



**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE
GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA TÉCNICA DE
REINJEÇÃO SETORIZADA**

MAX GABRIEL TIMO BARBOSA, MSc

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA**

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE
GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA TÉCNICA DE
REINJEÇÃO SETORIZADA**

MAX GABRIEL TIMO BARBOSA

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD
CO-ORIENTADOR: RENATO PINTO DA CUNHA, PhD**

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-187/23

- BRASÍLIA, MAIO DE 2023 -

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE GRAMPOS
EXECUTADOS POR MEIO DA TÉCNICA DE REINJEÇÃO
SETORIZADA**

MAX GABRIEL TIMO BARBOSA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADO POR:

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB) (ORIENTADOR)

RENATO PINTO DA CUNHA, PhD (UnB) (CO-ORIENTADOR)

**PEDRO WELLINGTON GONÇALVES DO NASCIMENTO TEIXEIRA, DSc
(EXAMINADOR EXTERNO)**

FELIBE GOBBI SILVEIRA, DSc (EXAMINADOR EXTERNO)

JUAN FELIX RODRIGUEZ REBOLLEDO, DSc (EXAMINADOR INTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 02 DE MAIO / 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

BARBOSA, MAX GABRIEL TIMO

Estudo da Resistência ao Arrancamento de Grampos Executados por meio da Técnica de Reinjeção Setorizada [Distrito Federal] 2023.

xxiv, 204 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2023)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1. Solo grampeado | 2. Injeções em solos |
| 3. Resistência ao arrancamento | 4. Reinjeção setorizada |
| 5. Interface solo-estrutura | |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Max Gabriel Timo Barbosa

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Estudo da resistência ao arrancamento de grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada

GRAU / ANO: Doutor / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Max Gabriel Timo Barbosa

AOS 04, Bloco F, Octogonal

70660-046, Brasília/DF - Brasil

À minha esposa, Nina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelas bênçãos que sempre me agraciou. Aos meus pais, Max e Conceição, por tê-los sempre me apoiando e pelos sacrifícios que sempre fizeram pela minha educação. À minha esposa, Nina, e à nossa filha, Marina, que me completam e me motivam em minhas empreitadas. A meu irmão, Matheus, pela paciência e interesse nas minhas pesquisas. Aos meus familiares e amigos, que compreendem e respeitam meu entusiasmo pela ciência e geotecnia. Ao povo brasileiro, por subsidiar a excelência das universidades públicas, como a Universidade de Brasília (UnB).

Aos professores da Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília que continuam me ensinando a cada aula e conversa. Agradeço em especial ao Professor Renato Cunha, pelos conselhos objetivos e certos. Agradeço imensamente ao Professor André Assis, por ter me acompanhado como orientador e motivador desde a graduação, por ser uma inspiração não só pessoal, mas também para toda a Engenharia Geotécnica Brasileira e Mundial. Novamente, foi uma honra.

A todos os autores de artigos e livros técnicos de engenharia citados neste trabalho. Este trabalho só foi possível por conta dessa preocupação desses com a difusão do conhecimento.

A todos os colaboradores da Solotrat, por terem auxiliado em toda a campanha de experimentação de campo e coleta de dados. Ao amigo Azzi, *in memoriam*, por ter me incentivado no aprofundamento dos estudos de injeções em solos e por ter sempre acreditado em meu potencial. Ao amigo Alberto, pelos dados fornecidos, pensamentos inortodoxos em geotecnia e imensa generosidade. Ao amigo George, pela independência concedida na condução das pesquisas, conselhos práticos e informações cedidas.

E, por fim, agradecer a meu pai, Max, mais uma vez, por me ensinar na vida e na engenharia.

ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO ARRANCAMENTO DE GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA TÉCNICA DE REINJEÇÃO SETORIZADA

RESUMO

Esta tese apresenta resultados de investigações feitas em escala real da interação solo-grampo, especialmente em grampos executados com a reinjeção setorizada por meio de ensaios de arrancamentos sub-horizontais e verticais em obras reais e campanha experimental de grampos em solo. Verificou-se que a técnica de reinjeção setorizada, técnica desenvolvida no Brasil por Pitta *et al.* (2016), obteve melhores resultados que os grampos executados com a injeção comum por gravidade. Os resultados observados em sete obras executadas pela empresa Solotrat, entre 2010 e 2016, estudadas em escala real, possibilitaram proposição de modelo empírico para a estimativa da resistência ao arrancamento de grampos com reinjeção setorizada. A fim de validar o modelo empírico e observar influências executivas não investigadas nessas obras prévias, além de proposição de método de seleção de técnica executiva de grampos em solo e alternativa de ensaios de arrancamento verticais conforme sugerido por Seo *et al.* (2012), foi realizada uma campanha experimental na argila porosa de Brasília. Nesta campanha, fez-se a exumação de grampos para investigação da influência do ângulo médio da rugosidade (AMR) da superfície dos grampos em solo e dos diâmetros médios exumados ($\emptyset_{\text{exu.}}$) nos resultados dos ensaios de arrancamento das diferentes técnicas executivas estudadas, em que o aumento de $\emptyset_{\text{exu.}}$ resultou em melhores resultados quanto à resistência ao arrancamento e AMR permitiu avaliar a diferença de resultados para diâmetros exumados semelhantes. Também foi observado que a perfuração com água foi ligeiramente superior para todos os tipos de grampos no caso do solo característico de Brasília e que o uso de aditivo expander nas caldas de cimento pode gerar piores resultados devido à interface lisa e por poder resultar em caldas de menor resistência à compressão simples, influência importante na resistência ao arrancamento. Além da verificação do método de perfuração, foram observados resultados superiores de resistência ao arrancamento para grampos executados com a reinjeção setorizada em relação aos demais tipos de metodologias de injeção estudadas, com o modelo empírico prevendo de forma conservadora os resultados dos ensaios de arrancamento de grampos executados com a reinjeção setorizada. Com a validação qualitativa e quantitativa da técnica de reinjeção setorizada, em obras reais prévias a esta tese e na campanha experimental, fez-se o uso do modelo empírico proposto em obras de solo grampeado no Pará com aderência conservadora, local com alto número de contenções em solos grampeados. Ademais, ao comparar os ensaios de arrancamento sub-horizontais e arrancamento vertical num mesmo local, verificou-se que os resultados dentro do desvio padrão da média de ambas as orientações de ensaio possibilitam não só o uso do modelo empírico proposto nesta tese, mas também do uso de ensaios de arrancamento verticais como ferramentas viáveis no projeto e execução de grampos executados pela reinjeção setorizada em solos isotrópicos. Com base nesta tese, recomenda-se o uso do modelo empírico proposto para a previsão de resistência ao arrancamento de grampos em solos não problemáticos, desde que conjugado a um fator de segurança apropriado. No entanto, é fundamental que a resistência estimada seja validada com ensaios reais antes do início da contenção, garantindo a segurança e eficiência do projeto.

STUDY OF THE PULLOUT RESISTANCE OF SOIL NAILS PERFORMED BY MEANS OF THE SECTORIZED POST GROUTING TECHNIQUE

ABSTRACT

This thesis presents real-scale results of soil-nail interaction, especially in nails executed with sectorized post grouting, through tests of sub-horizontal and vertical pullouts in real works and experimental campaign of soil nails. It was verified that the sectorized post grouting technique, a technique developed in Brazil by Pitta et al. (2016) for the execution of soil nails, obtained better results than the gravity grouted nails. The results observed in seven works carried out by the company Solotrat, between 2010 and 2016, studied in full scale, made it possible to propose an empirical model for estimating the resistance to pulling out of soil nails with sectorized post grouting. To validate the empirical model and observe executive influences of soil nails not investigated in works with nailed soil performed with sectorized post grouting, in addition to proposing a method of executive technique of soil nails and alternative to previous tests as suggested by Seo et al. (2012), an experimental campaign was carried out in the porous clay of Brasilia. In this campaign, the exhumation of staples was carried out to investigate the influence of the average roughness angle (AMR) of the surface of the staples in soil and the exhumed average averages ($\emptyset_{exu.}$) on the results of the pullout tests of the different techniques of soil nail, in which the increase of $\emptyset_{exu.}$ resulted in better results regarding pullout resistance and AMR allowed to evaluate the difference in results for similar exhumed diameters. It was also observed that drilling with water obtained better results to all types of soil nails in the case of the soil characteristic of Brasilia and that the use of expander additive in cement grouts can generate worse results due to the smooth interface and because it can result in grouts with less compressive strength, important influence on pullout strength. In addition to verifying the drilling method, superior results were observed in terms of pullout resistance for nails executed with sectorized post grouting in relation to the other types of injection methodologies studied, with the proposed empirical model conservatively predicting the results of the pullout tests of nails executed with sectorized post grouting. With the quantitative validation of the sectorized post grouting technique, in real works prior to this thesis and in the field, the empirical model proposed was used in nailed soil works in Pará with conservative adherence, a place with a high number of soil nailing retaining walls. Furthermore, when comparing the sub-horizontal pullout and vertical pullout tests in the same location, it was observed that the results within the standard deviation of the mean of both test orientations allow not only the use of the empirical model proposed in this thesis, but also the use of vertical pullout tests as viable tools in the design and execution of nail executed by sectorized post grouting in isotropic soils. Based on this thesis, the use of the proposed empirical model is recommended for predicting nail pullout resistance in non-problematic soils, as long as it is combined with an appropriate safety factor. However, it is fundamental that the estimated resistance be validated with real tests before the beginning of the retaining wall, guaranteeing the safety and efficiency of the project.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ETAPAS DA PESQUISA E ORGANIZAÇÃO DA TESE	3
2. TÉCNICA DE SOLO GRAMPEADO	5
2.1. CONTENÇÕES EM SOLO GRAMPEADO	5
2.2. FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE SOLOS GRAMPEADOS.....	6
2.2.1. INFLUÊNCIA DO MATERIAL DE CORTE.....	6
2.2.2. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO GRAMPO	11
2.2.3. INFLUÊNCIA DA INTERFACE SOLO-GRAMPO.....	12
2.3. CONCLUSÕES	18
3. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE GRAMPOS.....	19
3.1. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO EM LABORATÓRIO.....	19
3.2. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE CAMPO	25
3.3. MÉTODOS DE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE CAMPO	26
3.3.1. ENSAIOS DE FORÇA CONTROLADA	31
3.3.2. ENSAIOS DE DESLOCAMENTO CONTROLADO	33
3.4. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS.....	34
4. GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA REINJEÇÃO SETORIZADA.....	37
4.1. INTRODUÇÃO	37
4.2. DESENVOLVIMENTO DA REINJEÇÃO SETORIZADA	37
4.3. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO EM OBRAS COM GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA REINJEÇÃO SETORIZADA	49
4.3.1. OBRA 1131	50

4.3.2.	OBRA 1158	53
4.3.3.	OBRA 1332	55
4.3.4.	OBRA 1426	58
4.3.5.	OBRA 1487	60
4.3.6.	OBRA 1583	63
4.3.7.	OBRA 1755	65
4.4.	MODELO EMPÍRICO A PARTIR DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	68
5.	EXECUÇÃO EXPERIMENTAL DE GRAMPOS VERTICAIS EM SOLO	73
5.1.	INTRODUÇÃO	73
5.2.	FATORES DE INFLUÊNCIA NA CONCEPÇÃO DOS ENSAIOS.....	73
5.3.	DESCRIÇÃO DO SUBSOLO LOCAL.....	74
5.4.	METODOLOGIA DA CAMPANHA EXECUTIVA	77
5.5.	CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	83
5.5.1.	EQUIPAMENTOS DE PERFURAÇÃO.....	83
5.5.2.	EQUIPAMENTOS DE INJEÇÃO	89
5.6.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	91
5.6.1.	CARACTERIZAÇÃO DA CALDA DE CIMENTO.....	91
5.6.2.	CARACTERIZAÇÃO DA BARRA DE AÇO.....	95
5.7.	CAMPANHA EXECUTIVA.....	96
5.7.1.	EXECUÇÃO DOS GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA PERFURAÇÃO A ÁGUA.....	97
5.7.2.	EXECUÇÃO DOS GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA PERFURAÇÃO A AR.....	99
5.7.3.	INJEÇÃO DOS GRAMPOS EXPERIMENTAIS.....	101
5.8.	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO	106
5.9.	EXUMAÇÃO DOS GRAMPOS	111
5.10.	RESULTADOS.....	128

5.10.1.	GRAMPOS PERFURADOS A AR.....	128
5.10.2.	GRAMPOS PERFURADOS A ÁGUA.....	131
5.10.3.	SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	134
5.11.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	136
5.11.1.	ADERÊNCIA AO MODELO EMPÍRICO PROPOSTO	136
5.11.2.	AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EXECUTIVOS PARA A ARGILA POROSA DE BRASÍLIA.....	137
5.12.	CONCLUSÕES	147
6.	ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS E USO DO MODELO EMPÍRICO PROPOSTO EM PROJETOS E OBRAS EXECUTADAS COM GRAMPOS GR	149
6.1.	INTRODUÇÃO	149
6.2.	COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS E SUB-HORIZONTAIS PARA GRAMPOS GR.....	149
6.2.1.	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ENSAIO	150
6.2.2.	CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	150
6.2.3.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	150
6.2.4.	CARACTERIZAÇÃO DO APARATO DE ENSAIO	151
6.2.5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	157
6.3.	IMPACTO DO USO DO MODELO EMPÍRICO E DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS.....	159
6.3.1.	RECOMENDAÇÕES DESTA TESE PARA PROJETOS DE SOLO GRAMPEADO	160
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	163
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	166
	APÊNDICE A.....	175
	APÊNDICE B.....	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Parâmetros da caracterização básica da argila arenosa vermelha do campo experimental (Mendoza, 2013)	76
Tabela 5.2 – Intervalo de parâmetros da argila arenosa vermelha do campo experimental (modificado - Mendoza, 2013)	77
Tabela 5.3 – Resumo dos cenários de execução	83
Tabela 5.4 – Características do aditivo expansor.....	94
Tabela 5.5 – Características das caldas de cimento	95
Tabela 5.6 – Características das barras de aço (Gerdau, 2020)	95
Tabela 5.7 – Resultados dos diâmetros, rugosidade, q_s e $q_{s\text{corrigido}}$, para grampos perfurados com ar, em que GG é a sigla para grampo comum injetado por gravidade, GA a sigla para grampo com calda de cimento aditivada e GR para grampo executado por meio da reinjeção setorizada.....	131
Tabela 5.8 – Resultados dos diâmetros, rugosidade, q_s e $q_{s\text{corrigido}}$, para grampos perfurados com água, em que GG é a sigla para grampo comum injetado por gravidade, GA a sigla para grampo com calda de cimento aditivada e GR para grampo executado por meio da reinjeção setorizada.....	134
Tabela 5.9 – Resultados dos diâmetros, rugosidade, q_s e $q_{s\text{corrigido}}$, para todos os grampos, em que GG é a sigla para grampo comum injetado por gravidade, GA a sigla para grampo com calda de cimento aditivada e GR para grampo executado por meio da reinjeção setorizada	135
Tabela 6.1 – Características da calda de cimento	150
Tabela 6.2 – Características das barras de aço (Gerdau, 2020)	151
Tabela 6.3 – Tipo de solo, N_{SPT} , q_s de cada grampo de sacrifício e orientação do ensaio	157
Tabela 6.4 – Tipo de solo, N_{SPT} , q_s de cada grampo de sacrifício e orientação do ensaio	158

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Primeira contenção em Solo Grampeado (modificado - CLOUTERRE, 1991).	1
Figura 2.1. Deformabilidade associada a diferentes níveis de deformações. Es é o módulo de Young secante, ϵ_0 é a área de baixíssimas deformações e ϵ_f a deformação na ruptura (modificado - Atkinson, 2000).....	8
Figura 2.3. Dispositivos de drenagem. a) dreno linear contínuo (geodrenos verticais) b) dreno pontual (barbacã) e c) dreno sub-horizontal profundo (DHP) (modificado – Zirlis <i>et al.</i> , 2015).....	9
Figura 2.4. Talude grampeado e simulação da caixa de cisalhamento – (modificado - Yin & Su, 2006).....	14
Figura 3.1 – Desenho esquemático do projeto da caixa de cisalhamento de Yin & Su (2006)	20
Figura 3.2 – Desenho exemplificando a aplicação da Tabela 3.1 – adaptado de CLOUTERRE (1991).....	27
Figura 3.3. Esquema típico de ensaio de arrancamento em que o paramento é utilizado como parte da reação. O comprimento livre tem o mínimo de 1,0 m e o comprimento com interação com o maciço tem mínimo de 3,0 m	29
Figura 3.4. Arranjo de ensaios de arrancamento tipo “P” em diferentes camadas de solo, de forma a verificar estimativas de q_s de projeto em diferentes seções geotécnicas, previamente à obra - modificado – CLOUTERRE (1991).....	29
Figura 3.5. Critério de falha utilizado em ensaios de arrancamento de deslocamento controlado. - modificado – CLOUTERRE (1991).....	34
Figura 3.6. Croqui esquemático de grampo vertical utilizado para ensaio de campo.....	36
Figura 4.1. Perfuração e injeção do furo, nesse exemplo considerando a água como fluido de perfuração e a calda de cimento como ligante (modificado – Zirlis <i>et al.</i> , 2015)	37
Figura 4.2. Detalhe dos tubos perdidos deixados para a reinjeção, juntos à armação do grampo e aos centralizadores	40

Figura 4.3. Metodologia de reinjeção, enfatizando a maior rugosidade superficial gerada ...	41
Figura 4.4. Exumação de grampos que foram executados por meio da técnica de reinjeção setorizada, em que a maior rugosidade da superfície pode ser vista. (Zirlis <i>et al.</i> , 2015)	43
Figura 4.5. Montagem típica do ensaio de arrancamento. Os grampos tinham comprimento total de 4,0 m e comprimento livre de 1,0 m. Utilizou-se uma estrutura de suporte junto à face do talude	45
Figura 4.6. Curvas de carga-deslocamento de grampos injetados por gravidade	47
Figura 4.7. Curvas de carga-deslocamento de grampos executados pela técnica de reinjeção setorizada	47
Figura 4.8. Gráfico comparativo da resistência ao arrancamento em grampos injetados por gravidade e grampos reinjetados, em diferentes solos de São Paulo	49
Figura 4.9. Grampo de 15,0 m de comprimento, com 4 setores reinjeção. O primeiro setor é localizado ao fundo dos grampos, com os setores seguintes de iniciando imediatamente após o fim da última válvula do setor anterior, de forma que cada mangueira reinjete predominantemente porções diferentes do grampo, até junto à face de escavação	51
Figura 4.10. Vista esquemática da finalização da contenção.....	51
Figura 4.11. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1131, q_s (μq_s) foi de 126 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 8,36 kPa	53
Figura 4.12. Ensaio de arrancamento após execução do paramento. Tal execução foi possível devido a confecção de grampos de sacrifício durante a obra, em que o trecho livre foi envolto por graxa grafitada e por tubos de proteção e a cabeça dos grampos isoladas por meio de tubo PVC e membrana de borracha	54
Figura 4.12. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1158, q_s (μq_s) foi de 243 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 21,16 kPa	55
Figura 4.13. Contenção de encosta com rupturas superficiais, caracterizado por $N_{SPT} < 8$, porém com aterro lançado superficial que não podia ser removido	56
Figura 4.13. Cota superior de um grampo previamente à execução da reinjeção setorizada, em que cada setor é marcado com um símbolo específico, no caso 1 fita gomada para o	

primeiro setor, 2 fitas gomadas para o segundo setor e 3 fitas gomadas para o terceiro setor.....	57
Figura 4.14. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1332, q_s (μq_s) foi de 130 kPa e o desvio padrão de $q_s(\sigma q_s)$ de 2,9 kPa	58
Figura 4.15. Contenção em solo grampeado com paramento flexível, tipo Macmat R1®, em 2013, primeira obra em paramento flexível com uso de grampos executados com reinjeção setorizada	59
Figura 4.16. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1426, q_s (μq_s) foi de 277 kPa e o desvio padrão de $q_s(\sigma q_s)$ de 18,897 kPa	60
Figura 4.17. Comparação de resultados de grampos de sacrifício, de 3,0 m ancorados e 5,0 m livre, executados por meio de injeção por gravidade e reinjeção setorizada. No maciço local, composto de silte argiloso medianamente compacto, houve resultados de 200-250% superiores de grampos executados com reinjeção setorizada, em relação aos grampos de sacrifício executados por meio de reinjeção por gravidade	61
Figura 4.18. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1487, q_s (μq_s) foi de 212 kPa e o desvio padrão de $q_s(\sigma q_s)$ de 23,97 kPa	62
Figura 4.21. Comparação de resultados de grampos de sacrifício, de 3,0 m ancorados e 2,0 m livre, executados por meio de injeção por gravidade e reinjeção setorizada. No maciço local, composto de areia silto-argilosa medianamente compacta, houve resultados de 180-240% superiores de grampos executados com reinjeção setorizada, em relação aos grampos de sacrifício executados por meio de reinjeção por gravidade	63
Figura 4.22. Vista em corte da solução da obra, construída em escavações escalonadas para construção de garagens de edifício comercial	64
Figura 4.20. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1583, q_s (μq_s) foi de 284 kPa e o desvio padrão de $q_s(\sigma q_s)$ de 32,90 kPa	65
Figura 4.21. Seção geológico-geotécnica da encosta contida por meio de solo grampeado. O maciço em saprólito foi cortado em inclinação maior que a suportada, de forma que houve necessidade de contenção de criar um compósito que resistisse às solicitações com segurança apropriada	66
Figura 4.22. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1755, q_s (μq_s) foi de 376 kPa e o desvio padrão de $q_s(\sigma q_s)$ de 42,45 kPa	68

Figura 4.26. Gráfico N_{SPT} (número de golpes / 30 cm) vs q_s (kPa). Cada obra tem 15 resultados no gráfico. A linha contínua representa os resultados deste artigo e a linha tracejada os obtidos por Ortigao & Palmeira (1997)	70
Figura 4.27. Gráfico N_{SPT} (número de golpes / 30 cm) vs q_s (kPa). A linha contínua representa a correlação das Obras 2, 4, 5, 6 e 7 resultados e a linha tracejada a relação obtida por Ortigao & Palmeira (1997)	71
Figura 5.1 – Localização do campo experimental	75
Figura 5.2 – Layout dos grampos executados por meio de perfuração à água, com legenda ..	79
Figura 5.3 – Layout dos grampos executados por meio de perfuração à ar, com legenda	79
Figura 5.4 – Detalhe de grampo executado com injeção por gravidade (GG), sem aditivo (em amarelo nas Figuras 3.8 e 3.9)	80
Figura 5.5 – Detalhe de grampo executado com injeção por gravidade (GA), com aditivo (em vermelho nas Figuras 3.8 e 3.9)	81
Figura 5.6 – Detalhe de grampo executado com fase de reinjeção (GR), sem aditivo (em azul nas Figuras 3.8 e 3.9)	82
Figura 5.7 – Vista típica da perfuratriz rotativa com água como fluido de perfuração, com haste (à esquerda), bit de perfuração do tipo tricône e corpo da máquina, com motor fechado	84
Figura 5.8 - Princípio de funcionamento da perfuratriz com água como fluido de circulação e limpeza	85
Figura 5.9 – Vista típica da perfuratriz rotopercussiva com ar como fluido de perfuração, com torre recolhida	86
Figura 5.10 - Vista típica do conjunto perfuratriz-compressor, com uso de ar como fluido de perfuração, em deslocamento.....	87
Figura 5.11 - Princípio de funcionamento da perfuratriz com ar como fluido de circulação e limpeza	87
Figura 5.12 - Vista típica do misturador duplo com bomba de injeção acoplada.....	90
Figura 5.13 – Funil Marsh	92
Figura 5.14 – Reômetro de placa de Lombardi.....	93

Figura 5.15 – Perfuratriz rotativa manual para execução de grampos com circulação de água	97
Figura 5.16 – Exemplo de barra antes da centralização no furo, com espaçadores tipo carambola a cada metro.	98
Figura 5.17 – Exemplo de barra antes da centralização no furo. Pela flexibilidade da barra, antes da injeção é necessário centralizar o grampo manualmente, dado que o espaçador utilizado era de 30 mm e o furo de 75 mm.	99
Figura 5.17 – Perfuratriz pneumática rotopercussiva para execução de grampos com circulação de ar.....	100
Figura 5.18 – Furos do campo experimental após procedimento de injeção.....	101
Figura 5.19 – Injeção dos grampos comuns.....	102
Figura 5.19 – Pressão de reinjeção dos grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada, a pressão de abertura fica entre 3-5 vezes maior do que a pressão de injeção, para o caso do solo do campo experimental	104
Figura 5.19 – Detalhe da reinjeção dos grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada	105
Figura 5.22. Componentes da execução dos ensaios de arrancamento – sistema de aplicação e medição da carga.....	108
Figura 5.23. Componentes da execução dos ensaios de arrancamento – sistema de medição de deslocamentos. Observa-se a régua de nível adjacente ao grampo ensaiado. Previamente à aplicação de carga a base era nivelada	109
Figura 5.24. Detalhe da FieldReader 3Geo, com da leitura de carga pico – grampo com reinjeção.....	110
Figura 5.26. Detalhe de grampo após ensaio. Por conta da lubrificação interna do macaco vazado o grampo já ensaiado apresenta resquícios do óleo hidráulico, observado pela cor negra brilhante no grampo em destaque na imagem.....	111
Figura 5.27. Escavação mecanizada entre grampos, feita após os ensaios de arrancamento, de forma que não houvesse influência do peso da retroescavadeira no ensaio.	113
Figura 5.28. Detalhe do início da escavação entre grampos, para posterior retirada de material escavado de forma manual no entorno do grampo.	114

Figura 5.29. Escavação mecanizada entre grampos, feita após os ensaios de arrancamento, de forma que não houvesse influência do peso da retroescavadeira no ensaio.	115
Figura 5.30. Escavação mecanizada dos grampos, detalhe da escavação ao redor dos grampos 3, 4 e 5.....	116
Figura 5.31. Escavação manual após nicho escavado mecanicamente.....	117
Figura 5.32. Escavação manual após nicho escavado mecanicamente. Detalhe da escavação do grampo 1.	118
Figura 5.33. Detalhe de escavação manual dos grampos paralelamente à escavação mecanizada.....	119
Figura 5.34. Detalhe de içamento mecanizado dos grampos, com auxílio de sinaleiro para içamento controlado.....	120
Figura 5.35. Detalhe de içamento mecanizado dos grampos, com auxílio de sinaleiro para içamento controlado. Detalhe para o trecho livre preservado.....	121
Figura 5.36. Detalhe de dano mecânico gerado pela escavação mecanizada	122
Figura 5.37. Detalhe de bainha de grampo exumado, em que a calda de cimento é íntegra, sem contaminação do solo circundante	123
Figura 5.38. Detalhe de impregnação do solo circundante no exterior da bainha, com porção não possível de remover nem com limpeza à base d'água.	124
Figura 5.39. Detalhe dos grampos pós exumação. Os danos nos grampos foram principalmente no topo e na base de cada grampo, devido ao processo de içamento mecanizado	125
Figura 5.40. Detalhe dos grampos pós exumação. Os danos nos grampos foram principalmente no topo e na base de cada grampo, devido ao processo de içamento mecanizado.	126
Figura 5.41. Parâmetros de interesse na medição da rugosidade dos grampos (modificado – Seo <i>et al.</i> , 2012)	127
Figura 5.42. Perfilômetro para traçado dos perfis de rugosidade dos grampos	128
Figura 5.43 – Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com ar como fluido de perfuração, injetados por gravidade, sem uso de aditivo.....	129

Figura 5.44 – Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com ar como fluido de perfuração, com fase de reinjeção, sem uso de aditivo	129
Figura 5.45 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com ar como fluido de perfuração, injetados por gravidade, com uso de aditivo na calda de cimento	130
Figura 5.46 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) da média dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com ar como fluido de perfuração.....	130
Figura 5.47 – Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração, injetados por gravidade, sem uso de aditivo expensor na injeção	132
Figura 5.48 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração, com fase de reinjeção, sem uso de aditivo expensor na injeção	132
Figura 5.49 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração, injetados por gravidade, com uso de aditivo expensor na injeção	133
Figura 5.50 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) da média dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração	133
Figura 5.51 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) da média dos ensaios de arrancamento	135
Figura 5.52 - Gráfico N_{SPT} (número de golpes / 30 cm) vs q_s (kPa). O modelo proposto no capítulo 4 é representado pela curva traçada, considerando N_{SPT} de 0 a 10. O modelo proposto previu, para $N_{SPT} = 3$, 206,38 kPa, abaixo dos valores encontrados nos ensaios	137
Figura 5.53 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa).....	138
Figura 5.54 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs q_s (kPa).....	139
Figura 5.55 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus).	139
Figura 5.56 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa).....	140

Figura 5.57 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs q_s (kPa).....	141
Figura 5.58 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus).	141
Figura 5.59 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa) para grampos GR.	142
Figura 5.60 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs q_s (kPa), para Grampos GR.	143
Figura 5.61 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus), para grampos GR.	143
Figura 5.62 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa) para grampos GG, GA e GR perfurados à água.	144
Figura 5.63 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs q_s (kPa), para grampos GG, GA e GR perfurados à água.	145
Figura 5.64 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus), para grampos GG, GA e GR perfurados à água.	145
Figura 6.1 – Croqui esquemático de ensaio de arrancamento sub-horizontal, 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, 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	152
Figura 6.2 – 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.....	153
Figura 6.3 – Montagem de ensaio de arrancamento sub-horizontal no talude 1	154
Figura 6.4 - Montagem de ensaio de arrancamento vertical no talude 1	155
Figura 6.5 - Montagem de ensaio de arrancamento sub-horizontal no talude 2	156
Figura 6.6 - Montagem de ensaio de arrancamento vertical no talude 2	156
Figura A.1 – Detalhes esquemáticos do projeto da caixa de cisalhamento	176
Figura A.2 – Montagem da caixa de cisalhamento	177

Figura A.3 – Detalhe do equipamento de perfuração para a execução dos grampos experimentais	178
Figura A.4 – Detalhe do furo finalizado na caixa de cisalhamento	179
Figura A.5 – Detalhe da membrana utilizada para a caixa de cisalhamento	180
Figura A.6 – Compressor utilizado para tentativa de pressurização da caixa	181
Figura A.7 – Injeção dos dos grampos piloto na caixa de cisalhamento	182
Figura A.8 – Reinjeção dos grampos piloto na caixa de cisalhamento	183
Figura A.9 – Ensaio de arrancamento no protótipo da caixa de cisalhamento	184
Figura A.10 – Detalhe da retirada dos grampos da caixa de cisalhamento	184
Figura A.11 – Grampos exumados após os ensaios de arrancamento, sem carregamento vertical. a) Grampo com 1 setor de reinjeção b) Grampo sem reinjeção.....	185

LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMR	Ângulo médio de rugosidade da interface dos grampos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATO	Acompanhamento técnico de obra
a/c	Razão em massa entre água e cimento
A_s	Área da seção transversal da armação do grampo
CA-50	Aço para concreto armado com resistência 500 MPa
CP II	Cimento Portland Composto
CR10x	Aquisidor de dados da marca Campbell
D_{85}	Tamanho de partícula correspondente a 85% de partículas passantes
D_{95}	Tamanho de partícula correspondente a 95% de partículas passantes.
DF	Distrito Federal
DHP	Dreno Horizontal Profundo
DMT	Teste do Dilatômetro de Marchetti
E	Módulo de Young
E_{eod}	Módulo edométrico
E_s	Módulo de Young secante
f_{yk}	Tensão de escoamento característica do aço empregado
GA	Grampo executado com injeção por gravidade com emprego de aditivo
GC	Grampo comum executado com injeção por gravidade
GR	Grampo executado por meio da técnica de reinjeção setorizada
I_D	Índice de densidade

I.G.	Injeção por gravidade
IP	Índice de plasticidade
K_0	Coefficiente de empuxo no repouso
L_b	Comprimento ancorado no ensaio de arrancamento
LVDT	Transformadores diferenciais lineares
MEF	Método de Elementos Finitos
MEL	Método de Equilíbrio Limite
N_{SPT}	Resistência a penetração do solo conforme medido pelo ensaio SPT
NBR	Norma Brasileira
OCR	Razão de pré-adensamento
PVC	Policloreto de vinila
q_s	Resistência ao arrancamento dos grampos
$q_{scorrigido}$	Resistência ao arrancamento considerando o diâmetro exumado
R.S.	Reinjeção setorizada
SIA	Setor de Indústria e Abastecimento do DF
SMAS	Setor de Múltiplas Atividades Sul do DF
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SPT-T	SPT com medição de torque
T	Força de tração sendo aplicada no grampo
T_{ensaio}	carga máxima prevista para o ensaio de arrancamento
$T_{máx}$	Máxima força de tensão

T_r	Força de tração residual no grampo
$T_{\text{último}}$	Carga última da armação do grampo utilizado no ensaio
TAM	Técnica <i>tube-à-manchette</i>
S_r	Grau de saturação
w	Umidade
w_L	Limite de liquidez
w_P	Limite de plasticidade,
ε_0	Área de baixíssimas deformações
ε_3	deformação de tração principal menor
ε_f	Deformação na ruptura
γ	Peso específico
γ_{as}	Coefficiente de ponderação da resistência da armação do grampo
γ_d	Peso específico seco
γ_s	Peso específico de sólidos
μ_{qs}	Média da resistência ao arrancamento q_s
Φ	Ângulo de atrito advindo do ensaio DMT
$\emptyset_{\text{perf.}}$	Diâmetro da perfuração
$\emptyset_{\text{exu.}}$	Diâmetro exumado médio
σ_3	Tensão principal menor
σ_h	Tensão horizontal
σ_r	Tensão radial
σ_{qs}	Desvio padrão de q_s
σ_v	Tensão vertical
ν	Coefficiente de Poisson

1. INTRODUÇÃO

As estruturas de contenção reforçadas por grampos foram preconizadas na França, com o primeiro relato advindo da construção de uma contenção em Versalhes, em 1972 (CLOUTERRE, 1991). A Figura 1.1 ilustra a estrutura.

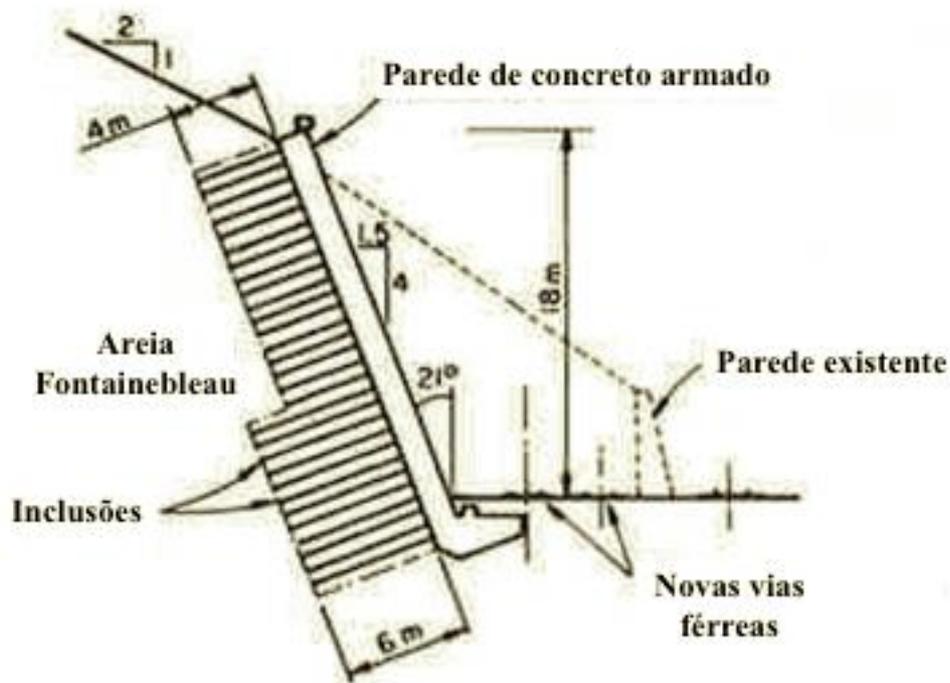


Figura 1.1. Primeira contenção em Solo Grampeado (modificado - CLOUTERRE, 1991).

As contenções em solo grampeado caracterizam-se pelo maior emprego em cortes, com desconfinamento controlado do maciço por meio de escavação, com perfuração e instalação de grampos para reforço do solo e posterior confinamento da face por meio de anteparo, comumente concreto projetado. A técnica também pode ser utilizada em cortes naturais, de forma a melhorar a estabilidade de maciços naturais com risco inapropriado ou como forma de recuperação de taludes rompidos. A contenção é calculada considerando condições drenadas, sendo necessários elementos como drenos horizontais profundos (DHP) e drenos de paramento (dreno pontual, chamado de barbacã, ou dreno linear contínuo) para que as hipóteses de projeto sejam confirmadas na obra. No Brasil a primeira obra com princípios similares também foi

executada em 1972, na Rodovia dos Imigrantes. Na Alemanha e nos Estados Unidos a técnica também iniciou sua utilização na década de 70.

Apesar do amplo uso do solo grampeado, pela economia e rapidez executiva quando comparado às soluções usuais de contenção, a técnica carece de maiores estudos quanto seu comportamento real. Como consequência, o projeto de contenções em solo grampeado é baseado em hipóteses conservadoras, advindas tanto de correlações empíricas (Ortigão & Palmeira, 1997) ou de observações de comportamento de estruturas dimensionadas de forma cautelosa.

Em relação ao Brasil, a técnica de Solo Grampeado tem importantes adaptações previamente empíricas, como a reinjeção dos grampos presente na norma ABNT NBR 16920-2 (2021). O estudo da técnica de Solo Grampeado no meio acadêmico brasileiro ocorre formalmente desde 1994, com menos de 50 casos na contabilização do autor, englobando monografias, dissertações de mestrado e teses de doutorado. Especificamente quanto ao Centro-Oeste brasileiro, os números das mais respeitadas instituições de geotecnia do Centro Oeste - apesar do relevante estudo de Ortigão & Palmeira (1997), apenas quatro trabalhos, sendo três de mestrado e um de doutorado, foram feitos na Universidade de Brasília acerca do tema e apenas dois trabalhos, duas dissertações de mestrado, da Universidade Federal de Goiás, foram feitas sobre solo grampeado até a presente data.

1.1.MOTIVAÇÃO

Os estudos concernentes à técnica de solo grampeado no mundo baseiam-se preliminarmente nos ensinamentos do projeto Clouterre (CLOUTERRE, 1991), finalizado em 1991, que gerou diversas recomendações no projeto e execução da técnica, algumas utilizadas até hoje de forma conservativa. Dentre os parâmetros investigados tem-se o parâmetro “ q_s ”, chamado de resistência ao arrancamento dos grampos. Esse parâmetro é o mais importante para as análises feitas pelo método do equilíbrio limite (MEL) tradicionalmente utilizadas no projeto de estruturas de contenção em solo grampeado, visto que representa a resistência ao cisalhamento (aderência) da interface solo-grampo e possibilita estimar a máxima carga passível de ser mobilizada por grampo. Ademais, em análises de estado limite de serviço e estado limite o

parâmetro q_s também é fundamental para os resultados de cálculo, já que este, mesmo indicando a resistência última ao arrancamento, é diretamente relacionado por meio de fatores de resistência com a carga de trabalho suportada pelos grampos (Lazarte *et al.*, 2015). Dessa forma, maximizar a resistência ao arrancamento dos grampos de modo que o solo grampeado não tenha sua vantagem competitiva de preço e prazo diminuída, é oportuno.

Dada essa consideração, nesta tese procurou-se estudar fatores fundamentais quanto ao arrancamento de grampos em solo, especialmente dos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada de grampos. A interação solo-grampo foi investigada pela compilação de dados de arrancamento de grampos reinjetados de forma setorizada em solo, pela execução de grampos experimentais com diferentes metodologias executivas em um solo amplamente estudado de Brasília e aplicação dos resultados em obras de contenção no Pará.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal desta tese foi investigar as principais influências no arrancamento de grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada.

Como objetivos secundários, tem-se:

- Fornecer estimativa prévia confiável da resistência ao arrancamento de grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada para o projeto de contenções em solo grampeado;
- Propor método de seleção para a metodologia executiva de grampos em solo;
- Propor alternativa para ensaios de arrancamento prévios ao início de obras;
- Validação das propostas da tese em obras reais.

1.3. ETAPAS DA PESQUISA E ORGANIZAÇÃO DA TESE

A estrutura desse trabalho é dividida em sete capítulos. Inicia-se com este capítulo introdutório, que introduz o estado de pesquisa atual de grampos em solo, com ilustração de como os objetivos da tese preenchem as lacunas das pesquisas atuais, descrevendo as etapas da pesquisa e a organização da tese.

O segundo capítulo consiste no detalhamento da técnica de solo grampeado, destacando o histórico das contenções em solo grampeado, com a descrição dos principais fatores que

influenciam o comportamento das contenções em solo grampeado – material de corte e drenagem, características do grampo e interface solo-grampo, com ênfase nesse último fator, elaborando nas pesquisas que investigaram a influência do grau de saturação, tensões e pressão de injeção na interface solo-grampo.

O terceiro capítulo descreve a teoria que motivou a introdução de ensaios de arrancamento, com descrição das diferenças, vantagens e desvantagens entre ensaios de laboratório e de campo para o estudo da resistência ao arrancamento dos grampos. Explora a lacuna de ensaios de campo prévios às contenções, previstos, mas normalmente não executados.

O quarto capítulo detalha o desenvolvimento da técnica de reinjeção setorizada, técnica desenvolvida no Brasil para a execução de grampos. As principais influências deletérias à resistência ao arrancamento no processo executivo de grampos foram ilustradas e a reinjeção setorizada foi concebida para compensar esses efeitos. Após validação qualitativa e quantitativa, foram analisadas sete obras com a técnica alternativa, para obras com investigação geotécnica detalhada. Os resultados possibilitaram proposição de modelo empírico, conforme os objetivos da tese e seu conteúdo publicado no periódico *Geological and Geotechnical Engineering* com o trabalho intitulado “*An innovative post grouting technique for soil nails*” (Barbosa *et al.*, 2022).

O quinto capítulo descreve a execução experimental de grampos em solo, para que lacunas observadas no quarto capítulo pudessem ser melhor elucidadas. Para isso, utilizou-se de método de seleção para a metodologia executiva de grampos no solo característico de Brasília, por meio da variação do método de perfuração e variação das características da calda de cimento, de forma a captar essas influências na resistência ao arrancamento, algo inédito na literatura. Na execução experimental, buscou-se investigar o ensaio de arrancamento vertical como alternativa a ser executada em grampos de sacrifício em obras de solo grampeado.

O sexto capítulo exemplifica a aplicação do modelo empírico proposto no quarto capítulo, além de validar a utilização de ensaios de arrancamento vertical como alternativa de verificação da resistência ao arrancamento de grampos executados por meio da reinjeção setorizada.

O sétimo e último capítulo resume as principais conclusões desta tese e sugere trabalhos futuros, especialmente no estudo de grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada.

2. TÉCNICA DE SOLO GRAMPEADO

Nesse capítulo é feita uma revisão bibliográfica de trabalhos feitos por outros pesquisadores no assunto de grampeamento de solo por inclusões resistentes à tração.

2.1. CONTENÇÕES EM SOLO GRAMPEADO

As contenções em solo grampeado são baseadas no reforço do solo por meio de inclusões em locais que a presença de tais inclusões ocasionem uma redistribuição de esforços favoráveis à estabilidade. O comportamento dessas estruturas assemelha-se com o comportamento de estruturas de Terra Armada, técnica idealizada por Henri Vidal em 1963, com as inclusões trabalhando à tração após uma pequena movimentação da massa de solo plástica idealizada, mobilizando o atrito lateral na interface entre a inclusão e o maciço na porção do maciço anterior à cunha supostamente formada pela mobilização da resistência do maciço local (Seo *et al.*, 2014). A principal diferença de comportamento advém que normalmente as estruturas em Solo Grampeado são construídas de cima para baixo (cortes no terreno natural) e as estruturas em Terra Armada de baixo para cima (aterros de especificações rigorosas). Dessa forma as estruturas em Solo Grampeado usualmente apresentam maiores deformações no topo e as estruturas em Terra Armada comumente apresentam maiores deformações na base.

Apesar do amplo uso do Solo Grampeado, pela economia e rapidez executiva quando comparado às soluções usuais de contenção, a técnica carecia de maiores estudos quanto seu comportamento real. Essa realidade mudou com o projeto Clouterre, realizado na França, entre 1986 e 1990 (CLOUTERRE, 1991). Neste estudo fizeram-se diversos ensaios de campo, em escala real, ensaios de laboratório, simulações numéricas e adaptações de métodos de estabilidade de forma que fossem geradas recomendações de projeto, monitoramento, construção e inspeção para estruturas construídas por meio do Solo Grampeado.

Dentre as recomendações do projeto Clouterre consta o método de análise de estabilidade global, o Método do Equilíbrio Limite (MEL), adaptado para Solo Grampeado com critérios múltiplos devido aos diferentes modos de falha dos grampos. Esse método conceituava quatro diferentes modos de falha dos grampos – falha interna por arrancamento, falha do elemento de solo abaixo do grampo, falha do grampo por fratura e falha do grampo por flexão - e é até hoje

utilizado na prática. Otimizações recentes generalizam com apenas um modo de falha dos grampos e três modos de ruptura da contenção – ruptura por arrancamento dos grampos, ruptura por cisalhamento do solo e ruptura pela face da contenção (Seo *et al.*, 2014). Complementarmente há o crescente uso da análise tensão-deformação pelo método dos elementos finitos (MEF) e da análise de confiabilidade (Lin *et al.*, 2016). A característica passiva desse tipo de contenção indica seu uso majoritário em maciços de comportamento dúctil.

Em relação ao Brasil, a técnica de Solo Grampeado tem importantes adaptações empíricas, como a reinjeção dos grampos e o reforço da face por meio de grampos verticais, que possibilitam melhor controle de deslocamentos do maciço (Souza *et al.*, 2015). Algumas dessas adaptações são inéditas e não publicadas na literatura internacional, com apenas Wang *et al.* (2017) relatando inovação similar na Austrália. O estudo da técnica de Solo Grampeado no meio acadêmico brasileiro ocorre desde 1994, com menos de 50 casos na contabilização do autor, englobando monografias, dissertações de mestrado e teses de doutorado.

2.2.FATORES QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DE SOLOS GRAMPEADOS

Para uma boa performance de uma estrutura de solo grampeado três fatores são de importância primordial:

- Natureza e características mecânicas do solo;
- Natureza e características mecânicas dos grampos;
- Interação entre o solo e o grampo.

Em suma, esses três fatores são vinculados e a descrição individual exclusiva de cada um desses é difícil e não prático. Entretanto, características individuais podem ser distinguidas.

2.2.1. INFLUÊNCIA DO MATERIAL DE CORTE

A sequência executiva típica da técnica de solo grampeado consiste na escavação sequenciada do maciço, com passos com altura máxima limitada pela resistência ao cisalhamento, especialmente a parcela coesiva, intrínseca ou aparente, do maciço sendo escavado. Por conta

dos esforços gerados pela escavação, alguns tipos de material, puramente friccionais, ou com intensa presença de água, costumam não ter indicação à técnica (Lazarte *et al.*, 2015). Entretanto, contenções em materiais como argila orgânica e solos colapsíveis são relatados na literatura (Awn, 2015; Natoli *et al.*, 2017).

Após a escavação há a perfuração e instalação dos grampos para posterior confinamento adicional por meio de anteparo, comumente em concreto projetado, comumente entre 7 a 25 cm, dependendo das propriedades do solo, dos grampos, da altura do passo de escavação, da altura final da contenção e do tempo de vida útil da estrutura (Gassler, 1988). Em solos com baixa coesão pode-se utilizar técnicas de pré-confinamento, como os grampos verticais e as injeções de consolidação (Souza *et al.*, 2015). Encostas já existentes, pouco inclinadas, em que o nível d'água é baixo e há possibilidade de crescimento de vegetação para proteção de intempéries naturais bem como coesão aparente gerada pelo potencial de sucção das raízes, tem amplo uso de geomantas flexíveis reforçadas (Duffy-Turner *et al.*, 2022)

Em contenções, o concreto projetado é utilizado com o mesmo princípio em que é utilizado em maciços de túneis, conferindo estabilidade local entre os grampos e com lei de endurecimento compatível com as deformações do maciço durante a cura do concreto projetado (Farias & Assis, 1996). O uso do concreto projetado é particularmente importante para evitar falhas progressivas especialmente em taludes verticais, já que as pequenas deformações devido ao desconfinamento provocado pela escavação podem, se não controladas, chegar a um limite em que as propriedades do maciço sejam alteradas, com menor rigidez, cuja menor rigidez pode gerar piora nos parâmetros da resistência ao cisalhamento (Clayton, 2011). A Figura 2.1 ilustra a maior deformabilidade associada a maiores deformações para um mesmo tipo de solo.

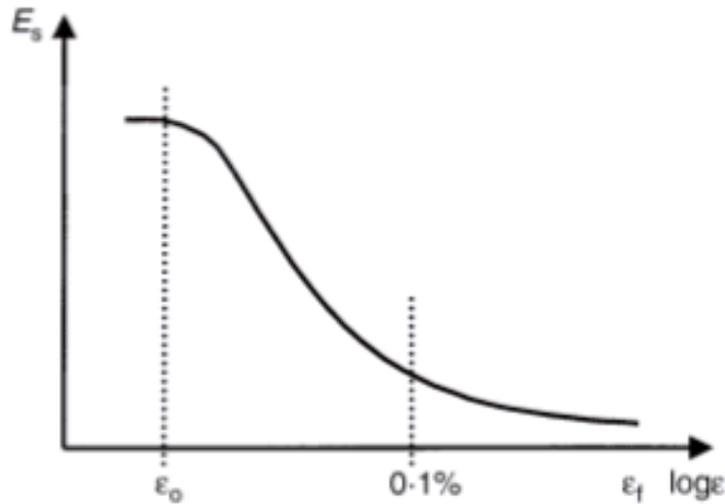


Figura 2.1. Deformabilidade associada a diferentes níveis de deformações. E_s é o módulo de Young secante, ϵ_0 é a área de baixíssimas deformações e ϵ_f a deformação na ruptura (modificado - Atkinson, 2000)

É visto na literatura que há decréscimo dos deslocamentos para taludes menos verticais, com reduções de até 70% dos deslocamentos horizontais quando se comparou taludes verticais em relação a taludes inclinados em 80° ou menos, em estudos numéricos e por centrífuga (Lima *et al.*, 2003; e Rotte & Viswanadham, 2013; respectivamente). O material de corte também é citado como influência preponderante por Silva (2022).

Ademais, a consideração do grampo fixo na face, bem como grampos de maior comprimento e maior diâmetro no topo da contenção, resulta em menores deslocamentos horizontais da frente de escavação (Lima *et al.*, 2003; Seo *et al.*, 2014). Segundo Babu & Singh (2010), não há diferença significativa nas deformações observadas e fator de segurança para diferentes valores de espessura do paramento em contenções verticais.

2.2.1.1. INFLUÊNCIA DA DRENAGEM DO MATERIAL DE CORTE

A construção em solo grampeado deve ser acima do nível d'água não só devido a problemas construtivos durante a fase de escavação, mas também com problemas de projeto, como o fluxo d'água perpassando pela face e o possível carreamento e retro erosão interna (CLOUTERRE, 1991). Para que as hipóteses de cálculo sejam mantidas durante a vida útil da estrutura, especialmente de empuxo máximo, e para que existam redundâncias de projeto e diminuição da probabilidade de falha da contenção, com efeitos benéficos à resistência ao cisalhamento

advindos do aumento das tensões efetivas, da sucção e do alcance do teor ótimo de umidade, elementos de drenagem são recomendados. Para o bom dimensionamento do sistema, a caracterização do aquífero, a resposta do aquífero à chuva, o sistema de drenagem, o método construtivo e a facilidade de manutenção futura devem ser considerados (Pohll *et al.* 2013). A Figura 2.2 apresenta os principais tipos de dispositivos drenantes que comumente compõem contenções de solo grampeado.

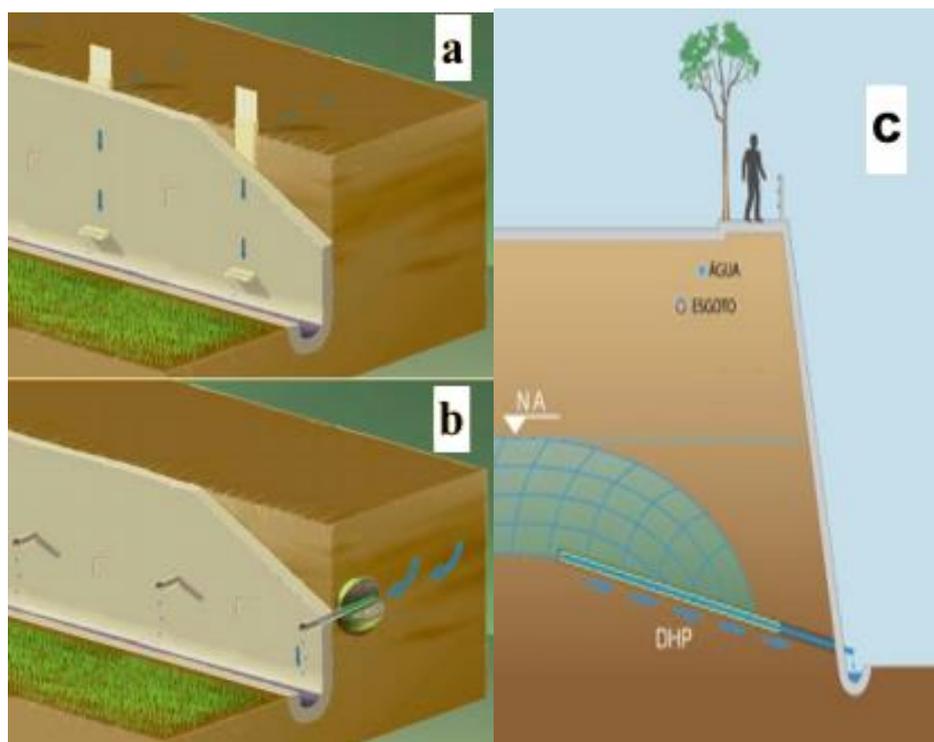


Figura 2.2. Dispositivos de drenagem. a) dreno linear contínuo (geodrenos verticais) b) dreno pontual (barbacã) e c) dreno sub-horizontal profundo (DHP) (modificado – Souza et al., 2015)

O dreno linear contínuo, também chamado de geodreno vertical, é resultado da instalação, numa escavação, de calha plástica drenante revestida por manta geotêxtil ou por dreno fibroquímico. Ele estende-se ao longo da direção vertical, da crista até a cota inferior do talude, aflora na canaleta de pé e é considerado um dreno linear.

