

ANÁLISE DE ESTABILIDADE PELO MÉTODO DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA PARA UM MURO DE SOLO REFORÇADO COM RCD E SOLO FINO

Gustavo Batista de Oliveira

Estudante do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, UFG, Goiânia, Brasil,
gustavo.batista@discente.ufg.br

Laura Beatriz Utikawa Brugnolli

Estudante do Curso de Engenharia Civil, UFG, Goiânia, Brasil, laura.utikawa@discente.ufg.br

Carlos Alberto Lauro Vargas

Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental (EECA), UFG, Goiânia, Brasil, carloslauro@ufg.br

RESUMO: A questão da erosão nas margens dos córregos causada pelo fluxo concentrado da água é um problema bastante comum em Goiânia (Sales, 2021). Uma alternativa ambiental é o uso de uma Estrutura de Contenção em Solo Reforçado (ESR) empregando resíduos de construção e demolição (RCD) e solo fino. O presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade do muro de ESR com RCD-R, solo fino e geogrelha, usando o Método de Redução de Resistência (MRR) mais indicado para meios heterogêneos e também usando o Método tradicional de Equilíbrio Limite (MEL) mais indicado para solos homogêneos. O estudo de caso experimental foi o muro ESR em RCD-R e solo fino executado por Santos (2011). Este muro experimental foi instrumentado com células de pressão e sistema de medidas de deformação do reforço e deslocamento do muro. A análise de estabilidade do muro ESR pelo MRR foi realizada utilizando o Método das Diferenças Finitas Explícito (FLAC), considerando o modelo elasto-plástico de Mohr Coulomb para o solo e o modelo elástico para os elementos estruturais das geogrelhas. Os resultados desta análise de estabilidade apresenta o modo de ruptura global em formato circular para o MEL e em formato de cunha para MRR. O Fator de Segurança (FS) obtido pelo MEL foi 17% maior que o FS pelo MRR, mostrando a diferença dos métodos quando o problema é um meio heterogêneo, envolvendo o material do muro (EST), o aterro compactado em RCD e o solo de fundação, o que não seria possível com o MEL.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Estabilidade, Muro de solo Reforçado e RCD, Análise Numérica, Método de Equilíbrio Limite e Método de Redução de Resistência.

ABSTRACT: The issue of erosion on the banks of streams caused by concentrated water flow is a common problem in Goiânia (Sales, 2021). An environmental alternative is the use of a Reinforced Soil Structure (RSS) employing construction and demolition waste (CDW) and fine soil. This study aims to analyze the stability of the RSS wall with CDW-R, fine soil, and geogrid, using the Most Suitable Method for Heterogeneous Media (MSM) which is the Method of Reduction of Resistance (MRR) and also using the traditional Limit Equilibrium Method (LEM) which is more suitable for homogeneous soils. The experimental case study was the CDW-R and fine soil RSS wall executed by Santos (2011). This experimental wall was instrumented with pressure cells and a system for measuring reinforcement deformation and wall displacement. The stability analysis of the RSS wall by MRR was performed using the Finite Difference Explicit Method (FDEM), considering the Mohr-Coulomb elasto-plastic model for the soil and the elastic model for the structural elements of the geogrids. The results of this stability analysis present the global failure mode in a circular shape for the LEM and in a wedge shape for the MRR. The Factor of Safety (FS) obtained by the LEM was 17% higher than the FS by the MRR, showing the difference between the methods when dealing with a heterogeneous medium involving the wall material (EST), the CDW compacted fill, and the foundation soil, which would not be possible with the LEM.

KEYWORDS: Stability Analysis, Reinforced Soil Wall and CDW, Numerical Analysis, Limit Equilibrium Method and Method of Reduction of Resistance.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Sales (2021), a erosão urbana representa um dos desafios ambientais mais significativos nas áreas urbanas, sendo exacerbada pelo crescimento contínuo e progressivo das áreas afetadas. Essa situação é muitas vezes agravada pela inadequação dos sistemas de drenagem ou pela propensão natural do terreno ao desenvolvimento desses processos erosivos.

Segundo a NBR 10004, os RCD são classificados como Classe II B - Inertes. O RCD apresenta a definição da Resolução 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que diz: "Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, [...]". A partir de Santos (2011) foi feita por Oliveira (2024) uma análise elasto-plástica da tensão-deformação do processo construtivo de um Muro Reforçado com RCD e solo fino.

