

Análise de estabilidade de uma encosta do Recife/PE considerando o solo inicialmente não saturado com aplicação de chuvas

Eduardo Matthews do Rego Barreto

Mestrando, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, eduardo.matthews@ufpe.br

Leila Brunet de Sá Beserra

Professora Adjunta, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, leila.brunet@ufpe.br

Leonardo José do Nascimento Guimarães

Professor Titular, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, leonardo.guimaraes@ufpe.br

RESUMO: Nos últimos anos, o aumento de acidentes decorrentes de movimentos de massa nas regiões de morros da região metropolitana do Recife/PE tem alertado para a segurança destes locais. Devido a isso, este trabalho teve por objetivo analisar a estabilidade da rua Brumal, Recife/PE, nos cenários de ocorrência das chuvas de 2022, saturação completa do solo e considerando somente a saturação da camada mais superficial. O perfil adotado foi modelado a partir de sondagens de simples reconhecimento na área de estudo. Os parâmetros de resistência foram provenientes de ensaios realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI/UFPE) em amostras indeformadas coletadas e correlações a partir do NSPT. Observaram-se Fatores de Segurança para épocas mais secas de aproximadamente 2,96, em épocas chuvosas próximos a 2, e de 1,74 considerando somente a camada de areia argilosa da superfície saturada. O Fator de Segurança foi de 1,48 para a condição crítica, abaixo do valor mínimo de 1,5 recomendado pela NBR 11682/2009. O resultado encontrado para a condição mais crítica determina a necessidade de obras de contenção e elaboração e divulgação de cartas geotécnicas. Além disso, a variação do Fator de Segurança devido a ocorrência de chuvas destaca a importância da análise e campanhas para conscientização da população sobre obras realizadas na encosta em períodos não chuvosos que podem representar um condicionante de acidente em épocas com chuvas intensas.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia, Método do Equilíbrio-Limite, Morros, Barreiras, Deslizamento.

ABSTRACT: In recent years, the increase in accidents resulting from mass movements in the hilly regions of the metropolitan region of Recife/PE has raised awareness about the safety of these places. Due to this, this work aimed to analyze the stability of Brumal Street, Recife/PE, in scenarios involving the 2022 rains, complete saturation of the soil and considering only the saturation of the most superficial layer. The adopted profile was modeled based on simple reconnaissance surveys in the study area. The resistance parameters came from tests carried out at the Soil and Instrumentation Laboratory (LSI/UFPE) for undisturbed samples collected, and correlations from the NSPT. Safety Factors were observed for drier seasons of approximately 2.96, in rainy seasons close to 2, and 1.74 considering only the clayey sand layer on the saturated surface. The Safety Factor was 1.48 for the critical condition, below the minimum value recommended by NBR 11682/2009 of 1.5. The result found for the most critical condition determines the need for containment works and the preparation and dissemination of geotechnical maps. Furthermore, the variation in the Safety Factor due to the occurrence of rain highlights the importance of analysis and campaigns to raise people's awareness about works carried out on the slope in non-rainy periods, which can represent a condition for accidents in times of intense rain.

KEYWORDS: Geotechnics, Limit Equilibrium Method, Hills, Barreiras, Landslides.

1 INTRODUÇÃO

O agravante aumento de acidentes decorrentes de movimentos de massa em morros na região metropolitana do Recife/PE, como o que vitimou fatalmente 133 pessoas no ano de 2022 (g1 PE, 2022), tem alertado sobre a segurança destes locais.

Um terço da cidade do Recife se localiza em áreas de topografias elevadas as quais são ocupadas predominantemente por pessoas de baixa renda, que não possuem condições adequadas para a construção de moradias nessa tipologia de terreno (SANTANA, 2019). Consequentemente, construções têm sido realizadas constantemente nessas regiões pelos próprios moradores sem acompanhamento de engenheiros, como constatado pelo autor em visita à área de estudo, e, por vezes, sobrecargas são adicionadas ou cortes e aterros são realizados em áreas que em épocas não chuvosas, devido a maior sucção no solo, não são notados problemas imediatos na estabilidade da encosta, porém ocasionam movimentos de massa em épocas mais chuvosas.

