

# Impacto de Precipitações Extremas na Estabilidade de Taludes: Uma Análise de Sensibilidade pelo SEEP/W com uso da Interação terra-clima

Enzo Silva Dias

Engenheiro Civil, Universidade Federal Ouro Preto (UFOP), Belo Horizonte-MG, Brasil,  
enzo.dias@aluno.ufop.edu.br

Gustavo Augusto Froes Cardoso

Engenheiro Civil, Universidade Federal de Brasília (UnB), Brasília-DF, Brasil, 231111637@aluno.unb.br

**RESUMO:** Com as mudanças climáticas induzidas pela atividade humana, a partir da Revolução Industrial e intensificadas ao decorrer dos anos, surgiram incertezas adicionais na análise de eventos relacionados às precipitações. Especificamente no contexto da estabilidade de taludes, as mudanças climáticas introduzem riscos geotécnicos decorrentes de alterações hidrológicas extremas, que podem desencadear movimentos de massa e causar perdas humanas, ambientais e materiais significativas. O objetivo central deste trabalho é avaliar o impacto das características hidrológicas na estabilidade de taludes em diferentes configurações. Dessa maneira, este estudo teve como objetivo realizar uma análise de sensibilidade da estabilidade em taludes hipotéticos variando em inclinações e composição do solo, sob a influência de precipitações regionais. A abordagem empregada explorou o uso da interação terra-clima pelo software SEEP/W. Foram obtidos resultados dentro do esperado em termos de condições não saturadas dos taludes avaliados para diferentes condições hidrológicas regionais, os taludes mais íngremes e sob influência de maiores precipitações apresentaram os menores fatores de segurança em comparação aos demais avaliados. Este estudo, ao evidenciar a relação entre inclinação, composição do solo e eventos hidrológicos extremos na estabilidade de taludes, oferece uma valiosa perspectiva sobre a consideração das precipitações na análise de estabilidade de taludes em diferentes configurações. Esta avaliação contribui positivamente para a prevenção de riscos geotécnicos decorrentes das mudanças climáticas, auxiliando na tomada de decisões e implementação de medidas para mitigação de movimentos de massa prejudiciais à preservação de vidas humanas, do meio ambiente e salvaguarda de recursos materiais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Precipitações extremas, estabilidade, análise de sensibilidade, SEEP/W, interação terra-clima, solos não saturados.

**ABSTRACT:** The changes in climate induced by human activity, starting with the Industrial Revolution and intensifying over the years, have led to additional uncertainties in the analysis of precipitation-related events. Specifically in the context of slope stability, climate change introduces geotechnical risks arising from extreme hydrological changes, which can trigger mass movements and cause significant human, environmental and material losses. The main objective of this work is to evaluate the impact of hydrological characteristics on the stability of slopes in different configurations. In this way, this study aimed to carry out a sensitivity analysis of the stability of hypothetical slopes varying in inclination and soil composition, under the influence of regional rainfall. The approach applied explored the use of soil-climate interaction in the SEEP/W software. Results were within expectations in terms of the unsaturated conditions of the slopes evaluated for different regional hydrological conditions. The steepest slopes and under the influence of higher rainfall had the lowest safety factors compared to the others evaluated. By highlighting the relationship between slope gradient, soil composition and extreme hydrological events on slope stability, this study offers a valuable perspective on the consideration of rainfall in the analysis of slope stability in different configurations. This assessment contributes positively to the prevention of geotechnical risks resulting from climate change, helping in decision-making and the implementation of measures to mitigate mass movements that are harmful to the preservation of human lives, the environment and the safeguarding of material resources.

**KEYWORDS:** Extreme precipitation, stability, sensitivity analysis, SEEP/W, land-climate interaction, unsaturated soils.