Santos (2011) apresenta que a Indústria da Construção Civil (ICC) destaca-se como uma das principais fontes de degradação do meio ambiente, tanto urbano quanto natural. Além de consumir entre 20 e 50% de todos os recursos naturais utilizados pela sociedade, a ICC é reconhecida por sua significativa contribuição para a geração de resíduos (RCD). O uso do RCD em solos reforçados é uma alternativa para a reciclagem desse resíduo tão prejudicial ao meio ambiente.

Com a intenção de obter a estabilidade e o dimensionamento de uma estrutura com o ESR é possível o uso do método de equilíbrio limite (MEL) ou o método de redução de resistência (MRR). O MRR consiste na análise tensão deformação elasto-plástica com redução progressiva dos parâmetros de resistência do solo até atingir a ruptura, o fator de redução indica o fator de segurança da estrutura. Esta análise foi realizada utilizando o FLAC com o método das diferenças finitas 2D. O MRR evita o uso de hipóteses simplificadoras para o cálculo das forças atuantes e as forças resistentes, que são calculadas com análise tensão-deformação pois considera um modelo elasto plástico do solo. Também não é necessária a predefinição de uma superfície de ruptura circular, diferente do método de equilíbrio limite (MEL) que precisa de uma superfície de ruptura circular definida.

O presente trabalho tem como objetivo analisar a estabilidade do muro, ESR com RCD-R, solo fino e geogrelha, usando o Método de Redução de Resistência (MRR) e sua comparação com os métodos tradicionais como o MEL. O estudo de caso experimental foi o muro ESR em RCD-R e solo fino executado por Santos (2011)

1.1 MURO REFORÇADO ESR

Conforme descrito por Benjamim (2006), a técnica de Estrutura de Solo Reforçado (ESR), surgiu como uma abordagem relevante, especialmente com os avanços nas geogrelhas. Este método demonstra vantagens que o posicionam como uma opção de custo competitivo em comparação com outras técnicas de construção de estruturas de contenção disponíveis. A utilização do Resíduo de Construção e Demolição (RCD) se tornou uma alternativa viável tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, uma vez que envolve a reutilização do material de forma estrutural e funcional. Um aspecto importante no dimensionamento de uma ESR é a análise da estabilidade interna, Figura 1, e externa, Figura 2. Na Figura 1 observa-se duas linhas de ruptura que atravessam a estrutura do ESR. A linha 1 apresenta uma ruptura interna por cisalhamento dos elementos de reforço (geogrelhas) e a linha 2 representa um linha de ruptura por atrito solo geogrelha.

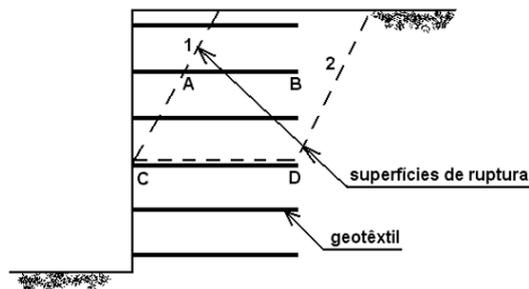


Figura 1. mecanismos de ruptura interna

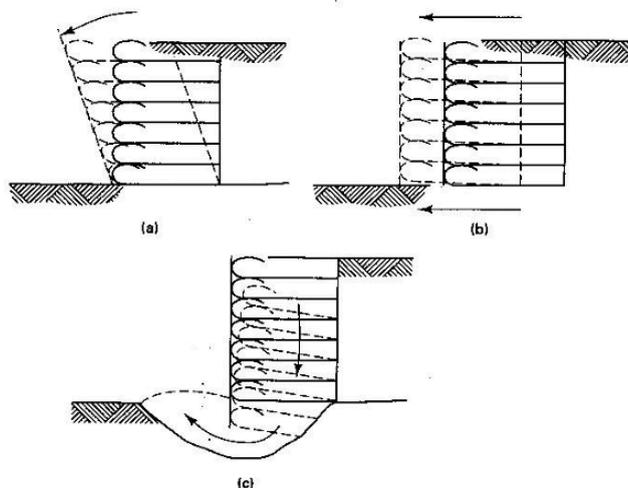


Figura 2. Estabilidade externa dos muros de solo reforçado. a) tombamento b) deslizamento e c) instabilidade global.

A Estabilidade Externa, pode ser definida considerando a massa do solo reforçado como um muro convencional de gravidade, o que garante a estabilidade da zona não reforçada, em relação ao tombamento, deslizamento e ruptura global. Além das incertezas associadas à fabricação do ESR, é importante considerar que a resistência dos materiais pode ser comprometida devido a danos resultantes do manuseio, instalação e exposição a condições ambientais adversas, como substâncias corrosivas. De acordo com Santos (2011), o processo de dimensionamento de Estruturas de Solo Reforçado (ESR) envolve a análise das condições de estabilidade do maciço reforçado frente a diversos modos de falha possíveis, como tombamento, deslizamento e global (Figura 2).

