

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/200

Efeito do fluxo d'água e intercalação de solos grossos e finos na estabilidade de encostas não saturadas sob chuva

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: Os solos, em geral, devido sua formação geológica, contém materiais com diferentes propriedades de resistência e permeabilidade. Este trabalho teve por objetivo analisar o impacto de intercalações de solos de menores e maiores permeabilidade no processo de saturação de uma encosta submetida a um regime de chuva e na estabilidade do talude. Os modelos analisados baseiam-se em sondagens de simples reconhecimento e coleta de amostras indeformadas realizadas na rua Brumal em Recife/PE. Os parâmetros de resistência adotados são resultados de ensaios realizados no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI/UFPE) e correlações a partir do NSPT. Ao longo das análises observou-se uma variação do Fator de Segurança devido a diferentes graus de saturação do solo arenoso. Essas diferenças de saturação ocorreram porque ocorria um impedimento da água escoar além do solo arenoso, mesmo este elemento apresentando uma permeabilidade maior que a intensidade da chuva, por causa da presença de solos argilosos abaixo e no sopé da encosta. Pelo mesmo motivo, o fluxo de água no solo apresentou componentes verticais e horizontais na tentativa de escoar para regiões de maior permeabilidade, ou seja, desviando das camadas argilosas. A saturação do solo arenoso e tendência da água de ir para altitudes menores, também podem indicar a ocorrência de fluxo na superfície da encosta e consequente erosão do solo. Este entendimento de como ocorre o processo de saturação do solo não homogêneo auxilia na análise de estabilidade de taludes com solo não saturado, assim como destaca a importância de realização de sondagens ao longo do solo de toda a encosta.

PALAVRAS-CHAVE: Formação Barreiras, Deslizamento, Estabilidade, Infiltração.

ABSTRACT: Soils, in general, due to their geological formation, contain materials with different resistance and permeability properties. This work aimed to analyze the impact of intercalations of soils with lower and higher permeabilities on the saturation process of a slope subjected to a rain regime and on the stability of the slope. The models analyzed are based on simple recognition surveys and collection of undisturbed samples carried out on Brumal Street in Recife/PE. The resistance parameters adopted are results of tests carried out at the Soils and Instrumentation Laboratory (LSI/UFPE) and correlations from the NSPT. Throughout the analysis, a variation in the Safety Factor was observed due to different degrees of saturation of the sandy soil. These differences in saturation occurred because water was prevented from flowing beyond the sandy soil, even though this element had a permeability greater than the intensity of the rain, due to the presence of clayey soils below and at the foot of the slope. For the same reason, the water flow in the soil presented vertical and horizontal components to flow to regions of greater permeability, that is, bypassing the clayey layers. The saturation of the sandy soil and the tendency of water to go to lower altitudes may also indicate the occurrence of flow on the surface of the slope and consequent soil erosion. This understanding of how the process of saturation of non-homogeneous soil occurs helps in analyzing the stability of slopes with non-saturated soil, as well as highlighting the importance of carrying out surveys along the soil of the entire slope.

KEYWORDS: Formation Barreiras, Landslide, Stability, Infiltration.

1 INTRODUÇÃO

Taludes naturais não são homogêneos devido a estratificações ou variações em diferentes propriedades dos materiais e condições hidráulicas ao longo da profundidade devido as várias formações geológicas e condições climáticas (Chatterjee, 2019). Ou seja, uma encosta irá apresentar materiais com diferentes propriedades de resistência e permeabilidade, por exemplo.

A permeabilidade do solo indica sua capacidade máxima de absorção de fluido com o tempo. Isso indica que para chuvas com volume maior que a capacidade de absorção do solo para um mesmo tempo, parte da água será absorvida pelo solo e outra irá escoar acima dele, em superfície livre ou outra camada de solo. Assim, havendo chuva intensa, ou concentração de água devido a impermeabilidade de algumas áreas, há um acúmulo maior de água em regiões da encosta que pode ter um poder erosivo ou ocasionar maior saturação, reduzindo a sucção e resistência ao cisalhamento do solo.

