

1 Introdução

O solo grampeado ou solo pregado é uma técnica em que o reforço do maciço é obtido através da inclusão de elementos resistentes à tensões de tração, esforços cortantes e momentos de flexão. Os elementos de reforço são muito semelhantes às ancoragens, porém sem pré-tensão ou trecho livre.

A utilização de elementos passivos para reforços de solos vem sendo muito utilizada em obras de contenção, em especial no Rio de Janeiro. É uma técnica eficaz no que diz respeito ao reforço do solo em taludes naturais ou resultantes de processo de escavação. A técnica de solo grampeado apresenta vantagens econômicas tanto no escoramento de escavações quanto na estabilização de taludes. A prática brasileira de grampeamento consiste na realização de pré-furo, seguido da introdução da barra metálica e preenchimento do furo por nata ou argamassa de cimento.

A resistência dos grampos está relacionada à mobilização do atrito no contato com o solo circundante. Como as inclusões trabalham predominantemente à tração, quanto maior o atrito entre os dois materiais, melhor será o desempenho do grampo. A mobilização do atrito na interface ocorre em função dos pequenos deslocamentos (de apenas alguns milímetros) entre o grampo e o material do maciço.

Considerando um processo de escavação, o grampeamento é feito em etapas na massa de solo, à medida que escavações são executadas. A zona reforçada desempenha o papel de suporte da massa de solo posterior não reforçada. Os grampos podem ser introduzidos no maciço através de pré-furo ou por cravação direta de elementos metálicos (grampo cravado). A face frontal da escavação é usualmente protegida por um revestimento delgado de concreto projetado, sem funções estruturais.

O alívio progressivo das tensões no solo, em função das sucessivas fases de escavação, e/ou uma configuração de ruptura do maciço, geram deslocamentos laterais no solo. Estes deslocamentos induzem o surgimento de forças internas aplicadas no sistema solo-reforço, de forma a minorar os deslocamentos da massa grampeada.

Uma vez terminada a construção de um maciço de solo grampeado pode-se perceber uma semelhança com os muros reforçados com geossintéticos ou terra armada. No entanto, deve-se observar que este tipo de contenção é construído no sentido descendente e com reforço *in situ* do solo, enquanto que os muros reforçados são ascendentes e com o elemento de suporte inserido no aterro.

A técnica de grampeamento de solos carece de estudos mais detalhados sobre a influência de parâmetros executivos e do tipo de solo na determinação da resistência ao arrancamento (q_s), parâmetro fundamental de projeto.

Os fatores de influência relacionados com o comportamento de grampos, a distribuição de tensões e deformações no grampo provocadas pelo avanço da escavação do maciço e a distribuição de tensões e deformações nos grampos ainda requerem estudos mais detalhados. O conhecimento destes fatores é fundamental para o aprimoramento da técnica, seja no aspecto de projeto, construção, desempenho e durabilidade.

1.1. Área de Estudo

Dentro de um programa de pesquisa da PUC-Rio e COPPE/UFRJ, com o apoio das empresas KLABIN SEGAL e SEEL, foi escolhida uma escavação em talude de solo residual de gnaiss para a implantação de um prédio residencial no município de Niterói (RJ) na praia de Boa Viagem.

Nesta obra foi realizada a escavação e simultânea contenção do talude por meio da técnica de solo grampeado. O talude possui altura superior a 30m em solo residual de gnaiss e com perfil de intemperismo complexo.

Na mesma área também foi selecionado um talude de 40m de altura para desenvolvimento de várias pesquisas em grampo. Estas escavações grampeadas situam-se nas proximidades do Museu de Arte Contemporânea (MAC) e, por isto, foram chamadas de Museu I e Museu II.

Diversas dissertações e teses foram desenvolvidas na área e avaliaram diversos tais como: comportamento dos grampos convencionais e não convencionais submetidos ao ensaio de arrancamento (Magalhães, 2005; Proto Silva, 2005; Springer, 2006); condicionantes geológico-geotécnicos das obras em solo grampeado realizadas no local (Gomes Silva, 2005); e comportamento e desempenho das escavações grampeadas Museu I (Lima, 2007) e Museu II, objetivo da presente pesquisa.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é analisar o comportamento da escavação grampeada Museu II ao longo da execução e entrada em serviço da obra. A caracterização geotécnica do material estudado é determinante na compreensão do desempenho da obra. O programa de investigação experimental deve estar voltado para a obtenção de parâmetros que estejam de acordo com o tipo de solo, condições do terreno e tipos de carregamentos experimentados pela massa de solo. Diversos ensaios de laboratório foram realizados com o objetivo de fornecer os parâmetros para as análises relativas ao comportamento e desempenho da obra em solo grampeado.

Diversas obras estão sendo realizadas no país, sem conhecimentos detalhados sobre as deformações inerentes à técnica e sobre os mecanismos de interação solo-grampo, durante o processo executivo e em serviço. O levantamento bibliográfico realizado mostra que no Brasil somente 4% das obras em solo grampeado utilizaram algum tipo de instrumentação.

A instrumentação de obras geotécnicas, interpretação dos dados e a análise do monitoramento de obras grampeadas permitem o entendimento do comportamento e dos mecanismos de interação envolvidos no desempenho da técnica de solo grampeado. Desse modo, avaliar o desempenho da instrumentação proposta é um dos objetivos dessa pesquisa. A avaliação da aplicabilidade de cada um dos instrumentos de monitoramento constitui em informação importante para futuros projetos de instrumentação.

