

Aplicação da Técnica de Rede Neural Artificial para Determinação do Fator de Segurança de Taludes Simples com Sobrecarga

Gérson Jacques Miranda dos Anjos
Professor, UFPA, Belém, Brasil, mirandadosanjos@gmail.com

Leandro Augusto Rodrigues Santiago
Graduado em engenharia civil, UFPA, Belém, Brasil, eng.lesant@gmail.com

Marcelo Seabra de Andrade
Graduado em engenharia civil, UFPA, Belém, Brasil, eng.marceloseabra@gmail.com

RESUMO: O presente estudo busca desenvolver uma simplificação da formulação de Spencer (1967) através de uma equação para a estabilidade de taludes pelo método determinístico, valendo-se da técnica das Redes Neurais Artificiais (RNA) que calcula de maneira direta o Fator de Segurança de taludes simples com sobrecarga. Foram empregados 1.800 casos obtidos pela combinação de parâmetros de entrada (inclinação do talude β , ângulo de atrito ϕ' , peso específico do solo γ , coesão do solo c' , altura do talude H , parâmetro de poro pressão ru e sobrecarga q) para o treinamento da RNA, utilizando-se o Fator de Segurança obtido pelo método de Spencer, tomado como valor medido. O arranjo da RNA com melhor otimização para o objetivo pretendido foi composto por sete parâmetros de entrada (β , ϕ' , γ , c' , H , ru e q) e cinco camadas ocultas com a camada de saída sendo o valor do Fator de Segurança. O método sugerido comparativamente aos outros cinco métodos avaliados estatisticamente, mostrou-se amplamente superior. Os resultados demonstraram a viabilidade da utilização da equação sugerida em substituição ao método proposto por Spencer, de modo a permitir sua aplicação de modo simplificado em taludes simples com ou sem sobrecarga.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Fator de Segurança, Redes Neurais Artificiais, Spencer.

ABSTRACT: The present study seeks to develop a simplification of Spencer's formulation (1967) through an equation for slope stability by the deterministic method, which uses the technique of Artificial Neural Networks (ANN) to directly calculate the Factor of Safety of simple slopes containing overload. A total of 1,800 cases obtained by combining input parameters (slope β , friction angle ϕ' , specific soil weight γ , soil cohesion c' , slope height H , pore pressure ru parameter and overload q) were adopted for ANN training, using the Safety Factor proposed through Spencer's method, and taken as a measured value. The ANN arrangement, as the best optimization for the intended objective, was composed of seven input parameters (β , ϕ' , γ , c' , H , ru and q) and five hidden layers, with the output layer being the value of the Safety Factor. The method suggested, compared to the other five methods evaluated statistically, proved to be vastly superior. The results demonstrated the feasibility of using the suggested equation to replace the previous method proposed by Spencer, in order to allow its application in a simplified way on simple slopes with or without overload.

KEYWORDS: Slope Stability, Safety Factor, Artificial Neural Networks, Spencer.

1 INTRODUÇÃO

Em qualquer artigo, estudo ou pesquisa que se faça acerca de taludes em âmbito nacional, é de se esperar que a norma brasileira seja uma das bases utilizadas na pormenorização dos termos ou procedimentos abordados. Neste contexto, a norma que regulamenta a estabilização de taludes é a NBR 11682:2009, a qual em seu capítulo 3 “Termos e definições”, subitem 3.20, define os taludes como sendo terrenos inclinados.

Valendo-se ainda da mesma norma, outro conceito importante é o da ruptura. No capítulo supracitado, agora no subitem 3.16, tem-se que a ruptura é a “modificação da geometria do talude ocasionada por escorregamento ao longo de uma superfície ou zona de concentração de deformações cisalhantes ou por deformações excessivas que afetem obras de engenharia”. Na Figura 1 têm-se elementos de um talude após ruptura.

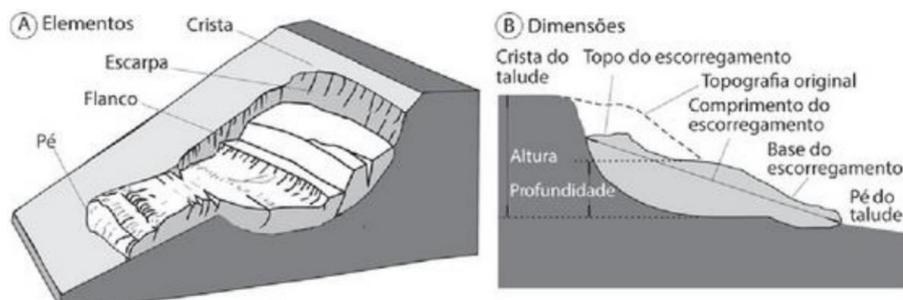


Figura 1. Elementos que caracterizam uma massa escorregada (Gerscovich, 2016).

