

Influência da Infiltração de Esgoto na Estabilidade das Encostas Típicas da Cidade do Rio de Janeiro

Iane Loise Moreira Gomes

Discente do Programa de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Brasil, ianegomess@poli.ufrj.br

Marcos Barreto de Mendonça

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Brasil, mbm@poli.ufrj.br

Wagner Nahas

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Brasil, wagnernahas@poli.ufrj.br

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica, Rio de Janeiro, Brasil, carminhacavalcanti@poli.ufrj.br

RESUMO: Encostas de grandes centros urbanos ocupadas sem infraestrutura adequada têm sido palco de frequentes eventos de movimentos de massa, usualmente associados a chuvas intensas. Nestes locais, é comum encontrar situações em que o esgoto é lançado diretamente no solo, o que pode constituir-se em importante fator condicionante da estabilidade da encosta. A contínua infiltração de esgoto no solo aumenta seu grau de saturação e, conseqüentemente, provoca a redução de sua coesão aparente devida à sucção, diminuindo a resistência ao cisalhamento do solo. O objetivo do presente trabalho é analisar o efeito do lançamento de esgoto na estabilidade de taludes a partir de modelagem numérica bidimensional de fluxo transiente associando chuva e esgoto, em talude hipotético típico da região, acoplada a análises de estabilidade por método de equilíbrio limite. As modelagens e análises de estabilidade foram realizadas utilizando o software Slide 2 da RocScience. Considerando um histograma de chuva médio da região, avaliou-se influência da infiltração do esgoto no fator de segurança ao longo de um período de 4 meses. Foram consideradas quatro diferentes configurações de infiltração de esgoto fazendo variar a densidade demográfica e espaçamento dos pontos de lançamento do efluente na encosta. Os resultados comprovam numericamente o impacto significativo da falta da coleta adequada de esgoto na estabilidade de taludes típicos da cidade do Rio de Janeiro.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Talude, Modelagem Numérica, Esgoto, Deslizamentos, Percolação.

ABSTRACT: Slopes of large urban centers occupied without adequate infrastructure have been the scene of frequent mass movement events, usually associated with heavy rains. In these locations, it is common to find situations where sewage is discharged directly into the ground, which can constitute an important conditioning factor for slope stability. The continuous infiltration of sewage into the soil increases its degree of saturation and, consequently, causes a reduction in its apparent cohesion due to suction, decreasing the soil's resistance to shear. The objective of this study is to analyze the effect of sewage discharge on the stability of slopes through two-dimensional numerical modeling of transient flow, associating rainfall and sewage, on a hypothetical slope typical of the region, coupled with stability analyses by the method of limit equilibrium. The modeling and stability analyses were performed using RocScience's Slide 2 software. Considering an average rainfall histogram of the region, the influence of sewage infiltration on the safety factor over a period of 4 months was evaluated. Four different configurations of sewage infiltration were considered, varying the demographic density and spacing of effluent discharge points on the slope. The results numerically confirm the significant impact of the lack of proper sewage collection on the stability of typical slopes in the city of Rio de Janeiro.

KEYWORDS: Slope Stability, Numerical Modeling, Sewage, Landslides, Percolation.

1 INTRODUÇÃO

Desastres associados a deslizamentos de terra têm ocorrido frequentemente, envolvendo diversos problemas à sociedade, como perdas materiais, impactos ambientais e perdas de vidas humanas, principalmente quando ocorrem em áreas urbanas.

Devido a combinação de características geomorfológicas e climáticas, o Brasil apresenta boa parte de seu território com significativa suscetibilidade a deslizamentos de terra (IBGE, 2019). Os fatores condicionantes da estabilidade de taludes são, de forma geral, conhecidos: características geológicas, geomorfológicas, climáticas, de vegetação e de uso da terra são os principais deles. Existem, entretanto, fatores antropogênicos que potencializam a susceptibilidade das encostas aos deslizamentos que são inerentes ao processo de ocupação informal sem o devido planejamento urbano e orientação técnica (Mendonça et al, 2000). As ações envolvidas em tal processo podem alterar a geometria natural da encosta, sobrecarregar o terreno, remover o efeito positivo da vegetação ou aumentar a umidade do solo.

