

# Sensibilidade dos fatores de segurança obtidos com a mudança de parâmetros de resistência do solo natural para o inundado

Marília Gabriela Alves de Arruda

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, marilia.alvesarruda@ufpe.br

Felipe de Souza Mata

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, felipe.mata@ufpe.br

Eduardo de Castro Bittencourt

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, eduardo.bittencourt@ufrn.br

**RESUMO:** No Brasil um dos locais que sofre anualmente com problemas de deslizamento é a Região Metropolitana de Recife (RMR), principalmente no inverno. O período chuvoso, característico por apresentar maiores índices pluviométricos situa-se entre os meses de março a agosto. Destaca-se este período de chuvas na cidade de Recife visto que as condições climáticas é um dos principais fatores que potencializam a instabilidade de encostas na capital de Pernambuco e cidades vizinhas. Neste contexto, é importante que análises de estabilidade sejam efetuadas em condições de saturação do solo, assim, a realização de ensaios como cisalhamento direto nas condições natural e inundada são importantes para averiguar a sensibilidade dos fatores de segurança frente à redução dos fatores de segurança. Nesta perspectiva, o presente artigo demonstra a forte influência da saturação do solo em reduzir os fatores de segurança de duas encostas estudadas, tornando-as instáveis. Observa-se nos resultados que o avanço da umidade reduziu os fatores de segurança de maneira expressiva, não apenas no cenário sem intervenção com contenção, mas também em etapa executiva e com a inclusão de contenção em muro de arrimo.

**PALAVRAS-CHAVE:** fator de segurança, cisalhamento direto, deslizamento

**ABSTRACT:** In Brazil, one of the places that suffers annually from landslide problems is the Metropolitan Region of Recife (RMR), especially in winter. The rainy period, characterized by higher rainfall, is between the months of March and August. This period of rain in the city of Recife stands out as climate conditions are one of the main factors that increase the instability of slopes in the capital of Pernambuco and neighboring cities. In this context, it is important that stability analyzes are carried out under soil saturation conditions, therefore, carrying out tests such as direct shear in natural and flooded conditions are important to determine the sensitivity of safety factors to the reduction of safety factors. From this perspective, this article demonstrated the strong influence of soil saturation in reducing the safety factors of two studied slopes, making them unstable. It was observed in the results that the advance of humidity significantly reduced safety factors, not only in the scenario without intervention with containment, but also in the executive stage and with the inclusion of containment in a retaining wall.

**KEYWORDS:** safety factor, direct shear, sliding

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento urbano desordenado característico em diversas capitais brasileiras, aliado à condições precárias no que tange infraestrutura e desigualdade social, está resultando em situações geotécnicas de instabilidade de encostas urbanas ao longo das últimas décadas. Tal conjuntura reforça a importância das pesquisas científicas no âmbito de fomentar não somente para o meio acadêmico, mas também no meio profissional e socioeconômico, gerando assim mais qualidade de vida para a população.

Neste sentido, Santos (2018) traz em uma de suas conclusões acerca de estudo de estabilidade de encosta em Recife que não somente a precipitação resulta na redução do fator de segurança de um talude, mas também vazamentos ocasionados por infraestrutura deficiente; podendo gerar uma redução dos FS na ordem de até 90%.

Ainda na perspectiva do aumento da umidade na massa de solo, vale frisar a importância de verificar como e com quais condições se dá a redução dos parâmetros de resistência coesão e ângulo de atrito, ao comparar os períodos de inverno e verão. Tais análises possibilitam uma melhor tomada de decisão por parte de projetistas geotécnicos quanto à solução de engenharia de estabilizar uma encosta. Neste aspecto e relacionado com a RMR, cita-se a pesquisa de Santana (2006) que entre os resultados do seu estudo, foi gerado um banco de dados sobre as principais características das obras de solução de engenharia para contenção.

A ação antrópica por sua vez é outro fator relevante para gerar instabilidade de uma encosta urbana. Característico de população de baixa renda, os bairros menos valorizados apresentam residências em áreas de risco, construídas em topo de taludes e/ou na base. Neste contexto, Almeida (2016) relata em sua pesquisa na cidade de Ipojuca-PE que o fator de segurança analisado com tensões advindas de residências somadas à condição do solo inundado indicam grande possibilidade de ruptura geotécnica.

Conforme supracitado, observa-se que a ação da umidade na redução dos parâmetros de resistência do solo resulta conseqüentemente na diminuição do fator de segurança. Tal fator justifica o desenvolvimento do presente artigo, embasado na análise de estabilidade de duas encostas na cidade de Recife nas condições natural e saturada.