## 1 INTRODUÇÃO

A estabilidade é bastante influenciada pela infiltração, sendo este um dos principais fatores relacionados à ocorrência de deslizamentos de terra. A intensidade da precipitação pode afetar as condições hidrogeológicas, impactando na capacidade de infiltração líquida e, por conseguinte, a permeabilidade do solo, em virtude das variações no teor de umidade. Alterações no equilíbrio climático do planeta têm potencial de provocar alterações significativas no planejamento e na concepção de projetos de estruturas geotécnicas. Vardon (2014), apresentou um estudo sobre os impactos das mudanças climáticas em geoestruturas, destacando a importância de incorporar de maneira adequada o fluxo superficial da água nas análises de infraestruturas geotécnicas. A quantificação precisa das variáveis climáticas representa uma tarefa complexa e de difícil previsão. Além disso, os procedimentos computacionais disponíveis devem ser calibrados e analisados com cautela, devido às suas limitações inerentes.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto de duas abordagens distintas: uma que considera apenas a infiltração e outra que avalia o balanço hídrico superficial, em taludes hipotéticos com características diversas, com uso da interação terra-clima. Para tanto, são empregadas técnicas convencionais de modelagem numérica, combinadas com análises de equilíbrio limite. Assim, este estudo realiza uma análise de sensibilidade da estabilidade em taludes hipotéticos, variando-se a inclinação e a composição do solo, sob a influência de precipitações regionais.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

É amplamente reconhecido que mudanças na poropressão e na linha freática, ocasionadas por eventos pluviométricos, são capazes de desencadear movimentos de massa (Gerscovich *et al.*, 2006; Zhu e Anderson, 1998). Os deslizamentos podem ocorrer devido a dois gatilhos principais (Collins and Znidarcic, 2004): o acúmulo de poropressões positivas em excesso nas regiões inferiores das encostas ou ao longo da interface solo-rocha, e a redução do estado não saturado, principalmente devido à infiltração, que leva o solo a dissipar ou reduzir as sucções (Fredlund and Rahardjo, 1993).

Dessa forma, se evidencia a necessidade da inclusão de métodos de estabilidade acoplados a fluxos transientes que levem em consideração essas condições de contorno para aproximar o modelo de uma resposta mais realista. Normalmente, a resolução de problemas em meios porosos pode ser realizada por meio de métodos contínuos, assumindo a hipótese de que o comportamento pode ser descrito por um volume elementar representativo.

A formulação do problema de fluxo está associada à Lei de Darcy, que é uma equação básica que rege o fluxo em meios porosos (SEEP, 2015):

$$v_i = -k_i \frac{\partial h_w}{\partial i}, i = x, y, z \quad (1)$$

onde  $v_i$  é o fluxo nas direções cartesianas;  $k_i$  é o coeficiente de permeabilidade e  $\frac{\partial h_w}{\partial i}$  é o gradiente hidráulico.

Além disso, para a resolução do problema, é necessária a inclusão de mais uma equação na formulação que descreva a variação temporal do teor umidade volumétrico, denominada equação da continuidade (Fredlund and Rahardjo, 1993), descrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla v \quad (2)$$

onde  $\theta$  é a umidade volumétrica e  $\nabla v$  é o divergente da velocidade.

Assim, com as duas formulações, dá-se origem a equação geral que rege a percolação em termos de fluxo transiente:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k_x \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + k_y \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + k_z \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

No entanto, em solos não saturados, o movimento pode ser descrito pela equação de Richards, que torna a permeabilidade dependente do teor de umidade volumétrica (Fredlund and Rahardjo, 1993):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k_x(\theta) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + k_y(\theta) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + k_z(\theta) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) \quad (4)$$

Há uma alta não linearidade envolvida na resolução dessa equação, o que demanda soluções mediante o emprego de métodos computacionais, como o método dos elementos finitos. Neste estudo, o programa numérico utilizado foi o SEEP/W, que segue a seguinte formulação (SEEP,2015):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(\theta) \frac{\partial h_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(\theta) \frac{\partial h_y}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H-y)}{\partial t} \quad (5)$$

onde  $\gamma_w$  representa o peso específico da água;  $H$  corresponde a carga altimétrica; e  $y$  designa a posição no eixo vertical; em que  $Q$  consiste na condição de contorno imposta pelo usuário; parâmetro de adensamento  $m_w$ .

