

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS EXECUTIVAS PARA SOLO GRAMPEADO (*SOIL
NAILING*)**

Dante Bianchi Cunha Martinez

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2017/11)

São Paulo
2017

AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS EXECUTIVAS PARA SOLO GRAMPEADO (*SOIL
NAILING*)

De acordo,

Aluno: Dante Bianchi Cunha Martinez

Orientador: Prof. Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu pai (*in memoriam*),
minha mãe e minha companheira, por me apoiarem e
acompanharem neste meu percurso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que colaboraram e ajudaram na realização deste trabalho, especialmente ao professor Dr. Fernando Antônio Medeiros Marinho pela oportunidade de realizar o trabalho de formatura sob sua orientação, apesar dos meus constantes atrasos de prazos sempre me incentivou e esteve a disposição para ajudar nesse processo.

Quero agradecer a empresa SOLOTRAT, que através do Eng. George Joaquim Teles de Souza, se disponibilizou em auxiliar e incentivar os caminhos da pesquisa. Também a todos os professores, funcionários, motoristas, técnicos, monitores, equipe de limpeza, cantina, portaria e secretaria do IGC por proporcionarem essa realização.

Agradeço à minha família por todos os momentos por me apoiar e possibilitar esta oportunidade. Agradeço também à minha companheira Julia Allegrini, por estar ao meu lado em todos os momentos e me inspirar a vencer mais uma etapa da vida.

Minha gratidão aos amigos Cauê Cioff, Laísa Assis, Brenda Rocha e Rafael Bittencourt por sempre me ajudarem em todas as horas para execução o deste trabalho.

Agradeço ao CEPEGE e a ENEGE por toda a experiência que me foi passada e pelo prazer de possibilitar ter conhecido grandes amigos enegélicos, os melhores amigos de uma semana.

Um grande abraço a todos os amigos destes anos que passei no IGC, da geologia depois dos 30, da pós-graduação, da licenciatura e do pessoal das republicas: Cativoiro, Covil, Pánapia e Astenosfera. Um abraço a turma 54, onde tudo começou, em especial a toda diretoria, a turma 55 que me acolheu e tivemos ótimos momentos juntos, as turmas de 2004 e 2006 por me mostrarem a geologia e a todos meus sobrinhos que sempre foram parceiros quando precisei.

RESUMO

A técnica de contenção denominada solo grampeado (*soil nailing*) tem como objetivo reforçar o solo de modo a garantir estabilidade em maciços a serem cortados, taludes naturais ou artificiais com estabilidade relativa ou já rompidos. Essas superfícies são reforçadas pela execução de chumbadores (barras rosqueadas ou vergalhões de aço), revestimento de concreto projetado e instalação de drenagem adequada. Os chumbadores recebem carga devido à movimentação do solo, de forma que a tensão nas barras é gerada passivamente em resposta à deformação deste durante o processo subsequente de escavação.

O método ganhou notoriedade em países como França, Alemanha, Reino Unido, Estados Unidos e Índia, na construção ferroviária e de autoestradas, para estabilização de taludes laterais em vias existentes ou colocação de novas vias adjacentes a elas. Esta técnica foi utilizada em uma variedade de projetos de engenharia civil a partir do final da década de 1970 e originou-se como extensão da técnica de contenção por tirantes em rocha e do “Novo Método Austríaco de Tunnelamento” (*New Austrian Tunneling Method*, NATM).

A utilização desta técnica por empresas brasileiras ocorreu pela primeira vez em obras de contenção a partir de 1970, com utilização crescente no país até os dias atuais, apesar da ausência de uma norma nacional. Visando contribuir para o conhecimento técnico e normativo sobre solos grampeados, este trabalho consiste na revisão bibliográfica de diversos procedimentos para execução do método, através da síntese das diretrizes de metodologia executiva em normas, manuais de órgãos públicos, orientações técnicas e outras publicações em âmbito nacional e internacional, no intuito de apresentar e discutir as similaridades e diferenças entre os procedimentos adotados.

ABSTRACT

The so-called soil nailing technique aims to reinforce the soil to guarantee slope stability in cuttings, natural or excavated slopes with relative stability or already broken. These surfaces are reinforced by the execution of nails (steel bar or reinforcing bar), shotcrete coating and proper drainage installation. The nails receive load due to the movement of the ground, so that the tension in the bars is generated passively in response to its deformation during the subsequent excavation process.

The soil nailing method has gained notoriety in countries such as France, Germany, United Kingdom, the United States and India, in railway and highway construction, for stabilization of lateral slopes in existing roads or the placement of new roads adjacent to them. This technique was used in a variety of civil engineering projects from the late 1970s and originated as an extension of the tie-rod retaining wall technique and the "New Austrian Tunneling Method" (NATM).

The use of this technique by Brazilian companies first occurred in containment works from 1970, with increasing use in the country until nowadays, despite the absence of a national standard. Attempting to contribute to the technical and normative knowledge on soil nailing, the present work consists of the bibliographic review of several procedures for the execution of this method, through the synthesis of the guidelines of executive methodology in standards, manuals of public agencies, technical guidelines and other publications at national and international level, to present and discuss the similarities and differences between the procedures adopted.

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Metas e objetivos.....	2
3. Trabalhos prévios	2
3.1. Terminologia	2
3.2. Histórico do Solo Grampeado.....	3
3.3. Histórico do Solo Grampeado no Brasil	4
3.4. Técnica.....	4
3.5. Vantagens e desvantagens do solo grampeado	9
3.6. Informações necessárias para projeto	10
Requisitos específicos do projeto	10
Informações iniciais do projeto.....	11
Investigações subterrâneas	12
Requisitos para seleção de localização e número de perfurações exploratórias.....	13
Procedimentos de campo	16
Teste laboratorial de solo.....	19
Seleção de parâmetros e etapas para execução de projeto	22
4. Materiais e métodos	25
5. Resultados obtidos	26
5.2. Etapa inicial do projeto	26
5.3. Chumbadores	27
5.4. Concreto projetado	29
5.5. Drenagem.....	32
6. Interpretação e discussão dos resultados	33
7. Conclusões.....	35
8. Referências bibliográficas.....	37

1. INTRODUÇÃO

A técnica de solo grampeado foi utilizada pela primeira vez por empresas brasileiras em obras de contenção em 1970 e desde então, ocorre o crescimento do uso da técnica no país (Ortigão *et al.*, 1995). Devido ao solo grampeado ser uma técnica simples e relativamente mais econômica que outros processos para estabilização de taludes, observa-se expressivo aumento em sua aplicabilidade, evidenciando também problemas associados aos métodos construtivos (Zirlis, A. C., 1999).

Com o objetivo de reforçar o solo de modo a garantir estabilidade a taludes naturais ou de escavações pode-se utilizar a técnica denominada solo grampeado (*soil nailing*), na qual estes taludes instáveis são passivamente reforçados pela introdução de elementos relativamente delgados (normalmente barras rosqueadas ou vergalhões de aço), chamados de chumbadores, que recebem carga devido a movimentação do solo em escavação, ou seja, a tensão nas barras é gerada passivamente em resposta à deformação do solo durante o processo subsequente de escavação (Prashant e Mukherjee, 2010).

A técnica de solo grampeado é o produto da execução de chumbadores, concreto projetado e drenagem almejando a estabilização de taludes que apresentam condições instáveis como em maciços a serem cortados, taludes existentes e taludes rompidos. Os chumbadores geram a estabilização geral do maciço, o concreto projetado a estabilidade local junto ao paramento e a drenagem atua nos dois casos (Val, E. C. D., 1999).

A contenção utilizando a técnica de solo grampeado ganhou notoriedade em países como França, Alemanha, Reino Unido, Estados Unidos e Índia na construção ferroviária e de autoestradas para estabilização de taludes laterais em vias existentes ou colocação de novas vias adjacentes a uma pré-existente como exemplifica a figura 1, sendo também utilizada para suporte temporário em escavações de edificações.

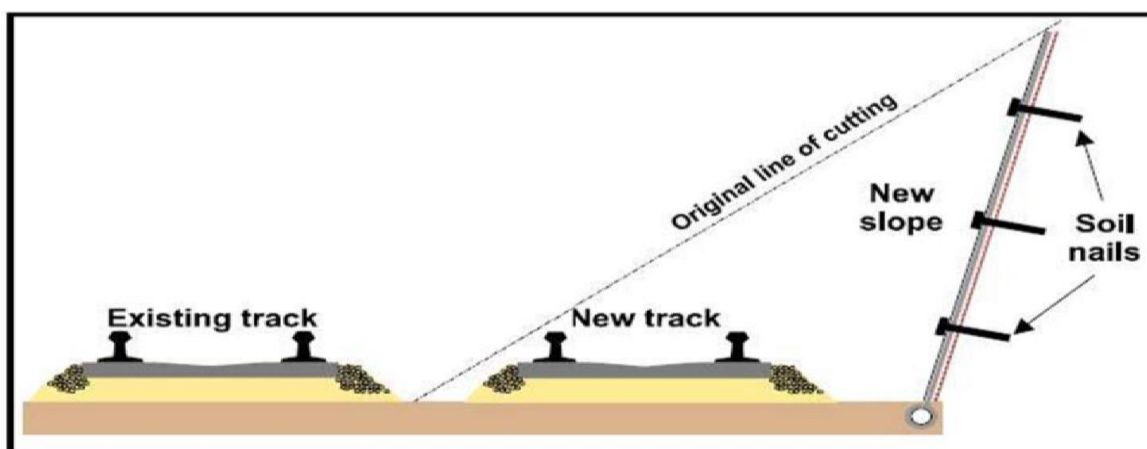


Figura 1: contenção de solo grampeado em construção ferroviária para colocação de novos trilhos adjacentes. Extraído de Prashant e Mukherjee (2010).

O estudo proposto neste TF consiste na revisão bibliográfica dos diversos procedimentos para execução do solo grampeado, comparando diversas normas, manuais de órgãos públicos e orientações técnicas vigentes - em âmbito nacional e internacional, por meio da análise teórica, no intuito de apresentar e discutir as similaridades e diferenças entre eles. Também é apresentada a descrição das informações necessárias para a execução de um projeto de solo grampeado, que são bastante relevantes, uma vez que o país ainda não possui uma norma técnica específica para esse tipo de construção.

2. METAS E OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a análise teórica por meio de diversas normas, manuais de órgão públicos e orientações técnicas vigentes, internacionais e nacionais, sobre o método de solo grampeado. A metodologia executiva da técnica de solo grampeado discutida no presente trabalho foi baseada no relatório submetido a *Research and Standards Organization* (RDSO), “*Soil Nailing for Stabilization of Steep Slope Near Railway Tracks*” (Prashant, A., Mukherjee, M. (2010)), na publicação da *Federal Highway Administration* (FHWA-NHI-14-007), “*Soil Nail Walls Reference Manual*” (Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., e Berg, R. (2015)), e na publicação da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), “Solo grampeado: projeto, execução e instrumentação” (Zirlis, A. C., Val, E. C. D., Neme, P. A. (1999)) e em parceria com a Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia (ABEF) e a ABMS, “Reforço do Terreno” (Abramento, M., Koshima, A., Zirlis, A. C. (1998)), afim de comparar as metodologias gerando uma tabela com as descrições adotadas pelos trabalhos.

3. TRABALHOS PRÉVIOS

3.1. Terminologia

De acordo com Val, E. C. D. (1999), mundialmente, a técnica de utilização de chumbadores sub-horizontais para fins de estabilização de cortes de taludes sub-verticais como reforço de solo, vem sendo utilizada desde a década de 70. Os franceses nessa época já haviam criado técnicas para estabilizar muros em aterros utilizando tiras metálicas com face de placas de concreto pré-moldado conhecidas como “*Terre Armée*” (terra armada). Então, passaram a denominar essa nova contenção com uso de chumbadores, que tem os mesmos princípios utilizados nos aterros reforçados, como “*terre clouée*” (terra pregada) ou “*sol cloué*” (solo pregado). Posteriormente, a técnica também foi difundida entre os ingleses que a denominaram de “*soil nailing*” (solo pregado).

3.2. Histórico do Solo Grampeado

Segundo Singla (1999), o método de solo grampado foi utilizado em uma variedade de projetos de engenharia civil a partir do final da década de 1970. A técnica originou-se como uma extensão da contenção por tirantes em rocha e do “Novo Método Austríaco de Tunelamento” (*New Austrian Tunneling Method*, NATM), o qual combinou concreto projetado reforçado e chumbadores para providenciar um sistema de suporte flexível para a construção de escavações subterrâneas. Na América do Norte, a primeira aplicação registrada do método foi em Vancouver no começo da década de 1970 para suporte temporário de escavação. Na Europa, as primeiras obras reportadas foram a construção de muros de contenção na França (1972) e Alemanha (1976), ligadas à construção de autoestradas ou ferrovias com escavação de talude ou ao suporte provisório na escavação de edificação.

