

8 Conclusões e Sugestões

Escavações grampeadas têm sido utilizadas com bastante recorrência como soluções para a estabilização de encostas naturais. O uso da técnica tem se desenvolvido, pois a mesma oferece menores custos de material e execução quando comparados com os custos para a execução de uma cortina atirantada.

Apesar das duas técnicas serem alternativas similares, destaca-se que os mecanismos das duas soluções são diferenciados. Os tirantes de uma cortina atirantada funcionam como elementos pré-tensionados, isto é, a tensão de incorporação que é aplicada nos mesmos é responsável pela restrição de deslocamentos na cabeça do tirante e, por conseqüência, na cortina atirantada. Os tirantes devem ser classificados como elementos ativos, uma vez que possuem carga de trabalho inicial diferente de zero.

Por outro lado, os grampos são elementos passivos. As cargas desenvolvidas nos grampos são decorrentes da movimentação da encosta. Então, à medida que a parede de escavação se desloca o grampo desenvolve esforços resistentes ao movimento. A instrumentação e monitoramento de obras em solo grampeado auxilia a identificar os mecanismos envolvidos na transferência de cargas para as barras, padrão de deslocamentos verificados no talude e comparação com respostas de modelos numéricos que simulem em ambiente computacional as características da obra. Diversas pesquisas foram realizadas em solo grampeado, mas ainda existem dúvidas quanto ao real comportamento das estruturas em solo grampeado, seja pela diversidade de solos ou por diferentes concepções de projeto.

A técnica de solo grampeado foi utilizada na obra denominada Museu II (praia das Flexas – Niterói – RJ) para a estabilização de uma encosta que foi escavada para a implantação de um empreendimento imobiliário. Foram realizadas investigações geotécnicas preliminares que subsidiaram o projeto quanto aos parâmetros do solo e dos demais elementos utilizados. No terreno adjacente ao Museu II foi executada pesquisa similar de comportamento de escavação grampeada. A área onde estavam inseridas as duas obras, Museu I e Museu II, serviu como campo experimental de diversas dissertações e teses

desenvolvidas pela PUC-Rio e COPPE/UFRJ com o apoio da executora dos serviços SEEL.

Esta pesquisa teve o objetivo de instrumentar, monitorar e analisar a encosta grampeada em solo residual Museu II ao longo de diversas fases de implantação da obra. As principais conclusões para cada uma das fases realizadas estão apresentadas a seguir.

8.1. Conclusões sobre Ensaios de Laboratório

O programa de investigação geotécnica de laboratório mostrou-se adequado para a caracterização e atribuição de parâmetros de comportamento dos solos da encosta.

Os ensaios de caracterização foram capazes de classificar o solo quanto à granulometria e demais características físicas. No entanto, é fundamental destacar que o solo escavado é um solo residual. O processo de destorroamento compromete a estrutura do solo, e, portanto influencia a real distribuição granulométrica.

Com relação aos ensaios e parâmetros de resistência dos solos estudados pode-se concluir que:

- O valor do intercepto coesivo mostrou-se bastante influenciado pela condição de saturação do solo;
- O grau de intemperismo dos solos também influencia o valor de coesão. Solos mais estruturados (solo residual jovem) tendem a apresentar maiores valores de coesão quando comparados a solos residuais maduros.
- O ângulo de atrito praticamente não varia em função da condição de saturação de um solo. Por outro lado, apresenta pequena variação em função da estruturação do solo. Dessa forma, solos residuais jovens tendem a apresentar maior ângulo de atrito do que solos residuais maduros,
- Ensaios de cisalhamento direto tendem a fornecer maiores valores dos parâmetros de resistência quando comparados aos obtidos por meio de ensaios de descarregamento lateral. Os ensaios de interface tendem a fornecer valores intermediários. É fundamental destacar as diferenças marcantes entre estes tipos de ensaios. A comparação de seus parâmetros deve ser feita de forma criteriosa.

Os parâmetros de deformabilidade, módulo de deformabilidade (E_{50}) e coeficiente de Poisson (ν), também foram determinados através de ensaios triaxiais. O valor do módulo de deformabilidade está diretamente ligado a tensão confinante aplicada. Além disso, foi evidenciada a influência do grau de saturação nas amostras. Materiais na condição natural tendem a ser mais rígidos do que os saturados. Verificou-se uma ligeira tendência à diminuição do coeficiente de Poisson (ν) em função do aumento da tensão de confinamento.

8.2. Conclusão sobre Investigações de Campo

As investigações *in situ* realizadas foram capazes de fornecer informações fundamentais quanto às condições de campo:

- Os valores obtidos da investigação à percussão tipo N_{SPT} podem ser utilizados para uma estimativa inicial de q_s , desde que sejam minorados;
- O mapeamento geológico tridimensional mostrou-se como ferramenta fundamental para a determinação do tipo de solo na encosta ao longo do grampo, definição dos contatos entre solos de natureza diferente, identificação de planos de fraqueza preferências (falhas) e complementação das informações colhidas em campo;
- Os ensaios de arrancamento constituem-se em ferramenta essencial para a determinação do valor de q_s . A execução de ensaios dessa natureza é fundamental para o controle técnico da obra. Devem ser previstos todas as vezes que ocorrer mudança de tipo de material ou em intervalos de altura pré-estabelecidos. Além de determinar o valor de q_s também devem ser utilizados para a obtenção do parâmetro k_β .

