



2026

Análise do Comportamento de Ensaios de Arrancamento em Solo Grampeado com Face Vertical

Bruno Yukio Tomimori ^a; José Otávio Serrão Eleutério ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, bruno.tomimori@ufms.br

^b Professor Orientador, otavio.eleuterio@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade apresentar os resultados de ensaios de arrancamento realizados em grampos instalados em diferentes níveis de subsolo de uma edificação de uso residencial e comercial, situada no município de Rondonópolis, no interior do estado de Mato Grosso, além de confrontar os valores de resistência ao arrancamento da interface solo-grampo obtidos em campo com aqueles estimados por outros autores amplamente empregados no meio técnico. Os ensaios de arrancamento foram executados em grampos constituídos de aço do tipo CA-50, com diâmetro de 16 mm e comprimento total de 4,0 m, dos quais 3,0 m correspondem ao trecho injetado e 1,0 m ao trecho livre. O procedimento adotado para a realização dos ensaios seguiu as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 16920-2. Os resultados obtidos possibilitaram confrontar parâmetros determinados experimentalmente com outros ensaios da literatura, bem como a avaliação das variações da resistência ao arrancamento da interface solo-grampo em função do nível de execução dos grampos ensaiados.

Palavras-chave: Solo grampeado; Ensaio de arrancamento; Resistência ao cisalhamento; Solo-grampo; Contenção; Geotecnia.

ABSTRACT

This study aims to present the results of pullout tests performed on soil nails installed at different basement levels of a residential and commercial building located in the municipality of Rondonópolis, in the state of Mato Grosso, Brazil. It also seeks to compare the pullout resistance values of the soil–nail interface obtained in the field with those estimated by other authors widely adopted in technical practice. The pullout tests were carried out on soil nails made of CA-50 steel, with a diameter of 16 mm and a total length of 4.0 m, of which 3.0 m correspond to the grouted (bonded) length and 1.0 m to the free length. The testing procedure followed the guidelines established by ABNT NBR 16920-2. The results obtained made it possible to compare experimentally determined parameters with results reported in the literature, as well as to evaluate variations in the pullout resistance of the soil–nail interface as a function of the installation level of the tested nails.

Keywords: Soil nailing; Pullout test; Shear resistance; Soil–nail interface; Retaining structures; Geotechnical engineering.

1. INTRODUÇÃO

O grampeamento do solo tem se consolidado como uma das principais técnicas de estabilização, em razão de sua viabilidade econômica, rapidez construtiva e menor impacto ambiental quando comparado a outros métodos de contenção. Trata-se de uma técnica aplicada em solos naturais com atuação provisória ou permanente para estabilização empregada na contenção de taludes e no reforço de encostas instáveis. Sua execução é aplicada em obras urbanas, especialmente na execução de subsolos e túneis. Além disso, é utilizada em obras viárias, como encostas, em intervenções destinadas ao alargamento de vias e à estabilização de taludes.

O princípio de funcionamento do solo grampeado baseando-se no reforço do solo por meio da mobilização da resistência à tração dos grampos e da interação solo-grampo restringindo o deslocamento do maciço e transferindo cargas das zonas instáveis para regiões com resistência contribuindo para a melhoria da estabilidade do talude, mecanismo que garantido pelo atrito lateral e principalmente na resistência a tração axial na interface solo-grampo (ABNT NBR 16920-2:2021).

O ensaio de arrancamento constitui o método mais difundido e apropriado para a determinação da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo, sendo amplamente empregado na verificação e validação do projeto, a partir das condições geotécnicas reais do maciço.

Este trabalho tem como objetivo apresentar e analisar os ensaios de arrancamento realizados em grampos de sacrifícios no município de Rondonópolis, Mato Grosso, associando os resultados de resistência ao arrancamento dos grampos obtidos em campo, à parâmetros executivos como, quantidade de injeções de calda de cimento realizadas, NSPT, nível de execução do ensaio, comprimento de grampo e compará-los com resultados de ensaios de outros autores.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A técnica do solo grampeado consiste na introdução de elementos de reforço, denominados grampos, no interior do maciço de solo, com o objetivo de aumentar a estabilidade global do conjunto.

Os grampos ao serem introduzidos passam por duas regiões existentes, chamadas zona ativa e passiva. A zona ativa é a porção de solo que se delimita na região interna da superfície potencial de ruptura, enquanto a zona passiva está presente atrás da superfície potencial de ruptura e é onde devem estar presentes, as injeções dos grampos a fim de mobilizar o deslocamento e garantir a estabilidade do talude, como representado na figura 1.

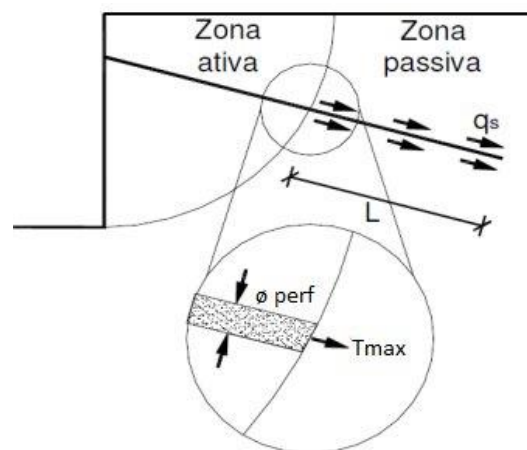


Figura 1 - Zona ativa (zona de superfície potencial de ruptura) e passiva (zona de resistência)

Diante disso, evidencia-se a necessidade do ensaio de arrancamento, que tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico real do grampo, permitindo a obtenção de parâmetros fundamentais, como a carga máxima aplicada e as deformações decorrentes da interação solo-grampo. A partir da realização desse ensaio, é realizado a construção das curvas Carga $\times$ Deslocamento, bem como verificar o pico e a mobilização do arrancamento e a eficiência do sistema de reforço adotado como mostra a figura 2.

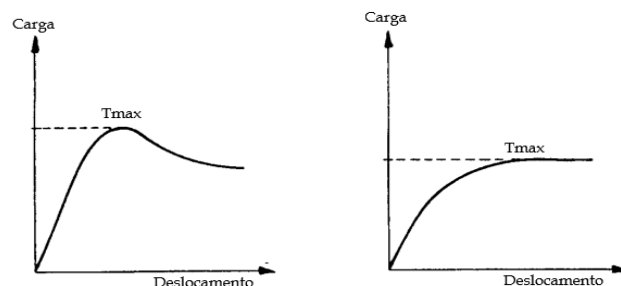


Figura 2 – Critérios de ruptura definidos para ensaios de arrancamento (French National Research Project Clouterre, 1991).