À empreiteira francesa Bouygues, em empreendimento conjunto com a empreiteira especializada Solentache, é creditado o primeiro registro de contenção por solo grampeado na Europa (1972-1973), aplicado em talude escavado em solo arenoso com 18 metros de altura e 70 graus de inclinação na região de Fontainebleau, como parte de um projeto de ampliação de uma ferrovia próxima de Versailles. Um total de 12.000 m² da face do talude foi estabilizada por mais de 25.000 barras de aço concretadas dentro de buracos pré-perfurados de até 6 m de extensão.

O primeiro grande programa de pesquisa sobre solo grampeado (em alemão, *bodenvernagelung*) foi feito na Alemanha pela Universidade de Karlsruhe e a empreiteira Bauer (1975-1981). Esse programa envolveu testes em larga escala de uma variedade de configurações experimentais. Como resultado do uso crescente do solo grampeado em obras de contenção na França, e devido à falta de uma metodologia de projeto, os franceses iniciaram seu próprio programa experimental – *Clouterre* – em 1986. O programa *Clouterre* envolveu três experimentos em larga escala em um espaço preparado na região de Fontainebleau e o monitoramento de seis estruturas em escala real de serviço. A partir dos resultados destes experimentos na França foi escrito o livro “*Projet National Clouterre*” e posteriormente, iniciou uma segunda fase do programa, chamada de “*Clouterre II*”, resultando na publicação em 2002, ambos pela “*École Nationale des Ponts et Chaussées*” (ENPC) em Paris.

Desde a introdução do solo grampeado na Europa e a subsequente conduta desses programas experimentais, o sistema de solo grampeado tem sido usado extensivamente em ambos os países, França e Alemanha. Os maiores atrativos do método são sua economia, flexibilidade de construção, capacidade de fazer uso de equipamento de construção de pequeno porte que seja particularmente apropriado para o uso em ambientes urbanos, e sua adaptabilidade geral para aplicações especiais.

Até o fim do século XX foram reportados na França mais de 100.000 m², por ano, de muros utilizando a técnica de solo grampeado, considerando somente obras públicas, além

de numerosas contenções menores não documentadas, construídas em projetos privados. Neste país, em Montpelier, encontra-se um dos maiores taludes de solo grampeado vertical, com 22 metros de altura; e o maior muro de solo grampeado inclinado, com 73 graus de inclinação e quase 30 metros de altura, localizado na entrada do túnel Dombes, perto de Lyon. Neste mesmo período, na Alemanha, estima-se a realização de mais de 500 contenções com solo grampeado, em grande parte como obras provisórias de subsolo utilizando revestimento de concreto projetado.

3.3. Histórico do Solo Grampeado no Brasil

No Brasil, a primeira obra onde foi realizada a técnica de solo grampeado, ao que sabe, foi em 1970, na construção do túnel de adução do Sistema Cantareira, em São Paulo. Nessa obra foi utilizado o método NATM para estabilizar o talude do emboque, usando chumbadores e concreto projetado, aproveitando o sistema construtivo do túnel. Neste período nomearam o método como solo enraizado. Muitas contenções em cortes realizadas pela empresa Rimobloco, executadas em meados dos anos 70, utilizando chumbadores e face de elementos pré-fabricados de concreto, ainda se encontram de pé. Após a denominação pioneira de solo enraizado, também já foi chamada de solo pregado e solo grampeado. Porém, em termos linguísticos, a tradução mais fiel, seria solo grampeado, apesar dos chumbadores não serem cravados dinamicamente dificulta a associação com 'pregos" (Val, E. C. D.,1999). Segundo Zirlis (1999), no período entre 1970 a 1996 foram documentados aproximadamente 55.000 m² em obras de solo grampeado, porém acredita-se que seja menos da metade das obras executadas no Brasil.

3.4. Técnica

De acordo com Verma (2014), solo grampeado é uma técnica onde taludes, escavações ou muros de contenção são reforçados pela introdução de elementos de reforço relativamente finos no talude. Tal elemento estrutural que fornece transferência de carga para o solo na aplicação de reforço de escavação é chamado de chumbador. Chumbadores são normalmente instalados em uma inclinação de 10 a 20 graus em relação à horizontal e estão sujeitos primariamente à tensão de tração. A tensão de tração é aplicada passivamente nos chumbadores em resposta à deformação dos materiais retidos durante o processo de escavação subsequente. O chumbador é tipicamente usado para estabilizar taludes existentes ou escavações onde geralmente a construção *top-down* é vantajosa comparada aos outros sistemas de muro de contenção, exceto em casos de taludes pré-existentes.

As aplicações em obras de contenção utilizando a técnica de solo grampeado são particularmente adequadas para escavação em condições de solo que exijam corte verticais ou quase verticais. Eles têm sido usados com sucesso em cortes de autoestrada; remoção de talude sob pilar de ponte existente durante ampliação de passagem inferior; para o reparo,

estabilização, e reconstrução de estruturas de contenção existentes; e portais de túnel (Verma *et al*, 2014).

Os elementos estruturais associados às obras de solo grampeado são (Prashant e Mukherjee, 2010):

- Barras de reforço de aço - As barras de reforço de aço sólidas ou ocas (com força mínima de 415 kPa) são o principal componente de um sistema de grampeamento. Esses elementos são colocados em buracos pré-perfurados e fixados com calda de cimento.
- Centralizadores – Material de PVC fixado ao longo da barra de aço para assegurar que o chumbador esteja centralizado no furo, com espaçamento regular ao longo da barra de no máximo 3 metros e uma distância nas extremidades de 0,45 metros (Lazarte *et al*. 2015).
- Calda de cimento – Nata de cimento na proporção 0,45 (proporção entre água/cimento) é injetada no buraco pré-perfurado após a colocação do chumbador para preencher o espaço anular entre a barra de aço e o solo em sua volta. Geralmente, cimento puro é usado para evitar desgaste no furo; porém, argamassa também é usada em perfuração de furos sem revestimento. O cimento transfere o estresse do solo para o chumbador e também age como uma proteção à corrosão para a barra de aço. Um tubo de cimento é usado para injetar a calda.
- Cabeça do chumbador (*Waler bars*) – A cabeça de chumbador é a ponta rosqueada do chumbador que se projeta do revestimento do muro. Ela é uma estrutura quadrada de concreto que inclui a placa de aço, porcas de aço, e reforço de cabeça do chumbador. Essa parte da estrutura fornece força de apoio, e transfere a carga de apoio da massa do solo para o chumbador.
- Porca, arruela e placa de apoio – Estas são anexadas à cabeça do chumbador e usadas para conectar o chumbador ao revestimento. As placas de apoio distribuem a força no final do chumbador para o revestimento temporário de concreto projetado.
- Revestimento temporário e permanente – Chumbadores são conectados à superfície de escavação ou talude por elementos de revestimento. Revestimento temporário é aplicado na escavação sem suporte antes do avanço dos níveis de escavação. Ele fornece suporte para o solo exposto, ajuda na proteção à corrosão e age como superfície de apoio para a placa de apoio. Revestimento permanente é aplicado sobre o revestimento temporário após os chumbadores serem instalados.
- Sistema de drenagem – Faixas de drenagem verticais de geocomposto são usadas como meio de sistema de drenagem. Elas são colocadas antes da aplicação do

revestimento temporário para coleta e transmissão de água de infiltração que pode migrar para o revestimento temporário. Segundo Kutschke et al. (2007), também são usados drenos sub-horizontais profundos (DHP) para coletar e desviar o fluxo de água do lençol freático, segundo Kutschke et al. (2007).

- Proteção à corrosão – Camadas protetoras de material sintético enrugado [HDPE (Polietileno de Alta Densidade) ou tubo de PVC] são colocadas ao redor da barra do chumbador para fornecer proteção a corrosão adicional.

Na figura 2 são apresentadas fotografias de campo de vários componentes utilizados na construção do muro, e na figura 3 é apresentado o corte transversal de um muro grampeado e seus componentes.

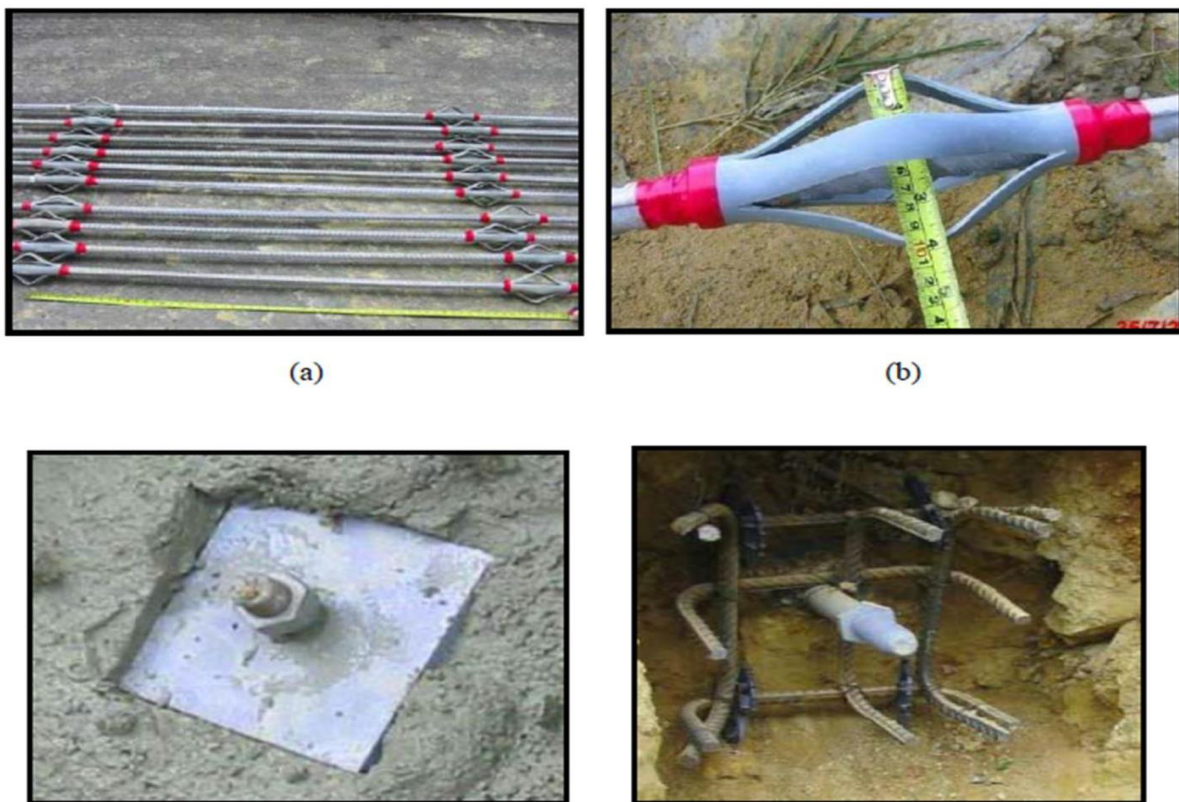


Figura 2: diversos elementos utilizados na construção de um muro utilizando a técnica de solo grampeado: a) barras de aço rosqueado com centralizadores; b) típicos centralizadores; c) placa de aço e arruela de aço; d) reforço para cabeça do chumbador (*Waler bars*) e arruela de aço. Modificado de Yeung (2008).

