

Comportamento de Estruturas de Solo Grampeado em Maciços Não Saturados

Kaoru Tsuchiya

Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, kaoru.tsuchiya@coc.ufrj.br

Mauricio Ehrlich

Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, me@coc.ufrj.br

RESUMO: Este estudo investiga, por meio de simulações numéricas no software PLAXIS 2D, o efeito da precipitação no comportamento de taludes em solo grampeado sob condições não saturadas. Utilizou-se como referência um talude de grande altura localizado no km 74,6 da BR-116/RJ, que sofreu deslizamento durante as chuvas intensas de janeiro de 2011. A modelagem baseou-se em dados de campo e laboratório obtidos em estudos anteriores, incluindo levantamentos topográficos, sondagens, registros pluviométricos e ensaios de resistência, permeabilidade e curvas características dos solos envolvidos (Van Onselen, 2016; Oliveira, 2024). Foram realizadas análises paramétricas para avaliar a influência da precipitação, da geometria dos grampos, das propriedades do solo e das condições de drenagem na estabilidade do maciço reforçado. Foram analisados os valores do fator de segurança (FS), a posição das superfícies de ruptura e os deslocamentos no maciço ao longo do tempo. Os resultados evidenciam que o solo grampeado é eficaz na restrição de deformações induzidas pela redução de sucção durante o avanço da frente de saturação, contribuindo para a estabilidade global do talude. Configurações com grampos mais longos e espaçamentos menores apresentaram melhor desempenho. A técnica se mostra uma alternativa viável para estabilização de encostas em um contexto de crescente recorrência de eventos extremos.

PALAVRAS-CHAVE: Solos Não Saturados, Solo Grampeado, Modelo Numérico, Estabilidade de Taludes

ABSTRACT: This study investigates, through numerical simulations using PLAXIS 2D software, the effect of rainfall on the behavior of nailed soil slopes under unsaturated conditions. A high embankment slope located at km 74.6 of the BR-116/RJ highway, which experienced a landslide during intense rainfall in January 2011, was used as a reference. The modeling was based on field and laboratory data from previous studies, including topographic surveys, borehole investigations, rainfall records, and strength, permeability, and soil-water retention curve tests (Van Onselen, 2016; Oliveira, 2024). Parametric analyses were conducted to assess the influence of rainfall, nail geometry, soil properties, and drainage conditions on the stability of the reinforced slope. The analysis included the evaluation of the factor of safety (FS), the position of potential failure surfaces, and displacements within the soil mass over time. The results show that nailed soil is effective in limiting deformations caused by suction loss during the advance of the saturation front, contributing to the overall slope stability. Configurations with longer nails and reduced spacing demonstrated better performance. This technique proves to be a viable solution for slope stabilization, especially in the context of increasingly frequent extreme weather events.

KEYWORDS: Unsaturated Soils, Soil Nailing, Numerical Model, Slope Stability

1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, apresentam-se os resultados de análises paramétricas conduzidas por meio de modelagem computacional, com o objetivo de avaliar o uso de grampeamento como técnica de estabilização de taludes de corte não saturado. As análises buscam investigar a influência da variação de diferentes fatores no Fator de Segurança (FS), na tração mobilizada nos reforços ao longo do comprimento dos grampos e nos deslocamentos. Para destacar os aspectos considerados e facilitar as análises numéricas, foram adotadas simplificações no modelo, evitando-se rupturas ou arrancamento dos grampos. Para isso, os grampos foram modelados como elementos elásticos, com elevada resistência ao arrancamento, de forma a garantir sua integridade estrutural em todas as análises realizadas.

2 HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO

2.1 Local estudado

O talude analisado neste estudo está localizado no município de Teresópolis-RJ, na Rodovia BR-116/RJ, na altura do km 76,4 (Figura 1a). Informações geológico-geotécnicas específicas da área de estudo podem ser encontradas no relatório elaborado pela Fundação COPPETEC para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), no âmbito do Sistema de Gerência Geológico-Geotécnico de Encostas e Taludes da Rodovia BR-116/RJ (SGGR116). A região insere-se em um contexto montanhoso e fortemente acidentado, caracterizado por amplitudes topográficas superiores a 400 m e gradientes acentuados a muito acentuados. O ambiente geotécnico local inclui a ocorrência de colúvios, depósitos de talus, solos rasos e afloramentos rochosos.