Além disso, possibilita-se a determinação do principal comportamento estrutural do grampo, correspondente à resistência ao arrancamento (q_s), definida pela seguinte expressão:

$$q_s = \frac{T_{max}}{\pi \cdot \phi_{perf} \cdot L_b}$$

onde:

q_s : resistência ao cisalhamento solo-grampo, expressa em quilopascals (kPa);

T_{max} : carga máxima estabilizada em ensaio ou estabelecido pelo projetista, expressa em quilonewtons (kN);

ϕ_{perf} : diâmetro da perfuração, expressa em metros (m);

L_b : comprimento injetado do grampo, expressa em metros (m).

B

2.1. PROCESSO EXECUTIVO DO SOLO GRAMPEADO EM TALUDE VERTICAL

2.1.1. Perfuração de Grampos Verticais

Como mostra a figura A, a fim de aprimorar a estabilidade temporária durante a escavação, são utilizados os grampos verticais, que se fazem necessárias enquanto a execução e aberturas de frentes de escavação e assegurem os executores e evite possíveis problemas de deslocamentos de terra e deslizamentos. De acordo com Mucheti (2019), além de promoverem melhorias nas propriedades mecânicas de solos com elevado índice de vazios. O estudo traz evidências que os parâmetros de resistência do solo obtidos em ensaios laboratoriais apresentaram valores superiores aos considerados na fase de projeto, apresentam 55% no fator de segurança em análises de estabilidade, o que reforça a eficiência e a confiabilidade da técnica empregada.



Figura 3 – Grampos Verticais

Segundo Pitta, Souza (2003) recomendam a implantação de grampos verticais previamente com a finalidade de reduzir os deslocamentos e aumentar a produtividade. Segundo os autores, essa alternativa técnica minimiza de forma significativa a ocorrência de trincas e deformações nas edificações adjacentes.

2.1.2. Escavação

A escavação é executada predominantemente por meio de equipamentos mecânicos, em conjunto com ajustes manuais no terreno com o objetivo de reduzir as imperfeições no contato entre o solo e o concreto projetado.

As escavações devem ser executadas em trechos alternados no sentido horizontal, visando a mobilização do efeito de arqueamento do solo, o qual contribui para a estabilização temporária da face escavada durante as etapas de perfuração e instalação dos grampos no trecho exposto (figura 4).



Figura 4 – Abertura de nichos

O corte do solo é iniciado de acordo com a geometria estabelecida em projeto, sendo a escavação geralmente conduzida de forma progressiva, em etapas controladas. As profundidades dessas etapas

variam, normalmente, entre 1,0 m e 2,0 m, dependendo das características e competências geotécnicas do terreno a ser estabilizado.

A técnica de solo grampeado é aplicável a diversos tipos de solo, incluindo areias cimentadas, areias úmidas com coesão capilar, argilas sobreadensadas e rochas de baixa resistência. Em solos arenosos, é incomum a execução de etapas com profundidades superiores a 2,0 m ou inferiores a 0,5 m, pois a manutenção da estabilidade temporária da face escavada é essencial. Por outro lado, em argilas sobre adensadas, é possível realizar etapas de escavação com profundidades superiores a 2,0 m, em função da maior resistência e coesão do material (BRUCE; JEWELL, 1987).

Diversos autores abordaram a definição da altura das etapas de escavação em obras executadas com a técnica de solo grampeado, destacando que esses valores devem ser estabelecidos de forma a garantir a estabilidade provisória do maciço durante a execução. Nesse contexto, Raju, Wong e Low (1997) e Gassler e Gudehus (1981) recomendam que as escavações sejam realizadas em etapas com alturas variando entre 1,0 m e 1,5 m, enquanto Vucetic, Tufenkjian e Doroudian (1993) indicam a possibilidade de adoção de alturas ligeiramente superiores, situadas entre 1,2 m e 1,8 m, desde que as condições geotécnicas do solo e os critérios de segurança sejam devidamente atendidos.

2.1.3. Perfuração e posicionamento de Grampos

A execução pode ser realizada com o auxílio de equipamentos de perfuração, tanto mecanizadas quanto manuais e como as perfurações são sub-horizontais devem ser realizadas na posição com uma leve inclinação, com variação entre 5° e 15°, o que contribui para a adequada acomodação da calda de cimento conhecida como *grout* para solos comuns, para preenchimento do grampo (ZIRLIS; PITTA, 1992).

Usualmente a execução do serviço é realizado por máquinas manuais e com o diâmetro de perfuração entre 75 e 150 mm, ademais, a perfuração deve garantir que o furo se mantenha estável até o preenchimento da bainha com calda de cimento (ABNT NBR 16920-2:2021).

Por conseguinte, deve-se inserir e posicionar os grampos que são compostos por barra de aço, espaçadores que garantem a centralização da barra de aço e tubos de polietileno do tipo espaguete com

espessuras de ½” (1,5mm) para injeção das fases pressurizadas de calda de cimento.

2.1.4. Primeira Injeção (Bainha)

Para a realizar a primeira injeção é necessário um tubo soldável com o mesmo comprimento da perfuração garantindo que a calda de cimento esteja sendo aplicada até o fundo e em torno de todo o grampo. Processo essencial que garante a transferência de tensão entre argamassa e os grampos, ademais, garante que as barras de aço inseridas tenham proteção contra corrosão (LAZARTE et al., 2015).

Ademais, a calda de cimento deve possuir o fator água/cimento variado entre 0,50 e 0,70.

De acordo com Springer (2006), a lavagem do furo após a introdução da barra constitui um procedimento capaz de proporcionar incremento na resistência de aderência do grampo. Em situações em que os grampos são executados apenas com bainha, há aproximadamente um aumento de até 27% em resistência.

2.1.5. Injeção de fases setorizadas

Segundo Pitta, Souza e Zirlis (2003), a instalação de tubos de fases pressurizadas para calda de cimento junto ao grampo contribui para o controle adequado do processo de injeção, reduzindo a ocorrência de falhas executivas. Além disso, esse procedimento favorece a formação de uma bainha de injeção mais homogênea, proporcionando melhor aderência entre o grampo e o solo e, consequentemente, maior eficiência do sistema de injeção. Ademais, recomenda-se a realização de uma ou mais reinjeções de fase pressurizadas por bombas de baixa pressão, e por meio de tubos de polietileno, dotados de válvulas com espaçamento entre 0,5 m, posicionadas até 1,5 m a partir da abertura da perfuração. Cada fase setorizada deve dispor de um tubo individual, de modo a garantir maior controle do processo de injeção e devem ocorrer de forma ascendente, ou seja, do trecho mais profundo até a região superficial da perfuração.