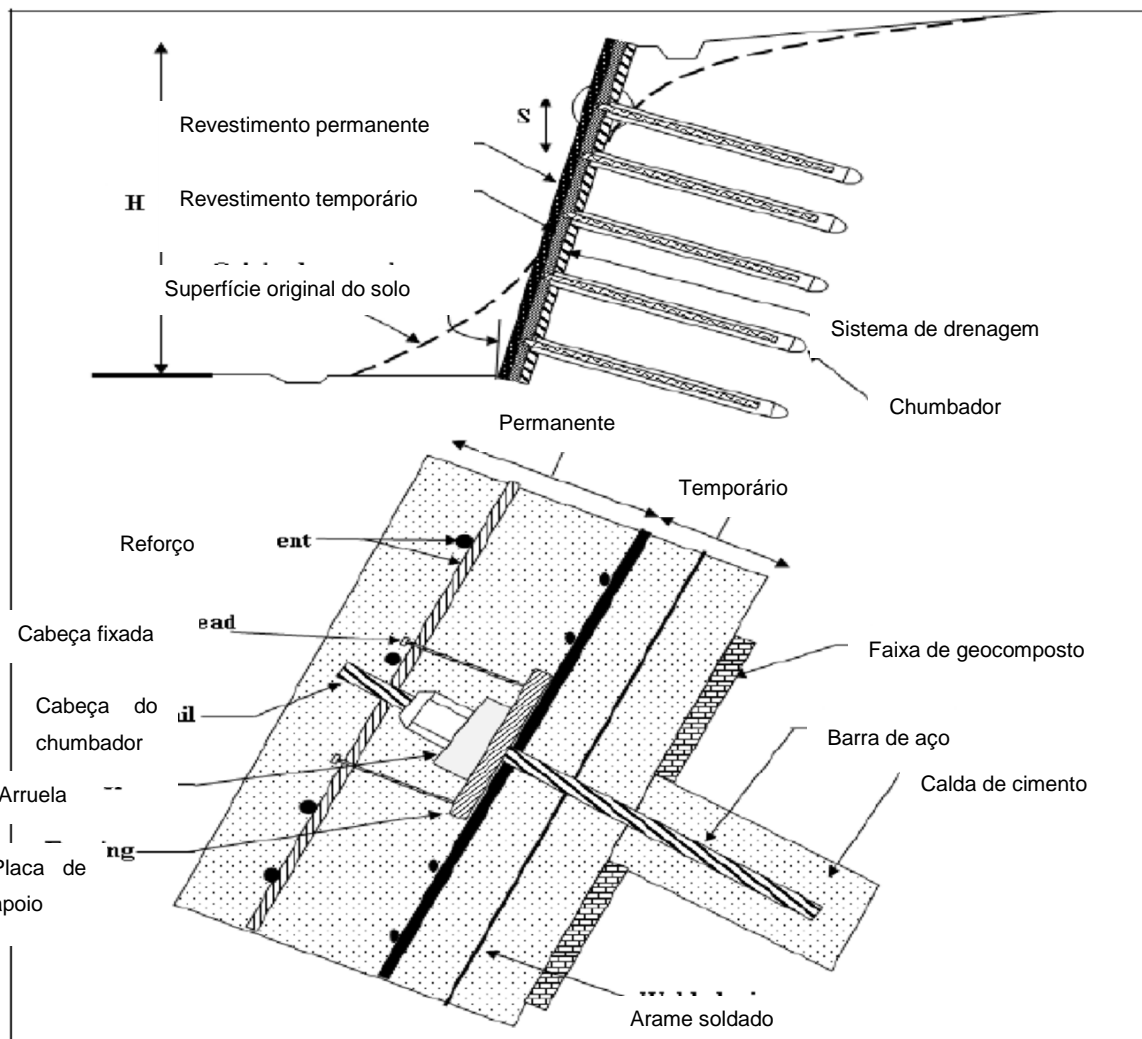


Figura 3: típica seção transversal de um muro de solo grampeado. Modificado de Prashant e Mukherjee (2010).

Segundo Prashant e Mukherjee (2010), a execução das estruturas grampeadas é feita geralmente em estágios e envolvendo os seguintes passos:

- Escavação até a profundidade onde os chumbadores serão instalados em um nível em particular;
- Perfuração de furos com diâmetros entre 6 a 10 centímetros;
- Instalação e aplicação da barra de aço com a calda de cimento;
- Construção de um revestimento temporário de concreto projetado.

Diversos tipos de métodos de solo grampeado são empregados no campo:

1. Grampo cimentado - Após a escavação, os primeiros buracos são perfurados no muro/talude e os grampos são colocados nos buracos pré-perfurados. Finalmente, o furo é então preenchido com calda de cimento como mostra a figura 4 em corte, que destaca na parte superior a barra de aço, no centro o revestimento da barra de aço e na parte inferior, a visão final do grampo cimentado.

2. Grampo guiado - Nesse tipo, grampos são inseridos mecanicamente no muro durante a escavação. A instalação desse tipo de grampo é muito rápida; no entanto, ele não fornece uma boa proteção à corrosão. Esse tipo é geralmente usado como grampeamento temporário.
3. Grampo auto perfurante - Barras ocas são inseridas e nata de cimento é injetada através da barra oca durante a perfuração. Esse método é mais rápido do que o do grampo cimentado e exibe mais proteção à corrosão que o do grampo guiado.
4. Grampo com *jet grouting* - A técnica *jet grouting* (cimento injetado) é usada para erodir o solo e criar o furo para instalar as barras de aço. O cimento fornece proteção à corrosão para o grampo.
5. Grampo lançado - As barras são “lançadas” dentro do solo a uma velocidade muito alta, usando-se um mecanismo de disparo envolvendo ar comprimido. Esse método de instalação é muito rápido; no entanto, é difícil controlar o comprimento da barra que penetra o solo.

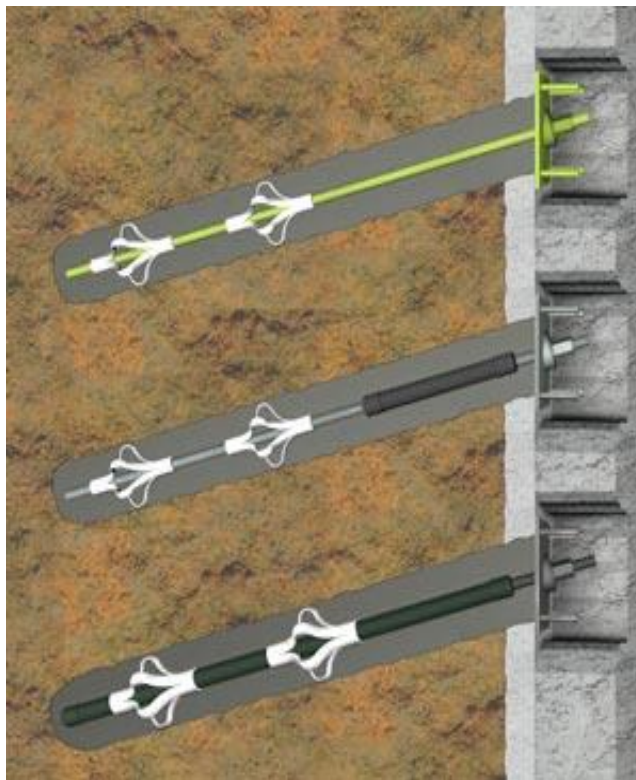


Figura 4: Seção transversal de uma contenção com chumbadores cimentados. Extraído de Prashant e Mukherjee (2010).

Na figura 5, observa-se, à esquerda, uma rodovia com um muro de contenção finalizado onde foi aplicado o método de solo grampeado e, à direita, observa-se uma obra na ferrovia de contenção em fase de implementação.

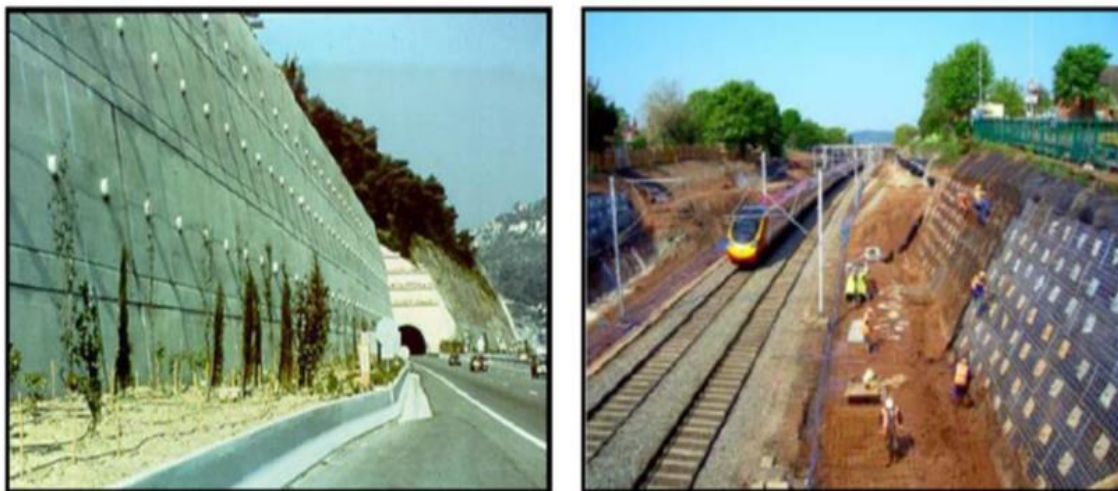


Figura 5: Aplicação do muro com contenção a partir de solo grampeado: a esquerda na rodovia e a direita na ferrovia. Extraído de Prashant e Mukherjee (2010).

3.5. Vantagens e desvantagens do solo grampeado

Vantagens e desvantagens do uso da técnica de solo grampeado são descritas abaixo (Prashant e Mukherjee, 2010):

- Menos prejudicial ao tráfego e causa menos impacto ambiental que outras técnicas de construção.
- A instalação de muros grampeados é relativamente mais rápida e tipicamente usa menos materiais de construção. Ela é vantajosa, mesmo em lugares de acesso remoto, pois geralmente é necessário equipamento menor.
- Ajustes fáceis de inclinação e localização do chumbador podem ser feitos quando obstruções (por exemplo, seixos ou “pedregulhos”, acúmulos ou serviços de utilidade pública subterrâneos) são encontradas. Logo, os ajustes de campo são menos caros.
- Comparados à tirantes, os chumbadores requerem menor profundidade, uma vez que estes são tipicamente mais curtos. Diferente de muros atirantados, vigas de apoio não são usadas em chumbadores, portanto, existe necessidade de altura livre menor.
- Como significativamente mais chumbadores são usados do que tirantes, ajustes no *layout* de projeto dos chumbadores são feitos mais facilmente na obra sem comprometer o nível de segurança.
- Comparados à tirantes, chumbadores oferecem menos peso para a parte do fundo da escavação, sobrecarregando menos esta parte da escavação.

- Muros grampeados são relativamente flexíveis e podem acomodar assentamentos totais e diferenciais relativamente grandes. Deflexões totais medidas de muros grampeados, estão normalmente dentro dos limites toleráveis. Muros grampeados tem um bom desempenho durante eventos sísmicos devido à flexibilidade geral do sistema.
- Muros grampeados são mais econômicos que muros de gravidade de concreto quando são usados procedimentos convencionais de construção de solo grampeado. O muro grampeado é tipicamente equivalente em custo ou mais economicamente viável do que muros atirantados. De acordo com Cornforth (2005), o grampeamento pode resultar em uma redução de custos de 10 a 30 por cento, quando comparado a muros do tipo *tieback*. O revestimento de concreto projetado é tipicamente menos custoso do que o revestimento estrutural requerido por outros sistemas de muro.

Algumas das possíveis desvantagens de muros grampeados estão listadas abaixo:

- No caso do chumbador, o sistema requer alguma deformação de solo para mobilizar resistência. Logo, o chumbador não é recomendado para aplicações onde um controle de deformação estrito é necessário. O pós-tensionamento dos chumbadores pode superar essa deficiência, mas esse passo por sua vez aumenta o custo do projeto.
- Muros grampeados não são adequados para solos com nível freático alto pela dificuldade em perfuração e escavação devido a infiltração de água subterrânea na escavação, corrosão das barras de aço e mudança na razão de água do cimento.
- Chumbadores não são adequados em solos sem coesão, pois durante a perfuração de um buraco o furo não cimentado pode colapsar. No entanto, em um caso como esse, a perfuração pode ser feita providenciando revestimento durante o processo de perfuração.
- Chumbadores são instalados em taludes onde pode haver utilidades públicas, como canos de águas enterrados, cabos subterrâneos e sistemas de drenagem. Portanto, eles devem ser colocados a uma distância segura, se possível, ao alterar sua inclinação ou espaçamento para alcançar essa distância.
- A construção de muros grampeados requer empreiteiras especializadas e experientes.

3.6. Informações necessárias para projeto

Requisitos específicos do projeto

De acordo Lazarte *et al.* (2015), os engenheiros devem se familiarizar com os requisitos específicos do trabalho que afetariam o projeto, construção e desempenho de um

muro utilizando a técnica de solo grampeado. Esses requisitos específicos do projeto podem incluir, mas não estão limitados aos seguintes pontos:

- Planos preliminares de desenvolvimento do local indicando altura, comprimento e localização do(s) muro(s) e relacionados à nova infraestrutura;
- Restrições físicas (muro próximo a um pilar de ponte, muro construído como um corte em terreno íngreme, muro próximo a uma hidrovia ou sujeito a erosão hídrica);
- Possíveis efeitos da construção e uso de muros em estruturas adjacentes existentes e / ou futuras que podem ser sensíveis ao movimento do muro (pilar de ponte, edifício, etc.);
- Acessibilidade e fluxo de tráfego no local do projeto;
- Limitações de vão livre superior e laterais;
- Presença de novas utilidades públicas existentes na frente, abaixo e atrás dos muros propostos;
- Estética do acabamento do muro;
- Necessidade de fechamento tráfego parcial e / ou total do tráfego durante a construção;
- Disponibilidade de áreas de preparação durante a construção.

