

Análise de Ruptura em Solos não Saturados: Um Estudo de Caso do Talude do Morro do Águia em Salvador

Andréia Borges dos Santos

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, abdossantos@hotmail.com

Tácio Mauro Pereira de Campos

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, tacio@puc-rio.br

Paulo Gustavo Cavalcante Lins

UFBA, Salvador, Brasil, plins@ufba.br

RESUMO: A ruptura do talude de corte na Rodovia Luís Eduardo Magalhães, na região conhecida como Morro do Águia aconteceu em 2005 após um período de chuvas. O terreno é composto por um solo residual silto arenoso oriundo de rocha de gnaiss e migmatitos. A análise do escorregamento envolveu a determinação de parâmetros de resistência e hidráulicos, através de ensaios de campo e laboratório. Uma análise de percolação por elementos finitos foi realizada para determinar a distribuição de poropressões. As poropressões foram utilizadas para cálculo do fator de segurança por equilíbrio limite. Verificou-se que o mecanismo de ruptura observado em campo é reproduzido quando se considera a resistência do solo não saturado. A distribuição de poropressões e o fator de segurança é muito sensível à posição inicial do nível de água.

PALAVRAS-CHAVE: Solo não saturado, taludes, ruptura.

1 INTRODUÇÃO

A estabilização de taludes é um assunto muito discutido na área geotécnica. Pesquisadores contribuem com seus trabalhos para um melhor entendimento do assunto, possibilitando a tomada de ações preventivas ou corretivas em áreas urbanas onde a ocorrência de movimentação de terra pode acarretar perdas materiais e ceifar vidas.

Os estudos dos mecanismos de ruptura de taludes teve como base a mecânica dos solos clássica, que abriu caminho para um entendimento mais profundo das diversas possibilidades regionais através do domínio das tecnologias de campo e de laboratório. Recentemente a parcela não saturada do solo pode ser considerada nas análises com a popularização de softwares que permitem considerar simultaneamente a influência de

diversas variáveis na solução dos problemas.

Essa conjuntura permite que o estudo dos solos não saturados se torne mais comum em todo o mundo. No Brasil, o interesse nesses solos é cada vez maior, haja vista a existência de ambiente propício a sua ocorrência.

Este trabalho tem por objetivo consolidar as informações técnicas obtidas na análise do deslizamento do talude do Morro do Águia, nas margens da Rodovia Luís Eduardo Magalhães, em Salvador, Bahia.

2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO TALUDE

2.1 Localização

O substrato geológico da cidade de Salvador consiste em rochas de alto grau de

metamorfismo de idade Pré-Cambriana. Essas rochas incluem gnaisses e migmatitos com foliação orientada para NNE (Lima e de Campos, 2016).

Os episódios tectônicos sucessivos ocasionaram a ocorrência de diversas falhas com orientação de N30-40E E-W e N30-40W (Lima e de Campos, 2016). A maior e mais famosa dessas falhas tem extensão de aproximadamente 150Km. Diversas falhas menores se produziram, sendo uma delas a que tangencia o talude estudado, conforme pode ser observado na Figura 1.

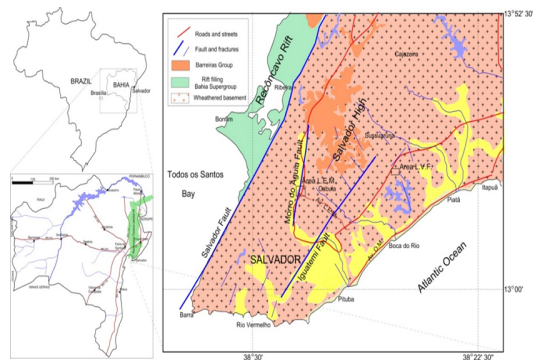


Figura 1. Localização do talude (Lima e de Campos, 2016).

A ruptura do talude aconteceu no dia 27 de agosto de 2005, após sete meses de chuvas intensas. O deslizamento foi profundo, com abaulamento na base. Após esta ocorrência vários ensaios de campo e laboratório foram realizados a fim de determinar a causa principal da ruptura. A Figura 2 apresenta a localização das sondagens e da retirada dos blocos.

