

Ensaio De Arrancamento Verticais Para Grampos Em Solo

Max Gabriel Timo Barbosa

SCO Engenharia Geotécnica, Brasília, Brasil, max.barbosa@sco.eng.br

André Pacheco de Assis

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

Renato Pinto da Cunha

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, rpcunha@unb.br

RESUMO: Os ensaios preliminares à construção de contenções em solo grampeado são fundamentais para otimização do projeto, dado que estimativas de resistência ao arrancamento, tanto teóricas como empíricas, costumam apresentar grande variação e o limite inferior dessas estimativas pode gerar projetos excessivamente conservadores e, por conseguinte, onerosos. Entretanto, os ensaios prévios de arrancamento sub-horizontais, utilizados na prática, são de execução mais demorada devido ao preparo envolvido, com necessidade de escavação, utilizando equipamento e mão de obra extensiva, o que em ensaios verticais não aconteceria. Para diminuir esse impacto, especialmente para obras menores ou para execução de ensaios de arrancamento em época posterior ao projeto básico, mas anterior ao projeto executivo, ensaios de arrancamento verticais surgem como alternativa. Esta opção foi utilizada por Seo et al. (2012) e Seo et al. (2017) como método de investigação da resistência ao arrancamento. No Brasil, em 2022, fez-se ensaios de arrancamento em grampos verticais, em diferentes áreas do Brasil, a fim de validar esta alternativa de ensaio prévio. Este artigo descreve a concepção e execução desses ensaios de arrancamento verticais. Verificou-se que os ensaios verticais apresentam resultados semelhantes aos resultados de ensaios sub-horizontais para grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Grampeado, Grampos, Resistência ao Arrancamento, Reinjeção Setorizada, Injeção Pressurizada.

ABSTRACT: Preliminary tests prior to the construction of soil nailing walls are crucial for project optimization, given that both theoretical and empirical estimates of pull-out resistance tend to exhibit significant variation, and the lower limit of these estimates can lead to excessively conservative and therefore expensive designs. However, sub-horizontal pull-out tests, commonly used in practice, are more time-consuming due to the preparation involved, requiring excavation using extensive equipment and labor, which would not be necessary for vertical tests. To mitigate this impact, especially for smaller projects or for conducting pull-out tests after the basic design but before the executive design, vertical pull-out tests emerge as an alternative. This option was used by Seo et al. (2012) and Seo et al. (2017) as a method for investigating pull-out resistance. In Brazil, in 2022, pull-out tests were conducted on vertical soil nails in different areas of the country to validate this pre-construction testing alternative. This article describes the conception and execution of these vertical pull-out tests. It was found that vertical tests yield similar results to sub-horizontal tests for soil nails executed using the sectorized post grouting technique.

KEYWORDS: Soil Nailing, Soil Nail, Pull-Out Resistance, Sectorized Post Grouting, Pressurized Grouting.

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios de arrancamento são essenciais para avaliar a resistência dos grampos em obras de solo grampeado, representada pelo parâmetro q_s , que é fundamental para análises de contenções. Barbosa et al. (2022) realizaram um estudo focado na caracterização da resistência ao arrancamento de grampos, aplicando a técnica de reinjeção setorizada. Os resultados demonstraram uma resistência superior à técnica de injeção por gravidade, especialmente em solos não problemáticos. Este estudo contribuiu para o desenvolvimento de

um modelo empírico que permite prever a resistência ao arrancamento dos grampos utilizando a reinjeção setorizada, conforme Eq. 1:

$$q_s = 190,24 + 5,38 \cdot N_{SPT} \quad (1)$$

Em que:

N_{SPT} é o valor de número de golpes Standard Penetration Test (N_{SPT}).