Com isso, este trabalho objetiva analisar a estabilidade de encostas inicialmente não saturadas com diferentes disposições de solos finos e grossos nas regiões mais baixas, durante regimes de chuvas intensas. Isso ocorrerá observando os diferentes comportamentos da infiltração da água nos perfis, analisando os distintos progressos de saturação do solo e, conseqüentemente, estabilidade da encosta.

2 METODOLOGIA

Para cumprir o objetivo deste trabalho, foram feitas variações da seção da rua Brumal, localizada no bairro do Passarinho, na zona norte da cidade de Recife-PE, estudado pelo autor no projeto Morro de Vontade. Adotaram-se os mesmos materiais, porém com disposições diferentes, simulando diferentes interpretações ou possibilidades de espessuras das camadas encontradas nos furos de sondagem originais.









Utilizou-se o software Slide2 através do Método dos Elementos Finitos para análise de infiltração da água e do Método do Equilíbrio-Limite para a estabilidade, com o método de GLE/Morgenstern-Price. Aplicou-se uma chuva de 100 mm/dia nos modelos.

2.1 Perfil inicial

Ao longo do projeto Morro de Vontade, executaram-se sondagens de simples reconhecimento (SPT) com coleta de amostras para caracterização do solo do perfil. No Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI/UFPE) realizaram-se caracterizações granulométricas e ensaios de cisalhamento direto das amostras indeformadas de solo obtidas.

A Tabela 1 e a Figura 1 apresentam as camadas adotadas para o perfil analisado. B1, B2 e B3 correspondem aos furos de sondagem realizados no topo, meia e sopé da encosta, respectivamente. O furo de sondagem B4 – Extra foi usado para manter a continuidade das características do B3 ao longo do sopé da encosta. A descrição e a espessura das camadas foram determinadas com base no ensaio SPT, por análise tátil e visual no momento do ensaio (camadas 3, 4, 6, 7 e 8), e pela classificação SUCS em amostras levadas ao laboratório para caracterização granulométrica (camadas 1, 2 e 5). Devido à não obtenção de amostras não deformadas em profundidades maiores que 1,5m, foram adotados parâmetros de resistência de correlações com NSPT obtidos em Joppert Jr. (2007) e dados de Fontoura (2015) para areias da Formação Barreiras.

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.

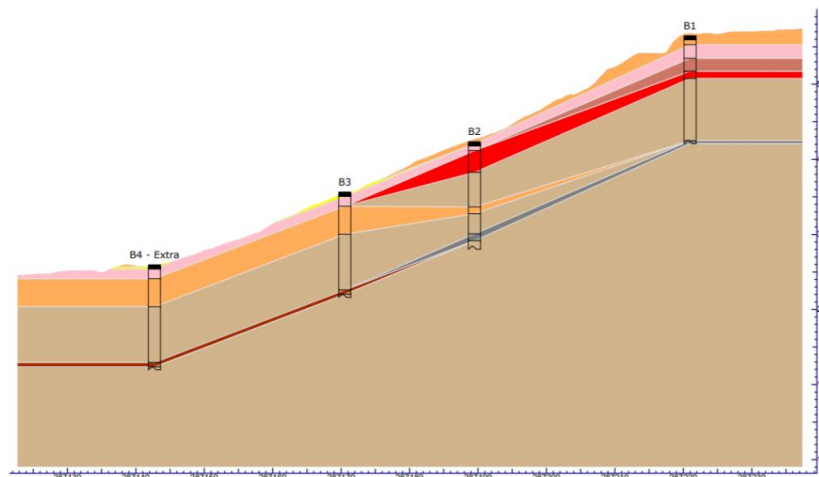










Figura 1. Perfil da rua Brumal (P1)

Foram adotados coeficientes de permeabilidade de trabalhos presentes na literatura que também estudaram solos da formação Barreiras. Segundo Coutinho (1976), o valor médio de anisotropia (k_h/k_v) é 2 para solos argilosos brasileiros, então adotou-se este valor para as camadas de argila e silte.

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)

Nas análises realizadas, empregaram-se curvas características da relação solo-água presentes na literatura de outros solos estudados na Formação Barreiras, Figura 2, os quais apresentavam características granulométricas e resistência ao cisalhamento semelhantes aos solos deste trabalho.

