

A importância de ensaios de arrancamento para definição de tratamentos de taludes

Paola Dutra

Engenheira Civil, RUMO S.A., Curitiba, Brasil, paola.dutra@ext.rumolog.com

Marcelo de Paula Barreto

Engenheiro Geotécnico, RUMO S.A., Curitiba, Brasil, mpbarretonline@gmail.com

André Fardin Rosa

Engenheiro Geotécnico, RUMO S.A., Curitiba, Brasil, andre.rosa@rumolog.com

Stefanie de Carla Dias

Engenheira Civil, RUMO S.A., Curitiba, Brasil, stefanie.dias@rumolog.com

RESUMO: Os ensaios de arrancamento consistem na aferição do parâmetro de resistência do contato da superfície ligante-maciço ao longo do trecho injetado (ABNT NBR 16920-2). O contato entre ligante-maciço é um dos principais parâmetros para garantia da eficiência do tratamento especificado. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados de ensaios de arrancamento e o impacto destes no dimensionamento de tratamentos de taludes. O tratamento foi definido através de análises de estabilidade, por meio do método de equilíbrio limite. A definição da resistência do contato superfície ligante-maciço, assim como o cálculo do comprimento de ancoragem, através da adesão, foi realizada através das diretrizes de normas brasileiras, ABNT NBR 16920-2 e ABNT NBR 5629. A resistência do contato ligante-maciço é fundamental para aferição da eficiência de ancoragens passivas, sendo normalmente a menor resistência entre ligante-barras e ligante-maciço. Com os resultados dos ensaios de arrancamento realizados, foi possível relacionar as informações com os critérios definidos em projeto. A execução de ensaios de arrancamento reduz a incerteza envolvida na definição do parâmetro denominado como adesão, informação importante para o dimensionamento de tratamentos. O resultado dos ensaios de arrancamento permitiu relacionar essas informações com os critérios de projeto e reduzir os riscos envolvidos no dimensionamento.

PALAVRAS-CHAVE: Ancoragem, Arrancamento, Ligante-barras, Ligante-maciço, Adesão.

ABSTRACT: Pull-out tests involve the measurement of the binder-mass surface contact strength parameter along the injected section (ABNT NBR 16920-2). The binder-mass contact is one of the main parameters for ensuring the efficiency of the specified treatment. This study aims to present the results of pull-out tests and their impact on the design of slope treatments. The treatment was defined through stability analyses, using the limit equilibrium method. The determination of the binder-mass surface contact strength, as well as the calculation of the anchorage length through adhesion, was conducted following Brazilian standards guidelines, ABNT NBR 16920-2 and ABNT NBR 5629. The binder-mass contact strength is essential for assessing the efficiency of passive anchorages, usually being the lowest strength between binder-bar and binder-mass. With the results of the conducted pull-out tests, it was possible to relate the information to the criteria defined in the project. The execution of pull-out tests reduces the uncertainty involved in defining the parameter known as adhesion, important information for the design of treatments. The outcome of the pull-out tests allowed for the correlation of this information with project criteria and reduced the risks involved in the design process.

KEYWORDS: Anchorage, Pull-out, Binder-bar, Binder-mass, Adhesion.

1 INTRODUÇÃO

Uma das soluções de estabilização de taludes utilizada é a execução de ancoragens, seja passiva ou ativa, dependendo da criticidade avaliada no local, com paramento em concreto projetado ou em tela metálica de alta resistência (GOMES, 2023).

As ancoragens utilizadas na estabilização de taludes, são executadas a partir da disposição uniforme de reforços, com definição de comprimento, espaçamento e inclinação das perfurações pré-determinadas no processo de dimensionamento, estas características são diretamente proporcionais a eficácia executiva dos elementos dimensionados.

A resistência da interface entre o maciço e a ancoragem é tipicamente avaliada por meio de ensaios de arrancamento *in situ* (ABNT, 2021). Todavia, devido a utilização de uma infraestrutura complexa para mobilização (perfuratriz, central de calda de cimento), este procedimento é comumente executado na etapa executiva para validar os parâmetros de projeto. Na fase de dimensionamento os parâmetros de resistência são usualmente estimados através de processos semiempíricos.