A reinjeção de fases é prevista para ocorrer aproximadamente 12 horas após a injeção da bainha, uma vez que, após esse período, a bainha já apresenta coesão suficiente para resistir às pressões de reinjeção e, ao mesmo tempo, capacidade de mobilizar adequadamente a calda injetada no maciço.

Ehrlich e Silva (2012) realizou análises de resultados e procedimentos executivos apresentados por diferentes autores, buscou-se verificar as influências das injeções na resistência ao arrancamento (q_s), adotando distintos procedimentos de injeção de calda cimento e nata de cimentos, incluindo apenas a bainha, bainha associada à injeção, bem como injeções executadas em uma, duas, três ou quatro fases, como mostra a figura 5.

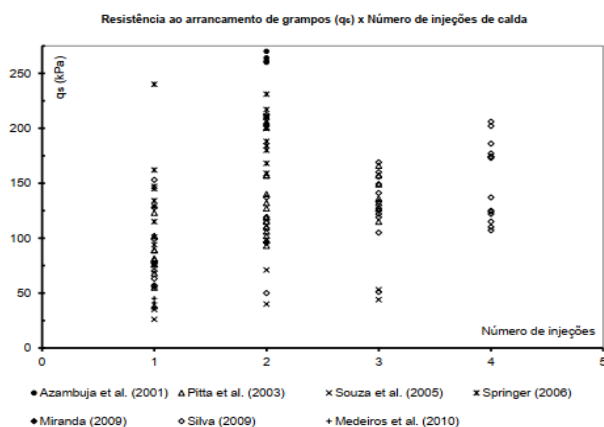


Figura 5 – Gráfico de Resistência ao arrancamento (q_s) x Injeções por autores no Brasil (Ehrlich e Silva, 2012)

Através do gráfico realizado por Ehrlich e Silva (2012) onde possui diversos resultados de vários autores não é possível relatar a resistência ao arrancamento apenas com a quantidade de injeções de calda de cimento, visto que há resultados realizados pelos mesmos autores que mostram a variabilidade de resistência ao arrancamento mesmo sendo realizados com as mesmas quantidades de injeções.

2.1.6. Perfuração e posicionamento de elementos drenantes

A execução de elementos drenantes nem sempre se fazem necessárias durante o projeto e execução do solo grampeado, porém o sistema é concebido a fim de evitar problemas futuros em relação a drenagem. Composta por drenos horizontais profundos (DHP), barbacãs e fitas de drenos fibroquímico ou geocompostos drenantes para o paramento, destinados ao controle de drenagem, prevenindo problemas patológicos com aumento da poropressão e exsudação do concreto e facilite o escoamento da água.

2.1.7. Faceamento dos Grampos

O faceamento do talude em solo grampeado embora não desempenhe função estrutural direta, a face do talude é executada com o objetivo de proteger a cabeça do grampo após o revestimento, impedindo sua exposição ao meio externo. Essa medida é essencial para evitar o desenvolvimento de manifestações patológicas, especialmente aquelas associadas à corrosão, além de contribuir para a durabilidade do sistema e para a manutenção do desempenho previsto ao longo da vida útil da obra.

A forma de revestimento mais comum adotada nesse tipo de sistema é o concreto projetado, em razão de sua facilidade de aplicação, boa aderência ao maciço e capacidade de conformação às irregularidades da superfície.

Com o objetivo de minimizar a ocorrência de fissuras no revestimento em concreto projetado, podem ser empregadas telas soldadas, assim como microfibras de polietileno ou de aço incorporadas ao traço do concreto antes do jateamento. Tais soluções atuam no controle da retração do concreto, intensificada pela presença de aditivos, além de contribuírem para a redistribuição das tensões provenientes das variações térmicas, reduzindo a incidência de fissuração por variação térmica e melhorando o desempenho e a durabilidade do revestimento.

2.2. Mecanismo Resistente dos Grampos

A interação solo-calda refere-se ao mecanismo de transferência de carga entre o grampo e o maciço de solo, que ocorre principalmente por aderência e atrito na interface entre o solo e a bainha com calda de cimento. E durante tendências de deslocamentos do maciço, são mobilizadas as tensões responsáveis pela resistência ao arrancamento do grampo (CLOUTERRE, 1991).

De acordo com Clouterre (1991), parâmetros de solos, coesão, ângulo de atrito interno, diâmetro de perfuração e o comprimento do grampo, são conjuntos que a forma que é produzida durante a execução afetam diretamente a resistência.

Segundo Bueno, Hoeltgebaum e Avanzi (2012), a rugosidade da superfície da barra de aço exerce influência direta na sua capacidade de suporte. Os autores observaram que barras de aço com superfície rugosa apresentaram resistência superior de até 18,15% quando comparados as barras lisas, demonstrando que as características superficiais do

elemento estrutural podem contribuir significativamente para o desempenho mecânico.

2.3. Ensaio de Arrancamento em Solo Grampeado

Esse ensaio permite analisar a capacidade de transferência de esforços entre o grampo e o maciço de solo, fornecendo parâmetros fundamentais para a verificação da eficiência do sistema de contenção em solo grampeado e para a validação dos critérios de projeto adotados.

O critério de aceitação do ensaio é definido individualmente para cada grampo ensaiado, uma vez que o posicionamento de cada ensaio é planejado de forma a contemplar diferentes condições geotécnicas, tais como variações de altura, camadas de solos distintos encontradas em ensaios SPT. De modo geral, o critério de aceitação é considerado atendido quando a interface solo-grampo é atingida ou mobilizada no ensaio é igual ou superior àquela prevista em projeto.

Entretanto, Byrne et al. (1998) elaboraram uma padronização com os tipos de solos com base em sua resistência ao arrancamento como evidenciado na tabela 1, onde ao estabelecer parâmetros de resistências padronizados, contribui significativamente para a interpretação dos resultados obtidos em ensaios laboratoriais ou em campo, além de auxiliar na previsão do desempenho mecânico dos solos em obras de taludes e estruturas de contenção. Dessa forma, a proposta do autor constitui uma referência importante para a caracterização da resistência dos solos, promovendo maior uniformidade nos critérios de análise.