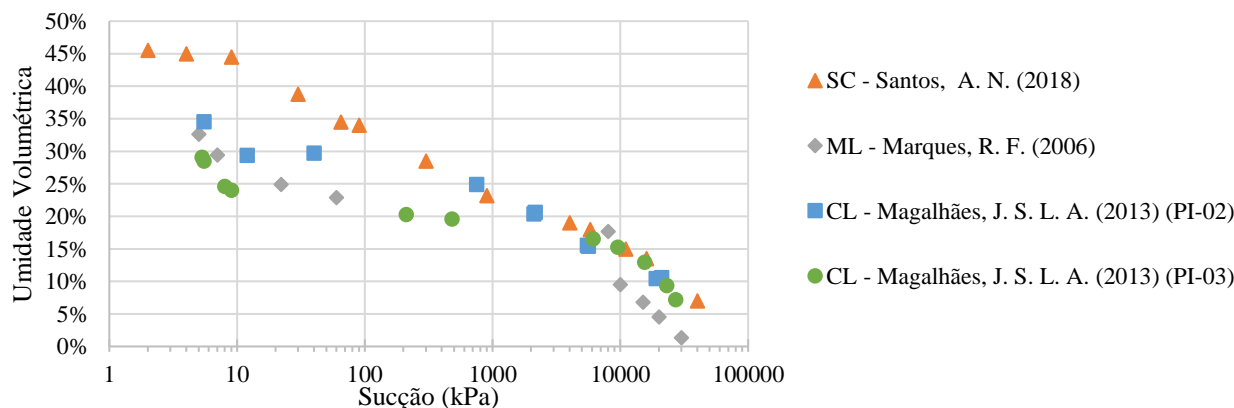


Figura 2. Curvas características da relação solo-água de solos da Formação Barreiras

2.2 Variações do perfil inicial

Os modelos criados para realizar a análise proposta por este trabalho estão presentes na Figura 3. O perfil P2 tem a ausência da camada de argila, CH, entre a extremidade esquerda e B4 - Extra. P3 apresenta uma maior profundidade de aterro de areia siltosa no B3. Em P4, adotou-se para a toda a encosta as características obtidas na sondagem B1. E, por fim, em P5 foi adotada uma continuidade horizontal a partir da sondagem B2.

