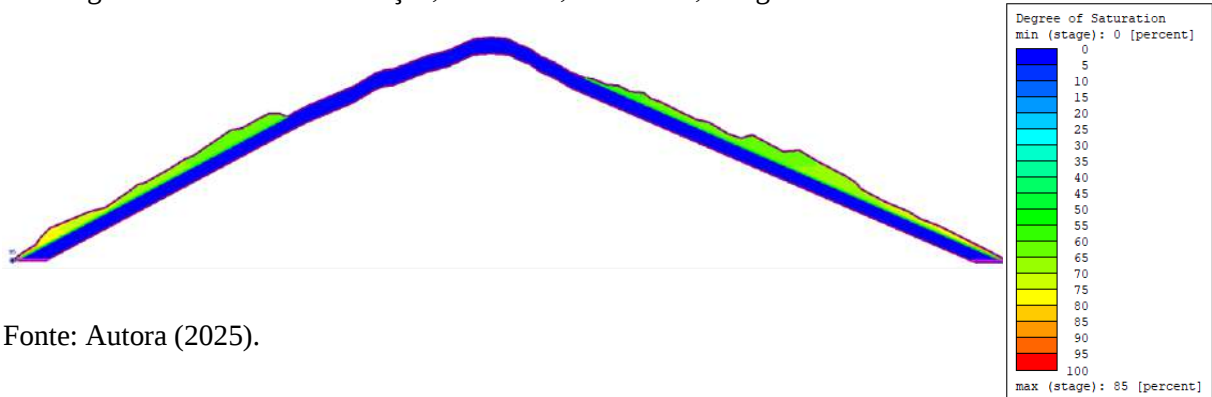
Fonte: Autora (2025).

Figura 117 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,20.



Fonte: Autora (2025).

Figura 118 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,20.



Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, coincidindo com a região de maior poropressão. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

Agora são apresentados na Figura 119, Figura 120 e Figura 121, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 47 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 119 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,995.

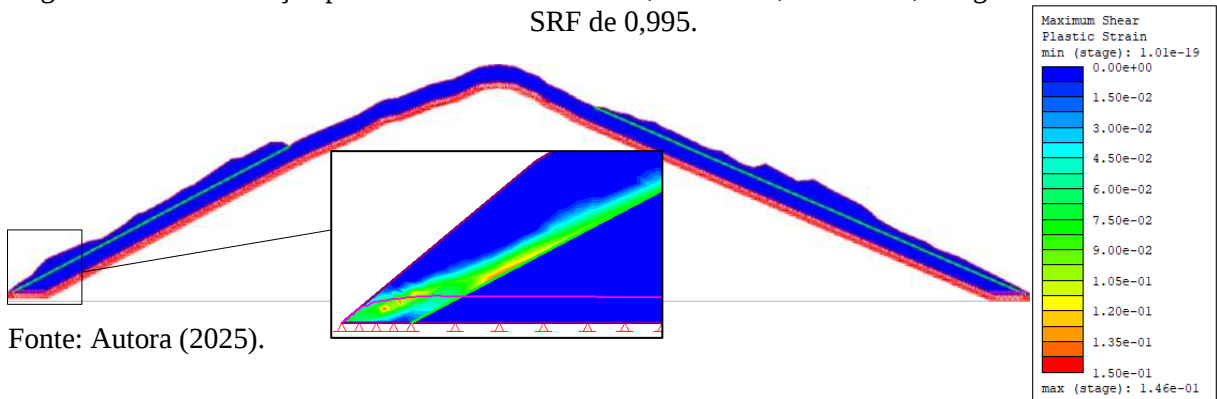


Figura 120 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,995.

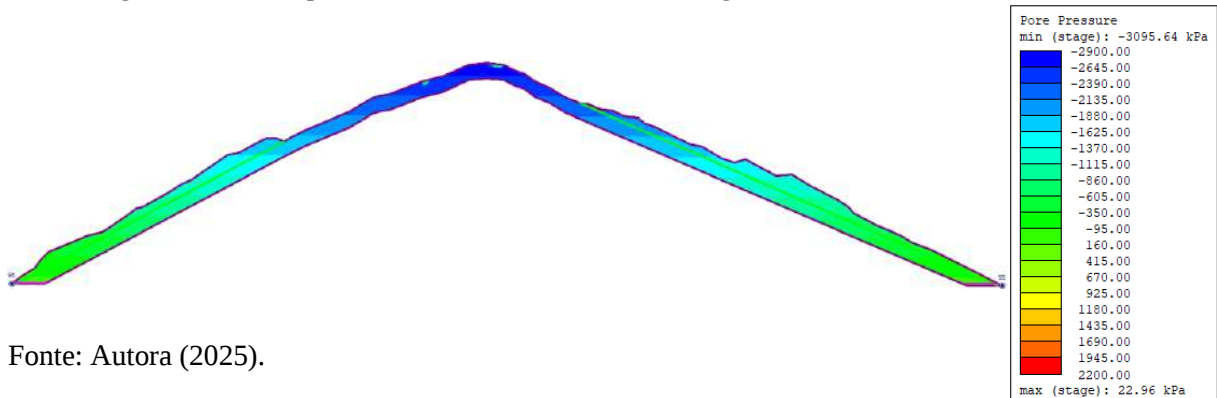
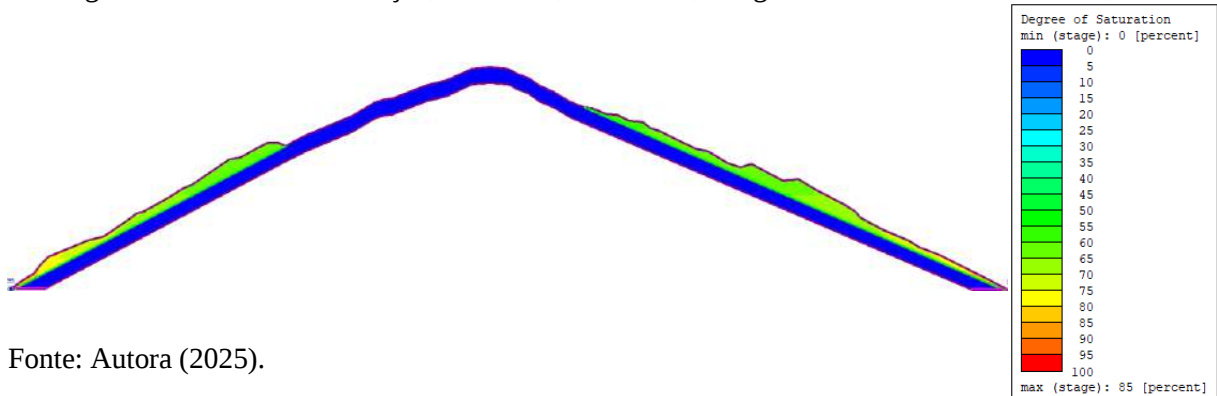


Figura 121 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 0,995.

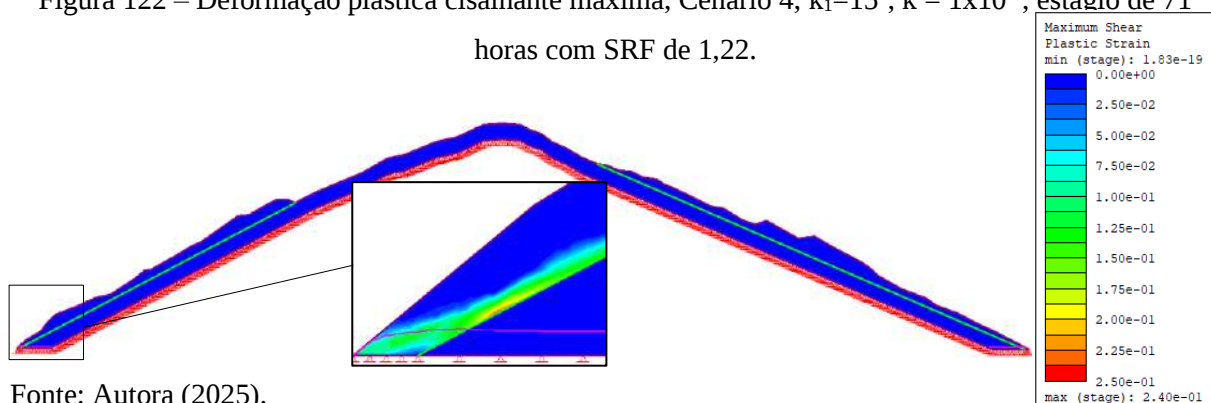


Neste estágio, observa-se um leve aumento da poropressão em relação ao instante anterior, especialmente na base do talude, onde também se concentra a deformação plástica cisalhante máxima. Esse acréscimo, ainda que discreto, foi suficiente para reduzir as tensões efetivas e provocar a queda do SRF para valores inferiores a 1, indicando a deflagração da ruptura no modelo.

4.4.6 Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-3}$, $k_2/k_1 = 0,01$ e $k_1 = 15^\circ$

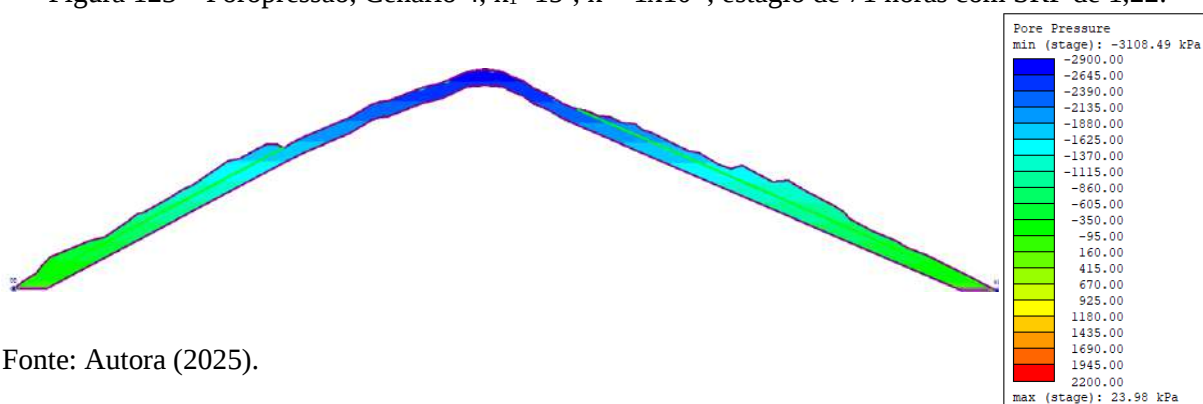
São apresentados os resultados referentes ao Cenário 4 agora para $k = 1 \times 10^{-3}$. A ruptura ficou entre 71 e 72 horas. Inicia-se com os resultados de 71 horas nas figuras 122, 123 e 124.

Figura 122 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 1,22.



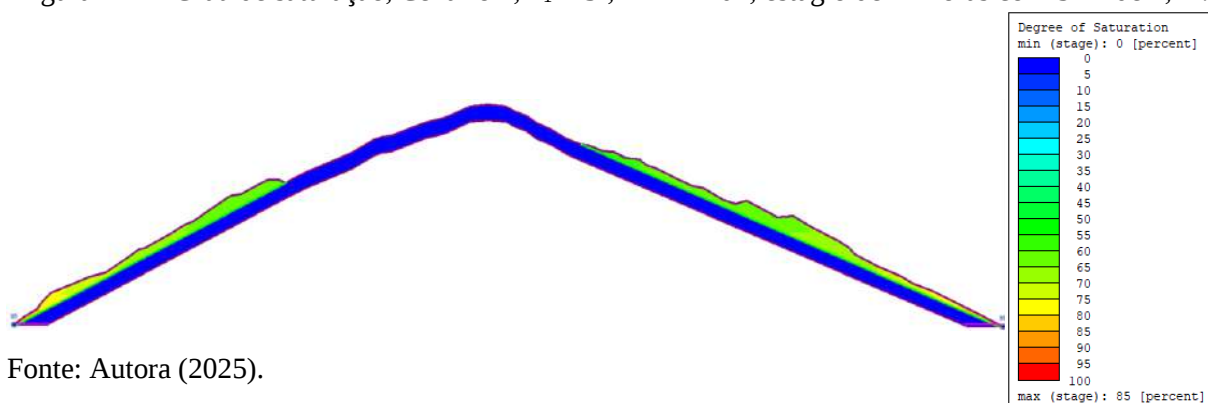
Fonte: Autora (2025).

Figura 123 – Poropressão, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 1,22.



Fonte: Autora (2025).

Figura 124 – Grau de saturação, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 71 horas com SRF de 1,22.

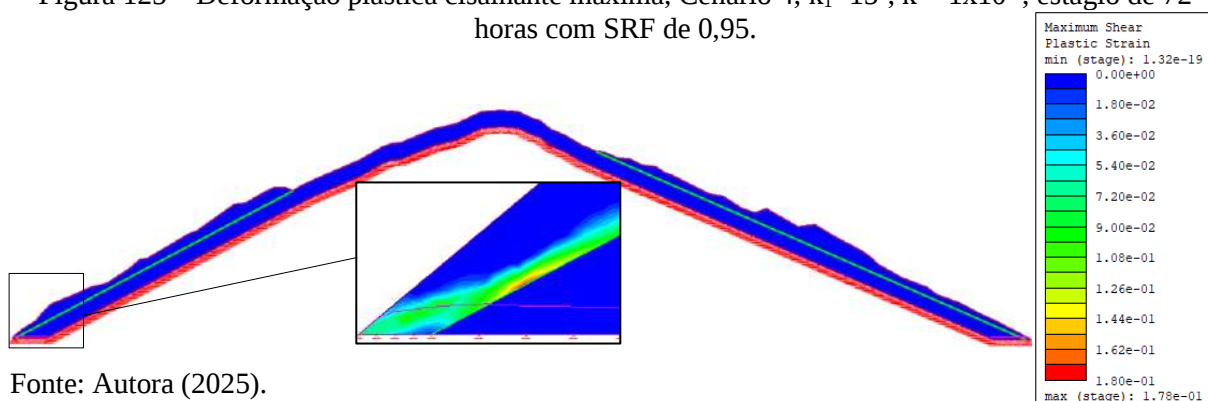


Fonte: Autora (2025).

Observa-se que o local de deformação plástica cisalhante máxima coincide com a região onde a poropressão atinge seus valores mais elevados, situada ao longo da interface solo-rocha na base do talude. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

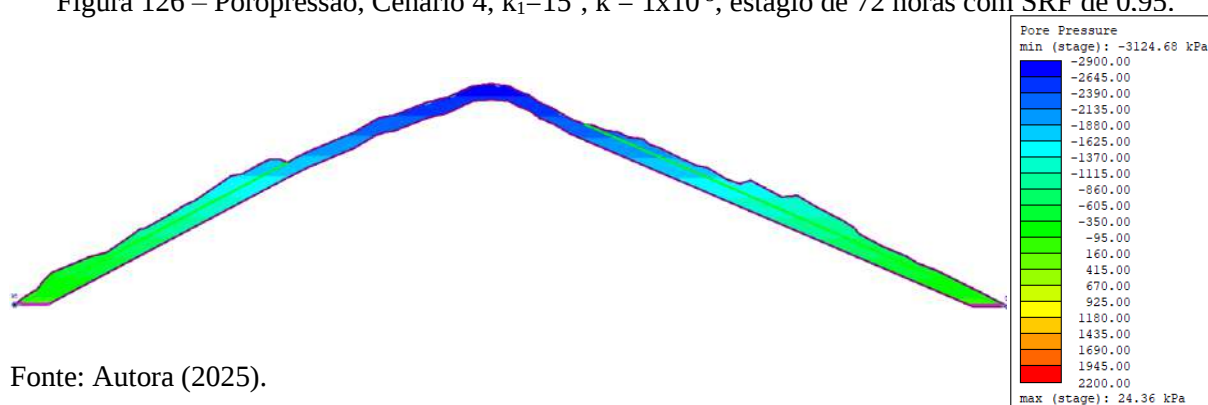
Agora são apresentados na Figura 125, Figura 126 e Figura 127, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 72 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 125 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 72 horas com SRF de 0,95.



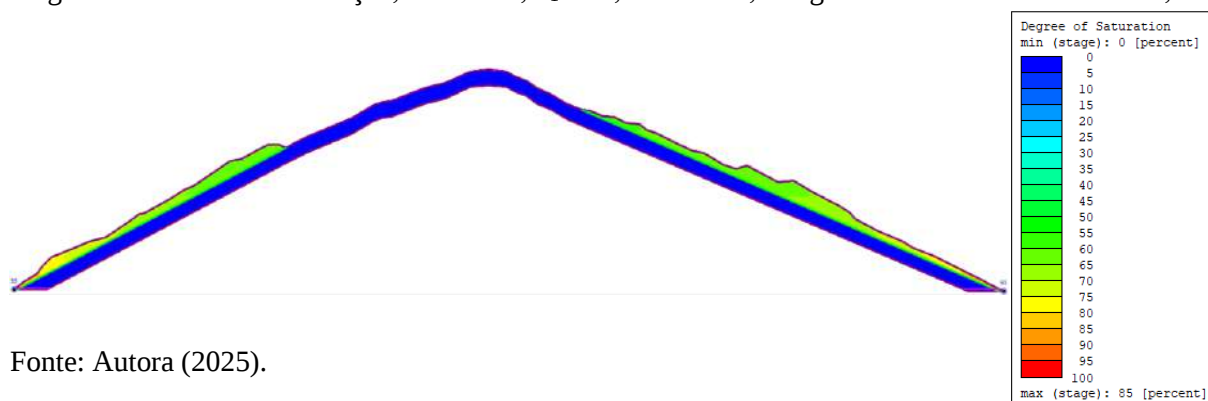
Fonte: Autora (2025).

Figura 126 – Poropressão, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 72 horas com SRF de 0.95.



Fonte: Autora (2025).

Figura 127 – Grau de saturação, Cenário 4, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 72 horas com SRF de 0,95.

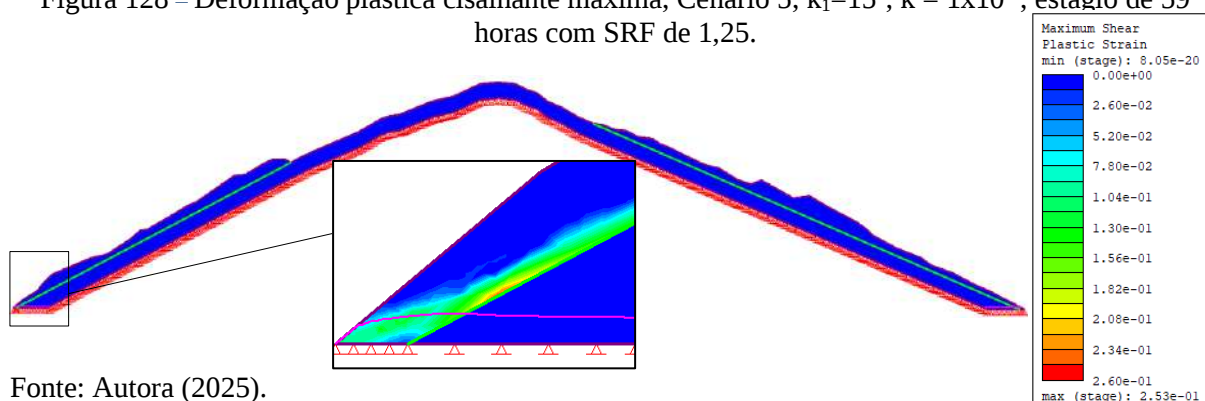


Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima permanece concentrada na mesma região de base do talude, coincidindo com a área de maior poropressão. Em relação ao estágio anterior, nota-se que o aumento da poropressão foi pequeno. Ainda assim, o modelo apresentou redução do SRF para 0,95, o que reflete a perda de resistência global do maciço.

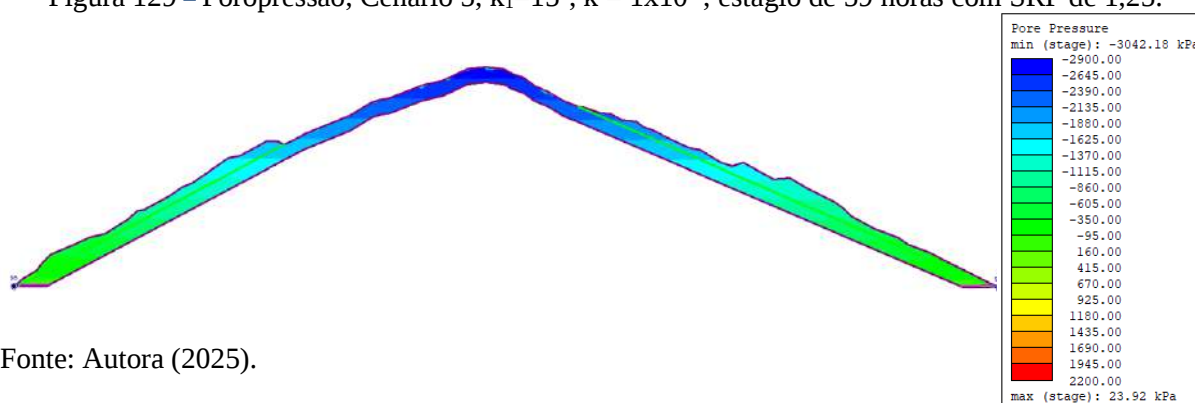
São apresentados na Figura 128, Figura 129 e Figura 130, os resultados referentes ao Cenário 5 e $k = 1 \times 10^{-3}$. A ruptura ficou entre 59 e 60 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 59 horas.

Figura 128 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,25.



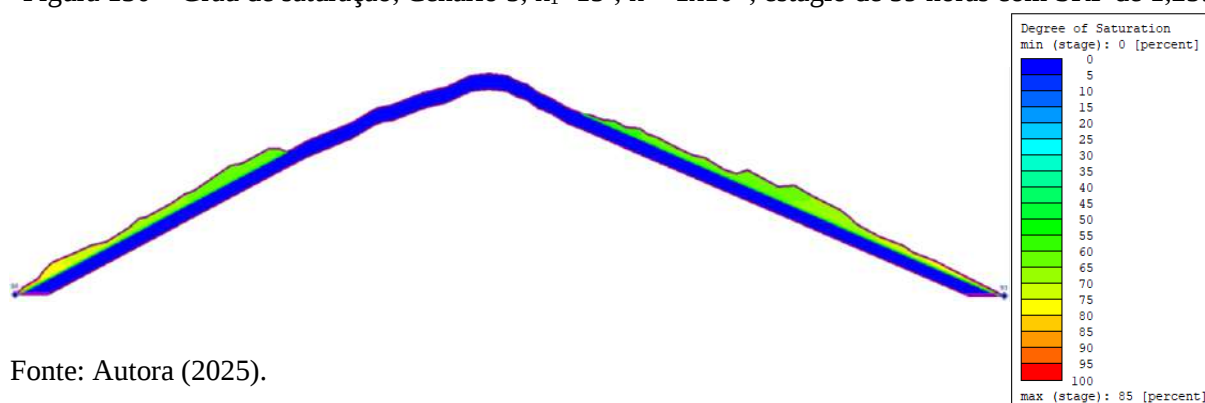
Fonte: Autora (2025).

Figura 129 – Poropressão, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,25.



Fonte: Autora (2025).

Figura 130 – Grau de saturação, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 59 horas com SRF de 1,25.

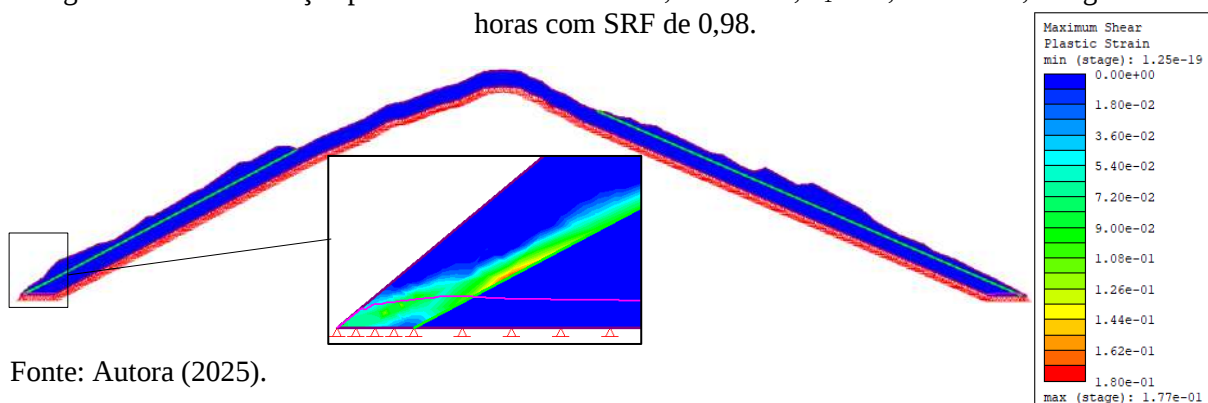


Fonte: Autora (2025).

Observa-se que o local de deformação plástica cisalhante máxima coincide com a região onde a poropressão atinge seus valores mais elevados, situada ao longo da interface solo-rocha na base do talude. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

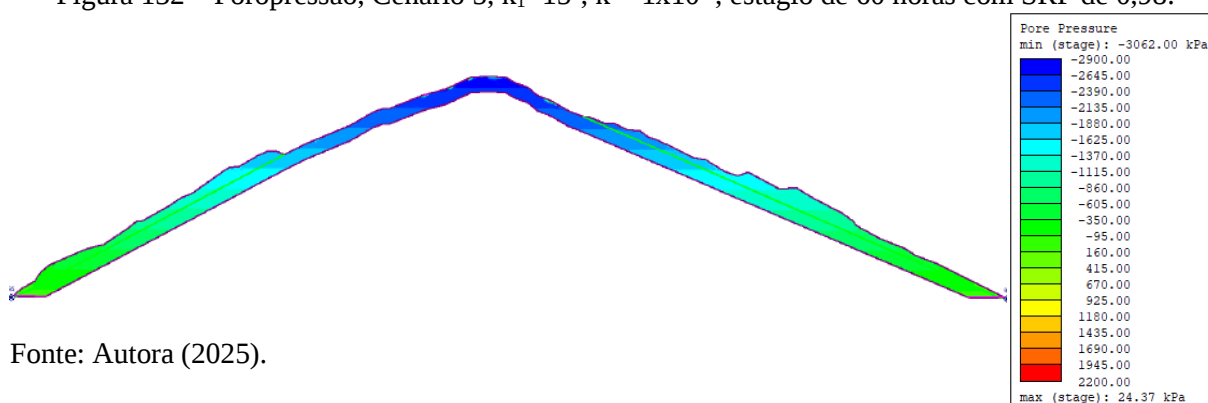
Agora são apresentados na Figura 131, Figura 132 e Figura 133, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 60 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 131 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,98.



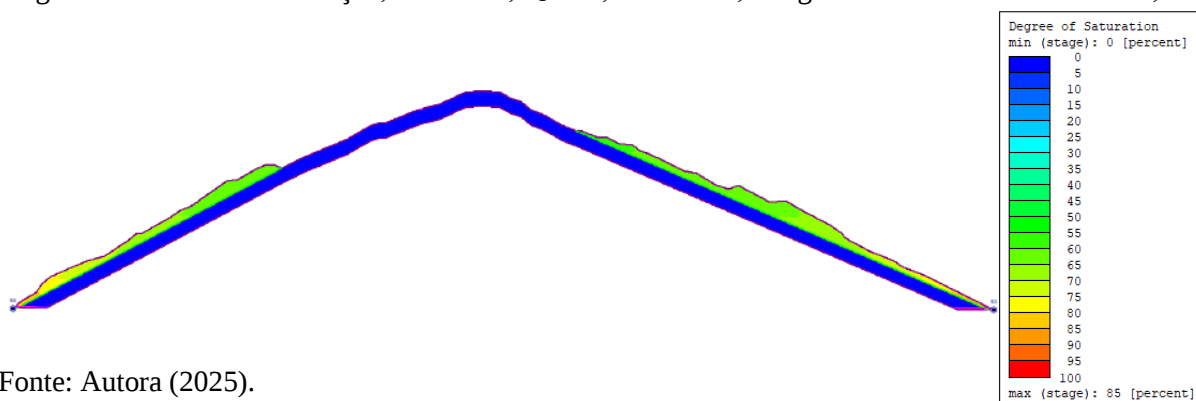
Fonte: Autora (2025).

Figura 132 – Poropressão, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,98.



Fonte: Autora (2025).

Figura 133 – Grau de saturação, Cenário 5, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 60 horas com SRF de 0,98.



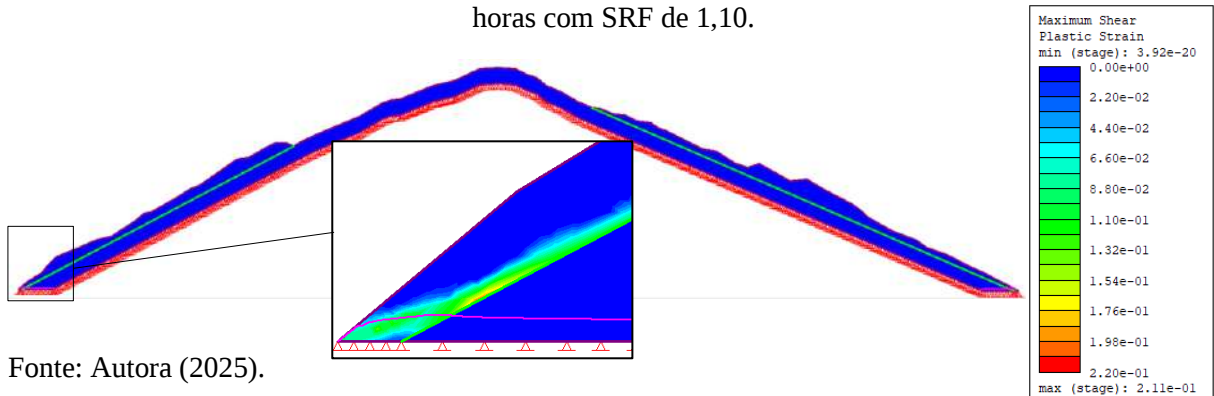
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que o local de deformação plástica cisalhante máxima permaneceu coincidente com a zona de poropressão mais elevada, indicando uma correlação entre os campos hidráulico e mecânico. Em comparação com o estágio anterior, nota-se que a poropressão aumentou ligeiramente, enquanto a distribuição da deformação manteve-se essencialmente no mesmo local. Esse incremento adicional da poropressão possivelmente reduziu as tensões efetivas na base do talude, favorecendo a perda de resistência ao cisalhamento e contribuindo para a ocorrência da ruptura observada no modelo numérico.

São apresentados na Figura 134, Figura 135 e Figura 136, os resultados referentes ao Cenário 6 e $k = 1 \times 10^{-3}$. A ruptura ficou entre 51 e 52 horas. Portanto, inicia-se com os valores

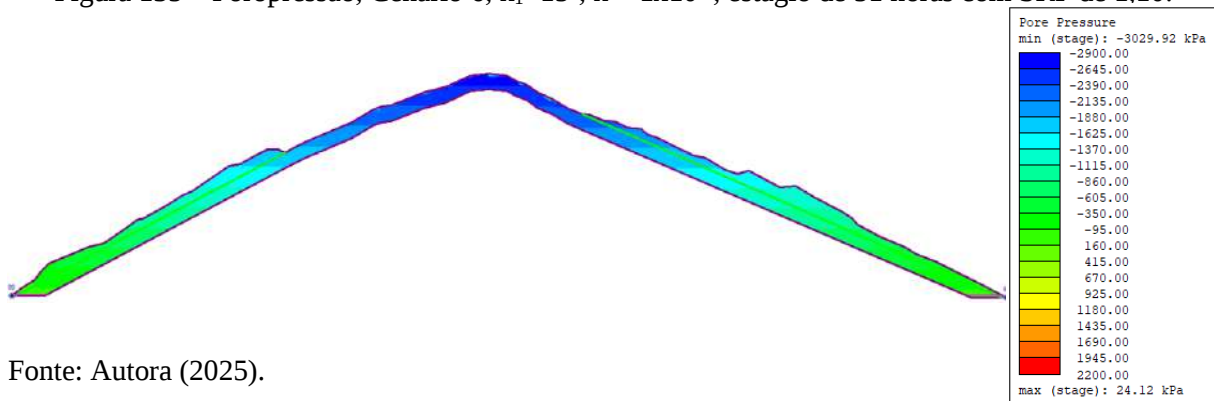
de 51 horas.

Figura 134 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,10.



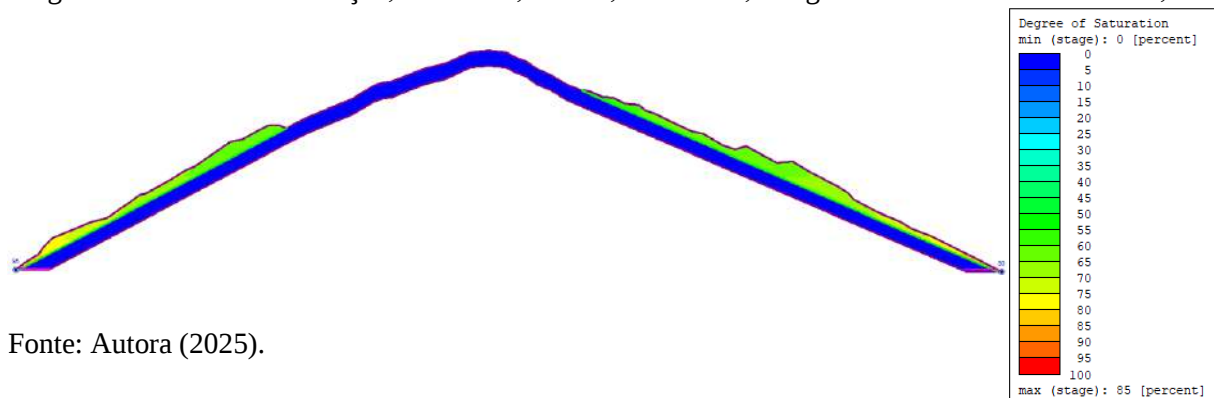
Fonte: Autora (2025).

Figura 135 – Poropressão, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,10.



Fonte: Autora (2025).

Figura 136 – Grau de saturação, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 51 horas com SRF de 1,10.

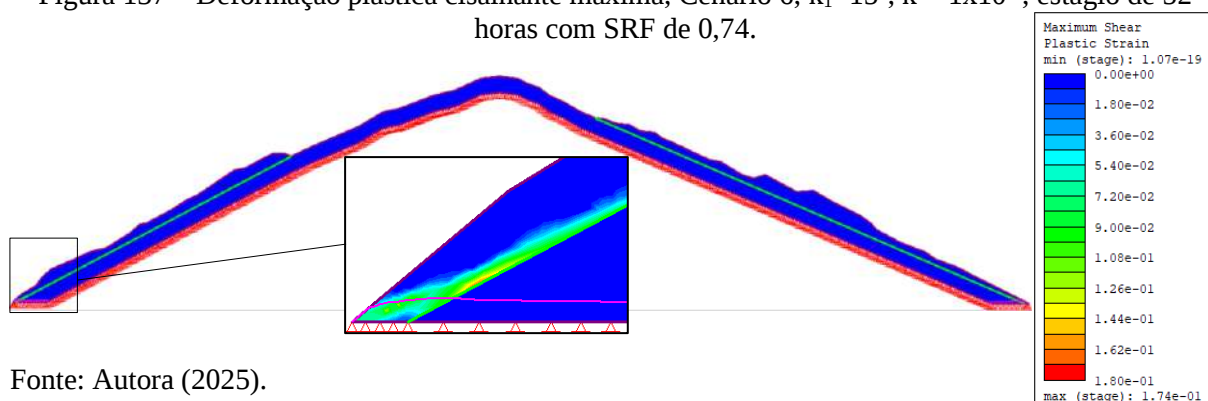


Fonte: Autora (2025).

Observa-se que o local de deformação plástica cisalhante máxima coincide com a região onde a poropressão atinge seus valores mais elevados, situada ao longo da interface solo-rocha na base do talude. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

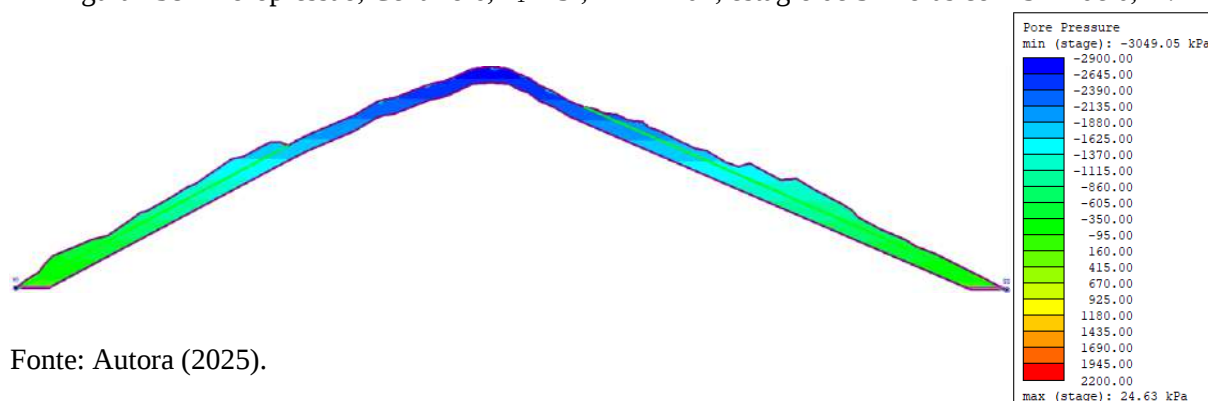
Agora são apresentados na Figura 137, Figura 138 e Figura 139, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 52 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 137 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,74.



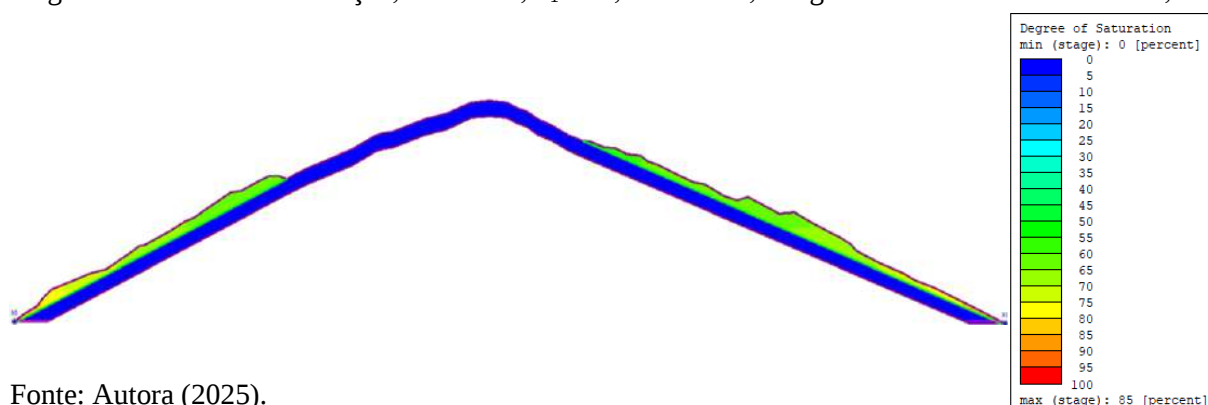
Fonte: Autora (2025).

Figura 138 – Poropressão, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,74.



Fonte: Autora (2025).

Figura 139 – Grau de saturação, Cenário 6, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 52 horas com SRF de 0,74.



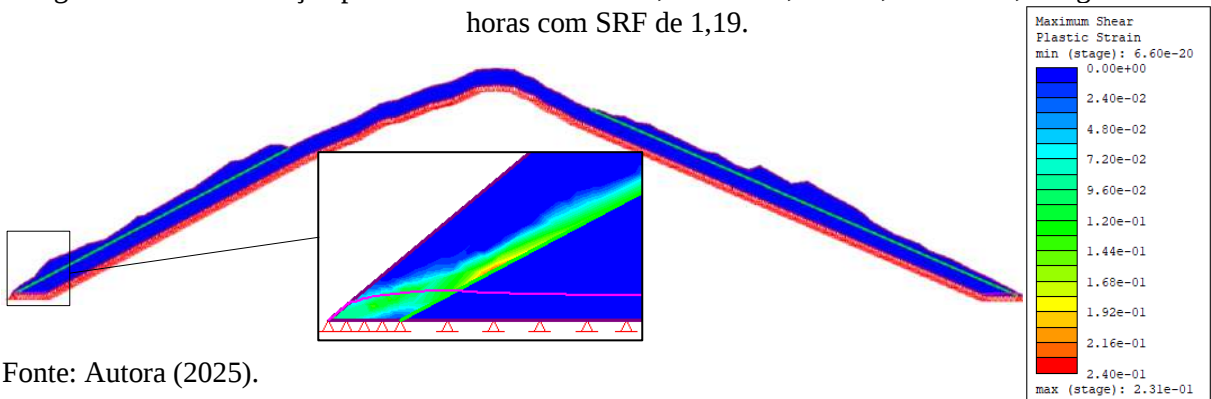
Fonte: Autora (2025).

No estágio de 52 horas, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima permanece concentrada na mesma região de base do talude, coincidindo com a área de maior poropressão. Em relação ao estágio anterior, nota-se que o aumento da poropressão foi muito pequeno, praticamente desprezível, indicando que não houve alteração significativa no campo hidráulico. Ainda assim, o modelo apresentou redução do SRF para 0,74, o que reflete a perda de resistência global do maciço.

São apresentados na Figura 140, Figura 141 e Figura 142, os resultados referentes ao Cenário 7 e $k = 1 \times 10^{-3}$. A ruptura ficou entre 46 e 47 horas. Portanto, inicia-se com os valores

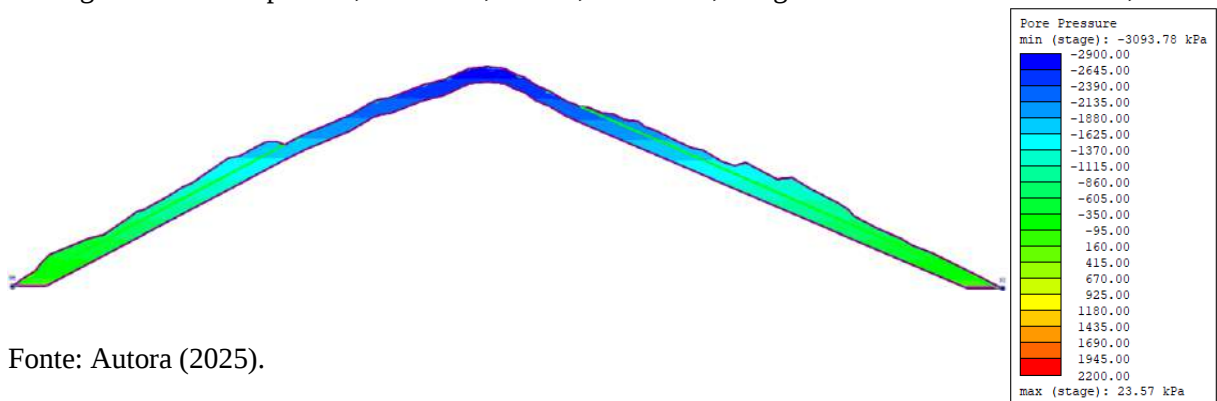
de 46 horas.

Figura 140 - Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,19.



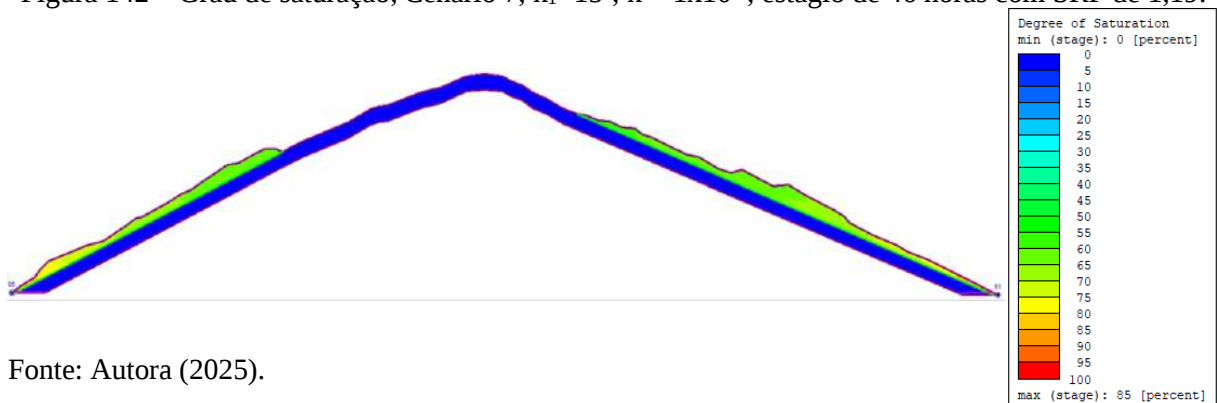
Fonte: Autora (2025).

Figura 141 – Poropressão, Cenário 7, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,19.



Fonte: Autora (2025).

Figura 142 – Grau de saturação, Cenário 7, $k_1=15^\circ$, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 46 horas com SRF de 1,19.

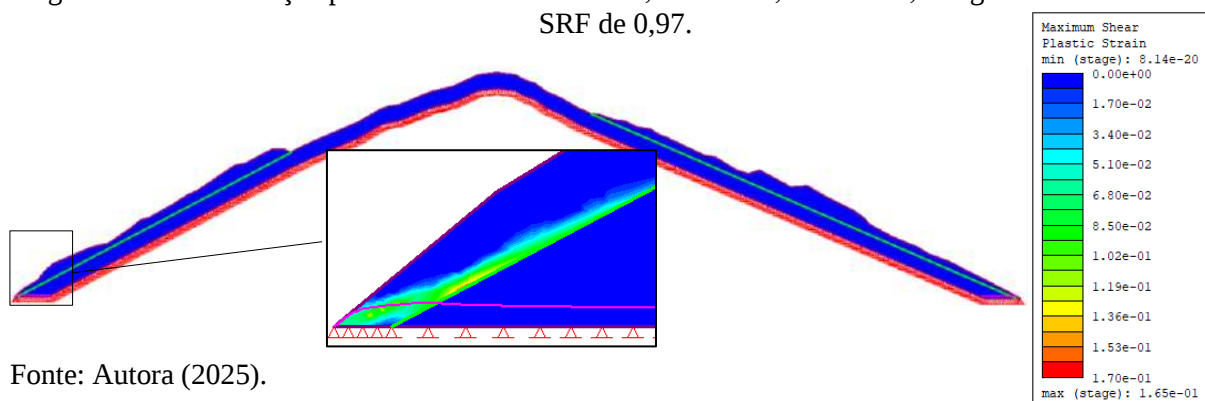


Fonte: Autora (2025).

Observa-se que o local de deformação plástica cisalhante máxima coincide com a região onde a poropressão atinge seus valores mais elevados, situada ao longo da interface solo-rocha na base do talude. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento e justificando os valores mais baixos de SRF observados neste estágio.

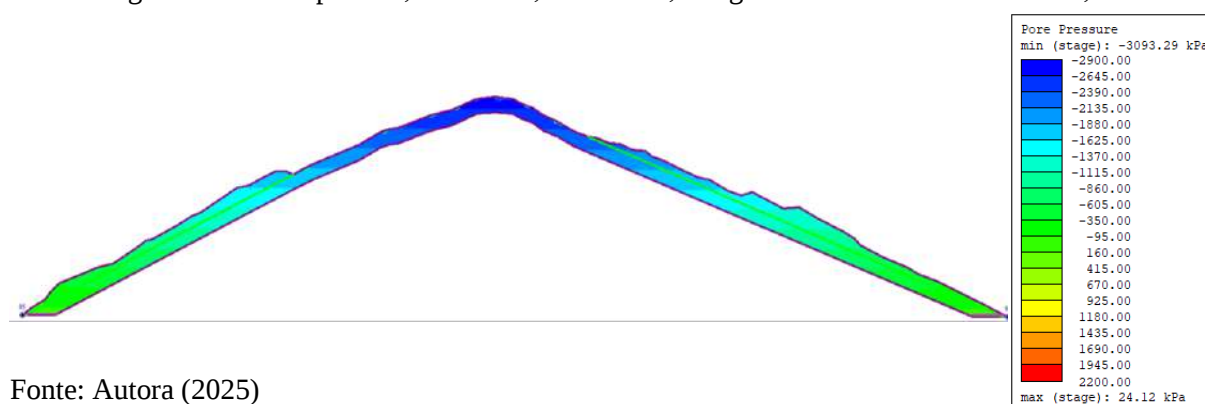
Agora são apresentados na Figura 143, Figura 144 e Figura 145, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 47 horas, o primeiro estágio com valor do SRF inferior a 1.

Figura 143 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,97.



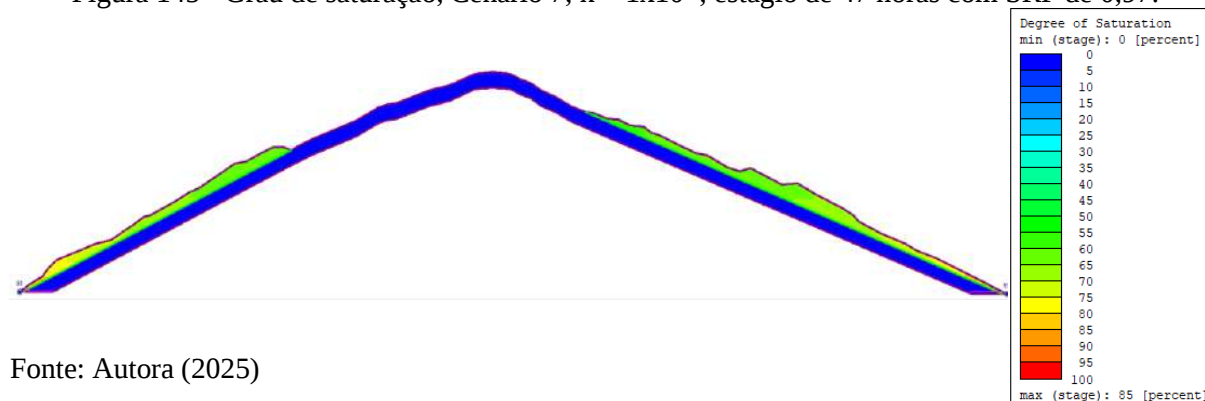
Fonte: Autora (2025).

Figura 144 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,97.



Fonte: Autora (2025)

Figura 145 - Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-3}$, estágio de 47 horas com SRF de 0,97.



Fonte: Autora (2025)

No estágio de 46 horas, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima permanece concentrada na mesma região de base do talude, coincidindo com a área de maior poropressão. Em relação ao estágio anterior, nota-se que o aumento da poropressão foi muito pequeno, indicando que não houve alteração significativa no campo hidráulico. Ainda assim, o modelo apresentou redução do SRF para 0,97, o que reflete a perda de resistência global do maciço.

4.4.7 Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-2}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$

São apresentados os resultados referentes ao Cenário 4 agora para $k = 1 \times 10^{-2}$. A ruptura

ficou entre 76 e 77 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 76 horas nas figuras 146, 147 e 148.

Figura 146 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 76 horas com SRF de 2,65.

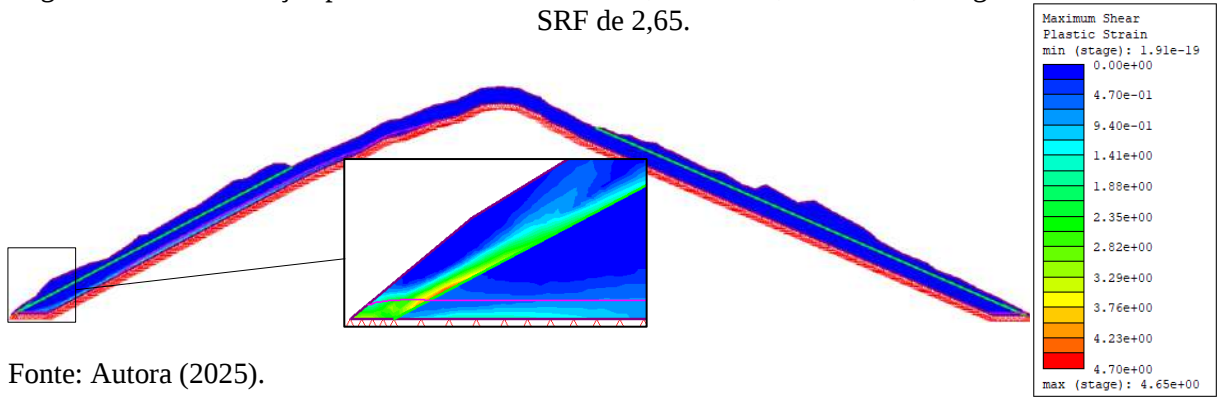


Figura 147 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 76 horas com SRF de 2,65.