No entanto, é importante ressaltar que os ensaios preliminares de arrancamento sub-horizontais, comumente empregados na prática e utilizados por Barbosa et al. (2022), demandam um tempo consideravelmente maior para sua execução devido ao processo preparatório necessário. Isso inclui a realização de escavações e a utilização de equipamentos e mão de obra em maior quantidade e extensão. Em contrapartida, nos ensaios verticais, essas etapas de preparação não são necessárias, o que resulta em uma maior eficiência e agilidade na condução dos ensaios.

Segundo Seo et al. (2012) e Seo et al. (2017), os ensaios de arrancamento vertical e sub-horizontais podem produzir resultados comparáveis na avaliação da resistência do solo grampeado, pois ambos são direcionados para avaliar a interação entre os grampos e o solo. A principal distinção entre esses ensaios é a orientação do grampo em relação à superfície do solo: no ensaio vertical, o grampo é posicionado perpendicularmente ao solo, enquanto no ensaio sub-horizonta, ele é alinhado paralelamente à superfície. Contudo, verifica-se que, para executados por meio da técnica de reinjeção setorizada (grampos GR), as pressões de injeção superam as tensões verticais nos grampos em ambas as orientações, resultando em valores de resistência semelhantes conforme previsto pelo modelo empírico. Com base nisso, foram conduzidos ensaios, tanto verticais quanto sub-horizontais, em obras de contenção no Pará, visando validar a eficácia dos ensaios verticais para os grampos GR.

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização dos Locais de Ensaio

Os ensaios foram conduzidos na Mina do Salobo, situada em Marabá/PA, em dois taludes distintos, nos quais foram aplicados grampos do tipo GR. Cada talude abrangeu uma área mínima de 4500 m², com a instalação de pelo menos 720 grampos GR. Devido a acordos de confidencialidade, quaisquer imagens ou detalhes que possam identificar a localização exata dos taludes não podem ser revelados neste momento. No entanto, é possível descrever o tipo de solo onde os grampos foram implantados, assim como as características dos materiais, equipamentos de ensaio e os resultados obtidos.

O primeiro talude compreendia uma estrutura de contenção em solo grampeado com revestimento de concreto projetado, predominantemente em solos residuais silto-arenosos derivados de gnaiss, apresentando um valor N_{SPT} médio igual a 8 no local do ensaio. Por outro lado, o segundo talude envolveu uma estrutura de contenção em solo grampeado com revestimento em tela flexível, implantada em solos residuais silto-argilosos, com um valor médio N_{SPT} de 14 no local do ensaio.

2.2 Caracterização dos Equipamentos

Pelos resultados de Barbosa et al. (2023), que indicou que para diferentes metodologias de injeção a perfuração com fluido de perfuração à água resultou em grampos de melhor resistência ao arrancamento, escolheu-se equipamento de perfuração de água. O equipamento escolhido é do tipo de rotor elétrico de eixo simples, sem uso de graxa ou de outro lubrificante nas hastes perfuradoras, a fim de evitar contaminação do maciço e perda de aderência entre a calda e o solo. A Figura 1 detalha a perfuratriz utilizada na perfuração a água.

Para a injeção da bainha e reinjeção setorizada, optou-se por utilizar uma unidade injetora de tipo circuito fechado, que é composta pelos seguintes componentes:

- Um misturador de alta rotação, operando em torno de 1.800 rpm, com capacidade superior a 150 litros. Esse misturador é equipado com peneira e hidrômetro graduado em litros e frações decimais.
- Uma bomba injetora helicoidal, capaz de manter um fluxo contínuo de mais de 100 litros por minuto, mantendo-se dentro dos limites de pressão necessários. Além disso, ela é capaz de bombear caldas com fator a/c igual ou superior a 0,4.
- Um garrafão de amortecimento e estabilizador de pressão vertical com colchão de ar, que possui volume suficiente para estabilizar o manômetro até cerca de 10% da leitura requerida.
- Um manômetro de pressões graduados, cobrindo de 50 kPa a 50 kPa, com resolução de 3000 kPa.
- Obturadores hidráulicos simples, que têm vedação apenas na ponta do obturador, já que as reinjeções setorizadas não requerem vedação dupla.
- Além disso, foram utilizadas tubulações, revestimentos, registros e ferramentas revisadas, visando evitar interrupções no processo de injeção.