Tabela 1 – Resistência ao arrancamento, interação solo-grampo (adaptado por BYRNE et al., 1998)

Tipo de solo	Descrição do solo	qs (kPa)
Solo não coesivo	Silte não plástico	20 – 30
	Silte arenoso	50 – 75
	Areia siltosa	50 – 75
	Areia med. compacta	50 – 75
	Areia siltosa densa	80 – 100
	Areia siltosa muito densa	120 – 240
	Loess	25 – 75
	Silte argiloso	40 – 100

Solo coesivo	Argila arenosa	100 – 200
	Argila rija	40 – 60

Através de análises de autores como Goldbach (2011), por meio de ensaios realizados em solos arenosos, obteve resultados referentes ao comportamento desses materiais em diferentes níveis de escavação. Os estudos permitiram avaliar a variação dos parâmetros geotécnicos em função da profundidade com a influência de carregamentos e de confinamento, evidenciando alterações na resistência ao arrancamento e na estabilidade das camadas analisadas (Tabela 2).

Tabela 2 – Profundidade, golpes e resistência ao cisalhamento (Goldbach, 2011).

Profundidade (m)	NSPT	qs (kPa)
2,0 – 2,45	15	107,5
3,00 – 3,45	16	107,33
4,00 – 4,15	30/15	140,00

Visto os resultados obtidos por Goldbach (2011) na tabela 2 em função da profundidade e dos valores de nSPT, verificou que, para os ensaios realizados entre 2,0m e 3,45m de profundidade, não foram observadas variações significativas na resistência ao arrancamento. Entretanto, a partir de 4,0 m, constatou-se influência do aumento das tensões confinantes devido à sobrecarga de solo, proporcionando maior mobilização da resistência na interface com valores mais elevados de resistência ao arrancamento.

Com base nos estudos de Beloni, Ferreira e Souza (2017), realizou em duas obras, o comportamento da resistência ao cisalhamento em função da quantidade de injeções realizadas no maciço de solo. Os autores analisaram a influência do número de injeções nos parâmetros mecânicos do material, evidenciando que o incremento das etapas de injeção, como apresenta a tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de injeções e resistência ao cisalhamento - (Beloni, Ferreira e Souza, 2017).

Obra	Nº de inj.	qs (kPa)
Obra I	1 injeção	29,94
	1 injeção	32,82
	2 injeções	48,65
	2 injeções	46,71

Obra II	3 injeções	67,46
	1 injeção	35,77
	1 injeção	31,1
	2 injeções	56,3
	2 injeções	68,04
	2 injeções	56,31
	3 injeções	103,25
	3 injeções	93,4

Com base nos resultados apresentados por Beloni, Ferreira e Souza (2017), conforme apresentado na Tabela 3, observa-se que, em ambas as obras analisadas, os ensaios de arrancamento executados com maior número de injeções, tendem a promover melhorias nas características de resistência e rigidez, em decorrência do preenchimento de calda de cimento nos vazios do solo.

Moretti, Rodrigues e Laurino (2013) realizaram quatro ensaios de arrancamento com comprimento ancorado de 3,0 m em trechos injetados, valor mínimo recomendado pela ABNT NBR 16920-2:2021, obtendo os valores de resistência ao arrancamento apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Comprimento ancorado e resistência ao cisalhamento, (Moretti, Rodrigues e Laurino, 2013).

Comp. inj. (m)	qs (kPa)
3	71,8
3	71,8
3	95,5
3	120,4

Moretti, Rodrigues e Laurino (2013), apresentaram os ensaios com os valores de comprimentos mínimos injetados indicando comportamento semelhante quanto à mobilização da resistência na interface solo-calda., aos comprimentos de injetados adotados neste presente estudo.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1. Características da Obra

3.1.1. Localização da Área em Estudo

A área de estudo situa-se na região central do município de Rondonópolis, no estado de Mato Grosso, conforme ilustrado na Figura 6. O empreendimento analisado consiste em uma edificação de uso misto, residencial e comercial,

composta por trinta e cinco pavimentos e três níveis de subsolo destinados a garagens. Para a execução dos subsolos, foi adotado o solo grampeado em contenção vertical com grampos permanentes, aplicado no perímetro da área a construir.



Figura 6 – Rondonópolis - MT, localização da Obra analisada (Google Earth – 2025)

3.1.2. Geometria Geral do Talude

Esta obra apresentou significativos desafios durante a fase de execução em função de sua geometria complexa, caracterizada pela presença de múltiplos vértices. Essas particularidades geométricas exigiram maior rigor no controle executivo e na sequência construtiva, de modo a garantir a conformidade com o projeto e o desempenho esperado do sistema adotado (Figura.7).

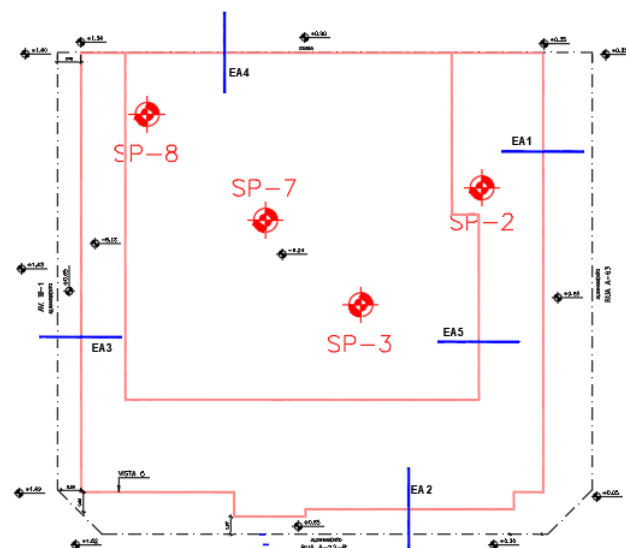


Figura 7 – Geometria do projeto do subsolo em Solo Grampeado

3.1.3. Perfil Geotécnico

A caracterização do terreno foi realizada a partir dos resultados dos ensaios SPT, os quais indicaram a

presença de areia argilosa até profundidades entre 7 e 8 m e de silte arenoso argiloso até profundidades entre 14 e 15 m (Figura 8).

