

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/247

Retroanálise Probabilística Bidimensional por Equilíbrio Limite de Ruptura de Talude no Morro da Força em Ouro Preto/MG

Filipe G. Xavier,

Mestrando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, filipe.xavier@wsp.com

André C. Zingano,

Professor Adjunto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, andrezin@ufrgs.br

Arthur Ximenes

Geólogo, WSP, Belo Horizonte, Brasil, arthur.ximenes@wsp.com

Emanuel Silveira

Engenheiro de Minas, WSP, Belo Horizonte, Brasil, emanuel.silveira@wsp.com

Roberto César Silva

Engenheiro Civil, WSP, Belo Horizonte, Brasil, roberto.silva2@wsp.com

RESUMO: Ouro Preto é uma cidade situada no estado de Minas Gerais na qual está sujeita a deslizamentos e rolamentos de solo/rocha. Infelizmente uma dessas fatalidades ocorreu no início de 2022 na qual um escorregamento translacional veio ocasionar perdas materiais no entorno do Morro denominado da Força. Assim, o objetivo deste trabalho é estimar os parâmetros de resistência do regolito presente no talude através de uma retroanálise probabilísticas da ruptura em questão. A modelagem numérica bidimensional foi desenvolvida por meio do software Slide 2 da Rocscience e os parâmetros de entrada iniciais foram estimados através de correlações geotécnicas. Apesar de haver diversas incertezas tal metodologia mostrou-se satisfatória para fornecer um embasamento técnico para dimensionamento de contenções em taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Retroanálise, probabilístico, correlação e equilíbrio-limite.

ABSTRACT: Ouro Preto is a city located in the state of Minas Gerais, which is subject to soil/rock slides and movements. Unfortunately, one of these fatalities occurred in early 2022, in which a translational slip resulted in material losses around the hill known as Morro da Força. Therefore, the objective of this work is to estimate the strength parameters of the regolith present in the slope through a probabilistic back-analysis of the rupture in question. The two-dimensional numerical modeling was developed using Rocscience's Slide 2 software, and the initial input parameters were estimated through geotechnical correlations. Despite the numerous uncertainties, this methodology proved satisfactory in providing a technical basis for designing slope reinforcements.

KEYWORDS: Back-analysis; Probabilistic; Correlation; Limit equilibrium.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos têm se tornado rotineiro os movimentos de massa em que há prejuízos materiais e de vidas humanas. A cidade de Ouro Preto – MG entra dentro desse cenário, isso se deve a ocupação urbana inadequada nas encostas, associada aos aspectos geológicos, geomorfológicos e geotécnicos da região (Xavier, 2019). Esses movimentos têm caráter natural e são causados devido a agentes exógenos modeladores do relevo, contudo as consequências dos movimentos de massa têm sido catastróficas devido a interferência com empreendimentos dos mais variados portes econômicos e funções.

Para mitigar o impacto causado por movimentos de massa é necessário caracterizar a região nas quais os empreendimentos estão locados com intuito de avaliar a necessidade de intervenção de engenharia que mitiguem a ocorrência de movimentos de massa tão comuns nos períodos chuvosos (Bretas, 2020).

A obtenção de parâmetros geotécnicos assertivos para alimentar modelos numéricos têm sido um desafio para a comunidade acadêmica, tendo em vista o alto custo para aquisição de dados. Assim, um movimento de massa pode vir a fornecer diversas informações sobre a condição de ruptura daquela encosta. No momento que a razão das forças resistentes sobre as solicitantes é unitária ($FS=1$) considera-se que a estrutura está na iminência do seu rompimento, tal premissa permite corroborar em um modelo numérico os parâmetros geotécnicos no momento da ruptura do talude, sendo eles resistência ao cisalhamento, intercepto de coesão, entre outros. O processo de determinar as condições e estabelecer o modelo mais adequado para o talude a partir das informações de sua ruptura é denominado retroanálise (Duncan; Wright; Brandon, 2014 *apud* Bretas, 2020). Contudo, para seu emprego é necessário entrar com parâmetros iniciais, condições de contorno, definir o método probabilístico e a distribuição estatística adotada conforme o cenário estudado.