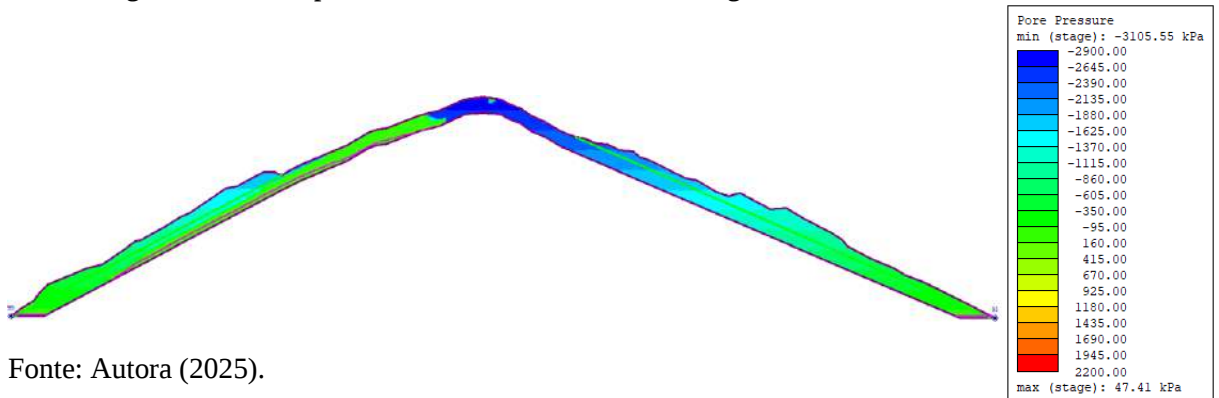
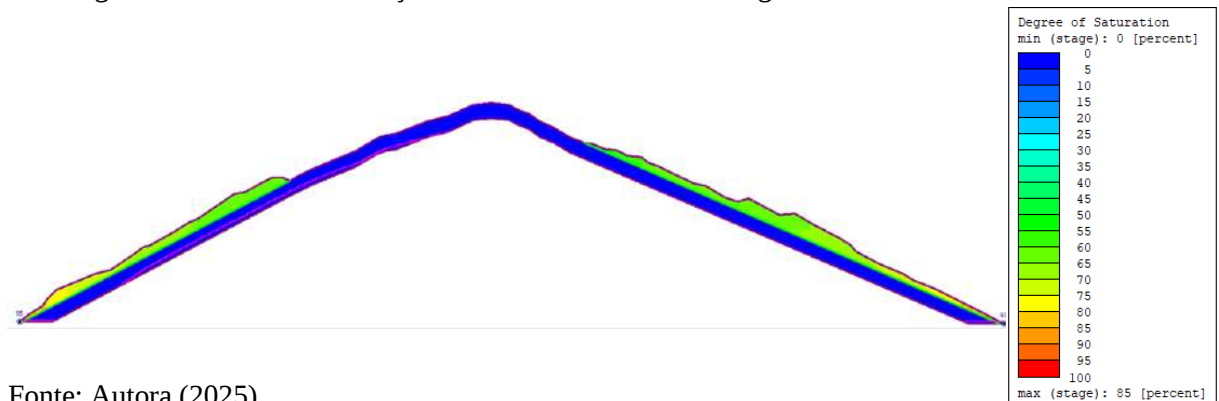


Figura 148 - Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 76 horas com SRF de 2,65.

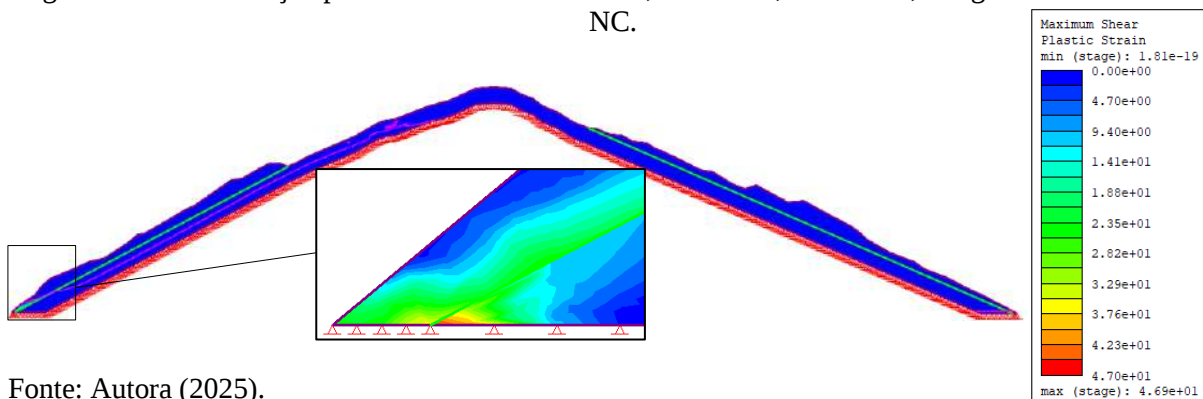


Observa-se que a deformação plástica cisalhante concentra-se ao longo da interface solo-rocha na base do talude, delineando a zona crítica potencial de escorregamento. A poropressão atinge seu máximo na lateral do maciço, embora a base também apresente valores representativos. Essa sobreposição entre os campos mecânico e hidráulico indica que o aumento da poropressão na base reduziu as tensões efetivas, favorecendo a mobilização do cisalhamento

e justificando os valores um pouco mais baixos de SRF observados neste estágio.

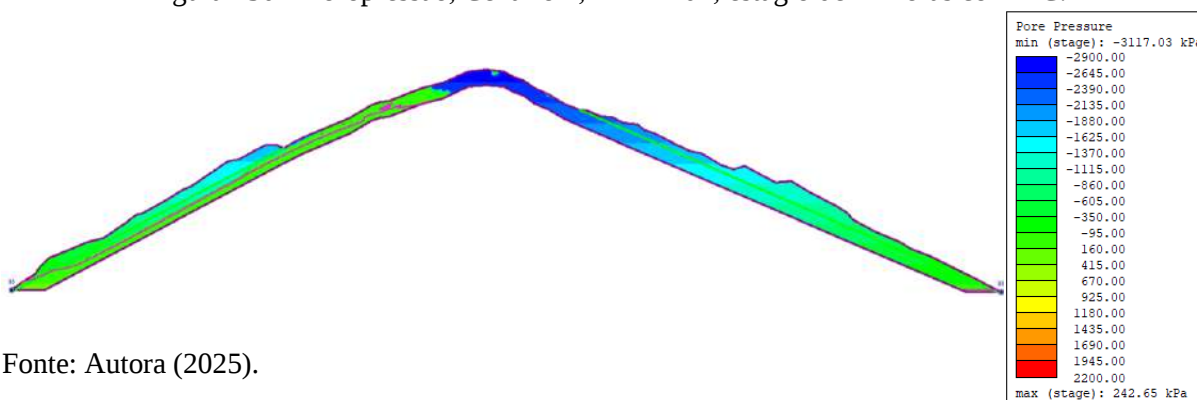
Agora são apresentados na Figura 149, Figura 150 e Figura 151, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 77 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 149 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 77 horas com NC.



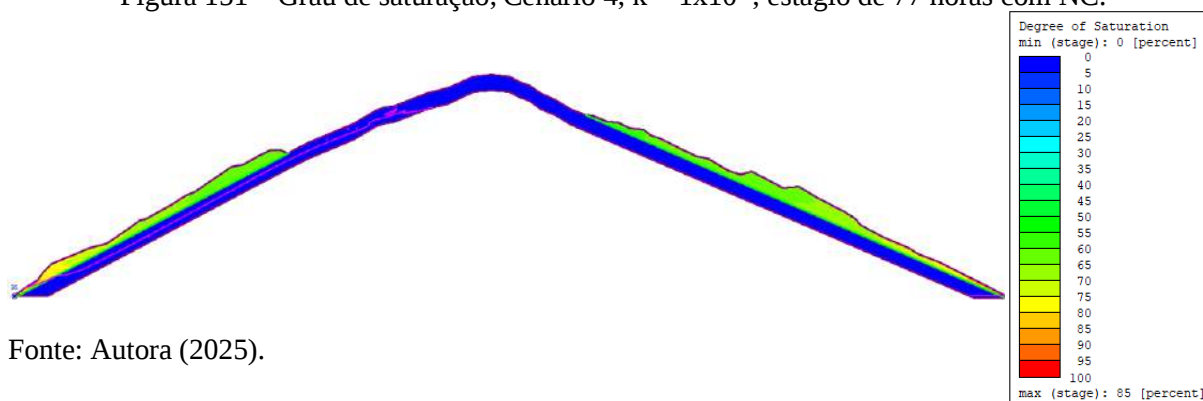
Fonte: Autora (2025).

Figura 150 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 77 horas com NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 151 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 77 horas com NC.



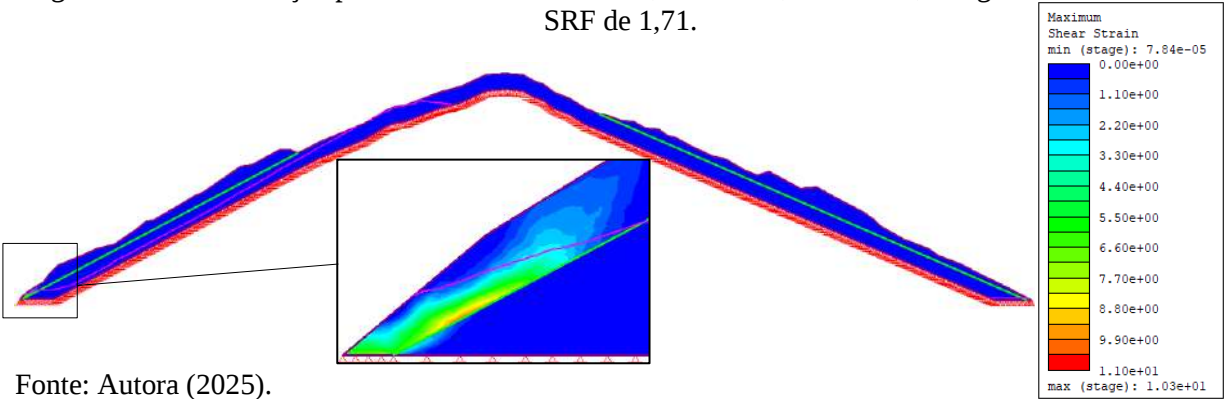
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude a máxima poropressão ficou na lateral e base do maciço. Isso aliado a não convergência do modelo, pode não ser compatível com a realidade física do modelo, indicando que o resultado provavelmente decorre de uma inconsistência numérica. Para confirmar essa hipótese, seria necessário refinar a malha na região crítica, reduzir o passo de tempo de cálculo e ajustar

as condições de contorno hidráulicas, garantindo maior estabilidade e precisão na simulação.

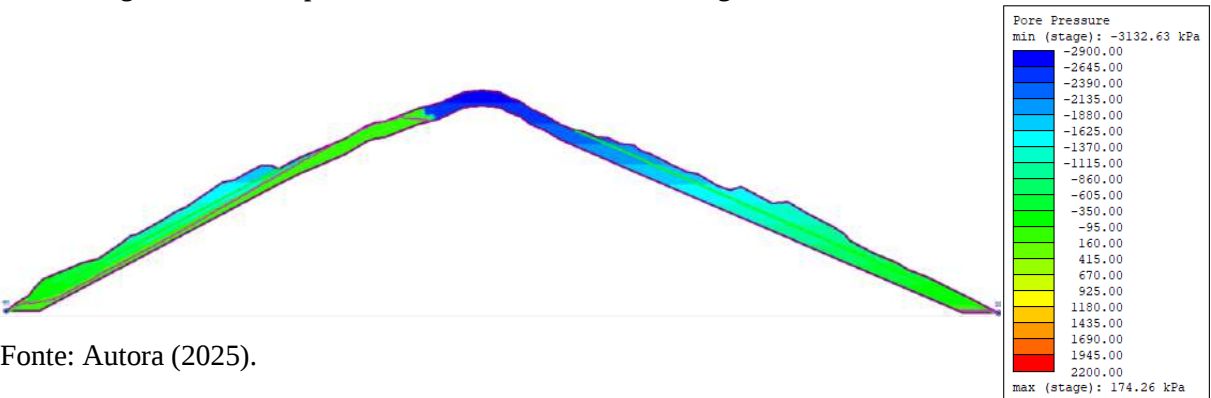
São apresentados na Figura 152, Figura 153 e Figura 154, os resultados referentes ao Cenário 5 e $k = 1 \times 10^{-2}$. A ruptura ficou entre 62 e 63 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 62 horas.

Figura 152 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 62 horas com SRF de 1,71.



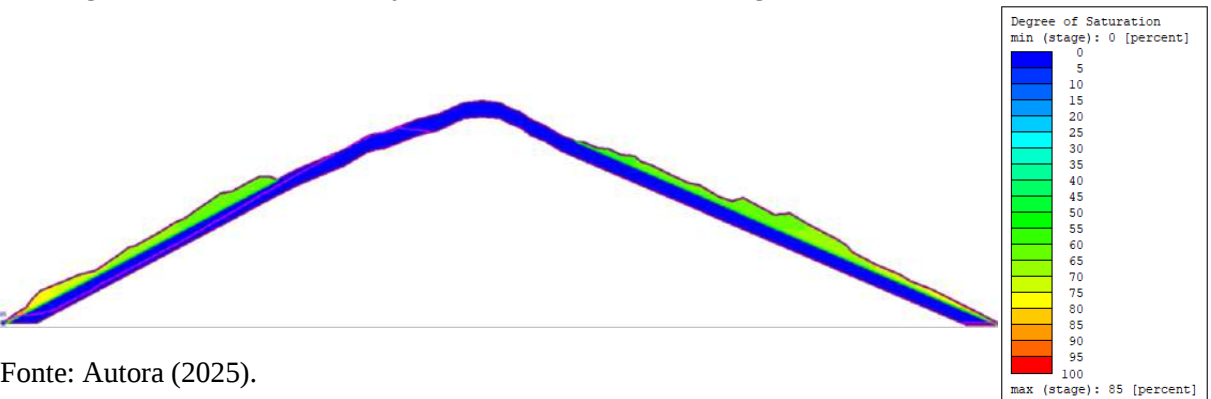
Fonte: Autora (2025).

Figura 153 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 62 horas com SRF de 1,71.



Fonte: Autora (2025).

Figura 154 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 62 horas com SRF de 1,71.



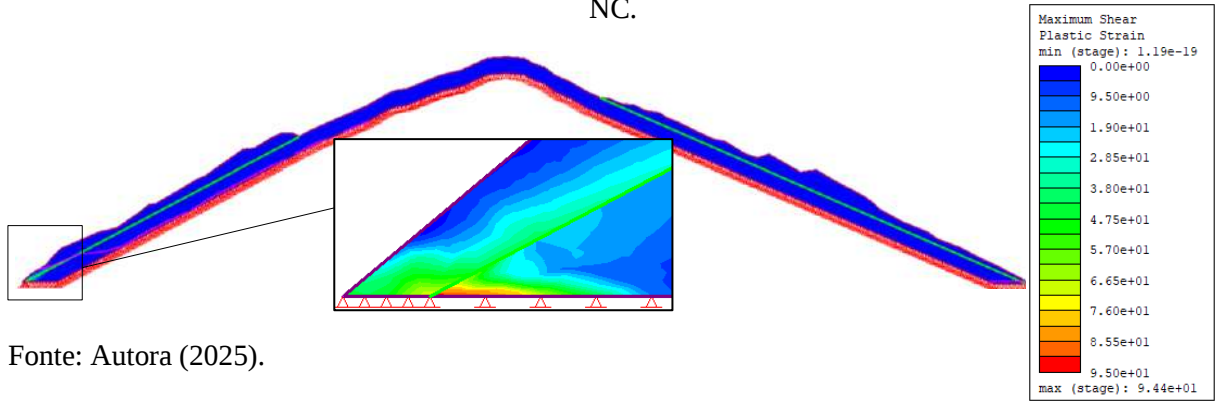
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentra-se na base do talude, enquanto a poropressão apresenta valores elevados tanto na base quanto na lateral do maciço. Essa configuração indica que o aumento da poropressão nessas regiões reduziu as tensões efetivas locais, contribuindo para a diminuição do SRF. A presença simultânea de altos valores

de poropressão e de deformação plástica na base reforça a influência do campo hidráulico sobre o comportamento mecânico do talude, favorecendo a mobilização da zona crítica de cisalhamento.

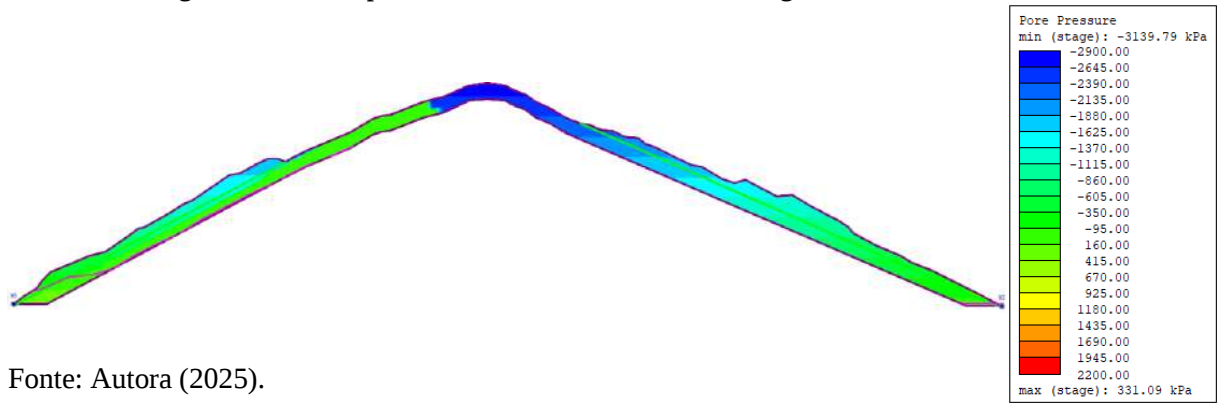
Agora são apresentados na Figura 155, Figura 156 e Figura 157, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 63 horas, o primeiro estágio com valor do SRF NC.

Figura 155 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 63 horas com NC.



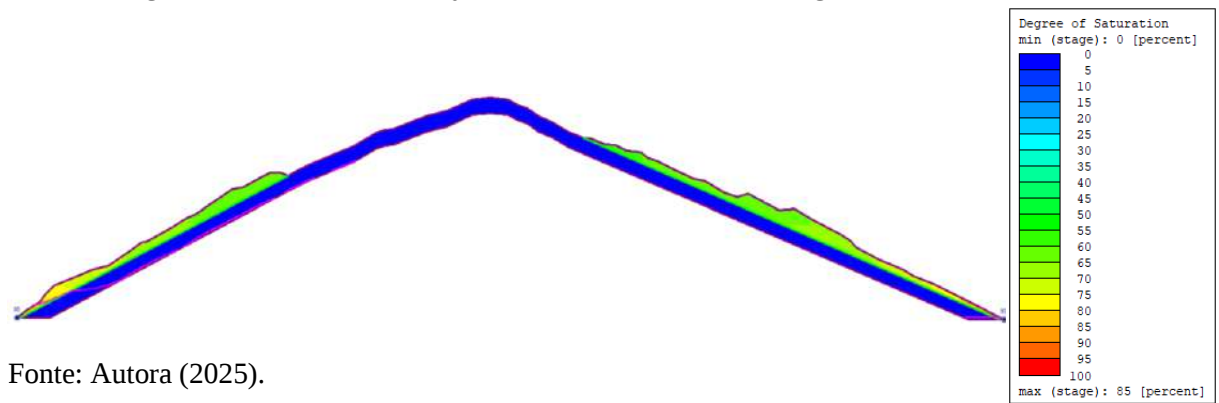
Fonte: Autora (2025).

Figura 156 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 63 horas com NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 157 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 63 horas com NC.



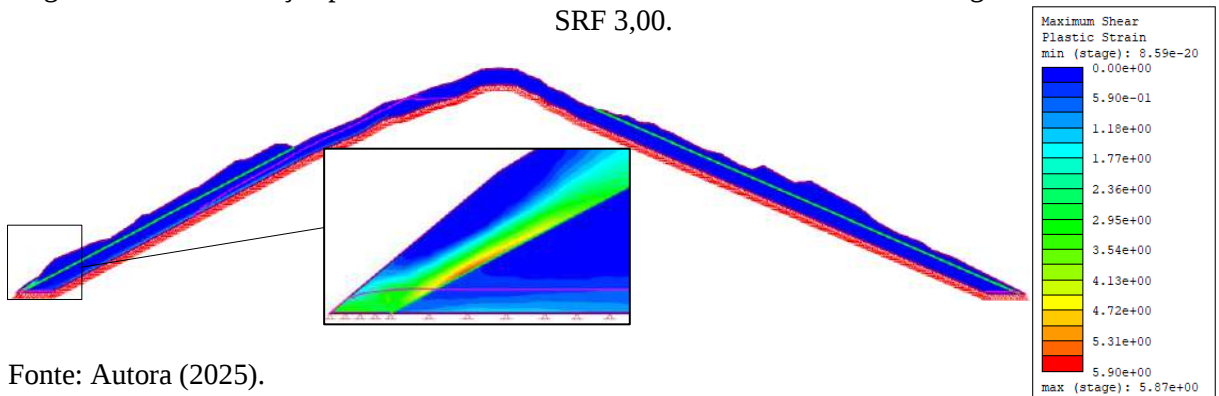
Fonte: Autora (2025).

A deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude a máxima poropressão ficou na lateral e base do maciço. Isso aliado a não convergência, pode não ser compatível com a realidade física do modelo, indicando que o resultado provavelmente decorre

de uma inconsistência numérica. Para confirmar essa hipótese, seria necessário refinar a malha na região crítica, reduzir o passo de tempo de cálculo e ajustar as condições de contorno hidráulicas, garantindo maior estabilidade e precisão na simulação.

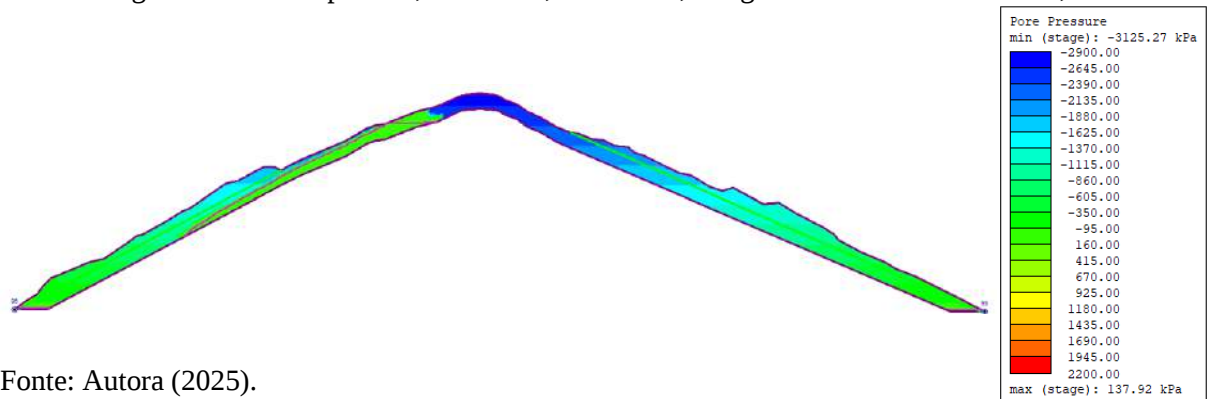
São apresentados na Figura 158, Figura 159 e Figura 160, os resultados referentes ao Cenário 6 e $k = 1 \times 10^{-2}$. A ruptura ficou entre 53 e 54 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 53 horas.

Figura 158 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 53 horas com SRF 3,00.



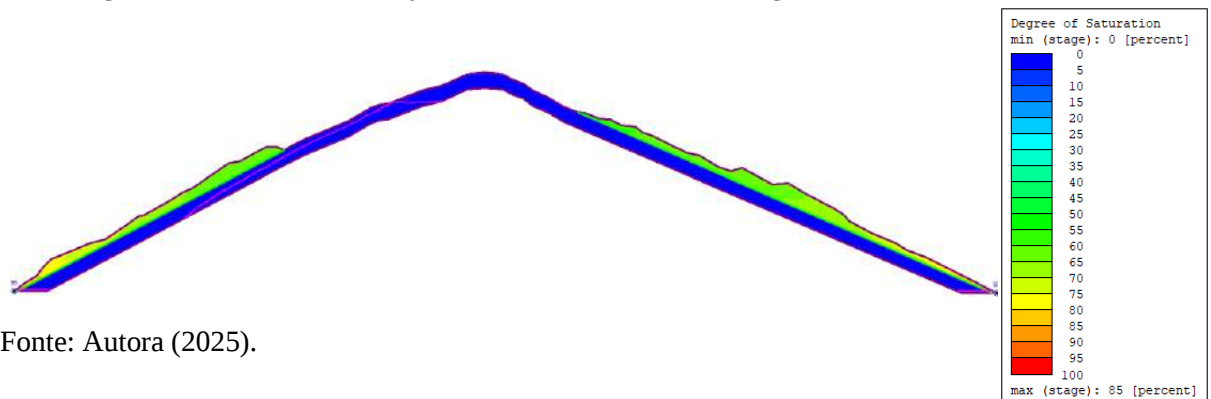
Fonte: Autora (2025).

Figura 159 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 53 horas com SRF 3,00.



Fonte: Autora (2025).

Figura 160 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 53 horas com SRF 3,00.



Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentra-se na base do talude, enquanto a poropressão apresenta valores elevados tanto na base quanto na

lateral do maciço. Essa configuração mostra que, o valor máximo encontra-se mais acima no talude. Por essa razão, o efeito da poropressão sobre a redução das tensões efetivas na zona crítica foi limitado, o que pode explicar a manutenção do SRF sem queda significativa neste estágio.

Agora são apresentados na Figura 161, Figura 162 e Figura 163, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 54 horas, o primeiro estágio com valor do SRF abaixo de 1.

Figura 161 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 54 horas com SRF de 0,78.

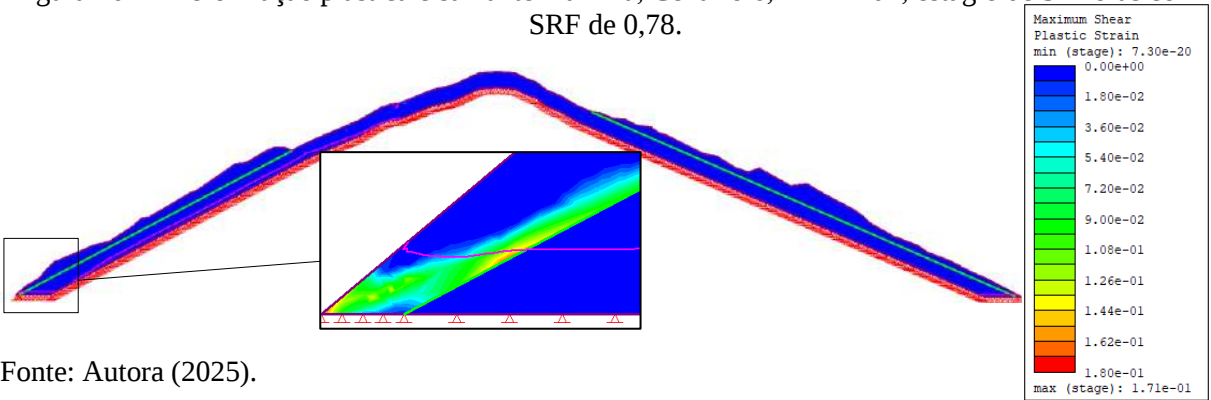


Figura 162 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 54 horas com SRF de 0,78.

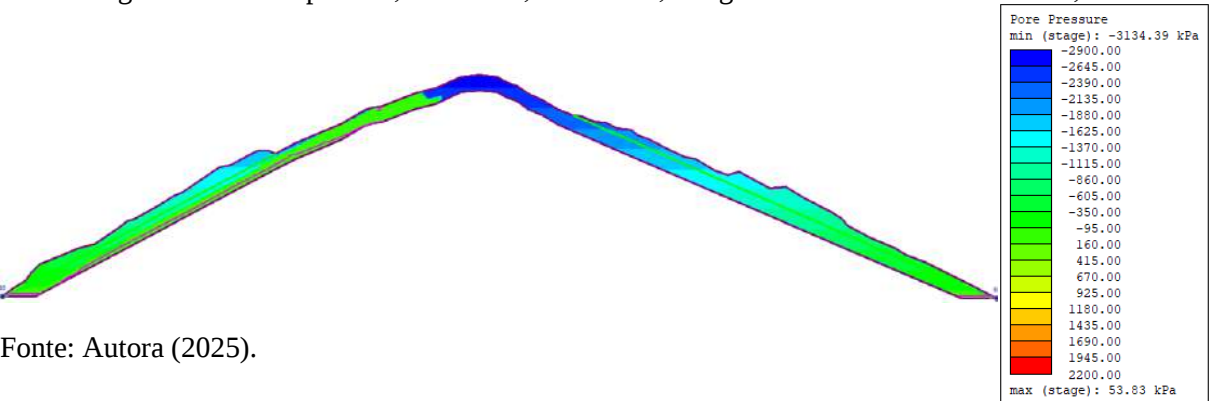
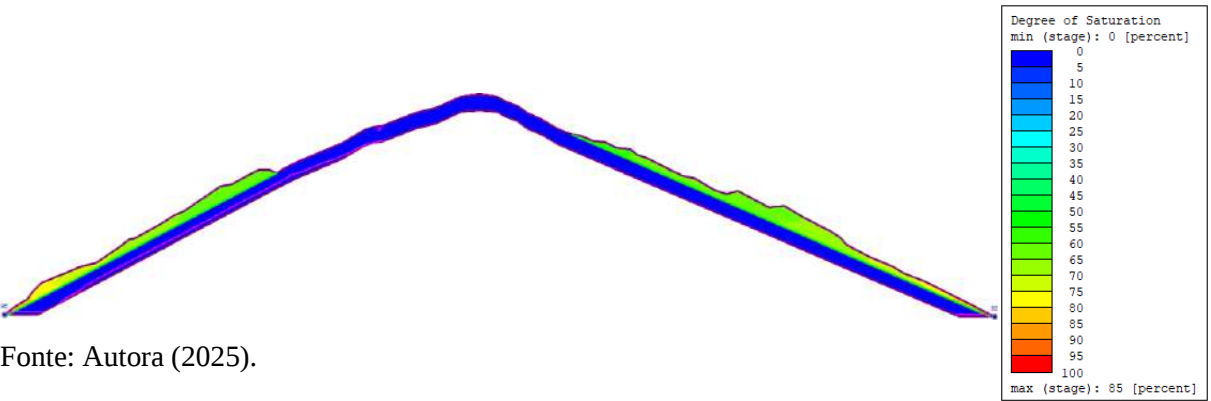


Figura 163 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 54 horas com SRF de 0,78.

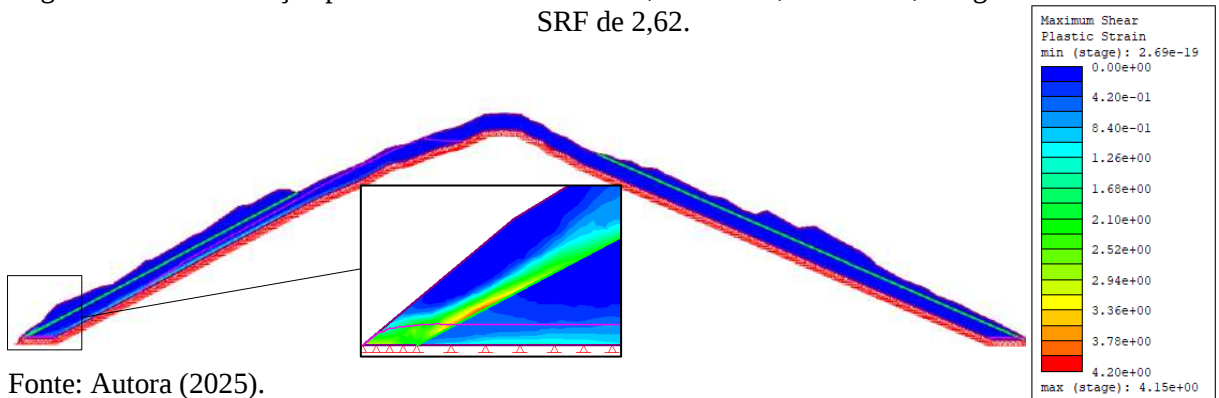


Neste estágio, observa-se que a poropressão máxima apresentou redução em relação aos instantes anteriores, sugerindo possível dissipação parcial no interior do maciço. Ainda assim,

nota-se um leve aumento dos valores na base do talude. Essa redistribuição da pressão nos poros pode ter contribuído para a queda do SRF para valores abaixo de 1.

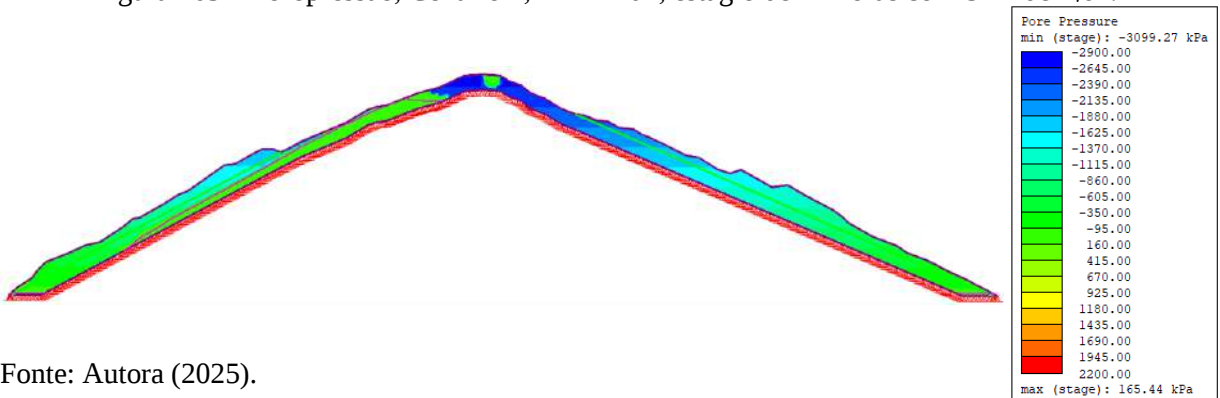
São apresentados na Figura 164, Figura 165 e Figura 166, os resultados referentes ao Cenário 7 agora para $k = 1 \times 10^{-2}$. A ruptura ficou entre 47 e 48 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 47 horas.

Figura 164 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 47 horas com SRF de 2,62.



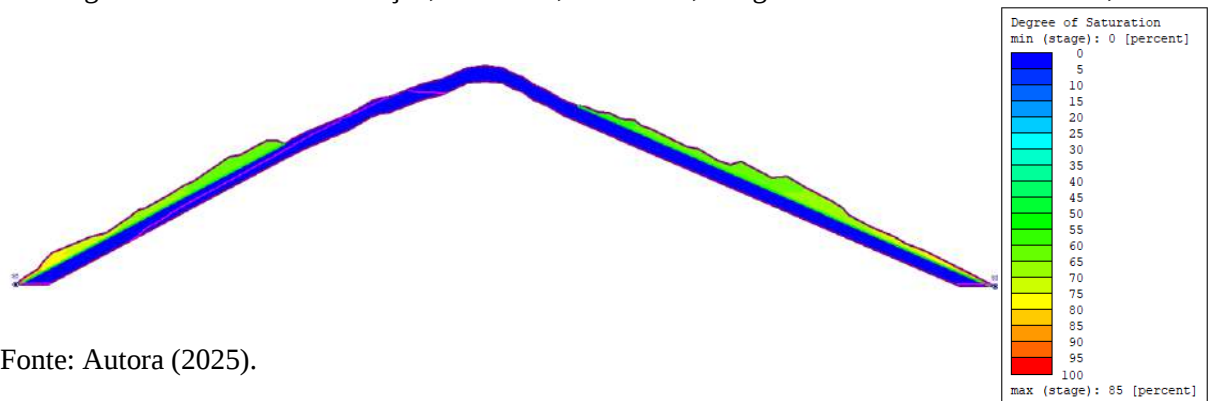
Fonte: Autora (2025).

Figura 165 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 47 horas com SRF de 2,62.



Fonte: Autora (2025).

Figura 166 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 47 horas com SRF de 2,62.



Fonte: Autora (2025).

Neste estágio, observa-se que a poropressão atingiu seu valor máximo na lateral do maciço, embora também se mantenham valores elevados na base do talude. Essa configuração indica que o aumento da poropressão ocorreu de forma distribuída, afetando tanto a lateral quanto a

zona de contato solo-rocha. A presença de altos valores de poropressão nessas regiões pode explicar a diminuição do SRF observada neste estágio da análise.

Agora são apresentados na Figura 167, Figura 168 e Figura 169, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 48 horas, o primeiro estágio com valor do SRF abaixo de 1.

Figura 167 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 48 horas com SRF de 0,11.

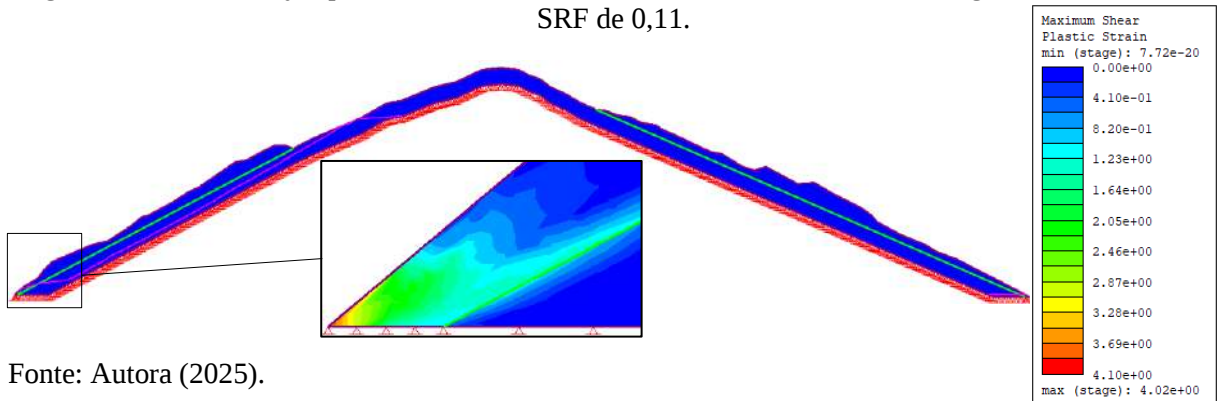


Figura 168 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 48 horas com SRF de 0,11.

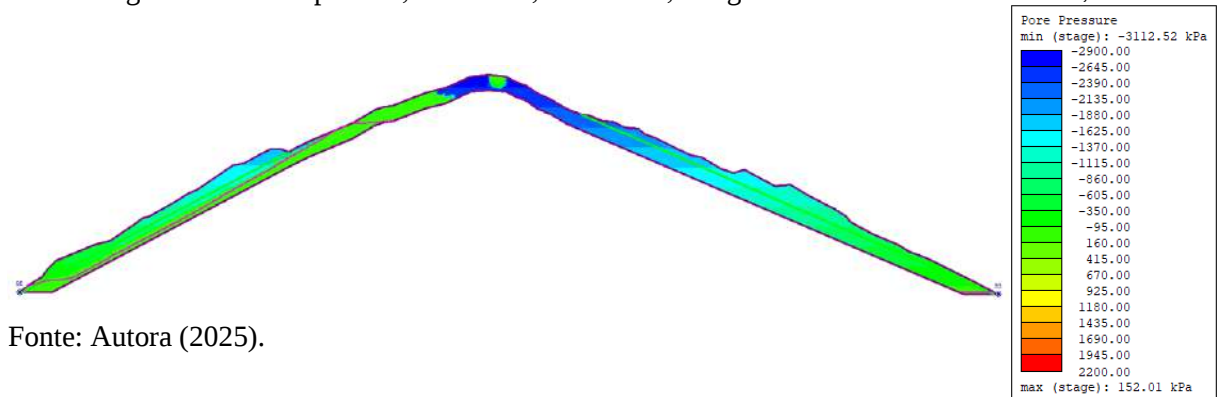
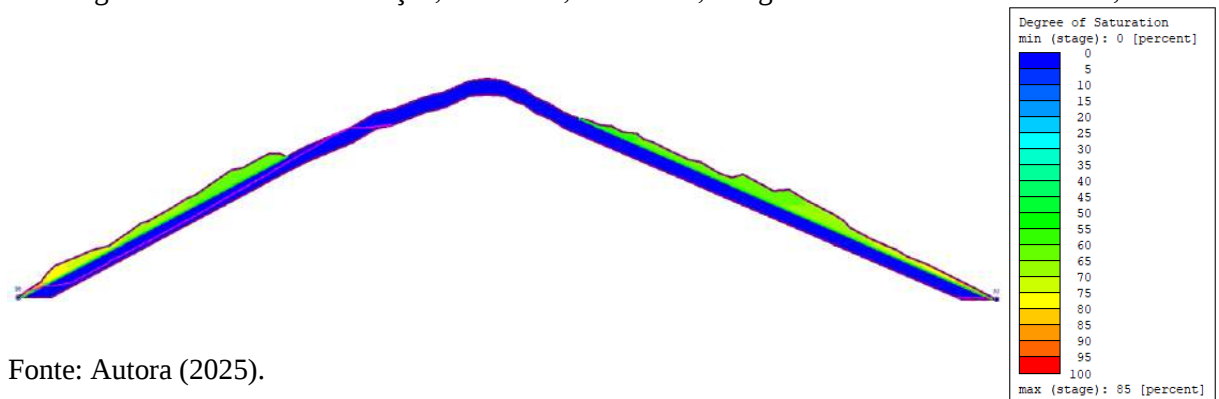


Figura 169 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-2}$, estágio de 48 horas com SRF de 0,11.



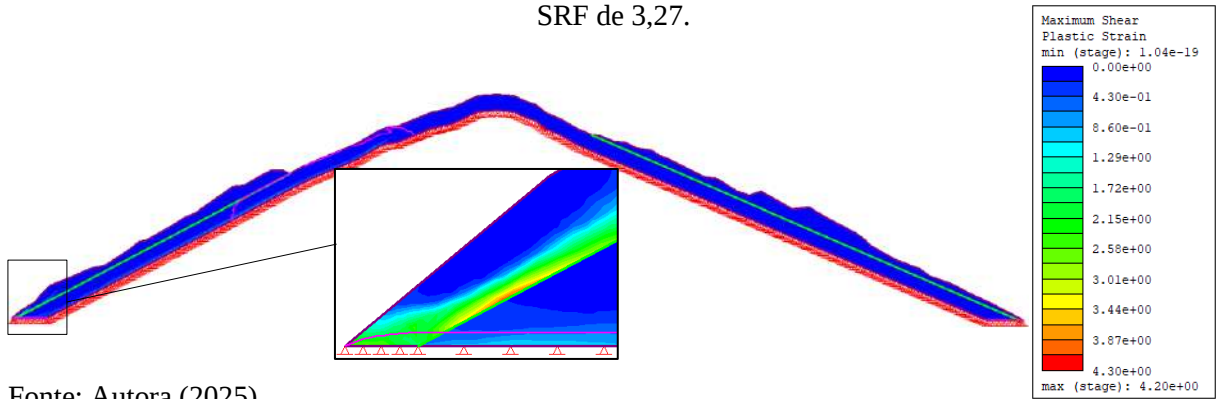
Neste estágio, observa-se que a poropressão máxima concentrou-se na lateral do maciço, enquanto valores elevados também se propagaram até a base do talude. Embora o pico de pressão não esteja localizado na zona de maior deformação plástica, a magnitude alcançada na base foi suficiente para reduzir significativamente as tensões efetivas e deflagrar a ruptura,

resultando em um SRF inferior a 1.

4.4.8 Cenário 4, 5, 6 e 7 com $k = 1 \times 10^{-1}$, $k_2/k_1 = 1$ e $k_1 = 0^\circ$

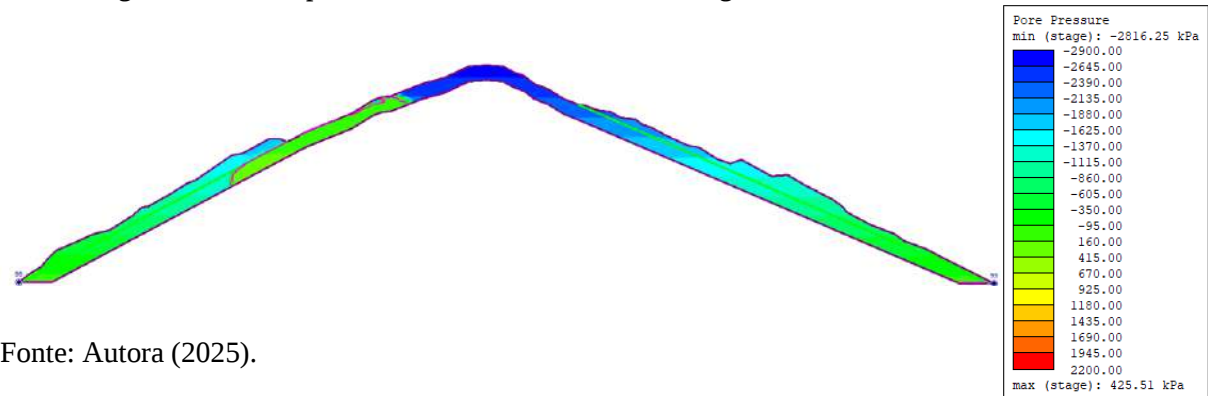
São apresentados os resultados referentes ao Cenário 4 para $k = 1 \times 10^{-1}$. A ruptura ficou entre 36 e 37 horas. Assim, inicia-se com os valores de 36 horas nas figuras 170, 171 e 172.

Figura 170 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 36 horas com SRF de 3,27.



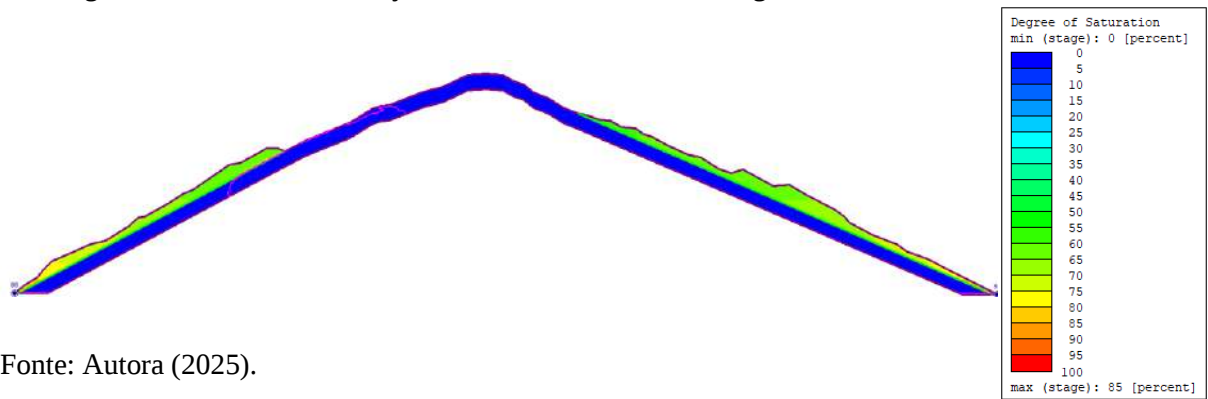
Fonte: Autora (2025).

Figura 171 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 36 horas com SRF de 3,27.



Fonte: Autora (2025).

Figura 172 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 36 horas com SRF de 3,27.



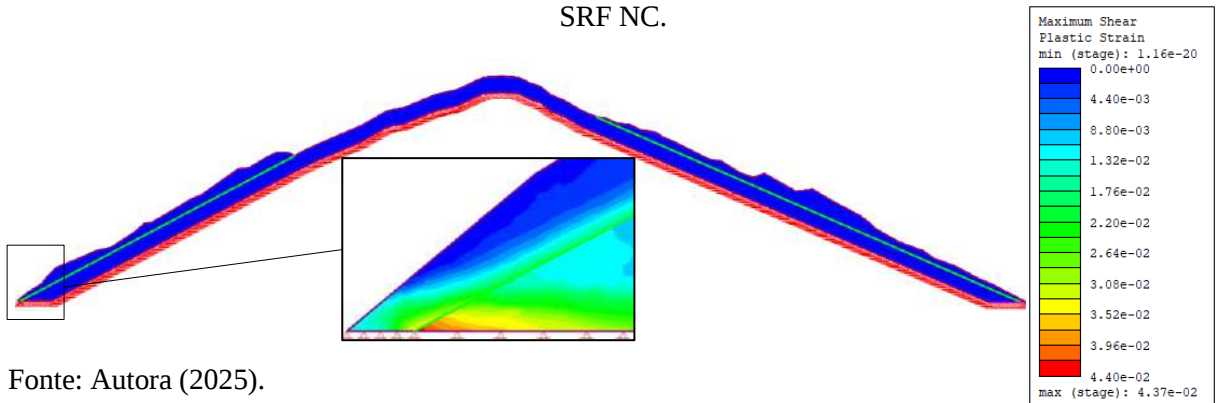
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na camada de solo imediatamente acima do maciço rochoso na base, formando uma faixa contínua ao longo da interface entre os materiais. A poropressão máxima, entretanto, ocorreu na porção superior do

talude, não coincidindo com a região de maior deformação. Essa diferença espacial entre os campos hidráulico e mecânico explica a manutenção do SRF elevado, uma vez que o aumento da poropressão ocorreu em região distinta daquela onde se concentrou o cisalhamento, não comprometendo de forma direta a estabilidade global do talude.

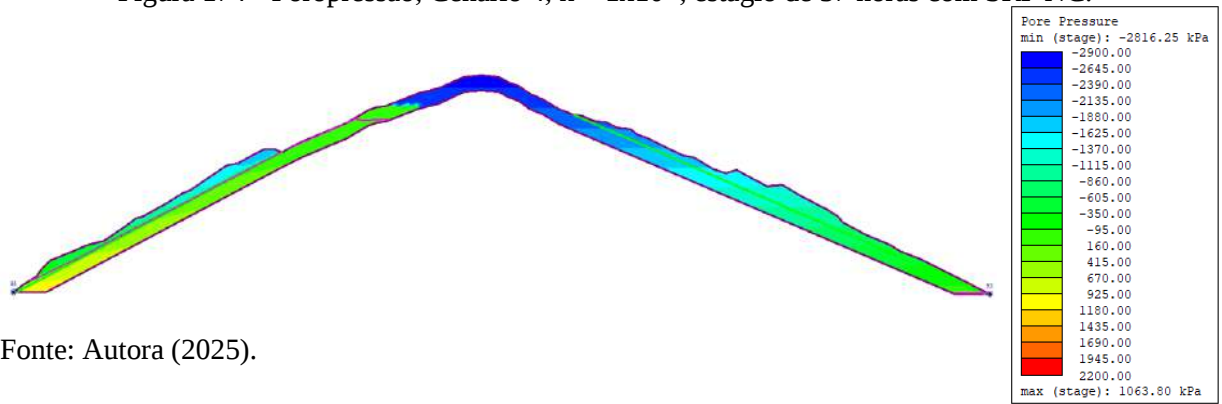
Agora são apresentados na Figura 173, Figura 174 e Figura 175, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 37 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 173 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 37 horas com SRF NC.



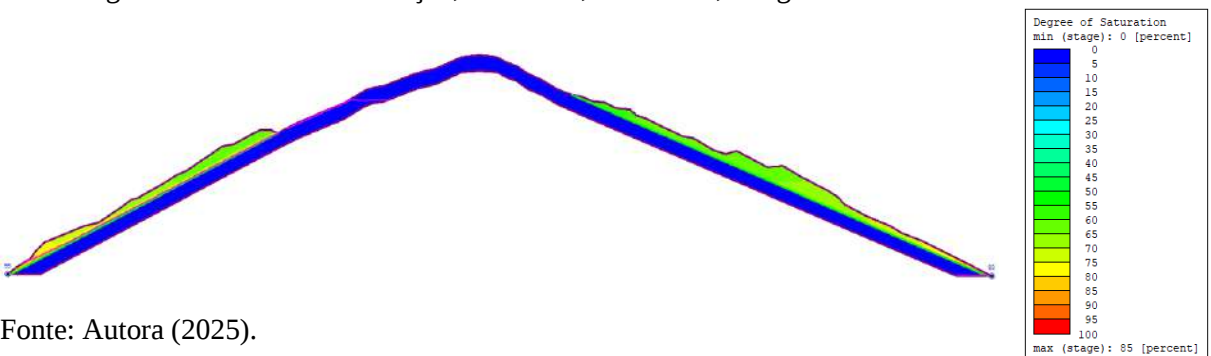
Fonte: Autora (2025).

Figura 174 – Poropressão, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 37 horas com SRF NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 175 – Grau de saturação, Cenário 4, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 37 horas com SRF NC.



Fonte: Autora (2025).

A deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se no interior do maciço rochoso, logo abaixo da interface solo-rocha. A poropressão máxima também se desenvolveu nessa região. Apesar disso, elevados valores de poropressão e a não convergência do modelo sugerem

que o resultado provavelmente decorre de uma inconsistência numérica localizada. No entanto, para confirmar essa hipótese, seria necessário refinar a malha na região crítica, reduzir o passo de tempo de cálculo e ajustar as condições de contorno hidráulicas, de modo a garantir maior estabilidade e precisão na simulação.

A seguir, são apresentados os resultados referentes ao Cenário 5 para $k = 1 \times 10^{-1}$. A ruptura ficou entre 30 e 31 horas. Inicia-se com os valores de 30 horas na figuras 176, 177 e 178.

Figura 176 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 30 horas com SRF de 3,55.

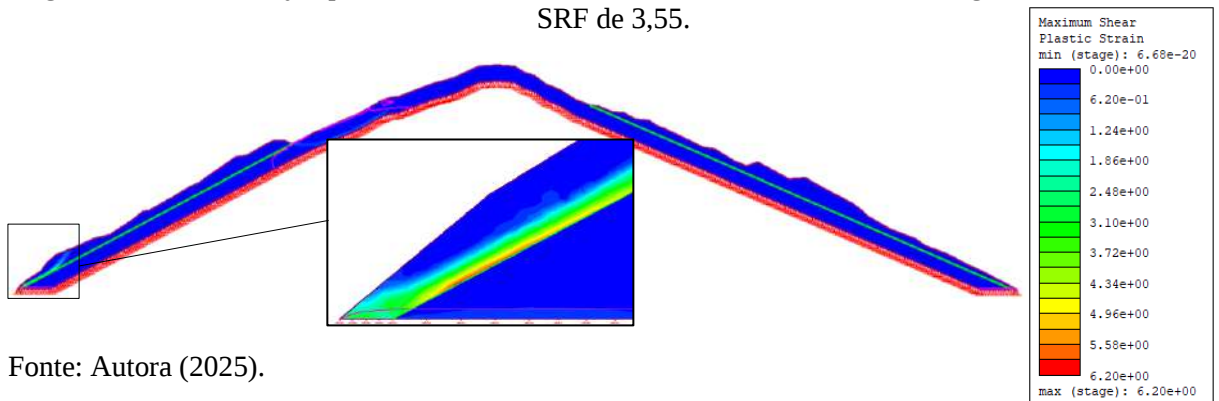


Figura 177 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 30 horas com SRF de 3,55.

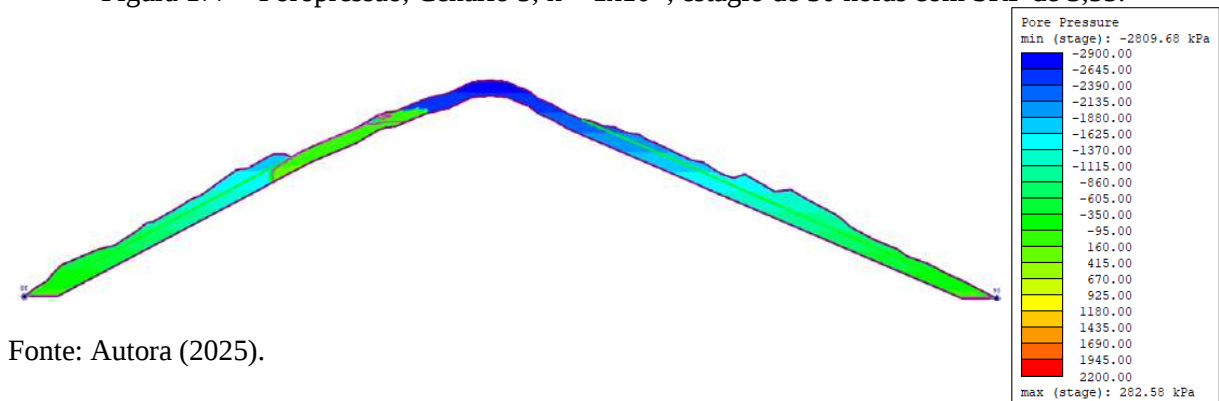
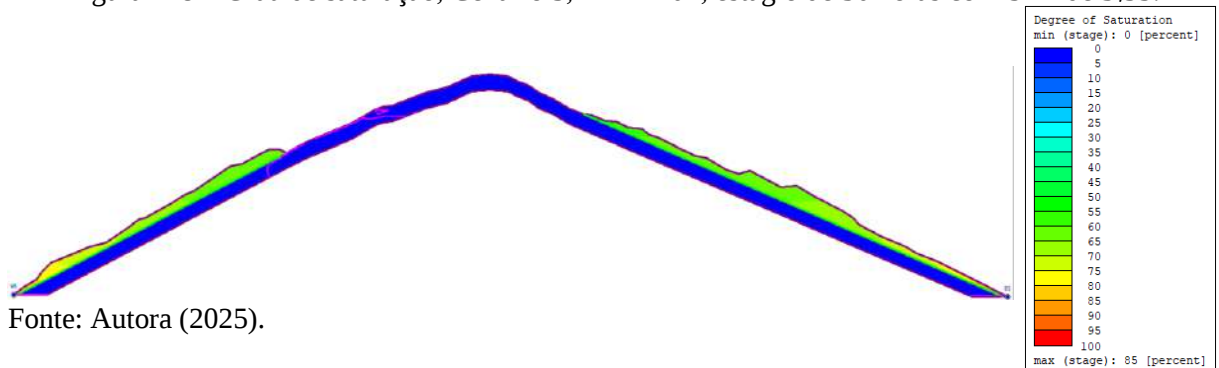


Figura 178 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 30 horas com SRF de 3,55.

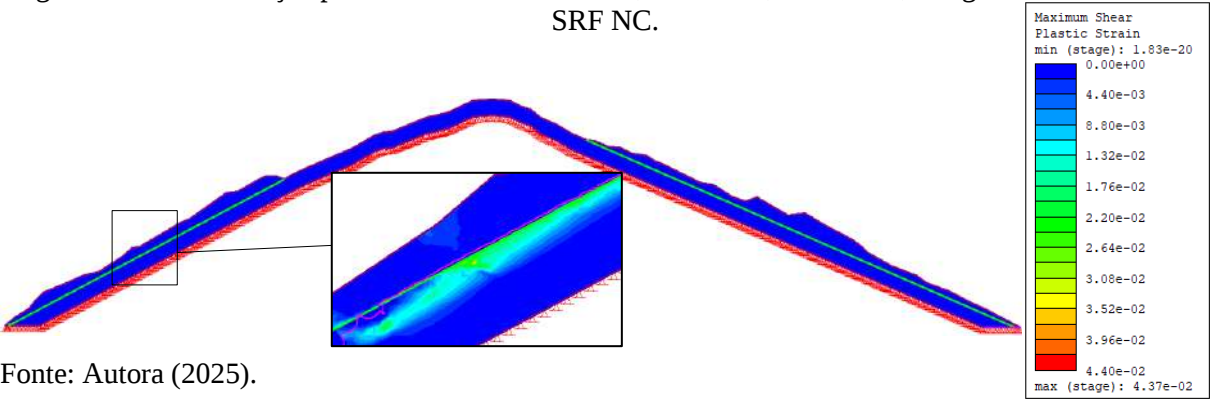


Observa-se que o local de máxima poropressão não coincide com a região de maior deformação acumulada. Essa diferença espacial entre os campos hidráulico e mecânico indica que a elevação da poropressão não foi suficiente para reduzir a resistência ao cisalhamento nas

zonas críticas do talude, o que pode explicar a manutenção de um valor elevado do SRF e, portanto, a estabilidade global do modelo.

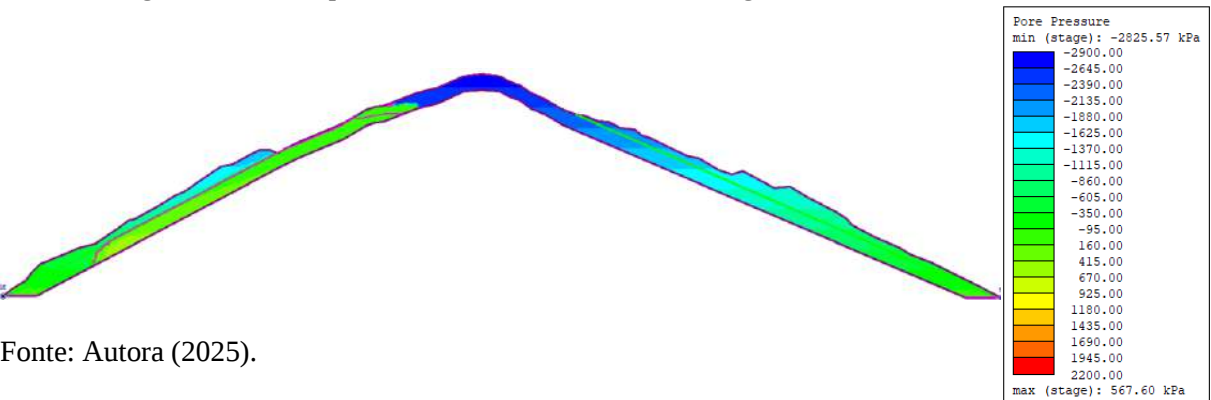
Agora são apresentados na Figura 179, Figura 180 e Figura 181, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 31 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 179 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 31 horas com SRF NC.



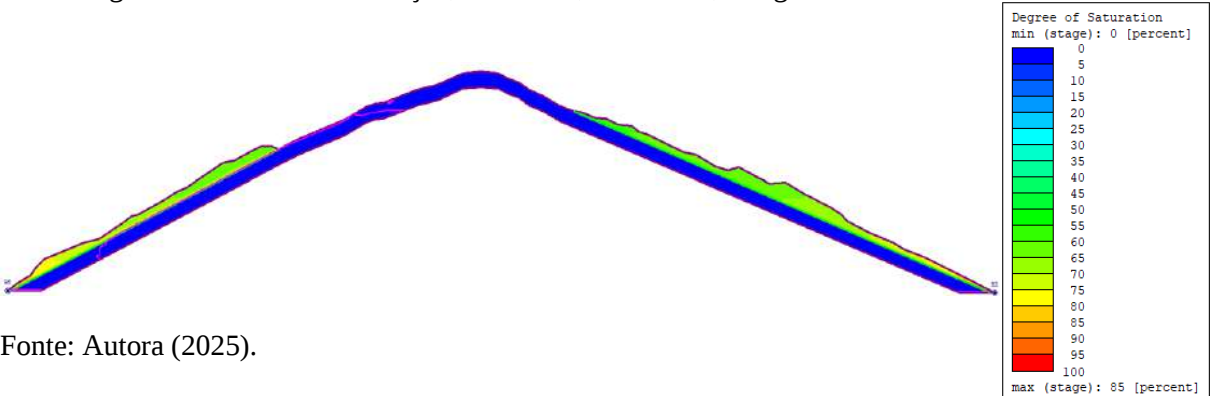
Fonte: Autora (2025).

Figura 180 – Poropressão, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 31 horas com SRF NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 181 – Grau de saturação, Cenário 5, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 31 horas com SRF NC.



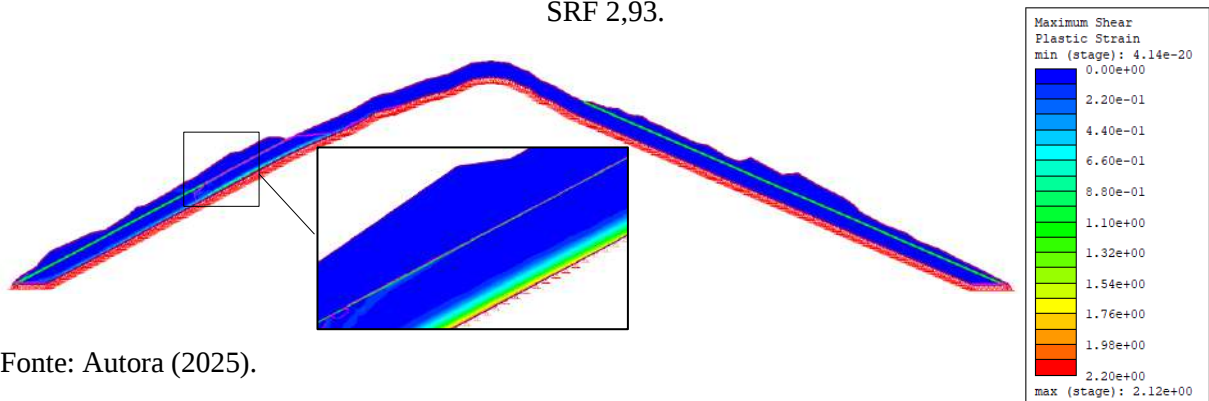
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na porção intermediária do talude. A poropressão máxima também se desenvolveu nessa região. Apesar disso, valores elevados de poropressão e a não convergência do modelo sugerem que o resultado provavelmente decorre de uma inconsistência numérica localizada. No entanto, para confirmar

essa hipótese, seria necessário refinar a malha na região crítica, reduzir o passo de tempo de cálculo e ajustar as condições de contorno hidráulicas, garantindo maior estabilidade e precisão na simulação.

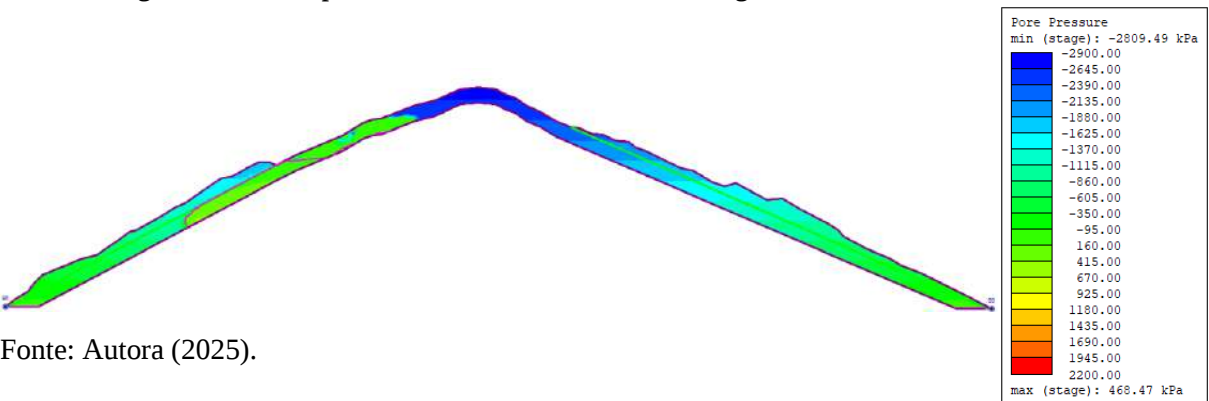
A seguir são apresentados na Figura 182, Figura 183 e Figura 184, os resultados referentes ao Cenário 6 para $k = 1 \times 10^{-1}$. A ruptura ficou entre 26 e 27 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 26 horas.

Figura 182 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 26 horas com SRF 2,93.



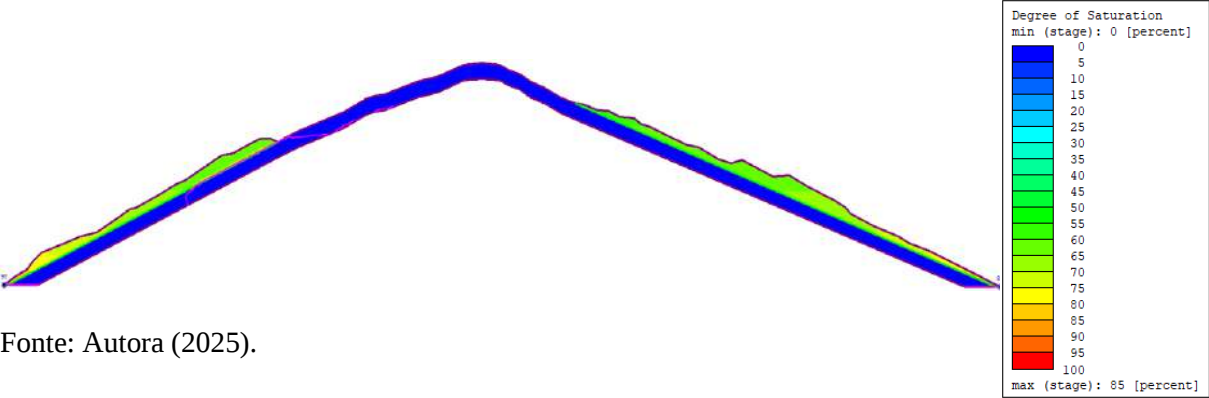
Fonte: Autora (2025).

Figura 183 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 26 horas com SRF 2,93.



Fonte: Autora (2025).

Figura 184 - Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 26 horas com SRF 2,93.



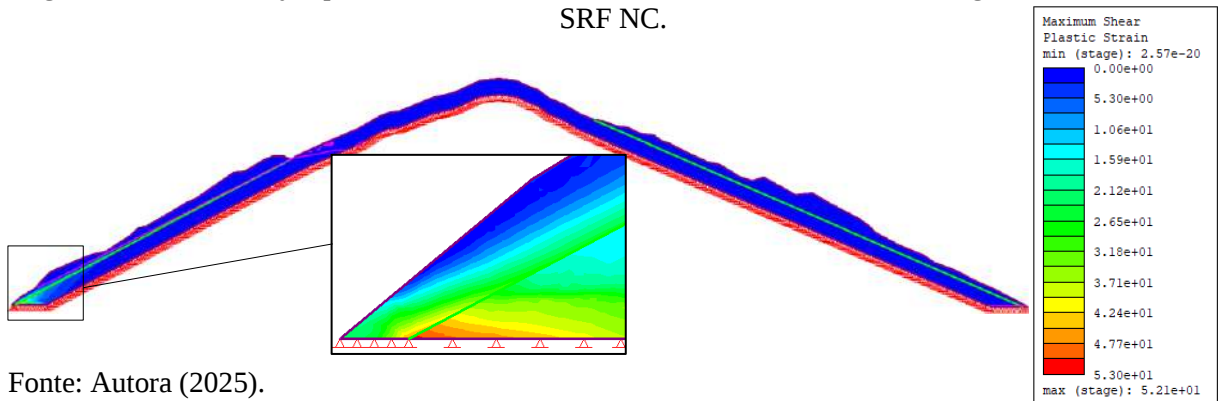
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a poropressão mais elevada concentrou-se no interior do maciço, sem continuidade desse acúmulo até a superfície. No entanto, essa elevação não foi suficiente para gerar redução expressiva das tensões efetivas nem para mobilizar uma superfície de

cisalhamento contínua. Dessa forma, o talude manteve sua resistência global, o que justifica o valor elevado do SRF e a ausência de indícios de ruptura generalizada. Para confirmar essa hipótese, seria necessário refinar a malha na região crítica, reduzir o passo de tempo de cálculo e ajustar as condições de contorno hidráulicas, garantindo maior estabilidade e precisão na simulação.

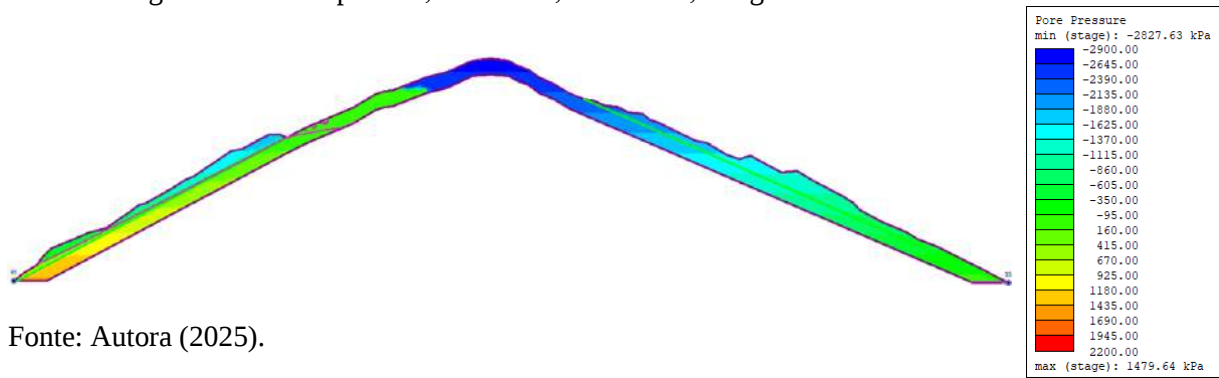
Agora são apresentados na Figura 185, Figura 186 e Figura 187, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 27 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 185 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 27 horas com SRF NC.



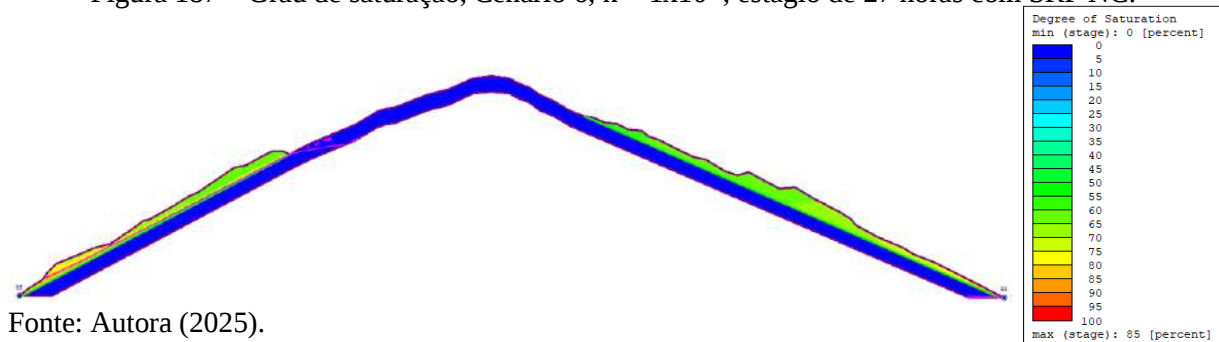
Fonte: Autora (2025).

Figura 186 – Poropressão, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 27 horas com SRF NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 187 – Grau de saturação, Cenário 6, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 27 horas com SRF NC.



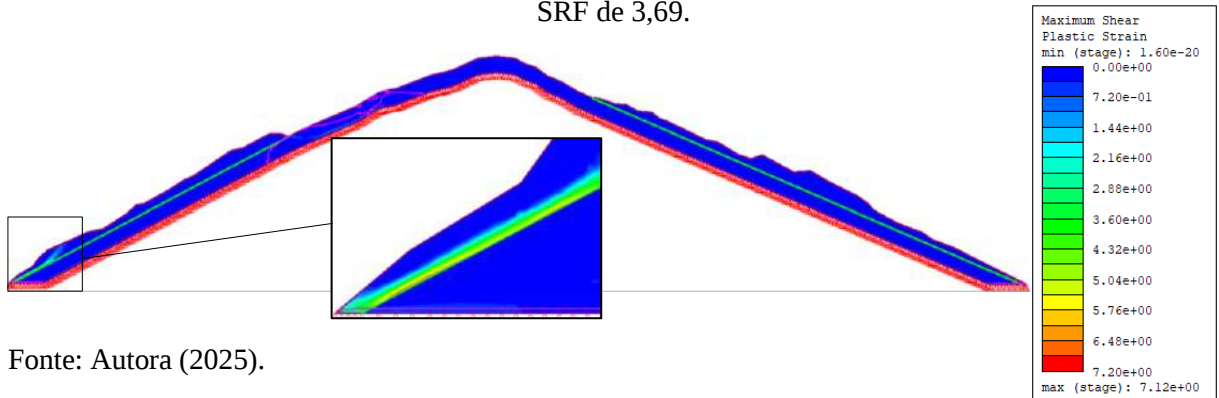
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a deformação plástica cisalhante máxima concentrou-se na base do talude, na mesma região onde foi registrada a poropressão mais elevada. Esse valor, contudo,

pode não ser compatível com a realidade física do modelo, indicando que o resultado provavelmente decorre de uma inconsistência numérica. Para confirmar essa hipótese, seria necessário refinar a malha na região crítica, reduzir o passo de tempo de cálculo e ajustar as condições de contorno hidráulicas, garantindo maior estabilidade e precisão na simulação.

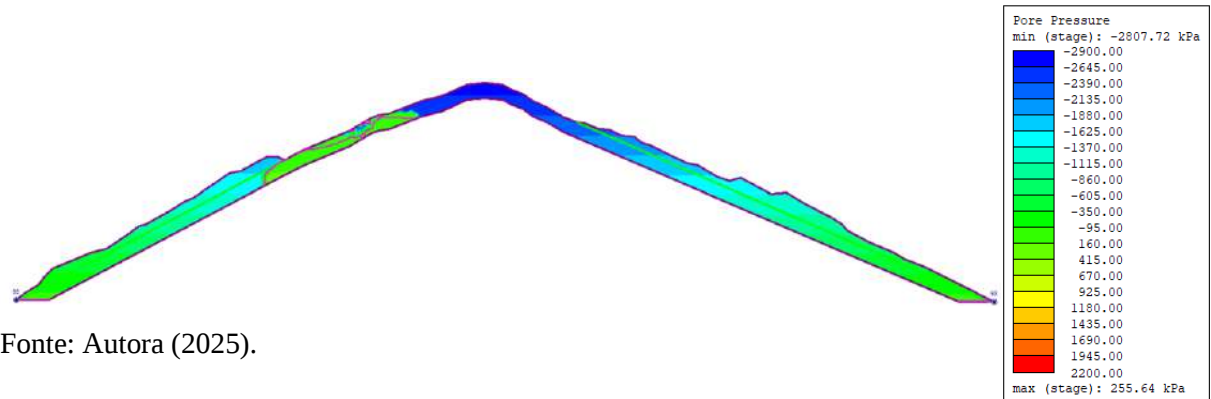
A seguir, são apresentados os resultados referentes ao Cenário 7 para $k = 1 \times 10^{-1}$. A ruptura ficou entre 24 e 25 horas. Portanto, inicia-se com os valores de 24 horas nas figuras 188, 189 e 190.

Figura 188 – Deformação plástica Cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 24 horas com SRF de 3,69.



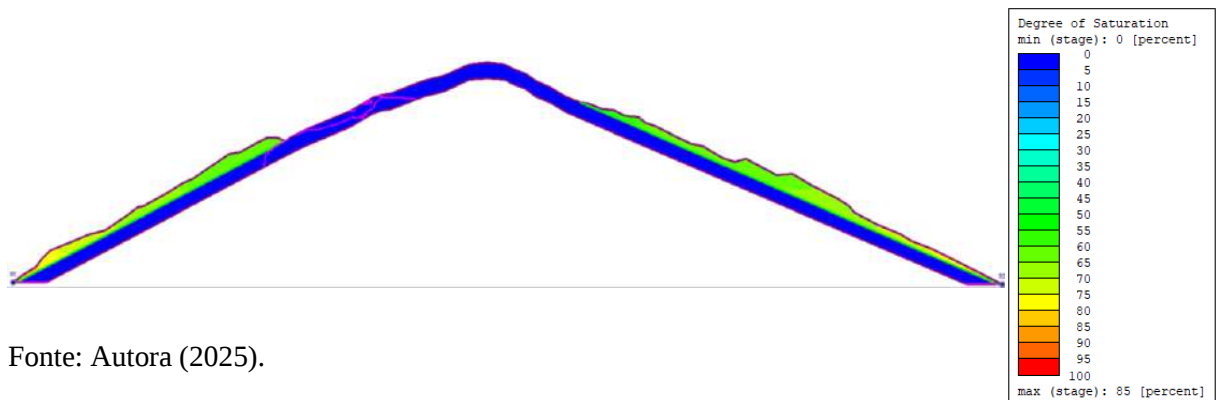
Fonte: Autora (2025).

Figura 189 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 24 horas com SRF de 3,69.



Fonte: Autora (2025).

Figura 190 - Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 24 horas com SRF de 3,69.



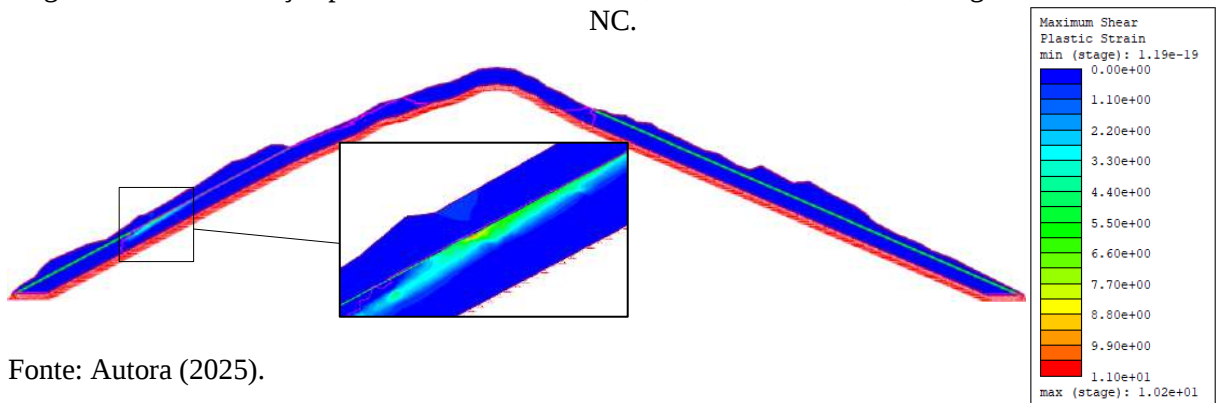
Fonte: Autora (2025).

Observa-se que o local de máxima poropressão não coincide com a região de maior

deformação acumulada. Essa diferença espacial entre os campos hidráulico e mecânico indica que a elevação da poropressão não foi suficiente para reduzir a resistência ao cisalhamento nas zonas críticas do talude, o que pode explicar a manutenção de um valor elevado do SRF e, portanto, a estabilidade global do modelo.

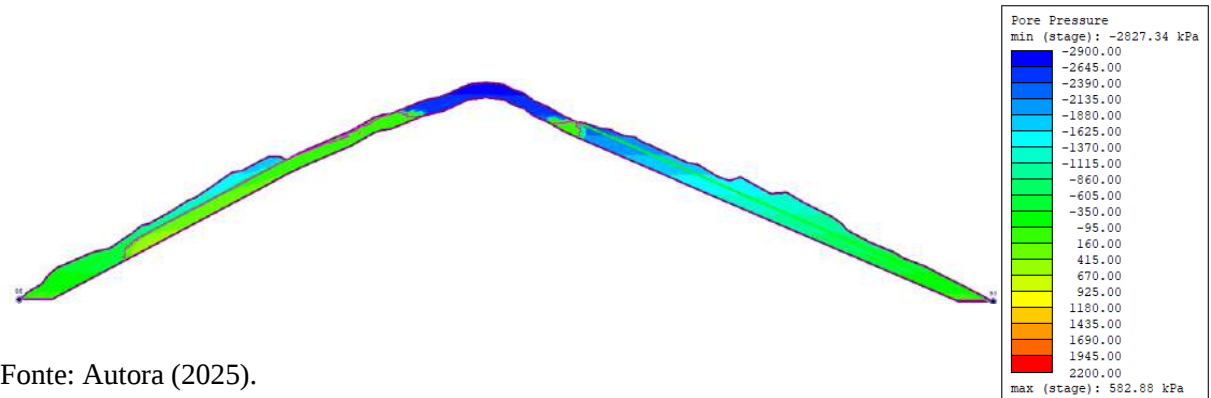
Agora são apresentados na Figura 191, Figura 192 e Figura 193, os gráficos referentes ao próximo estágio, de 25 horas, o primeiro estágio com não convergência (NC).

Figura 191 – Deformação plástica cisalhante máxima, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 25 horas com NC.



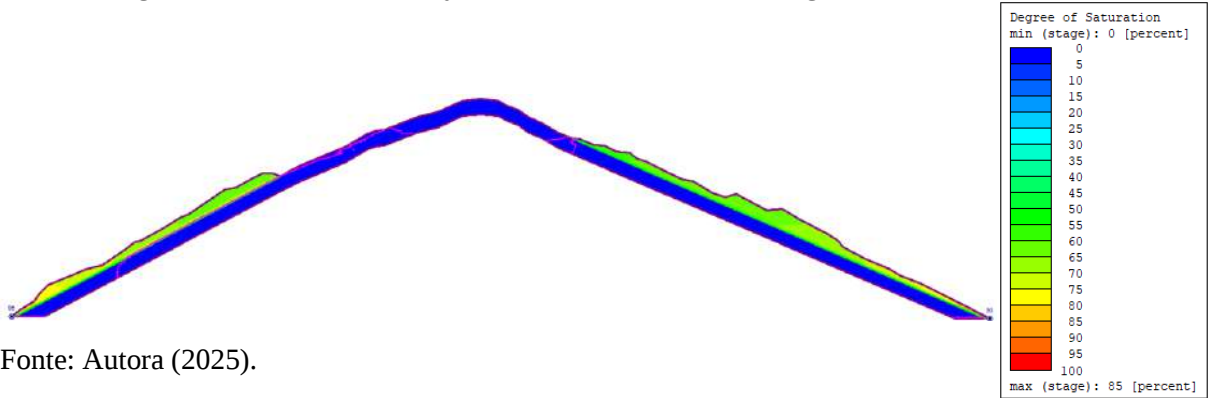
Fonte: Autora (2025).

Figura 192 – Poropressão, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 25 horas com NC.



Fonte: Autora (2025).

Figura 193 – Grau de saturação, Cenário 7, $k = 1 \times 10^{-1}$, estágio de 25 horas com NC.



Fonte: Autora (2025).

Observa-se que tanto a poropressão máxima quanto a deformação plástica cisalhante concentraram-se no interior do maciço, indicando possível acúmulo de água, o que pode ter gerado aumento localizado da poropressão e uma possível inconsistência numérica. Para

confirmar essa hipótese, seria necessário refinar a malha na região crítica e reduzir o passo de tempo de cálculo, de modo a aprimorar a estabilidade e a precisão da simulação.

5 CONCLUSÕES

5.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O modelo geométrico adotado demonstrou adequação e coerência com a configuração da encosta do local estudado em parte das simulações. A partir dessa base, os resultados obtidos permitiram avaliar de forma abrangente os efeitos da precipitação acumulada, da condutividade hidráulica do maciço rochoso e da anisotropia sobre a estabilidade de taludes não saturados, atendendo aos objetivos propostos, inclusive ao evidenciar a sensibilidade do modelo e as limitações observadas em determinadas condições de simulação.

A avaliação da permeabilidade do maciço rochoso indicou que, nos cenários com maiores valores de condutividade hidráulica, a resposta do modelo foi mais crítica, com elevações abruptas de poropressão que, em alguns casos, sugerem incrementos pouco realistas diante das condições simuladas. Em contraste, para as menores permeabilidades, a variação de poropressão apresentou comportamento mais coerente e regular ao longo do tempo, seguindo um padrão consistente entre os estágios e contribuindo para uma representação mais estável da resposta do talude às condições de chuva.

Em relação aos valores SRF, em nenhum dos cenários o modelo permaneceu estável até as 96 horas simuladas, seja porque o valor ficou menor que 1,0 antes do término do período, seja porque o modelo deixou de convergir à medida que se aproximava da condição de ruptura. Em parte dos casos, a não convergência pode estar associada a inconsistências numéricas em estados muito críticos. Nos demais, o comportamento é compatível com uma instabilidade física do talude, na medida em que o processo iterativo de cálculo deixa de encontrar um estado de equilíbrio para os níveis de redução de resistência aplicados, indicando que o sistema não é mais capaz de restabelecer uma configuração estável dentro do método de SSR.

A estabilidade da encosta foi controlada principalmente pela chuva antecedente e pelo acúmulo efetivo até o instante crítico, e não apenas pela ocorrência de picos tardios de precipitação. Assim, as diferenças observadas no momento de ruptura refletem a distribuição temporal da chuva e a janela de maior sensibilidade do sistema, mantendo coerência com os acumulados que efetivamente atuaram na perda de estabilidade. No que se refere à comparação com dados probabilísticos, não foi possível estabelecer uma correspondência direta, em termos de ocorrência ou não de ruptura, com os limiares propostos por Gonzalez *et al.* (2022), uma vez

que todos os modelos atingiram condição de instabilidade dentro das 96 horas simuladas; ainda assim, a análise dos momentos de ruptura permitiu identificar uma relação compatível com a hierarquia de suscetibilidade indicada pelos autores, uma vez que, nas simulações em que a tendência foi mais nítida, cenários associados a maior probabilidade de ocorrência apresentaram ruptura mais precoce.

As análises numéricas evidenciaram ainda a forte interdependência entre os campos hidráulico e mecânico, demonstrando que o aumento da poropressão decorrente da infiltração foi o principal fator responsável pela redução das tensões efetivas e, consequentemente, pela perda de estabilidade dos taludes simulados. O comportamento observado confirma o papel da interface solo-rocha na base como zona crítica de concentração de esforços cisalhantes, onde se iniciam e se propagam as rupturas.

A evolução temporal dos resultados demonstrou que mesmo pequenos incrementos de poropressão, sobretudo em estágios críticos nas zonas de deformação máxima, foram suficientes para deflagrar a instabilidade, evidenciando a alta sensibilidade do sistema às variações hidráulicas. Em contrapartida, quando os picos de poropressão ocorreram em regiões distintas dessas zonas, o SRF manteve-se elevado, indicando que a instabilidade somente se desenvolve de forma significativa quando há acoplamento direto entre os campos hidráulico e mecânico. Esses resultados confirmam a relevância da interação entre fluxo e resistência ao cisalhamento como fator decisivo na evolução das rupturas em taludes sob condições transientes de infiltração.

De forma geral, conclui-se que a estabilidade da encosta foi controlada principalmente pela chuva antecedente e pelo acúmulo efetivo até o momento crítico, e não apenas pela ocorrência de picos tardios de precipitação. Assim, diferenças no instante de ruptura refletem a distribuição temporal da chuva e a janela em que o sistema se torna mais sensível, mantendo coerência com os acumulados que efetivamente atuaram na perda de estabilidade.

Em relação à anisotropia de permeabilidade, nos cenários com menor intensidade de chuva inicial e maior quantidade na fase final (1, 2 e 3) observaram-se pequenas variações no momento de ruptura entre as diferentes direções de permeabilidade, o que pode indicar uma tendência preliminar de influência da orientação preferencial de fluxo. Por outro lado, nos cenários 4, 5, 6 e 7 essas diferenças praticamente não se manifestaram, sugerindo que, sob condições de maior aporte hídrico, o efeito da anisotropia torna-se menos evidente frente ao papel dominante do volume infiltrado. Embora o número reduzido de testes limite a robustez das comparações e não permita quantificar de forma definitiva o impacto da anisotropia hidráulica, os padrões registrados nos cenários de menor chuva constituem um indicativo

relevante de que a orientação de permeabilidade pode exercer algum grau de influência, configurando um ponto consistente a ser aprofundado em estudos futuros.

Por fim, a metodologia baseada no SRF acoplado à análise transiente de fluxo mostrou-se conceitualmente adequada para investigar taludes não saturados. Apesar de alguns resultados apresentarem possíveis inconsistências numéricas, especialmente nos estágios finais das simulações mais críticas, as respostas obtidas apresentaram boa coerência física nos casos em que as simulações convergiram adequadamente e se alinham ao comportamento observado em encostas típicas de Petrópolis. Dessa forma, o estudo contribui para o entendimento dos mecanismos de instabilidade induzidos por infiltração em solos residuais e fornece subsídios relevantes para análises futuras em contextos semelhantes.

5.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A representatividade do modelo geológico constitui uma das limitações deste estudo, uma vez que os parâmetros geotécnicos empregados foram definidos com base em valores médios da literatura e em estudos regionais. Embora esses dados permitam reproduzir o comportamento típico das encostas de Petrópolis, não refletem a heterogeneidade espacial real dos solos residuais e do maciço rochoso do Monte Florido.

Em relação ao comportamento do solo não saturado, embora o modelo utilize formulações adequadas para a curva de retenção e a permeabilidade não saturada, a curva granulométrica foi obtida de estudos anteriores, podendo não reproduzir com precisão o comportamento hidráulico local de cenários mais críticos, especialmente nas zonas de transição entre o solo e a rocha.

Do ponto de vista numérico, a ocorrência de não convergência (NC) em alguns estágios pode indicar limitações associadas à discretização da malha, ao passo de tempo e aos critérios de convergência. Ao longo do estudo, foram testadas diferentes configurações de malha, reduções de passo de tempo e ajustes nos parâmetros de convergência, o que mitigou parte das instabilidades, mas não foi suficiente para eliminá-las em todos os cenários. Em parte, essas limitações refletem inconsistências numéricas inerentes ao método SSR, que podem resultar em valores localmente superestimados de poropressão ou deformação plástica, evidenciando a necessidade de investigações numéricas mais aprofundadas para representar com maior fidelidade o comportamento do sistema.

Por fim, quanto à interpretação física das NCs, reconhece-se que algumas delas podem representar o colapso físico do sistema, mas sua comprovação depende de calibração com dados experimentais ou de campo, não contemplados neste trabalho. Dessa forma, os resultados apresentados devem ser interpretados como indicativos e não absolutos, servindo como

referência para a compreensão das tendências hidromecânicas e para o aperfeiçoamento de futuras simulações.

5.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O aprimoramento da caracterização geotécnica é um passo essencial para o avanço deste tipo de análise. Recomenda-se a realização de ensaios laboratoriais e de campo específicos para determinar com maior precisão os parâmetros de resistência, deformabilidade e condutividade hidráulica dos materiais locais. A obtenção de curvas características de retenção de água (SWCC) e curvas de permeabilidade não saturada diretamente em amostras da área de estudo possibilitaria uma calibração mais representativa do modelo, refletindo melhor o comportamento real dos solos e do maciço rochoso.

Sugere-se também a integração entre as simulações numéricas e dados de campo, por meio do uso de monitoramentos pluviométricos, piezométricos e de deslocamento, a fim de validar as respostas obtidas numericamente e refinar os critérios de identificação do instante crítico de ruptura. Nessa perspectiva, a comparação dos resultados do SSR com métodos tradicionais de equilíbrio limite poderia fornecer uma referência adicional para o fator de segurança, especialmente nos estágios em que ocorre NC, auxiliando na distinção entre instabilidades físicas e limitações numéricas do modelo.

No que se refere aos cenários de precipitação, recomenda-se ampliar o estudo para diferentes distribuições de intensidade, duração e frequência das chuvas, incluindo eventos extremos e ciclos sucessivos de precipitação e secagem, de modo a compreender o efeito cumulativo da infiltração e da poropressão sobre a estabilidade.

Outro ponto de interesse é o estudo da resposta de longo prazo e dos cenários pós-ruptura, de forma a investigar os mecanismos de reequilíbrio do sistema após eventos de instabilidade. Essa análise permitiria compreender a evolução temporal da poropressão e da deformação plástica em encostas parcialmente drenadas, contribuindo para estratégias de mitigação de risco.

Por fim, destaca-se a necessidade de aprimorar a estabilidade numérica do modelo, por meio de testes de malha, ajuste do passo de tempo e revisão dos critérios de convergência. A aplicação de análises paramétricas pode auxiliar na identificação das condições que favorecem a não convergência numérica, permitindo distinguir com maior clareza os erros computacionais das instabilidades físicas e aumentando a confiabilidade das simulações futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. **Slope Stability and Stabilization Methods**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos – a base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- ARCOVA, F. C. S.; RANZINI, M. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha – São Paulo. **Revista Árvore**, 2003.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. **Anais da 1ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas**, ABMS/ABGE/PUC-RJ, Rio de Janeiro, v. 2, p. 721-733, 1992.
- AVELAR, A. S. *et al.* Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: **Landslide Science and Practice: Global Environmental Change**, v. 4, p. 265–270, 2011.
- AZEVEDO, I. C. D. **Análise de Tensões e Deformações em Solos**, Viçosa, UFV, 2007.
- BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: **Ed. da UFSC**. v. 3, p. 877–1436, 2003.
- BISHOP, A. W. The principle of effective stress. **Teknisk Ukeblad**, v. 106, p. 859-863, 1959.
- BLAUDT, Larissa Mozer; ALVARENGA, Thomas Wünsch; GARIN, Yuri. Desastre ocorrido em Petrópolis no verão de 2022: aspectos gerais e dados da Defesa Civil. **Geociências**, São Paulo, v. 41, n. 4, p. 59–71, 2023.
- CAI, F.; UGAI, K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability. **Soils and Foundations**, v. 44, n. 1, p. 79-94, 2004.
- COSTA NUNES, A. J.; FERNANDES, C. E. M. Contribuição ao conhecimento do risco geológico urbano da cidade de Petrópolis/RJ. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1., 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1990. p. 102–114.
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. Transportation Research Board, U.S. **National Academy of Sciences**, Special Report, n. 247, p. 36–75, 1996.
- DAWSON, E.M., Roth, W.H. and Drescher, A., Slope stability analysis by strength reduction. **Geotechnique**, vol. 49, no. 6, pp. 835-840. 1999.
- DE MENDONÇA, M B; GONZALEZ, F C G; COELHO, G V da S. Likelihood of landslide occurrences for definition of rainfall thresholds applied to the Quitandinha river basin, Petrópolis, Brazil. **Landslides**, v. 18, n. 2, p. 583–593, 2021.
- DE PRAGA BAIÃO, Cheila Flávia; MANTOVANI, José; ALCÂNTARA, Enner. Increasing

landslide susceptibility in urbanized areas of Petrópolis identified through spatio-temporal analysis. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 160, 1 jul. 2025.

DESAI, C. S.; CHRISTIAN, J. T. Numerical methods in geotechnical engineering. New York: McGraw-Hill, 1977. 783 p.

DIAS, Helen Cristina; GROHMANN, Carlos Henrique. Standards for shallow landslide identification in Brazil: Spatial trends and inventory mapping. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 135, 1 mar. 2024.

DOS SANTOS, D. F.; LAETA, T.; FERNANDES, M. D. C.; SOUSA, G. M. D. Manutenção da planta Koeler para digitalização através de levantamento fotográfico. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 2, p. 277, 2017.

DUTRA, A. C. Movimentos de massa associados aos maciços rochosos granito-gnáissicos do município de Petrópolis, RJ. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2014. Salvador, Brasil, 2014.

DUNCAN, J. M.; Wright, S. G.; Brandon, T. L. (2014). **Soil Strength and Slope Stability, second edition**. New Jersey: Wiley, 2014.

DUNCAN, J. M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, n. 7, p. 577-596, 1996.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51–71, 2001.

FILHO, O. A. Geologia e geomorfologia da Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 1999.

FONSECA, M. J. G. *et al.*, Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro. Departamento Nacional de Produção Mineral (DPMN), Rio de Janeiro, 141p, 1998.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R.; WIDGER, R. A. The Shear Strength of Unsaturated Soils, **Canadian Geotechnical Journal**, Vol. 15, nº 3, p.313-321, 1978.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. John Wiley & Sons, New Jersey, 544p, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521–532, 1994.

GONZALEZ, F. C. G.; MENDONÇA, M. B.; COELHO, G. V. S. Probabilidade de ocorrência de deslizamentos em função da pluviometria aplicada à bacia do rio Quitandinha, Petrópolis-RJ. In: VIII Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas (VIII COBRAE), 2022, Porto de Galinhas. Anais da VIII Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas (VIII COBRAE), 2022.

G1. Deslizamento de terras destrói casa em Petrópolis, no RJ. 15 de dezembro de 2016. Disponível em: g1.globo.com. Acesso em 03 mai de 2025.

GRIFFITHS, D. V.; LANE, P. A. Slope stability analysis by finite elements. **Geotechnique**, v. 49, n. 3, p. 387-403, 1999.

GRIFFITHS, D. V.; MARQUEZ, R. M. Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements. **Geotechnique**, v. 57, n. 6, p. 537–546, ago. 2007.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. Ed. Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 1993. 216 p.

GUERRA, A. Catastrophic events in Petrópolis City (Rio de Janeiro State), between 1940 and 1990. **GeoJournal**, v. 37, n. 3, p. 349-354, 1995.

GUERRA, A. J. T.; GONÇALVES, L. F. H., Movimentos de Massa na Cidade de Petrópolis (Rio de Janeiro). In: Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. Ed. Bertrand, Rio de Janeiro, Brasil, V.1. p.189-251, 2001.

GUERRA, A. J. T.; LOPES, P. B. M.; SANTOS FILHO, R. D. dos. Características geográficas e geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 8, n. 1, 2007.

GU, TENGFEI *et al.* Landslide susceptibility assessment in Zhenxiong County of China based on geographically weighted logistic regression model. **Geocarto International**, v. 37, n. 17, p. 4952–4973, 2022.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock slope engineering**. 3. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981. 358 p.

HIGHLAND, L. M. BOBROWSKY, P. The landslide handbook—**A guide to understanding landslides**. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008, 129 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Projeto de Monitoramento do Desmatamento dos Biomas Brasileiros por Satélite – PMDBBS: Relatório Técnico da Mata Atlântica – 2022. São José dos Campos: INPE, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe>. Acesso em: 7 set. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 14 de mai de 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022: resultados preliminares. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Ocupação de encostas. Coord. Cunha, M. A. **São Paulo**: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991.

JIANG, S.-H.; YUAN, Z.-R.; WANG, Z. Z.; LIU, X. Improved rainfall infiltration model for probabilistic slope stability assessment considering transition layers and spatial variability.

Engineering Geology, v. 353, 2025.

KÖPPEN, W. Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

LACERDA, W. A. Estabilidade de encostas naturais ao longo da costa tropical do Brasil. In: Simpósio Sobre Desenvolvimentos Recentes em Mecânica de Solos e Pavimentos, 1997. **Anais...** [S.l.: s.n.], 1997.

LACERDA, W. A. Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: field and laboratory observations. **Geomorphology**, v. 87, n. 3, p. 104–119, 2007.

LAMBE, W. L.; WHITMAN R. V., 1969, **Mecánica de Suelos**, 1ª ed. Arcos de Belén, MEX, Limusa S. A., 1976.

LEROUÉIL, S.; VAUNAT, J.; PICARELLI, L.; LOCAT, J.; LEE, H.; FAURE, R. Geotechnical characterization of slope movements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 7., 1996, Trondheim. **Proceedings (...)**. Trondheim, 1996. p. 53-74.

LI, A.J.; MBURU, J. W.; CHEN, C. W.; YANG, K.-H. Investigations of silty soil slopes under unsaturated conditions based on strength reduction finite element and limit analysis. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 1095-1110, 2022.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated soil mechanics**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.

MASI, E. B. Root reinforcement in slope stability models: a review. **Geosciences**, v. 11, n. 5, 212, 2021.

MATSUI, Tamotsu; SAN, Ka-Ching. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. **Soils and Foundations**, v. 32, n. 1, p. 59-70, 1992.

MENDONÇA, M. B. et al. Likelihood of landslide occurrences for definition of rainfall thresholds applied to the Quitandinha river basin, Petrópolis, Brazil. **Landslides**, v. 17, p. 1487–1501, 2020.

NAKAZAWA, V.A.; CERRI, T.E.S., Os Escorregamentos Ocorridos em Petrópolis – Rj em fevereiro de 1988: Ações Emergenciais. I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano, pp 325-333, São Paulo, 1990.

NIELSEN, D. R.; TH. VAN GENUCHTEN, M.; BIGGAR, J. W. Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone. **Water Resources Research**, v. 22, n. 9 S, p. 89S-108S, 1986.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1972.

NUNES, A. L. L. S.; SAYÃO, A. S. F. J. Debris Flows e Técnicas de Mitigação EeConvivência. In: Congresso Nacional De Geotecnia – Geotecnia Nas Infraestruturas, 14., 2014, Covilhã, Portugal. **Anais...** Covilhã: Sociedade Portuguesa De Geotecnia, 2014. P. 83–123.

PENHA, H.M., FERRARI, A.L., RIBEIRO, A., AMADOR, E.S., PENTAGNA, F.V.P., JUNHO, M. C.B., BRENNER, T.L. Projeto Carta Geológica, Folha Petrópolis: relatório final. Rio de Janeiro: Convênio DRM / IG - UFRJ, 1979.

PINTO, C. de S., 2006, **Curso Básico de Mecânica dos Solos**, 3ª ed. São Paulo, Oficina de Textos.

POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIĆ, L. **Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory**. London: Thomas Telford, 1999.

RAHARDJO, H.; LI, X. W.; TOLL, D. G.; LEONG, E. C. The effect of antecedent rainfall on slope stability. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 19, n. 3–4, p. 371–399, 2001.

REN, Yongqiang; CHEN, Xiangmei; SHANG, Yan. Study on the influence of rainfall infiltration on the stability of dump slope. *Desalination and Water Treatment*, v. 319, 1 Jul. 2024.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

ROCSCIENCE. A New Era in Slope Stability Analysis: Shear Strength Reduction Finite Element Technique. Toronto: Rocscience Inc., 2004.

ROCSCIENCE INC. RS2 – Theory Manual. Toronto: Rocscience Inc., 2023.

SILVA, D. C. O. **Aplicação do modelo SHALSTAB na previsão de deslizamentos em Petrópolis, Rio de Janeiro**. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SOUZA, R. M. D. O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Departamento De Engenharia Civil, Núcleo De Instrumentação e Computação Aplicada À Engenharia: 39 p. 2003.

TEIXEIRA, R. S.; VILAR, O. M. Resistência ao Cisalhamento de um Solo Compactado Não Saturado. In: 3º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 1, p.161-169, Rio de Janeiro, 1997.

