

7

Conclusões e recomendações

Os estudos apresentados buscaram o entendimento da técnica de solo grampeado quando empregada em escavações em solos residuais de gnaiss. O monitoramento geotécnico de uma escavação de grande porte, estabilizada com grampos, permitiu melhor conhecimento do comportamento do maciço grampeado. O desempenho dos reforços e as movimentações do talude, durante a fase construtiva e em serviço, foram analisados por meio de um programa extenso de instrumentação e monitoramento geotécnico da obra. Ensaios de laboratório foram realizados com o objetivo de se caracterizar os solos constituintes do maciço e para se obter parâmetros de resistência e de deformabilidade dos mesmos.

As principais conclusões resultantes das análises realizadas são descritas a seguir:

7.1.

Ensaio de laboratório

Os resultados do programa experimental permitiram apresentar as características geotécnicas e o entendimento do comportamento tensão-deformação-resistência do material do talude. As principais conclusões são relatadas abaixo:

i. Caracterização geotécnica e classificação do material:

A caracterização geotécnica do material do talude indicou a predominância de solos grossos bem graduados, classificados como areno-siltoso e areno-argiloso, de consistência dura ($IC > 1,0$). O valor médio da densidade dos grãos foi de 2,703. Os valores médios dos limites de consistência foram: $LL=41\%$ e $LP=27\%$.

ii. Curvas características:

As curvas características indicaram valores de sucção superiores a 500kPa, para umidades volumétricas inferiores a 20% ($S_o < 50\%$).

iii. Ensaio de compressão confinada:

Nos ensaios de compressão confinada observou-se que a influência da deformabilidade do sistema é alta. No caso do solo residual jovem, a correção da deformabilidade do sistema implica em diferenças de até 65% nos parâmetros de compressibilidade obtidos. A compressibilidade do material diminuiu com a profundidade. A tensão de escoamento do solo residual maduro é o dobro do valor obtido para o solo residual jovem.

iv. Ensaio de cisalhamento direto:

De um modo geral, os corpos de prova dos ensaios de cisalhamento direto não exibiram pico de resistência bem definido, com a ruptura associada a grandes deslocamentos horizontais (superiores a 10mm). Na maioria dos ensaios, os corpos de prova diminuíram de altura durante o cisalhamento. No solo residual maduro, o ângulo de atrito máximo foi de $37,3^\circ$ (CP submerso) e $45,9^\circ$ (CP na umidade natural). Este último valor, de certa forma elevado, pode estar associado à não homogeneidade do material. O intercepto de coesão foi nulo no CP submerso e igual a 6,9kPa no ensaio na umidade natural. O solo residual jovem exibiu comportamento levemente anisotrópico, quanto à resistência. O material apresentou maior coesão ($c'=27,5\text{kPa}$) quando ensaiado com sua xistosidade perpendicular ao plano de cisalhamento do que quando ensaiado com o bandeamento paralelo à superfície de ruptura ($c'=12,3\text{kPa}$). O ângulo de atrito variou de $31,4^\circ$ para $34,0^\circ$. A influência da sucção na resistência ao cisalhamento do material foi observada no solo residual jovem (bandeamento paralelo ao plano de cisalhamento). Houve uma redução do intercepto de coesão de 36,3kPa para 12,3kPa e do ângulo de atrito de $38,7^\circ$ para 34° , quando cisalhamento ocorreu em condições de submersão do corpo de prova.

v. Ensaio triaxiais:

Os resultados dos ensaios triaxiais obtidos indicaram a influência de diversos fatores no comportamento tensão-deformação-resistência do solo residual jovem e maduro.

Os ensaios CID no solo residual maduro mostraram que o material ensaiado apresentou comportamento típico de solos cimentados. Para a tensão confinante bem menor que a tensão de escoamento, a tensão desviadora foi máxima para pequenas deformações, com pico de resistência bem definido. Vencida uma possível cimentação existente, (com o aumento da tensão

confinante) o material não apresentou pico de resistência. Nestes casos, a ruptura, ocorreu para grandes deformações axiais (maiores que 15%). No solo residual jovem, em geral, o material apresentou pico de resistência bem definido e associado à expansão do corpo de prova. As deformações axiais na ruptura foram maiores que 7%.

As curvas tensão-deformação dos ensaios CID-E indicaram expansão volumétrica do corpo de prova durante o cisalhamento, com deformações axiais na ruptura da ordem de 3%. Em todos os ensaios, os corpos de prova não sofreram ruptura brusca.

A contribuição da sucção promoveu um acréscimo de resistência nos solos residuais jovens não saturados. O efeito da sucção também acarretou em um aumento da rigidez do solo. Os módulos de deformabilidade na condição não-saturada foram maiores que na condição saturada (cerca de 1,4 vezes superiores nos ensaios CID e 2,7 vezes nos ensaios CID-E). Não se observou influência significativa da sucção nos valores do coeficiente de Poisson.