2 OBJETIVO

A proposta desse artigo é corroborar os parâmetros geotécnicos inseridos por correlações de sondagens através de uma retroanálise probabilística, fornecendo um embasamento técnico para dimensionamento de contenções em taludes. Para isso foi necessário desenvolver um modelo geológico implícito enfatizando o regolito obtido por sondagens, assim, obteve-se a estratigrafia da área de estudo, essas informações alimentaram um modelo numérico bidimensional baseado em equilíbrio-limite no qual foi possível mensurar a aderência dos parâmetros iniciais com ferramentas probabilísticas.

3 METODOLOGIAS EMPREGADAS

Neste estudo, foi analisada a estabilidade de taludes utilizando o método de Morgenstern-Price. Esse método foi desenvolvido para obter resultados mais precisos, buscando superfícies de escorregamento não circulares que respeitem as condições de equilíbrio e de fronteira. Ele é considerado rigoroso e foi aplicado em conjunto com o método de busca, que utiliza superfícies não circulares com refinamento automático gerado pelo software Slide (versão 9.023). Esse método busca superfícies circulares em superfícies lineares por partes, subdividindo os arcos circulares. Essa abordagem visa melhorar significativamente os resultados, encontrando superfícies de deslizamento com fatores de segurança mais conservadores.

Para o maciço rochoso considerou-se um modelo anisotrópico seguindo os critérios de resistência generalizado de Hoek-Brown e para regolito os parâmetros de resistência do critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Para obtenção dos parâmetros iniciais do modelo foi necessário realizar procedimentos indiretos como as correlações das sondagens, com intuito de atribuir parâmetros ligados a resistência de cisalhamento, intercepto de coesão e compressibilidade dos solos. Os cálculos dos ensaios de campo foram baseados na metodologia proposta por Schnaid e Odebrecht (2012). De acordo com esses autores, a energia teórica de queda livre transmitida do martelo para a haste não corresponde à energia nominal transmitida na prática. Portanto, é necessário fazer uma correção, especialmente em equipamentos manuais, onde essa energia atinge em média de 70% a 80% da teórica. Para garantir uma abordagem conservadora, todas as estimativas neste estudo serão corrigidas utilizando o fator de 70%.

$$N = N_{spt} * 0,7 \quad (1)$$

A estimativa dos valores de intercepto de coesão partiu dos conhecimentos adquiridos fazendo as seguintes considerações para valores máximos e mínimos probabilísticos.

$$C_{m\acute{a}x} = N/0,8 \quad (2)$$

$$C_{m\acute{i}n} = N/1,2 \quad (3)$$

Utilizamos a formulação de Teixeira (1996) para estimar o ângulo de atrito do material, adaptando o índice de resistência à penetração (N) para nosso caso específico.

$$\phi = \sqrt{20 + \bar{N}} + 15^\circ \quad (4)$$

Os pesos específicos dos materiais foram definidos com base na análise tátil visual e nos valores médios obtidos por penetração. Para as camadas de solos arenosos, foram utilizadas as correlações propostas por Godoy (1972) conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Correlações empíricas para peso específico de solos arenosos (Godoy, 1972).

N (golpes)	Consistência	Peso Específico (KN/m ³)		
		Drenado	Úmido	Saturado
< 5	Fofa	16	18	19
5 – 8	Pouco compacta			
9 - 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 – 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito compacta			

Para mensurar a dispersão dos parâmetros adotados utilizou-se o coeficiente de variação (Cov), obtido pela razão do desvio padrão pela média dos valores de um determinado parâmetro, assim, utilizou-se o proposto conforme a seguinte tabela para os seguintes parâmetros., conforme a Tabela 2

Tabela 2: Valores adotados para o coeficiente de variação, adaptado (Lacasse; Nadim, 1996 apud Flores, 2008, apud Bretas 2020)

Parâmetro do Solo	Cov Adotada(%)	Referência
Ângulo de atrito efetivo	10	Harr (1984), Kulhawy (1992)
Intercepto de coesão	30	Fredlund e Dahlman (1972), Kulhawy (1992), Lacasse e Nadim (1997), Duncan (2000)