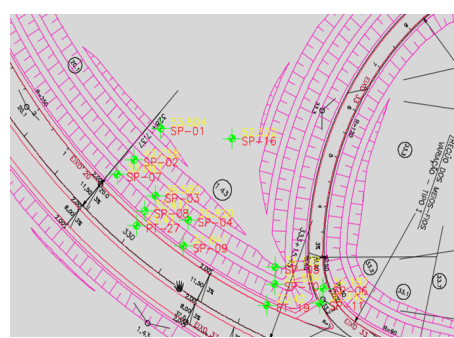


Figura 2. Locais de sondagem e retirada de blocos.

Penei- -ras	Pedre- -gulho	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
%	2	12	15	48	14

2.2 Caracterização do Talude

O perfil do solo é reproduzido na Figura 3. Observa-se um típico solo residual jovem. Sondagens a percussão foram realizadas ao longo de todo o talude, de onde se pôde determinar o perfil geológico-geotécnico do maciço com confiabilidade.

O perfil apresentou dois horizontes principais: o mais superficial consiste em solo residual silto arenoso que apresentou estrutura reliquiar e a mais profunda, a rocha de origem. O talude foi reconstituído a partir do perfil das sondagens SP14, SP4, SP9 e SP12.

A distribuição granulométrica do solo é representada na Figura 4 e resumida na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta os limites de consistência para o solo.

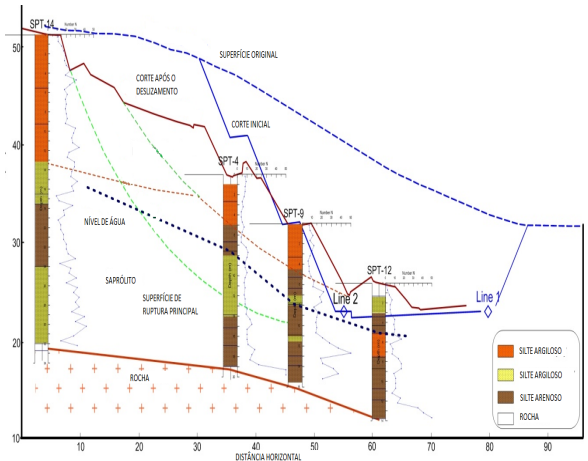


Figura 3. Perfil de Sondagem (Lima e de Campos, 2016).

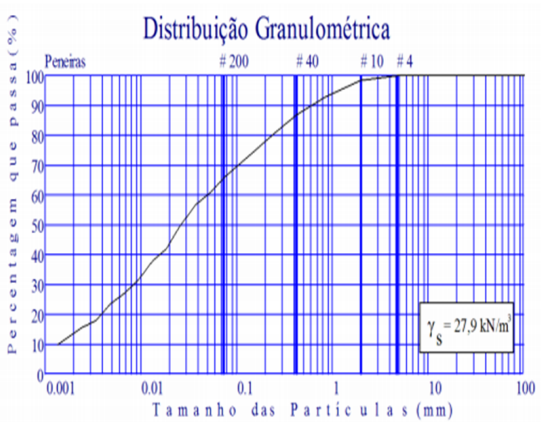


Figura 4. Curva Granulométrica

Tabela 1. Distribuição Granulométrica

Tabela 2. Limites de consistência.

W _L	W _P	IP
59	41	18

A mineralogia do solo foi estudada através da difratometria de raios X, com solos recolhidos de quatro cotas diferentes ao longo do perfil: 0,5m, 3,5m, 10,0m e 15m. Neste trabalho é apresentado apenas o resultado mais relevante, na Figura 5, devido à repetição dos mesmos padrões apresentados pelas amostras.

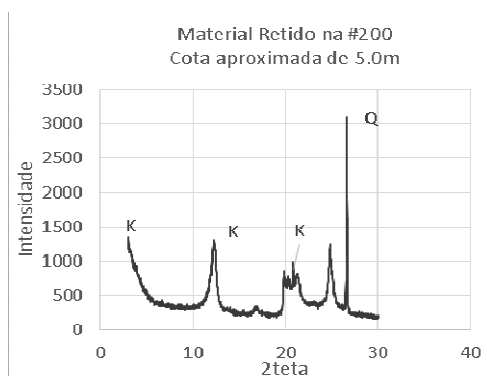


Figura 5. Mineralogia por Difratometria de Raio X.