Embora os requisitos acima não sejam exclusivos de muros de solo grampeado, eles devem ser cuidadosamente considerados durante a fase inicial de seu projeto. Um reconhecimento de campo é altamente recomendado para ajudar a verificar algumas das condições acima mencionadas.

Informações iniciais do projeto

Baseado no manual *"Soil Nail Walls Reference Manual"* (Lazarte *et al.*, 2015), o engenheiro também deve revisar novamente as informações chave relacionadas ao local, definir metas de projeto e planejar uma investigação efetiva do local. A revisão deve se concentrar em aspectos como topografia do local, uso passado do terreno, informações geológicas locais (a serem obtidas a partir de mapas geológicos e outras fontes) e outros dados geológicos relevantes (se aplicável, incluindo mapas de deslizamento de terra e mapas de falhas geológicas). A revisão de fotografias aéreas do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*, USGS) ou outras fontes pode ser útil quando características geológicas, como deslizamentos de terra, podem afetar a estrutura planejada. A revisão de informações como profundidade de penetração de geada ou mapas de risco sísmico também será necessária em regiões sujeitas a congelamento ou expostas a riscos sísmicos.

A revisão de relatórios e dados geotécnicos existentes, quando disponíveis, é um aspecto fundamental da avaliação de informações iniciais. A informação geotécnica histórica geralmente é útil, no entanto, o engenheiro deve avaliar a qualidade, a integridade e a aplicabilidade das informações geotécnicas existentes para um novo projeto. O engenheiro deve exercitar cautela ao extrapolar as condições subterrâneas encontradas em áreas próximas ao local do projeto, pois a variabilidade do solo pode ser grande em alguns casos.

O engenheiro também deve revisar registros de projeto e construção, bem como documentação de construção de estruturas adjacentes que podem ser afetadas pela construção e uso de tirantes. Espera-se que o projetista avalie a magnitude do movimento permitido de estruturas adjacentes com base no tipo de estrutura e avalie os dados de monitoramento geotécnico, se disponível.

Deve-se determinar a magnitude da carga superior temporária ou permanente que pode ocorrer perto dos muros planejados. A carga superior pode incluir tráfego de veículos ou de construção, cargas de estoques temporários, cargas de estruturas existentes ou futuras, utilidades públicas, etc.

As paredes dos muros de solo grampeado convencionais não são projetadas para resistir à erosão hídrica. O projetista deve considerar o potencial de escoamento e, se esse fator for importante, um tipo de muro alternativo deve ser considerado. Alternativamente, medidas apropriadas terão que ser consideradas para a proteção da base do muro se a técnica de solo grampeado for utilizada.

Investigações subterrâneas

Segundo Lazarte *et al.* (2015), a construção de muros de solo grampeado só deve ser permitida quando informações geotécnicas específicas do local existentes ou novas estiverem disponíveis e que atinjam os objetivos e requisitos de investigação subterrânea discutidos neste trabalho de formatura. Novas investigações geotécnicas serão necessárias na maioria dos casos para: fornecer informações geotécnicas na ausência de informações históricas, fechar lacunas de dados de investigações de campo passadas ou verificar tendências observadas em investigações históricas. Após completar a revisão dos requisitos específicos do projeto e das informações existentes e, idealmente, realizar um reconhecimento de campo, o engenheiro deve desenvolver um plano de trabalho detalhado para a condução de investigações geotécnicas do local.

As investigações subterrâneas devem ser realizadas de acordo com o *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) "Manual on Subsurface Investigations"* (AASHTO 1988), Circular de Engenharia Geotécnica nº 5 "*Manual on Subsurface Investigations*" (FHWA-IF-02-034; Sabatini *et al.*, 2002) e "*Manual on Subsurface*

Investigations” (FHWA-NHI-01-031; Mayne *et al.*, 2001). Os padrões da agência geotécnica local, se disponíveis, talvez precisem ser consultados em alguns casos. Os itens a seguir destacam os principais aspectos de investigações subterrâneas utilizadas nos projetos de solo grampeado.

Objetivos da investigação subterrânea

Os objetivos de uma investigação subterrânea são:

- Determinar a estratigrafia subterrânea;
- Obter amostras de solo representativas para testes laboratoriais;
- Medir as propriedades do solo in situ através de testes de campo;
- Medir as propriedades do solo no laboratório;
- Aferir o potencial de corrosão do solo e das águas subterrâneas;
- Avaliar a localização e as flutuações dos níveis de água subterrânea e gradientes.

A investigação subterrânea deve ser conduzida ao longo de toda a extensão do muro proposto. Ela deve incluir um número suficiente de testes de campo e locais de amostragem para avaliar a variação das propriedades do solo em todo o local do projeto. Determinar a localização e a natureza da água subterrânea é extremamente importante nos projetos de muro grampeados, pois a presença de água subterrânea elevada (particularmente em solos de drenagem livre) é uma condição desfavorável.

A investigação subterrânea pode ser conduzida em uma única fase ou em múltiplas fases, dependendo da complexidade do projeto e da disponibilidade de dados geotécnicos existentes. Se pouca ou nenhuma informação geotécnica estiver disponível para um local, conduzir a investigação em duas fases pode ser uma abordagem sensata. A primeira fase consistiria em uma investigação subterrânea preliminar para ajudar a identificar os estratos do solo e suas características básicas e determinar se o solo é favorável, difícil, ou desfavorável para chumbadores. A segunda fase consistiria em uma investigação subterrânea final focada na coleta dos dados específicos necessários para o projeto e construção do muro grampeado.

O engenheiro deve desenvolver um plano de exploração subterrâneo que permita o desenvolvimento de uma caracterização do sítio suficiente para o projeto e a construção do muro grampeado. A falta de uma investigação detalhada do local produzirá vários resultados indesejáveis, incluindo projetos não econômicos, reprojetos, dificuldades de construção, custos adicionais, atrasos de construção, e desempenho inadequado ou inseguro.

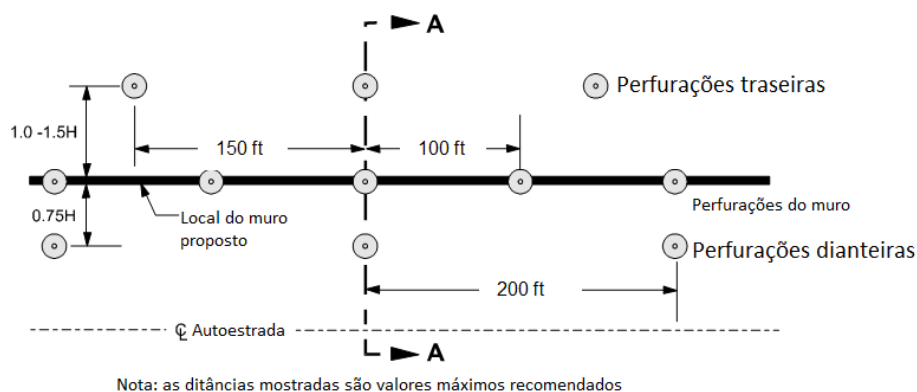
Requisitos para seleção de localização e número de perfurações exploratórias

De acordo com o manual “*Soil Nail Walls Reference Manual*” (Lazarte *et al.*, 2015), o tipo, o número, a localização e a profundidade das perfurações de teste e outros testes de campo são uma função das dimensões do muro, da presença de estruturas adjacentes e de níveis existentes e futuros. Outros fatores incluem o estágio do projeto no qual a pesquisa de campo é conduzida (ou seja, estudo de viabilidade, projeto preliminar, ou projeto final), a disponibilidade de dados geotécnicos existentes e a variabilidade das condições subterrâneas.

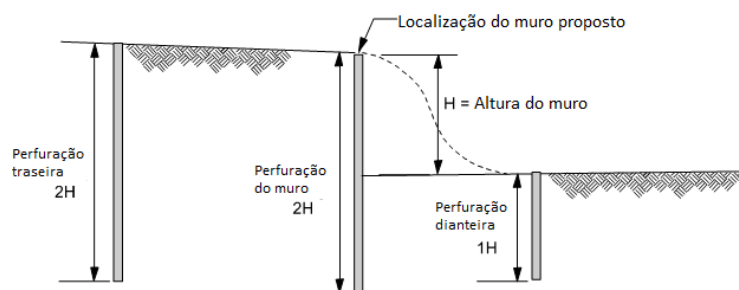
A orientação para selecionar o número de perfurações de teste e a definir suas profundidades é fornecida na Tabela 10.4.2-1 “*Minimum Number of Exploration Points and Depths of Exploration*” do AASHTO (2012). A figura 6 fornece orientações preliminares sobre o número e a localização das perfurações para sistemas de contenção de terra. As perfurações devem ser feitas ao longo da linha central, na frente e atrás do muro proposto. As perfurações feitas ao longo da linha central do muro proposto devem estar espaçadas entre 100 e 200 pés e avançar até pelo menos uma profundidade H abaixo do fundo de escavação planejado, onde H é a altura do muro nesse local.

As perfurações feitas atrás do muro devem ser espaçadas em até 150 pés ao longo do alinhamento, estar localizadas dentro de H a $1,5H$ atrás do muro e avançar até pelo menos uma profundidade $2H$ abaixo dos níveis finais. Se o chão atrás do muro se inclina, perfurações devem ser feitas a uma distância horizontal de $1,5H$ a $2H$ do muro. Essas perfurações devem ser suficientemente profundas para permitir a avaliação de massas de deslizamento potencialmente maiores ocorrendo na inclinação acima.

As perfurações feitas na frente do muro devem ser espaçadas em até 200 pés ao longo do alinhamento, estar localizado entre $0,75H$ a H na frente do muro e avançar até pelo menos uma profundidade H abaixo do fundo de escavação planejado.



Plano típico



Seção A - A

Figura 6: disposição preliminar das perfurações. Modificado de Sabatini *et al.* (2002).

Quando solos de granulação fina macios ou muito macios, silte orgânico ou a turfa existem dentro das profundidades de perfuração finais mostradas na figura 6, a profundidade deve ser aumentada pelo menos em H para perfurações ao longo e atrás do muro e em $0,5H$ para perfurações na frente do muro. Para áreas com risco sísmico significativo, as perfurações devem ser estendidas à base de depósitos suspeitos de serem liquefeitos (ou seja, depósitos de solos soltos a muito soltos, saturados, solos sem coesão), dentro de uma profundidade de cerca de $2H$ abaixo do fundo de escavação planejado. Na maioria dos casos, a profundidade máxima de perfuração pode não precisar exceder aproximadamente 50 pés.

Se rocha erodida for encontrada dentro das profundidades de perfuração mostradas na figura 6, as perfurações devem se estender para dentro da rocha erodida, de modo que uma amostra de núcleo, com pelo menos 10 pés de comprimento e em duas seções de 5 pés de comprimento, possa ser obtida para permitir inspeção de descontinuidades. Finalmente, o projetista deve estabelecer a profundidade das perfurações em relação a qualquer superfície de deslizamento que seja capaz de afetar a estabilidade e o desempenho dos muros. Certas condições geológicas (junções, estrato, etc.) podem exigir o uso de núcleos de rocha orientados para inspeção das mesmas.

Procedimentos de campo

Segundo Lazarte *et al.* (2015), esta seção apresenta informações gerais sobre procedimentos de campo que são utilizados para projetos de solo grampeado, baseados nos trabalhos de Sabatini *et al.* (2002) e Mayne *et al.* (2001).

Perfurações de Teste e Standard Penetration Test (SPT)

Investigações subterrâneas para projetos de *soil nailing* são em grande parte baseadas em perfurações de teste. As perfurações de teste são efetuadas usando métodos de perfuração rotativa, incluindo o trado oco e as perfurações de lavagem. Ambos os métodos de perfuração permitem a recuperação de amostras de solo.

O *Standard Penetration Test* (SPT ASTM D1586), é a amostragem de ambas as amostras de solo realizadas em perfurações de teste. O SPT pode ser usado em uma ampla variedade de solos que são favoráveis em projetos de grampeamento de solo. A amostragem do SPT permite a obtenção de amostras perturbadas; portanto, ele é apropriado para a amostragem de solos sem coesão (areias e silte elástico) para propriedades geotécnicas de índice e para amostragem de solo para testes de potencial de corrosão. O coletor do SPT pode recuperar desde solo residual até rocha erodida, nesses casos o coletor do SPT é inserido até a recusa (definida como quando a contagem de golpes de 50 golpes é alcançada para uma penetração de uma polegada ou menos).

