

Comparação do Fator de Segurança Utilizando Envoltórias de Ruptura Linear e Curva. Caso de Estudo Medellín - Colômbia

Eduardo Montoya Botero

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, embotero@gmail.com

George Fernandes Azevedo

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, george_engenheiro@hotmail.com

Hernán Eduardo Martinez Carvajal

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, carvajal@unb.br

Edwin Fabian Garcia Aristizabal

Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, garcia.udea@gmail.com

Newton Moreira de Souza

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, nmsouza@unb.br

RESUMO: A resistência ao cisalhamento dos solos é devida à contribuição da porção granular e da porção de argila presente no solo. Em tensões muito elevadas, a resistência de atrito entre as partículas impede o deslizamento entre elas, fazendo com que o esmagamento se torne o principal modo de deformação. Assim, a taxa de aumento na força de cisalhamento diminui com o aumento das tensões normais, levando a que a envoltória de tensão de cisalhamento seja curva. Escorregamentos superficiais acontecem em profundidades de 0,5 m a 3 m. Nessas profundidades, a tensão normal efetiva é da ordem de 5 a 20 kPa. Esse intervalo está abaixo do intervalo de tensões nas quais os corpos de prova são comumente testados para projetos de estabilidade de encostas. Parâmetros de resistência são usualmente obtidos com um valor mínimo de tensão efetiva normal, aproximadamente de 50 kPa. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb, com parâmetros de resistência c' e ϕ' para ensaios convencionais, superestima a resistência da tensão cisalhante para baixas tensões normais, no intervalo de tensões que é importante para análises de rupturas superficiais. O resultado do ensaio de cisalhamento direto, interpretado em termos do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, não é apropriado para o estudo de estabilidade superficial de encostas, porque o intervalo de tensões efetivas normais, na prática, não é usado em ensaios laboratoriais. Tendo os parâmetros de resistência da envoltória de Mohr-Coulomb é possível transformá-los para uma envoltória de ruptura curva sem coesão efetiva. O objetivo principal é comparar os resultados do fator de segurança utilizando uma equação de talude infinito e as envoltórias de Mohr-Coulomb e uma envoltória curva, para uma encosta na cidade de Medellín, Colômbia, a qual foi previamente discretizada. Para tanto, a metodologia prevista valeu-se de técnicas de geoprocessamento pelo uso de plataformas SIG, aplicadas a um conjunto de insumos do terreno. A declividade foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) das curvas de nível, os parâmetros de resistência foram estabelecidos mediante ensaios laboratoriais e a poropressão foi calculada usando elementos finitos, com base na ação de uma chuva considerada extrema na região de estudo. Como resultado, podem se comparar em cada pixel o cálculo do fator de segurança com ambas as envoltórias.

PALAVRAS-CHAVE: Escorregamentos, Envoltória curva, Chuvas, Fator de Segurança.

1 INTRODUÇÃO

Movimentos de massa são uma das causas mais frequentes de perdas humanas e econômicas em todo o mundo e, por isso, a determinação da ameaça associada a movimentos de massa, bem como a capacidade de prever esses eventos têm sido um assunto de grande interesse para a comunidade científica (Aleotti & Chowdhury 1999; Chacón et al 2006).

Para ambientes tropicais, caracterizados pelos perfis de intemperismo profundos e alto índice de chuvas, um número importante de pesquisadores estão concentrados na compreensão da chuva como um fator chave para a ocorrência de tais eventos (Crosta 1998; Terlien 1998; Polemio e Petrucci 2000; Iverson 2000 ; Larsen 2008).

No caso do Vale do Aburrá (Medellín - Colômbia), com um total de 3,4 milhões de habitantes, os movimentos de massa correspondem a 3 de cada 10 desastres que ocorrem na região e correspondem a 75% do total de vítimas por ano. Apenas os movimentos de massa foram responsáveis por 1390 mortes e perdas econômicas superiores a US\$ 10 milhões no período de 1880-2007 (Aristizábal e Gómez 2007). Na Colômbia, foram registrados, durante o último século, 36 desastres gerados por movimentos de massa de magnitude considerável, sendo que o mais catastrófico foi desastre de Villatina, em Medellín, que ocorreu em 27 de setembro de 1987, com um número estimado de 640 mortes (Aristizabal et al., 2010).

