

MODELAGEM NUMÉRICA DE ESCAVAÇÕES GRAMPEADAS

André P. Lima¹; Denise M. S. Gerscovich² & Alberto S. F. J. Sayão³

Resumo: O dimensionamento de estruturas em solo grampeado, em geral, baseia-se na teoria do Equilíbrio Limite, obtendo-se fatores de segurança em superfícies preestabelecidas. Diversos métodos de análise podem ser encontrados na literatura, porém nenhum deles consegue prever deformações no interior da massa grampeada, assim como a redistribuição de esforços nos grampos ao longo das etapas de escavação. A previsão de deformações e forças axiais nos grampos pode ser obtida por modelagem computacional. Com o auxílio do programa FLAC, buscou-se analisar o comportamento tensão-deformação de taludes em solo grampeado. Foi avaliada a influência da inclinação do talude nos deslocamentos horizontais ao longo de uma vertical a 1,0m do topo da escavação e nos deslocamentos verticais na superfície do terreno. Os resultados mostraram que uma pequena inclinação no talude pode acarretar em reduções de até 70% nos deslocamentos finais. Os esforços axiais máximos, mobilizados em cada grampo durante o processo de escavação, serão maiores em taludes mais íngremes.

Abstract: Soil nailing design is usually based on Limit Equilibrium concepts, which provide a factor of safety associated to a potential sliding surface. Several methods are available in the literature, but no one predicts the deformations of the reinforced soil mass or the redistribution of axial forces, which are mobilized along each nail during the excavation process. To access the deformation response of nailed soils, a computer stress-strain model is required. The computer program FLAC was used to analyze the influence of the slope inclination on the horizontal displacements along a vertical line, 1m distant from the excavation top. The vertical displacements of the soil surface have also been analyzed. The results indicated that a small inclination of the slope may provide a very significant reduction of the displacements. It is also shown that the maximum axial force mobilized along nails during the excavation increases with slope inclination.

Palavras-Chave: Solo grampeado, Estabilização de taludes, Modelagem numérica.

INTRODUÇÃO

Solo grampeado é uma técnica de estabilização de taludes naturais ou resultantes de escavações. O reforço do maciço dá-se pela inclusão de grampos semi-rígidos. Os grampos (barras, cantoneiras ou tubos de aço) podem ser executados sub-horizontalmente a partir de um pré-furo, seguido pelo preenchimento do furo com um elemento metálico e material cimentante (grampo injetado) ou por cravação direta do elemento metálico (grampo cravado). No Brasil, a maioria das obras utiliza grampos injetados, uma vez que o processo executivo e os equipamentos de instalação são semelhantes aos utilizados para tirantes. Além disso, grampos injetados apresentam resistência no contato solo-grampo superior à verificada com grampos cravados [1]. À medida que se processa a escavação do talude e instalação dos grampos, o maciço sofre descarregamento lateral. O principal elemento de interação solo-grampo é, portanto, o atrito mobilizado no contato entre os dois materiais. Como as inclusões são solicitadas basicamente à tração, quanto maior for o atrito entre o solo e o grampo, 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 (injetado ou cravado).

A face frontal do talude é usualmente protegida por um revestimento delgado de concreto projetado, armado com tela ou fibras de aço, sem função estrutural. A espessura da parede varia, em geral, entre 60 e 100mm.

O processo executivo do solo grampeado envolve o reforço do solo em etapas sucessivas de escavação e introdução dos grampos (Figura 1). A altura máxima a escavar em cada etapa depende do tipo do solo e da inclinação da face da escavação. Esta face deverá ser estável durante a fase crítica que ocorre entre a escavação, instalação dos grampos e aplicação do revestimento de concreto projetado. Geralmente, a altura de cada etapa de escavação varia entre 1,0m e 2,0m de altura.