O SPT não é possível para cascalhos, pedras e preenchimento contendo partículas grandes. Mesmo que a amostragem seja bem-sucedida, as amostras recuperadas desses solos não seriam representativas porque partículas grandes não conseguem entrar no coletor de amostras. Além disso, espera-se que a contagem de golpes seja enviesada ou sem significado. Existem numerosas correlações entre o valor-N de SPT e as propriedades de engenharia do solo. A magnitude da sobrecarga tem uma influência significativa no valor-N e deve ser levada em consideração ao usar correlações com as propriedades do solo aplicáveis. Além disso, correções nos valores-N podem ser necessárias para converter esses valores em valores-N₆₀, explicar diferentes eficiências de martelos e deve ser usado em algumas correlações. O engenheiro deve ter cautela ao usar correlações baseadas no SPT, pois os valores-N, mesmo que corrigidos, tendem a exibir variabilidade significativa devido às numerosas fontes de incerteza neste teste.

Em casos onde a deflexão do muro e o assentamento da superfície do solo sobreposta são restrições de projeto críticas e requerem estimativas precisas (por exemplo, usando métodos de elementos finitos ou técnicas similares), as correlações baseadas no SPT para estimar os valores do módulo do solo podem não ser adequadas. Testes laboratoriais

mecânicos de espécimes não perturbados, tais como testes de edômetro ou triaxial, ou testes *in situ*, como o teste de pressostato, podem ser conduzidos.

Cone Penetration Test (CPT)

O *Cone Penetration Test* (CPT, ASTM D5778) permite um desenvolvimento rápido e econômico de perfis subterrâneos contínuos, e permite identificar camadas de solo finas, o que, de outra forma, seria difícil de detectar usando amostragem de SPT descontínua. Esta capacidade pode ser particularmente útil ao investigar camadas finas de solo fraco por trás dos muros grampeados. No entanto, o CPT é mais limitado do que o SPT para aplicações de projeto de solo grampeado, pois os solos que são propícios ao CPT geralmente não são ideais para a aplicação de chumbadores. O CPT não pode ser realizado em solos duros, solos de cascalho, rocha erodida e depósitos de rocha.

Correlações entre os parâmetros de CPT (resistência do rolamento do cone, relação de fricção, etc.) e diversas propriedades de engenharia do solo estão disponíveis que podem ter menos variabilidade do que as correlações baseadas em SPT, particularmente para propriedades de solos de granulação fina. Para a maioria dos projetos de solo grampeado, a resistência de cisalhamento do solo pode ser estimada com base nos dados do CPT ou SPT. Da mesma forma, o módulo de elasticidade pode ser estimado a partir de dados CPT. No entanto, não existem correlações amplamente disponíveis entre parâmetros de CPT e resistência de aderência para tirantes.

Outras técnicas de teste de campo

Outras técnicas de teste de campo, como o *Pressuremeter Test* (PMT, ASTM D4719) e o *Vane Shear Test* (VST, ASTM D2573) não são, em geral, tão amplamente utilizadas como SPT e CPT. O Teste de Dilatômetro Plano (TDP) também está disponível, mas seu uso é bastante raro.

O PMT pode ser empregado em uma ampla variedade de tipos de solo, incluindo aqueles favoráveis à construção de muros. O PMT pode fornecer estimativas razoáveis do módulo do solo e é, portanto, um método de teste atraente quando a estimativa da deflexão da parede e do assentamento do solo é crítica. Além disso, uma correlação entre a pressão limite de PMT (pL) e a força de aderência foi desenvolvida na França para areia, argila, cascalho e rocha erodida (Clouterre, 2002). O VST não possui aplicação de rotina para o projeto de muros grampeados, pois é adequado para solos macios ou médios de granulação fina, que são desfavoráveis para chumbadores. No entanto, ele ainda pode ser usado em conexão com um projeto que incorpore muros grampeados se os estratos subjacentes de granulação fina forem críticos para a estabilidade global da escavação.

Poços de teste

A escavação de poços de teste pode fornecer informações valiosas sobre a possibilidade de uma face de escavação poder ficar sem suporte. Os poços de teste devem ter pelo menos 20 a 25 pés de comprimento e até aproximadamente 10 pés de profundidade (quando possível). Eles devem ser protegidos conforme necessário contra colapso e cumprir os padrões de segurança. Os poços de teste devem, de preferência, ser escavados perpendicularmente à parede para reduzir o efeito na face de escavação subsequente. Se os poços de teste forem escavados paralelamente à parede, eles devem ser escavados na zona de corte, pelo menos a 15 pés da parede. Para avaliar o tempo de espera da escavação, os poços de teste devem ser deixados abertos por 1 a 2 dias com proteção adequada para os trabalhadores e o público. Os poços de teste escavados devem ser inspecionados diariamente, no mínimo.

Os poços de teste permitem observações de infiltração de água subterrânea, o que pode afetar a estabilidade do corte aberto. Os poços de teste também permitem que amostras diretas ou espécimes não perturbados de solos de granulação fina sejam coletados para testes de laboratório, conforme necessário.

Água Subterrânea

A presença de água subterrânea, seja estável (ou seja, estática) ou empoleirada, deve ser identificada durante investigações subterrâneas, pois a água subterrânea afeta vários aspectos do projeto e o desempenho em longo prazo dos muros de solo grampeado. A água subterrânea, se presente acima do fundo da escavação, provavelmente impactará a estabilidade de cortes temporariamente não suportados durante a construção de um muro grampeado. Devem ser feitas observações cuidadosas em poços de teste para detectar infiltração de águas subterrâneas, mesmo em pequenas quantidades. As flutuações no lençol freático ao longo do tempo podem promover corrosão, afetar a estabilidade geral e causar pressões aumentadas no revestimento do muro. A água subterrânea pode afetar a estabilidade do furo de perfuração e influenciar a seleção dos procedimentos de aplicação de calda de cimento e dos métodos necessários para a drenagem permanente.

Subestimar grosseiramente a elevação de águas subterrâneas ou gradientes durante as investigações de campo pode ter sérias consequências para qualquer sistema de contenção de terra, mas particularmente para muros utilizando a técnica de *soil nailing*. Esses sistemas não são adequados para níveis de água subterrânea elevados e estáticos, quantidades significativas de água subterrânea empoleirada ou velocidades baixas ou moderadas de infiltração, particularmente em solos de drenagem livre.

A profundidade da água subterrânea deve ser obtida a partir de perfurações durante o processo de perfuração, ao final da perfuração e pelo menos 24 horas após a perfuração. É aconselhável finalizar algumas perfurações como piezômetros provisórios temporários de tubos verticais de PVC ranhurados. Esses piezômetros precisam ser monitorados por dias, semanas ou até mais, dependendo das flutuações antecipadas ou detectadas de água subterrânea e das condições do solo. Os níveis de água subterrânea obtidos durante a perfuração em solos coesivos ou outras formações com baixa permeabilidade geralmente não representam níveis de água subterrânea estabilizados e, se forem instalados piezômetros de tubo vertical, um período substancial de espera pode ser necessário para que as leituras de água subterrânea se estabilizem.

É importante prestar atenção ao teor de umidade e propriedades de índice de solos de granulação fina, conforme medido no laboratório. Um solo de granulação fina com seu teor de água superior ao limite plástico (PL) pode estar saturado no campo e sujeito a pressões de poros positivas. Conhecer o peso da umidade *in situ*, a gravidade específica e o teor de água, pode ajudar a determinar se o solo está acima ou abaixo do lençol freático.

Teste laboratorial de solo

Baseado no manual "*Soil Nail Walls Reference Manual*" (Lazarte *et al.*, 2015), o projeto de muros de solo grampeado exige que algumas das propriedades de engenharia sejam determinadas por testes laboratoriais. A quantidade e o alcance dos testes laboratoriais a serem realizados dependem das características específicas do projeto. Para projetos de menor complexidade, testes laboratoriais de parâmetros de índice podem ser suficientes se uma pesquisa de campo completa e adequada for realizada anteriormente. Para alguns projetos com condições subterrâneas desafiadoras, uma maior variedade de testes laboratoriais deve ser considerada mesmo se houver alguma informação geotécnica existente disponível.

Classificação de solo e testes de índice

A Tabela 1 (a, b, c) lista os testes laboratoriais utilizados em projetos de solo grampeado para classificar os solos e determinar as propriedades de índice.

Tabela 1a: procedimentos e testes laboratoriais para solos – Classificação. Modificada Lazarte *et al.* (2015).

Nome do teste	Padrão ASTM	Padrão AASHTO
Identificação visual de solos	D2488	Não disponível
Classificação de solos de acordo com a USCS	D2487	M145
Análise do tamanho de partícula	D422-63	T88
Fração de solo passando a peneira nº 200	D1140	T11

Tabela 1b: procedimentos e testes laboratoriais para solos - Parâmetros de índice. Modificada Lazarte *et al.* (2015).

Nome do teste	Padrão ASTM	Padrão AASHTO
Conteúdo de umidade	D2216	T265
Limites Atterberg para fração de partículas finas	D4318	T89, T90

Nota: Os padrões individuais ASTM e AASHTO aqui referenciados podem ser encontrados em ASTM (2012) e AASHTO (1988).

Tabela 1c: procedimentos e testes laboratoriais para solos - Testes de resistência de cisalhamento. Modificada Lazarte *et al.* (2015).

Nome do teste	Padrão ASTM	Padrão AASHTO
Teste de força compressiva não confinada (UC)	D2166	T208
Compressão triaxial não consolidada não drenada (UU)	D2850	T296
Compressão triaxial consolidada não drenada (CU)	D4767	T234
Compressão triaxial drenada consolidada (CD)	D7181	Não disponível

Os testes incluídos na Tabela 2c podem ser usados em diferentes tipos de solo, mas são muito mais usados em solos de granulação fina. Os testes de extensão triaxial também podem ser considerados para estimar parâmetros de resistência de cisalhamento do solo em descarga, o que seria a condição predominante por trás de um muro de contenção de terra.

No entanto, não se espera que a diferença de resultados obtidos em testes triaxiais de compressão ou extensão seja grande para os solos considerados favoráveis para muros grampeados.

Os testes de índice devem ser realizados para todos os projetos de solo grampeado para classificação do solo, de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solo (*Unified Soil Classification System*, USCS). Esses testes devem incluir distribuições de tamanho de grão e limites Atterberg para estimar a condutividade hidráulica dos solos, compressibilidade e os parâmetros de resistência de cisalhamento de solos. O teste de teor de umidade ajuda a identificar certas condições desfavoráveis para os grampos, por exemplo, teores de umidade inferiores a cerca de 5% em solos granulares com pequenas quantidades de partículas finas podem indicar que os cortes verticais podem não se sustentar sem suporte. O teste de conteúdo orgânico deve ser realizado para determinar se os solos são orgânicos caso ocorra observações de campo, pois os solos orgânicos também tendem a ter menor resistência de cisalhamento e ser mais compressíveis do que os solos inorgânicos, têm uma tendência de se movimentar com o passar do tempo e têm geralmente um maior potencial de corrosão.

Outros testes, incluindo gravidade específica (D854, T100), podem ser necessários em alguns casos para suportar a estimativa de outros parâmetros.

Testes de resistência de cisalhamento

A maioria dos solos favoráveis ao grampeamento é predominantemente granular. Os valores dos parâmetros de força desses solos são estimados usando correlações baseadas em métodos de teste de campo e não frequentemente medidos usando testes laboratoriais. Se os chumbadores estiverem instalados em solos de granulação fina de rígido a duro ou forem usados para estabilizar o preenchimento estrutural de uma parede terra mecanicamente estabilizada existente, a resistência de cisalhamento desses materiais deve ser estimada usando testes laboratoriais, como os listados na Tabela 2c.

O teste de cisalhamento direto (D3080, T236) pode ser usado para preenchimento quando a amostra é devidamente compactada no laboratório para condições *in situ*. Os testes de cisalhamento diretos têm uma série de limitações. Devido à superfície de falha ser forçada ao longo de um plano horizontal, a rotação das tensões principais durante o teste e a anisotropia do espécime limitam a aplicabilidade dos valores dos parâmetros de resistência interpretada. Além disso, o desenvolvimento de pressões de poros é descontrolado e sua medição é impraticável.

Nos casos em que os chumbadores são instalados em argilas rígidas supraconsolidadas que podem mobilizar forças totalmente suavizadas ou residuais após a

deformação, os parâmetros de resistência de cisalhamento podem ser estimados utilizando testes triaxiais (até certo nível de deformação axial) ou o dispositivo anel de torção de cisalhamento (D6467).

Deformabilidade e módulo

Onde os solos de granulação de macio a médio existem ao longo da escavação ou imediatamente abaixo do fundo, é importante avaliar a magnitude das deflexões do muro, o assentamento da superfície do solo, e o ricochete. Nesses casos, a compressibilidade do solo pode ser avaliada utilizando testes convencionais de consolidação unidimensional (D2435, T216). Os valores de módulo do solo também podem ser estimados usando testes triaxiais.

