

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/146

Análise da Estabilidade e do Modo de Ruptura de um Muro de Contenção pelo Método de Redução de Resistência

Laura Beatriz Utikawa Brugnolli

Estudante, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, laura.utikawa@discente.ufg.br

Carlos Alberto Lauro Vargas

Professor, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, carloslauro@ufg.br

Gustavo Batista de Oliveira

Estudante, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, gustavo.batista@discente.ufg.br

RESUMO: Taludes em margens de córregos podem sofrer erosões formando terrenos muito íngremes, propensos a deslizamentos, sendo necessário o uso de muros de contenção para estabilizá-los e garantir a integridade das construções vizinhas. Entretanto, as pressões laterais que o empuxo do solo aplica em uma contenção podem exceder sua capacidade, levando ao seu rompimento. Assim, é essencial dimensionar adequadamente essas estruturas, considerando os modos de ruptura potenciais, como deslizamento, tombamento, capacidade da fundação e ruptura global. Geralmente, é usado o Método de Equilíbrio Limite (MEL) para o cálculo do fator de segurança (FS), que indica a relação entre as forças de resistência e as forças de carga atuantes da contenção. Nesta pesquisa, além do MEL, foi aplicado o Método de Redução de Resistência (MRR) para determinar o FS e a superfície de deslizamento. Este é baseado na análise elasto-plástica do solo e muro, e consiste na redução dos parâmetros de resistência do solo até atingir a ruptura. Utilizando o FLAC 2D, software que simula o comportamento do solo, foram obtidos dados de tensões e deformações para cada redução, permitindo identificar o modo de ruptura provável. Os resultados do MRR foram comparados com os do MEL para avaliar o modo mais crítico e determinar a melhor abordagem para reforçar a estrutura. O FS obtido pelo MRR foi de 2,06, ou 28% maior do que o MEL, que foi de 1,601, o que indica a possibilidade de redimensionar o gabião com uma redução do volume, representando uma economia em mão de obra e material, tornando o projeto mais eficiente e econômico.

PALAVRAS-CHAVE: Análise de Estabilidade, Análise Elasto-Plástica, Método de Redução de Resistência, Muro de Contenção, Modos de Ruptura.

ABSTRACT: Slopes on stream banks can suffer erosion, forming very steep terrain, prone to landslides, making it necessary to use retaining walls to stabilize them and guarantee the integrity of neighboring buildings. However, the lateral pressures that soil pressure applies to a containment can exceed its capacity, leading to its failure. Therefore, it is essential to properly size these structures, considering potential failure modes, such as sliding, tipping, foundation capacity and global failure. Generally, the Limit Equilibrium Method (LEM) is used to calculate the factor of safety (FOS), which indicates the relationship between the resistance forces and the load forces acting on the containment. In this research, in addition to LEM, the Strength Reduction Method (SRM) was applied to determine the FOS and the sliding surface. This is based on the elasto-plastic analysis of the soil and wall, and consists of reducing the soil resistance parameters until failure is reached. Using FLAC 2D, software that simulates soil behavior, stress and strain data were obtained for each reduction, allowing the likely failure mode to be identified. The SRM results were compared with the LEM to evaluate the most critical mode and determine the best approach to reinforce the structure. The FOS obtained by SRM was 2.06, or 28% higher than the LEM, which was 1.601, which indicates the possibility of resizing the gabion with a reduction in volume, representing savings in labor and material, making the project more efficient and economical.

KEYWORDS: Stability Analysis, Elasto-Plastic Analysis, Strength Reduction Method, Retaining Wall, Failure Modes.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Equilíbrio de taludes

Talude é qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Ele pode ser natural, também chamado de encosta, ou artificial, originado de escavações antrópicas, como os cortes e aterros realizados em obras de estradas e barragens. Independente de sua origem, os taludes estão sujeitos a diversos fatores que podem comprometer sua estabilidade. Segundo Pinto (2006), a falha dos solos geralmente ocorre devido a tensões cisalhantes decorrentes de carregamentos aplicados ao solo. Vários fatores influenciam essas tensões em um talude, como o peso próprio do solo, a inclinação da face do talude, cargas adicionais, pressão hidrostática e as características de resistência do solo, como coesão e atrito interno. Assim, a erosão causada compromete a estabilidade do talude, pois transporta as partículas de solo alterando a geometria da face da encosta, diminuindo sua resistência e aumentando as tensões cisalhantes.

