XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/13

Análise de Estabilidade de Taludes Homogêneos com Geometrias Irregulares com uso do Método de Redução de Resistência

Ana Paula Silva Moraes 1
Estudante, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil,
anaana2@discente.ufg.br

Carlos Alberto Lauro Vargas 2
Professor, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil,
carloslauro@ufg.br

RESUMO: Tradicionalmente a determinação da Estabilidade de um talude é feita com uso do Método de Equilíbrio Limite - MEL. Estes métodos admitem várias hipóteses simplificadoras para resolver o problema, dentre elas: equilíbrio de um corpo rígido, superfície de deslizamento circular conhecida, entre outras, não considerando a deformabilidade do solo ou sua ruptura progressiva. Atualmente, com o desenvolvimento das ferramentas numéricas, é possível realizar análises tensão-deformação elastoplástica, obtendo deslocamentos cisalhantes máximos e regiões de plastificação, para qualquer tipo de estrutura geotécnica e qualquer perfil geotécnico. Normalmente estas ferramentas numéricas são usadas para simular o comportamento mecânico de estruturas geotécnicas como taludes em meios heterogêneos, inclusão de elementos estruturais de suporte, condições de fluxo de água, entre outras condições e prever o comportamento em termos de tensões e deformações, ou seja, sem o objetivo de determinar a estabilidade do talude. Mesmo assim, a análise de estabilidade pode ser realizada aplicando o Método de Redução de Resistência (MRR) na análise numérica tensão-deformação elastoplástica, que consiste na redução progressiva dos parâmetros de resistência do modelo geotécnico, por meio de um coeficiente de redução, que será o Fator de Segurança (FS), até atingir o estado limite de ruptura do talude. A região de plastificação obtida definirá a superfície de deslizamento do talude. Sendo assim o MRR não precisa nenhuma hipótese simplificadora para o cálculo dos esforços, considera a deformabilidade do modelo geotécnico e não precisa da adoção de superfícies de ruptura prováveis. A metodologia do MRR, aplicado na análise tensão deformação elastoplástica, apresenta-se como uma alternativa de análise de estabilidade de obras geotécnicas na tentativa de analisar de maneira rigorosa o estado de tensões em estruturas. A ferramenta numérica FLAC 2D (ITASCA 2011), permite análise elasto plástica de obras geotécnicas como taludes e permite a aplicação do MRR para a análise de estabilidade destas obras. Neste trabalho foi analisada a Estabilidade pelos MEL e MRR de 3 taludes homogêneos com geometria variável e comparados os resultados encontrados. Observou-se que o MRR apresentou valores de FS um pouco menores que o MEL e superfícies de deslizamento mais elipticas do que circulares, com exceção do talude infinito onde o MRR apresentou uma superfície perfeitamente plana. Como conclusão a medida que a geometria do talude homogêneo vai sendo mais irregular o FS do MRR vai reduzindo com relação ao FS do MEL.

PALAVRAS-CHAVE: Taludes; Estabilidade; Elasto Plastico; Redução de Resistência.

ABSTRACT: Traditionally, slope stability is determined using the Limit Equilibrium Method (LEM). These methods employ several simplifying assumptions to solve the problem, including: equilibrium of a rigid body, known circular slip surface, among others, without considering soil deformability or progressive rupture. Currently, with the development of numerical tools, it is possible to perform elastoplastic stress-strain analyses, obtaining maximum shear displacements and plastic regions for any type of geotechnical structure and any geotechnical profile. These numerical tools are typically used to simulate the mechanical behavior of geotechnical structures such as slopes in heterogeneous environments, including structural support elements, water flow conditions, and other conditions, and to predict behavior in terms of stresses