1.2 ESTUDO DE CASO

A coleta do resíduo de construção e demolição (RCD) ocorreu em dois momentos distintos: um para sua caracterização e outro para sua utilização como material de construção nas estruturas experimentais, conforme Tabela 1, extraída do estudo de Santos (2011). A Figura 3 apresenta uma ilustração do material coletado durante o processo, conforme descrito por Santos (2011).

Tabela 1. Principais características dos muros da pesquisa. (Santos, 2011)

Característica/Informação	Muro 1	Muro 2	Muro 3
Material de aterro	RCD-R	RCD-R	Silte arenoso
Elemento de reforço	Geogrelha	Geotêxtil não tecido	Grelha metálica
Material de fabricação do elemento de reforço	Poliéster	Polipropileno	Aço
Local de construção	Campo Experimental (PPG-UnB)	Campo Experimental (PPG-UnB)	Lab. de Estruturas de Engenharia Civil (RMCC)
Altura (m)	3,60	3,60	3,60
Inclinação da face com a vertical (°)	13	13	8

Legenda: PPG-UnB = Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília; RMCC = Royal Military College of Canada.



Figura 3. Pátio de RCD, na UREB (Santos, 2011)

Para a construção do muro experimental, o solo foi saturado por meio de um sistema de inundação, conforme mostrado na Figura 4. As camadas do muro 1 e 2 de Santos (2011) foram divididas de 60 cm em 60 cm, com o geotêxtil entre elas, dando 3,6 metros de altura e 6 camadas no muro.



Figura 4. Visão do sistema de inundação da base dos muros experimentais (Santos, 2011)

A Tabelas 2 e o Quadro 1 trazem os parâmetros referentes à fundação, onde foi construído o muro.

Tabela 2. Caracterização geotécnica do solo (modificado de Guimarães, 2002)

Parâmetro	Profundidade (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ_s (kN/m ³)	26,86	26,78	26,11	25,97	26,94	25,75	26,52	26,25	27,15	27,62
γ_d (kN/m ³)	10,20	10,41	11,49	11,46	11,96	11,98	12,82	13,86	13,84	13,29
γ (kN/m ³)	13,33	13,67	14,65	14,45	14,95	14,39	15,44	18,00	17,78	17,53
γ_{sat} (kN/m ³)	16,48	16,53	17,09	17,03	17,53	17,33	17,98	18,60	18,75	18,47
G_s	2,739	2,731	2,662	2,648	2,747	2,626	2,704	2,677	2,769	2,816
e	1,60	1,57	1,27	1,27	1,25	1,15	1,07	0,89	0,96	1,08
n (%)	61,6	61,1	56,0	55,9	55,6	53,5	51,7	47,2	49,0	51,9
Pedregulho CD	0,2	0,2	0,7	0,8	1,4	2,1	4,3	3,6	0,6	0,0
Areia CD	41,5	41,5	41,6	33,7	31,6	25,7	22,7	33,8	10,2	3,4
Silte CD	24,9	29,2	25,7	26,3	26,5	22,9	24,6	27,4	80,4	93,2
Argila CD	33,4	29,1	32,0	39,2	40,5	49,3	48,4	35,2	8,8	3,4
Pedregulho SD	0,2	0,2	0,7	0,8	1,4	2,1	4,3	3,6	0,6	0,0
Areia SD	56,2	56,2	53,2	53,0	49,2	34,9	30,1	42,0	10,2	1,4
Silte SD	51,4	35,9	34,2	43,1	48,6	61,4	61,9	51,9	86,8	79,5
Argila SD	2,2	7,7	11,9	3,1	0,8	1,6	3,7	2,5	2,4	19,1
w_L (%)	38	36	39	41	45	44	46	43	44	46
w_P (%)	28	26	29	29	34	33	35	34	26	30
I_p (%)	10	10	10	12	11	11	11	9	18	16
I_a	0,29	0,33	0,30	0,29	0,26	0,21	0,21	0,21	2,00	4,71

Quadro 1. Parâmetros da fundação adotados de Santos (2011)

Parâmetros adotados								
prof. (m)	Descrição	Densidade (kg/m ³)	E (MPa)	ν	K (Pa)	G (Pa)	coesão (KPa)	atrito
0 a 6	Areia argilosa	14	4,5	0,3	3,75E+06	1,73E+06	10	26
6 a 9	Argila arenosa	17	11	0,3	4,23E+06	4,23E+06	25	30
9 a 12	Silte variegado a roxo	17	24	0,3	9,23E+06	9,23E+06	50	34

O Quadro 2 apresenta os parâmetros relativos ao muro, enquanto o Quadro 3 fornece os parâmetros da geogrelha utilizada. Todos esses dados foram incorporados na concepção teórica do muro no software FLAC, sendo inseridos como parâmetros fundamentais.