Existem inúmeras situações nas quais a análise de estabilidade de taludes é de vital importância levando sempre em consideração a situação mais crítica em favor da segurança. Este trabalho utiliza as Redes Neurais Artificiais (RNA) como ferramenta de auxílio à pesquisa geotécnica desenvolvendo uma equação para o cálculo de Fator de Segurança de taludes, de maneira a analisar a estabilidade de taludes simples com sobrecarga em um solo uniforme utilizando a resposta via método de Spencer (1967) como o valor (real) medido. Os elementos mostrados na Figura 2 identificam o tipo de talude a ser analisado.

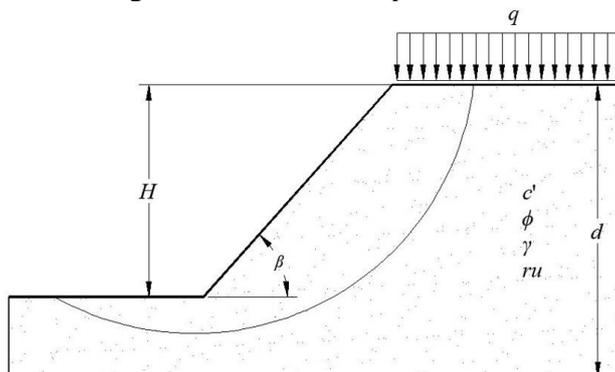


Figura 2. Parâmetros utilizados nas análises (Autor, 2022).

Os casos analisados e, posteriormente, formulados via equação usando RNA totalizaram 1800. Inicialmente, foram escolhidos 300 casos de taludes com distintas propriedades geométricas (inclinação β , altura H) e distintas propriedades geotécnicas (ângulo de atrito ϕ' , coesão c' , razão de poropressão ru , peso específico do solo γ) e, adicionalmente cinco casos de carregamento distribuído (sobrecarga q), conforme mostrado na Figura 3.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Investigação do Solo

Com certeza absoluta a investigação do solo é a essência da construção, levando em consideração que toda obra interage com o solo. Neste sentido, a NBR 11682/2009 no seu capítulo 5, subitem 5.6, considera imprescindível que em um estudo de taludes se conheça da forma mais fiel possível características como topografia, estratigrafia e as propriedades geomecânicas do talude.

2.2 Fator de Segurança

Há uma gama de métodos para se fazer a análise de estabilidade de um talude, dentre os quais se destacam, por diversos fatores, os chamados métodos determinísticos. Dentre esses fatores pode-se citar o fato de já serem utilizados há anos na geotecnia e por sua ampla aceitação. Esses métodos basicamente fazem uma relação entre tensões, originando um coeficiente conhecido como fator de segurança.

A NBR 11682:2009 define o fator de segurança como o “valor da razão entre a resistência (tensão cisalhante máxima disponível) e a resistência mobilizada (tensão cisalhante atuante ao longo da superfície de ruptura)”, conforme ilustra a Figura 3.

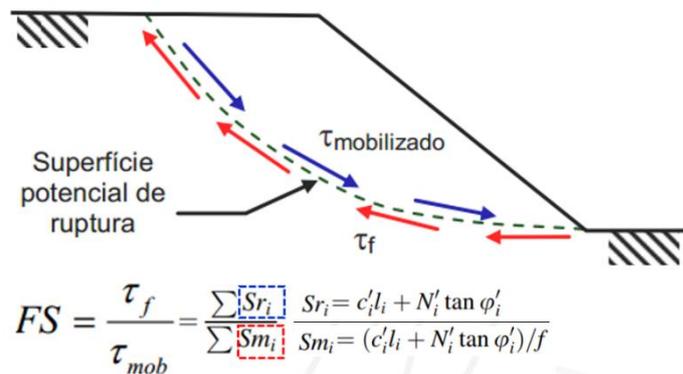


Figura 3. Superfície potencial de ruptura e Fator de Segurança (Gerscovich, 2016).