Como meio de resolver processos complexos de interação climática, o software tem disponível uma condição de contorno de fluxo que tenta simular os fenômenos hidrológicos que ocorrem na superfície. O usuário precisa inserir dados de precipitação, umidade relativa do ar, temperatura do ar e selecionar um método de solução para os fluxos evaporativos (SEEP, 2015). Assim, é possível resolver problemas como os de escopo desse estudo, em que a estabilidade é dependente das poropressões calculadas pelo SEEP/W, por exemplo na aplicação da interação terra-clima.

### 3 METODOLOGIA

A modelagem numérica é uma ferramenta que busca representar fenômenos físicos pelo intermédio de modelos matemáticos em uma tentativa de descrever os problemas de maneira mais realista. Dessa forma, um fator importante para manutenção de condições de segurança é a inclinação. Que pode ser responsável por determinar a susceptibilidade do talude à movimentos de massa. O modelo proposto nas figuras Fig.1(a) e Fig.1(b) consideram duas diferentes inclinações, 30° e 45°, como forma de simular o impacto de precipitações na estabilidade de taludes nas configurações mencionadas.

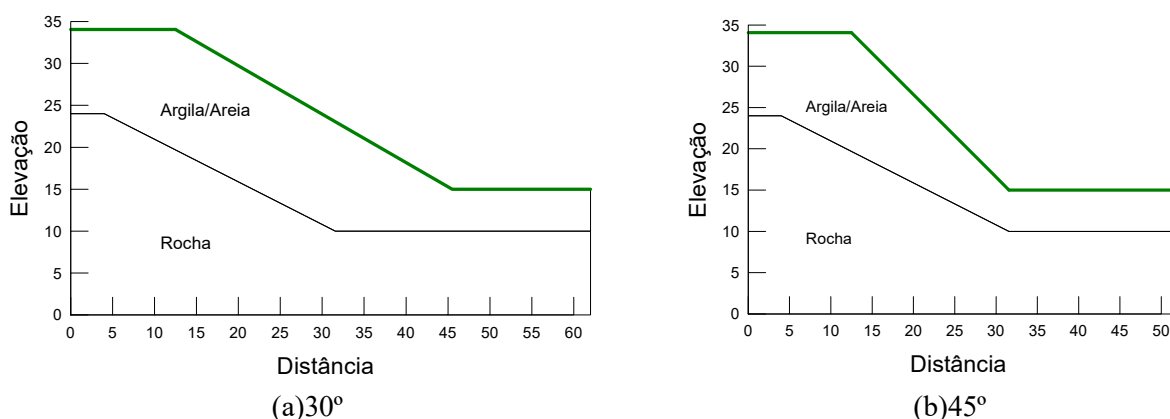





Figura 1. Esquematisações das Geometrias.

#### 3.1 Parâmetros




A Tabela 1, apresenta os parâmetros de resistência típicos dos materiais utilizados na análise realizada neste estudo com uso do SLOPE. O programa também considera a resistência advinda da coesão aparente, devido as condições de simulação de precipitação, que podem afetar a estabilidade. Assim, se faz uso do modelo proposto por Vanapalli *et al.* (1996) implementado no GeoStudio para incremento da resistência ao cisalhamento para solos parcialmente saturados.

Tabela 1. Parâmetros típicos de resistência.

Material	Cor	Modelo	$\Phi$ [°]	$c'$ [kPa]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Solo arenoso		Mohr-Coulomb	34	0	21,5
Solo argiloso		Mohr-Coulomb	21,5	20	20,5
Rocha		Impenetrável	-	-	26,5

A Tabela 2, apresenta os parâmetros hidráulicos dos materiais inseridos dos materiais utilizados na análise realizada neste estudo com uso do SEEP/2. A Equação 5, evidencia a necessidade da curva característica e da condutividade hidráulica dos materiais que estão sob condição não confinada.

Tabela 2. Parâmetros hidráulicos dos materiais.

Material	Cor	Modelo	$k_{Sat}$ (m/s)	$\theta_{Sat}$	$\theta_{Res}$
Solo arenoso		Saturado/NãoSaturado	0,0001	0,44	0,04
Solo argiloso		Saturado/NãoSaturado	1,00E-08	0,38	0,08
Rocha		Saturado	1,00E-12	-	-

A Figura 2, apresenta as curvas características da Areia e Argila, que foram geradas com base no banco de dados do GeoStudio. Essas funções são importantes para controle das variações de succões na região Não Saturada dos materiais.