### 1.1 Definições de taludes

Segundo Gerscovich (2016), talude é o termo que se dá para uma superfície que possui uma inclinação, seja em solo, rocha, ou ambos, podendo ser natural em que neste caso é denominado encosta, mas também apresentando ação antrópica que são os chamados taludes de corte e aterro.

Ainda segundo tal autora, os estudos que envolvem análises de estabilidade de taludes abrangem muitas situações práticas como barragem de terra nas fases de construção e operação, encosta natural para verificar necessidade de estabilização e também talude de corte, em que se verifica a inclinação do corte para verificar medidas de estabilização, seja somente com o próprio material que compõe o talude ou inclusão de estrutura de contenção como por exemplo muro de arrimo. Esta solução alíás apresenta grande aplicação nas encostas da RMR, em que nos projetos de estabilização envolve muita das vezes a realização de corte para inserção de uma contenção.

### 1.2 Fatores condicionantes para movimentação de massa na RMR

Uma etapa importante no projeto de estabilização de encosta urbana é diagnosticar quais são os fatores que geram instabilidade. A partir disto é possível realizar um projeto que se adeque às condições locais e também realizar previsões sobre condições de estabilidade críticas que possam acontecer no futuro. Neste âmbito, Magalhães (2013) analisou a estabilidade de uma encosta localizada na cidade de Camaragibe, na Região Metropolitana de Recife, em que foi verificada a influência do avanço da umidade na encosta na redução dos parâmetros de resistência a partir de ensaios de cisalhamento direto.

Na Tabela 1 a seguir são apresentados os valores de coesão e ângulo de atrito nas condições natural e inundada, para demonstrar a influência da água na redução dos parâmetros de resistência do solo para diferentes locais da encosta, em especial a coesão.

Tabela 1. Parâmetros para análise de estabilidade da encosta (Magalhães, 2013).

| Parâmetros para análise de estabilidade da encosta |                |                         |                            |                               |         |            |
|--|----------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|---------|------------|
| Local/Fáceis                                       | Tipo de Ensaio | Descrição/classificação | Condição do corpo de prova | $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> ) | c (KPa) | $\phi$ (°) |
| Topo da encosta                                    | CD             | Argila areno-siltosa    | Natural                    | 16,93                         | 27,39   | 35,7       |
|  |                |                         | Inundado                   | 19,27                         | 8,72    | 34,2       |
| Meia Encosta                                       | CD             | Argila areno-siltosa    | Natural                    | 18,13                         | 35,08   | 28,1       |
|  |                |                         | Inundado                   | 19,90                         | 6,97    | 29,5       |
| Base da encosta                                    | CD             | Argila areno-siltosa    | Natural                    | 16,29                         | 13,76   | 36,5       |
|  |                |                         | Inundado                   | 19,04                         | 3,30    | 35,0       |

A partir destes resultados conclui-se que a coesão do solo reduziu substancialmente comparando a situação natural com inundado. Com tais parâmetros geotécnicos, Magalhães (2013) realizou análises de

estabilidade no software computacional SLOPE/W a fim de mensurar os valores de FS pelos critérios de Morgenstern-Price, Bishop, Janbu e Ordinary. Na Tabela 2 abaixo são apresentados os resultados.

Tabela 2. Fatores de segurança em corpos de prova natural e inundado (Magalhães, 2013).

| Local           | Corpo de prova | Morgentern & Price | Bishop | Janbu | Ordinary |
|-----------------|----------------|--------------------|--------|-------|----------|
| Topo da encosta | Natural        | 1,690              | 1,165  | 1,092 | 1,100    |
|                 | Inundado       | 1,159              | 1,696  | 1,611 | 1,629    |
| Meia Encosta    | Natural        | 1,805              | 1,805  | 1,681 | 1,690    |
|                 | Inundado       | 1,342              | 1,699  | 1,482 | 1,439    |
| Base da encosta | Natural        | 2,280              | 2,268  | 2,092 | 2,008    |
|                 | Inundado       | 1,699              | 1,356  | 1,255 | 1,250    |
| Toda encosta    | Natural        | 1,720              | 1,690  | 1,567 | 1,550    |
|                 | Inundado       | 1,464              | 1,457  | 1,364 | 1,353    |

Considerando os fatores de segurança mínimos conforme apresentados na NBR 11682 (2009) e os resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que o efeito da água reduziu para valores abaixo de 1,5, valor mínimo para situações em que os riscos de perda de vidas humanas e danos materiais/ambientais são altos, conforme apresentado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3. Fatores de segurança conforme norma de estabilidade de taludes (Adaptada da NBR 11682/2009).