and strains; that is, without the objective of determining slope stability. Even so, stability analysis can be performed by applying the Resistance Reduction Method (RRM) in elastoplastic stress-strain numerical analysis. This method consists of progressively reducing the resistance parameters of the geotechnical model through a reduction coefficient, which will be the Safety Factor (FS), until the slope failure limit state is reached. The resulting plastic deformation region will define the slope's slip surface. Therefore, the RRM does not require any simplifying assumptions for calculating stresses, considers the deformability of the geotechnical model, and does not need to adopt probable failure surfaces. The RRM methodology, applied to elastoplastic stress-strain analysis, presents itself as an alternative for stability analysis of geotechnical structures, attempting to rigorously analyze the stress state in structures. The FLAC 2D numerical tool (ITASCA 2011) allows elastoplastic analysis of geotechnical structures such as slopes and enables the application of the RRM for the stability analysis of these structures. This study analyzed the stability of three homogeneous slopes with variable geometry using MEL and MRR methods, and compared the results. It was observed that the MRR method presented slightly lower safety factor (FS) values than the MEL method and more elliptical than circular sliding surfaces, with the exception of the infinite slope where the MRR method presented a perfectly flat surface. In conclusion, as the geometry of the homogeneous slope becomes more irregular, the FS of the MRR method decreases relative to the FS of the MEL method.

KEYWORDS: Slopes; Stability; Elastoplastic; Resistance Reduction.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Massad (2010) os Métodos de Equilíbrio Limite (MEL), em uso atualmente, por meio das equações de equilíbrio determinam as tensões de cisalhamento induzidas com base no conhecimento das forças atuantes. E por fim comparam-se essas tensões com a resistência ao cisalhamento do solo em questão.
O fator de segurança FS(razão entre a resistência ao cisalhamento "s" e a tensão cisalhante atuante "τ") é apresentado na Equação (1)

$$FS = \frac{s}{\tau} \tag{1}$$

A resistência ao cisalhamento "s" em termos de tensões efetivas, é dada pela Equação (2).

$$s = c' + \sigma' \cdot tg\,\phi' \tag{2}$$

onde: "c'" é a coesão interna do solo; "σ'" é a tensão normal e "ϕ" é o ângulo de atrito interno do solo.
O solo se comporta como um material rígido-plástico, onde as equações de equilíbrio estático são válidos até a iminência da ruptura e o fator de segurança (FS) é constante ao longo da superfície de ruptura (linha em 2D). Para o uso do MEL o solo deve ser homogêneo e apresentar superfície regular.
Os Métodos de Análise de Estabilidade de taludes com base em análise tensão deformação elasto plástica (critério de ruptura de Mohr-Coulomb), aplicando o método de Redução de Resistência (MRR), não apresentam algumas das limitações do MEL, por exemplo o solo não precisa apresentar uma superfície regular para que esse método seja aplicado, desse modo é possível fazer uma análise de um modelo mais próximo da realidade. no MRR os parâmetros de resistência do solo são reduzidos (divididos por um Fator de Redução FR) até que se alcance a ruptura, encontrando um FS (ou FR) que indica quanto o talude pode resistir nas condições em que o solo se encontra.

Os taludes hipotéticos a serem analisados serão uma representação de um talude infinito; um talude com geometria regular, apenas uma inclinação; e com geometria irregular, duas inclinações. Os resultados encontrados por Pedrosa (2020) em sua análise 2D com o MEL serão comparados com os encontrados pelo MRR neste estudo. Para isso serão comparadas superfícies de deslocamento e valores do fator de segurança encontrados com cada método.

2 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE (MEL) E MÉTODO DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA (MRR)

2.1 MEL

Na análise de estabilidade de talude é feito o processo de determinação da tensão de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície de ruptura mais provável e a comparação dela com a resistência do solo ao cisalhamento para verificação da segurança do talude (Das, 2007). Como citado em Pedrosa (2020), o MEL de Morgenstern e Price inicia com equilíbrio de momentos em torno da base da fatia e depois determina as equações de equilíbrio de forças nas direções normal e tangencial na base da fatia. Assumindo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, este método adiciona uma equação em termos da coesão do solo, ângulo de atrito e fator de segurança.