Apesar de estudos extensivos sobre resistência ao cisalhamento e interação da força entre maciço e ancoragem, notou-se uma variabilidade considerável nos valores de adesão (qs). Por isso, ensaios de arrancamento são essenciais para avaliar a eficiência do desempenho das ancoragens e determinar os fatores de segurança relacionados à estabilidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Estabilidade de talude

Para garantir a estabilidade dos taludes utilizando a técnica de solo grampeado, é crucial aderir aos critérios de segurança estabelecidos pelos estados-limite últimos. Essa conformidade é avaliada por meio de abordagens teóricas do equilíbrio limite, que determinam o fator de segurança através da análise da superfície potencial de ruptura, seja de maneira probabilística ou determinística. Além disso, o comportamento tensão-deformação do talude pode ser investigado utilizando-se de metodologias baseadas em Elementos Finitos e modelagem numérica, conforme preconizado pela NBR 16.920-2 (ABNT, 2021).

A análise de estabilidade foi conduzida utilizando o software Slide da Rocscience Inc., Toronto – Canadá, seguindo a normativa da NBR 11682 (2009). O processo adotou o método analítico de Spencer, baseado na teoria do equilíbrio limite e empregando o critério de Mohr-Coulomb para definição da ruptura, apresentado a seguir em termos de tensões efetivas:

$$\tau = c' + \sigma' \times \tan\varphi' \quad (1)$$

Sendo:

τ : tensão cisalhante;

c' : intercepto de coesão efetivo;

σ' : tensão normal efetiva;

φ' : ângulo de atrito efetivo.

Os Fatores de Segurança (FS) mínimos adotados para as análises de estabilidade foram obtidos da norma ABNT NBR 11682:2009, a qual prescreve os requisitos exigíveis para o controle da estabilidade de encostas e de taludes. Esta norma prescreve que um projeto deve enquadrar-se em classificações de nível de segurança, estabelecidas de acordo com riscos de perdas de vidas humanas e perdas materiais e ambientais. Para este estudo de caso considerou-se que as escavações permanentes demandam um alto nível de segurança contra danos materiais e ambientais e um alto nível de segurança contra danos a vidas humanas, resultando num FS mínimo de 1,5.

De acordo com a NBR 11682 (ABNT, 2009), a técnica de solo grampeado envolve a inserção de elementos metálicos (geralmente aço CA-50), que funcionam como ancoragem passiva para aumentar a resistência ao cisalhamento do solo.

Para o dimensionamento é importante o entendimento da cunha de ruptura, a qual divide as zonas ativas e passivas. A zona ativa é a área instável do maciço, onde ocorre a deformação para a mobilização das ancoragens. A zona passiva é a área onde as ancoragens estabilizam o maciço, ocorre a incorporação e a reação aos esforços gerados pela zona ativa (Oliveira e Santos, 2007). A Figura 1 ilustra a cunha de ruptura, zona ativa e passiva.

O comprimento do trecho ancorado, necessário na zona de incorporação das ancoragens, é definido a partir da Equação 2:

$$T_{\text{máx}} = q_s \times \pi \times D \times L_b \quad (2)$$

Sendo:

$T_{\text{máx}}$: carga máxima - ensaio de arrancamento

q_s : resistência de interface maciço-ancoragem

D : diâmetro da perfuração

L_b : comprimento do trecho ancorado

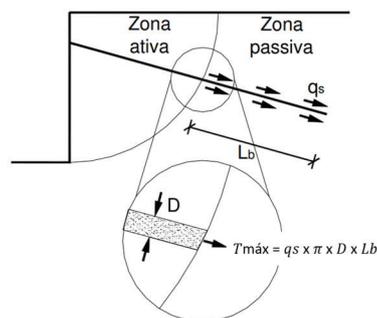


Figura 1. Tração na ancoragem (Ortigão et. Al, 1993)

Os elementos de reforço, que caracterizam a técnica de Solo Grampeado, foram inseridos no software Slide2 como *Soil Nail*. A modelagem deste elemento considerou esforços passivos, ou seja, que necessitam de deslocamentos para mobilização da resistência. Dessa forma, as forças de suporte são acrescentadas no numerador da equação de determinação do Fator de Segurança.