Ao final da construção, os valores máximos de deslocamentos vertical e horizontal têm sido observados no topo e são da ordem de 0,1 a 0,5% H, sendo H a altura total do talude [2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8]. Os deslocamentos no topo são

¹ Mestrando; PUC-Rio, R. Marquês de S. Vicente, 225, Rio de Janeiro, RJ. Fax: 21-31141195; aplima@civ.puc-rio.br

² D.Sc., UERJ, R. São Francisco Xavier, 524 / 5018 - A, Rio de Janeiro, RJ. Fax: 21-25877537; deniseg@uerj.br

³ PhD; PUC-Rio, R. Marquês de S. Vicente, 225 / 301-L, Rio de Janeiro, RJ. Fax: 21-31141195; sayao@civ.puc-rio.br

dependentes de diversos fatores, tais como: comprimento dos grampos (L); altura do talude (H); seqüência construtiva (ΔH); ângulo de inclinação da face (β); espaçamento entre grampos (S_v e S_h); inclinação dos grampos (α); tipo de grampo (injetado ou cravado); tipo de solo da escavação.

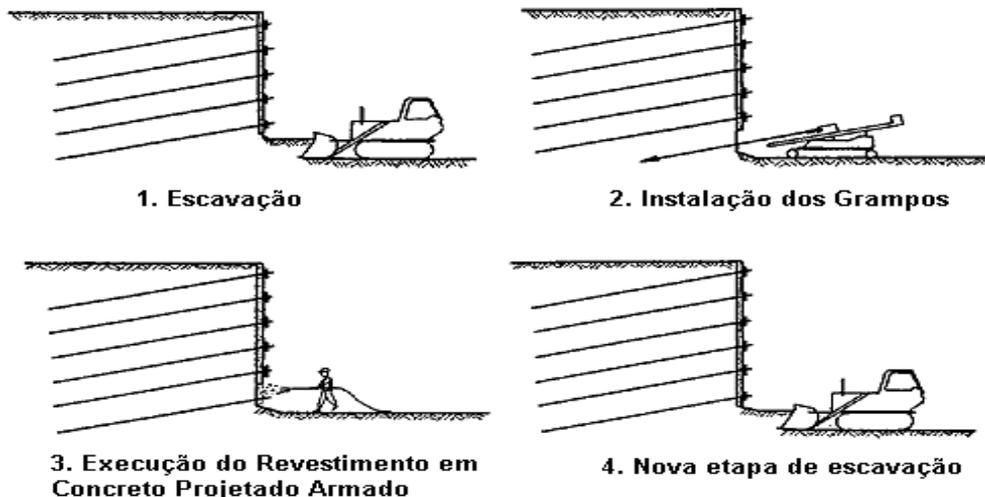


Figura 1. Processo executivo de uma estrutura de solo grampeado [9].

A disposição dos grampos é feita, em geral, em linhas com inclinação entre 5° e 20° , em relação à horizontal. Os espaçamentos horizontal e vertical, entre grampos, costumam variar entre 1,0m e 2,0m podendo ser iguais ou não. O valor de atrito unitário solo-grampo (q_s) deve ser medido através de ensaios de arrancamento, podendo ser estimado por correlações empíricas na fase de projeto.

Na prática, a concepção de projeto de escavações grampeadas baseia-se em análises por equilíbrio limite, obtendo-se fatores de segurança em superfícies de ruptura pré-estabelecidas. A partir de considerações sobre a estabilidade externa e interna, definem-se os espaçamentos vertical e horizontal, diâmetro, comprimento e inclinação do grampo. Diversos métodos de análise estão disponíveis na literatura [5, 10, 11, 12, 13 e 14]. As diferenças entre estas proposições retratam as incertezas quanto ao mecanismo de ruptura do conjunto solo-grampo, assim como quanto à forma da superfície potencial de ruptura e natureza das forças atuantes. Por não prever deformações no interior da massa reforçada, análises por equilíbrio limite não incorporam a redistribuição de esforços nos grampos ao longo das etapas de construção e, portanto, fornecem um fator de segurança global que não reproduz corretamente o comportamento da estrutura.

A previsão das deformações em maciços grampeados torna-se possível a partir da utilização de ferramentas numéricas capazes de simular as seqüências construtivas e incorporar os modelos constitutivos que reproduzem o comportamento dos materiais envolvidos neste tipo de obra [15,16].