Assume-se que a direção das forças entre fatias é descrita através de uma função matemática arbitrária onde a constante "λ" multiplicada a uma função de "x" se iguala à razão entre as forças entre fatias verticais e horizontais (X/E). Em geral, é utilizada uma função de meio seno juntamente com "λ" para designar a direção das forças entre fatias. A solução de Morgenstern e Price (1965) é baseada no somatório das forças tangencial e normal em cada fatia. Este método combina as equações de equilíbrio de forças e então a técnica numérica de Newton-Raphson é usada para resolver as equações de momento e força para a determinação do fator de segurança e do valor de "λ". As soluções anteriormente apresentadas, são, de maneira geral, aplicadas para taludes com geometria convencional (Pedrosa,2020).

2.2 MRR

No MRR a resistência ao cisalhamento s do material é reduzida progressivamente no cálculo do fator de segurança FS que é definido de acordo com as seguintes equações para o critério de Morh Coulomb (Equação (3) e Equação (4))

$$c^{trial} = \frac{1}{F_{trial}} c \tag{3}$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{F_{trial}} \cdot tan\phi\right) \tag{4}$$

Além disso é feita uma análise tensão deformação elasto plástica com algum critério de ruptura, como o critério de Mohr Coulomb, até que ocorra a falha, onde F_{trial} é o fator de redução que reduz simultaneamente a coesão e o atrito e representa o Fator de Segurança (FS). Como indicado a abordagem adotada pelo MRR é baseada na análise elasto plástica do material, levando em conta a irregularidade da superfície do talude e a heterogeneidade do solo, como resultado da análise aplicando o MRR no programa de diferencias FLAC 7.0 obtém-se um gráfico como apresentado na Figura 1, onde apresenta-se o perfil irregular de um talude e a provável superfície de ruptura, assim como o valor do FS, Moraes (2025).

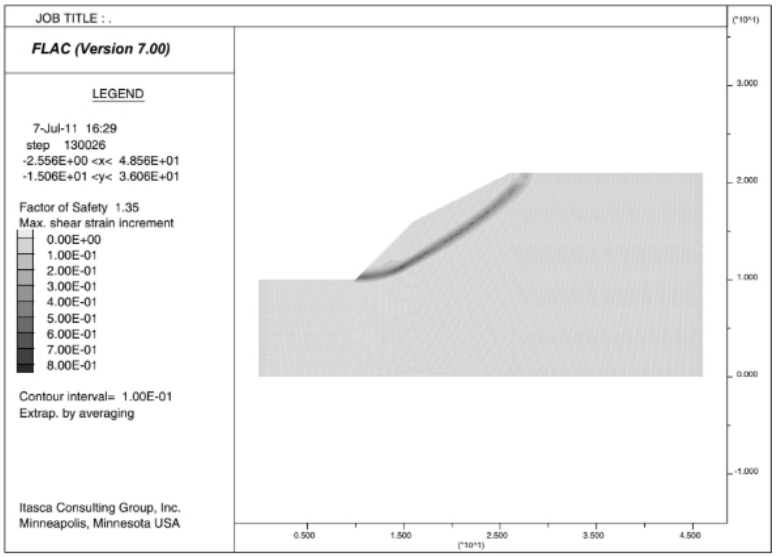


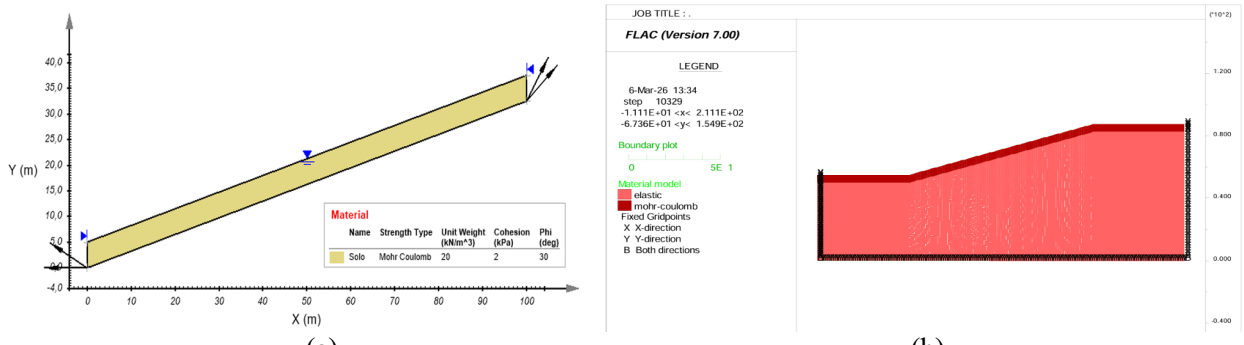
Figura 1. Resultados do fator de segurança FLAC versão 7.0 (Itasca, 2011)

3 MATERIAIS E MÉTODO

Para este estudo foi utilizado o trabalho de Pedrosa (2020) onde definiu para os três taludes hipotéticos o mesmo tipo de solo arenoso, variando entre eles somente a geometria e obteve o resultado pelo MEL para caso 2D, que foram analisados por Pedrosa (2020) no programa computacional SVSlope. Neste trabalho foi utilizado o MRR para os 3 taludes hipotéticos de Pedrosa (2020) do caso 2D. Serão utilizados os mesmos parâmetros e geometrias para serem analisados no programa computacional FLAC 7.0.

3.1 Talude infinito

Para o cálculo da estabilidade pelo Método de Redução de Resistencia (MRR) do talude infinito de Pedrosa (2020) foi considerada uma camada de 5 m de espessura com e extensão de 100 m e inclinada 18° com a horizontal, Figura 2a. Esta camada infinita está apoiada sobre um terreno firme e resistente. Os parâmetros da camada infinita de 5m são: peso específico de 20 kN/m3 coesão de 2 kPa e ângulo de atrito de 30°. Foi considerado o lençol freático profundo. A geometria do modelo está apresentada na Figura 2b.



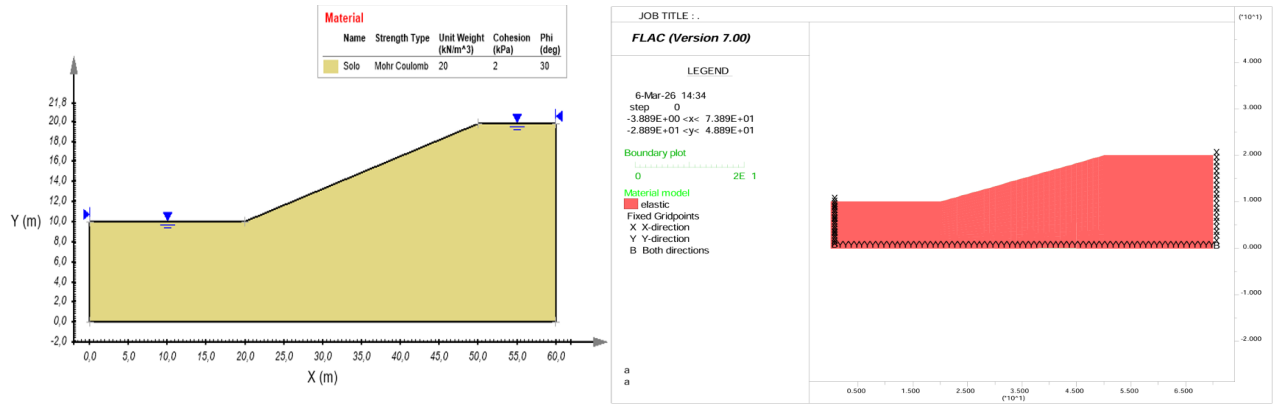
(a) (b)

Figura 2. Geometria da malha para o talude infinito: camada de 5 m de espessura sobre terreno resistente. (a) no SVSlope. Fonte: Pedrosa (2020). (b) no FLAC 7.0. Fonte: Autores.

3.2 Talude com um plano inclinado

Para o cálculo da estabilidade pelo Método de Redução de Resistencia (MRR) do talude homogeneo com um plano inclinado foi considerado um talude com 30 m de extensão e 10 m de altura (inclinada 18°).

Os parâmetros da camada homogênea são: peso específico de 20 kN/m3 coesão de 2 kPa e ângulo de atrito de 30°. A geometria e os parâmetros do solo foram retirados de Pedrosa (2020) que apresentou o modelo no SVSlope representado na Figura 3a. Foi considerado o lençol freático profundo. A geometria do modelo está apresentada na Figura 3b.

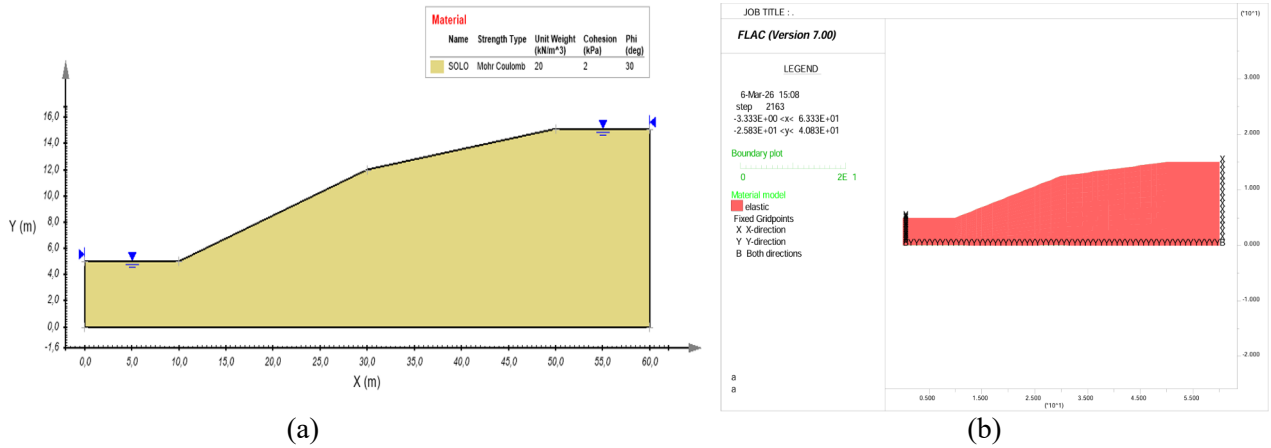


(a) (b)

Figura 3. Geometria da malha para o talude homogêneo com extensão de 30 m e altura de 10 m (inclinação de 18°). (a) no SVSlope. Fonte: Pedrosa (2020). (b) no FLAC 7.0. Fonte: Autores.

3.3 Talude com dois planos inclinados

Para o cálculo da estabilidade pelo Método de Redução de Resistencia (MRR) do talude homogeneo com dois planos inclinados foi considerado um talude com 20 m de extensão e 7.5 m de altura (inclinada 20,5°), seguido de um talude de 20 m de extensão e 2,5 m de altura (inclinação 7,1°). Os parâmetros da camada homogênea são: Peso específico de 20 kN/m3 coesão de 2 kPa e ângulo de atrito de 30°. A geometria e os parâmetros do solo foram retirados de Pedrosa (2020) que apresentou o modelo no SVSlope representado na Figura 4a. Foi considerado o lençol freático profundo. A geometria do modelo está apresentada na Figura 4b.



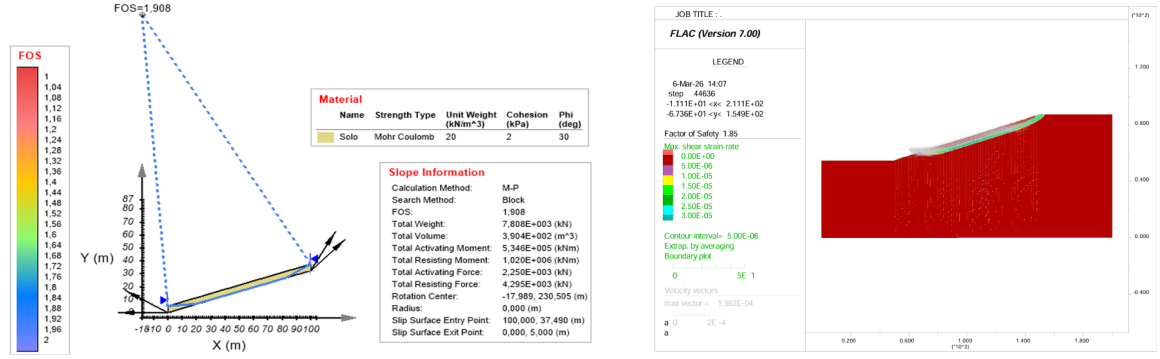
(a) (b)

Figura 4. Geometria da malha para o talude homogêneo com dois planos inclinados de 20° e 7,1° com a horizontal, respectivamente. (a) no SVSlope. Fonte: Pedrosa (2020). (b) no FLAC 7.0. Fonte: Autores.