De acordo com a ABNT NBR 16920:2021 – Parte 2, a resistência de projeto para ancoragens passivas é determinada pela Equação 3:

$$T_{d,aço} = f_{yk} \times A_{\text{útil}} \times \gamma_m \quad (3)$$
$$T_{d,aço} = 500.000 \times \left(\pi \frac{0,0194^2}{4} \right) / 1,15 = 129 \text{ kN}$$

Sendo:

$T_{d,aço}$: resistência à tração do aço de projeto;

f_{yk} : resistência característica do aço à tração (500 Mpa CA-50);

$A_{\text{útil}}$: área da seção transversal que pode ser garantida durante a vida útil da obra (diâmetro nominal de 20 mm, considerando espessura de sacrifício de 0,3 mm);

γ_m : coeficiente de minoração da resistência característica, para o aço assumido igual a 1,15.

A resistência ao cisalhamento no contato maciço-ancoragem (q_s) adotada no estudo de caso foi estimada inicialmente a partir de correlações empíricas dos autores apresentados na Tabela 1. O valor de q_s adotado considera a média dos valores apresentados pelos autores.

No software Slide a resistência ao cisalhamento na interface é considerada por metro, por esse motivo, os valores empregados no dimensionamento consideram o perímetro da perfuração de 0,23 m ($2 \times \pi \times 0,075$

m), chegando em um valor de 37 kN/m.

Tabela 1. Valores de resistência da interface maciço-ancoragem. Modificado de Elias e Juran (1991), Moraes e Arduíno (2003), Proto (2005)

Material	Resistência na interface (kN/m ²)	Resistência na interface (kN/m)
Areia siltosa	100 – 150	23-35
Silte	60 – 75	14-17
Colúvio	75 – 150	17-35
Areia Siltosa	380	89
Areno Siltoso (Manaus, AM)	162	38
Argila Arenosa (Niterói/RJ)	166	39
Argila Arenosa (Niterói/RJ)	227/274/260	53/64/61

Destaca-se que a precisão dos valores de resistência ao cisalhamento no contato maciço-ancoragem (q_s) e, por conseguinte, na força de arrancamento, só pode ser alcançada por meio de ensaios realizados *in situ*, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 16920:2021 – Parte 2.

2.2 Ensaio de arrancamento

O ensaio de arrancamento consiste na aplicação de carga na barra instalada, capaz de ocasionar um deslocamento entre o maciço e a ancoragem. O ensaio é monitorado por meio de um macaco hidráulico, ajustado à carga necessária, placas e porcas do sistema de contenção utilizadas para leituras de reações da carga exigida pelo macaco, juntamente com um medidor de deslocamento. Este ensaio possui o intuito de obter informações de resistência da interface maciço-ancoragem (q_s), diretamente proporcional com a capacidade última da ancoragem durante o ensaio de arrancamento (CLOUTERRE, 1991).

Os ensaios de arrancamento indicam a execução de estágios de carregamento, verificando a carga de tração máxima resistente. Durante o ensaio deve ser realizado no mínimo 5 estágios, com variação de carregamento de aproximadamente 20% da carga máxima prevista (ABNT, 2021). Para cada estágio de carga aplicada sobre a ancoragem, através de leitura realizada em relógio comparador, o tempo de espera para cada estágio é de 5 minutos, sendo que para o último estágio são necessários 15 minutos.

A resultante da carga máxima de ensaio está diretamente correlacionada a estabilização da carga durante o ensaio ou limitada pelo deslocamento máximo estabelecido pela projetista e, conseqüentemente, relacionada com a resistência da interface maciço-ancoragem (ABNT, 2021).

Para ensaios de arrancamento, o carregamento de 1,75 da carga equivale a resistência máxima suportada pela ancoragem de ensaio. A barra adquirida para a realização do ensaio necessita de uma resistência superior a relação entre maciço e calda de cimento. Como a principal função do ensaio de arrancamento é a obtenção da carga máxima de tração da interface maciço-ancoragem, o elemento de fixação, normalmente utilizado por barra de aço, deve ser superdimensionada.

Segundo a normativa de solo grampeado, NBR 16.920-2 (ABNT, 2021), para a obtenção de resultados satisfatórios, são necessários a realização de no mínimo 03 ensaios de arrancamento, que são de caráter opcional, visando a obtenção de dado representativo para a região da análise de estabilidade.

Durante a etapa construtiva da solução de solo grampeado, é necessário a execução do ensaio de arrancamento em 1% da quantidade total de ancoragens da obra, ou uma quantidade mínima de três ensaios em região representativa. Devido a execução de esforços na ancoragem, estas não devem pertencer a estabilidade do maciço, sendo apenas ancoragens de sacrifício para a confirmação dos parâmetros utilizados em cálculo e garantindo a segurança da solução.