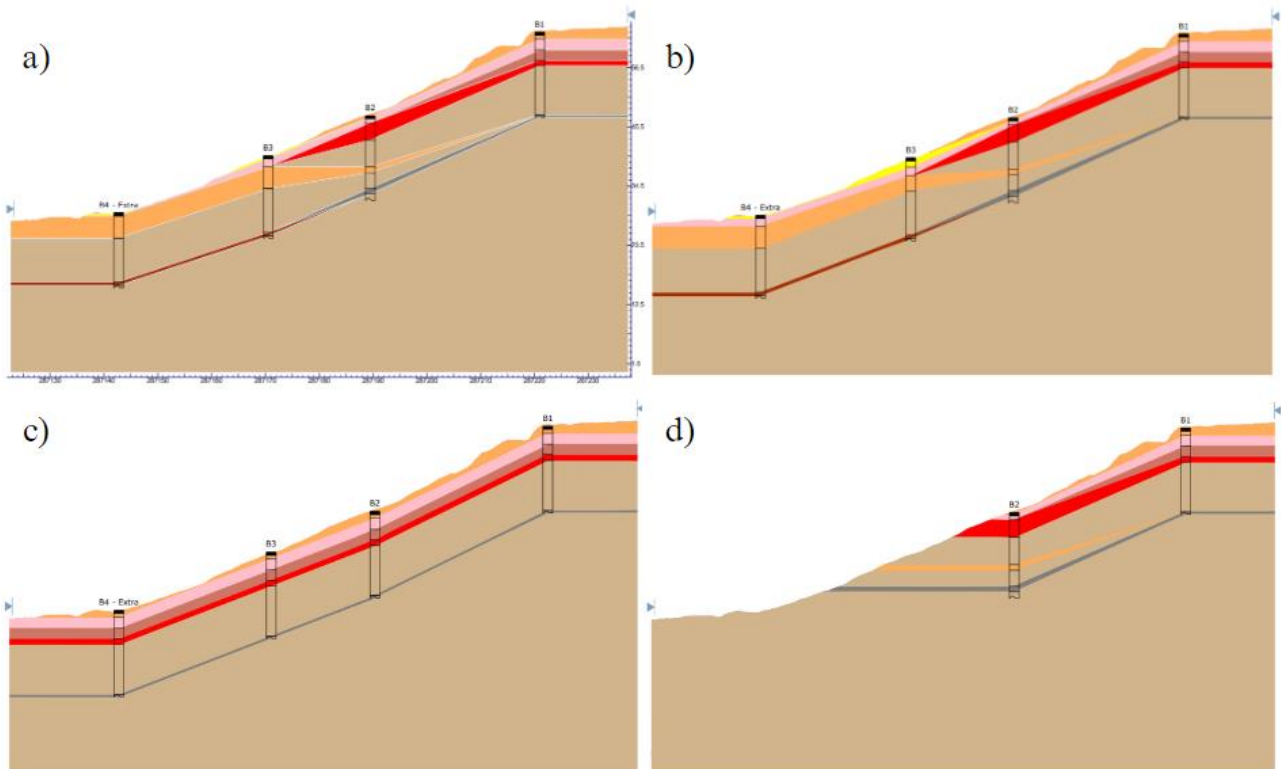


Figura 3. a) Perfil 2 (P2), b) Perfil 3 (P3), c) Perfil 4 (P4) e d) Perfil 5 (P5)

3 RESULTADOS

Na Figura 4 e Tabela 3 está presente a variação dos Fatores de Segurança dos modelos analisados com a aplicação de chuva ao longo de 25 dias. As diferenças apresentadas na Tabela 3 foram em relação ao valor bruto do Fator de Segurança (FS) dos perfis 2 a 5 com o FS do perfil 1 na condição inicial, antes da aplicação das chuvas, e no momento final, após a aplicação das chuvas.

Tabela 3. Fatores de Segurança iniciais e finais para os perfis

Perfil	FS inicial	FS final	Diferença para P1(inicial)	Diferença para P1 (final)
P1	2,96	1,78		
P2	2,95	1,81	- 0,01	- 0,03
P3	2,96	1,83	- 0,00	- 0,05
P4	2,99	1,85	+ 0,03	- 0,07
P5	2,97	1,72	+ 0,01	+ 0,06

