



Comparação da Análise de Estabilidade pelo MEL e MRR da Encosta na Rodovia Rio-Santos, km 434

Ana Paula Silva Moraes

Estudante, UFG, Goiânia, Brasil, anaana2@discente.ufg.br

Gabrielly Gonçalo Goulart Oliveira

Estudante, UFG, Goiânia, Brasil, gabriellygoncalo@discente.ufg.br

Matheus Borba Candido Pimenta

Estudante, UFG, Goiânia, Brasil, matheusborba@discente.ufg.br

Carlos Alberto Lauro Vargas

Professor, UFG, Goiânia, Brasil, carloslauro@ufg.br

RESUMO: O presente trabalho trata da análise de estabilidade de um estudo de caso de uma encosta com superfície de solo movimentada, apresentado por Pedrosa (2020) é um talude localizado na Rodovia Rio-Santos, km 434, no Rio de Janeiro. Esse talude é composto por 6 camadas, sendo elas, de cima para baixo, silte arenoso com restos vegetais, solo residual maduro, solo residual jovem, solo residual jovem compacto, solo residual jovem muito compacto e rocha sã. Os parâmetros utilizados para análise de estabilidade do talude foram o ângulo de atrito (ϕ) de cada camada, o peso específico (γ) de cada tipo de solo e sua coesão (c), assim como a geometria da encosta na sessão analisada, onde foi feita uma análise pelo Método do Equilíbrio Limite (MEL) para condições com nível d'água e material heterogêneo, obtendo um FS mínimo de 0,829 e apresentou uma superfície de ruptura de face. Para esse mesmo talude foi usado o Método de Redução de Resistência (MRR), onde a resistência ao cisalhamento do material é reduzida progressivamente no cálculo do fator de segurança FS e é feita uma análise tensão deformação elastoplástica, com o critério de Mohr Coulomb, até que ocorra a falha. O MRR leva em conta a irregularidade da superfície do talude e a heterogeneidade do solo. Como considerações finais o MRR apresentou, para condições heterogêneas, resultados mais coerentes com os observados em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Método do Equilíbrio Limite, Método de Redução de Resistência, Análise elastoplástica.

ABSTRACT: This work deals with the stability analysis of a case study of a slope with a disturbed soil surface, presented by Pedrosa (2020). It is a slope located on the Rio-Santos Highway, km 434, in Rio de Janeiro. This slope is composed of 6 layers, from top to bottom: sandy silt with plant remains, mature residual soil, young residual soil, compact young residual soil, very compact young residual soil, and sound rock. The parameters used for the slope stability analysis were the friction angle (ϕ) of each layer, the specific weight (γ) of each soil type and its cohesion (c), as well as the slope geometry in the analyzed section, where an analysis was performed by the Limit Equilibrium Method (LEM) for conditions with water level and heterogeneous material, obtaining a minimum FS of 0.829 and presenting a face failure surface. For this same slope, the Strength Reduction Method (SRM) was used, where the shear strength of the material is progressively reduced in the calculation of the safety factor F, and an elastoplastic stress-strain analysis is performed with the Mohr-Coulomb criterion, until failure occurs. Deformability parameters were estimated for each layer of the slope from available drillings (Pedrosa, 2020). The RRM takes into account the irregularity of the slope surface and soil heterogeneity. As final considerations, the RRM presented, for heterogeneous conditions, results more consistent with those observed in the field.

KEYWORDS: Slope stability, Limit Equilibrium Method, Strength Reduction Method, Elastoplastic analysis.



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 compararam-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)

$$FS = \frac{s}{\tau} \quad (1)$$

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

$$s = c' + \sigma' \cdot \tan \phi' \quad (2)$$

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 ser homogêneo 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.

O Estudo de Caso analisado é o de uma encosta localizada no km 434 da rodovia Rio-Santos, no Rio de Janeiro. O solo desse talude natural é heterogêneo e apresenta camadas diversas, logo espera-se que o MRR apresente resultados mais próximos do comportamento elasto plástico dos materiais e da estabilidade da encosta. 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.

Será realizada a análise de estabilidade pelo MRR para o talude no km 434 e a comparação dos resultados obtidos com os resultados pelo MEL apresentados por Pedrosa (2020) em sua dissertação de mestrado.