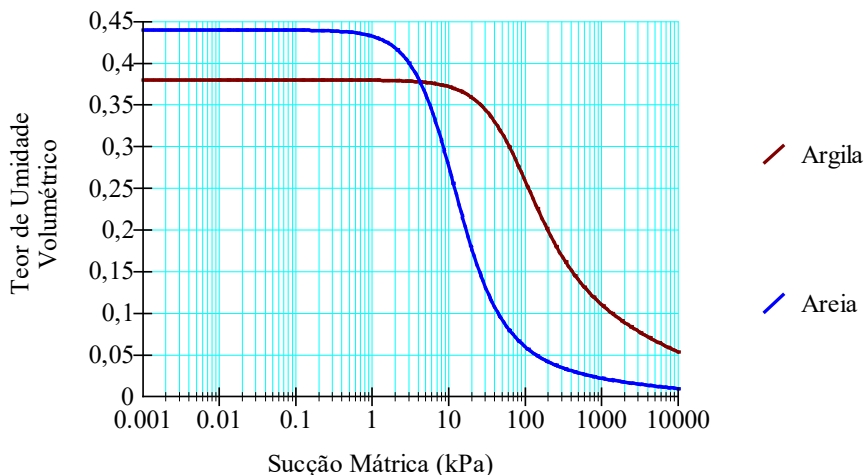


Figura 2. Curvas características, Areia e Argila.

### 3.2 Condições de contorno

As condições de contorno são fundamentais para resolução do problema, para regime permanente a entrada de dados para definição da posição da linha freática será feita em termos de carga total (H), 27m para montante e de 12m para jusante. Além disso, nas regiões com possibilidade de surgência utilizou-se a condição de contorno *drainage*.

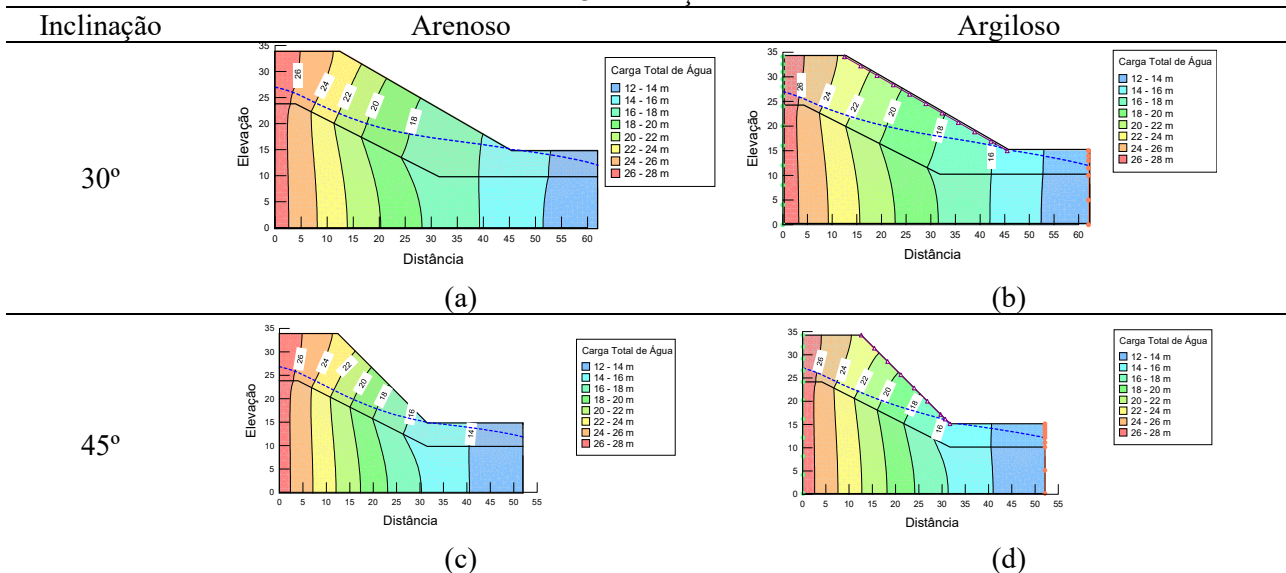
Acoplado as condições iniciais de percolação foram definidas as condições de contorno variáveis com o tempo, que utilizaram séries históricas da estação meteorológica de Belo Horizonte, de código 83587 (INMET, 2023). O primeiro modelo utiliza a indução de um fluxo de água na superfície para aplicar condições de precipitação recebeu apenas variáveis climáticas atreladas a precipitação. Já o segundo modelo, o qual emprega a interação Terra-clima, utilizou na entrada de dados, valores diários de umidade relativa do ar,