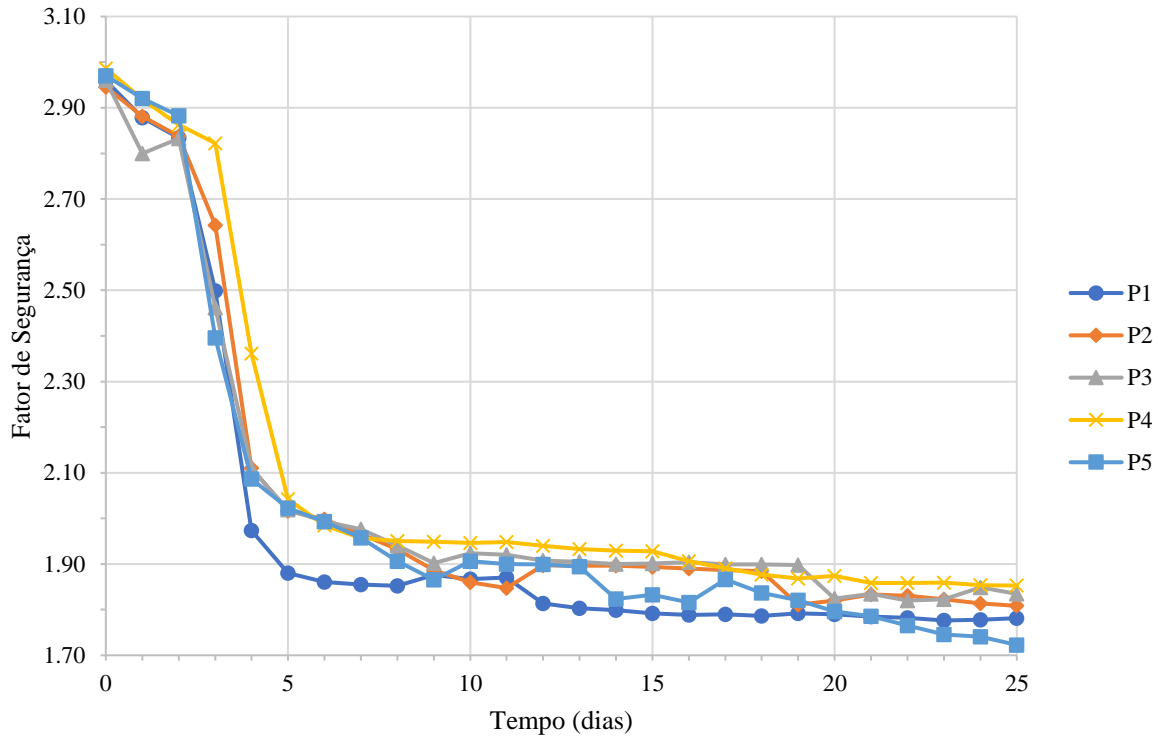


Figura 4. Variação do Fator de Segurança com o tempo de todos os perfis

A Figura 5 exibe as superfícies de ruptura do Perfil 1 após e antes da aplicação da chuva.

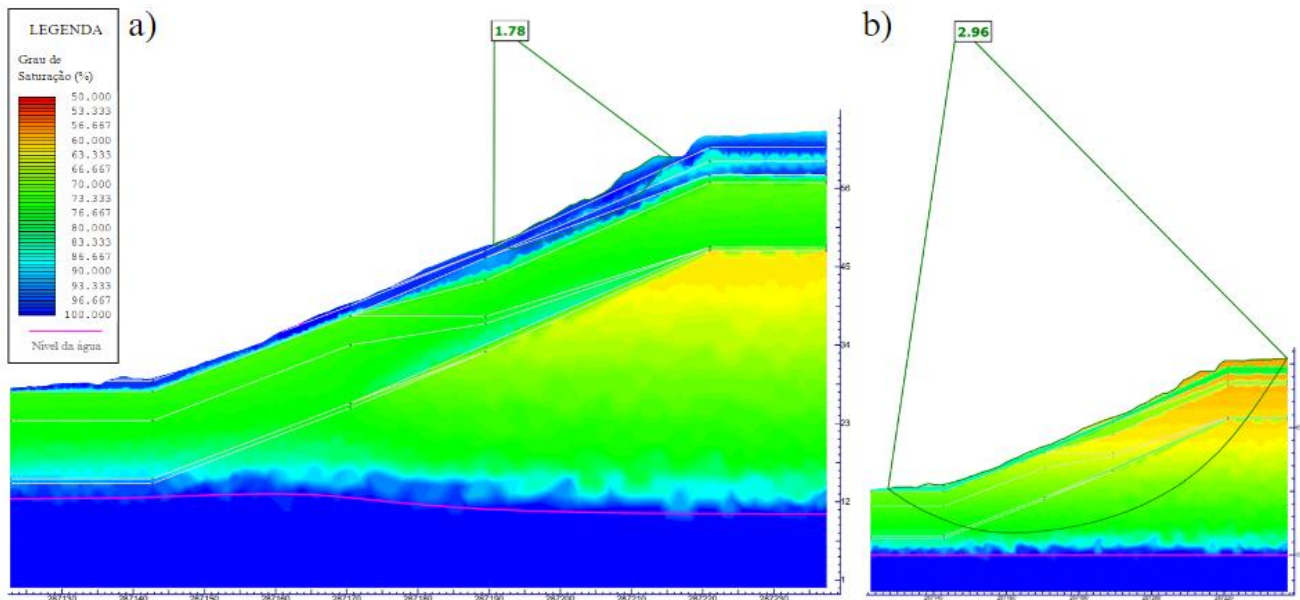


Figura 5. Perfil 1 a) aos 25 dias e b) antes de aplicação das chuvas

De modo a estudar o comportamento da água, a Figura 6 apresenta os vetores de fluxo de água no P1.