Outros Testes

Outros testes, embora não rotineiramente utilizados no projeto de solo grampeado, podem ser úteis para detectar condições desfavoráveis para o atirantamento de solo. Por exemplo, a presença de solos de granulação fina passíveis de colapso ou inchaço pode ser estabelecida realizando o teste de potencial de colapso (D5333) e o teste de potencial de inchaço (D4546, T258), respectivamente.

Testes especiais devem ser realizados em áreas expostas ao congelamento do solo para estabelecer o potencial de elevação de geada e a suscetibilidade ao enfraquecimento de degelo (D5918) dos solos nos chumbadores e nos muros. Esses testes devem ser realizados em amostras obtidas a partir de camadas do solo que serão expostas à ação da geada em longo prazo.

Seleção de parâmetros e etapas para execução de projeto

De acordo com Lazarte *et al.* (2015), uma vez que a informação suficiente esteja disponível a partir de perfurações, testes de campo e laboratório, o projetista deve desenvolver a estratigrafia do local e parâmetros de projeto correspondentes para cada estrato. O projetista também deve identificar a variabilidade das condições subterrâneas no local que possam afetar o projeto de muro de solo grampeado.

O desenvolvimento da estratigrafia do local envolve localizar o contato entre o solo, a rocha erodida e possivelmente a rocha matriz. A localização desses contatos é importante não só para as análises de estabilidade global, mas também para determinar se os chumbadores precisam ser estendidos perto de ou em materiais subjacentes mais duros. As condições de contraste acima e abaixo deste contato podem afetar o método selecionado e o equipamento de perfuração para realizar o furo, os procedimentos de construção e os

comprimentos de chumbadores. O projetista também deve identificar a existência de zonas úmidas mais macias ou água na zona de contato de rocha.

O desenvolvimento da estratigrafia do local é crítico para o projeto porque a natureza, a extensão e a distribuição das unidades do solo afetam a seleção dos métodos de perfuração, controlam a forma e as dimensões da massa de solo de deslizamento potencial por trás do muro e afetam o número e comprimento dos chumbadores. A variabilidade dos solos irá ditar o número de testes de verificação de chumbadores que são necessários para confirmar os critérios de projeto para cada depósito principal de solo. A variabilidade das condições subterrâneas é mais crítica para o projeto de muros longos.

Parâmetros de solo para projeto

As seguintes propriedades, no mínimo, devem ser determinadas para projetos de *soil nailing* a partir da investigação de campo e testes de laboratório:

- Profundidades de rupturas de estratigrafia;
- Níveis de água subterrânea;
- Peso unitário de cada depósito de solo principal;
- Parâmetros de resistência de cisalhamento de cada grande depósito de solo;
- Força de aderência de cada depósito de solo principal onde os chumbadores serão instalados.

Quando estimativas precisas da deflexão do muro de solo grampeado ou do movimento da superfície do solo são necessárias, o projetista também deve determinar os valores do módulo e compressibilidade do solo com base em resultados de testes de campo e / ou laboratoriais, conforme descrito anteriormente. O potencial de deslocamento do solo deve ser avaliado quando se trata de solos de granulação fina. A caracterização do potencial de corrosão do solo deve ser avaliada para todos os tipos de solos onde os chumbadores se

Etapas para execução do projeto

Esta seção apresenta procedimentos Etapa-a-Etapa para o projeto de muro de solo grampeado. As atividades principais ao longo da duração de um projeto de grampeamento de solo ocorrem nas seguintes fases principais:

- Considerações iniciais do projeto
- Desenvolvimento do projeto
- Pré-construção
- Construção e pós-construção

A sequência das principais etapas e sub-etapas está listada nas Tabela 2. A sequência de trabalho mostrada é independente de quem faz o projeto e aplicável para qualquer análise ou preparação de planejamento para um projeto de contrato.

Tabela 2: principais etapas - Considerações iniciais de projeto. Modificado Lazarte *et al.* (2015).

N° da Etapa	Descrição
Etapa 1	Requerimentos de projeto
a	Estabelecer requerimentos, padrões e limitações de projeto
b	Estabelecer desempenho de projeto
c	Reunir informação geotécnica preliminar
Etapa 2	Exploração subterrânea e desenvolvimento de parâmetros de projeto
a	Planejar e conduzir exploração subterrânea
b	Conduzir programa de testes laboratoriais de solo
c	Estabelecer potencial de corrosão do solo e nível de proteção de corrosão
d	Desenvolver perfis subterrâneos para análise
e	Desenvolver parâmetros de solo para análise
f	Obter parâmetros sísmicos
g	Conduzir uma análise de risco
Etapa 3	Definição de carga
a	Definir cargas de serviço não fatoradas
b	Selecionar combinações de carga e fatores de carga
Etapa 4	Configuração de chumbador e Seleção de material
a	Desenvolver layout do muro
b	Desenvolver seções transversais de chumbadores
c	Selecionar padrão do chumbador na face do muro
d	Avaliar instalação diagonal horizontal do chumbador
e	Detalhar proteção à corrosão
f	Selecionar tipo e propriedades materiais de chumbador
Etapa 5	Seleção de fatores de resistência
Etapa 6	Análise geral de estabilidade
a	Avaliar estabilidade interna
b	Avaliar estabilidade global
c	Avaliar falha horizontal basal (se aplicável)
d	Avaliar estabilidade de deslizamento (se aplicável)
Etapa 7	Estados de limite de força (Geotécnicos e estruturais)
a	Verificar resistência de arrancamento
b	Verificar estabilidade de deslizamento (se aplicável)
c	Verificar resistência de tração de chumbador
d	Verificar resistência de flexão do revestimento
e	Verificar resistência de cisalhamento
f	Verificar resistência de hastes do revestimento
g	Outras considerações de revestimento
Etapa 8	Estados de limite de serviço (Deformações)
a	Avaliar deslocamentos laterais e verticais do muro
b	Avaliar compressão lateral (se aplicável)
Etapa 9	Projeto sísmico
a	Selecionar parâmetros de projeto sísmico
b	Ajuste de coeficientes de projeto sísmico
c	Avaliar estabilidade geral com cargas sísmicas
Etapa 10	Drenagem e detalhes de drenagem
a	Avaliar drenagem interna
b	Avaliar escoamento de água de superfície
c	Desenvolver detalhes de drenagem
d	Itens especiais (se presentes)
Etapa 11	Outras considerações de projeto
a	Desenvolver avaliação de construtibilidade final
b	Preparar plano para programa de carga de teste
c	Preparar plano para programa de monitoramento geotécnico
Etapa 12	Preparações dos desenhos de construção e especificações

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado para realização deste trabalho foi a comparação das normas técnicas e manuais de órgãos públicos internacionais e artigos e publicações nacionais relacionadas a metodologia de execução do solo grampeado. Devido ao fato do Brasil não ter uma norma técnica nacional estabelecida, publicações de autores nacionais foram utilizadas como referência ao método empregado no Brasil.

Para realização das tabelas 3, 4, 5 e 6, foi utilizado o manual público de referência americano "*Soil Nail Walls Reference Manual*" (Lazarte *et al.*, 2015), publicado pela *Federal Highway Administration* (Nº FHWA-NHI-14-007); a publicação indiana "*Soil nailing for stabilization of steep slope near railway tracks*" (Prashant e Mukherjee, 2010) submetida na *Research Designs and Standards Organization* (RSDO); o artigo "*Experience with Soil Nailing in Brazil: 1970-1994*" (Ortigão *et al.*, 1996), submetido na *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, o livro "*Fundações: teoria e prática*" (Hachich *et al.*, 1998), da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS) em conjunto com Associação Brasileira de Empresas de Fundações e Geotecnia (ABEF) e a publicação "*“Solo grampeado”: projeto, execução e instrumentação*" (Zirlis *et al.*, 1999), da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).

Para construção do levantamento bibliográfico desse trabalho de formatura também foram utilizados os manuais de órgãos públicos relacionados: "*Geotechnical Engineering Manual: Design & Construction Guidelines for a Soil Nail Wall System*" (*State of New York Department of Transportation*, 2015), "*Manual on subsurface investigations*" (Mayne *et al.*, 2001), "*Geotechnical engineering circular no. 5: evaluation of soil and rock properties*" (Sabatini *et al.*, 2002), "*Soil Nail Walls Reference Manual*" (Lazarte *et al.*, 2015), "*The Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls*" (Byrne *et al.*, 1996), "*Demonstration Project 103: Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls*" (Singla, 1999) e "*Nailing Field Inspectors Manual*" (Porterfield *et al.*, 1994); artigos relacionados como "*Practical Soil Nail Wall Design and Constructability Issues*" (Kutschke *et al.*, 2007), "*Case studies in soil nailing*" (Babu, 2009), "*Case Study on the Performance of Reinforced Soil Slopes*" (Verma *et al.*, 2014), "*Landslides in practice. Investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils*" (Cornforth, 2005), "*Testing and Modelling of Screw Nailed Soil Slopes*" (Rawat e Gupta, 2017), "*Application of Soil nailing for Slope Stability Purpose*" (Yeung, 2008) e "*Soil nailing for stabilization of steep slope near railway tracks*" (Prashant e Mukherjee, 2010); orientações utilizadas no Brasil: "*“Solo grampeado”: projeto, execução e instrumentação*" (Zirlis *et al.*, 1999), "*Experience with Soil Nailing in Brazil: 1970-1994*" (Ortigão *et al.*, 1996) e o capítulo "*Reforço do Terreno*" (Abramento *et al.*, 1998); e outros países como França e Alemanha, com os projetos franceses: "*Projet Clouterre I*" (1986 *apud* Singla, 1999), "*Projet National*

Clouterre” (1991 *apud* Singla, 1999) e o projeto alemão: *Bodenvernagelung* (1981 *apud* Singla, 1999).

5. RESULTADOS OBTIDOS

Com base nas diretrizes das publicações americana, indiana e brasileiras (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999; Ortigão *et al.*, 1995; Abramento *et al.*, 1998, respectivamente), este capítulo apresenta uma síntese das recomendações para execução do método “*Soil Nailing*” em uma obra.

5.2. Etapa inicial do projeto

Para realização do projeto, antes de qualquer escavação, os controles de drenagem superficiais devem ser construídos para evitar que o fluxo da água superficial tenha impacto negativo na construção, potencializando as causas de instabilidade no talude (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010). Posteriormente ao controle do fluxo de água, inicia-se o corte do solo na geometria definida pelo projeto (Lazarte *et al.*, 2015; Ortigão *et al.*, 1995; Prashant e Mukherjee, 2010).

A maioria dos solos residuais e sedimentares são adequados para esta técnica. Existem, porém, algumas exceções como o caso de materiais que não resistem sem falha à escavação vertical em profundidade mínima de 1 metro. Para garantir o cumprimento deste parâmetro, a escavação inicial é realizada entre 1 e 1,2 metros de altura e a face escavada deve permanecer estável e sem reforços por um curto período de tempo, entre 24 a 48 horas (Lazarte *et al.*, 2015; Ortigão *et al.*, 1995; Prashant e Mukherjee, 2010).

Como descrito na tabela 3, para a realização da escavação do solo são utilizados equipamentos de terraplanagem como retroescavadeiras e/ou equipamentos manuais. O equipamento usado depende das limitações específicas do projeto, como acesso à obra, ajustes potenciais de economia de custos e planejamento de construção. Neste caso, quanto maior o porte das máquinas passíveis de utilização, maior a produtividade da obra.

A inclinação do corte pode ser moderada ou vertical, variando entre 10° e 90°, e o avanço da escavação recomendado é de 1 a 2 metros por estágio, para não haver necessidade de suportes para aplicação do concreto projetado ou perfuração dos chumbadores (*e.g.* andaimes, escadas de acesso com cesto de transporte). Em obras de contenção, a construção *top-down* (de cima para baixo) é vantajosa comparada a outros sistemas de muro, mas caso o talude já se encontre cortado pode-se trabalhar de forma ascendente ou descendente, conforme as exigências do projeto (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999).

Tabela 3: comparação entre as publicações americana, indiana e brasileiras (etapa inicial do projeto).

Projeto - Etapa inicial			
	Americano	Indiano	Brasileiro
Equipamento de escavação	Equipamentos de terraplanagem.		Equipamentos de terraplanagem e/ ou equipamentos manuais.
Tipo de construção	Ascendente e descendente.		
Avanço da escavação	1 a 2 metros.		
Inclinação do talude	10° a 90°		
Equipamento de perfuração	Perfuratrizes tipo sonda, “ <i>clawlair</i> ”, “ <i>wagon drill</i> ” e perfuratrizes manuais.		
Diâmetro do furo	100- 200 mm	100 a 150 mm	50 a 100 mm
Inclinação do furo	10° a 20°		5° a 30°

Os equipamentos utilizados para instalação dos chumbadores são perfuratrizes tipo sonda, “*clawlair*”, “*wagon drill*” e perfuratrizes manuais (Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999). A escolha da máquina de perfuração dependerá da profundidade do furo e da largura da bancada para acomodar o equipamento. Os furos são feitos um ao lado do outro em distância fixada pelo projeto, com diâmetro que varia entre 50 e 200 milímetros e a inclinação usual de 15° abaixo da horizontal, embora possa haver variações. O escoamento superficial da água e a água subterrânea, descritos mais adiante, devem ser controlados durante e após a construção da obra, onde drenos profundos, calha plástica revestida por manta geotêxtil, canaletas e barbacãs devem ser instalados conforme o avanço do projeto (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999).