A distribuição adotada dos parâmetros foi log-normal, considerando que a probabilidade de obter valores mais próximos da média é maior que a dos extremos, isso se deve ao histograma acumulado da variação dos parâmetros, os desvios padrões foram adotados referentes aos coeficientes de variação supracitados na Tabela 2. Em função da média acrescentou-se mais ou menos três desvios padrões com intuito de obter 99,74% de confiabilidade no resultado como pode ser visto na Figura 1

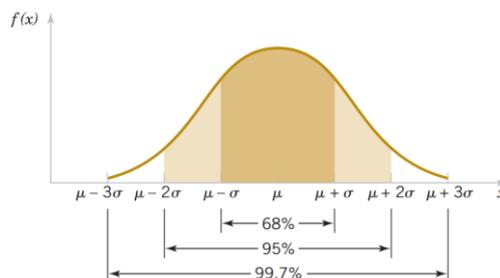


Figura 1: Exemplo de distribuição acumulada (Gaussiana) acessada 20/02/2024 em: <https://www.inf.ufsc.br/~andre.zibetti/probabilidade/normal.html>

Com intuito de otimizar o tempo operacional das análises de probabilidades utilizou a ferramenta superfície de resposta do Slide, conforme manual da Rocscience ela converte as variáveis aleatórias em variáveis aleatórias normais padrão usando equações de transformação (Li et al., 2011), permitindo que o software calcule menos análises direcionando estrategicamente as amostragens de interesse.

4 ESTUDO DE CASO

4.1. Geologia local

O estudo de caso abordado no artigo refere-se ao rompimento no morro denominado da Forca na cidade de Ouro Preto-MG, tal fatalidade ocorreu no dia 13 de janeiro de 2022, o desmoronamento do Morro da Forca provocou a destruição do casarão antigo Baeta Neves, felizmente o casarão estava desocupado e houve somente perda histórico/material a Figura 2 mostra uma imagem de drone pós ruptura.



Figura 2: Vista da ruptura do talude do morro da Forca, acessado 20/03/2024 em: <https://maisminas.org/ouro-preto-retirada-da-terra-que-caiu-do-morro-da-forca-deve-durar-ate-abril/>

Conforme a carta geotécnica de Ouro Preto as rochas presentes no Morro da Forca são constituídas pela formação Sabará sendo rochas metassedimentares com variados graus metamórficos e de alteração (Carvalho, 1982). Para desenvolver este trabalho foram avaliadas sondagens realizadas ao longo da região a Figura 3 evidencia a locação dessas sondagens em planta e um exemplo de caixa de sondagem obtida através da campanha.



Figura 3: Locação dos furos de sondagem e exemplo de caixa de testemunho.

4.2. Descrição geotécnica-geomecânica

Os procedimentos adotados seguiram o preconizado na NBR 6484 (Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos), para a descrição geomecânica da sondagem, os testemunhos foram organizados de maneira que as manobras estejam identificadas, definindo assim os intervalos geotécnicos.

A caracterização da matriz determina as frações granulométricas, texturas e possivelmente da plasticidade do regolito. O grau de alteração compreende a desintegração física e química da rocha devido aos

processos de intemperismo, conforme a definição da International Society for Rock Mechanics - ISRM (1981). O grau de resistência está associado a integridade física que pode ser alterado por processos intempéricos conforme a definição da ISRM (1981), através dos graus de resistência da rocha é possível estimar os valores associados de sua resistência à compressão uniaxial/simples. O RQD (Rock Quality Designation ou Índice de Qualidade da Rocha) foi criado em 1964 por D. U. Deere para avaliar quantitativamente a qualidade dos maciços rochosos.

O Geological Strength Index – GSI (Hoek, 1995) estima a redução a resistência do material rochoso em diferentes condicionamentos, utilizado no critério de Hoek-Brown para estimar os parâmetros. O parâmetro m_i indica a resistência a compressão não confinada do material rochoso, sendo tabelado de acordo como a litologia da rocha e o fator de distúrbio está associado a influência externas que o maciço sofreu. A definição de tais parâmetros está atribuída na rotina dos modelos anisotrópicos de Hoek-Brow generalizado no Slide 2.