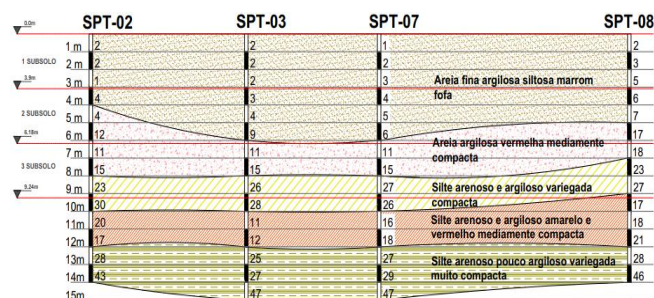


Figura 8 – Perfil Geotécnico típico da área da edificação

3.2. Características dos Grampos

3.2.1. Método de Execução dos Ensaios de Arrancamento

De acordo com a ABNT NBR 16920-2:2021, o grampo utilizado no ensaio de arrancamento deve apresentar trecho livre com comprimento mínimo de 1,0 m e trecho ancorado com comprimento mínimo de 3,0 m. Nos casos em que sejam adotados comprimentos distintos dos especificados, torna-se necessária a realização de um estudo específico que justifique tal adoção. Além disso, devem ser realizados ensaios obrigatórios de desempenho em, no mínimo, 1% da totalidade dos grampos da obra ou, alternativamente, no mínimo três ensaios em regiões significativas, de preferência em níveis diferentes, caso tenha tipos de solos diferentes e em diferentes vistas do projeto, garantindo que os resultados representem adequadamente o comportamento da estrutura (Figura 9).

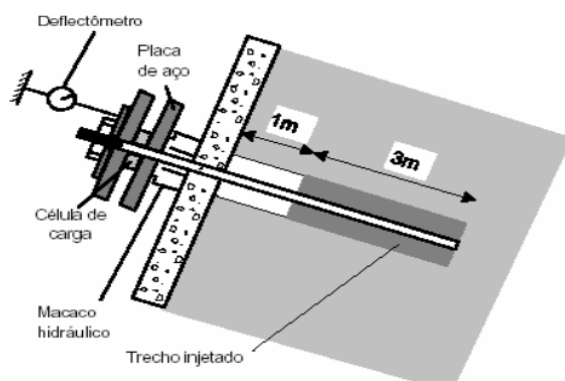


Figura 9 – Sistema utilizado nos ensaios de arrancamento (Silva, 2005)

Foram executados cinco ensaios de arrancamento em grampos de sacrifício. Os grampos foram concebidos com 15° de inclinação, barras de aço de diâmetro

nominal de 16 mm e comprimento total de 4,0m, onde 1,0m corresponde ao trecho-livre e 3,0m corresponde ao trecho injetado e 3 fases de injeções de calda de cimento. Esses ensaios tiveram como finalidade, validar o dimensionamento adotado em projeto.

Os grampos foram ensaiados em diferentes níveis com o objetivo de analisar o comportamento do sistema em diferentes camadas do solo e em diferentes vistas e mais próximos das sondagens SPT realizadas (figura 10).

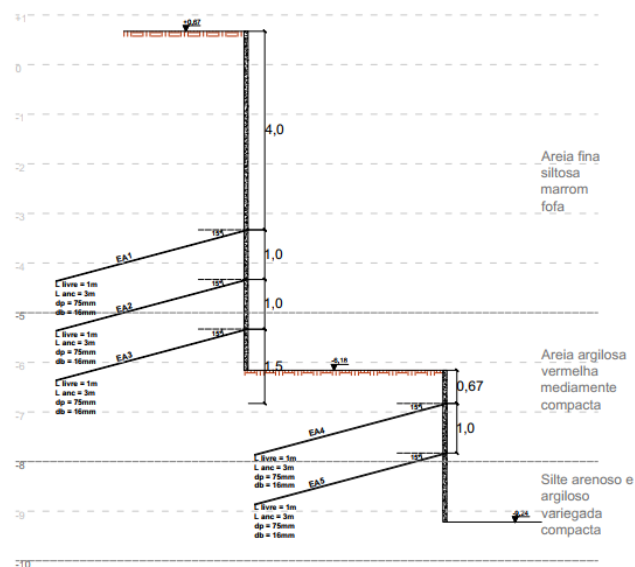


Figura 10 – Posicionamento e níveis dos ensaios de arrancamento.

3.3. Procedimento do Ensaio de Arrancamento

O ensaio consiste na aplicação de cargas de tração em, no mínimo, cinco estágios. O primeiro estágio deve iniciar com 10% da carga máxima prevista em projeto, com a finalidade de promover o ajuste do sistema de ensaio de arrancamento, evitando folgas nos equipamentos. Os estágios subsequentes devem ser realizados com incrementos de 20% da carga máxima prevista para o ensaio. Cada estágio deve ter duração de 5 minutos, sendo estabelecido um tempo de 15 minutos para o último estágio. Caso o sistema apresente imobilidade durante o carregamento, é permitido prosseguir para o estágio seguinte. Na eventualidade de o grampo não apresentar arrancamento ao atingir a carga de ensaio prevista, o procedimento deve-se continuar a aplicar cargas, respeitando-se os mesmos critérios de carregamento, até que o arrancamento seja efetivamente alcançado (ABNT NBR 16920-2:2021).

Para a realização do ensaio de arrancamento, foi necessária a utilização de um conjunto composto por pistão hidráulico vazado com capacidade de 30 tf, acionado por bomba manual, além de uma base de fixação destinada ao equipamento de medição. O deslocamento da cabeça do grampo foi monitorado por meio de um relógio comparador com curso de 50 mm, instalado sobre uma viga de referência. Para garantir o correto alinhamento do sistema, utilizou-se uma base inclinada acoplada à viga, responsável por conferir a inclinação adequada ao pistão hidráulico. Adicionalmente, foram empregados clavetes e cunha, com a finalidade de assegurar a estabilidade do conjunto e impedir o deslizamento do pistão sobre o grampo durante a aplicação das cargas (Figura 11)



Figura 11 – Montagem do sistema para os ensaios de arrancamento.

Tabela 5 – Média dos ensaios SPT

Ensaio	Cota (m)	Solo	NSPT
EA1	-4,0	Areia argilosa	3
EA2	-5,0	Areia argilosa	5
EA3	-6,0	Areia argilosa	11
EA4	-7,5	Silte areno argiloso	13
EA5	-8,5	Silte areno argiloso	17

Com base nos estudos e resultados desenvolvidos no Brasil por diferentes autores, Ehrlich e Silva (2012) realizaram um compilado de valores, contemplando resultados de resistência ao cisalhamento em função do número de golpes obtidos nos ensaios SPT e quantidade de injeções realizadas (Figura 12).