Este trabalho teve por objetivo analisar a estabilidade da rua Brumal, uma encosta da cidade do Recife/PE, através do Método do Equilíbrio-Limite, submetida ao regime de chuva de 2022 com o solo inicialmente não saturado, à saturação completa do solo (condição crítica) e considerando somente a saturação da camada de areia argilosa da superfície, simulando, por exemplo, possíveis efeitos de problemas em redes de drenagem, impermeabilização de áreas da encosta ou chuvas mais intensas.

2 METODOLOGIA

Este trabalho realizou a análise de estabilidade da rua Brumal, localizada no bairro do Passarinho, na zona norte da cidade de Recife-PE, Figura 1.

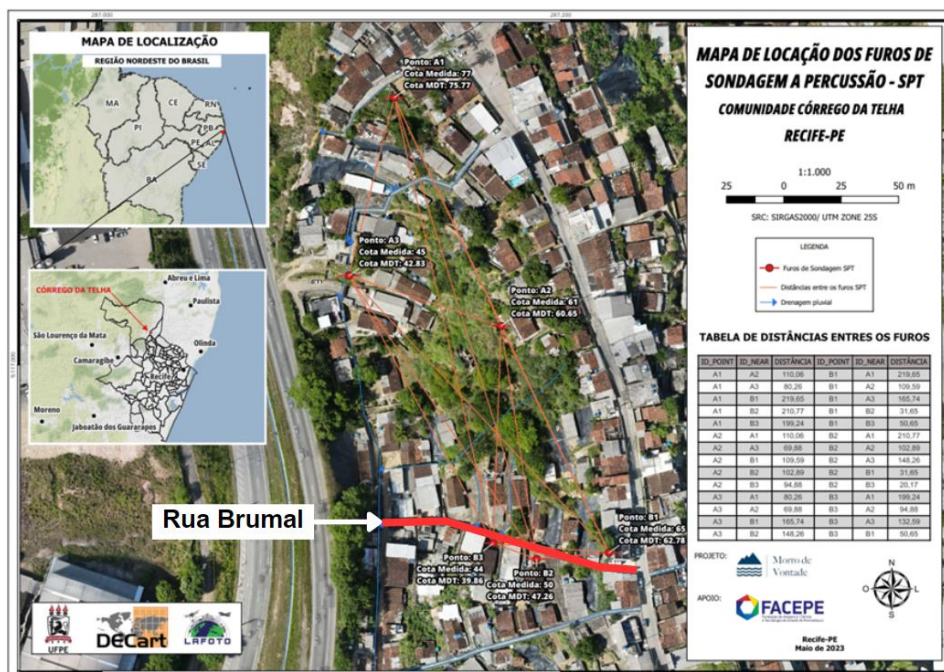


Figura 1. Localização da seção analisada. Fonte: Adaptado de Projeto Morro de Vontade (2023)

As análises de estabilidade foram realizadas no *software Slide2*, utilizando o método do equilíbrio-limite, com superfície de ruptura não-circular e método de GLE/Morgenstern-Price, para a determinação do Fator de Segurança, e o método dos elementos finitos para a análise de fluxo de água.

Foram feitas análises para todos os meses do ano de 2022, destacando-se chuvas que desencadearam movimentos de massa na cidade, levando em consideração o efeito desse fenômeno na resistência ao cisalhamento do solo e o comportamento do escoamento da água na encosta. Também foi estudado o cenário de saturação completa das camadas, sendo a situação mais crítica possível de ser atingida em uma encosta natural sem presença de sobrecarga, podendo ser resultado, por exemplo, de chuvas intensas, falhas em redes

de drenagem e abastecimento de água ou outras obras hidráulicas e áreas impermeáveis próximas. Um cenário intermediário, considerando somente a saturação da camada mais superficial, também foi analisado.