TERZAGHI, K. **Mechanism of Landslides**. In: From Theory to Practice in Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York, U.S.A., 1960. p.83-123.

TERZAGHI, K. **Theoretical Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1936.

USGS (United States Geological Survey). Landslide Types and Processes. 2004. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/FS2004-3072.pdf>. Acesso em: 23 jul 2025.

VANAPALLI, S. K. FREDLUND, D. G.; PUFAHL, D. E. The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristics of a compacted till. **Géotechnique**, Vol. 49, p.143-159, 1994.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, n°. 44, p.892–898, 1980.

VARANDA, E. **Mapeamento Quantitativo de risco de escorregamentos para o primeiro distrito de petropolis, RJ utilizando sistemas de informacoes geograficas**. 2006. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2006.

WICANDER, R. MONROE, J.S. Revisão Técnica: Maurício Antônio Carneiro. Fundamentos de Geologia. Ed. **CENCAGE**, Learning, São Paulo. 508p. 2009.

WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A.; NACHERGALE, F.; JONES, R. J. A. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, v. 90, n. 3–4, p. 169–185, 1999.

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L.; ZHU, J. Z. **The finite element method: its basis and fundamentals**. 6th ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

APÊNDICE A – MAPAS DE POROPRESSÃO E GRAU DE SATURAÇÃO

Figura A1 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

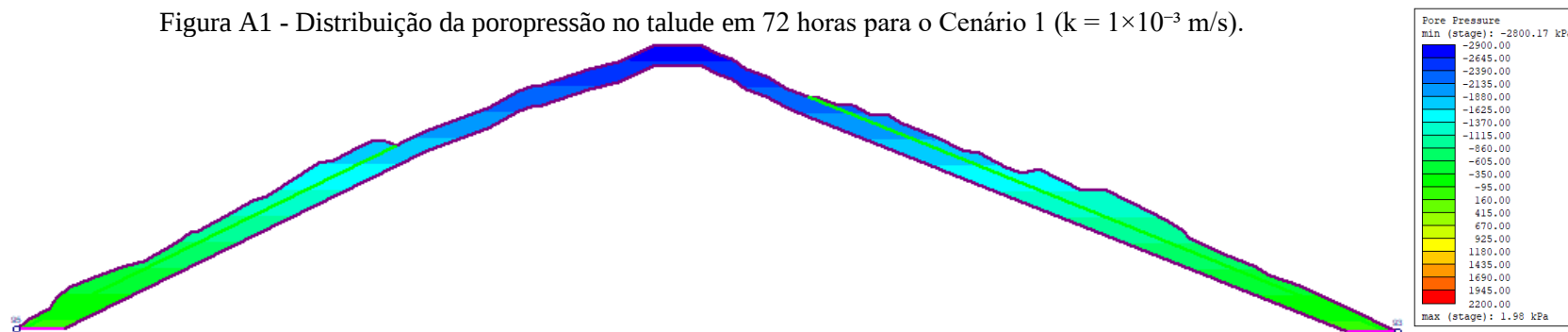


Figura A2 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

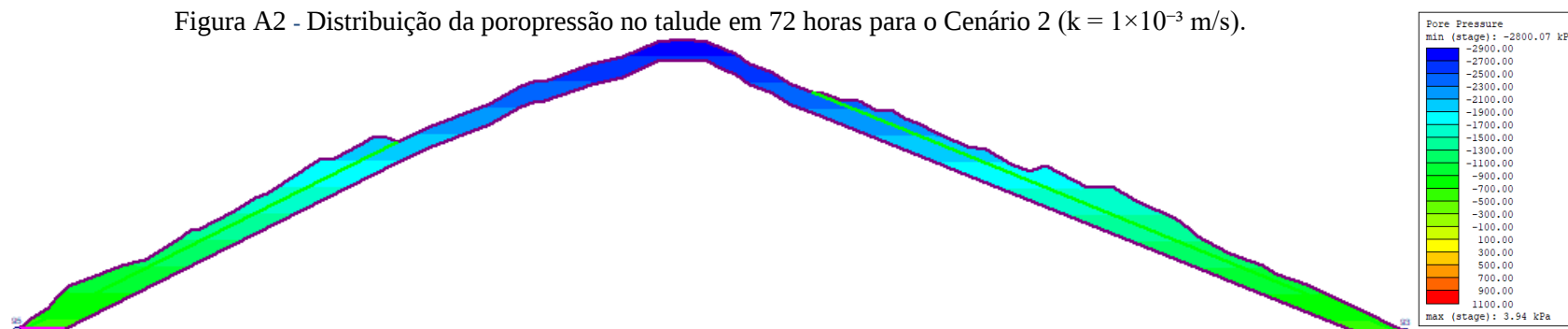


Figura A3 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

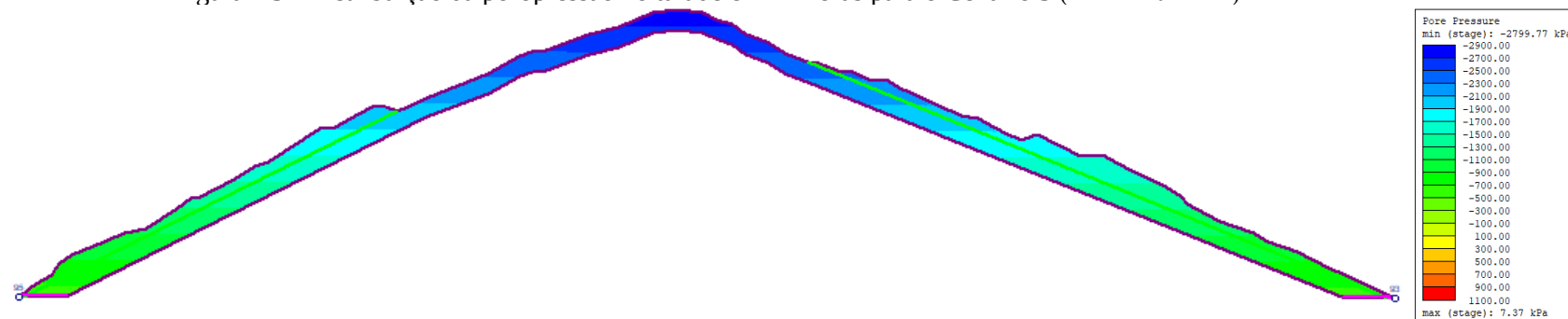


Figura A4 - Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

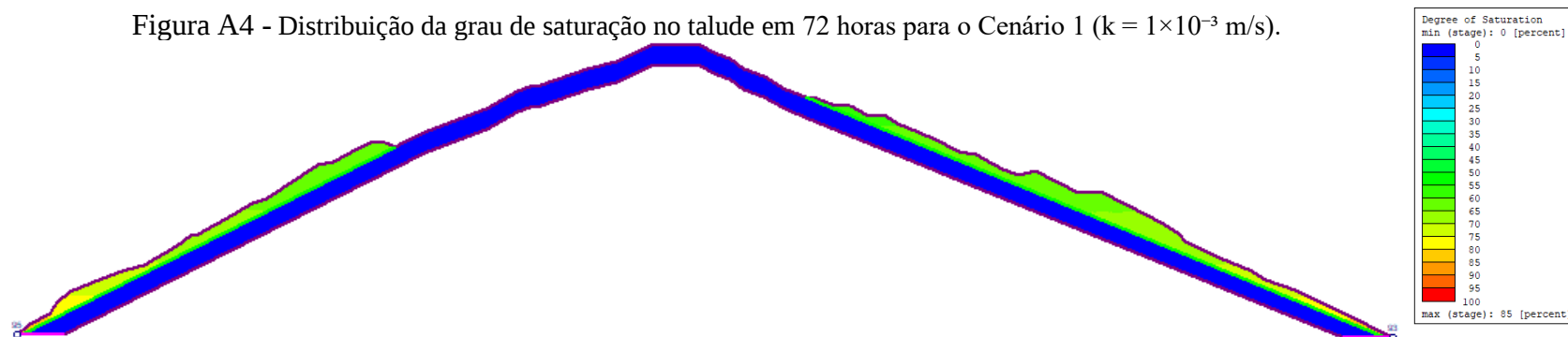


Figura A5 - Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

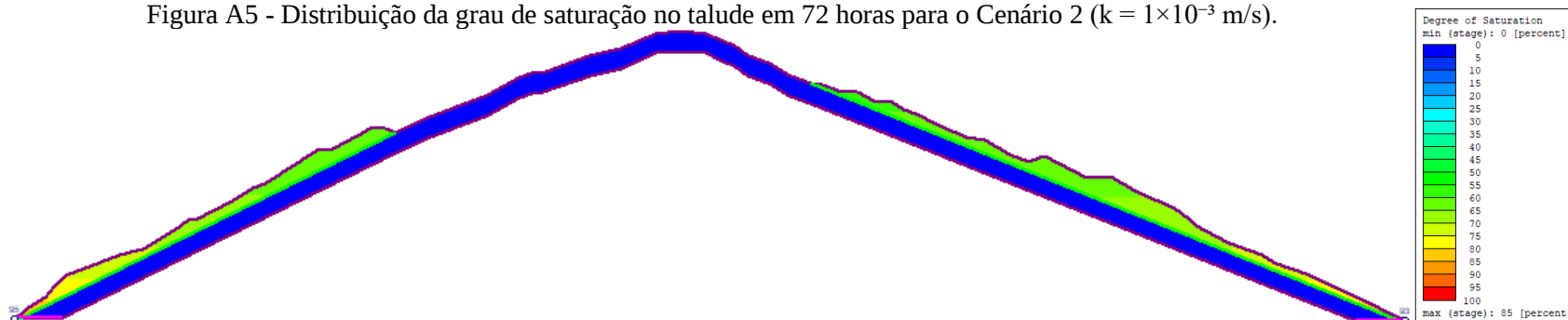


Figura A6 - Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

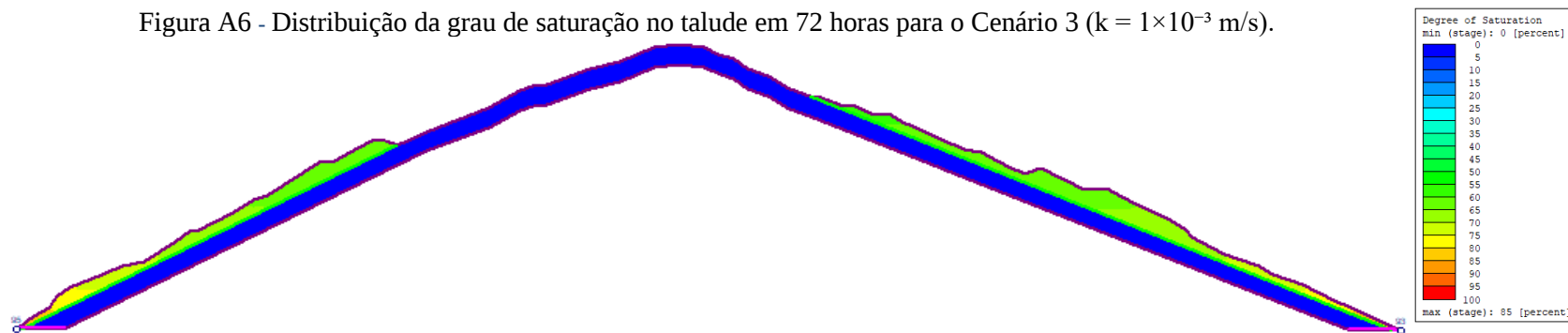


Figura A7 – Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

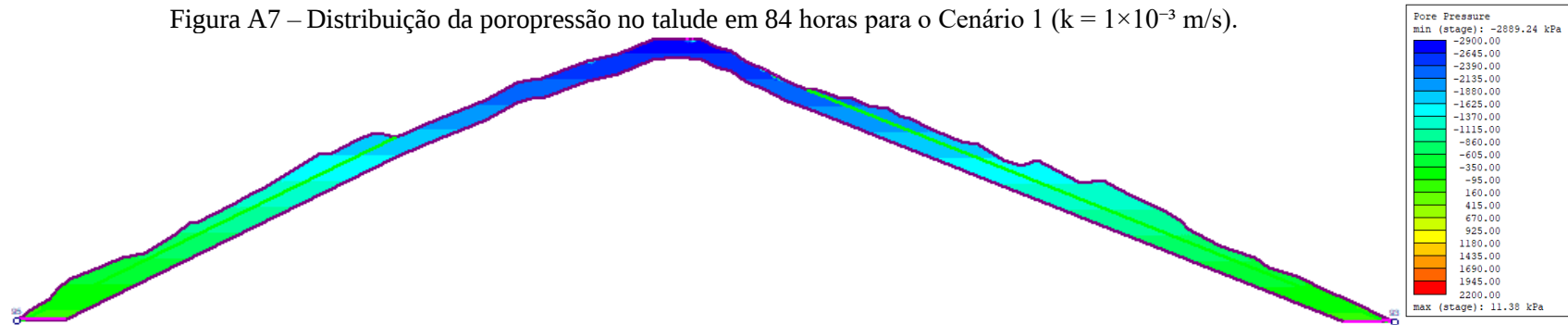


Figura A8 – Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

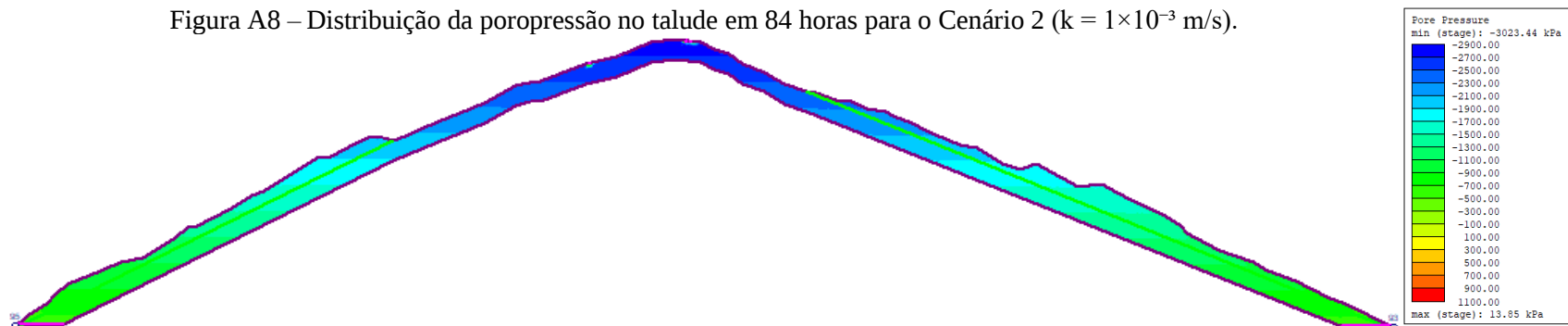


Figura A9 – Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

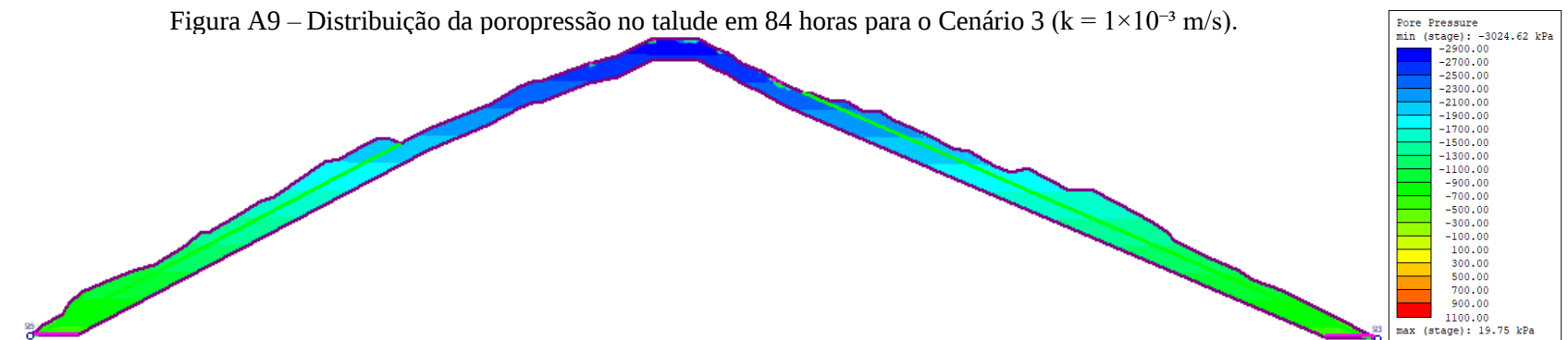


Figura A10 - Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

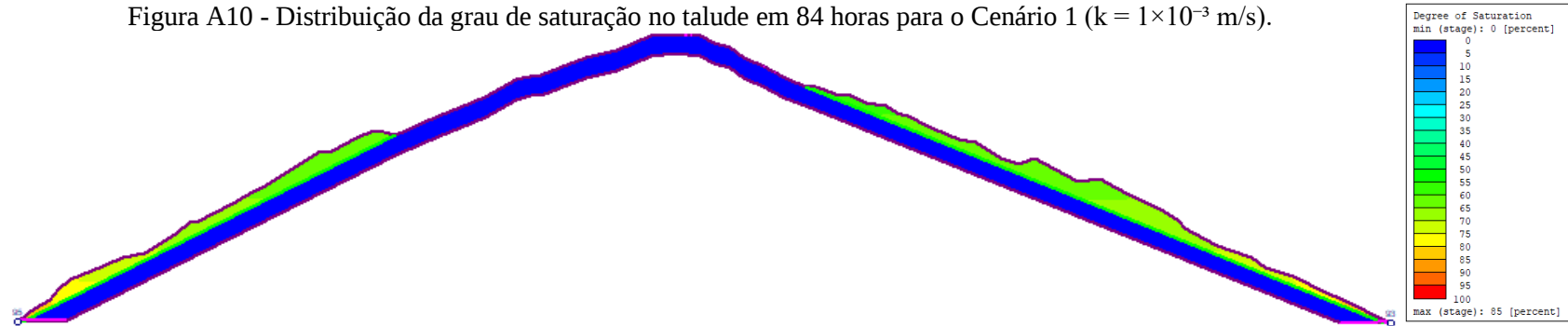


Figura A11 - Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

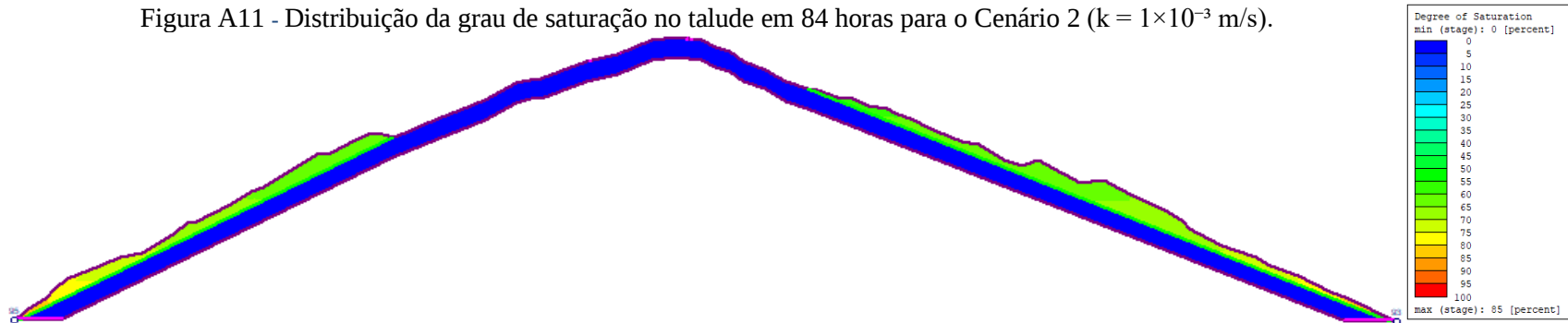


Figura A12 - Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

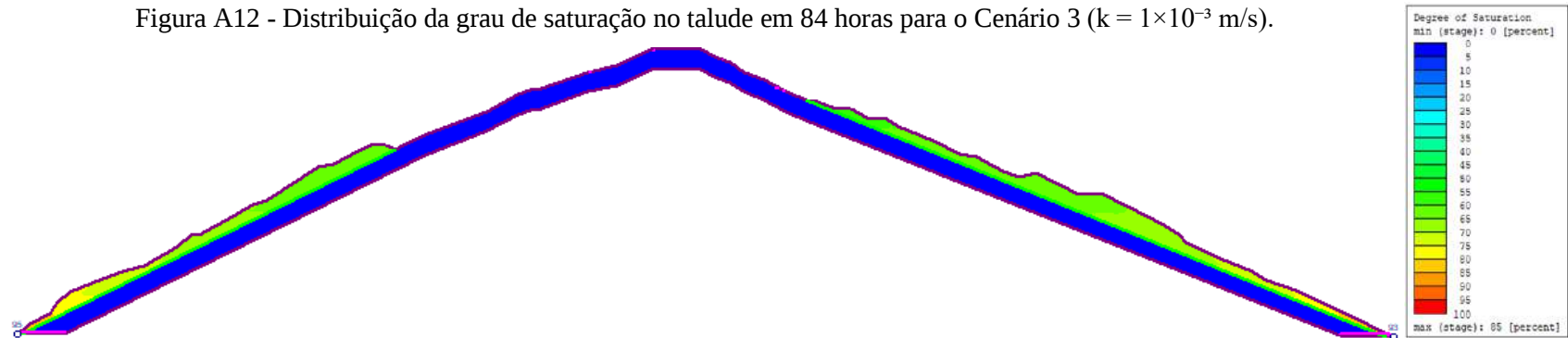


Figura A13 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

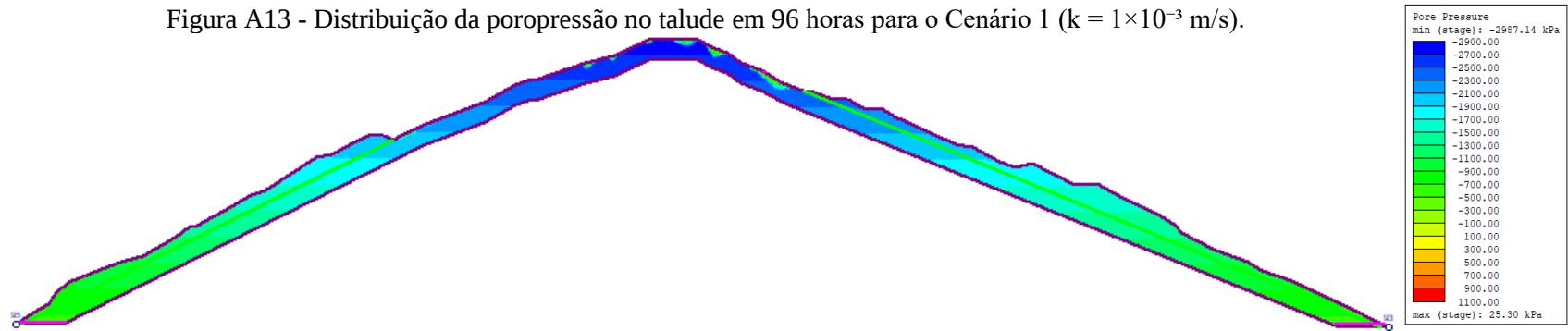


Figura A14 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

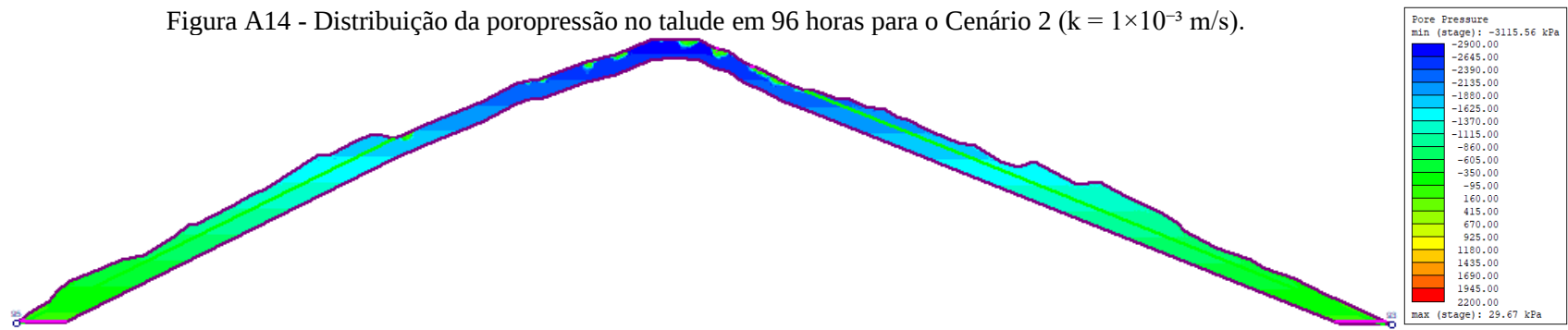


Figura A15 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

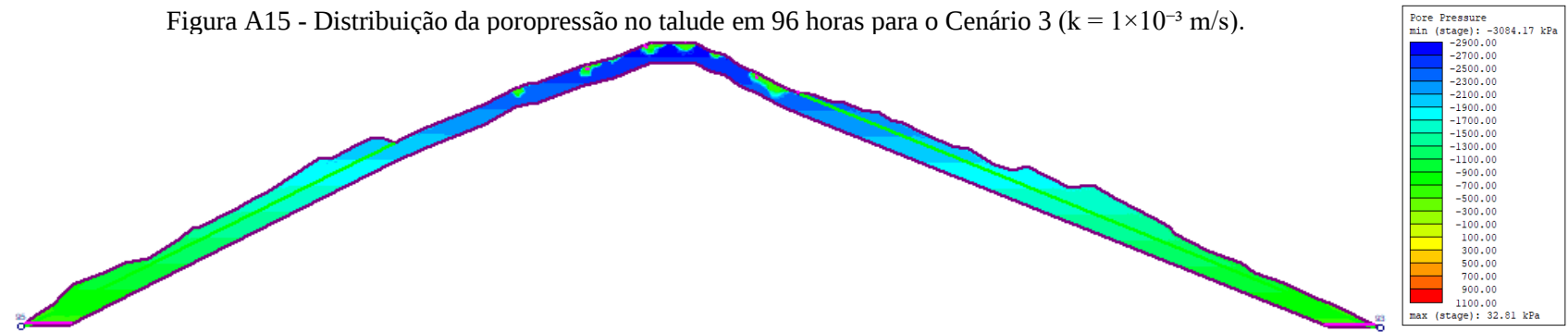


Figura A16 - Distribuição da grau de saturação no talude em 96 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

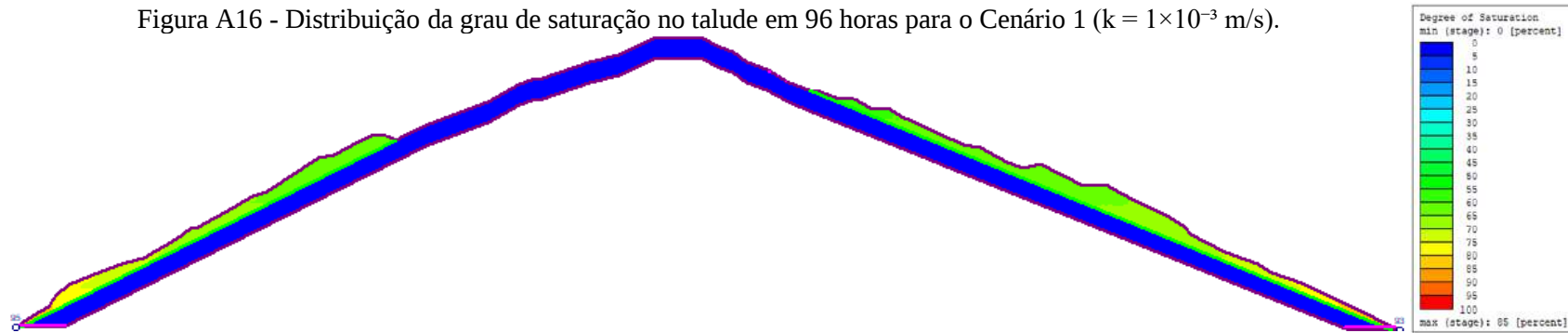


Figura A17 - Distribuição da grau de saturação no talude em 96 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

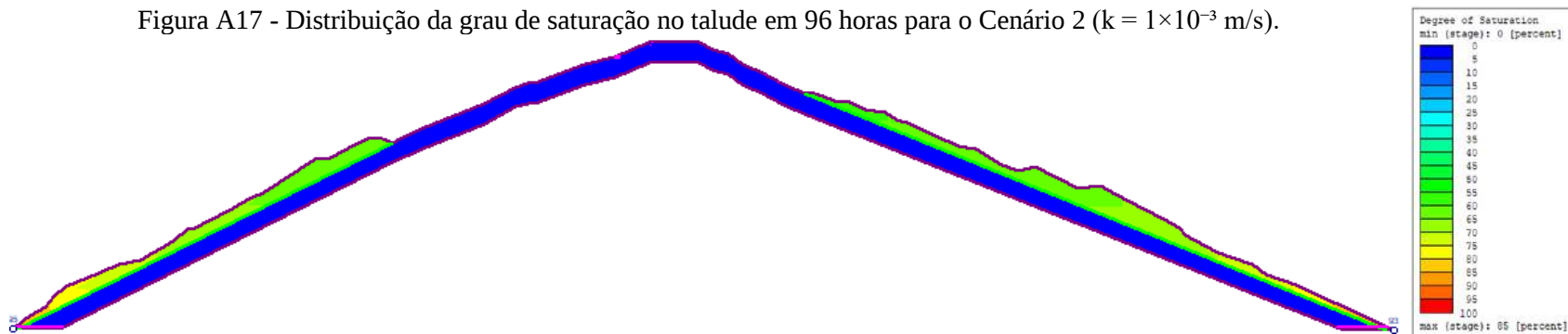


Figura A18 - Distribuição da grau de saturação no talude em 96 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s).

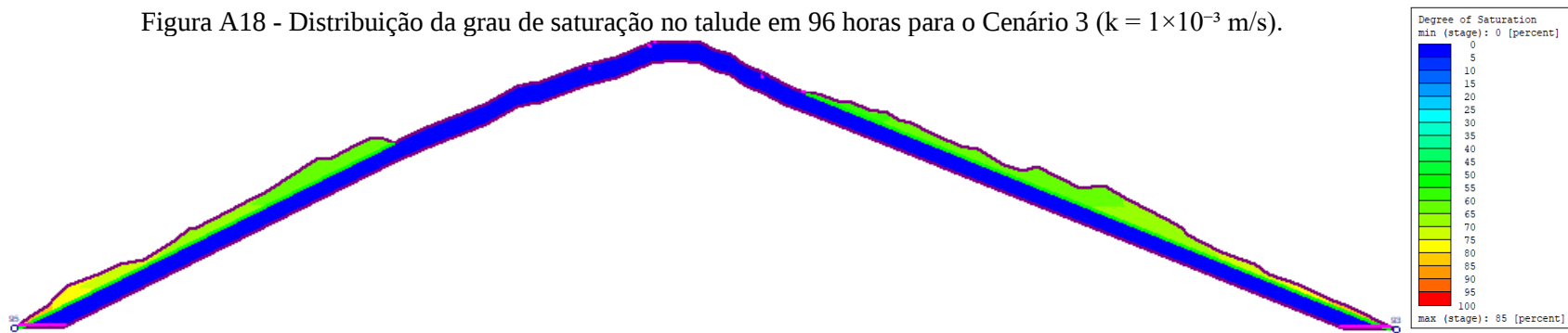


Figura A19 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

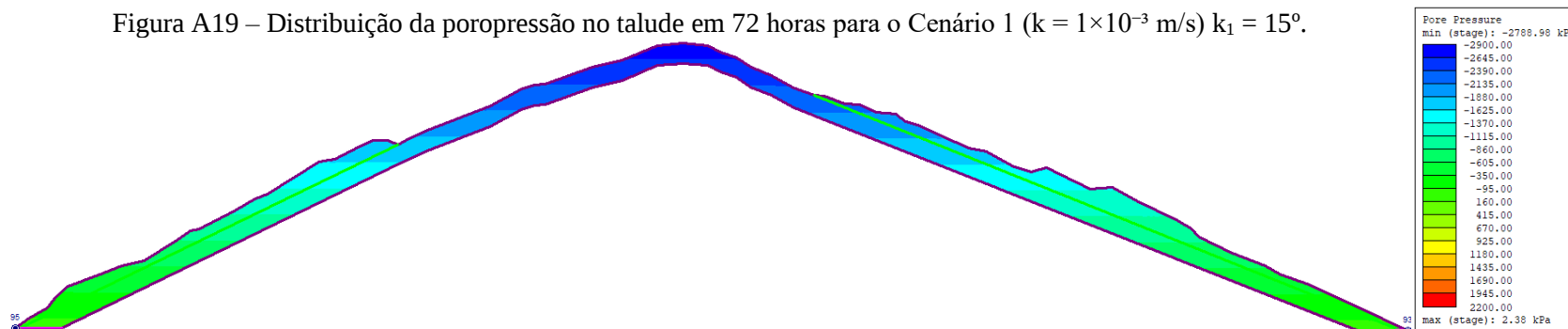


Figura A20 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

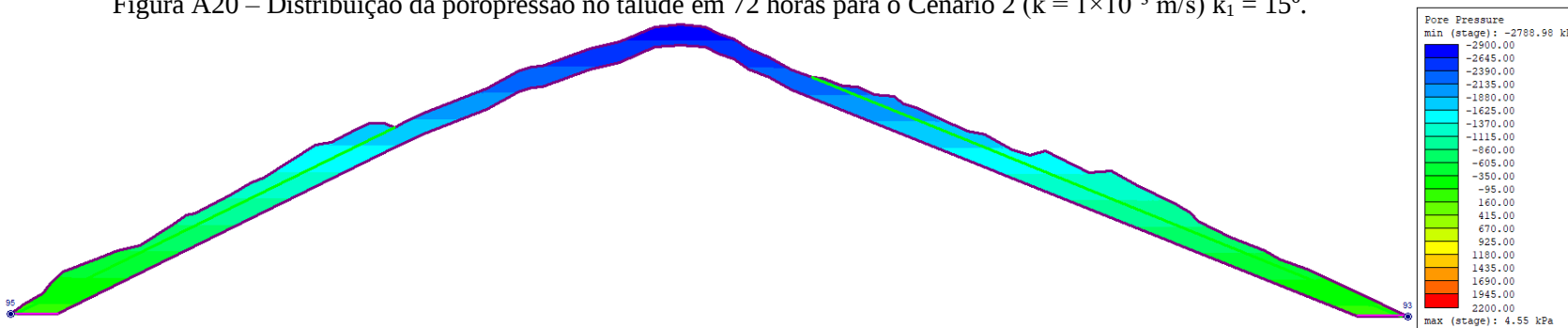


Figura A21 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

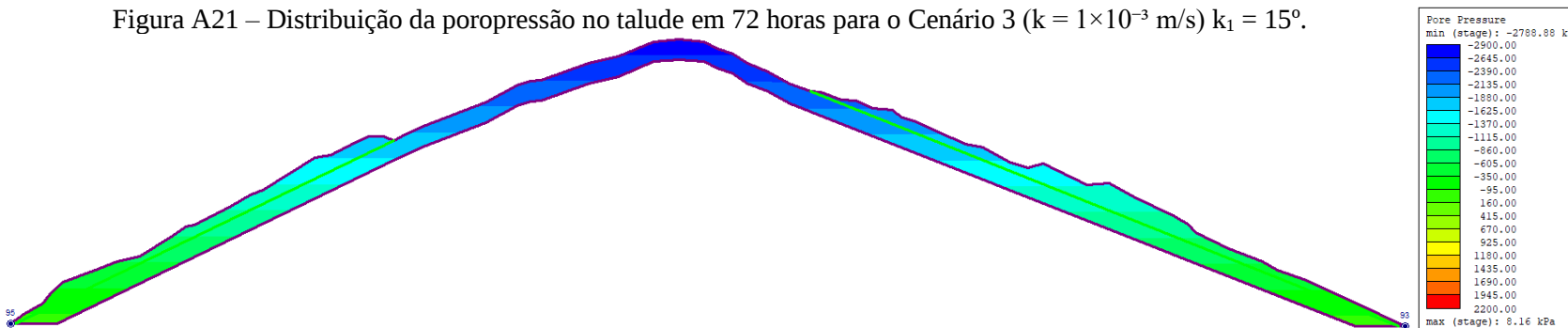


Figura A22 – Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

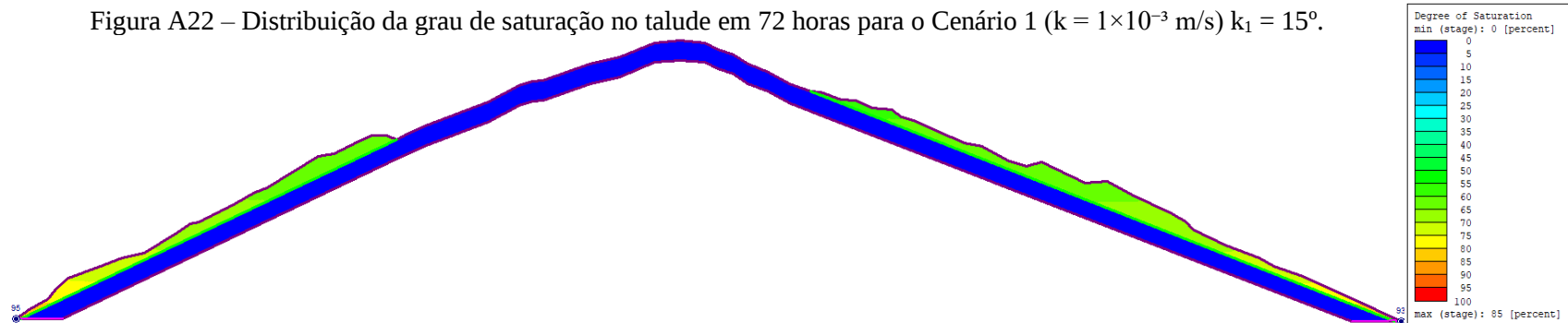


Figura A23 – Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

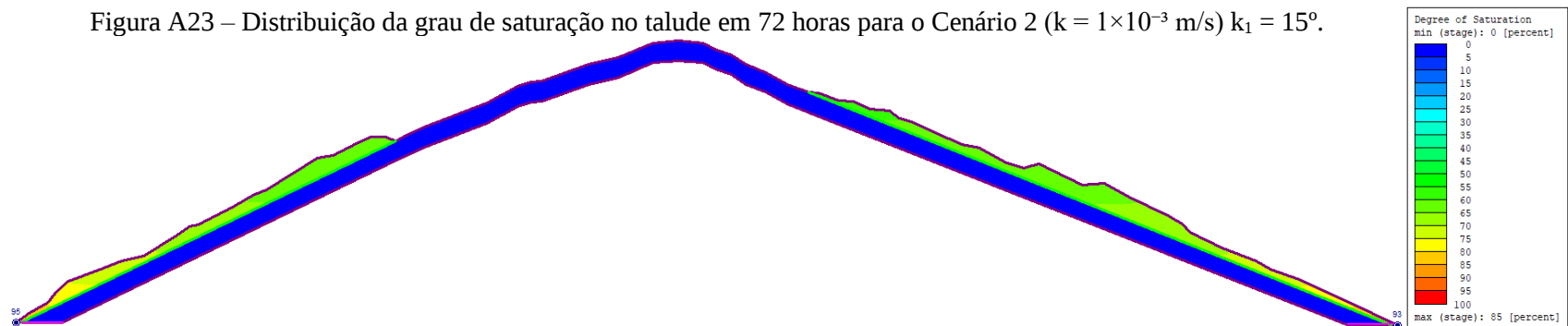


Figura A24 – Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

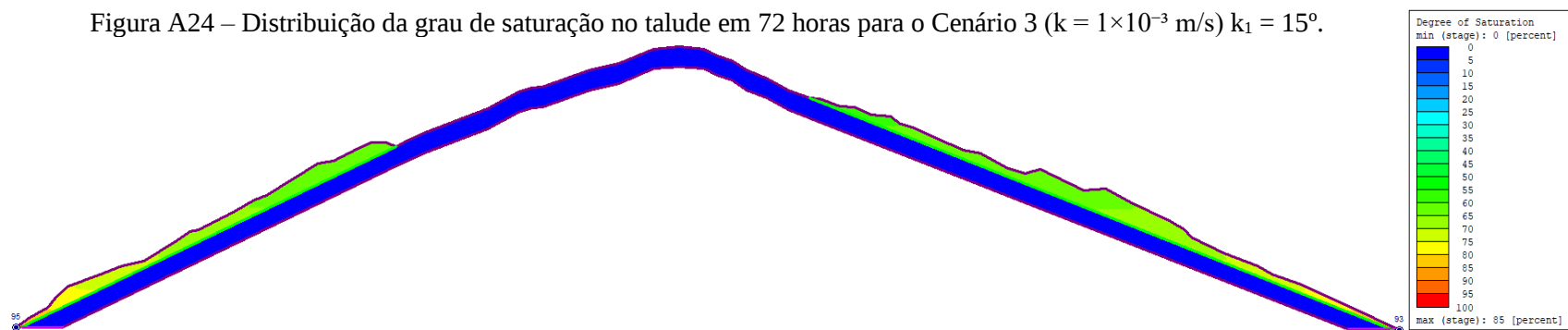


Figura A 25 – Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

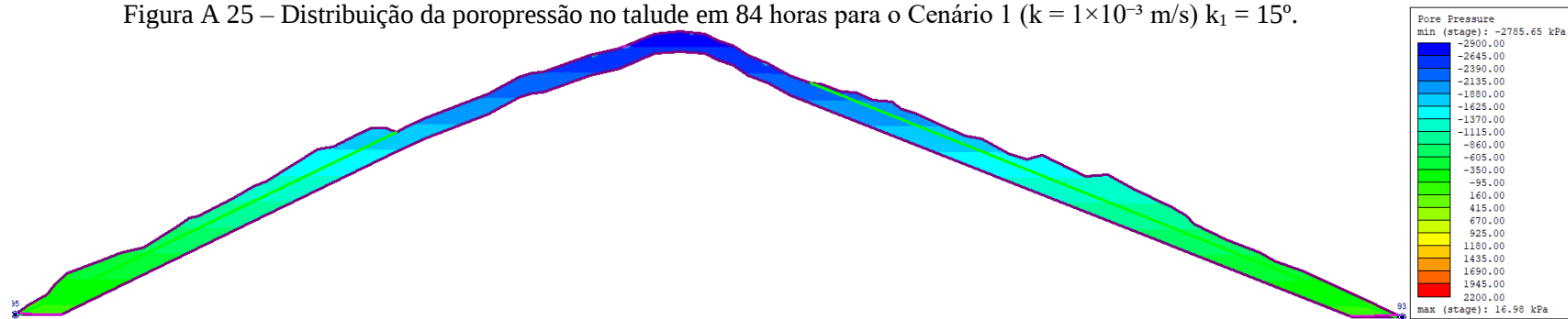


Figura A26 – Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

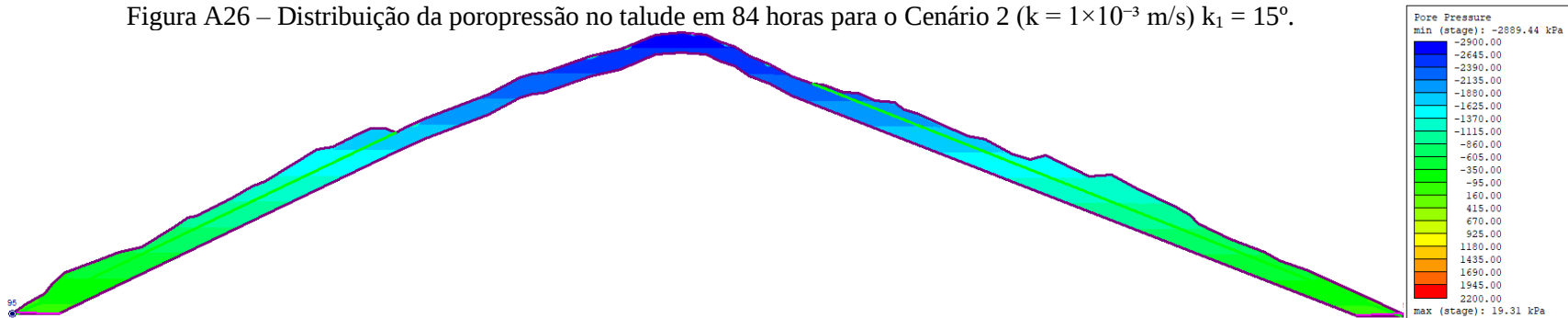


Figura A27 – Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

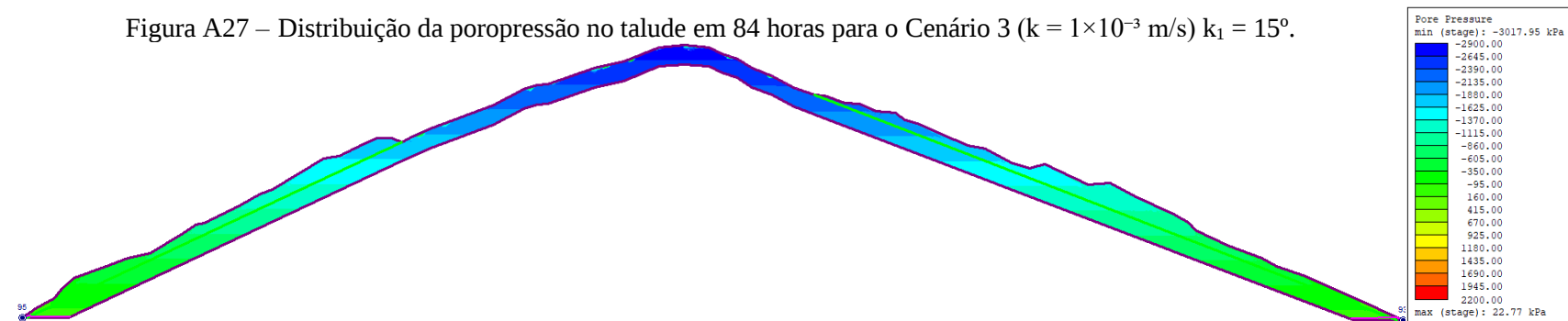


Figura A28 – Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

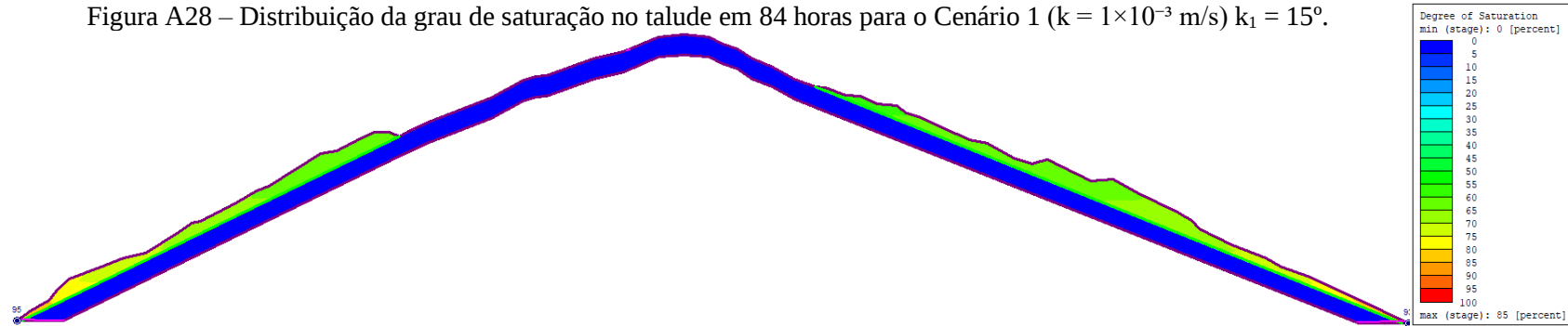


Figura A29 – Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

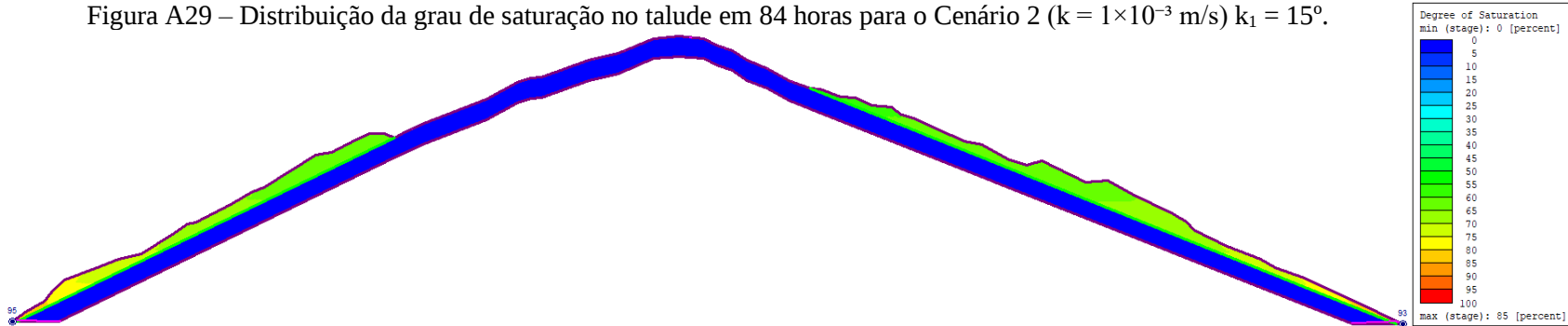


Figura A 30 – Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

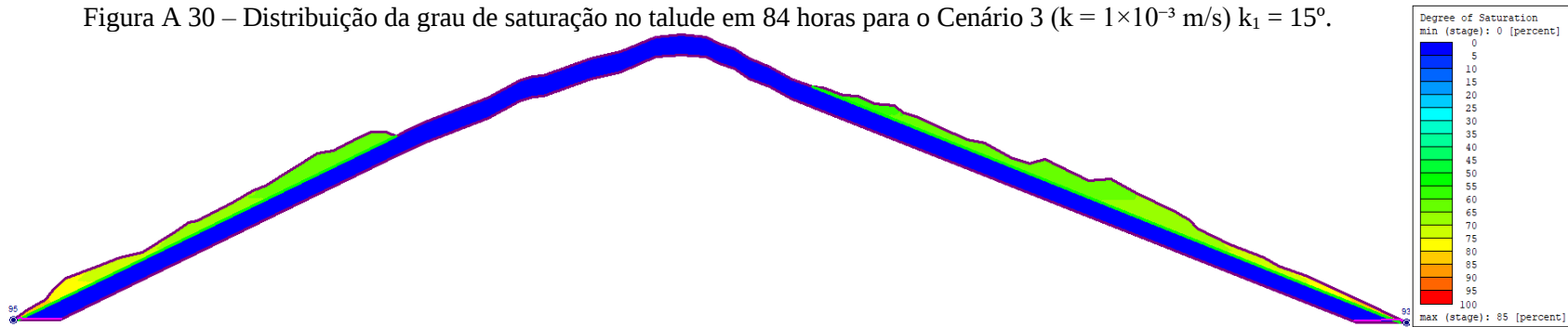


Figura A31 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

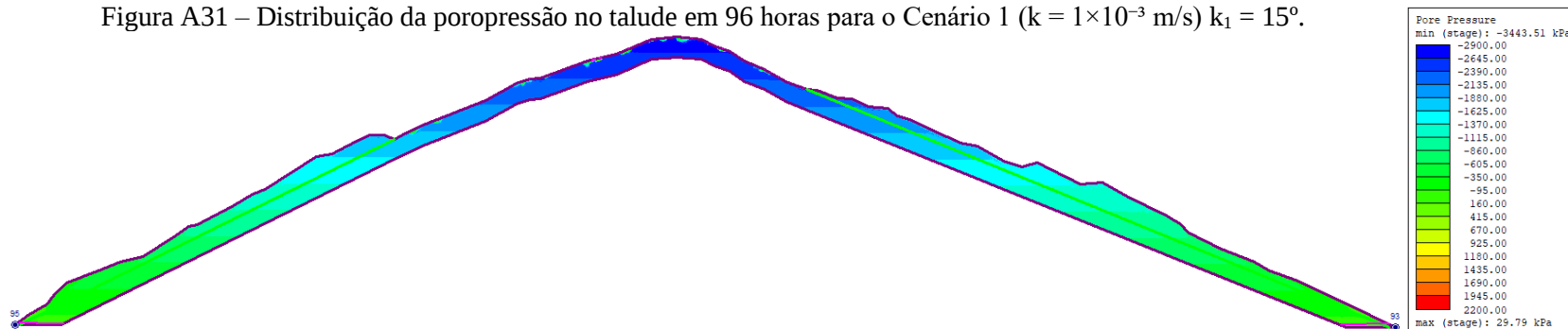


Figura A32 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

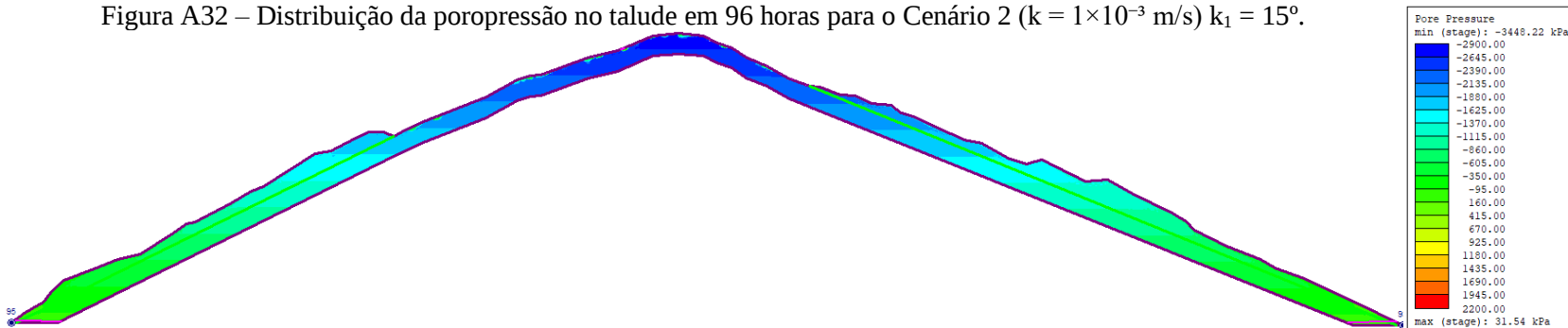


Figura A33 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

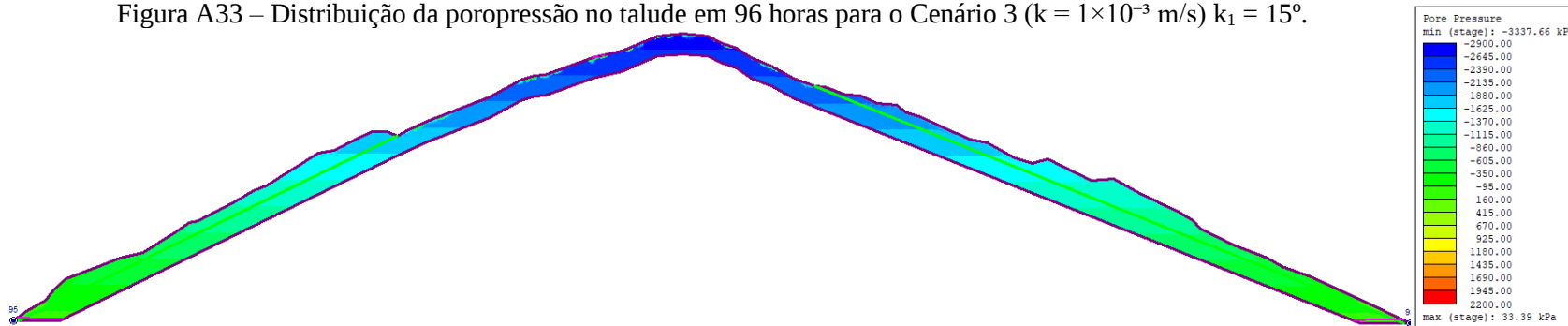


Figura A34 – Distribuição da grau de saturação no talude em 96 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

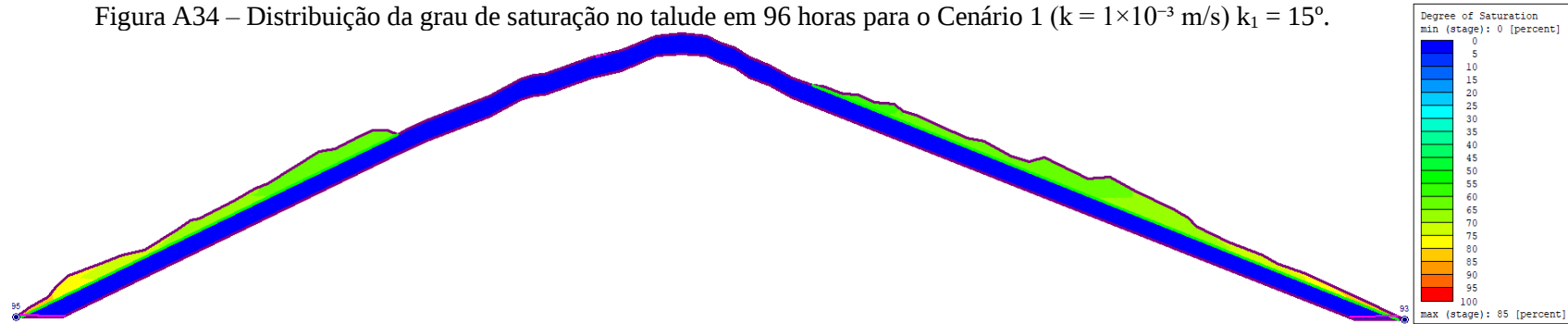


Figura A35 – Distribuição da grau de saturação no talude em 96 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

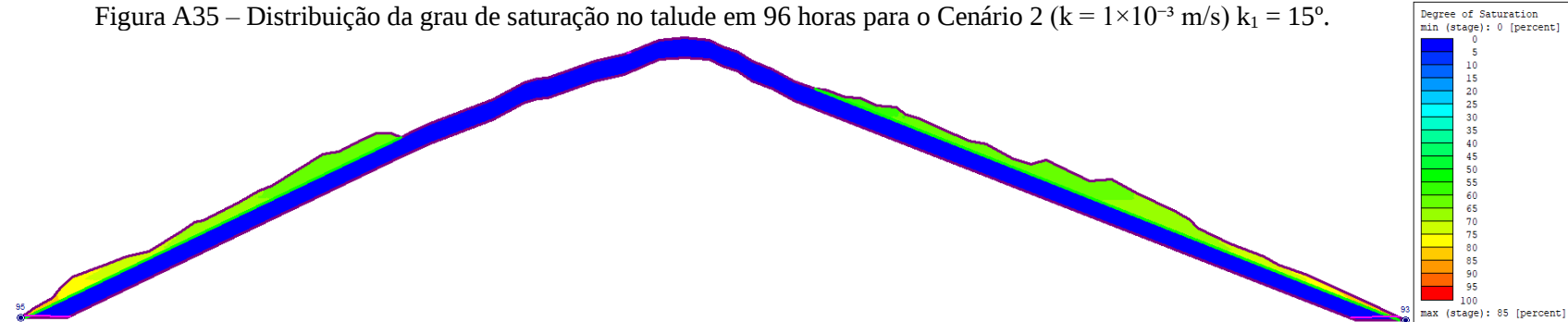


Figura A36 – Distribuição da grau de saturação no talude em 96 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-3}$ m/s) $k_1 = 15^\circ$.