Os ensaios de arrancamento em grampos exigem cuidados específicos para garantir resultados precisos. É necessário evitar o preenchimento do trecho inicial livre do grampo, pois isso poderia comprometer a integridade do teste. Para isso, são utilizados métodos como o uso de obturador de calda de cimento para evitar o preenchimento do furo. Durante o ensaio, a carga de tração é aplicada no grampo, sujeitando a face e o solo à compressão. Manter livre o trecho inicial do grampo é essencial para evitar compressão nesse ponto, o que

não é desejado. O monitoramento da carga de tração pode ser feito por meio de célula de carga ou pela leitura manométrica do macaco hidráulico, conforme apresentado na Figura 2.

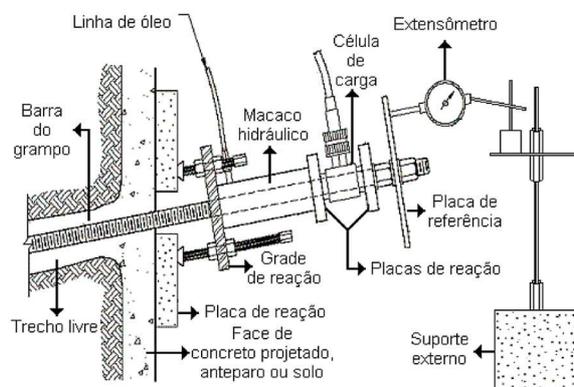


Figura 2. Montagem do ensaio de arrancamento (adaptado de Lazart et. Al, 2023)

3 RESULTADOS

Os parâmetros dos materiais foram obtidos, durante a etapa do projeto básico e executivo, através de sondagens e ensaios de laboratório. Em função de rupturas superficiais e erodibilidade do arenito R0, os parâmetros de resistência foram reduzidos para uma coesão de $c'=5$ KPa e ângulo de atrito de $\phi'=32^\circ$. Foram realizados 8 ensaios de arrancamento no local.

A calda utilizada nos ensaios foi ensaiada, sendo utilizado o cimento tipo CP II 32 Z, com fator A/C de 0,5. Aos 3 dias a resistência mínima foi de 18 MPa e aos 7 dias a resistência mínima foi de 29,4 MPa, sendo que, em algumas amostras, a resistência máxima aos 7 dias chegou em um valor de 33,4 MPa. A resistência obtida nos primeiros 7 dias é superior aos critérios requeridos em projeto.

Na sequência são apresentadas imagens durante a execução dos ensaios de arrancamento do estudo de caso.



Figura 3. Execução do ensaio de arrancamento.

Tabela 2 – Informações técnicas do projeto executivo

Diâmetro da ancoragem	20 mm
Diâmetro do furo	75 mm
Maciço	Arenito friável
Força de adesão de projeto	37 kN/m

Espaçamento de projeto	1,5 x 1,5 m
Resistência à tração do grampo	129 kN
Resistência da placa	50 kN
Comprimento das ancoragens	10 m

Os resultados dos ensaios de arrancamento realizados são apresentados na Figura 4 e na Tabela 3. Observou-se que a resistência mínima identificada nos ensaios foi de 71,6 kN/m², com uma adesão por metro de 16,9 kN/m. Este valor indicou a necessidade de reavaliação do fator de segurança do talude, considerando a discrepância com a adesão mínima de 37 kN/m inicialmente prevista no projeto executivo. Essa reavaliação foi fundamental para assegurar a estabilidade e a segurança do talude em questão, demonstrando a importância dos ensaios de arrancamento na validação dos parâmetros adotados em projeto.