Há também outros fatores de segurança na norma que são válidos para todos os tipos de carregamentos identificados pelo projetista e têm a finalidade de cobrir as incertezas naturais das diversas etapas de projeto e construção, variando conforme a situação e o potencial de ruptura do talude (NBR 11682, 2009). A norma ainda ressalta que, no caso de grande variabilidade dos resultados de ensaios geotécnicos, os fatores de segurança mínimos admissíveis devem ser majorados em 10% ou, alternativamente, ser usado um enfoque probabilístico.

2.3 Método Teórico de Spencer

Conhecer as variáveis que participam ativamente dos processos envolvendo a análise da estabilidade de taludes é imprescindível, haja vista toda a carga de importância demonstrada até aqui. Neste sentido, foram vários os estudos realizados com o intuito de conhecê-las e quantificá-las. Neste tópico será apresentado o método de Spencer (1967) por ser ele o método utilizado neste trabalho como premissa para a validação dos resultados. É um método dito rigoroso, em que momentos e forças (incluindo entre fatias) são levados em consideração em termos de equações da estática usadas em sua avaliação. As principais hipóteses dos métodos de equilíbrio limite são:

- O solo se comporta segundo um modelo rígido-perfeitamente-plástico do tipo Mohr-Coulomb;
- A massa de solo encontra-se em condições iminentes de ruptura generalizada;
- O fator de segurança é único ao longo da superfície de ruptura;
- O fator de segurança das componentes coesiva e de atrito da resistência é igual para todos os solos envolvidos.
- Postula-se um mecanismo de ruptura, isto é, arbitra-se uma determinada superfície potencial de ruptura (circular, planar, etc). O solo acima da superfície é considerado como corpo livre;
- O equilíbrio é calculado pelas equações da estática (Somatório de Forças – verticais, horizontais e Momentos 0). O equilíbrio de forças é feito subdividindo-se a massa de solo em fatias e analisando o equilíbrio de cada fatia.

Em 1967, E. Spencer cria um método capaz de auxiliar na análise de estabilidade de taludes. Este método se encaixa na classificação dos “rigorosos” por satisfazer todas as três equações de equilíbrio bidimensional, sem deixar de lado as forças interlamelares apresentando um nível satisfatório.

Em resumo, o seu método determina dois fatores de segurança, Ff e Fm, calculados em termos do equilíbrio das forças e do equilíbrio de momentos respectivamente, tendo como pressuposto base que as forças são paralelas entre si e somando as resultantes das forças X_i , Y_i , X_{i+1} e Y_{i+1} de interação entre as fatias, encontra-se o Q_i com inclinação igual a θ , como mostra a Figura 4.

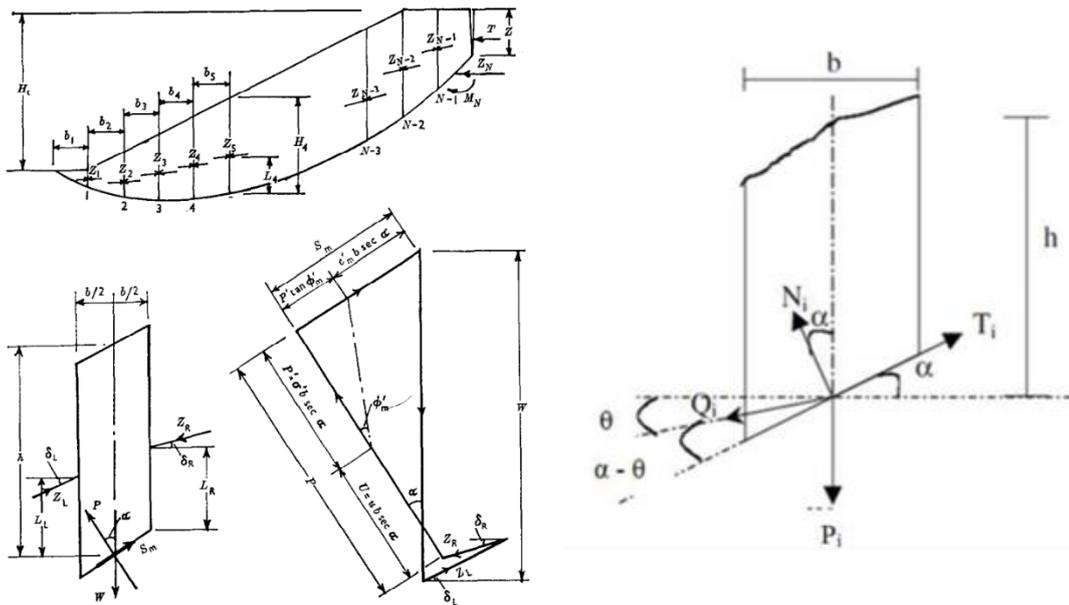


Figura 4. Método de Spencer (Marangon, 2004).

Calcula-se o equilíbrio das forças logo na base da fatia na direção normal e na direção tangencial, definindo-se o valor de Q_i . Para que haja equilíbrio, a resultante das forças interlamelares (Q) passa pelo ponto de interseção das demais forças atuantes na fatia (W, N e S).

A partir das equações de equilíbrio de forças nas direções paralelas e normais à base da fatia, calcula-se a resultante Q , conforme a Equação 1, cuja magnitude depende das características geométricas e parâmetros geotécnicos de cada fatia, bem como do valor adotado para a inclinação das forças interlamelares (θ). Em termos de razão de propressão (r_u), assumida constante em todo o talude, a expressão para o cálculo da resultante Q é definida por:

$$Q = \gamma H b \left\{ \frac{\frac{c'}{FS\gamma H} + \frac{1}{2} \frac{h}{H} \frac{\tan \phi'}{FS} [1 - 2r_u + 2 \cos \alpha] - \frac{1}{2} \frac{h}{H} \text{sen}(2\alpha)}{\cos \alpha \cdot \cos(\alpha - \theta) \left[1 + \frac{\tan \phi'}{FS} \tan(\alpha - \theta) \right]} \right\} \quad (1)$$

A equação resultante Q também incorpora o FS, sendo ainda necessário usar um processo iterativo para o cálculo do FS final.

3 METODOLOGIA

3.1 Apresentação de Dados

A equação proposta a seguir foi desenvolvida a partir da coleta de dados que foram gerados através da determinação das faixas de valores típicos para cada parâmetro de entrada, conforme dados da Tabela 1, em um total de 1800 casos analisados.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros de entrada (Fonte: Autor, 2022)

Altura do talude H (m)	Inclinação do talude β (graus)	Coesão c' (kPa)	Ângulo de atrito ϕ' (graus)	Peso específico γ (kN/m ³)	Razão de poropressão (ru)	Sobrecarga (q)
3	15	0	20	15	0	0
4	20	5	25	16	0,25	5
5	25	10	28	18	0,5	10
6	30	12	30	20		15
7	33	15	33	22		25
8	35	18	35			50
9	40	20	40			100
10	45	25	45			
12	50	30	50			
15	55	40				
20		50				
30		60				
50						

A preparação dos dados constou das etapas de inserção das coordenadas para cada talude, conforme Figura 5, em que são mostrados três casos distintos (dentre os 1800). Posteriormente, foi feita a análise usando o software *Slide* (Rocscience). A Figura 6 mostra um caso específico como exemplo.

Os métodos de Bishop, Spencer e Morgenstern & Price foram analisados. O presente trabalho usará os resultados obtidos pelo método rigoroso de Spencer na validação do FS via rede neural.



Figura 5. Dados dos talude (Autor, 2022).

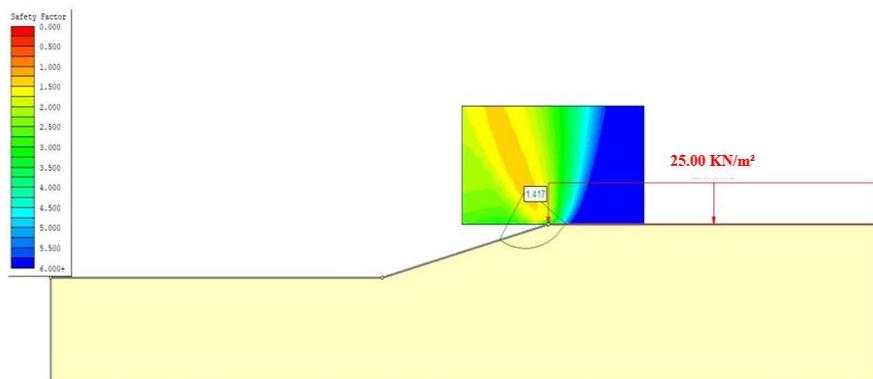


Figura 6. Análise do FS com o software *Slide* (Autor, 2022).

3.2 Arquitetura da Rede Neural Proposta

Após as etapas preliminares para a obtenção de dados, iniciou-se o processo para o desenvolvimento da RNA, executada no software MATLAB com repetidos testes para a definição da estruturação mais adequada, onde foram definidas como variáveis de entrada os parâmetros presentes na Tabela 1, comumente utilizados nas metodologias para o cálculo de fator de segurança de taludes, sendo eles: peso específico do solo, coesão, ângulo de atrito, inclinação do talude, altura do talude, razão de poropressão e sobrecarga.

A arquitetura mais exitosa ficou definida com a composição de sete parâmetros de entrada e uma camada intermediária (oculta), formada por cinco neurônios. O número de camadas ocultas foi fixado em uma unidade, pois esta formação é indicada para a solução de problemas linearmente separáveis, assim como o objeto deste estudo. O número de neurônios adotado foi determinado após diversas tentativas, variando entre os valores dentro da faixa do número de entradas (sete) e o de saída (uma).

O algoritmo utilizado na implementação do modelo foi o *feed-forward backpropagation*, com otimização bayesiana e as funções de ativação das camadas intermediária (fn1) e de saída (fn2) foram fixadas como tangente-hiperbólica e identidade, respectivamente. Do conjunto analisado, delimitou-se 70% dos casos para o processo de treinamento da RNA, e os demais igualmente divididos para a validação e teste. É importante ressaltar que a RNA desenvolvida é condicionada e treinada com a faixa de dados definidos previamente (Tabela 1), de tal forma que dados fora do *range* gerarão resultados menos precisos.

3.3 Método Proposto

Após o treinamento, validação e teste da RNA, com a arquitetura especificada no item anterior (3.2), efetuados com software MATLAB, obteve-se os pesos das conexões entre camadas, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Pesos de conexão entre camadas da RNA, acrescidos da constante de normalização

	Peso (<i>weight</i>)							Viés (<i>bias</i>)		
	W_{ik}							W_k	b_{hk}	b_0
	H	β	c'	ϕ'	γ	r_u	q	FS		
Neurônio oculto 1 (k = 1)	-2,414155	-0,0834	0,3123	0,0372	-0,09114	0,0013525	-0,422	51,67148994	-5,1916825	6,966931115
Neurônio oculto 2 (k = 2)	-0,132775	-0,0666	0,1188	0,2061	-0,02702	0,0270475	-0,1065	8,005181889	-1,0238775	
Neurônio oculto 3 (k = 3)	0,09682	0,0378	-0,0813	-0,2043	0,01673	-0,072125	0,1255	10,82662539	1,326865	
Neurônio oculto 4 (k = 4)	-0,97008	-0,0678	-1,1016	0,003	-0,116585	-0,0527125	-0,13	-52,23477167	-4,7402075	
Neurônio oculto 5 (k = 5)	0,03149	-0,8624	0,0465	0,31335	0,0154	-0,168615	-0,0585	11,44219814	-2,751885	

Com os pesos das conexões pode-se estruturar a RNA para obter-se a expressão da equação proposta conforme o algoritmo *feedforward*, originando a expressão:

$$FS = 133,51913.H_1 + 20,68539.H_2 + 27,976.H_3 - 134,97465.H_4 + 29,56664.H_5 + 20,93355 \quad (2)$$

$$H_1 = \tanh(-0,10273.H - 0,00417.\beta + 0,01041.c' + 0,00248.\phi' - 0,02604.\gamma + 0,00541.r_u - 0,00844.q - 1,8201) \quad (3)$$

$$H_2 = \tanh(-0,00565.H - 0,00333.\beta + 0,00396.c' + 0,01374.\phi' - 0,00772.\gamma + 0,10819.r_u - 0,00213.q - 1,13503) \quad (4)$$

$$H_3 = \tanh(0,00412.H + 0,00189.\beta - 0,00271.c' - 0,01362.\phi' + 0,00478.\gamma - 0,2885.r_u + 0,00251.q + 1,56773) \quad (5)$$

$$H_4 = \tanh(-0,04128.H - 0,00339.\beta - 0,03672.c' + 0,0002.\phi' - 0,03331.\gamma - 0,21085.r_u - 0,0026.q - 1,63409) \quad (6)$$

$$H_5 = \tanh(0,00134.H - 0,04312.\beta + 0,00155.c' + 0,02089.\phi' + 0,0044.\gamma - 0,67446.q - 0,00117.q - 1,91013) \quad (7)$$

