

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise Numérica de Encostas Submetidas a Precipitações Pluviométricas Usando os Métodos dos Elementos Finitos

Jéssica Maciel Araújo

Engenheira Civil, IESB, Brasília, Brasil, jessicamaciel.jma@gmail.com

Lucas Torres de Mendonça

Engenheiro Civil, IESB, Brasília, Brasil, lucastorres2007@gmail.com

RESUMO:

No Brasil, a ausência de planejamento urbano e a desigualdade entre as classes sociais possui como consequência o crescimento do número de moradias em áreas de riscos, onde às ações antrópicas sem planejamento, suporte técnico e avaliação de riscos geológicos/geomecânicos relacionados a chuvas intensas sucedem os movimento de massa que podem ocasionar sérios danos à sociedade, desde prejuízos materiais e ambientais à perdas de vidas. Em vista disso, nas últimas décadas houve um grande aumento nos estudos sobre estabilidade de encostas, onde inúmeros pesquisadores, juntamente com o uso de programas e experiências vivenciadas em um longo período buscam determinar um índice representativo da previsibilidade da chuva crítica, a fim de advertir previamente os indivíduos da possibilidade de ocorrência de deslizamentos. Desta forma, este trabalho apresenta um estudo experimental sobre análise numérica de estabilidade de encostas submetidas a precipitações pluviométricas utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de estabelecer uma correlação entre a curva IDF (intensidade, duração e frequência) e o Fator de Segurança (FS) das encostas através do *software* utilizando os principais parâmetros geomecânicos e características das encostas.

Palavras-chave: Curva IDF, Encosta, Estabilidade de encosta, Fator de Segurança, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT:

In Brazil, the lack of urban planning and inequity between social classes have, as a consequence, the growth of the amount of residences in high-risk areas, where, when associated with the anthropic actions without planning, lack technical support nor the analysis of geological and geotechnical risks related to intense rainfall, succeeded by landslides which may lead to prejudices onto Society, from material loss to lives. On the last decades, there was an increase in studies on slope stability analysis, where several researches, utilizing softwares and experiences seek to determine an representative index of foreseeability of critical rainfall, with the intention of warning the habitants about the probability of occurrence of landslides. This way, this report presents na experimental study about the numerical analysis about the stability of a slope affected by rainfall utilizing the Finite Element Method, aiming to establish a correlation between the IDF curve and the Safety Factor of a hill a software that is able to apply the main geomechanical parameters and characteristics of the slope.

Keywords: Finite Element Method, IDF curve, Safety Factor, Slope, Slope Stability.

1 INTRODUÇÃO

A expansão das cidades brasileiras, que ocorre de maneira desgovernada e sem atenção à segurança, leva cada vez mais pessoas a morar em locais com grandes riscos, como as áreas das encostas. Um

exemplo deste crescimento desordenado pode ser visto no Rio de Janeiro, onde as favelas, que abrigam a maior parte da população com baixo poder aquisitivo da cidade, são construídas sem a orientação



de profissionais, e em locais em que não existe segurança.

Estas residências, localizadas nas encostas, estão sujeitas a diversos riscos, e isto pode ser verificado com facilidade quando se acompanha aos noticiários. Praticamente todos os anos existem relatos de deslizamentos nestas áreas de risco, causando a morte de centenas de pessoas. Na maioria dos casos de deslizamentos está diretamente relacionados aos períodos de chuvas, em que precipitações com maior intensidade afetam a segurança das encostas nestas regiões (SCHUSTER & HIGHLAND, 2006).

Deste modo, torna-se evidente a necessidade de desenvolver estudos com o intuito de para analisar a estabilidade de encostas e taludes, com o propósito de prever a probabilidade de ocorrência de movimentos de massas em encostas associado às precipitações pluviométricas, buscando realizar medidas mitigadoras para evitar a perda de recursos e, principalmente, de vidas.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo experimental e a análise computacional de determinadas encostas, localizadas na Região Administrativa do Varjão – DF, submetidas a precipitações pluviométricas através do Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de correlacionar o Fator de Segurança com a Curva IDF, obtida através das medidas de precipitação pluviométrica.