Estudos anteriores apresentam um histórico de intervenções realizadas no km 76,4, bem como dados sobre características do solo e padrões de precipitação da região (Van Onselen, 2013, 2016 e Oliveira, 2024). Segundo Oliveira (2024), a primeira intervenção ocorreu na década de 1970, durante as obras de implantação da rodovia, ocasião em que o talude apresentava altura aproximada de 50 m e inclinação média de 54°. Em 11 de janeiro de 2011, ocorreu o primeiro deslizamento registrado neste talude (Figura 1b). Esse evento será utilizado como referência para a calibração e validação do modelo computacional empregado nas análises desenvolvidas neste trabalho.

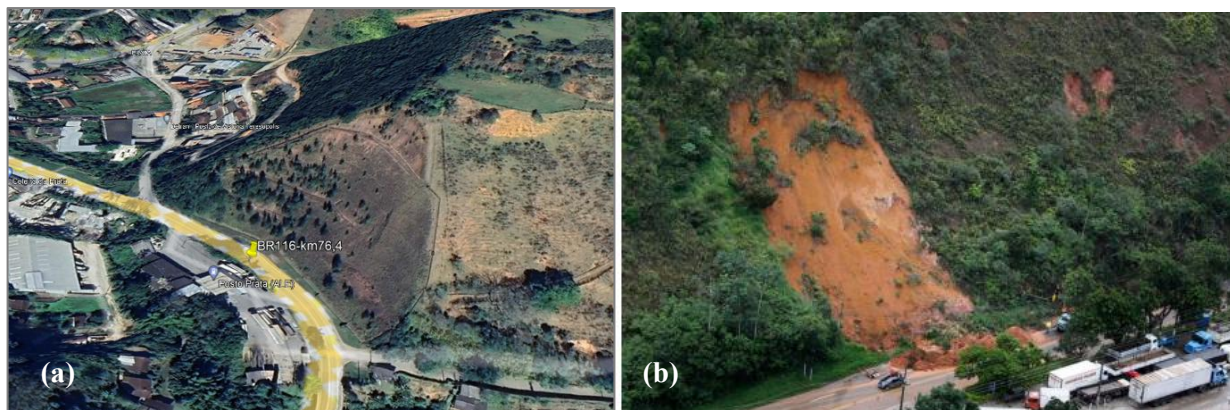


Figura 1. (a) Talude estudado em fevereiro/2024 (Google Earth); (b) Primeira ruptura de 2011, localização da seção de estudo (SGGR116).

2.2 Ensaios de campo e laboratório

Na Figura 2, apresenta-se a seção geológico-geotécnica definida do local através de sondagens à percussão (SPT). O solo residual derivado do gnaiss predominante na região possui composição silto-argilosa com presença de areia fina, além de apresentar valores de N_{SPT} crescentes com a profundidade. Ressalta-se que o furo permaneceu seco durante todo o ensaio. A estratigrafia inicia-se com um solo residual maduro (SRM), com valores de N_{SPT} variando entre 2 e 9. Abaixo do SRM, encontra-se o solo residual jovem 1 (SRJ1), com N_{SPT} entre 9 e 18, seguido pelo solo residual jovem 2 (SRJ2), que constitui a camada mais profunda identificada no perfil investigado.

Nas Figuras 3, e nas Tabelas 1 e 2, resumiram-se resultados de ensaios de caracterização, cisalhamento direto inundado e permeabilidade (Van Onselen et al., 2013; Van Onselen, 2016; Oliveira, 2024). As amostras utilizadas nos ensaios laboratoriais foram coletadas em abril de 2012, período correspondente ao final da estação chuvosa e início da estiagem. Os graus médios de saturação (S) obtidos foram: 0,74 para o SRM, 0,91 para SRJ1 e 0,60 para o SRJ2. Considerando que a primeira ruptura ocorreu em janeiro de 2011, durante o auge da estação chuvosa, é razoável supor que, na ocasião do evento, os graus de saturação desses materiais fossem superiores aos registrados na campanha de 2012.