Tais fatores podem levar os taludes a rupturas que podem ser classificadas de diversos tipos. O tombamento ocorre quando uma porção do solo de um talude gira ou inclina para fora da sua posição original e pode resultar em deformações permanentes ou até mesmo na queda de blocos de solo, representando um sério perigo para estruturas e pessoas que possam estar próximas. O deslizamento acontece quando uma massa de solo se move de forma coesa ao longo de uma superfície de falha, especialmente comuns em encostas íngremes ou áreas com solo altamente suscetível à erosão. Já a capacidade de carga é a capacidade máxima de suporte de peso de uma estrutura que o solo pode suportar sem sofrer ruptura. Compreender como cada força atua é crucial para projetar medidas preventivas eficazes (FIORI, 2015).

Uma técnica muito utilizada para contenção de taludes são os gabiões, também conhecidos como muros de arrimo, que são estruturas com o objetivo de fornecer estabilidade contra a ruptura de maciços de terra ou rocha, prevenindo os escorregamentos. Consistem em gaiolas metálicas preenchidas manualmente com pedras e construídas com fios de aço galvanizados em malha hexagonal com dupla torção. Podem ser executados de forma corrida, com parede vertical ou quase vertical, apoiados em fundações rasas ou profundas, e podem ser construídos com diversos materiais, tais como alvenaria, concreto simples ou armado, ou elementos especiais.

As características dos gabiões incluem flexibilidade, permitindo recalques diferenciais sem comprometer a estabilidade do talude, e são auto drenantes, com filtro em manta de geossintético entre o solo e o gabião, possibilitando a drenagem adequada do talude para evitar o aumento da poropressão. Além disso, sua principal vantagem é a facilidade de construção, sem necessidade de fundações específicas, tornando-os ideais para áreas inacessíveis ou íngremes. São versáteis e podem ser utilizados para diversas finalidades, como prevenção de erosão e inundações, delimitação de propriedades, estabilização de encostas e contenção de água.

O dimensionamento dos muros de gabião deve atender a especificações e verificações de estabilidade para requisitos como tombamento, deslizamento e capacidade de carga. Portanto, torna-se necessário o estudo do modo de ruptura provável para mitigar riscos e proporcionar melhor desempenho da estrutura, garantindo a segurança das pessoas e encostas vizinhas.

1.2 Método de Equilíbrio Limite (MEL)

A análise da estabilidade de taludes, especialmente em estruturas como barragens e aterros, guia a determinação da configuração mais eficiente em termos técnicos e econômicos. Adicionalmente, a avaliação pós-ruptura desempenha um papel crucial ao permitir a revisão e aperfeiçoamento dos parâmetros de projeto.

De acordo com Massad (2010) e Santos (2014), os métodos de Equilíbrio-Limite (MEL) operam com uma série de pressupostos. Eles assumem que o solo se comporta como um material rígido-plástico,

rompendo de forma abrupta sem deformações, e que tanto a superfície quanto o mecanismo de ruptura são pré-determinados. Além disso, valores médios dos parâmetros de resistência são utilizados, considerando-se o solo como homogêneo e contínuo em uma única camada. A análise presume a validade das equações de equilíbrio estático até o ponto de iminência de ruptura, enquanto o fator de segurança (FS) é considerado constante ao longo da linha de ruptura.

Essas premissas resultam em uma abordagem que analisa uma superfície de escorregamento circular padrão. O volume do material é dividido em fatias verticais, tratadas individualmente como blocos deslizantes, calculando-se um fator de segurança sem levar em conta as forças entre as fatias. A determinação do estado de equilíbrio limite ocorre quando a tensão cisalhante ao longo da superfície de ruptura assumida iguala-se à resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura assumida, ou seja, quando $FS = 1$, indicando a ruptura iminente do talude.

Gerscovich (2012) aponta que embora o Método de Equilíbrio Limite seja vantajoso por sua simplicidade e precisão, ele não reflete fielmente o comportamento real do solo. A premissa de que todos os elementos ao longo da superfície de ruptura alcançam $FS = 1$ simultaneamente contradiz o modelo elasto-plástico do solo. Além disso, ao desconsiderar deformações, não é possível determinar se as deformações reais do solo estão dentro da faixa admissível de projeto.