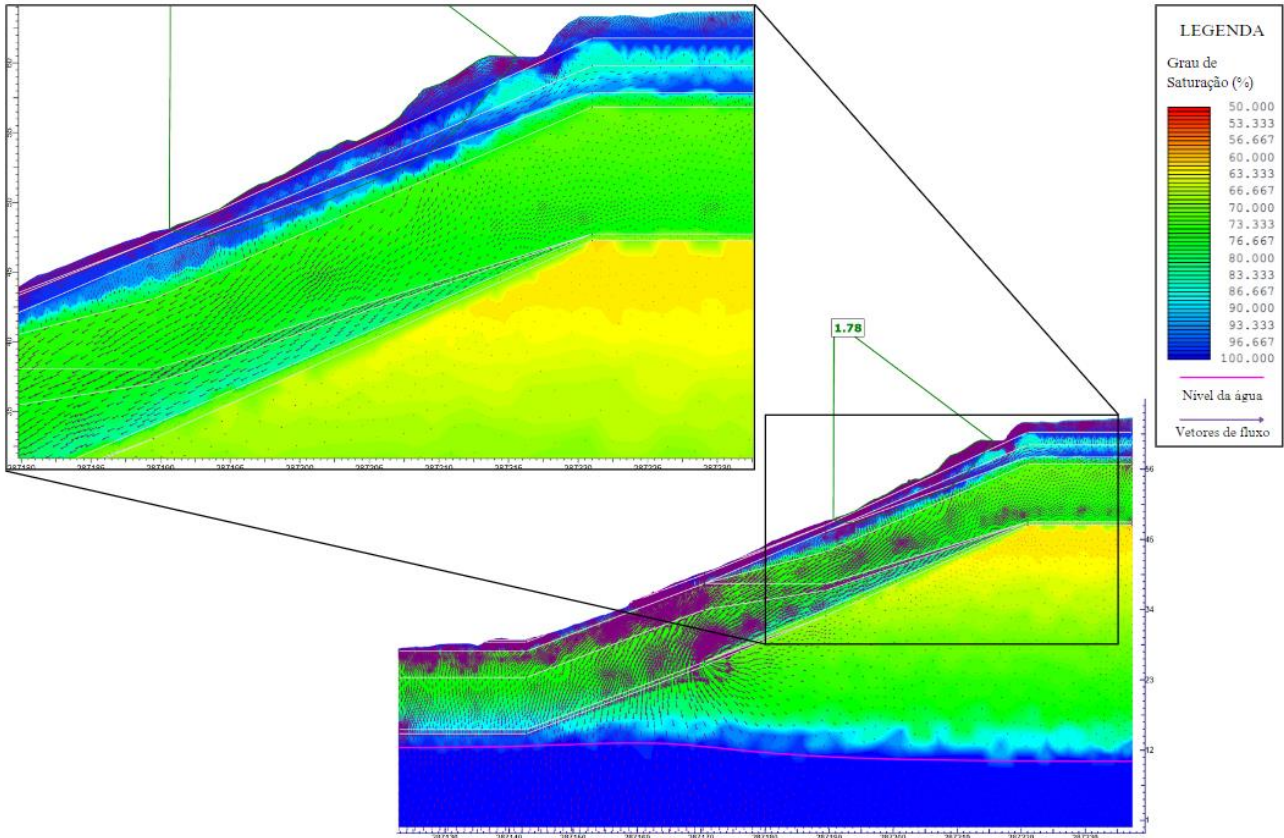


Figura 6. Vetores de fluxo no perfil 1

A Figura 7 contém as superfícies de ruptura e indicação da saturação dos modelos com variações do perfil inicial.