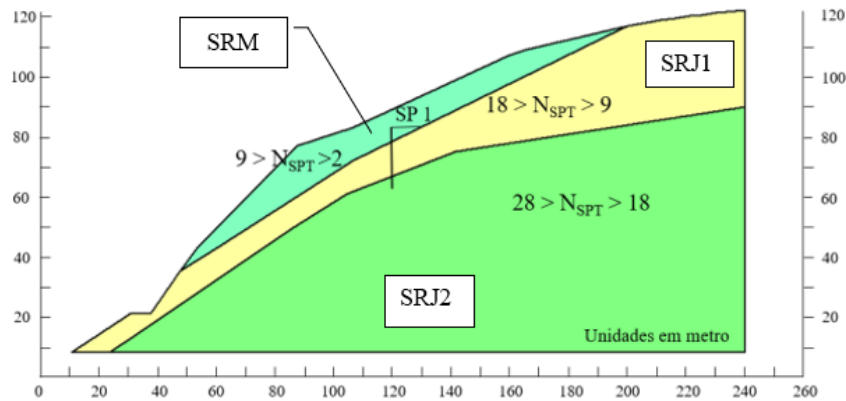


Figura 2. Seção geológico-geotécnica da seção estudada (Oliveira, 2024)

Tabela 1. Quadro resumo de resultados de caracterização dos solos (Van Onselen, 2016)

Camada de solo residual	Granulometria						Índices de consistência		Classificação Sistema Unificado
	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)			
			fina	média	grossa		LL	IP	
SRM	28	60	7	4	1	0	72	42	CH
SRJ1	15	72	8	5	0	0	64	39	CH
SRJ2	5	26	14	17	29	9	34	20	SC

Para a determinação dos parâmetros de condutividade hidráulica, foram realizados ensaios de permeabilidade com carga variável, com o objetivo de se obter o valor da permeabilidade do solo saturado (k_{sat}). As curvas características foram determinadas experimentalmente por meio da técnica do papel filtro, adotando-se o método de secagem. Os corpos de prova foram inicialmente saturados e, posteriormente, submetidos à secagem ao ar livre até atingirem diferentes níveis de umidade. A partir das leituras obtidas com os papéis-filtro, foram determinadas as sucções mátricas correspondentes a cada teor de umidade, permitindo a construção das curvas. Para o SRJ2, não foram realizados ensaios laboratoriais diretos. Neste caso, utilizou-se o recurso de estimativa da curva característica disponível no módulo SEEP/W do software GeoStudio, com base na distribuição granulométrica do solo. Os parâmetros da equação proposta por van Genuchten (1980) foram ajustados utilizando o programa RETC, permitindo a representação da curva característica de forma indireta. As curvas de condutividade hidráulica não saturada foram então obtidas com base na equação de van Genuchten (1980), possibilitando a caracterização da variação da condutividade hidráulica em função da sucção.

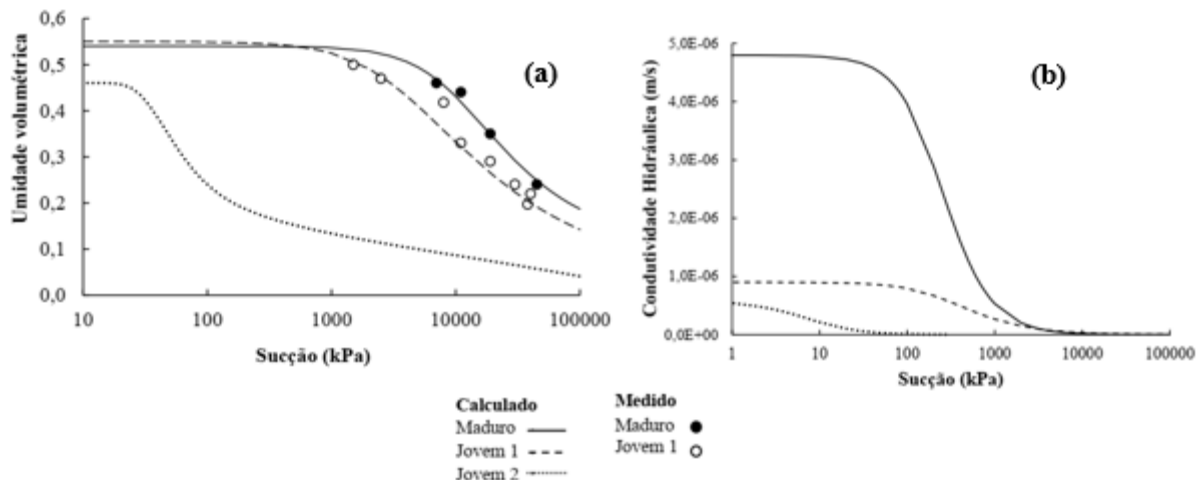


Figura 3. (a) Curvas características e (b) Curvas de condutividade hidráulica dos solos (Oliveira, 2024)