Na tentativa de prever uma relação direta entre a segurança dos taludes e as precipitações pluviométricas, serão determinados os principais parâmetros geomecânicos do objeto de estudo, juntamente com a curva IDF da região escolhida, onde será calculado, através do *software* RS2 da Rocscience, o Fator de Segurança de uma encosta, relacionando-a à diversas intensidades de precipitação, previstas na curva IDF da região onde esta encosta está localizada.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da área de estudo

A área definida como objeto de estudo, localiza-se na Região Administrativa do Varjão, no Distrito Federal. Segundo os dados da Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios (PDAD, 2015), o Varjão possui uma área com cerca de 90,68 ha, com aproximadamente 84,95% da área composta por construções permanentes e 11,73% por construções improvisadas. No total, 17,84% destas construções encontram-se em áreas de declive, com encostas

variando de 30 a 55 metros de profundidade. Conforme os registros do PDAD (2015) o Varjão possui aproximadamente 9.215 habitantes, apresentando uma densidade demográfica de 10,16 hab/km².

2.1.1 Características Climáticas

Segundo os dados do Climate-Data, o Varjão possui uma altitude de 1015 metros acima do nível do mar, onde apresenta uma temperatura média de 21,8 °C, com precipitação média anual de 1443mm, com períodos mais chuvosos nos meses de novembro e dezembro, com precipitações com cerca de 250mm. Segundo a classificação de Koppen e Geiger, o clima nesta região é considerada Aw, ou seja, clima tropical.

Conforme o Atlas do Distrito Federal (2020), a média de chuva acumulada entre os anos de 1979 a 2017 na região do Varjão, apresenta uma precipitação total anual que varia entre 1.351 mm a 1.450 mm, podendo chegar até 1.600 mm. As chuvas críticas que ocorrem nesta região geralmente são de curta duração e alta intensidade, podendo apresentar precipitações pluviométricas acima de 100 mm/dia.

Para a determinação da intensidade das chuvas (I) da região de estudo, de acordo com a recomendação da NOVACAP, utilizou-se para este estudo a equação 1, com os parâmetros característicos da região em questão.

$$I = \frac{21,7 TR^{0.16}}{(t + 11)^{0.815}} \times 60 \quad (1)$$

Desta forma, com os valores obtidos através da equação 1, utilizando as chuvas intensas com durações (t) entre 5 a 120 minutos e tempo de retorno (TR) de 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, resultou-se na curva IDF a ser utilizada neste estudo, conforme mostra a figura 1.

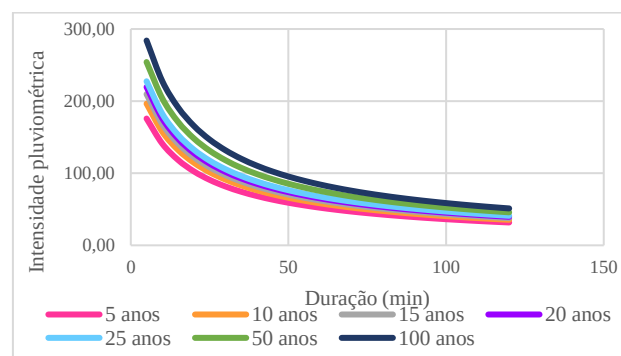


Figura 1. Intensidade pluviométrica (mm/h) do Distrito Federal.



2.1.2 Parâmetros Geomecânicos

Conforme Botero (2018), os parâmetros geotécnicos demonstram as principais características do solo, facilitando o entendimento do comportamento e resistência do solo. Esses parâmetros apresentam valores variáveis, pois os mesmos dependem de diversos fatores como origem, níveis de tensões, entre outros. Desta forma, utilizou-se os parâmetros geotécnicos adotados por Silva (2007 apud AZEVEDO, 2015) em seu trabalho, os quais foram obtidos através de ensaios geomecânicos realizados no Varjão, conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos adotados.

Parâmetro geomecânicos	Valores
Coesão efetiva	10 kPa
Ângulo de atrito efetivo	20°
Peso específico do solo	16,5 kN/m ³
Espessura do solo	0,5 m

Fonte: Adaptado de AZEVEDO, 2015.