Durante a construção, à medida que se prossegue com a escavação, esforços de tração são desenvolvidos nos grampos, em função da descompressão lateral do solo. Há um aumento nas solicitações axiais ao longo dos grampos e ocorre o deslocamento do maciço em função do prosseguimento da escavação.

Dessa forma, um dos objetivos deste trabalho é avaliar a forma de distribuição de tensões e deformações ao longo de grampos em cotas diversas do talude durante o avanço da escavação. Além disso, o monitoramento da evolução das cargas e dos deslocamentos, ao longo das diversas fases da obra, é fundamental para que certas hipóteses de projeto sejam confirmadas.

Um dos mais importantes parâmetros em projetos de maciços grampeados é a resistência ao arrancamento (q_s). Este trabalho também objetiva avaliar a distribuição de tensões e de deformações ao longo de um grampo durante o ensaio de arrancamento.

Portanto os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar o comportamento geral da obra grampeada em função dos esforços e deformações;
- Avaliar a transferência de carga do solo para o grampo;
- Estudar os fatores que influenciam o comportamento da obra.

1.3. Metodologia

A pesquisa pode ser dividida em cinco etapas principais: revisão bibliográfica; ensaios de laboratório; investigação de campo; instrumentação e monitoramento; e simulações numéricas.

A revisão bibliográfica é importante para o entendimento teórico do assunto abordado. Durante a revisão bibliográfica foram definidos os objetivos e a metodologia a ser empregada. Esta etapa é simultânea a todas as outras, possibilitando realimentar as análises e se necessário refinar os objetivos e a metodologia da pesquisa. O Capítulo II traz as informações bibliográficas levantadas no decorrer da pesquisa.

O conhecimento da área de estudo é fundamental para a identificação dos aspectos locais da obra. As investigações preliminares e a concepção do projeto estão apresentadas no Capítulo III. Adicionalmente, foi estabelecida uma cronologia da obra destacando os momentos cruciais no desenvolvimento do projeto, tais como: fases de escavação, condições climáticas adversas, alterações nas técnicas de escavação, instalação dos instrumentos, ensaios de campo e programação de monitoramento.

Os ensaios de laboratório são importantes para a caracterização do material da encosta e obtenção de parâmetros necessários ao entendimento do comportamento da obra. A diversidade dos materiais no perfil de intemperismo encontrado no local levou à investigação de cada um dos materiais separadamente. Os resultados dos ensaios foram capazes de reproduzir, de forma aceitável, os mecanismos e comportamentos verificados em campo, para isso a campanha de ensaios de laboratório proposta teve como objetivo abranger os diversos fenômenos e características necessárias ao entendimento do desempenho da obra. Para a campanha de investigação de laboratório foram retirados dez blocos indeformados de solo. O Capítulo IV traz as características geotécnicas básicas para cada solo, obtidas nos ensaios de caracterização, adensamento e os ensaios de resistência ao cisalhamento (cisalhamento direto e triaxial), as quais permitem a obtenção dos parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos.

A fase de investigação de campo contou com a compatibilização de dados disponíveis tais como: sondagens a percussão tipo SPT, visitas técnicas com o objetivo de caracterizar a geologia da área, e também resultados de modelos geológicos tridimensionais para a encosta. Além disso, foram realizados ensaios de arrancamento em cinco grampos instrumentados para diferentes cotas do terreno com o objetivo de obter a resistência ao arrancamento dos grampos neste tipo de solo. O Capítulo V apresenta as conclusões da campanha de investigação de campo e procurar compatibilizar os resultados obtidos com as outras fases da pesquisa.

Para a análise da distribuição de cargas e deformações nos grampos, foram utilizadas barras de aço instrumentadas com extensômetros elétricos resistivos. Foram instrumentadas 15 barras ao todo, sendo que 10 para o monitoramento da escavação e cinco para os ensaios de arrancamento. Além dos grampos instrumentados, o comportamento da obra também foi controlado por mais um conjunto de instrumentos no campo: cinco caixas de *tell tales* e dois inclinômetros. Para os grampos instrumentados de monitoramento, a frequência de leituras foi determinada de acordo com o avanço da escavação. Dessa forma, é possível avaliar a variação de carregamento dos grampos para diferentes fases de escavação. O Capítulo VI trata das características do projeto de instrumentação e do monitoramento realizado. Os resultados são apresentados separadamente para cada um dos instrumentos e também em uma análise conjunta. Os resultados obtidos foram corroborados por aspectos observados em fases anteriores da pesquisa.

As simulações numéricas representam a última fase desta pesquisa. Uma vez determinados os parâmetros e entendido o comportamento do muro em solo grampeado por meio de ensaios de laboratório, investigações de campo e monitoramento das etapas de escavação foram realizadas simulações com o objetivo de reproduzir o comportamento da obra. O Capítulo VII traz as características e resultados obtidos por meio de: análise de equilíbrio limite onde foi estudada a estabilidade da encosta e modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos para reproduzir o comportamento da escavação grampeada.

O Capítulo VIII resume as principais conclusões obtidas nas diversas fases do trabalho. O capítulo também apresenta alguns cuidados e recomendações que devem ser levados em consideração para futuras pesquisas no mesmo tema.