Em relação à verificação da anisotropia inerente nos ensaios CID, pode-se concluir que há uma diferença moderada no comportamento do solo residual jovem conforme a orientação do bandejamento. Os valores de coesão, ângulo de atrito e módulo de deformabilidade variaram razoavelmente quanto à direção do bandejamento. Já os valores do coeficiente de Poisson mantiveram-se praticamente iguais.

Quanto ao efeito de escala, conclui-se que a influência das dimensões dos corpos de prova é percebida na parcela de coesão do material, não havendo variações significativas no ângulo de atrito.

O módulo de deformabilidade mostrou-se fortemente influenciada pelas trajetórias de tensões impostas e pela tensão efetiva de consolidação. Para uma tensão confinante de 300kPa, o módulo de deformabilidade E_{50} nos ensaios CID-E (solo residual jovem e maduro) foi 2,2 vezes superior ao obtido no ensaio seguindo a trajetória de tensões de carregamento axial. Não houve influência significativa das trajetórias de tensões nos valores de v_{50} e as deformações necessárias para se atingir a ruptura foram bem menores nos ensaios CID-E, se comparadas com aquelas obtidas nos ensaios CID.

Os parâmetros de resistência c' e ϕ' , representativos dos ensaios triaxiais na condição saturada, foram de $c'=7,2\text{kPa}$ e $\phi'=29,3^\circ$ (solo residual maduro) e de $c'=24,6\text{kPa}$ e $\phi'=34,6^\circ$ (solo residual jovem).

7.2. Desempenho da instrumentação e monitoramento geotécnico

i. Inclínometria:

A confiabilidade nas leituras dos inclinômetros está diretamente ligada ao processo de instalação do tubo e leituras do equipamento. A frequência de leituras deve ser realizada após cada evento importante na obra. Recomenda-se pelo menos 1 leitura por dia no período de escavação, realizada por uma mesma dupla de operadores.

Os deslocamentos fornecidos pelos inclinômetros possibilitaram o controle da movimentação do maciço com eficiência. Os resultados mostraram um bom funcionamento do equipamento, sendo as leituras crescentes com o avanço da escavação e término do grampeamento do talude.

ii. Tell tales:

Os deslocamentos apresentados pelos “tell tales” também indicaram um crescimento durante o processo construtivo e após o término da obra. A análise dos resultados possibilitou detectar de zonas de maiores movimentações no talude.

Apesar das limitações referentes à confiabilidade das leituras fornecidas, é possível monitorar (por um custo menor e instalação mais simples que do inclinômetro) a movimentação do maciço durante toda a fase construtiva. A interpretação dos resultados dos “tell tales” contribui para a segurança da obra, sendo tomadas medidas preventivas, quando se observa um aumento significativo nos valores dos deslocamentos com o avanço da obra.

As diferenças encontradas nos valores de deslocamentos fornecidos pelos “tell tales” e pela inclinometria, podem ser explicadas pela incompatibilidade dos sistemas de medição.

As leituras dos “tell tales” devem ser realizadas por um único operador devidamente treinado em técnicas de escalada. Em ambientes agressivos, o sistema de medição deve ser feito de material anticorrosivo.

iii. Grampos instrumentados:

O processo de instrumentação das barras de aço requer mão de obra qualificada. O transporte dos reforços deve ser feito com cuidado e requer atenção de toda a equipe, com paralisação dos serviços durante a colocação das barras nos furos.

O desempenho da instrumentação geotécnica com extensômetros elétricos foi considerado bastante satisfatório. Os resultados indicaram que há um aumento (não linear) nas forças axiais, com o avanço da escavação e após a conclusão da obra.

7.3.

Considerações sobre a escavação grampeada em solo residual de gnaiss

i. Análise da estabilidade do talude em solo grampeado:

O aumento da densidade de grampos na base da escavação promoveu um acréscimo no fator de segurança global do talude (FS=1,35 - condição saturada e FS=1,59 - umidade natural).

Análises paramétricas indicaram um aumento do fator de segurança do talude com a elevação da sucção. Para um nível de sucção médio de 100kPa, o FS foi 6,6% superior à condição saturada. No caso de um valor de sucção no campo mais elevada (300kPa), o valor de FS foi 30% maior.