O dreno tipo barbacã, ou buzinode, é resultado da escavação de cavidade com cerca de 200 x 200 x 200 mm, preenchida com material arenoso e cuja saída é um tubo de PVC drenante, partindo do seu interior para fora do revestimento, com inclinação horizontal descendente. Trata-se de uma drenagem pontual.

Drenos sub-horizontais profundos (DHP) são tubos plásticos drenantes, de 31,75 mm a 50,8 mm, instalados em perfurações no solo, de 63,5 mm a 101,6 mm. Estes tubos são perfurados e recobertos por manta geotêxtil ou por tela de nylon, no entanto, podem ter somente micro ranhuras ($<0,4$ mm), sem recobrimento por manta ou tela.

Apesar de Rahardjo *et al.* (2003) concluírem baseados em análises numéricas que drenos superficiais, como os drenos de paramento, terem eficácia reduzida para a estabilidade de taludes, sejam lineares contínuos ou pontuais, como barbacãs, sendo mais eficazes drenos horizontais profundos posicionados na menor cota possível, o uso de drenos superficiais é importante para a conservação do paramento em concreto e, conseqüentemente, da estabilidade entre grampos. Ademais, drenos superficiais mitigam o desenvolvimento de erosão, comumente desconsiderada em análises numéricas (Chu *et al.*, 2013).

O dimensionamento de drenagem interna e de paramento, apesar de costumeiramente baseada na expertise do projetista, pode ser dimensionada via análises numéricas e analíticas, com o uso de análises numéricas em geologias mais complexas e análises analíticas em geologias uniformes. Analiticamente, tem-se as equações de Hooghoudt (1940) e Wesseling (1973) para estimativa de comprimentos e espaçamentos entre DHP. Apesar de limitadas, devido ao número de hipóteses associado às análises analíticas, estimativas preliminares podem ser feitas com esses métodos. Para análises numéricas podem ser utilizados softwares comerciais de geotecnia de amplo uso, como Seep W (Geostudio, 2018), ou softwares específicos, como o MODFLOW (Pohll *et al.*, 2013). A viabilidade construtiva e a gradação granulométrica do solo sendo drenado também devem ser considerados no dimensionamento do sistema, a fim de evitar fenômenos como o *piping* e colmatagem adjacente aos drenos.

Embora os drenos de paramento tenham importância, ressalta-se que os DHP perpassam pelo principal elemento de drenagem presente em uma contenção em solo grampeado e que realmente possibilita o rebaixamento do lençol freático e a manutenção das hipóteses numa contenção drenada, condição mais importante para a estabilidade de taludes (Rahardjo *et al.*, (2003)). O posicionamento destes na menor cota possível no talude evita DHP intermediários, dado que eventualmente o lençol freático será rebaixado ao nível dos DHP de menor cota, tornando os drenos intermediários inoperantes. Os drenos intermediários são necessários

apenas para lençóis empoleirados ou em contenções de longa vida útil, em que eventos chuvosos de menor probabilidade precisem ser considerados.

2.2.2. INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DO GRAMPO

Majoritariamente, os grampos são constituídos de material metálico, comumente barras de aço CA-50 ou barras de aços de maior resistência, como barras de aço laminadas a quente. Outros materiais com resistência à tração, como fibra de vidro, têm uso relatado na literatura (Cheng *et al.*, 2013). O diâmetro das barras é dimensionado a partir da solicitação esperada e da proteção à corrosão desejada. Além da usual consideração de espessura de sacrifício, que aumenta o diâmetro e, conseqüentemente, o custo do grampo devido não só à maior seção de material resistente à tração, mas ao maior diâmetro de furo possivelmente associado, tem-se técnicas previstas que não sejam deletérias à interação da barra de aço com a calda de cimento da bainha. Galvanização por imersão a quente e pintura industrial são técnicas recomendadas pela ABNT NBR 16.920-2 (2021) de Muros e Taludes em Solos Reforçados Parte 2: Solos Grampeados.

No contexto dos sistemas de contenção em solo grampeado, a aderência entre a barra e a calda de cimento é um fator crítico a ser considerado. Apesar da influência da rugosidade da barra, a aderência entre a barra e a calda de cimento é governada pela resistência à compressão da calda de cimento, o que enfatiza a importância do controle de qualidade durante a aplicação da calda (Moosavi *et al.*, 2005).

É importante ressaltar que apesar da importância da interface aglutinante-barra na resistência ao arrancamento de grampos, a interface solo-grampo apresenta uma variabilidade muito maior e, portanto, é frequentemente considerada como a interface crítica para a resistência ao arrancamento, sendo recomendado que os grampos sejam dimensionados para ruptura nessa interface de maior risco quanto a determinação de parâmetros.

2.2.3. INFLUÊNCIA DA INTERFACE SOLO-GRAMPO

A interface solo-grampo refere-se à interface ou limite entre a calda de cimento e o solo nas contenções em solo grampeado. O desempenho da interface do solo com o grampo é crítico para a estabilidade geral e resistência do sistema de solo grampeado. A interface deve ser capaz de transferir as cargas e tensões entre o grampo e o solo sem falhas.

A resistência da interface solo-grampo é afetada por uma série de fatores, como o tipo de aglutinante utilizado, o tamanho e espaçamento dos grampos, as condições do maciço em que os grampos são instalados e a qualidade dessa instalação. Um projeto e construção adequados da interface são essenciais para a estabilidade a longo prazo e o desempenho dos sistemas de solo grampeado. A qualidade da interface solo-grampo é obtida garantindo uma boa ligação entre o grampo e o solo, o que inclui a limpeza adequada do solo antes da aplicação, garantindo que o aglutinante seja colocado na profundidade e no ângulo corretos e garantindo que o aglutinante esteja na consistência correta. Fora calda de cimento, aglutinantes químicos também são utilizados.

A calda de cimento, aglutinante abordado nesta tese, é injetada diretamente no furo para garantir a ligação do solo ao grampo e para proteger o elemento resistente à tração da corrosão. Segundo Briaud (2013a), a maior influência no comportamento das contenções em solo grampeado advém da relação solo-grampo, em que a estimativa da resistência ao arrancamento dos grampos, q_s , é representativa de sua interação com o maciço local e impacta diretamente no espaçamento entre grampos e em seu comprimento. A interface solo-grampo adequadamente projetada, construída e mantida é crucial para a estabilidade e o desempenho a longo prazo dos sistemas de solo grampeado, e a falha na interface pode levar à falha de todo o sistema.

A força no grampo é gerada pelo deslocamento relativo entre o solo e o grampo e é então transmitida para o solo na interface solo-grampo. A força desenvolvida nos grampos pode diminuir os deslocamentos dentro do solo devido à redução da deformação de tração principal menor (ϵ_3) do solo, melhorando a estabilidade do maciço (Tei, 1993). O posicionamento do reforço em regiões de deformações de tração é o mais efetivo (Dyer, 1985). Essa mobilização

da resistência à tração para a estabilidade do talude ocorre, de forma quasi-estática, após a resistência ao cisalhamento do maciço local ser suplantada pelos esforços atuantes. O processo de mobilização dos grampos ocorre devido à restrição da dilatação local do maciço (Palmeira & Milligan, 1989, Yin *et al.*, 2009, entre outros). Schlosser (1982) constatou essa observação especialmente em solos granulares. Quanto maior a dificuldade de arrancamento de um grampo, maior o atrito ou ligação do grampo com o solo.

De acordo com Moosavi *et al.* (2005), a ruptura de grampos raramente ocorre por excesso de tensão na barra, o que justifica a interação grampo-solo ser testada durante a construção da estrutura em solo grampeado e colocada como provável modo de falha de projeto. Essa interação é descrita por:

$$q_s(kPa) = \frac{T_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot \phi_{perf} \cdot L_a} \quad (1)$$

Onde $T_{m\acute{a}x}$ é a máxima força de tensão, ϕ_{perf} o diâmetro da seção ancorada no ensaio de arrancamento e L_a o comprimento ancorado no ensaio de arrancamento. Apesar de não captada nesta equação, a rugosidade da interface tem influência importante na resistência ao arrancamento (Dyer, 1985).

Para o estudo isolado da resistência ao arrancamento de grampos, investigando fatores que influenciam na resistência ao arrancamento de grampos, Yin & Su (2006) propuseram uma caixa de cisalhamento. Esse estudo notabilizou-se pela possível investigação de fatores que influenciam na interface solo-grampo, como por exemplo procedimentos de instalação (perfuração com alívio de tensões, injeção de aglutinantes) e tensões iniciais do maciço, apenas com um pequeno comprimento representativo de grampo, como pode ser visto na Figura 2.3, sendo utilizado.

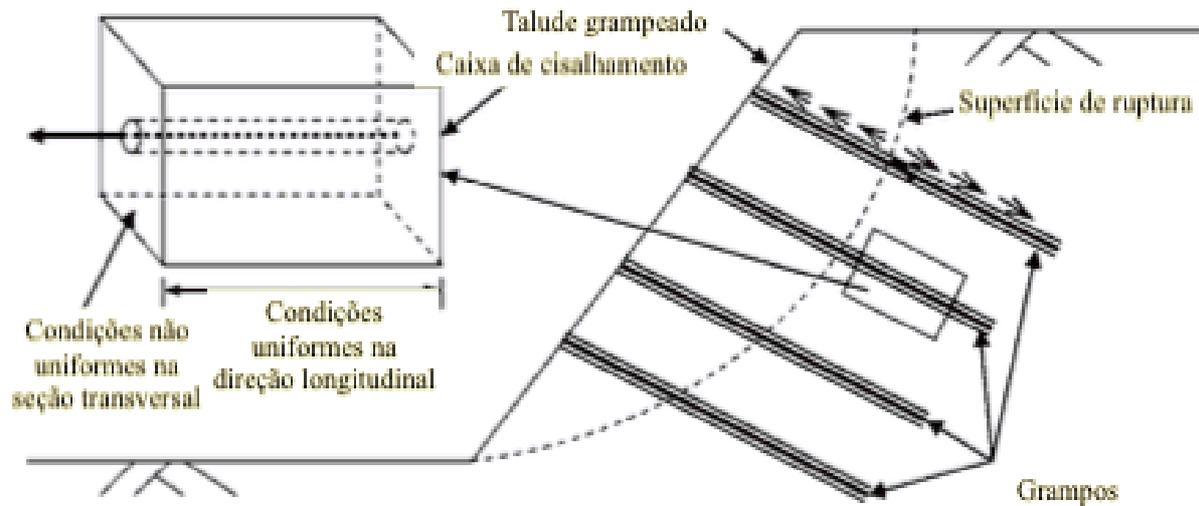


Figura 2.3. Talude grampeado e simulação da caixa de cisalhamento – (modificado - Yin & Su, 2006)

O estudo isolado é possível devido ao fato que o comprimento total do grampo, quando no estado limite último, está tensionado. A tensão cisalhante na interface agindo no grampo tem sentido oposto em relação à superfície de ruptura, vista na Figura 2.3. O solo e o estado de tensões existentes ao longo do comprimento total do grampo não são uniformes. Dessa forma, se o comprimento total do grampo, com condições não uniformes, é usado para o ensaio de arrancamento, a influência de parâmetros como as tensões iniciais e o procedimento de instalação não conseguem ser claramente identificados ou separados e, portanto, não conseguem ser estudados isoladamente.

Assim, caso haja a consideração de um pequeno comprimento de grampo, o solo e o estado de tensões são aproximadamente uniformes ao longo da direção longitudinal. Dessa forma é possível estudar a influência desses fatores na resistência ao arrancamento nesse grampo curto. Os resultados obtidos podem ser usados diretamente ou estendidos para um grampo em seu comprimento total. A caixa de cisalhamento de Yin & Su (2006), com essas premissas, permitiu ampliar os cenários de avaliação de performance de grampos em comparação com caixas de cisalhamento anteriores (Franzén, 1998). Por meio das premissas de Yin & Su (2006), diversos pesquisadores estudaram a resistência ao arrancamento em laboratório, por meio da caixa de cisalhamento, conforme Item 3.1.

2.2.3.1. INFLUÊNCIA DO GRAU DE SATURAÇÃO DA INTERFACE

Utilizando a caixa de cisalhamento concebida em 2006, Su *et al.* (2007) observaram que, para o granito decomposto característico de Hong Kong, um solo residual, o grau de saturação S_r do maciço influencia o q_s , encontrando valores ótimos de q_s para S_r entre 50 e 75%, representando um q_s duas vezes superior ao q_s encontrado com S_r de 98% e substancialmente superior ao q_s para S_r menor que 38%. Gurbarsud *et al.* (2013), ao proporem método semi-empírico de resistência ao arrancamento considerando o efeito da sucção mátrica no comportamento de grampos não pressurizados, encontraram resistências ao arrancamento 30 a 70% superiores em solos não-saturados quando comparado com solos saturados. Tal resultado sugere que resultados similares podem ser obtidos em solos colapsíveis sob efeito da sucção.

Já Hossain & Yin (2012) observaram que a resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo aumenta com o aumento da tensão efetiva atuante na interface e com a sucção mátrica. A sucção mátrica contribui para a resistência ao arrancamento para menores tensões de confinamento dos grampos, já que para maiores tensões normais estas que governam a resistência ao arrancamento. Essa relação com a sucção mátrica é importante com a resistência de arrancamento de pico, a resistência de arrancamento residual não é influenciada, devido à própria sucção diminuir após a resistência de pico. Essa tendência de comportamento *strain softening* pode ocorrer especialmente caso a sucção local seja elevada. Já a tensão normal influencia na resistência de pico e na resistência pós pico, com um comportamento não linear. Os autores encontraram que para pequenas sucções a pressão de injeção contribui para o aumento da resistência ao arrancamento, porém para altas sucções há uma tendência de decréscimo da resistência ao arrancamento com o aumento da pressão de injeção. O resultado obtido por Hossain & Yin (2012) sugere que para solos não-saturados, como a argila colapsível de Brasília, a pressão de injeção elevada pode ser detrimental à resistência ao arrancamento. Caso a pressão de injeção ultrapasse a resistência ao colapso do solo pode haver diminuição brusca dos parâmetros de resistência do solo, com o efeito benéfico da maior rugosidade de interface e menor exsudação da injeção podendo não compensar essa diminuição.

2.2.3.2. INFLUÊNCIA DAS TENSÕES NA INTERFACE

Também com a caixa de cisalhamento concebida em 2006, Su *et al.* (2008) verificaram que para grampos não reinjetados ou não injetados sob pressão as tensões iniciais têm influência desprezável na resistência ao arrancamento, diferentemente do encontrado para grampos cravados no terreno (Jewell, 1990). Segundo Kim *et al.* (2012) essa observação deve-se ao procedimento de perfuração, que plastifica as redondezas do maciço, com tensão principal menor igual a 0, independente da altura em que se está locado o grampo. De maneira geral, diferentes pesquisadores encontraram que quanto maiores as pressões de injeção maior a resistência ao arrancamento (Yin & Zhou, 2009; Yin et al, 2009).

Já Seo *et al.* (2012) estudaram de maneira mais profunda essa influência do processo de injeção pressurizada de calda de cimento, isto é, sistema no qual a injeção é feita em apenas uma etapa, o preenchimento da bainha, por meio de ensaios de campo e laboratório. Apesar da variação da tensão normal à profundidade, essa influência é desprezável para baixas profundidades, de forma que Seo *et al.* (2012) realizaram os ensaios de campo em grampos instalados verticalmente. Ademais, Su *et al.* (2008) observaram a influência desprezável da profundidade na resistência máxima ao arrancamento.

No processo de injeção pressurizada de fase única, previamente estudado por pesquisadores como Kim *et al.* (2009), há um incremento inicial da pressão de injeção devido a resistência do solo à injeção de fluidos com energia superior à injetabilidade local e posteriormente uma redução de pressão devido à percolação da água na calda de cimento para o solo, especialmente para caldas de cimento com fator *a/c* acima de 1,0. O processo de injeção pressurizada acarreta em tensões residuais no solo após as injeções, com magnitude 20% superior às tensões existentes antes das perfurações (Seo *et al.*, 2012). Esse aumento das tensões circunjacentes ao grampo junto a um maior diâmetro efetivo do grampo acarretou aumento mínimo de 36% na resistência ao arrancamento em grampos injetados em relação aos não injetados.

2.2.3.3. INFLUÊNCIA DA REINJEÇÃO SETORIZADA

Camberfort (1968), ao estudar a técnica de *tube-à-manchette* (TAM), observou a possibilidade de reinjeção por *clacagem*, alterando o maciço para não apenas recondicionar o entorno do furo para as tensões *in situ*, mas também para aumentar a tensão principal menor (σ_3) para um

estado superior aos níveis existentes. Como a técnica foi encontrada para densificar o solo ao redor do furo, e solos densos tem a tendência de dilatar ao serem cisalhados, o ângulo de dilatância do solo teria tendência de ser mobilizado no cisalhamento da interface, melhorando a performance do entorno da injeção TAM, técnica de reinjeção muito eficaz em tirantes (Kim *et al.*, 2012).

Cheng *et al.* (2013) estudaram a injeção TAM associada a grampos de fibra de vidro e relataram a melhora não só da mobilização do ângulo de dilatância, como relatado por Seo *et al.* (2012), mas também da resistência ao cisalhamento da argila mole que havia sido injetada, devido à consolidação.

Embora a injeção TAM possa obter uma melhoria eficaz na resistência ao cisalhamento dos solos e na resistência ao arrancamento de grampos, este ainda é um método demorado e de uso intensivo de mão-de-obra, reduzindo a viabilidade do uso em contenções de solo grampeado, que, geralmente, apresentam uma alta densidade de grampos por metro quadrado.

Por isso, foi desenvolvida uma metodologia análoga à injeção TAM, mas que resultaria em uma execução mais rápida, resultando em menos retrabalho e uso de mão-de-obra, com equipamentos menos sofisticados, com melhora semelhante na resistência ao arrancamento dos grampos e na resistência ao cisalhamento do maciço circundante.

Para volumes similares de calda de cimento injetada, em que o volume total de injeção é composto pelo volume de injeção injetado por gravidade adicionado ao volume injetado por reinjeção setorizada, o diâmetro médio era aproximadamente o mesmo, mas com superfície muito mais rugosa quando a reinjeção setorizada foi utilizada.

Os resultados promissores quanto à rugosidade dos grampos e o confinamento superior provido devido a altas pressões de injeção motivaram a execução de grampos por meio da técnica de reinjeção setorizada, a fim de validar quantitativamente a técnica em ensaios de arrancamento. Esse aprofundamento do estudo da reinjeção setorizada também foi motivada pela baixa abrangência de trabalhos no assunto, com Silva (2009) relatando aumento de até 100% da resistência ao arrancamento desses em relação a grampos injetados em fase única, à gravidade, em solos compactados, mas sem abordagem de outros tipos de solos ou do real motivo de maior resistência ao arrancamento.

2.3.CONCLUSÕES

As contenções em solo grampeado são influenciadas pelo material sendo contido, as características mecânicas do grampo e, principalmente, pela interação solo-grampo, representada pela resistência ao arrancamento. Enquanto estudos anteriores consideraram o efeito das tensões iniciais do maciço na interface solo-grampo como fator importante na resistência ao arrancamento, estudos recentes demonstraram que para grampos não cravados, como os estudados nesta tese, os procedimentos de instalação minimizam os efeitos das tensões iniciais, com a pressão de injeção tendo influência determinante na resistência ao arrancamento de grampos em solo, propiciando o surgimento de técnicas como a reinjeção setorizada.

Para medição da resistência ao arrancamento, ensaios de laboratório têm sido realizados para o estudo do comportamento isolado dos grampos, sob condições controladas, enquanto ensaios de campo apesar de realizados ainda carecem de publicações na literatura, lacuna a ser diminuída nos próximos capítulos.

3. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE GRAMPOS

Nesse capítulo é feita a descrição das metodologias de ensaios de arrancamento de grampos, em laboratório e *in situ*. Ênfase é dada para a descrição do aparato de ensaio de arrancamento de campo, análogo aos utilizados nesta tese. A instrumentação para monitorar os testes também é descrita.

3.1. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO EM LABORATÓRIO

Os ensaios de arrancamento de laboratório são realizados por pesquisadores que almejam investigar isoladamente possíveis fatores de influência na resistência ao arrancamento. Tais fatores incluem as propriedades do solo, as dimensões dos grampos, a superfície de interface dos grampos, a rigidez do elemento resistente à tração, condições de umidade e carregamento etc.

Tentativas incipientes de utilização de ensaios de arrancamento em laboratório para estimar o comportamento no arrancamento de grampos iniciou com Guilloux *et al.* (1979). Posteriormente, estudos como os de Abramento & Whittle (1995), Milligan *et al.* (1997), Franzen (1998), Chu & Yin (2005), Yin & Su (2006), Swan *et al.* (2007), desenvolveram caixas de arrancamento de forma a possibilitar mudanças de procedimentos de ensaio e mensurar não apenas isoladamente, mas também com condições fixas de ensaio, como tensões totais, tipo de grampo e pressão de injeção, entre outros.

Dentre as caixas de cisalhamento desenvolvidas para grampos em solo, recentemente tem-se utilizado a caixa de cisalhamento idealizada por Yin & Su (2006) em pesquisas. Houve tentativa do uso de aparato experimental nesta tese, porém, devido a obstáculos operacionais e ao fato de que o autor possuía disponibilidade de realização ampla de ensaios de arrancamento de campo, ensaios costumeiramente onerosos e de difícil uso em pesquisas acadêmicas, oportunamente fez-se a opção pelo uso de ensaios de arrancamento de campo. A tentativa do uso da caixa de arrancamento é descrita no Apêndice A.

A caixa concebida por Yin & Su (2006) marcou o desenvolvimento dos estudos de laboratório para isoladamente estudar as diferentes influências nos resultados de arrancamento, em especial pelo desenvolvimento da possibilidade de aplicação de pressões neutras de forma eficaz. O detalhe esquemático da caixa pode ser visto na Figura 3.1.

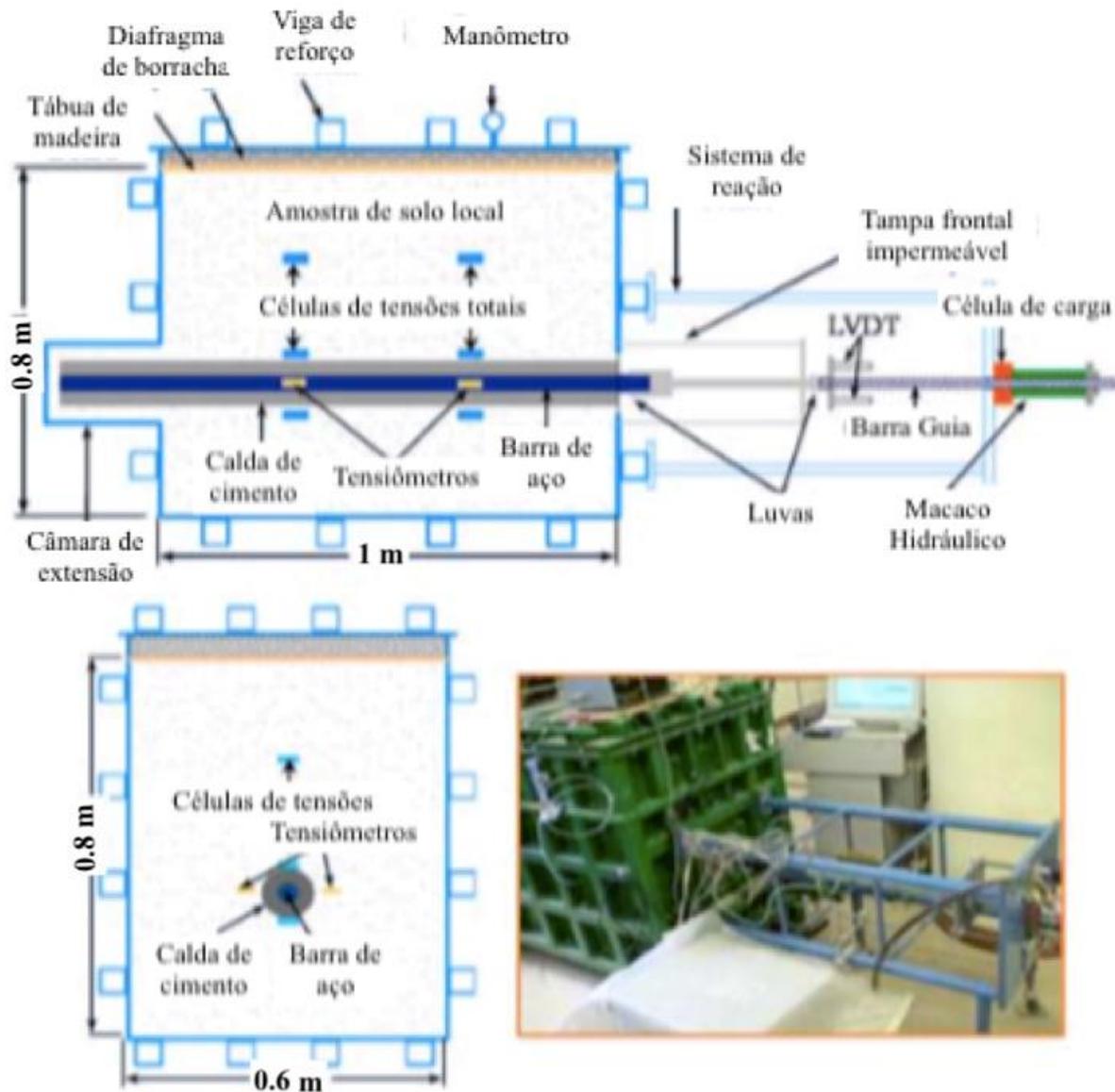


Figura 3.1 – Desenho esquemático do projeto da caixa de cisalhamento de Yin & Su (2006)

A caixa contém no topo um diafragma de borracha, que é fixado nessa superfície superior a fim de formar uma câmara de fluido para aplicação de pressões na superfície do solo, que simulam as tensões iniciais do maciço. Uma tábua de madeira, foi posta entre a membrana de borracha e o topo do solo de forma que a deformação do solo fosse uniforme. A amostra de solo tem 1,0 m de comprimento, 0,6 m de largura e 0,8 m de altura, dimensões determinadas

por meio de simulações numéricas da influência dos processos de perfuração e injeção em solos granulares. Acima da amostra ficam 30 mm de espaço para acomodação do diafragma de borracha e da tábua de madeira.

A caixa foi construída com chapas de aço reforçadas por meio de vigas de aço, de seção quadrada, para aumentar a resistência e a rigidez da caixa. O diafragma de borracha que forma a câmara de fluido para aplicação das pressões que simulam as tensões do maciço é fixada na tampa superior por uma armação de aço rígida. Duas válvulas foram posicionadas na tampa superior da caixa: uma para aplicação das tensões, com um manômetro nela para medição da pressão; a outra para saída de ar da câmara, que poderia levar a uma medida errada da mudança de volume do solo sendo testado. Quatro chapas mais grossas, foram soldadas na superfície externa da caixa como um enrijecedor para fixação da tampa superior. A tampa superior foi fixada ao enrijecedor por meio de parafusos de alta resistência. O enrijecedor é um pouco mais baixo do que a borda superior das chapas laterais da caixa. Posteriormente ao aperto dos parafusos, a membrana pode ser comprimida entre a tampa superior e a borda das chapas laterais. Isso se deve a precauções contra possíveis vazamentos de água entre a caixa de cisalhamento e a tampa superior em testes em condições submersas. Pensou-se em pequenos furos para passagem de fios/dutos de acesso a instrumentos, com selagem por meio de parafusos impermeabilizantes.

Uma inovação da caixa de Yin & Su (2006) foi a possibilidade de controlar o grau de saturação da amostra e possibilitar testes inundados, por meio de uma tampa impermeável, possibilitando ensaios antes não possíveis em outras caixas. O fornecimento desta tampa dianteira à prova d'água possibilitou a aplicação da pressão de retorno de água para saturar o solo de teste na caixa. A tampa dianteira à prova d'água é semelhante a uma célula triaxial tradicional. É formado por um cilindro Perspex® que é restrito por uma placa de aço e um anel de aço usando tirantes. Uma haste de aço é usada para conectar a cabeça do grampo e o parafuso para retirá-la. Dois anéis de cobre e anéis de borracha são usados no local onde a haste passa pela chapa de aço para evitar vazamentos.

Para testes submersos, o solo precisa ser saturado antes de ser retirado. A placa de aço que bloqueava o furo de perfuração podia ser removida após a cura da calda de cimento. A tampa

dianteira à prova d'água foi então instalada e o solo na câmara foi removido. Uma bomba de vácuo foi usada para sugar o ar dentro do solo de teste dos orifícios superiores da caixa e a água foi enchida na caixa dos orifícios inferiores ao mesmo tempo.

Na concepção desta caixa de cisalhamento, a ideia de usar uma câmara de extensão atrás e uma tampa dianteira à prova de água na frente da caixa é a mais importante. Isso possibilita manter um comprimento constante dos grampos durante o arrancamento e obter um maior grau de saturação do solo de teste.

Para mitigar o atrito da caixa com a amostra de solo, Yi & Su (2006) adotaram uma abordagem eficaz para reduzir o atrito lateral. Esta abordagem incluiu uma combinação das duas medidas seguintes:

- Uma folha de aço inoxidável lisa foi anexada à superfície interna da caixa;
- Uma folha plástica flexível foi colocada na chapa de aço com óleo lubrificante na interface entre a folha e a chapa.

Yin & Su (2006) realizaram testes de cisalhamento direto na interface de lubrificação entre a folha de plástico flexível e a chapa de aço inoxidável e simulação tridimensional em elementos finitos que corroboraram a eficácia da medida contra o atrito.

Para a perfuração, há a utilização de uma base fixa no chão a fim de evitar movimentação e garantir a horizontalidade do furo na caixa. A injeção de cimento foi concebida para execução por meio de cilindros especialmente projetados e construídos. Tubos de plástico foram conectados à saída de tais cilindros e estendidos até o final do furo de perfuração ao longo da barra de aço. Durante a injeção, uma placa de aço quadrada foi usada para apoiar a barra de aço e bloquear o furo de perfuração para evitar o vazamento de calda de cimento. A calda de cimento moveu-se do final para a entrada do furo durante a injeção.

Para a injeção sem pressão, a calda de cimento foi bombeada por um pistão fixado em uma extrusora de amostra de solo modificada quando o recipiente de calda foi acionado por um motor elétrico da extrusora.

Um cilindro especial foi projetado, construído e conectado para realizar a injeção com pressão. Havia dois furos no cilindro: um na tampa superior para aplicar pressão de ar e o outro na parte

inferior para conectar o tubo de injeção colocado no furo ao longo da barra de aço. A calda de cimento colocada no cilindro foi empurrada para dentro do furo por uma pressão de ar constante aplicada na superfície superior da calda de cimento. As pressões da calda de cimento no final e as posições da cabeça do grampo foram medidas usando dois medidores de pressão. Utilizando este cilindro, a calda de cimento é injetada sob pressões controladas.

Nestes testes de arrancamento de laboratório, a pressão de sobrecarga é aplicada pela pressão da água através de um diafragma de borracha fixado na tampa superior da caixa. Um manômetro de pressão é fixado na tampa superior para medir a pressão aplicada. Um medidor de mudança de volume automático é conectado na linha de pressão. O fluxo de água (compressão) ou fluxo de saída (expansão) é mensurado por um instrumento sensível à mudança de volume. A mudança no volume da água será a mudança de volume do solo, isto é, a deformação do solo de teste na caixa (testes saturados).

Para a determinação da tensão axial no grampo, quatro extensômetros são aderidos à barra de aço, com espaçamento de cerca de 300 mm. Os dados podem ser usados para obter a distribuição da força de cisalhamento devido ao atrito na superfície do grampo.

Dois transformadores diferenciais lineares LVDT, como mostrados na Figura 3.1, são instalados na cabeça do grampo para medir o deslocamento de arrancamento. Uma média dos dois valores é usada. Já a força de arrancamento é determinada por meio de uma célula de carga localizada entre o macaco hidráulico e a estrutura de reação de arrancamento.

A pressão vertical é aplicada no solo de teste pela pressão da água através da câmara de fluido formada pelo diafragma de borracha sob a tampa superior. Água deairada é utilizada para preencher a câmara de fluido continuamente devido à deformação do solo. A mudança de volume e as leituras da célula de pressão são registradas automaticamente por meio de aquisidor de dados CR10X.

Após cerca de 24 h, Yin & Su (2006) observaram que a alteração de volume foi muito pequena, o que indicava que o solo estava próximo de um estado de equilíbrio sob a pressão de sobrecarga aplicada. Um furo de 100 mm de diâmetro foi então perfurado a partir da frente da caixa, em toda a extensão da caixa, até a câmara adicional. Depois disso, um vergalhão de aço

de 40 mm com quatro extensômetros foi colocado no centro do furo de sondagem. O furo foi então injetado com calda de cimento com um fator água-cimento de 0,42. Após cinco dias de cura, quando a força desenvolvida da argamassa de cimento foi de cerca de 32 MPa, a haste foi puxada para fora usando um macaco hidráulico contra uma estrutura de reação de aço.

Os tensiômetros deveriam ser instalados através dos orifícios de acesso em cada lado da caixa pelo menos 24 horas antes da retirada. Para testes submersos, o solo precisava ser saturado antes do arrancamento e os transdutores de poropressão precisavam ser instalados antes da saturação do solo.

Com essa construção da caixa de arrancamento, Yin & Su (2006) obtiveram:

- Uma tampa frontal à prova d'água é colocada para cobrir e selar a cabeça do grampo de modo que a pressão da água possa ser aplicada para acelerar a saturação do solo. Usando este método, a influência do grau de saturação da resistência ao arrancamento do grampo pode ser examinada;
- A pressão de sobrecarga é aplicada por um diafragma de borracha flexível embaixo da tampa superior da caixa. A câmara fluida formada pelo diafragma de borracha e a tampa superior é preenchida com água deairada. O fluxo de entrada / saída de água é medido automaticamente por um medidor automático de mudança de volume. Desta forma, a pressão de sobrecarga na superfície do solo é mais uniforme e a mudança de volume do solo de teste (ou recalques) pode ser medida. Este design torna a caixa compacta e simples de operar.
- Um cilindro especial é projetado, feito, usado para realizar a injeção da calda de cimento sob pressão, de modo que a influência da pressão de injeção possa ser estudada.
- A perfuração foi realizada após a aplicação da pressão confinante. Desta forma, a influência da perfuração do furo e da liberação de tensão na resistência ao arrancamento do grampo pode ser investigada.

Desde 2006, com a invenção da caixa de arrancamento de Yin & Su (2006), houve a propagação do uso desta para ensaios de arrancamento de laboratório, com menores ou maiores variações, para o estudo isolado de influências na resistência ao arrancamento de grampos (Hong, 2011).

3.2. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE CAMPO

Desde que a técnica de solo grampeado foi introduzida pela primeira vez na prática no início da década de 1970, os pesquisadores tentaram investigar o comportamento dos grampos realizando testes de campo em escala real. Em comparação com o teste de arrancamento de laboratório, o teste de campo em escala real explica melhor os efeitos de diferentes parâmetros de influência e, portanto, as correlações capturadas entre a resistência ao arrancamento e certos parâmetros são mais razoáveis e confiáveis para o projeto baseado no local.

Um grande número de testes de campo foi realizado para avaliar o desempenho de grampos de solo em estruturas de contenção em solos (Guilloux e Schlosser, 1982; Juran, 1985; Juran & Elias 1990; Schlosser & Guilloux 1979). Matsui *et al.* (1990) mediram as forças axiais de grampos de solo em escavações e previram a superfície de deslizamento potencial usando os resultados de deformação medidos. Elias & Juran (1991) calcularam a resistência final ao arrancamento considerando os tipos de grampos e métodos de instalação. Heymann *et al.* (1992) observaram que a tensão de cisalhamento última entre a haste e o solo residual é independente da profundidade do solo. Ortigão & Palmeira (1997) investigaram a correlação entre a resistência ao arrancamento e os valores de N_{SPT} no Brasil. Wong *et al.* (1997) estimaram o desempenho de campo de grampos de solo em solo residual.

Turner & Jensen (2005) adotaram a técnica de solo grampeado para estabilizar deslizamentos de terra ativos. Mittal & Biswas (2006) demonstraram que o grampo executado com bainha apresenta melhor desempenho do que o grampo cravado, com um estudo de caso em campo. Yeung *et al.* (2007) auferiram que a pressão de injeção pode aumentar significativamente a resistência ao arrancamento, por meio de arrancamento de campo. Pun & Shiu (2007) discutiram a situação atual do solo grampeado na aplicação de campo em Hong Kong. Li *et al.* (2008) avaliaram a eficácia da técnica de grampeamento do solo pelo monitoramento contínuo de um talude feito pelo homem em escala real por seis meses, na qual o movimento do muro de arrimo e o modo de transferência de cargas axiais ao longo dos grampos do solo foi apresentado, analisado e discutido.

Seo *et al.* (2012), realizaram uma série de experimentos de arrancamento in situ em sistemas de solo grampeado, usando injeção pressurizada e injeção por gravidade comum para comparar

as resistências ao arrancamento de ambos os casos e verificar a eficácia da injeção pressurizada no sistema solo-grampo, observando o ganho de resistência da injeção pressurizada em fase única devido à compactação adicional do solo pela expansão da cavidade e ao aumento da tensão residual e da mobilização do ângulo de dilatância pela injeção pressurizada. Hong *et al.* (2013), encontraram que o teor de água das amostras de solo nas interfaces solo-grampo diminui substancialmente em comparação com o teor de água de amostras de solo não grampeados, além da observação do aumento da resistência ao arrancamento de grampos injetados sob pressão. Resende (2014) também observou que a pressão de injeção leva a melhores resistências de arrancamento. Seo *et al.* (2017) verificaram que além do aumento da resistência ao arrancamento com a pressão de injeção, há um aumento da rigidez do grampo. Nestas pesquisas, o método de ensaio variou entre o ensaio de força controlada e o de deslocamento controlado.

3.3.MÉTODOS DE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DE CAMPO

Os métodos de ensaios de arrancamento de campo perpassam pelos fundamentos de CLOUTERRE (1991), que categorizou os ensaios de arrancamento de campo em três diferentes tipos, de acordo com o estágio do grampeamento:

- Ensaios preliminares, prévios à construção, denominados nesta tese de ensaios tipo “P”;
- Ensaios de conformidade quando os serviços de contenção em solo grampeado iniciam, denominados nesta tese de ensaios tipo “C”;
- Ensaios durante a construção, de forma a inspecionar a execução dos grampos, denominados nesta tese de ensaios tipo “I”.

As metodologias desses ensaios são idênticas, com objetivo de aferir a qualidade da interface solo-grampo. Isso é feito por meio da aplicação de uma carga estática na cabeça do grampo até que ocorra movimentação mesmo sem acréscimo de carga no passo de carregamento. Os ensaios de campo são realizados em grampos de sacrifício, dado que após o arrancamento o grampo não pode ser incorporado à estrutura.

Os ensaios tipo “P” são feitos para solos incomuns para o uso de solo grampeado, como a argila porosa de Brasília, para validações de novas técnicas de execução de grampos, como a

reinação setorizada, e para obras de maior porte. Como principal objetivo, está a determinação da máxima tensão suportada pelo grampo. CLOUTERRE sugeriu a Tabela 3.1 para especificar a quantidade mínima de ensaios preliminares para determinadas áreas de contenção e a Figura 3.2 apresenta exemplo dessa aplicação. A principal dificuldade desse tipo de ensaio é determinar a resistência ao arrancamento em diferentes estratigrafias previamente às escavações.

Tabela 3.1. Área de contenção e recomendação de número de ensaios de arrancamento por tipo de solo na metragem desejada (CLOUTERRE, 1991)

Número de ensaios tipo "P" mínimo	Área de contenção (m ²)
6	Até 800
9	800 a 2000
12	2000 a 4000
15	4000 a 8000
18	8000 a 16000
25	16000 a 40000

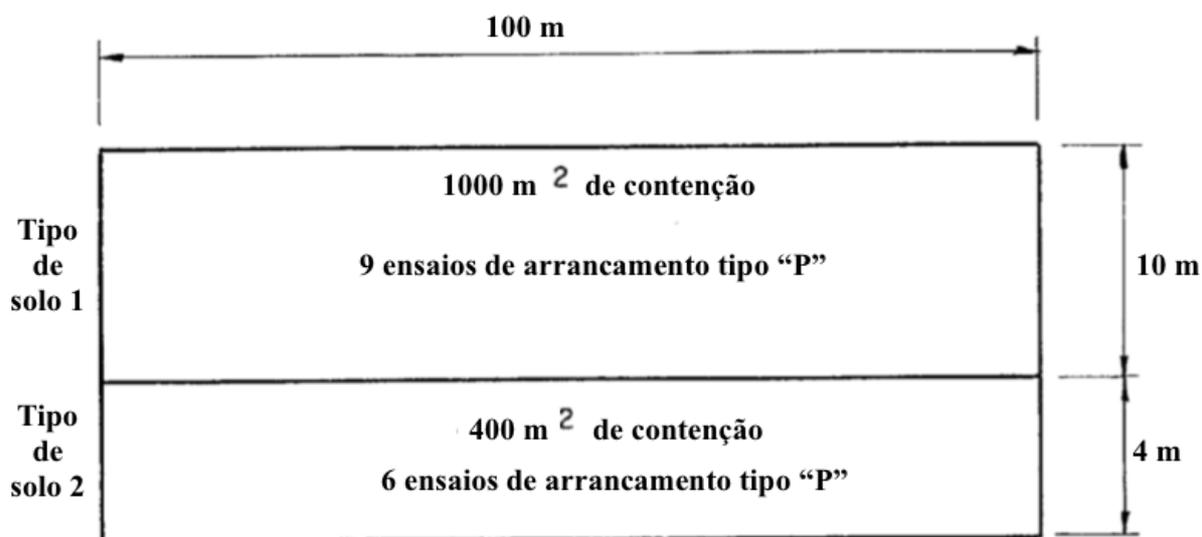


Figura 3.2 – Desenho exemplificando a aplicação da Tabela 3.1 – adaptado de CLOUTERRE (1991)

Os ensaios tipo "C" são feitos para validar as hipóteses de projeto acerca da interface solo-grampo, representada pelo q_s dos grampos. Os ensaios são conduzidos para cada tipo de

camada de solo quando a cota de escavação dos diferentes tipos de solo é alcançada. Apesar do paramento da contenção poder ser utilizado como estrutura de reação, recomenda-se que estruturas de reação à parte sejam feitas, para que se evite danificar o paramento na aplicação da carga máxima de arrancamento. Os ensaios de arrancamento são executados com reações que não possibilitem a rotação durante o ensaio.

CLOUTERRE (1991) recomenda também o uso da Tabela 3.1 para os ensaios tipo “C”, entretanto Lazarte *et al.* (2015), bem como NBR 16920-2 (2021), recomendam a utilização de ensaios tipo “C” em 1% do número de grampos totais da contenção. CLOUTERRE (1991) recomenda que os ensaios sejam igualmente distribuídos ao longo da área da contenção, por tipo de solo, de forma que seja representativo de possíveis feições geológicas não captadas em investigações geotécnicas prévias.

Os ensaios tipo “I” são feitos em grampos escolhidos em avanço e que tenham tido seção de trabalho dimensionada para que a falha por arrancamento não resulte na falha do grampo como um todo. Atualmente, ensaios tipo “C” são os mais difundidos e praticados na prática de solo grampeado. A NBR 16920-2 (2021) consolidou os ensaios tipo “I” e tipo “C” em uma única denominação, os ensaios de desempenho.

Para os ensaios de campo, o procedimento de instalação do grampo deve seguir exatamente os procedimentos que serão executados durante o serviço, com apenas a possibilidade de uma barra resistente à tração de maior tensão de escoamento, de forma que o grampo sempre rompa no teste entre o solo e o grampo, e não entre a barra e a calda de cimento. Previamente, ensaios exigiam mínimo de 5 m de comprimento ancorado (CLOUTERRE, 1991), mas verificou-se que esse comprimento pode ser de no mínimo 3 m, prática ainda adotada nas normas nacionais e internacionais (Lazarte *et al.*, 2015). Para o ensaio, de forma que não exista interferência da rigidez da estrutura de reação ao resultado dos ensaios devido a condições de contorno, um comprimento mínimo de 1 m da barra deve permanecer livre, sem interação com o maciço, conforme ilustrado na Figura 3.3. Há também a possibilidade de ensaios de arrancamento com trechos livres de maior comprimento em solos que possibilitem o arqueamento da seção do

furo sem colapso, possibilitando investigação prévia em diferentes estratigrafias, conforme Figura 3.4.

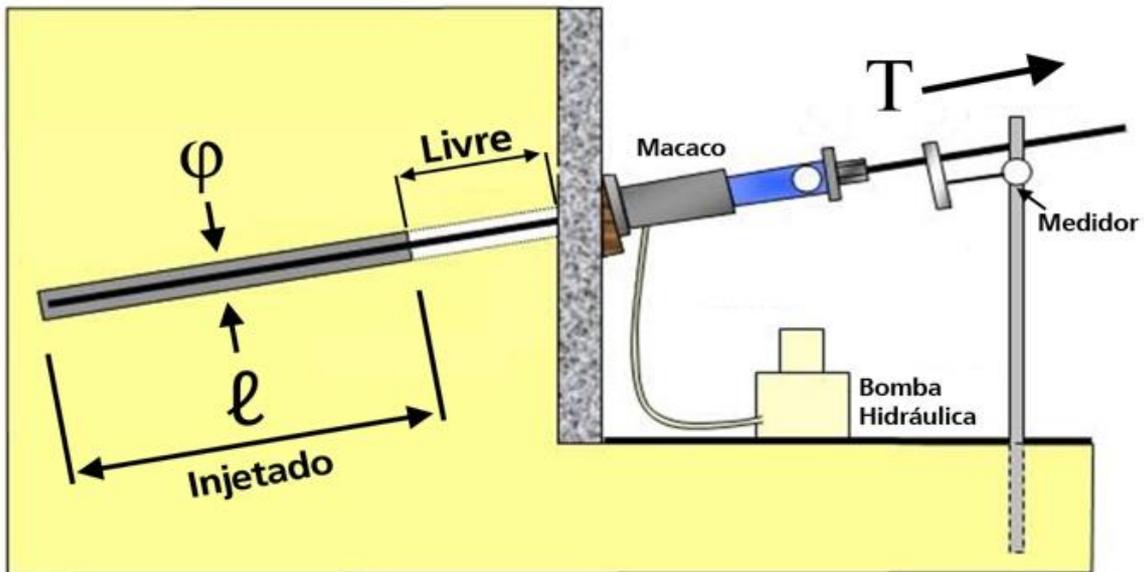


Figura 3.3. Esquema típico de ensaio de arrancamento em que o paramento é utilizado como parte da reação. O comprimento livre tem o mínimo de 1,0 m e o comprimento com interação com o maciço tem mínimo de 3,0 m.

T é a tração sendo aplicada no grampo, ϕ o diâmetro do grampo e l o comprimento injetado

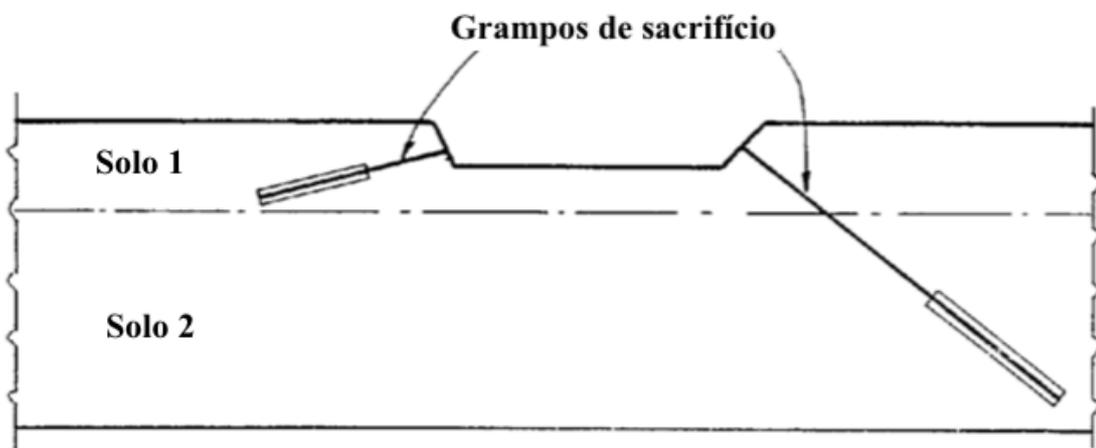


Figura 3.4. Arranjo de ensaios de arrancamento tipo “P” em diferentes camadas de solo, de forma a verificar estimativas de q_s de projeto em diferentes seções geotécnicas, previamente à obra - modificado – CLOUTERRE (1991)

No ensaio de arrancamento de campo, o valor real da resistência da interface, q_s , é determinado com deslocamentos ou força controlados, em que ambos os ensaios possibilitam determinar a máxima força de arrancamento T_{max} , com possibilidade de determinação da força residual T_r , por meio da análise dos resultados em gráficos de carga-deslocamento. Os ensaios executados de forma análoga ao projeto CLOUTERRE, de 1991, descrito a seguir, dado que o procedimento concebido à época e ainda utilizado obtém o maior número de dados dentre os ensaios de arrancamento, por possibilitar traçar curvas de carga-deslocamento mais completas, dado um intervalo menor de registros entre ensaios, é o do tipo força controlada, que é o tipo de ensaio prescrito na NBR 16920-2 (2021). Ensaios de deslocamento controlados costumam ser feitos apenas em pesquisas e em solos sujeitos a fluência (*creep*), dado que para solos não sujeitos a *creep* ambos os tipos de ensaio resultam em valores idênticos (CLOUTERRE, 1991). Previamente à montagem do ensaio, determina-se as cargas máximas esperadas do grampo, considerando estimativas de projeto, método de instalação dos grampos bem como feições geotécnicas do solo em que os grampos serão instalados e experiência prévia da projetista e da empresa construtora. Com as cargas máximas de ensaio, é possível especificar a barra resistente à tração, projetada de forma que o limite elástico desta não seja atingido no teste, o que interferiria na curva carga-deslocamento (Seo *et al.*, 2017).

O equipamento usado, visto na Figura 3.3, é composto de uma cunha de ajuste, para aplicação da força de tração ao longo do eixo da barra, aplicada por meio de um macaco hidráulico vazado e respectiva bomba, e uma célula de carga. Na ausência da célula de carga utiliza-se conjuntos macaco-bomba com certificado de calibração válidos. Tanto o conjunto quanto a célula de carga devem ter acurácia de no mínimo 1% da força máxima esperada de ensaio.

A compilação dos deslocamentos na cabeça dos grampos deve ser feita em relação a um ponto fixo, como um sistema embutido no solo ou outro dispositivo sobre base estável. Os deslocamentos podem ser medidos por meio de relógios comparadores de precisão de 0,1 mm. Já para casos de solos suscetíveis ao *creep*, em que os ensaios de deslocamento controlado são utilizados, é recomendada a utilização de transdutores variáveis de deslocamento contínuos (LVDT) (CLOUTERRE, 1991).

Previamente ao tensionamento do grampo de sacrifício, o trecho livre do grampo deve ser protegido por um tubo e com espaço suficiente provido entre o tubo e a estrutura de reação, para evitar qualquer contato entre eles durante o ensaio. Caso não seja possível providenciar um trecho livre, como ensaios do tipo “I”, as cargas aplicadas pelo macaco serão absorvidas por um sistema de reação que consiga descarregar essas cargas a uma distância de ao menos 1 metro do eixo do grampo. O sistema, que é composto da placa de reação, conjunto macaco-bomba e célula de carga, deve ser montado de forma que a barra não entorte antes do teste, evitando interferência na curva carga-deslocamento. O grampo, para caso de deslocamentos controlados, deve ser tracionado numa velocidade de 1 mm/min, numa margem de erro de 10% na velocidade de deslocamento. O ensaio é interrompido quando a força de tração superar a carga máxima estabelecida de ensaio ou tenha estabilizado. Em testes realizados em condições experimentais rigorosas em um mesmo tipo de solo não suscetível à fluência, tanto os testes de arrancamento por força controlada como os ensaios de arrancamento por deslocamento controlado mostraram a mesma força máxima de arrancamento T_{max} .

3.3.1. ENSAIOS DE FORÇA CONTROLADA

Nos ensaios de força controlada, os ensaios mais utilizados na prática brasileira, a taxa de movimento não é medida. Antes de realizar um ensaio de força controlada, será necessário estimar a força limite de extração T_{ensaio} que é utilizada para a determinação dos valores das cargas intermediárias de ensaio. Na NBR 16920-2 (2021), este ensaio é feito com o grampo progressivamente submetido a uma força de arrancamento, que aumenta até ao limite estimado da força de arrancamento T_{ensaio} e que deve ser inferior a $T_{último}$ para limitar a fluência no aço.