O solo é constituído de quartzo e feldspato e ainda foram observadas a presença de biotita através da lupa microscópica.

3 ENSAIOS PRINCIPAIS E DADOS DE CHUVAS

Ensaio de campo e laboratório foram realizados para determinação dos parâmetros de resistência e os parâmetros hidráulicos do solo. Foram também avaliados os dados de precipitação nos 86 dias anteriores ao evento.

Os dados de chuvas foram obtidos da Defesa Civil da Cidade de Salvador (Codesal, 2016). Percebe-se que, embora não tenha chovido no dia do escorregamento, 27 de agosto, houve ocorrência de chuvas significativas nos meses anteriores ao evento, o que contribuiu para a deflagração do escorregamento. A Figura 6 apresenta a precipitação mensal acumulada e a Figura 7 apresenta a precipitação diária do período do evento.

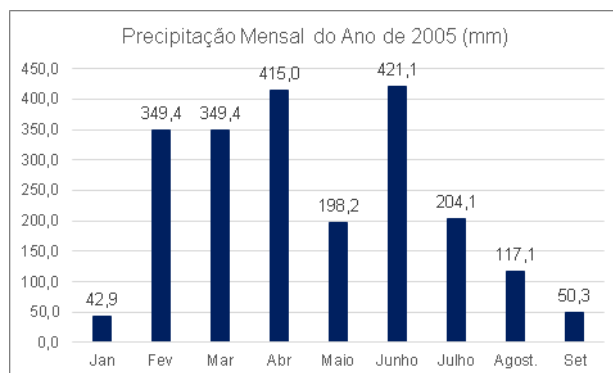


Figura 6. Precipitação mensal acumulada.

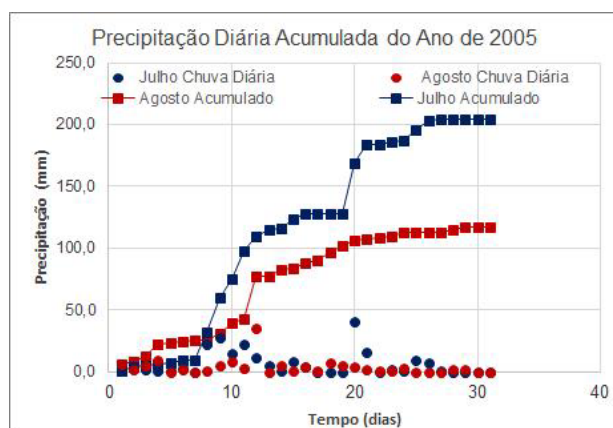


Figura 7. Precipitação diária.

A determinação da resistência do maciço foi feita em laboratório, através de ensaios de cisalhamento direto. A metodologia consistiu em coletar cinco blocos localizados próximos à superfície de ruptura, espacialmente distribuídos de forma a obter representatividade dos parâmetros. As curvas de resistência desses blocos na umidade natural e inundados foram determinadas.

Os parâmetros de resistência natural e inundada não apresentaram diferenças significativas quando se compara os blocos isoladamente. Esse resultado confirma que a umidade de campo no dia do evento estava bem próxima da umidade inundada. Os blocos foram coletados cinco dias após a ruptura do talude. A Figura 8 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