A Figura 2 mostra o misturador e a bomba selecionados para a execução.



Figura 1. Vista típica da perfuratriz elétrica, com haste (à esquerda), bit de perfuração do tipo tricône e corpo da máquina, com motor fechado



Figura 2. Vista típica do misturador duplo com bomba de injeção acoplada

2.3 Caracterização dos Materiais

2.3.1 Calda de Cimento

Para a calda de cimento, foi utilizado cimento CII-E-32, com características técnicas conforme Tabela 1. O cimento em questão foi escolhido devido à sua disponibilidade na região local e ao seu tempo de pega prolongado, o que é particularmente importante em climas como o de Marabá/PA. Para facilitar o entendimento dos profissionais responsáveis pela injeção e reinjeção dos grampos, conhecidos como injetadores, foi adotado um fator a/c de 0,5 tanto para a injeção inicial quanto para a reinjeção.

Tabela 1 – Características da calda de cimento

Tipo de aglutinante	Cimento (CII-E-32)
Fator a/c em peso	0,5
pH	7,9
Exsudação (%)	2,87
Peso específico (kN/m ³)	16,7
Coesão (Pa)	5,9
Viscosidade (mPa.s)	151
Resistência à compressão (MPa)	29,3 ± 1,5

2.3.2 Barra de Aço

Para a barra de aço, utilizou-se barra de aço de 25 mm. A Tabela 2 apresenta as características da barra de aço, obtidas do catálogo do fabricante Arcelor Mittal.

Tabela 2 – Características das barras de aço (Arcelor Mittal, 2022)

Diâmetro nominal (mm)	25,0
Massa Nominal (kg/m)	3,853
Tolerância Massa Linear (%)	4
Resistência Característica de 500 Escoamento (fyk) (MPa)	540
Limite de Resistência (MPa)	540
Alongamento em 10Ø (%)	8
Seção nominal (mm ²)	490,9
Limite de carga (kN)*	213

* Considerando coeficiente parcial de 1,15

2.4 Caracterização do Aparato de Ensaio

Tanto para os ensaios de arrancamento vertical quanto para os ensaios de arrancamento sub-horizontal, utilizou-se os mesmos sistemas de medição, com apenas diferença no sistema de reação, diferentes devido à cunha de inclinação necessária para os ensaios sub-horizontais. O croqui dos grampos em ambas as orientações pode ser visto nas Figuras 3 e 4. Fotos esquemáticas da execução dos ensaios de arrancamento podem ser observadas nas Figuras 5 e 6.

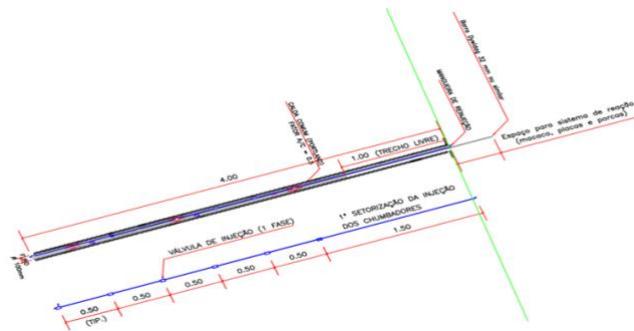


Figura 3. Croqui esquemático de ensaio de arrancamento sub-horizantal, em que o grampo foi instalado com 15 graus de inclinação. A barra de aço tem 5,0 m no total, com 3,0 m de trecho ancorado e 2,0 m de trecho livre, sendo 1,0 m interno ao maciço e 1,0 m externo, a fim de que haja espaço suficiente para o sistema de macaco, placas, porcas e célula de carga