2.1 Caracterização das camadas de solo da encosta

A caracterização da encosta apresentada foi produto do Projeto de Prevenção, Preparação e Mitigação de Desastres Decorrentes de Precipitações Intensas, financiado pela FACEPE, também conhecido como projeto Morro de Vontade, a qual contou com a participação de grupos de diversas áreas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como de geotecnia, a qual o presente autor fez parte. O grupo de cartografia foi responsável pelo levantamento topográfico utilizado neste trabalho.

Na Figura 2 e Tabela 1 estão presentes as camadas adotadas para o perfil analisado, sendo B1, B2 e B3 os furos de sondagem realizados no topo, meia e sopé da encosta estudada, Figura 3. O furo de sondagem B4 – Extra foi adotado para manter a continuidade das características do B3 ao longo do sopé da encosta. A descrição e espessura das camadas foram feitas segundo o material encontrado no ensaio SPT, tanto na análise tato visual no momento do ensaio, como em amostras retiradas do amostrador e levadas a laboratório para realização de caracterização granulométrica e posterior classificação através do SUCS (Sistema Unificado de Classificação dos Solos).

Foram seguidas as diretrizes das NBR 6458/2017, 6459/2017, 7180/2016 e 7181/2018 para a realização da caracterização granulométrica das amostras e determinação dos limites de consistência, possibilitando a realização da classificação SUCS dos solos.

Nas análises, os parâmetros de resistência utilizados foram provenientes de ensaios de laboratório, realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI/UFPE), correlações obtidos em Joppert Jr. (2007) a partir de resultados de sondagens de simples reconhecimento (SPT) realizados ao longo do projeto citado anteriormente, e dados de Fontoura (2015) de areias da Formação Barreiras.

O uso de correlações e outros dados da literatura se deve ao fato de terem sido coletadas somente amostras indeformadas há 1m de profundidade em locais muito próximos aos furos de sondagem B1 e B2, e superficiais em B3, para a realização de ensaios de cisalhamento direto. Esses ensaios foram executados seguindo as instruções da ASTM D3080, na condição inundada e com velocidade de 0,038 mm/min. Foram obtidos os valores de coesão e ângulo de atrito efetivos.

Em todas as camadas foram adotadas a equação ou modelo de resistência de Mohr-Coulomb. Os pesos específicos naturais foram adotados conforme dados obtidos em ensaios de caracterização e, uma vez que isso não era possível para determinados solos, recomendados por Joppert Jr. (2007) de acordo com o tipo de solo e os valores de N_{SPT} obtidos no ensaio SPT.

Devido a não identificação de nível de água nas sondagens de simples reconhecimento e presença de poços artesanais para extração de água em algumas residências no local, foram realizadas análises seguindo a hipótese que havia água na cota de 10m, estando 18m abaixo da menor elevação do perfil, assim como encontrado no Alto do Reservatório por Lima (2002), a qual é uma região próxima à área de estudo deste trabalho.

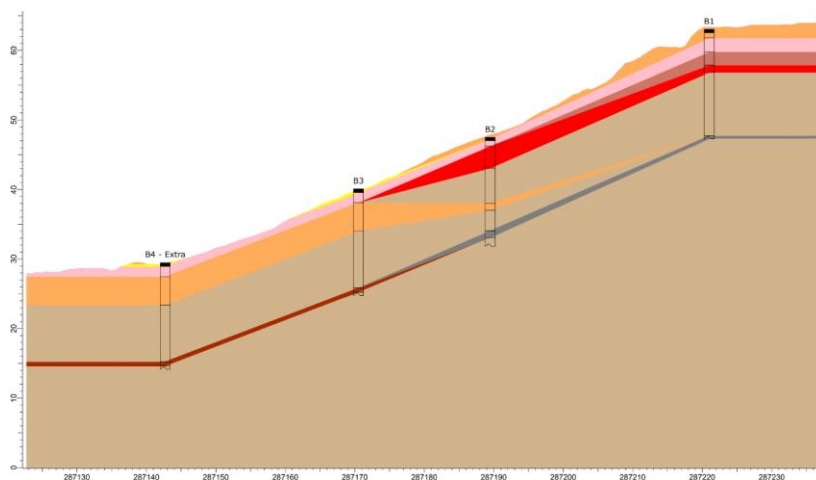







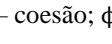


Figura 2. Perfil da rua Brumal adotado no Slide2.