Quadro 2. Parâmetros do muro adotados de Santos (2011)

SOLO DO MURO								
Camada Compactada	Descrição	Densidade (kg/m ³)	E (MPa)	ν	K (Pa)	G (Pa)	coesão (kPa)	atrito
	RCD-R	18	50	0,3	4,17E+07	1,92E+07	13	41

Quadro 3. Parâmetros da geogrelha adotados de Santos (2011)

REFORÇO						
GEOGRELHA	Espaçamento	E (MPa)	Area(m ²)	kbond (kN/m)	sbond (kN/m ²)	tração
	1	30	0,005	9,00E+05	7,50E+03	20kN/m

1.1 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE PARA ESTABILIDADES DE TALUDES

O Método de Equilíbrio Limite (MEL) considera as seguintes hipóteses: o solo como material rígido-plástico, ou seja; a superfície de ruptura é pré-determinada; o material é homogêneo e contínuo em uma única camada; as equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência de ruptura; o fator de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura. Essas considerações resultam em uma análise de uma superfície de escorregamento circular padrão, sendo o volume do material dividido em fatias verticais, as quais são analisadas de maneira individual, como se fosse um único bloco deslizando, e calculado um fator de segurança em alguns casos sem considerar forças entre as fatias (Figura 5):

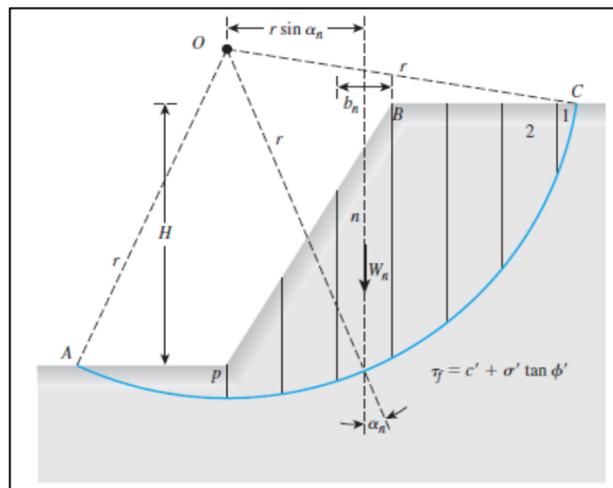


Figura 5 - Análise de um Talude Homogêneo pelo MEL

A análise de estabilidade determina o fator de segurança (FS), que permita quantificar o quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra. Para isso, as forças de resistência, ao longo da superfície de ruptura assumida, são iguais à resistência ao cisalhamento do solo. E as forças solicitantes são devidas ao equilíbrio estático na base das fatias verticais. O Fator de Segurança (FS) é o quociente entre estas duas (Equação 1).

$$FS = \frac{\Sigma \text{forças de resistência}}{\Sigma \text{forças solicitantes}} \quad (1)$$

O estado de equilíbrio limite é assumido quando as forças solicitantes, ao longo da superfície de ruptura assumida, são iguais as forças resistentes devidas à resistência ao cisalhamento do solo, ou seja, quando $FS = 1$. A análise de equilíbrio limite envolve interação e ajuste para determinar a superfície de falha

mais crítica e definir a estabilidade do talude. Isso é feito ajustando a forma da superfície de falha até que o menor fator de segurança seja alcançado.

Para Gerscovich (2012), o Método de Equilíbrio Limite é vantajoso pela sua simplicidade e precisão de resultados, porém, o comportamento de massa de solo não condiz com a realidade, pois a consideração da hipótese em que todos os elementos ao longo da superfície de ruptura chegam a um mesmo FS simultaneamente, contraria o modelo elasto-plástico do solo. Além disso, considera que não há deformações, o que não permite saber se as deformações reais do solo são compatíveis com a faixa admissível de projeto.