Entre as ações antropogênicas nessas áreas ocupadas sem infraestrutura urbana adequada, tem-se o lançamento de esgoto diretamente no solo. Sua contínua infiltração deve aumentar o grau de saturação do solo, fazendo reduzir a coesão aparente devida à sucção e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do solo. SANTOS e ASSUNÇÃO (2005) analisaram a quantidade da vazão de infiltração em uma área de estudo em Salvador sem esgotamento sanitário e concluiu, que a infiltração pode alcançar valores elevados em assentamentos adensados, em comparação com os valores das infiltrações geradas por chuvas torrenciais. Apesar dos indícios de se tratar de um importante fator condicionante que precisa ser considerado na avaliação da suscetibilidade de encostas a deslizamentos, observa-se na literatura uma carência de estudos numéricos com tal finalidade. Esta lacuna foi a motivação para a realização do presente trabalho que busca avaliar o efeito de diferentes cenários de lançamento de esgoto no fator de segurança quanto a estabilidade de taludes.

2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é analisar numericamente o efeito do lançamento de esgoto na estabilidade de um talude hipotético típico da região do Rio de Janeiro, considerando diferentes cenários de densidade de ocupação da encosta, a partir de modelagem numérica bidimensional de fluxo transiente associando chuva e esgoto ao longo de um período de tempo.

3 METODOLOGIA

As análises transientes de percolação e de estabilidade foram desenvolvidas utilizando, respectivamente, o método dos elementos finitos e equilíbrio limite, respectivamente, do módulo Slide 2 da RocScience. O método de equilíbrio limite escolhido para a análise de estabilidade foi Morgenstern-Price.

Os estudos de estabilidade envolveram as seguintes etapas:

Etapa 1: Montagem da geometria do modelo numérico de talude hipotético típico da região do Rio de Janeiro.

Etapa 2: Definição de uma região crítica no Rio de Janeiro em termos de movimentos de massa.

Etapa 3: Pesquisa bibliográfica para definição de perfis geotécnicos, faixa de parâmetros de resistência e permeabilidade compatíveis com a região escolhida.

Etapa 4: Aquisição de dados pluviométricos da região escolhida e definição de um período crítico a ser analisado.

Etapa 5: Definição de uma faixa de valores de lançamento de esgoto de acordo com as normas vigentes para diferentes cenários de ocupação da encosta.

Etapa 6: Análises de fluxo e de estabilidade considerando apenas chuva e chuva e esgoto ao longo do período analisado.

3.1 Levantamento Pluviométrico

O levantamento pluviométrico foi feito com base nos dados fornecidos pelo Alerta-Rio (2022) para a estação da Tijuca, esta estação foi escolhida devido ao número elevado de ocorrências de escorregamentos na região. Após verificar os meses com precipitações mais elevadas entre os anos de 2022 e 2023, foi definido o período de janeiro a abril de 2022 (120 dias) para realização da análise transiente.

3.2 Elaboração do Modelo Geotécnico

Para a elaboração do modelo numérico, considerou-se a geologia típica do Rio de Janeiro, a qual compõe-se predominantemente de gnaisses com cobertura pouco espessa de solo residual e/ou coluvionar (Pinto, 2013; Avelar *et al.*, 2011). A Figura 1 mostra a geometria e o perfil geotécnico adotado, descrito por uma camada pouco espessa de solo coluvionar, variando de 2 a 5 m, sobre uma camada mais espessa de solo residual jovem sobrejacente à de rocha alterada, variando de 2 a 10 m cada uma. A inclinação do talude é de 30° e foi escolhida com base nos escorregamentos que ocorreram próximos ao mirante da Vista Chinesa, situada no Parque Nacional da Tijuca, denominados de Acidente 21 e Acidente 23. O Acidente 21 ocorreu em um talude com declividade de 30° e o Acidente 23 ocorreu em um talude com declividade de 32° , em ambos os acidentes a encosta apresentava colúvio assente sobre solo residual (Rocha, 1993).