Tabela 1. Parâmetros de resistência adotados para as camadas

Nome do material	Cor	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	Fonte
1 – SC		17,88	6	29	O autor (2023)
2 – CH		18,75	3	33	O autor (2023)
3 – Areia argilosa compacta		20	10	32	Joppert Jr. (2007)
4 – Areia medianamente compacta		19	0	32	Fontoura (2015)
5 – CL		18,32	3	33	O autor (2023)
6 – Silte argiloso muito rijo		20	40	25	Joppert Jr. (2007)
7 – Aterro de areia siltosa		18	4	29	O autor (2023)
8 – Areia muito compacta		20	0	34	Fontoura (2015)

Legenda: γ – peso específico natural; c – coesão; ϕ – ângulo de atrito.

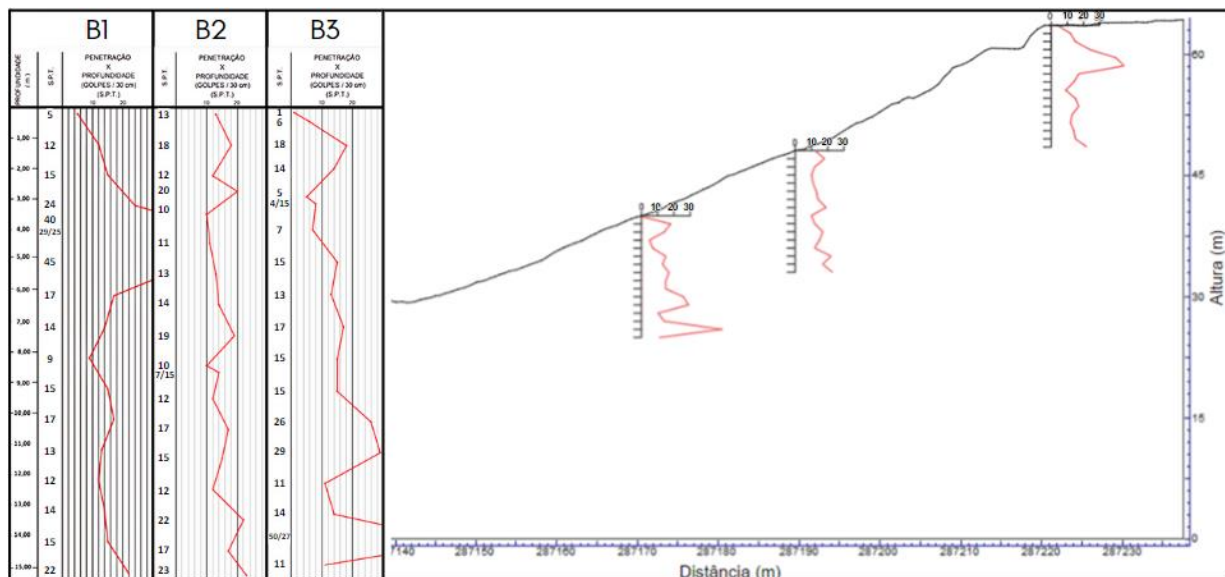










Figura 3. Resultado do ensaio SPT realizado na rua Brumal.

Para a análise da encosta no período chuvoso, foram adotados coeficientes de permeabilidade de trabalhos presentes na literatura, Tabela 2, os quais também estudaram solos da formação Barreiras. Foi adotada uma anisotropia (k_h/k_v) de 2 para as camadas de argila e silte, segundo Coutinho (1976) indica que é o valor médio para solos argilosos.