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

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, como no elemento representado em (a) da Figura 1. 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.

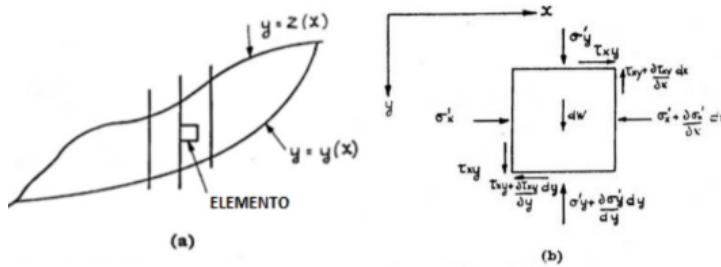


Figura 1. (a) Elemento junto à fronteira de duas fatias; (b) Forças efetivas atuando em um elemento. Fonte: Morgenstern e Price (1965).

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 (Pedroso, 2020). No MRR a resistência ao cisalhamento do material é reduzida progressivamente no cálculo do fator de segurança FS que é definido de acordo com as seguintes equações, Equação (3) e Equação (4), para o critério de Morh Coulomb.

$$c^{trial} = \frac{1}{F_{trial}} c \quad (3)$$

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

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 diferenças FLAC 7.0 obtém-se um gráfico como apresentado na Figura 2, onde apresenta-se o perfil irregular de um talude e a provável superfície de ruptura, assim como o valor do FS .

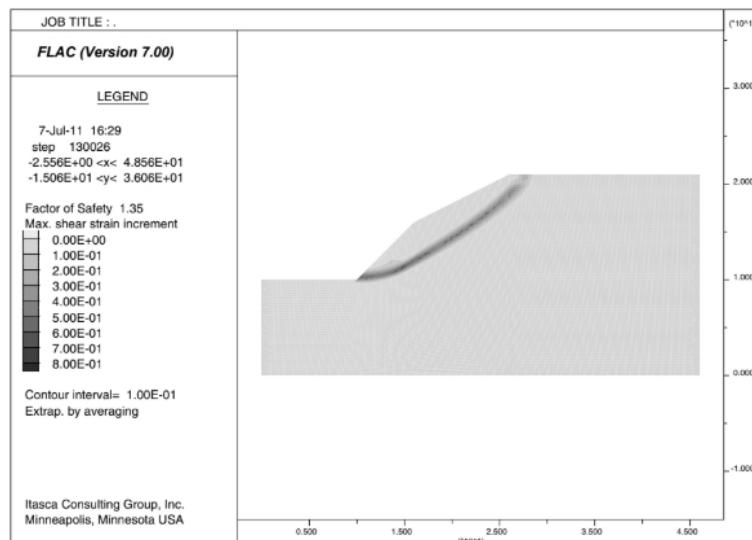


Figura 2. Resultados do fator de segurança FLAC versão 7.0 (Itasca 2011).



3 MATERIAIS E MÉTODO

O talude no km 434 apresentado por Pedrosa (2020) possui 5 camadas de solo sobre uma de rocha onde a primeira camada, da superfície da encosta para o fundo, foi definida como um silte arenoso com restos vegetais, possível colúvio, com espessura variando de 1,0 m a 5,0 m; a segunda camada como um solo residual maduro, com espessura entre 3,5 m a 4,0 m; a terceira camada como um solo residual jovem, com espessura variando de 5,0 m a 8,5 m; a quarta camada como um solo residual jovem compacto, com espessura variando de 0 a 14,0 m; a quinta camada como um solo residual jovem muito compacto, com espessura variando de 5,0 m a 7,5m; e uma sexta camada representando a rocha sã. Essa classificação se deu a partir de sondagem SPT feita na região (Figura 3).