temperatura do ar, evaporação e precipitação. Este segundo modelo é capaz de gerar processos de balanços hídricos mais complexos, numa tentativa de prever o comportamento da poropressão.

#### 4 RESULTADOS

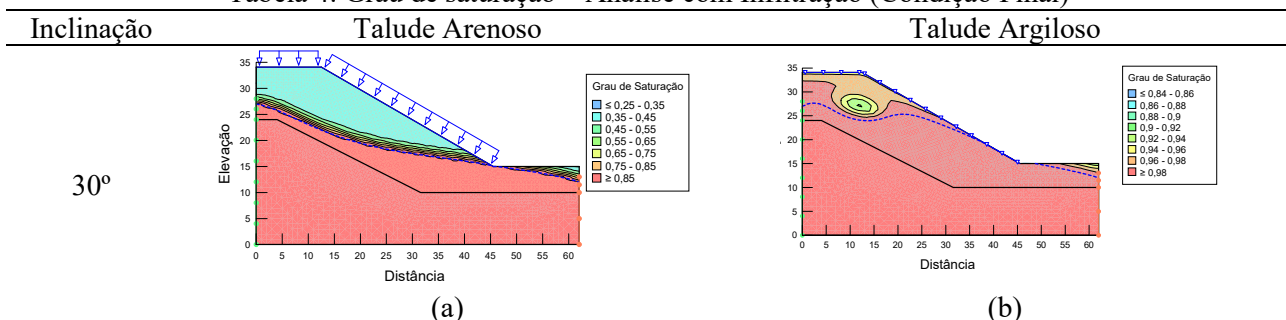
A Tabela 3, apresenta as condições iniciais de poropressão que foram acopladas ao estudo de fluxo transiente. Foram adotadas as mesmas condições de contorno para todas as situações avaliadas. Adjunto a isso parte-se do princípio de condições de estabilidade plena, isto é,  $F.S. > 1,0$  considerando uma avaliação por equilíbrio-limite.

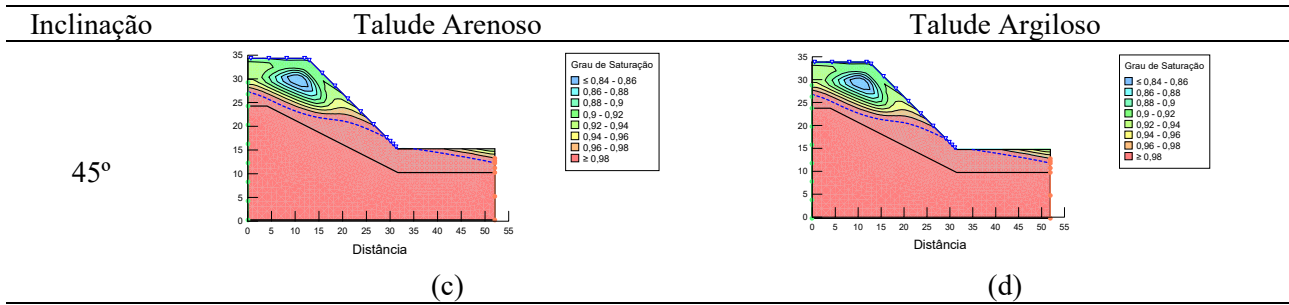
Tabela 3. Condição Inicial



A Tabela 4, apresenta as isolinhas de grau de saturação para o último dia avaliado no modelo de infiltração temporal. Os resultados para o talude arenoso, mostram a capacidade do modelo de redistribuir a água, mantendo uma maior porção de material com grau de saturação entre 35 a 45%. Em contrapartida, o talude argiloso apresenta capacidade de retenção de água mais significativa, onde uma maior porção de material apresenta grau de saturação entre 84 a 98%. Esta observação se relaciona com as condutividades hidráulicas de materiais argilosos serem inferiores as de materiais arenosos, o que resulta em maiores acúmulos e concentrações de água o que por consequência ocasiona uma maior elevação do nível freático do talude argiloso.

