



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONTENÇÕES EM SOLO
GRAMPEADO COM A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES FASES DE INJEÇÃO
DA CALDA DE CIMENTO: COMPARATIVO DE CASOS**

JOÃO PESSOA - PB

2025

GABRIEL HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONTENÇÕES EM SOLO
GRAMPEADO COM A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES FASES DE INJEÇÃO
DA CALDA DE CIMENTO: COMPARATIVO DE CASOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à coordenação do Curso
Superior de Bacharelado em
Engenharia Civil da Universidade
Federal da Paraíba como requisito para
a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Lopes
Soares

JOÃO PESSOA - PB

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237a Santos, Gabriel Henrique Costa Dos.

Análise do comportamento de contenções em solo grampeado com a utilização de diferentes fases de injeções da calda de cimento: comparativo de casos / Gabriel Henrique Costa Dos Santos. - João Pessoa, 2025. 62 f. : il.

Orientação: Fábio Lopes Soares.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Estabilização de Taludes. 2. Contenção em Solo grampeado. 3. Injeção de calda de cimento. 4. Condições geotécnicas. I. Soares, Fábio Lopes. II. Título.

UFPB/BSCT

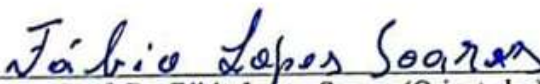
CDU 66.01(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

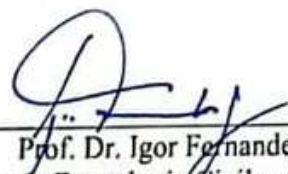
GABRIEL HENRIQUE COSTA DOS SANTOS

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE CONTENÇÕES EM SOLO GRAMPEADO COM A UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES FASES DE INJEÇÃO DA CALDA DE CIMENTO: COMPARATIVO DE CASOS

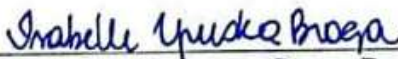
Trabalho de Conclusão de Curso em 29/09/2025 perante a seguinte Comissão Julgadora:


Prof. Dr. Fábio Lopes Soares (Orientador)
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

Aprovado


Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

APROVADO


Prof. Dra. Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB
Universidade Federal da Paraíba - UFPB

APROVADO

Dedico este trabalho ao meu pai, Luciano dos Santos, que sempre foi meu exemplo de caráter, amor e força. Saiba que essa vitória é nossa e que este trabalho é o resultado de que todo esforço valeu a pena.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder saúde, forças, sabedoria e perseverança em toda caminhada acadêmica. Não foi uma jornada fácil e Ele sabe o quão foi importante sua presença nesta trajetória.

Aos meus pais por ter me dado o dom da vida, em especial ao meu pai e melhor amigo Luciano. Te agradeço por sempre acreditar em mim, estar ao meu lado, me dar amor e ser meu ombro amigo nos momentos mais difíceis. Saiba que és o meu maior exemplo; minha fonte de inspiração, de perseverança e de hombridade.

À minha noiva Ellen, gostaria de reservar um agradecimento especial. Sua presença nessa jornada foi essencial para que ela fosse concluída com êxito. Obrigado por todo carinho, amor, paciência e compreensão nos dias difíceis. Te agradeço por caminhar junto comigo, me apoiar e sempre me dar suporte quando pensei que não ia conseguir. Você é peça fundamental nesse processo. Celebrar contigo cada pequena vitória torna o sabor desta conquista ainda mais especial. Obrigado por sempre acreditar em mim e por estar ao meu lado.

Aos meus familiares, que sempre torceram por mim e colaboraram para que esse sonho fosse realizado.

Em especial, aos meus amigos de curso André Meira, Breno Lyra, Cássio Duré, Guilherme Costa, Italo Vivacqua, Joylson Medeiros, Luiz Felipe, Pedro Borges, Raquel Ferreira, Thales Albert e Thomás Amorim. Agradeço pelo companheirismo, pelas risadas, os suportes nos estudos e nas apreensões pré-provas. Saibam que vocês foram peças fundamentais nesta caminhada e que a presença de vocês no cotidiano da universidade foi fundamental para tornar o curso mais leve.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fábio Soares, por aceitar esse desafio e orientações valiosas ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para a realização deste projeto.

Também agradeço à banca avaliadora, por ter aceitado esse convite, Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes e Prof.a Dra. Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga. Suas sugestões certamente serão enriquecedoras.

Por fim, a todos que de alguma forma, fizeram parte dessa etapa da minha vida: muito obrigado.

“Mas, sejam fortes, e não desanimem, pois o trabalho de vocês será recompensado.”

2 Crônicas 15:7

RESUMO

Com o avanço das obras de infraestrutura e a crescente ocupação de áreas com relevos acidentados, a necessidade de soluções eficientes para a estabilização de taludes e contenções tornou-se cada vez mais relevante. Nesse contexto, o solo grampeado consolidou-se como uma técnica estratégica, por aliar segurança, rapidez executiva e viabilidade econômica. Desse modo, este trabalho aborda a análise do comportamento de contenções em solo grampeado, com foco na utilização de diferentes fases de injeção da calda de cimento, uma metodologia executiva, que apesar de ser normalizada recentemente, é uma técnica difundida há tempos no ambiente geotécnico. A análise baseou-se em dois casos de obras documentados na literatura técnica por Pinto *et al* (2022) e Silva (2019), tendo como objetivo entender como se comporta a resistência dos grampos mediante a reinjeção da calda de cimento em solos distintos e quais os motivos que acarretam esse comportamento. Os resultados evidenciaram que a aplicação de fases de injeção de reforço não é uma solução universal, mostrando que as fases de reinjeções podem se tornar prejudiciais para a resistência do grampo. Apesar do estudo ter suas limitações por ser um trabalho baseado em dados fornecidos pelos casos abordados na literatura, este procura contribuir para a compreensão do comportamento dos grampos em distintos ambientes de aplicação. Desse modo, as conclusões do estudo reforçam a importância de uma análise detalhada das condições executivas e dos parâmetros utilizados para a aplicação da técnica de solo grampeado, visando otimizar seu desempenho e segurança.

Palavras-chave: Estabilização de taludes, solo grampeado, contenção, injeção de calda de cimento, condições geotécnicas.

ABSTRACT

With the expansion of infrastructure projects and the growing occupation of areas with irregular topography, the demand for efficient solutions for slope stabilization and earth retaining systems has become increasingly relevant. In this context, soil nailing has been consolidated as a strategic technique, combining safety, construction efficiency, and cost-effectiveness. This study addresses the analysis of nailed soil retaining structures, focusing on the use of different phases of grout injection—a construction methodology that, although only recently standardized, has long been applied in geotechnical practice. The analysis was based on two case studies reported in the technical literature by Pinto *et al* (2022) and Silva (2019), aiming to understand how the bond resistance of soil nails behaves when subjected to grout re-injection in different soils and which factors influence this behavior. The results showed that reinforcement injection phases are not a universal solution, and in some cases, they may even reduce the performance of soil nails. Despite its limitations as a study based on secondary data from the literature, this work seeks to contribute to a better understanding of soil nail behavior in distinct geotechnical conditions. The conclusions emphasize the importance of a detailed analysis of construction procedures and design parameters to optimize the performance and safety of soil nailing techniques.

Keywords: Slope stabilization, soil nailing, retaining structures, grout injection, geotechnical conditions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferença entre os tipos de taludes.....	18
Figura 2 - Componentes de um talude.....	19
Figura 3 - Classificação do movimento de massa segundo Varnes (1978)	20
Figura 4 - Características dos principais grupos de movimento de massa.....	21
Figura 5 - Escorregamento do tipo rastejo.....	22
Figura 6 - Esquema de escorregamento rotacional.....	23
Figura 7 - Esquema de escorregamento translacional.....	24
Figura 8 - Esquema de escorregamento em cunha.....	25
Figura 9 - Descalçamento de blocos.....	26
Figura 10 - Tombamento de blocos.....	26
Figura 11 - Exemplificação do movimento de massa do tipo Corrida.....	27
Figura 12 - Partes constituintes de um grampo (chumbador).....	32
Figura 13 - Perfuração dos grampos.....	36
Figura 14 - Execução da cravação de grampos.....	37
Figura 15 - Desenho esquemático com mangueiras de reinjeção.....	39
Figura 16 - Seção transversal do perfil geotécnico.....	45
Figura 17 - Planta de locação dos grampos selecionados.....	46
Figura 18 - Carga Aplicada (F_n) x Resistencia ao Cisalhamento (q_s) x Deslocamentos (Δ) com fase de injeção única.....	50
Figura 19 – Carga Aplicada (F_n) x Resistência ao cisalhamento (q_s) x Deslocamentos (Δ) com fase de injeção de reforço.....	52
Figura 20 - Resistencia ao cisalhamento (q_s) x Deslocamento (ΔS) para diferentes fases de injeção.....	53
Figura 21 - Deslocamento x carga do chumbador E1.....	55
Figura 22 - Deslocamento x carga do chumbador E2.....	56
Figura 23 - Deslocamento x carga do chumbador E3.....	56
Figura 24 - Deslocamento dos chumbadores E1, E2 e E3 x cargas aplicadas....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.....	30
Tabela 2 - Estágios de aplicação das cargas de ensaio com fase única de injeção.....	50
Tabela 3 - Estágios de aplicação das cargas de ensaio com injeção de reforço..	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas.....	29
Quadro 2 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais..	30
Quadro 3 - Resumo dos tipos de Drenagem e suas características.....	34

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
FHWA	Federal Highway Administration
FS	Fator de Segurança
NATM	New Austrian Tunneling Method
DHP	Drenos Sub-Horizontais Profundos
SPT	Standard Penetration Test - Sondagem à Percussão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa.....	16
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivos Gerais.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Taludes.....	18
2.2	Movimentação de massa.....	19
2.3	Análise da estabilidade de Taludes	27
2.4	Fator de Segurança (FS).....	28
2.5	Solo Grampeado	30
2.5.1	Histórico	31
2.5.2	Componentes	31
2.5.3	Método Executivo da perfuração.....	34
2.5.4	Fases de Injeções	37
2.6	Ensaio de Arrancamento	40
2.7	Interação Injeção-grampo.....	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	Seleção de Casos	43
3.2	Características dos casos	43
3.3	Critérios avaliativos	44
3.4	Limitações da metodologia.....	44
4	DESCRIÇÃO DOS CASOS DE OBRA.....	45
4.1	Obra 1 localizada na cidade de João Pessoa – PB.....	45
4.2	Obra 2 localizada na cidade de Guarulhos – SP	47
5	RESULTADOS	49
5.1	Obra João Pessoa-PB.....	49
5.2	Obra Guarulhos-SP	54
6	CONCLUSÕES	59
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	60
7	REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A estabilização de taludes é um processo fundamental na engenharia civil, em especial na geotécnica, pois visa garantir a segurança e a estabilidade de encostas naturais ou de taludes resultantes de obras de infraestrutura. Sua importância reside na prevenção de movimentos de massa provindos de condições desfavoráveis na qual podem acarretar problemas econômicos e sociais para toda população. Dessa forma, a relevância da estabilização não se resume em assegurar a integridade estrutural de obras civis, mas contribui na redução de riscos para toda sociedade.

A escolha do método de estabilização mais adequado, por sua vez, depende de diversos fatores geotécnicos e construtivos para que se tenha o melhor desempenho possível. Dentre os principais aspectos, destacam-se as características do solo, disponibilidade de recursos e dificuldades executivas influenciam diretamente na técnica utilizada. Para isso, se faz necessário uma avaliação detalhada a fim de determinar a solução mais adequada, equilibrando todas essas vertentes que englobam o processo.

Sob esse enfoque, o solo grampeado, conforme definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na NBR 16920-2:2021 (ABNT, 2021), é uma técnica temporária ou permanente, que através de barras de aço são introduzidos reforços no maciço aliados com revestimento da face do talude, a fim de resistirem aos esforços e às deformações e consequentemente as degradações impostas ao talude.

Apesar de ser uma técnica nova quando comparada às demais obras de contenção, é um procedimento difundido e amplamente utilizado em obras geotécnicas, devido ao seu viés executivo e econômico. No aspecto executivo, permite um processo que ocorre de forma progressiva, com a escavação e a instalação dos grampos em etapas. Do ponto de vista econômico, mostra-se vantajoso por demandar, a princípio, menor volume de concreto e aço em relação a soluções mais rígidas, como cortinas de estacas ou muros de contenção, aproveitando a resistência do próprio maciço reforçado pelos grampos.

No Brasil, até pouco tempo, a execução de reforço com solo grampeado vinha sendo empregada com base em normas voltadas a outras soluções de contenção, como cortina de estacas, ou ainda em referências internacionais que forneciam diretrizes gerais para execução e desempenho dos grampos. Entretanto, com a

publicação da norma brasileira NBR 16920-2:2021, o solo grampeado passou a dispor de instruções normativas específicas, estabelecendo parâmetros técnicos e limites claros para sua devida aplicação e controle.

1.1 Justificativa

Diante da importância das técnicas de contenção de solo grampeado, torna-se fundamental realizar uma análise detalhada das condições executivas e dos parâmetros utilizados para a aplicação adequada desta técnica em maciços. Tal investigação não apenas visa aprimorar as práticas da engenharia civil em obras de contenção, mas também aprofundar o conhecimento sobre a técnica. Dessa forma, este trabalho propõe comparar e analisar as execuções de solo grampeado com o intuito de evitar a generalização de sua aplicabilidade e, consequentemente, otimizar o desempenho da técnica.

Assim, a escolha da execução de solo grampeado como objeto de estudo se justifica pela sua crescente aplicação no país, impulsionando a busca pelo método de contenção mais eficientes, sem comprometer a segurança do talude.

Além disso, a escassez de casos de obras documentadas e detalhadas na literatura técnica baseados na norma específica nacional evidencia uma lacuna de conhecimento que este trabalho busca preencher, contribuindo para o avanço da compreensão e aplicação dessa importante técnica geotécnica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Realizar uma revisão bibliográfica de casos documentados na literatura técnica para análise comparativa sobre a aplicação de solo grampeado com diversas fases de injeção da calda de cimento, com base nos dados apresentados por Pinto *et al* (2022) e Silva (2019).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Coletar e organizar informações técnicas de cada caso, como características da obra, tipologia geotécnica, metodologia de execução, ensaios de carregamento realizados e desempenho observado;
- Realizar uma análise comparativa dos dados coletados e discutir os resultados, focando nos processos executivos, capacidade de limitação das injeções, adaptação das fases de injeção ao tipo de solo, levando em consideração as particularidades de cada caso analisado;
- Apontar as limitações da metodologia, destacando as restrições do estudo baseado em pesquisa bibliográfica e a falta de dados experimentais complementares.

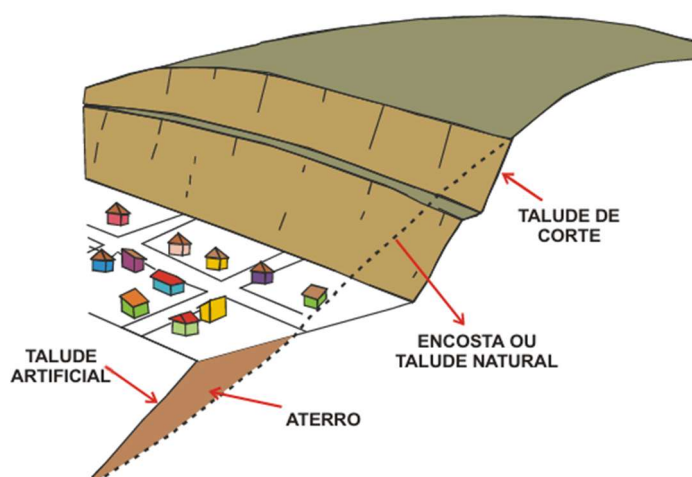
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Taludes

De acordo com Gerscovich (2016), talude ou encosta é a denominação atribuída a qualquer superfície inclinada de um maciço constituído por solo, rocha ou uma combinação de ambos, que pode se formar por meio de processos geológicos e erosivos — como o intemperismo físico — ou a partir de intervenções antrópicas.

Desse modo, os taludes podem ser classificados, quanto à sua natureza, em naturais e artificiais. Os taludes artificiais são aqueles construídos a partir de ações humanas, como realizações de cortes e lançamentos de aterros atrelados à execução de rodovias ou na solidez de barragens. Sua estabilidade está diretamente relacionada ao correto dimensionamento da geometria do corte, especialmente no que se refere à inclinação e à altura determinadas. Por sua vez, os taludes naturais são formados por processos geológicos e podem ser compostos por solo residual, disposição de sedimentos, rochas ou ainda pela combinação desses materiais, apresentando comportamentos distintos conforme suas características geotécnicas. A Figura 1 apresenta a diferença entre os tipos de taludes.

Figura 1: Diferença entre os tipos de taludes



Fonte: UNESP/IGLA (2002)

Segundo Augusto Filho (1992), a discretização da geometria do talude, associada ao tipo de material que o compõe, está diretamente relacionada às características do escoamento e ao comportamento da estrutura frente à possibilidade

de colapso. A interação desses elementos com fatores externos — especialmente a presença e a circulação da água — pode alterar significativamente a resistência dos materiais, favorecendo o deslocamento de massas.

Desse modo, a existência do talude visa garantir a estabilização do maciço de solo ou de rocha que o cerca, para isso, se faz necessário identificar seus componentes. A Figura 2 evidencia e descreve – em sequência – cada parte que compõe a estrutura de um talude.

Figura 2: Componentes de um talude



Fonte: UNESP/IGLA (2002)

- Crista ou topo:
- Superfície de Ruptura:

2.2 Movimentação de massa

De acordo com Tominaga *et al.* (2015), o movimento do solo ou rocha ao longo de uma vertente sob a ação direta da gravidade é denominado movimento gravitacional de massa, estando diretamente associado à interação entre as características geotécnicas do maciço e a atuação de agentes externos, como a água, que contribuem para a redução da resistência dos materiais e favorecem o desencadeamento de processos de instabilidade.

A Figura 3 apresenta a classificação desenvolvida por Varnes (1978), na qual classifica de maneira simplificada a movimentação de massa baseada em dois critérios principais: o tipo de movimento correlacionado com o material envolvido.

Figura 3: Classificação do movimento de massa segundo Varnes (1978)

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha De blocos rochosos De rocha	Abatimento de detritos De blocos de detritos De detritos	Abatimento de terra De blocos de terra De Terra
	Translacional	Muitas unidades			
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
				(Rastejo de solo)	
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

Fonte: Gerscovich (2016)

Diversos autores da literatura brasileira, como Guidicini e Nieble (1984), Augusto Filho e Virgili (1998), Tominaga *et al.* (2009) e Gerscovich (2016), abordam os movimentos de massa como processos associados à instabilidade de encostas, classificando-os em grupos distintos conforme o tipo de deslocamento e o comportamento do material envolvido. Entre os principais grupos descritos por esses estudiosos, destacam-se o rastejo, o escorregamento, a subsidência, cada um com características específicas quanto à velocidade, profundidade do movimento e mecanismos de ruptura. A Figura 4 apresenta essa classificação e, posteriormente, a definição de cada tipo conforme proposto por Gerscovich (2016).

Figura 4: Características dos principais grupos de movimento de massa

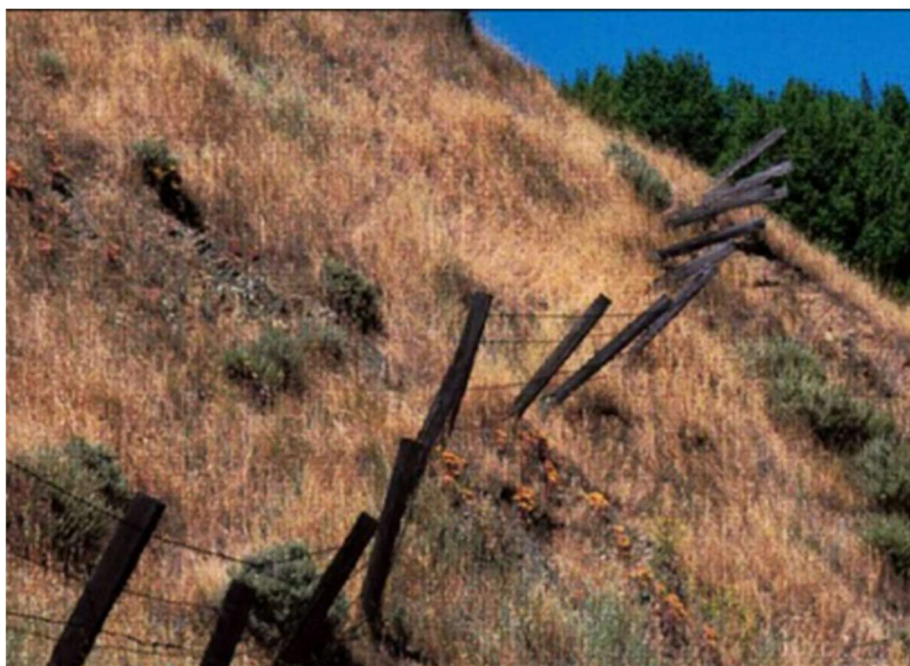
PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejo ou fluência	Vários planos de deslocamento (internos) Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada Geometria indefinida
Escorregamento	Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidades médias (km/h) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares $\Rightarrow$ solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza Circulares $\Rightarrow$ solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha $\Rightarrow$ solos e rochas com dois planos de fraqueza
Queda	Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/s) Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos etc. Rolamento de matacão Tombamento
Corrida	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: Augusto Filho (1992), *apud* Gerscovich (2016)

a) Rastejo ou fluência:

Esse tipo de movimento caracteriza-se por não apresentar superfície de ruptura bem definida e por ocorrer de forma lenta, com limites indefinidos entre o material em movimento e o solo estabilizado, envolvendo, na maioria das vezes, grandes volumes de solo. Dessa forma, suas causas são atribuídas à ação da gravidade, associada aos efeitos da variação de temperatura e umidade (Tominaga, 2015). A Figura 5 apresenta esse tipo de escorregamento.

Figura 5: Escorregamento do tipo rastejo



Fonte: Marinho (2020)

b) Escorregamento:

Trata-se de movimentos rápidos, com volumes definidos, sob efeito da ação da gravidade, movimentando-se para baixo e fora do talude.

Segundo Guidicini & Nieble (1984), esse tipo de movimento de massa ocorre quando a relação entre a resistência ao cisalhamento do material e a tensão de cisalhamento na superfície potencial de movimentação decresce até atingir uma unidade, no momento do escorregamento. Isso ocorre devido a força gravitacional superar o atrito interno existente entre as partículas de sedimento – esse que mantém a estabilidade da encosta – produzindo assim o movimento descendente do conjunto de material.

Esse processo de instabilidade, ao depender da superação da resistência ao cisalhamento dos materiais pela força gravitacional, pode ocorrer de diferentes formas, a depender da geometria do talude e das características do maciço envolvido. Nesse sentido, os escorregamentos são classificados em três categorias principais: escorregamentos rotacionais ou circulares, escorregamentos translacionais ou planares e escorregamentos em cunha, variando conforme o formato da superfície de ruptura e o comportamento do material instabilizado.

- Escorregamentos rotacionais

Este tipo de fenômeno é caracterizado por apresentar uma superfície de ruptura côncava tornando um movimento curvo ao decorrer do maciço rochoso. De acordo com Fernandes e Amaral (2003), sua ocorrência associa-se – na maioria dos casos – à existência de solos homogêneos e de grande volume, aterros, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas. O escorregamento circular tem seu movimento deflagrado muitas das vezes a partir da execução de cortes realizados na base destes materiais, ocorridos com frequência em taludes rodoviários. A Figura 6 apresenta esse tipo de escorregamento.

Figura 6: Esquema de escorregamento rotacional



Fonte: Marinho (2020)

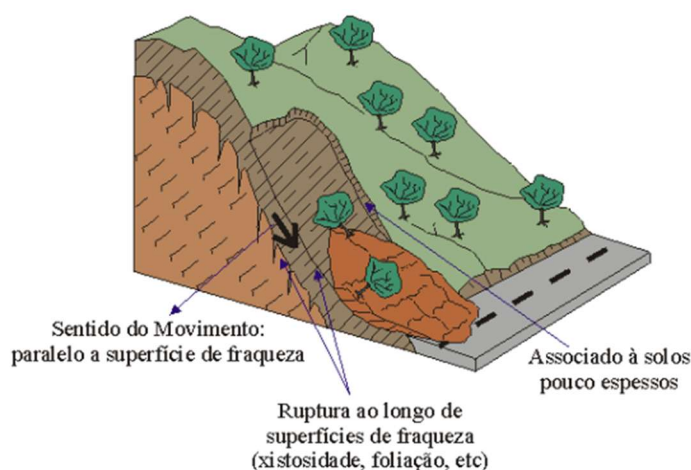
- Escorregamento Translacional

Segundo Tominaga (2015) esse tipo de escorregamento é o mais frequente entre todos os tipos de movimento de massa. São caracterizados por apresentarem superfície de ruptura plana relacionada com a zona de fraqueza representadas por descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas. No tocante da morfologia, esse tipo

de ruptura do maciço apresenta plano de ruptura raso, na maioria das vezes, de 0,5 m a 5,0 m de profundidade.

Enquanto os escorregamentos rotacionais ocorrem, em geral, em taludes mais íngremes e apresentam extensão relativamente limitada, com raio de alcance menor que os translacionais, os escorregamentos planares costumam se desenvolver em taludes mais suaves e, por serem geralmente mais espessos, podem atingir centenas ou até milhares de metros, gerando assim um raio de alcance maior referente ao primeiro citado. A Figura 7 apresenta esse tipo de escorregamento.

Figura 7: Esquema de escorregamento translacional

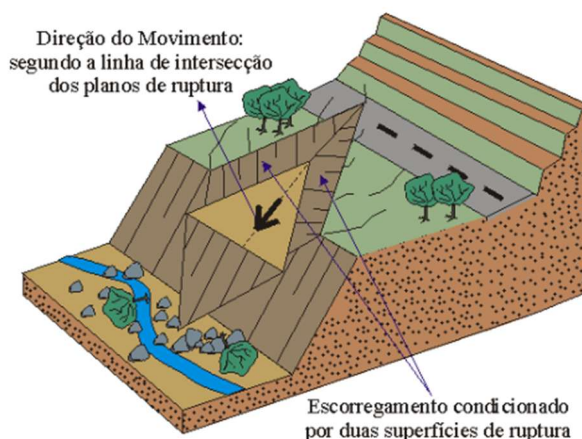


Fonte: Modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis (2010)

- Escorregamento em cunha

Como apontam Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), esse tipo de escorregamento ocorrem, de forma mais restrita, em regiões onde o relevo é fortemente controlado por estruturas geológicas. Estão geralmente associados a maciços rochosos pouco ou muito alterados, nos quais a presença de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, condiciona o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção desses planos. Esse tipo de movimento manifesta-se, principalmente, em taludes de corte ou em encostas que passaram por processos de desconfinamento, seja por causas naturais ou por intervenções antrópicas. A Figura 8 apresenta esse tipo de escorregamento.

Figura 8: Esquema de escorregamento em cunha



Fonte: Modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis (2010)

c) Movimentos de blocos

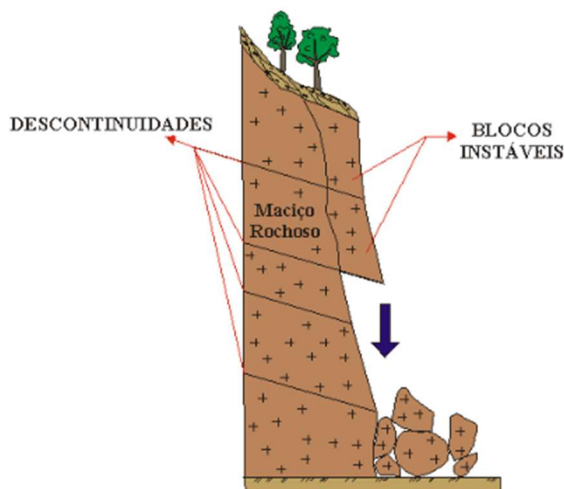
Também conhecidos como Subsidiências, são deslocamentos que acontecem em altas velocidades de blocos ou lascas de rocha que caem devido a ação da gravidade. Segundo Gerscovich (2016), de acordo com o mecanismo deflagrador, esse tipo de movimento pode ser classificado como queda ou afundamento de camadas.

- Queda

As quedas ocorrem quando fragmentos rochosos de diferentes tamanhos e volumes se desprendem de encostas muito íngremes, deslocando-se em queda livre ou em plano inclinado, como no caso do rolamento de matacões. Esses movimentos são caracterizados por velocidades extremamente elevadas e podem alcançar grandes distâncias a jusante.

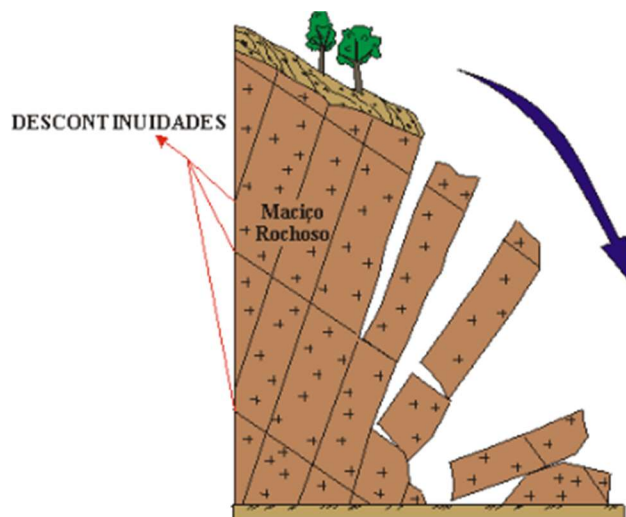
Segundo Gerscovich (2016) a formação destes blocos tem como origem a ação do intemperismo nas fraturas, pressão hidrostáticas nas mesmas, perda do desconfinamento lateral. As Figuras 9 e 10 apresentam dois mecanismos que representam o movimento de massa do tipo queda, o descalçamento e tombamento, respectivamente. Esses mecanismos se diferenciam pela caracterização do plano de ruptura do talude, no qual o primeiro destaca-se pela descontinuidade horizontal e o segundo vertical no maciço.

Figura 9: Descalçamento de blocos



Fonte: Modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis (2010)

Figura 10: Tombamento de blocos



Fonte: Modificada de Infanti Jr. & Fornasari Filho, 1998; organizada por Fábio Reis (2010)

- Afundamento de camadas

O deslocamento ou adensamento da superfície de camadas do talude é uma deformação contínua e origina-se da remoção da fase sólida, líquida ou gasosa. Segundo Oliveira (2010), esses movimentos podem ainda desenvolver-se por meio da erosão causada pela ação das águas pluviais e córregos, que acabam por lavar e escavar as camadas superficiais do solo e por fatores antrópicos como atividades de

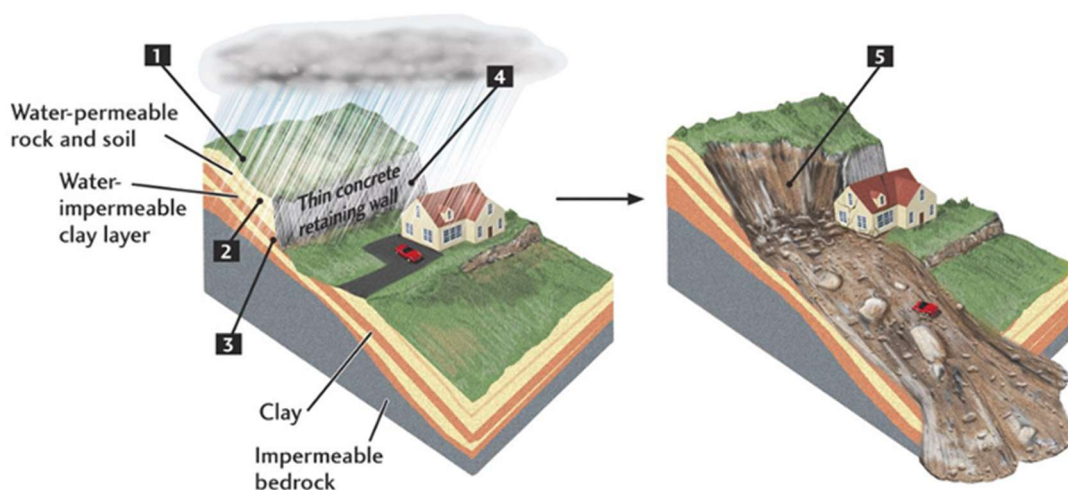
mineração ou obras subterrâneas; influenciando na deformação continua e no deslocamento dos maciços rochosos.

d) Corrida (Flow)

Segundo Tominaga (2015), esse tipo de movimento ocorre devido a perda do atrito interno entre as partículas do solo, caracterizando com a presença excessiva de água, destruindo assim, sua estrutura interna. Estes movimentos são gerados a partir de grande aporte de materiais como solo, rocha e árvores que, ao atingirem as drenagens, formam uma massa de elevada densidade e viscosidade.

A massa de solo passa a se comportar como um fluido e por apresentarem alta velocidade (10 km/h) os deslocamentos podem atingir extensões significativas, apesar de não possuírem altas declividades, trazendo consequências mais destrutivas que os escorregamentos. (Guidicini & Nieble, 1984; Gerscovich, 2016). A Figura 11 representa como ocorre o movimento do tipo Corrida.

Figura 11: Exemplificação do movimento de massa do tipo Corrida



Fonte: Tomazzoli *et al.* (2010).

2.3 Análise da estabilidade de Taludes

A análise de estabilidade de taludes consiste em um conjunto de procedimentos técnicos aplicados com o objetivo de quantificar o quão próximo da ruptura uma encosta ou um talude se encontra. Para isso, fatores condicionantes tais como:

sobrecarga, geometria do talude, perfil geotécnico, estudo pluviométrico; corroboram para a devida análise atuando no sistema.

Augusto Filho & Virgili (1998), classifica a análise de estabilidade de taludes em três grupos principais, conforme o seu comportamento frente a diferentes condicionantes.

O primeiro grupo corresponde aos métodos analíticos, empregados e fundamentados na teoria do equilíbrio-limite e em modelos matemáticos que levam em consideração as tensões e deformações atuantes no talude. Esses métodos são amplamente utilizados por fornecerem estimativas do fator de segurança (FS) com base em condições específicas de geometria, propriedades do solo e carregamentos atuantes.

Na sequência, o segundo grupo corresponde aos métodos experimentais, que utilizam modelos físicos em escala reduzida para simular o comportamento dos taludes, permitindo a observação direta dos mecanismos de instabilidade.

Por fim, o terceiro grupo abrange os métodos observacionais, baseados na experiência prática e em estudos de casos anteriores. Essa abordagem inclui a retroanálise de rupturas passadas, o uso de ábacos de projeto e o julgamento técnico de especialistas, sendo especialmente útil em situações onde os dados disponíveis são limitados ou quando se busca validar os resultados obtidos por métodos analíticos ou experimentais.

Desse modo, analisar a estabilização significa verificar se o talude é estável – através dos métodos disponíveis – por meio da determinação do fator de segurança associado a uma potencial superfície de ruptura.

2.4 Fator de Segurança (FS)

Fiori (2016) define fator de segurança de um talude como a razão entre as forças resistentes ao cisalhamento do solo e as forças mobilizantes advindas sob efeito dos esforços atuantes. A Equação 1 descreve esta relação.

$$FS = \frac{\sum \text{Forças Resistentes}}{\sum \text{Forças Atuantes}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Dessa forma, para Duncan e Wright (2005), o FS expressa a capacidade do maciço em resistir ao movimento em relação à sua solicitação, sendo que valores inferiores a 1 indicam instabilidade iminente. Augusto Filho e Virgili (1998) reforçam que o FS é diretamente associado à superfície de ruptura mais crítica, ou seja, aquela com menor valor de estabilidade, cuja identificação é essencial para o correto dimensionamento das obras de contenção.

Assim, o FS atua como um parâmetro central na análise de estabilidade, auxiliando no diagnóstico do comportamento do talude e na tomada de decisão quanto à necessidade de medidas estabilizadoras.

No entanto, segundo a NBR 11682/2009 este valor de segurança para iminência à ruína pode variar em função da situação potencial de ruptura do talude, no qual tem relação direta com o perigo de perda de vidas humanas e a possibilidade de danos materiais e ao meio ambiente.

Os Quadros 1 e 2 apresentadas estabelecem critérios para definição do nível de segurança desejado na análise de estabilidade de taludes, considerando diferentes riscos associados a vidas humanas, danos materiais e impactos ambientais.

Quadro 1: Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: NBR 11682:2009

Quadro 2: Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

Fonte: NBR 11682:2009

Desse modo, com os respectivos níveis determinados através dos critérios estipulados nos Quadros 1 e 2, é possível mensurar o fator de segurança mínimo para deslizamento do talude, representado na Tabela 1.

Tabela 1: Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível de segurança contra danos a vidas humanas Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: NBR 11682:2009

2.5 Solo Grampeado

De acordo com a NBR 16920/2021, O termo “solo grampeado” refere-se à aplicação de reforços resistentes à tração em maciços, de forma a se obter um compósito com melhores características mecânicas. O grampeamento do solo é obtido através da inclusão de elementos lineares passivos, semi-rígidos, resistentes à flexão composta, denominados grampos. Segundo Silva (2009), são considerados

elementos passivos, pois as tensões são empregas ao longo da extensão do grampo em resposta às deformações que ocorrem no solo.

Estes elementos de reforço são posicionados horizontalmente ou inclinados no maciço, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento (Ortigão et al., 1993, *apud* Saré, 2007).

2.5.1 Histórico

O solo grampeado originou-se na Áustria – década de 1960 – a partir da técnica de execução de suporte de galeria e túneis denominada NATM (*New Austrian Tunneling Method*) desenvolvida Landislau Von Rabcewicz, a partir de 1945, para avanço de escavações em túneis rochosos.

O método NATM consiste na aplicação de um suporte flexível para permitir que o terreno se deforme ocorrendo a formação de uma região plastificada no entorno da escavação, que pode ser reforçada através de chumbadores.

O desenvolvimento desse método passou a ser propagado a partir dos anos 70 em países da Europa como: Alemanha (Stocker *et al.*, 1979 *apud* Saré, 2007), França (Clouterre *et al.*, 1991 *apud* Saré, 2007), Grã-bretanha (Brune e Jewell, 1986 *apud* Saré, 2007), entre outros.

No Brasil, a aplicação desta técnica inciou-se em 1980 em obras de contenção urbana e rodoviária, sendo gradualmente normatizada e aplicada em projetos de engenharia geotécnica. Segundo Lima et al. (2002, *apud* Gerscovich *et al.*, 2016), o sucesso da técnica NATM em rochas duras incentivou sua aplicação em solos mais brandos, como argilas e areias, consolidando o solo grampeado na prática geotécnica.

2.5.2 Componentes

O sistema é composto por três elementos: solo, grampos e paramento. Segundo Solotrat (2023), essa técnica de melhoria de solos utiliza em conjunto com a aplicação dos grampos, elementos de reforço metálicos ou poliméricos e de sistema de drenagem interna.

- Grampos

São elementos lineares (chumbadores) de reforço instalados no maciço que mobiliza a resistência de tração e cisalhamento com o solo ao longo de todo seu comprimento. Os grampos podem ser barras ou tubos de aço ou ainda, barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular (Saré, 2007), na qual são geralmente moldados *in loco*. Tais elementos são instalados com uma devida inclinação abaixo da horizontal variando entre 5° a 30°, além disso, suas extremidades que faceiam a superfície do talude são dobradas com angulação a 90° a fim de garantir a ancoragem do grampo à camada de revestimento superficial.

Com o objetivo de garantir o eixo do grampo centralizado durante a perfuração, é instalado o centralizador, no qual tal mecanismo garante o posicionamento correto da barra. Além disso, são dispostas mangueiras de injeção que auxiliam durante o processo de perfuração. A Figura 12 apresenta as partes constituintes de um grampo.

Figura 12: Partes constituintes de um grampo (chumbador)



Fonte: Solotrat (2023)

- Parâmetros

São partes do sistema construtivo que fornece a devida proteção contra a erosão superficial, tendo ou não função estrutural na estabilidade do conjunto (NBR 16920/2021). Podendo ser rígido ou flexível, constituído por concreto projetado – sendo esse armado ou simples – moldado *in loco*, alvenaria estruturada, elementos pré-moldados de concreto, telas metálicas ou geossintéticos associados à face verde.

Casualmente, utiliza-se concreto projetado como revestimento do parâmetro do talude em conjunto com revestimento vegetal. Este concreto pode ser executado de

maneiras: através da via seca ou via úmida. O primeiro preparo é a seco e a água é adicionada junto ao bico de projeção, momento antes da aplicação. Já a respeito da segunda, a aplicação direta é realizada com água e essa mistura é levada até o local de aplicação (Solotrat, 2023). Usualmente o concreto utilizado é o de via seca, sendo este uma composição de cimento, areia, pedriscos, água e aditivos, podendo ser adicionado fibras metálicas, sintéticas ou termoplásticas (em substituição da tela metálica).

- Drenagem

A drenagem é um elemento fundamental que visa proporcionar um fluxo ordenado para as águas internas e externas que convergem para o talude, sendo uma técnica essencial para a estabilização do maciço.

Segundo o manual da Solotrat (2023), recomenda que a drenagem seja sempre executada em suas diversas formas (profunda, de paramento e de superfície), mesmo que não haja indicação de água durante a fase de projeto. A execução de DHP (Drenos Sub-Horizontais Profundos) junto à superfície são essenciais, pois as camadas superficiais são frequentemente muito drenantes. O Quadro 3 apresenta os tipos de drenagem abordados e suas características:

Quadro 3: Resumo dos tipos de Drenagem e suas características

Tipos de Drenagem	Definição e função	Características
Dreno Sub-Horizontal Profundo (DHP)	Capta águas profundas e distantes da face do talude antes que aflorem, conduzindo-as ao paramento e despejando-as nas canaletas	Comprimento usual de 6 a 24 metros. - Tubos plásticos drenantes de 32 a 50 mm, podendo ter microranhuradas (0,4 mm) sem recobrimento, ou perfurações recobertas por manta geotêxtil ou tela de nylon.
Dreno de Paramento	Promove o adequado fluxo das águas do talude que chegam ao paramento	- Dreno Linear Contínuo: Instalação de calha plástica drenante revestida por manta geotêxtil ("PVD" ou "dreno fibroquímico"), estendendo-se verticalmente da crista ao pé do talude. - Dreno Tipo Barbacã: Escavação de cavidade (aprox. 30x30x30 cm), revestida com geotêxtil e preenchida com material granular (brita ou areia). Tubo interno (32 a 50 mm) com inclinação descendente
Drenagem de Superfície	Coleta e direciona as águas superficiais que escoam pelo talude.	- Inclui canaletas de crista e pé e descidas d'água. - O efeito erosivo do despejo de água nestas peças deve ser cuidadosamente analisado.

Fonte: Autor (2025)

2.5.3 Método Executivo da perfuração

O processo tem seu início na execução da pré contenção a partir da instalação de chumbadores verticais, como medida de melhoria do solo, em sequência realiza-se cortes descendentes no maciço seguindo as diretrizes do projeto e logo a seguir é iniciada a execução da primeira linha de grampos (Solotrat, 2023).

As perfurações, em geral, são executadas por meio de equipamentos cujo peso varia entre 50 e 1000 kg, o que lhes confere características de leveza e facilidade de manuseio. Tais equipamentos podem ser instalados e operados sobre diferentes tipos de superfície, sem necessidade de infraestrutura complexa de apoio. Para a perfuração e limpeza dos furos, podem ser utilizados fluidos como água, ar comprimido ou lama bentonítica, sendo que, no caso do uso desta última, recomenda-se a lavagem eficiente do furo com calda de cimento, a fim de evitar a redução do

atrito entre o solo e o elemento de reforço, conforme orientam Ortigão e Palmeira (1992).

A NBR 16920-2:2021 cita que diversos modelos de grampos podem ser adotados, a depender da técnica de instalação utilizada, eficiência mecânica e sua durabilidade, dentre eles destacam-se:

- Grampos Perfurados e injetados:

Realiza-se a perfuração do maciço com diâmetros que variam de 75 mm a 150 mm, com barras de aço ou outros elementos resistentes à tração introduzidos no furo, com preenchimento da bainha com calda de cimento ou outro material ligante. Este processo permite que se obtenha valores de resistência ao cisalhamento na interface solo-grampo (qs) na ordem de 100 kPa para grande parte dos tipos de solos (Ortigão, 1993).

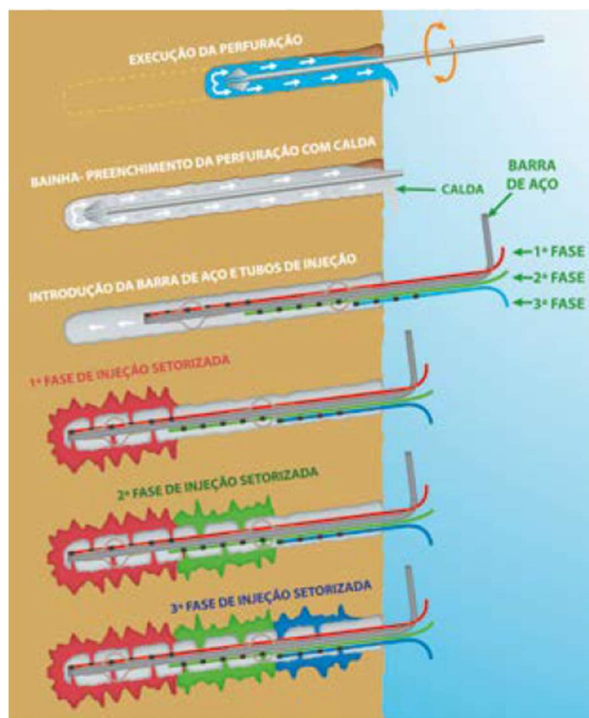
Como fluido de perfuração e limpeza dos furos, pode ser utilizada água pressurizada ou ar comprimido e também pode ser utilizado em alternância com o fluido, trados helicoidais.

A perfuração com ar comprimido é comumente usada em solo grampeado devido à sua eficiência na remoção de material e na criação de furos para os grampos. O ar comprimido impulsiona a broca, remove os detritos e permite a rápida execução dos furos, tornando o processo mais rápido e econômico em comparação com outros métodos. Tal modelo de perfuração com esse tipo de fluido, atende muito bem se o solo não estiver úmido ou abaixo do lençol freático, caso contrário pode haver entupimento do fluxo de ar com a lama, transmitindo pressão ao terreno (Solotrat, 2023).

Na execução o grampo é introduzido na posição definida com auxílio de dispositivos centralizadores – espaçados a 2 metros – cujo objetivo é garantir o posicionamento correto da perfuração e posteriormente dos grampos. Em conjunto são incorporados os tubos de injeção permanentes – usualmente confeccionados em PVC – com variação de diâmetro entre 5 mm e 18 mm, que possuem o objetivo de conduzir a calda de cimento durante sua injeção, garantindo a homogeneidade. Ao longo de sua extensão, são inseridas válvulas de injeção, constituídas por pequenas aberturas que se expandem mediante a pressão aplicada, permitindo o escoamento controlado da calda. A quantidade de tubos instalada é definida pelo número de fases

de injeção previstas no projeto, sendo prática comum a adoção de um tubo para cada etapa de injeção. A Figura 13 representa a fase de perfuração com fluido em sequência da inserção do tubo de injeção e por fim os grampos.

Figura 13: Perfuração dos grampos



Fonte: Solotrat (2023)

- Grampos autoperfurantes:

Esse modelo de perfuração é constituído por grampos não reinjetados, compostos por elemento monobarra vazado, na qual sua instalação é realizada pela própria barra em conjunto com seus acessórios – que já se encontram incorporados ao grampo – e injetado de forma simultânea com o fluido ligante utilizado.

- Grampos cravados

Nesse processo, executa-se a cravação de tubos, cantoneiras ou barras de aço por percussão, manualmente ou com o auxílio de maquinário, frequentemente utilizado martelos hidráulicos ou pneumáticos (Figura 14). Após a perfuração não há utilização do preenchimento da bainha com calda cimento, logo, não há necessidade da cura do fluido, garantindo assim uma resistência imediata do grampo. Neste caso,

como não há a presença da calda de cimento em contato com a barra de aço para garantir o cobrimento da peça, se faz necessário a proteção contra corrosão, através previsão de uma espessura de aço para agir como metal sacrifício.

De acordo com Silva (2009) essa metodologia de perfuração tem sua vantagem por suas cravações acontecerem em alta velocidade, porém, se faz necessário o controle de qualidade na execução para que sejam utilizados guias para limitar as possibilidades de desvio ou flambagem das barras, garantindo a eficiência do serviço. Em casos de solos com alta resistência, esse método acaba sendo inviabilizado, devendo adotar outro meio de execução das perfurações.

Figura 14: Execução da cravação de grampos



Fonte: Shariati (2011)

2.5.4 Fases de Injeções

A injeção da calda de cimento é a etapa que garante a ligação entre grampo e solo, formando ao endurecer, o bulbo de tensões após aderência entre cimento e solo, permitindo a transferência de esforços. O preenchimento com o ligante pode ser realizado por fase única ou em setores, através de mangueiras instaladas juntamente com o grampo, para isso deve-se medir em cada fase a pressão de injeção e o volume

aplicado. A quantidade de tubulação depende especificamente da quantidade de fases previstas, considerando uma mangueira para cada fase.

- Injeção inicial

Essa etapa também conhecida como preenchimento da bainha, é o processo de aplicação pressurizada do ligante, executada após a perfuração no maciço. Seu objetivo é preencher o espaço onde irá abrigar o grampo, reduzindo os vazios ali existentes entre o solo e grampo. Através do processo executivo de perfuração e injeção, os grampos são chumbados por meio de um fluido cimentício, também denominado de calda de cimento. Sua composição é comumente utilizada calda de cimento ou resina epóxi, sendo uma calda com elevado teor de cimento para maciços de solo – com fator água-cimento (a/c) entre 0,5 e 0,7 em peso – e o polímero em formações rochosas (Solotrat, 2023).

Durante a primeira fase de injeção compreende pelo preenchimento do furo e introdução da barra, alternativamente pode-se realizar a injeção do fluido após locação do grampo, por meio da tubulação acessória – de polietileno ou similar – injetando de baixo para cima, preenchendo toda cavidade.

- Reinjeções

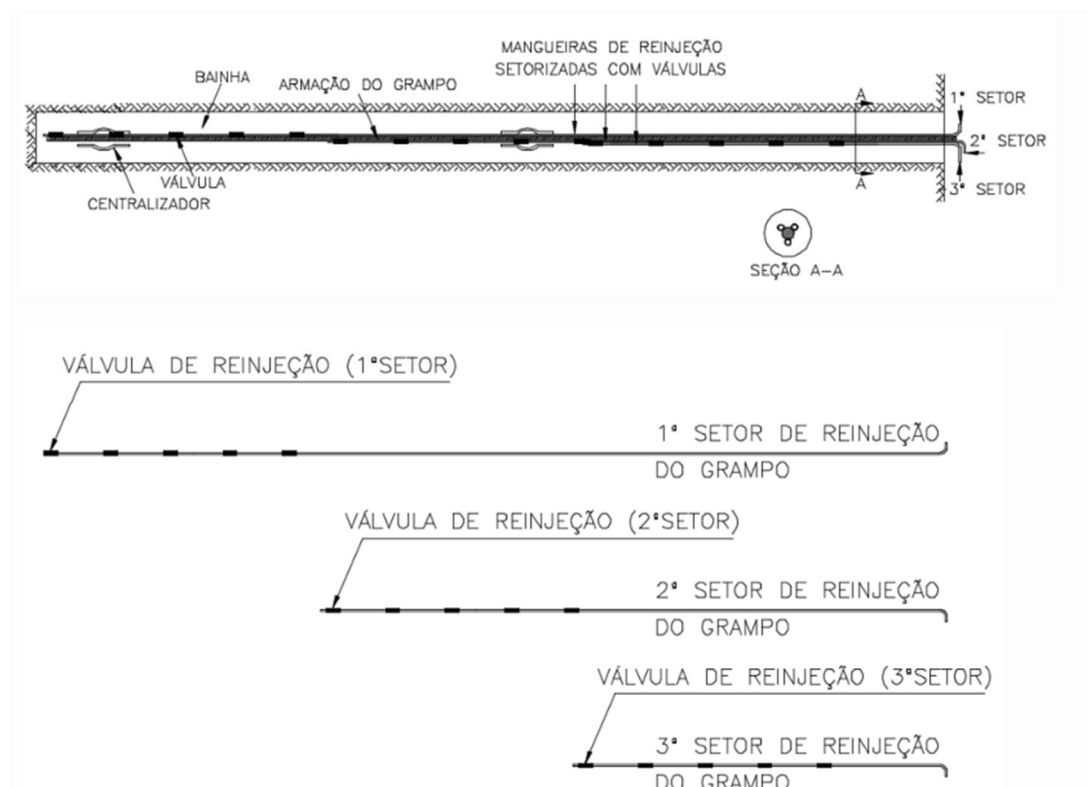
A reinjeção, consiste em injeções adicionais de calda após o preenchimento inicial da bainha. Seu objetivo principal é fazer com que melhore a qualidade da interface solo-grampo, realizando o preenchimento dos vazios que podem ter se formado devido ao processo de exsudação da calda inicial, gerando uma compactação do solo e aumento da área de contato efetiva.