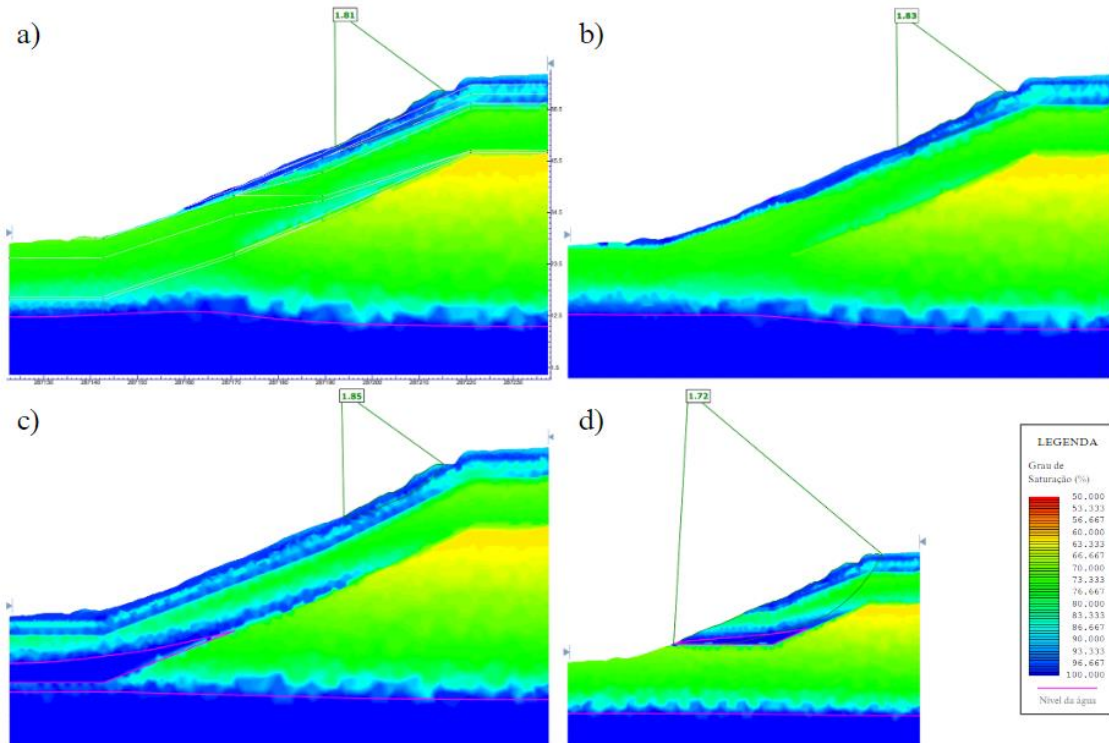


Figura 7. Superfície de ruptura e saturação aos 25 dias nos perfis a) P2, a) P3, a) P4 e a) P5

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente foi possível notar que todos os perfis apresentaram Fatores de Segurança semelhantes antes da aplicação da chuva, com valores próximos a 2,97. Após 5 dias da aplicação da chuva, todos já chegaram a valores próximos de 2, indicando a redução de resistência ao cisalhamento do solo devido à saturação. Aos 25 dias, os valores de Fator de Segurança se distanciaram mais do que o início do estudo, tendo valores entre 1,72 e 1,85.

A partir desse momento é possível analisar como se deu o processo de saturação do solo, observando-se nas Figuras 5 e 7 diferentes zonas de saturação. O Perfil 1 apresentou uma saturação acima de 90% ao longo das alturas próximas à superfície em todo o perfil. O Perfil 2 teve comportamento semelhante até a sondagem B4-Extra, onde não apresentava a camada de solo argiloso na superfície deste ponto até a extremidade esquerda da seção. O Perfil 3 apresentou uma região maior de solo saturado na área mais superficial da sondagem B3, com maior espessura de solo arenoso na superfície, e menor no sopé da encosta do que o Perfil 1.

Os perfis P1, P2 e P3 apresentaram superfícies de ruptura semelhantes, localizando-se entre os furos de sondagem B1 e B2, região para o qual, nestes perfis, apresentam os mesmos materiais com mesmas profundidades. A distinção dessa região nos perfis concentra-se nas diferentes saturações com aplicação da chuva, que implicaram na variação do Fator de Segurança entre 1,78 e 1,83.

Os Perfis 4 e 5 apresentaram “bolsões” de solo saturado a meia altura da encosta, indicando zonas de menor resistência ao cisalhamento, como é possível ver na superfície de ruptura do P5.

Diferenças de saturação ao longo da encosta, mesmo com aplicações de chuvas constantes, explica-se devido a diferença de valores entre a intensidade da chuva e os coeficientes de permeabilidade dos solos. Uma chuva de 100 mm/dia é equivalente ao valor aproximado de $1,16 \times 10^{-6}$ m/s. O qual é aproximadamente 10 vezes menor que o coeficiente de permeabilidade das areias do solo analisado, valor próximo às argilas em questão e maior que a permeabilidade do silte do modelo, sendo todas as comparações em relação à permeabilidade do solo em questões saturadas.