Tabela 4. Grau de saturação – Análise com Infiltração (Condição Final)





A Tabela 5, apresenta as isolinhas de grau de saturação para o último dia no modelo de interação Terra-clima. O talude arenoso possui uma menor capacidade de retenção de água neste modelo, e consequentemente exibe maiores valores de sucção. Já o talude argiloso, em ambas as geometrias há uma redução da linha freática no pé do talude, o que contribui para a redução de surgência superficial nesta região do modelo. Além disso, o modelo com uso da interação terra-clima apresenta menores valores de grau de saturação em relação a análise que somente considera infiltração, demonstrando a capacidade do modelo de simular fluxos evaporativos.

Tabela 5. Grau de saturação – Análise com a Interação terra-clima (Condição Final)

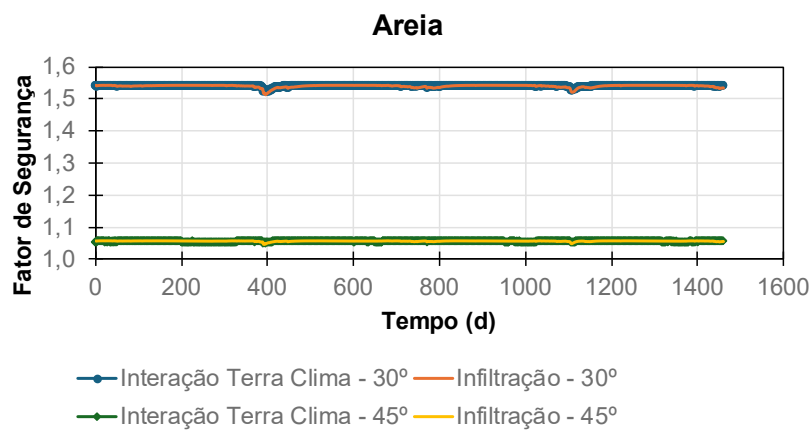
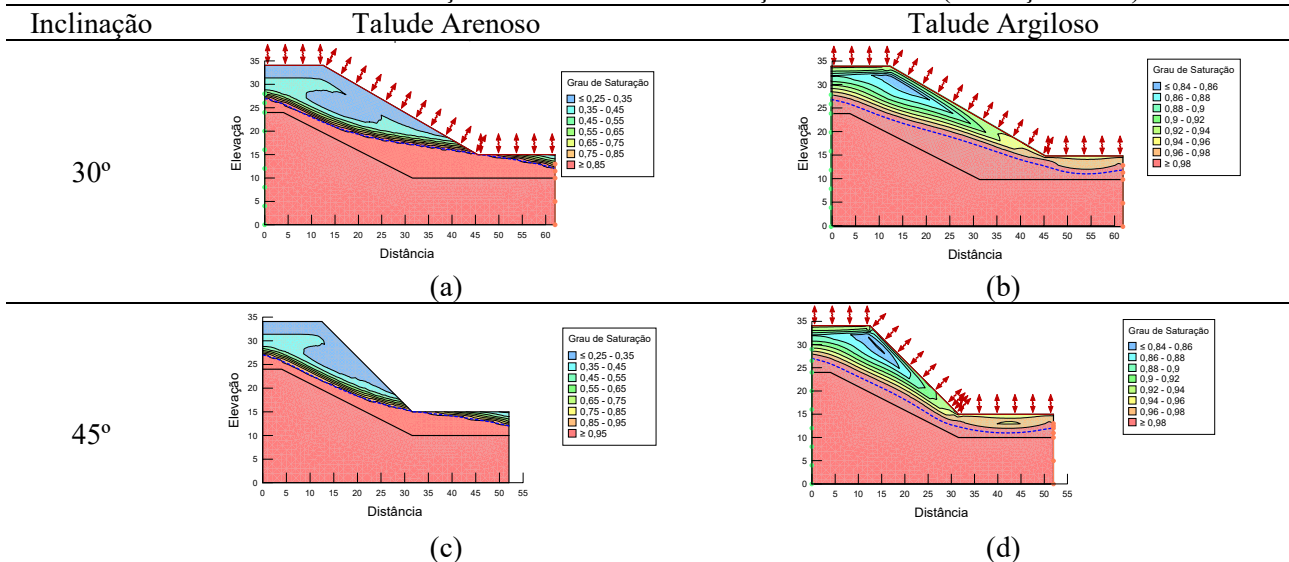