1.2 MÉTODO DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA PARA ESTABILIDADES DE TALUDES

Para o cálculo da estabilidade do ESR podemos usar o Método de Equilíbrio (MEL) ou o método de redução de resistência (MRR) com uso de ferramentas numéricas. O MRR consiste na análise numérica elasto plástica, onde, a partir de um fator de redução (Fr), serão reduzidos (ou aumentados) os parâmetros de resistência do solo até que se alcance a ruptura do muro (Equações 2 e 3). O Fr é considerado equivalente ao Fator de Segurança (FS) do talude encontrado pelo método MRR.

$$c' = c'/Fr \quad (2)$$

$$\tan \varphi' = (\tan \varphi)/Fr \quad (3)$$

No software FLAC, é possível realizar o MRR para obter o Fr iminente de ruptura da estrutura em ESR pelo uso de análise elasto plástica.

A análise de estabilidade pelo MRR foi realizada pelo software FLAC, que inicialmente, é construída a malha do solo de fundação, depois a malha do muro e do reforço com geogrelhas, como já descrito anteriormente. Em seguida, outros comandos levam a análise elasto plástica iterativa da redução dos parâmetros de resistência do solo, até atingir à ruptura, determinando assim o Fr que foi alcançado que será equivalente ao fator de segurança do problema..

2 METODOLOGIA

A geometria usada para a análise de estabilidade pelo MEL está apresentada na Figura 6. Onde se observa a região da fundação, o aterro compactado em camadas de RCD de 60 cm e geogrelha que estão representadas como um bloco da Estrutura de Solo Reforçado (ESR). Finalmente as camadas RCD foram compactadas sem geogrelha a montante do ESR. Os parâmetros adotados seguem os dados apresentados nos Quadros 1, 2 e 3. Sendo que para o ESR, composto pelo RCD mais a Geogrelha, foi adotada os parâmetros do RCD como uma análise conservadora (Figura 6). Uma outra análise foi feita adotando para o ESR os parâmetros do RCD, mais uma resistência à tração ou um aumento da coesão, como efeito da presença da geogrelha. Mesmo assim, o FS e a superfície de deslizamento não sofreram alteração

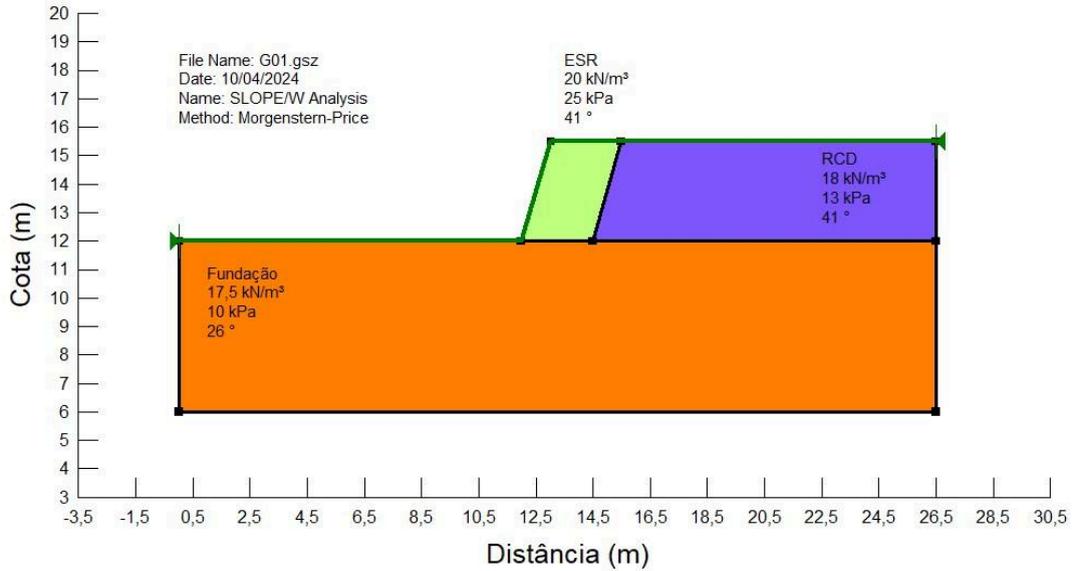


Figura 6. Geometria do ESR e parâmetros adotados para a análise de estabilidade pelo MEL

A malha de diferenças finitas usada no FLAC para o MRR está apresentada na Figura 8 e 9. Onde se observa o material de fundação em 3 camadas, os aterros compactados de RCD de 60 cm e a geogrelha envolvendo cada camada de RCD compactada.