$T_{último}$ é obtido a partir de:

$$T_{último} \leq \frac{A_S \cdot f_{yk}}{\gamma_s} \quad (3.1)$$

onde

$T_{último}$ é a carga última da armação do grampo utilizado no ensaio, expressa em quilonewtons (kN);

A_s é a área da seção transversal da armação do grampo, expressa em metros quadrados (m^2);
 f_{yk} é a tensão de escoamento característica do aço empregado, expressa em quilopascals (kPa);
 γ_s é o coeficiente de minoração da resistência da armação do grampo; para barras de aço, $\gamma_s = 1,15$.

A armação do grampo de ensaio pode ter resistência à tração superior à armação dos grampos de projeto, em função da carga máxima do ensaio de arrancamento.

A carga de ensaio deve ser a carga prevista para o arrancamento do grampo, conforme a seguir:

$$T_{ensaio} = L_b \cdot \pi \cdot \varphi \cdot q_s \leq T_{último} \quad (3.2)$$

onde

T_{ensaio} é a carga máxima prevista para o ensaio, expressa em quilonewtons (kN);

L_b é o comprimento ancorado do grampo ensaiado, expresso em metros (m);

φ é o diâmetro da perfuração do grampo ensaiado, expresso em metros (m);

q_s é a resistência da interface solo-grampo prevista em projeto, expressa em quilopascals (kPa).

Conforme NBR 16920-2 (2021), devem ser aplicados quantos estágios forem necessários para a obtenção da curva carga-deslocamento, sendo no mínimo cinco estágios de igual carregamento (20 % da carga máxima prevista para o ensaio – T_{ensaio}), com tempo de 5 min em cada estágio e com tempo de 15 min para o último estágio.

Em cada etapa de carga, a medição do deslocamento de fluência é realizada da seguinte forma:

A força de tração imposta ao grampo é medida usando uma célula de carga. O nível desta força é mantido rigorosamente constante ao longo de cada etapa de carregamento, no entanto, uma variação no valor da força de até 0,1% da força de arrancamento limite estimada é aceitável. Ressalta-se a importância da realização de testes reais de fluência (com força constante). Se isso não for feito, variações nos níveis de força aplicada ao grampo durante as etapas de carregamento podem mascarar fenômenos de fluência, principalmente durante as primeiras etapas de carregamento. Durante os primeiros passos, a fluência não deve exceder 0,1 a 0,2

mm. O início do tempo t_0 é tomado no instante em que o nível de carga da etapa correspondente é atingido.

As medições de deslocamento são feitas em cada etapa de carregamento e realizadas nos intervalos de tempo de no mínimo 5 min em cada estágio e 15 min para o último estágio.

Se necessário, a pressão do macaco pode ser ajustada para manter a força no valor de etapa de carregamento necessário. É recomendado que medições de temperatura sejam feitas no início e no final de cada etapa. Se a ligação solo-grampo não falhar na força de tração limite estimada T_{ensaio} , será possível continuar o teste em incrementos com o mesmo critério até atingir o arrancamento ou $T_{\text{último}}$.

Após a última etapa, é realizado o descarregamento e feita a leitura dos deslocamentos cada décimo da força limite de extração alcançada durante o teste.

A curva força-deslocamento será plotada levando em consideração qualquer deslocamento de fluência observado em cada etapa de carregamento. A força de arrancamento limite é geralmente alcançada quando se torna necessário ativar continuamente o macaco para manter a carga constante.

3.3.2. ENSAIOS DE DESLOCAMENTO CONTROLADO

Nos ensaios de deslocamento controlado, ensaios utilizados para pesquisas e regiões geotécnicas desconhecidas, a taxa de movimento é medida. Dessa forma, é possível auferir possível comportamento de fluência do solo, complementarmente aos ensaios de adensamento no local. Assim como no ensaio de força controlada, será necessário estimar a força limite de extração T_{ensaio} que é utilizada para a determinação dos valores das cargas intermediárias de ensaio.

A barra será tensionada a uma velocidade de 1 mm/min, de preferência com bomba manual. A margem de erro na velocidade deve ser de $\pm 10\%$. Essa velocidade pode ser controlada, por exemplo, por meio de um marcapasso e um relógio comparador a cada 1/100 mm. A barra deve permitir um deslocamento mínimo de 50 mm.

O teste será interrompido quando a força de tração ultrapassar um valor máximo preestabelecido ou se estabilizar. Recomenda-se plotar a curva de deslocamento de força. As leituras das cargas serão feitas a cada 1/10 mm (ou a cada 6 s) até 5 mm, a partir daí a cada 1/2 mm (ou a cada 30 s) até a carga residual. Se nenhuma carga residual aparecer, o teste será continuado até que a força de tração na cabeça do grampo varie menos de 1% para um deslocamento de 1 mm.

Durante o descarregamento, as leituras de força versus deslocamento serão feitas a cada décimo da força máxima.

A força limite de tração T_{max} será o valor máximo da força atingida durante o teste. Este valor, T_{max} corresponderá na curva força-deslocamento ao valor de pico, ao valor residual ou ao valor tal que a variação da força por 1 mm seja inferior a 1 por cento, ou ao valor para um deslocamento máximo de 30 mm. A Figura 3.5 ilustra esses critérios de paralisação de ensaio.

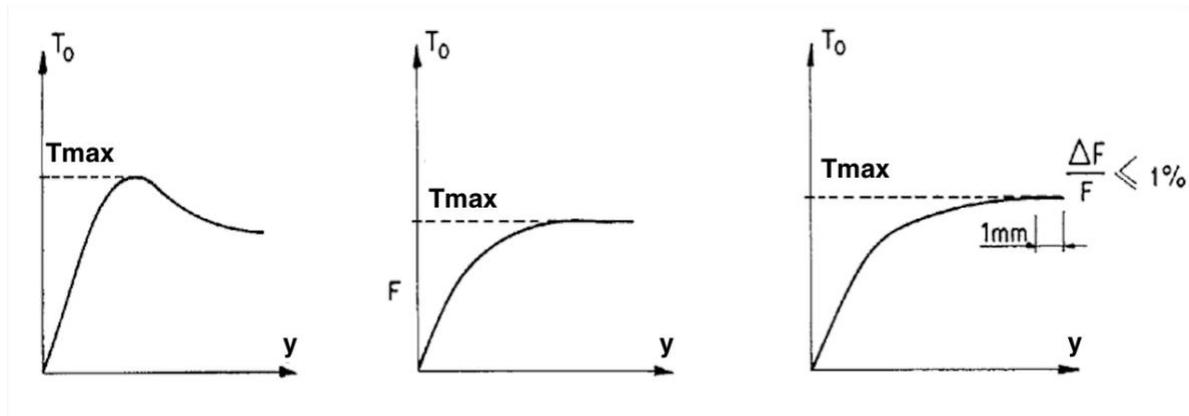


Figura 3.5. Critério de falha utilizado em ensaios de arrancamento de deslocamento controlado. - modificado – CLOUTERRE (1991)

3.4. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS

Os ensaios tipo “P”, preliminares à construção, 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 gera projetos excessivamente conservadores e, por conseguinte, onerosos. Entretanto, os ensaios de arrancamento sub-

horizontais, mostrados na Figura 3.3 e 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. A Figura 3.6 apresenta o esquemático dos grampos preparados para ensaio. Os grampos foram instalados e ensaiados conforme os métodos de ensaio descritos nos Itens 3.3.1 e 3.3.2, com a diferença apenas na orientação destes. Em teoria, a diferença entre as duas condições de ensaio, sub-horizontal ou vertical, é a diferença entre a tensão horizontal (σ_h) e vertical (σ_v) exercida pelo coeficiente de empuxo do maciço. No ensaio de arrancamento sub-horizontal, a tensão radial (σ_r) atuante na barra é diferente nas diferentes posições da circunferência da interface solo-grampo, mas, no teste vertical, a tensão radial atuante no grampo é a mesma para mesmas profundidades. Dessa forma, teoricamente, essa limitação não é impeditiva para a similitude dos resultados de ensaios sub-horizontais e verticais, devido à tensão normal média (σ_m) ser a mesma em ambos os casos e o diâmetro do grampo ser pequeno o suficiente para a influência das diferentes tensões verticais ser negligível.

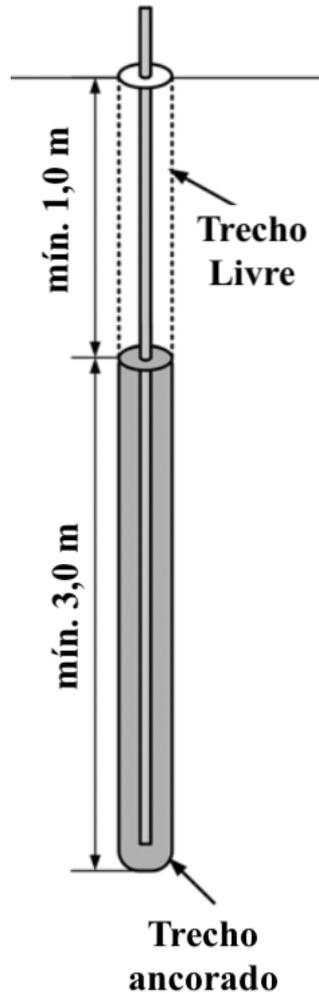


Figura 3.6. Croqui esquemático de grampo vertical utilizado para ensaio de campo

Apesar de ainda não difundidos no Brasil, ambos os ensaios são geralmente usados para pesquisa e também na prática (Seo, 2020). Para que esse tipo de ensaio seja mais utilizado no Brasil, buscou-se nesta tese, como visto nos objetivos de proposição alternativa para ensaios de arrancamento prévios ao início de obras, o emprego da metodologia de Seo *et al.* (2012), para diferentes metodologias de instalação de grampos, como a reinjeção setorizada. Posteriormente, buscou-se investigar se há diferença na prática nos resultados de ensaios de arrancamento realizados em grampos sub-horizontais e verticais para um mesmo tipo de solo.

4. GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA REINJEÇÃO SETORIZADA

4.1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é feita uma apresentação dos princípios de desenvolvimento e estado da arte da técnica de reinjeção setorizada, características de obras executadas pela técnica, bem como proposição de estimativa de resistência ao arrancamento de grampos executados por meio da reinjeção setorizada.

4.2. DESENVOLVIMENTO DA REINJEÇÃO SETORIZADA

A execução convencional da técnica de solo grampeado começa com a perfuração; assim, há um desconfinamento local da massa do solo, com plastificação progressiva e deslocamentos induzidos em direção ao interior do furo, resultando em um material com piores propriedades geotécnicas ao redor do furo. Posteriormente, a calda de cimento, ligante comumente utilizado, é injetado do fundo do furo até a superfície deste, como visto na Figura 4.1.

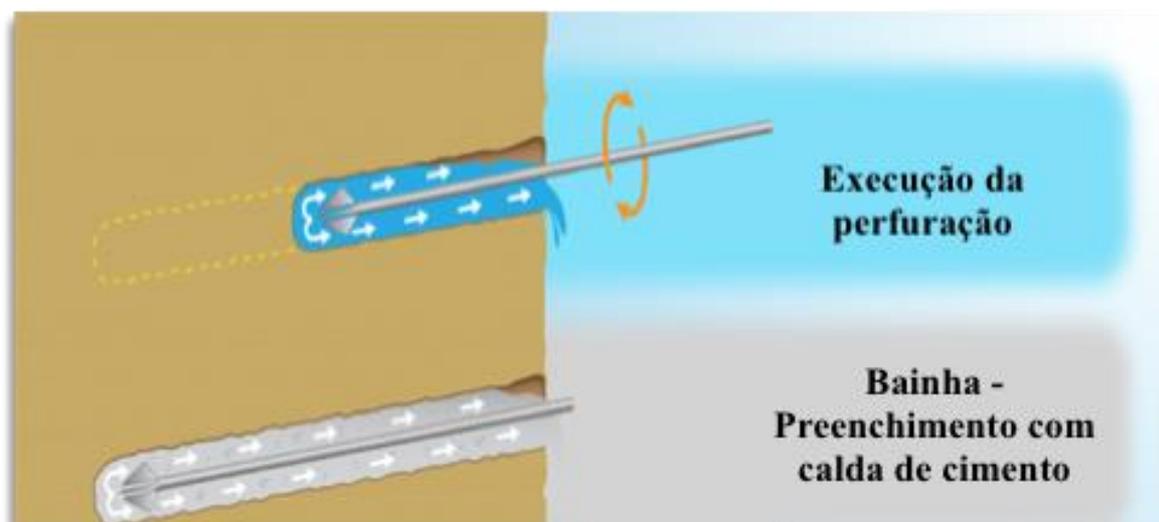


Figura 4.1. Perfuração e injeção do furo, nesse exemplo considerando a água como fluido de perfuração e a calda de cimento como ligante (modificado – Souza et al., 2015)

Na execução convencional de grampos, em que não há injeção pressurizada, o entorno do maciço não retorna ao estado de tensões anterior à perfuração e a aderência da interface do

grampo ao solo, apesar de oferecer resistência ao arrancamento, é menor do que possível se as propriedades do maciço estivessem intactas, por exemplo, sem desconfinamento e com as mesmas propriedades geotécnicas antes da perfuração.

Assim propôs-se uma técnica que ao menos restaurasse as tensões iniciais em torno do maciço antes da perfuração. Essa alternativa foi concebida como uma opção mais viável do que a solução para aumentar o número de grampos em uma contenção de solo grampeado, uma solução ainda usada para compensar a menor resistência ao arrancamento disponível.

Para alcançar o objetivo de usar o menor número de grampos e evitar o retrabalho, pensou-se em um sistema no qual houvesse possibilidade de injeção pressurizada.

Su *et al.* (2008) relataram que a resistência ao arrancamento de grampos dificilmente depende das tensões *in situ*, no solo grampeado com injeção convencional, uma hipótese confirmada por Yin & Zhou (2009) que também encontraram uma dependência da resistência ao arrancamento à pressão de injeção. Yin *et al.* (2009), Hossain & Yin (2011), Seo *et al.* (2012), Hong *et al.* (2013) e Wang *et al.* (2017) também observaram um aumento na resistência ao arrancamento devido à pressão de injeção, para casos pressurizados de injeção em estágio único. No entanto, o método de execução de grampos concebido nesses estudos não compensa os efeitos devido à exsudação do ligante, exigindo aditivos específicos para abordar os efeitos de retração dos ligantes, deletérios devido à menor restrição da dilatação no arrancamento (Moosavi *et al.*, 2005).

Além disso, alguns solos não permitem a introdução efetiva de obturadores simples, método empregado nos estudos de Seo *et al.* (2012) e Hong *et al.* (2013), nem o uso de obturação dos furos junto à face da contenção, método usado por Yin *et al.* (2009) e Houssain & Yin (2011) 1).

Assim, a concepção da reinjeção setorizada adveio da necessidade de uma metodologia que poderia ser utilizada independentemente do tipo de maciço, inspirada na execução da injeção tube-à-manchette (TAM), conforme observado no Capítulo 2, e exemplificado por Cheng *et al.*, (2013), que estudaram grampos de fibra de vidro com injeção TAM e relataram a melhora não só da restrição à dilatação, como relatado por Seo *et al.* (2012), mas também da resistência

ao cisalhamento da argila mole que havia sido injetada, devido à consolidação.

Contudo, embora a injeção TAM possa obter uma melhoria eficaz na resistência ao cisalhamento dos solos e na resistência ao arrancamento de grampos, este ainda é um método demorado e de uso intensivo de mão-de-obra, reduzindo a viabilidade do uso em contenções de solo grampeado, que, geralmente, apresentam uma alta densidade de grampos por metro quadrado.

Por isso, à época da concepção da reinjeção setorizada, por Pitta *et al.* (2016), foi desenvolvida uma metodologia análoga à injeção TAM, mas que resultaria em uma execução mais rápida, resultando em menos retrabalho e uso de mão-de-obra, com equipamentos mais leves, menos sofisticados, com melhora semelhante na resistência ao arrancamento dos grampos e na resistência ao cisalhamento do maciço circundante. A Figura 4.2 mostra os detalhes esquemáticos e reais dos grampos, antes da inserção da armação no furo. A Figura 4.3 ilustra os passos da reinjeção setorizada.

A Figura 4.4 exemplifica grampos de ensaio em argilas moles normalmente consolidadas executados para avaliar qualitativamente a técnica em termos de diâmetro médio e rugosidade superficial, uma vez que maior diâmetro e superfícies mais ásperas resultam numa resistência ao arrancamento mais alta.

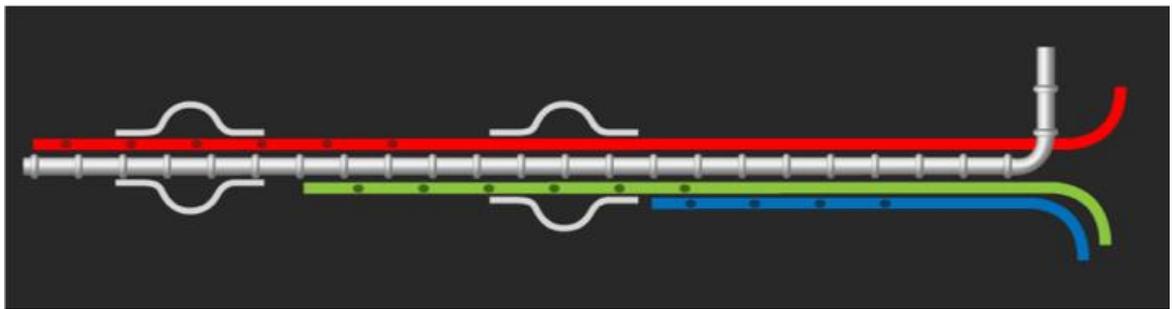


Figura 4.2. Detalhe dos tubos perdidos deixados para a reinjeção, juntos à armação do grampo e aos centralizadores

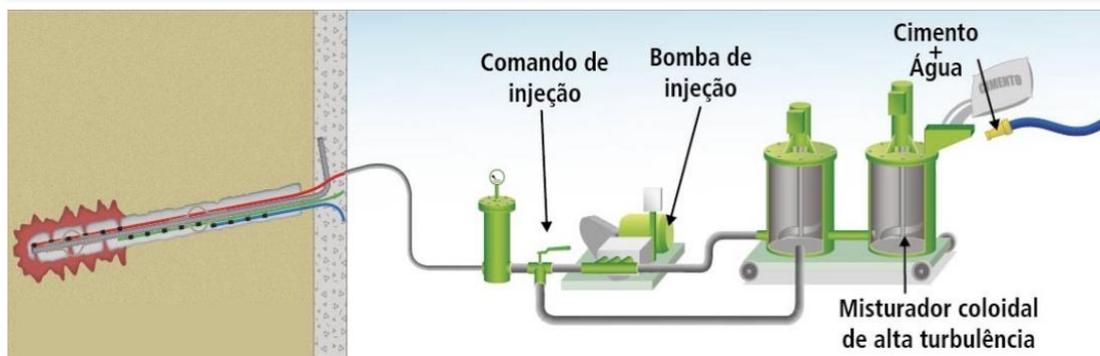
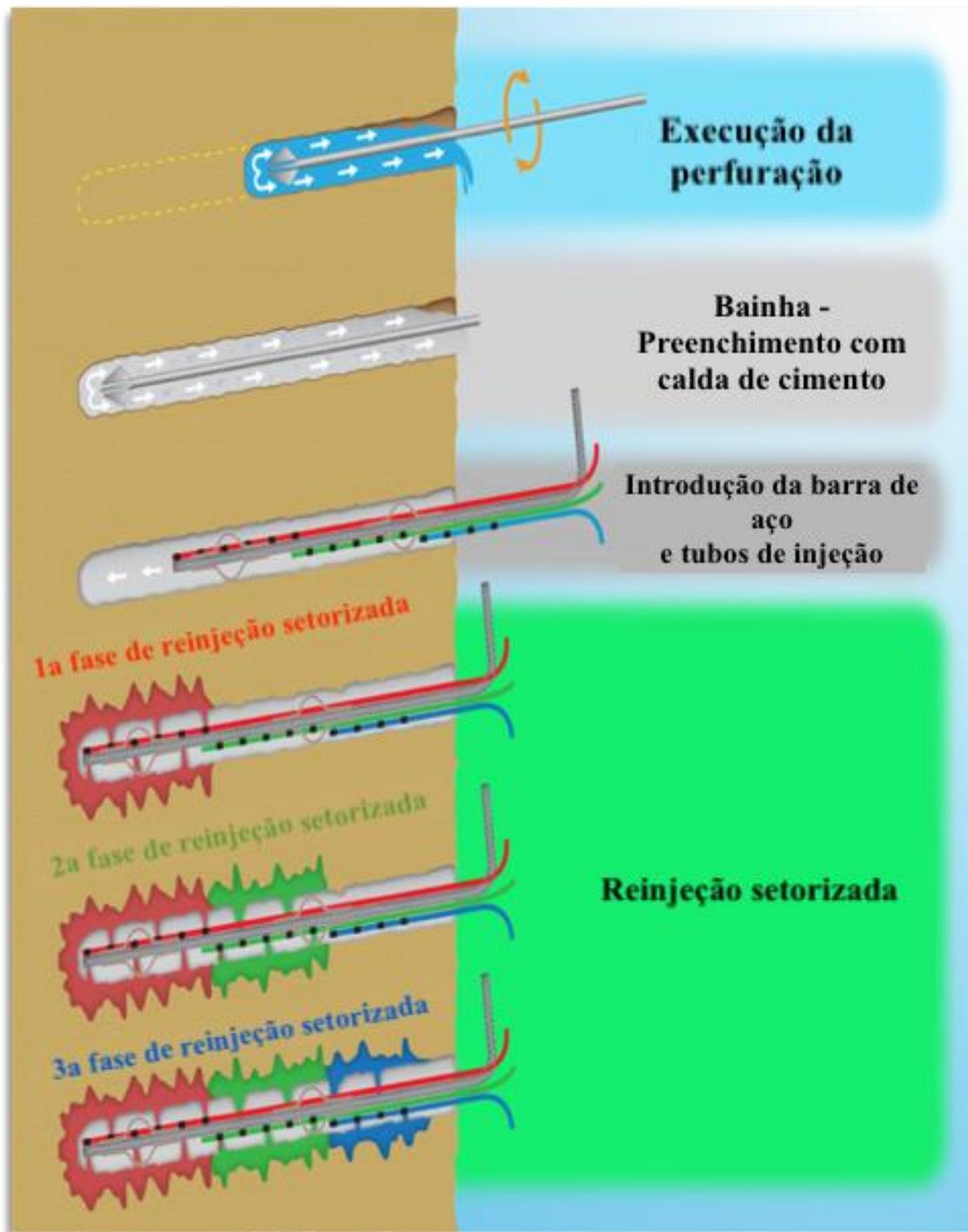


Figura 4.3. Metodologia de reinjeção, enfatizando a maior rugosidade superficial gerada





Figura 4.4. Exumação de grampos que foram executados por meio da técnica de reinjeção setorizada, em que a maior rugosidade da superfície pode ser vista. (Souza et al., 2015)

Como visto na Figura 4.2, a técnica consiste na associação de tubos plásticos flexíveis (geralmente de polietileno) inseridos no furo, ao longo dos grampos. Os tubos são selados nas extremidades, sendo frágeis em certos pontos ao longo de seu comprimento em lugares, locais em que a calda é reinjetada.

Esses pontos frágeis, comumente referidos como válvulas, são aqueles onde buracos ou rasgos na mangueira são feitos, protegidos apenas por uma fita de goma, ou similar, para isolar o interior dos tubos durante a inserção dos grampos no furo e evitar que a calda de cimento injetada na bainha entre nesses tubos de reinjeção.

Os tubos, como visto na Figura 4.2, compreendem todo o comprimento do furo, a fim de reinjetar uniformemente os grampos e evitar quaisquer pontos que possam prejudicar a resistência ao arrancamento devido aos efeitos deletérios da exsudação da calda de cimento e o desconfinamento do furo. A reinjeção é geralmente em uma razão água/cimento (a/c) de 0,5 a 0,7, sendo 0,7 o fator a/c máximo conforme a NBR 16920-2 (2021).

Após 12 a 24 h de feita a injeção por gravidade, em uma razão água/cimento (a/c) de até 0,5, fator a/c máximo conforme NBR 16920-2 (2021), a reinjeção setorizada é realizada. Isso é feito por meio de um obturador simples inserido na extremidade superior de cada tubo, com a

calda de cimento reinjetada quebrando as válvulas nos pontos onde há menor confinamento, i.e., maior injetabilidade. Como a reinjeção é realizada na extremidade superior dos tubos, o uso de um obturador duplo é evitado, economizando tempo e custos de mão-de-obra.

Embora a Figura 4.2 mostre um grampo instalado com três tubos, o número destes depende do comprimento dos grampos. Nos trabalhos experimentais, como o visto na Figura 4.4, verificou-se que cada setor com válvulas, em termos de rugosidade superficial, poderia satisfatoriamente reinjetar o solo, ou seja, com rugosidade superficial muito maior do que um grampo perfeitamente cilíndrico, em até 3,0 m. Rasgos feitos em trechos acima de 3,0 m resultaram em menor rugosidade superficial. Por exemplo, considerando essas observações, um grampo com 9,0 m teria pelo menos três tubos instaladas ao longo da barra de reforço, cada um com 3,0 m de região fragilizada com válvulas, conforme visto na Figura 4.3.

Para volumes similares de calda de cimento injetada, em que o volume total de injeção é composto pelo volume de injeção injetado através de injeção por gravidade adicionado ao volume injetado através da reinjeção setorizada, o diâmetro médio era aproximadamente o mesmo, mas com superfície muito mais rugosa quando a reinjeção setorizada foi utilizada. A concepção e a eficácia da reinjeção setorizada foram avaliadas inicialmente pela exumação dos grampos em local experimental, como visto na Figura 4.4. A perceptível maior rugosidade superficial da interface, a esperada maior restrição à dilatação dos grampos reinjetados e a prevenção de retrabalho devido à resistência ao arrancamento superior alcançada motivaram a análise quantitativa dos grampos por meio de ensaios de arrancamento.

Para os ensaios de arrancamento, foram utilizadas seis barras de aço de escoamento de 240 kN e 22,25 mm, com comprimento de 3 m. O comprimento livre era de 1,0 m, necessário porque ao aplicar a carga de tração na barra, a superfície do talude e o solo são submetidos a cargas de compressão, podendo resultar em resultados imprecisos. Os furos foram perfurados com uma perfuratriz manual e a injeção de calda de cimento, feita de baixo para cima do furo, previamente agitada em um misturador de alta turbulência, possuía fator água-cimento de 0,5. O comprimento livre foi envolto por graxa grafitada e um tubo protetor, minimizando o atrito no trecho livre. O esquema dos ensaios de arrancamento seguiu o previsto no Item 3.4 e Figura 3.3, com a realização do ensaio em campo conforme Figura 4.5.



Figura 4.5. Montagem típica do ensaio de arrancamento. Os grampos tinham comprimento total de 4,0 m e comprimento livre de 1,0 m. Utilizou-se uma estrutura de suporte junto à face do talude

Três dos grampos foram executados utilizando a injeção por gravidade. Os outros três grampos foram executados utilizando reinjeção setorizada, com um tubo de polietileno com pontos

frágeis a cada 0,5 m na extensão da injeção de 3,0 m.

Os relógios comparadores foram instalados na estrutura de suporte para medir os deslocamentos. Em cada etapa de carregamento, os critérios de estabilização foram respeitados, com leituras sendo realizadas nos seguintes intervalos de tempo: 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 60 min. Foi adotado um dos critérios de paralisação de ensaios de deslocamento controlado, conforme Figura 3.5, no qual considerou que caso houvesse 1 mm de deslocamento, mas menos de 1% de aumento na carga medida, o grampo haveria atingido a carga máxima de ensaio. A Tabela 4.1 resume os resultados dos testes, em que N_{SPT} é o número de golpes do teste SPT.

Tabela 4.1. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo

Grampo	Tipo de solo	Tipo de injeção	N_{SPT}	q_s (kPa)
1	Argila Vermelha Porosa	I.G.	2	62
2	Argila Vermelha Porosa	I.G.	2	73
3	Argila Vermelha Porosa	I.G.	2	67
4	Argila Vermelha Porosa	R. S.	2	114
5	Argila Vermelha Porosa	R. S.	2	120
6	Argila Vermelha Porosa	R. S.	2	122

I.G – Injeção por gravidade

R.S. – Reinjeção setorizada

Ao observar a reinjeção setorizada da Tabela 4.1 pode-se observar a eficácia da técnica, ao menos na argila vermelha porosa, com uma melhoria média de 176% na resistência ao arrancamento. A Figura 4.6 mostra as curvas de carga-deslocamento dos grampos injetados por gravidade e a Figura 4.7 dos grampos executados via reinjeção setorizada. As curvas carga-deslocamento dos grampos executados com a reinjeção setorizada eram visivelmente mais lineares do que as curvas de carga-deslocamento dos grampos injetados por gravidade, sugerindo melhor previsibilidade dos grampos executados por meio da reinjeção setorizada.

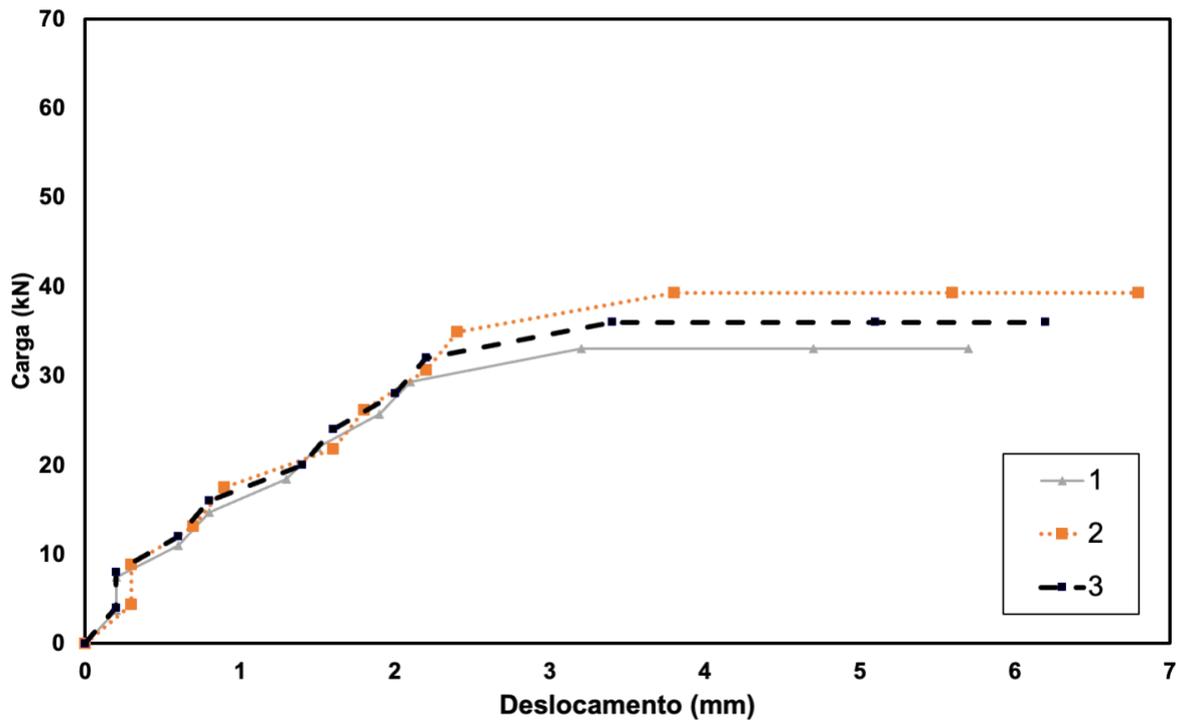


Figura 4.6. Curvas de carga-deslocamento de grampos injetados por gravidade

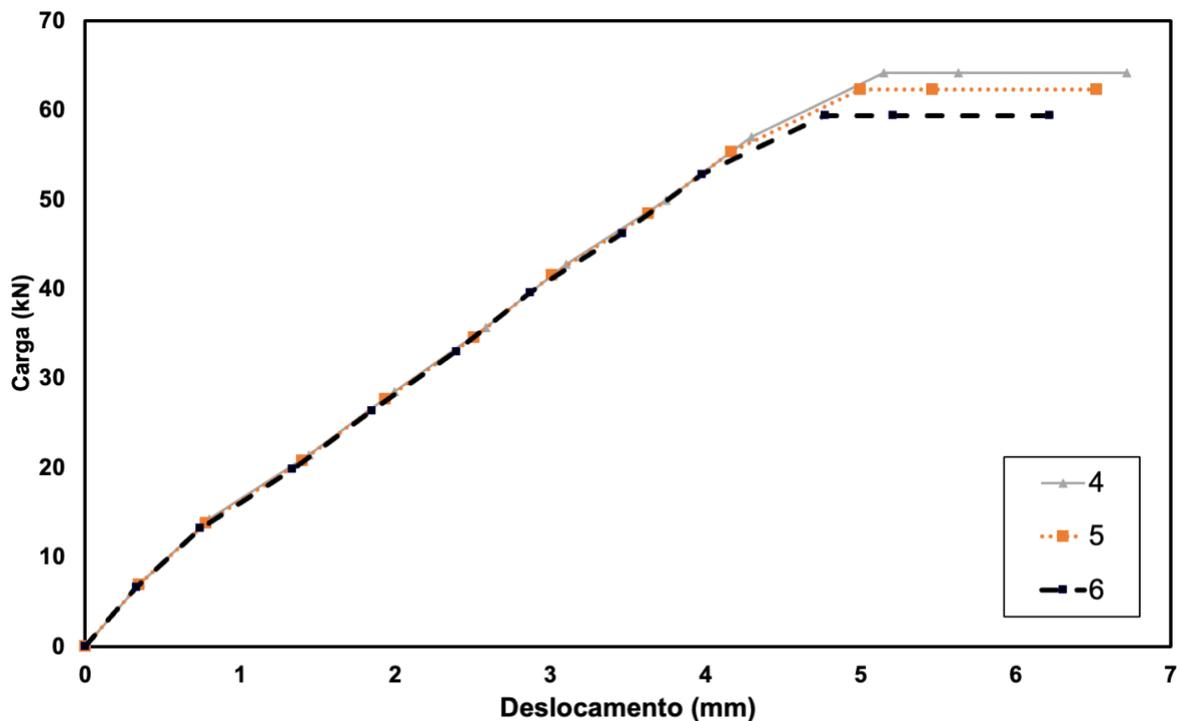


Figura 4.7. Curvas de carga-deslocamento de grampos executados pela técnica de reinjeção setorizada

A fim de verificar se os resultados em argila vermelha porosa eram repetíveis ou apenas característicos da interação solo-grampo em argila vermelha porosa, foram executados grampos de sacrifício com reinjeção setorizada e injeção por gravidade em cinco obras que

estavam em andamento no período (2009-2010), com diferentes tipos de solo. Devido a limitações quanto ao tempo de ensaio nessas obras, houve apenas o arrancamento contínuo, ou seja, apenas com o emprego do conjunto macaco e bomba, sem leitura de deslocamentos. De todo modo, o arrancamento foi considerado como finalizado quando a leitura da carga residual estava estabilizada, de modo que fosse registrado o q_s residual e não o de pico, de forma mais conservadora. A Tabela 4.2 ilustra os resultados destes ensaios, que indicaram, em todos os tipos de solo em que a técnica foi empregada, melhores resultados quanto à resistência ao arrancamento. A Figura 4.8 ilustra graficamente esses resultados.

Motivados pelos ensaios de arrancamento em diferentes tipos de solo, foram realizadas contenções reais de solo grampeado utilizando a reinjeção setorizada, em diferentes solos e condições no Brasil.

Tabela 4.2. Tipo de solo, q_s e melhoria da resistência ao arrancamento em cada tipo de solo

Tipo de Solo		Silto Argiloso (Solo Residual)	Argilo Arenoso (Solo Residual)	Argila vermelha mole (Solo Residual)	Saprolito de Gnaisse	Argila vermelha rija (Solo Residual)
Local		Guarulhos - SP	Morumbi - SP	Av. Paulista - SP	Morumbi - Sp	Av. Paulista - SP
Injeção por Gravidade	kPa	85,3	71,0	37,0	256,0	107,5
Reinjeção	kPa	122,5	108,0	92,0	438,0	141,0
% melhora	%	43,6%	52,1%	148,6%	71,1%	31,2%

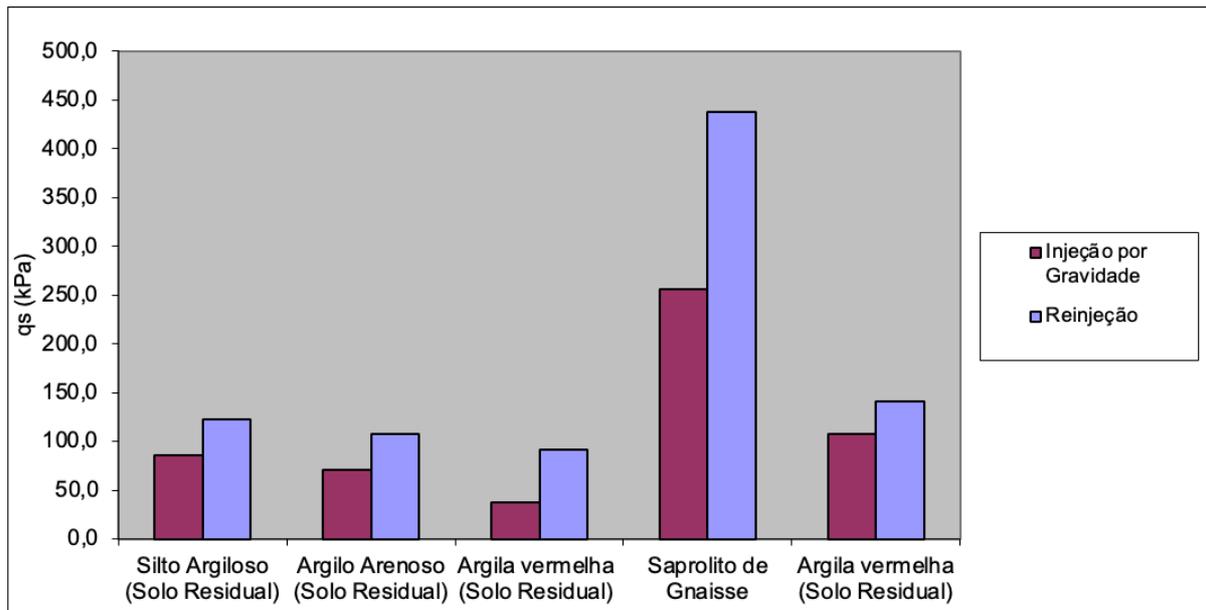


Figura 4.8. Gráfico comparativo da resistência ao arrancamento em grampos injetados por gravidade e grampos reinjetados, em diferentes solos de São Paulo

4.3. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO EM OBRAS COM GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA REINJEÇÃO SETORIZADA

A partir dos experimentos bem-sucedidos de reinjeção setorizada em argila e com a evidência que a injeção pressurizada obtém melhor resistência ao arrancamento em solos onde a sucção não é excessiva (Gupersaud *et al.*, 2013), diversas contenções em solo grampeado foram construídas utilizando a técnica de reinjeção setorizada no Brasil, desde 2010.

Dentre as obras realizadas com a técnica, algumas foram escolhidas, de forma que estatisticamente fossem representativas, conforme as premissas:

- Mínimo de 1000 grampos na contenção, todos estes com emprego da reinjeção setorizada;
- Caracterização geotécnica prévia do maciço, com variações de consistência e/ou compactidade entre obras;

Essas premissas foram escolhidas de forma que:

- Houvesse mínimo de 15 ensaios de arrancamento na obra, de forma a diminuir a variância característica de pequenos tamanhos de amostra (Baecher *et al.*, 2005);

- Ensaios de arrancamento executados com mínimo de 1,0 m livre em relação à encosta/frente de escavação;
- Caracterização geotécnica com amplitude de parâmetros de forma a avaliar a performance do processo de reinjeção não só em argilas, mas em outras estratigrafias conhecidas.

A fim de validar as estimativas de intervalo de resistência de projetos de estruturas de solo grampeado, os ensaios de arrancamento são feitos no início das construções. Dessa forma otimizações de projeto podem ser realizadas antes do início dos trabalhos, a partir da comparação dos resultados da interface solo-grampo, q_s , obtidas em campo com as estimadas de projeto.

Dado que encostas e cortes naturais, como os contidos por solo grampeado, apresentam variação litológica importante, especialmente em São Paulo (Futai *et al.*, 2012), local da maioria das obras estudadas, com usual crescimento da resistência ao cisalhamento conforme a profundidade, o que representou a escolha das cotas superiores para os ensaios de arrancamento, dado que estariam em condições geotécnicas de piores características. Dessa forma, os grampos de sacrifício para os ensaios de arrancamento foram executados em elevações que estavam a uma profundidade de até 4,0 m, passo máximo de escavação permitido nos maciços dessas obras quando não há medidas de confinamento. Entre outras características comuns às obras escolhidas tinha-se o uso de água como fluido de perfuração e a inclinação sub-horizontal de 15 graus para os grampos, bem como uso do aglutinante calda de cimento, sem aditivos.

Dentre as premissas estabelecidas, sete obras atenderam a esses critérios. Os resultados foram computados relacionando a resistência ao arrancamento ao número de golpes N_{SPT} , o ensaio de campo mais utilizado no Brasil, e previamente utilizado em modelo empírico de Ortigão & Palmeira (1997).

4.3.1. OBRA 1131

A obra 1131, consistiu de uma contenção vertical de cerca de 1700 m², com altura variável de 4,7 a 19,1 m, de 3,0 a 15,0 m de comprimento. A obra, concluída em 2010, em Santana-SP,

foi executada para a construção de garagens de edifício comercial. Como peculiaridade, além de alturas significativas de contenção, houve execução de grampos de 15,0 m, com quatro setores de reinjeção, conforme Figura 4.9. A Figura 4.10 mostra a vista da construção.

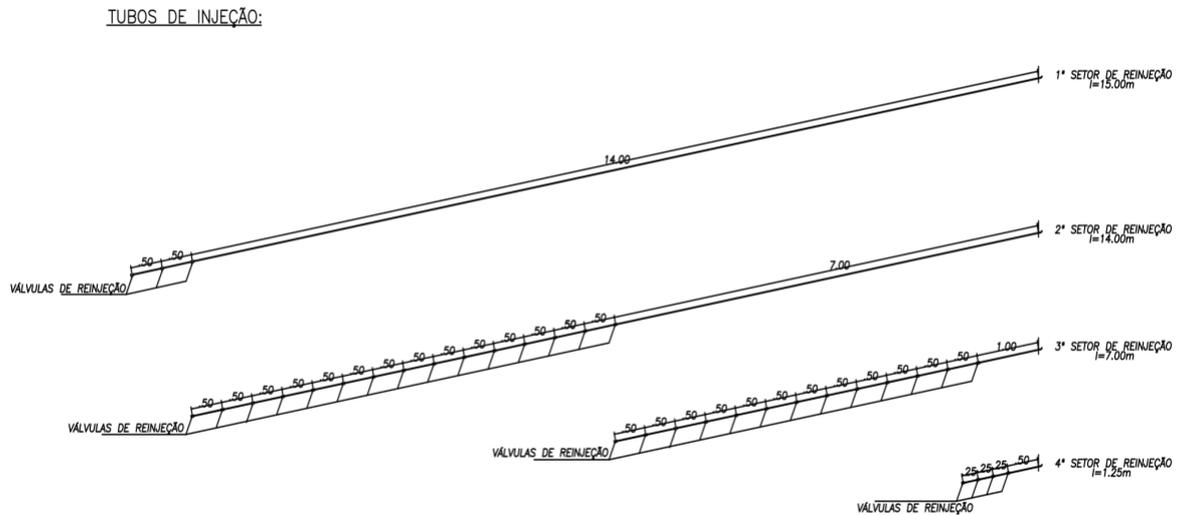


Figura 4.9. Grampo de 15,0 m de comprimento, com quatro setores de reinjeção. O primeiro setor é localizado ao fundo dos grampos, com os setores seguintes de iniciando imediatamente após o fim da última válvula do setor anterior, de forma que cada mangueira reinjete predominantemente porções diferentes do grampo, até junto à face de escavação



Figura 4.10. Vista esquemática da finalização da contenção

Dos 25 ensaios de arrancamento realizados, selecionou-se aleatoriamente quinze ensaios em grampos de sacrifício, de forma a facilitar a comparação com as outras sete obras. Os grampos de sacrifício estavam localizados em maciço predominantemente constituído de areia silto-argilosa, com média de golpes N_{SPT} de 10. A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício e a Figura 4.11 ilustra a distribuição de resultados de q_s para o mesmo solo.

Tabela 4.3. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo de sacrifício

Grampo	Tipo de solo	N_{SPT}	q_s (kPa)	$\emptyset_{perf.}$ (mm)
1	Areia Silto-Argilosa	10	117	75
2	Areia Silto-Argilosa	10	122	75
3	Areia Silto-Argilosa	10	120	75
4	Areia Silto-Argilosa	10	129	75
5	Areia Silto-Argilosa	10	131	75
6	Areia Silto-Argilosa	10	117	75
7	Areia Silto-Argilosa	10	117	75
8	Areia Silto-Argilosa	10	127	75
9	Areia Silto-Argilosa	10	136	75
10	Areia Silto-Argilosa	10	133	75
11	Areia Silto-Argilosa	10	125	75
12	Areia Silto-Argilosa	10	120	75
13	Areia Silto-Argilosa	10	118	75
14	Areia Silto-Argilosa	10	125	75
15	Areia Silto-Argilosa	10	146	75

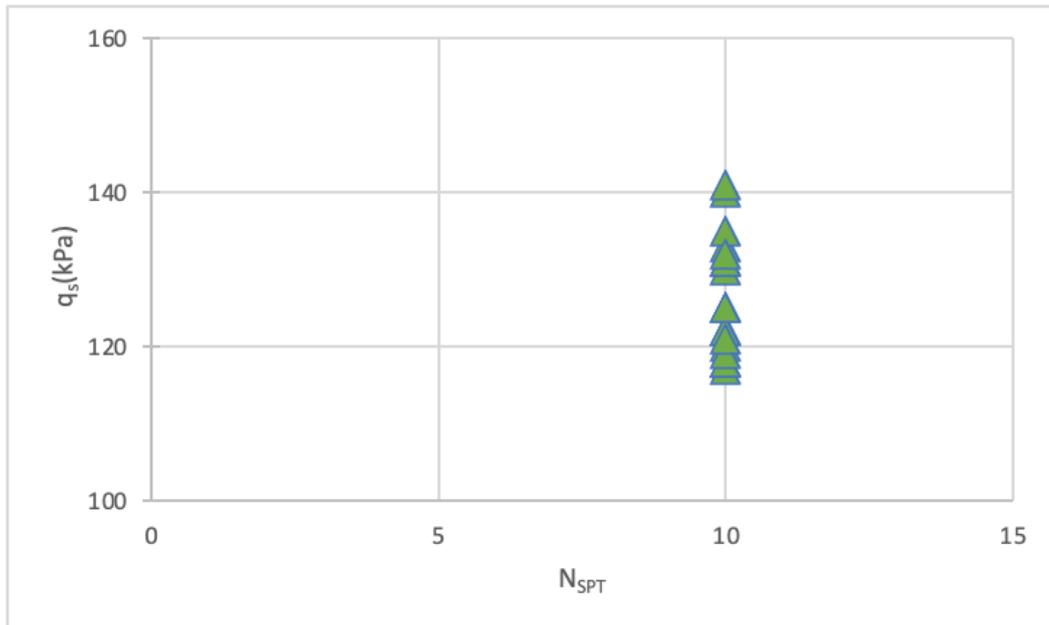


Figura 4.11. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1131, q_s (μq_s) foi de 126 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 8,36 kPa

4.3.2. OBRA 1158

A obra 1158, consistiu de uma contenção vertical de cerca de 1200 m², com altura média de 15,5 m, 1220 grampos, de 6,0 a 12,0 m de comprimento. A obra, executada em 2011, na BR 101-SC, foi executada para as contenções de encostas naturais da rodovia federal BR 101. Como peculiaridade, houve ensaios de arrancamento no início e no fim da obra, respeitando os 4,0 m de profundidade em relação à crista do talude, conforme Figura 4.12.



Figura 4.12. Ensaio de arrancamento após execução do paramento. Tal execução foi possível devido a confecção de grampos de sacrifício durante a obra, em que o trecho livre foi envolto por graxa grafitada e por tubos de proteção e a cabeça dos grampos isoladas por meio de tubo PVC e membrana de borracha

Dos dezessete ensaios de arrancamento realizados, selecionou-se aleatoriamente quinze ensaios em grampos de sacrifício, de forma a facilitar a comparação com as outras sete obras. Os grampos de sacrifício estavam localizados em maciço predominantemente constituído de silte argiloso, com média de golpes N_{SPT} de 8. A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício e a Figura 4.13 ilustra a distribuição de resultados de q_s para o mesmo solo.

Tabela 4.4. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo de sacrifício

Grampo	Tipo de solo	N_{SPT}	q_s (kPa)	$\phi_{perf.}$ (mm)
1	Silte Argiloso	8	266	75
2	Silte Argiloso	8	231	75
3	Silte Argiloso	8	217	75
4	Silte Argiloso	8	233	75

5	Silte Argiloso	8	254	75
6	Silte Argiloso	8	264	75
7	Silte Argiloso	8	218	75
8	Silte Argiloso	8	223	75
9	Silte Argiloso	8	260	75
10	Silte Argiloso	8	221	75
11	Silte Argiloso	8	275	75
12	Silte Argiloso	8	233	75
13	Silte Argiloso	8	238	75
14	Silte Argiloso	8	239	75
15	Silte Argiloso	8	279	75

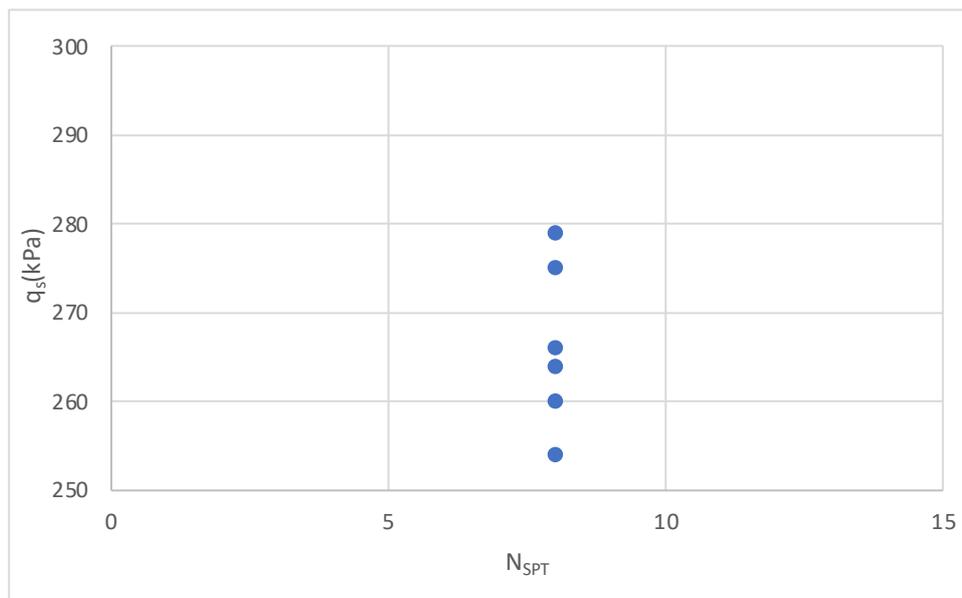


Figura 4.13. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1158, q_s (μq_s) foi de 243 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 21,16 kPa

4.3.3. OBRA 1332

A obra 1332, consistiu de uma contenção de encosta, que se estendia por 1150 m², com altura média de 20 m, sendo conformadas duas declividades distintas: 1V:0,25H no trecho inferior com 12,0 m de altura e 1V:1,5H no trecho superior com 8,0 m de altura, composta por grampos

de 6,0 a 10,0 m. A obra, executada em 2013, em São Paulo-SP, foi executada para estabilização de talude em área de divisa entre terrenos comerciais. Como peculiaridade, houve recuperação de rupturas rasas superficiais, advindas dum aterro lançado, mal compactado e com lençol freático no início da construção a 3,0 m de profundidade, rebaixado para a cota inferior da contenção, conforme exemplificado na Figura 4.13. A Figura 4.14 ilustra à cota superior de um grampo previamente à execução da reinjeção setorizada, em que cada setor é marcado com um símbolo específico, no caso uma fita gomada para o primeiro setor, duas fitas gomadas para o segundo setor e três fitas gomadas para o terceiro setor. Apesar de em outras obras previamente ter sido realizadas marcações específicas, este padrão desta obra foi avançado para as demais obras subsequentes.