Neste trabalho pretende-se dar ênfase à influência da inclinação (β) do talude na previsão do comportamento tensão-deformação de uma obra estabilizada com solo grampeado. Serão comparados os deslocamentos horizontais a 1,0m do topo da escavação, deslocamentos verticais na superfície do terreno e, finalmente, os esforços desenvolvidos nos grampos ao longo das etapas de escavação. As análises serão feitas através do programa computacional FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) [17]. Fatores de segurança globais serão fornecidos, com o auxílio do programa *STABL for Windows* [18], como complemento desta pesquisa.

PROGRAMA FLAC

O programa FLAC é um programa computacional bidimensional codificado em diferenças finitas [15, 17]. Para modelar os materiais geotécnicos, o programa oferece nove opções de modelos constitutivos. Nas análises reportadas no presente trabalho, foi utilizado o modelo Elasto-Plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

A simulação do grampo foi realizada através de elementos unidimensionais que trabalham à tração, não apresentando resistência à flexão. A resistência no contato solo-grampo é definida pelas componentes de adesão e atrito entre o solo e o grampo. Grampos injetados foram introduzidos na malha a partir da identificação das coordenadas de suas extremidades. Desta forma, é possível, ao longo do processo de escavação, haver deslocamento relativo entre o grampo e a malha. A característica 3D do solo grampeado foi transformada em uma condição 2D, através da divisão de alguns parâmetros do grampo (módulo de elasticidade, carga de escoamento, rigidez no contato, etc) pelo espaçamento horizontal entre grampos.

CASOS ESTUDADOS

As análises foram feitas considerando-se a inclinação (β) do talude, igual a 60° , 70° , 80° ou 90° . Em todos os casos, adotou-se grampos de 6m de comprimento e 10,5m de altura máxima de escavação ($L/H = 0,57$). Os estágios de escavação foram realizados a cada 1,5m de altura, constituindo um total de 7 estágios, sendo a largura da base da escavação igual a 3,0m.

Os grampos com 6m de comprimento foram posicionados com espaçamento vertical e horizontal, constante, igual a 1,5m ($s_v = s_h = 1,5m$), sendo que a primeira linha foi introduzida a 1,0m do topo da escavação. Os grampos foram 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 considerados com inclinação $\alpha = 10^\circ$ com a horizontal. Em cada etapa da escavação do talude, os grampos foram introduzidos simultaneamente com a consideração de uma parede de concreto com espessura de 100mm.

A malha adotada nas análises foi constituída de 138 elementos horizontais e 84 elementos verticais (Figura 2). A discretização da malha e as condições de contorno estão também apresentadas nesta figura.

Os parâmetros geomecânicos dos materiais envolvidos nas simulações estão descritos na Tabela 1. Estes parâmetros foram selecionados a partir de casos de obra observados na literatura [19].

