DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/14

Análise de Estabilidade de um Muro de Contenção de Gravidade pelo 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, o dimensionamento e verificação da estabilidade de uma contenção em muro de gravidade são feitas com uso do Método de Equilíbrio Limite – MEL nas teorias de Empuxo de Terra de Rankine e Coulomb expandidas para solos com coesão, terrapleno inclinado e atrito solo-muro. Estes métodos admite várias hipóteses simplificadoras para resolver o problema, como não considerar a deformabilidade do solo, a ruptura progressiva do solo ou ruptura do contato solo muro, não levando em conta a heterogeneidade do solo e a interação solo-estrutura. A análise de estabilidade pode ser realizada aplicando o Método de Redução de Resistência (MRR) por meio da análise numérica tensão-deformação elastoplástica, o MRR consiste na redução progressiva dos parâmetros de resistência do critério de ruptura (do perfil de solo), por meio de um coeficiente de redução, até atingir o estado limite de ruptura do solo e por conseguinte do muro de gravidade. Este coeficiente de redução representa o Fator de Segurança (FS) e a região de plastificação obtida define a superfície de deslizamento do solo ao redor do muro ou as cunhas ativa e passiva do muro, dispensando o uso de hipótese simplificadora para o cálculo dos esforços e a adoção de superfícies de ruptura provável, além de considerar a deformabilidade do modelo geotécnico. Em resumo, para este estudo, foi utilizada a ferramenta numérica FLAC 2D (ITASCA 2011), foi realizada a análise de estabilidade pelo MRR para um estudo de caso de um muro de gravidade que colapsou usando parâmetros de resistência do solo informados por Milhomem, *et al.* (2024), obtendo-se FS muito acima de 1,0. Após retro analisar do problema foram obtidos os parâmetros representativos do estudo de caso de colapso do muro ou FS = 1,0.

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

ABSTRACT: Traditionally, the design and verification of the stability of a gravity retaining wall are done using the Limit Equilibrium Method (LEM) on the expanded Rankine and Coulomb earth pressure theories for cohesive soils, inclined embankments, and soil-wall friction. These methods admit several simplifying assumptions to solve the problem,such as not considering soil deformability, progressive soil rupture, or soil-wall contact rupture, or rupture of the soil-wall contact, disregarding soil heterogeneity and soil-structure interaction. Stability analysis can be performed using the Resistance Reduction Method (RRM) through elastoplastic stress-strain numerical analysis. The RRM consists of the progressive reduction of the resistance parameters of the failure criterion (of the soil profile), using a reduction coefficient, until the soil failure limit state is reached, and consequently, the gravity wall failure limit state. This reduction coefficient represents the Safety Factor (FS), and the resulting plastic deformation region defines the soil slip surface around the wall or the active and passive wedges of the wall, eliminating the need for a simplifying assumption to calculate the stresses and adopt probable rupture surfaces, in addition to considering the deformability of the geotechnical model. In summary, for this study, the FLAC 2D numerical tool (ITASCA 2011) was used, and a stability analysis was performed using MRR for a case study of a gravity wall that collapsed, using soil resistance parameters reported by Milhomem et al. (2024), obtaining an FS well above

1.0. After back-analyzing the problem, the representative parameters of the wall collapse case study were obtained, or FS = 1.0.

KEYWORDS: Gravity wall; Stability; Elastoplastic; Strength 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 ou as forças atuantes. As quais são comparadas com as forças resistentes obtidas com a resistência ao cisalhamento do solo em questão.
O fator de segurança FS (razão entre as forças resistência ao cisalhamento "s" e as forças cisalhantes atuantes "τ") é apresentado na Equação (1)

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

As forças resistêntes ao cisalhamento "s" do solo pode ser definidas pelo critério de ruptura de Mohr Columb considerando o solo 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 (um plano inclinado apenas).

Os Métodos de Análise de Estabilidade de taludes com base na análise tensão deformação elasto plástica (critério de ruptura de Mohr-Coulomb), aplicando o método de Redução de Resistência (MRR), não apresentam varias 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 assim um Fator de Segurança (FS ou FR) que indica quanto o talude pode resistir nas condições em que o solo se encontra.

2 MÉTODO DE REDUÇÃO DE RESISTÊNCIA (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, (Moraes *et al.*, 2025). O resultado obtido 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, (ITASCA, 2011).

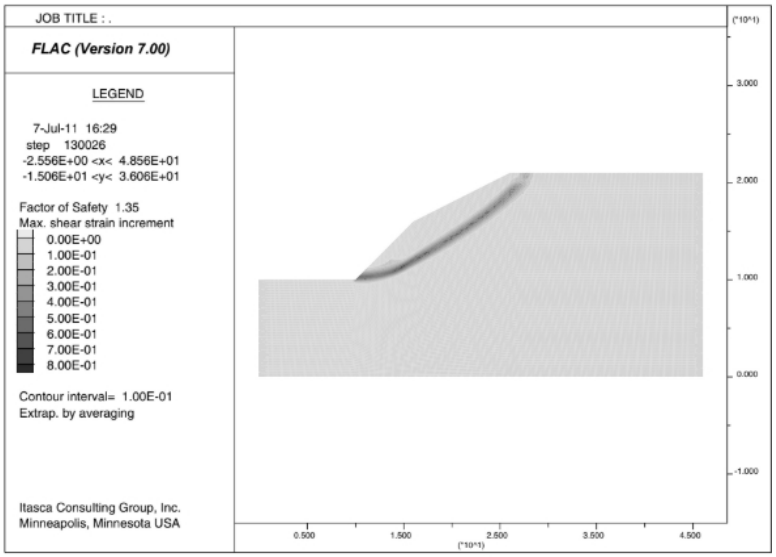


Figura 1. Resultados do fator de segurança FLAC versão 7.0 (Itasca, 2011)

3 MATERIAIS E MÉTODO

O estudo de caso trata do colapso de um muro de flexão apresentado em Milhomem, *et al.* (2024). Os parâmetros do solo e a geometria do talude foram adotados de Milhomem, *et al.* (2024), que fizeram análise de um muro de contenção de uma mineradora localizada na região sudoeste do estado do Tocantins, próxima à cidade de Natividade. O muro analisado colapsou com a carga extra acima do solo de material britado e após fortes chuvas que saturaram o solo aumentando a carga sobre o muro. A Figura 2 apresenta uma imagem do muro colapsado.


Figura 2. Muro colapsado. Fonte: Milhomem, *et al.* (2024).

Para a análise com o MRR no FLAC 7.0 o muro foi adaptado e as camadas de solo foram definidas em duas cotas. Foram considerados os parâmetros de solo saturado, porém sem presença de nível de água no solo, condição inicial critica relatada em Milhomem, et al. (2024). Assim a estabilidade foi analizada apenas considerando o muro e o solo com umidade de campo.

3.1 Talude com muro de gravidade

Para o cálculo da estabilidade pelo MRR do muro de gravidade foram consideradas as seguintes camadas de solo: uma camada superir de 5 m de espessura argilo siltosa (CM) e outra camada inferior de 5 m de espessura de pedregulho siltoso (GM) (Figura 1). O muro em concreto armado tinha espessura média de 20 cm e fundação em sapata 40 cm de base e 60 cm de altura como apresentado na Figura 3 e na Figura 4 que apresenta o muro com mais destaque.

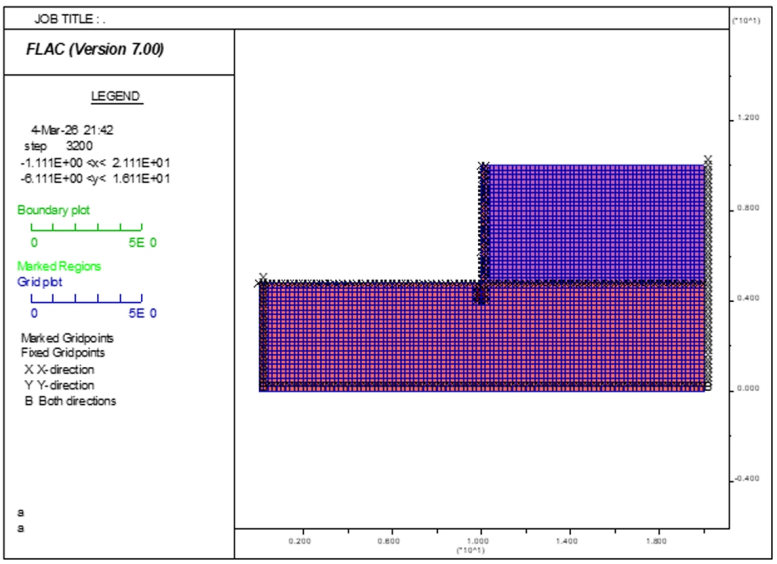


Figura 3. Geometria da malha o perfil geotécnico composto de duas camadas de solo: camada superior de 5 m de espessura de uma camada Argilo siltosa superior e 5 m de espessura de uma camada inferior de pedregulho siltosa inferior. Fonte: Autores.

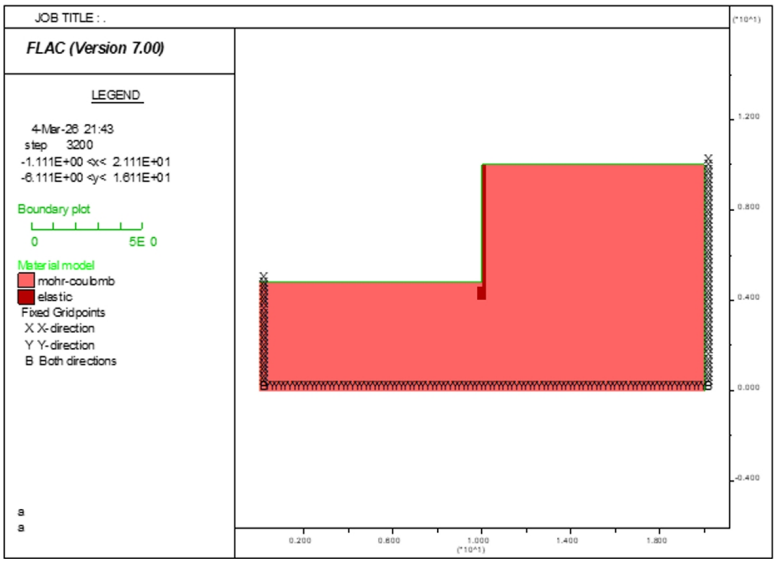


Figura 4. Geometria da malha para o muro de gravidade de 5 m de altura e 20 cm de espessura em um tom mais forte de vermelho. O perfil geotécnico está composto de duas camadas de solo de 5 m de espessura cada uma Argilo siltosa superior e pedregulho siltosa inferior. Fonte: Autores.

Os parâmetros para os materiais geotécnicos e o muro de concreto estão na Tabela 1 e foram adotados do estudo de caso. Os parâmetros de deformabilidade foram obtidos de correlações com sondagens NSPT, apresentadas em Milhomem, *et al.* (2024).

Tabela 1 Parâmetros adotados para os materiais geotécnicos e o muro de concreto armado.

Material	γ (kN/m³)	NSPT	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)
CM	19	15	34	0,33	130	32
GM	19	11	25	0,33	100	30
Muro	25	-	40000	0,2	-	-

Para realizar a análise de estabilidade pelo Método de Redução de Resistência (MRR) foram geradas primeiro as tensões *in situ* e depois feita a escavação e instalação da contenção. A Figura 5 apresenta as tensões verticais induzidas.