Escorregamentos superficiais acontecem em profundidades de 0,5 m a 3 m. Nessas profundidades, a tensão normal efetiva é da ordem de 5 a 20 kPa. O resultado do ensaio de cisalhamento direto, interpretado em termos do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, não é apropriado para o estudo de estabilidade superficial de encostas, porque o intervalo de tensões efetivas normais, na prática, não é usado em ensaios laboratoriais.

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb com parâmetros de resistência c' e ϕ' para ensaios convencionais, superestima a resistência da

tensão cisalhante para baixas tensões normais, no intervalo de tensões que é importante para análises de falhas superficiais. O resultado do ensaio de cisalhamento direto, interpretado em termos do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, não é apropriado para o estudo de estabilidade superficial de encostas, porque o intervalo de tensões efetivas normais, na prática, não é usado em ensaios laboratoriais.

Tendo os parâmetros de resistência da envoltória de Mohr-Coulomb, é possível transformá-los para uma envoltória de ruptura curva sem coesão efetiva, como proposto por Lade (2010).

Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo principal comparar os resultados do fator de segurança (FS) utilizando uma equação de talude infinito e as envoltórias de Mohr-Coulomb e de Lade (2010), para uma encosta na cidade de Medellín - Colômbia a qual foi previamente dividida em pixels quadrados. Para tanto, a metodologia prevista valeu-se de técnicas de geoprocessamento pelo uso de uma plataforma baseada em sistemas de informação geográfica, aplicadas a um conjunto de insumos do terreno.

A declividade foi obtida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) das curvas de nível; os parâmetros de resistência foram estabelecidos mediante ensaios laboratoriais e, a poropressão foi calculada usando elementos finitos, com base na ação de uma chuva considerada extrema na região de estudo. Todos os cálculos são feitos para uma profundidade de solo proposta por Azevedo et al. (2015) para a zona de estudo. Como resultado, podem se comparar em cada pixel o cálculo do fator de segurança com ambas as envoltórias.

2 METODOLOGIA

Uma área de 1,5 km² foi escolhida para o estudo. Esta área está situada na costa noroeste da cidade de Medellín (Figura 1), localizando-se no Vale de Aburrá, no qual há cinco outras cidades, além de Medellín, que formam a chamada Área Metropolitana de Medellín.

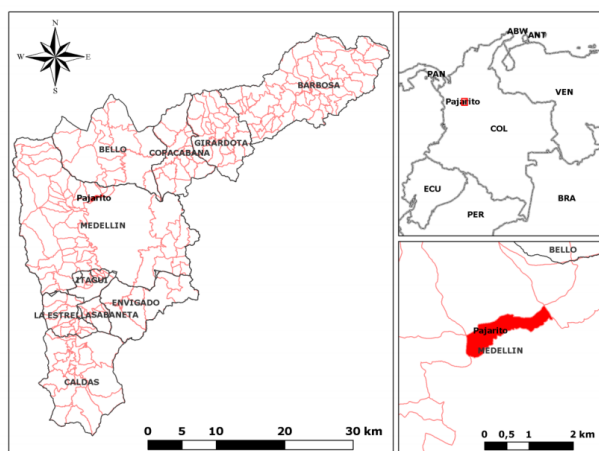


Figura 1. Localização da região de estudo.

Usando a topografia da área de estudo, um modelo digital de elevação (MDT) foi preparado com um tamanho de pixel quadrado de 10 m de lado. Considerando-se a classificação de susceptibilidade de escorregamentos em encostas feitas por García (2004), em que é apresentada a relação entre a ocorrência de deslizamentos de terra e o valor de inclinação do terreno, decidiu-se criar um histograma com nove tipos de declividades que, de acordo com García (2004), fornecem os maiores níveis de susceptibilidade.

Uma vez que os intervalos foram fixados, as declividades foram escolhidas, para as quais a análise numérica de infiltração foi processada. As inclinações das vertentes escolhidas corresponderam ao limite superior de cada classe do histograma.

Foi empregado, nos cálculos, o mapa de espessura de solo da região proposto por Azevedo et. al (2015) o qual tem a mesma resolução de pixel.

A partir da curva de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da estação pluviométrica San Cristóbal (INTEGRAL, 2011), foi estabelecida uma chuva extrema cujo período de recorrência (Tr) foi de 100 anos, Intensidade (I) 48 mm/h e duração (D) 100 minutos.

A caracterização geotécnica feita por Lôbo (2012) e INTEGRAL (2011) foi usada, da qual foram obtidos os parâmetros da curva de retenção de água e ensaio de cisalhamento, sendo que esses resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2. O peso específico do solo foi considerado em 20 kN/m^3 .