Os valores de q_s determinados por meio de correlação com o N_{spt} situam-se entre os valores obtidos de ensaios de arrancamento na condição de pico e residual. Logo, utilizar os valores de projeto é uma alternativa interessante do ponto de vista de parâmetros de resistência. Porém, executar um projeto apenas com o uso da correlação proposta seria contra a segurança do ponto de vista de ensaios de arrancamento.

8.3. Conclusão sobre Instrumentação e Monitoramento

A instrumentação foi importante para acompanhar os deslocamentos durante e após a escavação. Neste trabalho, o monitoramento foi realizado com inclinômetros e *tell tales*, para medidas de deslocamento horizontal, e barras instrumentadas com *strain gages*, para medidas de carga nos grampos. A redundância de instrumentação mostrou-se eficaz. A instrumentação permitiu avaliar os deslocamentos do maciço e cargas nos grampos, fornecendo indicadores da velocidade de avanço da escavação.

O projeto de instrumentação proposto mostrou-se eficiente para o acompanhamento das fases de escavação e monitoramento da obra. Os instrumentos selecionados permitiram leituras de deslocamentos da encosta para diferentes cotas e também das cargas as quais os grampos estavam submetidos durante o período de monitoramento. As leituras contínuas dos instrumentos permitiram o acompanhamento da obra de um modo global, sendo possível a identificação de implicações devido às condições de escavação, clima e outros aspectos construtivos da parede grampeada.

Os inclinômetros mostraram-se eficientes na obtenção dos deslocamentos pontuais e para o deslocamento global do maciço. A interpretação dos resultados corroborou a observação de aspectos geológicos marcantes na encosta, tais como a identificação de falhas. No entanto, os custos são elevados e os cuidados com a proteção do tubo de acesso são fundamentais para o sucesso do monitoramento que podem inviabilizá-los ou levarem a interpretação errada das informações obtidas.

Os *tell tales* são medidores mecânicos de baixo custo, robustos, imunes às oscilações elétricas e térmicas, e de fácil montagem e operação. Os inconvenientes estão em sua resolução limitada a 0,5mm e a tendência de relaxação do sistema. Além disso, recomenda-se que a caixa de *tell tales* também seja monitorada quanto aos deslocamentos por meio de ferramentas topográficas. Os resultados do monitoramento com *tell tales* realizado neste trabalho indicaram um desempenho similar ao do inclinômetro, apesar da resolução reduzida.

A análise conjunta dos dados de inclinometria e dos *tell tales* mostrou que os instrumentos funcionam de maneira equivalente e que é possível por meio dessas informações determinar as regiões de deslocamentos preferenciais no maciço.

Os grampos instrumentados com *strain gages* mostraram um bom desempenho, aliado a custos acessíveis. Os resultados de calibração das barras instrumentadas indicaram um comportamento elástico linear, com histerese desprezível, fornecendo constantes de calibração semelhantes em todos os *strain gages*.

Além disso, o sistema de monitoramento por meio de grampos instrumentados apresentou bom desempenho quanto à durabilidade dos *strain gages*, apesar dos conectores de sinais terem sofrido corrosão significativa. O arranjo dos *strain gages* ao longo das barras mostrou-se eficaz na obtenção da distribuição de cargas ao longo dos grampos. Essa distribuição de cargas foi determinante para o entendimento do mecanismo de transferência de cargas ao longo do comprimento do grampo e também para a determinação do ponto de tração máxima, o qual divide as zonas passivas e ativas de um maciço grampeado.

A análise das cargas nos grampos também permitiu que as hipóteses de comportamento da parede grampeada fossem discutidas. Conclui-se que o tipo de projeto utilizado para a obra Museu II faz com que os grampos funcionem como elementos de enrijecimento do talude, isto é, a massa de solo grampeada funciona como um muro de peso, ao contrário do que foi observado por Lima (2007) na obra Museu I.

Os *tell tales* apresentam também uma disposição ao aumento de deslocamentos que podem ser atribuídos a uma possível fluência do sistema.

Os grampos, de uma maneira geral, não registraram aumento de cargas uma vez que as mesmas estão estabilizadas com exceção dos grampos instalados na cota 28m.

8.4. Conclusões sobre Simulações Numéricas

A utilização das ferramentas numéricas GEOSLOPE e PLAXIS mostrou-se bastante adequada para o estudo de uma escavação grampeada em solo residual de gnaiss. A comparação bem sucedida entre os comportamentos de campo e numérico indica a possibilidade de se utilizar a simulação numérica para prever o comportamento da escavação.

O programa Geoslope foi utilizado para análises de equilíbrio limite. Foram simuladas as diversas etapas de escavação da encosta com a inclusão dos grampos à medida em que os patamares de escavação eram atingidos.