2.2 Análise Numérica

Com relação aos parâmetros geomecânicos (coesão, ângulo de atrito e peso específico), foram utilizados os dados obtidos através dos estudos realizados por Silva (2007 apud AZEVEDO, 2015) na região do Varjão, apresentado na tabela 1, os quais foram inseridos no *software* escolhido, baseada no MEF e com seus critérios de falha através do método de análise de estabilidade Mohr-Coulomb, com a finalidade de obter os valores de fator de segurança.

Para que o *software* representasse de maneira precisa as características de rompimento do solo, empregou-se a curva de sucção seguindo o modelo Van Genuchten apropriado para o solo característico da região, definido como argila arenosa, conforme os estudos feitos por Silva (2007).

Na do Varjão, existem inúmeras encostas, com diferentes declividades e geometrias, e por este motivo foram adotadas cinco declividades para a realização das análises numéricas. Portanto, as declividades escolhidas possuem ângulos de 5°, 10°, 15°, 25° e 35°, de forma a englobar as mais variadas geometrias presentes no local de estudo.

Para que as simulações sejam realizadas, foram selecionadas cinco precipitações pluviométricas de maneira aleatória, conforme constam na curva IDF do Distrito Federal, mostrada na figura 1. Através das

precipitações definidas, foram avaliadas suas intensidades, durações e o volume de água, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2. Precipitações selecionadas para aplicação no software

	Chuvas				
Intensidade (mm/h)	118	227	67	66	51
Duração (s)	900	600	3600	5100	7200
Volume de água (m³)	29,5	37,8	67,0	93,5	102

Para a realização da simulação numérica foi utilizada uma malha de 500 elementos, com 300 iterações para cada simulação. Esta malha foi determinada mediante testes realizados com o programa, em que foram testadas malhas de 300, 500 e 1000 elementos, e os resultados entre eles apresentaram baixa variabilidade, especialmente quando comparadas as malhas de 300 e 500 elementos.

3 RESULTADOS

Através dos parâmetros geomecânicos, declividades, intensidade e duração das precipitações pluviométricas do Varjão, foram realizadas inúmeras simulações com diferentes combinações de dados, onde resultou nos fatores de segurança que constam na tabela 3.

Tabela 3. Fatores de Seguranças obtidos nas simulações

	Volume de água (m ³)				
Declividade	29,5	37,8	67	93,5	102
5°	3,44	3,43	3,44	3,44	3,43
10°	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
15°	1,15	1,15	1,15	1,14	1,15
25°	0,48	0,58	0,59	0,55	0,58
35°	0,33	0,36	0,31	0,29	0,37

É importante notar que os valores de Fator de Segurança (FS) descritos na tabela 3 indicam a estabilidade da encosta, e seu desempenho varia de acordo com os seus valores. Desta forma, o FS é dado como a relação entre a resistência máxima do solo e a tensão cisalhante gerada, sendo assim quando o FS é



menor do que 1,00, temos uma probabilidade maior de ocorrência de movimentações de massa.

Como pôde ser visto na tabela 3, o FS permanece relativamente constante baseado no volume de água, com variações desprezíveis na maior parte das situações. Em algumas situações, os valores tiveram uma grande variação, porém no contexto geral de todas as simulações podemos assumir que o volume de água não afetou significativamente o FS da encosta.

Comparando os Fatores de Segurança com relação à declividade foi possível verificar um decréscimo significativo dos valores, indicando que encostas mais íngremes possuem uma tendência de gerar movimentações de terra com mais facilidade.

Após a análise dos resultados encontrados através das simulações, foi gerado o gráfico destacado na figura 2, o qual relaciona a declividade e o volume de água com o Fator de Segurança.

