

DEFORMABILIDADE DE TALUDES ESTABILIZADOS COM SOLO GRAMPEADO

Fernanda O. Springer, Doutoranda
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil.

Denise M. S. Gerscovich, Professora Adjunta
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Brasil.

Alberto S. F. J. Sayão, Professor Associado
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil.

RESUMO: A utilização da técnica de solo grampeado vem sendo cada vez mais utilizada em obras de estabilização de taludes e cortes. Os projetos são usualmente baseados na análise do equilíbrio do maciço grampeado, sem observar aspectos relacionados à deformabilidade da estrutura. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da modelagem numérica dos diferentes estágios de um talude escavado com face vertical em terreno com superfície horizontal e estabilizado com grampos. Atenção particular foi dada à influência dos aspectos construtivos nas tensões atuantes nos grampos e nos deslocamentos na face do talude e na superfície do terreno. Os resultados mostram que, quando o método executivo permite o deslocamento entre os grampos e a face (grampos livres), as deformações são mais elevadas, em especial para valores da razão entre comprimento (L) do grampo e altura (H) de escavação inferiores a 0,67. Verifica-se ainda que o mecanismo de ruptura, baseado no desenvolvimento das regiões ativa e passiva, não ocorre quando os grampos são fixados à parede da face do talude.

ABSTRACT: The use of soil nailing has been gaining growing acceptance for stabilization works in cuts and slopes. Design procedures are usually based on limit equilibrium methods, disregarding aspects related to the deformability of the soil nailed mass. This paper presents the results of a numerical study of soil slopes with vertical face and horizontal surface. The main objective is to evaluate the influence of the construction technique on the soil displacements and nail tension. The results show that when construction procedures allow for relative displacements between nails and slope face (free nails), the displacements increase, particularly for ratios between nail length (L) and excavation height (H) smaller than 0.67. It is also noted that the failure mechanism, which is based on the development of active and passive regions, does not occur when the nails are fixed to the slope face.

PALAVRAS-CHAVES: taludes grampeados, modelagem numérica, deformabilidade.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de inclusões passivas para reforços de solos, técnica conhecida como solo grampeado, vem tendo aceitação crescente no meio técnico, para a estabilização de taludes e contenção de escavações, em especial no Rio de Janeiro.

Os grampos podem ser introduzidos sub-horizontalmente no maciço através de pré-furo, seguido pela introdução de elemento metálico e

preenchimento do furo com material cimentante (grampo injetado) ou por cravação direta de elementos metálicos, como barras, cantoneiras ou tubos de aço (grampo cravado).

Historicamente, a adoção de grampos como elementos de reforço de solo foi originada a partir da técnica NATM, para avanço de escavações em túneis rochosos. Com esta técnica, os deslocamentos na cavidade são estabilizados com a aplicação, logo após a escavação, de um revestimento flexível de

concreto projetado, tela metálica e chumbadores curtos radiais (grampo cravado). Com o desenvolvimento desta técnica, passou-se a utilizar com mais frequência o grampo injetado, uma vez que o processo executivo e os equipamentos necessários à sua instalação são semelhantes aos utilizados para tirantes.

Durante a escavação do talude, o solo que forma o muro de solo grampeado é sujeito a descarregamento lateral. O principal elemento de interação solo-grampo é, portanto, o atrito mobilizado no contato entre os dois materiais. Como as inclusões trabalham basicamente à tração, quanto maior for o atrito entre os dois materiais, melhor será o desempenho do reforço. A resistência ao atrito depende não só do tipo e densidade do solo, mas também do tipo do grampo. Grampos injetados apresentam resistência no contato solo-grampo superior à verificada com grampos cravados.

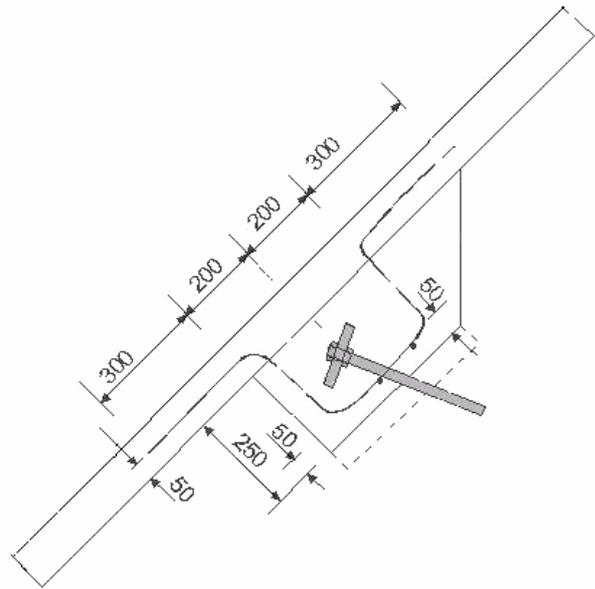
A definição dos parâmetros de projeto dos grampos, tais como comprimento (L), ângulo (α) de instalação e espaçamentos vertical (S_v) e horizontal (S_h), depende dos seguintes fatores: altura do talude escavado, ângulo de inclinação da face, tipo de grampo (injetado ou cravado), quantidade de grampos e resistência mobilizada no contato solo/grampo (q_s), além de variáveis ambientais que eventualmente venham a alterar as características mecânicas do grampo.

Como regra geral, os grampos são dispostos em linhas com inclinação suave em relação à horizontal. Na prática, a instalação dos grampos é realizada com ângulos de inclinação α entre 5° e 15° . Entretanto, os grampos mostram-se mais eficientes no controle de deslocamentos laterais da massa escavada quando instalados na horizontal.

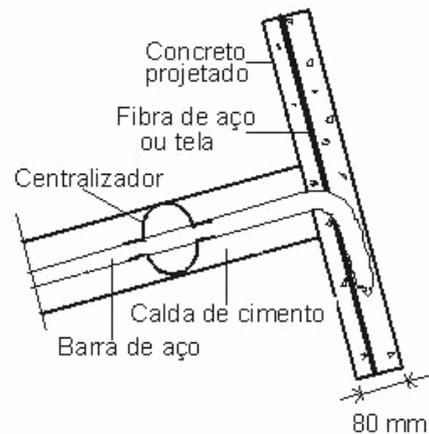
A Figura 1 mostra diferentes configurações para a extremidade dos grampos. A extremidade superior pode ser embutida no paramento (Figura 1a) ou dobrada (Figura 1b). Pode-se ainda utilizar placa metálica e porca (Figura 1c), que permitem a aplicação de uma pequena carga de incorporação para garantir o contato entre o solo e o concreto projetado. Esta precaução é importante no caso de muros com paramento vertical.

Após a introdução dos grampos, deve-se executar a proteção da face do maciço, a fim de que a mesma não sofra processos localizados de

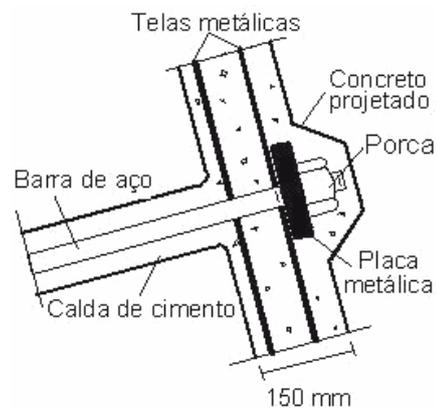
erosão superficial, causados principalmente pela ação da chuva e outras intempéries naturais. Em taludes escavados em solo, esta proteção é feita normalmente com um revestimento delgado de concreto projetado, sem funções estruturais.



(a) Cabeça do grampo embutida.



(b) Cabeça do grampo dobrada.



(c) Cabeça do grampo com placa e porca.

Figura 1. Cabeças dos grampos (GeoRio, 1999).

Na prática, o projeto de reforço de solo com grampos é tratado de forma semelhante à adotada para muros de gravidade. Como tal, deve-se proceder a avaliação da estabilidade externa (escorregamento ou tombamento) e interna. A partir do equilíbrio interno, dimensiona-se o espaçamento e o comprimento dos grampos. Os principais métodos de análise consideram o desenvolvimento de duas regiões (ativa e passiva), limitada por uma superfície potencial de deslizamento (Ortigão et al., 1995).

Ao contrário do preconizado na teoria clássica de empuxos de terra, os termos ativo e passivo referem-se à forma de mobilização dos esforços no grampo. O limite entre as duas regiões é definido pela localização, em cada grampo, do ponto de força axial máxima (Figura 2).

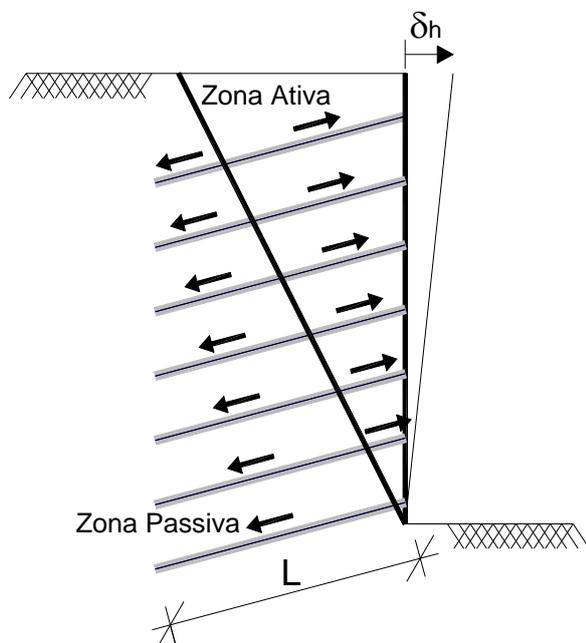


Figura 2. Definição das zonas ativa e passiva em escavações grampeadas.

Neste tipo de abordagem, considera-se que, uma vez que a estrutura é estável, os deslocamentos são de pequena magnitude e não interferem na qualidade do projeto.

Ao final da construção, os valores máximos de deslocamentos vertical e horizontal ocorrem em geral no topo. Os deslocamentos esperados para massas de solo grampeado são da ordem de 0,1 a 0,5% H, sendo “H” a altura total do talude (Guilloux et al., 1982; Cartier e Gigan, 1983;

Gässler e Gudehus, 1981; Shen et al., 1981; Plumelle, 1986; Mitchell e Villet, 1987; Juran e Elias, 1987).

Os deslocamentos no topo são dependentes de diversos fatores, tais como: altura do talude da escavação; seqüência construtiva; espaçamento entre grampos; comprimento dos grampos; razão entre o comprimento do grampo e a altura do muro; inclinação dos grampos; capacidade de suporte do solo de fundação.

Quando são previstos valores elevados para os deslocamentos laterais no topo do muro, lança-se uso das estruturas mistas, as quais consistem em uma estrutura de solo grampeado enrijecido com ancoragens no topo. As barras de ancoragem devem ter comprimentos muito superiores aos dos grampos, pois os trechos de ancoragem devem ser locados em posição distante da massa de solo grampeado.

Na realidade, pouco se conhece ainda sobre a influência dos parâmetros de projeto e técnicas de execução com relação à deformabilidade do maciço grampeado.

Com o objetivo de estudar o comportamento tensão-deformação de massas grampeadas, foram realizadas simulações numéricas de taludes escavados em solo com face vertical e superfície do terreno horizontal. Ênfase foi dada à influência da técnica construtiva no comportamento do maciço reforçado. Neste trabalho foi utilizado o programa computacional FLAC (Itasca, 1996).

2 PROGRAMA FLAC

O programa FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) é baseado no método de diferenças finitas e simula o comportamento bidimensional e as etapas construtivas de obras de engenharia, incluindo estruturas constituídas de solos e/ou rochas. No programa estão incorporados diversos modelos constitutivos, elástico ou elasto-plásticos, além de modelos de junta (para interfaces entre materiais de comportamentos distintos).

A simulação do grampo é feita através de elementos unidimensionais que trabalham à tração, não apresentando resistência à flexão. A resistência no contato solo-grampo depende das componentes de adesão e de atrito, as quais

devem ser obtidas preferencialmente em ensaios de arrancamento no campo.

O programa FLAC disponibiliza duas alternativas para a colocação do grampo injetado na malha: livre (G-Livre) ou com extremidade fixa a um nó específico (G-Fixo).

A primeira consiste na inserção dos grampos (barra de aço + calda de cimento) a partir da identificação das coordenadas (x, y) de suas extremidades. Desta forma, os esforços desenvolvidos ao longo do grampo livre possuem uma parcela ativa e uma passiva (Figura 2). Neste caso, é possível haver um deslocamento relativo entre o grampo e a face, resultando no puncionamento do grampo.

A segunda alternativa para a colocação do grampo consiste na compatibilização dos deslocamentos da extremidade do grampo a um dos nós da face do talude, mantendo a outra extremidade livre. Esta alternativa condiciona os movimentos dos grampos aos movimentos dos nós aos quais estão fixados, impedindo, nesta região, que a resistência solo-grampo seja mobilizada.

Neste trabalho, o comportamento do solo foi representado pelo modelo de Mohr-Coulomb (Itasca, 1996).

3 CASO ESTUDADO

A análises foram feitas considerando um talude vertical escavado com 10,5m de altura e executado em 7 estágios de 1,5m.

A malha adotada foi constituída de 11.954 nós (139 x 86), conforme mostra a Figura 3. As condições de contorno (deslocamentos horizontais e verticais impedidos nos contornos laterais e de fundo) também estão apresentadas nesta figura.

Os grampos com 6m de comprimento foram posicionados com espaçamento vertical constante ($s_v = 1,5m$), sendo que a instalação da primeira linha de grampos foi feita a 1m de profundidade. O espaçamento horizontal (s_h) foi mantido igual a 1,5m. Os grampos eram compostos por uma barra de aço com diâmetro $\phi_{aço} = 25mm$ e calda de cimento injetada em furos com diâmetro $\phi_{furo} = 75mm$. Todos os grampos foram inclinados de $\alpha = 10^\circ$ com a horizontal.

Em cada etapa da escavação do talude, os grampos eram introduzidos simultaneamente com a consideração de uma parede de concreto com espessura de 100mm.

Os parâmetros geomecânicos dos materiais envolvidos nas simulações estão descritos na Tabela 1.

Vale ressaltar que todos os parâmetros geométricos e geomecânicos adotados neste trabalho foram selecionados a partir de casos de obra observados na literatura (Springer, 2001).

Tabela 1. Parâmetros considerados nas análises.

MATERIAL	PARÂMETRO	VALOR
Grampo	$\sigma_{aço}$	500MPa
	$E_{aço}$	205GPa
	$G_{injeção}$	9GPa
	q_s	150kPa
Parede	E_{parede}	24GPa
	E_{solo}	45MPa
Solo	ν	0,25
	γ	18,5kN/m ³
	c'	10kPa
	ϕ'	32°
	ψ	7,5°
	k_0	0,5

Nota: $\sigma_{aço}$ = tensão de escoamento do aço, E = módulo de Young, G = Módulo cisalhante, q_s = resistência ao arrancamento do grampo, ν = coeficiente de Poisson, γ = peso específico natural, c' = coesão efetiva, ϕ' = ângulo de atrito, ψ = ângulo de dilatância, k_0 = coeficiente de empuxo no repouso.

4 RESULTADOS OBTIDOS

As análises tiveram como principal objetivo avaliar o comportamento tensão-deformação de um talude escavado com solo grampeado. Foram consideradas as duas alternativas de introdução do grampo na malha (com extremidade livre ou fixa), sendo que a escolha depende do processo construtivo no campo. No caso de obras com a extremidade do grampo embutida ou dobrada (Figuras 1a e 1b), é possível haver um puncionamento do grampo em relação à face da escavação. Seria, portanto, recomendável simular o grampo como livre.

Entretanto, quando a extremidade é fixada por placa metálica e porca (Figura 1c), considera-se

mais apropriado introduzir o grampo na malha solidarizando-o à parede da face (grampo fixo).

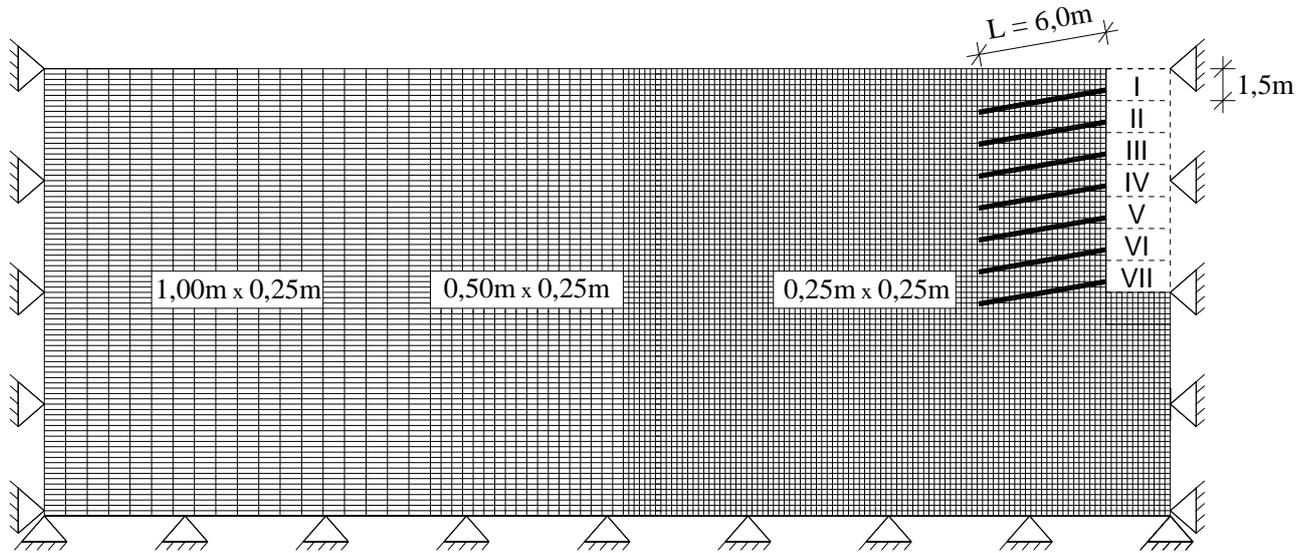


Figura 3. Geometria e malha adotadas nas análises.

A Figura 4 mostra os perfis de deslocamentos horizontais a uma distância de 1,75m da face do talude, para o caso de grampos livres e fixos. Os resultados referem-se a diferentes etapas da escavação, uma vez que a razão entre comprimento do grampo ($L = 6\text{m}$) e altura do talude (H) varia de 1,00 a 0,57, correspondendo, respectivamente, a alturas de 6,0m a 10,5m. O perfil de deslocamentos na face do talude escavado é semelhante ao apresentado na Figura 4, isto é, os deslocamentos apresentam a mesma ordem de grandeza. Ocorre, entretanto, um ligeiro aumento junto à base da escavação, devido a uma maior concentração de tensões cisalhantes nesta região.

Para valores de L/H superiores a 0,67 (isto é, $H < 9\text{m}$), nota-se que os resultados independem da forma de introdução do grampo. Já para razões $L/H < 0,67$ (ou seja, $H > 9\text{m}$), os deslocamentos horizontais são maiores quando o grampo tem ambas as extremidades livres. Este comportamento é atribuído à ocorrência de um deslocamento relativo entre a extremidade do grampo e a face da escavação, gerando uma condição de puncionamento do grampo.

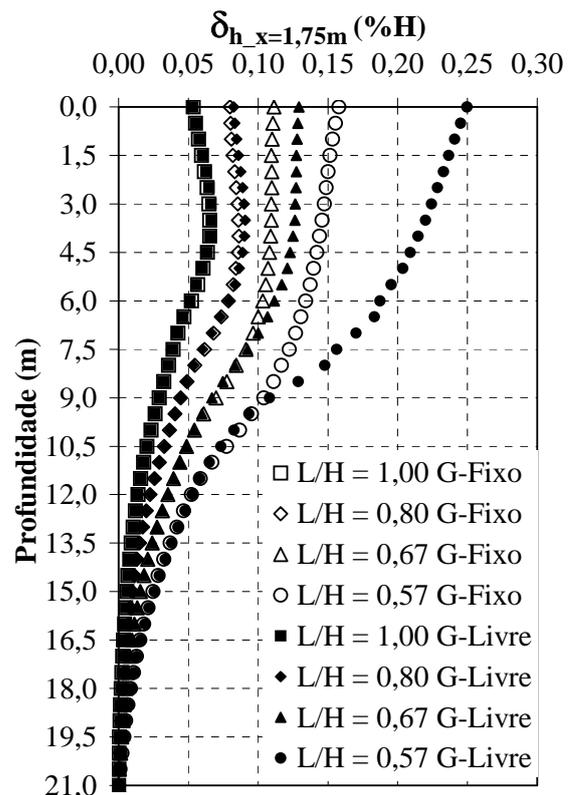


Figura 4. Comparação entre os deslocamentos horizontais a uma distância de 1,75m da face de escavação, considerando grampo livre ou fixo.