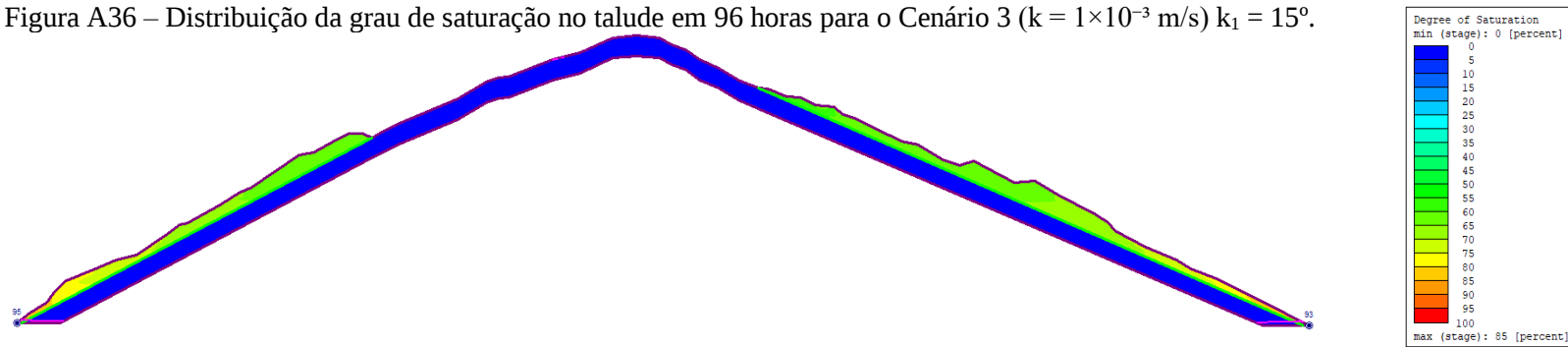


Figura A37 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

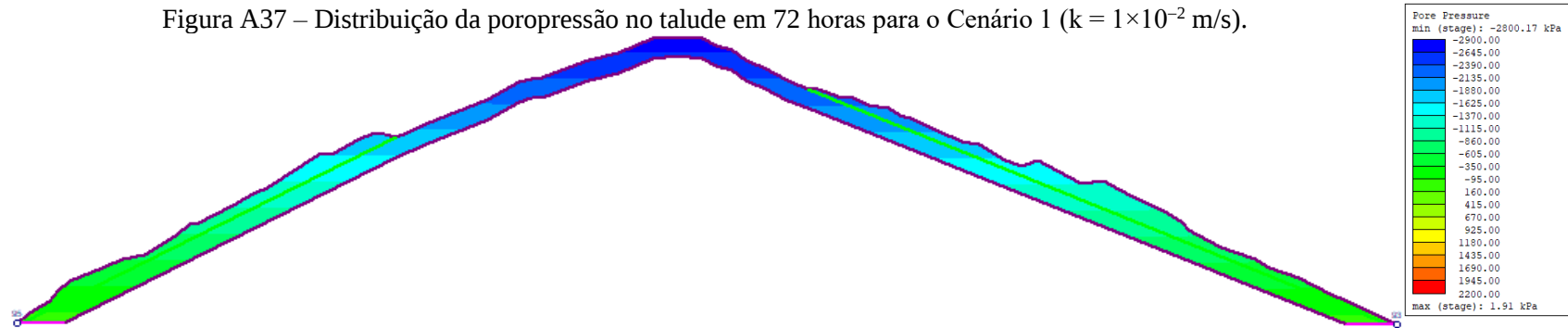


Figura A38 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

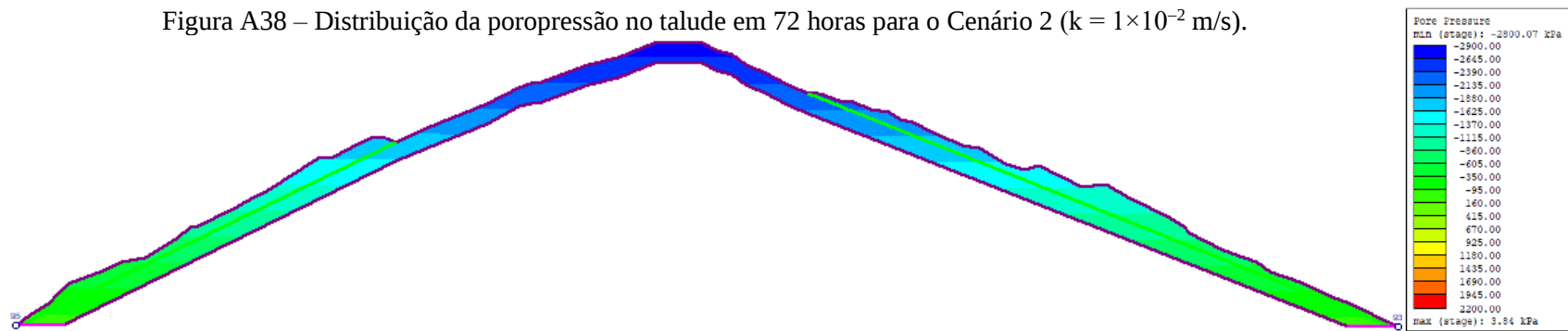


Figura A39 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

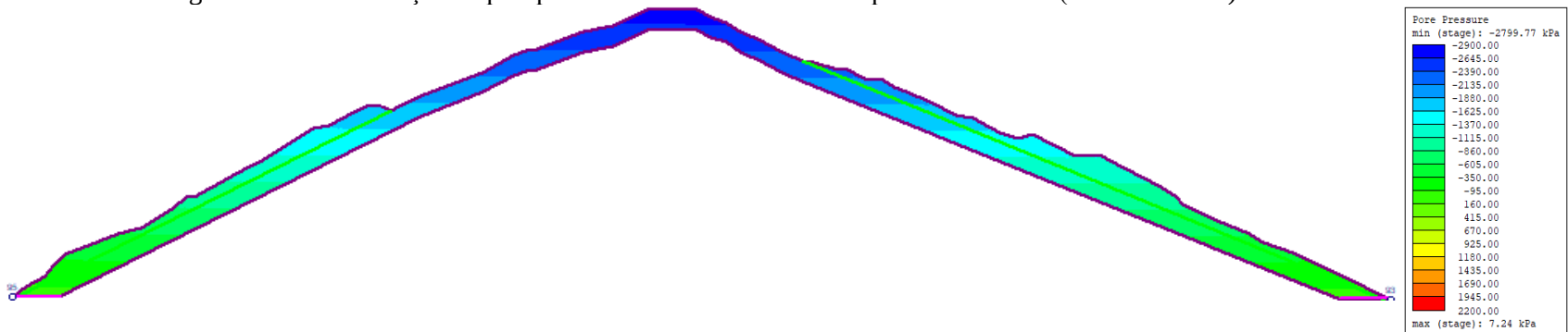


Figura A40 - Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

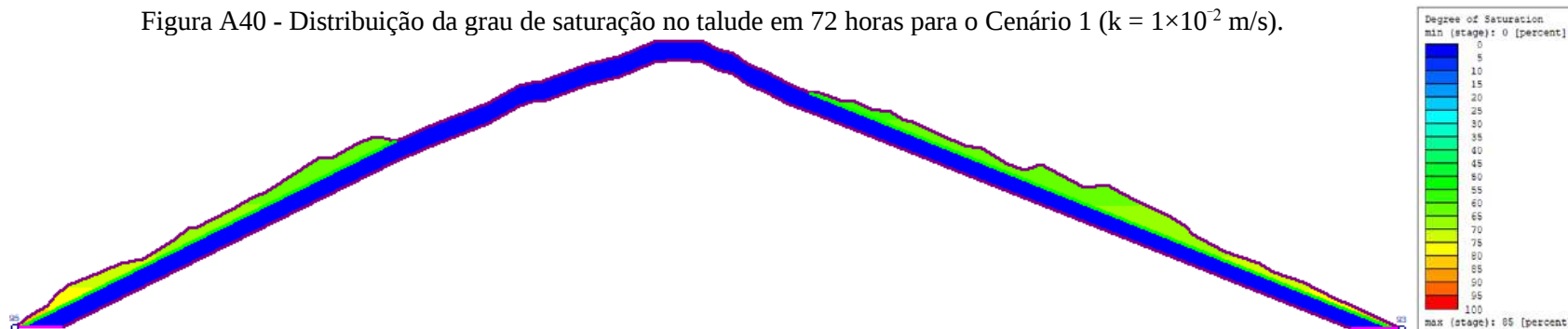


Figura A41 - Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

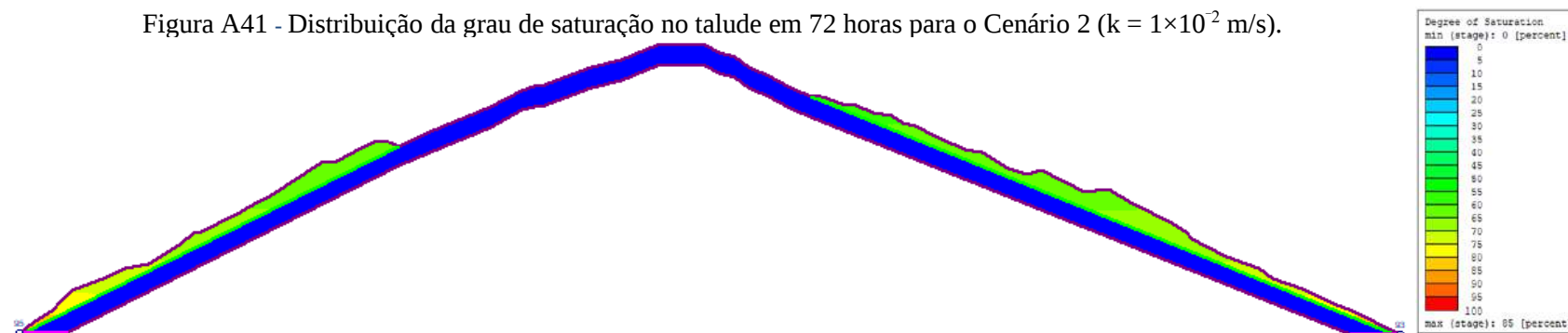


Figura A42 - Distribuição da grau de saturação no talude em 72 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

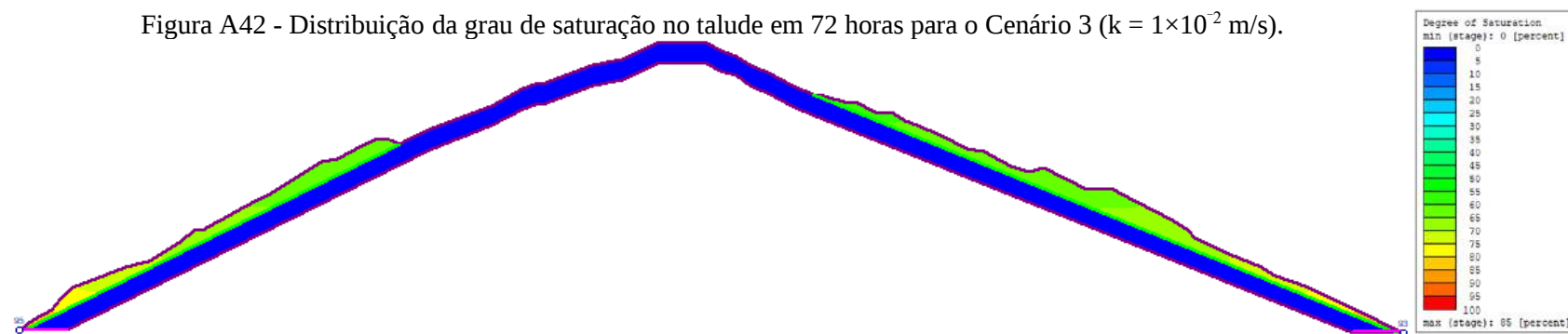


Figura A43 - Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

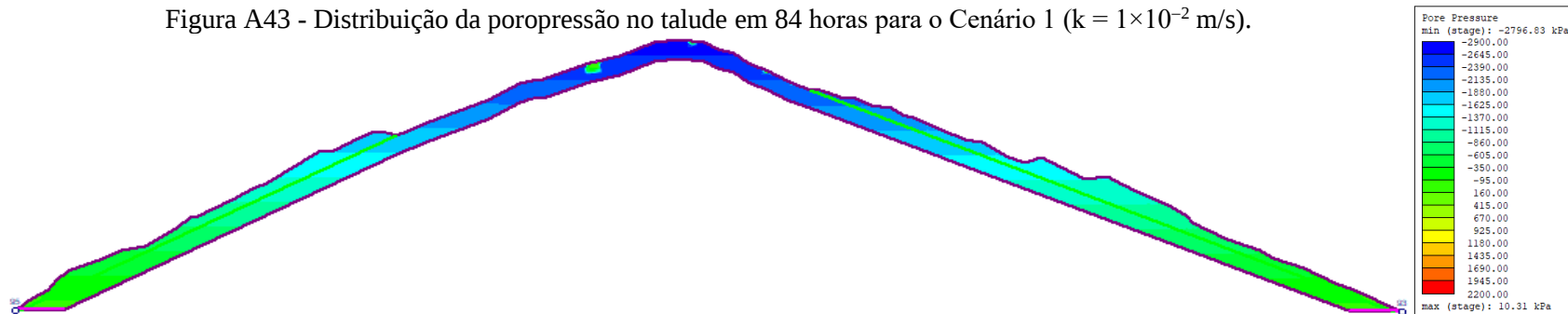


Figura A44 - Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

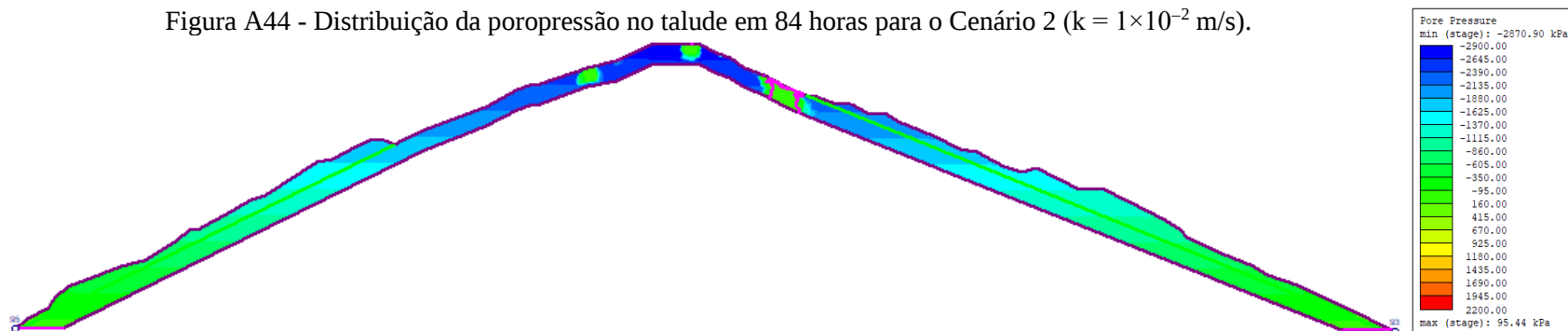


Figura A45 - Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

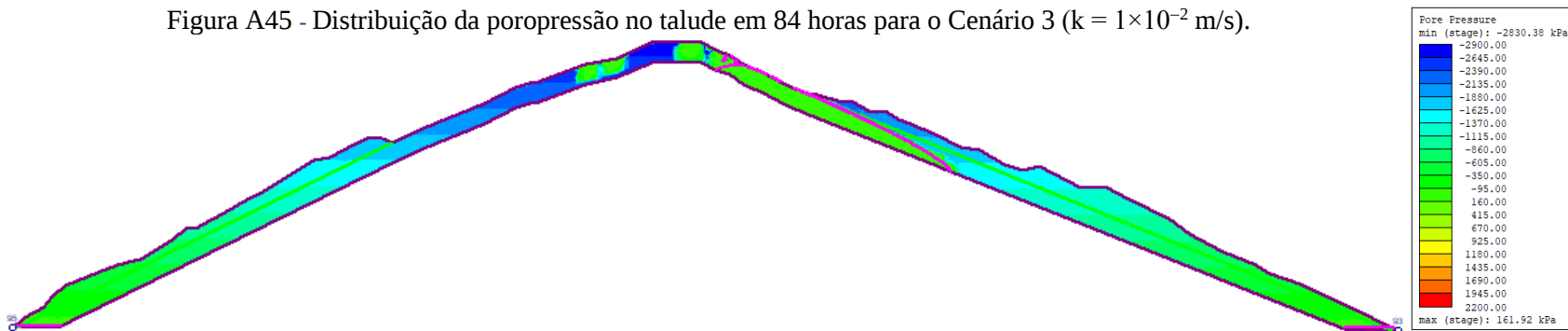


Figura A46 - Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

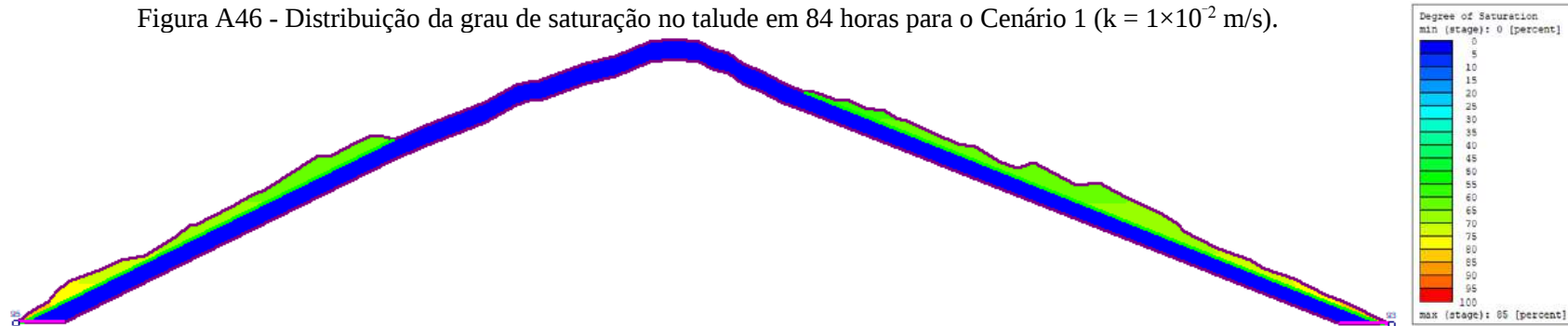


Figura A47 - Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).



Figura 194 - Distribuição da grau de saturação no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

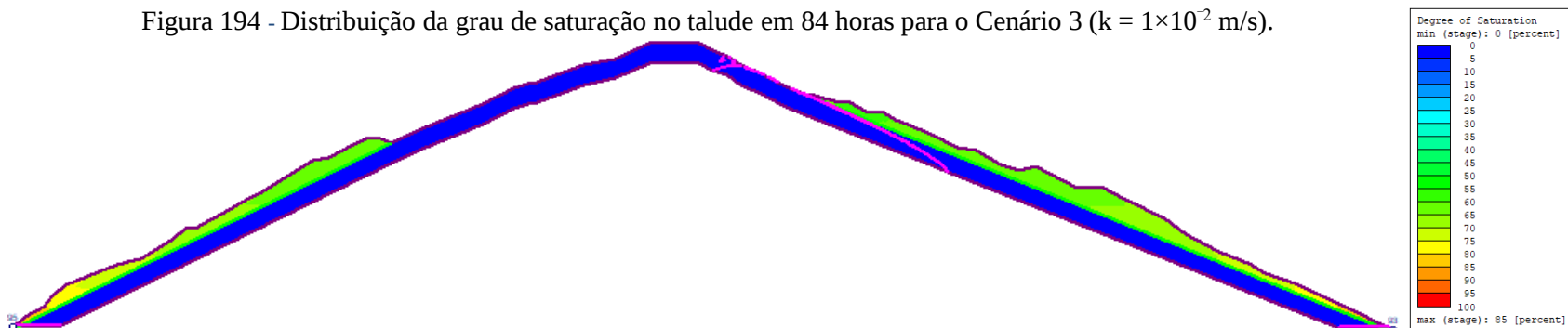


Figura A48 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

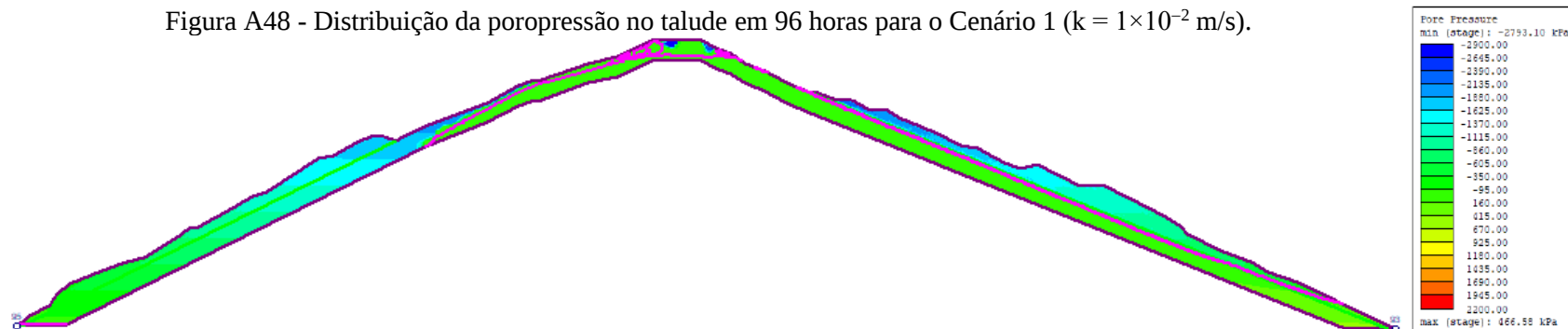


Figura A49 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

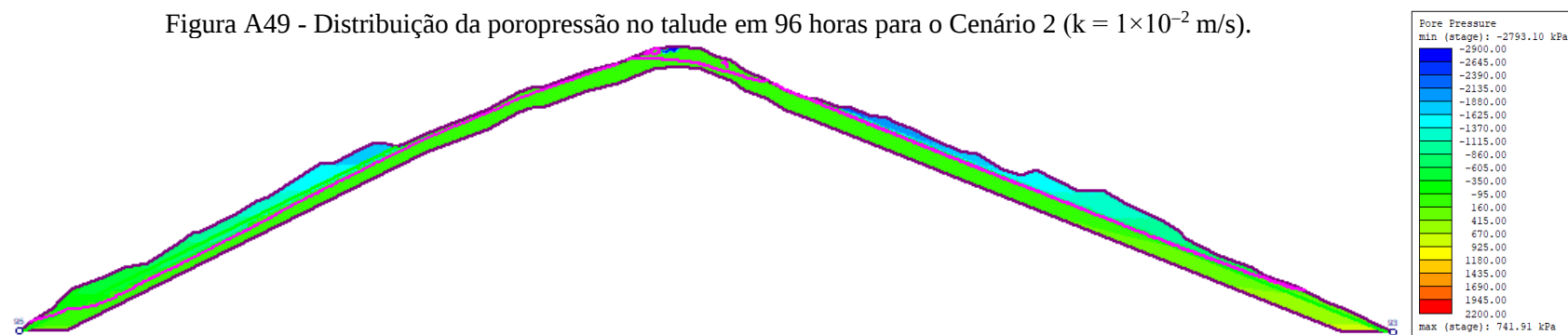


Figura A50 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-2}$ m/s).

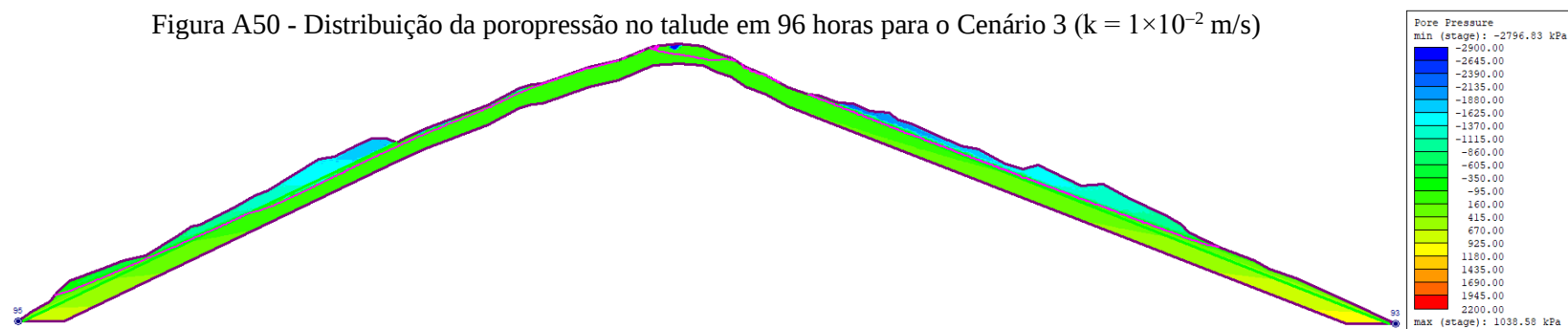


Figura A51 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s).

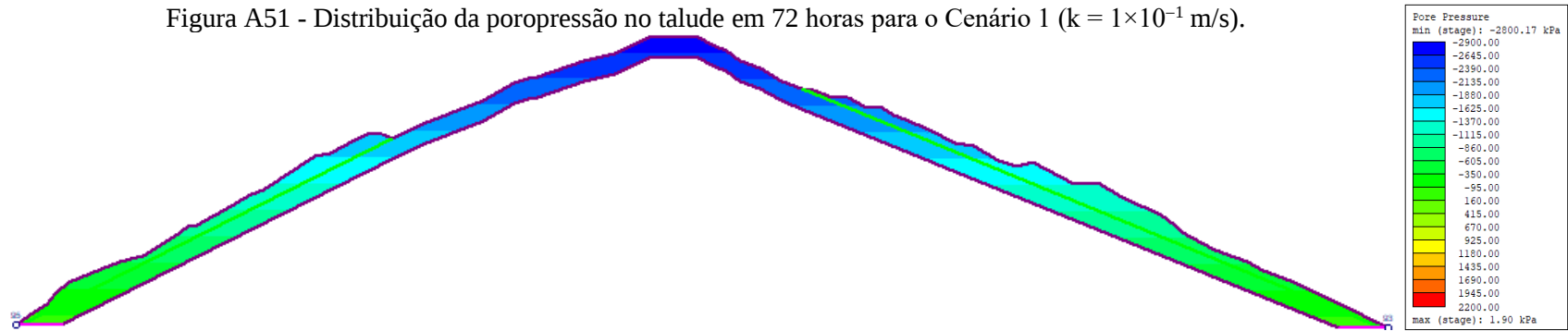


Figura A52 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s).

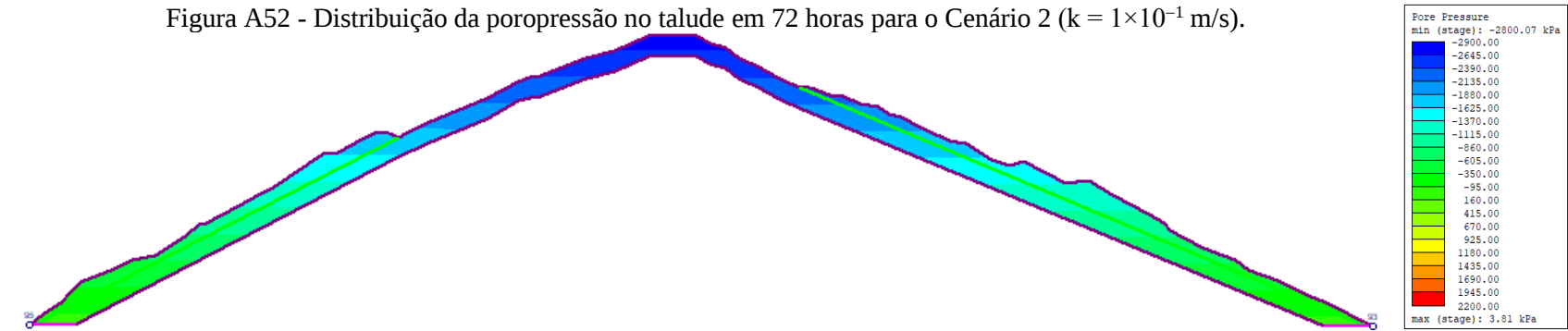


Figura A53 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s).

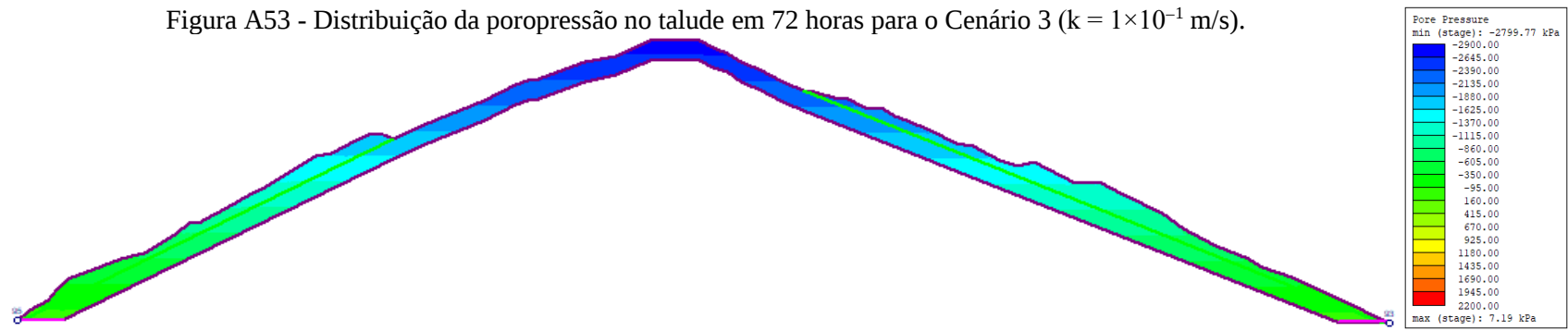


Figura A54 - Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s).

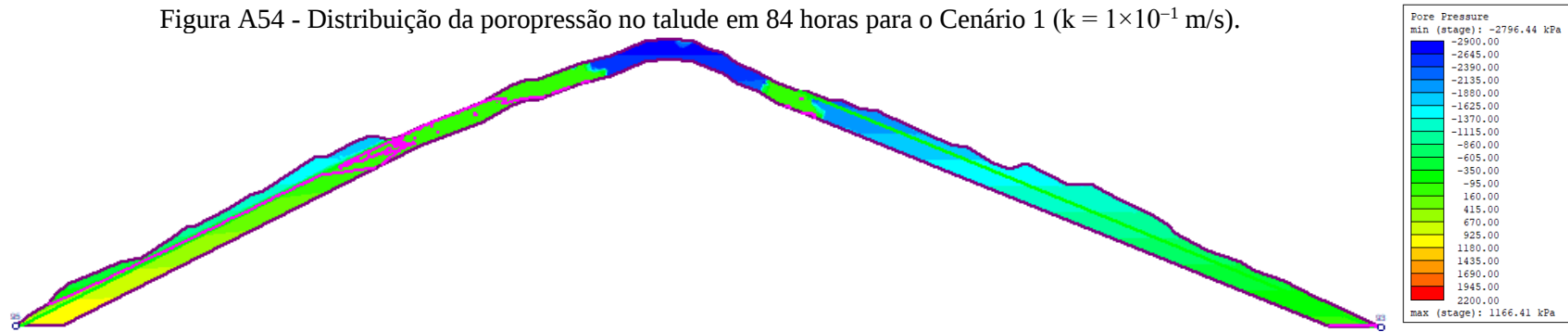


Figura A55 – Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s).

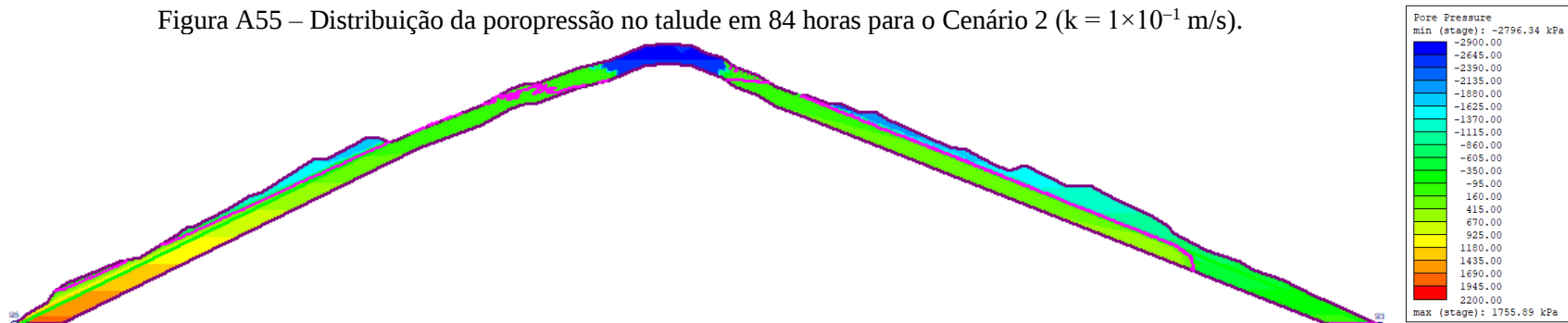


Figura 195 - Distribuição da poropressão no talude em 84 horas para o Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-1}$ m/s).

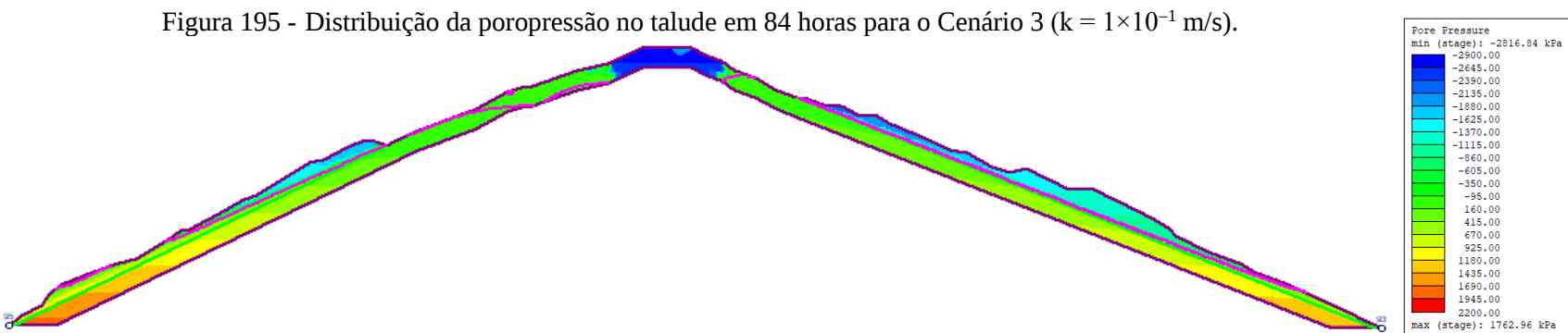


Figura A56 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

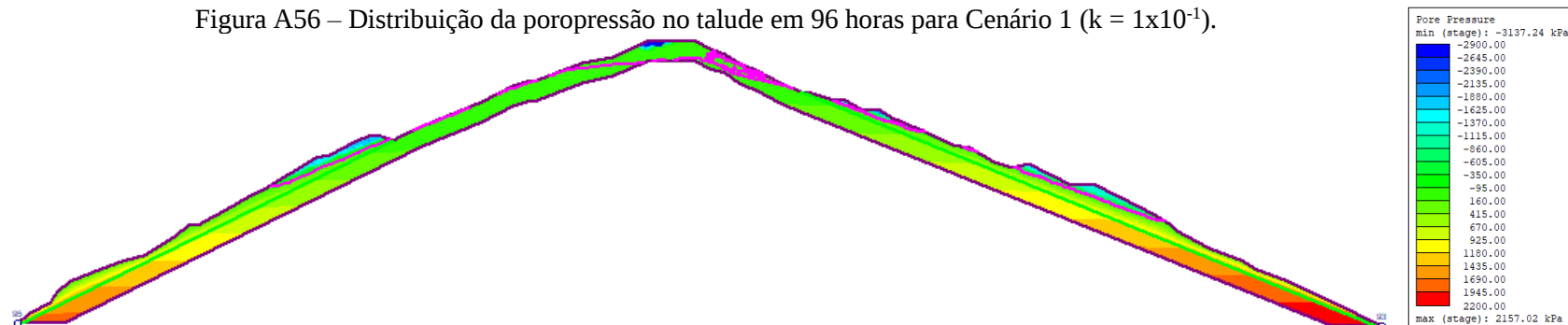


Figura A57 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

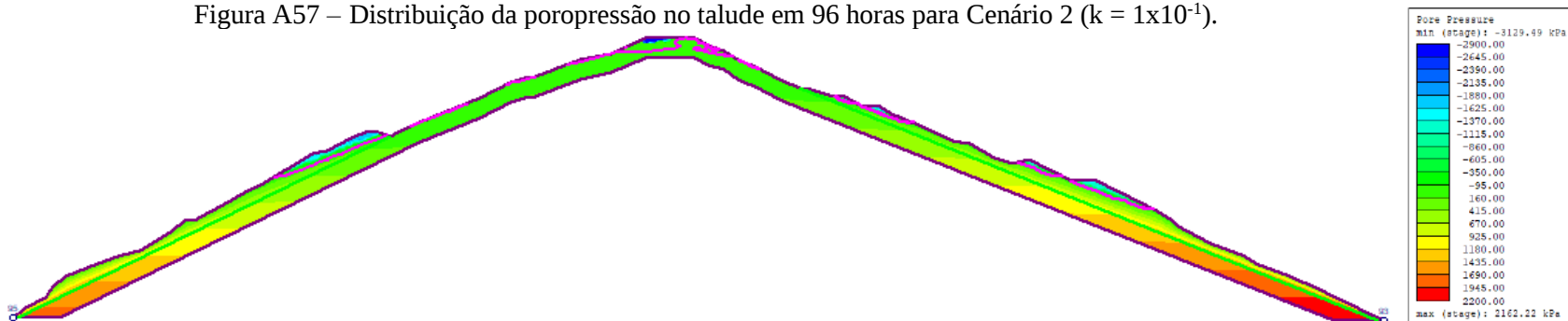


Figura A58 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

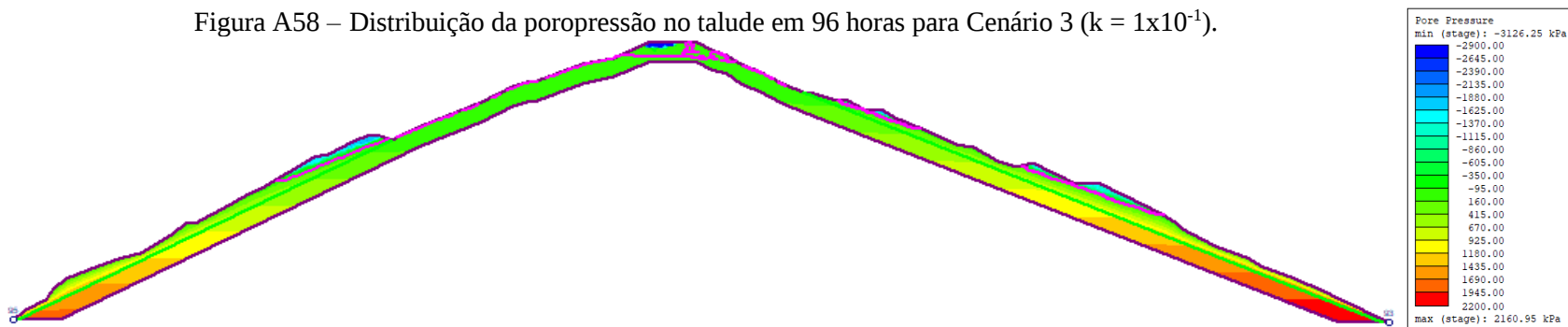


Figura A 59 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 1 ($k = 1 \times 10^{-1}$)

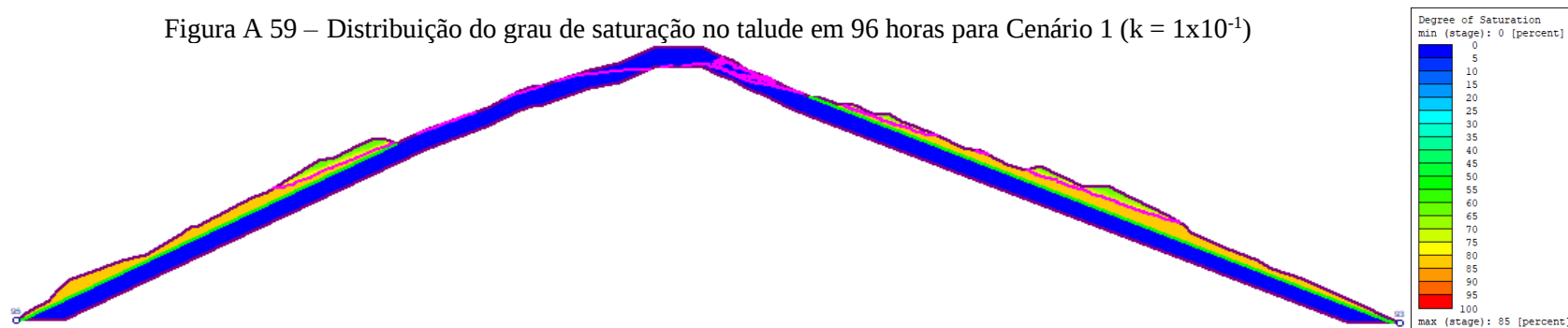


Figura A60 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 2 ($k = 1 \times 10^{-1}$)

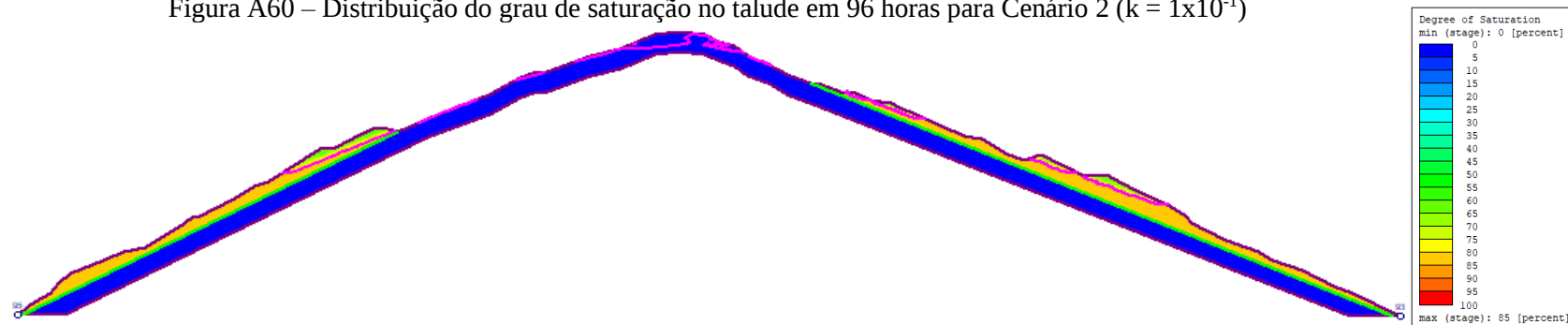


Figura A61 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 3 ($k = 1 \times 10^{-1}$)