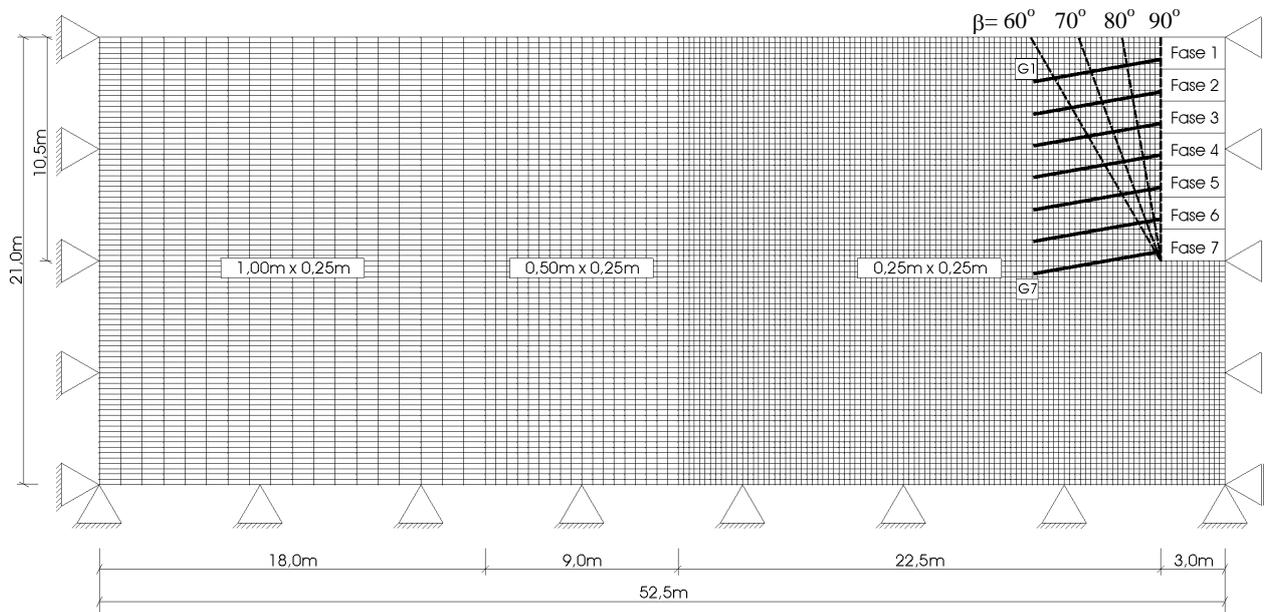


Figura 2. Geometria e malha adotadas nas análises, para diferentes inclinações (β) da face da escavação

Tabela 1. Parâmetros geomecânicos adotados nas análises.

	<i>Parâmetro</i>	<i>Magnitude</i>
Grampo	tensão de escoamento	$\sigma_{esc. aço} = 500 \text{ MPa}$
	módulo de Young	$E_{aço} = 205 \text{ GPa}$
	módulo cisalhante	$G_{injeção} = 205 \text{ GPa}$
	resistência ao arrancamento do grampo	$q_s = 105 \text{ kPa}$
Solo	módulo de Young	$E_{solo} = 45 \text{ MPa}$
	coeficiente de Poisson	$\nu = 0,25$
	peso específico natural	$\gamma = 18,5 \text{ kN/m}^3$
	coesão efetiva	$c' = 10 \text{ kPa}$
	ângulo de atrito efetivo	$\phi' = 32^\circ$
	ângulo de dilatância	$\psi = 7,5^\circ$
Parede	coeficiente de empuxo no repouso	$k_o = 0,50$
	módulo de Young	$E_{parede} = 24 \text{ GPa}$

RESULTADOS OBTIDOS

O objetivo das análises foi avaliar a influência da inclinação do talude no comportamento tensão-deformação do maciço, assim como, o desenvolvimento dos esforços axiais nos grampos ao longo das sucessivas etapas de escavação.

Deslocamentos horizontais (%H) ao longo de uma linha vertical, distante 1,0m do topo do talude, estão plotados em função da profundidade da malha, na última etapa de escavação, $L/H=0,57$ (Figura 3). Deve-se ressaltar que no caso dos taludes de inclinação $\beta=60^\circ$, 70° e 80° , os deslocamentos horizontais a grandes profundidades correspondem a pontos relativamente distantes da parede. Já no caso do talude de face vertical, $\beta=90^\circ$, estes deslocamentos correspondem a pontos distantes 1,0m da parede de concreto projetado, independente da profundidade em questão.

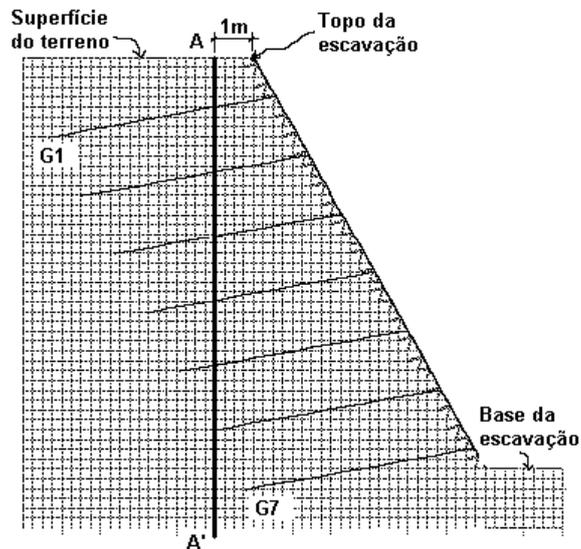


Figura 3. Vertical AA' adotada para obtenção dos deslocamentos horizontais.