Tabela 2. Coeficientes de permeabilidade adotados

Nome do material	Cor	Permeabilidade (m/s)	Fonte
1 - SC		$1,40 \times 10^{-5}$	Santos (2018)
2 - CH		$1,45 \times 10^{-6}$	Santana (2006); Coutinho et al. (2006) apud Meira (2008)
3 - Areia argilosa compacta		$1,40 \times 10^{-5}$	Santos (2018)
4 - Areia medianamente compacta		1×10^{-5}	Coutinho e Severo (2009) apud Coutinho et al. (2020)
5 - CL		$1,45 \times 10^{-6}$	Santana (2006); Coutinho et al. (2006) apud Meira (2008)
6 - Silte argiloso muito rijo		1×10^{-7}	Coutinho e Severo (2009) apud Coutinho et al. (2020)
7 - Aterro de areia siltosa		$6,36 \times 10^{-6}$	Santos (2018)
8 - Areia muito compacta		1×10^{-5}	Coutinho e Severo (2009) apud Coutinho et al. (2020)

2.2 Caracterização dos solos não saturados da encosta

De forma a analisar a variação da sucção no solo com o decorrer das chuvas, os valores adotados para as curvas de retenção do modelo foram de trabalhos realizados na Formação Barreiras, Figura 4, que apresentavam características granulométricas e de resistência semelhantes aos das camadas presentes no modelo estudado. Na camada de silte foram adotados valores de um solo de Maceió/AL, nas camadas de argila foram adotadas curvas de retenção de solos de Camaragibe/PE e, por fim, foram adotados valores de um solo de Recife/PE para as camadas de areia.

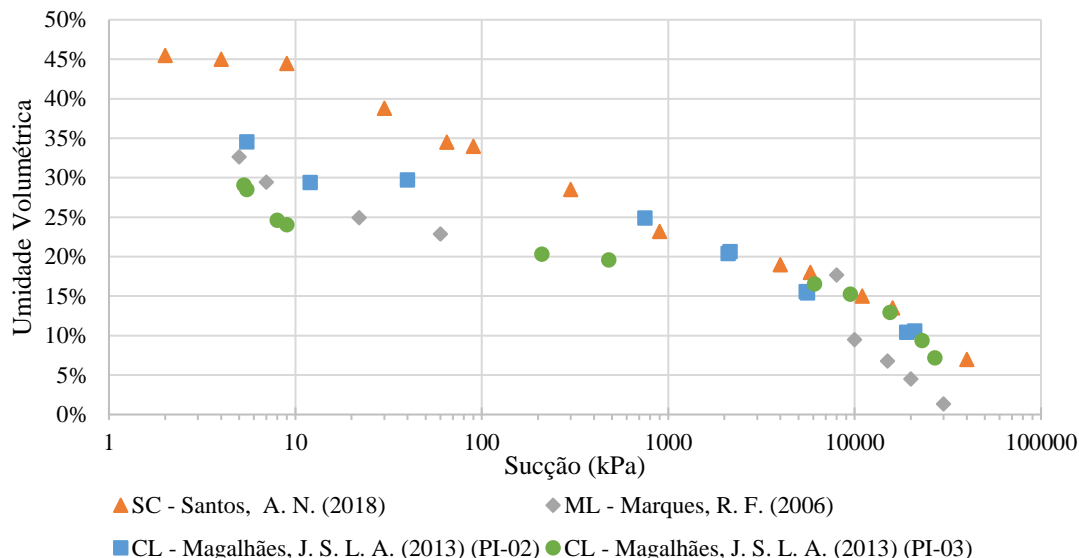


Figura 4. Curvas de retenção de solos da Formação Barreiras

No *Slide2* é possível calcular o valor de ϕ^b a partir da função de teor de umidade de água em análises transientes para cálculo da resistência ao cisalhamento não saturada, Equação 1, baseando-se no método presente em Vanapalli et al. (1996).

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan\phi' + (u_a - u_w) \left[(\tan\phi') \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (1)$$

2.3 Chuva adotada no modelo

A chuva adotada no modelo corresponde ao monitoramento pluviométrico realizado pela APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) em todos os dias do ano de 2022 no posto do Alto da Brasileira, na cidade do Recife/PE, Figura 5.