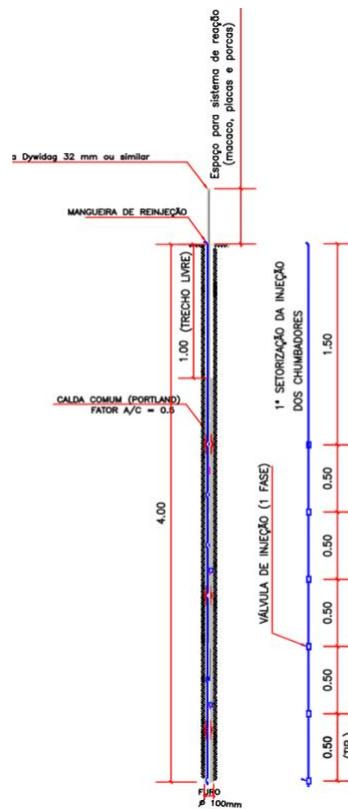


Figura 4. Croqui esquemático de ensaio de arrancamento vertical. A barra de aço tem 5,0 m no total, com 3,0 m de trecho ancorado e 2,0 m de trecho livre, 1,0 m interno ao maciço e 1,0 m externo, a fim de que haja espaço suficiente para o sistema macaco, placas, porcas e célula de carga



Figura 5. Montagem de ensaio de arrancamento sub-horizantal no talude 1 à esquerda e vertical à direita



Figura 6. Montagem de ensaio de arrancamento sub-horizantal no talude 2 à esquerda e vertical à direita

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Talude 1

Para o Talude 1, predominantemente em silte arenoso, foram executados quatorze grampos de sacrifício, sete em orientação vertical e sete em orientação sub-horizantal, em arranjo conforme observado na Figura 5. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício, conforme tipo de solo, número de golpes N , q_s real e orientação do ensaio. O q_s esperado conforme modelo empírico proposto pela Eq. 1 era de 233 kPa.

Tabela 1 – Tipo de solo, N_{SPT} , q_s de cada grampo de sacrifício e orientação do ensaio

Grampo	Tipo de solo	N _{SPT}	q _s (kPa)	Orientação do ensaio
1	Silte Arenoso	8	292	Sub-Horizontal
2	Silte Arenoso	8	274	Sub-Horizontal
3	Silte Arenoso	8	283	Sub-Horizontal
4	Silte Arenoso	8	267	Sub-Horizontal
5	Silte Arenoso	8	278	Sub-Horizontal
6	Silte Arenoso	8	264	Sub-Horizontal
7	Silte Arenoso	8	296	Sub-Horizontal
8	Silte Arenoso	8	262	Vertical
9	Silte Arenoso	8	247	Vertical
10	Silte Arenoso	8	275	Vertical
11	Silte Arenoso	8	259	Vertical
12	Silte Arenoso	8	273	Vertical
13	Silte Arenoso	8	265	Vertical
14	Silte Arenoso	8	253	Vertical

A média dos resultados dos grampos de sacrifício ensaiados na orientação sub-horizontal foi de 279 kPa, com desvio padrão de 12,03, média 19,66% superior ao q_s estimado pela Eq. 1. A média dos resultados dos grampos de sacrifício ensaiados na orientação vertical foi de 262 kPa, com desvio padrão de 10,12, uma média 12,31% superior ao q_s estimado pela Eq. 1. Comparando-se as médias do conjunto de dados de ambas orientações de ensaio, observou-se que os grampos sub-horizontais apresentaram resistência ao arrancamento em média 6,54% superior à resistência ao arrancamento dos grampos ensaiados verticalmente, dentro do desvio padrão de cada conjunto de dados, o que, estatisticamente, por meio de teste de hipótese, representa que os resultados são iguais.

3.2 Talude 2

Para o Talude 2, predominantemente em silte argiloso, foram executados dezesseis grampos de sacrifício, oito em orientação vertical e oito em orientação sub-horizontal, em arranjo conforme observado na Figura 6. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício, conforme tipo de solo, número de golpes N, q_s real e orientação do ensaio. O q_s esperado conforme modelo empírico proposto pela Eq. 1 era de 266 kPa.