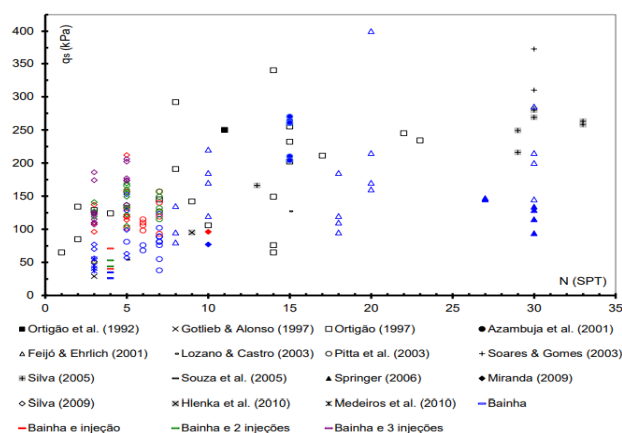


Figura 12 – Gráfico de Resistência ao cisalhamento (q_s) x NSPT de autores no Brasil (Ehrlich e Silva, 2012)

Com base no gráfico apresentado por Ehrlich e Silva (2012), que reúne resultados de ensaios de arrancamento realizados no Brasil por diversos autores, observa-se que os valores de resistência ao arrancamento em função do NSPT e da quantidade de injeções de calda de cimento não apresentam correlação significativa. Tal comportamento decorre da elevada dispersão dos resultados, uma vez que foram registrados valores distintos mesmo para condições semelhantes de NSPT e número de injeções.

4. RESULTADOS

A intuição dos ensaios de arrancamento teve como objetivo validar os valores adotados em projeto, onde a carga máxima de projeto era de 90kN, e a resistência ao arrancamento mínimo de 45 kPa.

Os ensaios foram executados em grampos de sacrifício, com os comprimentos mínimos que podem ser adotados pela ABNT NBR 16920-2:2021 e optou-se pela utilização de barras com diâmetros semelhantes aos empregados na obra, porém com comprimentos inferiores ao grampos de projeto, mantendo-se a compatibilidade geométrica do sistema, devido ao tempo em que se adequava às limitações operacionais do campo e em todos os grampos foram realizados a injeção da bainha e 2 reinjeções, porém houve grampos que não apresentaram abertura da fase de injeção e foram realizados a injeção da bainha e 1 reinjeção.

Em alguns casos, o carregamento foi aplicado até atingir a carga máxima de projeto, seguido pela etapa de descarga. Após a descarga, procedeu-se a um novo carregamento até o escoamento do aço, demonstrando que a resistência ao arrancamento poderia atingir valores superiores aos previstos em projeto, como

pode-se observar nos gráficos, da figura 12. Como houve casos em que não foi possível realizar a etapa de descarga, em razão de os grampos estarem em deformação e apresentarem estabilização de carga antes de atingir a carga de escoamento do aço, como apresentados no gráfico da figura 13.

Tabela 6 – Especificações dos grampos de sacrifício.

Ensaio	Comp. livre (m)	Comp. anc.(m)	Ø perf. (mm)	Inclinação da perfuração	Nº de inj.
EA1	1,0	3,0	75,0	15°	3
EA2	1,0	3,0	75,0	15°	3
EA3	1,0	3,0	75,0	15°	2
EA4	1,0	3,0	75,0	15°	2
EA5	1,0	3,0	75,0	15°	2

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de arrancamento realizados em campo.

Solo	Ensaio	Carga de ruptura (kN)	Prof. (m)	Def. (mm)	qs (kPa)	nSPT
Areia argilosa	EA1	90,0	-4,0	4,29	127,32	3
	EA2	90,0	-5,0	4,37	127,32	5
	EA3	70,1	-6,0	7,45	99,17	11
Silte areno argiloso	EA4	45,9	-7,5	6,81	64,94	13
	EA5	35,4	-8,5	4,31	50,08	17

Limite de escoamento do aço (Ø16mm) = 10,055 Tf = 100,55kN

Ao utilizar a barra de aço CA-50 com diâmetro de 16mm foi necessário realizar o limite do escoamento do aço, definido com o seguinte cálculo:

$$\sigma_e = 500 \text{ MPa} = 50 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

$$\phi 16\text{mm}$$

$$A = \frac{\pi \cdot 16^2}{4} = 201,1 \text{ mm}^2$$

$$F_e = 50 \cdot 201,1 = 10055 \text{ kgf}$$

$$\frac{10055}{100} = 100,55 \text{ kN}$$

Os ensaios EA1 e EA2 atingiram a carga de 9,18Tf (90kN), correspondente ao limite de projeto. Em seguida, foi realizada a etapa de descarga e, posteriormente, um novo carregamento até a carga de

10,18Tf (99,83kN), instante em que se verificou o escoamento do aço (Figura 13)

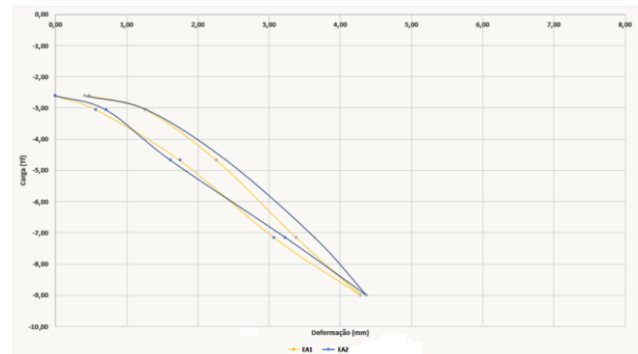


Figura 13 – Gráfico Carga (Tf) x Deslocamento (mm) - EA1 (amarelo) e EA2 (azul)

Os ensaios EA3, EA4 e EA5 tiveram sua execução interrompida, pois apresentavam deformações, porém ao ser aplicado a carga, a mesma se mantinha-se estabilizada, e ao realizar a descarga não houve deformações do grampo, se mantendo na posição (Figura 14).