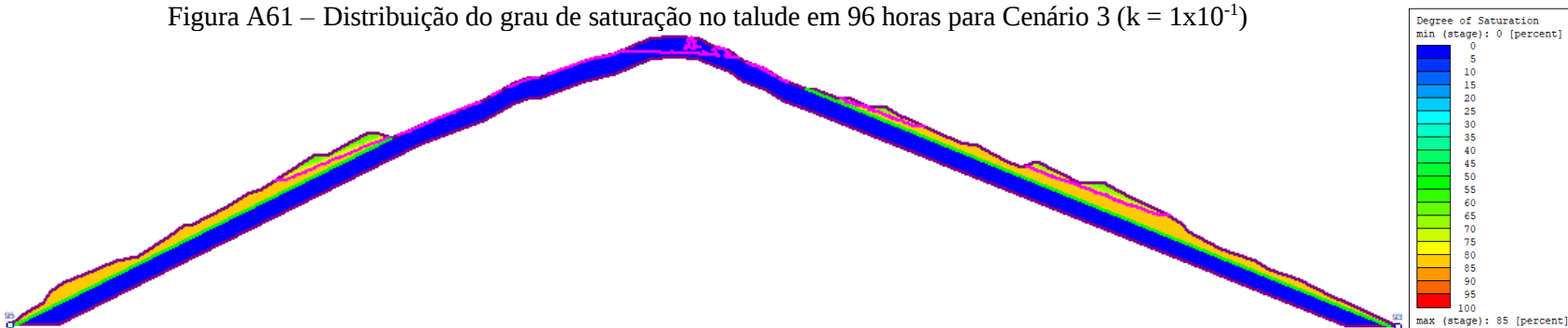


Figura A62 - Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

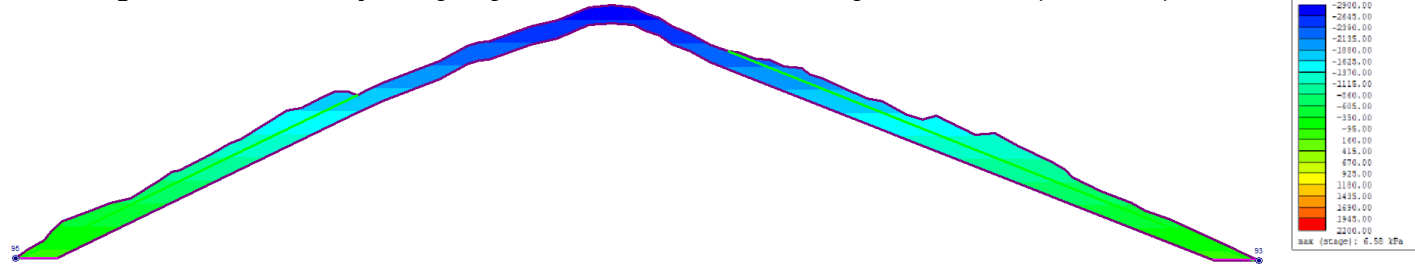


Figura A63 - Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

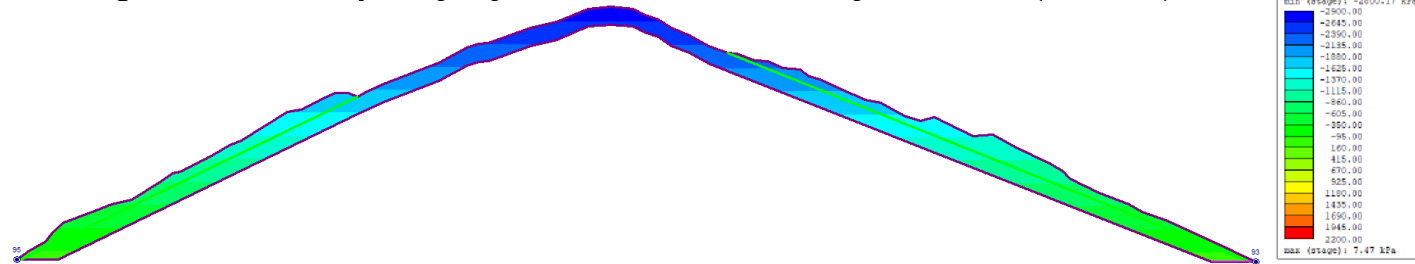


Figura A64 - Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

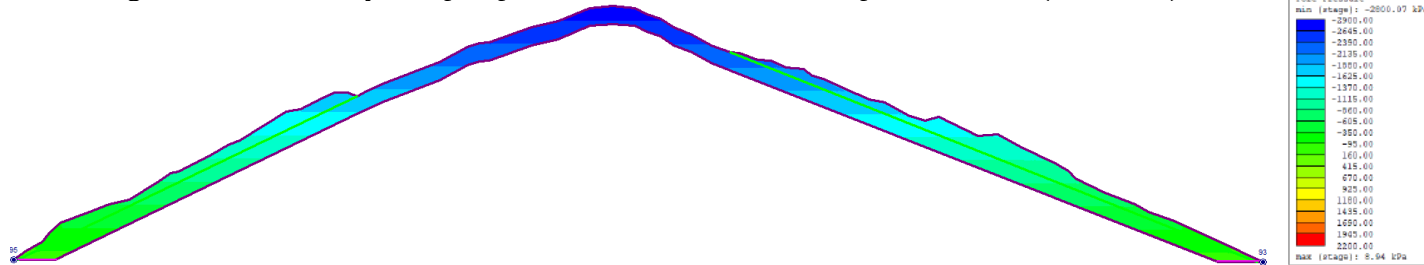


Figura A65 - Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

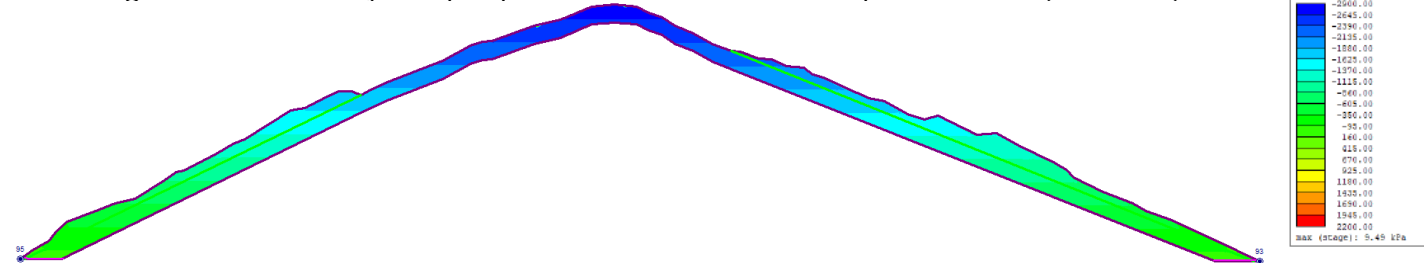


Figura A66 - Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

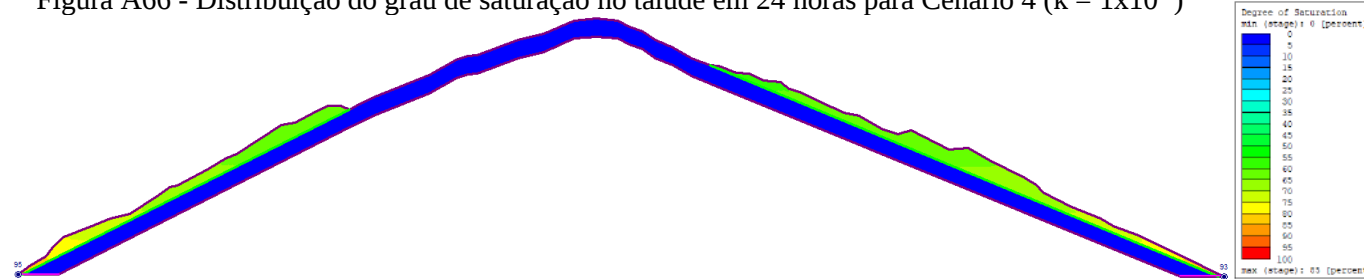


Figura A67 - Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

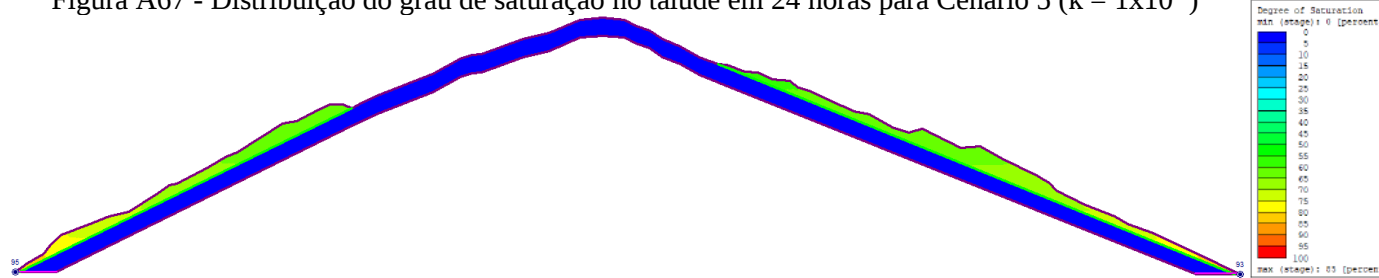


Figura A68 - Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

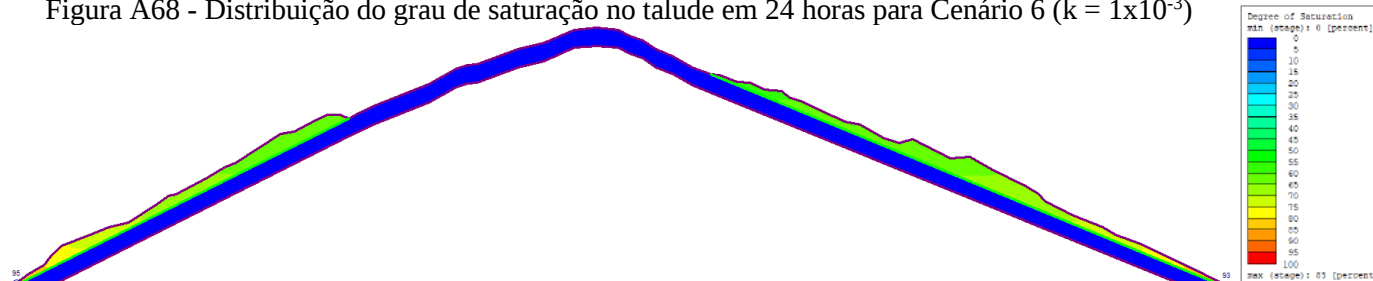


Figura A69 - Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

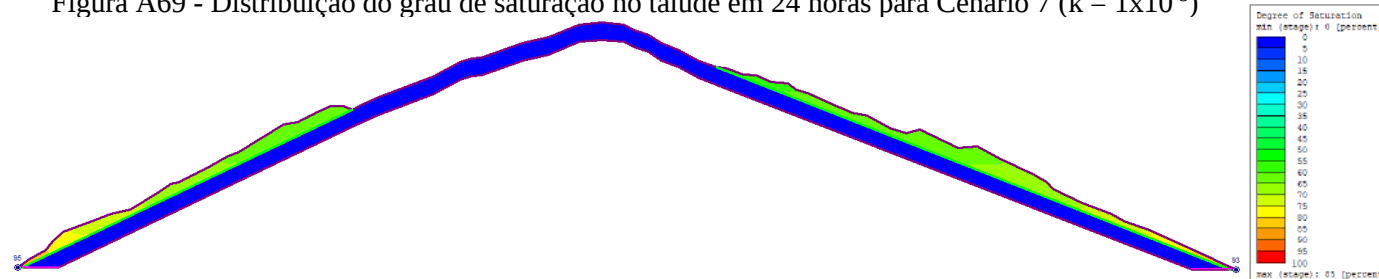


Figura A70 - Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

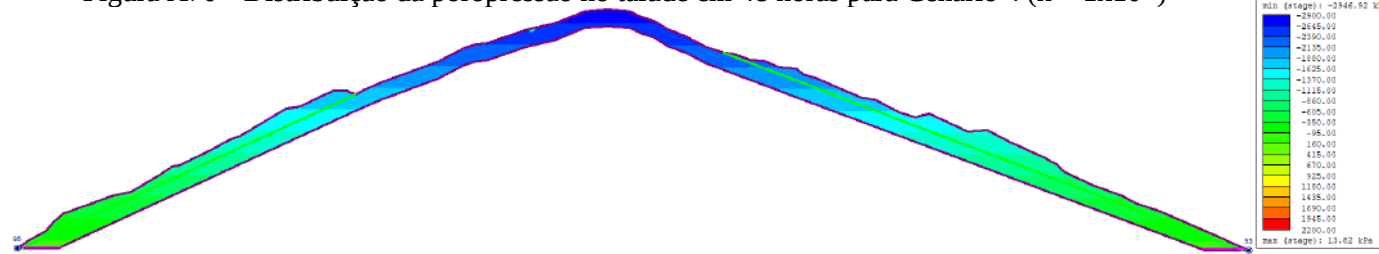


Figura A71 - Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

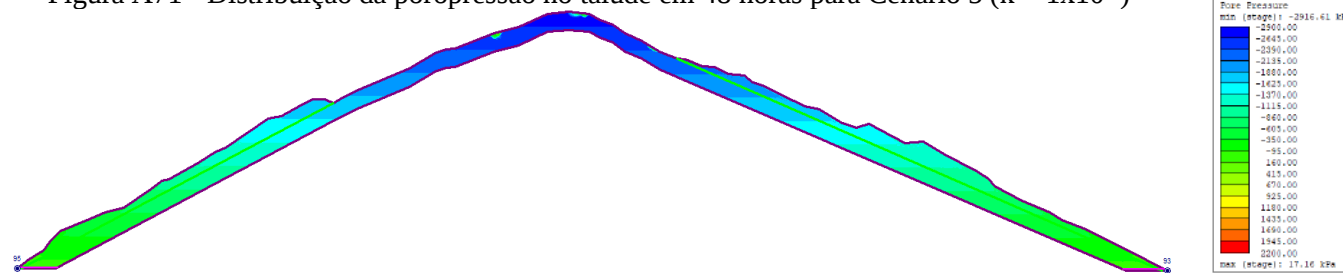


Figura A72 - Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

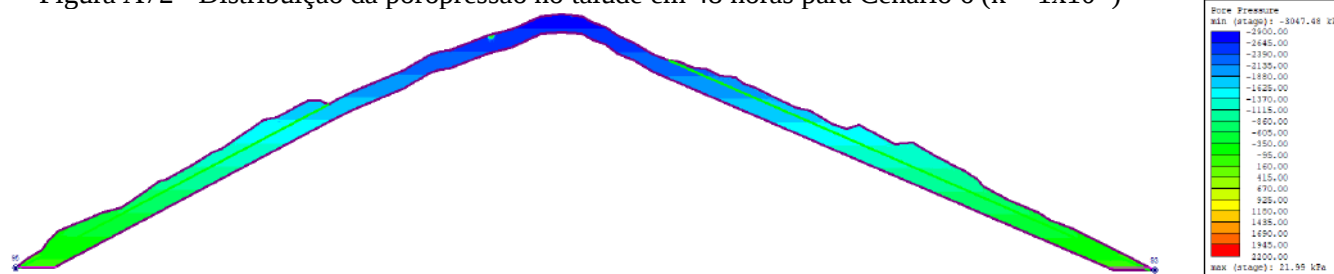


Figura A73 - Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

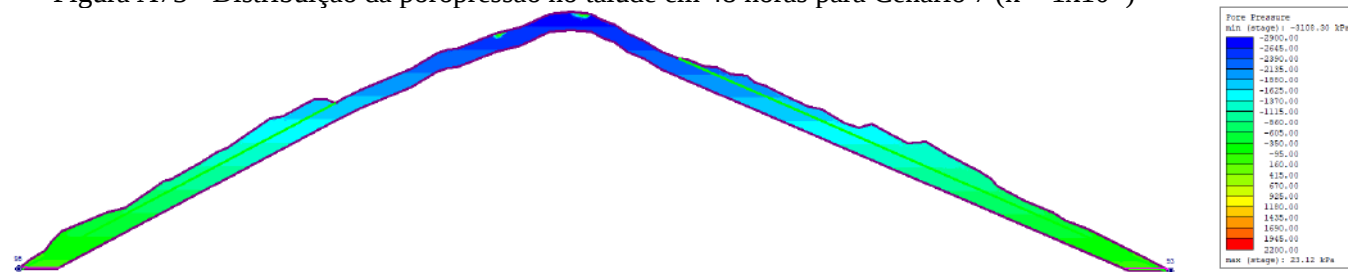


Figura A74 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

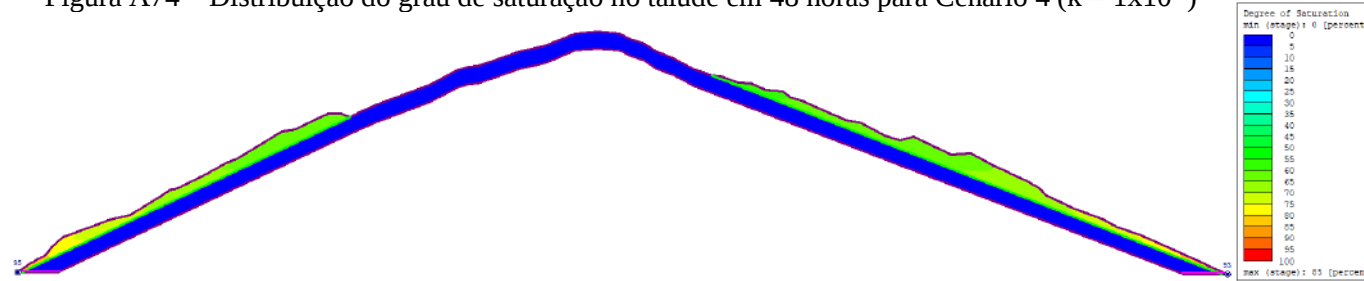


Figura A75 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

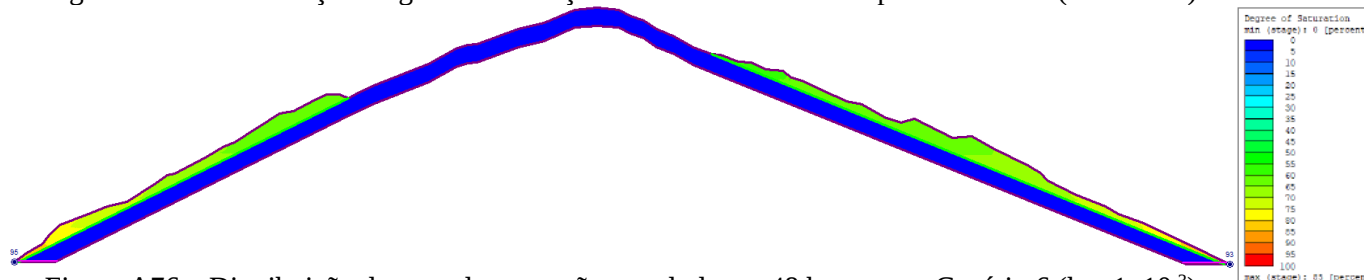


Figura A76 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

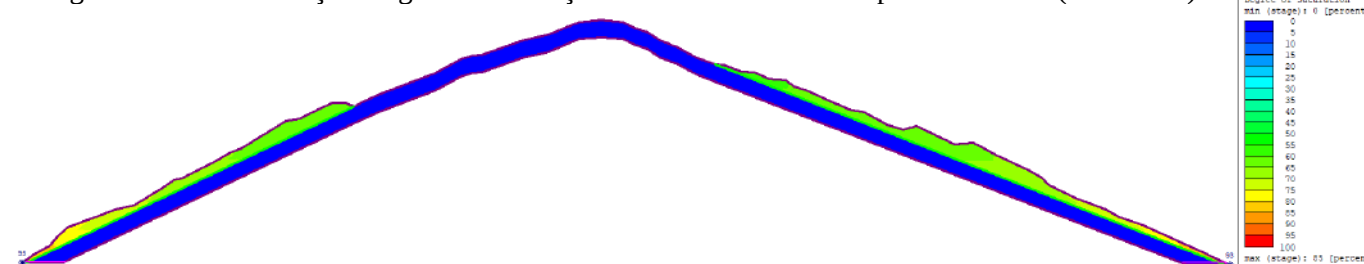


Figura A77 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

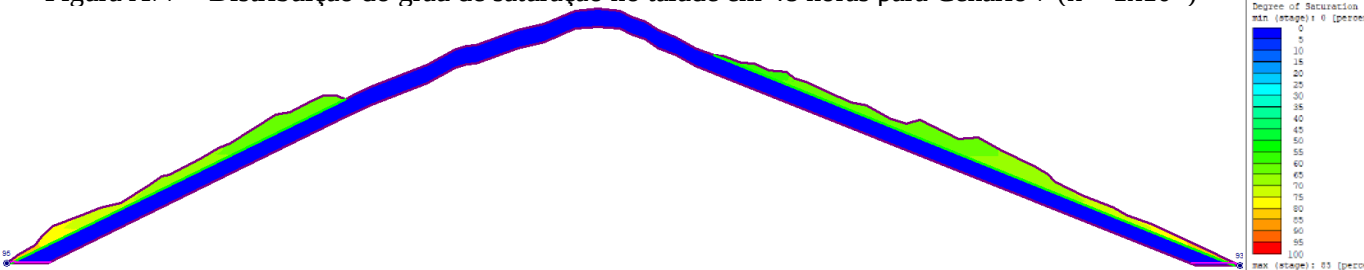


Figura A78 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

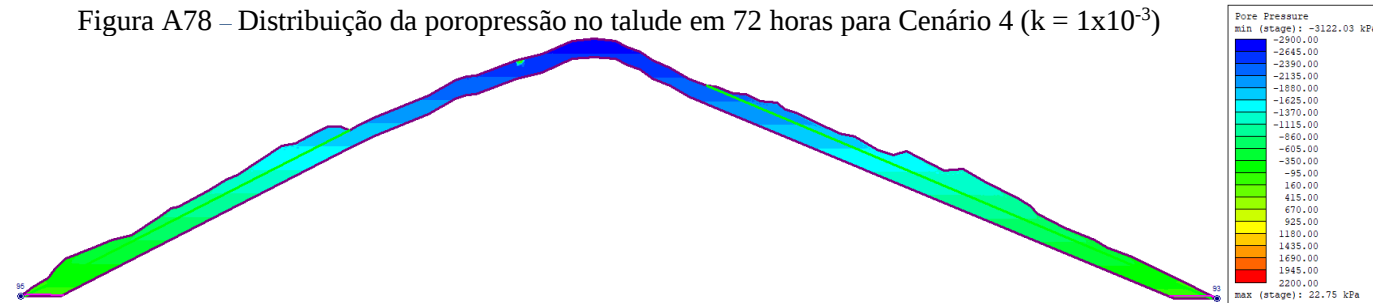


Figura A79 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

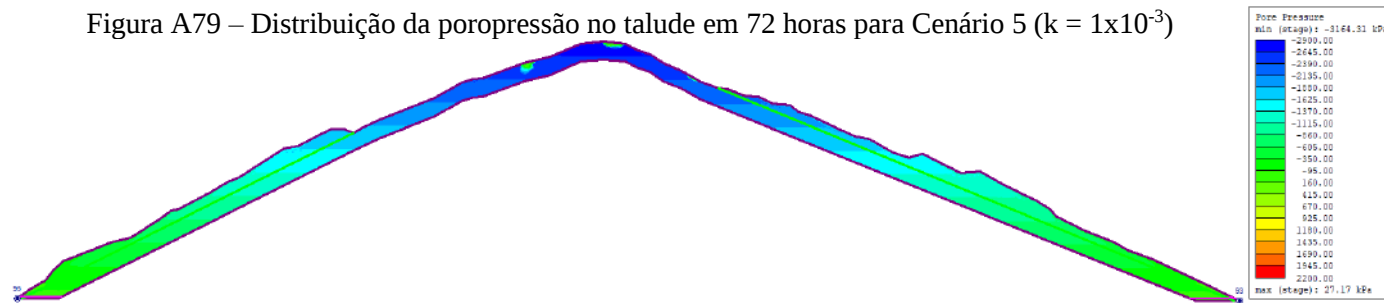


Figura A80 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

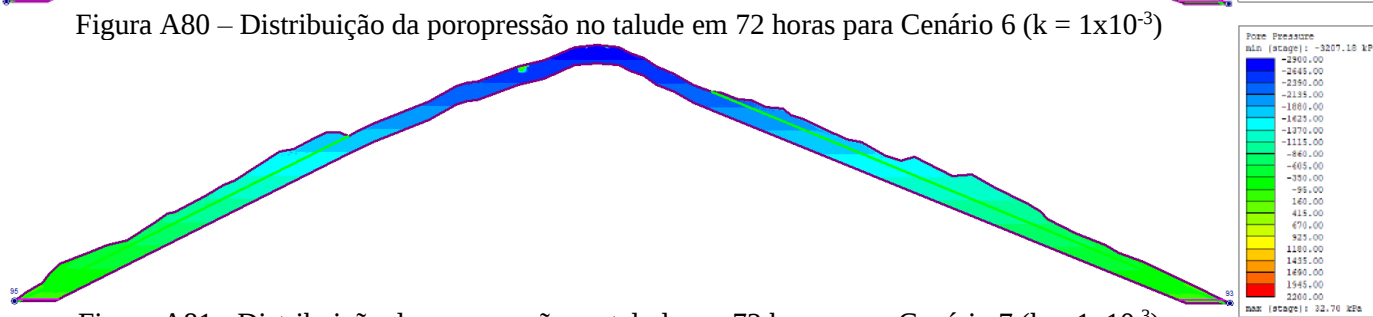


Figura A81 - Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

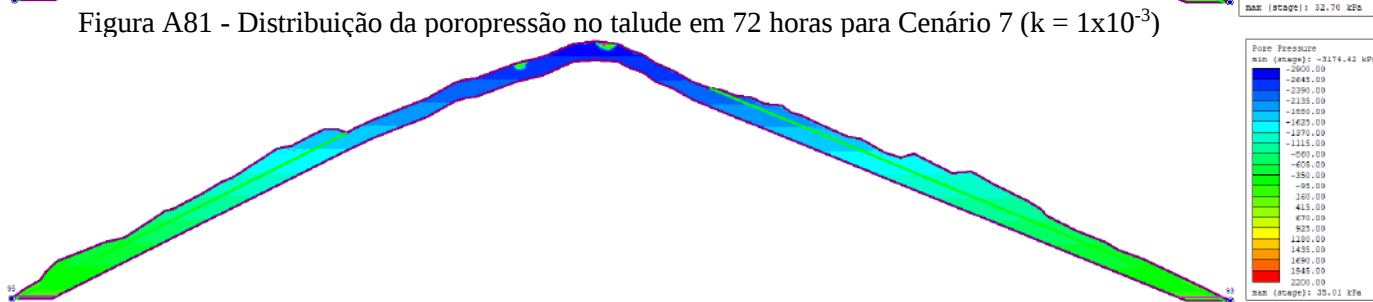


Figura A82 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

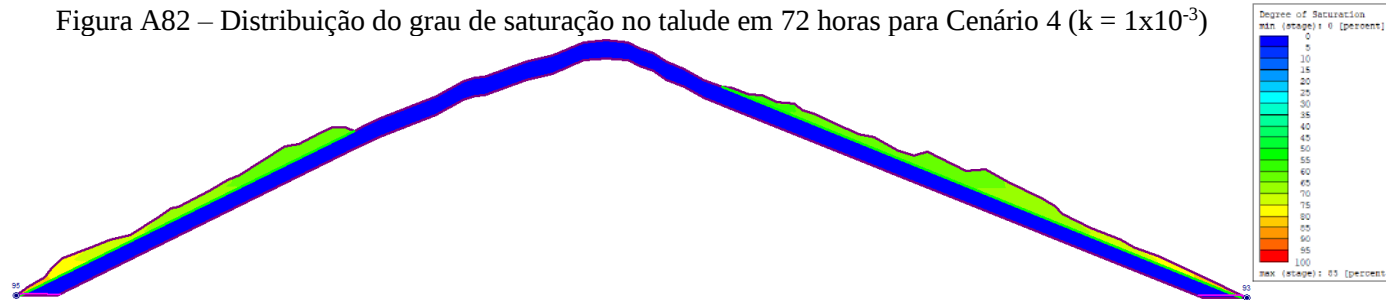


Figura A83 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

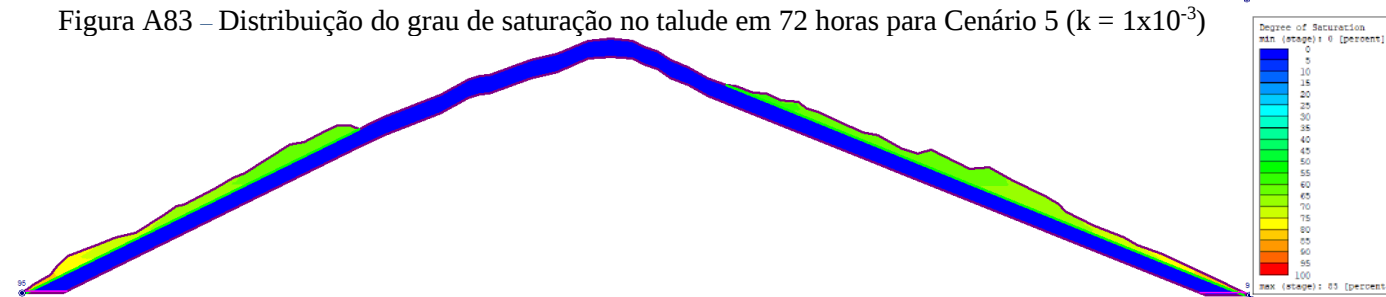


Figura A84 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

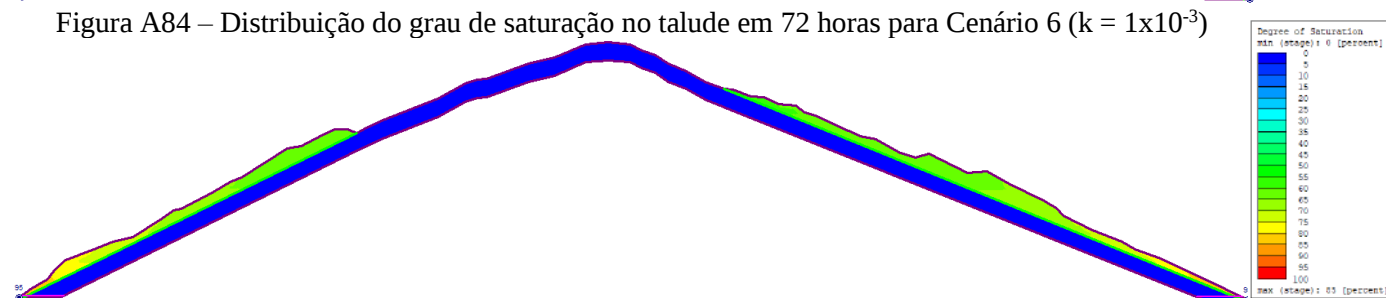


Figura A85 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

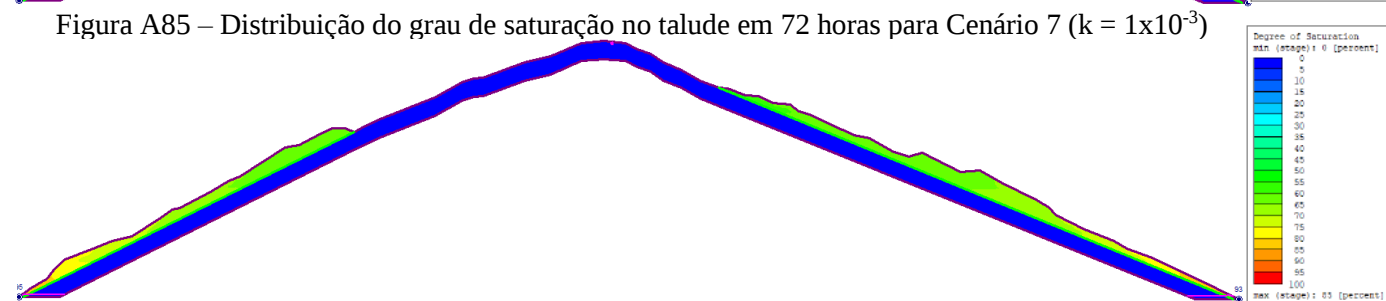


Figura A86 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

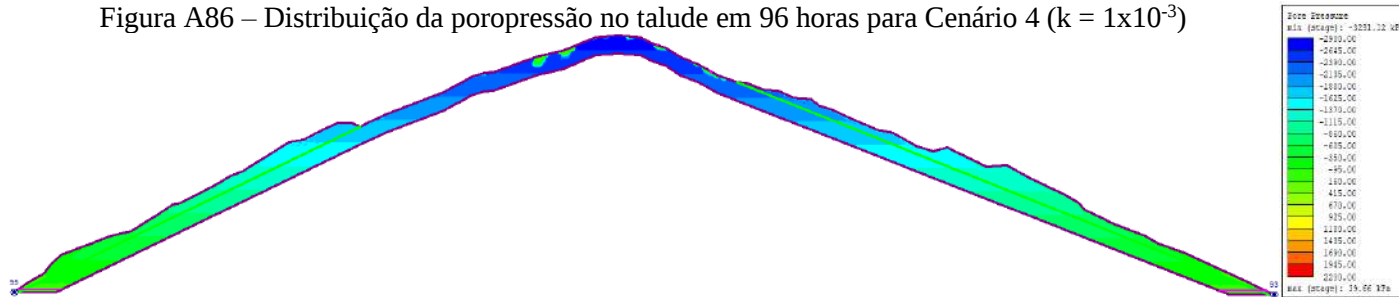


Figura A87 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

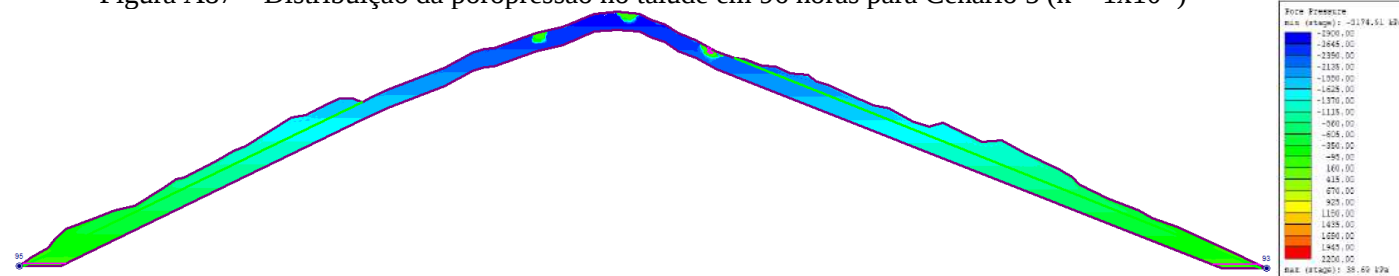


Figura A88 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

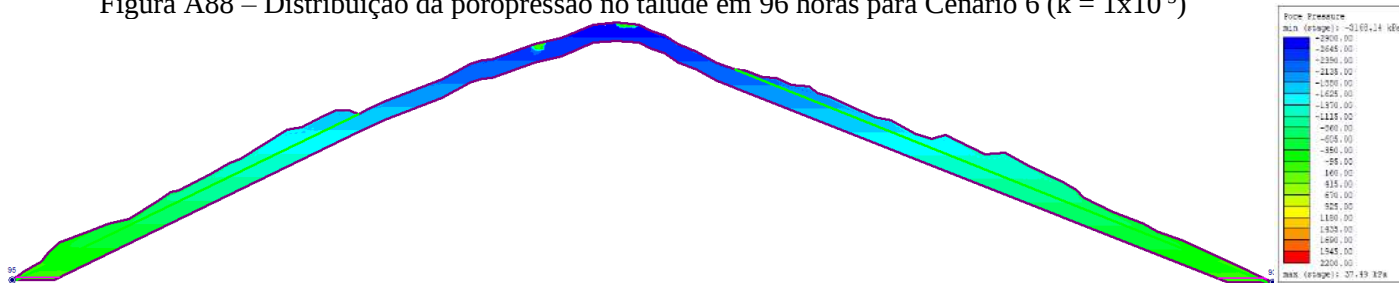


Figura A 89 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$)

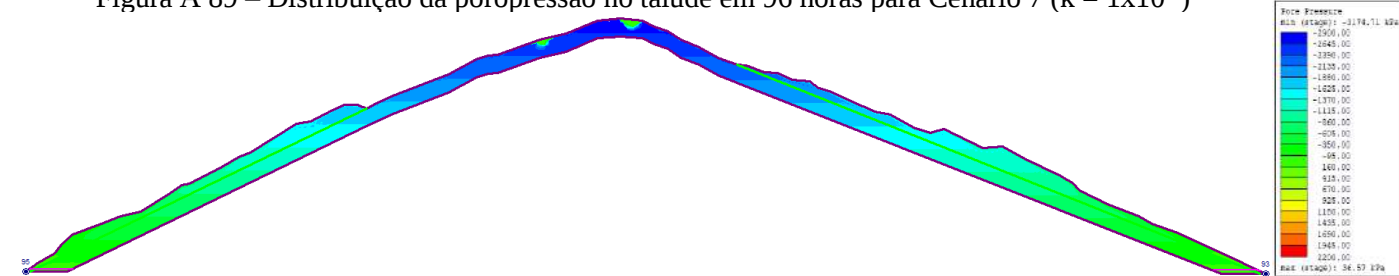


Figura A90 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$).

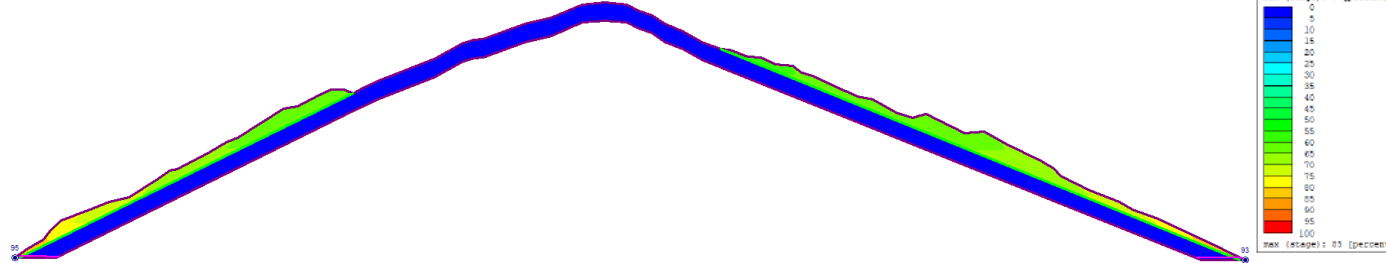


Figura A91 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$).

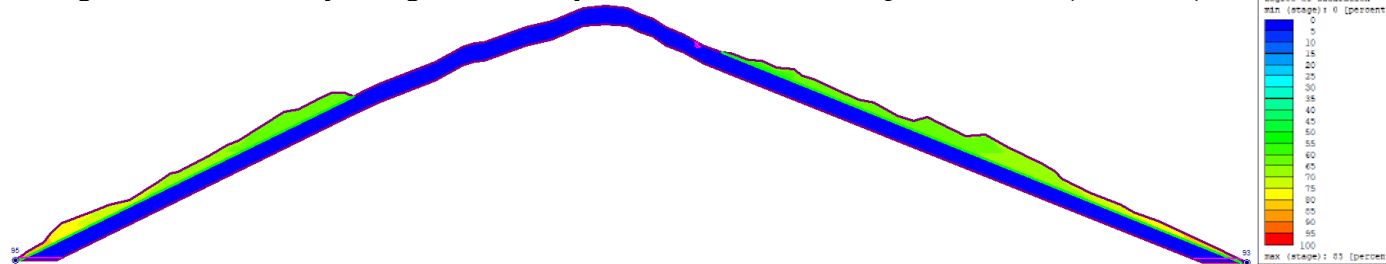


Figura A92 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$).

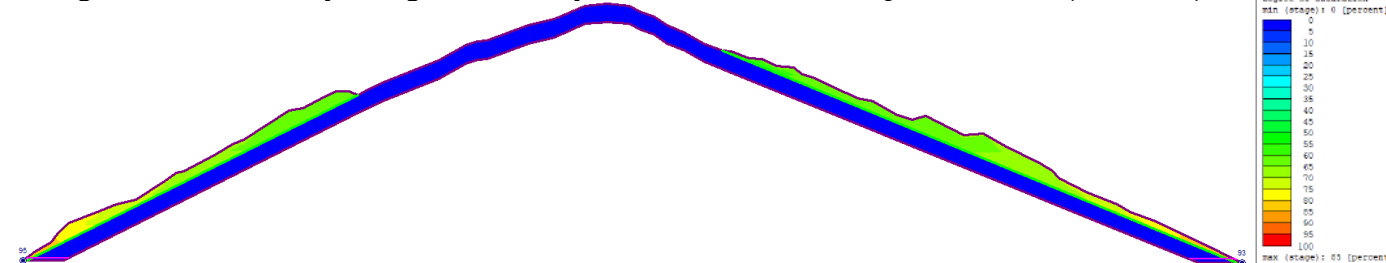


Figura A93 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$).