Tabela 1. Parâmetros da curva característica do solo.

$\alpha(1/\text{kPa})$	n'	m	$k (\text{m/s})$
0,035	1,26	0,206	3×10^{-5}

Tabela 2. Ensaios de cisalhamento.

Nº do teste	Resistência ao cisalhamento S (kPa)	Tensão efetiva σ' (kPa)
1	42,31	50
2	64,82	100
3	109,83	200

Depois disso, uma análise numérica da infiltração foi realizada, a partir da qual se obteve a pressão dos poros (U) nos taludes escolhidos, caracterizados pela inclinação (β), para o fim da chuva. Para este fim, o código de elemento finito preparado no laboratório de geomecânica da Universidade de Kyoto, apresentado por Garcia (2010), foi usado.

De posse do perfil de poropressão em função da profundidade para as nove declividades do histograma, gerado pela chuva em estudo, foi elaborada uma carta de poropressão fazendo a interpolação do perfil desta variável nas nove declividades do histograma com o valor de inclinação em cada pixel, baseando-se na Tabela 3:

Tabela 3. Associação entre declividades e poropressões.

Inclinação pixel (%)	Perfil (%) pressão de poros associada
≤ 20.5	16
20.50 - 27.25	25
27.25 - 30.50	29
30.50 - 34.00	32
34.00 - 41.50	36
41.50 - 52.50	47
52.50 - 64.00	58
64.00 - 85.00	70
> 85.00	100

A partir da análise numérica de infiltração e da interpolação anteriormente descrita, a variação da pressão nos poros é obtida em cada um dos taludes no fim de cada precipitação obtida da curva IDF.

Considerando-se a geometria dos nove taludes, caracterizados pela inclinação advinda do histograma sugerido por García (2004),

juntamente com os parâmetros de resistência, também foi possível calcular a relação entre as tensões atuantes (τ) e as tensões de cisalhamento (s) para cada um dos cenários de combinações entre declividade e chuva, o que resulta em um coeficiente de segurança, como mostrado na equação 1, proposta por Lade (2010).

$$FS = \frac{s}{\tau} = \frac{a.Pa.\left(\frac{\sigma'}{Pa}\right)^b}{\tau} \quad (1)$$

onde a e b são elementos adimensionais, σ' é tensão efetiva e Pa corresponde a pressão atmosférica na mesma unidade de s e σ' .

Lade (2010) propõe uma envoltória de ruptura sem coesão efetiva, que pode ser modelada por uma função potência da mesma forma da equação 2:

$$\left(\frac{s}{Pa}\right) = a\left(\frac{\sigma'}{Pa}\right)^b \quad (2)$$

A fim de calcular os valores de a e b , o logaritmo em ambos os lados foi empregado na equação 2 e uma expressão que representa uma função linear na escala logarítmica foram produzidos como representado na equação 3.

$$\log\left(\frac{s}{Pa}\right) = \log(a) + b.\log\left(\frac{\sigma'}{Pa}\right) \quad (3)$$

Criando uma relação entre s e τ , a equação que determina o fator de segurança de um talude infinito é mostrada na equação 4:

$$FS = \frac{a.Pa.\left[\frac{\gamma_{sat}.h.(\cos\alpha)^2 - U}{Pa}\right]^b}{\gamma_{sat}.h.\cos\alpha.\sin\alpha} \quad (4)$$

onde γ_{sat} é peso específico saturado do solo, h é profundidade da camada, α refere-se a declividade da encosta e U corresponde a poropressão;

3 RESULTADOS

Nesta seção, serão mostrados os principais resultados alcançados na pesquisa, bem como a explicação das análises estabelecidas.

Do mapa de declividades presente na Figura 2 se conclui que o local de estudo apresenta uma distribuição que tende a se concentrar ao redor do intervalo 10 - 25%, mas sem descartar declividades menores do que 10% e muito maiores que 25%.