5.3. Chumbadores

Os chumbadores são constituídos pelas hastes de aço e os centralizadores, estes localizados a 0,45 metro das extremidades e espaçados de 2 a 3 metros entre si (Lazarte *et al.*, 2015; Zirlis *et al.*, 1999).

Como mostra o resumo da tabela 4, as hastes dos chumbadores podem ser vergalhões ou barras de aço sólidas, lisas ou rosqueadas, com 20 a 32 milímetros de diâmetro (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999), o que evita a deformação excessiva durante seu manuseio e instalação. De acordo com a diretriz americana elas devem seguir as conformidades das normas ASTM A615 e ASTM A722 (Lazarte *et al.*, 2015). Também são utilizadas barras ocas onde a injeção da calda de cimento ocorre durante o avanço da perfuração (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010).

O comprimento do chumbador pode ser estimado em aproximadamente $0,7H$ e não devem que ser maiores do que $1,2H$ ou inferiores a $0,5H$, onde H é a altura do muro, pois provavelmente não irão satisfazer os requisitos de estabilidade de deslizamento (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010). Segundo Ortigão *et al.* (1995), o comprimento dos chumbadores deve ser de 60 a 120% da altura da escavação. É geralmente mais prático instalar chumbadores superiores ao longo de uma ou duas fileiras paralelas ou subparalelas, não excedendo um espaçamento máximo de aproximadamente 6 pés e nem mínimo de 4 pés (cerca de 1,8 e 1,2 metros, respectivamente) em ambas as direções (Lazarte *et al.*, 2015).

Os componentes que conectam os chumbadores ao revestimento consistem em placas de apoio, arruelas chanfradas, porcas hexagonais, arruelas e parafusos de cabeça. O objetivo da placa de apoio é distribuir a força aplicada na extremidade do chumbador sobre o revestimento inicial do concreto projetado e o solo por trás do revestimento, e geralmente recebe uma carga pequena de 5kN para fixação (Lazarte *et al.*, 2015; Ortigão *et al.*, 1995; Prashant e Mukherjee, 2010). A placa de rolamentos, as porcas sextavadas e as arruelas fornecem conexão entre o chumbador e o revestimento inicial, enquanto os parafusos de cabeça encaixam o chumbador e o revestimento final. Na norma americana a placa de rolamento deve seguir os padrões AASHTO M183 / ASTM A36, e geralmente deve ser quadrada e plana, com 8 a 10 polegadas de dimensões laterais e espessuras típicas de 0,75 a 1 polegadas; enquanto as arruelas e parafusos devem atender aos requisitos da AASHTO M291 / ASTM A563, grau B (Lazarte *et al.*, 2015).

Tubos adjacentes de injeção, não recuperáveis após a execução da obra, devem ter diâmetro entre 10 e 15 mm, providos de válvulas para injeção sob baixa pressão espaçadas de 0,5 metro, até 1,5 metros da boca do furo (Zirlis *et al.*, 1999). A injeção da calda de cimento utiliza o método “*tremie*”, no qual um tubo inclinado, quase vertical, é colocado no mínimo 1,5 metros para dentro da boca do furo, alimentando o cimento por gravidade abaixo do nível da água. Em solos granulares a injeção de calda de cimento sob baixas pressão é realizada através de válvulas (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010). Publicações nacionais descrevem uso de barras com diâmetro menor que 20 milímetros e ponta dobrada em forma de “L”, o que evitaria o uso de porcas, arruelas e placas (Zirlis *et al.*, 1999).

Tabela 4: comparação entre a norma americana, publicação indiana e publicações brasileiras (chumbadores).

Chumbadores			
	Americano	Indiano	Brasileiro
Tipo de barra de aço	Vergalhões, barras de aço rosqueadas e barras ocas de aço.		Vergalhões e barras de aço rosqueadas
Diâmetro da barra de aço	20 a 43 mm	20 a 32 mm	10 a 32 mm
Comprimento dos chumbadores	70-120% da altura do muro.		60-120% da altura do muro.
Espaçamento dos chumbadores	Varia de 4 a 6 pés em ambas as direções.		Sem especificação.
Espaçamento dos centralizadores	Máximo de 3 metros, 0,45 cm das extremidades.	Sem especificação.	A cada 2 metros.
Espaçamento dos tubos de injeção	“Tremie pipe” a partir de 1,5 metros da boca do furo.		Válvulas a cada 0,5 m e a partir de 1,5 metros da boca do furo.
Proteção contra corrosão	LRFD- “Bridge Design Specifications” (AASHTO 2014), and “Standard Specifications for Highway Bridges” (AASHTO 2002).	Protegidas por galvanização, tinta, epóxi e cimento.	ABNT NBR 5629 (Tabela 2). Tratamento anticorrosivo por meio de resinas poliméricas e calda de cimento.
Elementos da cabeça do chumbador	Placa de apoio, arruelas chanfradas, porcas hexagonais, arruelas e parafusos de cabeça.		

Dependendo do clima de uma região ou do tipo de solo deve ser feita uma proteção anticorrosão nas peças de aço que são protegidas por galvanização, tinta, epóxi e/ou cimento (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999). Nas publicações nacionais é utilizada como referência a norma brasileira ABNT NBR 5629 - Tratamento anticorrosivo por meio de resinas poliméricas e calda de cimento. O manual americano utiliza as normas descritas nos trabalhos da LRFD - “*Bridge Design Specifications*” (AASHTO 2014), e “*Standard Specifications for Highway Bridges*” (AASHTO 2002) e a publicação de Prashant e Mukherjee (2010) não faz referência a nenhuma norma específica.

5.4. Concreto projetado

Existem dois métodos para aplicação do concreto projetado: via seca e via úmida (Tabela 5). No método por via seca, o agregado e o cimento são misturados a seco e adicionados à água no bocal. A adição de água no bocal permite que a plasticidade do concreto projetado

possa ser ajustada no bico, se necessário. No método de via úmida o agregado, cimento e água são misturados em uma planta de lote e transportados para o bico por uma bomba hidráulica. Em ambos os casos pode ser adicionado ao concreto uma mistura de catalizadores ou fibras de plástico ou aço. No caso da utilização de aceleradores, eles devem ser compatíveis com o cimento utilizado, não corrosivos ao aço e não promover outros efeitos prejudiciais, como fissuras ou encolhimento excessivo.

Ambos os métodos de concreto projetado produzem uma mistura adequada para revestimento da parede (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999). No Brasil não existe registro nas publicações quanto a utilização do método por via úmida, mas os trabalhos também não apresentam restrições quanto ao método (Zirlis *et al.*, 1999).

Os textos nacionais com diretrizes de solo grampeado sugerem a utilização de algumas normas brasileiras ABNT que tiveram seu desenvolvimento impulsionado pelos serviços de execução Túneis NATM: NBR 13044 - Concreto projetado: reconstituição da mistura recém projetada; NBR 13069 - Concreto projetado: determinação dos tempos de pega em pasta de cimento Portland, com ou sem a utilização de aditivo acelerador de pega; NBR 13070 - Moldagem de placas para ensaio de argamassa de concreto projetados; NBR 13371 - Concreto projetado: determinação do índice de reflexão por medição direta; NBR 13354- Concreto projetado: determinação do índice de reflexão em placas (Zirlis *et al.*, 1999). O manual de referência americano descreve para a aplicação do concreto projetado a utilização das normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), que é órgão estadunidense de normalização, com as seguintes normas: ASTM C 260; ASTM C 350; ASTM C 402 (Lazarte *et al.*, 2015). A publicação indiana não especifica nenhuma norma, mas descreve todas as etapas de aplicação.

As proporções entre água e cimento variam entre 0,45 e 0,5. Para evitar perdas os mangoteiros devem aplicar o concreto ortogonalmente e a uma distância de 1 metro da parede (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999). De acordo com Zirlis *et al.* (1999) deve-se utilizar a norma brasileira ABNT NBR 13597 - Procedimento para qualificação de mangoteiro de concreto projetado aplicado por via seca.

A armação convencional usada no concreto projetado consiste em telas eletrosoldadas, comumente usadas como reforço para revestimento temporário ou, ocasionalmente, permanente (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999). A área da seção transversal e abertura das telas eletrosoldadas são selecionadas para satisfazer requisitos do projeto e devem ter uma largura consistente com a altura de elevação da escavação, equivalente à união vertical dos chumabadores, além de uma sobreposição de pelo menos 8 polegadas. “*Waler bars*”, formadas por duas barras verticais (uma de cada lado

da cabeça do prego) e duas barras horizontais (vide figura 2), também podem ser colocadas em torno da cabeça dos chumbadores como reforço adicional (Prashant e Mukherjee, 2010).

Tabela 5: comparação entre a norma americana, publicação indiana e publicações brasileiras (Concreto projetado).

Concreto Projetado			
	Americano	Indiano	Brasileiro
Modo de obtenção do concreto projetado	Via seca ou via úmida.		Via seca.
Normas para concreto projetado	ASTM C 260, ASTM C 350, ASTM C 402.	Sem especificações.	NBR 13044; NBR 13069; NBR 13070; NBR 13371; NBR 13354.
Fator água/cimento	0,45	0,5	0,45 a 0,5
Distância para aplicação do concreto projetado	Em torno de 1 metro.		
Inclinação da mangueira para a aplicação do concreto projetado	Ortogonal à superfície.		
Norma para a aplicação do concreto projetado	Sem especificações.		NBR 13597
Armação	Telas eletrosoldadas, “ <i>waler bars</i> ” e fibras metálicas de aço.		Ferragens convencionais, telas eletrosoldadas ou fibras metálicas de aço e <i>waler bars</i> .
Espessura do revestimento inicial	Cobertura mínima de 4 polegadas.	Não apresenta.	Cobertura total de aproximadamente 12 polegadas. Não apresenta.
Espessura do revestimento final	Cobertura mínima de 6 polegadas.		

O concreto projetado tem como função fornecer proteção aos materiais de drenagem como: geocompostos, tubos de conexão, suporte para drenos de paramento e DHP (se necessário) e calhas de drenagem, e também para as “*Waler bars*”, placas de rolamentos e parafusos na parede de solo grampeado (Prashant e Mukherjee, 2010). Existem exemplos de paredes utilizando a técnica de solo grampeado onde o revestimento inicial de concreto

projetado também serve como o revestimento final. Nestes casos a cabeça do chumbador se estende do revestimento final e não são instaladas as “*Waler bars*” (Lazarte *et al.*, 2015; Zirlis *et al.*, 1998).

A cobertura mínima no revestimento inicial deve ser de 4 polegadas na face externa e 6 polegadas no revestimento final sobre os elementos da cabeça do chumbador, servindo como proteção eficaz e de longo prazo contra corrosão (Lazarte *et al.*, 2015). Segundo Prashant e Mukherjee (2010), a cobertura total do revestimento deve ser de aproximadamente 12 polegadas. A mistura de concreto com fibras de aço apresenta um ganho na aplicação em superfícies irregulares, pois apesar do custo 20% superior às telas, ocorre uma economia de 20 a 40% por metro quadrado aplicado em relação ao concreto projetado convencional. A tendência atual é a substituição das telas por fibras de aço (Zirlis *et al.*, 1999).

5.5. Drenagem

A construção do sistema de drenagem das águas superficiais e águas subterrâneas utilizado na construção de muros de contenção usando a técnica de solo grampeado deve iniciar-se simultaneamente à escavação, pois o escoamento superficial não controlado da água de escoamento e/ ou a água subterrânea pode causar dificuldades durante a construção, aumentar o custo e a duração da obra, prejudicar sua integridade de longo prazo, afetar negativamente o desempenho dos muros e degradar a estética (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010).

Para o controle da água superficial antes da escavação, são instaladas canaletas de crista e valas, que tem como objetivo evitar danos à geometria do talude cortado (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010). Conforme ocorre o avanço dos níveis da obra, os drenos de paramento, compostos por calha plástica ondulada revestida por manta geotêxtil ou dreno fibroquímico devem ser instalados para o escoamento das águas subsuperficiais (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1999). Drenos tipo barbacã, que são resultado da escavação de uma cavidade com dimensões de 40x40x40 centímetros preenchida por material arenoso tendo como saída um tubo de PVC drenante (Zirlis *et al.*, 1998), e drenos subhorizontais profundos (DHP) são instalados para controle do nível de água.