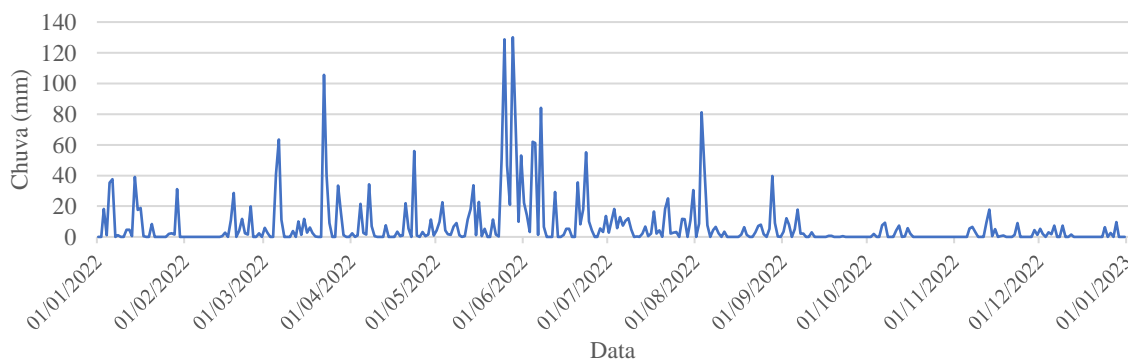


Figura 5. Medições de chuva ao longo de 2022.

3 RESULTADOS

Na Tabela 3 estão presentes os resultados encontrados para as análises de estabilidade realizadas na Rua Brumal.

Tabela 3. Variação de Fator de Segurança para a encosta estudada

Tempo	FS	Tempo	FS	Tempo	FS
Início	2,96	C2	2,53	Setembro	2,96
Janeiro	2,94	C3	2,08	Outubro	2,96
Fevereiro	2,94	Maio	2,16	Novembro	2,96
Março	2,92	Junho	2,90	Dezembro	2,96
Abril	2,94	Julho	2,83	Situação crítica	1,48
C1	2,85	Agosto	2,94	SC saturado	1,74

Legenda: C1 – Após chuva de 128,7mm em maio; C2 – Após chuva de 130,1mm em maio; C3 – Após acumulado de chuva de 201,6mm em 2 dias em maio.

As Figuras 6, 7.a e 7.b mostram as superfícies de ruptura das análises considerando a chuva de 2022 no período após acumulado de 201,6mm em 2 dias de maio do mesmo ano, considerando somente a saturação completa da camada SC e a saturação completa do solo, respectivamente.

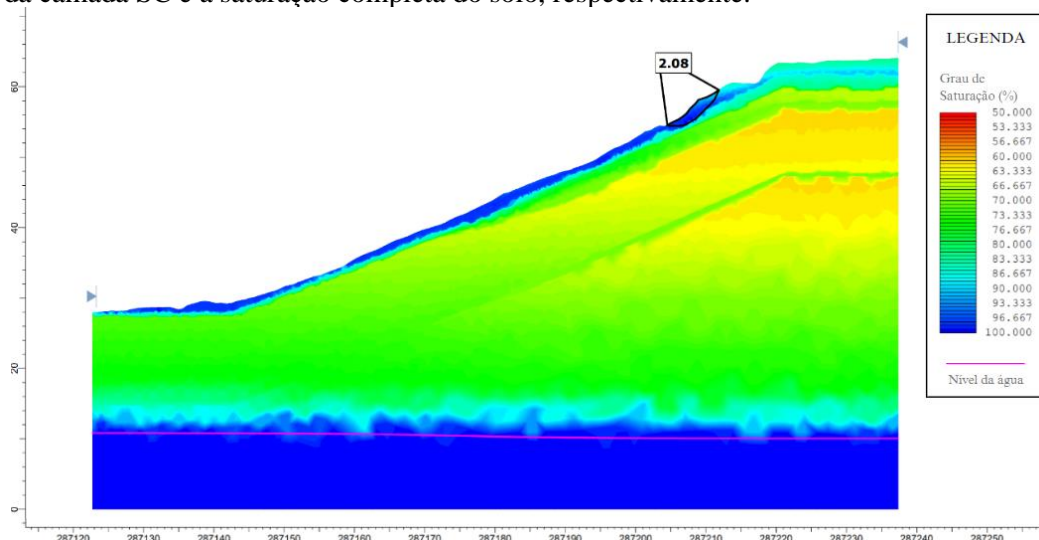


Figura 6. Análise de estabilidade em C3.