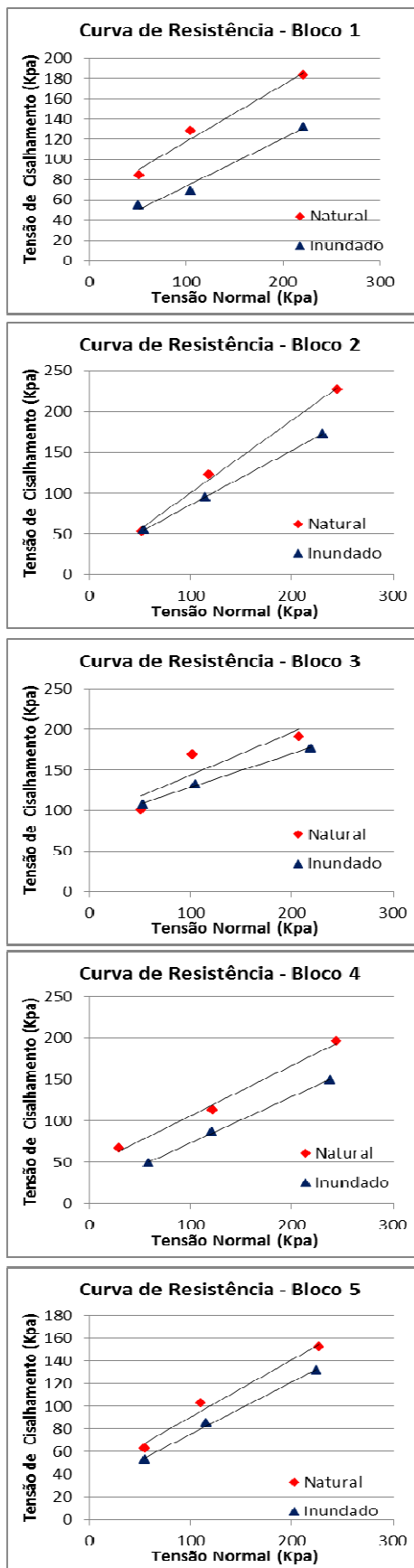


Figura 8. Resistência ao cisalhamento dos blocos.

Quando se compara os parâmetros de

resistência entre os blocos, observa-se que há uma variabilidade significativa entre os valores obtidos. Essa diferença evidencia a heterogeneidade da rocha e a variação no perfil de umidade mostrado nas sondagens. As Tabelas 2 e 3 resumizam os índices físicos e dados de resistência dos blocos.

Tabela 2. Índices físicos e dados de resistência dos blocos inundados.

Solo	e	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Bloco 1	1,34	16,33	26,7	25,1
Bloco 2	1,12	15,77	18,7	33,7
Bloco 3	1,32	16,17	87,6	22,4
Bloco 4	1,04	15,53	18,3	29
Bloco 5	1,35	16,45	29,8	25,4

Tabela 3. Índices físicos e dados de resistência dos blocos na umidade natural.

Solo	e	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Bloco 1	1,33	16,20	61,6	30,1
Bloco 2	1,10	14,99	11,4	41,7
Bloco 3	1,29	16,23	91,3	27,6
Bloco 4	0,95	16,20	27,5	24,8
Bloco 5	1,33	16,37	39,4	27,4

4 DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

A modelagem da infiltração da água no solo foi realizada com o programa SEEP/W. A análise de estabilidade do talude foi realizada pelo programa SLOPE/W. O método de equilíbrio limite utilizado foi o de Morgenstern-Price, utilizando a função de força inter-fatias *half-sine*.

No estudo se ignorou a ocorrência da evapotranspiração, a parcela de escoamento superficial da chuva e se considerou o solo homogêneo ao longo do perfil.

Inicialmente, na determinação do fator de segurança crítico considerou-se o solo saturado, sem a análise de fluxo. Os parâmetros considerados foram $\gamma_n = 16,3 \text{ kN/m}^3$, $c' = 16,58 \text{ kPa}$, $\phi' = 25,6$ e $\phi_b = 0^\circ$. Esses valores são referentes ao Bloco 1.

A simulação nessas condições mostra um círculo crítico superficial, diferente do padrão de movimento de massa observado em campo,

que apresentou um levantamento profundo com levantamento na base, além de mostrar valores inconsistentes no fator de segurança $FS = 0,679$. O resultado dessa análise é mostrado na Figura 9.