| Nível de Segurança contra danos ambientais | Nível de segurança contra danos a vidas humanas |       |       |
|--|---|-------|-------|
|  | Alto  | Médio | Baixo |
| Alto                                       | 1,5   | 1,5   | 1,4   |
| Médio                                      | 1,5   | 1,4   | 1,3   |
| Baixo                                      | 1,4   | 1,3   | 1,2   |

Estes resultados podem ser correlacionados com os deslizamentos ocorridos no ano de 2022 na cidade de Recife-PE, que foi a maior tragédia natural do século no estado do Pernambuco, conforme matéria da TV Globo publicada no dia 01/06/2022. Na referida matéria, Roberto Quental Coutinho, professor da Universidade Federal de Pernambuco, relata que apesar de serem desastres naturais, a ação humana também tem forte influência no aumento da instabilidade. Nesse sentido, destaca-se a forte ocupação humana nas regiões de encostas, resultando no aumento das tensões na massa de solo.

Adicionalmente, Silva (2010) cita em sua pesquisa em talude em Camaragibe - PE outras ações antrópicas que também aumentam a instabilidade de encostas, como descarte de água servida, presença de fossas nos taludes e obras de retaludamento sem aplicação de técnicas de engenharia. Silva (2007) também relata que a ação antrópica ao lado das chuvas estão entre os principais fatores que geram movimentação de massa.

## 2 ESTUDOS DE CASO

Como objetos de estudo foram utilizados dois projetos de estabilização de encosta que estão localizadas na cidade de Recife que os autores dimensionaram. Uma delas denominada no presente artigo como “Encosta 1”, se encontra no bairro da Várzea, e a segunda encosta denominada como “Encosta 2” está localizada no bairro de Passarinho. A seguir na Figura 1 são apresentados registros fotográficos das respectivas encostas.

Figura 1. Encosta 1 a esquerda e Encosta 2 a direita. Fonte própria



No dimensionamento foram verificados fatores de segurança em 3 diferentes cenários: o primeiro é o atual, isto é, sem a inclusão de contenção; o segundo é com execução de corte executivo para inclusão da contenção; e o terceiro e último cenário, verifica os fatores de segurança após a inclusão da contenção.

Quanto ao valor mínimo de FS enquadrado como aceitável, para a etapa de corte temporário considerou-se satisfatório aquele igual ou superior a 1,3; enquanto que para o cenário final com contenção inserida, o FS mínimo deve ser de 1,5.

Para estudar a influência da água na redução dos fatores de segurança, foram verificadas as estabilidades em dois diferentes contextos. O contexto 1 inserindo os valores de coesão e ângulo de atrito na condição natural, aliado à aplicação dos pesos específicos das camadas de solo não saturados. O contexto 2 por sua vez foi estudado com a inclusão dos parâmetros de resistência na condição inundada, em conjunto com pesos específicos saturados, simulando uma situação de saturação da massa de solo na região da encosta.

## 2.1 Metodologia de análise de estabilidade

Foram analisadas duas encostas estabilizadas com a inclusão de muro gravidade composto por pedra argamassada. A estabilidade global das contenções foi analisada de maneira computacional a partir do programa Slide 2.0® da empresa Rocscience, software capaz de realizar análises de estabilidade de encostas, aterros, barragens de terra e contenções com presença de solo e rocha. Os critérios aplicados nas análises foram de Morgenstern-Price, Spencer, Bishop e Janbu. Considerou-se nos estudos a ruptura do tipo não circular devido a presença de diferentes solos encontrados nos laudos de sondagem SPT.

Como subsídio para obtenção da estratigrafia local para análise das camadas de solo presentes no local do projeto, foram realizadas 3 sondagens SPT realizadas no topo e na base. No meio do talude não foi possível devido a inclinação das encostas. Para a divisão das camadas e obtenção da estratigrafia local, foram analisados em conjunto o índice de resistência à penetração e textura do solo, unindo as camadas com características similares no que tange estes dois aspectos.