4.3. Modelo

O modelo geotécnico e geomecânico foi desenvolvido através do software Leapfrog da Seequent, sendo um artifício para tentar estimar a realidade, não obstante, todos os modelos são aproximações do fenômeno que se busca entender, ou seja, são ferramentas para auxiliar na tomada de decisão, assim, as seções 2D foram confeccionadas a partir de uma abordagem implícita utilizando ferramentas como funções de base radial e distâncias assinaladas para geração das superfícies. Foi gerado dois modelos, um com ênfase no regolito e o outro geológico, nas sondagens encontraram os respectivos materiais Filito (FL), Pegmatito (PG), Quartizito (QZ), Aterro (AT), Rocha alterada, Saprólito (SAP), Solo aluvionar (SAL) e Solo residual (SR), contudo foi dada ênfase nos materiais em destaque para o trabalho proposto. A Figura 4 mostra os modelos gerados com uma proporção no eixo Z de 1,5 vezes quando comparada com as demais e a Figura 5 a topografia com uma ampliação do eixo Z com a seção obtida através da análise implícita.

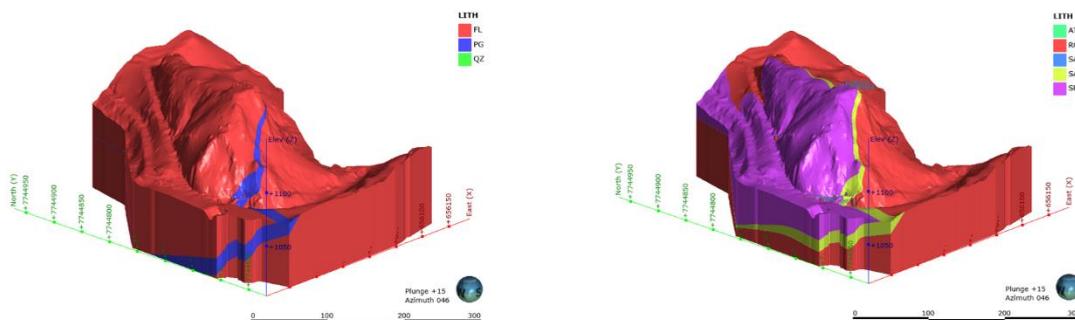


Figura 4: Modelos geológico e geotécnico respectivamente.

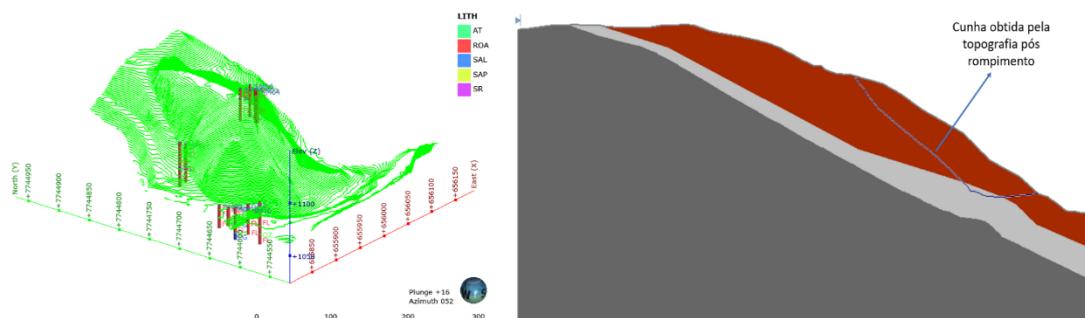


Figura 5: Topografia local pós rompimento e seção obtida no modelo geotécnico exportada para o Slide 2D.

Com intuito de obter parâmetros mais conservadores não foi considerado no modelo contribuições de eventos pluviométricos que acontecia na região ao longo do mês que ocorreu a ruptura.

5 RESULTADOS

Após obtida a seção de maior altura do modelo e sua estratigrafia de maneira implícita, foi definido os parâmetros geotécnicos iniciais através das metodologias de correlação já supracitadas, seguindo o Cov da Tabela 2 e a distribuição log-normal em função da média com mais ou menos três desvios padrões. A Tabela 3 apresenta os parâmetros adotados inicialmente para a análise probabilística.

Tabela 3: Valores adotados inicialmente para os parâmetros geotécnicos conforme correlações com a campanha de sondagem.