Para grampos livres, a face do talude escavado desloca-se mais livremente, atingindo um valor máximo de 0,25% H (ou seja, 26mm). Este valor é inferior aos deslocamentos máximos relatados na literatura (Clouterre, 1991).

A Figura 5 mostra os deslocamentos verticais observados na superfície do terreno. Da mesma forma do que foi observado anteriormente, a influência do tipo de fixação do grampo afeta

exclusivamente taludes escavados com altura superior a 9m. Para menores alturas, a superfície do terreno apresenta uma ligeira expansão, cuja magnitude pode ser considerada desprezível (< 2,4mm). Para razões $L/H < 0,67$ (ou seja, $H > 9m$), a magnitude dos deslocamentos atinge valores da ordem de 0,08% H, que são também inferiores à margem relatada na literatura (Clouterre, 1991)

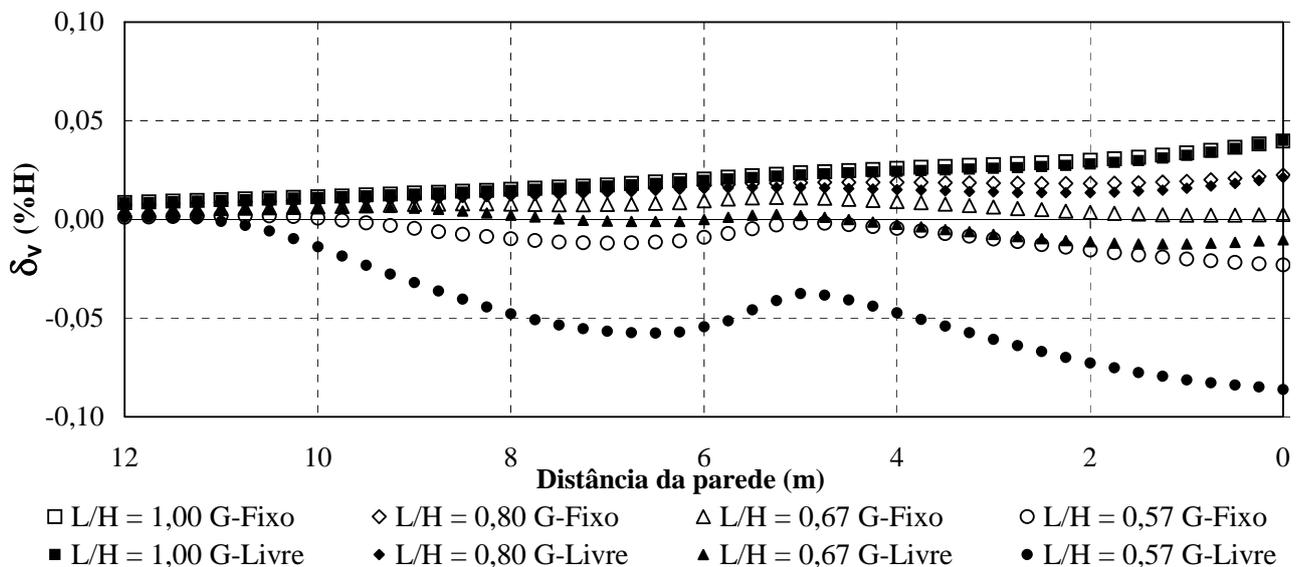


Figura 5. Comparação entre os deslocamentos verticais da superfície do terreno obtidos para simulações com grampos livres e fixos.

Observa-se, ainda, na Figura 5, uma distribuição de deslocamentos verticais variável em função da distância à face do talude, em particular no intervalo entre 4 e 6m. Como os grampos possuem 6m de comprimento e estão inclinados de $\alpha = 10^\circ$ com a horizontal, este intervalo corresponde aproximadamente ao limite entre a região reforçada com grampos e a região não reforçada. Na região junto à face do talude escavado, o solo reforçado deforma-se como um monólito em direção à face, fazendo com que a região posterior sofra um recalque adicional.