4 CONCLUSÃO

O presente estudo soma-se a outros na literatura mundial na confirmação do desempenho exitoso das RNAs em problemas relacionados a engenharia geotécnica de taludes. Suas funções de aprendizado, com auto correções sucessivas, por meio da adaptação dos pesos sinápticos de cada uma das entradas, garantem o aperfeiçoamento contínuo do sistema da rede. Isto torna-a muito útil na solução de problemas na área geotécnica, que trata de problemas complexos - como a estabilidade de taludes - de modo eficiente e eficaz.

Por fim, os resultados demonstraram a viabilidade da utilização da equação sugerida em substituição ao método rigoroso proposto por Spencer, de maneira a permitir sua aplicação de modo simplificado, com o uso de uma ferramenta rápida e usada facilmente pela comunidade geotécnica na determinação do Fator de segurança de Taludes simples ou àqueles em que as condições de variabilidade estratigráfica sejam pequenas, com o ou sem o uso de sobrecarga. A Equação sugerida neste trabalho não deve sofrer qualquer modificação quanto a faixa de dados para sua aplicação (Tabela 2), bem como no número de algarismos significativos das Equações usadas, devendo ser usada exatamente conforme mostrado nas Equações 2 a 7, mostradas anteriormente. A resposta do FS segue uma função densidade de probabilidade lognormal, o que condiz com vários trabalhos que confirmam este mesmo tipo de função.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, L.W., Lee, T. S., Sharma, S., Boyce, G. M. (1996). *Slope Stability and Stabilization Methods*. NY: Jhon Wiley.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Bishop, A. W., Morgenstern, N. R. (1996). *Stability Coefficients for Earth Slopes*. Geotechnique.
- Box, G., Tiao, C. (1973). *Bayesian inference in statistical analysis*. *International Statistical Review*. Disponível em: < <https://www.semanticscholar.org/paper/Bayesian-inference-in-statistical-analysis-Box-Tiao/a205103d4f25ae39f417bac7bd5142302d7f448c> >. Acesso em: 10 abr. 2021
- Braga, A. D. P., Carvalho, A. P., Ludermir, T. B. (2000). *Redes neurais artificiais: Teoria e aplicações*. Rio de Janeiro: Editora Livros Técnicos e Científicos.

- Chung, Y., Kusiakb, A. (1944). *Grouping parts with a neural network*. *ScienceDirect*. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0278612594900345>>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- Corrêa, V. A. (2019). *Aplicação da técnica de rede neural artificial para a determinação do fator de segurança de taludes simples em substituição ao método gráfico de Michalowski*. *Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA*.
- Cruden, D. M., Varnes, D. J. (1996) Landslide Types and Processes. In: Turner, A. K.; Shuster, R. L. (eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, Washington D. C. National Research Council, p. 36 - 75.
- Cunha, M. A. (1991) *Manual de Ocupação de Encostas*. São Paulo, p. 216.
- Gersovich, D. M. S. (2016). *Estabilidade de taludes*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Marangon, M. (2004) Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia. Material didático ou instrucional. 25 p.
- Negrão, A., Campanha, G. (2018) *Processos em Encosta*. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2108078/mod_resource/content/2/Processos%20em%20encostas.pdf>. Acesso em: 01 fev 2022.
- Park, H. I. Study for Application of Artificial Neural Networks in Geotechnical Problems. *Artificial Neural Networks*, 2011.
- Pinto, C. S. Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, Vol 3, 2006.
- Skempton, A. W., Hutchinson, J. Stability of Natural Slopes. (1969). Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/qdownload/skempton-amp-hutchinson-1969-stability-of-natural-slopes-pdf-free.html>>. Acessado em: 05 jan 2022.
- Spencer, E. (1967) A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Géotechnique*, Vol. 17.
- Terzaghi, K. (1950) Mechanisms of Landslides. Geotechnical Society of America, Berkeley. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/books/book/750/chapter/3902883/Mechanism-of-Landslides>>. Acessado em: 18 dez 2021