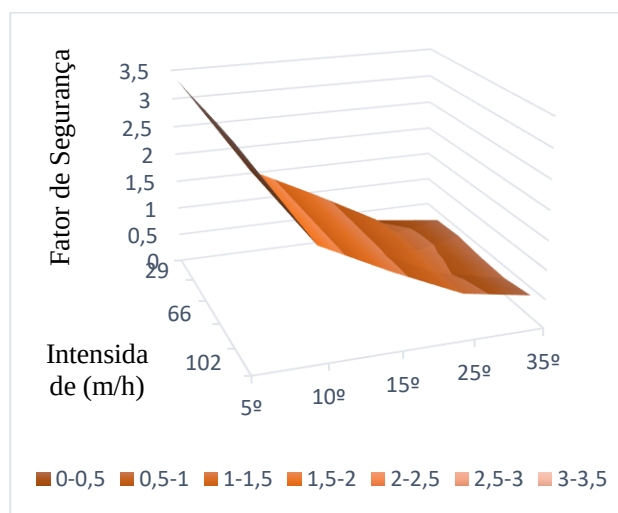


Figura 2. Relação entre declividade, precipitação e Fator de Segurança

Com o auxílio da figura 2, foi possível verificar de maneira mais clara a relação entre o Fator de Segurança e os parâmetros utilizados nas simulações, como o quão crítico o FS fica, a medida em que a declividade aumenta. Também foi possível verificar a baixa variabilidade com relação ao volume de água.

4 Conclusões e Recomendações

A seguir apresentam-se as conclusões gerais sobre o estudo realizado:

- Calculou-se o valor do Fator de Segurança da encosta, determinando que a declividade da encosta possui mais influência no FS, quando comparado com

as chuvas ocorridas na região, conforme registrados na curva IDF do Distrito Federal;

- Verificou-se que o FS varia com diferentes valores de intensidade pluviométrica e duração das chuvas, porém não foi possível determinar com precisão a relação entre estes dados e o Fator de Segurança, de maneira a indicar um crescimento ou decréscimo deste parâmetro quando relacionado com as chuvas;
- Correlacionou-se o Fator de Segurança de diversas encostas presentes na região de estudo com suas declividades, levando em consideração também o volume de água precipitada em cada uma destas encostas. O resultado permitiu determinar que a declividade crítica está entre 15° e 25°, e a partir desta declividade, o risco de deslizamento causado pelas chuvas é maior.

Recomenda-se que sejam feitas as seguintes análises em trabalhos futuros:

- Considerar a chuva antecedente durante as simulações, de maneira a determinar se um conjunto de chuvas seguidas pode impactar nos deslizamentos das encostas que foram determinadas serem mais estáveis. As chuvas antecedentes podem influenciar na segurança ao aumentar o nível do lençol freático presente na encosta, diminuindo a resistência do solo acima deste, podendo causar os deslizamentos em encostas que se encontram estáveis quando apenas uma chuva é analisada;
- Simular encostas com diferenças entre as declividades mais suaves, obtendo-se dados mais detalhados sobre a declividade crítica das encostas, especialmente entre as declividades de 15° e 25°;
- Utilizar uma malha com mais elementos, com o intuito de estabilizar os resultados das simulações, e verificar com mais precisão a relação entre o FS e as precipitações ocorridas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS Brasileiro de Desastres Naturais. [S. l.: s. n.], 2013. “Atlas”. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/atlas/>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

AZEVEDO, George Fernandes. “Sistema de análise quantitativa de risco por escorregamentos rasos deflagrados por chuvas em regiões tropicais.” 2015.

CODEPLAN DF; “Pesquisa distrital por Amostra de Domicílios (PDAD).” 2015. Disponível em: <<http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/02/PDAD-Varjão-1.pdf>>. Acesso em: fev/2021.

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
 IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
 IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
 XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
 23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
 COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

MONTOYA BOTERO, Eduardo. “*Metodologia para aplicação de redes neurais artificiais para sistemas de alerta de escorregamentos deflagrados por chuvas em regiões montanhosas.*” 2018.

SILVA, C.P.L., ALENCAR, C.L.S. & SOUZA, N.M. (2007). “*Utilização de geoprocessamento e cartografia geotécnica em estudos de susceptibilidade a escorregamentos na vila Varjão (DF).*” 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, ABGE, Uberlândia, Brasil, 1: 169-183.

SCHUSTER, R.L., HIGHLAND, L.M. “*The Third Hans Cloos Lecture. Urban landslides: socioeconomic impacts and overview of mitigative strategies.*” Bull Eng Geol Environ 66, 1–27 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10064-006-0080-z>