Figura 4. Ensaios de arrancamento – Curva carga versus deslocamento

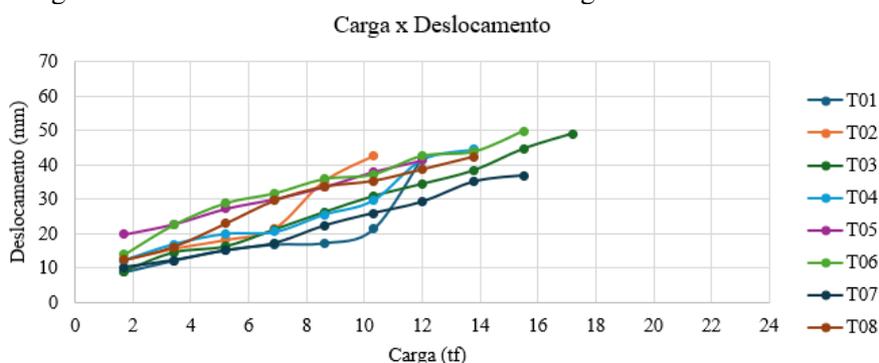


Tabela 3. Resultado dos ensaios de arrancamento

Ancoragem	Deslocamento (mm)	Comprimento ancorado (m)	Carga máxima do ensaio (tf)	Carga máxima do ensaio (kN)	Resistência maciço-ancoragem q _s (kN/m ²)	Força de adesão do projeto T _s (kN/m)
1	42,3	8,0	12,0	117,7	62,4	14,7
2	42,5	8,0	10,3	101,0	53,6	12,6
3	48,9	8,0	17,2	168,7	89,5	21,1
4	44,5	8,0	13,8	135,3	71,8	16,9
5	41,3	8,0	12,0	117,7	62,4	14,7
6	49,7	8,0	15,5	152,0	80,6	19,0
7	36,7	8,0	15,5	152,0	80,6	19,0
8	42,2	8,0	13,8	135,3	71,8	16,9

As curvas carga versus deslocamento indicaram reduzida variabilidade entre os resultados dos ensaios realizados, indicando coerência e representatividade das informações obtidas nos ensaios de campo. Os resultados das análises realizadas são apresentados na Figura 5 a Figura 7.

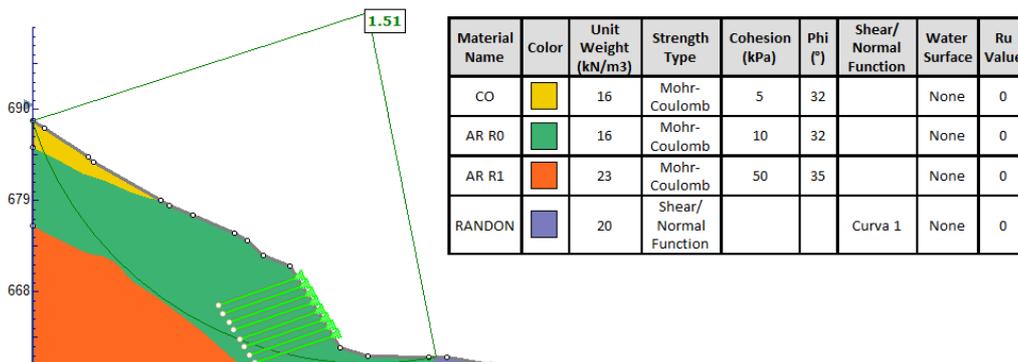


Figura 5. Análise de estabilidade inicial – Adesão obtida através de bibliografia técnica de 37,0 kN/m.

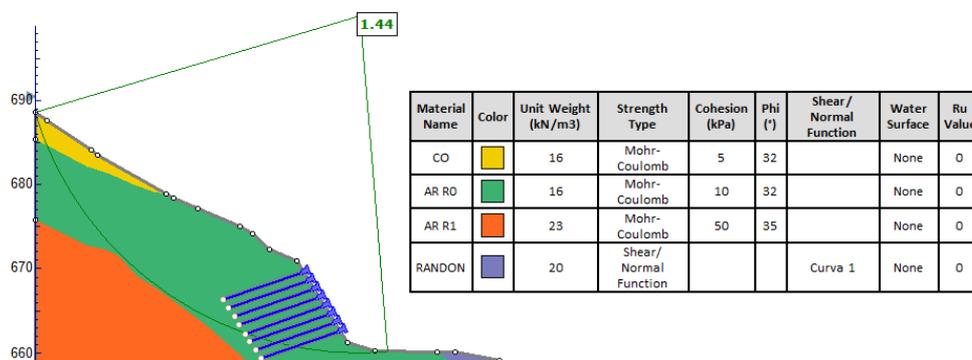


Figura 6. Análise de estabilidade – Adesão obtida através de ensaio de arrancamento de 16,9 kN/m.