A partir das amostras coletadas em campo, foram preparados corpos de prova para ensaios de cisalhamento direto, visando à obtenção dos parâmetros de resistência do solo. Os ensaios foram realizados em duas condições: com as amostras na umidade natural e sob condição de inundação (Tabela 2), para avaliar o comportamento do solo em diferentes estados de saturação.

Tabela 2. Quadro resumo de resultados de ensaios (Van Onselen, 2016; Oliveira, 2024)

Material	Parâmetros de resistência		Parâmetros de condutividade hidráulica (Van Genuchten, 1980)					
	c' (kPa)	ϕ' (°)	k_{sat} (m/s)	θ_r	θ_s	α	n	m
SRM	2	23	4,8e-06	0,1	0,5459	0,0001	1,70	0,4117
SRJ 1	44	25	9,0e-07	0,02	0,5748	0,003	1,43	0,3007
SRJ 2	1	35	6,3e-07	0,15	0,4600	0,050	1,50	0,3333

3 MODELAGEM NUMÉRICA

As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software PLAXIS 2D, baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Na modelagem do comportamento mecânico dos solos, utilizou-se o modelo constitutivo *Hardening Soil Model* (HSM), adequado para representar a resposta não linear e dependente da tensão típica de solos residuais. Para representação do avanço da frente de saturação, consideraram-se os parâmetros de condutividade hidráulica não saturada, conforme apresentado na Tabela 2. Os parâmetros de deformabilidade dos solos foram estimados com base na formulação empírica (Eq. 1) proposta por Odebrecht e Schnaid (2012), considerando-se os valores médios obtidos na investigação geotécnica. Tabela 3, apresentam-se os parâmetros de solos considerados nas análises efetuadas.

$$E_{50} = 2,01 \cdot N_{SPT,60} \quad (1)$$

Tabela 3. Parâmetros adotados para os solos, modelo constitutivo: HSM

Material	γ (kN/m ³)	Saturação inicial	e_o	N_{SPT} médio	Deformabilidade			Resistência	
					E_{50} (MPa)	m	v_{ur}	c' (kPa)	ϕ' (°)
SRM	15,1	0,88	1,48	7	19,3	0,5	0,2	2	23
SRJ1	15,9	0,91	0,60	14	38,5	0,5	0,2	44	25
SRJ2	16,3	-	0,46	29	79,8	0,5	0,2	1	35

Considerando a saturação inicial de cada solo, conforme apresentado na Tabela 3, a precipitação foi modelada como uma função dependente do tempo, sendo a infiltração condicionada à declividade do talude. Nesse contexto, apenas a componente da precipitação perpendicular à superfície do terreno é considerada para infiltração. A geração de escoamento superficial ocorre a partir de duas contribuições: a parcela da precipitação que não infiltra devido à geometria do talude e o excedente de água que não é absorvido em razão da saturação do solo ou da limitação imposta pela sua condutividade hidráulica. Com base nos parâmetros de condutividade hidráulica apresentados na Tabela 2 e na restrição da elevação da linha piezométrica ao nível do terreno natural, observa-se a evolução do grau de saturação e a variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo, mantendo-se, durante toda a análise a possibilidade de geração de *runoff*.

3.1 Validação do modelo

A primeira ruptura documentada do talude foi utilizada como base para validação do modelo numérico inicial. Os parâmetros geotécnicos adotados estão apresentados na Tabela 3, e os dados de precipitação foram os mesmos utilizados por Oliveira (2024). Considerou-se uma chuva acumulada de 96 horas de 174 mm, sendo que, na última hora (97ª hora), foi aplicada uma intensidade adicional de 10 mm.

As condições iniciais de saturação e tensões foram obtidas por meio do processo de *Gravity Loading*. Em seguida, foram simuladas duas fases de análise acoplada fluxo-deformação, dependentes do tempo: a primeira com duração de 96 horas e a segunda com 1 hora, totalizando 97 horas. Dessa forma, a evolução da

saturação, da permeabilidade e da sucção ao longo do tempo foi considerada de forma contínua ao longo do período de precipitação.

Ao final de cada fase, foram avaliados os valores do Fator de Segurança (FS) e as posições das superfícies potenciais de ruptura. Após as primeiras 96 horas de chuva, o valor de FS permaneceu superior ao valor unitário, indicando condições estáveis para o talude. No entanto, após a aplicação da precipitação adicional, o FS reduziu-se para valores inferiores, caracterizando a ruptura do talude na posição indicada na Figura 4(b). A localização da cunha de deslizamento que foi estimada é compatível com aquela observada em campo, conforme registrado na Figura 1(b). Esse modelo, que apresenta boa correlação com as condições reais de campo, será referido ao longo deste trabalho como Caso 0. Um aspecto relevante observado nas simulações foi a ocorrência de surgência de água na face do talude entre as horas 96 e 97 de precipitação, fenômeno que pode representar um indicativo de ruptura iminente em encostas naturais.

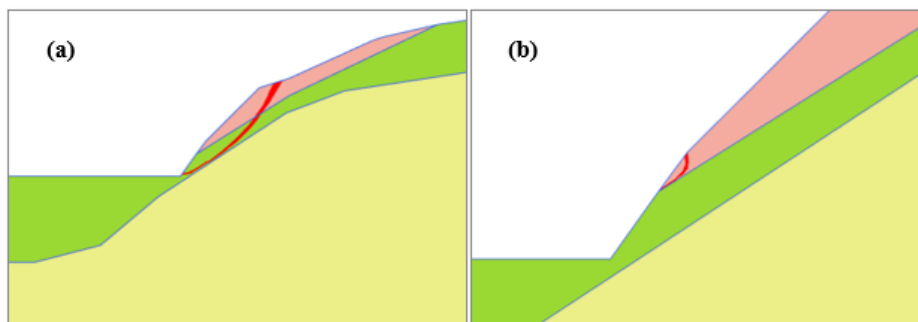


Figura 4. (a) Superfície crítica hora 96 (FS=1,30) e (b) Superfície de ruptura na hora 97 (FS=0,79)

3.2 Modelagem do grampo

No programa Plaxis 2D os grampos podem ser modelados por três diferentes formas, através de um elemento do tipo *plate*, *geogrid* ou *embedded beam*. Foi adotado o elemento *embedded beam* para as análises aqui realizadas. Ele é comumente utilizado para representar elementos longos e esbeltos que transmitem cargas ao solo por meio de elementos de interface ao longo do fuste e base. Considerando que os grampos são constituídos por uma seção mista de aço e nata de cimento, foi adotado um material equivalente para a definição dos parâmetros de rigidez e peso específico do elemento. No modelo, os grampos foram definidos com barras de aço de 25 mm de diâmetro, instaladas em perfurações de 75 mm preenchidas com nata de cimento com resistência característica à compressão $f_{ck}=25$ MPa. Os parâmetros utilizados para o elemento de grampo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Características do grampo (*embedded beam*)

γ (kN/m ³)	30
diâmetro (m)	0,075
E (kPa)	44.111.111,11
Resistência axial fuste (kN/m)	300
Resistência de ponta (kN)	-
Espaçamento (m)	variável (ver Tabela 5)

3.3 Casos analisados

Na Tabela 5, apresenta-se um resumo das análises efetuadas. Foram simulados oito casos distintos, nos quais se variaram os seguintes parâmetros: o comprimento dos grampos (L), o espaçamento horizontal entre grampos (S_h) e a precipitação acumulada nas 96 horas iniciais (q). O espaçamento vertical entre os grampos (S_v) foi mantido constante em 1,50 m em todas as simulações. Nas análises, seguiram-se a mesma sequência adotada para o Caso 0, a saber: (i) condição inicial, imediatamente após a instalação dos grampos; (ii) 96 horas de chuva; e (iii) após a 97ª hora, aplicação adicional de 10 mm/h de precipitação.

Tabela 5. Casos analisados

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8
S_h (m)	1,5	3,0	1,5	3,0	1,5	3,0	1,5	3,0
L (m)	6		12		6		12	
q (mm/96h)	174		174		87		87	

3.4 Resultados das análises

Na Tabela 6, apresentam-se os valores de FS determinados para cada caso. A Figura 5 mostra as superfícies críticas correspondentes a cada condição analisada. Os grampos não alteraram significativamente os fatores de segurança (FS) iniciais, uma vez que são elementos passivos e não sofrem solicitações relevantes no momento da instalação. No entanto, em comparação com o caso sem grampos (Caso 0), o grampeamento proporcionou valores de FS mais elevados na 97ª hora de chuva. Observou-se também que o espaçamento horizontal entre os grampos teve impacto pouco expressivo no FS global do talude. Embora, em algumas análises, tenha-se observado que espaçamentos mais amplos geram instabilidades locais, o que indica a necessidade de elementos de face. A introdução de um elemento permeável na face contribuiu para a estabilização destas regiões.

Tabela 6. FS para os diferentes casos analisados

FS	Caso 0	1	2	3	4	5	6	7	8
inicial	1,74	1,74	1,75	1,75	1,75	1,74	1,75	1,75	1,75
96h	1,30	1,35	1,35	1,49	1,51	1,63	1,65	1,64	1,65
97h	0,79	1,31	1,36	1,48	1,49	1,60	1,63	1,62	1,62

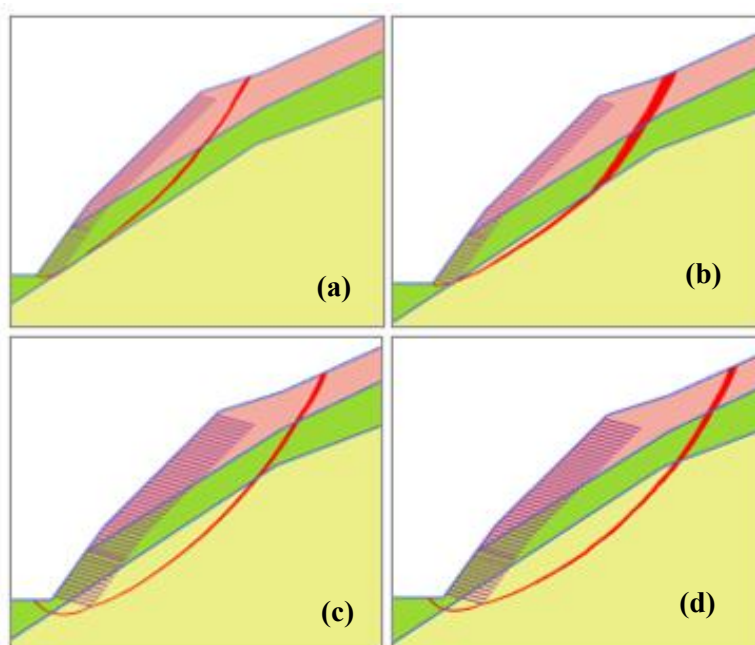


Figura 5. Superfícies críticas globais para os Casos: (a) 1 e 2; (b) 5 e 6; (c) 3 e 4 e; (d) 7 e 8.

Nos casos com grampos mais longos, os FS globais apresentaram-se mais elevados, salientando como esperado, que comprimentos maiores favorecem à estabilidade do talude. A redução da chuva acumulada (Casos 5 a 8) levou a menores reduções no valor do FS evidenciando o impacto direto da precipitação no comportamento do talude. Verifica-se também que grampos mais longos e chuvas acumuladas menores fazem com que a superfície crítica se desloque para a direita (Fig. 5).

Na Tabela 7, comparam-se os valores máximos de esforços de tração mobilizados, T_{max} , determinados para cada caso, considerando as diferentes linhas de grampos e deslocamentos horizontais do

talude. Malhas mais densas reduziram os deslocamentos do solo, porém também geraram esforços de tração mais elevados nos grampos. Grampos mais longos resultaram em maiores esforços de tração, devido à sua maior contribuição na redução das deformações nas zonas mais instáveis do maciço. A Figura 6 mostra que, ao contrário do que se verificou nos grampos de 6 m, os grampos de 12 m atravessam integralmente a região de maiores deslocamentos observada na modelagem do caso sem grampos (Caso 0). O aumento do comprimento dos grampos resultou em esforços de tração entre 1,8 e 2,2 vezes superiores, independentemente do nível de chuva acumulada. Considerando o mesmo espaçamento e comprimento de grampos, observa-se que os esforços nos grampos foram aproximadamente 20% maiores nos cenários com maior precipitação.