1.3 Método da Redução de Resistência (MRR)

Para superar as limitações dos métodos tradicionais, como o Equilíbrio Limite, o Método de Redução de Resistência (MRR) adota uma abordagem baseada na análise elasto-plástica do material, levando em conta a irregularidade da superfície do talude e a heterogeneidade do solo. Este método é aplicável para calcular o Fator de Segurança (FS) em uma variedade de situações, como paredes de contenção e túneis. O procedimento envolve a redução gradual dos parâmetros de resistência do solo até a ocorrência da falha, como os do material Mohr-Coulomb, simultaneamente diminuindo a coesão e o atrito, com uso de um Fator de redução (F_{trial}), conforme expresso nas equações (3) e (4).

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

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

Uma vantagem do MRR é a determinação automática da superfície de ruptura crítica. O Fator de Segurança global é determinado pelo valor de F_{trial} no qual os parâmetros devem ser reduzidos para que a solução por elementos finitos não apresente mais convergência numérica ou forneça grandes deformações no talude, indicando a ocorrência da ruptura.

1.4 Método das Diferencias Finitas 2D (FLAC)

O programa FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), utiliza o método numérico das diferenças finitas, que aplica a técnica de solução explícita para solução das equações diferenciais tensão deformação e o cálculo de modelos geotécnicos e geomecânicos.

Para determinar o limite de ruptura, são realizadas várias execuções separadas com diferentes fatores de redução de resistência. Cada execução é verificada para determinar se o equilíbrio ou o fluxo plástico contínuo é alcançado. O ponto de falha pode ser encontrado por meio de sucessivos ajustes nos fatores de redução de resistência.

2 ESTUDO DE CASO

Nos últimos anos, as regiões cujo o Córrego Abel/Brasílio no Setor Santo Hilário (Goiânia - GO) percorre enfrentaram degradação por processos erosivos. Assim, o Plano de Recuperação de Área Degradada do Córrego Abel (AMMA, 2018), foi um estudo que visou identificar e corrigir os processos de desgaste ambiental deste córrego, onde dividiu o córrego em quatro trechos, mostrado na Figura 1, descrevendo processos de erosão ambiental em cada um, desde a nascente até a foz. Utilizando imagens do Google Earth, foram identificadas as áreas degradadas e realizadas visitas técnicas para selecionar locais de amostragem.



Figura 1. Vista Geral dos Trechos (AMMA, 2019).



Figura 2. Trecho 3 - Seções de 36 a 86

A análise de estabilidade foi conduzida escolhendo seções próximas aos pontos de amostragem e sondagem e as que apresentaram maior irregularidade de terreno. Sendo assim, foram analisadas 17 das 50 seções da Figura 2 abrangendo as margens esquerda e direita, totalizando 34 análises de estabilidade.

Após as análises, o talude com maior altura e maior declividade, a Seção 45D, foi escolhido para ter reforço com um gabião para prevenção de riscos de queda ou deslizamentos. Assim, foram coletados dados topográficos detalhados do terreno, incluindo informações sobre elevações e perfis do talude, além de características específicas do solo, através das sondagens e ensaios de caracterização e resistência.

3 METODOLOGIA

Inicialmente, foi feita a construção da geometria do talude natural na seção 45D (Figura 3), e incorporando o muro de gabião com o dimensionamento proposto (Tabela 1). Em seguida, foram adotados parâmetros de resistência do solo e do muro de gabião, conforme apresentados na Tabela 2.

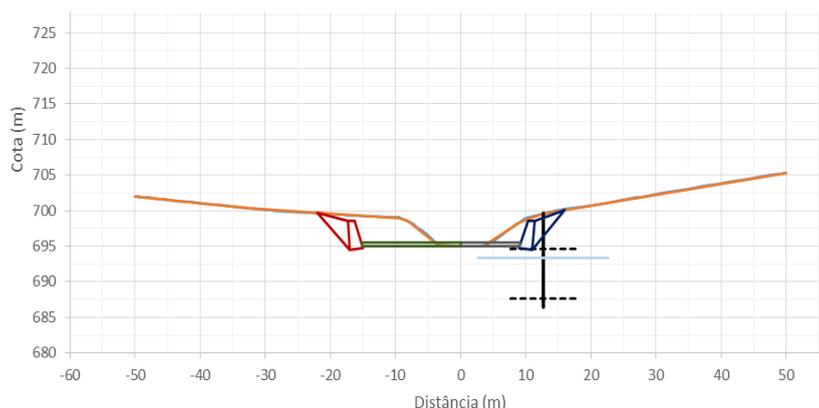


Figura 3. Geometria da Seção 45D

Tabela 1. Dimensionamento do Gabião para a Seção 45D

CAMADA	COMPRIMENTO (m)	ALTURA (m)	INÍCIO (m)
1	2,00	1,00	-
2	1,50	1,00	0,50
3	1,50	1,00	0,50
4	1,00	1,00	1,00

Tabela 2. Parâmetros do Solo e Gabião da Seção 45D

TIPO DE MATERIAL	γ_n (kN/m ³)	c (KPa)	ϕ (°)	E (MPa)	v
SOLO FRACO	16,20	13,00	32,00	-	-
GABIÃO DE CONCRETO	20,00	-	-	500	0,25

Assim, os dados topográficos foram importados para o software Slope/w, onde as propriedades geotécnicas do solo foram definidas. O Método de Equilíbrio Limite foi empregado para calcular o Fator de Segurança e a linha de ruptura do talude reforçado com o gabião. Esse processo envolveu iterações realizadas na planilha Excel. Além disso, o mesmo talude com gabião foi modelado no software FLAC para uma análise mais aprofundada utilizando o Método de Redução de Resistência. Assim, ajustando os parâmetros de resistência e deformação da interface até que o resultado numérico informasse sobre a ruptura do talude e muro de contenção, foi possível avaliar a estabilidade do gabião e obter um Fator de Segurança associado ao seu potencial rompimento.

Como o índice de fator de segurança é mais valioso quando usado de maneira comparativa, em análises que utilizam a mesma definição de índice, a fase subsequente envolveu a comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos, destacando semelhanças e diferenças nas análises e fatores de segurança alcançados. Esta relação permite analisar numericamente a diferença entre os métodos utilizados e concluir a importância da flexibilidade e adaptação na seleção de métodos, incentivando uma abordagem criteriosa e contextualizada para análises de estabilidade do talude e muro de contenção em questão.

4 RESULTADOS

4.1 Método do Equilíbrio Limite

Na análise pelo MEL foi usado o método de Morgenstern Price e, como primeiro estudo de comparação do MEL com o MRR, não foi considerado o nível do lençol freático.

A Figura 4 apresenta a estabilidade do talude com gabião da margem direita, com FS global de 1,61 e uma superfície de ruptura global, na qual o formato já era esperado, pois o MEL sempre terá uma superfície circular. E como o gabião está instalado na análise, o contorno percorre por baixo dele, provando a estabilidade contra tombamento, deslizamento, capacidade de carga e ruptura global da contenção. Além disso, o FS acima de 1 também seria esperado uma vez que se trata de um solo coesivo e atrito acima de 25°.

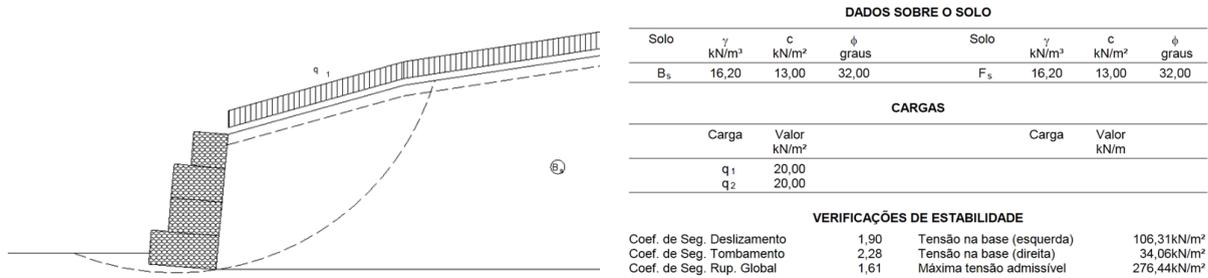


Figura 4 Estabilidade Global do Gabião (FS = 1,6) e dados utilizados para o MEL

4.2 Método da Redução de Resistência

Uma vez que a análise elastoplástica no software FLAC pode ser feita no terreno como um todo, o sistema analisa o talude mais fraco, e a primeira análise do MRR indicou que a margem esquerda seria a mais crítica, visto que mostrou apenas deslizamento para ela, com FS = 1,71. Portanto, para encontrar a superfície de ruptura onde o gabião será instalado, foi criada uma malha apenas do lado direito da margem para forçar resultados mais precisos (Figura 5), obtendo um FS = 2,06.

Ademais, o programa exibiu uma distribuição dos deslocamentos cisalhantes para um coeficiente de redução de resistência de 2,06 na Figura 6. Então, foi identificado o modo de ruptura correspondente ao gabião: deslizamento com cunha triangular, e formação de uma superfície de ruptura global passando por baixo do gabião com formato de cunha ativa.

Posto isso, o FS obtido indicou que a contenção terá funcionamento adequado, mas para uma redução dos parâmetros, de forma que o FS seja menor, a ruptura por deslizamento é iminente.

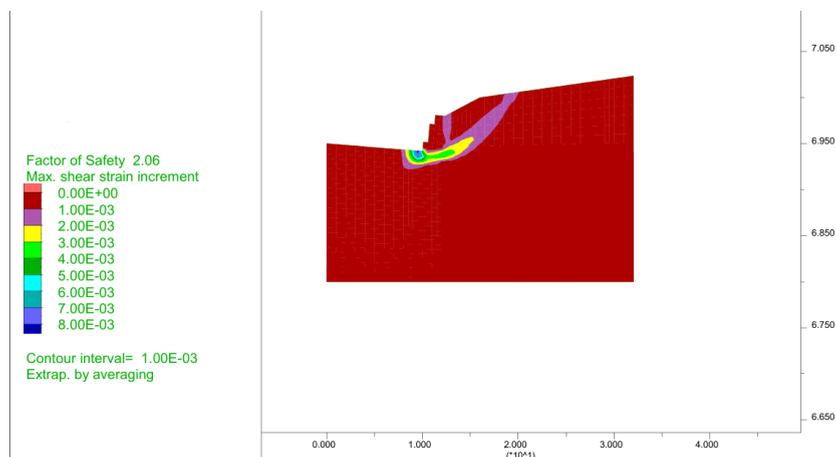


Figura 5. FS da Margem Direita pelo MRR

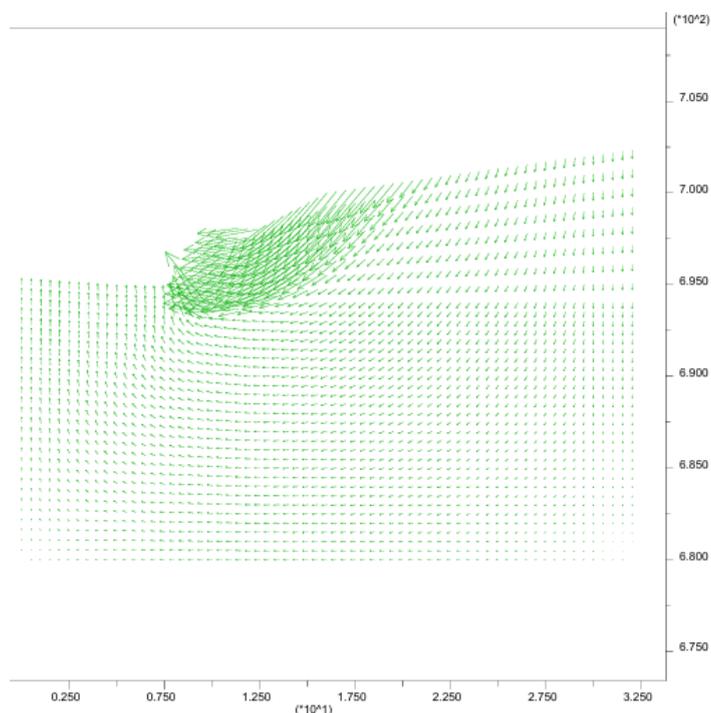


Figura 6. Ruptura da Margem Direita

5 CONCLUSÃO

O estudo comparativo entre o Método Equilíbrio Limite (MEL) e o Método de Redução de Resistência (MRR) para a análise de estabilidade do gabião para o talude de margem de córrego com processo erosivo em Goiânia forneceu resultados importantes sobre as diferentes abordagens e suas implicações práticas, uma vez que a formação completa da superfície de ruptura do MRR precisa de maior redução dos parâmetros ou maior plastificação do modelo comparada com o MEL.