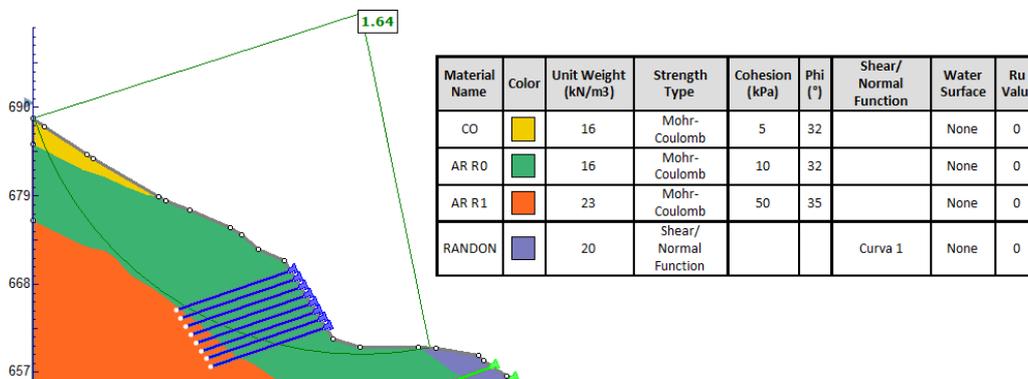


Figura 7. Análise de estabilidade considerando ancoragens com comprimento de 15,0 m – Adesão obtida através de ensaio de arrancamento de 16,9 kN/m.

4 CONCLUSÕES

A execução dos ensaios de arrancamento em ancoragens passivas inseridas em arenito friável revelou resultados que não apenas ficaram abaixo das expectativas projetadas, mas também sinalizaram a necessidade de uma análise de estabilidade aprofundada. Essa situação destacou a importância de ajustar e validar os parâmetros de projeto com base em dados empíricos, garantindo assim a segurança e a estabilidade do talude analisado.

Este estudo sublinha o valor inestimável dos ensaios de arrancamento como ferramenta para a calibração precisa dos parâmetros de projeto. A relação entre a calibração de dados e a segurança estrutural é direta e incontestável, ressaltando a necessidade de alinhar as expectativas de projeto com as condições reais do campo.

As incertezas inerentes às condições de contorno e aos dados geotécnicos são um desafio constante na engenharia geotécnica. Estes fatores, se não forem devidamente considerados e validados por meio de investigações detalhadas e ensaios específicos, podem levar a discrepâncias significativas entre os resultados de projeto e o desempenho real, aumentando o risco de instabilidade.

Portanto, conclui-se que a integração entre a análise teórica e a validação experimental é essencial para o desenvolvimento de projetos de engenharia geotécnica confiáveis. Os ensaios de arrancamento, quando utilizados eficazmente para aferir a aderência solo-ancoragem, fornecem insights valiosos que contribuem para a otimização da segurança e funcionalidade das estruturas de contenção de taludes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a RUMO S.A. pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996). NBR 5629. *Execução de Tirantes Ancorados o Terreno*. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro, RJ.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-2. *Muros e Taludes em Solos Reforçados – Parte 2: Solos Grampeados*. Rio de Janeiro, RJ.
- Clouterre, R. (1991). English Translation of the: “*French Soil Nailing Recommendation-1991. For Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support System Using Soil Nailing* (by Plumelle, Schlosser et al., 1990). Federal Highway Administration. FHWA-SA-93-026.
- Elias, V., Juran, I. (1991). *Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations*. Report FHWA-RD-89-198. U.S. Department of Transportation. McLean, Virginia.
- Gomes, D. D. S. (2023). *Comportamento de ancoragens passivas em ensaios de arrancamento executados em Itabirito friável*.
- Lazart, C. A.; Elias, V.; Espinoza, D.; Sabatini, P. J. (2003). *Soil nail walls - Report nº: FHWAO-IF-03-017. Geotechnical Engineering*. Circular nº 7. s.l.: Federal Highway Administration, D.C.
- Oliveira, M.A., Santos, M.S. (2009). *Solo Grampeado – Zona Ativa, a importância de sua avaliação, como ela pode colaborar no dimensionamento e otimização desta solução*. IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. São Paulo, SP.
- Ortigão, J. A. R. (1995). *Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos*.
- Proto, T.S. (2005). *Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaisse*. Dissertação de Mestrado., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ.