

## 5. Conclusões e sugestões

Os estudos aqui apresentados buscaram esclarecer uma série de questões envolvendo a técnica de estabilização de taludes em solo-grampeado. Uma avaliação do comportamento tensão-deformação de escavações grampeadas foi realizado através de modelagem computacional. Procurou-se compreender a influência dos parâmetros mais relevantes na modelagem do comportamento de escavações grampeadas em solo residual do Estado do Rio de Janeiro.

As principais conclusões resultantes das análises realizadas são:

### **Inclinação do talude em contenções com solo grampeado:**

A influência da inclinação do talude é significativa nos deslocamentos horizontais, os quais crescem de magnitude à medida que o talude torna-se mais íngreme. A execução de escavações com taludes ligeiramente inclinados reduz significativamente a magnitude dos deslocamentos no topo. Esta redução chega a 75% quando se passa de uma escavação vertical ( $\beta=90^\circ$ ) para uma inclinação de  $\beta=80^\circ$ . Adicionalmente, a forma dos deslocamentos também é afetada; deslocamentos máximos no topo da escavação só são observados em taludes com  $\beta=90^\circ$ . Para pontos abaixo da base da escavação, a inclinação do talude afeta pouco os deslocamentos horizontais.

Estudos de recalques superficiais demonstram que a magnitude destes deslocamentos é diretamente proporcional à observada em termos de deslocamentos horizontal. Em taludes verticais, por exemplo, o elevado deslocamento horizontal em direção à escavação acarreta deslocamentos verticais também significativos. Os valores de recalque superficial independem de  $\beta$  a partir de uma distância de aproximadamente  $2H$  do topo da parede vertical. A partir desta posição, os recalques superficiais já são menos expressivos e sofrem influência reduzida da inclinação  $\beta$ .

Com relação à base da escavação, observou-se de um modo geral, um processo de elevação de fundo pouco sensível à inclinação da parede. Em pontos próximos à base da escavação, valores mais elevados de recalques superficiais foram relatados em taludes verticais. A partir da distância de 0,5m da base da escavação, os deslocamentos verticais independem da inclinação do talude, e são aproximadamente constantes, variando entre 0,23%H e 0,30%H.

Os esforços axiais máximos de tração para  $L/H=0,57$  (última etapa de escavação), são maiores em taludes mais próximos da vertical. Os resultados indicam que os grampos mais próximos à superfície contribuem menos na contenção do solo do que os grampos inferiores. Para profundidades de escavação maiores, a mobilização da primeira linha de grampos é acentuada, em particular para as inclinações de  $80^\circ$  e  $90^\circ$ . Em taludes com  $60^\circ$  e  $70^\circ$  de inclinação, não há um aumento considerável dos esforços axiais nos grampos durante todo o processo de escavação.

#### **Estabilização de escavações com grampos e tirantes:**

Uma solução de contenção em estrutura mista (solo grampeado+tirantes) pode ser útil quando se deve reduzir os deslocamentos em determinados pontos da escavação. Esta redução é obtida através da instalação de tirantes nesses locais.

#### **Número de etapas de escavação:**

O número de estágios de escavação apresenta grande influência nos deslocamentos da parede em estruturas de contenção com grampos e tirantes. As escavações em etapas, mais usuais na prática da engenharia geotécnica, forneceram valores maiores de deslocamento no topo da estrutura.

#### **Espessura da parede:**

Resultados apresentados mostram a influência da rigidez da parede nos deslocamentos horizontais na face da escavação. Paredes com espessura de 10cm e 20cm apresentam valores similares de deslocamentos. O mesmo pode ser observado para os casos de estruturas sem revestimento ou com paredes de espessura reduzida.

#### **Influência dos contornos laterais:**

A influência das condições de contorno em modelagem de escavações grampeadas é bastante significativa. As análises indicam que uma relação de  $B_e/H \geq 4$  pode ser utilizada em problemas de escavações com solo grampeado utilizando o programa FLAC. A partir desta relação, a variação dos deslocamentos horizontais na face da escavação torna-se desprezível para qualquer condição de contorno lateral direito imposta (Figura 82). Com relação à influência do contorno lateral esquerdo, a geometria estudada demonstra ser

aceitável no caso de escavações que apresentam certa simetria. Em outras situações, o contorno lateral esquerdo deve ser afastado o suficiente da região da escavação, de modo a não interferir nos resultados.

#### **Influência da forma de modelagem da parede:**

A parede modelada como material 2D perfeitamente elástico e isotrópico indica um padrão de deslocamento semelhante ao de um corpo rígido quando adotado um valor do módulo de Young da parede ( $E_{\text{parede}}=50\text{GPa}$ ), correspondente ao módulo do concreto. Para valores reduzidos do módulo de Young (com rigidez equivalente àquela apresentada pelo elemento de viga), a estrutura exibe um perfil de deslocamento horizontal semelhante ao fornecido por elementos de viga, tendo sido registrados, em toda escavação, menores valores de deslocamento.

Como resultado destas análises, verifica-se que o tipo de modelagem da parede resulta em diferentes padrões de deslocamento. Sugere-se, neste caso, que a parede seja modelada com elementos de viga em análises numéricas de escavações grampeadas.

#### **Escavações grampeadas em solo residual:**

No caso de escavações de 5m de profundidade, os resultados de deslocamento no topo indicam que para  $L/H \geq 0,7$  não há interferência da densidade de grampos na escavação para o solo estudado. Ressalta-se, ainda, que, nestas análises, a relação entre espaçamento e comprimento de grampo ( $S_v/L$ ) variou entre 25% e 50%.

Para escavações de 10m de profundidade, os deslocamentos no topo, relativos à condição de  $L/H \geq 0,7$  ( $L=12\text{m}$ ), indicam interferência do espaçamento entre grampos quando este é superior a 2m ( $S_v/L > 16,7\%$ ). Para espaçamentos de 3m ( $S_v/L=25\%$ ) observa-se uma mudança no padrão de deslocamentos horizontais em função das condições geométricas (contorno, discretização da malha), que afetam diretamente o valor final dos deslocamentos. Espaçamentos maiores que 3m resultaram no colapso da escavação grampeada. Para grampos de 6m de comprimento ( $L/H < 0,7$ ), a influência do espaçamento é observada quando este é superior a 1,5m ( $S_v/L > 25\%$ ). A partir desta condição ( $S_v=2\text{m}$ ) ocorre o desenvolvimento de uma região plastificação contínua, caracterizando uma condição de ruptura.

Para escavações de baixa altura ( $H \leq 5\text{m}$ ), a relação de  $L/H \geq 0,7$  e  $Sv/L \leq 50\%$  pode ser usada como critério de projeto para escavações em solos residuais gnáissicos jovens, típicos do Rio de Janeiro. Para escavações maiores, a relação  $Sv/L$  máxima deve ser reduzida para 25%.

O ângulo médio de rotação da face ( $\theta$ ), relacionado à rotação global do conjunto solo-grampo, mostrou-se ser um parâmetro de projeto importante, não devendo ser ignorado ao se avaliar a deformabilidade de taludes grampeados. Na prática, as análises concentram-se nos deslocamentos no topo, admitindo que a rotação da parede ocorra com deslocamento nulo na base da escavação.

A adoção de uma configuração variável de comprimento de grampo, apresenta-se como uma alternativa técnica e economicamente recomendada.

### **Sugestões:**

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

- Estabelecer critérios de distância para o contorno em escavações grampeadas que não apresentam uma condição de simetria (ex.: casos em taludes naturais, vales muito largos);
- Estudar o comportamento tensão-deformação de contenções em solo grampeado que envolvam outros tipos de solos, com o objetivo de se correlacionar critérios de projetos  $L/H$  e  $Sv/L$  para diversos solos;
- Detalhar a influência de diversas configurações de comprimento de grampo no estudo da deformabilidade da massa de solo grampeado;
- Comparar medições de escavações instrumentadas (caso real) com previsões usando o programa FLAC;
- Implementar estudos tensão x deformação de escavações grampeadas em três dimensões (3D);