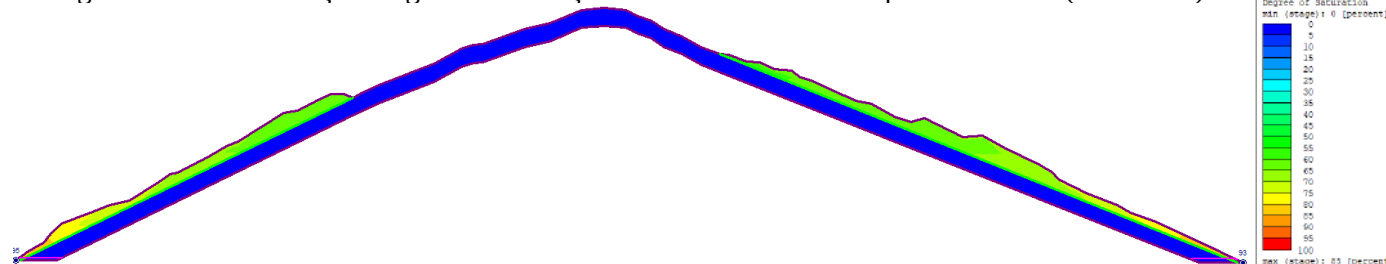


Figura A94 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

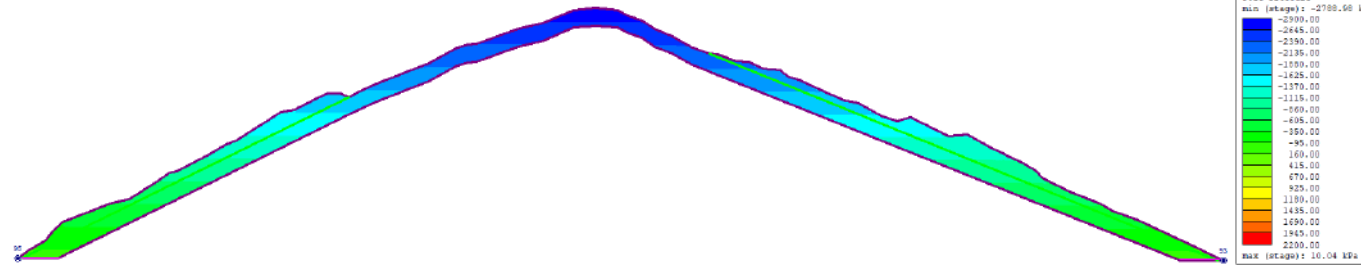


Figura A95 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

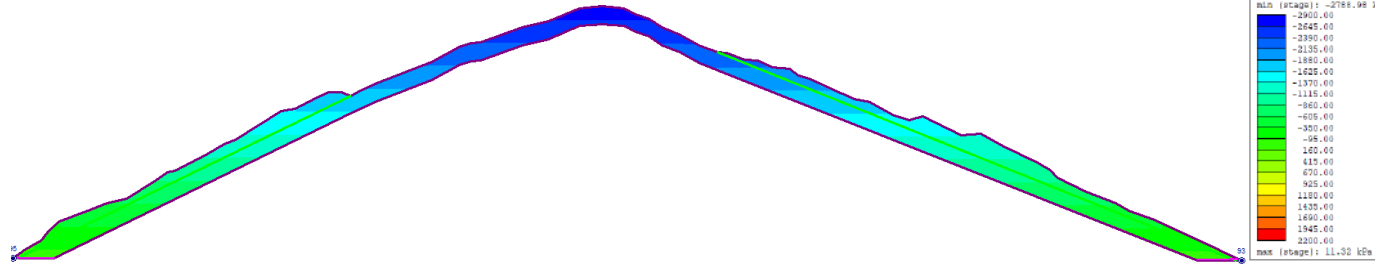


Figura A96 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

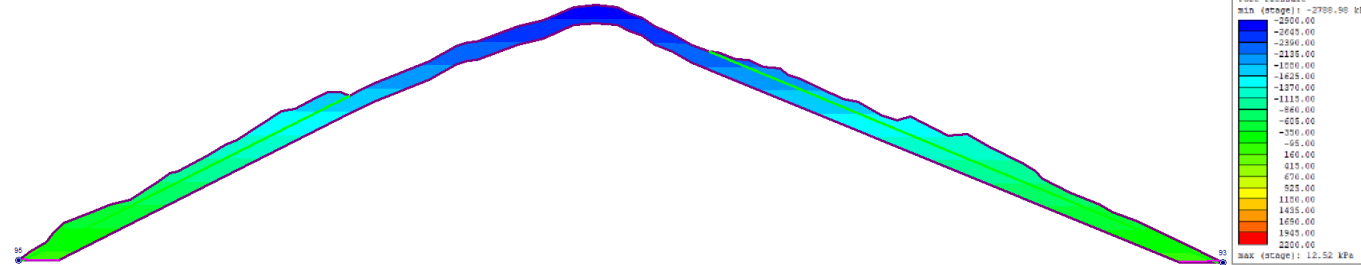


Figura A97 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

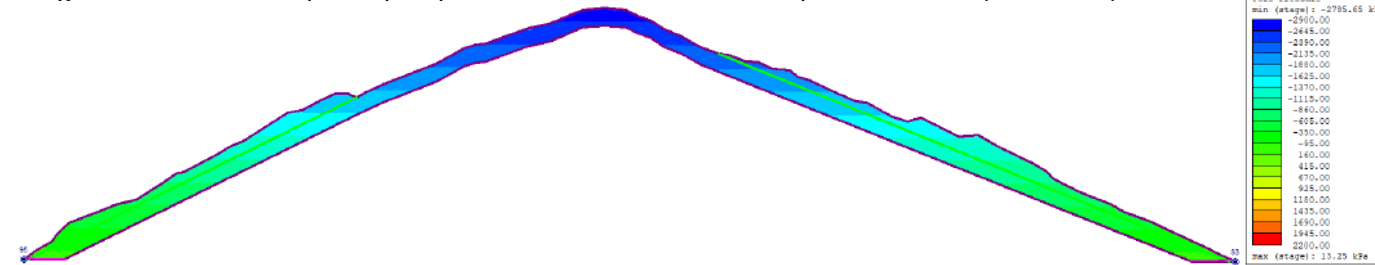


Figura A98 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

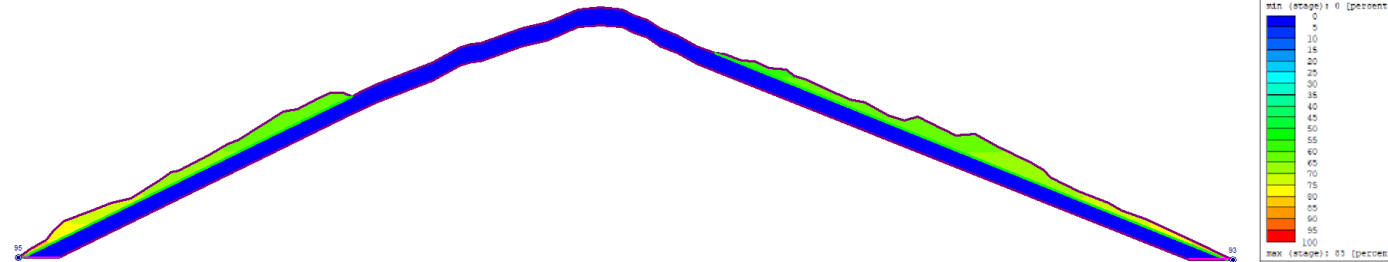


Figura A99 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

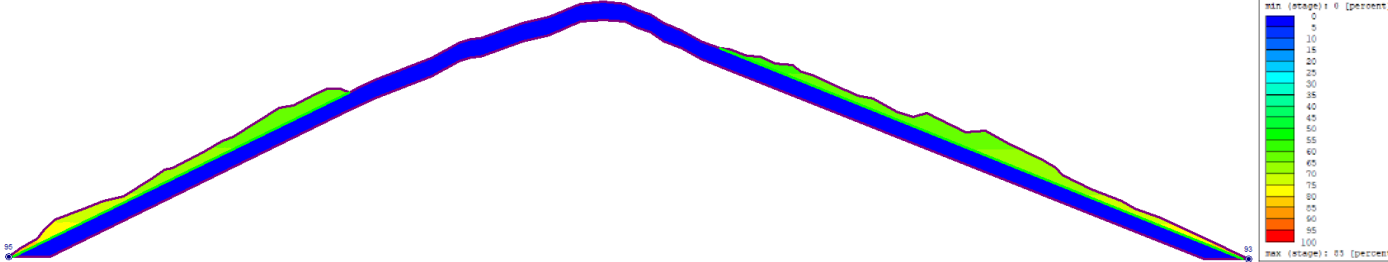


Figura A100 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

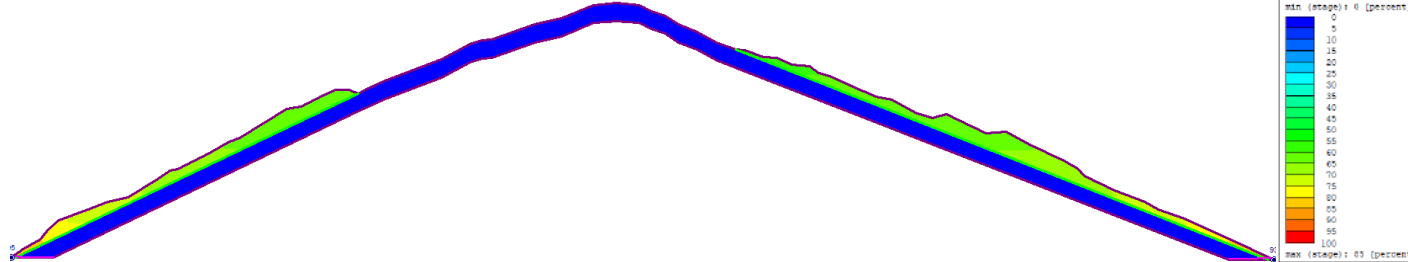


Figura A101 - Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

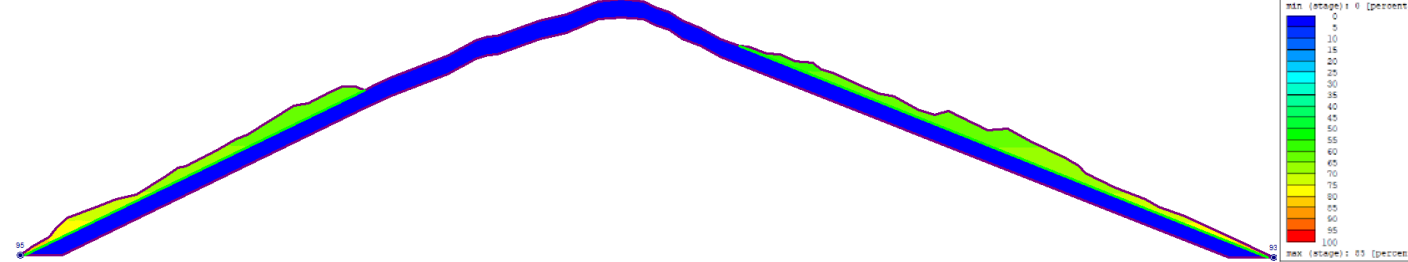


Figura A102 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

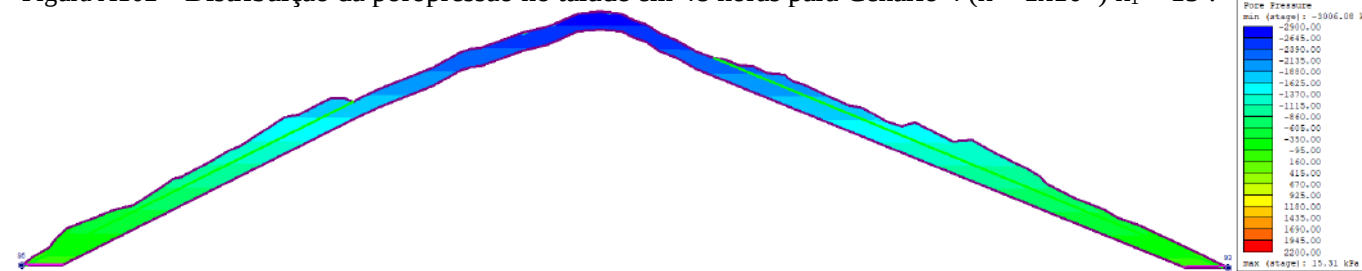


Figura A103 - Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

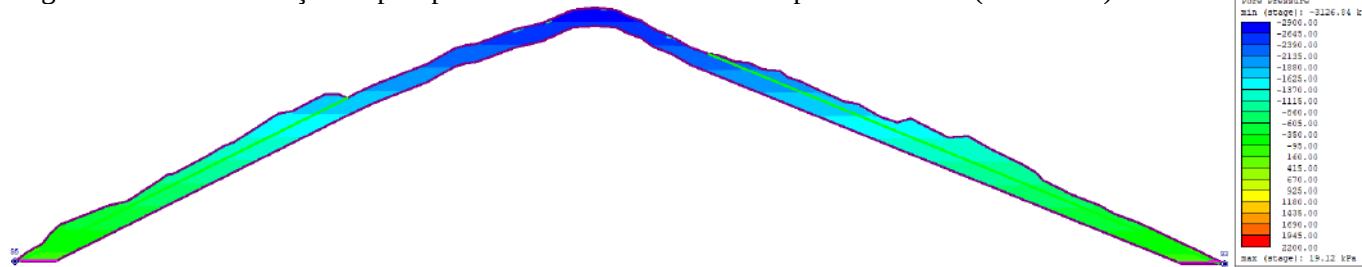


Figura A104 - Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

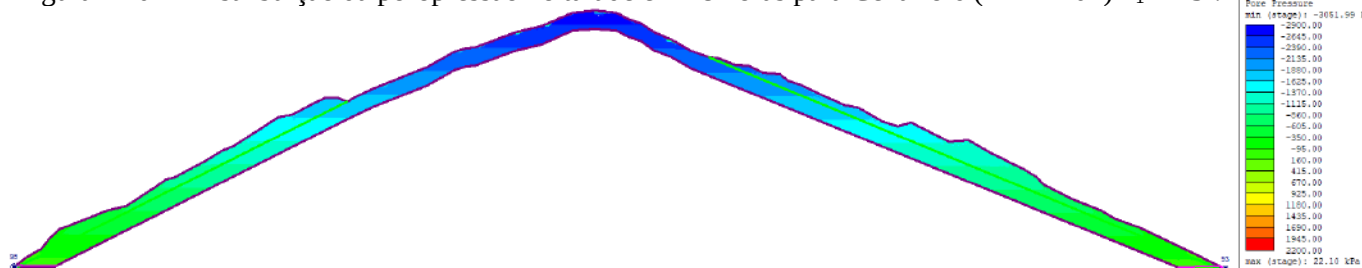


Figura A105 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

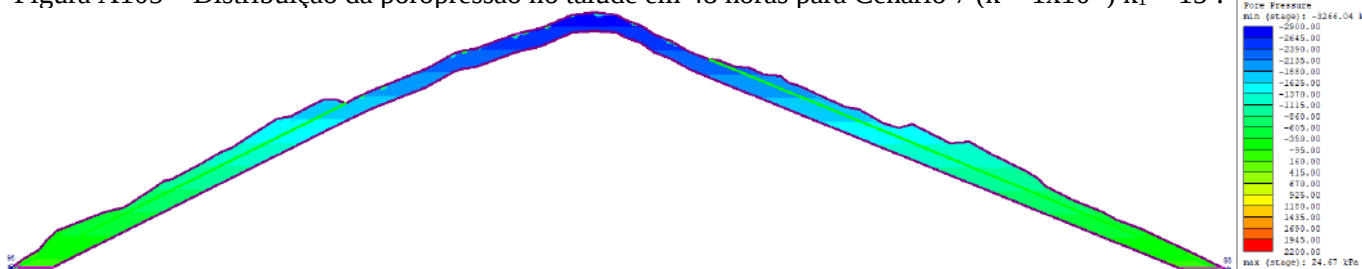


Figura A106 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

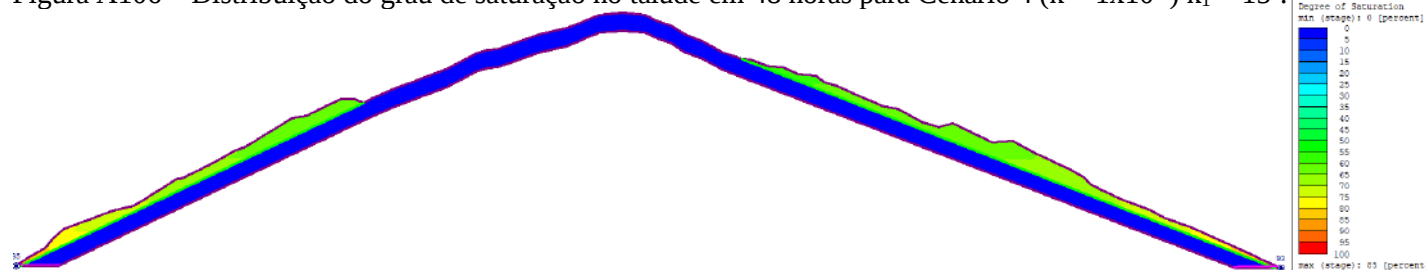


Figura A107 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

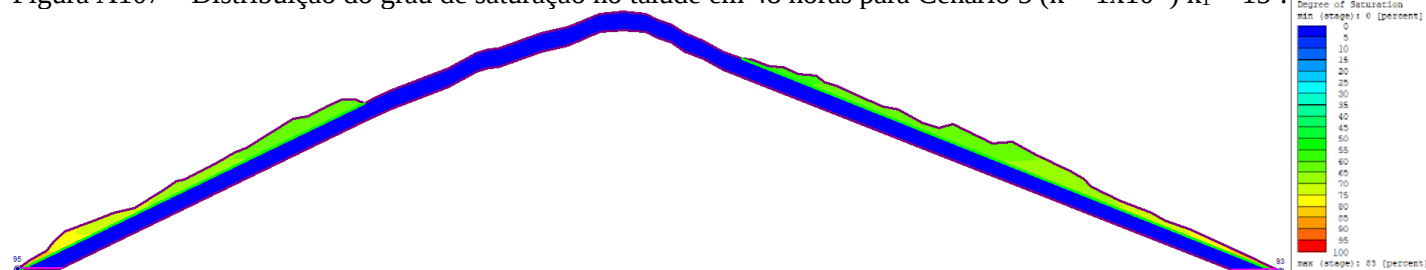


Figura A108 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

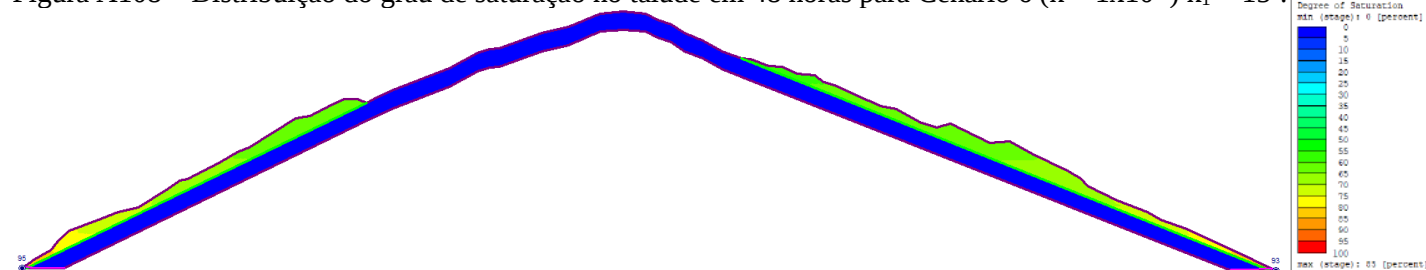


Figura A109 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

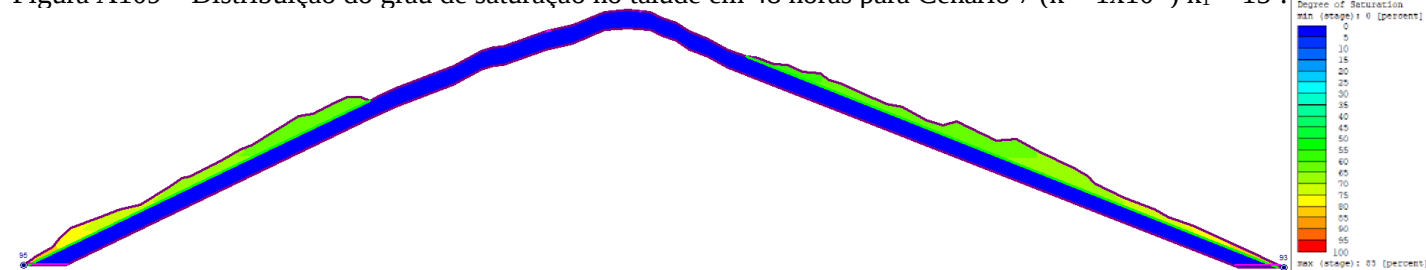


Figura A110 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

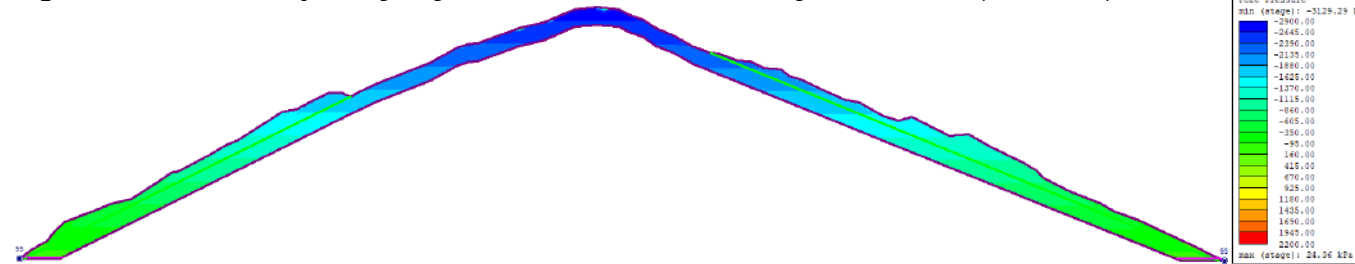


Figura A111 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

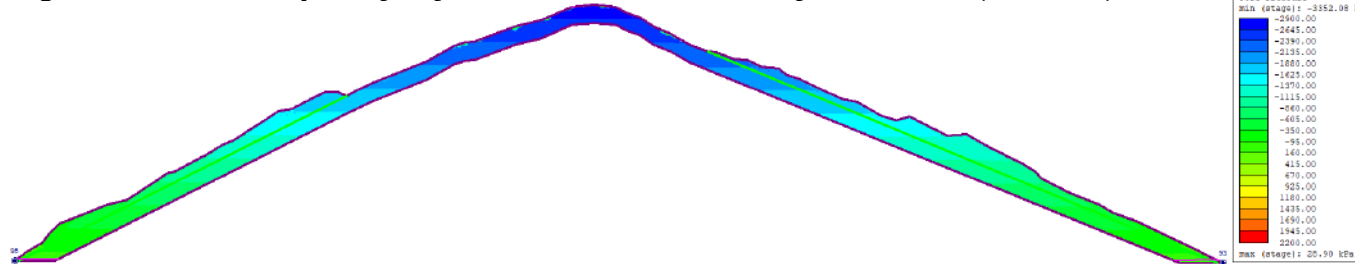


Figura A112 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

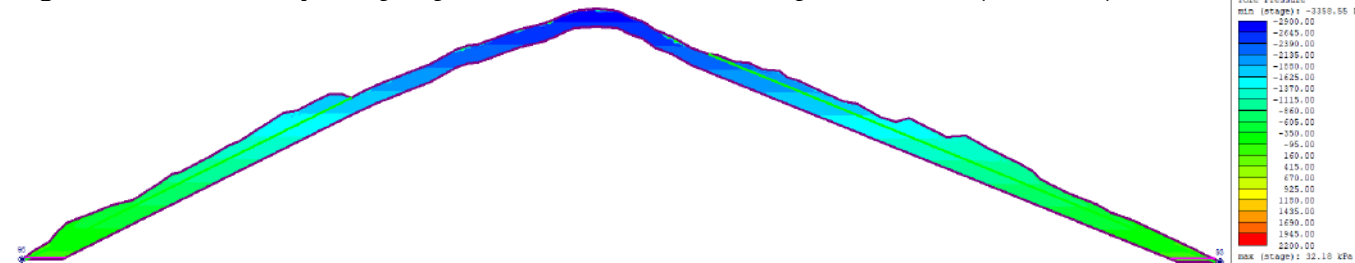


Figura A113 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

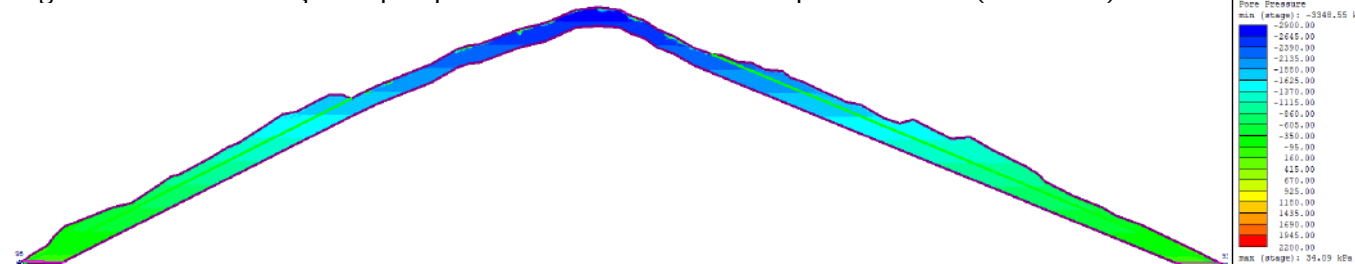


Figura A114 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

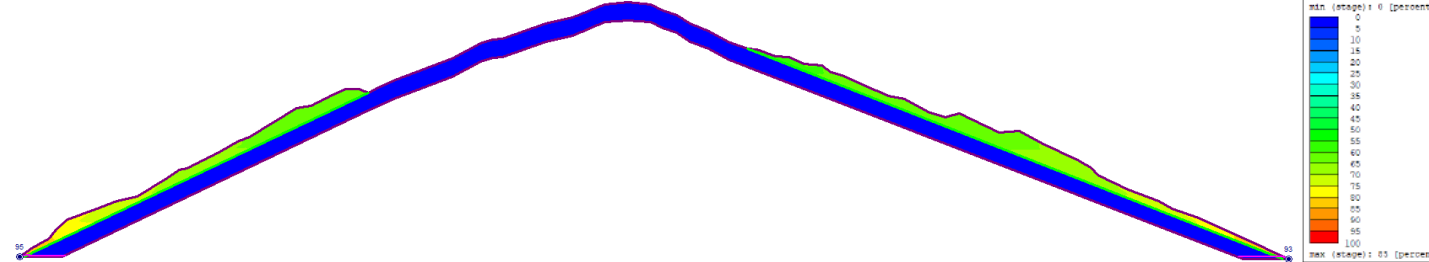


Figura A115 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

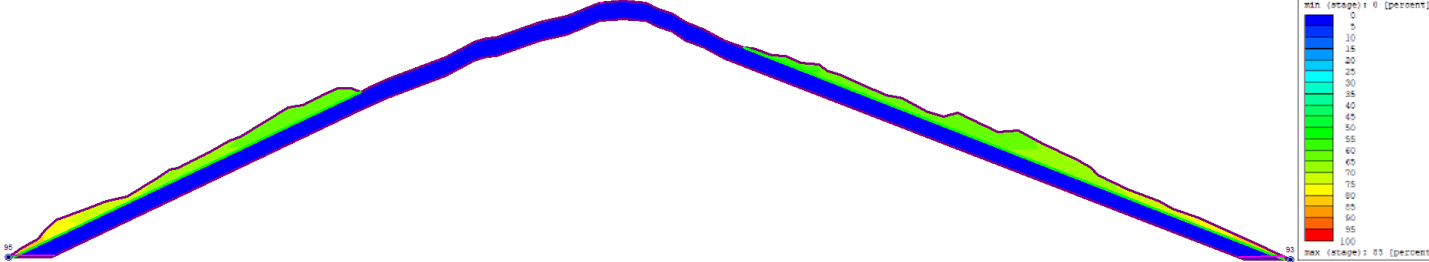


Figura A116 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

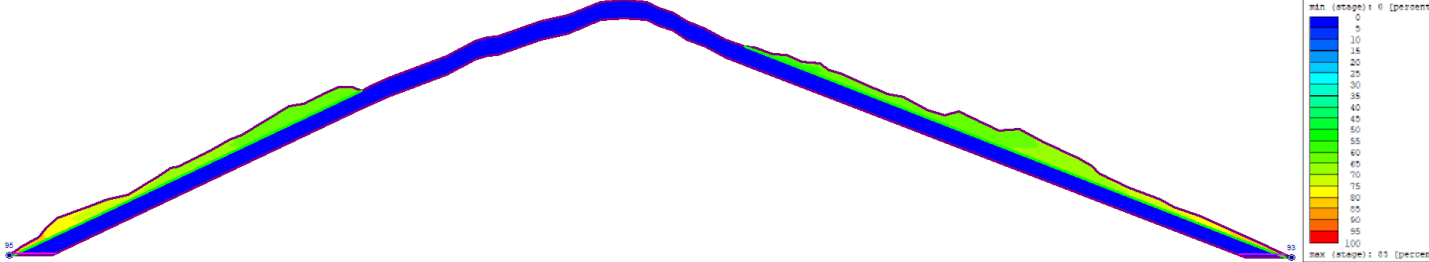


Figura A117 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

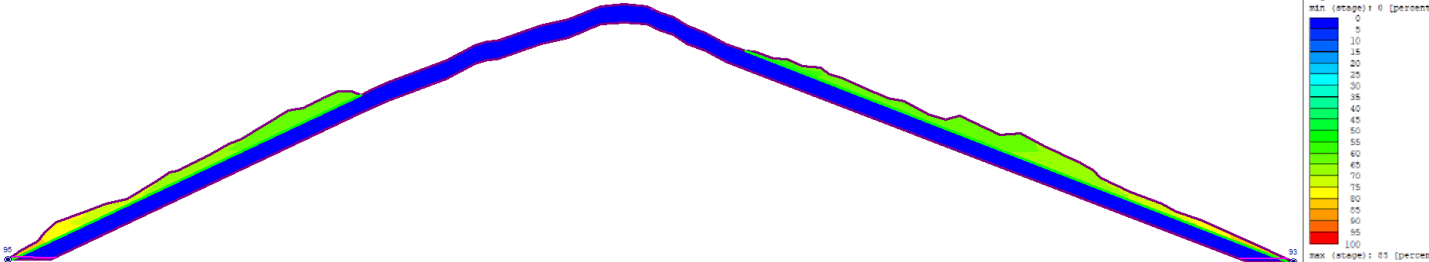


Figura A118 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

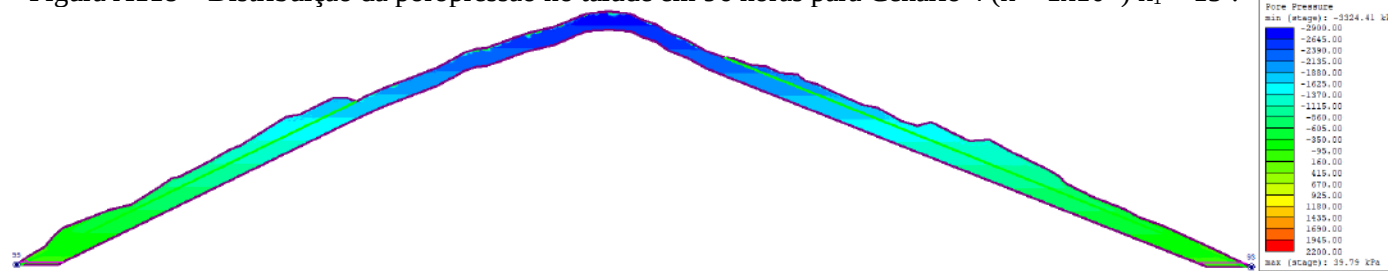


Figura A119 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

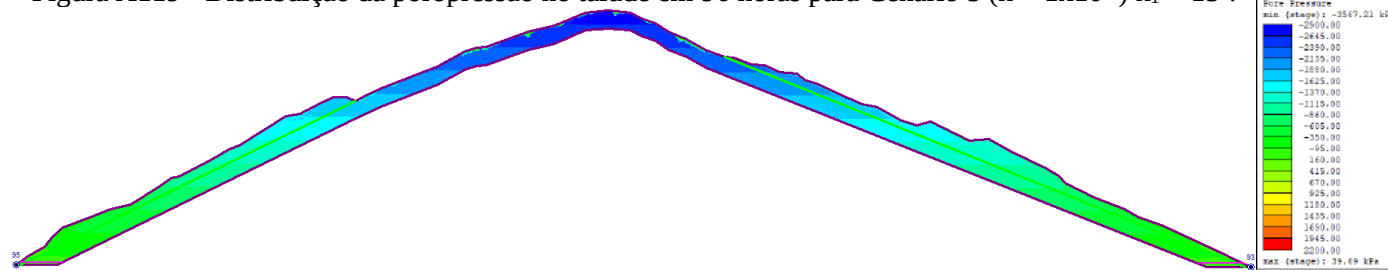


Figura A120 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

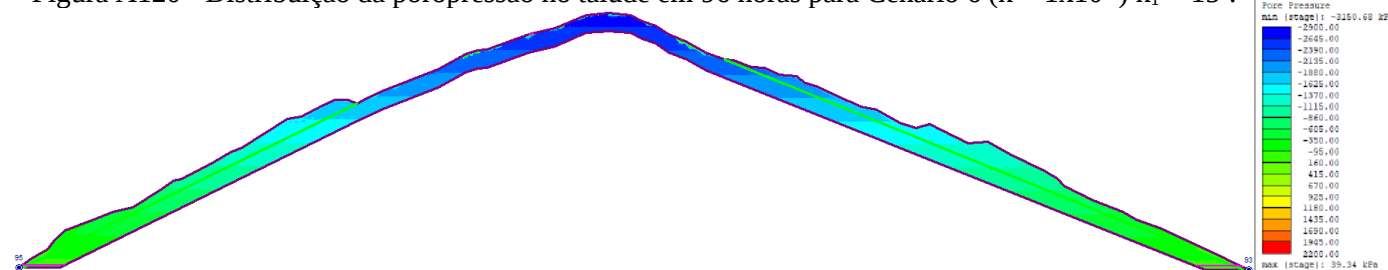


Figura A121 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$.

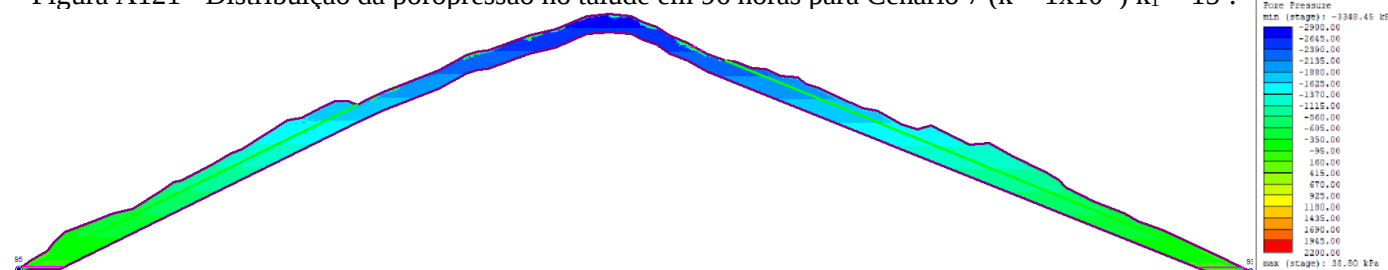


Figura A122 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$

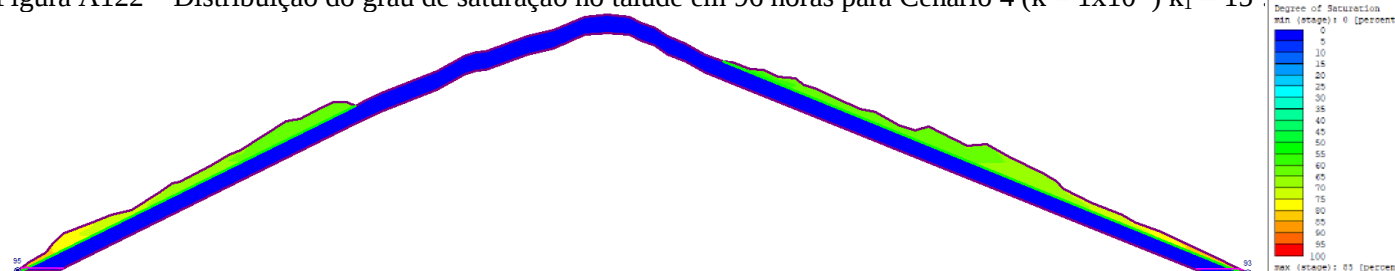


Figura A 123 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$

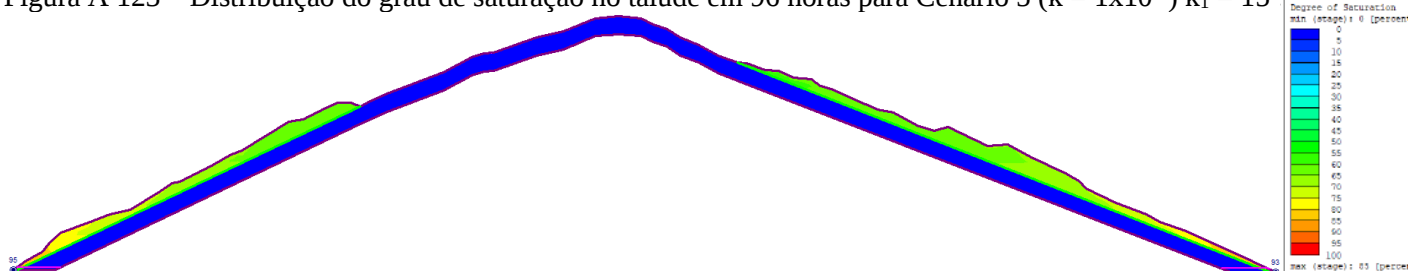


Figura A 124 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$

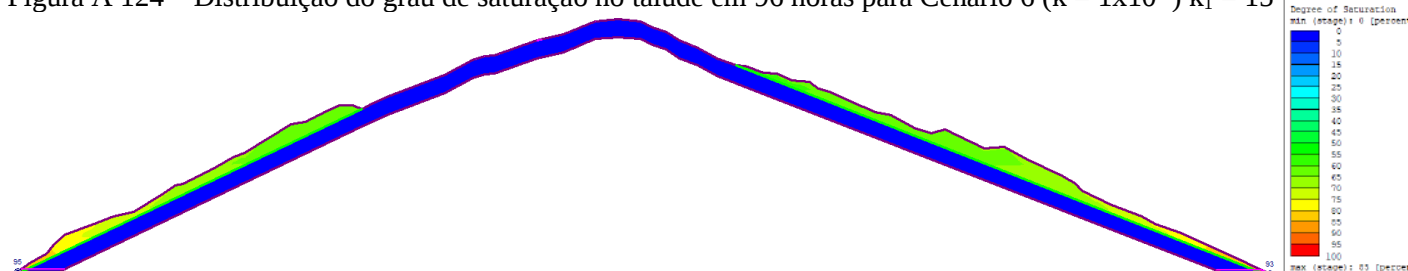


Figura A 125 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-3}$) $k_1 = 15^\circ$

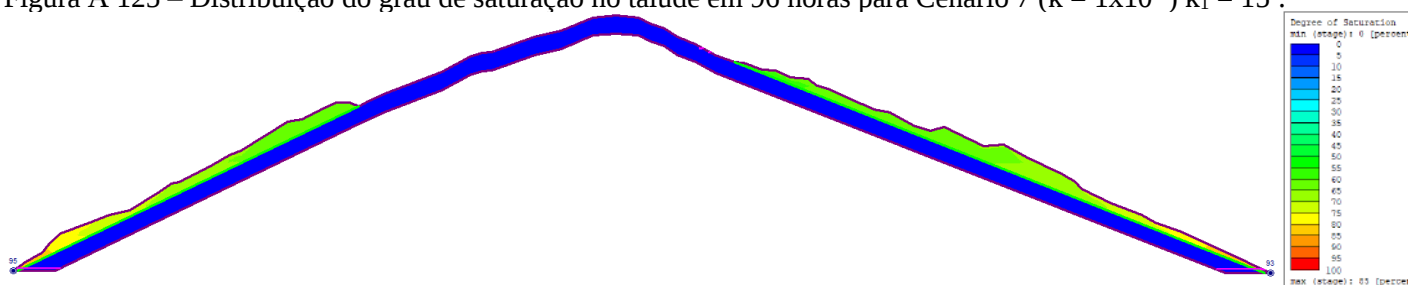


Figura A126 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

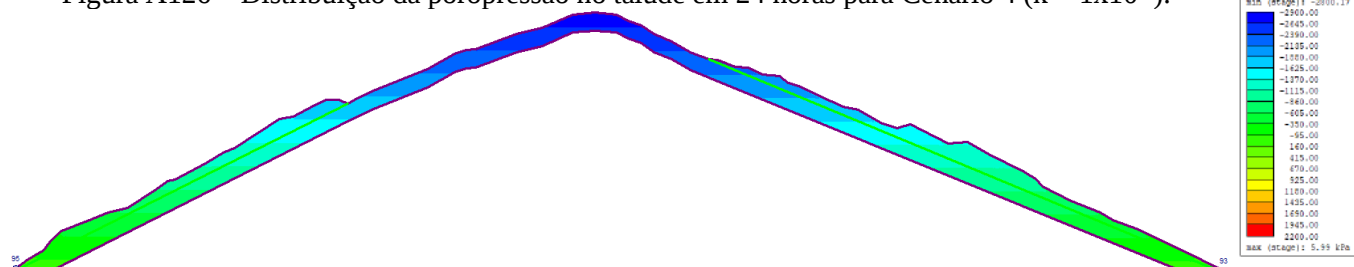


Figura A127 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

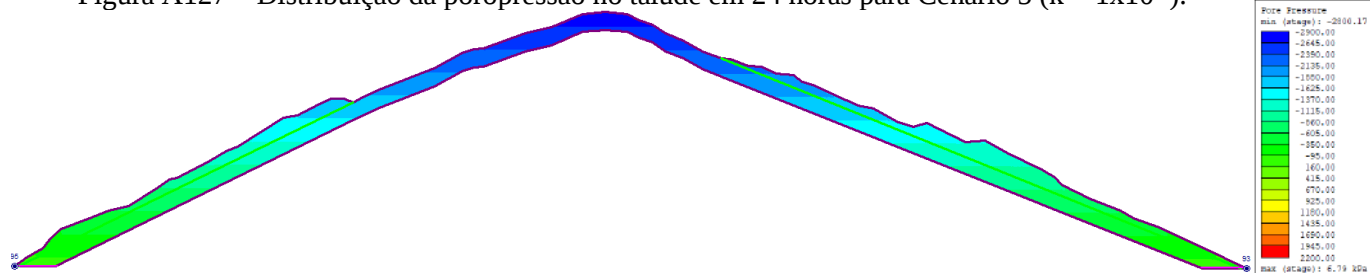


Figura A128 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

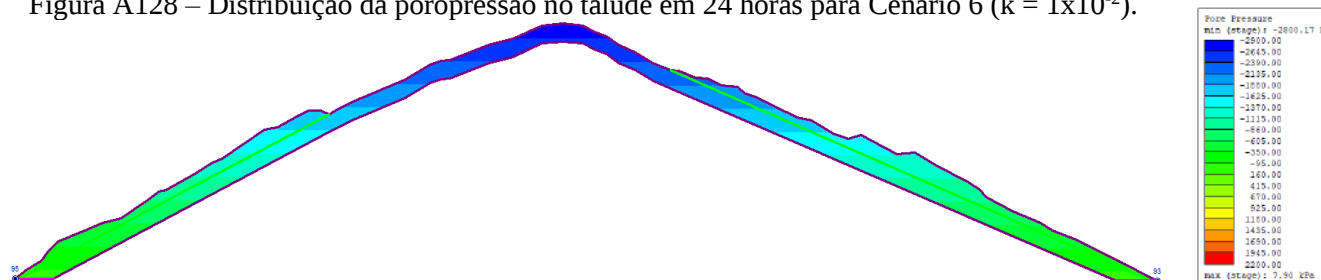


Figura A129 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

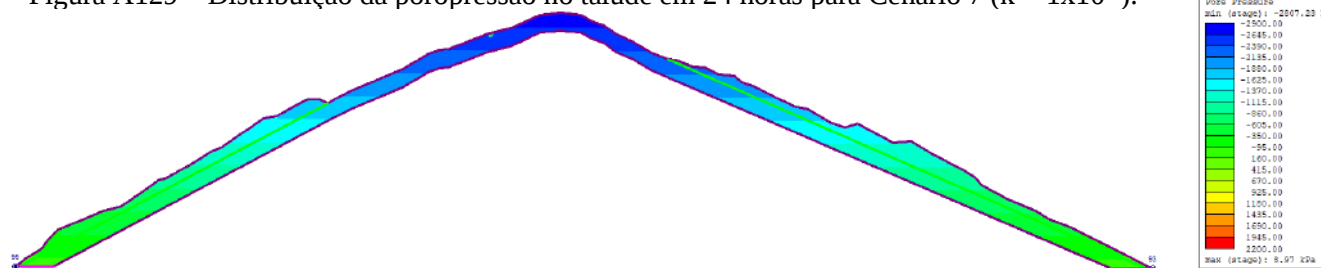


Figura A130 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

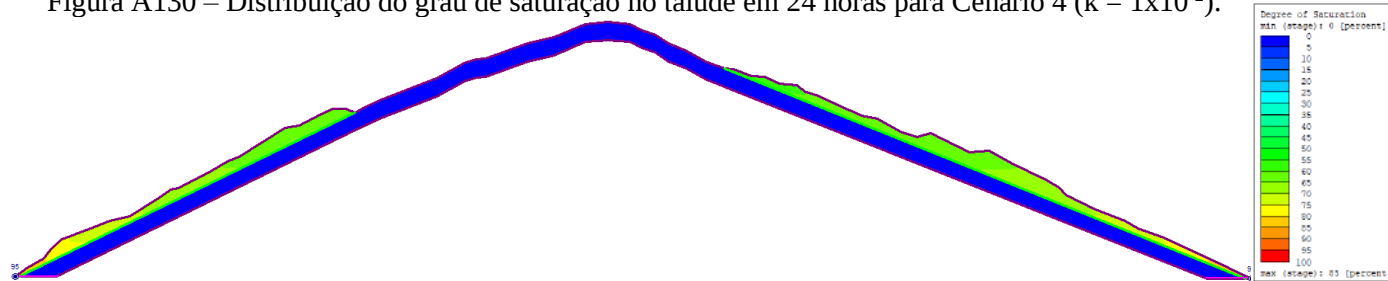


Figura A131 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

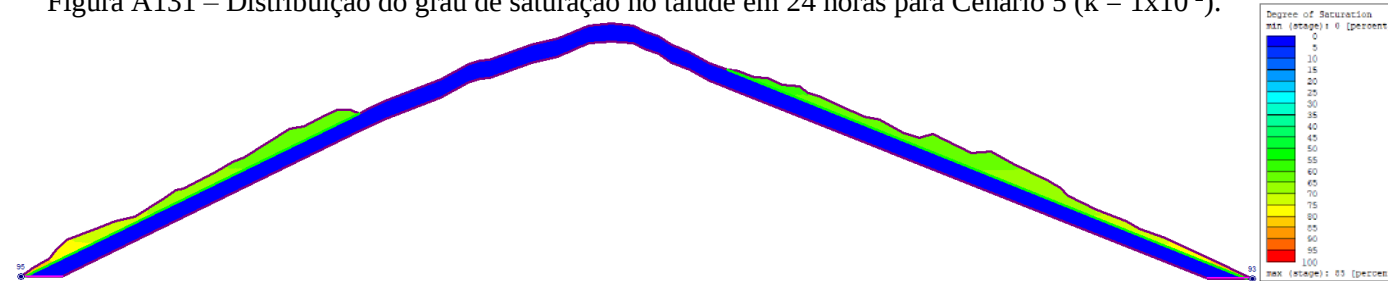


Figura A132 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

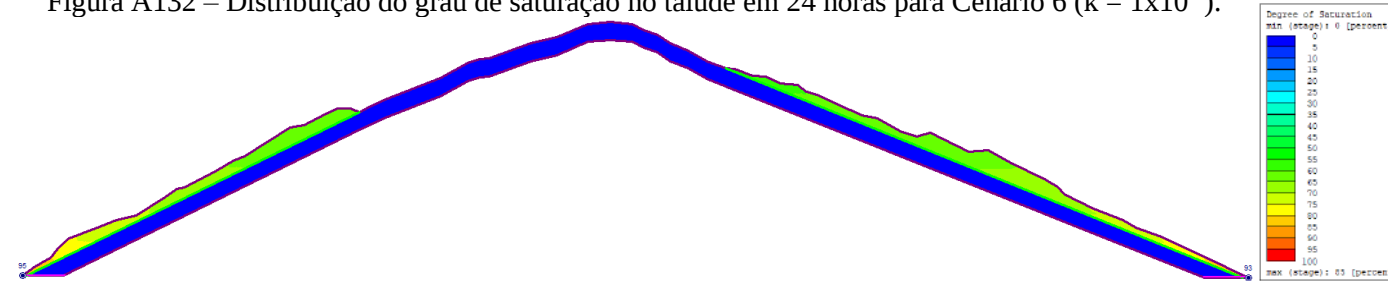


Figura A133 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

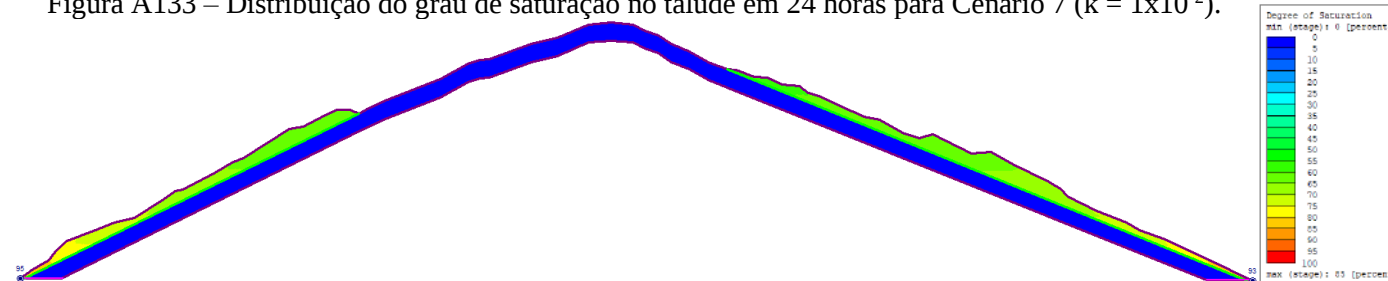


Figura A134 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

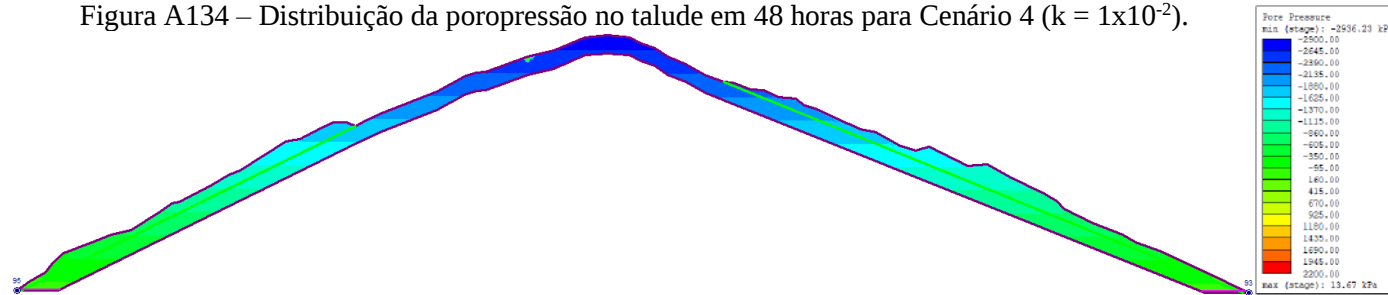


Figura A135 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

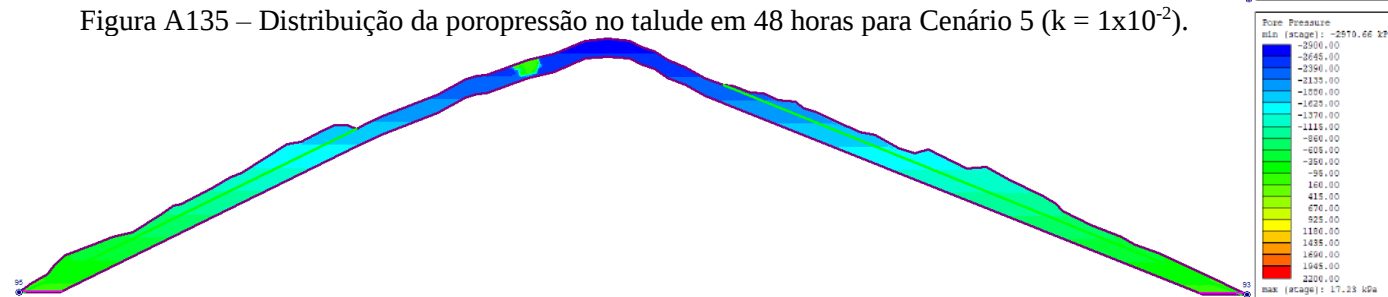


Figura A136 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

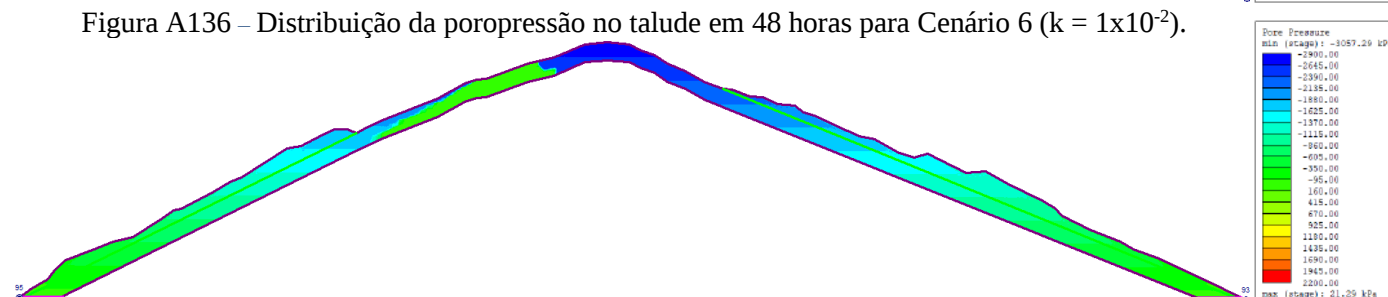


Figura A137 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

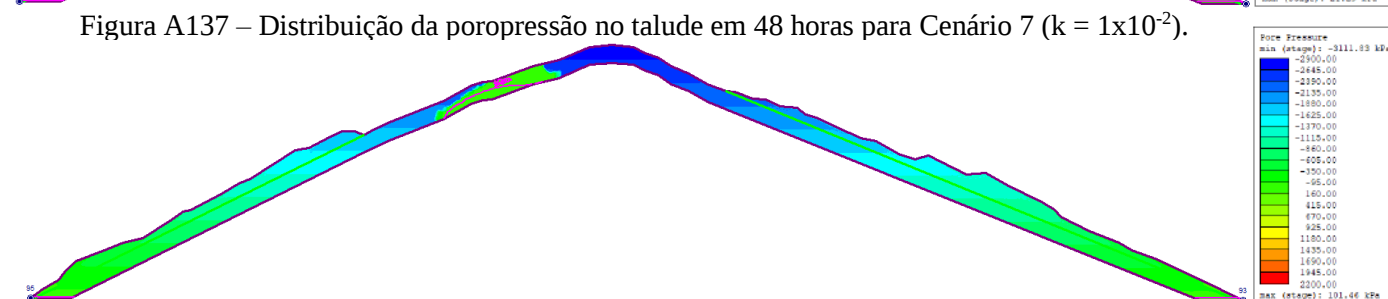


Figura A138 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

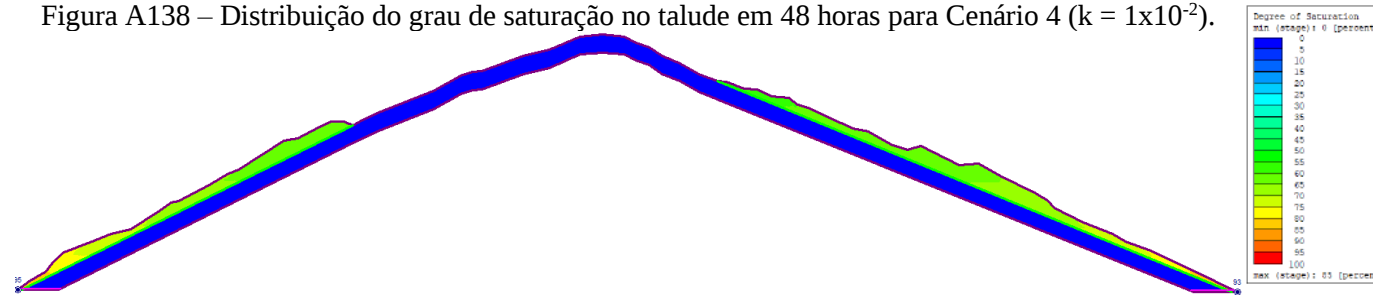


Figura A139 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

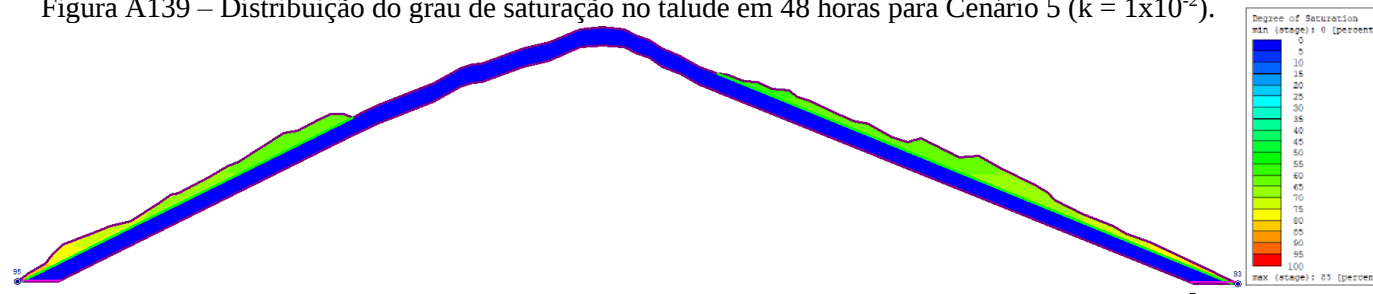


Figura A140 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

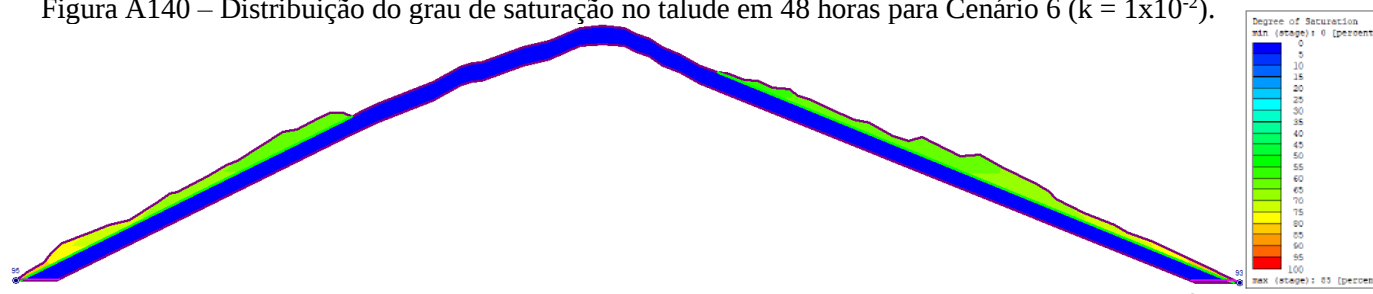


Figura A141 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

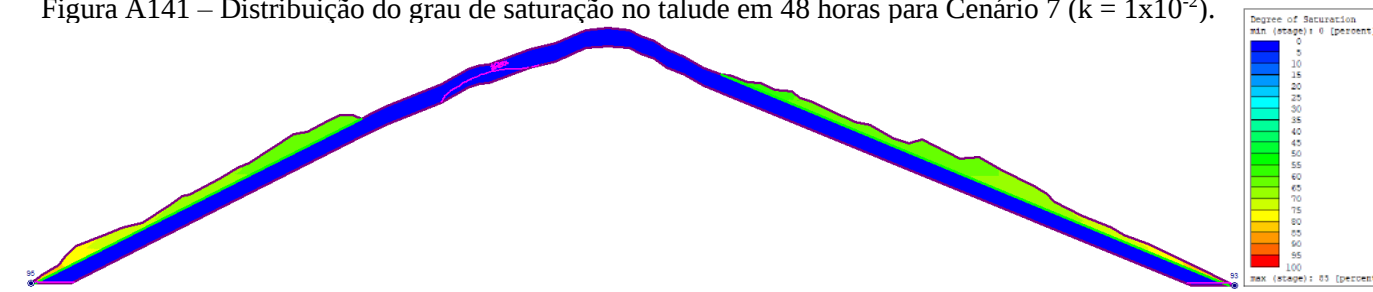


Figura A142 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

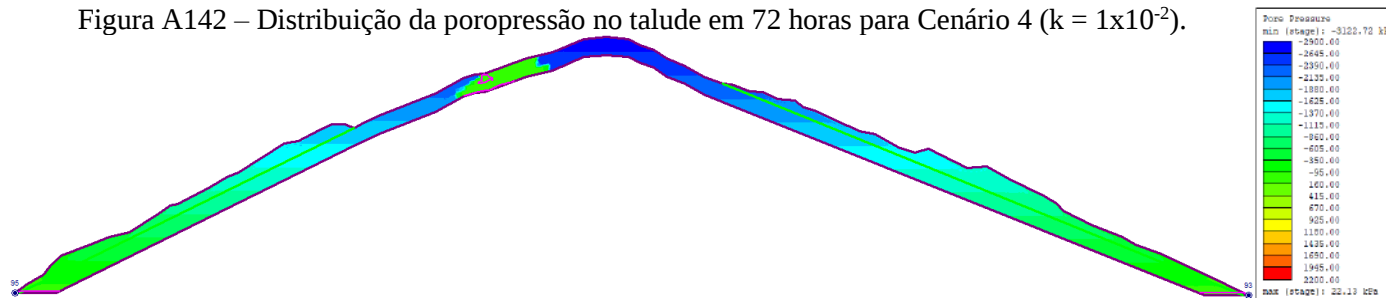


Figura A143 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

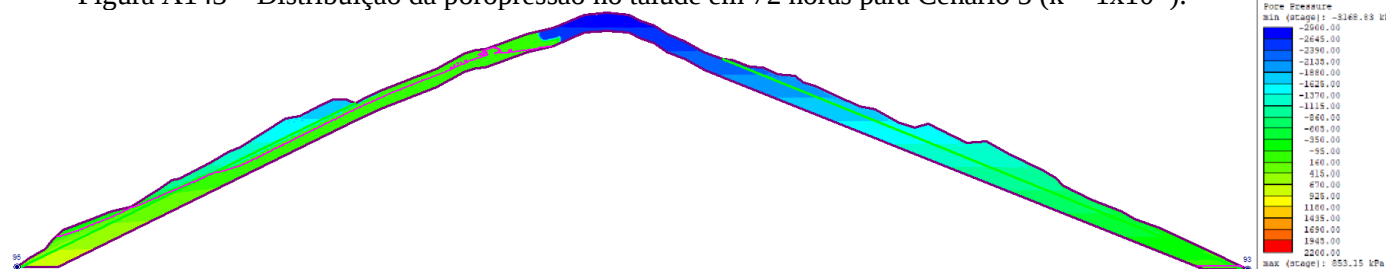


Figura A144 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

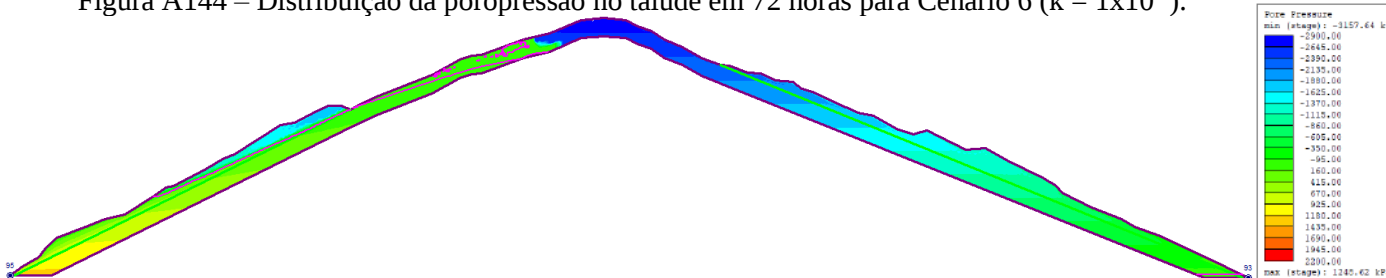


Figura A145 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

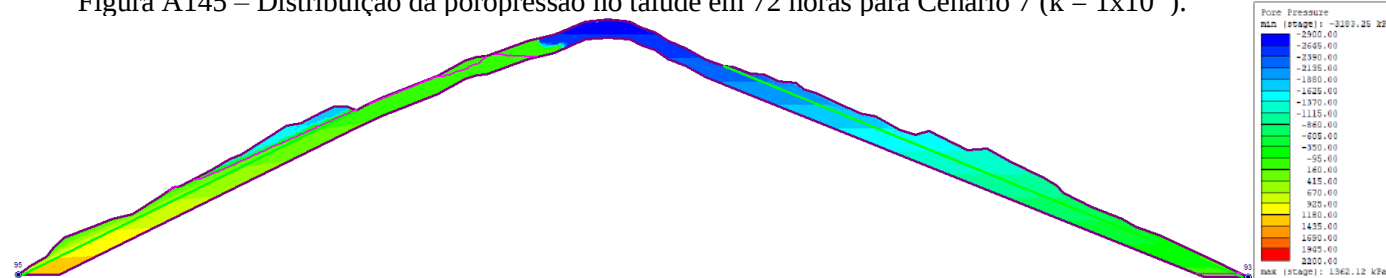


Figura A146 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

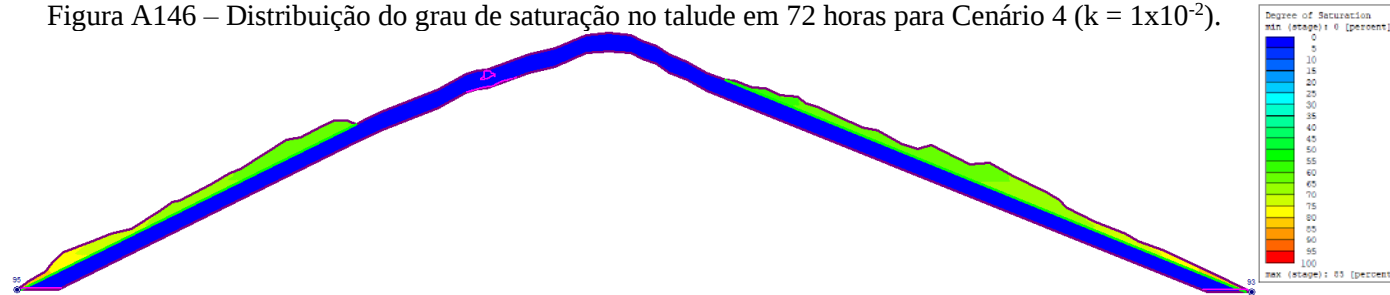


Figura A147 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

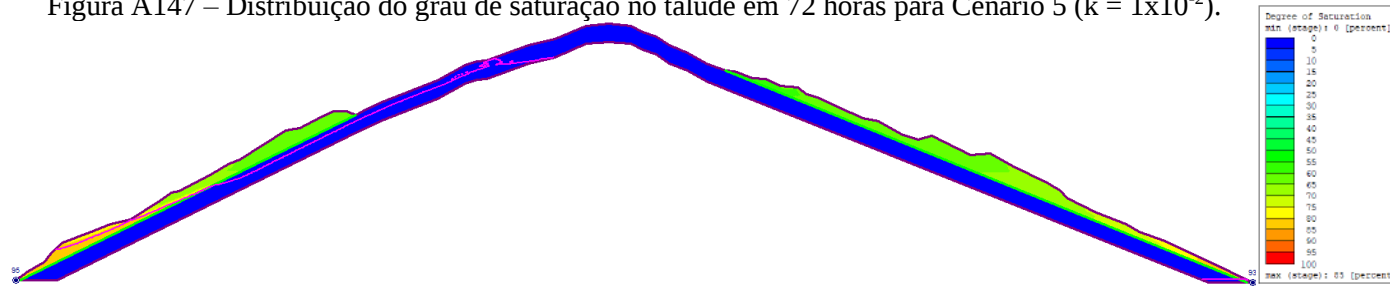


Figura A148 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

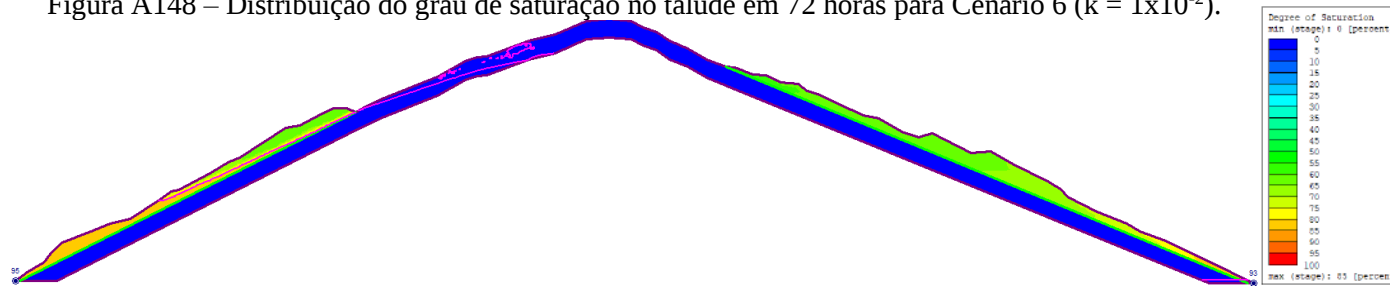


Figura A149 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

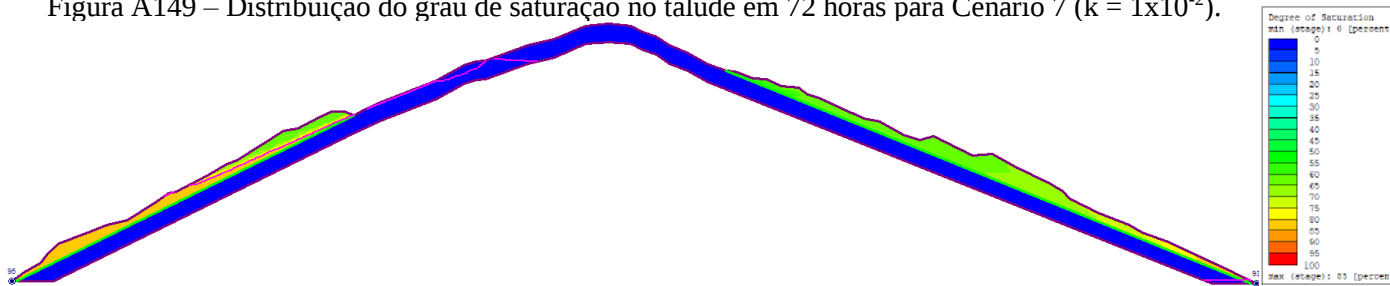


Figura A150 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

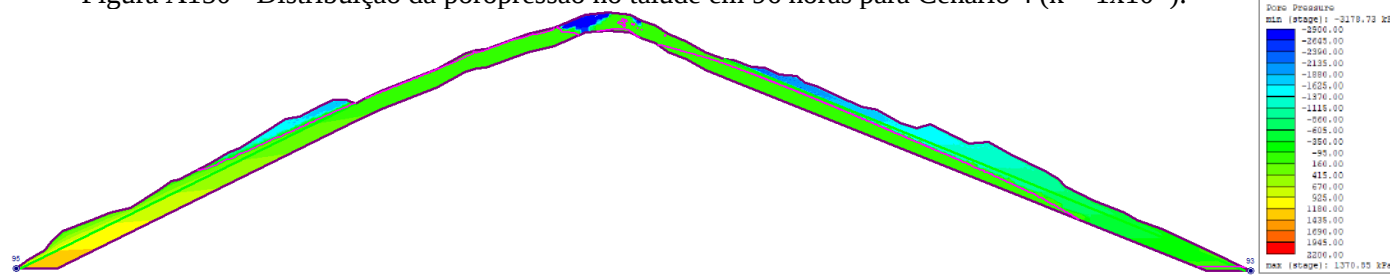


Figura A151 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

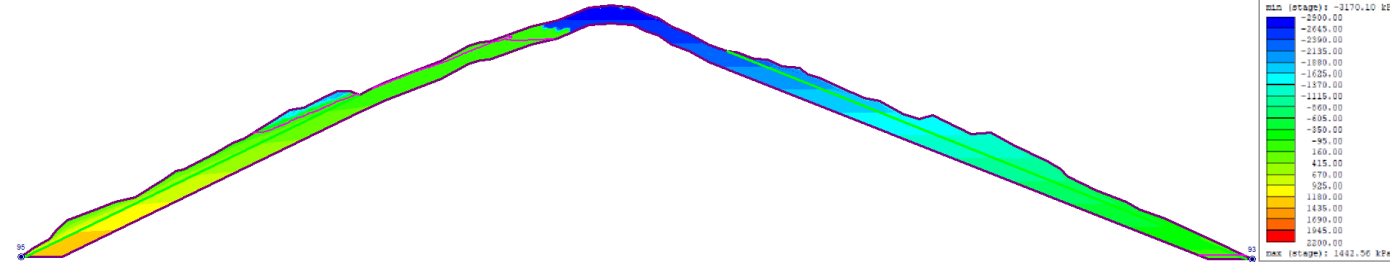


Figura A152 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

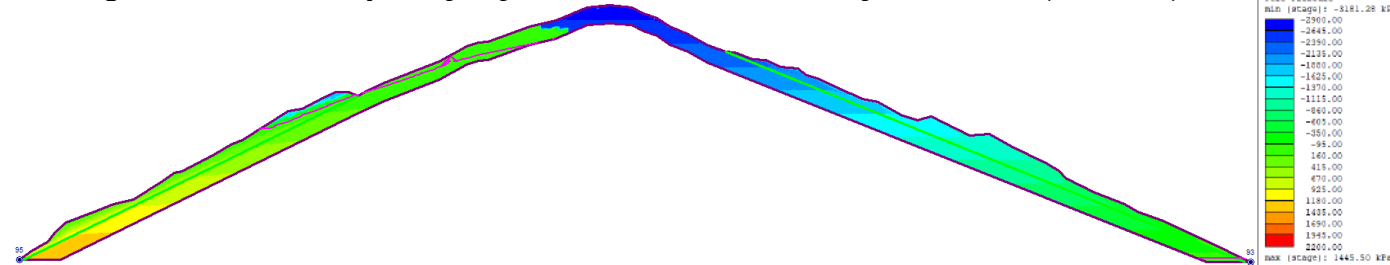


Figura A153 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$).