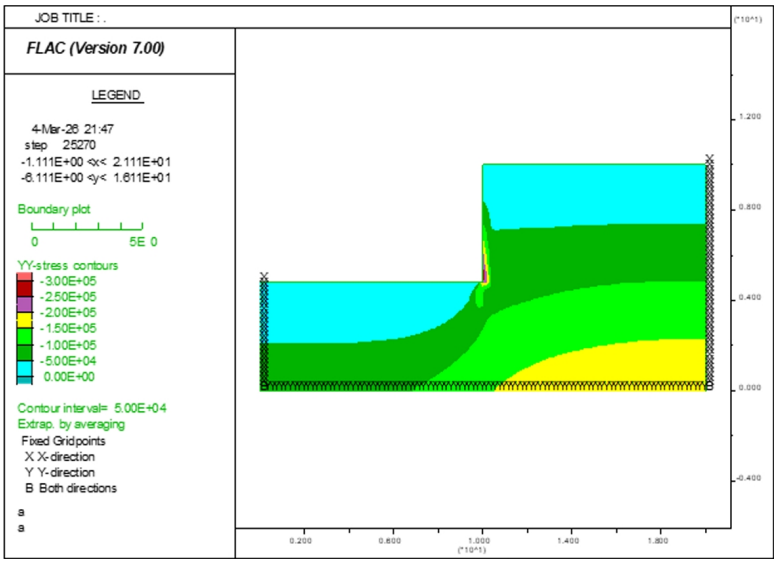


Figura 5. Tensões verticais nas camadas do solo após a instalação do muro de contenção . Fonte: Autores.

Após a instalação do muro de gravidade foi realizada a análise de estabilidade pelo Método de Redução de Resistência (MRR), onde o muro foi simulado com modelo elástico e as camadas de solo como elasto plástico (critério de Mohr Coulomb). O MRR consiste em diminuir os parâmetros de resistência do solo dividindo por um fator de redução e fazendo novas análises elastoplásticas até atingir a ruptura do muro. O Fator de redução aplicado será o FS do muro e a região de cisalhamento a superfície de deslizamento obtida, como explicado anteriormente.

4 RESULTADOS

Na Figura 6 tem-se o resultado do MRR onde foi obtido um FS de 5,41, muito acima do esperado que deveria ser próximo de 1,0 uma vez que o muro colapsou.

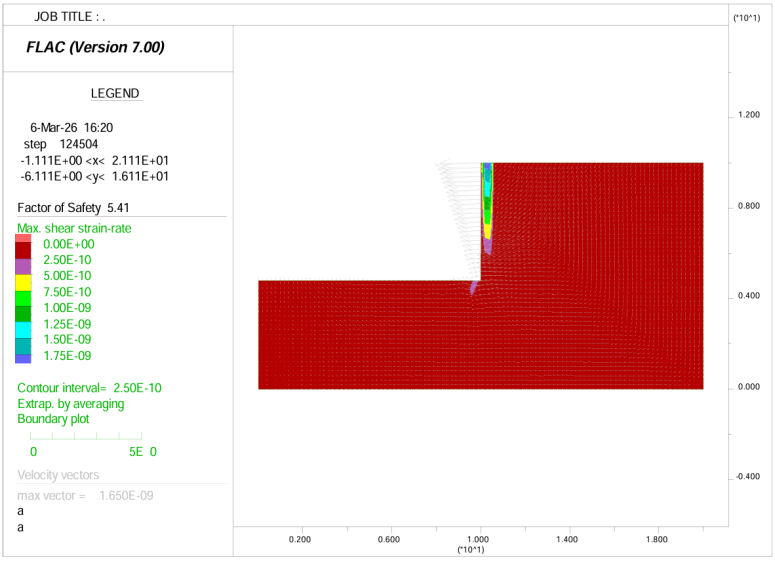


Figura 6. Resultado da Estabilidade do muro pelo MRR para os parâmetros iniciais com FS 5,41 e ruptura por tombamento do muro. Fonte: Autores.