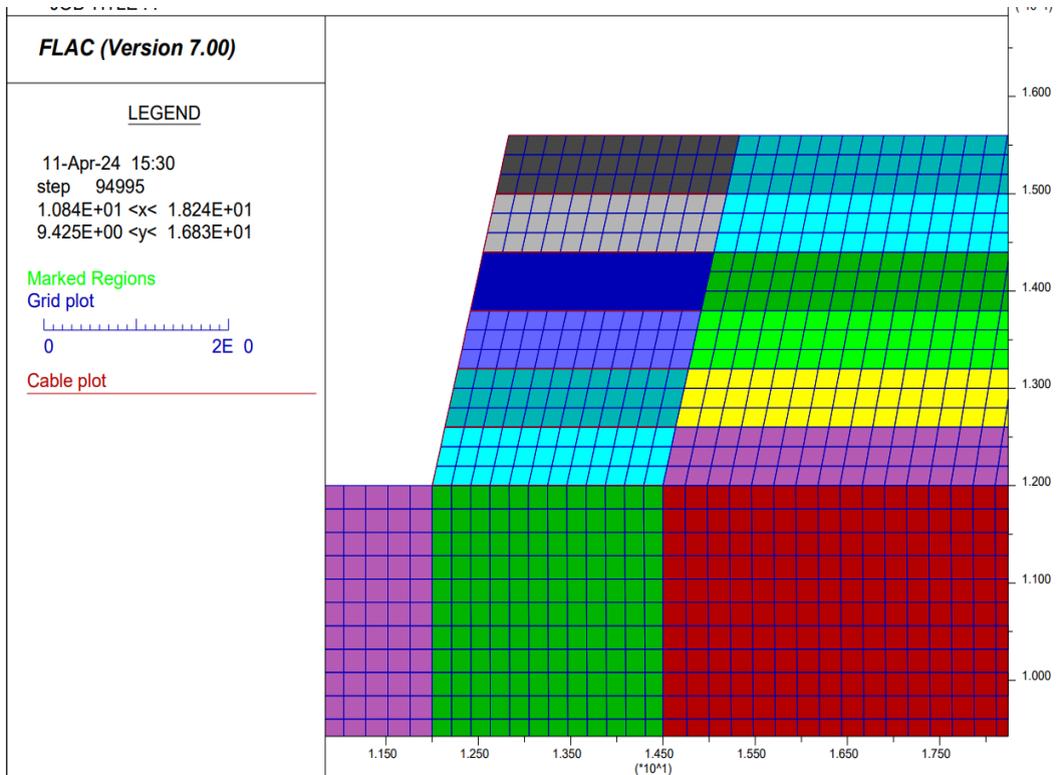


Figura 8. Malha de Diferenças Finitas do ESR usada para a análise pelo MRR

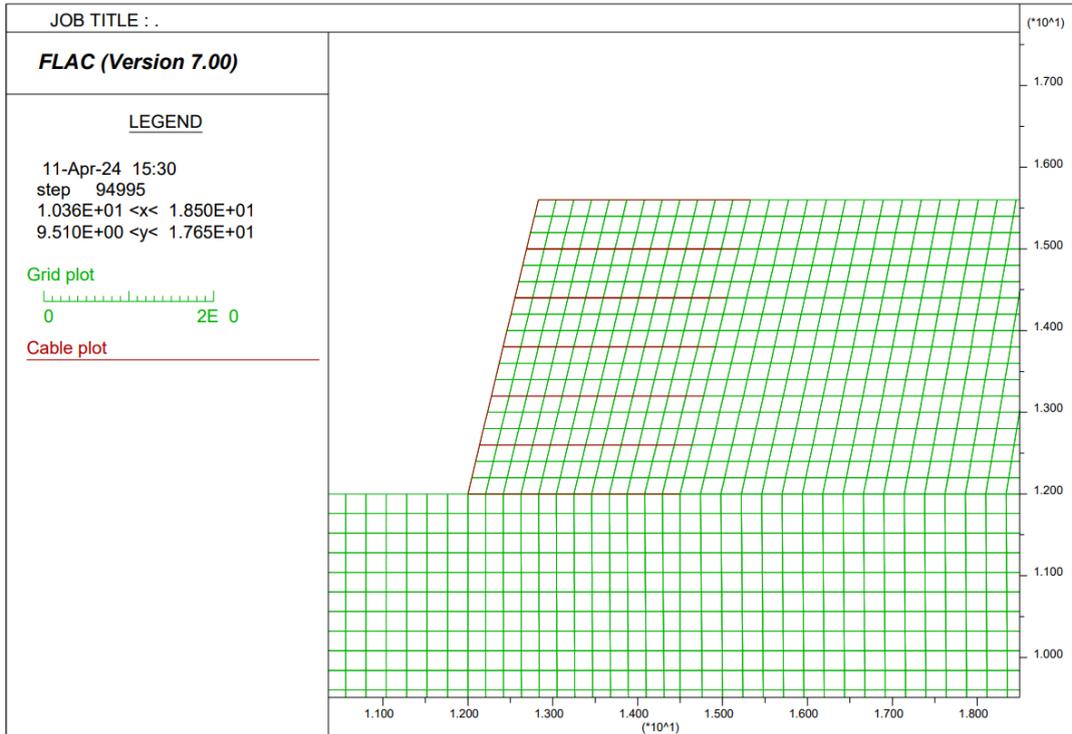


Figura 9. Malha de Diferenças Finitas do ESR com as geogrelhas usada para a análise pelo MRR

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 7 é observado o resultado da análise de estabilidade pelo MEL, onde se o FS obtido pelo Método Morgenstern Price foi de 2,35, muito acima de 1,5, representando um ESR estável. Por outro lado, a superfície de deslizamento, perfeitamente circular, representa uma ruptura global onde o fundo da superfície atinge a primeira camada do solo de fundação, ao mesmo tempo que não corta o ESR. Este resultado era esperado considerando o MEL e o tipo de material.

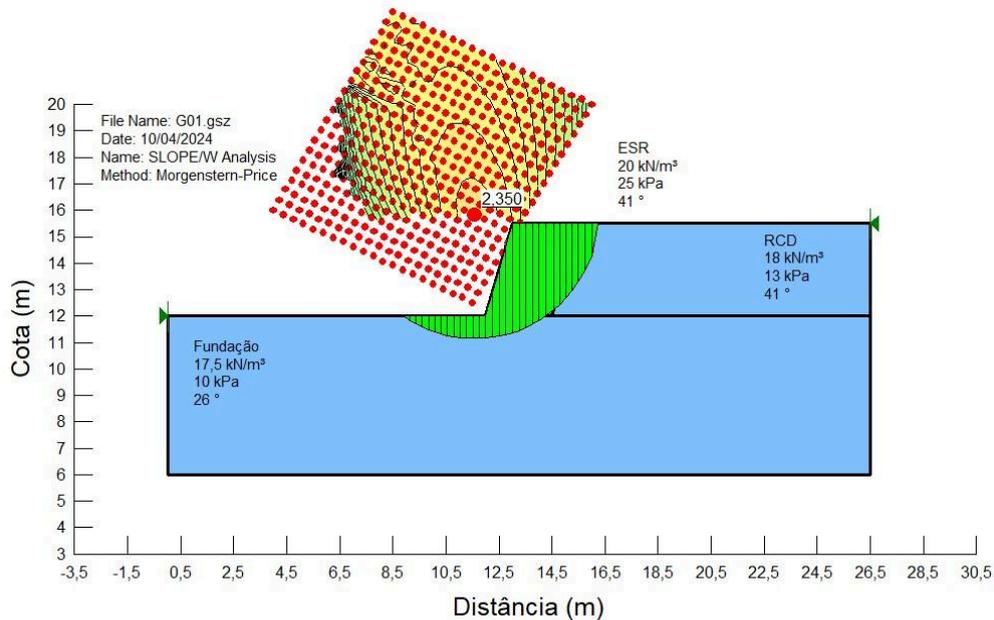


Figura 7 Resultado da análise de estabilidade pelo MEL. Fator de Segurança de 2,35 e Superfície de deslizamento crítica global e perfeitamente circular

Como resultado do método de redução de resistência (MRR), pode-se observar na Figura 10, um fator de segurança pelo MRR de 2,01, o que significa a necessidade de redução dos parâmetros de resistência do solo pela metade para atingir o deslizamento ou plastificação do solo. Por tal motivo o talude pode ser considerado estável. Também é observada uma concentração de deformações cisalhantes máxima formando uma superfície em cunha que passaria cortando o canto inferior direito da ESR. Por outro lado, observa-se que a cunha passa por baixo do ESR atingindo o solo de fundação até uma profundidade um metro abaixo do pé do ESR. Os vetores velocidade em cinza (Figura 10) indicam o sentido do deslocamento e apresentam tamanho similar o que indica uma mesma magnitude de deslocamento dentro de uma cunha, ou seja, um deslocamento em bloco rígido.