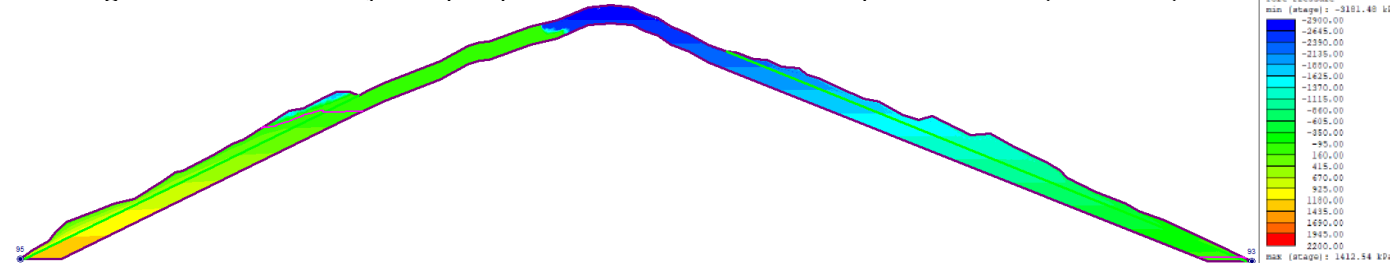


Figura A154 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-2}$)

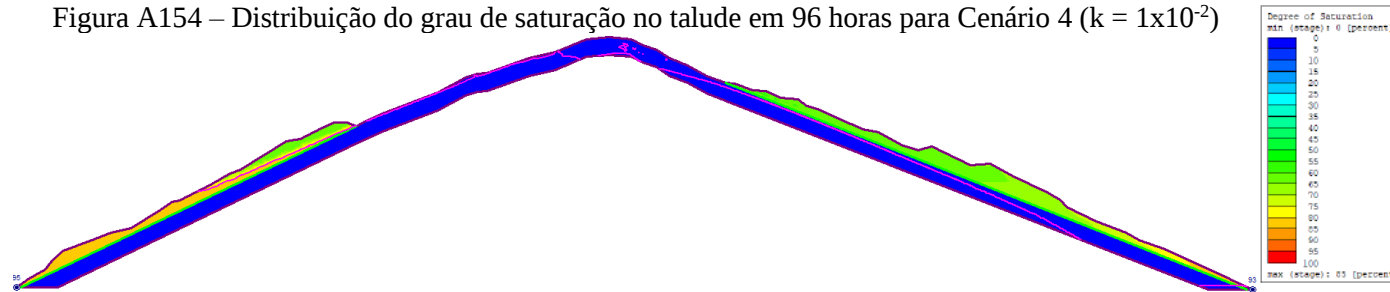


Figura A155 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-2}$)

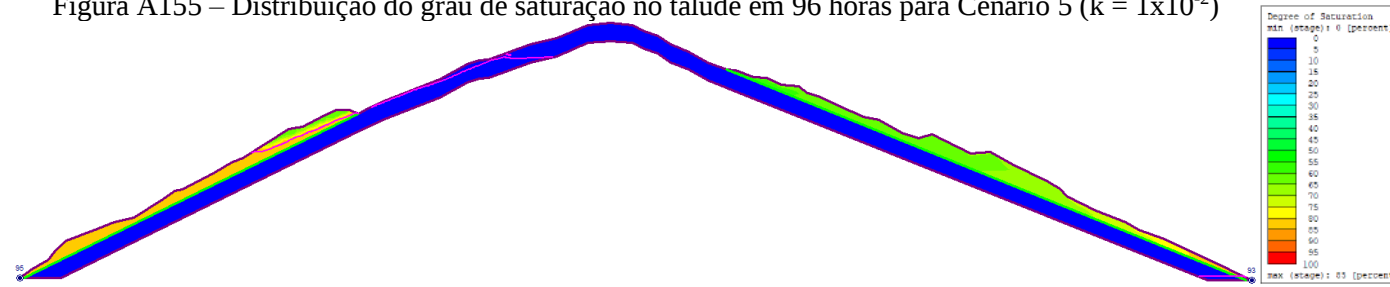


Figura A156 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-2}$)

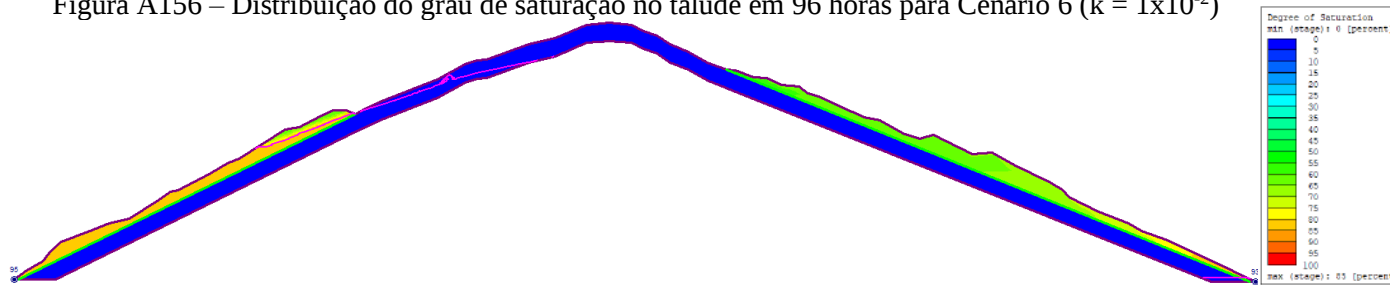


Figura A157 – Distribuição do grau de saturação no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-2}$)

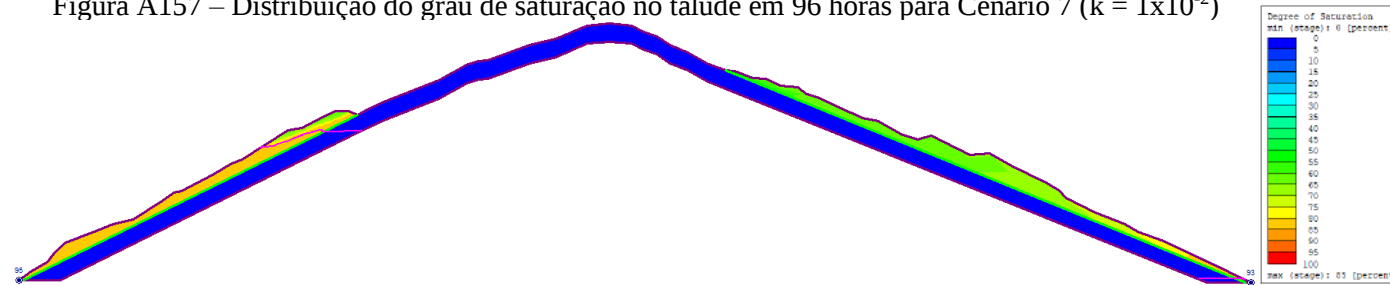


Figura A 158 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

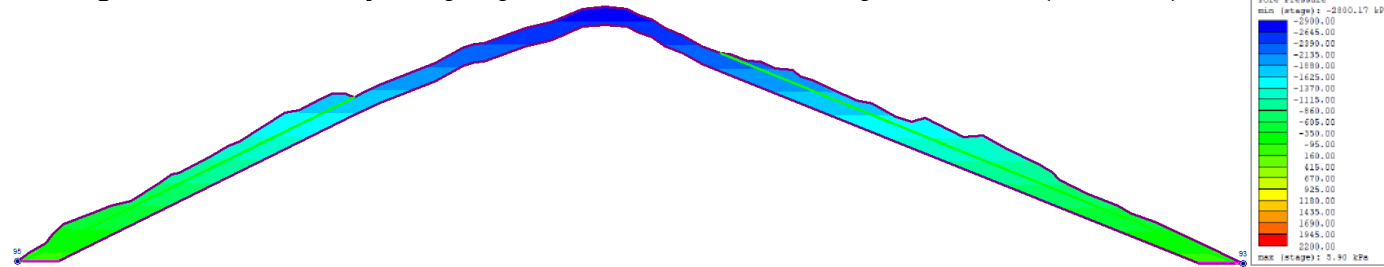


Figura A159 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

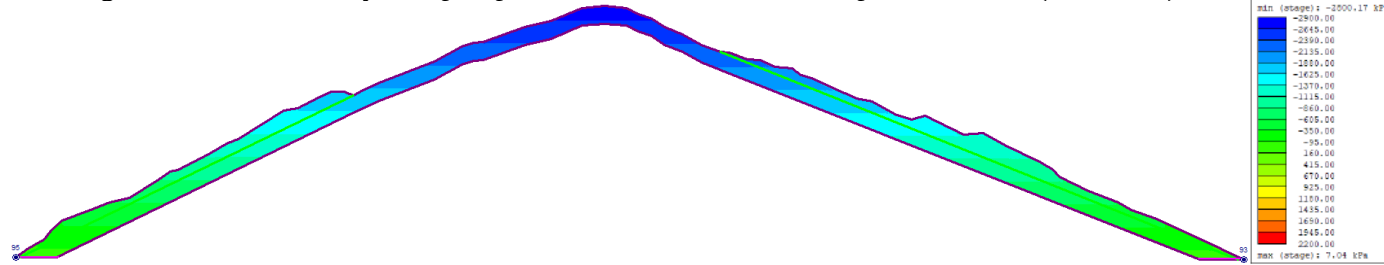


Figura A160 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

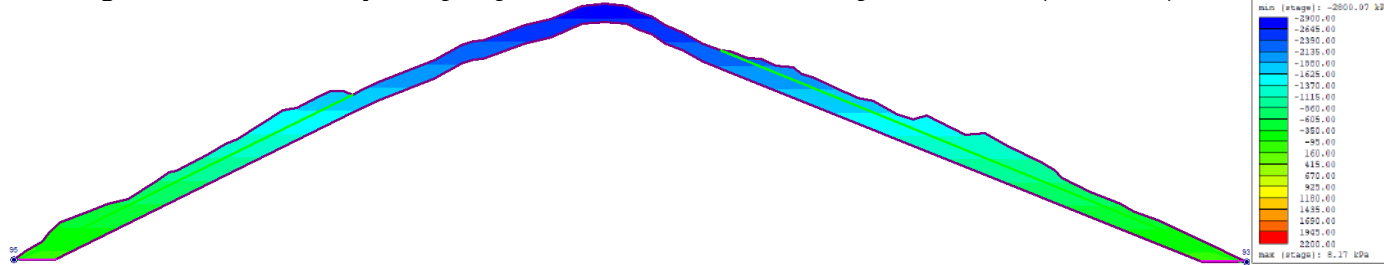


Figura A161 – Distribuição da poropressão no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

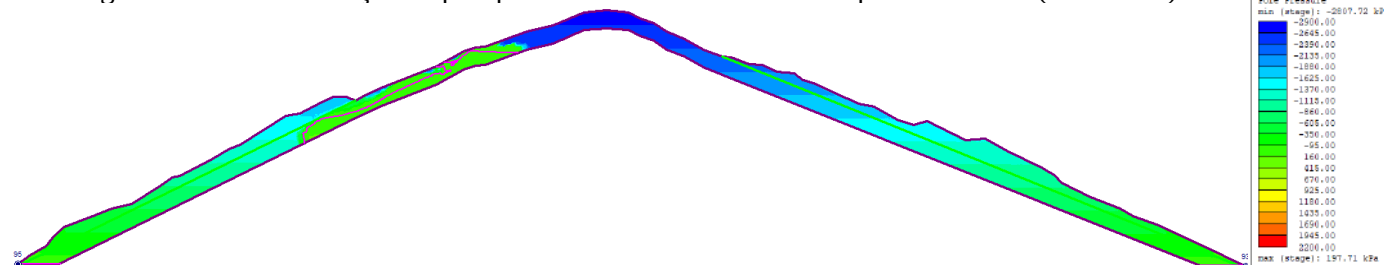


Figura A162 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

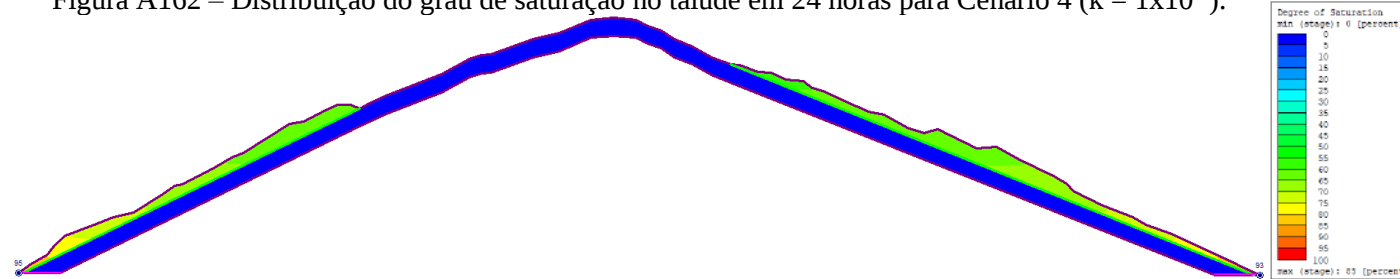


Figura A 163 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

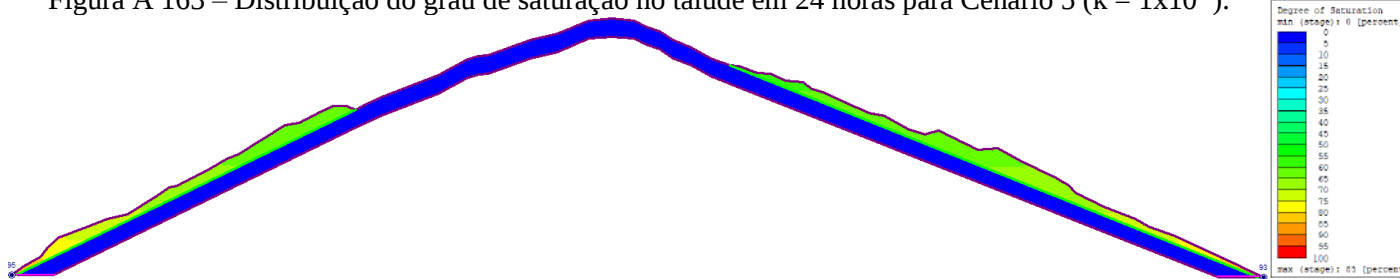


Figura A164 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

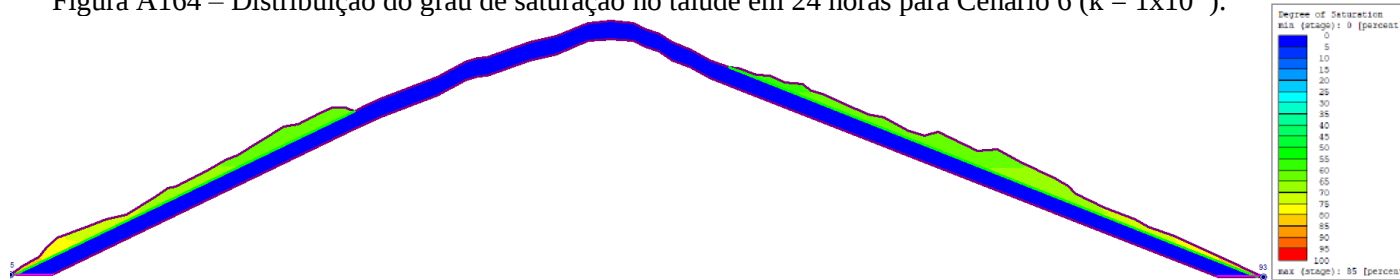


Figura A165 – Distribuição do grau de saturação no talude em 24 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

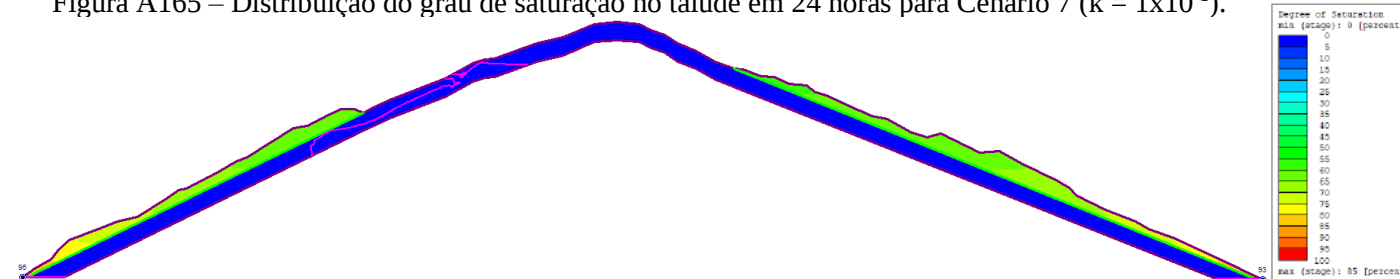


Figura A166 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

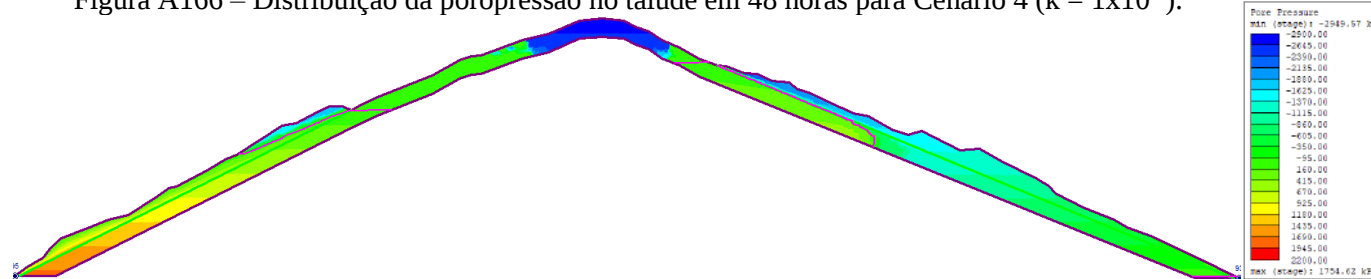


Figura A167 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

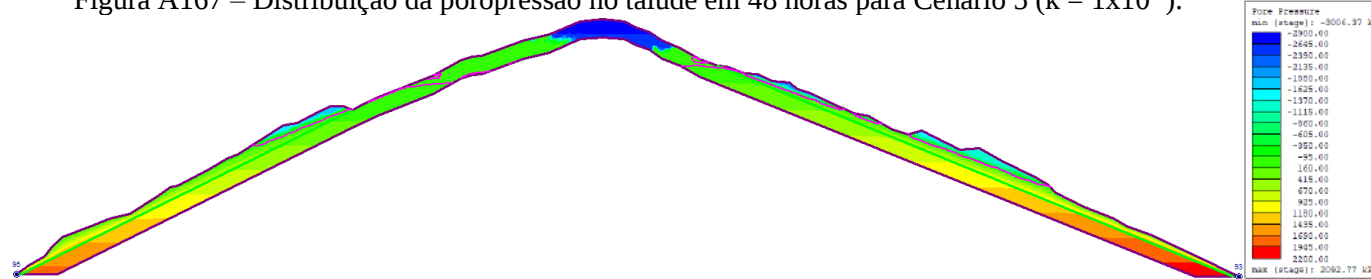


Figura A168 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

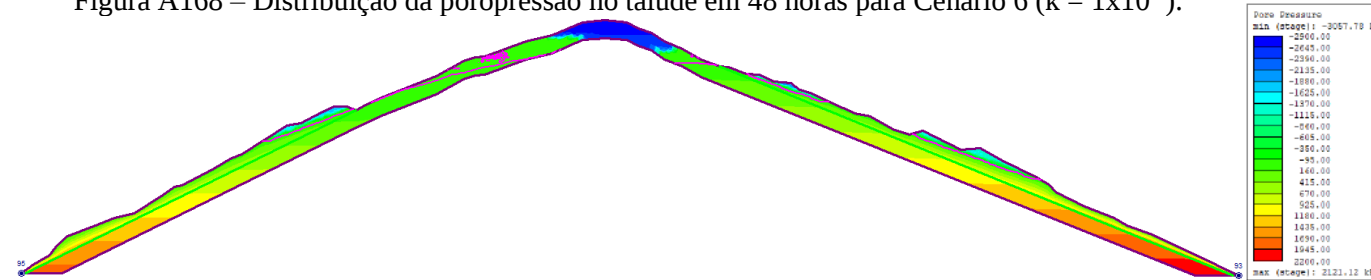


Figura A169 – Distribuição da poropressão no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

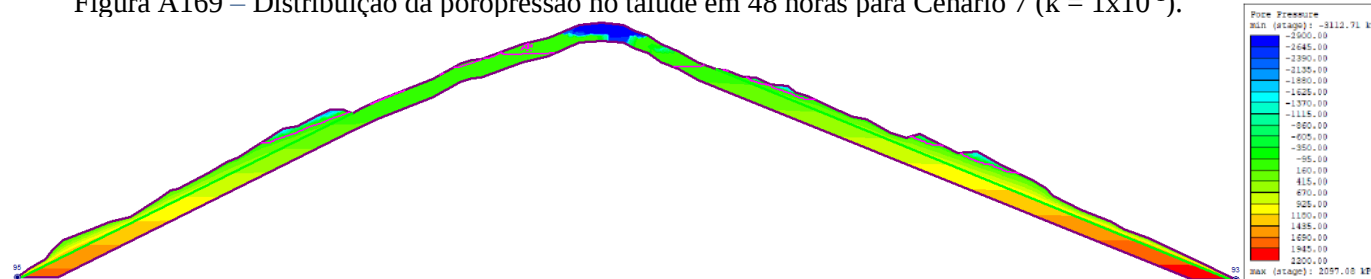


Figura A170 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

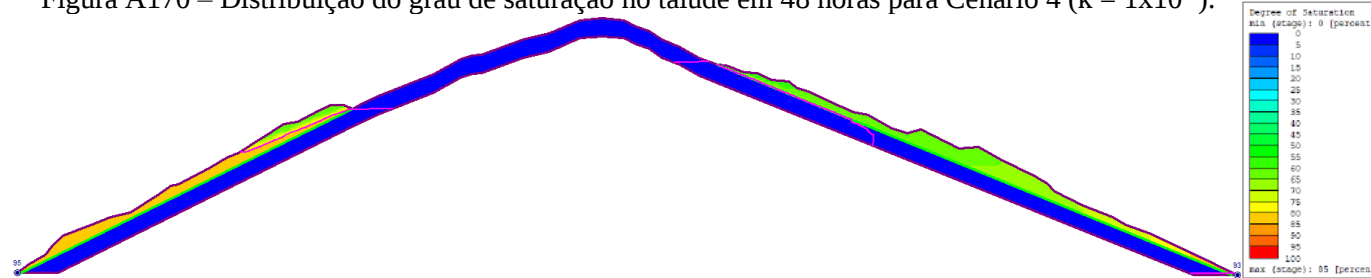


Figura A171 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

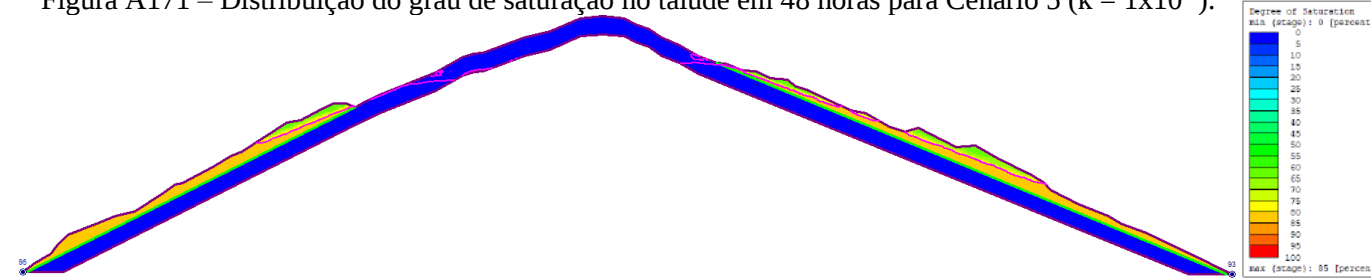


Figura A172 - Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

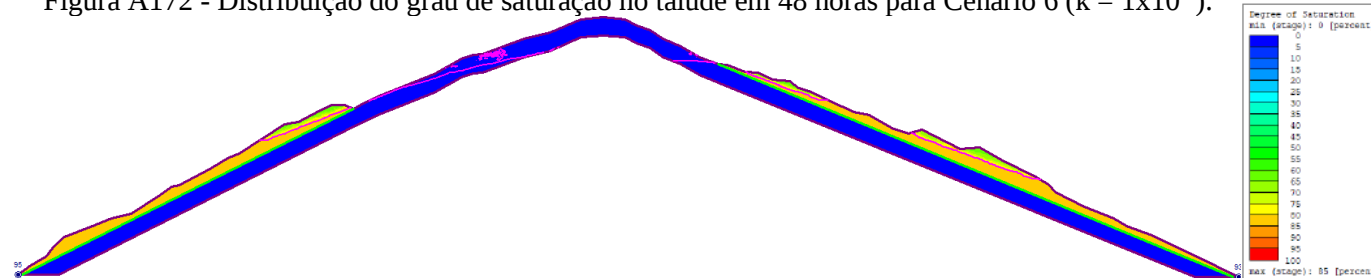


Figura A173 – Distribuição do grau de saturação no talude em 48 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

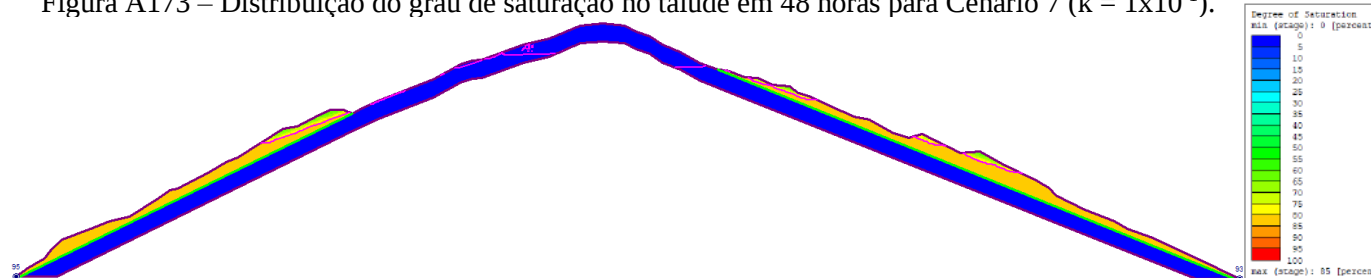


Figura A174 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

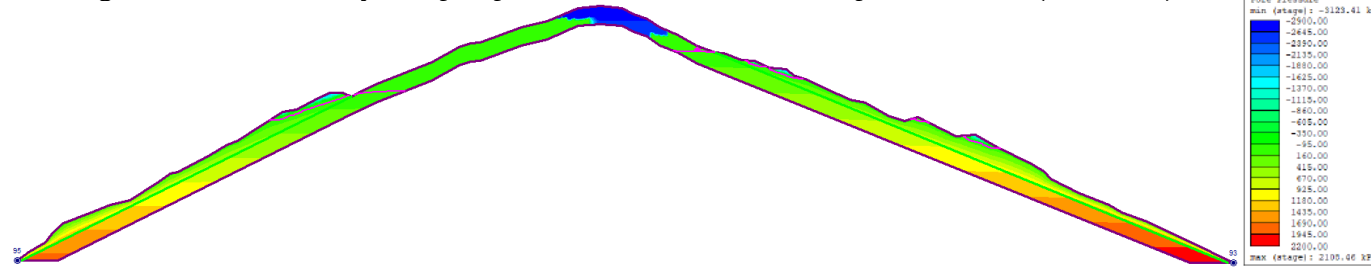


Figura A175 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

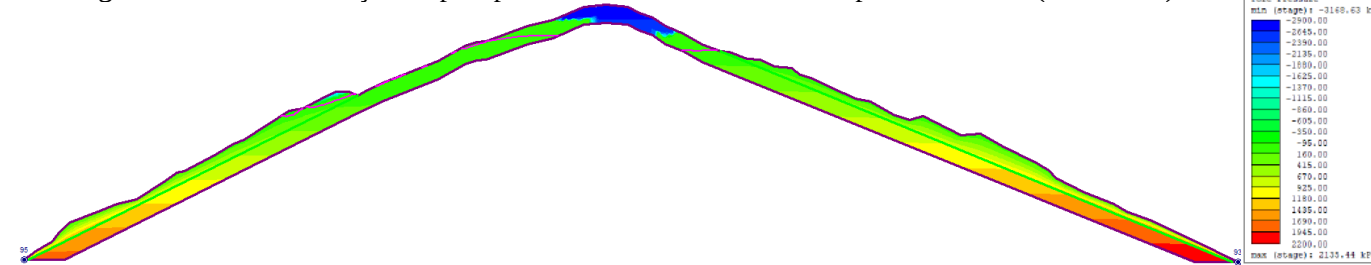


Figura A176 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

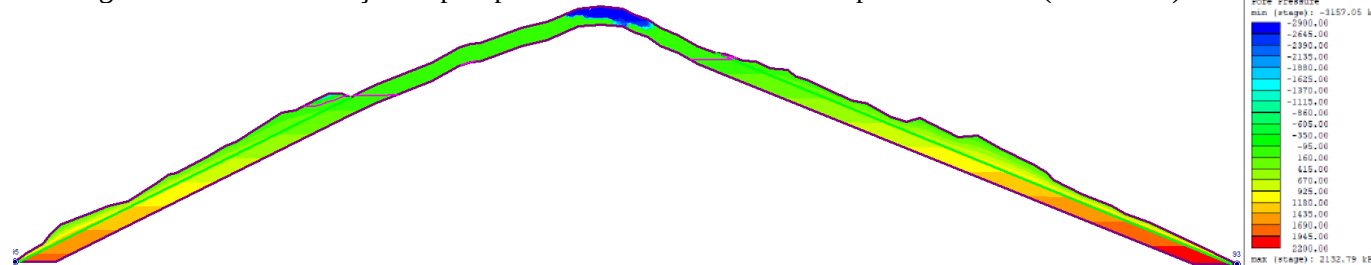


Figura A177 – Distribuição da poropressão no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

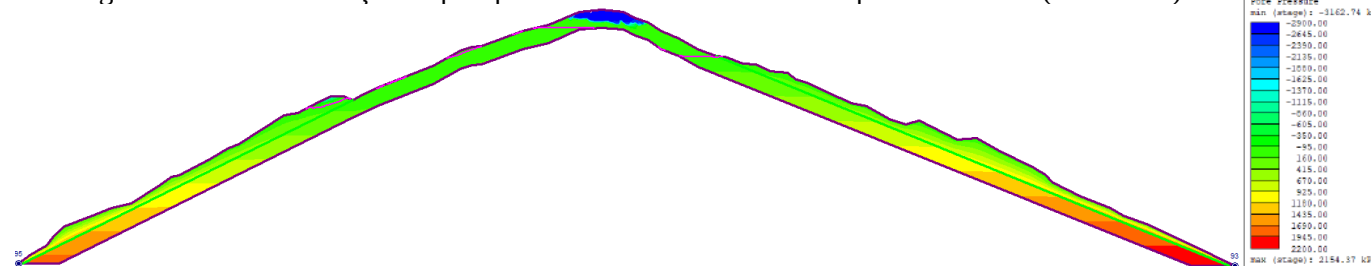


Figura A178 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

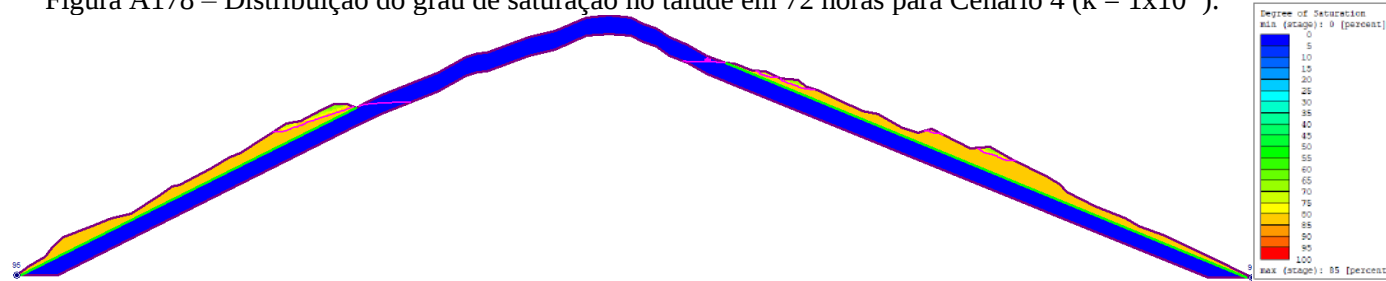


Figura A179 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

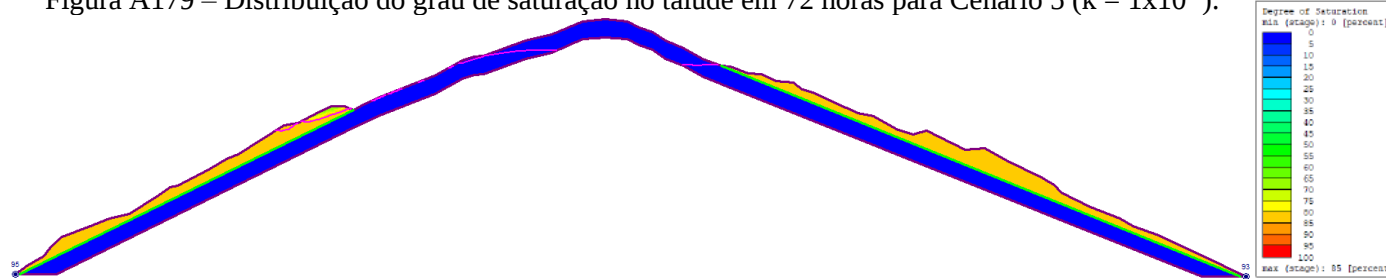


Figura A180 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

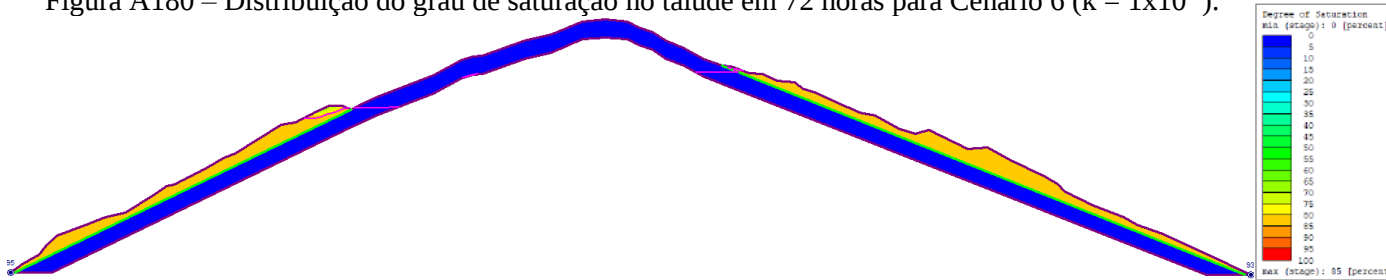


Figura A 181 – Distribuição do grau de saturação no talude em 72 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

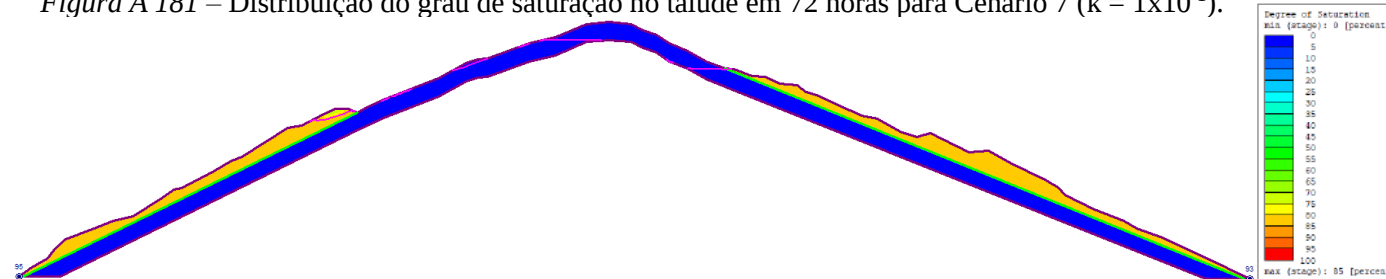


Figura A 182 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

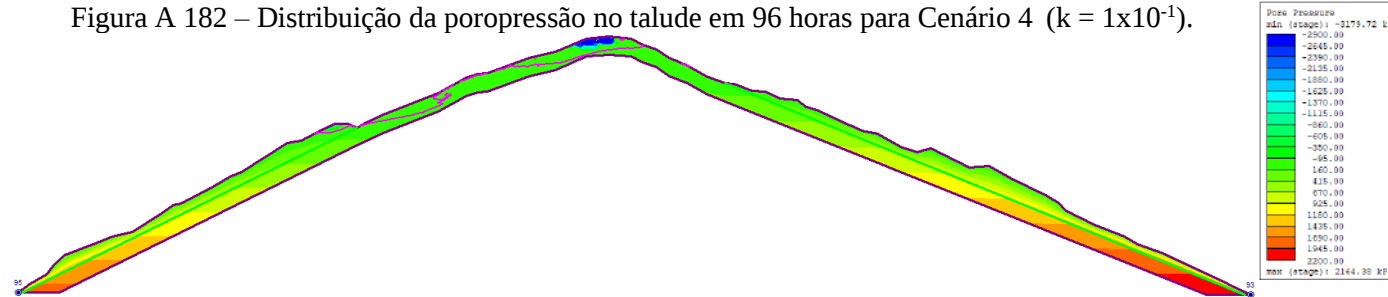


Figura A183 - Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

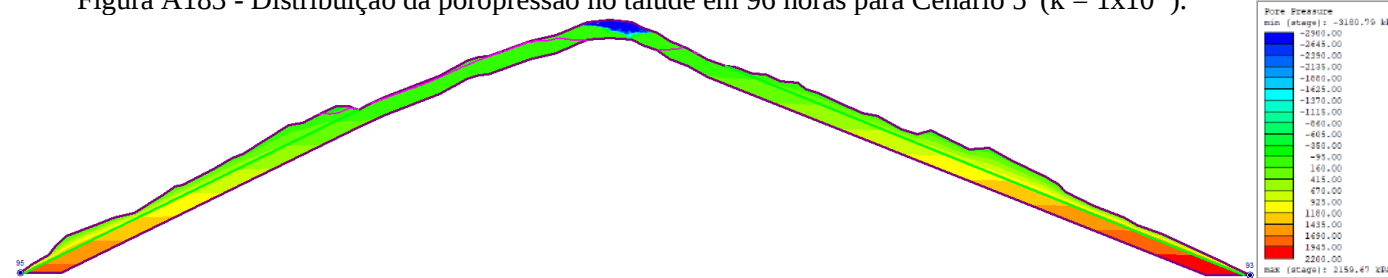


Figura A184 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

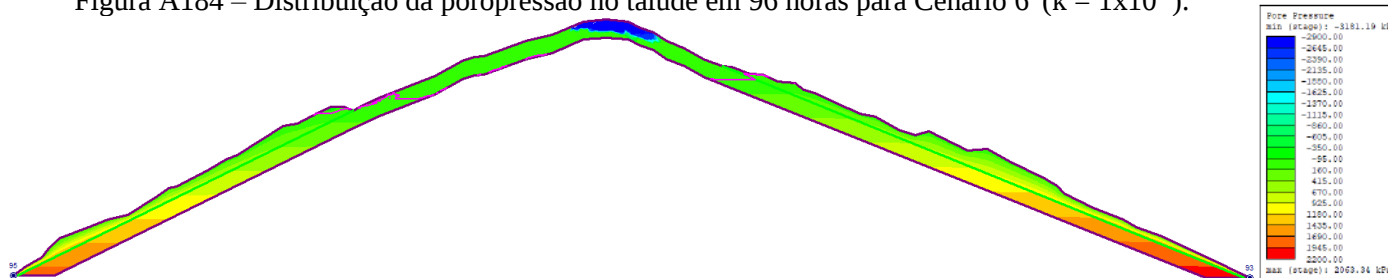


Figura A185 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

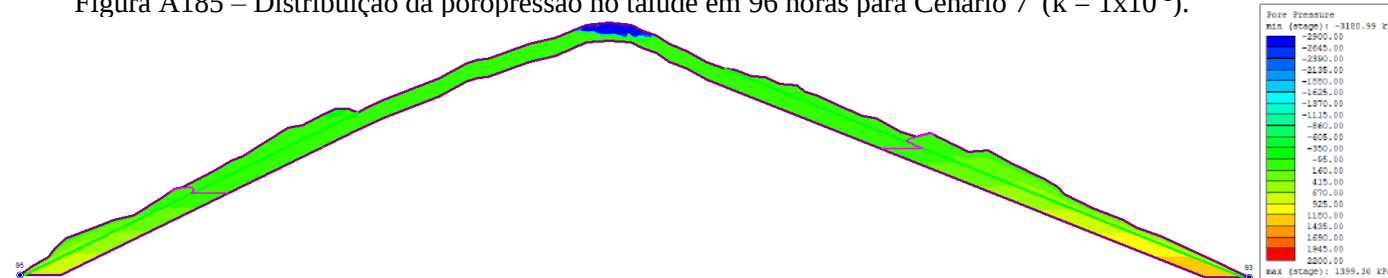


Figura A186 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 4 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

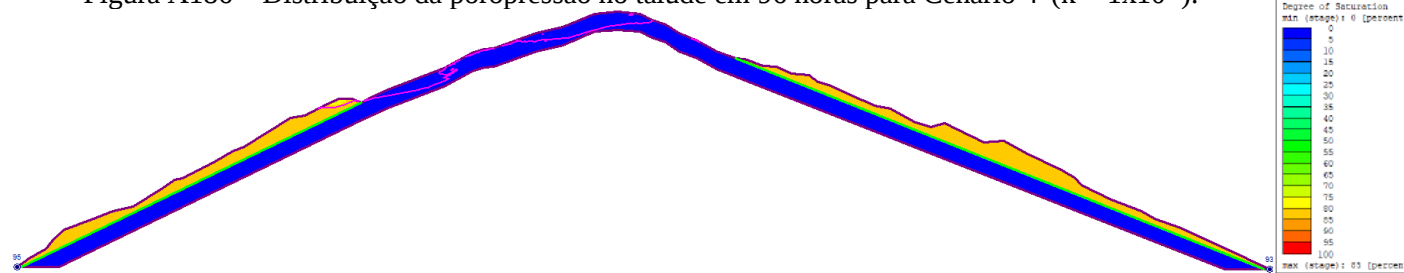


Figura A187 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 5 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

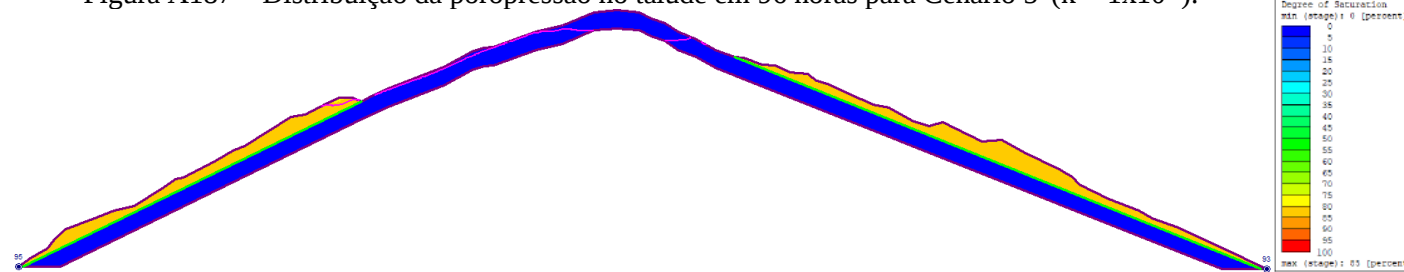


Figura A188 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 6 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

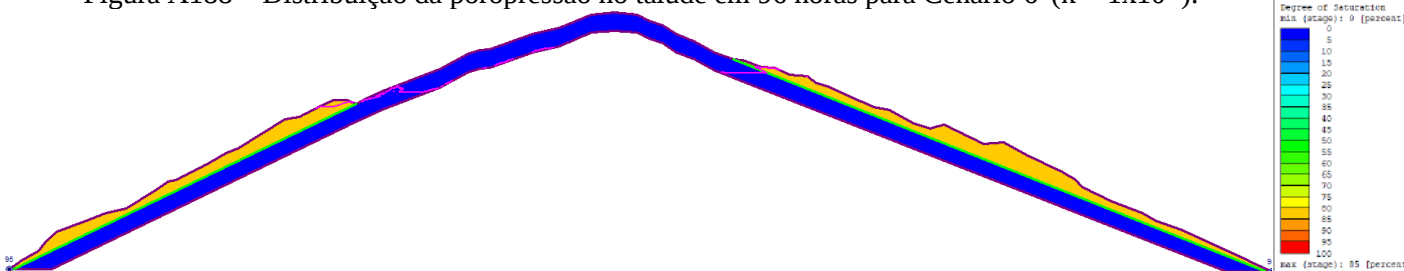


Figura A189 – Distribuição da poropressão no talude em 96 horas para Cenário 7 ($k = 1 \times 10^{-1}$).