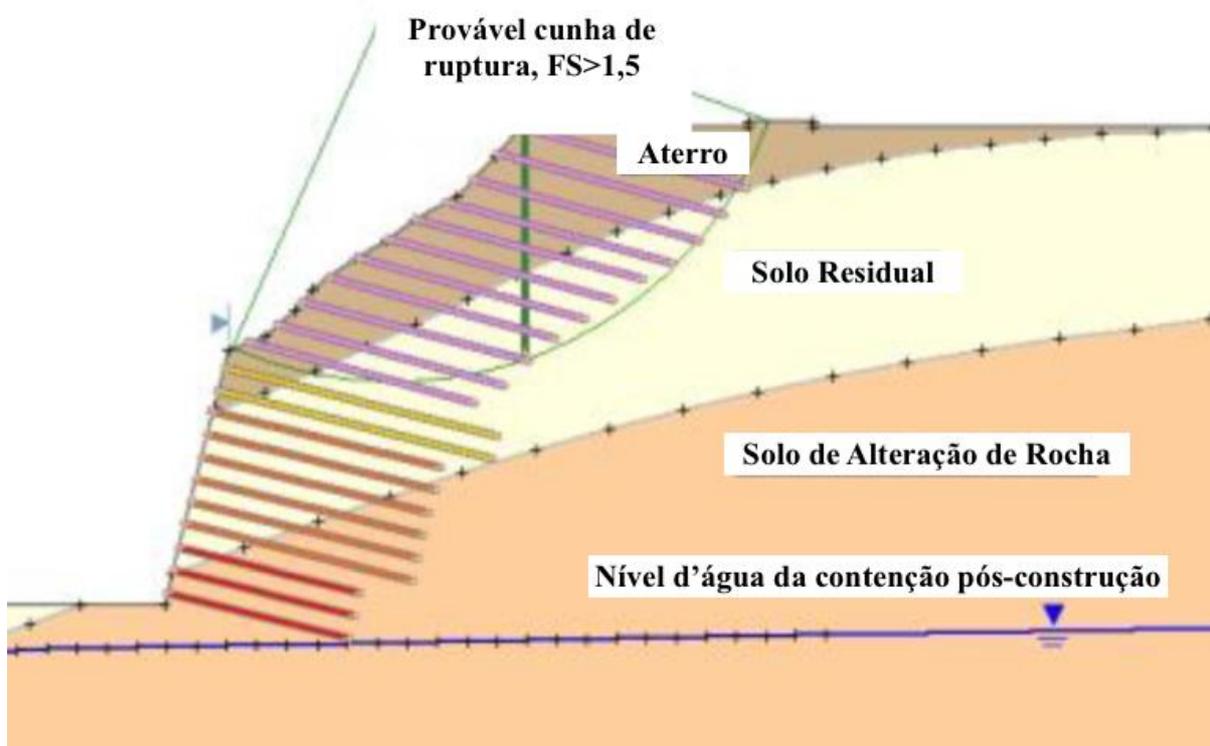


Figura 4.14. Contenção de encosta com rupturas superficiais, caracterizado por $N_{SPT} < 8$, porém com aterro lançado superficial que não podia ser removido



Figura 4.15. Cota superior de um grampo previamente à execução da reinjeção setorizada, em que cada setor é marcado com um símbolo específico, no caso uma fita gomada para o primeiro setor, duas fitas gomadas para o segundo setor e três fitas gomadas para o terceiro setor.

Foram realizados quinze ensaios em grampos de sacrifício, que estavam localizados em maciço predominantemente constituído de aterro mal compactado e solo residual, com média de golpes N_{SPT} de 8. A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício e a Figura 4.14 ilustra a distribuição de resultados de q_s para o mesmo solo.

Tabela 4.4. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo de sacrifício

Grampo	Tipo de solo	N_{SPT}	q_s (kPa)	$\phi_{perf.}$ (mm)
1	Aterro/Solo Residual	8	130	75
2	Aterro/Solo Residual	8	127	75
3	Aterro/Solo Residual	8	132	75
4	Aterro/Solo Residual	8	126	75

5	Aterro/Solo Residual	8	128	75
6	Aterro/Solo Residual	8	132	75
7	Aterro/Solo Residual	8	131	75
8	Aterro/Solo Residual	8	127	75
9	Aterro/Solo Residual	8	127	75
10	Aterro/Solo Residual	8	127	75
11	Aterro/Solo Residual	8	125	75
12	Aterro/Solo Residual	8	132	75
13	Aterro/Solo Residual	8	133	75
14	Aterro/Solo Residual	8	133	75
15	Aterro/Solo Residual	8	133	75

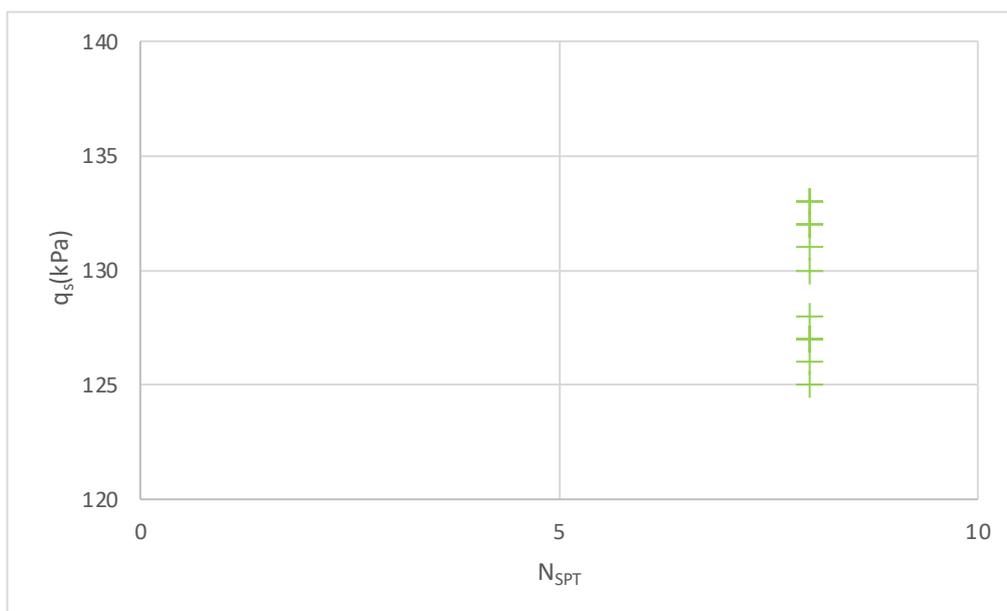


Figura 4.16. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grupos de sacrifício da obra 1332, q_s (μq_s) foi de 130 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 2,9 kPa

4.3.4. OBRA 1426

A obra 1426, consistiu de uma contenção de encosta, que se estendia por 2650 m², com altura média de 20 m, sendo conformadas com declividade de 1V:1,5 H, com banco de 3,0 m de comprimento entre taludes, composta por grampos de 4,0 a 6,0 m. A obra, executada em 2013,

em Joinville-SC, foi executada para estabilização de talude em área de divisa com reserva ambiental. Como peculiaridade, houve recuperação de escorregamentos, advindos de lençol freático elevado e baixa coesão do maciço local, com utilização de paramento flexível, tipo Macmat R1®, constituído de geocomposto que combina uma camada de malha de arame de aço hexagonal de dupla torção com um composto de polipropileno de matriz tridimensional que é extrudado no fio durante o processo de fabricação (Maccaferri, 2014), conforme exemplificado na Figura 4.15.



Figura 4.17. Contenção em solo grampeado com paramento flexível, tipo Macmat R1®, em 2013, primeira obra em paramento flexível com uso de grampos executados com reinjeção setorizada

Foram realizados 38 ensaios de arrancamento, destes selecionou-se aleatoriamente quinze ensaios em grampos de sacrifício, de forma a facilitar a comparação com as outras sete obras. Os grampos de sacrifício estavam localizados em maciço predominantemente constituído de silte arenoso, com média de golpes N_{SPT} de 9. A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício e a Figura 4.16 ilustra a distribuição de resultados de q_s para o mesmo solo.

Tabela 4.5. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo de sacrifício

Grampo	Tipo de solo	N_{SPT}	q_s (kPa)	$\phi_{perf.}$ (mm)
1	Silte Arenoso	9	251	75
2	Silte Arenoso	9	276	75

3	Silte Arenoso	9	262	75
4	Silte Arenoso	9	268	75
5	Silte Arenoso	9	263	75
6	Silte Arenoso	9	282	75
7	Silte Arenoso	9	276	75
8	Silte Arenoso	9	310	75
9	Silte Arenoso	9	291	75
10	Silte Arenoso	9	269	75
11	Silte Arenoso	9	297	75
12	Silte Arenoso	9	258	75
13	Silte Arenoso	9	287	75
14	Silte Arenoso	9	258	75
15	Silte Arenoso	9	312	75

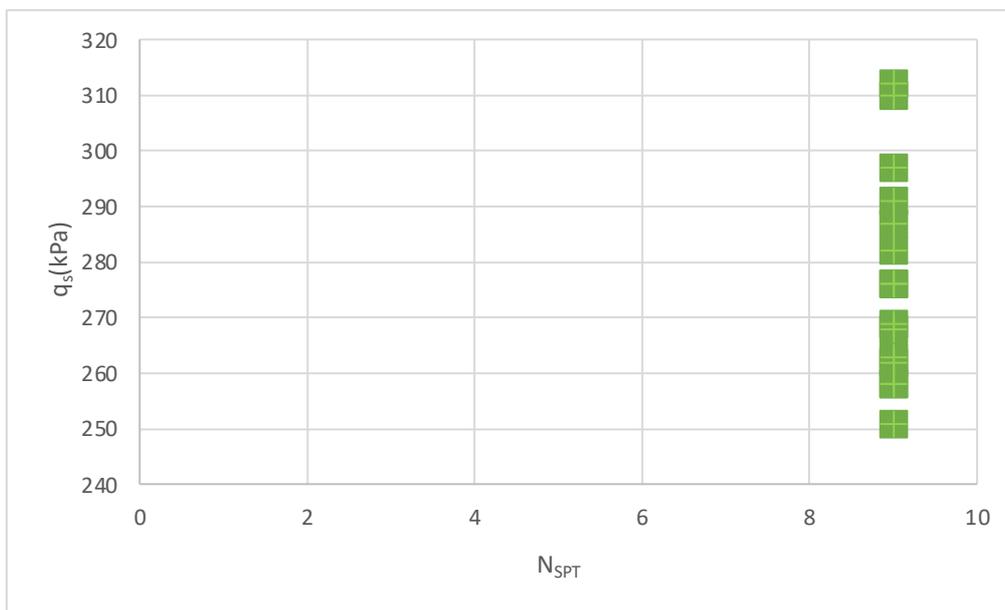


Figura 4.18. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1426, q_s (μq_s) foi de 277 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 18,897 kPa

4.3.5. OBRA 1487

A obra 1487, consistiu de uma contenção vertical de 1450 m², com altura de 18,0 m, com grampos de 6,0 a 12,0 m de comprimento. A obra, executada em 2014, em São Paulo-SP, foi

executada para a construção de estações do metrô da cidade de São Paulo. Como peculiaridade, além de alturas significativas de contenção, também houve comparação de performance entre grampos convencionais e grampos com reinjeção setorizada a pedido do projetista, numa obra com silte argiloso medianamente compacto, de forma a auferir a eficácia do uso de reinjeção setorizada em solos granulares mais competentes, cujos resultados são apresentados na Figura 4.17.

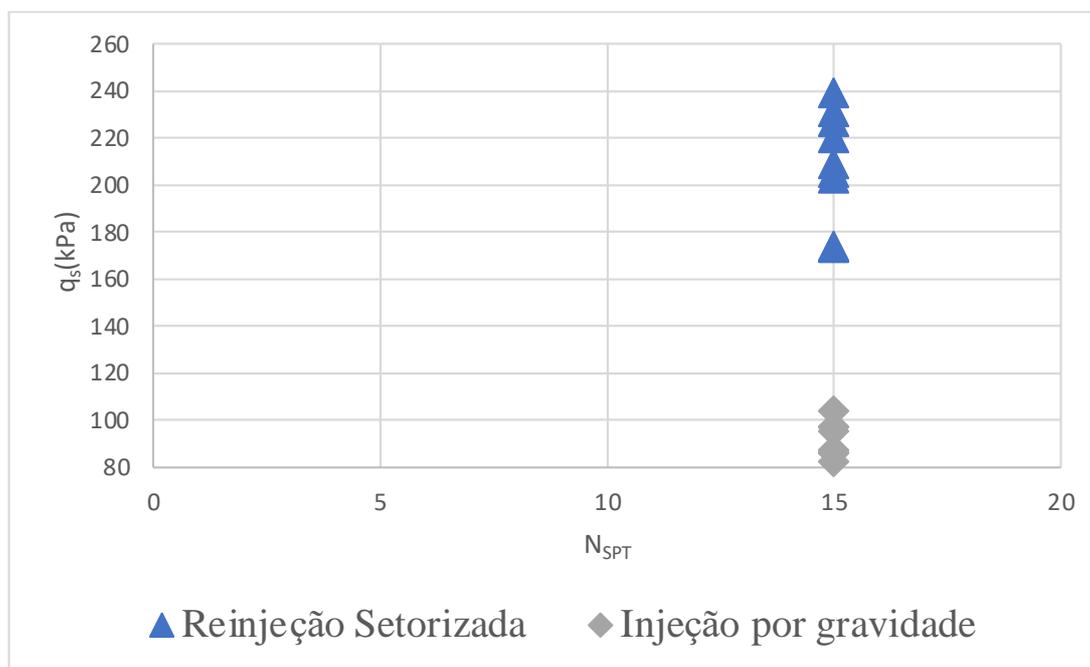


Figura 4.19. Comparação de resultados de grampos de sacrifício, de 3,0 m ancorados e 5,0 m livre, executados por meio de injeção por gravidade e reinjeção setorizada. No maciço local, composto de silte argiloso medianamente compacto, houve resultados de 200-250% superiores de grampos executados com reinjeção setorizada, em relação aos grampos de sacrifício executados por meio de reinjeção por gravidade

Foram realizados vinte ensaios de arrancamento, destes selecionou-se aleatoriamente quinze ensaios em grampos de sacrifício, de forma a facilitar a comparação com as outras sete obras. Os grampos de sacrifício estavam localizados em maciço predominantemente constituído de silte argiloso, com média de golpes N_{SPT} de 15. A Tabela 4.6 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício e a Figura 4.18 ilustra a distribuição de resultados de q_s para o mesmo solo.

Tabela 3.6. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo de sacrifício

Grampo	Tipo de solo	N_{SPT}	q_s (kPa)	$\phi_{perf.}$ (mm)
--------	--------------	-----------	-------------	---------------------

1	Silte Argiloso	15	231	75
2	Silte Argiloso	15	205	75
3	Silte Argiloso	15	227	75
4	Silte Argiloso	15	173	75
5	Silte Argiloso	15	209	75
6	Silte Argiloso	15	220	75
7	Silte Argiloso	15	174	75
8	Silte Argiloso	15	239	75
9	Silte Argiloso	15	203	75
10	Silte Argiloso	15	205	75
11	Silte Argiloso	15	227	75
12	Silte Argiloso	15	171	75
13	Silte Argiloso	15	224	75
14	Silte Argiloso	15	237	75
15	Silte Argiloso	15	241	75

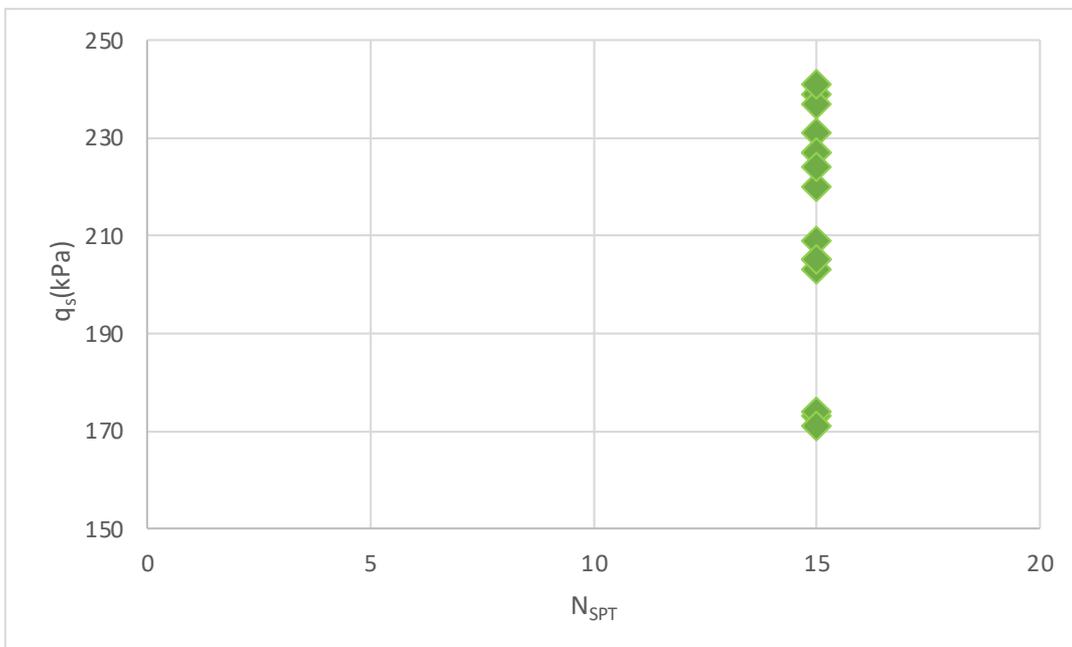


Figura 4.20. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1487, q_s (μq_s) foi de 212 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 23,97 kPa

4.3.6. OBRA 1583

A obra 1583, consistiu de uma contenção vertical de 1080 m², com altura variável de 9,1 a 16,0 m, com grampos de 8,0 a 13,0 m de comprimento. A obra, executada em 2015, em Marília-SP, foi executada para a construção de garagens de edifício comercial. Como peculiaridade, houve comparação de performance entre grampos convencionais e grampos com reinjeção setorizada, numa obra com areia silto-argilosa medianamente compacta, de forma a auferir a eficácia do uso de reinjeção setorizada em solos granulares mais competentes, cujos resultados são apresentados na Figura 4.21. A Figura 4.22 apresenta o corte da seção crítica, de 16,0 m de altura.

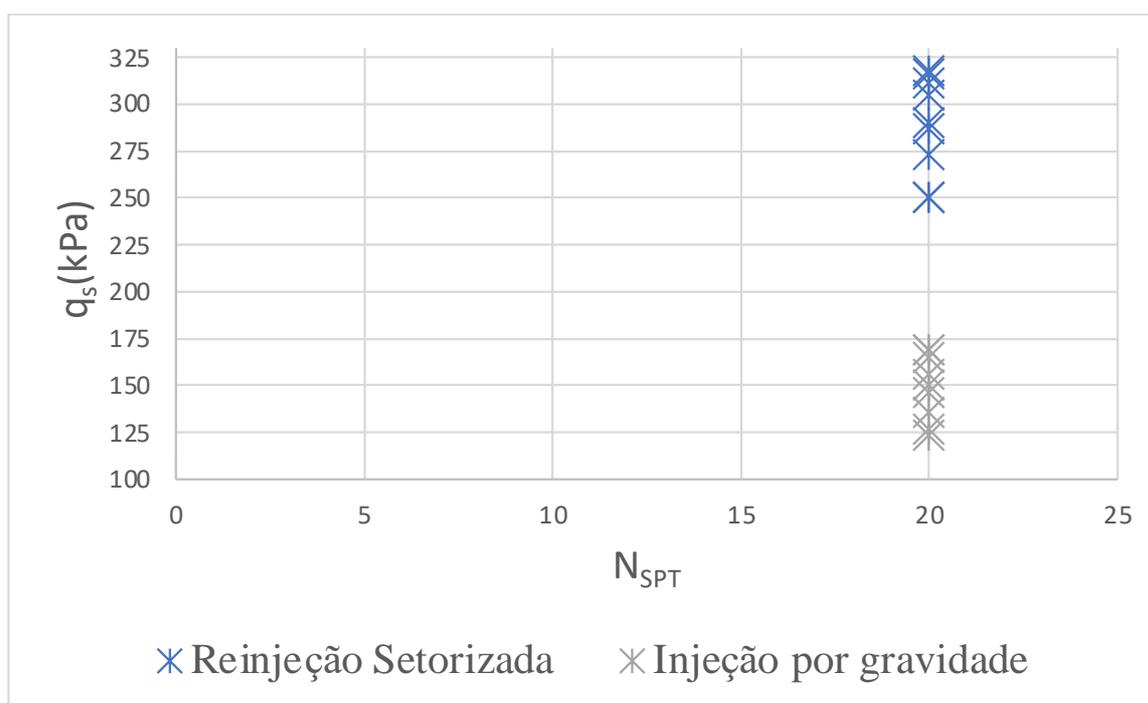


Figura 4.21. Comparação de resultados de grampos de sacrifício, de 3,0 m ancorados e 2,0 m livre, executados por meio de injeção por gravidade e reinjeção setorizada. No maciço local, composto de areia silto-argilosa medianamente compacta, houve resultados de 180-240% superiores de grampos executados com reinjeção setorizada, em relação aos grampos de sacrifício executados por meio de reinjeção por gravidade

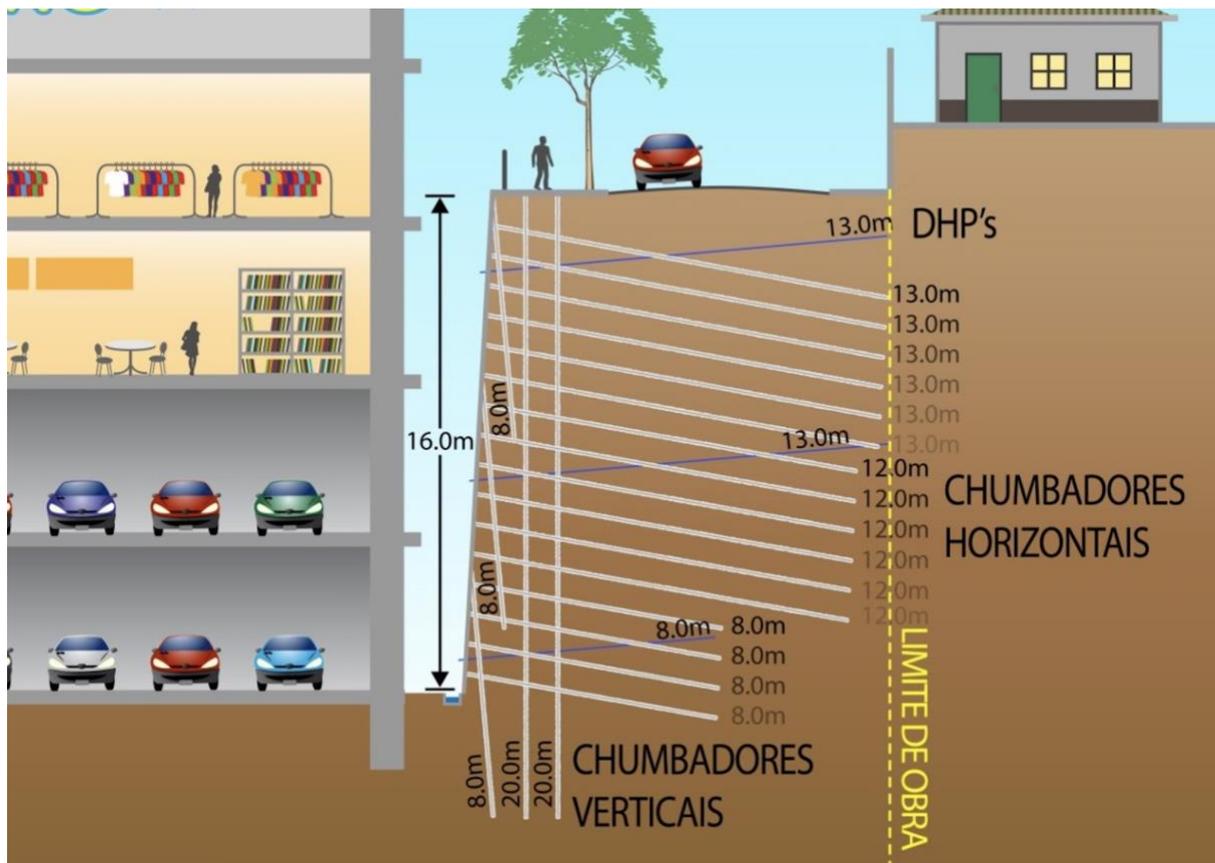


Figura 4.22. Vista em corte da solução da obra, construída em escavações escalonadas para construção de garagens de edifício comercial

Foram realizados quinze ensaios em grampões de sacrifício, que estavam localizados em maciço predominantemente constituído de areia silto-argilosa, com média de golpes N_{SPT} de 20. A Tabela 4.7 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício e a Figura 4.20 ilustra a distribuição de resultados de q_s para o mesmo solo.

Tabela 4.7. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo de sacrifício

Grampo	Tipo de solo	N_{SPT}	q_s (kPa)	$\phi_{perf.}$ (mm)
1	Areia Silto-Argilosa	20	316	75
2	Areia Silto-Argilosa	20	305	75
3	Areia Silto-Argilosa	20	250	75
4	Areia Silto-Argilosa	20	311	75
5	Areia Silto-Argilosa	20	318	75
6	Areia Silto-Argilosa	20	290	75

7	Areia Silto-Argilosa	20	273	75
8	Areia Silto-Argilosa	20	250	75
9	Areia Silto-Argilosa	20	287	75
10	Areia Silto-Argilosa	20	292	75
11	Areia Silto-Argilosa	20	244	75
12	Areia Silto-Argilosa	20	271	75
13	Areia Silto-Argilosa	20	214	75
14	Areia Silto-Argilosa	20	320	75
15	Areia Silto-Argilosa	20	320	75

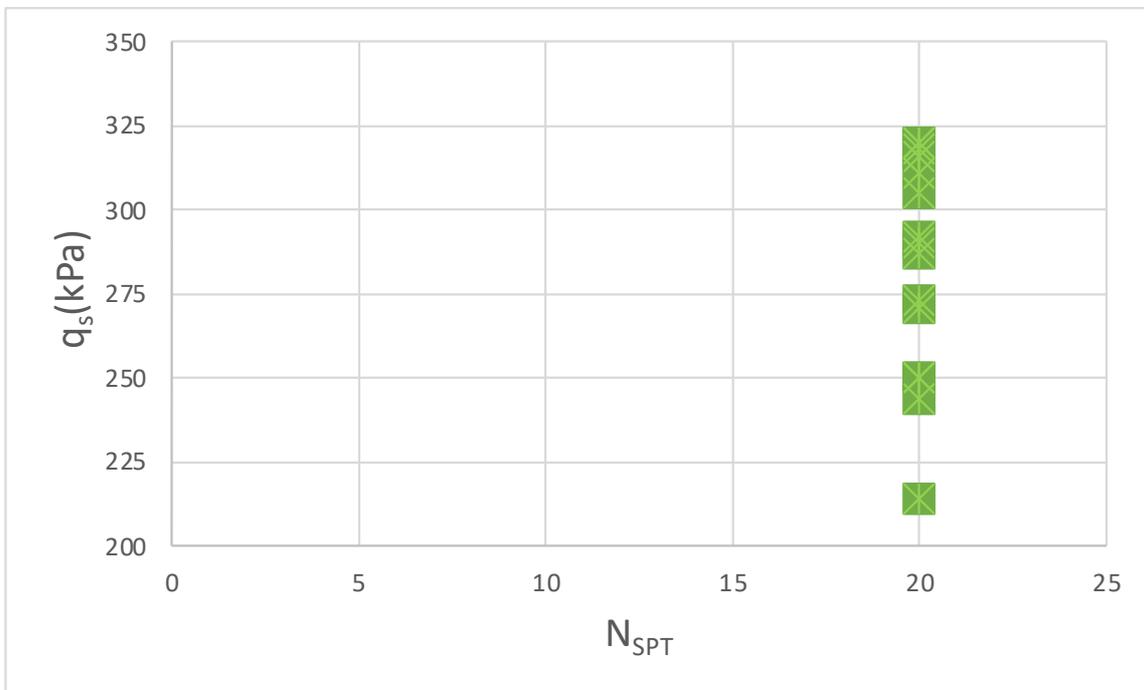


Figura 4.23. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1583, q_s (μq_s) foi de 284 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 32,90 kPa

4.3.7. OBRA 1755

A obra 1755, consistiu de uma contenção vertical de 2100 m², com altura variável de 24,8 a 34,9 m, de 10,0 a 15,0 m de comprimento. A obra, executada em 2016, em Caieiras-SP, foi executada para a contenção de encostas no acesso à planta industrial. Como peculiaridade,

além de alturas significativas de contenção, houve emprego da reinjeção setorizada em maciço composto de saprólito e rocha alterada mole, conforme geologia apresentada Figura 4.21.

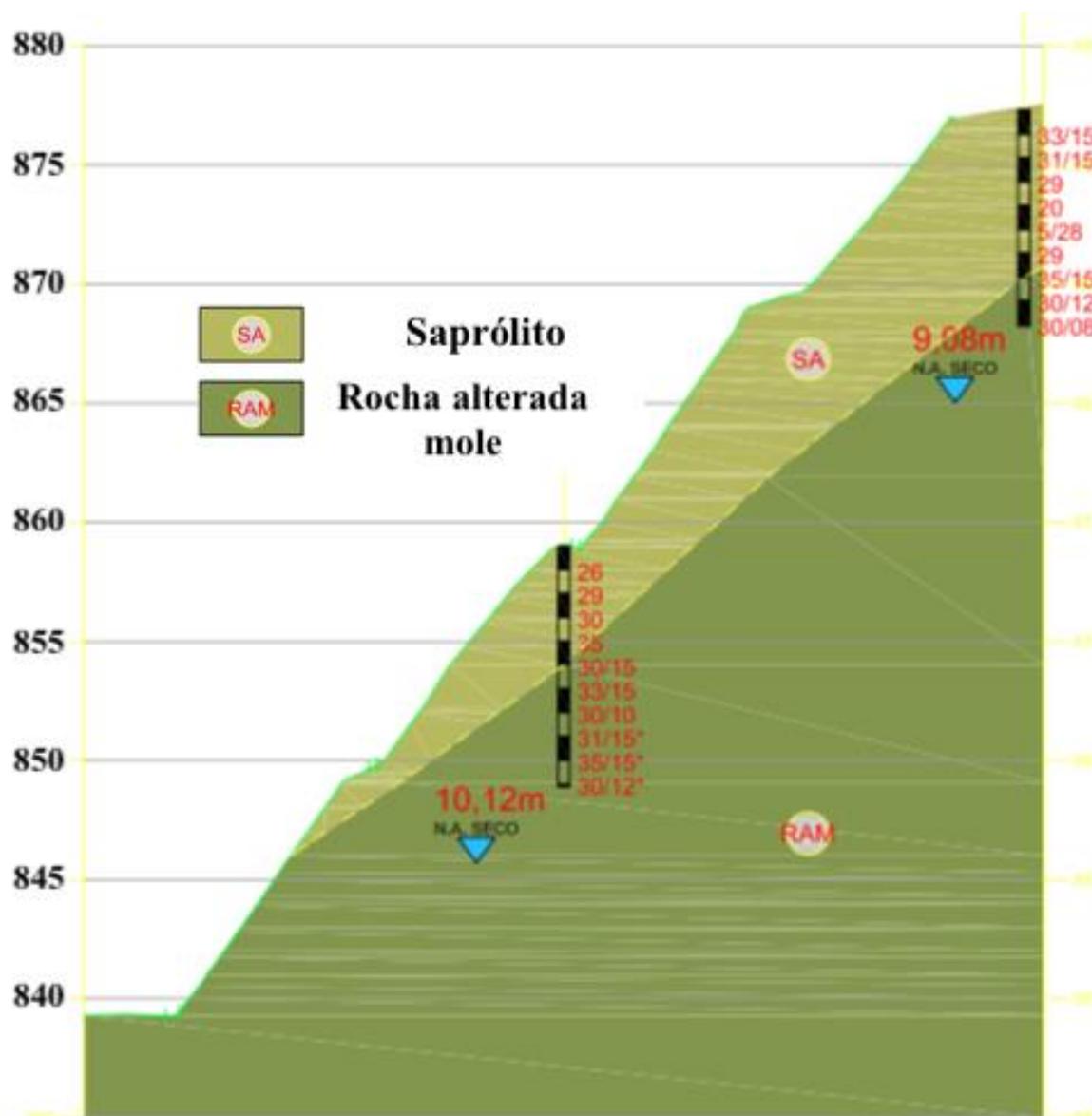


Figura 4.24. Seção geológica-geotécnica da encosta contida por meio de solo grampeado. O maciço em saprólito foi cortado em inclinação maior que a suportada, de forma que houve necessidade de contenção de criar um compósito que resistisse às solicitações com segurança apropriada

Dos 30 ensaios de arrancamento realizados, selecionou-se aleatoriamente quinze ensaios em grampos de sacrifício, de forma a facilitar a comparação com as outras sete obras. Os grampos de sacrifício estavam localizados em maciço predominantemente constituído de saprólito, com média de golpes N_{SPR} de 30. A Tabela 3.8 mostra os resultados obtidos de q_s obtidos por grampo de sacrifício e a Figura 4.22 ilustra a distribuição de resultados de q_s para o mesmo

solo.

Tabela 4.8. Tipo de solo, N_{SPT} , e q_s de cada grampo de sacrifício

Grampo	Tipo de solo	N_{SPT}	q_s (kPa)	$\emptyset_{perf.}$ (mm)
1	Saprólito	30	384	75
2	Saprólito	30	410	75
3	Saprólito	30	361	75
4	Saprólito	30	364	75
5	Saprólito	30	329	75
6	Saprólito	30	331	75
7	Saprólito	30	448	75
8	Saprólito	30	384	75
9	Saprólito	30	318	75
10	Saprólito	30	402	75
11	Saprólito	30	343	75
12	Saprólito	30	346	75
13	Saprólito	30	375	75
14	Saprólito	30	381	75
15	Saprólito	30	466	75

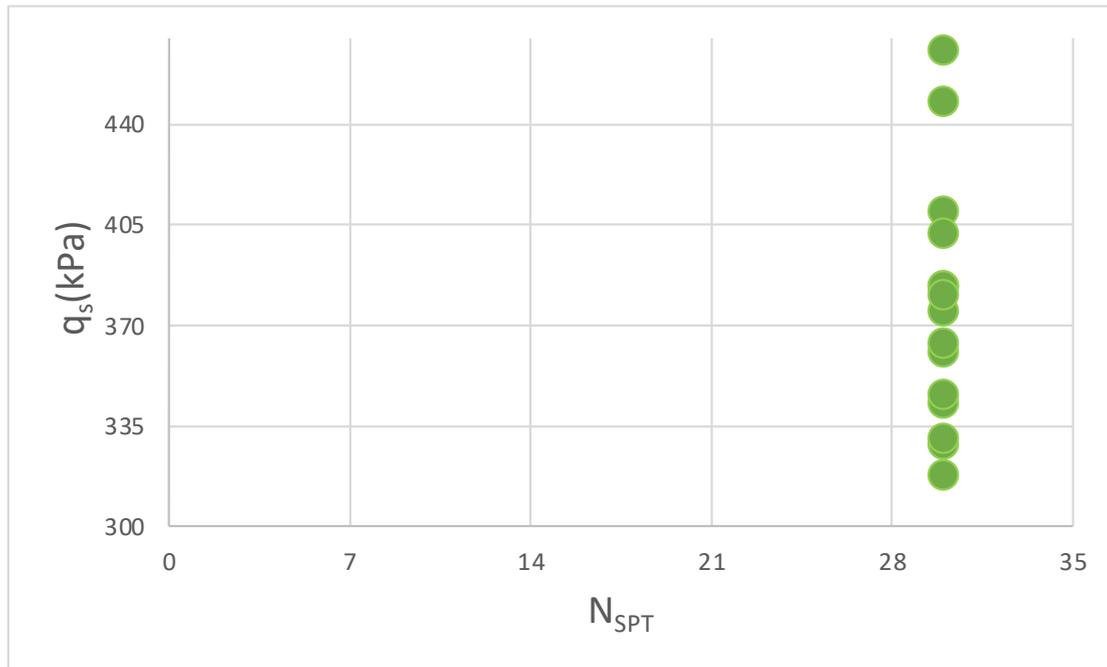


Figura 4.25. Curva N_{SPT} (SPT) – q_s (kPa) dos grampos de sacrifício da obra 1755, q_s (μq_s) foi de 376 kPa e o desvio padrão de q_s (σq_s) de 42,45 kPa

4.4. MODELO EMPÍRICO A PARTIR DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Por modelos empíricos oferecerem simplicidade de uso e entendimento e por esta tese ter tido acesso a muitos dados de obra, como registros históricos e medições de campo, propôs-se modelo empírico para uso em situações em que os dados possam ser limitados, situação típica em projetos básicos.

Para gerar o modelo empírico desta tese, considerou-se que Ortigao & Palmeira (1997), propuseram modelo empírico que definia claramente a interface solo-grampo, por meio do q_s , bem como uma relação satisfatória com o N_{SPT} , gerado a partir da sondagem SPT. Dessa forma, identificou-se relacionamentos pela análise dos dados das sete obras, para identificar padrões que pudessem fornecer informações que melhor representassem a nova técnica de reinjeção setorizada. Esses padrões foram observados por meio de um modelo de regressão, que melhor se ajustava aos dados e ao problemática da resistência ao arrancamento dos grampos, estabelecendo os parâmetros do modelo ajustando o modelo aos dados e determinando os melhores valores para os parâmetros.

Para validação, fez-se a comparação do modelo gerado com o relacionamento gerado com modelo que tem por base os mesmos parâmetros, q_s e N_{SPT} , de Ortigao & Palmeira (1997), amplamente utilizado no Brasil para estimar a resistência ao arrancamento de grampos e projetar contenções em solo grampeado. Outros modelos empíricos, como o modelo de Elias & Juran (1991), que considera a pressão de injeção em sua formulação e é difundido no meio técnico brasileiro e internacional, não foi utilizado dado que os parâmetros são diferentes dos utilizados nesta tese. Erlich & Silva (2012) reportaram que não seria possível estabelecer uma correlação simples entre q_s e valor N_{SPT} , entretanto Erlich & Silva (2012) utilizaram ensaios que não havia mesmo padrão de método de perfuração, método de injeção, comprimento de trecho livre e trecho ancorado bem como cota de instalação dos grampos, padronização esta que foi realizada no modelo empírico proposto nesta tese.

Para gerar o modelo, categorizou-se os dados das sete obras na Tabela 4.9, que mostra, para cada obra, o tipo de solo, o N_{SPT} , a média da resistência ao arrancamento q_s (μq_s) e o desvio padrão de q_s (σq_s). A Figura 4.26 resume os resultados obtidos nos ensaios de campo, mostrando a relação obtida nesta tese, vista na Eq. 4.1, ao mesmo tempo em que mostra a relação obtida por Ortigao & Palmeira (1997) para obras de controle de alta qualidade realizadas com injeção por gravidade, vista na Eq. 4.2.

Tabela 4.9. Tipo de solo, N_{SPT} , μq_s e σq_s de cada trabalho

Obra	Tipo de solo	N_{SPT}	μq_s (kPa)	σq_s (kPa)
1	Areia silto-argilosa	10	126	8,4
2	Silte argiloso	8	243	21,2
3	Aterro e solo residual	8	130	2,9
4	Silte Arenoso	9	277	18,9
5	Silte argiloso	15	212	23,0

6	Areia argilosa	20	284	32,9
7	Saprólito	30	376	42,5

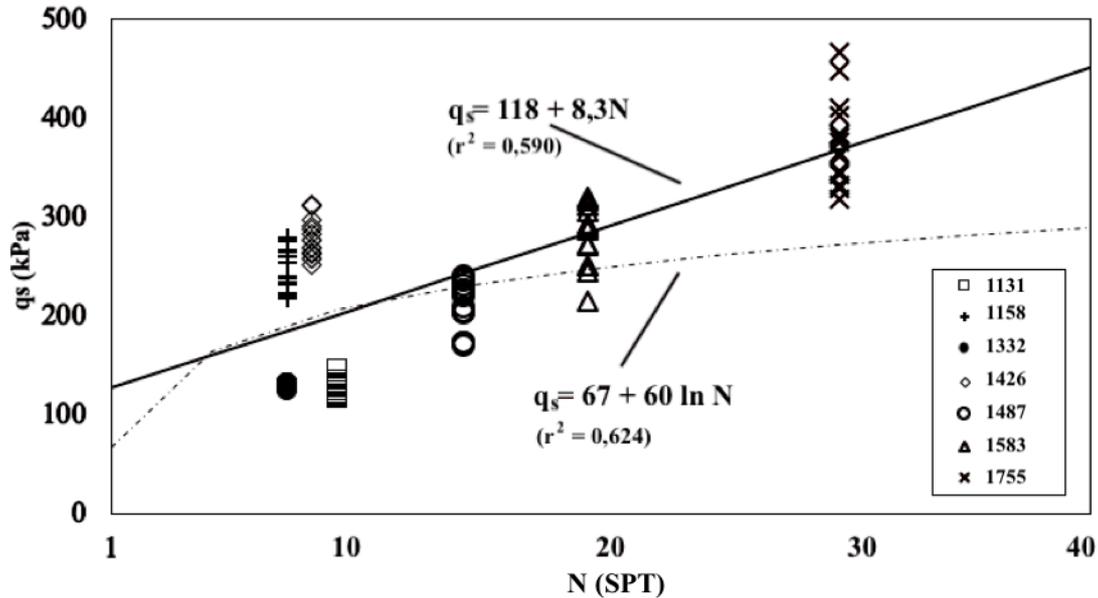


Figura 4.26. Gráfico N_{SPT} (número de golpes / 30 cm) vs q_s (kPa). Cada obra tem 15 resultados no gráfico. A linha contínua representa os resultados deste artigo e a linha tracejada os obtidos por Ortigao & Palmeira (1997)

$$q_s = 118 + 8,3 \cdot N_{SPT} \quad (1)$$

$$q_s = 67 + 60 \cdot \ln N_{SPT} \quad (2)$$

Enfatiza-se que a Obra 1 e a Obra 3 foram executadas em solos problemáticos. A Obra 3 foi realizada em um aterro não consolidado em que a resistência esperada era de 75 kPa, 58% inferior aos resultados que foram obtidos em campo. Ortigao & Palmeira (1997) também coletaram dados de argila porosa, característica da obra 3 e estes resultados apresentaram resistência de arrancamento 53% inferior às obtidas nos ensaios da Obra 1. Dessa forma, desconsiderando os resultados da Obra 1 e da Obra 3, obtém-se a correlação vista na Figura 4.27 e apresentada na Eq. 4.3.

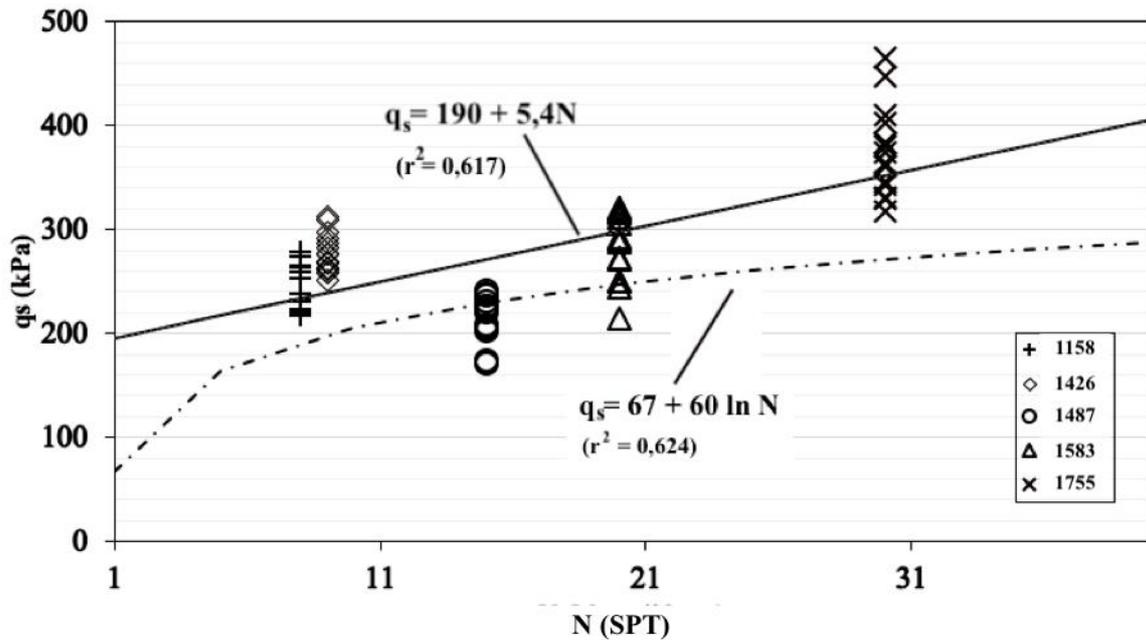


Figura 4.27. Gráfico N_{SPT} (número de golpes / 30 cm) vs q_s (kPa). A linha contínua representa a correlação das Obras 2, 4, 5, 6 e 7 resultados e a linha tracejada a relação obtida por Ortigao & Palmeira (1997)

$$q_s = 190,24 + 5,38 \cdot N_{SPT} \quad (3)$$

Não só com o modelo empírico, mas também pela análise dos principais resultados das obras estudadas, observou-se que a técnica de reinjeção setorizada alcança maior resistência ao arrancamento do que as resistências obtidas em grampos executados por injeção gravitacional. Essa tendência foi encontrada para todos os tipos de solo testados, confirmando estudos de Yin *et al.* (2009), Hossain & Yin (2011), Seo *et al.* (2012), Hong *et al.* (2013) e Wang *et al.* (2017) para injeções pressurizadas. Apesar da dispersão significativa, ficou evidente que a reinjeção setorizada consegue maior resistência ao arrancamento do que os resultados encontrados por Ortigao & Palmeira (1997) para grampos injetados por gravidade.

De acordo com os resultados, a ação da injeção pressurizada, para argilas, areias, siltes e pedregulhos, resultou em maior resistência na interface dos grampos e, conseqüentemente, um q_s mais alto.

Notavelmente, para o silte arenoso de São Paulo, houve um aumento de mais de 400% na resistência ao arrancamento. Para a argila porosa, que apresentou o menor aumento na

resistência de arrancamento dos grampos, houve aumento de 58%, quando comparado aos resultados ilustrados por Ortigao & Palmeira (1997).

Os resultados em silte foram os mais surpreendentes, devido ao aumento considerável de q_s , mesmo para menores N_{SPT} . Presume-se que esse comportamento dos maciços compostos principalmente de silte se deve ao maior confinamento gerado ao redor do grampo, à maior rugosidade gerada pela injeção pressurizada e ao menor espaçamento entre grampos das contenções em siltes, até 1,3 m, possivelmente compensando a menor coesão de solos predominantemente siltosos.

Esses melhores resultados da reinjeção setorizada ocorreram devido a vários fatores. A melhora da resistência ao cisalhamento do maciço ao redor do grampo além da manutenção e aumento do confinamento proporcionado pela tensão principal menor e o aumento da restrição da dilatação devido à reinjeção setorizada. Além disso, devido a maiores volumes de injeção do que o volume teórico dos furos, houve uma expansão da área de injeção e, conseqüentemente, uma maior resistência ao arrancamento. Esses fatores atuam em conjunto, contudo, a física subjacente do sistema ainda não é totalmente compreendida, devido a interação solo-grampo ser suscetível às diferentes influências mencionadas.

Com isso, o modelo empírico proposto na Eq. 3, cuja variância da variável dependente (q_s) tem nível de precisão razoável para fins de engenharia, especialmente em estimativas prévias de grampos executados com a reinjeção setorizada. Todavia, o modelo empírico pode não funcionar bem fora do intervalo de dados usado para ajustar o modelo, e suas previsões podem não ser confiáveis nesses casos, devendo haver validação do modelo usando dados independentes para garantir que ele funcione conforme o esperado em diferentes condições, quantificando a incerteza nas previsões do modelo e levá-la em consideração ao tomar decisões com base no modelo.

Dessa forma, observou-se que estudos eram necessários a fim de validar o modelo para grampos executados por meio da reinjeção setorizada em execuções experimentais.

5. EXECUÇÃO EXPERIMENTAL DE GRAMPOS VERTICAIS EM SOLO

5.1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é descrita a execução experimental de grampos em solo, de forma a validar o modelo empírico proposto no Capítulo 4, além de esclarecer influências não elucidadas nos ensaios realizados, como o método de perfuração e características do aglutinante injetado, propondo um método para selecionar o melhor tipo de execução de grampos para determinado tipo de solo, bem como uma alternativa de ensaio de arrancamento que apresente maior viabilidade em estudos preliminares às obras e em estudos acadêmicos.

5.2. FATORES DE INFLUÊNCIA NA CONCEPÇÃO DOS ENSAIOS

Conforme discutido nos capítulos anteriores, os ensaios de arrancamento são procedimentos que caracterizam os grampos e suas metodologias executivas por meio da resistência ao arrancamento, representada pelo parâmetro q_s , parâmetro base para análises de contenções em solo grampeado. O Capítulo 4 caracterizou a resistência ao arrancamento de grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada, que apresentou resultados superiores aos grampos executados pela técnica convencional, de injeção por gravidade. De todo modo, houve nas obras executadas alguns fatores fixos que foram decididos conforme experiência da empresa executora, não necessariamente com ensaios anteriores:

- Método de perfuração, em que todas as obras foram executadas com equipamentos que utilizavam água como fluido de perfuração, em detrimento de ar comprimido, método também bastante utilizado para execução de grampos;
- A calda de cimento não era aditivada, era composta apenas de água e cimento;
- Apesar de ter havido exumação, não houve a investigação do diâmetro efetivo final e o perfil de rugosidade, fator importante para o cisalhamento de interfaces (Barton, 1973);
- Todos os ensaios foram executados em grampos sub-horizontais, por evidências de Seo *et al.* (2012) e Seo *et al.* (2017) não serem de conhecimento da empresa executora à época da execução das obras.

Como havia disponibilidade ao autor do uso de campo experimental previamente caracterizado, bem como de equipamentos de execução de solo grampeado que apresentavam possibilidade de variação de metodologia executiva de perfuração, variação do traço da calda de cimento, equipamentos e mão de obra para exumação de grampos e conhecimento acerca dos ensaios de Seo *et al.* (2012) e Seo *et al.* (2017), decidiu-se pela execução experimental de grampos verticais, a fim de investigar essas lacunas e validar o modelo empírico proposto. Para minimizar os custos de ensaio, utilizou-se de recomendações de Hong *et al.* (2013), de menor trecho ancorado ($\geq 2,00$ m) para condições controladas, como a dessa execução experimental.

5.3.DESCRICÃO DO SUBSOLO LOCAL

Para a execução experimental de grampos em solo, foi utilizado um campo experimental localizado nas proximidades da empresa Solotrat Centro-Oeste Engenharia Geotécnica. O Campo Experimental está situado em Brasília, Guar (Região Administrativa X do Distrito Federal). O endereço do campo, de acordo com a nomenclatura vigente no Setor,  SIA SMAS, Conjunto A1, Lote 06, Guar, DF. As coordenadas aproximadas são $15^{\circ}48'59.65''S$ e $47^{\circ}58'0.13''W$. A localizao do campo experimental pode ser vista na Figura 5.1.



Figura 5.1 – Localização do campo experimental

A caracterização geotécnica do campo experimental da Solotrat Centro-Oeste foi realizada por Mendoza (2013) e Zuluaga (2015) a partir de ensaios de caracterização (w_L , w_P , granulometria e densidade real), ensaios de adensamento e ensaios de compressão triaxial. Observou-se que após uma camada de aterro compactado de 0,5 m há uma espessa camada de argila porosa colapsável, típica do DF e representativa de um solo que além de mole, é metaestável.

A argila porosa de Brasília tem suas feições características advindas do clima da região, com períodos alternantes de seca e precipitação, com média de temperatura anual acima de 20 °C. Dessa forma, as condições climáticas são favoráveis aos processos de lixiviação e laterização, processos que geram microagregações de textura arenosa, unidas umas às outras por meio de pontes cimentantes de argila, sustentando uma estrutura porosa, com permeabilidade de solos granulares finos (10^{-5} a 10^{-6} m/s) e metaestável. O solo apresenta, pós-colapso, baixa resistência ao cisalhamento e alta compressibilidade (Farias & Assis, 1996).

A argila porosa é localizada próxima à superfície, com espessura média de 15 a 30 m, apesar de que locais com 40 m de espessura também são encontrados. O lençol freático na região é profundo, com locais de profundidade superior a 40 m (Farias & Assis, 1996).

Para a caracterização do campo experimental da Solotrat Centro-Oeste Mendoza (2013) realizou ensaios de campo do tipo SPT, SPT-T e DMT para caracterização do solo local. O perfil obtido consiste de argila arenosa de consistência mole e cor vermelha de 0 a 5,0 m de profundidade, com silte arenoso de consistência média e cor marrom entre 5,0 e 8,0 m, silte arenoso de consistência dura e cor branca de 8,0 a 9,0 m e argila siltosa de consistência média e cor marrom escura de 9,0 a 14,0 m. O nível d'água encontrava-se a 4,5 m de profundidade.

Como apenas a camada de argila porosa era de interesse, estudou-se apenas os parâmetros referentes a esta. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros obtidos por Mendoza (2013) na caracterização básica de amostras indeformadas da argila porosa. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros obtidos para o modelo de Mohr-Coulomb, por meio de correlações de Mendoza (2013).

Tabela 5.1 – Parâmetros da caracterização básica da argila arenosa vermelha do campo experimental (Mendoza, 2013)

Prof	w	w_L	w_P	I_P	γ	γ_s	γ_d	Areia	Silte	Argila
(m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kN/m³)	(kN/m³)	(kN/m³)	(%)	(%)	(%)
5	32,4	42	30	12	14,85	26,69	11,39	16,4	11,3	72,3

Em que w é a umidade, w_L o limite de liquidez, w_P o limite de plasticidade, I_P o índice de plasticidade, γ o peso específico, γ_s o peso específico de sólidos, γ_d o peso específico seco, e por último tem-se as frações de areia, silte e argilas obtidas por meio da granulometria com sedimentação.

Tabela 5.2 – Intervalo de parâmetros da argila arenosa vermelha do campo experimental (modificado - Mendoza, 2013)

I_D^1	Φ^2	c^3	E^2	ν	K_0^2	OCR ²	E_{eod}^2
(%)	($^\circ$)	(kPa)	(MPa)				(MPa)
7 - 9	26 - 34	9 - 19	2,3 - 14	0,3 - 0,4	0,3 - 0,9	1 - 2,6	19,2 - 21,6

¹ Parâmetro obtido no ensaio SPT

² Parâmetro obtido no ensaio DMT

³ Parâmetro obtido no ensaio triaxial

Onde I_D é o índice de densidade advindo do ensaio SPT, Φ o ângulo de atrito advindo do ensaio DMT, E o módulo de Young advindo de ensaio triaxial, ν é o coeficiente de Poisson, K_0 é o coeficiente de empuxo no repouso, OCR a razão de pré-adensamento e E_{eod} o módulo edométrico.

Com o campo experimental conhecido e caracterizado, foi possível dispor a campanha executiva de forma a esclarecer os objetivos desta tese.

5.4. METODOLOGIA DA CAMPANHA EXECUTIVA

Para a campanha executiva, buscou-se arranjar sistematicamente os grampos de forma que houvesse possibilidade de observação de variáveis não observadas nos ensaios das obras de grampos executados com a reinjeção setorizada. Primeiramente, com a escolha do campo experimental previamente caracterizado, pode-se escolher local que permitisse a exumação dos grampos com investigação da interação entre o diâmetro efetivo final no local e o perfil de rugosidade dos grampos exumados, bem como a execução de grampos orientados verticalmente, de forma a viabilizar procedimento prévio às obras com ensaios de arrancamento verticais. Ademais, com a observação que desde os anos 1990 (Pitta & Zirlis, 2000) aditivos têm sido utilizados na calda de cimento de chumbadores, bem como há dissertação de mestrado recente acerca do tema no Brasil (Miranda, 2019), buscou-se comparar os resultados entre grampos executados com calda de cimento com aditivo expensor, que, em

tese, melhoraria a resistência ao arrancamento dado à menor exsudação esperada, bem como teria maior penetração nos vazios do maciço, dado à provável maior fluidez. Além disso, fez-se a variação da metodologia de perfuração, a fim de observar possíveis influências do método de perfuração na resistência ao arrancamento de grampos em Brasília.

Quanto ao número mínimo de testes necessários, foi determinado pelo tamanho e complexidade do projeto e pelo nível de incerteza envolvido. Normalmente, recomenda-se um mínimo de três testes por tamanho e configuração da execução experimental para fornecer uma representação do desempenho dos grampos. Dessa forma, pensou-se em seis cenários, resultando em dezoito grampos executados:

- Cenário 1: Grampo executado comum (injeção por gravidade), com perfuração a ar;
- Cenário 2: Grampo executado com calda de cimento aditivada, com perfuração a ar;
- Cenário 3: Grampo executado com reinjeção setorizada, com perfuração a ar;
- Cenário 4: Grampo executado comum (injeção por gravidade), com perfuração a água;
- Cenário 5: Grampo executado com calda de cimento aditivada, com perfuração a água;
- Cenário 6: Grampo executado com reinjeção setorizada, com perfuração a água;

A disposição destes grampos no campo experimental pode ser vista nas Figuras 5.2 e 5.3. As Figuras 5.4 a 5.6 ilustram o detalhe típico de montagem de cada tipo de grampo, com relação ao modo de injeção. Os diferentes métodos de perfuração apresentam detalhes típicos de montagem idênticos. Para aferição da rugosidade e diâmetros reais, a exumação de todos os grampos foi planejada, de forma que ocorresse em época que o lençol freático estivesse suficientemente baixo para escavação parcializada, sem escoramento. A Tabela 5.3 resume os cenários.

Ao seguir essas diretrizes, uma avaliação abrangente da resistência ao arrancamento dos grampos em solo pode ser alcançada, fornecendo estruturação para decisões prévias de projeto e construção.

GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DE PERFURAÇÃO A ÁGUA

- GRAMPO EXECUTADO COMUM
- GRAMPO EXECUTADO COM ADITIVO EXPANSOR
- GRAMPO EXECUTADO COM REINJEÇÃO

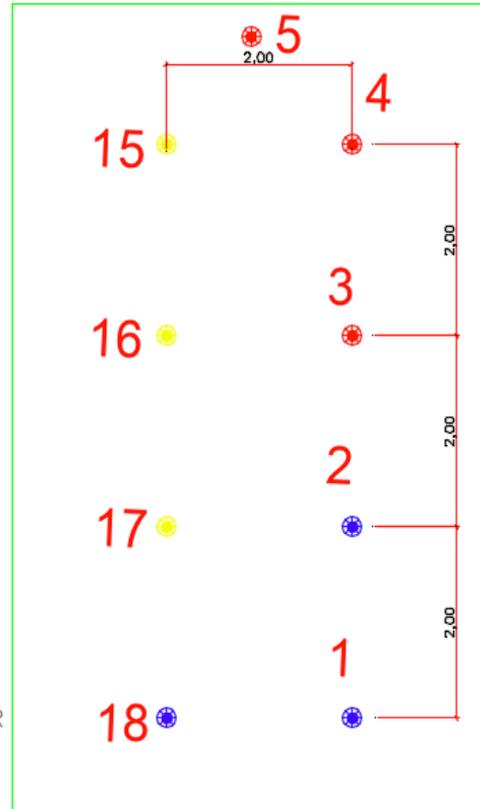


Figura 5.2 – Layout dos grampos executados por meio de perfuração à água, com legenda

GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DE PERFURAÇÃO A AR

- GRAMPO EXECUTADO COMUM
- GRAMPO EXECUTADO COM ADITIVO EXPANSOR
- GRAMPO EXECUTADO COM REINJEÇÃO

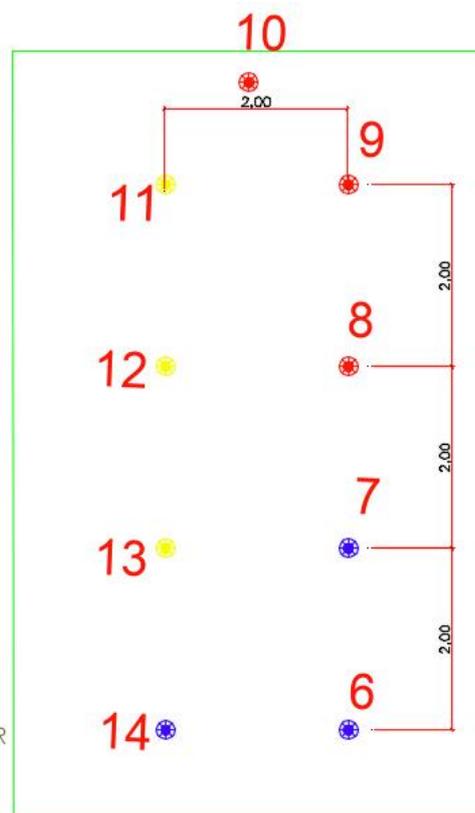


Figura 5.3 – Layout dos grampos executados por meio de perfuração à ar, com legenda

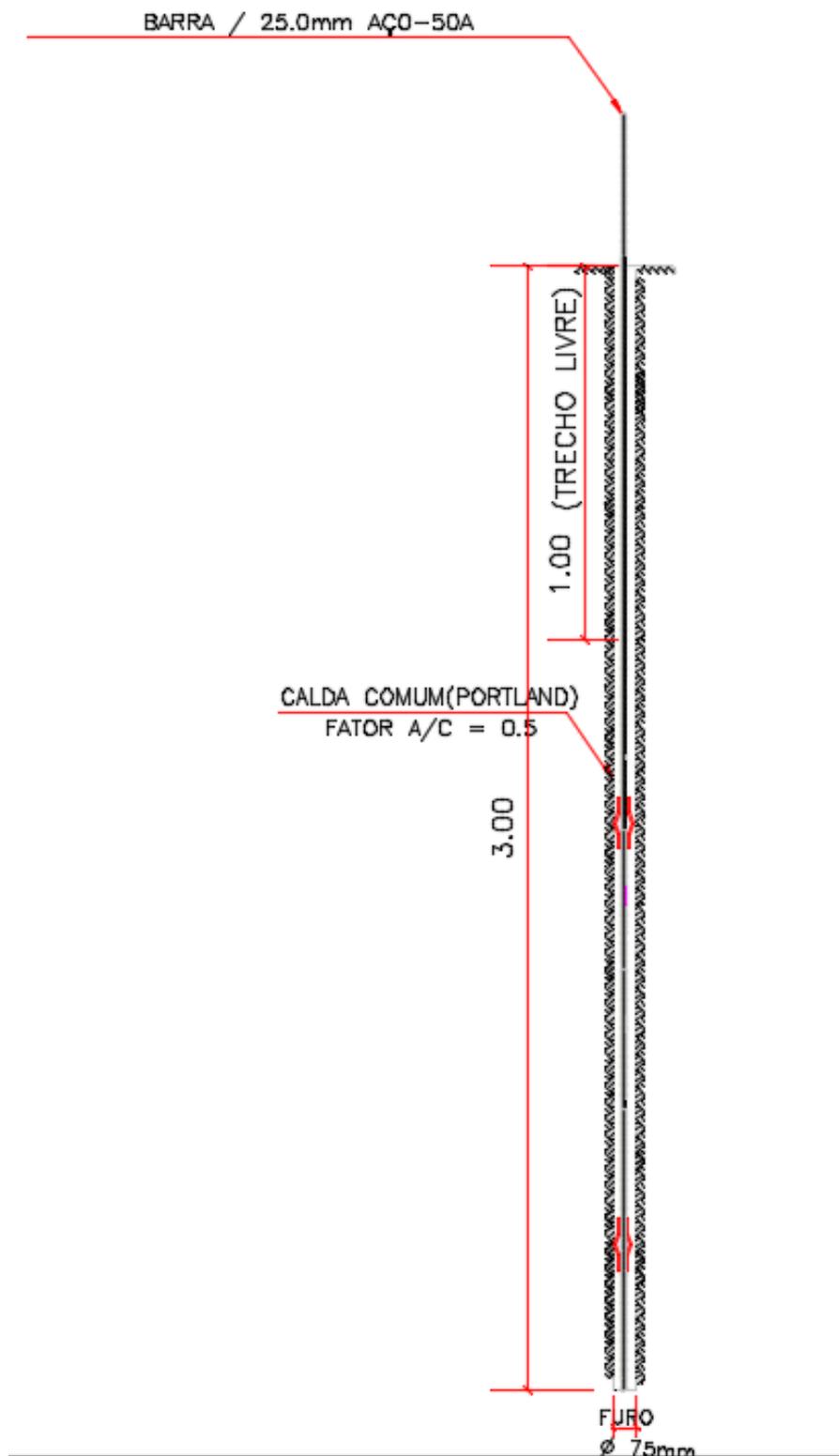


Figura 5.4 – Detalhe de grampo executado com injeção por gravidade (GG), sem aditivo (em amarelo nas Figuras 5.2 e 5.3)

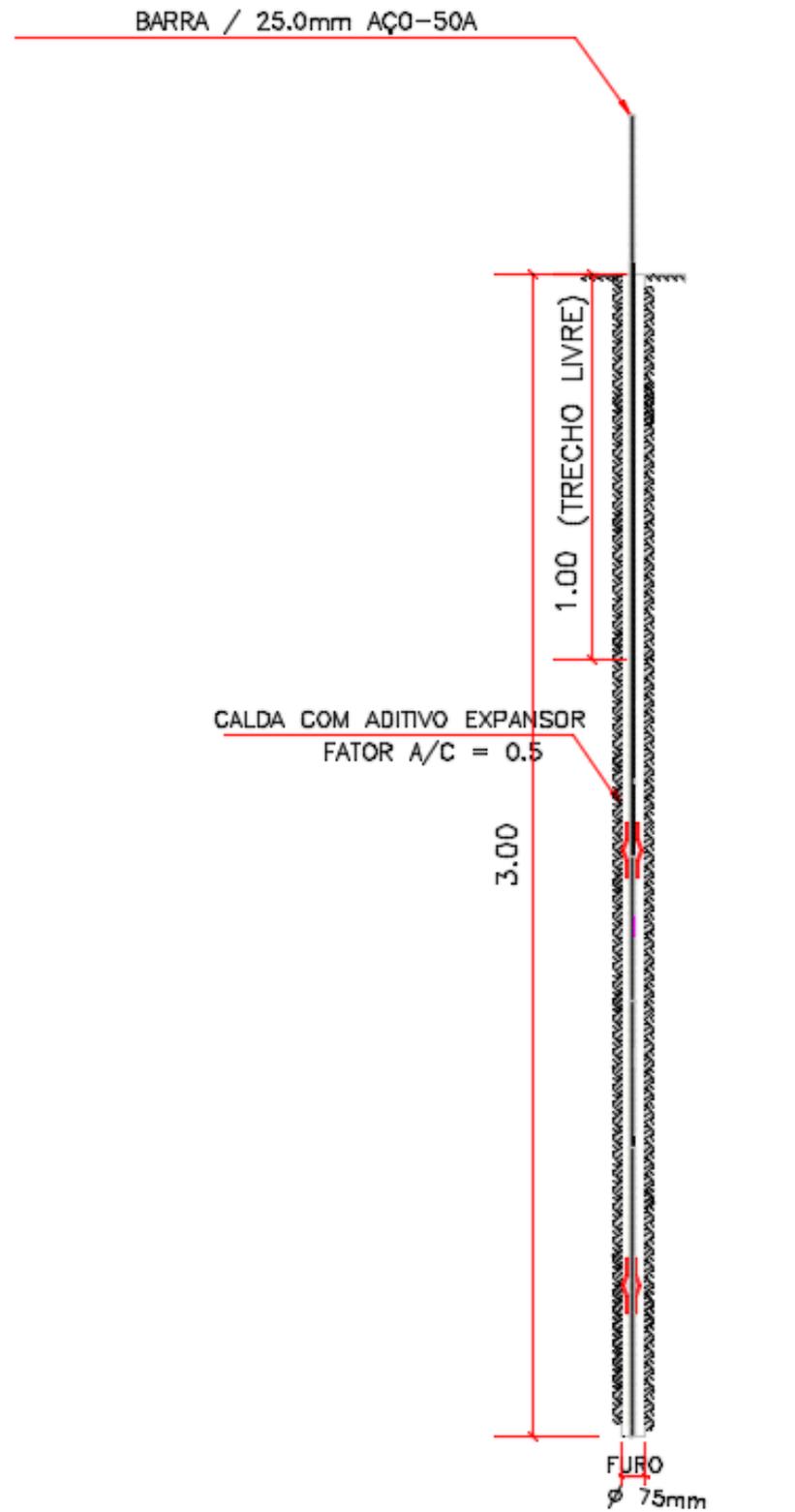


Figura 5.5 – Detalhe de grampo executado com injeção por gravidade (GA), com aditivo (em vermelho nas Figuras 5.2 e 5.3)

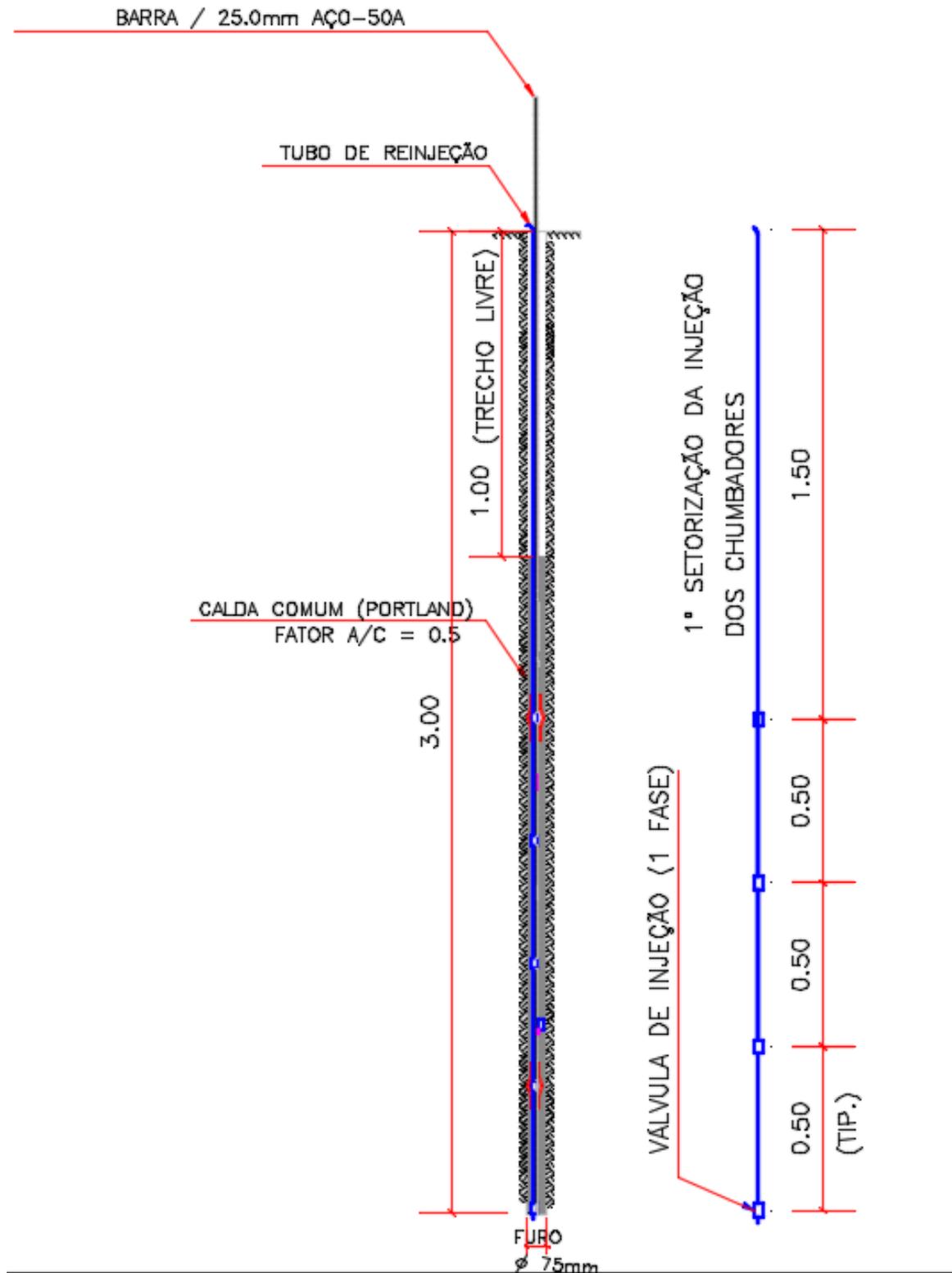


Figura 5.6 – Detalhe de grampo executado com fase de reinjeção (GR), sem aditivo (em azul nas Figuras 5.2 e 5.3)

Tabela 5.3 – Resumo dos cenários de execução

Cenário	Método de injeção	Método de perfuração	Simbologia	Grampos
1	Injeção por gravidade	A ar	GG	11, 12, 13
2	Calda de cimento aditivada	A ar	GA	8, 9, 10
3	Reinjeção setorizada	A ar	GR	6, 7, 14
4	Injeção por gravidade	A água	GG	15, 16, 17
5	Calda de cimento aditivada	A água	GA	3, 4, 5
6	Reinjeção setorizada	A água	GR	1, 2, 18

5.5. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Os equipamentos foram escolhidos de acordo com a disponibilidade da Solotrat, objetivos das investigações acerca de variáveis não estudadas no Capítulo 4 e com as recomendações de Warner (2004) e Souza *et al.* (2015).

5.5.1. EQUIPAMENTOS DE PERFURAÇÃO

Como houve apenas o uso de perfuratrizes rotativas com água como fluido de perfuração nas obras executadas no Capítulo 4, na execução experimental optou-se por variar as ferramentas de perfuração com os principais métodos comumente utilizados para perfuração de ancoragens – perfuração rotativa com água como fluido de perfuração e perfuração rotopercussiva, com ar como fluido de perfuração.

5.5.1.1. EQUIPAMENTO DE PERFURAÇÃO A ÁGUA

Para a perfuração com água como fluido de perfuração, escolheu-se equipamento de perfuração 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 5.7 detalha a perfuratriz utilizada na perfuração a água.



Figura 5.7 – Vista típica da perfuratriz rotativa com água como fluido de perfuração, com haste (à esquerda), bit de perfuração do tipo tricône e corpo da máquina, com motor fechado

Estritamente, a perfuração rotativa é qualquer forma de perfuração que faz um furo ao girar o bit no fundo do furo. As brocas rotativas são geralmente consideravelmente maiores em diâmetro do que a haste de perfuração, e a circulação de fluido é usada para limpar os resíduos de perfuração. A Figura 5.8 ilustra esse processo.

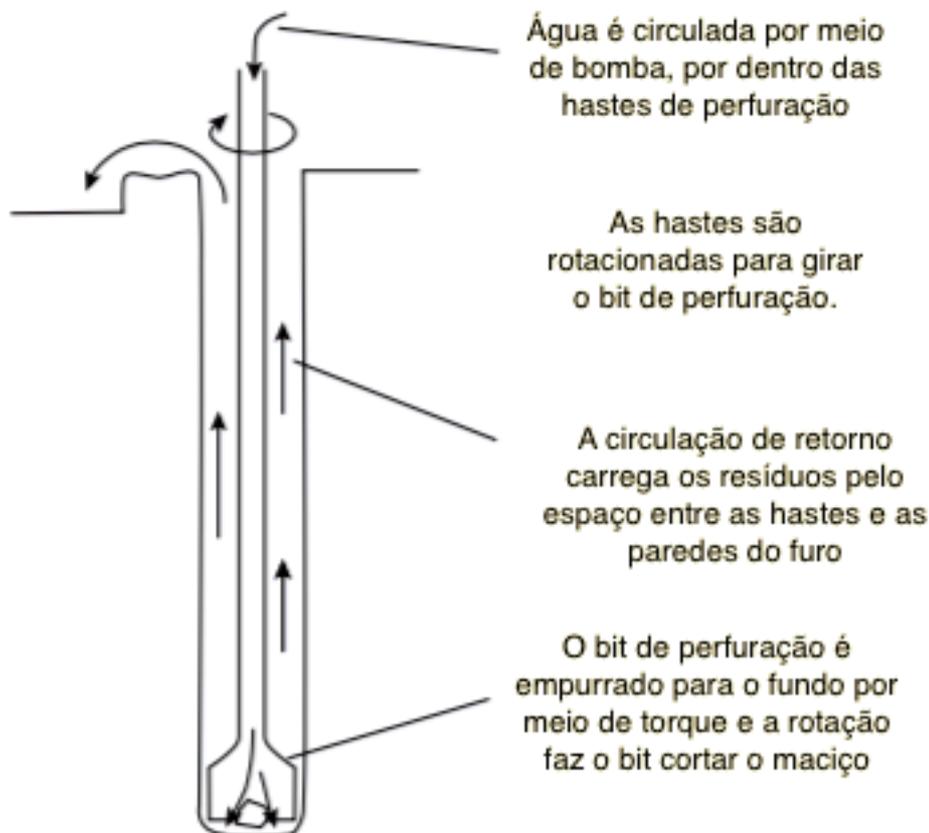


Figura 5.8 - Princípio de funcionamento da perfuratriz com água como fluido de circulação e limpeza

As hastes rosqueadas são constituídas de aço API, podendo ter entre 15 e 50 mm de diâmetro, a depender da finalidade da obra, com orifício interno para passagem de fluido de perfuração, normalmente água. Para que essa água seja circulada e auxilie na retirada de fluidos de dentro do furo e no resfriamento das hastes e do bit, como visto na Figura 5.8, é o motivo de a perfuratriz ter uma válvula, vista na Figura 5.7, em que é possível acoplar uma mangueira de água, e esta é acoplada à perfuratriz. O bit de perfuração, chamado de tricône (para solos finos) ou roller bit (para solos grossos), de 40 a 150 mm, a depender do tipo de maciço sendo perfurado, funciona por meio da rotação que é transmitida das hastes a ele e do avanço provido pelos operadores da máquina; esse fato justifica a perfuratriz ser denominada manual. Para a execução escolheu-se tricône próprio para argila, de 75 mm de diâmetro, com orifício em que se permitia a circulação de água.

Para que haja essa transferência de rotação e *pulldown* (puxada para baixo, ou avanço), as hastes devem ser bem rosqueadas e conectadas a um gerador de força motriz. Essa geração é

feita pelo motor, elétrico, trifásico, blindado, de 3 cavalos e 1750 W. Esse motor é isolado do restante da máquina e é conectado por meio de fios elétricos a um interruptor; este interruptor é ligado à uma fonte de energia elétrica, comumente a geradores.

5.5.1.2. EQUIPAMENTO DE PERFURAÇÃO A AR

Para a perfuração com ar como fluido de perfuração, escolheu-se equipamento de perfuração do tipo rotopercussivo, pneumático, do tipo *crawlair*, 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. Escolheu-se bits de perfuração de 75 mm de diâmetro, analogamente ao bit de perfuração do equipamento de perfuração com água, com orifício em que se permitia a circulação de ar. A Figura 5.9 ilustra equipamento de perfuração que utiliza ar como fluido.



Figura 5.9 – Vista típica da perfuratriz rotopercussiva com ar como fluido de perfuração, com torre recolhida

A perfuração rotopercussiva é uma forma de perfuração que executa um furo ao rotacionar e percutir o conjunto de hastes e bit no fundo do furo. A perfuração é feita com auxílio de compressor de ar, com o conjunto hastes e bit sendo capazes de perpassar maciços de maior dureza, como rochas secas, envolvendo soprar ar comprimido pela haste do bit e pelo bit. O ar ajuda a remover resíduos e detritos do furo à medida que o bit corta o solo. A Figura 5.10 ilustra o conjunto do compressor de ar com a perfuratriz e a Figura 5.11 ilustra o processo de perfuração a ar.

A Figura 5.10 ilustra o conjunto do compressor de ar com a perfuratriz e a Figura 5.11 ilustra o processo de perfuração a ar.



Figura 5.10 - Vista típica do conjunto perfuratriz-compressor, com uso de ar como fluido de perfuração, em deslocamento

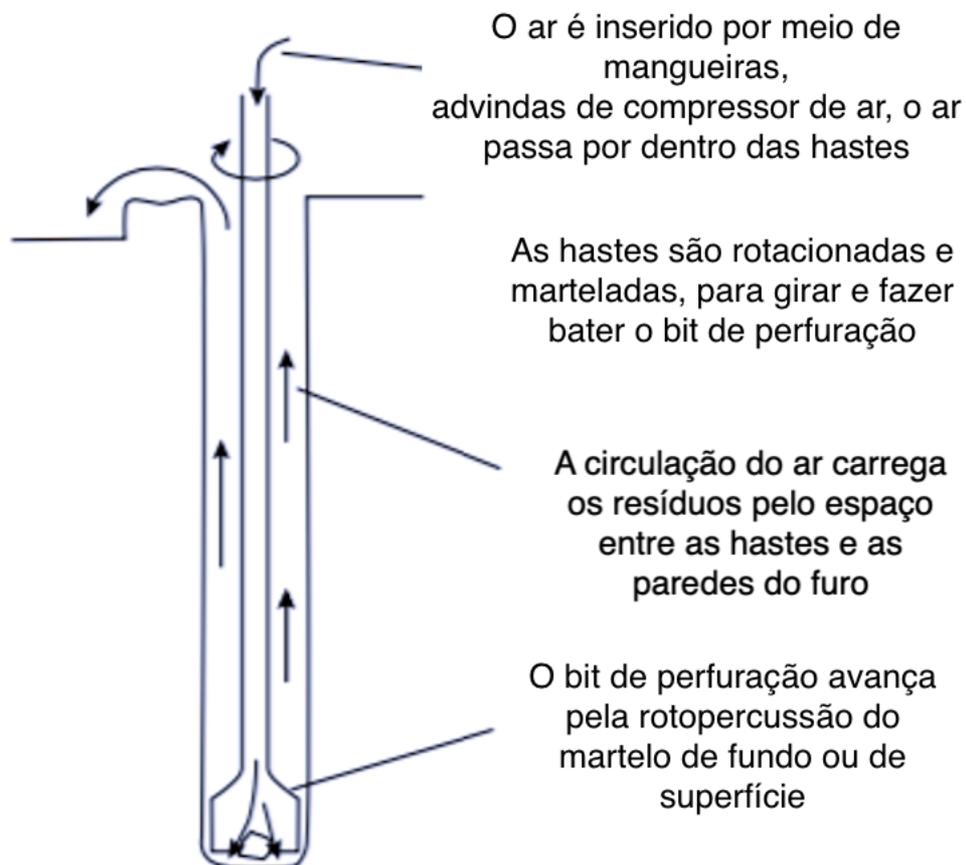


Figura 5.11 - Princípio de funcionamento da perfuratriz com ar como fluido de circulação e limpeza

5.5.1.3. COMPARAÇÃO TEÓRICA DOS MÉTODOS

Ambos os métodos têm suas próprias vantagens e desvantagens, e a escolha de qual método usar dependerá da situação de perfuração específica e dos resultados passíveis de serem obtidos com o método escolhido na formação que será perfurada e injetada.

Uma das principais diferenças entre a perfuração com água e ar é a compressibilidade do fluido. A água não é compressível, enquanto o ar é. Ao perfurar com água, a pressão da água é constante e a água flui através da broca a uma taxa constante. Isso torna a perfuração com água ideal para perfurar materiais densos, pois a água pode facilmente cortar o material.

Por outro lado, a perfuração com ar envolve o uso de ar comprimido para alimentar o bit. A compressibilidade do ar significa que a pressão do ar pode mudar, bem como a vazão. Isso pode tornar a perfuração com ar menos eficiente para perfurar materiais granulares de maior densidade, pois o ar pode não ser capaz de soprar o material tão facilmente, enquanto a água, por meio da própria vazão do fluido de perfuração e por sua incompressibilidade, é capaz de fazer essa remoção dos resíduos de perfuração. No entanto, perfurar com ar pode ser mais eficiente para perfurar materiais menos densos, pois o ar pode soprar facilmente os detritos.

Em resumo, a compressibilidade dos fluidos é um fator crucial nas operações de perfuração. A escolha de perfurar com água ou ar dependerá da situação de perfuração específica, como o tipo de material a ser perfurado e o resultado desejado da operação de perfuração. A perfuração com água é ideal para materiais duros e densos e ajuda a resfriar e remover detritos, enquanto a perfuração com ar é eficiente para materiais macios e menos densos, mas gera muita poeira e detritos. A produtividade de ambos os métodos dependerá essencialmente do dimensionamento do sistema de perfuração à formação que se almeja a perfurar. Para grampos em solo, a produtividade, para furos de até 100 mm, costuma ser 35-40% superior para perfuração à água.

Por conta desse entendimento, de que há facilidade de limpar o furo em solos menos densos, como o subsolo local, típico da argila porosa de Brasília, houve essa variação de metodologia executiva de perfuração dos furos dos grampos para melhor entender como o método de perfuração poderia influenciar na resistência ao arrancamento de grampos.

5.5.2. EQUIPAMENTOS DE INJEÇÃO

O equipamento de injeção para grampos normalmente inclui um misturador, uma bomba de injeção e mangueiras para injetar a calda de cimento nos grampos. O misturador é utilizado para combinar os materiais da calda de cimento, que normalmente consistem em cimento e água, podendo ou não haver presença de aditivos. A bomba é então usada para que a calda de cimento seja injetada nos furos, através de mangueiras de alta pressão.

Os requisitos de energia para equipamentos de injeção podem variar dependendo do equipamento específico que está sendo usado e das condições do local de trabalho. Alguns sistemas de injeção podem ser movidos por um motor elétrico, enquanto outros podem ser movidos por um motor a gasolina ou diesel. As bombas de injeção elétricas normalmente requerem uma fonte de energia dedicada, como um gerador ou tomada elétrica, enquanto as bombas movidas a gás ou diesel não requerem uma fonte de energia separada.

O tamanho da bomba de injeção e a distância que a calda de cimento precisa ser bombeada também desempenharão um papel nos requisitos de energia. Bombas maiores exigirão mais energia para operar, e bombear a calda em distâncias maiores também exigirá mais energia, como em situações em que o solo grampeado é executado em talude com indisponibilidade de chegada à crista, em que elevados desníveis precisam ser superados. Em geral, as bombas de injeção para execução de grampos podem consumir entre 3 e 15 cv, e a potência elétrica necessária estará na faixa de 7,5 a 30 kW. Também existem bombas de injeção manuais, útil para locais de difícil acesso ou trabalhos experimentais, devido ao tamanho menor e menor custo de aquisição.

Diferentemente dos equipamentos de perfuração, não houve necessidade de variação do tipo de equipamento, dado que um mesmo equipamento permite a execução das injeções de calda de cimento, com ou sem aditivo, além de que como a pressão de injeção e o fluxo são passíveis de serem monitorados e as mangueiras entre os tipos de bomba de injeção são similares, a influência do tipo de equipamento não se mostrou importante. Para a execução experimental, escolheu-se uma unidade injetora do tipo circuito fechado, constando, dos seguintes dispositivos:

- Misturador de alta rotação (aproximadamente 1.800 rpm) e capacidade superior a 150 l, equipado com peneira e hidrômetro graduado em litros e frações decimais;

- Bomba injetora helicoidal, com capacidade de manter um fluxo contínuo superior a 100 l/min, dentro dos limites de pressão requeridos, e bombear caldas com o fator a/c igual ou superior a 0,4;
- Garrafão de amortecimento e estabilizador de pressão vertical com colchão de ar, com volume suficiente para estabilização do manômetro até, aproximadamente, 10% da leitura requerida;
- Manômetro de pressões graduados de 0 kPa a 50 kPa, com resolução de 3000 kPa;
- Obturadores hidráulicos simples, ou seja, com vedação apenas na ponta do obturador, dado que as reinjeções setorizadas não requerem obturadores duplos (dupla vedação);
- Tubulações, revestimentos, registros e ferramentas revisadas, para evitar interrupções do processo de injeção.

A Figura 5.12 ilustra o misturador e a bomba escolhidos para a execução experimental.



Figura 5.12 - Vista típica do misturador duplo com bomba de injeção acoplada

5.6. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.6.1. CARACTERIZAÇÃO DA CALDA DE CIMENTO

Por motivo de ser o tipo de cimento mais utilizado em obras de solo grampeado, delimitou-se que para as injeções utilizar-se-ia cimento comum, CP II, com superfície específica (Blaine) entre 3000 e 5000 cm^2/g , com a hipótese de campo que o D_{85} do cimento com diâmetro médio de 70 μm e D_{95} de 90 μm (Pitta, 2017), em que D_{85} é o tamanho de partícula correspondente a 85% de partículas passantes e D_{95} o tamanho de partícula correspondente a 95% de partículas passantes.

A água utilizada na preparação da calda de injeção foi supervisionada para que estivesse isenta de quantidades prejudiciais de sedimentos, de materiais orgânicos, álcalis, sais e quaisquer outras substâncias que interfeririam nas reações de hidratação dos sólidos.

A mistura de cimento e água foi feita com tempo de agitação mínimo de 5 min e definiu-se que, em qualquer caso, não poderão ser injetadas caldas que permaneçam no misturador por tempo superior a 2 h.

As propriedades da calda de cimento a serem controladas, para melhor possibilidade de replicação futura em outros estudos, foram a coesão, viscosidade, densidade e exsudação da calda de cimento. Previamente à injeção dos grampos, procedeu-se com o estudo do traço a ser utilizado.

Utilizou-se para a determinação da densidade da calda de cimento uma balança e um Becker graduado de precisão. Para a análise de exsudação da calda de cimento utilizou-se um cilindro graduado, preencheu-se o cilindro com calda de cimento, deixando-a em repouso por 1 h. Observou-se a sedimentação e determinou-se a porcentagem que havia se separado da solução coloidal. Para a determinação da viscosidade utilizou-se um funil Marsh, visto na Figura 5.13, e seguiu-se os procedimentos de ASTM D 6910 (2009).



Figura 5.13 – Funil Marsh

Já para a verificação da coesão da calda de cimento, utilizou-se o reômetro de placa de Lombardi. Esse instrumento simples, de fácil manufatura, consiste em uma placa de aço de 100 mm x 10 mm x 3 mm com uma alça para inserção no misturador da calda, conforme pode ser observado na Figura 5.14. Os sulcos são cortados em ambos os lados da placa para dar uma superfície áspera. O procedimento consistiu em pesar a placa, mergulhar a placa totalmente na calda de cimento e depois pesá-la novamente. Subtraiu-se o peso inicial do peso final para calcular o peso da calda presa à placa. Então se dividiu o peso da calda de cimento pela área da placa para obter o peso por unidade de área. O peso por unidade de área é dividido pelo peso específico da calda de cimento para determinar a espessura da argamassa presa à placa. Esta espessura, quando convertida em mm, é a coesão e transforma-se esse valor para Pa segundo ábacos presentes em Lombardi (1985).

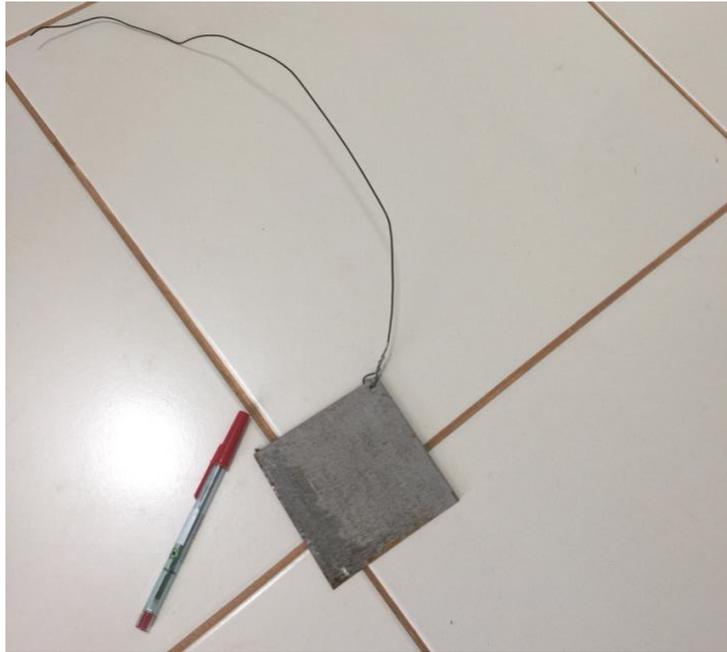


Figura 5.14 – Reômetro de placa de Lombardi

Já em relação aos ensaios de laboratório, previu-se a realização de ensaios na calda de cimento após esta ter atingido, ao menos, sua resistência final, com mínimo de 65 dias de cura.

5.6.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO ADITIVO

Por motivo de ser, na experiência do autor, o tipo de aditivo mais empregado em especificações de injeções para solo grampeado e tirantes, delimitou-se o uso de aditivo expansor. Esse tipo de aditivo é comumente especificado devido ao possível aumento do volume das caldas de cimento após aplicação, especialmente em trabalhos sob pressão em que é necessária estabilidade da calda mesmo sob pressão, evitando a exsudação e o fenômeno de filtração por pressão.

O mecanismo de ação desses aditivos se baseia na capacidade de reduzir a tensão superficial da calda, permitindo maior fluidez e, por conseguinte, tendendo a preencher de forma mais completa os vazios existentes do solo. Isso é conseguido adsorvendo na superfície as partículas de cimento na calda e diminuindo a atração entre partículas, o que permite que as partículas se movam mais livremente e facilmente.

Além do benefício esperado de maior penetração nos vazios existentes no solo, o uso desses aditivos também poderia aumentar a resistência à compressão da calda, o que pode levar a uma

interface solo-grampo mais durável (Moosavi *et al.*, 2005). Isso porque os aditivos podem ajudar a melhorar a hidratação das partículas de cimento, o que pode levar a uma reação mais completa e uniforme e a gerar um produto final mais resistente.

Tais aditivos adicionalmente podem ajudar a reduzir a quantidade de água necessária para atingir um nível desejado de trabalhabilidade na mistura a baixos fatores a/c. Isso pode levar a uma redução na exsudação e diminuição da pós-fissuração passível de ocorrer na calda de cimento, o que também pode melhorar a resistência geral e a estabilidade da interface argamassa-solo.

No entanto, é importante notar que o uso de aditivos também pode apresentar efeitos indesejados à interface solo-grampo. Por exemplo, caso a mistura seja por demasiado aditivada, pode haver exsudação excessiva e segregação da calda, o que pode resultar em interfaces solo-grampo menos resistentes. Por motivo de confidencialidade, a fabricante do aditivo não permitiu citação na tese. As características técnicas do aditivo utilizado nesta tese, passíveis de serem elencadas, são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Características do aditivo expensor

Base química	Aditivos especiais derivados de alumínio e cargas minerais.
Apresentação	Pó, ensacado
Dosagem especificada pelo fabricante	0,4-1,4% em relação ao peso de cimento

5.6.1.2. RESULTADOS PRÉVIOS DAS CALDAS DE CIMENTO

A Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos para as caldas de cimento comum e a aditivada com expensor de calda. Notou-se uma melhor performance da calda de cimento sem aditivos quanto à resistência à compressão, porém melhor resultado quanto ao percentual de exsudação na calda com aditivo expensor

Tabela 5.5 – Características das caldas de cimento

Tipo de aglutinante	Cimento (CPII)	Cimento CPII com aditivo expansor com 0,5% em peso
Fator a/c em peso	0,5	0,5
pH	7,9	7,9
Exsudação (%)	9	1
Peso específico (kN/m³)	16,9	16,8
Coesão (Pa)	7	6,9
Viscosidade (mPa.s)	154	138
Resistência à compressão (MPa)	38,94 ± 3,94	33,58 ± 4,21
Módulo de Young (GPa)	24,1 ± 4,17	24,03 ± 3,97

5.6.2. CARACTERIZAÇÃO DA BARRA DE AÇO

Por motivo de ser o tipo de barra mais utilizada em obras de solo grampeado, delimitou-se que para o elemento resistente à tração dos grampos utilizar-se-ia barra de aço CA 50, de alta resistência, como a barra de diâmetro de 25 mm, que possui capacidade de carga suficiente para arrancamento do grampo na interface solo-grampo nas condições de 2 m de trecho ancorado, não rompendo na interface barra de aço-grampo.

A Tabela 5.6 apresenta as características típicas da barra de aço, obtidas do catálogo do fabricante Gerdau.

Tabela 5.6 – Características das barras de aço (Gerdau, 2020)

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

* Considerando coeficiente parcial de 1,15

5.7. CAMPANHA EXECUTIVA

Após o planejamento e concepção da campanha executiva, esta foi realizada em março de 2020, no campo experimental descrito no item 5.3. Escolheu-se a execução para acontecer em março, época chuvosa de Brasília, devido ao nível d'água do campo experimental chegar em seu nível máximo anual nessa época, de 4,5 m de profundidade. Dessa forma, quando da exumação, o nível d'água já estaria em nível baixo o suficiente para a escavação sem necessidade de rebaixamento artificial de lençol freático. Ademais, os ensaios de arrancamento em época seca permitiram condições realistas no campo experimental, dado que as contenções em solo grampeado são calculadas consideradas drenadas. Seguindo-se o arranjo previsto nas Figuras 5.2 a 5.6, prosseguiu-se com a campanha executiva, com os equipamentos descritos no Item 5.5 e materiais descritos no Item 5.6.

5.7.1. EXECUÇÃO DOS GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA PERFURAÇÃO A ÁGUA

Para a perfuração a água foi utilizada a perfuratriz manual elétrica da Figura 5.15. A sequência executiva seguiu o disposto no Item 5.5.1.1, com bomba d'água com capacidade suficiente para perfuração de furos de 75 mm, com o conjunto com performance de 10 m/min.



Figura 5.15 – Perfuratriz rotativa manual para execução de grampos com circulação de água

A ordem de execução dos furos apresentados na Figura 5.2, no caso dos grampos executados por meio de perfuração a água, de numeração 1 a 5 e 15 a 18, foi feita respeitando-se cinco diâmetros de perfuração entre um furo e outro, com preenchimento do furo com calda de cimento, preenchimento realizado no mesmo dia das perfurações, conforme prática de campo, após a instalação da barra resistente à tração centralizada no furo, dado que foi observada a estabilidade do furo após sua execução. Esta foi instalada e fixada de forma monolítica e individual por furo, com auxílio de dispositivos centralizadores ao longo da barra, a fim de garantir o contínuo e constante recobrimento com a calda de cimento, conforme as Figuras 5.16 e 5.17.



Figura 5.16 – Exemplo de barra antes da centralização no furo, com espaçadores tipo carambola a cada metro.

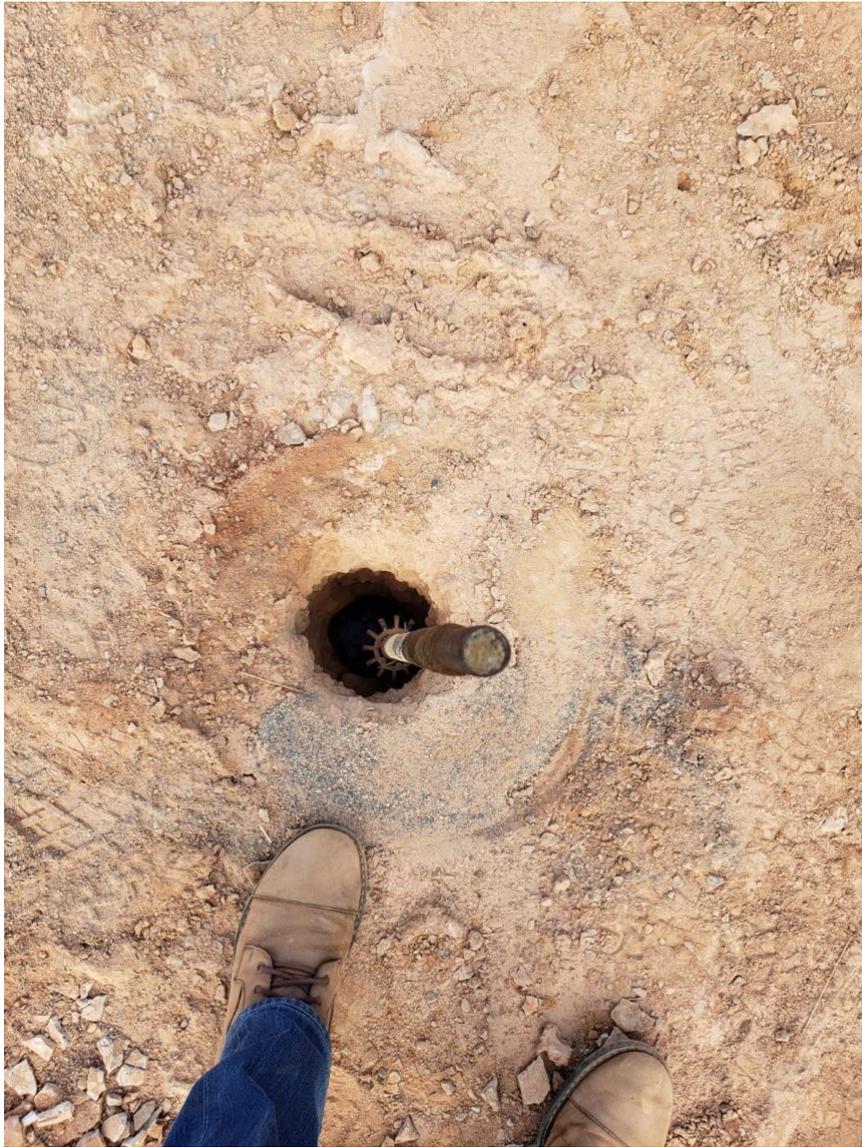


Figura 5.17 – Exemplo de barra antes da centralização no furo. Pela flexibilidade da barra, antes da injeção é necessário centralizar o grampo manualmente, dado que o espaçador utilizado era de 30 mm e o furo de 75 mm.

5.7.2. EXECUÇÃO DOS GRAMPOS EXECUTADOS POR MEIO DA PERFURAÇÃO A AR

Para a perfuração a ar foi utilizado o conjunto rotopercussivo da Figura 5.18. A sequência executiva seguiu o disposto no Item 5.5.1.2, com compressor de capacidade suficiente para perfuração de furos de 75 mm, com o conjunto com performance de 5 m/min.



Figura 5.18 – Perfuratriz pneumática rotopercussiva para execução de grampos com circulação de ar

A ordem de execução dos furos apresentados na Figura 5.3, no caso dos grampos executados por meio de perfuração a ar de numeração 6 a 14, foi feita respeitando-se cinco diâmetros de perfuração entre um furo e outro, com preenchimento do furo com calda de cimento realizado no mesmo dia das perfurações, conforme prática de campo, após a instalação da barra resistente à tração centralizada no furo, dado que foi observada a estabilidade do furo após sua execução. Esta foi instalada e fixada de forma monolítica e individual por furo, com auxílio de dispositivos centralizadores ao longo da barra, a fim de garantir o contínuo e constante recobrimento com a calda de cimento.

5.7.3. INJEÇÃO DOS GRAMOS EXPERIMENTAIS

A injeção dos grampos, por ter havido diferenças entre os três métodos – calda de cimento comum sem aditivação e sem reinjeção, calda de cimento com aditivação e sem reinjeção e calda de cimento sem aditivação, mas com reinjeção, foi realizada de acordo com cada metodologia, conforme mostrado nas Figuras 5.4 a 5.6. A Figura 5.19 ilustra os grampos após a conclusão das injeções. Como critério para todos os métodos de injeção, determinou-se que a mistura de cimento e água fosse feita com tempo de agitação mínimo de 5 min e definiu-se que, em qualquer caso, não poderiam ser injetadas caldas que permaneçam no misturador por tempo superior a 2 h.



Figura 5.19 – Furos do campo experimental após procedimento de injeção

5.7.3.1. GRAMOS EXPERIMENTAIS SEM ADITIVOS E SEM REINJEÇÃO (GC)

A injeção dos grampos sem aditivos e sem reinjeção, aqui chamados de grampo comum (GC), foi realizada com tubo auxiliar removível, de forma ascendente, de forma que a injeção fosse feita de baixo para cima. A fim de que a manutenção de 1,0 m livre fosse possível, fez-se o uso de um “pio”, dispositivo costumeiramente utilizado em medições piezométricas, de forma que

fosse possível parar a injeção no momento em que a calda de cimento alcançasse 1,0 m abaixo do nível do terreno. A Figura 5.20 ilustra a injeção de grampos comuns.



Figura 5.20 – Injeção dos grampos comuns

5.7.3.2. GRAMPOS EXPERIMENTAIS COM ADITIVOS E SEM REINJEÇÃO

A injeção dos grampos com aditivos e sem reinjeção, aqui chamados de grampo com aditivo expensor (GA), foi executada de forma similar à descrita no Item 5.7.3.1, com a fundamental diferença da mistura da calda de cimento com aditivo expensor de calda, conforme descrito no Item 5.6.1.1. O critério de parada foi o mesmo dos grampos comuns, com preservação do trecho livre.

5.7.3.3. GRAMPOS EXPERIMENTAIS SEM ADITIVOS E COM REINJEÇÃO

A injeção dos grampos sem aditivos e com reinjeção, aqui chamados de grampo com reinjeção (GR), foi realizada em duas etapas, característica da reinjeção setorizada. Nesses grampos, a montagem da barra foi feita com mangueira de reinjeção em um setor, perpassando o comprimento ancorado e com três válvulas, conforme Figura 5.6.

Após um tempo mínimo de 12 h, os grampos do tipo GR foram reinjetados por meio da mangueira de injeção perdida, anotando-se a pressão de abertura máxima, de injeção e o volume de calda absorvida. As Figuras 5.21 e 5.22 ilustram a execução da reinjeção.



Figura 5.21 – Pressão de reinjeção dos grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada, a pressão de abertura fica entre 3-5 vezes maior do que a pressão de injeção, para o caso do solo do campo experimental



Figura 5.22 – Detalhe da reinjeção dos grampos executados por meio da técnica de reinjeção setorizada

5.8. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO

Os ensaios foram executados 84 dias após a execução dos grampos, de forma que a calda de cimento chegasse a uma resistência à compressão representativa de longo prazo e para que os grampos perpassassem por períodos secos e chuvosos em Brasília, para a resistência ao arrancamento destes ser representativa de longo prazo. O comprimento livre era de 1,0 m, necessário porque ao aplicar a carga de tração na barra, a superfície do solo é submetida a cargas de compressão, podendo resultar em resultados imprecisos (Seo *et al.*, 2012). O ensaio foi realizado utilizando os seguintes dispositivos:

- Base de reação de aço ASTM A36, 30 mm;
- Macaco hidráulico e bomba de óleo com manômetro de 30 toneladas de capacidade;
- Dois relógios comparadores de medição de deslocamentos axiais da extremidade do grampo com acurácia de 0,1 mm, com base de referência a mais de 5 diâmetros do eixo do grampo sendo ensaiado, para representatividade das leituras;
- Célula de carga vazada aferida, com aquisidor de dados digital;

A carga máxima passível de ser aplicada é a resistência de cálculo da barra de aço ($\gamma_f=1,0$), vista na Eq. 5.1:

$$T_{\text{último}} \leq A_s \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 4,91 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{5,10^5}{1,15} = 213,42 \text{ kN} \quad (1)$$

sendo

$T_{\text{último}}$: carga última da armação do grampo utilizado no ensaio

A_s : área da seção transversal da armação do grampo, barra de aço de 25 mm

f_{yk} : tensão de escoamento característica do aço empregado

γ_{as} : coeficiente de ponderação da resistência da armação do grampo; para barras de aço ($\gamma_s = 1,15$)

De todo modo, como havia apenas 2,0 m ancorados por grampo, mesmo quando executados por meio da reinjeção setorizada, colocou-se como carga máxima de ensaio, T_{ensaio} , uma carga de 150 kN. Caso não ocorresse arrancamento do grampo até T_{ensaio} , o ensaio prosseguiria com o mesmo critério até atingir o arrancamento ou $T_{\text{último}}$. Ademais, como critério auxiliar sugerido

por Clouterre (1991) e Zhang *et al.* (2009), considerava-se que o grampo teria sofrido arrancamento caso houvesse 1 mm de deslocamento, com menos de 1% de aumento na carga medida, em dado estágio de carregamento, conforme observado no Capítulo 3.

O ensaio foi realizado em estágios. Antes de qualquer medição foi aplicada uma carga inicial (P_0) com a finalidade de ajustar as folgas do sistema. Esta carga foi a mínima possível de ser lida com precisão pelo conjunto de carregamento e leitura utilizado, limitada a 10% da carga máxima prevista. A partir da carga inicial (P_0) foram então aplicados quantos estágios de carregamentos fossem necessários para a obtenção da curva carga- deslocamento, sendo no mínimo cinco estágios de igual carregamento (20% da carga máxima prevista para o ensaio - T_{ensaio}), com tempo de 5 min em cada estágio.

A partir dos ensaios, calculou-se a resistência da interface solo grampo (q_s) pela Eq. 5.2:

$$q_s = \frac{T_{ensaio}}{L_b \cdot \pi \cdot \phi_{perf}} \quad (2)$$

sendo

L_b : comprimento ancorado;

ϕ_{perf} : diâmetro da perfuração;

q_s : resistência da interface solo x grampo

O detalhamento do ensaio pode ser visto nas Figuras 5.23 a 5.26.

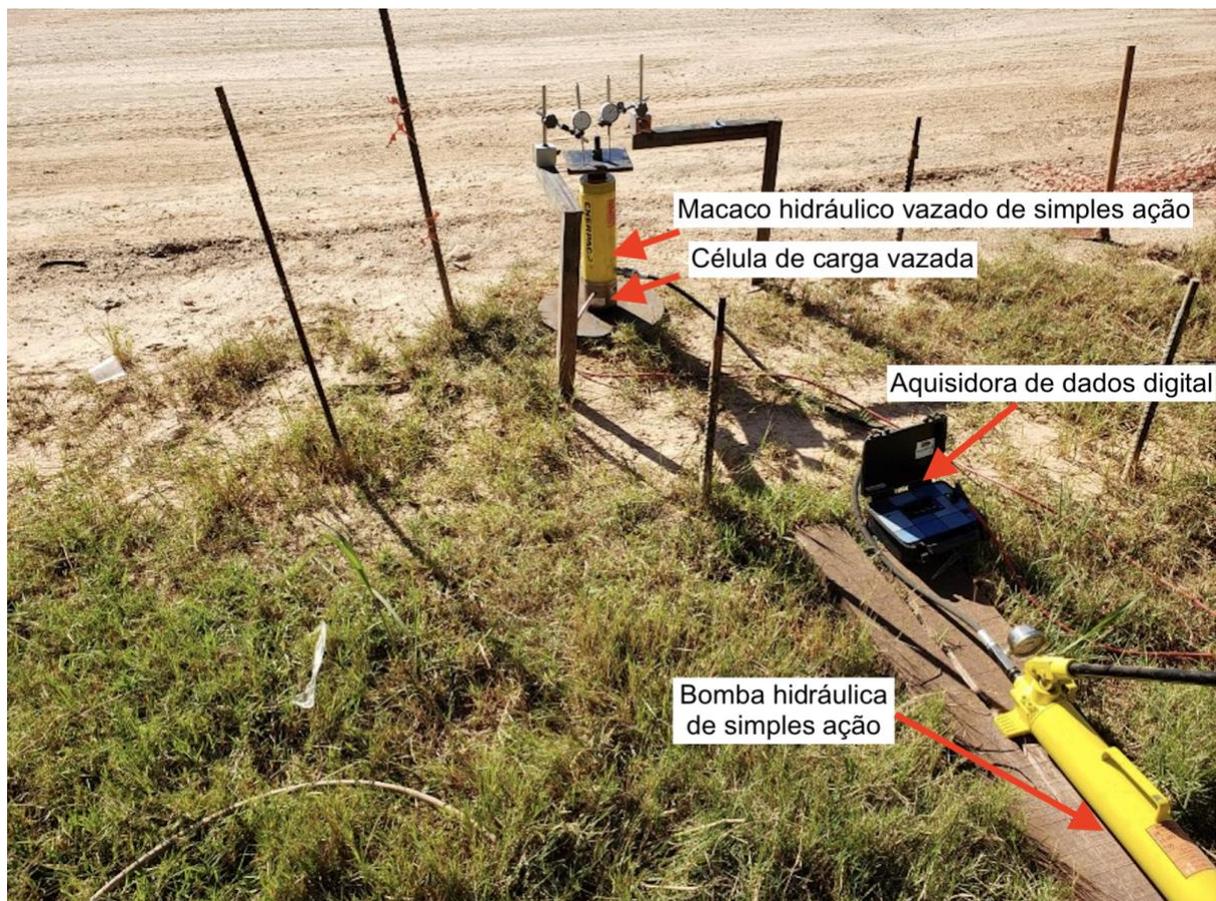


Figura 5.23. Componentes da execução dos ensaios de arrancamento – sistema de aplicação e medição da carga

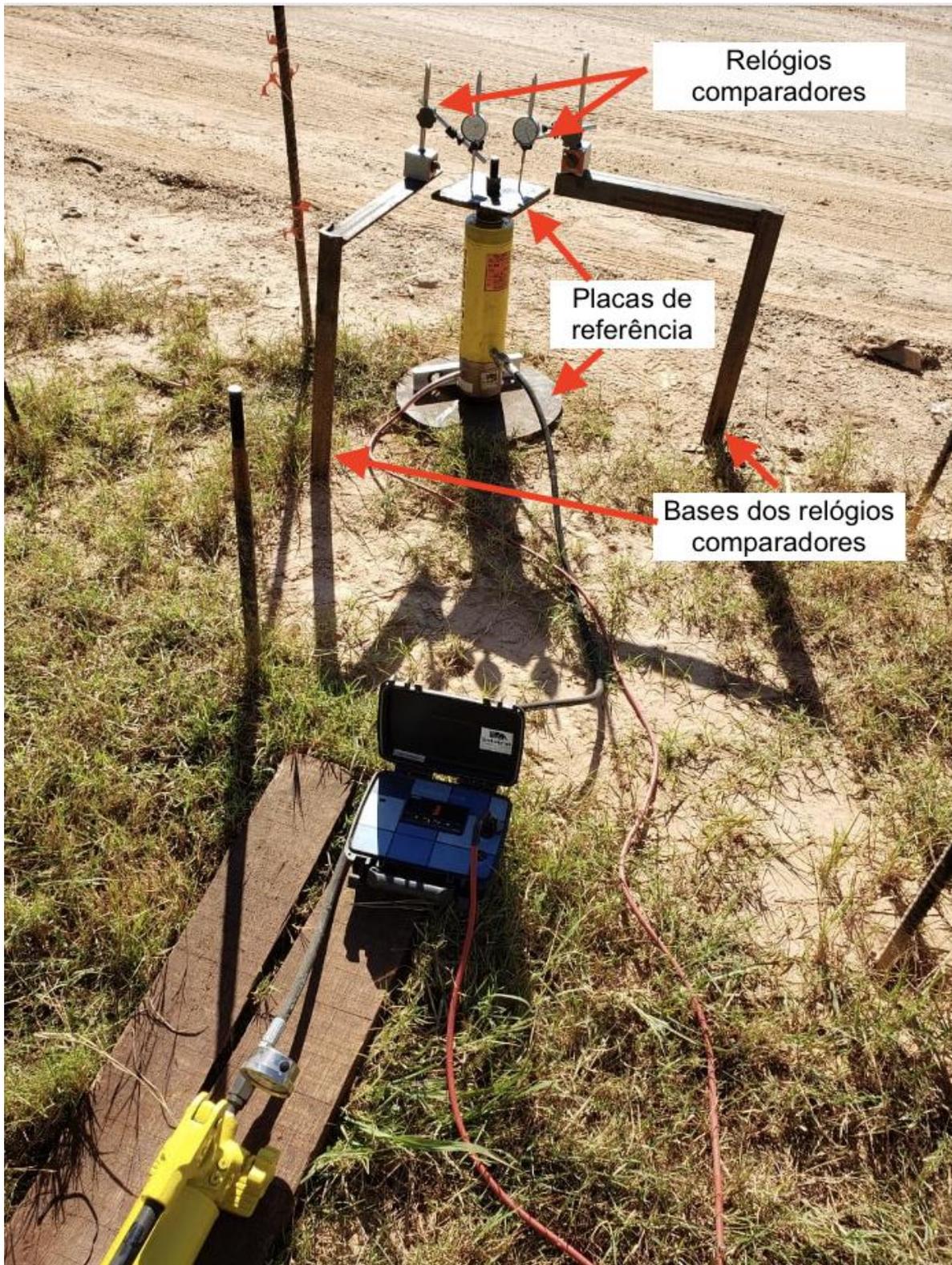


Figura 5.24. Componentes da execução dos ensaios de arrancamento – sistema de medição de deslocamentos. Observa-se a régua de nível adjacente ao grampo ensaiado. Previamente à aplicação de carga a base era nivelada



Figura 5.25. Detalhe da FieldReader 3Geo, com leitura de carga pico – grampo com reinjeção.



Figura 5.26. Detalhe de grampo após ensaio. Por conta da lubrificação interna do macaco vazado o grampo já ensaiado apresenta resquícios do óleo hidráulico, observado pela cor negra brilhante no grampo em destaque na imagem.

5.9. EXUMAÇÃO DOS GRAMPOS

A exumação da interface solo-grampo refere-se ao processo da remoção do solo da interface, preservando a rugosidade do grampo. Este processo é normalmente usado em situações em que a interface solo-grampo precisa ser inspecionada ou reparada; nesta tese almejou-se a inspeção e medição da interface solo-grampo por meio do diâmetro médio dos grampos e perfil típico

de rugosidade, considerando o ângulo médio de rugosidade, denominado AMR. Cronologicamente, posteriormente à execução dos ensaios de arrancamento, fez-se a exumação de todos os dezoito grampos.

Os procedimentos de exumação da interface solo-grampo seguiram as seguintes etapas:

- Planejamento: Foi identificada a localização e extensão da interface solo-grampo; nesta tese considerou-se como extensão de interesse os 2,0 m do trecho ancorado de cada grampo;
- Escavação: O primeiro passo no processo de exumação foi escavar o solo acima da interface solo-grampo. Isso foi feito utilizando combinação de escavação mecanizada, no caso uma retroescavadeira de concha simples, com métodos manuais, tomando-se cuidados para evitar danos à interface solo-grampo durante o processo de escavação;
- Inspeção: Uma vez exposta a interface solo-grampo, ela foi inspecionada para determinar sua condição e quaisquer possíveis problemas que precisassem ser abordados. A inspeção incluiu a avaliação da integridade da calda, a verificação de rachaduras ou vazios na calda de cimento e a avaliação da interface solo-grampo;
- Preservação: Durante o processo de exumação, protegeu-se a interface solo-grampo de mais danos, de forma a preservar a condição original da calda de cimento tanto quanto possível enquanto a medição do ângulo médio de rugosidade ainda não era efetuada.

Durante a etapa de escavação mecanizada, vista nas Figuras 5.27 a 5.36 percebeu-se que mesmo com o cuidado com os procedimentos de exumação, danos mecânicos em alguns pontos da interface solo-grampo ocorreram, especialmente devido ao uso de retroescavadeira com concha de dimensão similar ao espaçamento entre grampos e ao içamento mecanizado do grampo da escavação, necessário devido ao peso de cada um ser bastante elevado para içamento manual. Durante o içamento, por ainda haver uma forte interação da calda com o solo, maior até do que com a própria barra, foi observado deslocamento no topo e na base da maioria dos grampos, conforme pode ser observado nas Figuras 5.37 a 5.40.

Para contrabalançar esses danos ao determinar o ângulo médio de rugosidade e o diâmetro médio dos grampos, foi o uso de paquímetro para medir o diâmetro dos grampos a cada 10 cm, espaçadas ao longo de seu comprimento de 2,0 m, de forma que ao menos 10 medidas fossem feitas. Isso possibilitou que o diâmetro médio fosse representativo.



Figura 5.27. Escavação mecanizada entre grampos, feita após os ensaios de arrancamento, de forma que não houvesse influência do peso da retroescavadeira no ensaio.



Figura 5.28. Detalhe do início da escavação entre grampos, para posterior retirada de material escavado de forma manual no entorno do grampo.



Figura 5.29. Escavação mecanizada entre grampos, feita após os ensaios de arrancamento, de forma que não houvesse influência do peso da retroscavadeira no ensaio.



Figura 5.30. Escavação mecanizada dos grampos, detalhe da escavação ao redor dos grampos 3, 4 e 5.



Figura 5.31. Escavação manual após nicho escavado mecanicamente.



Figura 5.32. Escavação manual após nicho escavado mecanicamente. Detalhe da escavação do grampo 1.



Figura 5.33. Detalhe de escavação manual dos grampos paralelamente à escavação mecanizada.



Figura 5.34. Detalhe de içamento mecanizado dos grampos, com auxílio de sinaleiro para içamento controlado.



Figura 5.35. Detalhe de içamento mecanizado dos grampos, com auxílio de sinaleiro para içamento controlado.
Detalhe para o trecho livre preservado



Figura 5.36. Detalhe de dano mecânico gerado pela escavação mecanizada



Figura 5.37. Detalhe de bainha de grampo exumado, em que a calda de cimento é íntegra, sem contaminação do solo circundante



Figura 5.38. Detalhe de impregnação do solo circundante no exterior da bainha, com porção não possível de remover nem com limpeza à base d'água.



Figura 5.39. Detalhe dos grampos pós exumação. Os danos nos grampos foram principalmente no topo e na base de cada grampo, devido ao processo de içamento mecanizado



Figura 5.40. Detalhe dos grampos pós exumação. Os danos nos grampos foram principalmente no topo e na base de cada grampo, devido ao processo de içamento mecanizado.

5.9.1.1. INSPEÇÃO DOS GRAMPOS EXUMADOS

Com os grampos exumados e dispostos em local abrigado, fez-se a medição dos diâmetros, em ao menos dez diferentes pontos, para a aquisição do diâmetro médio dos grampos, de forma a obter o diâmetro exumado médio desses grampos e, conseqüentemente, ser possível comparar o q_s , representado pela Eq. 5.2 e o $q_{\text{scorrigido}}$, representado pela Eq. 5.3:

$$q_{\text{scorrigido}} = \frac{\text{Tensaio}}{L_b \cdot \pi \cdot \varnothing_{\text{exu}}} \quad (3)$$

sendo

L_b : comprimento ancorado;

\varnothing_{exu} : diâmetro exumado médio;

$q_{\text{scorrigido}}$: resistência da interface solo-grampo considerando o diâmetro exumado

Para averiguar a influência da rugosidade na diferença entre q_s e $q_{\text{corrigido}}$ medições de rugosidade da interface solo-grampo foram feitas, utilizando o ângulo médio de rugosidade (AMR) para determinar o grau de irregularidade da superfície da interface. Para essa medição da rugosidade da interface solo-grampo, existem vários métodos diferentes que podem ser utilizados, incluindo inspeções visuais, perfis de superfície e varredura a laser. No caso desta tese, utilizou-se de combinação de inspeções visuais e medição de perfis da superfície das interfaces.

Esses perfis de superfície são medidos a partir dos ângulos entre os picos e vales da superfície da interface e, em seguida, calculado o ângulo médio desses ângulos, o AMR. O AMR é normalmente expresso como um único valor, que pode ser usado para comparar a rugosidade de diferentes superfícies ou para avaliar a rugosidade de uma única superfície ao longo do tempo.

O AMR foi considerado como um bom indicador da rugosidade geral da interface solo-grampo, pois leva em consideração tanto a altura quanto o espaçamento dos picos e vales na superfície. Um valor de AMR mais baixo normalmente indica uma superfície mais lisa, enquanto um valor de AMR mais alto indica uma superfície mais áspera. A Figura 5.41 ilustra os parâmetros de interesse na medição da rugosidade e a Figura 5.42 mostra o perfilômetro utilizado.

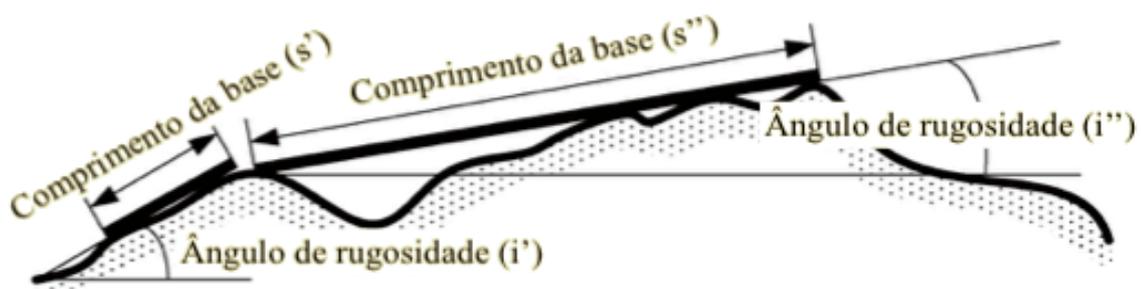


Figura 5.41. Parâmetros de interesse na medição da rugosidade dos grampos (modificado – Seo et al., 2012)



Figura 5.42. Perfilômetro para traçado dos perfis de rugosidade dos grampos

5.10. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de arrancamento foram categorizados conforme o método de perfuração empregado e o método de injeção utilizado. Devido à influência dos métodos de execução empregados no diâmetro final e na rugosidade da interface solo-grampo, apresentou-se também nesse item os dados obtidos na exumação dos grampos. Os boletins dos ensaios de arrancamento de cada grampo estão presentes no Apêndice B.

5.10.1. GRAMPOS PERFURADOS A AR

Conforme observado no Item 5.4, os grampos executados com perfuração a ar foram os Grampos 6 a 14. As Figuras 5.43 a 5.46 mostram os resultados dos ensaios de arrancamento de acordo com o método de injeção empregado. A Tabela 5.7 apresenta os dados obtidos na exumação destes grampos, em que GG são grampos comuns injetados por gravidade, GA são grampos injetados por gravidade com adição de aditivo e GR são grampos executados com reinjeção setorizada.

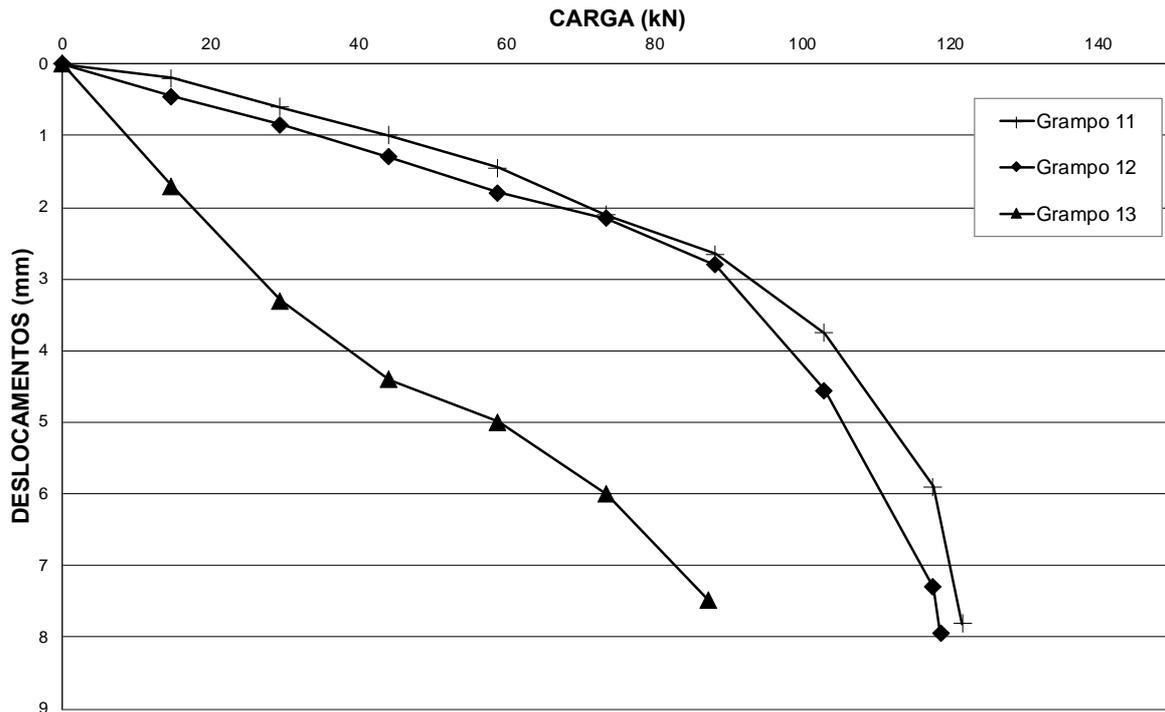


Figura 5.43 – Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampas perfuradas com ar como fluido de perfuração, injetados por gravidade, sem uso de aditivo

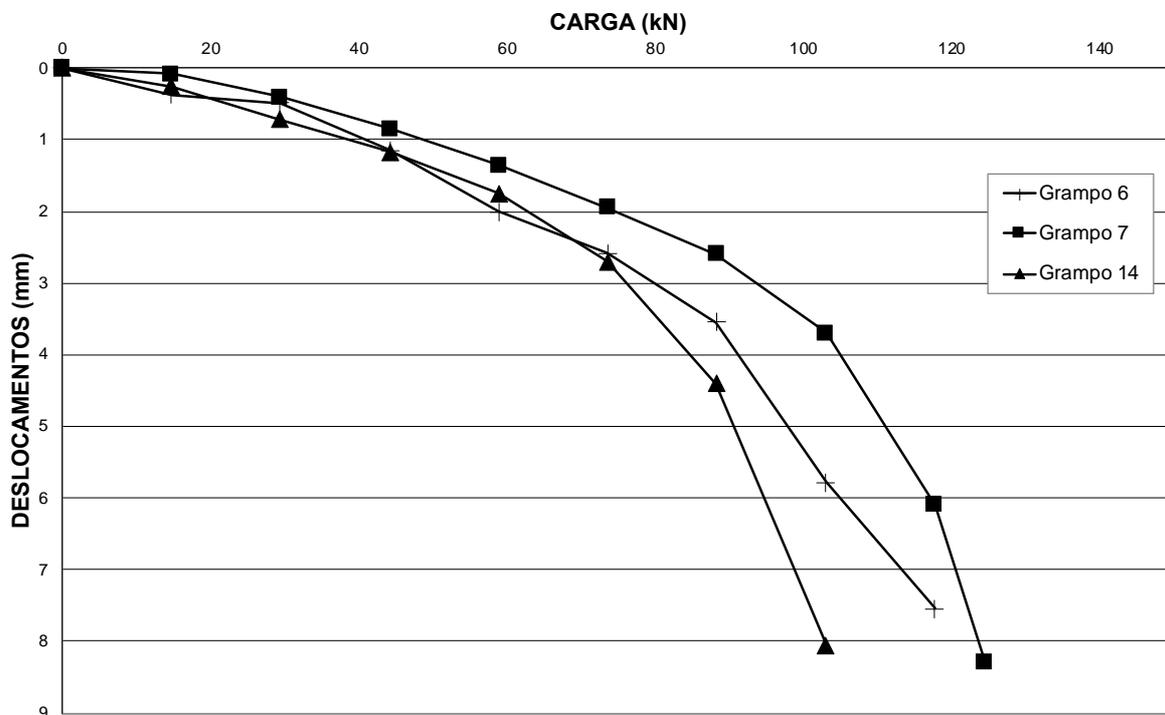


Figura 5.44 – Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampas perfuradas com ar como fluido de perfuração, com fase de reinjeção, sem uso de aditivo

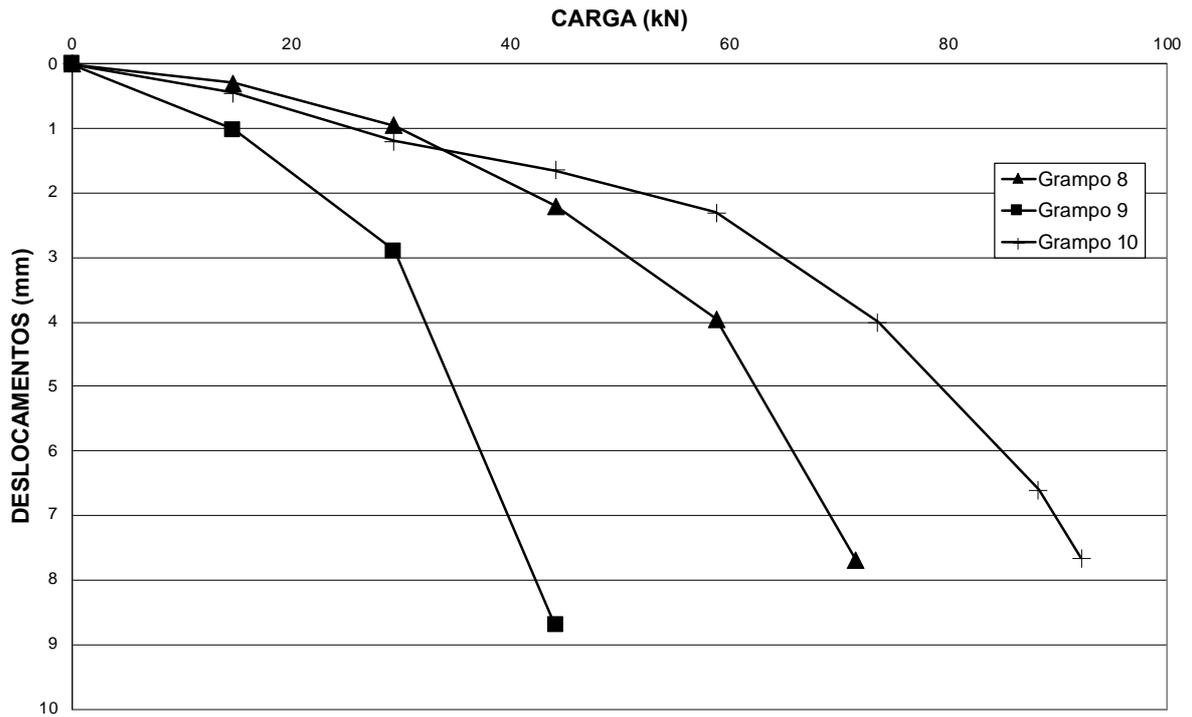


Figura 5.45 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com ar como fluido de perfuração, injetados por gravidade, com uso de aditivo na calda de cimento

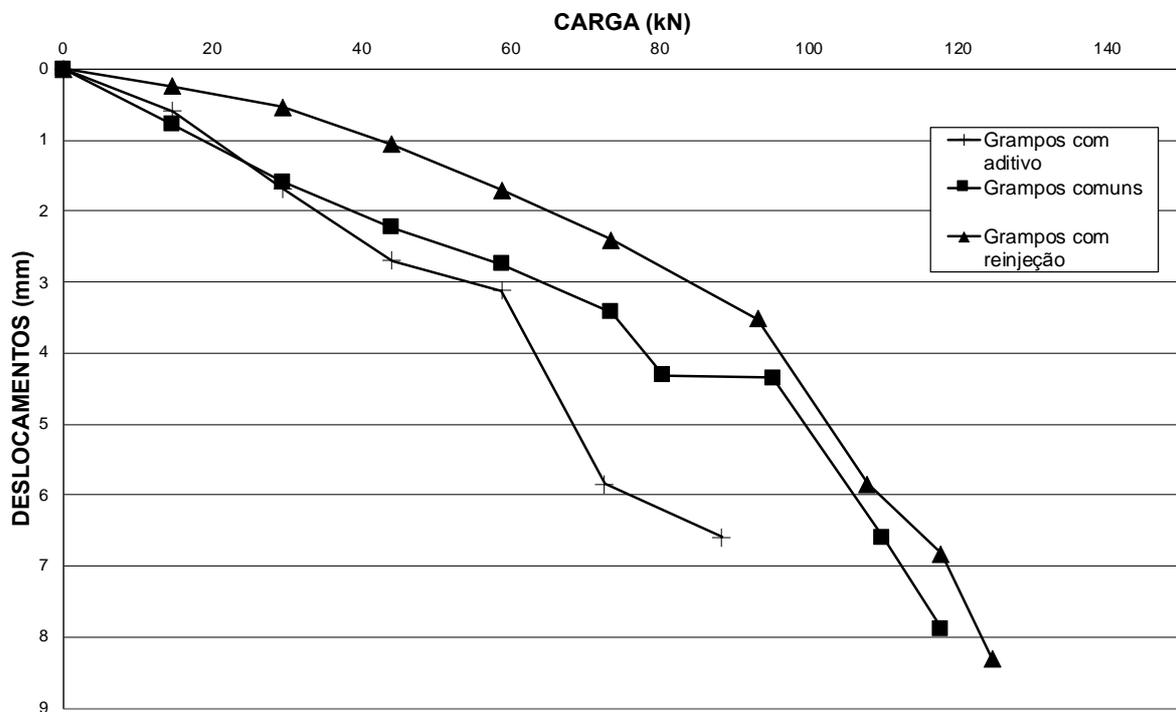


Figura 5.46 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) da média dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com ar como fluido de perfuração

Tabela 5.7 – Resultados dos diâmetros, rugosidade, q_s e $q_{scorrigido}$, para grampos perfurados com ar, em que GG é a sigla para grampo comum injetado por gravidade, GA a sigla para grampo com calda de cimento aditivada e GR para grampo executado por meio da reinjeção setorizada

Número do Grampo	Tipo de injeção	Diâmetro médio (cm)	Ângulo de rugosidade médio (o)	q_s (kPa)	$q_{scorrigido}$ (kPa)
6	GR	11,46	26,7	249,72	163,43
7	GR	12,19	33,7	264,29	162,61
8	GA	9,77	19,7	151,92	116,62
9	GA	10,82	29	93,65	64,91
10	GA	10,19	16,3	195,62	143,98
11	GG	10,92	41	258,05	177,23
12	GG	9,45	19,7	249,72	198,19
13	GG	9,87	18,7	185,21	140,74
14	GR	12,32	27,3	218,51	133,02

5.10.2. GRAMOS PERFORADOS A ÁGUA

Conforme observado no item Figura 5.4, os grampos executados com perfuração a água foram os grampos 1 a 5 e 15 a 18. As Figuras 5.47 a 5.50 mostram os resultados dos ensaios de arrancamento de acordo com o método de injeção empregado. A Tabela 5.8 apresenta os dados obtidos na exumação destes grampos, em que GG são grampos comuns injetados por gravidade, GA são grampos injetados por gravidade com adição de aditivo expensor e GR são grampos executados com fase de reinjeção.

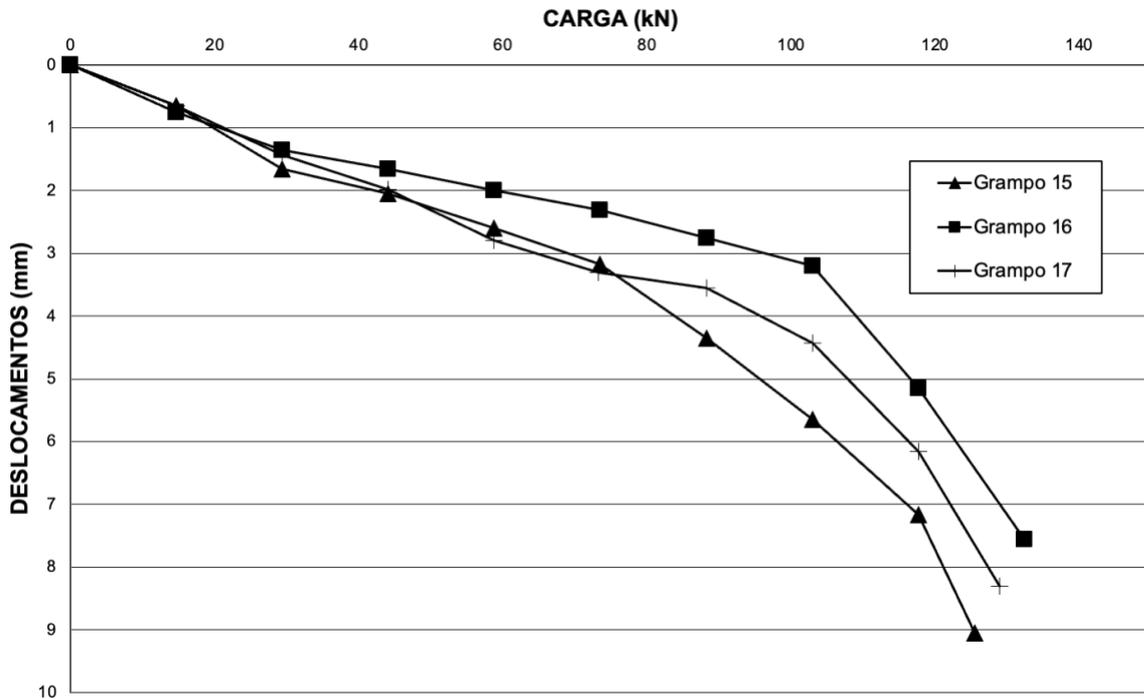


Figura 5.47 – Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração, injetados por gravidade, sem uso de aditivo expansor na injeção

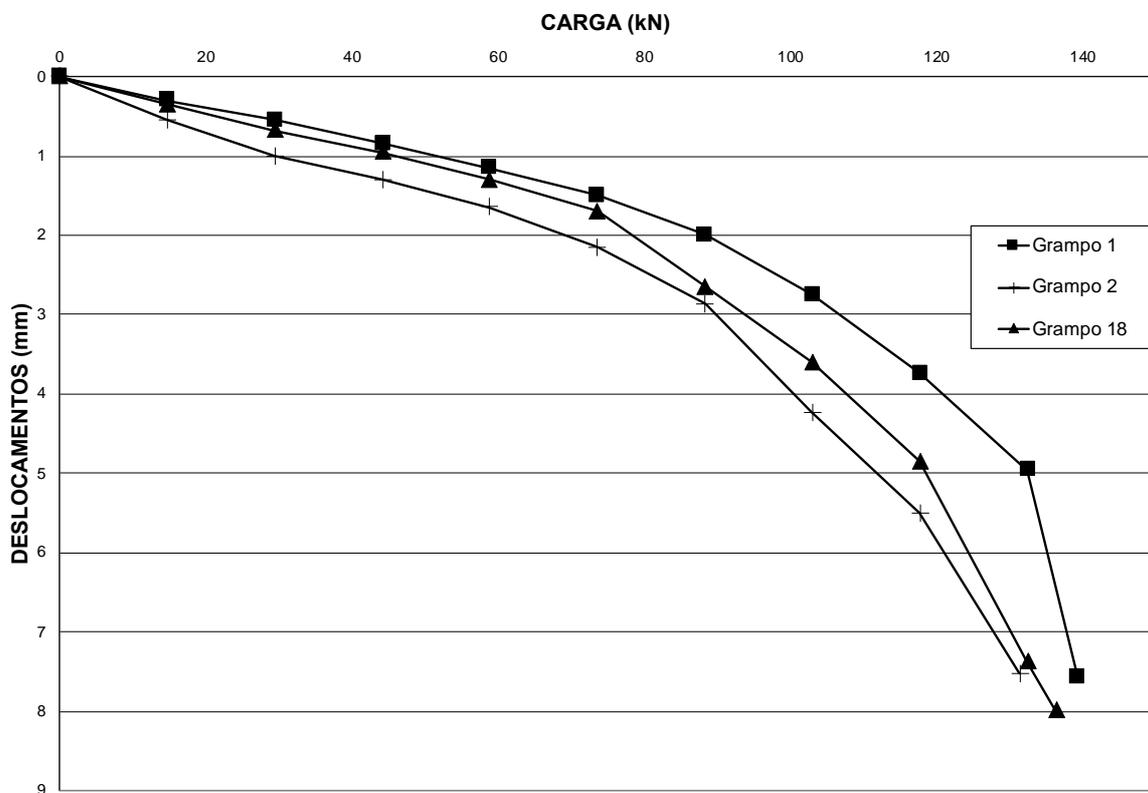


Figura 5.48 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração, com fase de reinjeção, sem uso de aditivo expansor na injeção

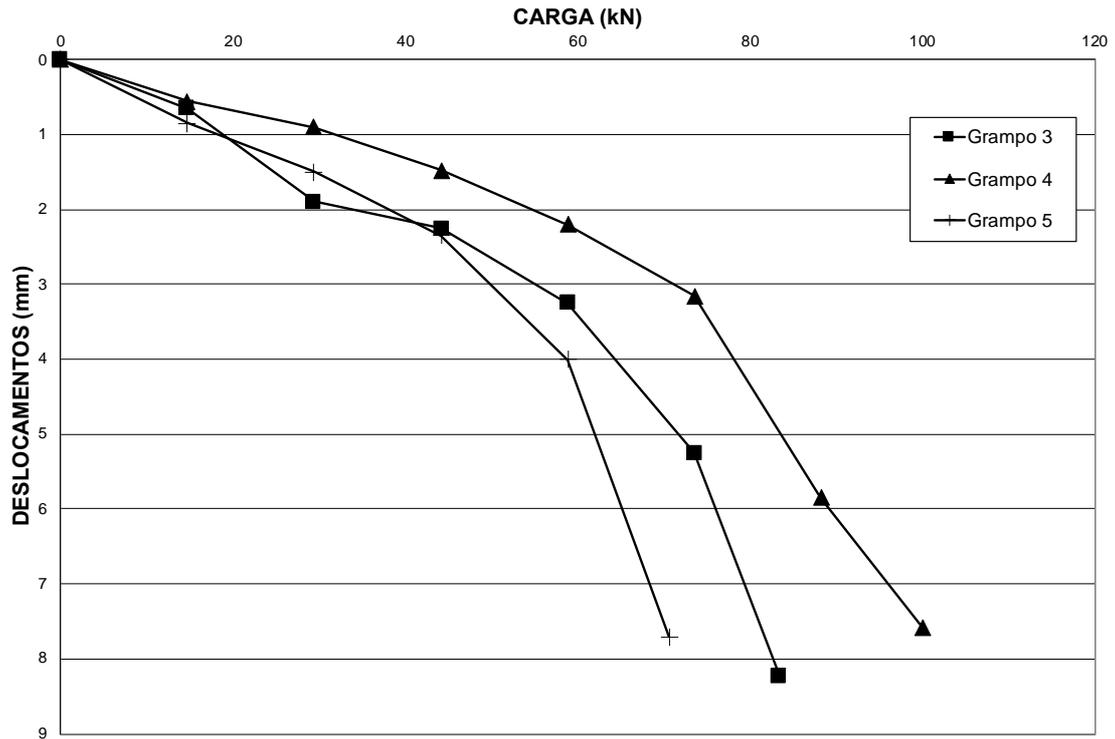


Figura 5.49 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração, injetados por gravidade, com uso de aditivo expansor na injeção

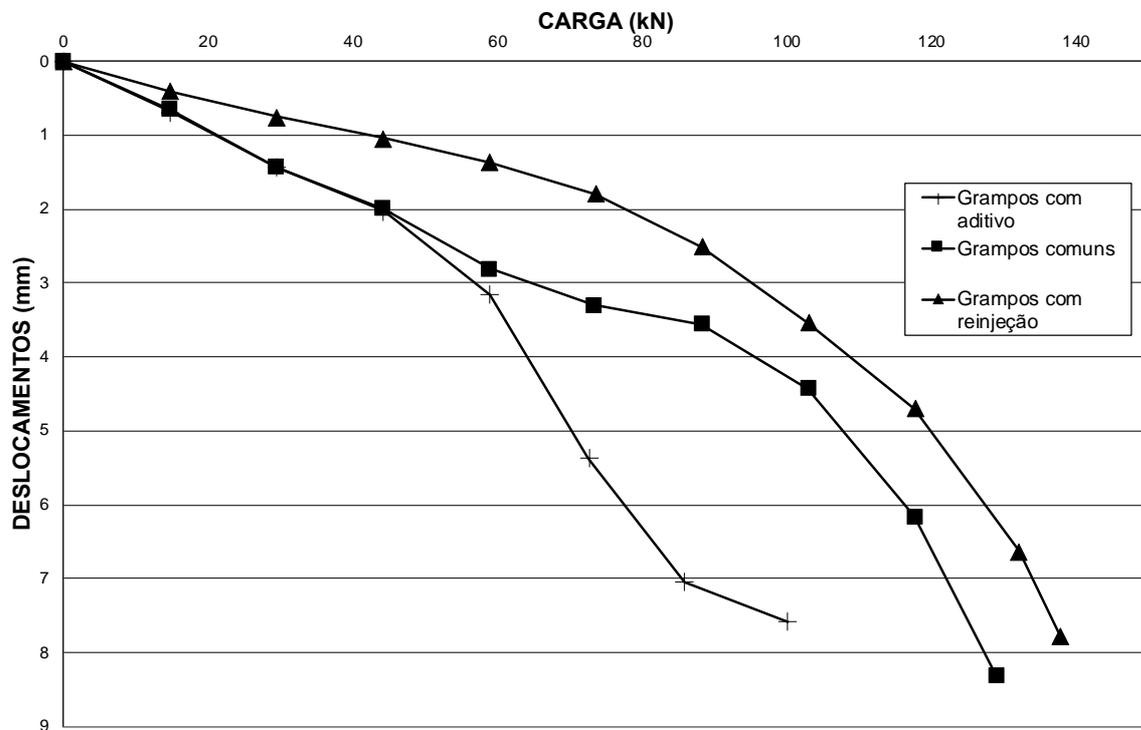


Figura 5.50 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) da média dos ensaios de arrancamento de grampos perfurados com água como fluido de perfuração

Tabela 5.8 – Resultados dos diâmetros, rugosidade, q_s e $q_{s\text{corrigido}}$, para grampos perfurados com água, em que GG é a sigla para grampo comum injetado por gravidade, GA a sigla para grampo com calda de cimento aditivada e GR para grampo executado por meio da reinjeção setorizada

Número do Grampo	Tipo de injeção	Diâmetro médio (cm)	Ângulo de rugosidade médio ($^{\circ}$)	q_s (kPa)	$q_{s\text{corrigido}}$ (kPa)
1	GR	14,39	42,6	278,86	150,03
2	GR	13,94	38,1	289,26	141,70
3	GA	12,80	14,3	176,89	103,65
4	GA	11,78	25,3	212,27	135,14
5	GA	9,77	23,7	149,83	115,02
15	GG	12,41	18	280,94	169,73
16	GG	11,24	35	266,37	177,80
17	GG	12,83	33	273,66	160,00
18	GR	15,31	35,3	295,51	154,02

5.10.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS

A Figuras 5.51 sintetiza a média dos resultados dos ensaios de arrancamento de acordo com o método de perfuração e injeção empregado. A Tabela 5.9 apresenta os dados obtidos na exumação destes grampos, em que GG são grampos comuns injetados por gravidade, GA são grampos injetados por gravidade com adição de aditivo expensor e GR são grampos executados com fase de reinjeção.

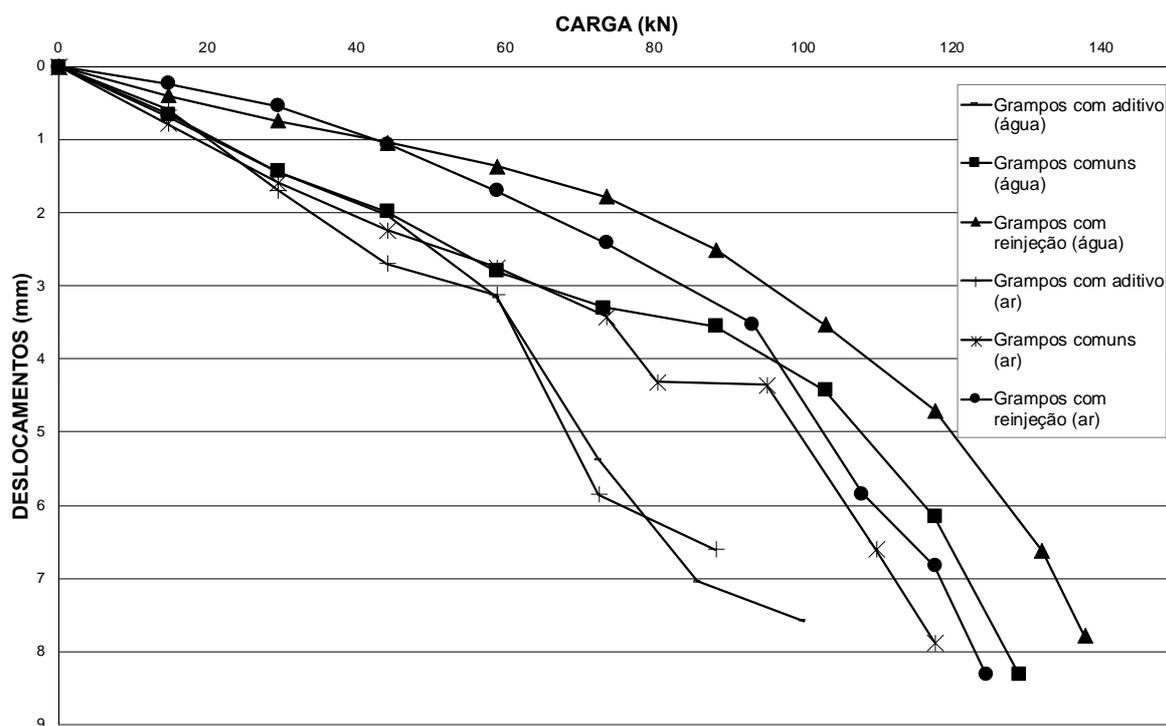


Figura 5.51 - Gráfico carga (kN) vs deslocamentos (mm) da média dos ensaios de arrancamento

Tabela 5.9 – Resultados dos diâmetros, rugosidade, q_s e $q_{s\text{corrigido}}$, para todos os grampos, em que GG é a sigla para grampo comum injetado por gravidade, GA a sigla para grampo com calda de cimento aditivada e GR para grampo executado por meio da reinjeção setorizada

Número do Grampo	Tipo de injeção	Método de perfuração	Diâmetro médio (cm)	Ângulo de rugosidade médio (°)	q_s (kPa)	$q_{s\text{corrigido}}$ (kPa)
1	GR	Água	14,39	42,6	278,86	150,03
2	GR	Água	13,94	38,1	289,26	141,70
3	GA	Água	12,80	14,3	176,89	103,65
4	GA	Água	11,78	25,3	212,27	135,14
5	GA	Água	9,77	23,7	149,83	115,02
6	GR	Ar	11,46	26,7	249,72	163,43
7	GR	Ar	12,19	33,7	264,29	162,61
8	GA	Ar	9,77	19,7	151,92	116,62

9	GA	Ar	10,82	24,1	93,65	64,91
10	GA	Ar	10,19	16,3	195,62	143,98
11	GG	Ar	10,92	41	258,05	177,23
12	GG	Ar	9,45	19,7	249,72	198,19
13	GG	Ar	9,87	18,7	185,21	140,74
14	GR	Ar	12,32	27,3	218,51	133,02
15	GG	Água	12,41	18	280,94	169,73
16	GG	Água	11,24	35	266,37	177,80
17	GG	Água	12,83	33	273,66	160,00
18	GR	Água	15,31	35,3	295,51	154,02

5.11. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse item são analisados os resultados da execução experimental, de forma a averiguar se os valores obtidos dos grampos executados com a reinjeção setorizada são condizentes com o modelo empírico proposto no Capítulo 4, bem como, avaliar qual método executivo de grampo é mais indicado para a argila porosa típica de Brasília. Nessa avaliação foi considerada a exumação dos grampos, por meio da análise da influência do diâmetro médio de cada grampo e do perfil de rugosidade da interface gerado. É importante ressaltar que apesar da obtenção do $q_{s\text{corrigido}}$, o autor recomenda o uso do modelo empírico que considera o diâmetro teórico dos grampos, por ser possível a comparação com o modelo empírico de Ortigão & Palmeira (1997).

5.11.1. ADERÊNCIA AO MODELO EMPÍRICO PROPOSTO

Conforme observado no Capítulo 4, na Eq. 4.3, a resistência ao arrancamento q_s foi relacionada ao número N_{SPT} , relativa ao ensaio SPT. No campo experimental em que os grampos foram executados, tem-se o N_{SPT} médio de 3, com resistência ao arrancamento esperada de 206 kPa. A Figura 5.52 apresenta a curva do modelo empírico comparado com a resistência ao arrancamento dos grampos executados com a reinjeção setorizada, para cada tipo de perfuração empregada.

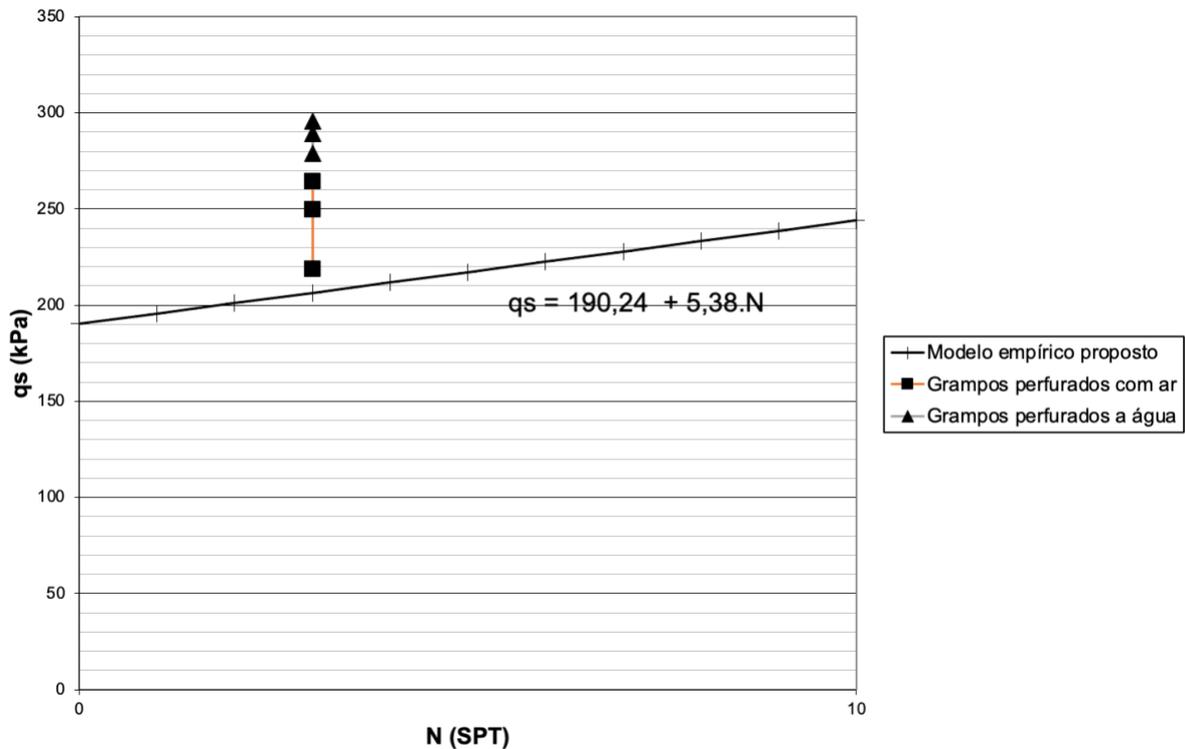


Figura 5.52 - Gráfico N_{SPT} (número de golpes / 30 cm) vs q_s (kPa). O modelo proposto no Capítulo 4 é representado pela curva traçada, considerando N_{SPT} de 0 a 10. O modelo proposto previu, para $N_{SPT} = 3$, 206 kPa, abaixo dos valores encontrados nos ensaios

Conforme observado na Figura 5.52, a curva do modelo empírico proposto comparado com a resistência ao arrancamento dos grampos executados com reinjeção setorizada previu de forma conservadora os resultados, sendo viável sua aplicação para dimensionamento do q_s . Ademais, nota-se que a média da resistência ao arrancamento dos grampos executados com perfuração a água foi 18 % superior à média da resistência ao arrancamento dos grampos executados com perfuração a ar, no caso de grampos GR, indicativo para o uso de perfuração a água em Brasília para grampos executados pelo método da reinjeção setorizada. Essa maior resistência da interface é esperada devido ao fato que a perfuração com água provê maior permeação da calda de cimento no maciço, devido à limpeza não só do furo, mas também do entorno do furo, além da não colmatção das paredes do furo, ocorrência possível no caso de perfuração com ar.

5.11.2. AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EXECUTIVOS PARA A ARGILA POROSA DE BRASÍLIA

Para comparação entre os métodos executivos dos grampos, fez-se comparativos entre mesmas técnicas de injeção para as diferentes técnicas de perfuração e posteriormente a comparação

entre as técnicas de injeção que obtiveram melhores resultados para cada tipo de grampo, já que em todos os casos a perfuração a água obteve resultados superiores.

5.11.2.1. COMPARAÇÃO ENTRE GRAMPOS GG

Para os seis grampos comuns ensaiados na execução experimental, denominados grampos GG nesta tese, a perfuração a água obteve grampos com resistências ao arrancamento ligeiramente superiores à perfuração com ar, conforme observado nos gráficos das Figuras 5.53 e 5.54. No gráfico da Figura 5.53 é possível observar que a média do AMR dos grampos executados a água são ligeiramente superiores aos grampos executados com ar (8%), para os grampos GG executados na argila porosa de Brasília, indicando que a perfuração a ar obtém um perfil de furo contínuo, de menor AMR e possivelmente, gerando menor restrição à dilatação na interface solo-grampo quando do arrancamento, representado pelo menor q_s obtido, para os grampos GG. Como esperado, o diâmetro exumado dos grampos executados com perfuração a água foi maior do que o diâmetro dos grampos exumados executados com perfuração a ar (21%). A Figura 5.55 apresenta a relação diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus), em que houve maior influência do diâmetro que da rugosidade de interface na maior resistência ao arrancamento dos grampos comuns executados com água.