A comparação entre as Figuras 6a e 6b, quanto aos esforços transmitidos aos grampos, mostra que o ponto de força axial máxima varia significativamente em função da forma de fixação do grampo. No caso de grampo fixo (Figura 6b), os maiores esforços ocorrem junto à face. Em contraste, com o grampo

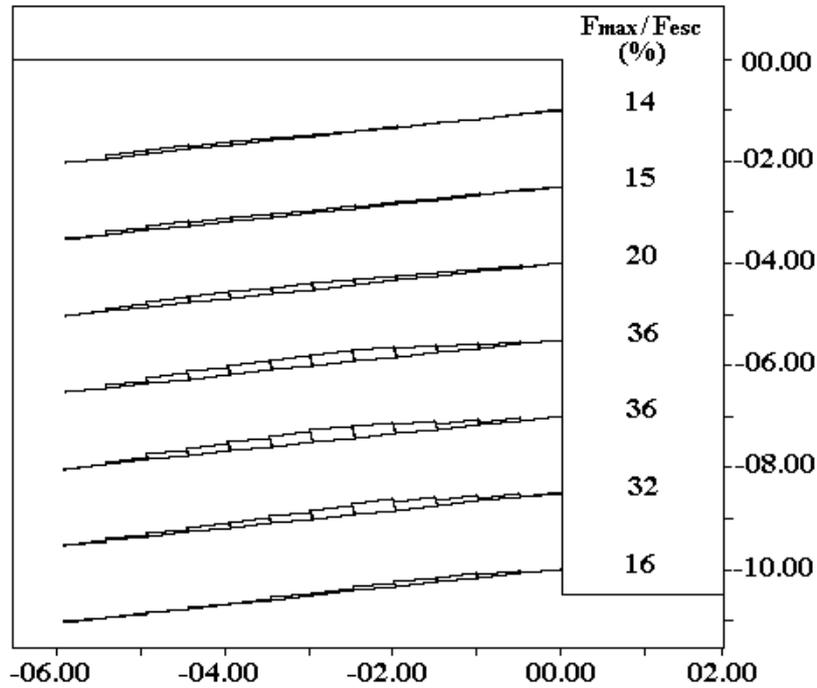
deslocando-se livremente, o ponto de força axial máxima é mais interno (Figura 6a). Com isto, o mecanismo de ruptura baseado na existência de duas regiões, ativa e passiva, só ocorre em estruturas grampeadas quando o método executivo permite o deslocamento relativo entre o grampo e a face do talude.

Adicionalmente, observa-se que o tipo de fixação dos grampos interfere não só na forma da distribuição dos esforços, mas também na intensidade de mobilização do grampo. Quando o deslocamento do grampo é mantido igual ao deslocamento da face da escavação, os grampos inferiores são os mais solicitados. Por outro lado, quando o grampo está solto, a mobilização ocorre aproximadamente à meia altura do talude da escavação.

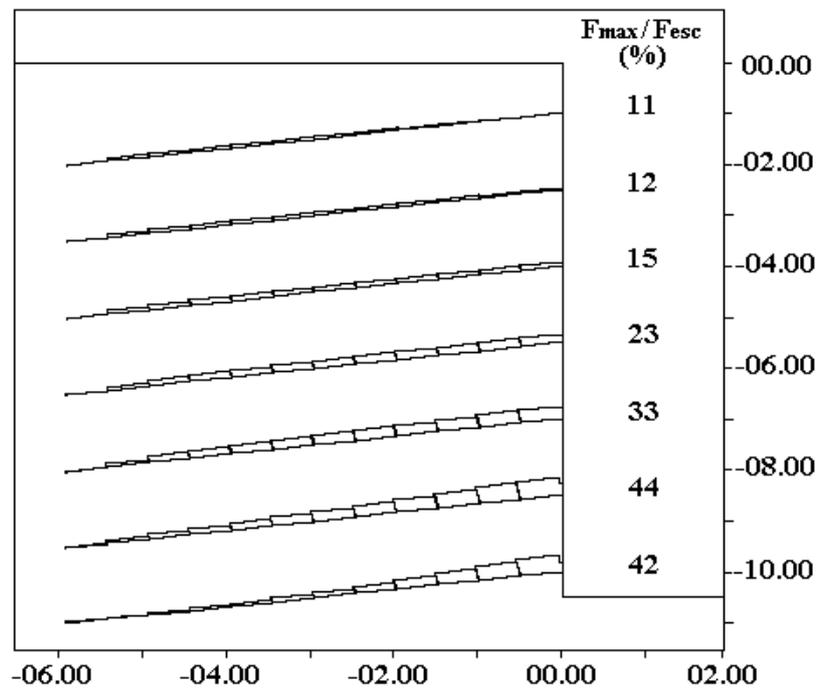
Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que, a cada estágio de escavação, maiores incrementos de deslocamento horizontal são observados junto à base do corte.