Tabela 7. Esforços máximos nos grampos ($T_{\max \max}$) e deslocamentos horizontais máximos do talude ($u_{h \max}$)

		Caso 0	1	2	3	4	5	6	7	8
96h	$T_{\max \max}$ (kN)	-	372	316	657	624	330	244	596	530
	$u_{h \max}$ (m)	0,32	0,23	0,25	0,15	0,18	0,11	0,11	0,09	0,10
97h	$T_{\max \max}$ (kN)	-	382	378	656	647	344	256	615	557
	$u_{h \max}$ (m)	0,40	0,27	0,32	0,16	0,19	0,12	0,13	0,10	0,12

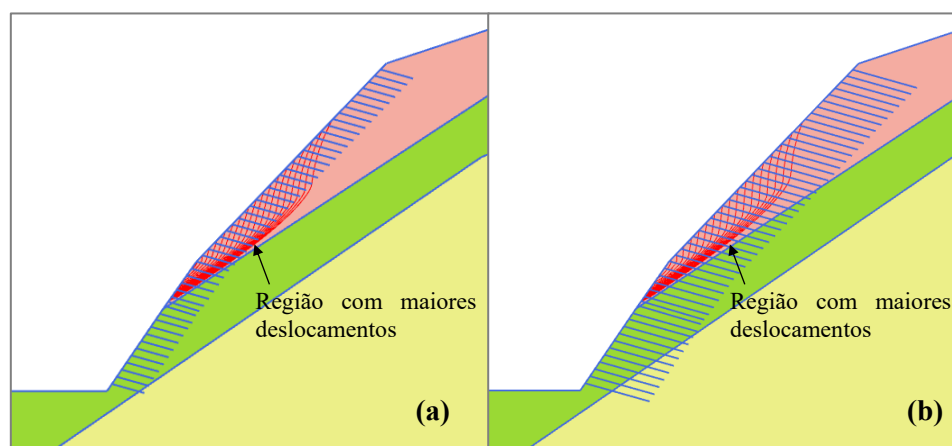


Figura 6. Região com maiores deslocamentos, modelagem do caso sem grampos, hora 96 (Caso 0) e projeção dos grampos com comprimento de: (a) 6 m; e (b) 12 m.

4 CONCLUSÕES

As análises indicam que o grampeamento pode contribuir para a melhoria da estabilidade global de taludes em condição não saturada. A redução da sucção, provocada pelo avanço da frente de saturação em decorrência da precipitação, e a consequente variação das tensões e deformações resultam em movimentações no talude. Por se tratar de elementos passivos, os grampos não são mobilizados no momento da instalação. No entanto, sua presença atua restringindo as deformações durante o avanço da frente de saturação, podendo evitar deslizamentos. Os esforços e deslocamentos mostraram-se sensíveis à variação do comprimento e do espaçamento entre os grampos, sendo que grampos mais longos e com malhas mais densas se mostraram mais eficientes no controle das deformações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fundação COPPETEC. (2015). *Sistema de Gerência Geológico-Geotécnico de Encostas e Taludes da rodovia BR-116/RJ – km 2 ao km 144,5*. Rio de Janeiro.
- Oliveira, Q.A.(2024) *Avaliação numérica de limiares críticos de precipitação que levaram a deslizamentos em um talude de corte, não saturado, na BR-116/RJ, km 76,4*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, 153 p.



- PLAXIS. (2024). *PLAXIS 2D – Reference and Material Models manual* (Version 2024.3). Disponível em: <https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0107989>. Acesso em: 15 maio 2025.
- Schnaid, F., & Odebrecht, E. (2012). *Ensaaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações* (2ª ed.). São Paulo: Oficina de Textos.
- Van Onselen, C. C. (2012). *Retroanálise de ruptura em talude de solo residual situado na BR 116, km 76,4.RJ*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / COPPE, 377 p.
- Van Onselen, C. C., Ehrlich, M., & Becker, L. D. B. (2013). *Retroanálise da ruptura de talude de solo residual situado na BR 116/RJ, km 76,4*. VI Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas COBRAE. Angra dos Reis.