Na Figura 6 é notado que, devido a dificuldade do escoamento da água em solos argilosos, a água presente ou aplicada nas camadas de areia superficiais é dividida em três destinos diferentes. Parte da água é infiltrada na argila, que apresenta uma resistência inicial devido às resistências da parcela de sucção do solo não saturado; outra parte é retida pela areia normal à intersecção da chuva com a encosta; e outra parte, devido às ações da gravidade, são escoadas para altitudes menores.

Dessa forma, é possível compreender os motivos dos modelos P1, P2 e P3 apresentarem saturações diferentes entre B1 e B2. Devido o vetor de fluxo de água conter componentes horizontais e verticais, o fluxo ao encontrar uma camada argilosa em regiões mais baixas é impossibilitado de ocorrer na vertical e na horizontal. Com isso, crescentemente acumula-se água nos vazios do solo arenoso, ou seja, ocorre um aumento do grau de saturação. A alta saturação da camada superficial também é um indicativo da ocorrência de fluxo de água na superfície da encosta, implicando em erosões, os quais podem representar um risco geotécnico.

Todos estes fatores que interferem no comportamento da água que flui através do solo destaca a importância de uma análise completa do solo de uma encosta, mostrando que locais os quais podem não indicar inclinações relevantes para a análise de estabilidade, podem indicar presença de solos finos que interfiram na saturação de regiões próximas e afetando, diretamente, a segurança contra movimentos de massa da encosta.

Neste trabalho, também foi possível observar nos Perfis 4 e 5 o possível impacto da falta de furos de sondagem ao longo de toda a encosta e interpretações ou suposições equivocadas do material constituinte do solo do local. Segundo a NBR 11682/2009, para nível de segurança contra danos a vidas humanas alto e nível de segurança contra danos materiais e ambientais médio, recomenda-se um Fator de Segurança de 1,5. Portanto, o Fator de Segurança de 1,85 para o P4, 0,07 acima (+4%) do valor obtido em P1, embora neste caso não altere o nível de segurança da encosta, pode ser um indicativo de um erro de análise que, em casos mais críticos, seja fundamental para a determinação da segurança da encosta. Situação semelhante à encontrada no P5, com Fator de Segurança de 1,72, 0,06 abaixo (-3%) do valor de P1, e 0,13 menor (-7%) que o fator obtido em P4.

5 CONCLUSÃO

Através dos dados apresentados, foi possível observar como ocorre o processo de infiltração de água no solo inicialmente não saturado. Fluxos de água com componentes horizontais e verticais foram demonstrados como produtos da presença de solo argiloso entre solos arenosos devido a sua baixa permeabilidade.

Este fenômeno mostrou-se importante na compreensão do valor de saturação da camada arenosa, uma vez que a água aplicada neste solo era impedida de infiltrar na vertical com valor igual ou maior que a intensidade da chuva devido a baixa permeabilidade do solo argiloso abaixo. Com isso a água escoaria para regiões mais baixas do mesmo solo arenoso, com componentes horizontais no fluxo. A presença de mais solo argiloso novamente em regiões mais baixas também impediria a infiltração horizontal da água. A junção desses fatores afeta diretamente a saturação da camada arenosa por completo, que pode apresentar diferentes graus de saturação, e conseqüentemente resistência ao cisalhamento, dependendo do solo presente em altitudes menores ou sua espessura ao longo de todo o perfil.

Outro fato que pode se relacionar com o comportamento descrito anteriormente é a possibilidade de escoamento de água acima da camada arenosa, o qual pode ter poder erosivo e implicar em problema geotécnicos futuros.

Além do fluxo de água estudado, este trabalho também possibilitou analisar os impactos da falta de realização de sondagens no solo ao longo de toda a encosta ou interpretação equivocada dos dados obtidos, com variação no caso estudado de até 7% ou 0,13 no valor bruto do Fator de Segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Lafayette, Kalinny Patrícia Vaz. (2000) *Comportamento geomecânico de solos de uma toposequência na Formação Barreiras em uma encosta na área urbana do Recife-PE*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 137 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.
- 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.