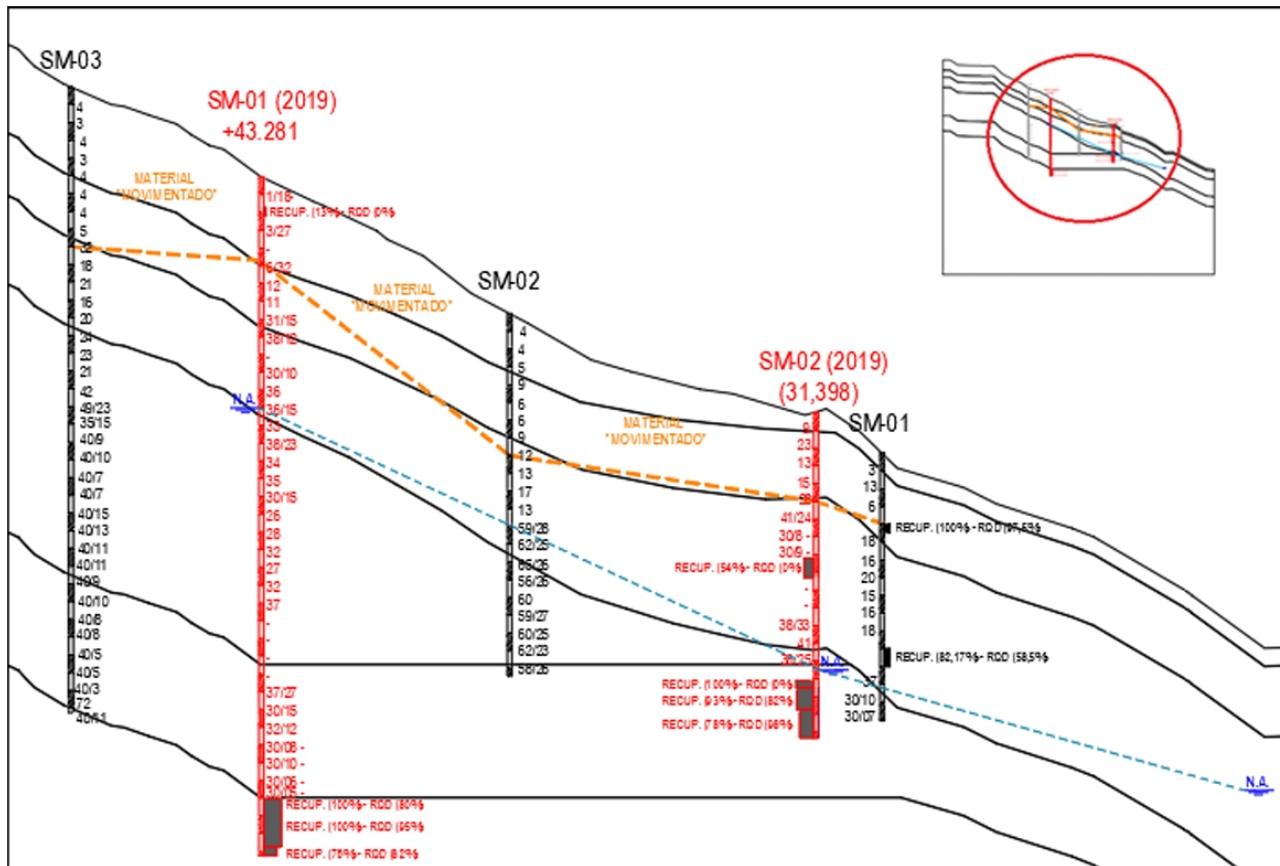


Figura 3. Seção transversal analisada e superfície provável de deslizamento. Fonte: Pedrosa (2020).

Os parâmetros adotados, por Pedrosa (2020), por meio de ensaios de sondagem e corelações locais, para as camadas de solo utilizados para a primeira etapa do cálculo de FS pelo MEL foram a coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e peso específico (γ) e estão apresentados na Tabela 1. Para uma segunda etapa de cálculo do FS pelo MEL foram utilizados diferentes valores de coesão para a segunda camada de solo até atingir um FS o mais próximo de um. A análise pelo MRR também será feita para a primeira e segunda etapas com os mesmos valores adotados no MEL por Pedrosa (2020). Para a sexta camada foi adotada uma rocha sã, procedimento padrão do programa *SVSlope* e que também foi utilizado por Pedrosa (2020).

Tabela 1. Parâmetros adotados das 5 camadas de solo para para a primeira etapa de cálculo do FS pelo MEL.
Fonte: Pedrosa (2020).