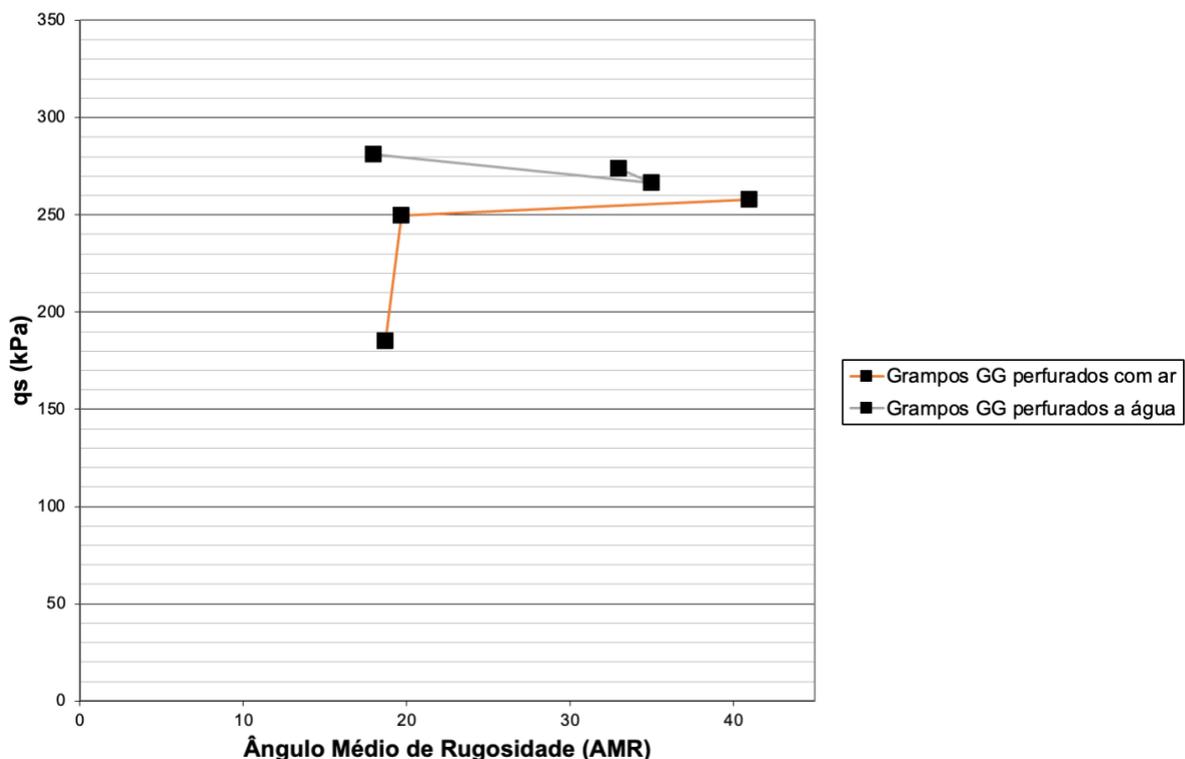


Figura 5.53 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa).

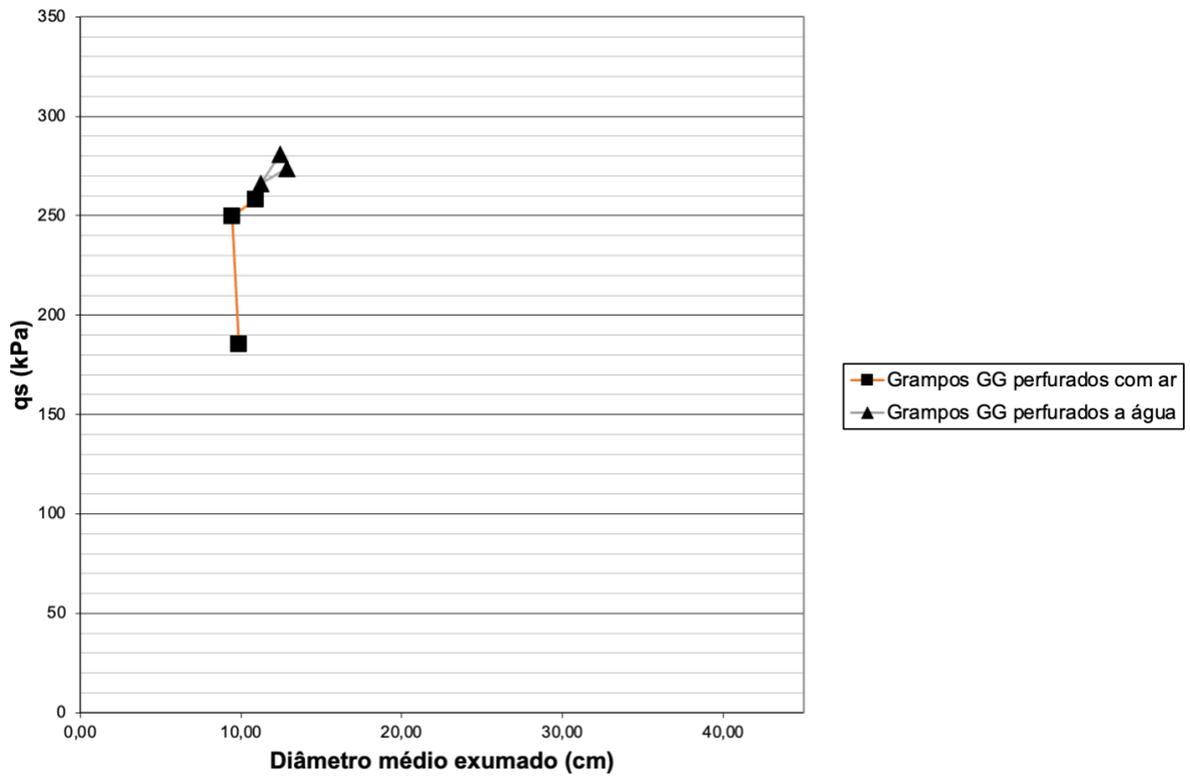


Figura 5.54 - Gráfico Diâmetro médio exumado (\varnothing_{exu} , em cm) vs q_s (kPa).

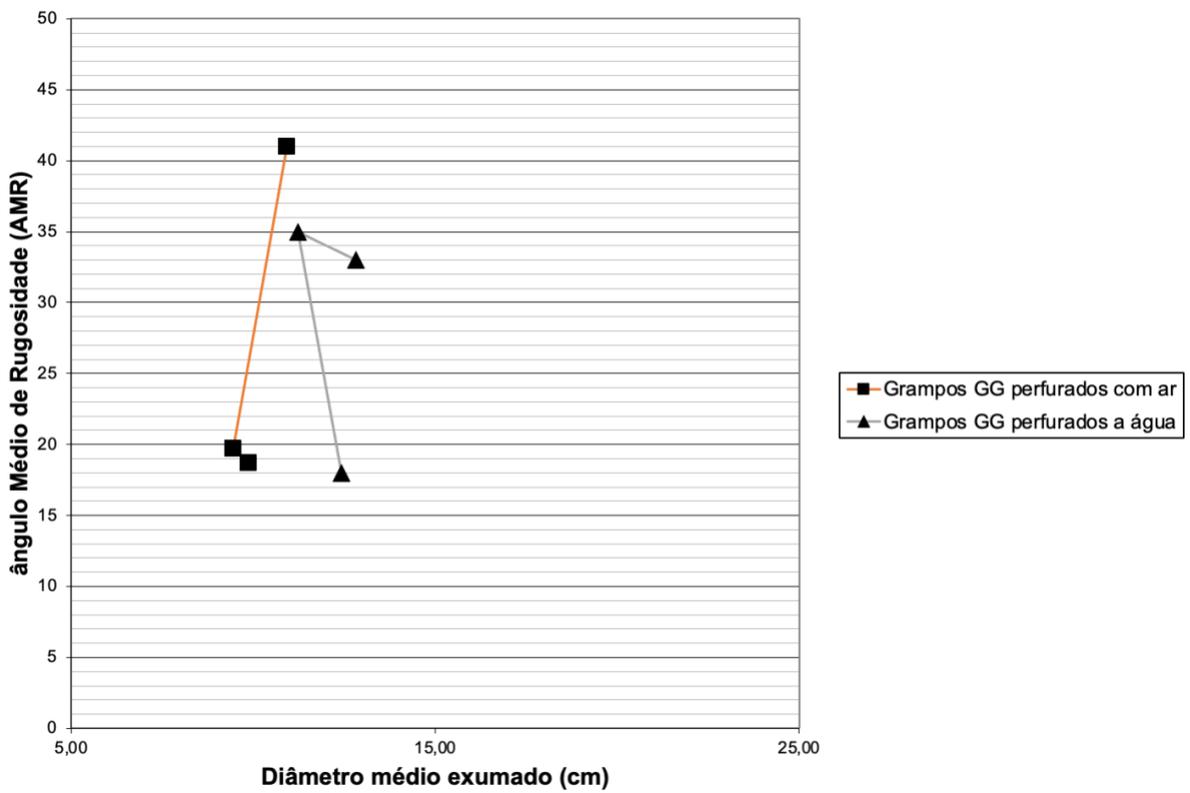


Figura 5.55 - Gráfico Diâmetro médio exumado (\varnothing_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus).

5.11.2.2. COMPARAÇÃO ENTRE GRAMPOS GA

Para os seis grampos executados com calda de cimento aditivada, ensaiados na execução experimental, denominados grampos GA nesta tese, a perfuração a água obteve grampos com resistências ao arrancamento pouco superiores às perfurações com ar, conforme observado nos gráficos das Figuras 5.56 e 5.57. No gráfico da Figura 5.56 é possível observar que a média do AMR dos grampos executados a água são ligeiramente superiores aos grampos executados com ar (5%), para os grampos GG executados na argila porosa de Brasília, indicando que a perfuração a ar obtém um perfil de furo contínuo, de menor AMR e possivelmente, gerando menor restrição à dilatância na interface solo-grampo quando do arrancamento, representado pelo menor q_s obtido, para os grampos GA, coincidente ao encontrado para grampos GG. Como esperado, o diâmetro exumado dos grampos executados com perfuração a água foi maior do que o diâmetro dos grampos exumados executados com perfuração a ar (12%). A Figura 5.58 apresenta a relação diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus), em que houve maior influência do diâmetro que da rugosidade de interface na maior resistência ao arrancamento dos grampos GA executados com água.

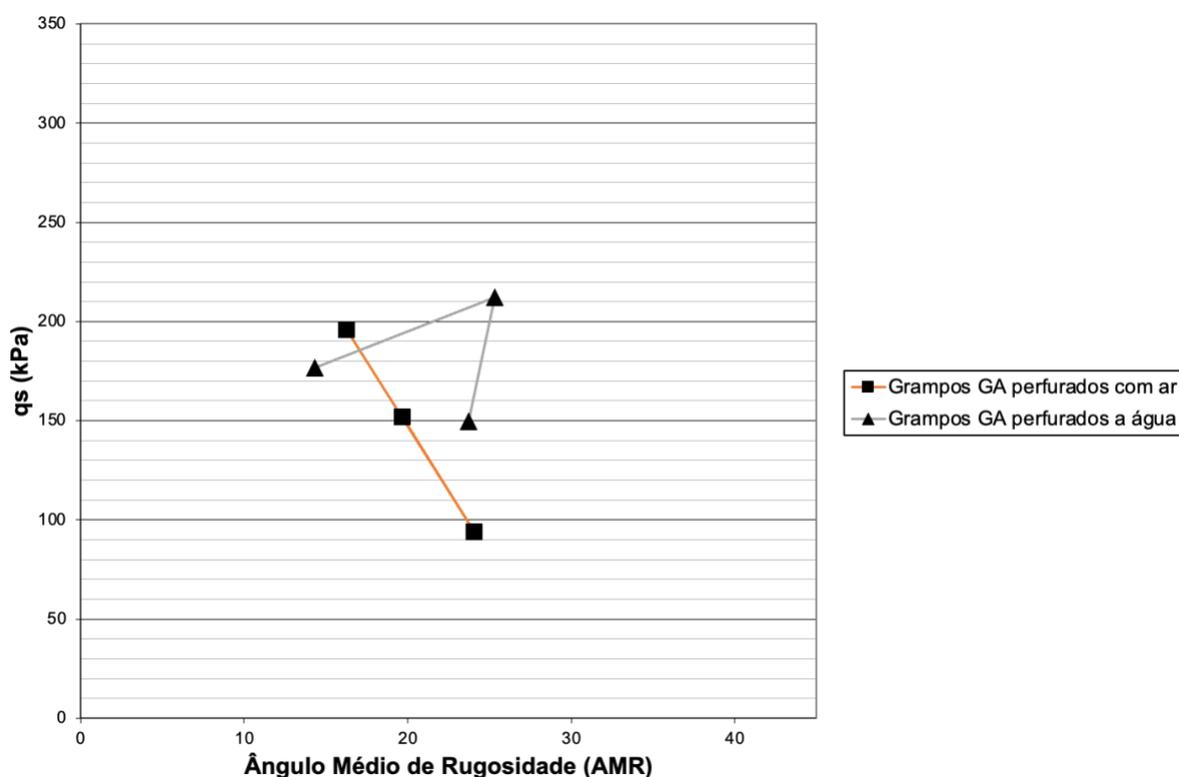


Figura 5.56 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa).

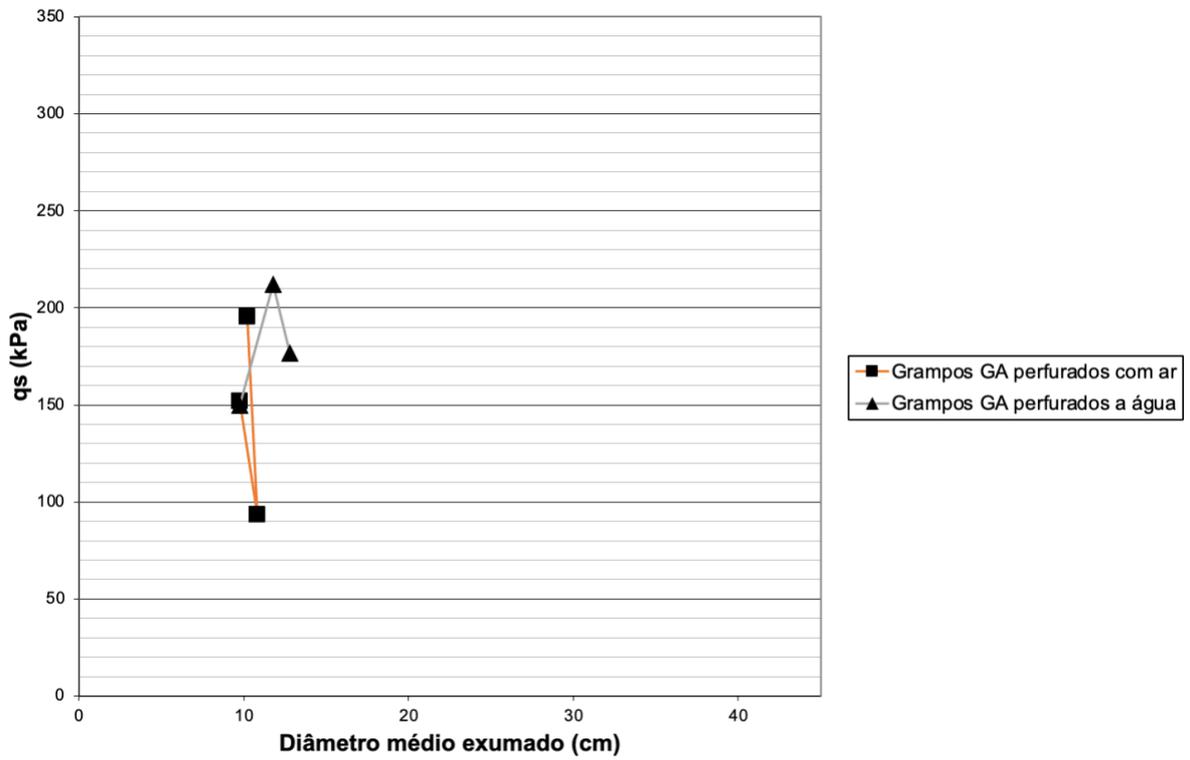


Figura 5.57 - Gráfico Diâmetro médio exumado (\varnothing_{exu} , em cm) vs q_s (kPa).

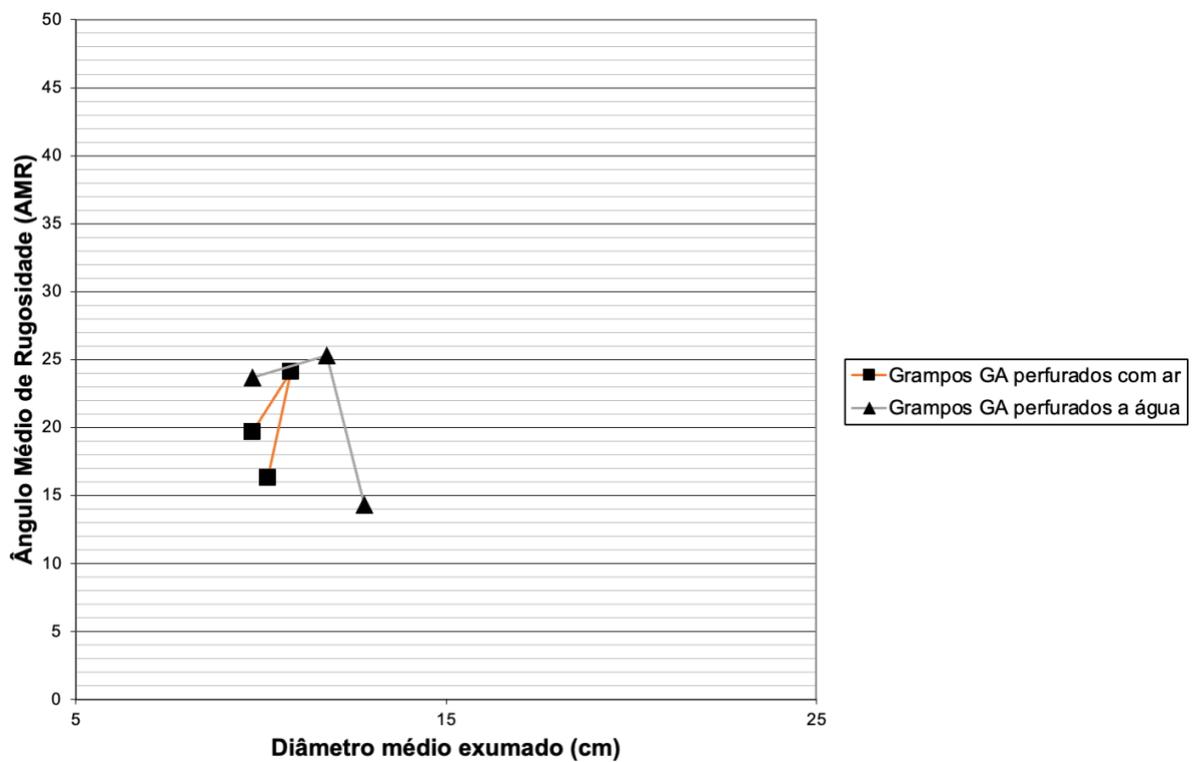


Figura 5.58 - Gráfico Diâmetro médio exumado (\varnothing_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus).

5.11.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE GRAMPOS GR

Para os seis grampos executados com reinjeção setorizada, ensaiados na execução experimental, denominados grampos GR nesta tese, a perfuração a água obteve grampos com maiores resistências ao arrancamento, conforme observado nos gráficos das Figuras 5.59 e 5.60. A interação superior entre o grampo e o solo nos grampos perfurados a água foi possível observar também nos resultados dos AMR dos grampos executados com a reinjeção setorizada, com ângulos de rugosidade da interface dos grampos perfurados a água 32% superiores aos ângulos de rugosidade de interface dos grampos perfurados a ar. O diâmetro médio exumado foi 21% superior nos grampos perfurados a água, indicando uma maior influência do AMR do que da melhora do diâmetro médio exumado para os grampos executados com reinjeção setorizada em Brasília.

A Figura 5.61 apresenta a relação diâmetro médio exumado (\varnothing_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus), em que houve maior influência da rugosidade da interface que do diâmetro na maior resistência ao arrancamento dos grampos GR executados com água.

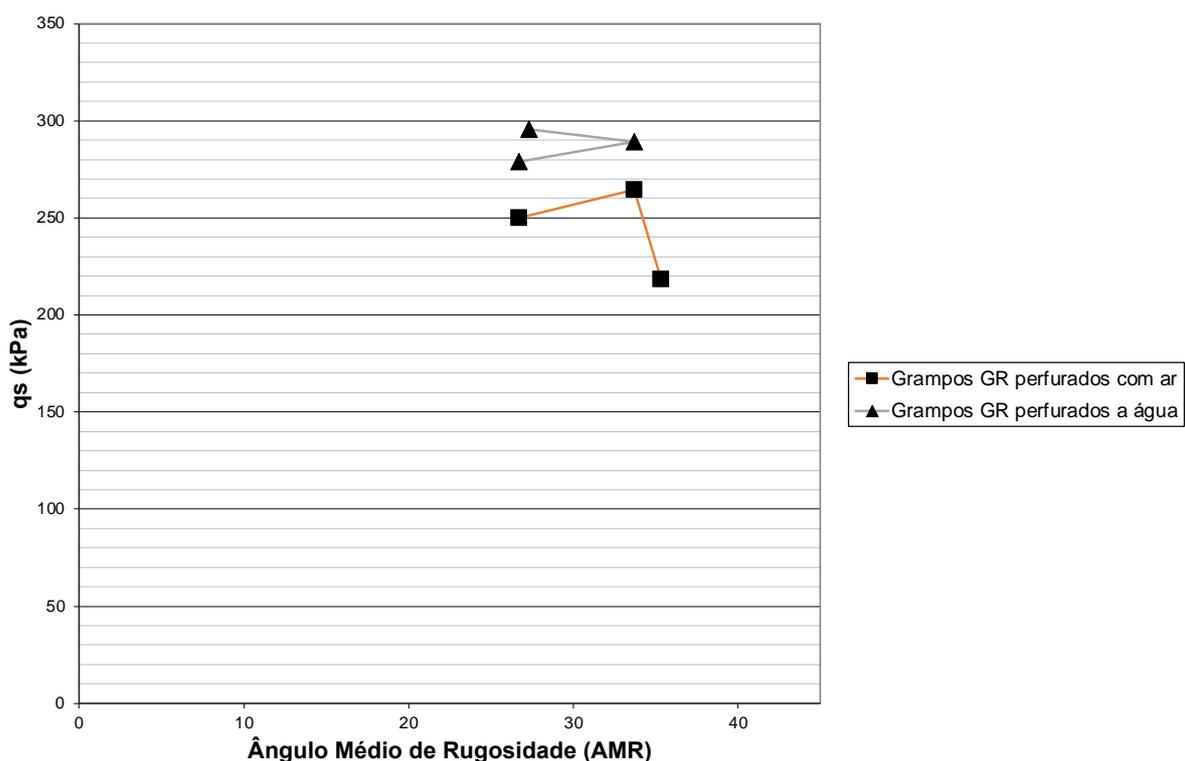


Figura 5.59 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa) para grampos GR.

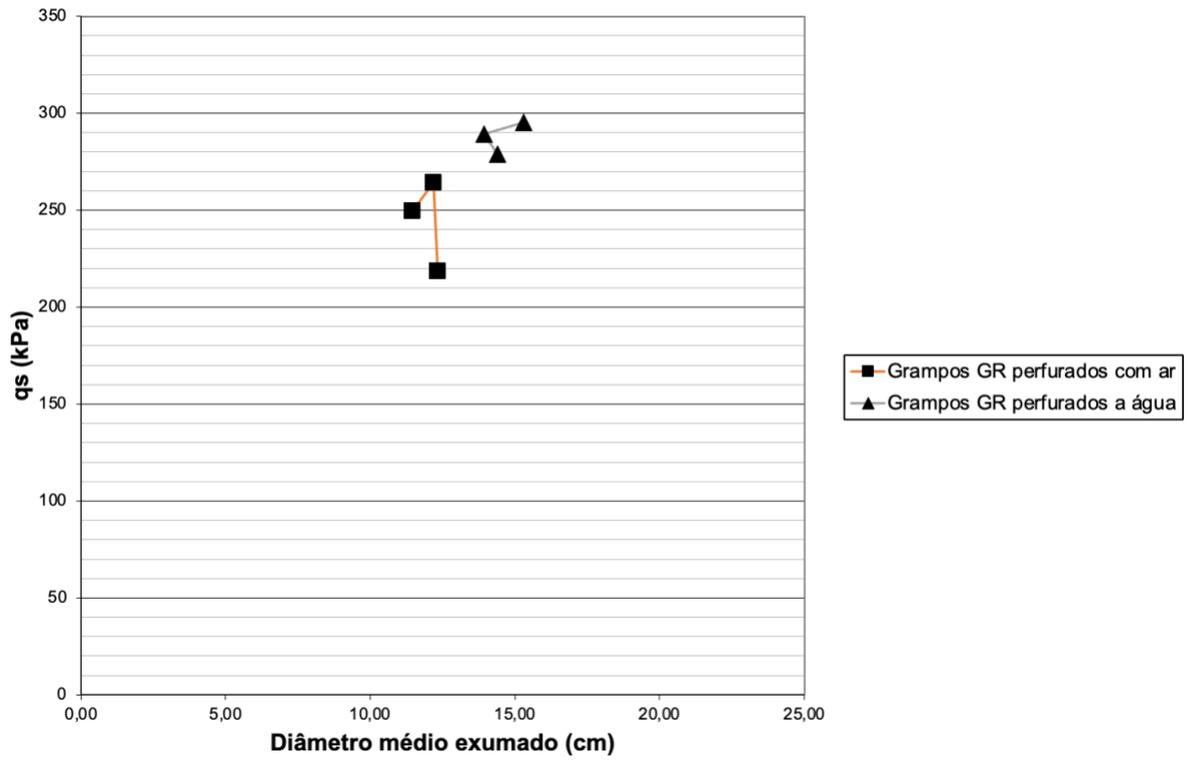


Figura 5.60 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs q_s (kPa), para Grampos GR.

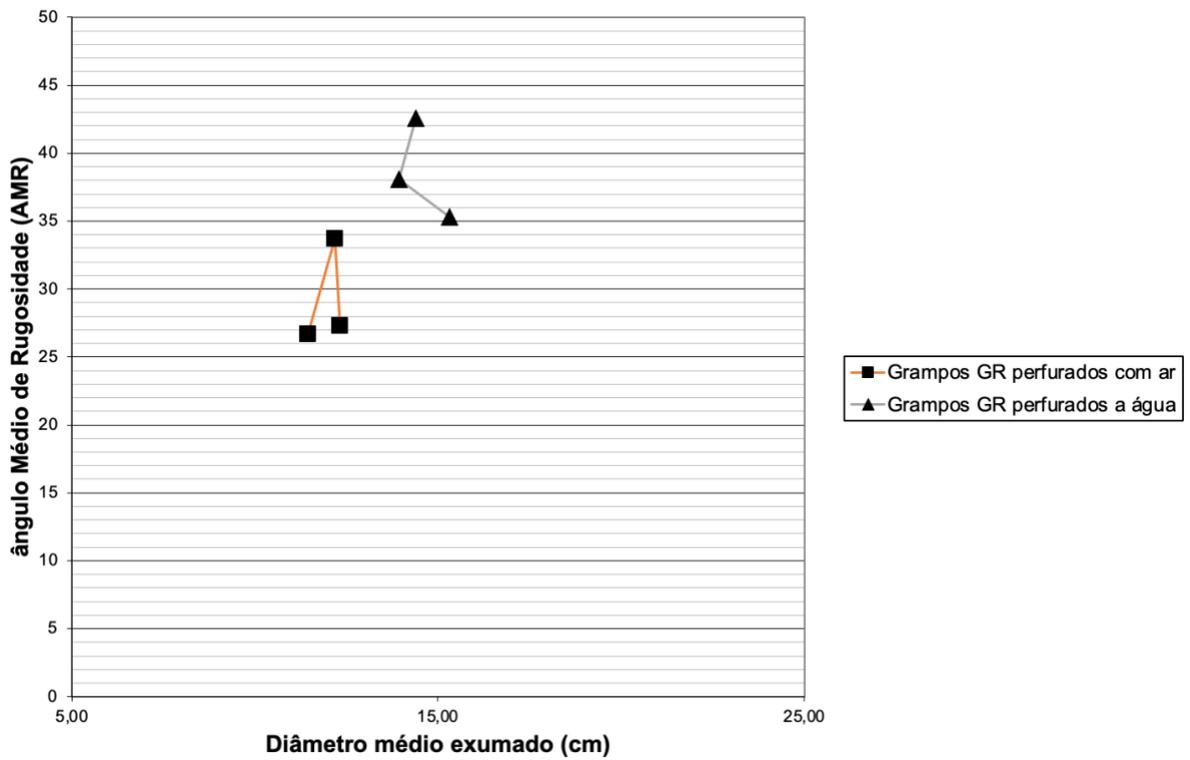


Figura 5.61 - Gráfico Diâmetro médio exumado (ϕ_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus), para grampos GR.

5.11.2.4. COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS DE INJEÇÃO PARA A ARGILA POROSA DE BRASÍLIA

Nos ensaios de arrancamento verticais foi possível observar que a perfuração com água, para grampos GG, grampos GA e grampos GR obteve resultados superiores de resistência ao arrancamento. Parte-se da hipótese que esses melhores resultados advêm da desobstrução de poros no entorno do furo durante a limpeza provida durante a utilização de método de perfuração à água como fluido de perfuração, de forma que exista meio para a calda fluir e preencher quaisquer vazios ou lacunas no raio de ação possível, dependente da coesão e viscosidade da calda de cimento (Barbosa, 2018), levando a um maior diâmetro, um AMR superior e, possivelmente, a uma melhor interação solo-grampo. Entretanto, houve diferenças significativas entre os diferentes tipos de grampos ensaiados, de acordo com a técnica de injeção, como pode ser observado nas Figuras 5.62 a 5.64.

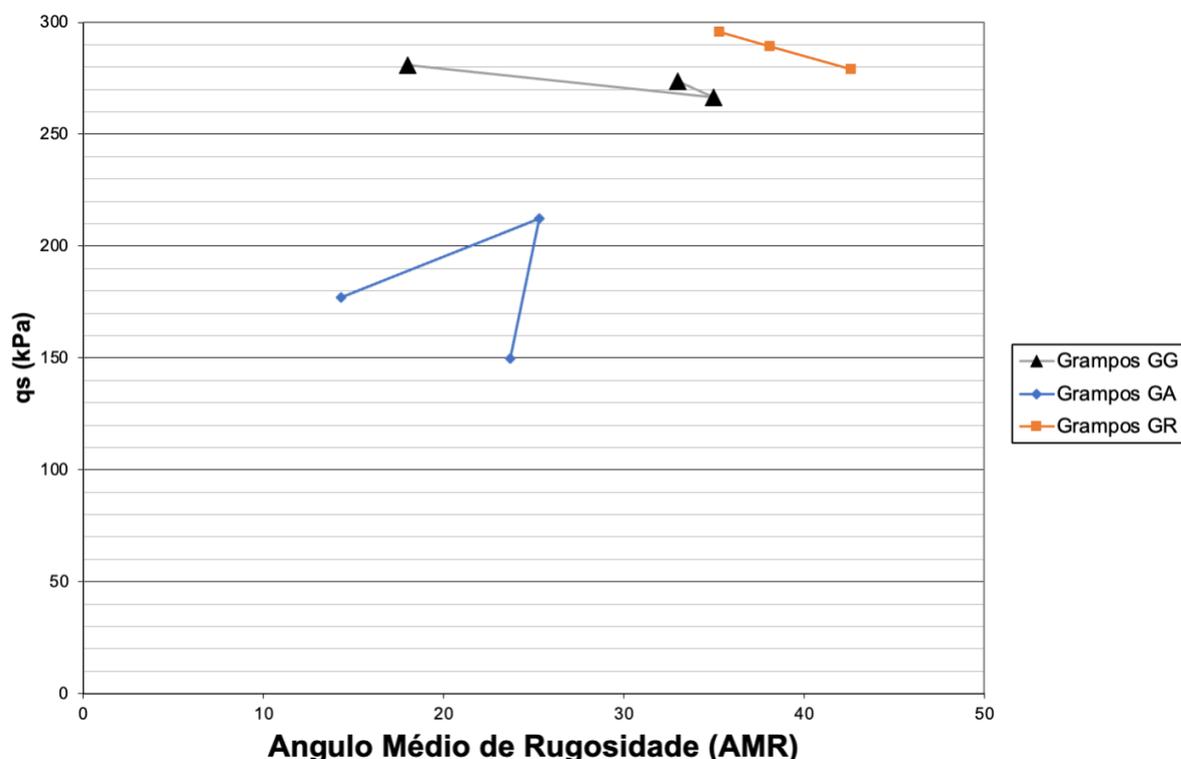


Figura 5.62 - Gráfico Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus) vs q_s (kPa) para grampos GG, GA e GR perfurados à água.

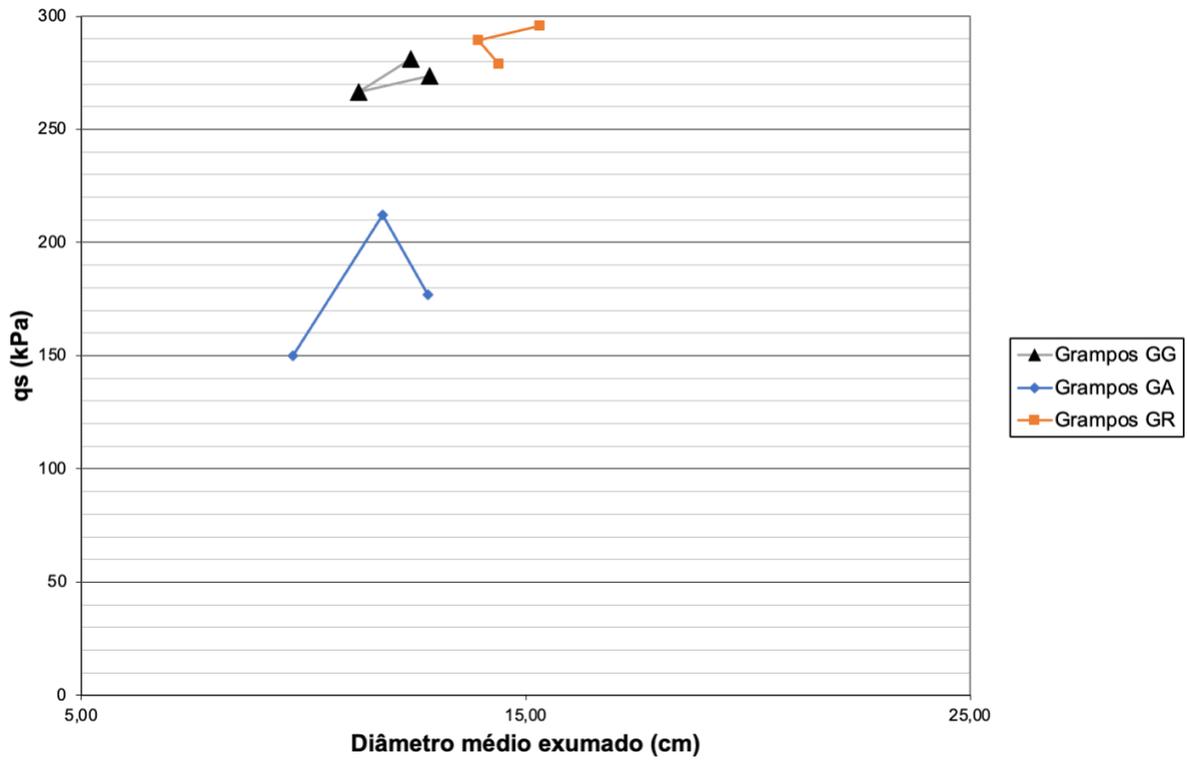


Figura 5.63 - Gráfico Diâmetro médio exumado (\varnothing_{exu} , em cm) vs q_s (kPa), para grampos GG, GA e GR perfurados à água.

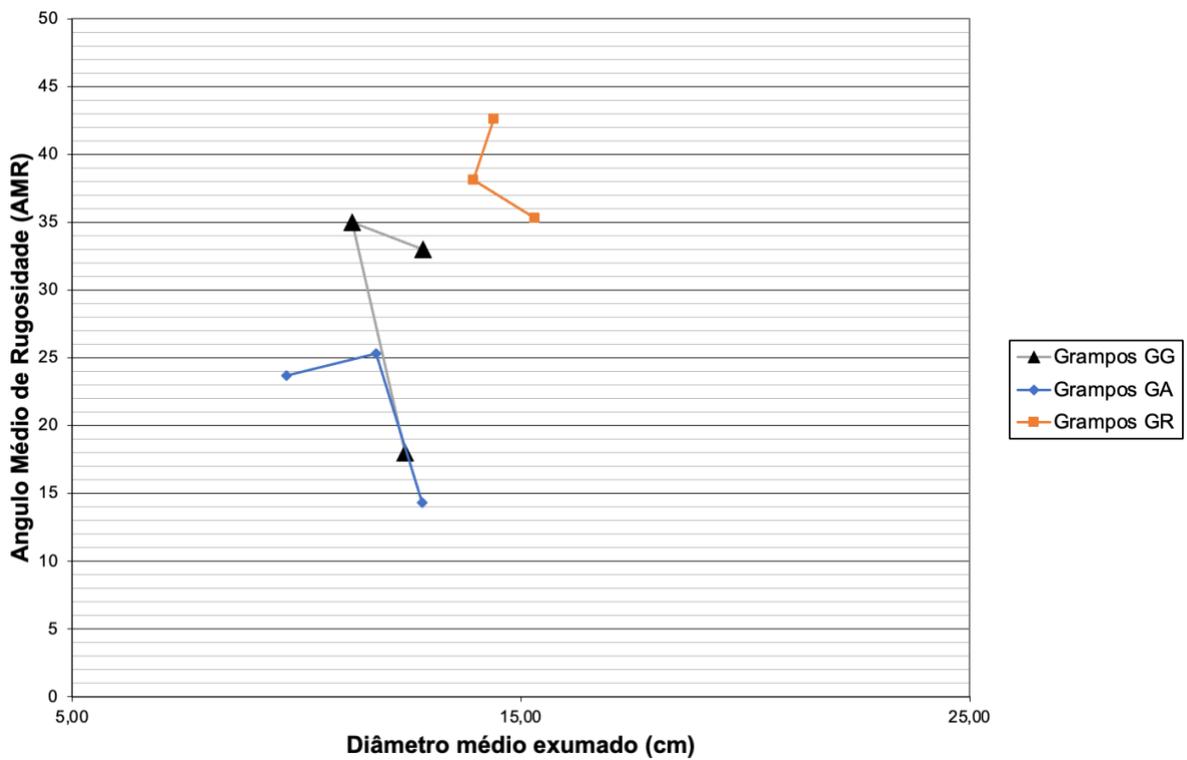


Figura 5.64 - Gráfico Diâmetro médio exumado (\varnothing_{exu} , em cm) vs Ângulo Médio de Rugosidade (AMR, em graus), para grampos GG, GA e GR perfurados à água.

Pela análise das Figura 5.62 e 5.63 observou-se que os melhores resultados quanto à resistência ao arrancamento foram dos grampos GR, executados com reinjeção. A média da resistência ao arrancamento foi 5% superior quando comparada aos grampos GG e 60% superior quando comparada aos grampos GA. Nota-se que, contrariamente aos estudos de Miranda (2019), a resistência ao arrancamento dos grampos GG foi significativamente superior aos resultados dos grampos GA, com resultados 52% superiores, mesmo com diâmetro médio exumado apenas 6% superior. Neste caso, pode-se observar maior influência do AMR na resistência ao arrancamento, em que este foi 36% superior, o que implica nas limitações que a Eq. 2.1, clássica da resistência ao arrancamento, possui na consideração da rugosidade no resultado final dos grampos, influência descrita na tese de Hong (2011).

Por conta da diferença entre os grampos GG e GA no que tange diâmetro médio exumado ser significativamente menor que a variação entre as resistências ao arrancamento, comparou-se, adicionalmente, a resistência à compressão simples das caldas de cimento, comum e aditivada, vista na Tabela 5.5, em que foi observada resistência 16% superior da calda de cimento comum em relação à resistência da calda de cimento aditivada, o que corrobora Moosavi *et al.* (2005), que encontraram que caldas de cimento de pior resistência à compressão simples irão gerar menores quantidades de dilatação, bem como resistência ao arrancamento mais baixas. Similarmente a este estudo, houve uma relação exponencial entre a resistência à compressão à calda de cimento e a resistência ao arrancamento, dado que nos estudos de Moosavi *et al.* (2005) uma variação de 33% na resistência à compressão simples nas caldas de cimento gerou diferenças de 77% na resistência ao arrancamento. Neste estudo esta diferença de 16% gerou uma variação de 52% na resistência ao arrancamento, que corrobora a importância do controle de qualidade das caldas de cimento injetadas e da averiguação prévia à obra para que os efeitos da aditivação não tenham efeito contrário ao almejado.

Entre os grampos GG e grampos GR, que utilizaram a mesma calda de cimento, a diferença na resistência ao arrancamento entre as duas técnicas de injeção foi inferior à esperada, com resultados dentro do desvio padrão, dado que os grampos GR tiveram um diâmetro médio exumado 20% superior e um AMR 35% superior, mas com uma melhora de apenas 5% na resistência ao arrancamento. Entretanto, conforme modelo empírico de Ortigão & Palmeira (1997), vista na Eq. 4.2, a resistência ao arrancamento esperada dos grampos GG seria de 133 kPa, inferior inclusive à obtida nos grampos GA.

A diferença menor que a esperada pode ser explicada pelo fato que na execução experimental de grampos verticais os grampos GR encontram resultados similares e até inferiores aos

grampos sub-horizontais, devido à pressão de injeção ser superior ao confinamento do furo independentemente da orientação do grampo, enquanto nos grampos GG e GA a injeção por gravidade é facilitada, feita do fundo do furo até o topo, diminuindo as influências deletérias de desconfinamento local da massa do solo, com menor influência da plastificação progressiva e dos deslocamentos induzidos em direção ao interior do furo. A estabilidade dos furos foi observada na execução experimental, em que o furo permaneceu íntegro, da execução dos grampos até aos ensaios de arrancamento.

5.12. CONCLUSÕES

Com base nos dados da execução experimental, é possível afirmar que, para a argila porosa de Brasília, o modelo empírico proposto no Capítulo 4 é aderente. Notadamente, a perfuração com água obteve melhores resultados para todos os tipos de técnicas de injeção estudadas na execução experimental, e é recomendada para a execução de grampos no solo de Brasília, especialmente dado o maior diâmetro médio gerado. Ademais, observou-se que o uso de aditivo expensor de calda de cimento não é recomendado para projetos em solo grampeado em Brasília, em que a resistência na interface solo-grampo é o fator de maior relevância, devido a esse uso do aditivo ter possível diminuição da resistência à compressão simples das caldas de cimento, bem como resultar em interfaces menos rugosas.

A hipótese que uma interface solo-grampo rugosa e de maior diâmetro é a mais indicada para aplicações de solo grampeado, foi confirmada, dado que esta pode fornecer uma maior resistência ao arrancamento de grampos. Nos ensaios executados, percebeu-se que apesar da Eq. 2.1 fornecer base teórica capaz de representar a resistência ao arrancamento de grampos, relacionando q_s com a força aplicada para um dado diâmetro e área superficial do grampo, indicando que maiores diâmetros resultem em maiores resistências ao arrancamento, a rugosidade e qualidade da interface solo-grampo precisa ser considerada. Esta observação fez-se evidente na comparação entre os grampos GA e grampos GG, em que a pequena diferença entre diâmetros médios não explicou a significativa diferença na resistência ao arrancamento q_s , com necessidade de uso dos dados dos ângulos médios de rugosidade (AMR) e dos resultados da resistência à compressão simples das caldas de cimento para explicar a diferença. É possível também concluir que os grampos GR, por mais que recomendados pelo autor desta tese devido a possibilidade de garantir de melhores resultados em campo, com comportamento

mecânico mais previsível, conforme observado nos gráficos carga vs deslocamento, no que tange a resistência ao arrancamento, rugosidade da interface e diâmetro, não são os grampos mais econômicos para o solo de Brasília, dado que os grampos GG também obtiveram bons resultados e tem execução mais rápida por não apresentarem o passo de reinjeção. A execução experimental de forma vertical também pode ter sido um fator para os resultados da resistência ao arrancamento dos grampos GG e GA, mas como isso não ficou claro para os grampos GR, fez-se ensaios verticais em outra região do Brasil para auferir se, para os grampos GR, a execução de grampos verticais é eficaz para ensaios preliminares de calibração da resistência ao arrancamento.

6. ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS E USO DO MODELO EMPÍRICO PROPOSTO EM PROJETOS E OBRAS EXECUTADAS COM GRAMPOS GR

6.1. INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é descrita a execução de ensaios de arrancamento verticais em outra região do País, especificamente o Pará, local escolhido devido ao alto número de obras de contenção em solo grampeado atualmente sendo executadas em mineradoras da região de Parauapebas e Marabá. Comparou-se os resultados obtidos nos ensaios de arrancamento verticais com os ensaios de arrancamento sub-horizontal de forma a verificar a hipótese que, para grampos executados com a reinjeção setorizada, denominados grampos GR, haveria segurança no uso de ensaios de arrancamento vertical como alternativa de ensaio prévio. Ademais, buscou-se exemplificar a aplicabilidade dos resultados encontrados nos Capítulos 4 e 5 em projetos reais de contenções em solo grampeado executado com a técnica de reinjeção setorizada.

6.2. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS E SUB-HORIZONTAIS PARA GRAMPOS GR

Ensaio de arrancamento verticais e sub-horizontais podem apresentar resultados semelhantes no arrancamento de solo grampeado porque ambos os ensaios são projetados para medir a qualidade da interface grampo-solo. A diferença entre os ensaios é a orientação do grampo em relação à superfície do solo. Em um ensaio de arrancamento vertical, o grampo é orientado perpendicularmente à superfície do solo, enquanto em um ensaio de arrancamento sub-horizontal, o solo grampeado é orientado paralelamente à superfície do solo. Apesar dessa diferença, foi observado no Capítulo 5 que para grampos GR, devido às pressões de injeção serem superiores às tensões verticais no grampo em ambas as orientações, houve similitude aos valores previstos pelo modelo empírico do Capítulo 4. Dessa forma, em obras de contenção no Pará, foram feitos ensaios de arrancamento verticais e sub-horizontais em mesmo material, de forma a validar os ensaios de arrancamento verticais para os grampos GR.

6.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ENSAIO

Os ensaios foram executados na Mina do Salobo, em Marabá/PA, em dois taludes distintos, em que foi aplicado grampos do tipo GR. Cada talude foi executado com área mínima de 4500 m², com mínimo de 720 grampos. Devido a cláusulas de confidencialidade, imagens ou informações que poderiam identificar a localidade dos taludes não podem ainda ser apresentadas. Apenas a descrição do solo em que os grampos foram executados pode ser exposta nesta tese, bem como as características dos materiais, aparato de ensaio e resultados..

O primeiro talude consistiu em contenção em solo grampeado com paramento em concreto projetado executado majoritariamente em solos silto arenosos residuais de gnaiss, com número de golpes N_{SPT} do local do ensaio igual a 8. Já o segundo talude consistiu em contenção em solo grampeado com paramento em tela flexível executado em solos silto argilosos residuais, com número de golpes N_{SPT} do local do ensaio igual a 14.

6.2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Foi utilizado equipamento de perfuração a água, idêntico ao descrito no Item 5.5.1.1. e visto na Figura 5.7. Para a injeção da bainha e reinjeção setorizada, utilizou-se equipamento elétrico idêntico ao descrito no Item 5.5.2. e visto na Figura 5.12.

6.2.3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

6.2.3.1. CARACTERIZAÇÃO DA CALDA DE CIMENTO

Para a calda de cimento, foi utilizado cimento CII-E-32, com características técnicas conforme Tabela 6.1. Esse cimento foi utilizado pela disponibilidade local e pelo maior tempo de pega, importante para climas como o da região de Marabá/PA. Tanto para a injeção como para a reinjeção foi utilizado fator a/c de 0,5, de forma a simplificar o entendimento dos profissionais responsáveis pela injeção e reinjeção dos grampos, denominados injetadores.

Tabela 6.1 – Características da calda de cimento

Tipo de aglutinante	Cimento (CII-E-32)
Fator a/c em peso	0,5
pH	7,9
Exsudação (%)	1,87

Peso específico (kN/m³)	16,8
Coesão (Pa)	6,5
Viscosidade (mPa.s)	121
Resistência à compressão (MPa)	37,35 ± 2,92

6.2.3.2. CARACTERIZAÇÃO DA BARRA DE AÇO

Para a barra de aço, analogamente ao observado no Item 5.6.2, utilizou-se barra de aço de 25 mm, com a única diferença sendo o fabricante. A Tabela 6.2 apresenta as características da barra de aço, obtidas do catálogo do fabricante Arcelor Mittal.

Tabela 6.2 – 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 Escoamento (f_{yk}) (MPa)	500
Limite de Resistência (MPa)	540
Alongamento em 10Ø (%)	8
Seção nominal (mm²)	490,9
Limite de carga (kN)*	213

* Considerando coeficiente parcial de 1,15

6.2.4. 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 6.1 e 6.2. Fotos

esquemáticas da execução dos ensaios de arrancamento podem ser observadas nas Figuras 6.3 a 6.6.

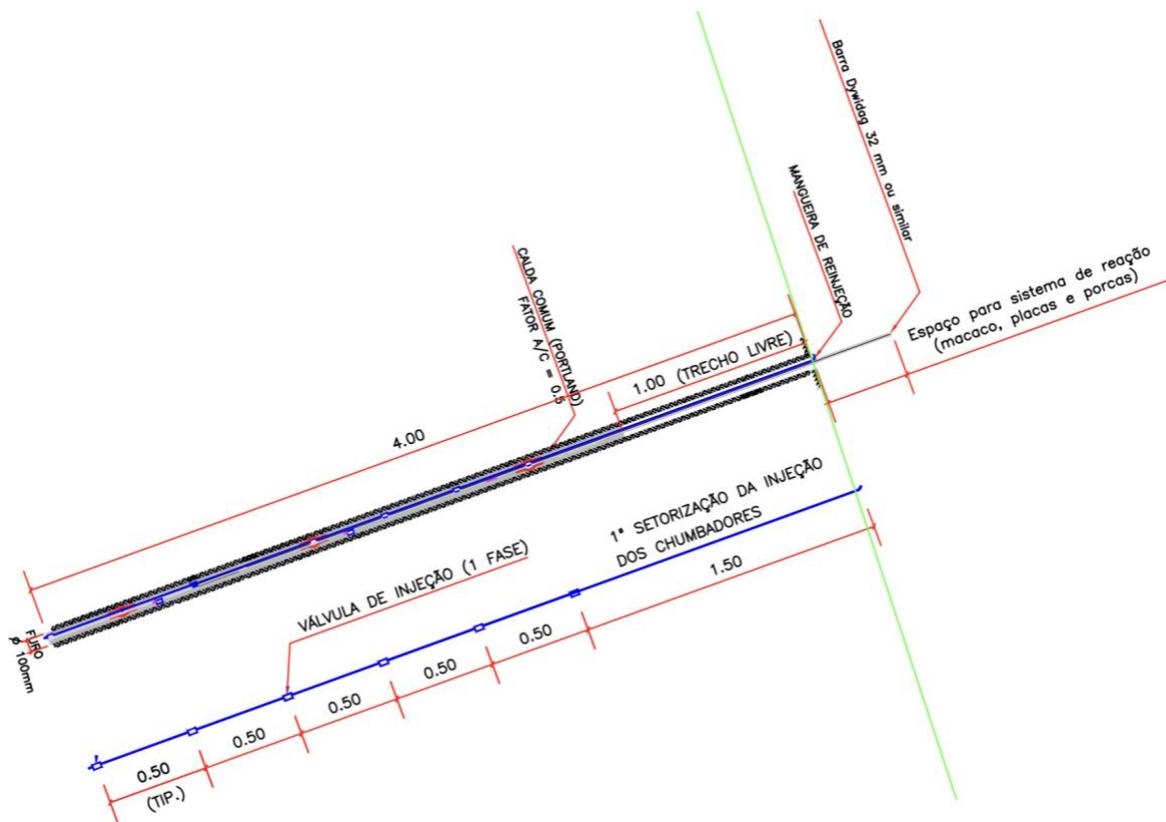


Figura 6.1 – Croqui esquemático de ensaio de arrancamento sub-horizantal, em que o grampo foi instalado com 15 graus de inclinação. A barra de aço tem 5,0 m no total, com 3,0 m de trecho ancorado e 2,0 m de trecho livre, 1,0 m interno ao maciço e 1,0 m externo, a fim de que haja espaço suficiente para o sistema macaco, placas, porcas e célula de carga

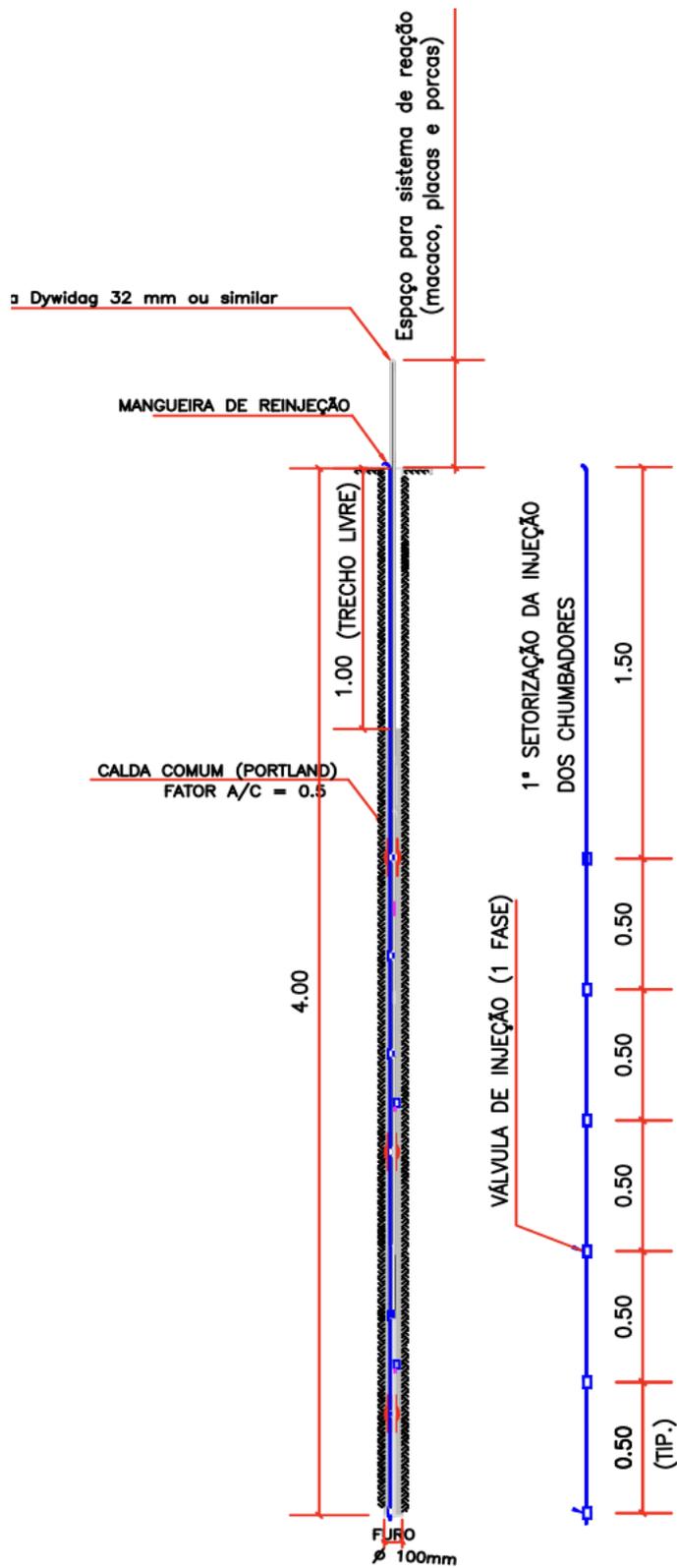


Figura 6.2 – Croqui esquemático de ensaio de arrancamento vertical. A barra de aço tem 5,0 m no total, com 3,0 m de trecho ancorado e 2,0 m de trecho livre, 1,0 m interno ao maciço e 1,0 m externo, a fim de que haja espaço suficiente para o sistema macaco, placas, porcas e célula de carga



Figura 6.3 – Montagem de ensaio de arrancamento sub-horizontal no talude 1



Figura 6.4 - Montagem de ensaio de arrancamento vertical no talude 1



Figura 6.5 - Montagem de ensaio de arrancamento sub-horizontal no talude 2



Figura 6.6 - Montagem de ensaio de arrancamento vertical no talude 2

6.2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.2.5.1. 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-horizontal, em arranjo conforme observado nas Figuras 6.3 e 6.4. A Tabela 6.3 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. 4.3 era de 233 kPa.