Material	Parâmetro	Média	Desv. Padrão	Valor relativo mín.	Valor relativo máx.	Covariância (%)
SR Filito (Nspt=9)	Coesão	9	2.7	8.1	8.1	30%
SR Filito (Nspt=9)	Phi	28	2.8	8.4	8.4	10%
SAP Filito (Nspt=25)	Coesão	21	6.3	18.9	18.9	30%
SAP Filito (Nspt=25)	Phi	36	3.6	10.8	10.8	10%

Através desses parâmetros cunhas de ruptura parecidas mais diferentes entre si foram geradas usando a rotina ferramenta de resposta do Slide, obtendo o seguinte resultado, conforme a Figura 6.

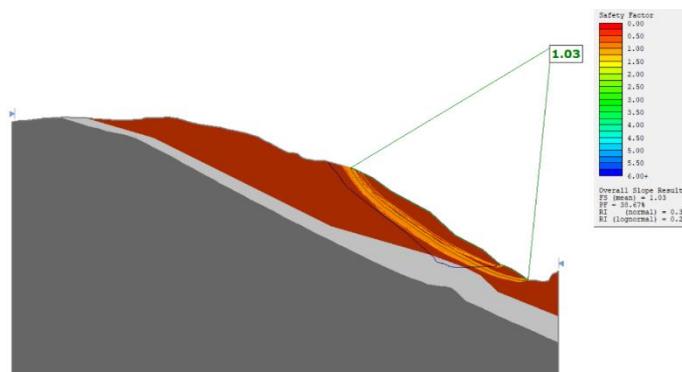


Figura 6: Retroanálise inicial sem a calibração dos parâmetros.

Observa-se que as curvas ficaram aderentes em alguns trechos a cunha da ruptura original. Considerando que a ruptura ocorreu, os resultados mostraram um Reliability Index (RI) acima de zero, o que indicaria que o índice de confiabilidade não está alto e que a probabilidade de falha está em 38,67% mostrando que o modelo inicialmente não está aderente para os parâmetros de resistência iniciais obtidos através de correlações geotécnicas. Assim, variou os parâmetros de resistência conforme a proporção entre as o Cov de cada

parâmetro, respeitando a proporção de variabilidade entre eles com intuito de calibrar os dados de entrada. A Tabela 4 mostra um quadro resumo desses resultados e a Figura 7 o desenvolvimento das análises.

Tabela 4: Quadro resumo das calibrações dos parâmetros.

Estágio	Probabilidade de falha	Fator de Segurança	Índice de confiabilidade (normal)
1	38,67 %	1.03	0.34
2	50,00%	1.00	-0.02
3	90,00%	0.89	-1.21
4	94,67%	0.86	-1.55
5	90,40%	0.70	-1.54

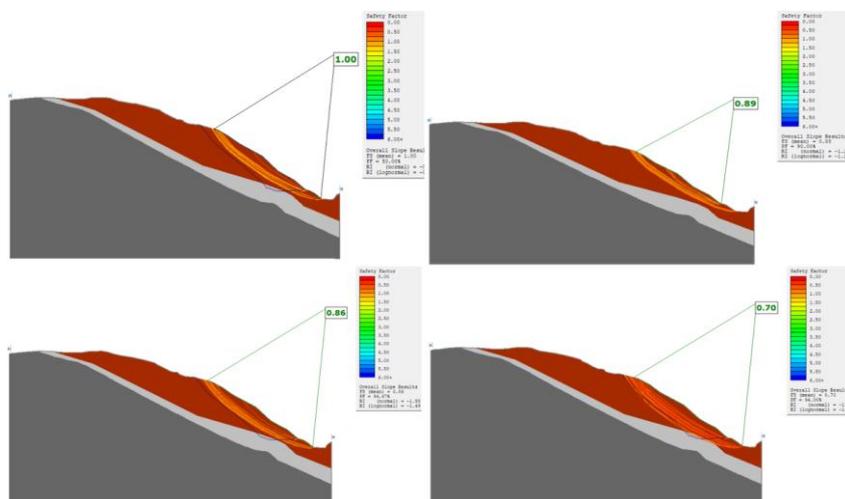


Figura 7: Desenvolvimento das retroanálises probabilísticas para calibração

Nota-se, que a probabilidade de falha convergiu entre os estágios 4 e 5 à medida que foi reduzindo os parâmetros geotécnicos. Após a calibração do modelo observa-se que os resultados se tornaram mais aderentes com a probabilidade de ruptura acima de 90 % e com o RI em torno de -1,5. A Tabela 5 traz os parâmetros de resistência para os materiais após as análises.