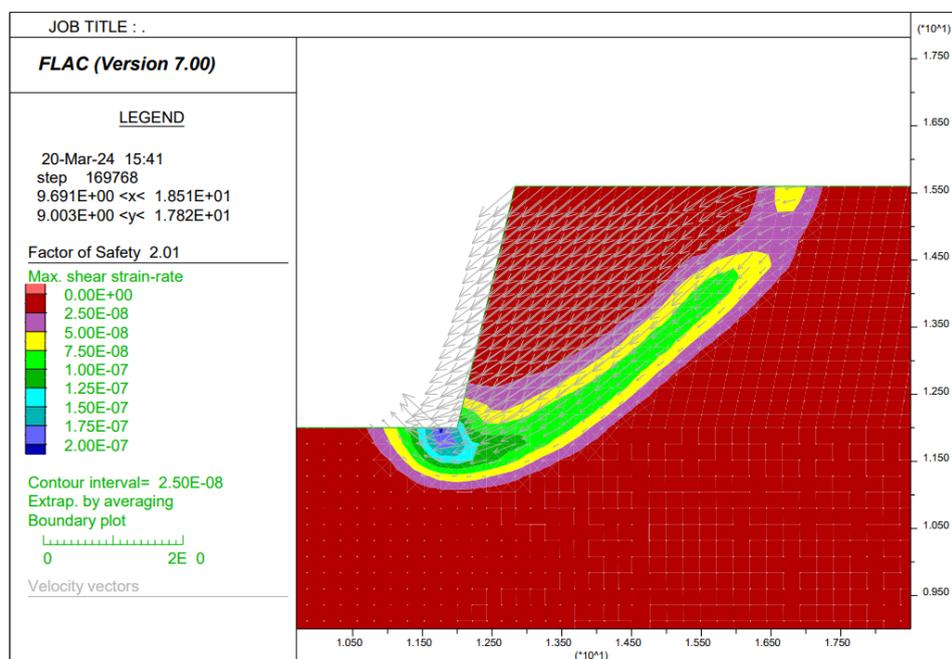


Figura 10. Resultado do método de redução de resistência (MRR)

4 CONCLUSÕES

Como conclusões podemos observar que a análise de estabilidade pelo MRR foi possível de ser realizada para um talude com muro de solo reforçado. Como esperado, a superfície de ruptura, obtida pelo MRR não foi circular (como obtido pelo MEL) e sim em formato de cunha, passando por baixo da fundação. Isto é devido a heterogeneidade do talude, formado por um muro de ESR, o aterro compactado em RCD mais solo fino e a primeira camada de fundação.

Para ambas as análises de estabilidade pelo MEL e pelo MRR para a estrutura do ESR obtiveram um FS acima de 2,0; indicando que a estrutura de ESR é estável e não precisaria de nenhum tipo de reforço.

Os fatores de segurança (FS) foram diferentes entre os modos usados, sendo o FS do MEL 18% maior que o FS do MRR, provavelmente isso é devido à superfície de ruptura do MEL ser circular e envolver obrigatoriamente o ESR por completo, e para esse caso, aumentaria a superfície de deslizamento o que aumenta o FS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem, ao Programa de Iniciação em Pesquisa da Universidade Federal de Goiás (UFG) e ao Centro de Pesquisa em Hidrologia e Geotecnia Ambiental (CEHIGE), pelo apoio com a infraestrutura de pesquisa e pela disponibilização do software FLAC para o desenvolvimento das análises de estabilidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2004). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro, p. 71.
- BENJAMIM, C.V.S. (2006). Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotextil. Tese de Doutorado. EESC, Universidade de São Paulo. São Carlos, 294p
- GERSCOVICH, Denise M. S. Estabilidade de Taludes, (2012): Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 92 pg.
- ITASCA. FLAC: online manual table of contents. 5. ed. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2011.
- RESOLUÇÃO CONAMA No 307, DE 5 DE JULHO DE 2002. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf.
- OLIVEIRA, G. ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO CONSTRUTIVO DE UM MURO DE SOLO REFORÇADO COM RCD E SOLO FINO.em Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região Centro-Oeste, Local: Goiânia GO, Acesso em: 11 abr. 2024.
- SANTOS, E. C. G. D. (2011) AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MUROS REFORÇADOS EXECUTADOS COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS (RCD-R) E SOLO FINO. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação de Geotecnia da UnB, Brasília, DF, pg 248. 2011.
- SALES, M. M. (2021), Recuperação de área degradada por processos erosivos instalados nas margens do córrego Abel/Basilio no setor Santo Hilário (Goiânia-GO), AMMA GO, UFG. Goiânia GO, pg 55.