Tabela 6.3 – 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. 4.3. 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. 4.3. 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.

6.2.5.2. 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 nas Figuras 6.5 e 6.6. A Tabela 6.4 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. 4.3 era de 266 kPa.

Tabela 6.4 – 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. 4.3. 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. 4.3. 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.

6.2.5.3. CONCLUSÕES

Para que seja viável previamente à execução das contenções em solo grampeado a previsão da resistência ao arrancamento almejada, é necessário que exista um modelo empírico capaz de prever, de forma conservadora, os resultados desse parâmetro. Coincidentemente ao observado no Capítulo 5, o modelo empírico proposto no Capítulo 4, também foi eficaz na previsão conservadora da resistência ao arrancamento dos grampos nos Taludes 1 e 2. Para o Talude 2, a proximidade dos resultados sugere que para maiores N_{SPT} é importante a aplicação de fator de segurança parcial aos resultados encontrados no modelo empírico da Eq. 4.3.

Adicionalmente, nesses taludes, validou-se a hipótese que os ensaios de arrancamento verticais apresentam alternativa prévia confiável para os ensaios de arrancamento de grampos GR. Com essa validação, a aferição da real resistência ao arrancamento fica facilitada em projetos em que não exista possibilidade prévia de escavação e acesso, antecipando o marco temporal da verificação da resistência ao arrancamento de projeto e possivelmente gerando execuções mais assertivas e econômicas.

6.3.IMPACTO DO USO DO MODELO EMPÍRICO E DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO VERTICAIS

Um projeto geotécnico, como o projeto de contenções em solo grampeado, deve comunicar as condições do local da obra, informações de construção e detalhar o projeto suficientemente de forma que seja possível a interpretação pelo proprietário do projeto ou ao representante do proprietário. É uma parte essencial do processo de construção e é usado na fase de projeto, na fase de construção e após a construção, caso existam reclamações.

Segundo Briaud (2013b), o projeto geotécnico deve se basear em oito fatores:

1. Resumo de todos os dados de investigação do local, incluindo camadas, condições das águas subterrâneas e variabilidade com base em sondagens;
2. Interpretação geológica;
3. Resultados de ensaios in situ;
4. Resultados de exames laboratoriais;
5. Interpretação e análise dos dados de subsuperfície;
6. Análises preliminares;

7. Julgamento e recomendações de engenharia, incluindo soluções para possíveis problemas;
8. Disposições especiais recomendadas e condições limitantes.

6.3.1. RECOMENDAÇÕES DESTA TESE PARA PROJETOS DE SOLO GRAMPEADO

Para o autor, é possível englobar os oito fatores recomendados por Briaud em quatro etapas: a etapa de pesquisa, etapa de verificações simples, etapa de verificações finais e etapa de revisão obrigatória posterior. Além dessas quatro etapas, é necessário o acompanhamento da performance por meio de acompanhamento técnico de obra (ATO), que tenha ligação direta com a projetista do projeto executivo.

6.3.1.1. ETAPA DE PESQUISA

Nesta etapa, engloba-se os cinco primeiros fatores elencados por Briaud (2013b), de resumo de todos os dados de investigação do local, incluindo camadas, condições das águas subterrâneas e variabilidade com base em sondagens, interpretação geológica, resultados de ensaios in situ e resultados de exames laboratoriais, caso existam, e a interpretação e análise dos dados de subsuperfície. Reforça-se que na busca dos dados de investigação do local é de suma importância averiguar experiências passadas na região e do maciço em questão.

A inserção de profissionais que já atuaram no mesmo local em que será realizada a contenção é uma alternativa importante, dado que as sondagens e ensaios mapeiam apenas porção da geologia local, em que descontinuidades, variação do lençol freático e condições pouco usuais, como bolsões de argila mole e expansividade do maciço, podem não ser passíveis de inferência apenas via sondagens.

Com a finalização da etapa de pesquisa é possível a delimitação das soluções a serem escolhidas na etapa de verificações simples.

6.3.1.2. ETAPA DE VERIFICAÇÕES SIMPLES

Após a concepção da obra, com sua etapa de pesquisa finalizada, é possível realizar análises preliminares, de forma a observar pelas análises de estabilidade do talude natural possíveis arranjos dos grampos, bem como dos seus comprimentos recomendados. Nesse passo, em que a resistência ao arrancamento q_s é o parâmetro determinante do comprimento dos grampos, o modelo empírico proposto na Eq. 4.3 pode ser utilizado como dado de entrada nos programas de estabilidade de taludes que se baseiam no método de equilíbrio limite, como Slope W (Geostudio, 2018) e Slide (Rocscience, 2020), com apropriado fator de segurança. Para a

estimativa com base nessa correlação, como em outras correlações empíricas, o fator de segurança é determinado considerando diversos aspectos, como a criticidade da contenção, o nível de tolerância ao risco e o nível de incerteza associado à sondagem fornecida. Em projetos básicos geotécnicos, na experiência do autor, este fator de segurança quanto o q_s é de 1,5 a 3, mesmo após verificação da resistência ao arrancamento *in situ*.

6.3.1.3. ETAPA DE VERIFICAÇÕES FINAIS

Após as verificações simples, em que análises preliminares indicaram os arranjos potenciais dos grampos, as recomendações finais de engenharia e os julgamentos podem ser feitos. Nesta etapa pode-se fazer análises numéricas ou mais analíticas (maior grau de precisão) usando intervalo de parâmetros, pela variabilidade dos materiais geotécnicos. Especialmente em casos de solo grampeado vertical, recomenda-se a utilização de softwares de elementos finitos, a fim de que a possibilidade de uso da contenção seja investigada, dado que deslocamentos excessivos não são possíveis de captar nas análises feitas pelo método de equilíbrio limite (Ferreira, 2019).

Nesta etapa, o desenho final, especificando o processo construtivo de maneira mais detalhada conforme preconiza a NBR 16920-2 (2021) é feito. Também nesta etapa, é feita a especificação da monitoração, se necessária, com o intervalo de variação esperados em campo, bem como disposições especiais recomendadas e condições limitantes.

6.3.1.4. ETAPA DE REVISÃO OBRIGATÓRIA POSTERIOR

Esta etapa é recomendada pelo autor para projetos de solo grampeado, baseado nos ensaios tipo “P”, recomendados no projeto CLOUTERRE (1991), devido aos projetos no Brasil rotineiramente estimarem resistências ao arrancamento mais baixas que as reais, especialmente em grampos executados pela reinjeção setorizada. Dessa forma, ensaios prévios, verticais ou não, como vistos nesse capítulo, próximos ao início da construção, são realizados. Baseando-se nos resultados desses ensaios, considerando que estes foram executados nas distintas regiões geotécnicas, como visto na Figura 3.4, é possível revisar-se pela última vez o projeto. Nos Taludes 1 e 2, pode-se aumentar o espaçamento entre grampos devido aos resultados terem sido superiores aos estimados pela Eq. 4.3.

6.3.1.5. ETAPA DE ACOMPANHAMENTO DA PERFORMANCE

Em contenções de solo grampeado, mesmo com a etapa de revisão obrigatória posterior, o monitoramento da solução é essencial. Contenções em solo grampeado essencialmente são

realizadas em taludes naturais, em que o desconfinamento destes à escavação, efeito das intempéries e interface com construções enterradas existentes etc., o que exige o acompanhamento técnico integral, com ATO em comunicação direta com a projetista. Na etapa de verificações finais, esse nível de monitoramento via instrumentação pode ser especificado, se diário, semanal, mensal, mas sempre com um engenheiro geotécnico responsável acompanhando diretamente a obra. Esse acompanhamento técnico durante toda a obra também é importante para que os engenheiros envolvidos possam reportar o comportamento observado e publicar o conhecimento advindo da obra, ampliando a base de dados referente a contenções em solo grampeado.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta tese, o principal objetivo foi a descrição e validação da técnica de reinjeção setorizada, concebida por Pitta *et al.* (2016), para execução de grampos em solos, prática existente desde 2010 no Brasil, mas ainda sem uma tese de doutorado específica sobre o assunto. Para isso, foram descritos os princípios que levaram à busca do desenvolvimento da metodologia de reinjeção, que foram o de minimizar os efeitos deletérios da perfuração e exsudação da prática de injeção por gravidade comum de grampos, bem como melhorar o maciço circundante por meio de injeção pressurizada, algo previamente verificado na literatura, mas apenas em fase única.

A investigação qualitativa e quantitativa da técnica possibilitou a proposição de modelo empírico para grampos executados por meio desta metodologia, que, posteriormente, serviu de base para estudos experimentais que cumpriram os objetivos secundários desta tese, de um método de seleção de metodologia executiva de grampos em solo e a proposição de alternativa para ensaios de arrancamento prévios ao início de obras.

Para esse fim, os estudos experimentais foram constituídos de campanha de ensaios de arrancamento verticais, no solo característico de Brasília, solo bem estudado e disponível ao autor. A escolha da orientação vertical adveio justamente da maior facilidade executiva em ensaios de obra prévios, fundamental para a otimização dos projetos de solo grampeado. Além da orientação vertical, os grampos foram executados com diferentes metodologias de perfuração e de injeção de forma a cumprir o objetivo de proposição de método de seleção de metodologia executiva para grampos.

Durante essa execução experimental, em que não só se utilizou a injeção gravitacional comum, mas também a reinjeção setorizada e a injeção por gravidade com expensor de calda, com duas metodologias de perfuração, variando-se ar e água como fluido de perfuração, comparou-se o comportamento ao arrancamento dos grampos sob uso dessas diferentes metodologias, não só pelos resultados dos ensaios de arrancamento, mas também pelo resultado da exumação dos grampos, em que o diâmetro médio exumado e o ângulo médio de rugosidade dos grampos puderam ser observados e correlacionados à resistência ao arrancamento.

Pode-se constatar que os grampos executados com água como fluido de perfuração obtiveram maiores resistências ao arrancamento e melhor comportamento tensão-deformação em todas as metodologias de injeção e que apesar de os grampos executados por meio da reinjeção setorizada apresentarem resultados próximos ao esperado pelo modelo empírico proposto, com maiores resistências ao arrancamento e melhor comportamento tensão-deformação independentemente do método de perfuração, a melhora para o solo de Brasília foi inferior em solos não-colapsíveis, conforme havia sido observado no Capítulo 4. Ademais, para os grampos executados com a reinjeção setorizada, o modelo empírico proposto foi coerente, motivando o uso tanto da orientação vertical como do modelo empírico para obras reais de solo grampeado, o que foi feito no Capítulo 6, pela oportunidade de o autor utilizar essas metodologias em projetos *design-build* de contenções no Pará.

Nessas obras reais, comparou-se os resultados do arrancamento de grampos em ambas as orientações, vertical e sub-horizontal, em que os resultados dos ensaios estiveram dentro do desvio padrão da média encontrada em ambos os tipos de ensaio, para mesmos taludes, em mesmas condições geotécnicas, cumprindo o objetivo de validação das propostas da tese em obras reais, bem como possibilitando a inserção no processo de projeto de solo grampeado da revisão final obrigatória, isto é, após a emissão do projeto executivo mas previamente ao início da obra.

Portanto, o uso do modelo empírico proposto de previsão de resistência ao arrancamento de grampos é uma ferramenta recomendada para projetos de contenção em solos não problemáticos. No entanto, é importante lembrar que esse modelo deve ser utilizado com cautela e sempre conjugado a um fator de segurança apropriado. Além disso, é fundamental que a resistência estimada seja validada com ensaios reais antes do início da contenção, garantindo a segurança e a eficiência do projeto. O uso de modelos empíricos pode ser uma solução econômica e viável para a previsão de resistência, mas não pode ser utilizado de forma isolada e sem os devidos cuidados de validação e verificação.

Como sugestões para pesquisas futuras de complemento ao estudo da reinjeção setorizada de grampos, tem-se:

- Aplicação do modelo empírico em maior gama de obras, a fim de melhorar a aderência encontrada nesta tese ($r^2 = 0,617$);
- Uso da orientação de ensaio de arrancamento vertical em outros tipos de solo, de forma a averiguar se, conforme nesta tese, os resultados de arrancamento vertical são

realmente ligeiramente inferiores aos resultados de arrancamento sub-horizontal e averiguar para solos anisotrópicos a influência da orientação;

- Simular numericamente o processo de perfuração, injeção e reinjeção setorizada, de forma a melhorar o entendimento da formação da rugosidade da interface e da diferença dos ângulos médios de rugosidade entre grampos comuns e grampos executados com a reinjeção setorizada;
- Realizar ensaios laboratoriais com a caixa de arrancamento de Yin & Su (2006), de forma a investigar influências isoladas, como o grau de saturação, para os diferentes solos do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramento M. & Whittle A. (1995). Analysis of Pullout Tests for Planar Reinforcements in Soil, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 121(6), 476-485.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 16920-2 – Muros e taludes em solos reforçados Parte 2: Solos grampeados, Rio de Janeiro, ABNT.
- Araki, M.S. (1997). Aspectos Relativos às Propriedades dos Solos Porosos Colapsíveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-040A/97, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.
- ArcelorMittal (2022) Guia do Aço Arcelor Mittal. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com › catalogo-guia-aco/> (Acessado: 8 de Novembro, 2022).
- ASTM D 6910 (2009). Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries. American Society for Testing and Materials. 3 p.
- Atkinson, J. H. (2000). Non-linear soil stiffness in routine design. The 40th Rankine Lecture. *Géotechnique* 50, No. 5, pp. 487–508.
- Awn, S. H. A. (2015). Effect of Soil Nailing on Some Problematic Soils. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 19(2), 16-41.
- Babu, G. L. S. & Singh, V. P., (2010), “2D Numerical simulations of soil nail walls”, *Geotech Geol Eng* 28, pp. 299–309
- Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2005). Reliability and statistics in geotechnical engineering. John Wiley & Sons.
- Barbosa, M.G.T. (2018). Estudo do efeito de injeções cimentícias no comportamento de túneis rasos em solos metaestáveis. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-296/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137 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.
- Barbosa, M.V.R. (2017) Comunicação pessoal.
- Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering geology*, 7(4), 287-332.
- Benmokrane, B., Chennouf, A., & Mitri, H. S. (1995). Laboratory evaluation of cement-based grouts and grouted rock anchors. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 32, No. 7, pp. 633-642). Pergamon.
- Benmokrane, B., Zhang, B., & Chennouf, A. (2000). Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications. *Construction and Building Materials*, 14(3), 157-170.
- Briaud, J.L. (2013a). Technical Communications. In: *Geotechnical engineering: unsaturated*

- and saturated soils. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. pp 746-752.
- Briaud, J.L. (2013b). Elements of Geophysics. In: Geotechnical engineering: unsaturated and saturated soils. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. pp 962-964.
- Cardoso, F.B.F. (1995). Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-026A/95, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 139 p.
- Cheng, Y. M., Au, S. K., Pearson, A. M., & Li, N. (2013). An innovative geonail system for soft ground stabilization. *Soils and foundations*, 53(2), 282-298.
- Chu L.M. & Yin J.H. (2005). A Laboratory Device to Test the Pull-out Behavior of Soil Nails, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 28(5), 1-15.
- Chu, H. K., Lo, C. M., & Chang, Y. L. (2013). Numerical analysis of slope stability at the 115.9 k point of the Su-Hua Highway. *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 44(2), 97-104.
- Clayton, C.R.I., (2011). Stiffness at small strain: research and practice. *Géotechnique*, 61(1), pp.5-37.
- CLOUTERRE. (1991). French National Research Project Clouterre - Recommendations. English Translation, Federal Highway Administration, FHWA-SA-93-026, Washington D.C., USA. 305p.
- Duffy-Turner, M., Winter, M. G., & Nettleton, I. M. (2022). PUBLISHED PROJECT REPORT PPR1033.
- Dyer, M. R. (1985). Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement.
- Elias V. and Juran I. (1991). Soil Nailing for Stabilization of Highway Slopes and Excavations, United States Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-89-193.
- Ehrlich, M., & Silva, R. C. (2012). Resistência ao arrancamento de grampos-análise da influência do NSPT e da injeção da bainha nos resultados. Em Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (Vol. 16).
- Farias, M.M. & Assis, A.P. (1996) Numerical simulation of a tunnel excavated in porous collapsible soil, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Mair & Taylor (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 713-718.
- Franzén, G. (1998). Soil nailing-A laboratory and field study of pull-out capacity. Doctoral thesis, Dept. of Geotechnical Engineering, Chalmers Univ. of Technology, Chalmers, Sweden. 180 p.
- Ferreira, L.R. (2019). Análise Numérica 3D de Solo Grampeado em Solo Sedimentar Com Inclusões Verticais. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM- 326/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 131 p.
- Futai M.M.; Cecílio Jr M.O.; Abramento M. (2012) Resistência ao cisalhamento e

- deformabilidade de solos residuais da região metropolitana de São Paulo. In: Twin Cities – Solos das Cidades de São Paulo e Curitiba. ABMS, São Paulo, Cap. 7, 30p.
- Gaessler, G. (1988). Soil Nailing Theoretical Basis And Practical Design. Proc. Of Int. Symp. On Theory And Practice Of Earth Reinforcement, Fukuoka, pp. 283-288.
- GeoStudio (2018). Stability Modeling with GeoStudio. GEO-SLOPE. GEO-SLOPE International Ltd., Calgary
- Gerdau: Vergalhão GG50 - Construção civil: Gerdau Mais (2020) Gerdau mais. Disponível em: <https://mais.gerdau.com.br/cotacao/construcao/construcao-civil/vergalhao-gg50/> (Acessado: 2 de Fevereiro, 2022).
- Guilloux A., Schlosser F. & Long N.T. (1979). Laboratory Study of Friction between Soil and Reinforcements, International Conference on Soil and Reinforcement, Paris, France, 1, 35-40.
- Guilloux A. & Schlosser F. (1982). Soil Nailing: Practical Applications, Symposium on Recent Development in Ground Improvement Techniques, Bangkok, 29 Nov-3 December, 389-397.
- Guimarães, R.C. (2002). Análise das Propriedades e Comportamento de um Perfil de Solo Laterítico Aplicada ao estudo do Desempenho de Estacas Escavadas. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 091A/02, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183 p.
- Gurpersaud, N., Vanapalli, S. K., & Sivathayalan, S. (2013). Semiempirical method for estimation of pullout capacity of grouted soil nails in saturated and unsaturated soil environments. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 139(11), 1934-1943.
- Heymann G., Rohde, A.W., Schwartz K. and Friedlaender E. (1992). Soil Nail Pull Out Resistance in Residual Soils, Proc. of the International Symposium on Earth Reinforcement Practice, Fukuoka, Japan, 487-492.
- Hong, C.Y. (2011). Study on the pullout resistance of cement grouted soil nails. Doctoral thesis, Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China. 295 p
- Hong, C. Y., Yin, J. H., Pei, H. F., & Zhou, W. H. (2013). Experimental study on the pullout resistance of pressure-grouted soil nails in the field. Canadian geotechnical journal, 50(7), 693-704.
- Hooghoudt, S.B. (1940). General consideration of the problem of field drainage by parallel drains, ditches, watercourses, and channels. Publ. No.7 in the series Contribution to the knowledge of some physical parameters of the soil (titles translated from Dutch). Bodemkundig Instituut, Groningen, The Netherlands.
- Hossain, M. A., & Yin, J. H. (2012). Influence of grouting pressure on the behavior of an unsaturated soil-cement interface. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 138(2), 193-202.

- Jewell R.A. (1990). Review of Theoretical Models for Soil Nailing, Proc. of the International Reinforced Soil Conference, Glasgow, Scotland, 10-12, September, 265–275
- Juran I. (1985). Reinforced Soil Systems-application in Retaining Structures, *Geotechnical Engineering*, 16(1), 39-82.
- Juran I. and Elias V. (1990). Behavior and Working Stress Design of Soil Nailed Retaining Structures, Performance of Reinforced Soil Structures: Proc. of the International Reinforced Soil Conference, 207-212.
- Kim, J. S., Lee, I. M., Jang, J. H., & Choi, H. (2009). Groutability of cement-based grout with consideration of viscosity and filtration phenomenon. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(16), pp. 1771-1797.
- Kim, T. S., Sim, B. K., Kim, J. S., Lee, S. W., & Lee, I. M. (2012). Effect of pressurized grouting on anchor behavior in residual soils. In *7th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*.
- Lazarte, C.A., Robinson, H, Gómez, J. E., Baxter, A, Cadden, A., Berg, R. (2015), Geotechnical engineering circular No. 7- soil nail walls, Report FHWA-NHI-14-007, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D. C. 420 p.
- Li J., Tham L.G., Junaideen S.M., Yue Z.Q. and Lee C.F. (2008). Loose Fill Slope Stabilization with Soil Nails: Full-scale Test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 134(3), 277-288.
- Lima, A. P., Gerscovich, D. M., & Sayão, A. S. F. J. (2003). Deformability analysis of nailed soil slopes. In *12th Panamerican conference for soil mechanics and geotechnical engineering* (pp. 2127-2132).
- Lin, P., Liu, J., & Yuan, X. X. (2016). Reliability analysis of soil nail walls against external failures in layered ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(1). 12p.
- Lombardi, G. (1985). The role of cohesion in cement grouting of rock. *Fifteenth Congress on Large Dams. International Commission on Large Dams. Lausanne. Vol III*, pp. 235-261.
- Maccaferri (2014). Technical data sheet Macmat® R1 6822GN turf reinforcement mat. Maccaferri. 1p.
- Marques, F.E.R. (2006). Comportamento de Túneis Superficiais Escavados em Solos Porosos: O Caso do Metrô de Brasília/DF. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra, Fundação Para a Ciência e a Tecnologia. 462 p.
- Matsui T., San K.C. and Hayashi K. (1990). Design and Field Test on a Reinforced Cut Slope, Performance of Reinforced Soil Structures: Proc. of the International Reinforced Soil Conference, 235-239.
- Mendoza, C.C. (2013). Estudo do comportamento mecânico e numérico de grupo de estacas do tipo alluvial anker em solo poroso do Distrito Federal. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 234 p.

- Miranda, F. H. (2019). Estudo da resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo com o uso de calda aditivada e calda convencional. Dissertação de Mestrado, UFV, 169p.
- Milligan G.W.E., Chang K.T. and Morris J.D. (1997). Pullout Resistance of Soil Nails in Sand and Clay, Proc. of the 3rd Conference on Ground Improvement Geosystems, London, Telford, 414-422.
- Mittal S. & Biswas A.K. (2006). River Bank Erosion Control by Soil Nailing, Geotechnical and Geological Engineering, 24, 1821-1833.
- Moosavi, M., Jafari, A., & Khosravi, A. (2005). Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure. Cement and Concrete Composites, 27(1), pp. 103-109.
- Mota, N.M.B. (2003). Ensaio Avançados de Campo na Argila Porosa Não Saturada de Brasília: Interpretação e Aplicação em Projetos de Fundação. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-013A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p.
- Nadim, F. (2007). Tools and strategies for dealing with uncertainty in geotechnics. In Probabilistic methods in geotechnical engineering. Springer, Vienna. pp. 71-95.
- Natoli, E., Admiraal, B., de Wit, D., Yahyaoui, A., & de Vos, W. J. (2017). River embankment strengthening by non-metallic nails: overview on a permanent soil nailing for flood protection. Innovative Infrastructure Solutions, 2(1), 1-10.
- Ortigão J.A.R. & Palmeira E.M. (1997). Optimised design of soil nail walls. Proc. 3rd Intern Conf. On Ground Improvement Geosystems. London, Telford pp. 368-374.
- Palmeira E.M. and Milligan G.W.E. (1989). Scale and Other Factors Affecting the Results of Pull-out Tests of Grids Buried in Sand, Geotechnique, 39(3), 511-524.
- Papagiannakis, A. T., Diaz, M., & Bin-Shafique, S. (2016). Numerical Analysis of a Soil Nail Wall System in Expansive Clays. TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers, TRB, Washington, 9p.
- Pitta, C. A., Barbosa, M. V. R., Barbosa, M. G. T., Assis, A.P. (2017) A Injeção de Maciços para Obtenção de Solo Grampeado de Deformações Irrelevantes. In Geocentro 2017. 6p.
- Pitta, C. A., & Zirlis, A. (2000). Chumbadores injetados: a qualidade do solo grampeado. IV SEFE-Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 2, 541-547.
- Pitta, C. A., Zirlis, A., Souza, G.J.T. (2016). Comunicação pessoal.
- Pohll, G.M., Carroll, R.W.H., Reeves, D.M., Parashar, R., Muhunthan, B. Thiyagariah, S., Badger, T., Lowell, S., Willoughby, K.A. (2013). Design Guidelines for Horizontal Drains used for Slope Stabilization, Washington State Department of Transportation, Washington D.C., 390p.
- Powers J. P., Corwin A. B., C. Schmall P. C., Kaeck W. E. (2007). Construction Dewatering and Groundwater Control New Methods and Applications. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 651 p.
- Pun W.K. and Shiu Y.K. (2007). Design Practice and Technical Developments of Soil Nailing

- in Hong Kong, Proc. of the HKIE Geotechnical Division 27th Annual Seminar: Geotechnical Advancements in Hong Kong since 1970s. The Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, 197-212.
- Rahardjo, H., Hritzuk, K. J. Leong, E. C., Rezaur, R. B. (2003). Effectiveness of horizontal drains for slope stability, *Engineering Geology*, 69, 295-308.
- Resende, C. (2014). Estudo De Grampos Em Cortinas Em Solos Tropicais Na Cidade De Goiânia. Dissertação de Mestrado em Geotecnia – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás. 126p.
- Rocscience (2020). Slide - 2D limit equilibrium slope stability for soil and rock slopes - Slope Stability Verification Manual. Rocscience. 188 p. Disponível em rocscience.com.
- Rotte, V. M., & Viswanadham, B. V. (2013). Influence of nail inclination and facing material type on soil-nailed slopes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 166(2), 86-107.
- Sanchez, M., Briaud, J. L., Hurlebaus, S., Kharanaghi, M. M., & Bi, G. (2017). Creep Behavior of Soil Nail Walls in High Plasticity Index (PI) Soils: Technical Report (No. FHWA/TX-15/0-6784-1), 442 p.
- Schlosser F. and Guilloux A. (1979). Friction between Soil and Strips in Reinforced Earth Structures, *International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, 1.
- Schlosser F., Jacobsen H.M. and Juran I. (1983). Soil Reinforcement, Proc. of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 23-26.
- Schlosser F. (1990). Mechanically Stabilized Earth Retaining Structures in Europe. *Earth Retaining Structures, Proc. of the Design and Performance of Earth Retaining Structures Conf.*, Cornell University, Ithaca, New York, ASCE, Geotechnical Engineering Division, 1990, 347-378.
- 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. J., Lee, I. M., & Lee, S. W. (2014). Optimization of soil nailing design considering three failure modes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(2), 488-496.
- 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.
- Seo, H. (2020) Comunicação pessoal.
- Silva, E. B. (2009). Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de ensaios de arrancamento em campo e laboratório. Tese de Doutorado em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 313p.
- Silva, D. P. (2022). Comportamento De Estrutura De Contenção Composta Por Grampos E Ancoragens. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-344/2022, Departamento de

- Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.
- Soga, K., Au, S. K. A., Jafari, M. R., & Bolton, M. D. (2004). Laboratory investigation of multiple grout injections into clay. *Geotechnique*, 54(2), 81-90.
- Souza, G. J. T., Pitta, C.A., Zirlis, A. C. (2018) Manual de Serviços Geotécnicos, 6ª Edição. Solotrat, São Paulo, SP, 93 p.
- Su, L. J., Chan, T. C., Shia, Y. K., Cheung, T., & Yin, J. H. (2007). Influence of degree of saturation on soil nail pull-out resistance in compacted completely decomposed granite fill. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(11), pp. 1314-1328.
- Su, L. J., Chan, T. C., Yin, J. H., Shiu, Y. K., & Chiu, S. L. (2008). Influence of overburden pressure on soil–nail pullout resistance in a compacted fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(9), pp. 1339-1347.
- Swann L.H., Lorimer M.J. and Li R.P.M. (2007). Instrumented Soil Nail Pull-out Tests in Decomposed Tuff and Working Bond Study, The HKIE Geotechnical Division Annual Seminar, 287-292.
- Tei, K. (1993). A study of soil nailing in sand. Ph.D. Thesis, Magdalen College, Oxford University, 260pp.
- Turner J.P. and Jensen W.G. (2005). Landslide Stabilization Using Soil Nail and Mechanically Stabilized Earth Walls: Case Study, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 131(2), 141-150.
- Wang, Q., Xinyu, Y., Shanyong, W., Sloan, S.W., Sheng, D. (2017). Experimental investigation of compaction grouted soil nails. *Canadian Geotechnical Journal*. e-First Article: pp. 1-11.
- Wesseling, J. (1973). Subsurface flow into drains. *Drainage Principles and Applications Vol. II: Theories of Field Drainage and Watershed Runoff*. 2-56. Publ. 16. ILRI, Wageningen, The Netherlands.
- Wong I.H., Low B.K., Pang P.Y. and Raju G.V.R. (1997). Field Performance of Nailed Soil Wall in Residual Soil, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 11(3), 105-112.
- Xanthakos, P.P., Abramson, L.W., Bruce, D.A. (1994). *Ground Control and Improvement*. New York, NY, John Wiley & Sons, Inc. pp. 75-683.
- Yeung A.T., Cheng Y.M., Tham L.G., Au A.S.K., So S.T.C. and Choi Y.K. (2007). Field Evaluation of a Glass-Fiber Soil Reinforcement System, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 21(1), 26-34.
- Yin, J.H., & Su, L.J. (2006). An innovative laboratory box for testing nail pull-out resistance in soil. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 29. Pp. 1–11.
- Yin, J. H., Su, L. J., Cheung, R. W. M., Shiu, Y. K., & Tang, C. (2009). The influence of grouting pressure on the pullout resistance of soil nails in compacted completely decomposed granite fill. *Géotechnique*, 59(2), pp. 103-113.

- Yin, J. H., & Zhou, W. H. (2009). Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(9), pp. 1198-1208.
- Yun, J. W., Park, J. J., Kwon, Y. S., Kim, B. K., & Lee, I. M. (2016). Cement-based fracture grouting phenomenon of weathered granite soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(1), 232-242.
- Zhang, L. L., Zhang, L. M., & Tang, W. H. (2009). Uncertainties of field pullout resistance of soil nails. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(7), 966-972.
- Zuluaga, F.A. (2015). Estimativa da Capacidade de Carga e Recalque de Fundações Tipo Alluvial Anker no Solo do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação G-DM-249/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.

A. TENTATIVA DO USO DA CAIXA DE ARRANCAMENTO DE YIN & SU (2006)

A fim de estudar a resistência ao arrancamento de grampos no solo característico de Brasília tentou-se adaptar a caixa de cisalhamento descrita em Yin & Su (2006), que simula o arrancamento a diferentes condições de contorno, previamente observada na Figura 3.1, com a diferença fundamental de que tentou-se ensaiar amostras indeformadas, devido às características metaestáveis da argila porosa de Brasília.

Devido a isso, não se utilizaria células de tensões totais e tensiômetros nas circunvizinhanças dos grampos, a fim de evitar perturbar a estrutura do solo indeformado. Ademais, a caixa havia sido dimensionada de modo que esta fosse fácil montagem e desmontagem, para que os ensaios possam ser realizados in situ, com a caixa de cisalhamento envolvendo o solo. O projeto da caixa pode ser visto na Figura A.1. Os detalhes da montagem da caixa e execução dos grampos podem ser vistos nas Figuras A.2 a A.11.

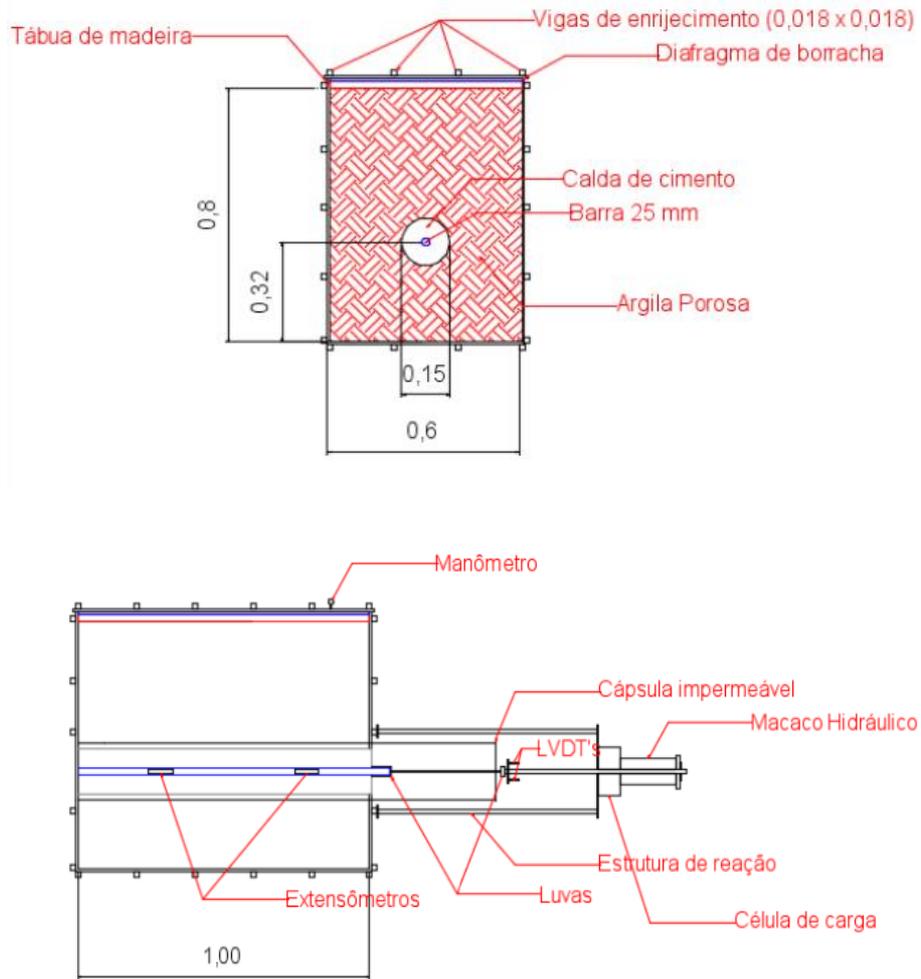


Figura A.1 – Detalhes esquemáticos do projeto da caixa de cisalhamento



Figura A.2 – Montagem da caixa de cisalhamento



Figura A.3 – Detalhe do equipamento de perfuração para a execução dos grampos experimentais



Figura A.4 – Detalhe do furo finalizado na caixa de cisalhamento



Figura A.5 – Detalhe da membrana utilizada para a caixa de cisalhamento

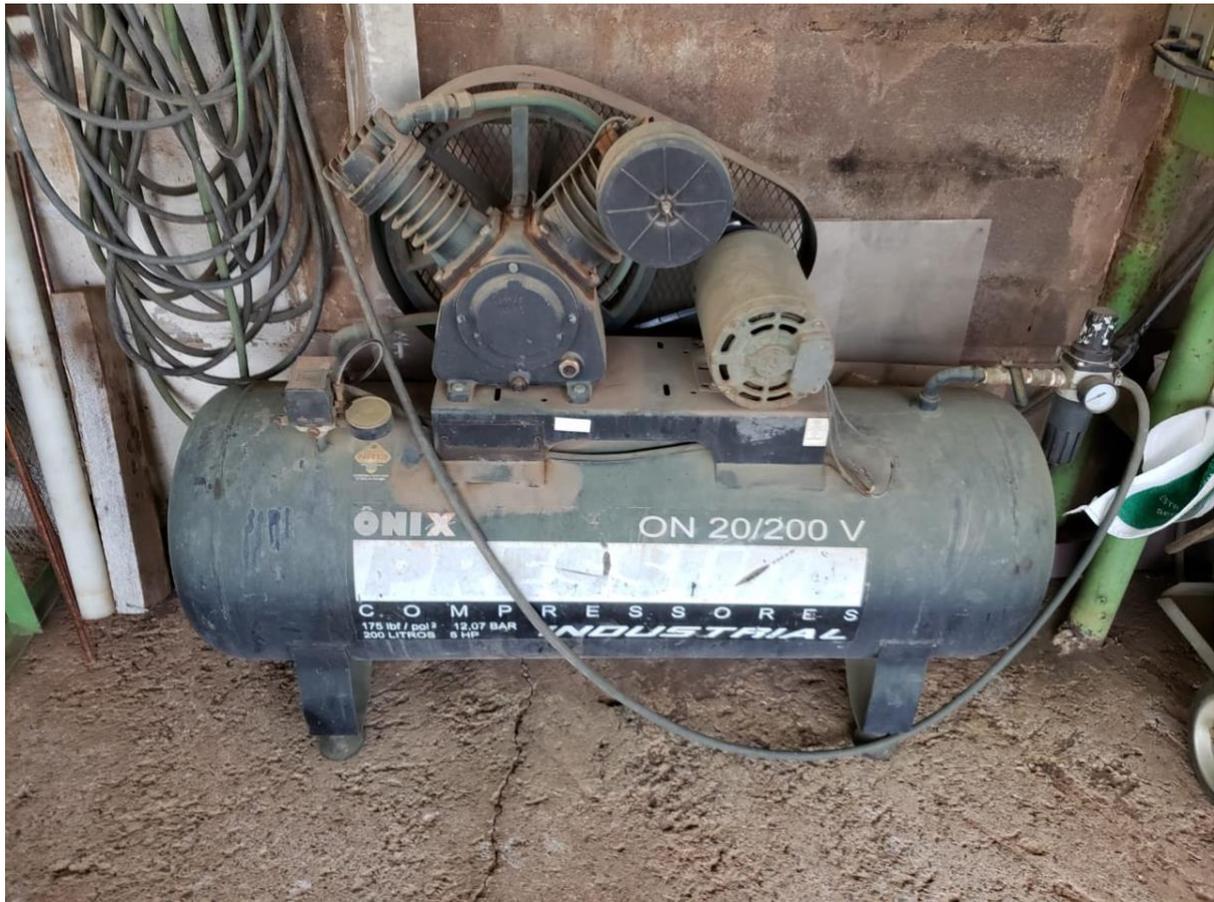


Figura A.6 – Compressor utilizado para tentativa de pressurização da caixa



Figura A.7 – Injeção dos dos grampos piloto na caixa de cisalhamento



Figura A.8 – Reinjeção dos grampos piloto na caixa de cisalhamento



Figura A.9 – Ensaio de arrancamento no protótipo da caixa de cisalhamento

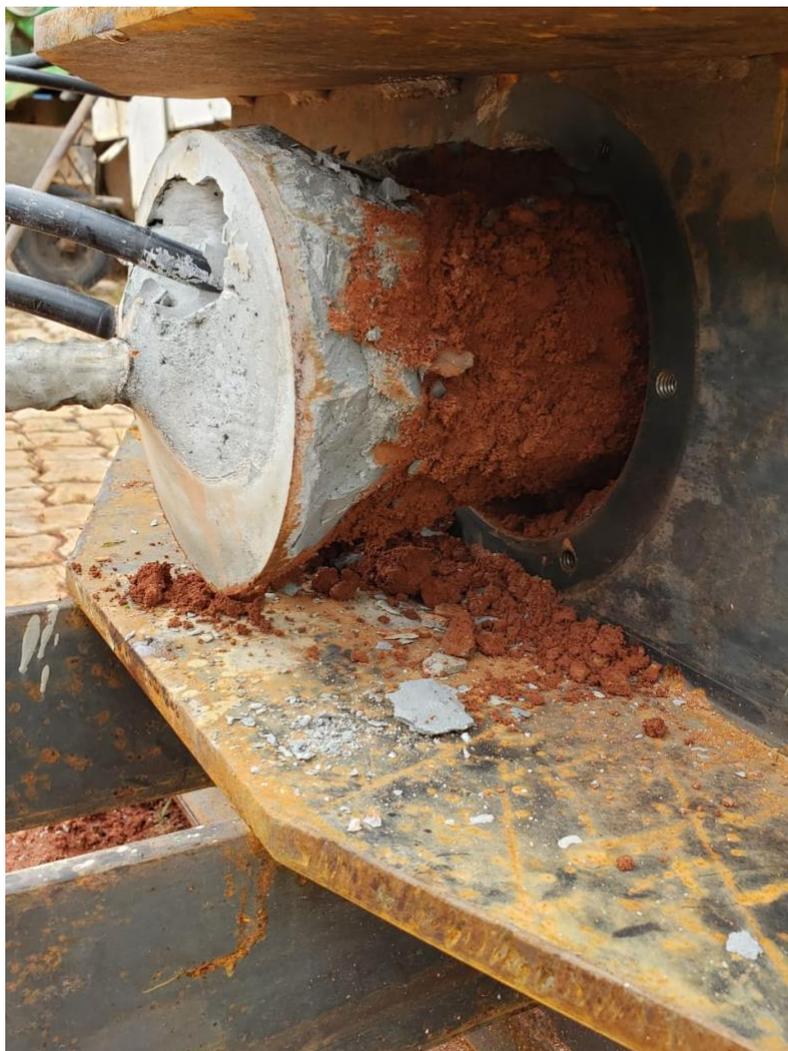


Figura A.10 – Detalhe da retirada dos grampos da caixa de cisalhamento



Figura A.11 – Grampos exumados após os ensaios de arrancamento, sem carregamento vertical. a) Grampo com 1 setor de reinjeção b) Grampo sem reinjeção

Por meio de observações durante a montagem do aparato do conjunto de ensaio, além da observância durante a execução dos grampos e dos ensaios de arrancamento na caixa de cisalhamento concluiu-se que, mesmo com a possibilidade de a caixa ser desmontada, o prosseguimento com o experimento era inviável. Justifica-se essa conclusão pela quantidade de equipamento mobilizada, o que inviabilizaria o uso da caixa de cisalhamento em campo, previamente à execução, de forma a validar as premissas do projeto, como era o objetivo na concepção da caixa. Ademais, a pressurização do compressor da membrana que faria a transmissão desse carregamento para o interior da caixa foi falha. Devido a essas observações e ao fato do autor ter tido possibilidade de execução de ensaios de arrancamento de campo, decidiu-se mudar o enfoque da pesquisa. A mudança foi feita para ensaios de arrancamento verticais, metodologia validada por Seo *et al.* (2012) e Seo *et al.* (2017), fundamentados para representar a realidade executiva, dadas as influências descritas na resistência ao arrancamento

dos grampos, de forma que fosse possível obter o mesmo objetivo de validar os parâmetros de projeto, previamente à execução, de forma viável, rápida e efetiva.

B. BOLETINS DOS ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DA EXECUÇÃO EXPERIMENTAL DE GRAMPOS VERTICAIS

Esse apêndice refere-se aos boletins dos ensaios de arrancamento da execução experimental de grampos verticais, conforme descrito no Capítulo 5. Os grampos perfurados a ar (grampos 6 a 14) foram executados dia 11/03/2020 e os grampos perfurados a água (1 a 5 e 15 a 18) foram executados 22/03/2020.

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GR						
NÚMERO GRAMPO:		ø GRAMPO		CARGA DE ENSAIO (tf)		
1		75 mm Desl. Máx. 7,5 mm		13,50		
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δ _{cméd}
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,27	0,33	0,30
2	3,000		5,00	0,50	0,61	0,55
3	4,5		5,00	0,77	0,94	0,85
4	6,000		5,00	1,05	1,27	1,15
5	7,500		5,00	1,36	1,65	1,50
6	9,0		5,00	1,82	2,20	2,00
7	10,500		5,00	2,50	3,03	2,75
8	12,000		5,00	3,40	4,11	3,74
9	13,500		5,00	4,51	5,46	4,96
10	14,200		5,00	6,89	8,34	7,58

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente, do fundo para a boca, sem obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GR						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
2	Desl. Máx.	7,5 mm	13,40			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,50	0,61	0,55
2	3,000		5,00	0,91	1,10	1,00
3	4,5		5,00	1,18	1,43	1,30
4	6,000		5,00	1,50	1,82	1,65
5	7,500		5,00	1,95	2,37	2,15
6	9,0		5,00	2,61	3,16	2,87
7	10,500		5,00	3,85	4,66	4,24
8	12,000		5,00	5,00	6,05	5,50
9	13,400		5,00	6,85	8,28	7,53

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GA						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
3	Desl. Máx.	7,5 mm	7,50			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,59	0,72	0,65
2	3,000		5,00	1,73	2,09	1,90
3	4,5		5,00	2,05	2,48	2,25
4	6,000		5,00	2,95	3,58	3,25
5	7,500		5,00	4,77	5,78	5,25
6	8,500		5,00	7,48	9,05	8,23

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GA						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
4	Desl. Máx.	7,5 mm	4,50			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,50	0,61	0,55
2	3,000		5,00	0,82	0,99	0,90
3	4,5		5,00	1,35	1,63	1,48
4	6,000		5,00	2,00	2,42	2,20
5	7,500		5,00	2,86	3,47	3,15
6	9,000		5,00	5,32	6,44	5,85
7	10,200		5,00	6,89	8,34	7,58

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GA						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
5	Desl. Máx.	7,5 mm	7,20			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,77	0,94	0,85
2	3,000		5,00	1,36	1,65	1,50
3	4,5		5,00	2,14	2,59	2,35
4	6,000		5,00	3,64	4,40	4,00
5	7,200		5,00	7,01	8,48	7,71

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GR						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
6	Desl. Máx.	7,5 mm	12,00			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
ESTÁGIO				δ1	δ2	δcmed
	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,34	0,41	0,38
2	3,000		5,00	0,44	0,53	0,49
3	4,500		5,00	1,05	1,27	1,15
4	6,000		5,00	1,82	2,20	2,00
5	7,500		5,00	2,35	2,84	2,58
6	9,000		5,00	3,23	3,91	3,55
7	10,500		5,00	5,25	6,36	5,78
8	12,000		5,00	6,86	8,31	7,55

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GR						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
7	Desl. Máx.	7,5 mm	12,70			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,07	0,09	0,08
2	3,000		5,00	0,36	0,44	0,40
3	4,5		5,00	0,77	0,94	0,85
4	6,000		5,00	1,23	1,49	1,35
5	7,500		5,00	1,77	2,15	1,95
6	9,0		5,00	2,36	2,86	2,60
7	10,500		5,00	3,36	4,07	3,70
8	12,000		5,00	5,55	6,71	6,10
9	12,700		5,00	7,55	9,13	8,30

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GA						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
8	Desl. Máx.	7,5 mm	7,30			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,27	0,33	0,30
2	3,000		5,00	0,86	1,05	0,95
3	4,5		5,00	2,00	2,42	2,20
4	6,000		5,00	3,59	4,35	3,95
5	7,300		5,00	7,00	8,47	7,70

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GA						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
9	Desl. Máx.	7,5 mm	4,50			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,93	1,12	1,02
2	3,000		5,00	2,64	3,19	2,90
3	4,5		5,00	7,91	9,57	8,70

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GA						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
10	Desl. Máx.	7,5 mm	9,40			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,41	0,50	0,45
2	3,000		5,00	1,09	1,32	1,20
3	4,5		5,00	1,50	1,82	1,65
4	6,000		5,00	2,09	2,53	2,30
5	7,500		5,00	3,64	4,40	4,00
6	9,0		5,00	6,00	7,26	6,60
7	9,400		5,00	6,96	8,43	7,66

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GG						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
11	Desl. Máx.	7,5 mm	12,40			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,18	0,22	0,20
2	3,000		5,00	0,55	0,66	0,60
3	4,5		5,00	0,91	1,10	1,00
4	6,000		5,00	1,32	1,60	1,45
5	7,500		5,00	1,92	2,32	2,11
6	9,0		5,00	2,41	2,92	2,65
7	10,500		5,00	3,41	4,13	3,75
8	12,000		5,00	5,36	6,49	5,90
9	12,400		5,00	7,10	8,59	7,81

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GG						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
12	Desl. Máx.	7,5 mm	12,10			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,41	0,50	0,45
2	3,000		5,00	0,77	0,94	0,85
3	4,5		5,00	1,18	1,43	1,30
4	6,000		5,00	1,64	1,98	1,80
5	7,500		5,00	1,95	2,37	2,15
6	9,0		5,00	2,55	3,08	2,80
7	10,500		5,00	4,14	5,01	4,55
8	12,000		5,00	6,64	8,03	7,30
9	12,100		5,00	7,23	8,75	7,95

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GG						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
13	Desl. Máx.	7,5 mm	8,90			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	1,55	1,87	1,70
2	3,000		5,00	3,00	3,63	3,30
3	4,5		5,00	4,00	4,84	4,40
4	6,000		5,00	4,55	5,50	5,00
5	7,500		5,00	5,45	6,60	6,00
6	8,9		5,00	6,80	8,23	7,48

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GR						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
14	Desl. Máx.	7,5 mm	9,80			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,23	0,28	0,25
2	3,000		5,00	0,65	0,79	0,72
3	4,5		5,00	1,06	1,29	1,17
4	6,000		5,00	1,59	1,93	1,75
5	7,500		5,00	2,45	2,97	2,70
6	9,0		5,00	4,00	4,84	4,40
7	9,800		5,00	7,32	8,86	8,05

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GG						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
15	Desl. Máx.	7,5 mm	12,80			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,59	0,72	0,65
2	3,000		5,00	1,50	1,82	1,65
3	4,5		5,00	1,86	2,26	2,05
4	6,000		5,00	2,36	2,86	2,60
5	7,500		5,00	2,88	3,49	3,17
6	9,0		5,00	3,95	4,79	4,35
7	10,500		5,00	5,14	6,22	5,65
8	12,000		5,00	6,51	7,88	7,16
9	12,800		5,00	8,23	9,96	9,05

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GG						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
16	Desl. Máx.	7,5 mm	13,50			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
ESTÁGIO				δ1	δ2	δcmed
	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,68	0,83	0,75
2	3,000		5,00	1,23	1,49	1,35
3	4,5		5,00	1,50	1,82	1,65
4	6,000		5,00	1,82	2,20	2,00
5	7,500		5,00	2,10	2,54	2,31
6	9,0		5,00	2,50	3,03	2,75
7	10,500		5,00	2,91	3,52	3,20
8	12,000		5,00	4,68	5,67	5,15
9	13,500		5,00	6,86	8,31	7,55

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GG						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
17	Desl. Máx.	7,5 mm	7,40			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,50	0,61	0,55
2	3,000		5,00	1,18	1,43	1,30
3	4,5		5,00	2,05	2,48	2,25
4	6,000		5,00	5,45	6,60	6,00
5	7,400		5,00	6,96	8,43	7,66

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo

ENSAIO DE ARRANCAMENTO						
Grampo GR						
NÚMERO GRAMPO:	ø GRAMPO	75 mm	CARGA DE ENSAIO (tf)			
18	Desl. Máx.	7,5 mm	10,50			
02/01/2020	CARGA (tf)		TEMPO (min)	Deslocamentos (mm)		
				δ1	δ2	δcmed
ESTÁGIO	0,0		1,00	0,00	0,00	0,00
1	1,500		5,00	0,32	0,39	0,35
2	3,000		5,00	0,62	0,75	0,68
3	4,5		5,00	0,86	1,05	0,95
4	6,000		5,00	1,18	1,43	1,30
5	7,500		5,00	1,55	1,87	1,70
6	9,0		5,00	2,41	2,92	2,65
7	10,500		5,00	3,27	3,96	3,60
8	12,000		5,00	4,41	5,34	4,85
9	13,500		5,00	6,71	8,12	7,38
10	13,900		5,00	7,26	8,79	7,99

DADOS DO CHUMBADOR – MONTAGEM

AÇO CA-50 f=25 mm 21 ton ELU
 COMPRIMENTO TOTAL = 3,0 M
 COMPRIMENTO LIVRE = 1,0 M
 COMPRIMENTO ANCORADO = 2,0 M

Bainha: Injeção ascendente,
 do fundo para a boca, sem
 obturação da boca do furo