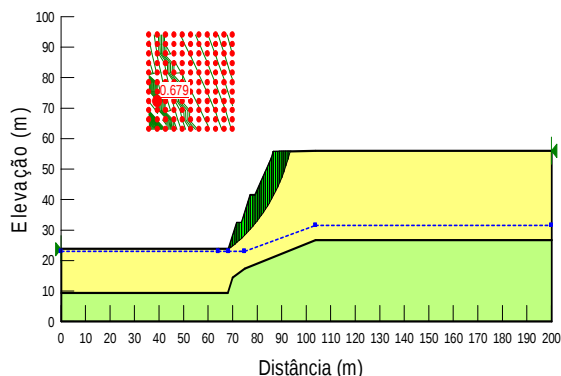


Figura 9. Fator de segurança desconsiderando a infiltração e a parcela de resistência da sucção ϕ_b .

A permeabilidade não saturada foi determinada a partir do ensaio de campo tipo Guelph e atende à seguinte equação:

$$K = K_{fs} e^{\alpha\psi} \quad (1)$$

K_{fs} é o coeficiente de permeabilidade saturada do solo, α é o parâmetro que possibilita determinar a variação da condutividade hidráulica do solo não saturado, K , com a sucção ψ . (Gardner, 1958. *apud* de Campos *et al.*, 1992).

Na modelagem da infiltração considerou-se a curva característica com os dados de sucção abaixo de 3000 kPa. A função condutividade hidráulica utilizada na análise é apresentada na Figura 10. A curva característica que foi utilizada na análise e foi ajustada no programa SEEP/W é apresentada na Figura 11.

A modelagem partiu do nível de água coincidente com o impenetrável à percussão e, a partir daí, a cota foi sendo incrementada até se chegar ao nível de água inicial que levasse a um fator de segurança unitário ao fim da simulação. Na modelagem foi considerada a infiltração na superfície do talude representada pela função chuva apresentada na Figura 12.

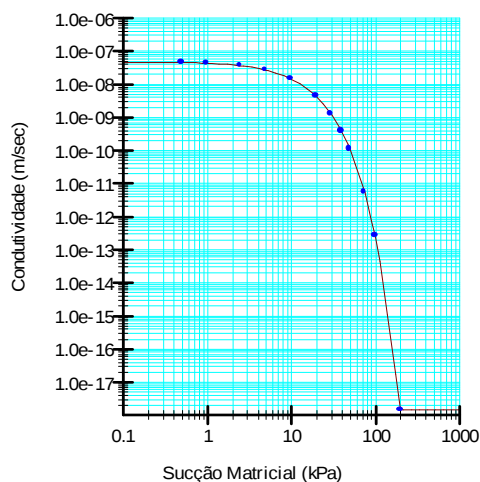


Figura 10. Função condutividade hidráulica.

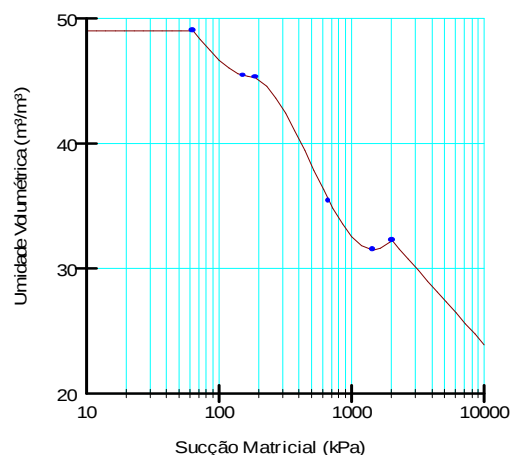


Figura 11. Curva Característica ajustada no programa SEEP/W.

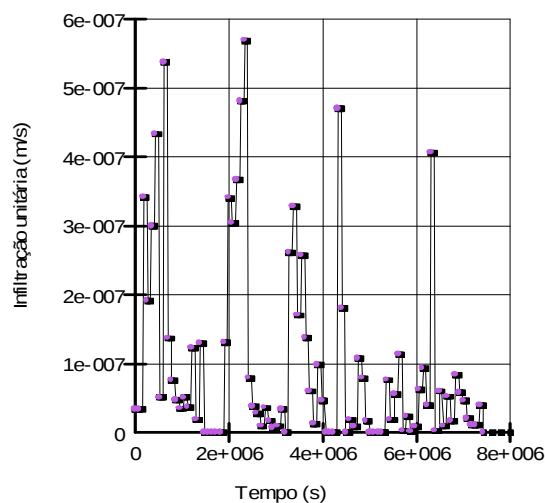


Figura 12. Função Chuva.