Tabela 2 – Tipo de solo, N_{SPT}, q_s de cada grampo de sacrifício e orientação do ensaio

Grampo	Tipo de solo	N _{SPT}	q _s (kPa)	Orientação do ensaio
1	Silte Argiloso	14	310	Sub-Horizontal
2	Silte Argiloso	14	280	Sub-Horizontal
3	Silte Argiloso	14	292	Sub-Horizontal
4	Silte Argiloso	14	303	Sub-Horizontal

5	Silte Argiloso	14	298	Sub- Horizontal
6	Silte Argiloso	14	279	Sub- Horizontal
7	Silte Argiloso	14	302	Sub- Horizontal
8	Silte Argiloso	14	307	Vertical
9	Silte Argiloso	14	277	Vertical
10	Silte Argiloso	14	286	Vertical
11	Silte Argiloso	14	259	Vertical
12	Silte Argiloso	14	271	Vertical
13	Silte Argiloso	14	291	Vertical
14	Silte Argiloso	14	284	Vertical
15	Silte Argiloso	14	267	Vertical
16	Silte Argiloso	14	272	Vertical

A média dos resultados dos grampos de sacrifício ensaiados na orientação sub-horizontal foi de 296 kPa, com desvio padrão de 11,75, média 11,60% superior ao q_s estimado pela Eq. 1. A média dos resultados dos grampos de sacrifício ensaiados na orientação vertical foi de 276 kPa, com desvio padrão de 10,7, uma média apenas 3,88% superior ao q_s estimado pela Eq. 1. Comparando-se as médias do conjunto de dados de ambas orientações de ensaio, observou-se que os grampos sub-horizontais apresentaram resistência ao arrancamento em média 7,43% superior à resistência ao arrancamento dos grampos ensaiados verticalmente, dentro do desvio padrão de cada conjunto de dados, o que, estatisticamente, por meio de teste de hipótese, representa que os resultados são iguais.

4 CONCLUSÕES

Para garantir a viabilidade da previsão da resistência ao arrancamento antes da execução das contenções em solo grampeado, é crucial contar com um modelo empírico que seja capaz de fornecer estimativas conservadoras dos resultados desse parâmetro. O modelo empírico proposto por Barbosa et al. (2022), demonstrou eficácia ao prever de forma conservadora a resistência ao arrancamento dos grampos nos Taludes 1 e 2. No entanto, para o Talude 2, observou-se que é importante aplicar um fator de segurança parcial aos resultados do modelo empírico, especialmente para NSPT mais elevados. Além disso, nos taludes em questão, foi confirmada a hipótese de que os ensaios de arrancamento verticais constituem uma alternativa confiável aos ensaios de arrancamento de grampos GR. Essa validação facilita a avaliação da real resistência ao arrancamento em projetos onde não é possível realizar escavação prévia ou acesso, antecipando a verificação da resistência ao arrancamento do projeto e potencialmente resultando em execuções mais precisas e econômicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arcelor Mittal (2022) Guia do Aço Arcelor Mittal. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com › catalogo-guia-aco/> (Acessado: 8 de Novembro, 2022).
- Barbosa, M.G.T. (2023). Estudo da Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-187/2023, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 204 p.
- Barbosa, M. G. T., de Assis, A. P., & da Cunha, R. P. (2022). An innovative post grouting technique for soil nails. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(11), 5539-5546.
- Seo, H. J., Jeong, K. H., Choi, H., & Lee, I. M. (2012). Pullout resistance increase of soil nailing induced by pressurized grouting. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(5), pp. 604-613.
- Seo, H., Pelecanos, L., Kwon, Y. S., & Lee, I. M. (2017). Net load-displacement estimation in soil-nailing pullout tests. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*. 14 p.