4 RESULTADOS

4.1 Talude infinito

Pedrosa (2020) encontrou como resultado da analise com o MEL o FS de 1,908 e a superfície de rupitura apresentada na Figura 5a. A Figura 5b apresenta o resultado da análise de estabilidade pelo MRR onde se observa um Fator de Segurança de 1,8457 ou 1,85, resultado próximo ao MEL. A superfície de deslizamento tem espessura de 5 m e atinge um comprimento aproximado de 100 m, bem próximo da superfície de deslizamento encontrada com o MEL.

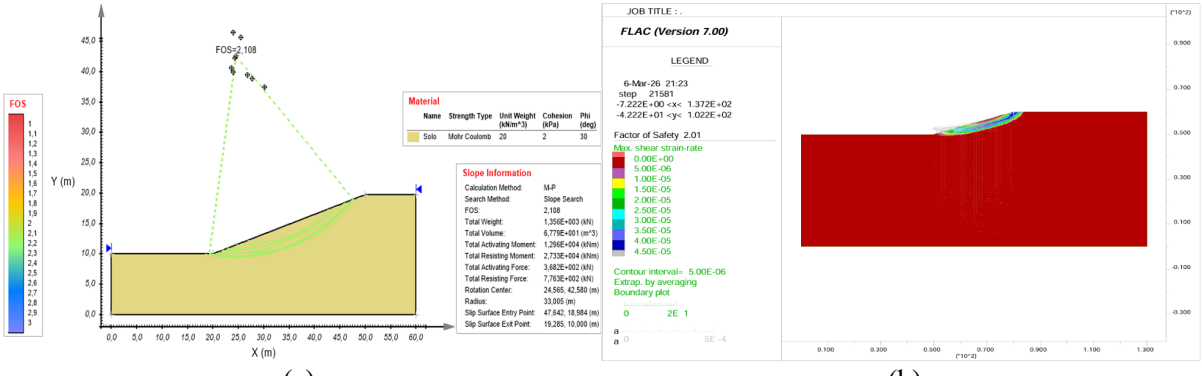


(a) (b)

Figura 5. Resultado da análise de estabilidade do talude infinito (a) com o MEL. Fonte: Pedrosa (2020). (b) com o MRR. Fonte: Autores.

4.2 Talude com um plano inclinado

Pedrosa (2020) encontrou como resultado da analise com o MEL o FS de 2,108 e a superfície de rupitura apresentada na Figura 6a. A Figura 6b apresenta o resultado da análise de estabilidade pelo MRR onde se observa um Fator de Segurança de 2,00928 ou 2,01, resultado muito próximo do MEL de 2,108. Observa-se vetores de velocidade concentrados numa superfície de deslizamento elíptica, assim como as tensões cisalhantes máximas. As dimenssões do deslisamento pelo MRR foram de 5 m de espessura e 33 m de comprimento,m, bem próximo da superfície de deslizamento encontrada com o MEL, que tem formato circular com profundidade máxima de 5 m e comprimento de 28 m.