A avaliação das poropressões é fortemente dependente das condições de sucção no campo e das propriedades hidráulicas do meio não saturado. A modelagem apresentou poropressões muito altas no tempo de 86 dias, vindo o talude a se romper sob a influência da variação do nível de água.

A Figura 13 apresenta a distribuição de poropressões iniciais e a Figura 14 apresenta a distribuição de poropressões após a simulação de 86 dias de precipitação.

Segundo Vargas Junior *et al.* (1992) a ocorrência de poropressões positivas nas encostas não saturadas pode levar a um processo de instabilização que independe da perda de resistência devido à diminuição de sucção. Neste estudo de caso, a pressão de poros se apresenta na ordem de -150 kPa.

Os parâmetros considerados na análise acoplada ao estudo da infiltração foram $\gamma_h = 16,3 \text{ kN/m}^3$, $c' = 16,58 \text{ kPa}$, $\phi' = 25,6$ e $\phi_b = 18^\circ$.

Observa-se que não houve grandes mudanças no perfil da sucção antes e após as chuvas. O regime de fluxo próximo ao pé do talude ocasionou a ocorrência de poropressão positiva. A base levantou de forma que houvesse o solapamento da estrutura e consequentemente, ocorresse a ruptura. O círculo crítico da análise de estabilidade deste caso é apresentado na Figura 15. A forma da superfície de ruptura pode ser comparada com a foto apresentada na Figura 16.

Conforme afirma de Campos *et al.* (1992) os parâmetros que influenciam a modelagem de fluxo para solos não saturados são: condições de contorno (taxas de precipitação, fronteiras impermeáveis), parâmetros hidráulicos (curva característica, relação entre condutividade hidráulica e grau de saturação), a geometria e as condições iniciais.

As fronteiras laterais e inferior do modelo foram consideradas impermeáveis.

A geometria é relevante quando não se tem um perfil geológico adequado da área. No caso deste estudo o levantamento geológico e geotécnico foi muito consistente o que eliminou a possibilidade de influência negativa dessa variável.

As condições iniciais se referem basicamente

à variação do nível de água que se mostrou muito sensível na modelagem, mas os resultados foram coerentes com os níveis de água observadas no perfil de sondagem após a ruptura.

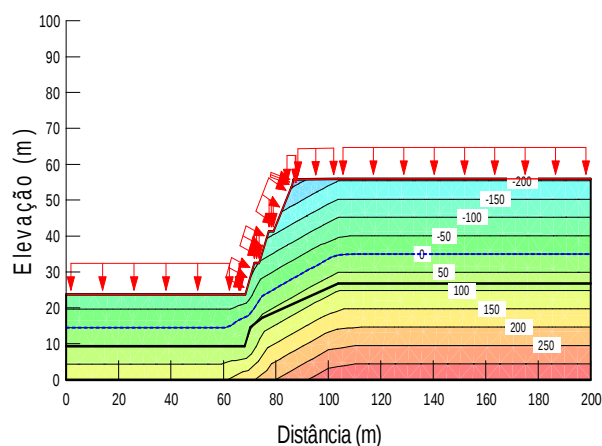


Figura 13. Distribuição de poropressão inicial.

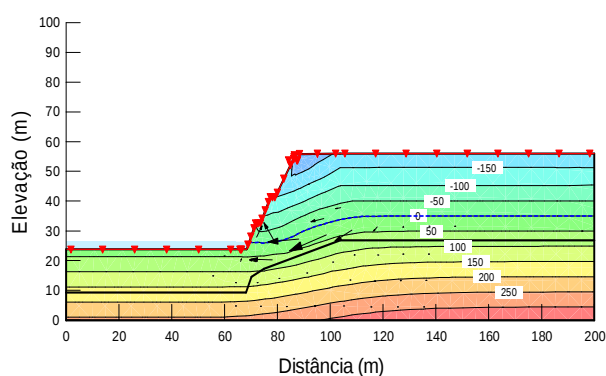


Figura 14. Distribuição de poropressão após simulação com infiltração definida por 86 dias de precipitação.