Figura 3. Variação temporal do fator de segurança da Areia.

A Figura 3 apresenta os valores de fator de segurança para ambas as inclinações dos taludes de composição arenosa. É perceptível que não há mudanças significativas nos valores de fator de segurança independentemente do tipo de análise realizada, isto possivelmente está ligado a capacidade de drenagem das areias.

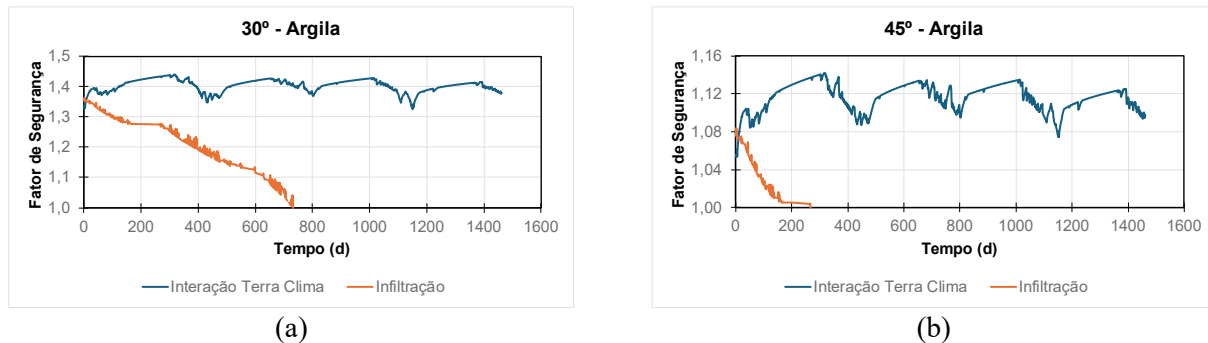


Figura 4 – Variação temporal do fator de segurança da Argila (a) Talude de 30° (b) Talude de 45°

A Figura 4 apresenta a variação temporal do fator de segurança no tempo para o talude argiloso, é perceptível que a simulação aplicada influencia diretamente nos resultados quanto a estabilidade dos taludes. Na Figura 4(a) a ruptura ocorre no dia 733 para o modelo de infiltração. Já na Figura 4(b) a ruptura ocorre no dia 269, acelerada pelas condições iniciais estabilidade já deterioradas. As simulações que consideram a interação terra-clima demonstraram maior sensibilidade aos eventos pluviométricos e fluxos evaporativos, isto pode ser notado pela variação temporal dos fatores de segurança deste tipo de análise.

## 5 RESULTADOS GERAIS

Modelos que consideram condições climáticas possuem incertezas vinculadas às suas premissas, devido a dificuldade de obtenção de dados precisos e representativos para a simulação assertiva de condições climáticas. O lençol freático e as poropressões são os principais influenciadores nas alterações das condições de estabilidade desses modelos, que incorporam a teoria da mecânica dos solos não-saturados para avaliação do impacto da distribuição de infiltração na redução de sucção.

A representação da zona não saturada em modelos de infiltração ou de interação climática deve ser refinada para avaliar com precisão o impacto de eventos pluviométricos. Na Tabela 4, observa-se que ao comparar os cenários (a) e (c), pode-se verificar que os valores de grau de saturação se assemelham bastante, nestes modelos que consideram somente a infiltração. Da mesma maneira na Tabela 5, ao se comparar os cenários (a) e (c), mesmo com a interação terra-clima, os graus de saturação também se assemelham bastante entre si com poucas diferenças evidentes na maior parte do talude.

Os taludes arenosos, devido a sua maior permeabilidade, apresentam menos alterações nos graus de saturação do modelo. Diante da facilidade de infiltração, o que resulta em uma linha freática praticamente estacionária e fatores de segurança mais estacionários, conforme observado na Figura 3. Logo, a inclinação foi o fator mais sensível para a redução da estabilidade para taludes com a composição arenosa.

Em contrapartida, os taludes argilosos são mais sensíveis a escolha do modelo de precipitação e a inclinação do talude. Pode-se observar, que as condições mais íngremes resultam em rompimentos em um menor intervalo de tempo, devido aos fatores de segurança iniciais menores, no entanto a redução progressiva do fator de segurança ocorre devido ao período de chuvas que persiste até o dia 165 (ruptura posterior no período de estiagem, dia 269). Contudo, não se observa ruptura na simulação com uso da interação terra-clima, por consequência do fluxo evaporativo, que por vezes é capaz de provocar o deplecionamento da linha freática no pé do talude (Tabela 5, cenários (b) e (d)); o que auxilia na redução de possíveis surgências superficiais, e elevações do lençol freático.

Adicionalmente, observa-se que as simulações envolvendo taludes argilosos apresentam uma variabilidade maior nos fatores de segurança em comparação com aquelas que utilizam materiais arenosos. Isso se deve à baixa taxa de infiltração nos taludes argilosos, resultando no acúmulo de água nas simulações

realizadas e, conseqüentemente, um aumento nas poropressões positivas (conforme evidenciado na Tabela 5, cenários (b) e (d)).

## 6 CONCLUSÕES

Este artigo apresenta um trabalho de pesquisa sobre a importância da adaptação dos estudos numéricos com as mudanças climáticas. Alertando sobre a relevância que os modelos sejam capazes de capturar e reproduzir os efeitos diretos de eventos extremos de precipitação com o intuito de fornecer subsídios a capacidade de previsão dos engenheiros. Existem variadas técnicas de modelagem de eventos pluviométricos, nesse artigo busca-se entender a influência da interação climática em taludes de diferentes composições e geometrias.

Os métodos podem tender a serem mais conservadores, a depender da quantidade de premissas que o compõe. Desta forma, o modelo de infiltração isolada é o mais conservador, pois simula apenas a variável crítica para indução de instabilidades. Além disso, pode-se analisar que modelos de chuva são mais sensíveis a materiais de baixa permeabilidade. O fator de segurança inicial impacta diretamente nas ocorrências de rupturas de taludes sob influência de precipitações pluviométricas subsequentes. A interação terra-clima, modelo com condições climáticas mais complexas, não apresentou indícios de instabilidade em nenhum dos cenários avaliados neste estudo.

Para taludes de composição arenosa ocorreu a manutenção dos valores de fator de segurança, o que indica uma baixa influência dos eventos pluviométricos para este tipo de material, nas simulações conduzidas neste estudo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq pelo apoio financeiro; À Seequent, pela concessão de uso da licença da ferramenta GeoStudio. E à GeoFast, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Collins, B. D., & Znidarcic, D. (2004). Stability analyses of rainfall induced landslides. *Journal of geotechnical and environmental engineering*, 130(4).
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Gerscovich, D. M. S., Vargas Jr, E. A., & De Campos, T. M. P. (2006). On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro, Brazil. *Engineering Geology*, 88(1-2).
- INMET (2023). *Banco de Dados Meteorológicos do INMET*. 2023. <https://bdmep.inmet.gov.br/#>
- Krahn, J. (2015). Seepage modeling with SEEP/W: An engineering methodology. *GEO-SLOPE International Ltd*. Calgary, Alberta, Canada. June 2015 Edition.
- Vanapalli, Sai & Fredlund, Delwyn & Pufahl, D.E. & Clifton, A.W.. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal - CAN GEOTECH J*. 33. 379-392. 10.1139/t96-060.
- Vardon, Phil. (2014). Climatic influence on geotechnical infrastructure: a review. *Environmental Geotechnics*. 2. 10.1680/envgeo.13.00055.
- Zhu, J. H., & Anderson, S. A.(1998). Determination of shear strength of Hawaiian residual soil subjected to rainfall-induced landslides. *Geotechnique*, 48(1).