Os resultados dos estudos em equilíbrio-limite mostraram que os grampos instrumentados que mais contribuem para a estabilidade do maciço grampeado são aqueles da face C (5ª linha) e G (1ª linha). Os valores de tração máxima dos reforços estão bem distantes da carga de escoamento da barra de aço (44% do valor de $T_{\text{escoamento}}$).

ii. Deslocamentos durante a construção em serviço:

Os resultados fornecidos pela inclinometria indicaram que os deslocamentos horizontais aumentaram com o avanço da escavação e não cessaram após o término da obra. O comportamento do maciço pode ser dividido em 4 fases:

- Fase (1): execução da escavação grampeada - há um crescimento acelerado dos deslocamentos com o avanço da escavação da ordem de 0,18mm/dia (I1) e de 0,79mm/dia (I2). Os maiores deslocamentos observados no maciço ocorreram nesta fase;
- Fase (2): término da obra e início da escavação vizinha - movimentações associadas à acomodação da massa de solo e ao desconfinamento lateral provocado pela escavação vizinha. Nesta fase a taxa de deslocamento sofreu redução média de 85% em relação à fase (1).

- Fases (3) e (4): períodos pós-construção da escavação vizinha - observa-se uma tendência à estabilização dos deslocamentos horizontais associada ao término da escavação do “Museu 2” e à mobilização dos esforços nos grampos.

Na última medição realizada, a magnitude de $\delta_h^{m\acute{a}x}$ foi de 0,20%H no talude superior. No talude inferior, a maior movimentação equivaleu a 0,41%H. Observou-se um aumento nos deslocamentos de até 52%, após 2 anos e 10 meses de monitoramento.

O padrão de movimentação na direção secundária é semelhante ao observado na direção principal, porém a ordem de grandeza dos deslocamentos é significativamente menor.

A evolução da movimentação horizontal máxima, durante os sucessivos estágios de execução mostrou que os deslocamentos são menores no início da escavação e aumentam com o avanço da obra, de forma exponencial (o processo de movimentação do talude é mais acelerado na face subvertical). Os valores de $\delta_h^{m\acute{a}x}$ aumentaram significativamente quando a altura da escavação foi igual a 72% da altura total do talude. As deformações no interior do maciço grampeado diminuem com a distância da face.

A interpretação dos resultados dos “tell tales” possibilitou delimitar uma região de maior movimentação do maciço e o controle dos deslocamentos durante o processo executivo. Os maiores deslocamentos foram fornecidos pelos cabos mais longos.

iii. Mobilização dos grampos durante a construção e em serviço:

Durante a construção e em serviço, os grampos trabalham predominantemente à tração, sendo observados valores baixos de momentos fletores nas barras instrumentadas.

O aumento das solicitações nos grampos é função do processo executivo, inclinação da face, densidade dos grampos, geologia e escavação vizinha.

Os resultados de força axial (F_{axial}) em cada grampo apresentaram tendência de estabilização 11 meses após o término da obra. De maneira geral, o valor de F_{axial} foi inferior a 100kN na face C e 200kN na face G. Durante o monitoramento, os grampos mais solicitados foram aqueles da face inferior. Os maiores incrementos de F_{axial} ocorrem durante a construção, onde há descompressão lateral do solo. Durante o serviço, verificou-se uma menor variação das leituras com o tempo.

Os valores de tração máxima aumentaram após o término da obra. Um ano e seis meses do fim do grampeamento, o acréscimo de carga foi de 158% (face C) e 110% (face G). Estes dados alertam para algumas situações de projeto em que não se faz uma avaliação dos esforços nos grampos durante o serviço.

iv. Distribuição das tensões nos grampos e ponto de tração máxima:

A distribuição das tensões depende da forma de fixação do grampo e das descontinuidades litológicas ao longo do grampo. No caso estudado, os grampos instrumentados comportaram-se como “livres” em relação à face da escavação.

O ponto de tração máxima situa-se distante da face da escavação e varia com a profundidade e com a inclinação do talude. No topo do talude, o ponto onde $T=T_{\text{máx}}$ é de $0,42H$ (sendo H a altura do talude em solo grampeado).

A obtenção dos valores de tração máxima permitiu definir a localização de uma eventual superfície crítica (no interior da região de maiores deslocamentos fornecidos pelos “tell tales”). A posição desta curva indicou (no final da construção) que a contribuição de cada grampo, na estabilidade global do maciço, varia conforme a posição e comprimento do reforço. A maior contribuição ao equilíbrio da massa foi fornecida pelos grampos superiores (1ª linha - face C). Estes resultados diferiram dos apresentados pelas análises de estabilidade (talude saturado).

v. Magnitude das forças de tração máxima:

A força axial máxima aumentou de forma exponencial com o avanço da escavação. O valor de $F_{\text{máx}}$ pôde ser determinado em qualquer etapa da obra pela relação:

$$\frac{F_{\text{máx}}}{F_{\text{esc}}} = 0,0553 \cdot e^{2,7105 \left(\frac{H_{\text{esc}}}{H} \right)}$$

vi. Valores de tração medidos e estimados na fase de projeto:

Os valores de tração estimados na fase de projeto foram diferentes daqueles fornecidos pela instrumentação dos grampos.