A análise da evolução do fator de segurança permitiu que fossem identificadas durante o processo de escavação as fases críticas de projeto. A principal conclusão obtida foi que a escavação grampeada projetada funciona como um grande muro de peso colocado na fase do talude, observação já identificada durante a fase de análise dos dados de monitoramento. A opção de projeto com grampos menores na parte superior e maiores na parte inferior torna a estrutura equivalente a uma estrutura de solo reforçado, não devendo ser considerada como um solo grampeado onde os grampos atravessam a superfície de ruptura.

O fator de segurança não deve ser interpretado com um percentual de segurança e sim como um indicativo entre as forças que solicitam uma encosta comparada com as forças resistentes. Para análises mais precisas do comportamento de escavações, faz-se necessário a utilização de ferramentas que avaliem o comportamento tensão-deformação das estruturas.

Foram simuladas as diversas fases de escavação dos patamares, inclusão dos grampos e aplicação da parede de concreto projetado no programa PLAXIS, o qual utiliza o método dos elementos finitos. O modelo de endurecimento de solos foi selecionado por possibilitar realizar análises com módulos de elasticidade não lineares e possuir como critério de ruptura os mesmos critérios de Mohr-Coulomb. A complexidade no desenvolvimento de um estudo paramétrico, com o objetivo de reproduzir computacionalmente as observações de campo, é devida à grande diversidade de parâmetros na encosta seja dos solos, elementos estruturais ou geométricos.

A comparação entre os resultados de campo e numéricos foi adequada tanto para a previsão de deslocamentos como para a previsão de cargas nos grampos. Na maioria dos casos, as diferenças variaram entre 15 e 30%, muito provavelmente devido às imprecisões da modelagem, atribuídas fundamentalmente a não representatividade de parâmetros, limitações do modelo e modelagem fora das reais características de campo.

Os estudos de monitoramento de encostas grampeadas são importantes para o desenvolvimento de técnicas de projeto que contemplem não exclusivamente a determinação de fatores de segurança. A análise em termos de equilíbrio limite não é capaz de fornecer deslocamentos potenciais da encosta. Análises do tipo tensão deformação devem ser utilizadas como ferramenta de projeto para escavações grampeadas.

A análise somente em termos de equilíbrio limite conduz a projetos a favor da segurança. No entanto, a incorporação pode levar a projetos com nível de

segurança dentro do exigido pelas normas, mas com utilização de recursos e distribuição de elementos de reforço de forma mais eficiente.

A utilização de ferramentas computacionais mais sofisticadas na previsão de comportamento pode contribuir de forma decisiva na execução de projetos mais e eficientes e seguros, onde os mecanismos de comportamento sejam bem entendidos e os critérios de projetos estejam relacionados com parâmetros de deslocamentos máximos e tensões máximas no interior de massas de solo grampeadas.

8.5.Sugestões para Pesquisas Futuras

Estudos similares a este são fundamentais para o entendimento do mecanismo de transferência de esforços entre a massa de solo e os grampos especialmente para solos de natureza residual. De um modo geral, poucas pesquisas têm sido desenvolvidas nesta área. Uma das sugestões é que sejam desenvolvidos estudos que permitam o maior entendimento dos mecanismos de transferência de carga e suas correlações com os deslocamentos experimentados pela encosta.

As diversas fases de pesquisa forneceram algumas observações que devem ser consideradas como recomendações e sugestões para pesquisas futuras:

- Os inclinômetros devem receber especial atenção quanto ao risco de vandalização dos tubos. Obstruções no tubo do inclinômetro podem conduzir a erros de interpretação dos resultados. Deve ser prevista proteção eficaz para o topo dos tubos inclinométricos;
- Os inclinômetros devem ser instalados em locais selecionados em função dos estudos geológicos prévios e orientados com os planos preferências de deslocamentos;
- As leituras dos *tell tales* devem ser corrigidas por meio de acompanhamento topográfico nas caixas de instrumentação;
- Os *strain gages* devem funcionar com ligações em paralelo de modo que o sinal de um elemento danificado não comprometa o de outro instalado na mesma barra;
- O projeto de instrumentação deve prever uma caixa onde serão armazenados os cabos dos grampos instrumentados;
- Os conectores dos cabos devem ser de material resistente à corrosão e de fácil reparo no caso de dano;

- As leituras dos *strain gages* devem ser acompanhadas de monitoramento da tensão de alimentação do sistema de aquisição, uma vez que diferentes voltagens podem conduzir a leituras e interpretações erradas;
- A definição dos ensaios a serem realizados deve ser avaliada levando-se em consideração a natureza dos carregamentos em campo, tipo de obra e modelo constitutivo que será empregado para análise numérica;
- Os ensaios de laboratório previstos devem procurar reproduzir as trajetórias de carregamento e as condições de campo;
- Podem ser previstos ensaios de campo com o objetivo de obter parâmetros de comportamento diferenciados para alimentar o modelo constitutivo (piezocone, por exemplo);
- Novos métodos de instrumentação devem ser sempre considerados quando se projeta o sistema de monitoramento.
- Aprimorar o uso de técnicas computacionais e propor critérios de projeto que contemplem limites de deslocamentos e de desenvolvimento de tensões no interior das encostas.