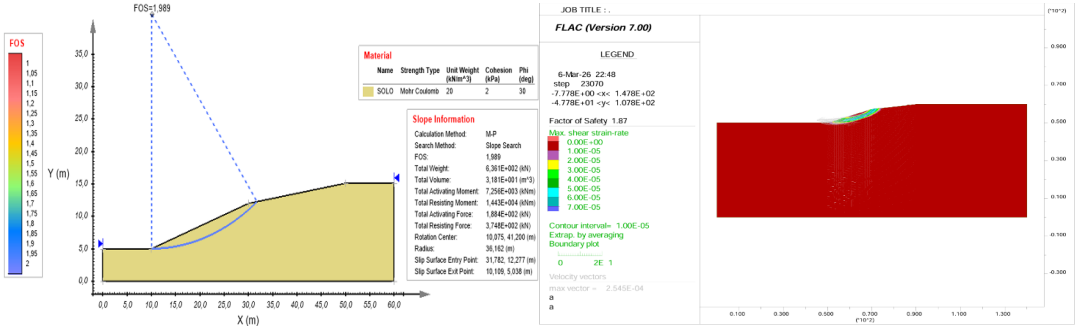
(a) (b)

Figura 6. Resultado da análise de estabilidade do talude com uma inclinação (a) com o MEL. Fonte: Pedrosa (2020). (b) com o MRR. Fonte: Autores.

4.3 Talude com dois planos inclinados

Pedrosa (2020) encontrou como resultado da analise com o MEL o FS de 1,989 e a superfície de rupitura apresentada na Figura 7a. A Figura 7b apresenta o resultado da análise de estabilidade pelo MRR onde se observa um Fator de Segurança de 1,87305 ou 1,87, resultado muito diferente do MEL de 1,989e vetores de velocidade concentrados numa superfície de deslizamento elíptica. A Figura 7b confirma o resultado com a concentração de tensões cisalhantes máximas na mesma superfície de deslizamento de formato elíptico no pê

do talude com espessura de 4 m e comprimento de 24 m (ou seja no primeiro plano inclinado), bem próximo da superfície de deslizamento encontrada com o MEL, que tem formato circular com profundidade máxima de 4 m e comprimento de 22 m.



(a) (b)

Figura 7. Resultado da análise de estabilidade do talude com duas inclinações (a) com o MEL. Fonte: Pedrosa (2020). (b) com o MRR. Fonte: Autores.

5 CONCLUSÕES

Comparando o caso 1 do talude infinito, os resultados do MEL e do MRR foram muito próximos. Pelo MEL o FS foi de 1,91 e pelo MRR o FS foi de 1,85 (diferencia de 2,5%). As superfícies de deslizamento tiveram 5 m de espessura com extensão de 100 m.

Comparando o caso 2 do talude homogêneo com um plano inclinado, os resultados do MEL e do MRR foram muito próximos. Pelo MEL o FS foi de 2,11 e pelo MRR o FS foi de 2,01 (diferencia de 4,5%). As superfícies de deslizamento tiveram 5 m de espessura com extensão de 33 m.

Comparando o caso 3 do talude homogêneo com dois planos inclinados, os resultados do MEL e do MRR foram também muito próximos. Pelo MEL o FS foi de 1,99 e pelo MRR o FS foi de 1,87 (diferencia de 6%). As superfícies de deslizamento tiveram 4 m de espessura com extensão de 24 m.

Como conclusão a medida que a geometria do talude homogêneo vai sendo mais irregular o FS do MRR vai ficando menor que o FS do MEL.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Iniciação à Pesquisa da Universidade Federal de Goiás (PIP-UFG) e à Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) UFG por incentivar e proporcionar a oportunidade de realizar essa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAS, Braja M. *Fundamentos de engenharia geotécnica* / Braja M. Das ; tradução All Tasks ; revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. - São Paulo: Thomson Learning, 2007.

ITASCA. FLAC: *online manual table of contents*. 5. ed. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2011.

MASSAD, Faiçal. *Curso básico de geotecnia: obras de terra*. 2ª ed.-São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MORAES, Ana Paula Silva et al. *Comparação da Análise de Estabilidade pelo MEL e MRR da Encosta na Rodovia Rio-Santos, km 434.*

MORGENSTERN, N. R.; Price, V. E. *The Analysis of the Stability of General Slip surfaces. Géotechnique*, Vol 15(1): pp 79-93. 1965.

PEDROSA, Paula Tavares. *Estudo dos fatores de segurança em análises por equilíbrio limite em modelos bi e tridimensionais* / Paula Tavares Pedrosa; orientadora: Raquel Quadros Velloso; co-orientadora: Ana Cristina Fontenla Sieira. – 2020.