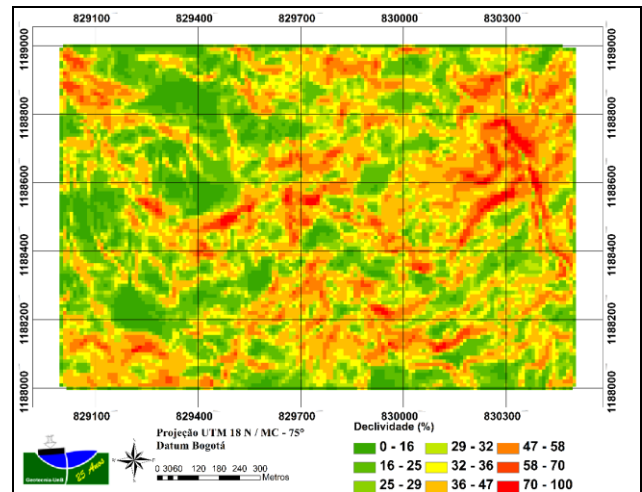


Figura 2. Mapa de declividades.

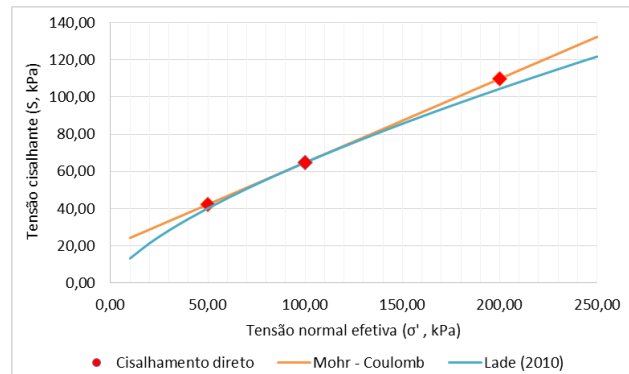


Figura 3. Resultados dos ensaios de cisalhamento direto e as respectivas envoltórias.

Observa-se no gráfico da Figura 3 como os três pontos do ensaio ajustam-se mais à previsão de Mohr Coulomb, mas o ensaio de cisalhamento direto feito por INTEGRAL (2011) não utilizou tensões normais baixas segundo o sugerido em Lade (2010). Mesmo assim, não se descartou a previsão pelo ajuste parabólico (Lade, 2010), uma vez que são

notórias as diferenças na previsão da resistência ao cisalhamento para baixas tensões na Figura 3.

Com os dados contidos na Figura 3 podemos extrair os parâmetros de ruptura do critério Mohr-Coulomb como sendo $c' = 19$ kPa e $\phi' = 24^\circ$ e os parâmetros do critério Lade (2010) $a = 0,65$ e $b = 0,69$.

Nas Figuras 4 e 5, encontram-se, respectivamente, os mapas relacionados aos fatores de segurança obtidos pelas envoltórias de Mohr-Coulomb e pela envoltória curva.

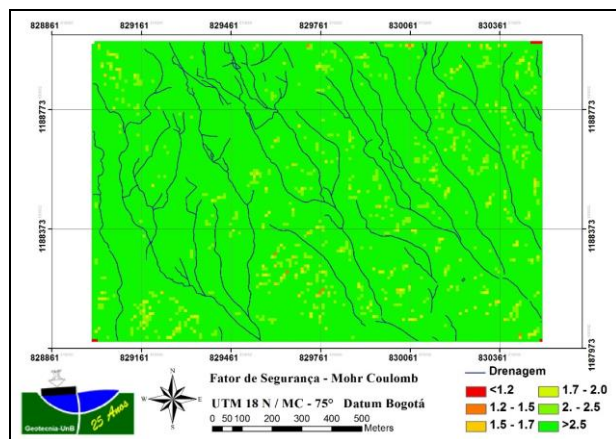


Figura 4. Mapa de fatores de segurança por Mohr-Coulomb.

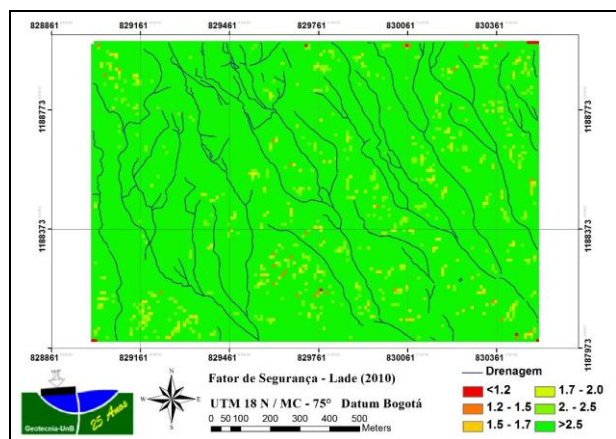


Figura 5. Mapa de fatores de segurança obtidos pela envoltória curva de Lade (2010).