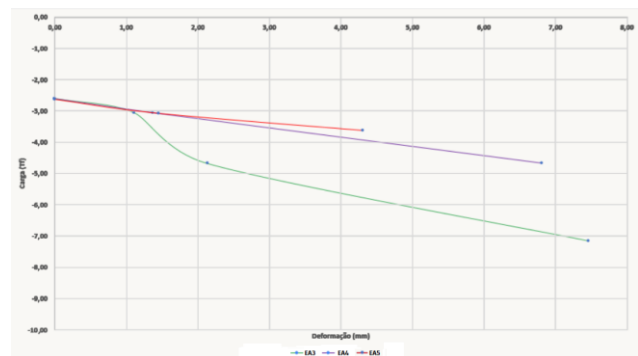


Figura 14 – Gráfico Carga (Tf) x Deslocamento (mm) - EA3 (verde), EA4 (roxo) e EA5 (vermelho)

O ensaio de arrancamento EA5 teve a resistência ao arrancamento de 50 kPa representa um acréscimo aproximado de 11% em relação ao valor mínimo exigido (45 kPa), superando o valor mínimo requerido de 45 kPa. Apesar de atender ao critério estabelecido, observa-se que a margem de segurança foi moderada, indicando comportamento próximo ao limite mínimo especificado.

Como mostra da Figura 15 é possível verificar a proporção da relação Carga x Deslocamento de todos os ensaios de arrancamento obtidas para este trabalho.

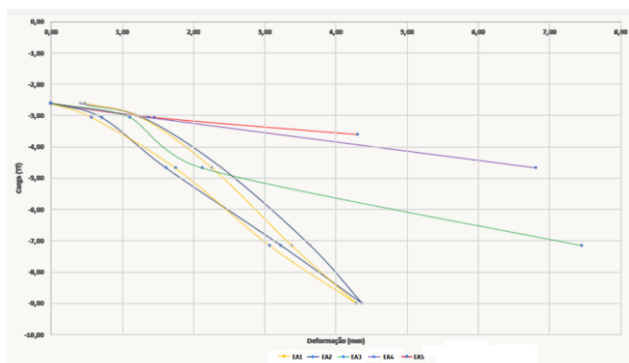


Figura 15 – Gráfico Carga (Tf) x Deslocamento (mm) - EA3, EA4 e EA5

5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos levantamentos de resultados de autores realizado por Ehrlich e Silva (2012) como visto tanto na figura 5, onde é apresentado o gráfico de resistência ao arrancamento e quantidade de injeções de calda de cimento, quanto na figura 12, relaciona a resistência ao arrancamento à NSPT e quantidade de injeções de nata de cimento, os gráficos apresenta valores com muita variação e demonstra que não é possível obter resultados precisos tendo em vista a região do Brasil possui grande extensão territorial e variabilidade geotécnica, os quais influenciam de forma significativa o comportamento mecânico e apresentam particularidades regionais e se faz necessário formas de filtrar com mais parâmetros como, tipo de solo, região ou estado onde foi realizado o ensaio, profundidade, comprimento dos grampos, a partir desses filtros poderia se obter resultados mais refinados.

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com a tabela adaptada de Byrne et al. (1998), elaborada com o intuito de correlacionar os valores de resistência ao arrancamento com o tipo de solo ensaiado, verificou-se que os resultados se mostram compatíveis aos apresentados pelos autores se mantendo em solos não coesivos entre 50-75 kPa de resistência e para solos coesivos entre 40-100 kPa de resistência.

Goldbach (2011), ao relacionar os seus resultados de resistência ao arrancamento com a profundidade e NSPT, mostrou que até os 3,0m, os resultados obtidos não tinham alterações significativas, porém com o avanço de escavação os ensaios possuíam resultados mais satisfatórios, entretanto neste trabalho, mostra-se a que apesar do nível ser realizado mais abaixo

existem parâmetros que ajudam a aumentar a resistência, pois como mostra a figura 14, os ensaios EA4 e EA5 alcançaram cargas menores em relação aos outros ensaios de arrancamento, mostrando que apenas a consideração do critério de NSPT, não é válida, pois neste trabalho estes ensaios foram realizados com se estivessem próximos a crista do talude, ou seja, sem a carga de solos confinado sobre o local ensaiado apresentou a importância e influência da combinação dos parâmetros de cargas de confinamento do solo e NSPT.

Assim como Beloni, Ferreira e Souza (2017), que apresentaram resultados em duas obras, correlacionado os resultados de ensaio de arrancamento com a quantidade de injeções, conforme apresentado na Tabela 3, ao comparar a bainha isolada e a bainha com uma fase, observou-se um incremento de 51,94%. Por sua vez, ao comparar a bainha com uma fase e a bainha com duas fases, foi registrado um aumento de 41,48%. Nesta pesquisa ao realizar comparar bainha com uma injeção e bainha com duas injeções, os resultados são mais satisfatórios àqueles grampos nos quais foram executadas mais injeções de calda de cimento, tendo a melhoria de resistência mínima de 22,11%, podendo superar 60,66% de resistência ao arrancamento. Tal comportamento que evidencia a influência positiva do aumento do número de injeções no desempenho mecânico do sistema, uma vez que a maior quantidade de calda injetada tende a promover melhor preenchimento dos vazios, maior aderência na interface solo-grampo e incremento da coesão aparente do maciço tratado.

Ainda que nesta pesquisa os ensaios tenham sido realizados em comprimento de grampos reduzidos em relação ao projeto, assim como Moretti, Rodrigues e Laurino (2013), realizaram ensaios com comprimentos de 3,0 em trechos injetados, valores mínimos seguindo a ABNT NBR 16920-2:2021 é possível obter resultados que alcancem e até superem a resistência ao arrancamento dentro das premissas de projetos.

Os valores obtidos nos ensaios mostraram-se conservadores e compatíveis com as premissas adotadas em projeto de carga máxima de 90 kN e resistência mínima de 45 kPa, atingindo as expectativas estabelecidas para o desempenho do sistema. Tal comportamento reforça a adequação dos parâmetros utilizados e a confiabilidade dos

resultados obtidos nas condições geotécnicas analisadas.

6. CONCLUSÕES

Os resultados indicam que a resistência ao arrancamento dos grampos executados no município de Rondonópolis atendeu de forma satisfatória aos critérios de desempenho estabelecidos em projeto. Entretanto, a comparação com ensaios realizados em diferentes regiões do Brasil evidencia elevada variabilidade nos valores de resistência, associada às particularidades geotécnicas dos solos locais, demonstrando que a resistência ao arrancamento não pode ser correlacionada de forma direta e única aos valores de NSPT, para buscar resultados mais precisos são necessários a utilização de mais critérios como, profundidade de escavação, quantidade de injeções, comprimento de grampos, diâmetro da barra de aço, tipo de solo, NSPT, região e estado da pesquisa, com isso, seria possível criar correlações e refinar as pesquisas trazendo mais assertividade e dados fidedignos.