O modelo empregado considera as superfícies inferiores com condição de contorno de potencial constante, nas bordas laterais, fluxo livre na superfície da camada de colúvio e fluxo nulo (impermeável) no limite inferior do modelo sendo a entrada de esgoto considerada como uma fonte pontual de entrada de vazão à profundidade de 2 m espaçada ao longo do talude. Para condição inicial, uma simulação de fluxo permanente foi realizada sem esgoto e sem chuva para todos os casos.

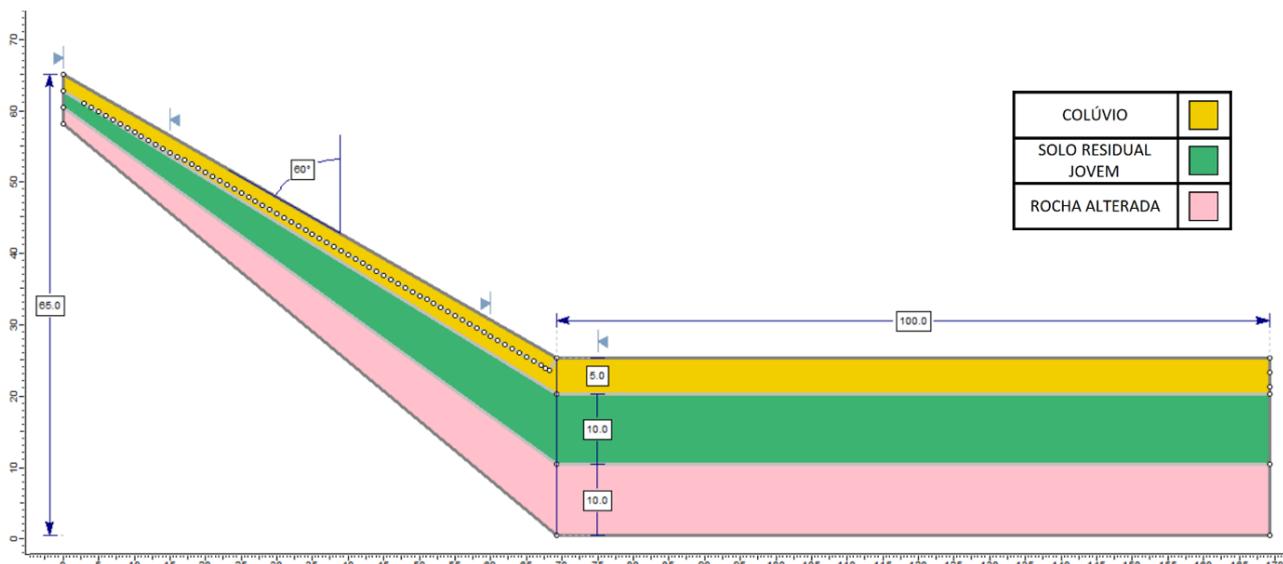


Figura 1. Geometria do modelo adotado.

3.3 Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Os dados de peso específico, intercepto coesivo, ângulo de atrito e permeabilidade do solo coluvionar foram determinadas a partir de informações de amostras deformadas e indeformadas dos colúvios da Vista Chinesa (RJ), extraídas de DELGADO (1993) e ROCHA (1993), enquanto os dados de peso específico, coesão e ângulo de atrito dos solos residual jovem e rocha alterada foram determinados a partir de ensaios de cisalhamento direto realizados no Morro da Formiga, localizado no Maciço da Tijuca, obtidos em SALES

(2016). As propriedades hidráulicas do colúvio (com exceção da permeabilidade), do solo residual jovem e da rocha alterada foram adotadas com base nas localidades de Gávea (RJ), Campo Grande (RJ) e Costa Brava (RJ), respectivamente, extraídas de PINTO (2013). A Tabela 1 resume os parâmetros adotados para cada material.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos dos materiais.

Solo	γ (kN/m ³)	c'	ϕ (°)	k_{sat} (cm/s)	θ_r	θ_s	α (cm ⁻¹)	n
Colúvio ⁽¹⁾	14	5	26	0,001	0,051	0,44	-	-
Residual Jovem	17	33	42	1,19E-04	0,051	0,51	8,41E-03	1,81
Rocha Alterada	20	200	55	9,93E-04	0,065	0,506	0,0225	2,68

⁽¹⁾ Os parâmetros hidráulicos α e n para o colúvio foram adotados de acordo com o modelo de solo arenoso do software.

O parâmetro ϕ^b , ângulo que define o incremento na resistência ao cisalhamento para o incremento de sucção matricial ($u_a - u_w$), foi determinado automaticamente pelo software para cada material com base no método de VANAPALLI *et al* (1996), usando o conteúdo de água (umidade gravimétrica w , umidade volumétrica θ , ou grau de saturação S) como função da sucção matricial para determinar o aumento na resistência ao cisalhamento na zona não saturada.

3.4 Infiltração de Esgoto

Em locais sem rede pública de esgoto, o lançamento de esgoto diretamente no solo pode influenciar na estabilidade da encosta da região de entorno. A contínua infiltração de esgoto no solo aumenta o teor de umidade do solo e, conseqüentemente, reduz a coesão aparente ou eleva as poropressões, resultando na redução da resistência ao cisalhamento do solo. A suscetibilidade a deslizamentos de terra em encostas desordenadamente ocupadas pode estar relacionada a tais efeitos, uma vez que em grande parte desses locais o esgoto sanitário é direcionado para sumidouros e valas sem revestimento.

De acordo com a norma técnica ABNT NBR 7229 (1993), a contribuição diária de esgoto para ocupantes permanentes de residências de padrão baixo é de 100 litros/pessoa. A partir dos dados coletados no Censo Demográfico 2010 (IBGE, 2011), a quantidade de pessoas por domicílio em aglomerados subnormais na cidade do Rio de Janeiro é de 3,26. Com intuito de analisar de forma representativa a quantidade de esgoto lançada no solo em regiões sem rede de esgoto, quatro cenários foram considerados:

- MD-01: Construções de 1 pavimento cujos sumidouros estão espaçados entre si em 10 metros.
- MD-02: Construções de 1 pavimento cujos sumidouros estão espaçados entre si em 5 metros.
- MD-03: Construções de 2 pavimentos cujos sumidouros estão espaçados entre si em 10 metros.
- MD-04: Construções de 2 pavimentos cujos sumidouros estão espaçados entre si em 5 metros.

Foi considerado um domicílio com 3,26 pessoas por pavimento e um sumidouro por construção. A profundidade dos sumidouros foi adotada em 2 metros abaixo da cota do talude. Em função destes dados, a Tabela 2 apresenta o volume de lançamento de esgoto por sumidouro e seus respectivos espaçamentos em cada modelo analisado.

Tabela 2. Descrição dos sumidouros nos modelos analisados.

Modelo	Contribuição de esgoto por sumidouro			Espaçamento (m)
	Quantidade de domicílios atendidos	Nº de pessoas geradoras de esgoto	Vazão de esgoto (m ³ /dia)	
MD-01	1	3,26	0,326	10
MD-02	1	3,26	0,326	5
MD-03	2	6,52	0,652	10
MD-04	2	6,52	0,652	5

4 RESULTADOS

Para possibilitar a verificação do impacto da infiltração de esgoto na estabilidade do talude, fez-se uma análise transiente inicial alimentada apenas com os dados pluviométricos, em seguida, foram efetuadas as análises para os diferentes modelos – MD-01, MD-02, MD-03 e MD-04 – com variação do volume de esgoto e espaçamento entre pontos de lançamento, como apresentado anteriormente na Tabela 2.

A Figura 2 apresenta os resultados do fator de segurança (FS) ao longo do tempo, sendo possível determinar o dia da ruptura do talude ($FS = 1$) para cada modelo analisado. Na condição inicial (dia 0) o FS encontrado para o modelo é de 1,7, sem influência de chuva e esgoto.

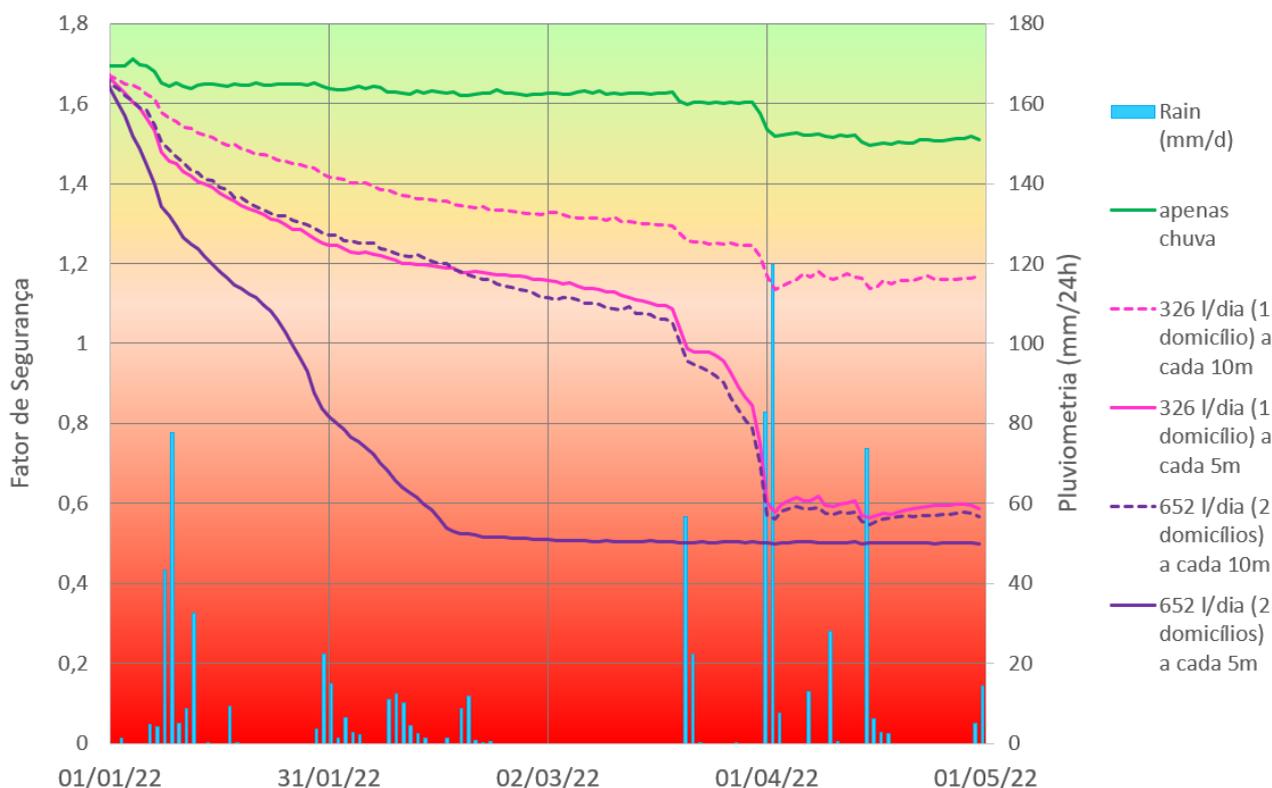


Figura 2. Variação do FS ao longo do tempo.