A distribuição de tensões obtida pela instrumentação assumiu uma forma variável enquanto que, na proposição da FWHA e nas análises em equilíbrio limite, observou-se uma distribuição trapezoidal e retangular, respectivamente.

vii. Mobilização de q_s :

No final da construção, as tensões cisalhantes no contato solo-grampo (obtidas pela instrumentação) foram inferiores a 25% do valor de q_s do projeto. A maior mobilização acontece na 1ª linha de grampos das faces C e G. Após o término da escavação e início da obra vizinha, o valor da tensão cisalhante solo-grampo é menor que 35% do valor de q_s .

viii. Tração na face da escavação:

A magnitude de T_o (no final da escavação) é maior nos grampos da face G, cuja inclinação é mais acentuada ($\beta=85^\circ$). A relação de ($T_o/T_{m\acute{a}x}$) varia com a profundidade normalizada pela altura total da escavação (z/H). A magnitude de T_o oscilou entre 0,3 a 0,6 de $T_{m\acute{a}x}$.

ix. Estado de tensões no maciço grampeado:

As tensões horizontais desenvolvidas nos reforços foram menores que aquelas relacionadas ao estado ativo, sendo esta observação mais evidente no final do monitoramento e nos grampos inferiores. A magnitude das tensões máximas nos grampos não foi constante e variou com a profundidade.

A aplicação de uma carga de incorporação ($T_i=100\text{kN}$) nos grampos inferiores (Face G) modificou o estado de tensões na região inferior do talude, promovendo uma redução das forças de tração máximas mobilizadas nos grampos daquela região.

Em termos práticos, a força axial máxima observada no talude (em serviço) pode ser estimada pela seguinte relação:

$$T_{m\acute{a}x} = 0,30 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot Z \cdot S_h \cdot S_v$$

x. Critérios preliminares de projeto:

Os parâmetros de projetos de obras nacionais, realizadas em solos residuais, indicaram que s_v/L situa-se entre 0,20 e 0,40. A relação de L/H apresenta grande variabilidade, porém na maioria das obras oscila entre 0,40 e 0,80. Na obra pesquisada, o valor de s_v/L foi de 0,08 a 0,10 e de L/H foi de 0,40 a 0,60.

xi. Metodologia executiva e especificações:

O processo de escavação acelerado ($H_{\text{escav}}=2,40\text{m}$, sem grampos) acarretou em aceleração dos deslocamentos do talude grampeado e, conseqüentemente, em maior mobilização dos reforços. A influência da seqüência de escavação acelerada foi mais significativa na região inferior do talude (face G).

Medidas corretivas adotadas durante a construção (escavação em bancadas e aplicação de uma carga de incorporação nos grampos) reduziram significativamente a velocidade dos deslocamentos e a mobilização dos grampos, demonstrando serem procedimentos eficientes no controle do comportamento do maciço.

Para se evitar a adoção de medidas corretivas, recomenda-se que o processo de execução, de escavações em solo grampeado, deva ser realizado em 3 etapas seqüenciais, iniciando-se o grampeamento do solo e a face de concreto projetado imediatamente após a etapa de escavação.

Em escavações verticais em solo residual de gnaíse, a altura de escavação recomendada deve ser inferior a 1,30m. Durante a execução deve ser realizado acompanhamento permanente dos deslocamentos horizontais e, se possível, deve-se monitorar o comportamento dos grampos.

xii. Período de chuvas intensas:

Os resultados da instrumentação mostraram que o processo de infiltração de água no talude, decorrente do período de chuvas intensas, pouco influenciou na movimentação do maciço e na mobilização da tração nos grampos.

xiii. Desconfinamento lateral devido à escavação vizinha:

A movimentação do maciço de solo grampeado foi influenciada pela escavação vizinha. O início da escavação do "Museu 2" promoveu mudanças no padrão de comportamento do talude, com aumento dos deslocamentos na direção secundária (direção NW-SE) até o término da escavação vizinha.

O desconfinamento lateral promoveu um aumento da mobilização dos grampos inferiores da obra.

7.4. Sugestões

Como sugestões para novas pesquisas, são citados alguns estudos importantes:

- Modelagem numérica do comportamento da obra instrumentada e realização de estudos paramétricos com auxílio de um programa computacional;
- Implementação de modelagem numérica do comportamento da escavação grampeada em três dimensões (efeito tridimensional);
- Avaliação da sucção no comportamento tensão-deformação do maciço estabilizado com grampos;
- Comparação dos valores de tração obtidos nos métodos de dimensionamento de taludes em solo grampeado, com aqueles fornecidos pela instrumentação;
- Realização de programas de instrumentação e monitoramento, estudos em escala reduzida e modelagem numérica, de escavações grampeadas em diversos tipos de solos residuais, que possibilitem a definição de critérios de projeto para estes solos;
- Criação de norma específica para projeto e execução de taludes em solo grampeado.