Visualmente, a distribuição espacial entre as classes de valores de FS conseguidas com as diferentes envoltórias de ruptura apresentam grande similaridade. A maior parcela da região em estudo encontra-se classificada com FS superiores a 2,5. No outro extremo, a menor quantidade encontrada corresponde aos pixels com fatores de segurança que representam a

faixa com menor estabilidade (FS inferiores a 1,2).

Há uma relação direta entre os menores fatores de segurança calculados e as regiões com maiores declividades, o que demonstra os preceitos presentes no modelo de estabilidade de taludes utilizado.

Pode-se também fazer uma análise quantitativa em relação à comparação entre os dois mapas. De forma geral, observa-se uma grande concordância entre as duas abordagens quando se trata dos valores de fator de segurança superiores a 2,5.

Uma melhor compreensão das diferenças entre as duas envoltórias de ruptura utilizadas pode ser averiguada a partir dos dados presentes na Tabela 4, a qual traz a distribuição dos pixels pelas classes dos fatores de segurança em números absolutos e em porcentagem.

4 CONCLUSÕES

Ressaltam-se aqui as principais conclusões estabelecidas pelo presente trabalho.

O resultado do ensaio de cisalhamento direto, interpretado em termos do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, não é apropriado para o estudo de estabilidade superficial de encostas, porque o intervalo de tensões efetivas normais, na prática, não é usado em ensaios laboratoriais.

Comprovou-se que o critério de ruptura de Mohr-Coulomb com parâmetros de resistência c' e ϕ' para ensaios convencionais, superestima a resistência da tensão cisalhante para baixas tensões normais, no intervalo de tensões que é importante para análises de falhas superficiais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro concedido pela Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aleotti P. e Chowdhury R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 58, p. 21-44.
- Aristizábal, E. e Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá: originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007, *Revista Gestión y Ambiente*, Vol. 10, p. 17-30.
- Aristizábal, E., Martinez, H. e Gómez, J. (2010). Una breve revisión sobre el estudio de movimientos em masa detonados por lluvias, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, físicas y Naturales*, Vol. 34 (131), p. 209-227.
- Azevedo, G.F., Montoya, B.E., Carvajal, H.E.M., Moreira, N.M. e Garcia E.F. (2015). Estimativa da profundidade do solo pelo uso de técnicas de geoprocessamento, estudo de caso: Setor Pajarito, Colômbia, *XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, INPE, João Pessoa, PB, Brasil, INPE, Vol. 1, p. 4551-4558.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T. e El Hamdouni, R. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 65 (1), p. 341-411.
- Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall threshold: an aid for landslide susceptibility zonation, *Environmental Geology*, Vol. 35(2-3), p. 131-145.
- Garcia, E. (2010). *Numerical Analysis of the Rainfall Infiltration Problem in Unsaturated Soil*, Ph.D. Thesis, Kyoto University. 170p.
- Garcia, H.A.G. (2004). *Avaliação da Susceptibilidade aos Movimentos de Massa Usando Sistemas de Informação Geográfica e Redes Neurais Artificiais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 140 p.
- INTEGRAL (2011), *Elaboración de estudios geológicos geotécnicos, hidrogeotécnicos, análisis de la vulnerabilidad estructural, y diseños de obras en las zonas de riesgo de la ciudad de Medellín*, Relatorio de Consultoria 178 p.
- Iverson, R. (2000). Landslide triggering by rain infiltration, *Water Resources Research*, Vol. 36(7), p. 1897-1910.
- Lade, P.V. (2010). The mechanics of surficial failure in soil slopes, *Engineering Geology*, Vol. 114, p. 57-64.
- Larsen, M.C. (2008). Rainfall-triggered landslides, anthropogenic hazards, and mitigation strategies, *Advances in Geosciences*, Vol. 14, p. 147-153.
- Lôbo, B.R.H. (2012). *Efeito do avanço da frente de umidade na redução da sucção e da resistência ao cisalhamento de um perfil de solo coluvionar em Medellín-Colômbia*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 110 p.
- Polemio, M. e Petrucci, O. (2000). Rainfall as a Landslide Triggering Factor: An Overview of Recent International Research. Landslides in research, theory and practice. *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*, Caraiff, London, England, Vol. 3, p. 1219-1226.
- Terlien, M.T.J. (1998). The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds, *Environmental Geology*, Vol. 35(2-3), p. 124-130.