Partindo de um FS de aproximadamente 1,7 na data inicial, observa-se o efeito da chuva na redução do FS, tal efeito pode ser observado com maior clareza logo após os dias de maior precipitação (08/01/2022 e 01/04/2022). De uma forma geral, observa-se uma influência bastante significativa da infiltração de esgoto no FS, conforme mostra a Figura 2. Pode ser verificado também que quanto maior a vazão de esgoto, maior a redução do FS na estabilidade do talude. Portanto, o pior cenário dentre os analisados foi do modelo MD-04, onde a vazão pontual é mais elevada e com menor espaçamento entre os sumidouros. No cenário mais favorável dentre as análises em que o efeito do esgoto foi considerado, apesar de apresentar uma redução significativa no FS, o talude do MD-01 não rompeu, visto que não houve valores menores que 1, entretanto, vale ressaltar que mesmo para esta situação, o nível de segurança contra danos a vidas humanas e danos materiais e ambientais está insatisfatório, visto que atinge fatores de segurança menores que 1,2. De acordo com a norma técnica ABNT NBR 11682 (2009), para áreas com elevada concentração de pessoas, o FS mínimo para deslizamentos deve ser de 1,4, sem considerar danos materiais e ambientais.

As figuras 3 e 4 mostram a comparação do FS no pior cenário para o MD-01, o qual ocorre no dia 02/04/22, dia do maior valor acumulado de chuva em 24h do ano. A redução observada no FS foi de 25%.

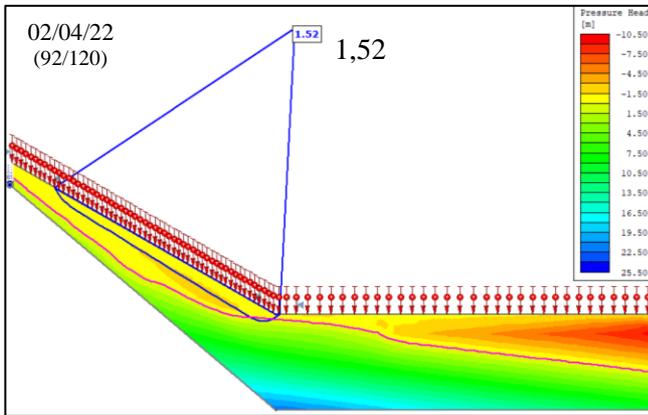


Figura 3. FS apenas com efeito da chuva em 02/04/22.

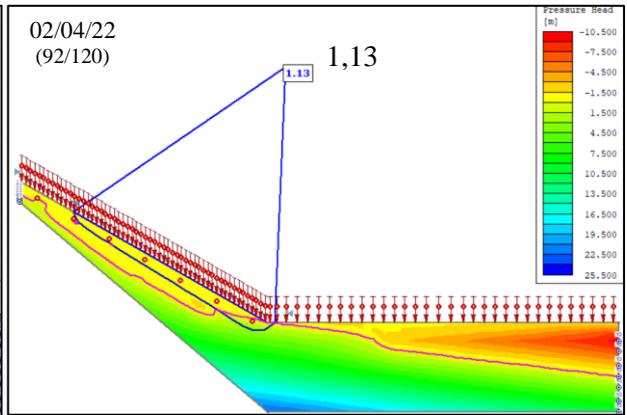


Figura 4. MD-01: FS com esgoto em 02/04/22.

Em seguida, são apresentadas as comparações no dia em que há o rompimento do talude (FS = 1) para cada modelo. As figuras 5, 6 e 7 mostram o MD-02 e o MD-03 no dia 21/03/22; por fim, as figuras 8 e 9 mostram o MD-04 no dia 26/01/22. O impacto do esgoto nos valores de FS é apresentado na Tabela 3.

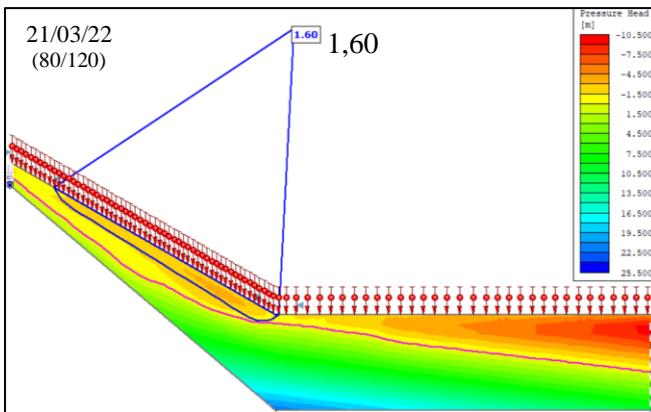


Figura 5. FS apenas com efeito da chuva em 21/03/22.