Os resultados indicam que os grampos mais próximos à superfície contribuem menos na contenção do solo do que os grampos inferiores. As forças axiais máximas desenvolvidas nos grampos inferiores são inicialmente pequenas,

porém crescem rapidamente nos estágios subsequentes da escavação, contribuindo significativamente na estabilidade (Springer, 2001).



a) Grampo Livre



b) Grampo Fixo

Nota: F_{max} = força axial máxima em cada grampo ; F_{esc} = força de escoamento da barra de aço.

Figura 6. Distribuição das forças axiais ao longo dos grampos para $H = 10,5m$ ($L/H = 0,57$).

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os resultados da modelagem numérica com o programa FLAC de um talude escavado com face vertical em terreno horizontal e estabilizado com grampos. As análises mostram que um dos fatores mais importantes para o comportamento do talude grampeado refere-se às alternativas de execução com grampo fixo ou livre, em relação à face escavada. Os deslocamentos previstos para a massa de solo grampeado dependem claramente da razão L/H (comprimento do grampo / altura do talude). Para as maiores alturas (ou seja, $L/H < 0,67$), os deslocamentos horizontais e verticais da massa grampeada são menores quando os grampos são fixados à face. Para maiores valores de L/H, o processo construtivo (grampo fixo ou livre) não tem influência significativa nos deslocamentos da massa grampeada.

A análise das tensões nos grampos mostra que o ponto de tração máxima varia em função da forma de fixação do grampo. No caso de grampo fixo, o ponto de tração máxima ocorre junto à face. No caso de grampo livre, a tração máxima verifica-se em um ponto mais interno. Nota-se ainda que o mecanismo de ruptura com o desenvolvimento de regiões ativa e passiva somente ocorre quando os grampos são livres em relação à face do talude escavado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPERJ (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) pelo auxílio financeiro. Os autores agradecem também ao eng. Hélio Brito (GeoRio) e J. A. R. Ortigão (UFRJ) pelas informações e apoio ao trabalho.

REFERÊNCIAS

Cartier, G. & Gigan J. P. (1983). Experiments and Observations on Soil Nailing Structures, *Proceedings of the 8th European Conf. on S.M.F.E.*, Helsinki, Vol. 2, p. 473-476.

- Clouterre (1991). *Recommandations Projet National Clouterre*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ENPC, Paris, 269 p.
- GÄSSLER, G. & GUDEHUS, G. (1981). Soil Nailing – Some Aspects of a New Technique, *Proc. 10th Int. Conf. S.M.F.E.*, Stockholm, Vol. 3, Session 12, p. 665-670.
- GeoRio (1999). *Manual Técnico de Encostas: Vol. IV - Ancoragens e Grampos*, Fundação GeoRio; Editores: J.A.R. Ortigão e A.S.F.J Sayão, 184p.
- Guilloux, A., Notte G. & Schlosser, F. (1982). Soil Nailing: Practical Applications, *Symp. on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, p.389-397.
- Itasca (1996). *FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 3.3, User Manual*, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
- Mitchell, J. K. & Villet, W. C. B. (1987). *Reinforcement of Earth Slopes and Embankments*, NCHRP Report 290, USA Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- Ortigão, J. A. R., Palmeira, E. M. & Zirlis, A. (1995). Experience with Soil Nailing in Brazil: 1970-1994, *Proc. of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, London, Vol. 113, paper 10584, p. 93-106.
- Plumelle, C. (1986). Full Scale Experimental Nailed Soil Retaining Structures, *Revue Française de Geotechnique*, no. 40, p. 45-50.
- Juran, I. & Elias, V. (1987). Soil Nailed Retaining Structures: Analysis of Case Histories, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE Geotech. Special Publication no. 12, N.York, p. 232-244.
- Shen, C. K., Bang, S., Romstad, K. M., Kulchin, L. & DeNatale J. S. (1981). Field Measurements of Earth Support System, *ASCE Journal*, Vol.107, GT12, p.1625-1642.
- Springer, F. O. (2001). *Estudos da Deformabilidade de Escavações com Solo Grampeado*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.