Verificou-se que os grampos nos que houve 3 fases de injeção tiveram entre 22,11% e 60,66% de resistência ao arrancamento quando comparados àqueles grampos com injeções de 2 fases. Com isso, pode-se determinar a relevância da quantidade de injeções utilizadas em grampos, uma vez que esse fator influencia diretamente o desempenho mecânico, a aderência solo-grampo.

Conclui-se que a consideração isolada do parâmetro NSPT não se mostra suficiente para representar adequadamente o comportamento da resistência ao arrancamento. Os ensaios EA4 e EA5 realizados nesta pesquisa foram executados em condições parecidas à crista do talude, sem a atuação significativa de tensões de confinamento sobre o trecho ensaiado. Tal condição evidencia que a resistência mobilizada na interface solo-grampo não depende exclusivamente do índice de resistência à penetração, mas da combinação entre o NSPT e o estado de tensões atuante, assim como as tensões de confinamento do maciço.

Dessa forma, o ensaio de arrancamento destaca-se como ferramenta essencial de controle em obras com solo grampeado, permitindo a verificação in loco da capacidade resistente dos grampos e a validação dos parâmetros de projeto, contribuindo para a segurança e confiabilidade do sistema de contenção.

Para futuras pesquisas, recomenda-se a ampliação do banco de dados nacional, para que tenha resultados factuais, bem como a realização de análises comparativas entre ensaios de arrancamento e parâmetros indiretos, como o NSPT, além da avaliação da influência do tipo de calda de injeção e das pressões de execução sobre a resistência ao arrancamento e aderência solo-grampo.

7. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e ao curso de Engenharia Civil, pela infraestrutura e suporte pedagógico oferecido. Ao professor orientador José Otávio Serrão Eleuterio, pela confiança, direcionamento e conhecimentos compartilhados, fundamentais para realização deste trabalho. Agradeço à Solidifica Fundações e Geotecnia LTDA., pelo suporte, execução e fornecimento dos dados dos ensaios de arrancamento. Agradeço também à minha família e amigos pelo incentivo e apoio constante durante toda a jornada acadêmica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16920-2:2021, Muros e taludes em solos reforçados — Parte 2: Solos grampeados. Rio de Janeiro, 2021.
- BELONI, FERREIRA E SOUZA, 2017, *Análises dos Ensaios de Arrancamento em Grampos Executados na Construção de Dois Subsolos em Solos Arenosos na Cidade de Ipatinga – MG*, In: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), ABMS, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, novembro.
- BRUCE, D. A.; JEWELL, R. A. *Soil Nailing: The second decade. In: International Conference on Foundations and Tunnels*, 1987, Londres. Anais... p. 68-83, mar. 1987.
- BUENO, HOELTGEBAUM e AVANZI, 2012, *Estudo de Arrancamento de Grampos em Modelos Reduzidos*, Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba.
- BYRNE, R. J. et al. *Manual for design and construction monitoring of soil nail wall. Report No. FHWA-SA-96-069R*. Washington, 568p. 1998.
- CLOUTERRE, Plumelle et al, 1991, *Soil Nailing Recommendations for Designing, Calculating,*

- Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing*, French National Research Project Clouterre, Paris, França.
- EHRlich, M. E SILVA, R. C. 2012, *Ensaio de Arrancamento de Grampos – Verificação da influência do Nspt e da injeção da bainha*, Anais do XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Porto de Galinhas, 2012.
- FEIJÓ, R. L.; EHRlich, M., 2005, Resultados do monitoramento de uma obra experimental em solo grampeado. In: Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas, 4., Salvador. Anais...Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2005. p633-642.
- GASSLER, G.; GUDEHUS, G. Soil nailing: Some aspects of a new technique. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 10., 1981, Estocolmo: ISSMFE, 1981. P. 665–670.
- GOLDBACH, 2011, Análise da correlação entre a resistência (qs) e o índice de resistência a penetração (nspt) aplicada a um projeto de solo grampeado, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, setembro.
- LAZARTE, C. A. et al. *Soil Nail Walls Reference Manual*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2015.
- MORETTI, RODRIGUES E LAURINO, 2013, *Ensaio de arrancamento em grampos metálicos executados em aterros rodoviários do interior de São Paulo*, In: VI Conferência Brasileira de Encostas, COBRAE, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, outubro.
- MUCHETI, P.J.R. DE ALBUQUERQUE E GARCIA, 2019, *Contribuição de Grampos Verticais Injetados na Estabilidade e Deslocamentos de Obras de Solo Grampeado*, In: 9º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia 3ª Feira da Indústria de Fundações e Geotecnia SEFE 9 – São Paulo, Brasil, junho.
- PACHECO E SILVA, D., 2009. Análise de Diferentes Metodologias Executivas de Solo Pregado a partir de Ensaio de Arrancamento em Campo e Laboratório. São Carlos, 313p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PITTA, C. A., SOUZA, G. J. T. e ZIRLIS, A. C. (2003). Solo grampeado: alguns detalhes executivos: ensaios e casos de obras, Workshop Solo Grampeado - Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, ABMS-NRSP/SindusCon-SP, São Paulo, SP, p. 01- 20.
- RAJU, V. R.; WONG, K. S.; LOW, B. K. Pull-out resistance of soil nails in residual soils. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 14., 1997, Hamburgo. Anais... Hamburgo: ISSMGE, 1997. p. 2083–2086.
- SILVA, TIAGO PROTO DA SILVA, 2005, *Resistência ao Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaiss*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Puc-Rio, 144 p.
- SOLOTRAT ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Manual técnico. São Paulo: Solotrat Engenharia Geotécnica, 2003. p. 5-15.
- SPRINGER, F. O., 2006, *Ensaio de Arrancamento de Grampos em Solo Residual de Gnaiss*, Tese* de D.Sc., DEC/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- TUFENKJIAN, M. R.; DOROUDIAN, M. *Pullout resistance of soil nails in sand*. In: *Annual Geotechnical Engineering Conference*, 1993, Minneapolis. Proceedings... Minneapolis: University of Minnesota, 1993. p. 25–38.
- ZIRLIS, A. C.; PITTA, C. A., 1992, “Soil nailing: chumbamento de solos – experiência de uma equipe na aplicação do método”, In: I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas (COBRAE), ABMS, v. 1, pp. 81-99, Rio de Janeiro, novembro.