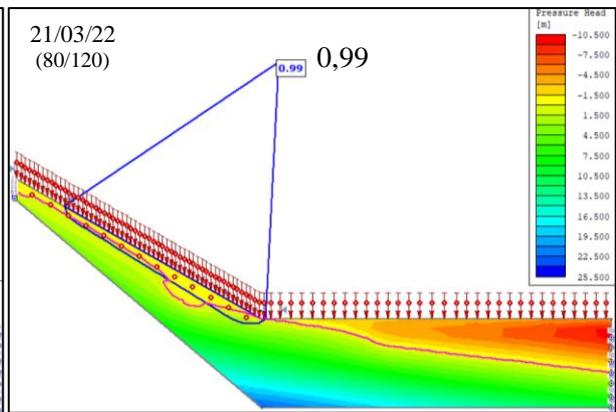


Figura 6. MD-02: FS com esgoto em 21/03/22.

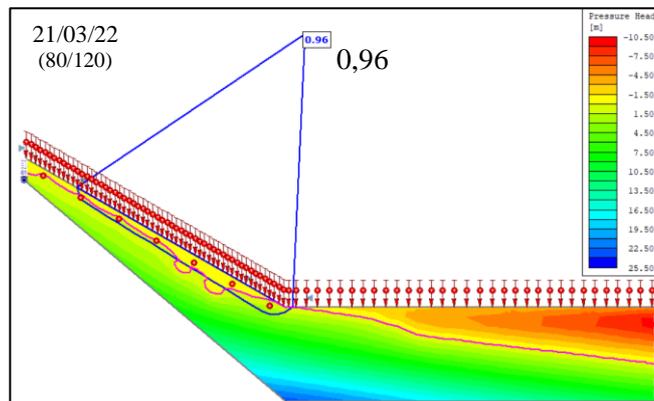


Figura 7. MD-03: FS com esgoto em 21/03/22.

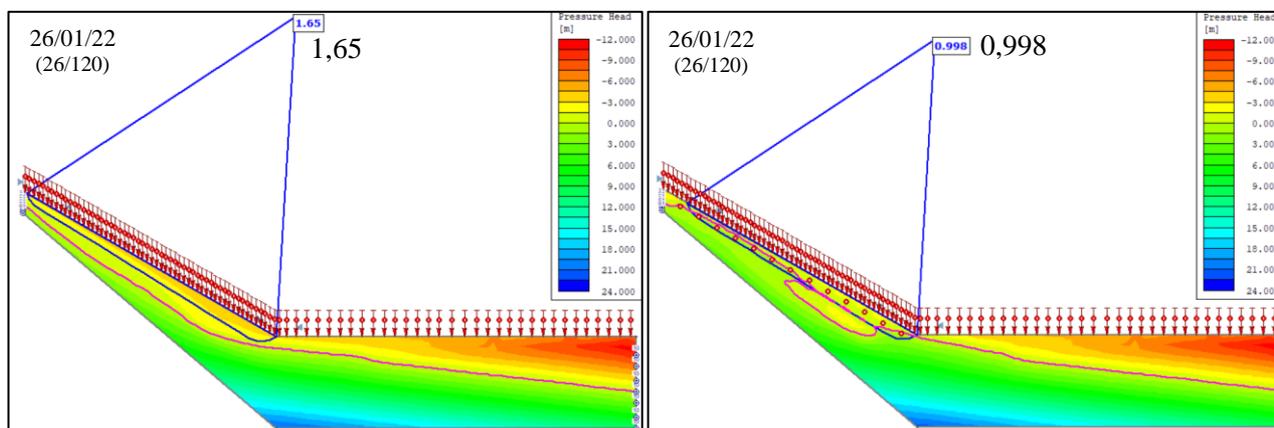


Figura 8. FS apenas com efeito da chuva em 26/01/22.