Camada	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m³)
Solo 1	1	21	14
Solo 2	2	25	13
Solo 3	3	41	12
Solo 4	4	36	11
Solo 5	5	41	13

Como resultado para esta primeira etapa de calculos Pedrosa (2020) encontrou um fator de segurança de 0,829 não chegando ao fator unitário esperado (Figura 4a). O FS da superfície de ruptura mais próxima do unitário para esse talude foi de 0,982 a uma profundidade de 8,0 m atravessando a camada de solo residual maduro. Essa superfície de ruptura é apresentada na Figura 4b marcada em azul. Nota-se que a movimentação do solo é mais provável nas camadas superficiais do talude, porém em uma localização e profundidade diferentes da esperada, Figura 3 linha marrom, logo a autora realizou retro análises, que resultaram na mudança do valor de c da segunda camada de solo de 2 kPa para 1 kPa, buscando encontrar um FS unitário para uma superfície mais condizente com a movimentação real do talude como marcado na Figura 3, essa foi a segunda etapa de calculo do FS. Para encontrar uma superfície na profundidade desejada foi definido no programa que a profundidade mínima de ruptura fosse de 7,0 m. O FS da superfície de ruptura mais próxima do talude real encontrado com o novo valor de c da segunda camada de solo (ou parâmetros ajustados) foi de 0,991, esta superfície está marcada em azul na Figura 4b, com uma profundidade máxima de aproximadamente 8,0 m.

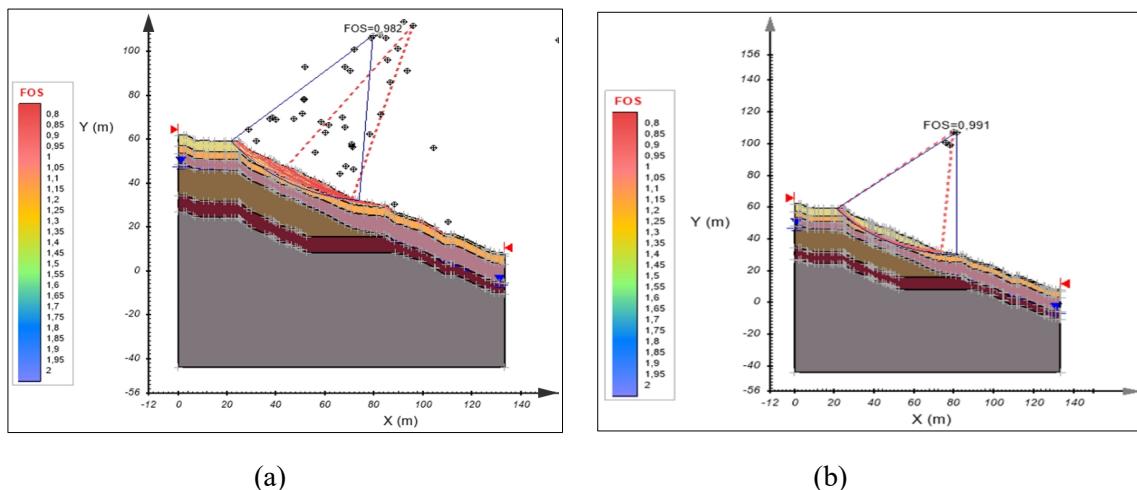


Figura 4. Resultado da análise de estabilidade pelo MEL na seção transversal do maciço
Analizado (a) parâmetros adotados e (b) parâmetros ajustados. Fonte: Pedrosa (2020).

Para análise pelo MRR foi construída uma malha de 133x112 (elementos de 1x1m). Inicialmente a superfície da camada de solo 1 foi suavizada e descrita no programa computacional FLAC 7.0 a partir da geração de linhas retas para formar a superfície da camada de solo como apresentado na Figura 5. Para as demais camadas foi analisado o perfil apresentado por Pedrosa (2020) e as linhas para formar a superfície da segunda camada foi espaçada com a distância de 5,0 m na vertical das linhas da superfície da primeira, a terceira superfície à 3,0 m da segunda marcando o início da terceira camada de solo, a quarta superfície formada por linhas à uma distância de 5,0 m da terceira superfície, o início da quinta camada de solo representada por linhas à 14 m da quarta superfície e para o início da rocha sã as linhas ficaram à 7 m do início da quinta camada.