Após obtenção da estratigrafia, foi mensurado o valor médio de SPT de cada solo a fim de obter por correlação os parâmetros peso específico, coesão e ângulo de atrito. Tal metodologia de análise de estratigrafia foi aplicada conforme Bittencourt (2018) e as formulações para mensurar o ângulo de atrito seguem abaixo nas Equações 1 e 2.

$$\phi = 0,4N_{SPT} + 28 \quad (1)$$

$$\phi = \sqrt{20N_{SPT}} + 15 \quad (2)$$

Já para o cálculo da coesão foi utilizada a Equação 3, proposta por Berberian (2015), apresentada a seguir.

$$c' = N_{SPT}/0,35 \quad (3)$$

Destacam-se dois critérios de projeto aplicados para utilização das correlações supracitadas, o primeiro foi a inclusão de um fator de minoração entre 1,2 a 1,5 para obtenção do ângulo de atrito para solos com maior presença de finos. Tal condição se aplicou conforme cita Gerscovich (2016) devido a incertezas presentes nas correlações com SPT. O segundo critério se baseou em limitar o valor da coesão para valores na ordem daquele obtido no ensaio de cisalhamento, com exceção para casos de índice de resistência a penetração elevado, que possibilita aplicar maiores valores à coesão. Como não foram realizados ensaios de permeabilidade no solo para mensuração de maneira direta deste parâmetro, não foi aplicada rede de fluxo nas análises.

## 2.2 Ensaios de cisalhamento direto

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados conforme premissas da ASTM D3080M – 11 – “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions”. As amostras indeformadas obtidas para as duas encostas estudadas foram coletadas em profundidade na ordem de 1,5m; em que o local de coleta foi próximo a um dos furos de sondagem SPT realizados, a fim de aplicar na camada de solo de estudo os valores de ângulo de atrito e coesão obtidos em laboratório. As tensões normais aplicadas nos ensaios foram de 54,5kPa, 109kPa e 218kPa. Na Tabela 4 a seguir são apresentados os resultados dos ensaios nas condições natural e inundada para as duas encostas.

Tabela 4. Resultados cisalhamento direto

| Encosta | Condição | Caracterização física | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (graus) |
|---------|----------|-----------------------|--------------|--------------------------|
| 1       | Natural  | Areia argilosa        | 28           | 25,1                     |
| 1       | Inundado | Areia argilosa        | 10,8         | 33,8                     |
| 2       | Natural  | Silte argilo-arenoso  | 75,2         | 36,8                     |
| 2       | Inundado | Silte argilo-arenoso  | 9,7          | 33,4                     |

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados de estabilidade para as duas encostas com os parâmetros não saturados e saturados. Para a Encosta 1 são apresentados na Tabela 5 a seguir os FS nos três cenários: terreno natural, corte executivo e com contenção inserida; no contexto 1 com os parâmetros não saturados.

Tabela 5. Resultados FS encosta 1 – Contexto 1

| Cenário            | Critério          | FS   |
|--------------------|-------------------|------|
| Terreno natural    | Morgenstern-Price | 1,14 |
| Corte executivo    |                   | 1,38 |
| Contenção inserida |                   | 2,30 |
| Terreno natural    | Spencer           | 1,14 |
| Corte executivo    |                   | 1,37 |
| Contenção inserida |                   | 2,30 |
| Terreno natural    | Janbu             | 1,11 |
| Corte executivo    |                   | 1,29 |
| Contenção inserida |                   | 2,05 |
| Terreno natural    | Bishop            | 1,08 |
| Corte executivo    |                   | 1,38 |
| Contenção inserida |                   | 2,25 |

Na Tabela 6 a seguir são apresentados os resultados da encosta 1 para o contexto 2, isto é, com os parâmetros saturados.

Tabela 6. Resultados FS encosta 1 – Contexto 2

| Cenário            | Critério          | FS   |
|--------------------|-------------------|------|
| Terreno natural    | Morgenstern-Price | 1,07 |
| Corte executivo    |                   | 1,23 |
| Contenção inserida |                   | 2,24 |
| Terreno natural    | Spencer           | 1,09 |
| Corte executivo    |                   | 1,23 |
| Contenção inserida |                   | 2,24 |
| Terreno natural    | Janbu             | 1,05 |
| Corte executivo    |                   | 1,17 |
| Contenção inserida |                   | 1,73 |
| Terreno natural    | Bishop            | 1,02 |
| Corte executivo    |                   | 1,23 |
| Contenção inserida |                   | 1,88 |

Ao comparar os dois contextos para a Encosta 1, observa-se entre todos os critérios aplicados uma maior influência da saturação na etapa de corte executivo, com os FS possuindo maiores reduções. Tais resultados reforçam o cuidado em efetuar intervenções em período de estiagem para evitar a ação da água na redução dos FS, especialmente na etapa de execução da obra.