Figura 9. MD-04: FS com esgoto em 26/01/22

Tabela 3. Comparação dos resultados dos fatores de segurança dos modelos nos dias críticos.

Modelo	Dia da ruptura	FS sem esgoto	FS com esgoto	Redução (%)	Ruptura	Local da superfície crítica
MD-01 ⁽¹⁾	-	1,52	1,13	25	Não	
MD-02	21/03/22	1,60	0,99	38	Sim	Contato entre colúvio e solo residual jovem
MD-03	21/03/2022	1,60	0,96	40	Sim	
MD-04	26/01/2022	1,65	0,998	40	Sim	

⁽¹⁾ Os dados para o MD-01 referem-se ao pior cenário, no dia 02/04/22, visto que neste modelo não ocorre ruptura.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho realizou análises de fluxo e de estabilidade para um talude típico do Rio de Janeiro, com e sem percolação de esgoto, parametrizando para diferentes cenários, nos quais foi realizada a variação da vazão e do espaçamento do ponto de aplicação da vazão. O intuito foi avaliar o impacto da infiltração de esgoto em locais onde não há acesso à rede pública de esgoto e como consequência, seu lançamento em valas e sumidouros, atuando como possível contribuição na deflagração de um escorregamento.

A partir das premissas adotadas, do comportamento apresentado em cada modelo e da avaliação do conjunto de soluções, os resultados obtidos mostraram-se coerentes. Com eles, foi possível concluir que a percolação de esgoto no solo pode interferir significativamente na estabilidade da encosta e deflagrar um movimento de massa que não seria outrora deflagrado apenas com a ação da chuva. Além disso, a comparação feita entre casos com maior e menor vazão e espaçamento mostraram que a redução de pontos de lançamento de esgoto no solo pode resultar em um cenário mais favorável para a estabilidade, ou seja, o acesso à rede pública de esgoto, mesmo que ocorra parcialmente em uma região, é benéfico para a mitigação de acidentes e de danos a vidas humanas, materiais e ambientais.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alerta-Rio (2022). Dados pluviométricos e estatísticas de escorregamentos. Disponível em: <<http://alertario.rio.rj.gov.br/>>. Acesso em: 15 de março de 2024.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1993). NBR 7229. *Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos*. Rio de Janeiro.
- Avelar, A.S., Netto, A.L.C., Lacerda, W.A., Becker, L.B., Mendonça, M.B. (2013). *Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil*. In: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (eds) *Landslide Science and Practice*, p. 265-270. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Delgado, C. W. C. (1993). *Resistência ao cisalhamento dos solos coluvionares e residuais não saturados da Vista Chinesa, RJ*. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 182 p.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011). *Censo Demográfico 2010: aglomerados subnormais*. Rio de Janeiro.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2019). *Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação*. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro.
- Pinto, J. L. T. M. G. (2013). *Determinação de propriedades hidráulicas de solos residuais do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 169 f.
- Mendonça, M. B., Marques, E. A. G. Avelar, A. (2000). *Experience on Diagnosis and Treatment of Urban Hill-Slopes in Rio de Janeiro, Brazil*. In: 5th International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development. Belo Horizonte.
- Rocha, J. C. S. (1993). *Caracterização geológico-geotécnica dos materiais envolvidos nos movimentos de massa ocorridos em fevereiro de 1988, na Vista Chinesa – Rio de Janeiro – RJ*. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Geologia – IGEO/UFRJ, 149 p.
- Sales, L. S. (2016). *Contribuição aos estudos de correlação chuva vs escorregamentos: aplicação às ocorrências da Comidade da Formiga no ano de 2010*. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração: Geotecnia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro / UERJ, 136 f.
- Santos, L. A. O., Assunção, D. M. S. (2005). *Volumes de águas residuárias descartados em encostas e taludes de corte de assentamentos urbanos carentes*. In: IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. Salvador/BA.
- Vanapalli S. K., Fredlund D.G., Pufahl D.E., Clifton A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, p.379-392.