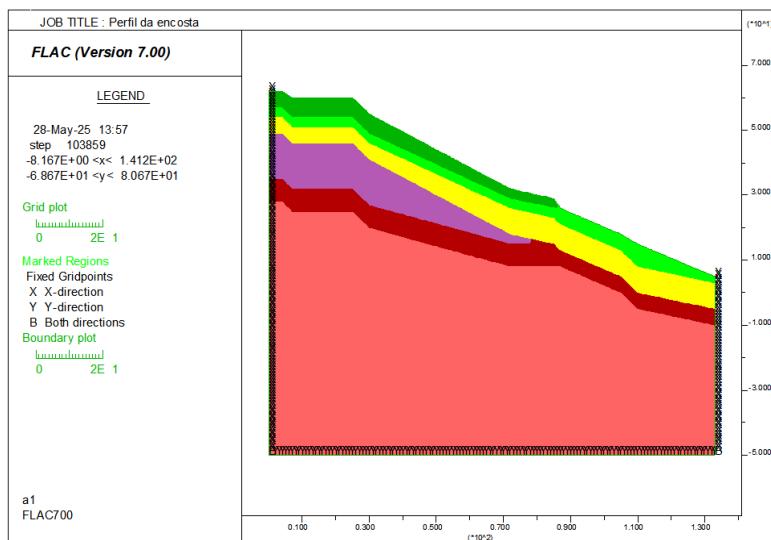


Figura 5. Representação gráfica das cinco camadas de solo e da camada de rocha sã pelo FLAC 7.0.

Fonte: Autores.

Para indicar as condições iniciais de tensões no solo, foi definido no programa que os materiais seriam elásticos e após estabilização com a força da gravidade passaram a ser definidos como elasto plásticos. Com os parâmetros de cada camada salvos e o estado de tensões estabilizado o MRR foi rodado no programa para encontrar os vetores de deslocamentos do solo, a superfície onde ocorreria a ruptura inicial do talude e o FS provável do mesmo.

Para o cálculo do FS pelo MRR no FLAC 7.0 são necessários os valores de densidade (d) calculados com a equação (5) onde g é a aceleração da gravidade; o módulo de elasticidade (E) estimado com a equação (6), onde α e k são coeficientes do tipo de solo assim como o coeficiente de Poisson (v). O E e v são utilizados para calcular os módulos cisalhante (G) e de compressão (K) com a equação (7) e equação (8) respectivamente. Os valores de α , k , e v da Equação (6) foram obtidas de Teixeira e Godoy (1996).

$$d = \frac{\gamma}{g} \quad (5)$$

$$E = \alpha \cdot k \cdot N_{SPT} \quad (6)$$

$$G = E / (2(1+v)) \quad (7)$$

$$K = E / (3(1-2v)) \quad (8)$$

Os parâmetros utilizados para o cálculo com o MRR são listados na Tabela 2. Os valores de N_{SPT} foram retirados da análise da Figura 3, o valor de g utilizado foi de 10 m/s^2 , o valor de v foi considerado como $0,3$, o valor de α igual a 5 e da constante k de $0,45 \text{ MPa}$. Os valores de c e ϕ foram os mesmos estimados e depois ajustados das análises feitas pelo MEL por Pedrosa (2020).

Tabela 2. Valores dos parâmetros utilizados. Fonte : Autores.

Camada de solo	N_{SPT}	$d (\text{kg/m}^3)$	$E (\text{Pa})$	$G (\text{Pa})$	$K (\text{Pa})$
01	3	1400	7.00E+06	2.69E+06	5.83E+06
02	12	1300	2.70E+07	1.04E+07	2.25E+07
03	20	1200	4.50E+07	1.73E+07	3.75E+07
04	40	1100	9.00E+07	3.46E+07	7.50E+07
05	40	1300	9.00E+07	3.46E+07	7.50E+07

4 RESULTADOS

Os fatores de segurança encontrados com o MRR foram de 0,62 para os parâmetros adotados para a primeira etapa de calculo e de 0,72 para os parâmetros ajustados para a segunda etapa de calculo, Figura 6. Mesmo após a correção da malha para evitar ruptura localizadas a Figura 6b apresenta está concentração de deformações cisalhantes. Para observar melhor a superfície de ruptura foram plotados os vetores de deslocamento onde foi possível observar melhor a superfície provável de deslizamento (Figura 7) para esse caso. As tensões no solo, verticais e horizontais, estão apresentadas na Figura 8, não foi notada diferença significativa entre as tensões entre os parâmetros estimados e ajustados.