Tabela 5: Comparação dos parâmetros.

Material	Parâmetro	Inicial	Pós Calibração
SR Filito (Nspt=9)	Coesão	9	6,9
SR Filito (Nspt=9)	Phi	28	21,7
SAP Filito (Nspt=25)	Coesão	21	16,2
SAP Filito (Nspt=25)	Phi	36	27,9

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O procedimento apresentado neste trabalho, indica uma metodologia pós rompimento com intuito de estimar os parâmetros geotécnicos sem a realização de ensaios laboratoriais. Observa-se que esse tipo de metodologia é atrativo tendo em vista que as solicitações que levaram a aquele rompimento são *in situ* e não simuladas como qualquer outro ensaio.

Para o modelo ser aderente houve a necessidade de diminuir em torno de 22,5% os valores de coesão e ângulo de atrito proposto inicialmente através de correlações geotécnicas, isso reitera que a correlação pode ser muito assertiva para materiais homogêneos. Contudo, para materiais anisotrópicos como saprólitos de filitos e solo residual de filitos a correlação mostrou pouco aderente com o Nspt, apresentando valores sem refletir em parâmetros de resistência elevados.

Assim, retroanálises probabilísticas com intuito de estimar os parâmetros geotécnicos é uma ferramenta que pode vir a apresentar contribuições técnicas para alimentar projetos de contenção em terrenos com solos com características friáveis. Considerando as problemáticas brasileiras ligadas aos movimentos de massas em taludes supracitados neste trabalho, sugere-se adoção da rotina da metodologia apresentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Apostila - *Parâmetros dos Solos para Cálculo de Fundações* – Engenharia Civil (Faculdade Sudoeste Paulista) – FSP, pg. 74 – 89.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484: *Solo Sondagem de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Bretas, T. C. (2020) *Retroanálise probabilística tridimensional por equilíbrio-limite de rupturas de talude em Belo Horizonte/MG*. 168 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Carvalho, E.T. (1982). *Carta Geotécnica de Ouro Preto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 92p.
- Deere, D.U., and Deere, D.W., (1988), "The Rock Quality Designation (RQD) Index in Practice," *Rock Classification Systems for Engineering Purposes*, ASTM STP 984, ed. Louis Kirkaldie, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 91-101.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*, second edition. New Jersey: Wiley.
- Godoy, N. S (1972). *Fundações: Notas de aula, Curso de graduação*. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.
- Hoek, E. & Bray, J.W. (1981). *Rock slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, 3ed. London, 385p.
- ISRM (1981): *Rock Characterization Testing and Monitoring*. ISRM Suggested Methods, International Society for Rock Mechanics, Ed. Pergamon Press, Oxford, 212 p
- Li, D., C, Y., Lu, W., & Zhou, C. (2011). *Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables*. *Computers and Geotechnics*, 38(1), 58-68
- Marques, D. (2022). – *Notas de aula Introdução a Modelagem Geológica* – UFRGS – Porto Alegre, RS.
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. (1999). *Evaluation of geotechnical property variability*. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, pp. 625-639.
- Schnaid, F. Odebrecht, E. (2012), *Ensaio de Campo: e Suas Aplicações à Engenharia de Fundações*.
- Teixeira, A.H (1996). *Análise, Projeto e Execução de fundações*. 3º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia PROJETO. *Anais...*Rio de Janeiro: ABNT:ABMS.
- Timo, V.P. (2019). *Caracterização geológica-geotécnica e propostas de estabilização do Morro da Forca - Ouro Preto*. 134 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Xavier, F. G. (2019). *Estudo do potencial tecnológico de uso de rejeito de minério de ferro em blocos para paramento de estruturas reforçadas por geossintéticos em Ouro Preto - MG*. 70 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Zingano, A. (2023) – *Notas de aula Mecânica de Rochas* – UFRGS – Porto Alegre, RS.