Fatores de segurança globais foram calculados, com o auxílio do programa *STABL for Windows* [18], pelo Método de Bishop simplificado, admitindo-se superfícies de ruptura circulares. Os resultados, mostrados na Tabela 2, demonstram que, independente da inclinação β , seria necessária a adoção de uma solução de estabilização, já que em todos os casos o $FS < 1,0$. Com a inserção dos grampos (6m de comprimento, 1,5m de espaçamento), observa-se um incremento de cerca de 40% em FS. Entretanto, para o caso de face vertical, esta solução ainda resultaria numa condição de estabilidade não aceitável.

Tabela 2. Fatores de segurança do talude da escavação, com e sem a consideração dos grampos.

Inclinação	Fator de Segurança (Método de Bishop Simplificado)	
	Sem Grampo (FS_{SG})	Com Grampo (FS_{CG})
$\beta = 60^\circ$	0,96	1,58
$\beta = 70^\circ$	0,80	1,47
$\beta = 80^\circ$	0,66	1,22
$\beta = 90^\circ$	0,57	1,05

A Figura 4 apresenta os perfis de deslocamentos horizontais em uma vertical a 1,0m de distância do topo da parede, ao final da escavação ($L/H=0,57$). Os resultados mostram a influência significativa da inclinação da face nos deslocamentos horizontais, os quais crescem de magnitude à medida que a face torna-se mais íngreme. Adicionalmente, a forma dos deslocamentos também é afetada; deslocamentos máximos no topo da escavação só são observados em taludes verticais ($\beta=90^\circ$). Instrumentação de campo em obras de solo grampeado confirmam esta observação [20, 21, 22 e 23]. A execução de escavações com taludes ligeiramente inclinados reduz significativamente a magnitude dos deslocamentos no topo. No caso estudado, esta redução chega a 75% quando se passa de uma escavação vertical para uma inclinação de 80° . Para pontos abaixo da base da escavação, a inclinação da face afeta pouco os deslocamentos horizontais.

Observando-se os vetores de deslocamentos gerados pelo FLAC (Figura 5), para a última etapa de escavação ($L/H = 0,57$), nota-se um comportamento diferente com relação à forma dos deslocamentos, no caso de taludes verticais. A maior magnitude dos vetores, assim como a aparente formação de uma região potencial de ruptura está em concordância com os resultados obtidos nas análises por equilíbrio limite. A introdução do reforço, com as características geométricas adotadas neste trabalho, é insuficiente para estabilizar a massa de solo, conforme indicam os valores de fatores de segurança sem grampo (FS_{SG}) e com grampos (FS_{CG}).

A Figura 6 mostra os deslocamentos verticais na superfície do terreno, em função da distância da parede vertical correspondendo ao ponto situado no topo da escavação. A magnitude destes deslocamentos é diretamente proporcional à observada em termos de deslocamentos horizontal. Os valores de recalque superficial independem de β a partir de uma distância de aproximadamente $2H$ do topo da parede vertical. A partir desta posição, os recalques superficiais já não são tão expressivos, sofrem influência reduzida da inclinação β .

Com relação ao levantamento de fundo, a Figura 7 mostra que a partir da distância de 0,5m da base da escavação, os de deslocamentos verticais, independente da inclinação do talude, são aproximadamente constantes e variam entre $0,23\%H$ e $0,30\%H$. De um modo geral, observou-se um processo de elevação de fundo pouco sensível à inclinação da parede. Em pontos próximos à base da escavação, valores mais elevados foram relatados em taludes verticais. A possível configuração de ruptura destes taludes podem explicar este comportamento distinto.