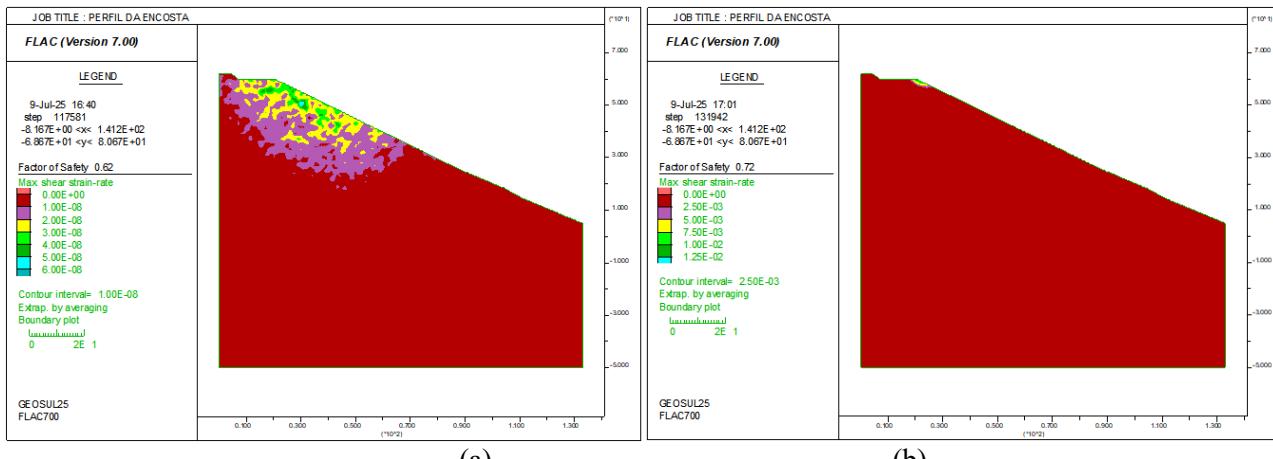


Figura 6. Resultado da análise de estabilidade pelo MRR na seção transversal do maciço analisado (a) parâmetros adotados na primeira etapa de calculo e (b) parâmetros ajustados para a segunda etapa de calculo. Fonte: Autores.