O Método Equilíbrio Limite (MEL) apresenta algumas hipóteses que podem limitar sua aplicabilidade prática. Primeiramente, ao assumir um comportamento rígido-plástico do solo, esse método não captura a complexidade de solos que se deformam antes do colapso. Além disso, a exigência de pré-determinação da superfície circular pode não refletir a realidade de situações geotécnicas, onde as rupturas podem ocorrer de maneiras imprevisíveis e variadas. A utilização de valores médios para parâmetros de resistência e a suposição de homogeneidade do solo em uma mesma camada pode ser inadequada para solos caracterizados por sua heterogeneidade, como o caso desta pesquisa, onde foi considerado o gabião na análise.

Por fim, como observado nos resultados, o MEL define um FS de 1,601 e superfície circular passando por baixo do gabião. Já o resultado do MRR fornece um FS de 2,06 com superfície de plastificação passando por baixo do gabião que não forma uma região com base circular, mas que se aproxima de uma superfície em cunha ou triangular no tardo do muro de gabião e circular na base do muro de gabião.

De forma geral, a região de plastificação dos métodos são parecidas, mas o fator de segurança do MRR é 28% maior que o MEL, visto que o MRR considera aspectos mais detalhados das propriedades do solo, da estrutura do gabião e das condições de carga, precisando que o solo plastifique mais para que forme a superfície de ruptura. Essa diferença pode ser significativa em termos de segurança estrutural, pois indica que o método MRR pode oferecer uma estimativa mais conservadora e precisa sobre a estabilidade da estrutura em questão.

Além disso, o resultado do MRR pode influenciar diretamente nas decisões de projeto e construção, indicando que o projeto do gabião dimensionado por este método pode ser mais robusto e menos propenso a falhas, especialmente em condições adversas como a ocorrência de sobrecargas ou variações nas características do solo ao longo do tempo. O valor obtido indica que é possível redimensionar o gabião com uma redução do volume para que atenda o FS acima de 1,5, representando uma economia significativa tanto em mão de obra quanto em material, tornando o projeto mais eficiente e econômico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro. 2009.
- AHMED, Clarissa Regina Masiero. Fatores que influenciam a erodibilidade nos solos do município de Campos dos Goytacazes-RJ sob uma análise multicritério. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2009.
- AMMA. Plano de Recuperação de Áreas Degradadas - PRAD. Goiânia, 2019.
- BISHOP, A. W. The use of slip circles in stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Vol. 5, No. 1, 1955,
- BITTENCOURT, D. M. A.; Vargas, Carlos Lauro. Fatores Intervenientes na aplicação de uma proposta de barreiras de contenção de erosões e análise de estabilidade de taludes. In: I GEOCENTRO - I Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica na Região do Centro-Oeste, 2009, Goiânia. Anais, 2009. v. 1. p. 100-104.
- DAS, Braja M. Fundamentos de engenharia geotécnica. Tradução da 7ª edição norte americana Cengage Learning, 2011.
- FIORI, Alberto Pio. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. Oficina de Textos, 2016.
- GERSCOVICH, Denise M. S. Estabilidade de Taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- ITASCA. FLAC: online manual table of contents. 5. ed. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2011.
- MASSAD, Faïçal. Obras de terra: curso básico de Geotecnia. 2ª ed. – São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, Vol. 15, No. 1, 1965, pp. 77-93.
- NOWATZKI, A.. Professor Alexei Nowatzki. 2011; Tema: Prof. Dr. Alexei Nowatzki de Geografia. (Site). Disponível em: < <https://profalexeinowatzki.wordpress.com/> >.
- PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. 3ª Ed. - São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- PRUSKI, Fernando Falco. Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica. Universidade Federal de Viçosa, 2009. ROSS, Jurandyr L. Sanches (org). Geografia do Brasil. São Paulo: EDUSP. 6. Ed., 1. Reimp. 2011.
- XSTABL, (1999), Slope Stability Reference Manual, Version 5.2, pp 11-26.