A injeção da calda de cimento inicial pode não preencher completamente todos os vazios encontrados na interface solo-grampo ou o processo de exsudação da água pode criar microvazios no canal perfurado. Então, ao introduzir um volume maior de calda – proporcionado pelas reinjeções – acaba preenchendo esses vazios, consolidando a interface e resultando em um bulbo de tensão maior pois aumenta a área de contato efetiva, elevando assim a capacidade de transferência de carga do grampo e por consequência uma maior resistência ao cisalhamento. (Arêdes *et al.*, 2018; Barbosa *et al.*, 2020)

Além disso, as pressões aplicadas durante essas diversas fases de injeções podem gerar um “gradiente de melhoria do solo” ao redor do bulbo, visto que essas determinadas pressões podem compactar radialmente o solo circundante, aumentando sua densidade e, conseqüentemente, sua resistência ao cisalhamento e seu ângulo de atrito; vale salientar que tal efeito de compactação é particularmente benéfico em solos granulares. Ademais, tal procedimento pode promover o aumento da dilatação entre o maciço e o grampo, resultando em maior intertravamento entre as partículas de solo e o bulbo formado. (Lima, 2009; Barbosa *et al.*, 2020).

De acordo com D’Hyppolito (2017) as reinjeções podem ser realizadas em diferentes momentos após a injeção inicial e sob diferentes pressões, dependendo da metodologia adotada e das características do solo. A Figura 15 representa o esquema representativo do processo de injeção da calda de cimento acoplado com mangueiras de reinjeção.

Figura 15: Desenho esquemático com mangueiras de reinjeção



Fonte: NBR 16920-2:2021

2.6 Ensaio de Arrancamento

O ensaio de arrancamento consiste em um procedimento experimental utilizado para avaliar a resistência à tração de elementos de reforço inseridos no maciço de solo. Este método tem como objetivo principal determinar os parâmetros de interação entre o solo e grampo, fundamentais para determinar a resistência dos grampos em função do talude ao longo do trecho injetado.

Conforme descrito na NBR 16920-2:2021 (Anexo A), todo ensaio deve ser realizado em grampo executado com o mesmo processo adotado em obra (perfuração e injeção); o grampo deve ser composto por dois trechos, sendo um trecho livre de no mínimo 1 metro de comprimento localizado a partir da superfície do terreno e trecho injetado de no mínimo 3 metros.

De acordo com a norma a carga máxima a ser aplicada deve ser limitada à resistência de cálculo da barra de aço, conforme a Equação a seguir:

$$T_{\text{último}} \leq A_s * f_{yk} / \gamma_s \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

$T_{\text{último}}$: Carga última da armação do grampo utilizado no ensaio, expressa em quilonewtons (kN);

A_s : Área da seção transversal da armação do grampo, expressa em metros quadrados (m²);

f_{yk} : Tensão de escoamento característica do aço empregado, expressa em quilopascals (kPa);

γ_s : Coeficiente de minoração da resistência da armação do grampo; para barras de aço igual a 1,15

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

$$T_{ensaio} = L_b * \pi * \phi_{perf} : q_s \leq T_{\text{último}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

T_{ensaio} : Carga máxima prevista para o ensaio, em quilonewtons (kN);

L_b : Comprimento ancorado do grampo ensaiado, em metros (m);

ϕ_{perf} : Diâmetro da perfuração do grampo ensaiado, em metros (m);

q_s : Resistência da interface solo × grampo prevista em projeto, expressa em quilopascals (kPa).

Por fim, o valor do q_s a ser considerado como resultado do ensaio deve ser estabelecido conforme a seguinte equação:

$$q_s = T_{m\acute{a}x} / L_b * \pi * \phi_{perf} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

$T_{m\acute{a}x}$: Carga máxima que se manteve estabilizada no ensaio ou limitada pelo deslocamento máximo estabelecido pelo projetista.

Com relação ao número de ensaios, a NBR 16920-2:2021 afirma que para a devida verificação do parâmetro q_s , devem ser executados no mínimo três ensaios de arrancamento por região representativa.

2.7 Interação Injeção-grampo

No tocante da relação entre a fase de injeção e o grampo, a qualidade da injeção é crucial para a eficácia do grampo e diversos fatores podem influenciá-la, como o fator água/cimento da calda, a pressão de injeção e a presença de aditivos na composição. A resistência de arrancamento (q_s) dos grampos é um parâmetro crítico e pode ser influenciado por diversos fatores, como: características da calda de cimento, pressão de injeção, adesão do solo com a estrutura e o método utilizado na instalação.

Pesquisas desenvolvidas por Silva (2011) concluem que a resistência das caldas de cimento pode apresentar pequenas variações em função da marca de cimento utilizada bem como dos tipos de aditivos nelas empregadas, tendo como principal influência nas propriedades a relação a/c, visto que um volume excedente de água gera o fenômeno da exsudação, retração e porosidade, reduzindo resistência e por consequência a durabilidade do grampo, mesmo com a aplicação de reinjeções.

No tocante à interação entre as características do solo – que envolvem permeabilidade, granulometria, coesão – e a metodologia de instalação (pressão de injeção, tipo de perfuração) torna-se um ponto crítico. Isso se dá pelo fato de que em solos mais finos ou com baixo teor de permeabilidade, a injeção sob alta pressão pode não se tornar eficaz na penetração do solo, resultando em um bulbo que não interage adequadamente com o maciço. No entanto, em solos mais permeáveis, a calda de cimento se dissipará rapidamente sem promover a consolidação entre solo-grampo desejada (Lima, 2009).

Lima (2009) também aborda que outro fator causador da diminuição da resistência do grampo é o excesso de injeção correlacionado com o limite de injetabilidade do solo. Cada tipo de solo possui uma capacidade máxima de absorção da calda de cimento sem que ocorra fenômenos indesejados. Essa injeção excessiva, ultrapassando esse limite, pode gerar a formação de lentes de calda ou fraturamento hidráulico solo, podendo reduzir a resistência ao invés de aumentá-las.

Além disso, o grande número de injeção de fases sem o conhecimento do limite de cada solo, pode aumentar o custo da obra devido à cobrança do volume de calda de cimento injetada, distanciando-se da metodologia original de rápida contenção em maciços de solo e de outros métodos de contenção, como o de tirantes por exemplo Lima (2009).

Por fim, utilização de múltiplos tubos manchetados para as reinjeções, pode possibilitar o comprometimento da adesão solo-estrutura. Visto que o contato entre o solo, tubo de polietileno e o grampo pode criar planos de fraqueza ou dificultar a formação de uma interface coesa, principalmente se a calda não preencher adequadamente todos os vazios possíveis encontrados na perfuração ou se houver movimentação excessiva durante o processo.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de abordagem qualitativa e descritiva, fundamentada no estudo de casos documentados na literatura técnica. A metodologia adotada consiste em uma análise comparativa dos dados apresentados em dois estudos experimentais que investigaram o uso do solo grampeado com diferentes fases de injeção, conforme expostas nas produções acadêmicas realizadas por Silva (2019) e por Pinto *et al* (2022).

3.1 Seleção de Casos

Considerando a escassez de pesquisas acadêmicas desenvolvidas em um período sequente à publicação da norma nacional específica para solo grampeado, os casos analisados foram selecionados através das bases de dados Google Acadêmico e no Repositório Institucional da Universidade Federal do Goiás (UFG), a partir dos trabalhos de Silva (2019) e de Pinto *et al* (2022); desenvolvidos através de práticas executivas e critérios adotados antes da consolidação de diretrizes normativas específicas. Os critérios de seleção incluíram:

- Utilização da técnica de solo grampeado;
- Aplicação de diferentes fases de injeção da calda de cimento;
- Disponibilidade de dados técnicos relevantes, como características geotécnicas, metodologia executiva, resultados de ensaios e desempenho observado.

3.2 Características dos casos

Para cada estudo selecionado, buscou-se sistematizar e organizar as informações mais relevantes, incluindo:

- Caracterização Geológica e Geotécnica;
- Sistema de perfuração e injeção;
- Ensaios de cisalhamento direto (arrancamento) realizados;

- Desempenho observado após as perfurações e injeções.

3.3 Critérios avaliativos

A análise comparativa entre os casos considerou os seguintes aspectos:

- Variação da resistência ao cisalhamento para grampos com injeção simples e com injeções de reforço;
- Influência da caracterização do solo e de suas condições mediante as fases de injeção;
- Procedimentos executivos e instrumentação utilizada;

3.4 Limitações da metodologia

O estudo realizado tem como embasamento dados obtidos especificamente através de pesquisa bibliográfica, fundamentados nas informações disponibilizadas pelos trabalhos originais. Dessa forma, as análises estão sujeitas ao nível de detalhamento apresentado nas fontes e não contemplam ensaios adicionais em campo ou monitoramentos complementares. Portanto, os resultados devem ser interpretados considerando-se tais restrições, bem como as particularidades de cada caso analisado.

4 DESCRIÇÃO DOS CASOS DE OBRA

4.1 Obra 1 localizada na cidade de João Pessoa – PB

Segundo Pinto *et al* (2022), o primeiro caso de estudo foi realizado em uma obra localizada na cidade de João Pessoa, no bairro do Miramar. Trata-se de uma execução de contenção do subsolo de uma edificação residencial, na qual se teve como solução utilizada a técnica em cortina de estaca e solo grampeado, sendo esse último, objeto de estudo deste trabalho.

O talude analisado possui altura com variação entre 6,40 m a 7,49 m, para a devida perfuração dos grampos, os quais foram espaçados em sua terceira e quarta linha de contenção com uma distância uniforme de 1,35 m tanto na direção vertical e horizontal.

Com o objetivo de construir o respectivo perfil geológico do talude e caracterizar o solo em que o mesmo foi inserido, realizou-se a sondagem do tipo *Standard Penetration Test* (SPT) na profundidade referente às locações dos grampos. O perfil geotécnico obtido através da sondagem está representado na Figura 16 e foi caracterizado como silte argiloarenoso, com profundidade de 1,90 m e 5,30 m, com NSPT igual a 6 na região dos grampos submetidos aos ensaios de arrancamento.

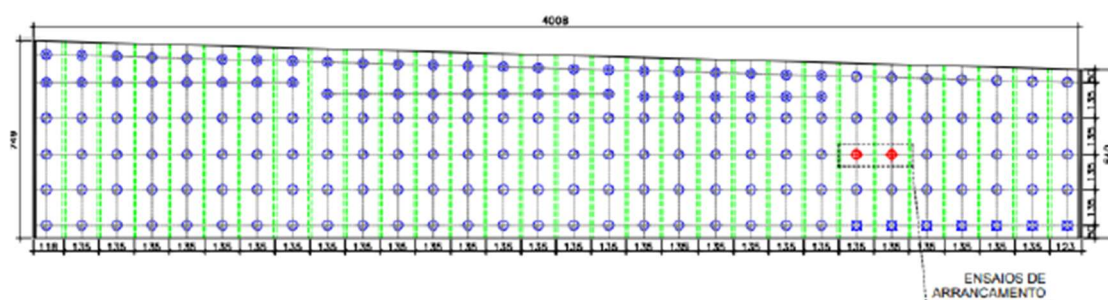
Figura 16: Seção transversal do perfil geotécnico



Fonte: Pinto *et al* (2022).

O processo executivo dos grampos inicia-se pela perfuração do talude, utilizando-se um diâmetro de 100 mm, perfurado através de água pressurizada para promover a desagregação e expulsão do material escavado. Após esta etapa inicial, foram escolhidas duas perfurações (Figura 17) situadas na parte central do talude para que seja realizada a análise da resistência dos grampos quanto às fases de injeção. Dessa forma, na sequência prosseguiu-se à injeção de uma bainha com pasta de cimento, empregando uma relação água/cimento de 0,5. Subsequentemente, o grampo de aço, do tipo CA-50, com bitola de 20 mm e comprimento de 6,00 m, foi instalado. Em seguida, das perfurações escolhidas, em apenas uma foi realizado o processo de reinjeção. Para finalização do processo de contenção, incluiu a construção da parede em concreto projetado, incorporando fibras sintéticas e drenos.

Figura 17: Planta de localização dos grampos selecionados



Fonte: Pinto *et al* (2022).

A avaliação da resistência dos grampos frente às distintas fases de injeção da calda de cimento foi conduzida por meio de ensaios de arrancamento, contemplando tanto o grampo com injeção simples de bainha, quanto aquele submetidos à uma fase de reinjeção.

Para isso, a montagem e execução dos ensaios foram compostas por um conjunto formado por um macaco e bomba hidráulica para imposição das cargas de tração nos grampos em conjunto com um manômetro, capaz de aferir os respectivos carregamentos aplicados em cada estágio. A fim de determinar os deslocamentos causados nas barras de aço, foi utilizado um deflectômetro registrando tanto o deslocamento no momento de aplicação da carga, quanto após o período de estabilização da carga imposta.

4.2 Obra 2 localizada na cidade de Guarulhos – SP

Conforme Silva (2019), o segundo caso de estudo foi realizado em uma obra de infraestrutura na cidade de Guarulhos, São Paulo. Para seleção da área de perfuração em que os ensaios iriam ser executados, foram realizadas inspeções geológicas através de sondagens NSPT, para determinação de cenários favoráveis para a execução dos três modelos de injeção das fases de calda de cimento. A camada na qual foi executado os chumbadores e realizada o estudo, localizava-se a cerca de 14 metros da crista do talude, sendo caracterizada como uma mistura de argila arenosa e argila siltosa.

Diante disso, em sequência foi realizada a execução dos grampos, seguindo o procedimento de perfuração com ar comprimido, com pressões estabelecidas na ordem de 10 kgf/cm². Com o objetivo de inibir a interferência entre furos as perfurações foram realizadas de forma alternada, preservando a integridade do maciço. Como critério de parada, considerou-se o escoamento dos resíduos, garantindo a limpeza adequada e o máximo de preenchimento da bainha.