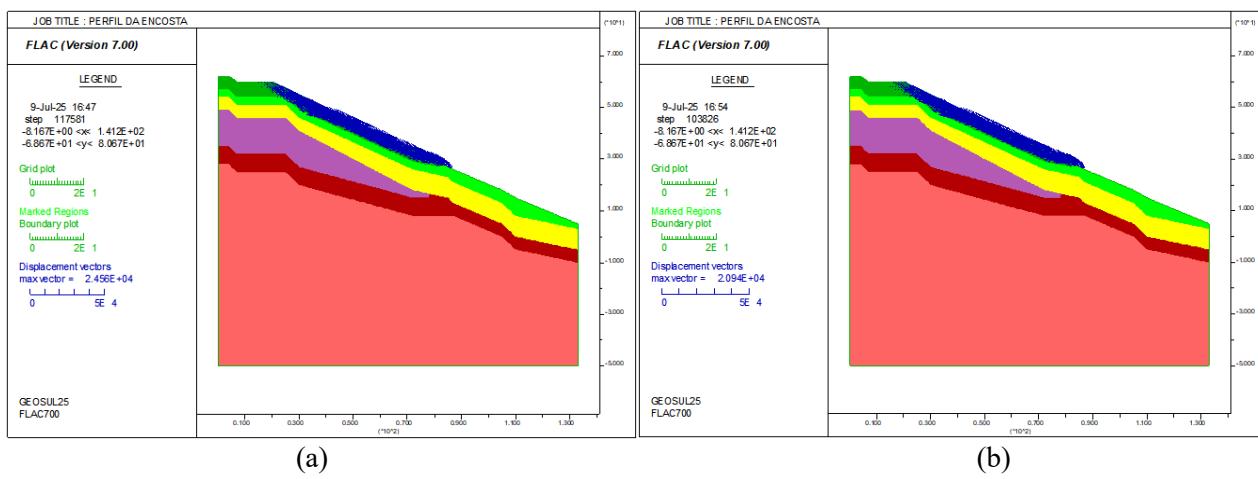
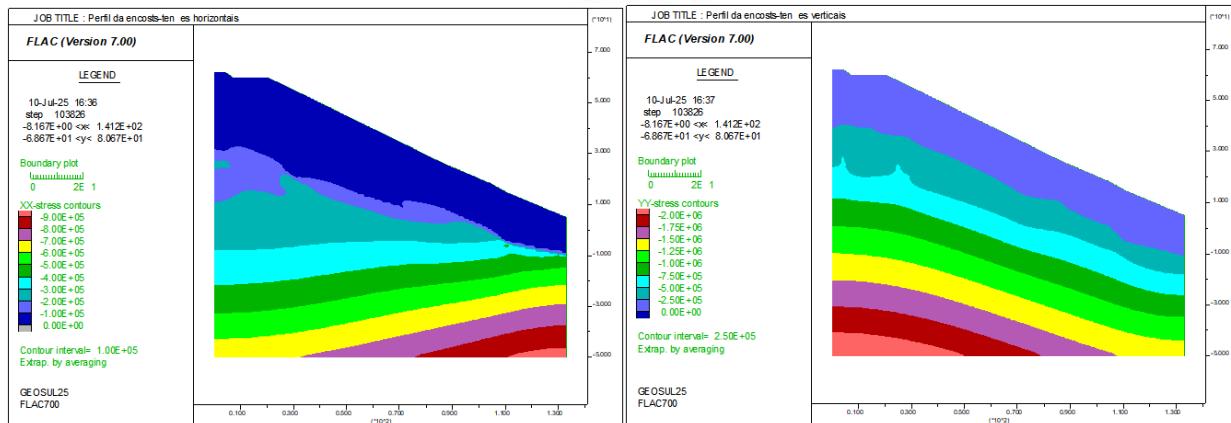


Figura 7. Vetores de deslocamento em azul escuro na seção transversal do maciço analisado (a) parâmetros adotados e (b) parâmetros ajustados.



(a) (b)
Figura 8. Tensões no maciço (a) horizontais e (b) verticais.

5 CONCLUSÕES

Foi encontrado com o MRR um FS 36,86% menor do que o encontrado com o MEL para os parâmetros adotados na primeira etapa de cálculo. Para os parâmetros ajustados por Pedrosa (2020) para a segunda etapa de cálculo o FS encontrado pelo MRR foi 27,35% menor que pelo MEL. Para os dois casos, quanto ao fator de segurança, observa-se resultados conservadores pelo MRR assim seria possível com o MRR tomar providências mais cautelosas para estabilização do talude. Quanto à superfície de ruptura, os vetores de deslocamento apresentados pelo FLAC 7.0 representam bem a extensão do deslocamento de solo onde era esperado e em uma profundidade de aproximadamente 7 m alcançando a segunda camada de solo do talude.

Novas pesquisas são necessárias para compreender melhor as diferenças do FS entre os dois métodos (MEL e MRR) que a partir de princípios diferentes, procuram um fator de segurança (FS) do talude.

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. Os autores agradecem a Fundação de Apoio à Pesquisa (FUNAPE) da Universidade Federal de Goiás por apoiar a publicação desse artigo e participação no XIV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul (GEOSUL).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DAS, Braja M. *Fundamentos de engenharia geotécnica* / Braja M. Das ; tradução All Tasks ; revisão técnica Périco 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*. 2^a ed.-São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- 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 bidimensionais e tridimensionais* / Paula Tavares Pedrosa; orientadora: Raquel Quadros Velloso; co-orientadora: Ana Cristina Fontenla Sieira. – 2020.
- TEIXEIRA, A. T.; GODOY, N. S. *Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas. Fundação: Teoria e Prática*. São Paulo, SP, PINI, 1996.