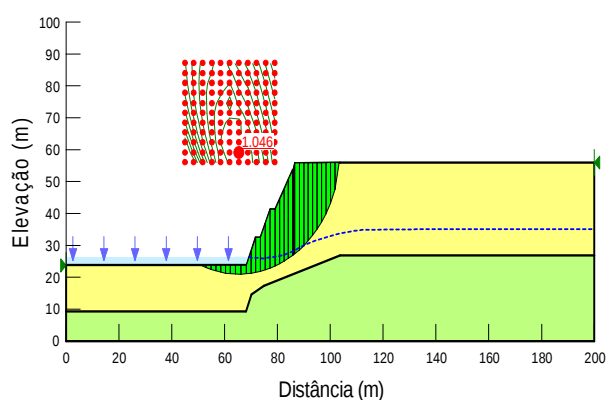


Figura 15. Fator de segurança considerando a poropressão simulada com infiltração definida por 86 dias de precipitação.

O resultado da modelagem se mostrou fortemente influenciada pela curva

característica. Como foram realizados dois ensaios feitos através de papel filtro se pode verificar que o ensaio que se mostrou satisfatório foi aquele que seguiu o método proposto por Marinho (1994).

Os possíveis erros que poderiam ocorrer provenientes das medições de chuvas se referem à possibilidade dos volumes de precipitação medidos não serem representativos dos locais em decorrência da localização do pluviômetro. Isto não aconteceu pois o instrumento localiza-se próximo ao talude em estudo.

A condutividade hidráulica, por sua natureza, possui uma variabilidade de valores, isto acontece também devido às diversas características físicas do local escolhido para a realização do ensaio e porque esse parâmetro também varia com a sucção.



Figura 16. Foto do deslizamento.

5 CONCLUSÕES

A simulação de análise de estabilidade de taludes que desconsiderou a parcela de resistência devido às poropressões negativas com dados de resistência do solo inundado mostrou resultados inconsistentes com fator de segurança crítico $FS = 0,68$. Além disso, não se conseguiu reproduzir o movimento de massa ocorrido conforme aconteceu de fato. Conclui-se desta forma que o parâmetro não saturado ϕ_b não pode ser desconsiderado na análise.

Em um modelo que considera a distribuição espacial e temporal das poropressões e a resistência ao cisalhamento incrementada pelas

poropressões negativas foi possível reproduzir o mecanismo de movimento de massa observado em campo.

O fluxo subterrâneo de água no maciço converge para a base do talude que acarretou no aumento de poropressões locais justificando a ruptura profunda ocorrida.

O fator de segurança é muito sensível ao posicionamento do nível de água e da curva característica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geotecnia e Laboratório de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal da Bahia.

REFERÊNCIAS

- Codesal (2016). *Índice Pluviométrico*. Disponível em: <www.codesal.salvador.ba.gov.br>. Acesso em: 12 de março de 2016.
- de Campos, T.M.P.; Vargas Junior, E.A.; Eisenstein, Z. (1992) Considerações Sobre Processos de Instabilização de Encostas em Solos Não Saturados na Cidade do Rio de Janeiro. *1º Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas*, 1º COBRAE. Rio de Janeiro. p. 741-757
- Lima, O.A.L. e de Campos, L.E.P. (2016) *Two-Dimensional Electric Imaging: A Non-Invasive Tool for Solving Hydrological and Geotechnical Problems in Urban Areas*. (Não publicado). 29 p.
- Marinho, F. A. M. (1994) Medição de Sucção com o método do papel filtro. *X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações*. Foz do Iguaçu, PR. Vol. 2. p. 515-522.
- Vargas Junior, E.A.; Costa Filho, L.M.; de Campos, T.M.P. (1992). Análise de Infiltração em Solos de Encostas na cidade do Rio de Janeiro e sua Consequência na Estabilidade. *1º Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas*, 1º COBRAE. Rio de Janeiro. p. 759-770.