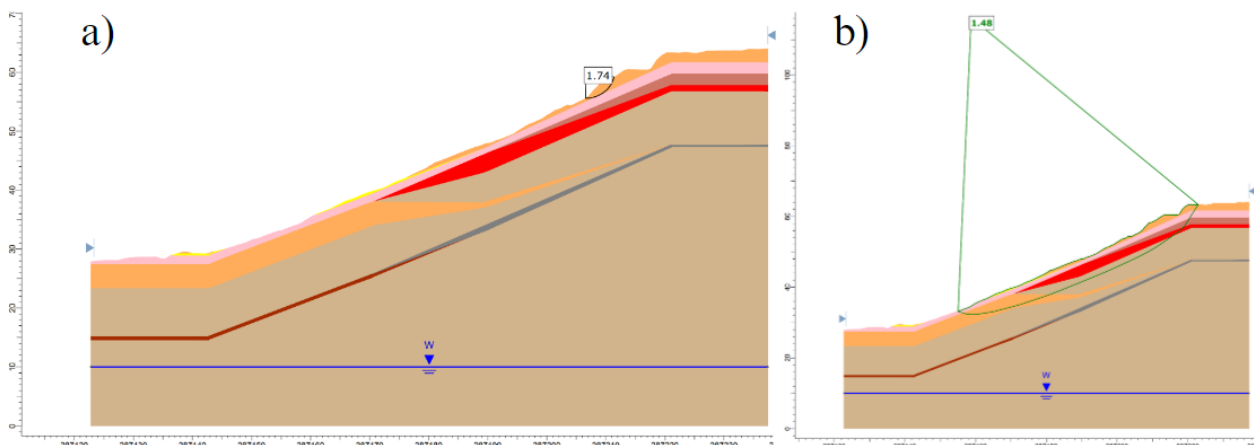


Figura 7. Análise de estabilidade a) considerando somente a saturação completa da camada de SC e b) considerando a saturação completa do solo.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Através dos resultados encontrados, pode-se notar que há redução na segurança da encosta com a ocorrência de chuvas na cidade do Recife. Reduziu-se o Fator de Segurança de 2,94, presente na época de baixa ocorrência de chuvas (meses de janeiro e fevereiro), para 2,08, correspondente ao período das maiores intensidades pluviométricas registradas no ano (mês de maio). Porém, ao ser considerada a condição mais crítica possível, com a saturação completa de todas as camadas de solo, é atingido um valor de 1,48 para o Fator de Segurança, ficando abaixo do limite de 1,5 recomendado pela NBR 11682/2009 para nível de segurança contra danos a vidas humanas alto e nível de segurança contra danos materiais e ambientais médio.

Este cenário crítico pode ser atingido em situações de épocas com chuvas intensas e constantes, assim como juntamente a outros fatores que podem desencadear em saturação do solo, como vazamento de redes de drenagem e abastecimento d'água, ou outras estruturas hidráulicas. Estes últimos fatores que foram levados em consideração para a análise com saturação somente da camada mais superficial, o solo SC. Para esta análise se obteve um Fator de Segurança de 1,74.

Destaca-se que as análises foram realizadas sem a presença de sobrecarga proveniente de construções realizadas na região, que contém tanto encostas sem presenças de casas como com presenças de casas, de diferentes alturas e cargas transmitidas ao solo.

Portanto, mesmo as análises realizadas não contando com presença de sobrecarga, mostrou-se um cenário de risco de estabilidade na ocorrência de chuvas intensas que desencadeiem na saturação completa do solo, necessitando, assim, de medidas estabilizadoras para a área estudada.

Devido o Fator de Segurança abaixo de 1,5, mostra-se importante, também, a elaboração e divulgação de cartas geotécnicas para direcionar a expansão urbana para locais de menores riscos à vida. A redução de 76% da época seca para a saturação completa do solo mostra a importância da conscientização da população em relação a queda de resistência do solo devido a maior umidade deste material.