Para campo de estudo, foram realizados três grampos para a amostra, identificados como E1, E2 e E3; cada um foi executado com fases de injeções distintas, na qual:

- E1: Apenas com preenchimento inicial da bainha;
- E2: Preenchimento da bainha associado com uma fase de reinjeção;
- E3: Preenchimento da bainha associado com duas fases de reinjeção.

As barras utilizadas foram rosqueáveis, com 6 m de comprimento com diâmetro de 34 mm, unidas por luvas, sendo os trechos livres protegidos com tubos de PVC para evitar contato indesejado com a calda. Com o objetivo de garantir a homogeneidade da mistura da calda de cimento, a mistura foi realizada em central próxima ao local de aplicação por meio de misturador de alta turbulência, com fator a/c igual a 0,5.

Dessa forma, a primeira fase de injeção foi realizada de forma ascendente, preenchendo o espaço entre barra e furo. Após o período de 12 horas, realizou-se as reinjeções nos grampos E2 e E3, através de tubos em polietileno. O controle da pressão de aplicação foi realizado com dois manômetros estabilizadores localizados

um na bomba de reinjeção e outro nos chumbadores, limitando a uma ordem de 10kgf/cm^2 . Para finalização do processo de contenção, incluiu a construção da parede em concreto projetado, com duas camadas de tela, garantindo o recobrimento mínimo de 5 cm a cada aplicação, como orientado pela NBR 13070 (ABNT,2012).

Por fim, após 7 dias de cura da calda, foram realizados os ensaios de arrancamento dos chumbadores mencionados. A montagem e execução dos ensaios foram compostas por um conjunto formado por um macaco hidráulico para aplicação das cargas e extensômetros com precisão de 0,01 mm afim de aferir os deslocamentos. O carregamento foi realizado em incrementos progressivos até atingir a força máxima de ensaio, ou até 1,5 vezes a carga teórica admissível. Também foi realizado o ensaio de fluência em carga constante equivalente a 75% da carga de ensaio, monitorando-se os deslocamentos em intervalos regulares durante 60 minutos. Este procedimento visou avaliar a estabilidade dos deslocamentos ao longo do tempo e a transferência efetiva da carga para o maciço.

5 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos através dos dados fornecidos pelos autores nos estudos selecionados, abrangendo as cargas de ensaio estabelecidas e os ensaios de arrancamento utilizados.

Inicialmente, foram apresentados os resultados descritos pelos autores, com o auxílio de tabelas e gráficos comparativos, cujo objetivo é analisar e comparar os ensaios de arrancamento obtidos em ambos os trabalhos, a fim de confrontar os dados de cisalhamento encontrados (q_s) para elucidar os possíveis motivos pelos quais as fases de injeção de reforço levaram a desfechos opostos em cada caso abordado.

5.1 Obra João Pessoa-PB

No estudo conduzido por Pinto *et al* (2022), em solo caracterizado como silte argiloarenoso, foram aplicadas nas fases de estudo, uma sequência de cargas de ensaio para determinar a resistência do grampo e respectivamente o seu comportamento quanto ao deslocamento mediante a submissão dos diferentes estágios de carga.

Segundo os autores, para o ensaio realizado apenas com a fase de preenchimento inicial da bainha, ao atingir o sexto estágio de aplicação da carga, ocorreu a não estabilização da carga, indicando a ruptura e consequentemente, o rompimento na interface solo/grampo. Dessa forma, o ensaio foi finalizado obtendo-se uma resistência ao cisalhamento no valor de 52 kPa, referente à uma carga limite aplicada no sexto estágio de 92,9 kN.

Para facilitar a análise e a compreensão dos dados, foi elaborada a Tabela 5, na qual resume os resultados principais dos ensaios de arrancamento, permitindo visualizar de forma clara as aplicações realizadas possibilitando observar o crescimento da resistência e a variação do deslocamento. Com base nessa tabela, a Figura 18 relaciona os resultados obtidos em seus respectivos estágios analisados, com as cargas aplicadas e seus deslocamentos aferidos.

Observa-se que ocorreu um aumento da resistência do grampo com a evolução da carga aplicada, sendo possível identificar o momento de ruptura na interface solo/grampo, evidenciado pelo encontro entre as curvas de deslocamento inicial e final dos estágios, simbolizando a ruptura. A Tabela 2 apresenta as variáveis contribuintes

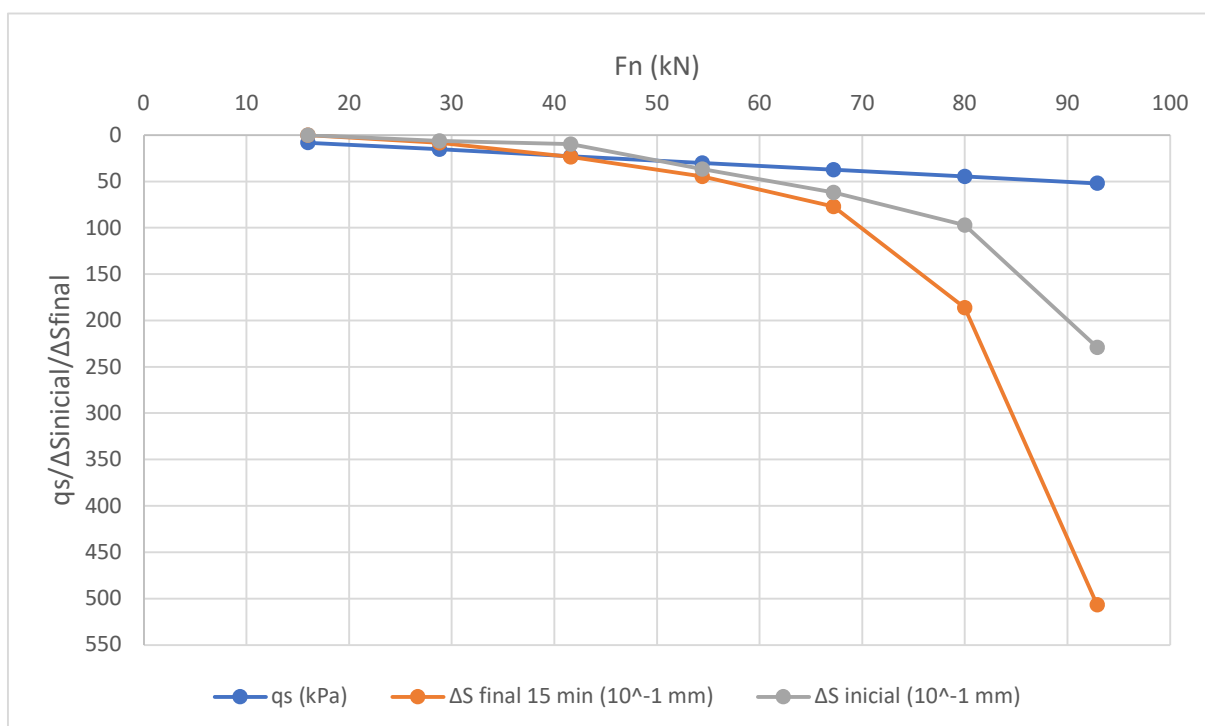
para o ensaio de arrancamento e o seu respectivo gráfico. Para melhor adequação e entendimento, fez-se necessário o aumento da escala da variável deslocamento para permitir o melhor entendimento e compreensão no gráfico.

Tabela 2: Estágios de aplicação das cargas de ensaio com fase única de injeção

Estágios	carga (Fn)	qs (kPa)	ΔS inicial (10^{-1} mm)	ΔS final 15 min (10^{-1} mm)
0	16	8,1	0	0
1	28,8	15,4	6,3	8,5
2	41,6	22,7	9,7	23,6
3	54,4	30	36,8	44,5
4	67,2	37,4	61,9	77,2
5	80	44,7	97,1	186,1
6	92,9	52	229	506,8

Fonte: Adaptado de *Pinto et al* (2022).

Figura 18: Carga Aplicada (Fn) x Resistência ao cisalhamento (qs) x Deslocamentos (Δ) com fase de injeção única



Fonte: Autor (2025)

Com respeito ao ensaio realizado com uma fase de reinjeção, o estudo atingiu o nono estágio de aplicação da carga, na qual foi possível aferir o deslocamento inicial e final. Novamente, ao ser imposto uma nova sequência de carregamento, foi observado o rompimento no conjunto solo/grampo, afirmando assim, desestabilização

da carga e a ruptura da interface. Desse modo, segundo os autores, foi obtido uma resistência ao cisalhamento no último estágio de ensaio no valor de 73,3 kPa, com um respectivo carregamento de 131,3 kN.

Para facilitar a análise e a compreensão dos dados, foi elaborada a Tabela 3, na qual resume os resultados principais dos ensaios de arrancamento, permitindo visualizar de forma clara as aplicações realizadas possibilitando observar o crescimento da resistência e a variação do deslocamento.

Tabela 3: Estágios de aplicação das cargas de ensaio com injeção de reforço

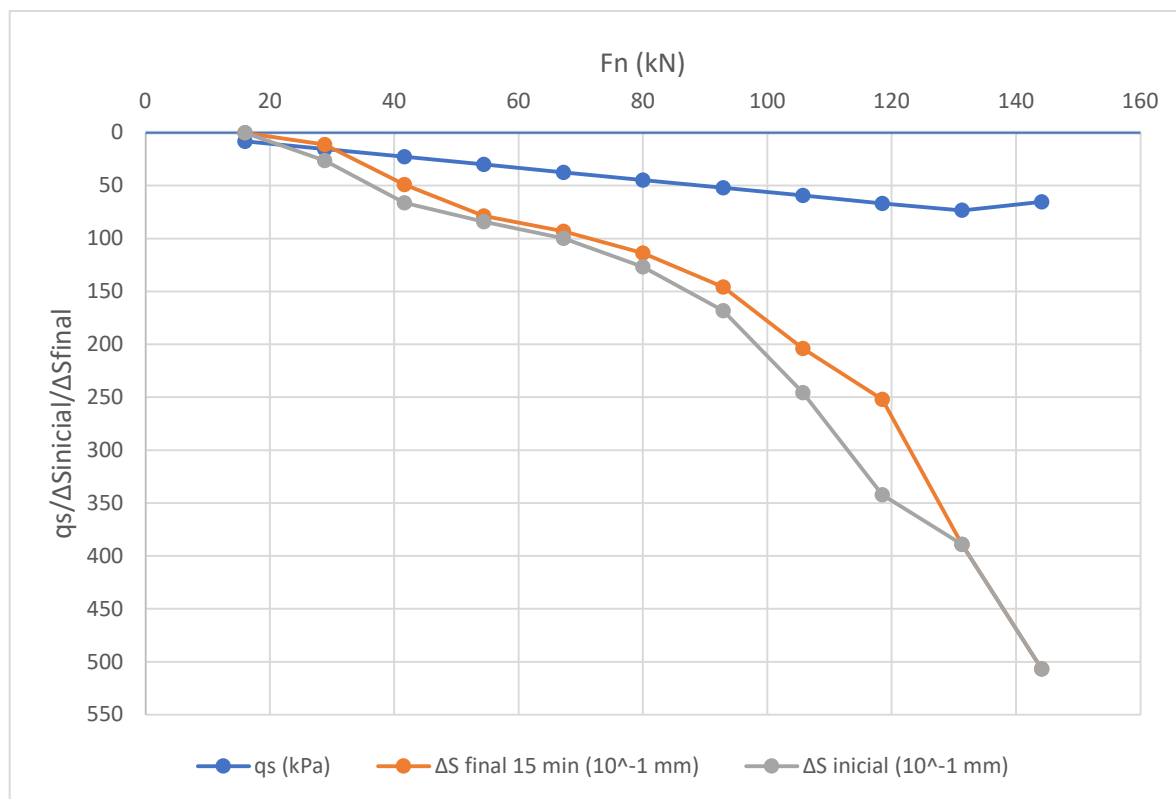
Estágios	carga (Fn)	qs (kPa)	ΔS inicial (10^{-1} mm)	ΔS final 15 min (10^{-1} mm)
0	16	8,1	0,1	0,1
1	28,8	15,4	11,2	26,3
2	41,6	22,7	48,9	66,1
3	54,4	30	78,8	84
4	67,2	37,4	93,2	99,7
5	80	44,7	113,7	126,7
6	92,9	52	145,7	168,1
7	105,7	59,4	203,8	245,8
8	118,5	66,7	252	342,3
9	131,3	73,3	389,1	389,1
10	144,1	65,2	506,7	506,7

Fonte: Adaptado de Pinto et al (2022).

Com base na Tabela 3, a Figura 19 relaciona os resultados obtidos em seus respectivos estágios analisados, com as cargas aplicadas e seus deslocamentos aferidos. Observa-se que houve aumento da resistência do grampo com a evolução da carga aplicada, sendo possível identificar o momento de ruptura na interface solo/grampo, evidenciado pelo encontro entre as curvas de deslocamento inicial e final dos estágios, simbolizando a ruptura.

A Tabela 3 apresenta as variáveis contribuintes para o ensaio de arrancamento e o seu respectivo gráfico. Para melhor adequação e entendimento, fez-se necessário o aumento da escala da variável deslocamento para que houvesse o melhor entendimento e compreensão no gráfico.

Figura 19: Carga Aplicada (F_n) x Resistência ao cisalhamento (q_s) x Deslocamentos (Δ) com fase de injeção de reforço

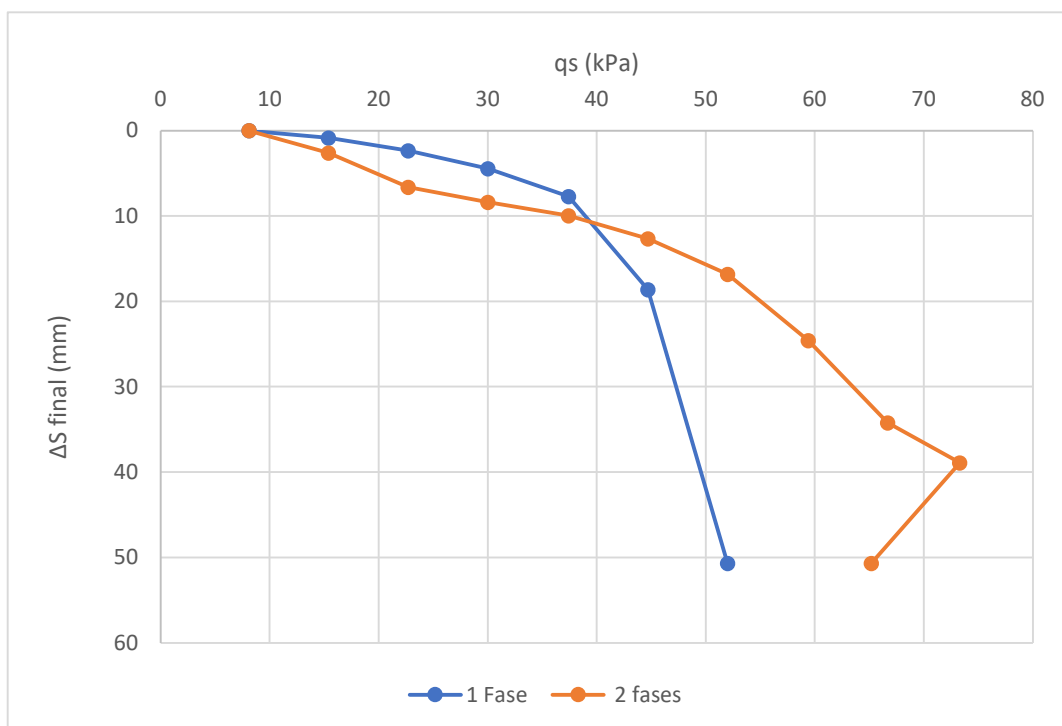


Fonte: Autor (2025)

Os resultados quantitativos demonstraram um ganho significativo de desempenho com a reinjeção. O grampo com injeção simples atingiu uma resistência ao cisalhamento na interface (q_s) de 52,0 kPa. Já o grampo que recebeu a injeção de reforço alcançou um valor de 73,3 kPa, o que representa um aumento de aproximadamente 40% na capacidade de carga.

Dessa forma, a partir dos resultados obtidos, que relacionam as resistências de arrancamento dos grampos e seus respectivos deslocamentos em função dos estágios de carregamento em cada ambiente de estudo, torna-se possível analisar o comportamento dos grampos analisados. Diante disso, foram associados os valores de resistência ao arrancamento (q_s) e os deslocamentos finais (ΔS), considerando tanto a fase de injeção inicial quanto a de reinjeção, sendo esses dados apresentados em um único gráfico (Figura 20).

Figura 20: Resistência ao cisalhamento (q_s) x Deslocamento (ΔS) para diferentes fases de injeção



Fonte: Autor (2025)

O desempenho superior da curva de injeção de reforço, evidenciado na Figura 20, pode ser atribuído a uma combinação de mecanismos geotécnicos que são potencializados pela reinjeção em solos com características favoráveis, como o silte argiloarenoso do estudo.

Em primeira parte, o processo de injeção de infiltração é o principal fator que corrobora para esse aumento de resistência. Segundo Weaver e Bruce (2007), em solos com vasta permeabilidade a calda de cimento age sob pressão preenchendo os vazios intergranulares do maciço adjacente ao furo. Essa ocorrência cria uma zona de transição entre a mistura cimentícia e o solo, criando um “bulbo de ancoragem” maior, não se limitando ao diâmetro perfurado. Esse fato gera o aumento efetivo do diâmetro do grampo e por consequentemente a área de contato e o atrito entre o chumbador e o maciço de solo.

Outrossim, a injeção sob pressão promove um efeito de pressão e confinamento no solo ao redor. A pressão da calda gera um estado de pré-adensamento na interface solo-grampo, garantindo o preenchimento completo do furo. Além disso, Segundo Lazarte *et al* (2003), a injeção sob pressão resulta em valores de aderência maiores comparado à injeção por gravidade. Isso se explica que a

pressão resulta no aumento da tensão normal (confinamento) na interface do grampo, colaborando o aumento da resistência ao atrito, visto que esse fato é uma função direta da tensão normal.

Por fim, a reinjeção também serve para o tratamento de fissuras e descontinuidades do maciço acarretados pelo processo de perfuração que induz a existência desses fatos. A adição da nova fase de injeção preenche essas descontinuidades, garantindo um contato uniforme entre a calda e solo, otimizando a transferência de carga ao longo do trecho ancorado.

5.2 Obra Guarulhos-SP

Em contrapartida, no estudo conduzido por Silva (2019), realizado em solo coesivo de baixa permeabilidade, investigou o desempenho dos grampos – quanto sua resistência – com a ação de múltiplas fases de injeção. Para isso, foram realizados três ensaios de arrancamento nos chumbadores E1, E2 e E3 para quantificar e analisar a resistência q_s em função do deslocamento.

A princípio, após realizar aplicação de 1,5 da carga de ensaio estabelecida, não foram constatados a ruptura dos chumbadores, habilitando assim a implementação de novas cargas.

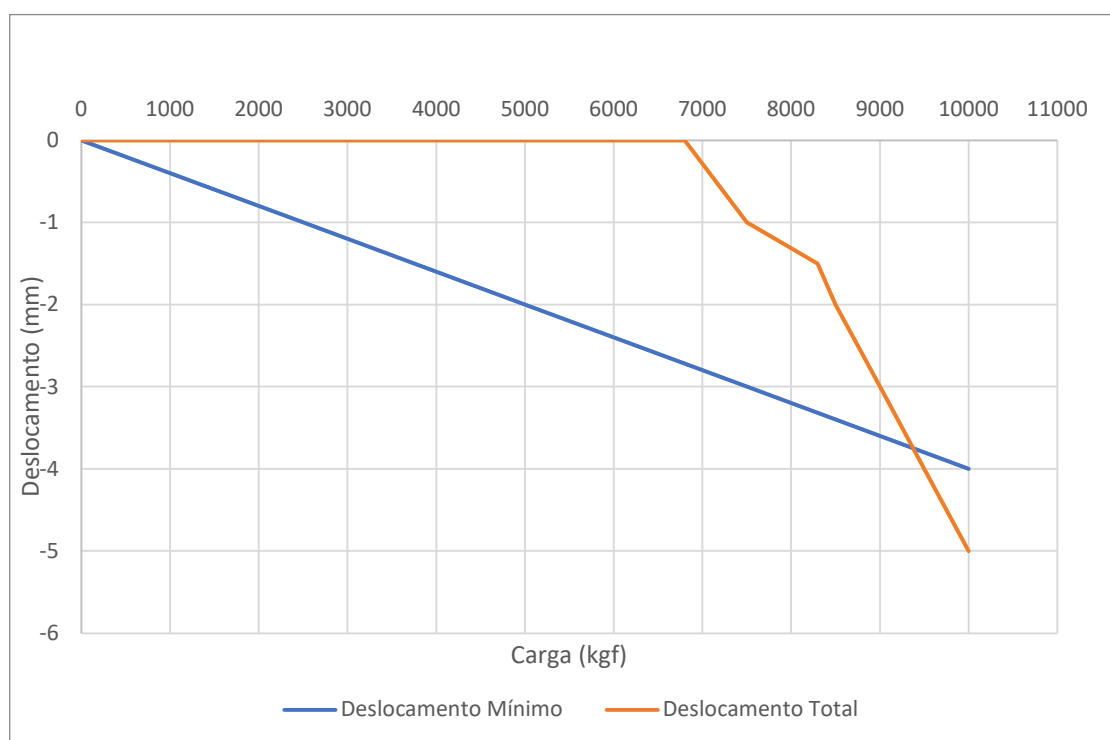
Após uma série de estágios de carregamento – que não foram especificados pelo autor – observou-se que apenas o chumbador E1, o qual não recebeu fases de reforço, atendeu aos critérios de aceitação estabelecidos no estudo. Embora tenham recebido um maior volume de calda de cimento, os chumbadores E2 e E3, seus desempenhos tiveram resultados insatisfatórios quando avaliados pelos critérios avaliativos.

Diferentemente do estudo realizado na pesquisa de Pinto *et al* (2022), esse não avaliou o comportamento dos grampos no tocante da resistência ao cisalhamento (q_s) em função do deslocamento sofrido por ele na execução dos estágios de carga.

Em contraste, a análise foi conduzida a partir das curvas de deslocamento em função das cargas aplicadas aos chumbadores. A análise das cargas x deslocamentos para os chumbadores E1, E2 e E3, representadas nas Figuras 21, 22 e 23 respectivamente, acentua o ponto crítico deste estudo. Enquanto a curva do ensaio E1 atende os critérios de aceitação descritos na metodologia utilizada, diferentemente das curvas dos ensaios E2 e E3.

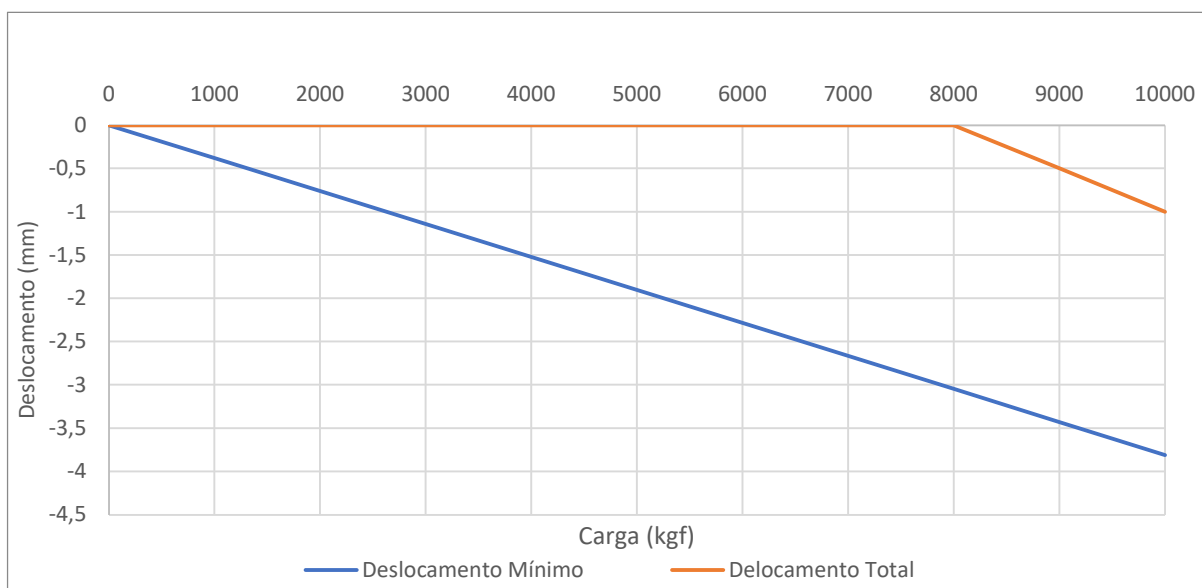
Esse critério – definido pela FWHA – está diretamente relacionado à transferência da carga aplicada no grampo para o solo, visto que para o ensaio ter maior eficácia o deslocamento total do chumbador medido com a aplicação da força máxima no final do procedimento, deve exceder 80% do deslocamento elástico do comprimento livre. No caso dos ensaios realizados, apenas o chumbador E1 superou esse critério, significando que a carga aplicada foi transferida para o solo ao longo do trecho ancorado, diferentemente dos grampos E2 e E3 que não foram bem sucedidos a esse requisito. Apesar dos últimos grampos suportarem as cargas máximas de ensaio, a falta de deslocamento adequado não garantiu que a carga tivesse sido transferida para o solo ao longo do trecho.

Figura 21: Deslocamento x carga do chumbador E1



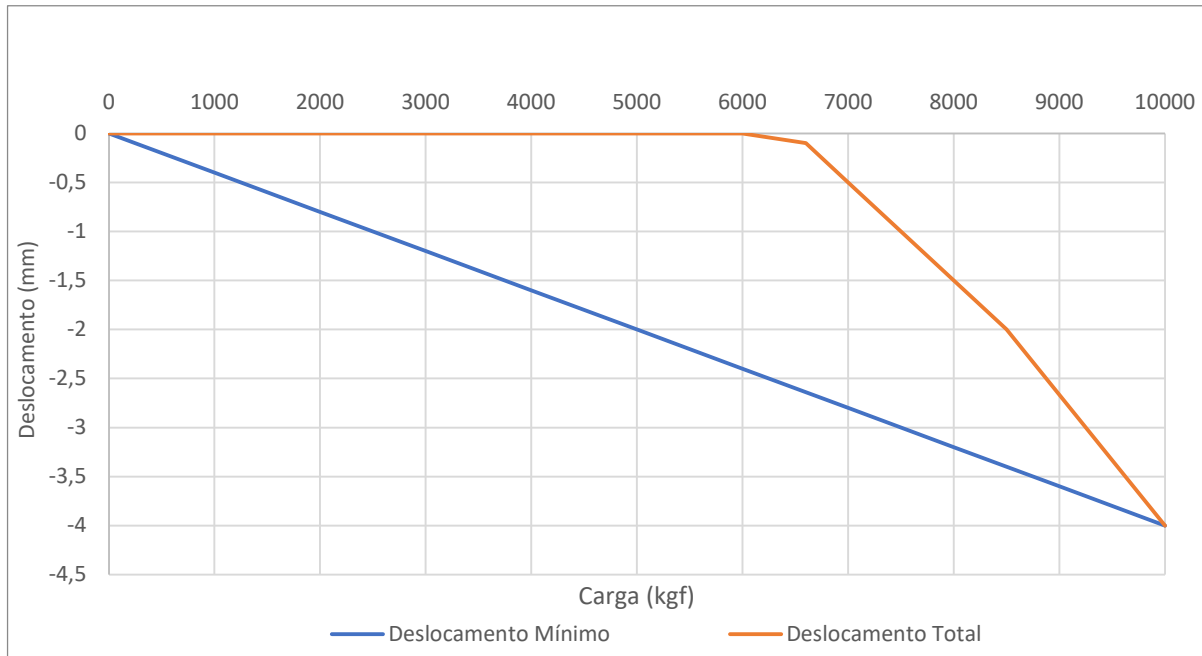
Fonte: Adaptado de Silva (2019)

Figura 22: Deslocamento x carga do chumbador E2



Fonte: Adaptado de Silva (2019)

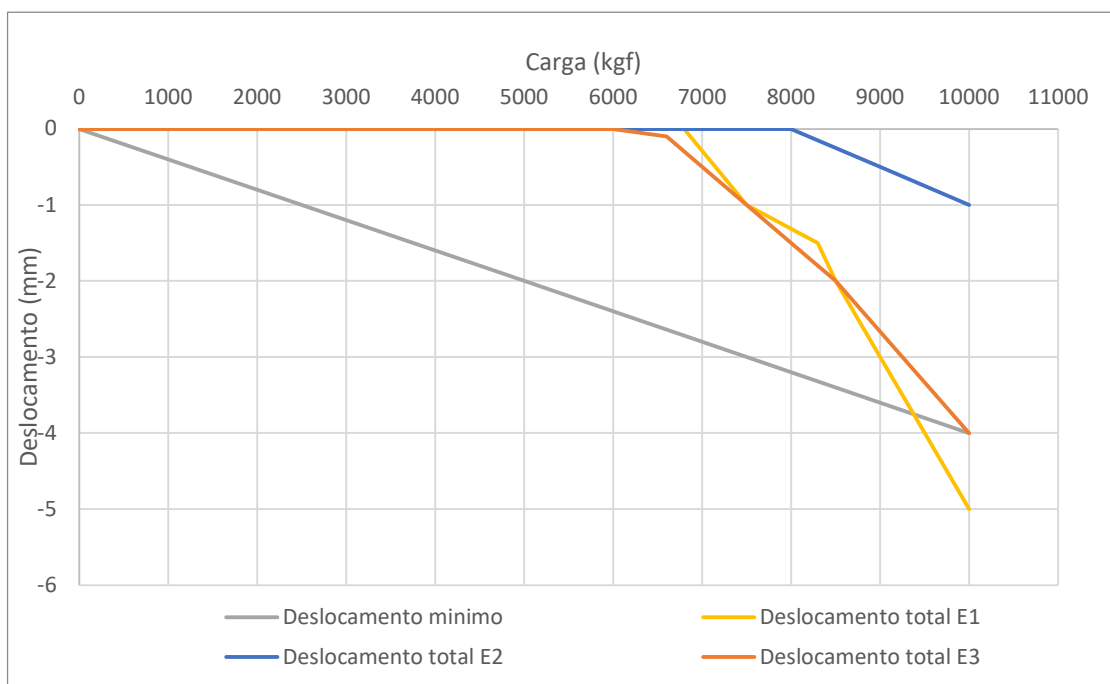
Figura 23: Deslocamento x carga do chumbador E3



Fonte: Adaptado de Silva (2019)

. Dessa forma, foram associados os valores dos deslocamentos de cada chumbador em conjunto com as cargas aplicadas comparando com o deslocamento mínimo imposto pela metodologia aplicada, considerando tanto a fase de injeção inicial quanto as fases de reinjeções para comparativo de sua eficiência, sendo esses dados apresentados em um único gráfico (Figura 24).

Figura 24: Deslocamento dos grampos E1, E2 e E3 x Cargas aplicadas



Fonte: Autor (2025)

Diante do exposto, um dos principais fatores que corroboram para que esta redução venha acontecer é a baixa permeabilidade do solo coesivo. Conforme estabelecido por Weaver e Bruce (2007), o preenchimento de vazios através do mecanismo ideal de injeção de infiltração, torna-se inviável em maciços argilosos ou siltosos de baixa permeabilidade. Esse fator ocorre ao injetar a calda de cimento sob alta pressão, há a possibilidade de exceder a resistência a tração do solo, acarretando o fraturamento hidráulico. Segundo Bustamante e Doix (1985), em solos finos, a injeção sob pressão tende a criar uma rede de fissuras preenchidas por cimento em vez de permear o maciço. Essas fissuras, preenchidas com uma calda lisa, criam planos de fraqueza e não garantem uma aderência eficaz com a matriz de solo adjacente.

Consoante ao observado por Silva (2019), outro viés que corrobora a redução da resistência ao arrancamento dos chumbadores é a presença dos tubos de injeção durante o processo, visto que, na maioria das vezes serem compostos por polímeros lisos, estes podem atuar como “agente desmoldante” entre a calda e o solo criando uma interação de baixo nível de atrito. Na análise realizada através dos ensaios dos chumbadores E2 e E3, a carga não estava sendo transferida para uma zona de ancoragem; o sistema não possuía aderência ao longo dos planos de fraqueza criados pelo fraturamento hidráulico ou pela interface com os tubos de injeção. O aumento do volume da calda de cimento foi inerente à sua devida função de permear os vazios ainda encontrados na interação solo-grampo, sem formar um sistema único, confinável e estável.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou a análise comparativa entre dois casos de obras que utilizaram diferentes fases de injeção da calda de cimento em solo grampeado, tendo como base os estudos realizados por Pinto et al (2022) e Silva (2019). Por meio da revisão bibliográfica, foi possível identificar as vantagens e limitações apresentadas com a inserção de diferentes fases de injeção da calda de cimento nas perfurações.

A metodologia de análise aplicada nos casos demonstrou que a eficácia das fases de injeção de reforço está intrinsicamente ligada às condições geotécnicas do ambiente de execução. Na obra 1, em João Pessoa, documentada por Pinto *et al* (2022), caracterizada por um solo silte-argiloarenoso, os ensaios de arrancamento concluíram que a injeção de calda de cimento em fases de reforço da bainha foi altamente benéfica, promovendo um aumento de 40% na resistência ao cisalhamento (qs) na interface solo-grampo. Em contrapartida, na obra 2, em Guarulhos, dissertada por Silva (2019), foi possível verificar a ineficácia da técnica de reinjeção, na qual fases posteriores à de preenchimento inicial da bainha comprometeram a eficácia dos chumbadores. A análise dos dados realizada pelo autor revelou que o grampo com apenas uma injeção da calda de cimento atendeu aos critérios de desempenho, enquanto os que tiveram sucessivas fases de reinjeções, obtiveram a ineficácia na transferência das cargas para o solo e por consequência, a redução da sua resistência.

Além disso, este estudo enfatizou como o mecanismo de interação da calda com o solo é um aspecto importante que influencia nesta combinação. No primeiro caso, o sucesso no estudo foi atribuído ao mecanismo de injeção de infiltração que resultou na melhora das propriedades do maciço. No segundo caso, o insucesso justificou-se pela ocorrência de fraturamento hidráulico, gerando planos de franqueza e pela possível criação de uma interface de baixa aderência devido ao material dos tubos de injeção. Desse modo, a análise aprofundada do comportamento do solo, bem como a adequação do método executivo, mostrou-se fundamentais para garantir a segurança e a eficiência da contenção.

Nesse sentido, apesar das contribuições de cada estudo, a principal limitação encontrada foi a dependência das informações disponíveis nos trabalhos analisados, o que impediu a realização de uma validação experimental própria para o controle de todas as variáveis. Outra limitação esteve relacionada à necessidade de utilizar

embasamentos em normas nacionais não específicas para solo grampeado ou em referências internacionais, visto que a norma nacional específica para essa tipologia de contenção foi publicada apenas após o desenvolvimento desses estudos. No caso do estudo de Silva (2019), a complexidade dos fenômenos envolvidos abre margem para múltiplas interpretações teóricas. Contudo, o trabalho alcançou seus objetivos, oferecendo uma base sólida para a compreensão dos fatores que governam o desempenho de grampos com múltiplas fases de injeção.

Desse modo, os resultados encontrados evidenciam que a aplicação de fases de injeção de reforço não é uma solução universal, sendo sua viabilidade e eficiência condicionadas a uma abordagem rigorosa, necessitando um estudo geotécnico detalhado e um controle do método executivo mais específico, mediante cada tipologia de solo a ser perfurado. Nesse contexto, torna-se imprescindível que a execução siga de forma rigorosa o que foi estabelecido em projeto, respeitando a resistência prevista para os grampos e assegurando um controle de qualidade compatível com as premissas projetuais, de modo a evitar comprometer a eficiência da contenção.

Por fim, este trabalho tem como objetivo ajudar a entender melhor o comportamento complexo da interação solo-cimento em diferentes situações e também pretende abrir caminho para novos estudos na área de melhoramento de solos e contenções no futuro.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando as limitações metodológicas deste estudo, especialmente no que se refere à ausência de dados obtidos diretamente em campo e à dependência de informações documentadas em produções acadêmicas anteriores, recomenda-se que pesquisas futuras busquem ampliar e aprofundar o conhecimento sobre o tema por meio das seguintes abordagens:

- **Realização de investigações que ampliem a caracterização geotécnica do solo**, não se restringindo aos resultados obtidos exclusivamente pelo ensaio NSPT. Embora amplamente empregado em levantamentos preliminares, este ensaio apresenta limitações na representação da heterogeneidade e da variabilidade dos solos, especialmente em encostas naturais, mediante sua diversidade de camadas com espessuras não controladas;

- **Desenvolvimento de protótipos**, que permitam simular a execução da técnica em solo grampeado em condições controladas de laboratório. Essa abordagem possibilitaria a avaliação de diferentes situações executivas permitindo identificar configurações mais eficientes da técnica em termos de resistência, custo e desempenho a longo prazo;
- **Ampliação da base de estudos de caso**, incorporando novos casos de obras que possam abranger as diversas metodologias executivas da técnica mediante as fases de injeção da calda de cimento, a fim de proporcionar maior representatividade e abrangência as análises comparativas.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13070: Concreto projetado – Moldagem de placas para ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16920-2: Muros e taludes em solos reforçados - Parte 2: Solos grampeados**. Rio de Janeiro, 2021.

AUGUSTO FILHO, O. **Taludes**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 495-528.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Soil strength and slope stability**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. p. 231-304.

FIORI, A. P. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 1984.

INFANTI JR., N.; FORNASARI FILHO, N. **Processos de movimentos de massa**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (ed.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. p. 211-234.

LAZARTE, C. A.; ELIAS, V.; ESPINOZA, R. D.; SABATINI, P. J. Geotechnical Engineering Circular No. 7: **Soil Nail Walls**. Report No. FHWA-IF-03-017. Washington, D.C.: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2003. 394 p.

MACHADO, Jonas Alves; SILVA, Rodrigo Batista da; AMARAL, Luiz Antonio do; SOUZA, Cleide de Fátima. **Aplicação de solo grampeado para recuperação de uma encosta do rio Madeira**. Revista de Engenharia e Tecnologia, Ponta Grossa, v. 14, n. 2, e20100, 9 mar. 2022.

MARINHO, Filipe. **Estabilidade de taludes: deslizamentos de terra. Guia da Engenharia**. Publicado em: 22 maio 2020. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/estabilidade-taludes-deslizamentos/>. Acesso em: 11 ago. 2025.

MELLO, Leonel Dias de Araujo. **Análise do comportamento de uma escavação provisória em solo grampeado**. 2020. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

OLIVEIRA, A. M. S. **Mecanismos de colapso e estabilização de encostas**. In: I Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2010, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBDN, 2010.

ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M.; ZIRLIS, A. **Experiência com solo grampeado no Brasil: 1970-1993. Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 291-304, dez. 1993

INFANTI JUNIOR, N. & FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 9, p.131-152.

SARÉ, R. R. **Estudo de caso de uma contenção em solo grampeado na cidade de São Paulo**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SHARI'ATI, Mohammad-Mahdi. **Rock bolt (parafuso de rocha)**. Pardis, Blog "Golgoft". Publicado em 29 dez. 2011.

SILVA, A. P. L. **Análise experimental de chumbadores de grande capacidade de carga com múltiplas fases de injeção**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

SILVA, D. P. (2009) **Análise de diferentes metodologias executivas de solo pregado a partir de ensaios de arrancamento em campo e laboratório**. São Carlos, 313p. Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos.

SILVA, M. A. **Estudo da influência da relação água/cimento e de aditivos nas propriedades de pastas de cimento para injeção**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SILVA, R. R. C. **Avaliação da resistência ao arrancamento em solo grampeado através de fases de injeção**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 15, n. 1, p. 194-207, 2019.

SOLOTRAT. **Manual de Serviços Geotécnicos**. São Paulo: Solotrat, 2023.

TOMAZZOLI, J. et al. **Mapeamento de áreas de risco a escorregamentos e corridas de detritos na bacia do Rio do Meio, Urubici/SC**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2010, Florianópolis.

TOMINAGA, L. K. et al. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2015.

UNESP/IGLA. **Material Didático sobre Taludes**. 2002.

WEAVER, K. D.; BRUCE, D. A. **Dam Foundation Grouting**. 3rd ed. Reston, VA: ASCE Press, 2007. 552 p. ISBN 978-0784407646.