Em seguida são apresentados os FS para a Encosta 2 nos três cenários: terreno natural, corte executivo e com contenção inserida; nos contextos de parâmetros não saturados (Tabela 7) e saturados (Tabela 8).

Tabela 7. Resultados FS encosta 2 – Contexto 1.

| Cenário            | Critério          | FS   |
|--------------------|-------------------|------|
| Terreno natural    | Morgenstern-Price | 4,55 |
| Corte executivo    |                   | 3,57 |
| Contenção inserida |                   | 4,95 |
| Terreno natural    | Spencer           | 4,67 |
| Corte executivo    |                   | 3,62 |
| Contenção inserida |                   | 4,83 |
| Terreno natural    | Janbu             | 3,83 |
| Corte executivo    |                   | 3,15 |
| Contenção inserida |                   | 4,01 |
| Terreno natural    | Bishop            | 4,09 |
| Corte executivo    |                   | 3,40 |
| Contenção inserida |                   | 4,21 |

Tabela 8. Resultados FS encosta 2 – Contexto 2.

| Cenário            | Critério          | FS   |
|--------------------|-------------------|------|
| Terreno natural    | Morgenstern-Price | 1,34 |
| Corte executivo    |                   | 1,35 |
| Contenção inserida |                   | 2,11 |

|                    |         |      |
|--------------------|---------|------|
| Terreno natural    |         | 1,37 |
| Corte executivo    | Spencer | 1,35 |
| Contenção inserida |         | 2,16 |
| Terreno natural    |         | 1,33 |
| Corte executivo    | Janbu   | 1,31 |
| Contenção inserida |         | 1,84 |
| Terreno natural    |         | 1,34 |
| Corte executivo    | Bishop  | 1,35 |
| Contenção inserida |         | 1,93 |

A partir dos resultados da Encosta 2 apresentados nas Tabelas 7 a 8 pode ser observado que em todos os cenários existe uma influência expressiva da saturação do solo em reduzir os FS, com destaque para o terreno natural, que sem o efeito da saturação, a encosta não irá entrar em colapso, mas com o avanço da umidade, a estabilidade cai drasticamente.

#### 4 CONCLUSÕES

Após análise dos resultados de FS para contextos não saturados e saturados para duas diferentes encostas com mesma solução de estabilização em muro de arrimo, conclui-se que o avanço da umidade reduz drasticamente a estabilidade da encosta, não apenas no cenário sem intervenção, mas também no processo executivo de inserção da contenção.

Este fato reforça o cuidado que se deve ter em dois sentidos: o primeiro em analisar de maneira detalhada os parâmetros de resistência do solo no projeto a partir de ensaio de laboratório, e o segundo no que tange a execução da contenção, sendo imprescindível a estabilização ser realizada em período de seca na região metropolitana de Recife.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro.
- Almeida, R. O. (2016). *Estudo geotécnico e análise de encosta bela vista no município de Ipojuca-PE*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de pós graduação em engenharia civil.
- Bittencourt, E. C. (2018) *Comportamento de Radiers Estaqueados Assentes em Solos Arenosos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 160 p.
- Gerscovich, D. M. S. (2016). *Estabilidade de taludes*. 2ª Ed. São Paulo: Oficina de textos.
- Matéria da Prefeitura do Recife, 2023. “Prefeitura do Recife anuncia pacote com 24 obras de contenção de encostas”. Acessado em 25/10/2023 < <https://www2.recife.pe.gov.br/noticias/28/05/2023/prefeitura-do-recife-anuncia-pacote-com-24-obras-de-contencao-de-encostas> >
- Magalhães, J. S. L. A. (2013). *Estudo de estabilidade da encosta alto do Padre Cícero no município de Camaragibe – PE*. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de pós graduação em engenharia civil.
- Santana, R. G. (2006). *Análise de soluções de engenharia para estabilização de encostas ocupadas na região metropolitana do Recife-PE. Estudo de caso: Ruptura ocorrida em encosta com ocupação desordenada na UR 2, Ibura*. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de pós graduação em engenharia civil.
- Santos, A. N. (2018). *Estudos geotécnicos e análise de estabilidade de duas encostas localizadas no Ibura no município de Recife-PE*. Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de pós graduação em engenharia civil.

- Silva, M. M. (2007). *Estudo geológico-geotécnico de uma encosta com problemas de instabilidade no município de Camaragibe-PE*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 402 p.
- Silva, R. R. (2010). *Proposta para estabilização de uma encosta ocupada em Camaragibe – PE com a consideração de um tratamento global*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 213 p.