Para obter os parâmetros dos solos representativos foi realizada a retro análise do muro fazendo uma segunda análise de estabilidade pelo MRR com parâmetros reduzidos com o FR da primeira análise. Na Figura 7 é apresentado o resultado desta segunda analise que obeteve um FS próximo de 1,0 com os parâmetros reduzidos para os materiais geotécnicos, estes parâmetros estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da retro-análise obtidos para os materiais geotécnicos.

Material	γ (kN/m³)	NSPT	E (MPa)	ν	c (kPa)	ϕ (°)
CM	19	15	34	0,33	24	6,6
GM	19	11	25	0,33	18	6,1

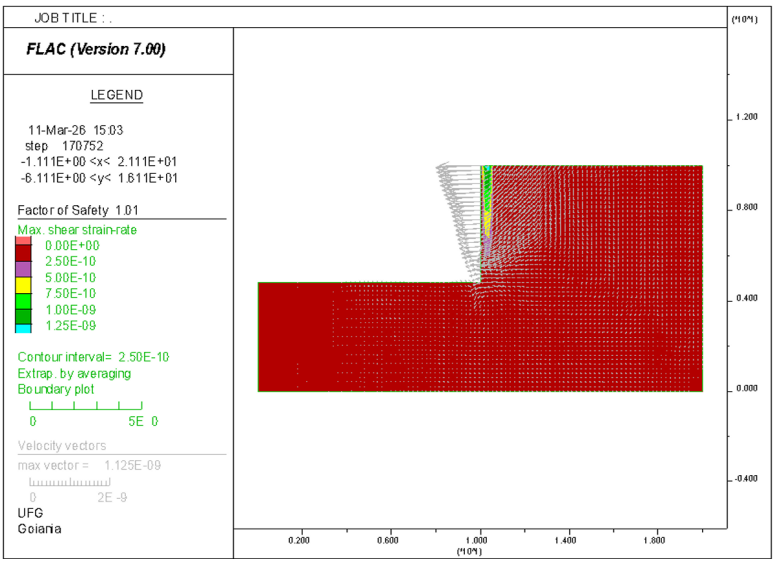


Figura 7. Resultado da Estabilidade do muro pelo MRR para os parâmetros ajustado com FS 1,0 e ruptura por tombamento do muro. Fonte: Autores.

5 CONCLUSÕES

Na análise de estabilidade pelo Método de Redução de Resistencia (MRR) se observa um FS 5,41 muito acima do esperado, uma vez que o muro de gravidade colapsou. Devido ao colapso do muro o FS deveria estar próximo de 1,0. Para isto foi feita uma retro análise utilizando parâmetros de resistência reduzidos (coesão e atrito divididos pelo primeiro FS). Com estes novos parâmetros foi possível obter um FS próximo de 1,01 e ruptura por tombamento do muro o que corresponde ao resultado de campo. Com isto podemos concluir que os parâmetros do retro análise são parâmetros representativos do campo.

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

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

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

MILHOMEM, Marcos Coelho (2024). *Retroanálise de Ruptura de Contenção do Tipo Muro de Arrimo com Contrafortes em Mineradora da Região Sudoeste do Estado do Tocantins*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2, , Balneário Camboriú. Anais eletrônicos. Balneário Camboriú: ABMS. Disponível em: <https://editora.editoraomnisscientia.com.br/artigoPDF/24227113943.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2026.

MORAES, Ana Paula Silva; OLIVEIRA, Gabrielly Gonçalo Goulart; PIMENTA, Matheus Borba Candido; VARGAS, Carlos Alberto Lauro (2026). *Comparação da Análise de Estabilidade pelo MEL e MRR da Encosta na Rodovia Rio-Santos, km 434.* In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 9. ; SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 14., Bento Gonçalves. Anais eletrônicos. Bento Gonçalves: ABMS. Disponível em: https://www.cobrae.com.br/anaistrabalhos/. Acesso em: 20 mar. 2026.