5 CONCLUSÃO

As regiões de morros, muitas vezes ocupadas de forma desordenada e sem supervisionamento de especialistas ou do poder público, têm se mostrado áreas que demandam de bastante atenção devido ao número crescente de acidentes com deslizamento de terra acontecidos. Isto tem ocorrido, dentre vários fatores, devido a ocupação de áreas que naturalmente já apresentam perigo de movimento de massa, como a rua estudada neste trabalho.

Mostrou-se que a rua Brumal, na cidade do Recife/PE, apresenta um Fator de Segurança de 1,48, abaixo do recomendado pela NBR 11682/2009 de 1,5, na ocorrência de saturação completa do solo, que pode ser proveniente de épocas de chuvas muito intensas e constantes, assim como juntamente a outros fatores, como vazamentos de estruturas hidráulicas.

Porém, notou-se que em épocas mais secas, a mesma encosta apresentou um Fator de Segurança de 2,96, devido a forças de sucção presentes no solo não saturado. Este comportamento alerta para a falsa sensação de segurança que pode acontecer em obras realizadas pelos próprios moradores nos morros, uma vez que em épocas secas essa construção pode não representar risco aos moradores, porém em épocas chuvosas pode desencadear acidentes devido movimentos de massa.

Portanto, através dos resultados mostrados, este trabalho analisou a estabilidade da rua Brumal, na cidade do Recife/PE, objetivando analisar a segurança da área contra movimentos de massa. Além disso, mostrou os ganhos na estabilidade devido a sucção no solo não saturado, o qual, por outro lado, na falta do seu conhecimento pode representar um fator de risco aos moradores devido a obras irregulares.

Por fim, este trabalho mostra a importância de possíveis campanhas conscientização alertando para o comportamento do solo não saturado aos moradores dos morros, assim como de acompanhamento de construções pelo poder público ou a realização de cartas geotécnicas indicando quais regiões são adequadas para construção a fim de se evitar a ocupação de áreas naturalmente instáveis em condições chuvosas críticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APAC. (2023) *Monitoramento pluviométrico*. Disponível em <<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em: 3 out. 2023.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 6459. *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo — Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181. *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2003). ASTM D3080 – 03: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- Coutinho, R. Q., Morais, B. D., Oliveira, M. S. (2020) *Caracterização Geotécnica de Encostas da Formação Barreiras Localizadas no Bairro Ibura (Cohab), Recife-PE*. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Campinas.
- Coutinho, Roberto Quental. (1976) *Características de adensamento com drenagem radial de uma argila mole da baixada fluminense*. Dissertação de Mestrado, Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 213 p.
- Fontoura, T. B. (2015) *Comportamento tensão – deformação e resistência ao cisalhamento de uma areia de duna cimentada artificialmente*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 170 p.
- Joppert Jr, I. (2007) *Fundações e Contensões de Edifícios*. Pini ISBN 978-85-7266-177-5, São Paulo, 221 p.
- Lima, Analice França. (2002) *Comportamento geomecânico e análise de estabilidade de uma encosta da Formação Barreiras na área urbana da cidade do Recife*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 204 p.
- Magalhães, J. S. L. A. (2013) *Estudo de estabilidade da Encosta Alto do Padre Cícero no Município de Camaragibe – PE*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 107 p.
- Marques, R. F. (2006) *Estudo da capacidade de carga de estacas escavadas com bulbos, executadas em solo não saturado da Formação Barreiras da cidade de Maceió – AL*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 180 p.
- Meira, F. F. D. A. (2008) *Estudo do processo erosivo em encostas ocupadas*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Rocscience. (2023) *Unsaturated Shear Strength*. Disponível em: <<https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/material-properties/define-material-properties/strength-parameters/unsaturated-shear-strength>>. Acesso em: 2 out. 2023.
- Santos, Amabelli Nunes dos. (2018) *Estudos geotécnicos e análise da estabilidade de duas encostas localizadas no Ibura no município de Recife-PE*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 164 p.