Apresentados na tabela 6, esses drenos profundos são instalados a partir da perfuração descendente de baixo ângulo, geralmente com 2 a 4 polegadas de diâmetro, onde é inserido um tubo de PVC, geralmente de 2 polegadas, com espaçamento de 5 centímetros e envolto por manta drenante ou tela de nylon. Também são instaladas canaletas de pé (base) e escadas hidráulicas na finalização da construção (Lazarte *et al.*, 2015; Prashant e Mukherjee, 2010; Zirlis *et al.*, 1998).

Tabela 6: comparação entre a norma americana, publicação indiana e publicações brasileiras (Drenagem).

Drenagem			
	Americano	Indiano	Brasileiro
Dreno subterrâneo	DHP		
Diâmetro da perfuração	2" a 4"		2,5" a 4"
Diâmetro do tubo de PVC	2"		1,25" a 2"
Drenos superficiais e subsuperficiais	Calha plástica revestida por manta geotêxtil, dreno fibroquímico e canaletas.		Calha plástica revestida por manta geotêxtil, fibroquímico, canaletas e barbacãs.

Podem ser executados, ainda, procedimentos investigativos adicionais para conhecimento prévio do subsolo, como técnicas de sísmica, além de metodologias específicas para terrenos de solo congelado. Tais técnicas fugiram ao escopo do trabalho devido à limitação de aplicabilidade e consequentemente de publicações com essa temática no cenário nacional.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A comparação entre as normas executivas apresentada a seguir tem como objetivo demonstrar as diferenças e semelhanças nas metodologias aplicadas, com o intuito de ressaltar as deficiências causadas pela falta de uma norma brasileira específica para a técnica de solo grampeado e propondo uma solução para sanar este déficit.

Nas etapas iniciais do projeto, que consistem na escavação, *layout* e geometria do corte do talude e perfuração dos furos, as diferentes normas apresentadas mostram muitas semelhanças e poucas diferenças. As máquinas de escavação e perfuração utilizadas são as mesmas, sendo restringidas pelo espaço que ocupam, custo da obra, profundidade do furo ou altura da parede. O avanço na escavação, a inclinação do corte para construção da parede e a construção *top-down* (de cima para baixo), são descritas com muita semelhança. As diferenças restringem-se ao diâmetro do furo, maior na norma americana (100- 200 mm), intermediária na publicação indiana (100 a 150 mm) e menor nos artigos nacionais (50-100 mm). Outra diferença ocorre na inclinação dos furos, pois apesar das publicações estrangeiras terem como referência a inclinação de 15° com erro admitido de até 5°, as publicações brasileiras colocam a inclinação do furo aceitável entre 5° a 30°. No entanto, as referências estrangeiras colocam como problema uma inclinação abaixo de 10° devido a dificuldades no escoamento da nata de cimento.

No item que aborda a comparação de chumbadores, podemos observar que no Brasil nunca foram utilizadas barras de aço ocas e que ele é o único país em que são utilizadas barras com diâmetros entre 10 a 20 milímetros. Devido a esse fato, somente as publicações brasileiras descrevem pontas de chumbadores dobradas em "L", pois barras de aço com

espessura superior a 20 milímetros não podem ser dobradas. Os comprimentos dos chumbadores são iguais pois as metodologias americana e indiana admitem mesmo que raros, chumbadores com o comprimento de 60% da altura da parede escavada. Os centralizadores têm espaçamento entre 2 a 3 metros, mas somente a metodologia americana determina a distância das extremidades. O espaçamento dos chumbadores não é determinado nas publicações brasileiras, mas no manual americano é apresentado com determinações específicas de proporções relativas ao comprimento do chumbador e dimensão da parede.

Os tubos de injeção descritos nas publicações indianas e normas americanas são injetados à baixa pressão, colocados a uma distância mínima de 1,5 metros e com preenchimento por gravidade. Nas publicações brasileiras é descrito que o tubo de injeção com válvulas a cada 0,5 metro provavelmente consegue suprir o problema citado anteriormente, de nata de cimento não escorrer bem em furos com inclinação menor que 10°.

Em relação às normas anticorrosão dos chumbadores, a metodologia americana e as publicações brasileiras adotaram normas nacionais existentes em obras com condições similares. A publicação indiana não especifica norma, mas descreve os tipos de tratamento anticorrosivo aplicáveis. Os elementos que compõem a cabeça do chumbador como placas, arruela, porcas e parafusos são descritos de mesma forma e com mesmo objetivo, somente a diferença nos casos brasileiros para barras de aço menor de 20 milímetros de diâmetro, dobradas na ponta.

A descrição da aplicação de concreto projetado no revestimento da obra é dada por normas existentes nos casos brasileiro e americano. Os modos de obtenção do concreto projetado são iguais apesar de não haver relatos em obras nacionais a partir de via úmida, embora não haja restrições ao uso. A referência indiana baseia-se na descrição minuciosa da aplicação por etapas, mostrando todas as recomendações a serem adotadas. A comparação na metodologia executiva da drenagem resultou numa descrição muito semelhante entre elas, com diferença somente no diâmetro dos DHP. Embora a referência americana aborde outros cenários relativos ao nível de água subterrâneo, a comparação utilizada neste trabalho foi baseada na descrição para controle de águas subterrâneas elevadas, pela maior semelhança com a realidade predominante no Brasil.

A comparação dos materiais de referência mostrou que a norma americana "*Soil Nail Walls Reference Manual*" (Lazarte et al, 2015), por ser mais recente e portanto baseada na experiência de mais de duas décadas de execução deste método construtivo, apresenta sua mais completa definição, adotando parâmetros específicos para realização das etapas de investigação e execução do projeto de solo grampeado. A publicação indiana "*Soil nailing for stabilization of steep slope near railway tracks*" (Prashant e Mukherjee, 2010) apresenta-se

como uma adaptação de normas e publicações nacionais e internacionais, introduzindo normas indianas ou normas usualmente utilizadas em obras locais para adaptação do procedimento à realidade do país. As publicações brasileiras ““Solo grampeado”: projeto, execução e instrumentação” (Zirlis *et al*, 1999), “*Experience with Soil Nailing in Brazil: 1970-1994*” (Ortigão *et al*, 1996) e “Reforço do Terreno” (Abramento *et al.*, 1998) são baseadas no “*Projet National Clouterre*” (1991) e tem pequenas adaptações para as normas brasileiras existentes. Uma das maiores dificuldades no levantamento da bibliografia nacional foi encontrar um trabalho abrangendo todas as etapas envolvidas no método construtivo. O trabalho de Zirlis *et al.* (1999) foi o mais completo dos trabalhos analisados, embora existam etapas a serem melhor descritas.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho visou descrever e comparar a metodologia executiva da técnica de solo grampeado a partir de normas, publicações e artigos nacionais e internacionais. Devido ao fato de que obras utilizando esta técnica demonstram-se vantajosas em diversos aspectos como custo e tempo e com o aumento crescente de obras relacionadas, foram identificadas algumas etapas da execução incompletas ou ausentes nas bibliografias nacionais. Pode-se concluir que os trabalhos nacionais existentes não suprem em sua totalidade a necessidade da criação de norma brasileira ou manual específico para projetos utilizando a técnica de solo grampeado.

Essa iniciativa para criação de um manual ou norma técnica para solo grampeado, deve ser dada pelo trabalho em conjunto de empresas públicas, universidades, associações nacionais, órgãos responsáveis, empresas projetistas, consultores e empresas que atuam na área geotécnica. Podemos observar esta iniciativa na criação da norma francesa “*Projet National Clouterre*” (1991) e na norma americana “*Soil Nail Walls Reference Manual*” (Lazarte *et al*, 2015), que foram estabelecidas a partir de parcerias público/privado, por meio de investigações, execução, monitoramento e experiência obtida ao longo dos projetos. Também foram adotadas ou adaptadas normas pré-existentes para obtenção desses trabalhos.

Este consórcio público/privado deve se fazer valer da experiência obtida na norma americana para a criação de um manual, por ela ser a mais recente publicação e descrever em detalhes todas as etapas desde a investigação, construção de projeto, execução e monitoramento. Seria produtivo adaptar ou adotar com as devidas adequações os padrões descritos nesta publicação para a nossa realidade local e incentivar a investigação e o monitoramento a partir de instrumentação para gerar publicações mostrando as experiências através dos acertos e erros em obras nacionais.

Uma primeira aproximação de material-referência, ou um “manual” adaptado para o caso brasileiro, poderia ser obtida através da compilação e combinação dos parâmetros

americanos e aqueles já abordados no cenário nacional, gerando documento semelhante ao obtido na publicação indiana. A evolução da aplicação desse método construtivo e seu registro nas publicações técnicas ao longo do tempo, baseando-se nas instruções reunidas no manual preliminar, dariam origem à futura norma brasileira para execução de solos grampeados.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramento, M., Koshima, A., Zirlis, A. C. Reforço do Terreno. In: Saes, J. L., Frota, R. G., Carvalho, C. S., Niyama, S., W. C. Hachich, F. F. Falconi (Eds.), *Fundações: teoria e prática* (1998). 2º ed. 656-668. ABMS/ABEF, Ed. Pini.
- Babu, G. S. (2009). Case studies in soil nailing. Apresentado no Indian geotechnical Conference (IGC) -2009.
- Byrne, R. J., Cotton, D., Porterfield, J., Wolschlag, C., e Ueblacker, G. (1996). Manual for design and construction monitoring of soil nail walls. Federal Highway Administration, publicação N° FHWA-SA-96-069.
- Cornforth, D. H. (2005). Landslides in practice. Investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils. *John Wiley & Sons Inc. Hoboken New Jersey*, 596.
- “Geotechnical Engineering Manual: Design & Construction Guidelines for a Soil Nail Wall System” (State of New York Department of Transportation, 2015)
- Kutschke, W. G., Tarquinio, F. S., e Petersen, W. K. (2007). Practical soil nail wall design and constructability issues. 32º Conferência Anual de Fundações Profundas, 83-91. Colorado: The Broadmoor.
- Lazarte, C. A., Robinson, H., Gómez, J. E., Baxter, A., Cadden, A., e Berg, R. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual. Federal Highway Administration, publicação N° FHWA-NHI-14-007.
- Marzionna, J. D. Prefácio. In: Zirlis, A. C., Val, E. C. D., Neme, P. A. (Eds.), “Solo grampeado”: projeto, execução, instrumentação” (1999). Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica- ABMS.
- Mayne, P. W., Christopher, B. R., e DeJong, J. (2001). Manual on subsurface investigations. Federal Highway Administration, publicação N° FHWA NHI-01-031.
- Ortigão, J. A. R., Palmeira, E., Zirlis, A. C., Barley, A. D., Bridle, R. J., Davies, M. C. R. (1995). Experience with Soil Nailing in Brazil: 1970- 1994, (v. 119,238-241). Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering.
- Porterfield, J. A., Cotton, D. M., e Byrne, R. J. (1994). Soil nailing field inspectors manual-Soil nail walls Federal Highway Administration, publicação N° FHWA-SA-93-068.
- Prashant, A., Mukherjee, M. (2010). Soil nailing for stabilization of steep slope near railway tracks. Research Designs and Standards Organization (RSDO), Lucknow. Kanpur.
- Rawat, S., e Gupta, A. K. (2017). Testing and Modelling of Screw Nailed Soil Slopes. Indian Geotechnical Journal, 1-20. DOI 10.1007/s40098-017-0229-7.

Sabatini, P. J., Bachus, R. C., Mayne, P. W., Schneider, J. A., e Zettler, T. E. (2002). Geotechnical engineering circular no. 5: evaluation of soil and rock properties. Federal Highway Administration, publicação N° FHWA-IF-02-034.

Singla, S. (1999). Demonstration project 103: design & construction monitoring of soil nail walls. Federal Highway Administration, publicação N° FHWA-IF-99-026.

Yeung, V., (2008). Application of Soil nailing for Slope Stability Purpose, B.Tech. Project, University of Technology, Sydney.

Val, E. C. D. Projeto. In: Zirlis, A. C., Val, E. C. D., Neme, P. A. (Eds.), "Solo grampeado": projeto, execução, instrumentação" (1999). 1-32. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica- ABMS.

Verma, A., Langan, D., Agarwal, S., e Bharti, V. K. (2014). Case Study on the Performance of Reinforced Soil Slopes, publicado no Indian Institute of Technology Kanpur.

Zirlis, A. C. Execução. In: Zirlis, A. C., Val, E. C. D., Neme, P. A. (Eds.), "Solo grampeado": projeto, execução, instrumentação" (1999). 33-51. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica- ABMS.