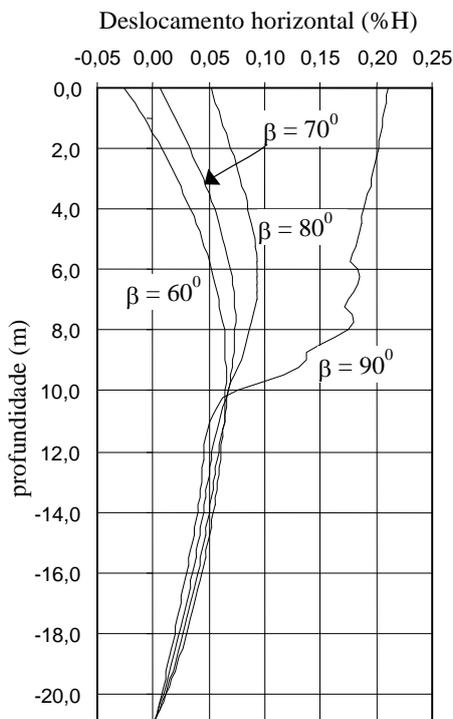


Figura 4. Perfil de deslocamentos horizontais na vertical AA'.

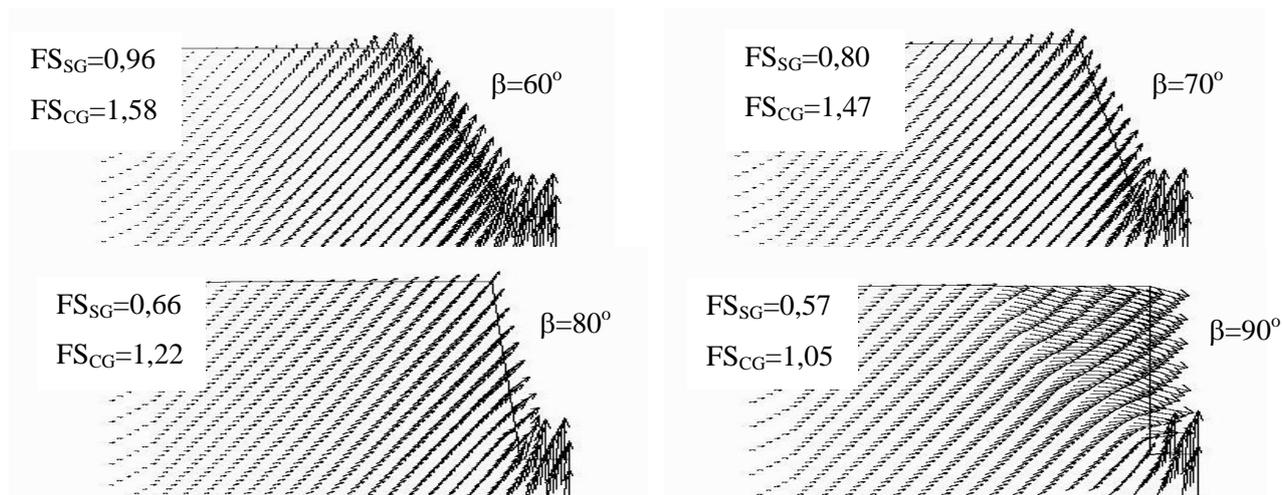


Figura 5. Vetores de deslocamentos e fatores de segurança para taludes com $H = 10,5m$ ($L/H=0,57$).

A comparação entre os esforços máximos de tração ($F_{m\acute{a}x.}$) na última fase de escavação ($L/H=0,57$) para os diversos grampos, é ilustrada na Figura 8. Os resultados indicam que os grampos mais próximos à superfície contribuem menos na contenção do solo do que os inferiores. O esforços axiais máximos serão tão maiores quanto maior for a inclinação do talude. Para os casos estudados o grampo mais solicitado em taludes verticais localiza-se a 7,5m de profundidade (grampo n.º.5), enquanto que, em inclinações de 60° e 70° , o grampo mais solicitado localiza-se a 9,0m de profundidade (grampo n.º.6).

Um estudo comparativo dos valores de força axial máxima na primeira linha de grampos, localizada a 1,0m profundidade, para diferentes etapas de escavação, está mostrado na Figura 9. Os resultados indicam um ligeiro aumento na magnitude dos esforços de tração à medida que segue-se com o processo de escavação; isto é, com a redução da relação L/H. Para profundidades de escavação acima de 6m (L/H=1,0), a mobilização da primeira linha de grampos é acentuada, em particular, em inclinações do talude de 80° e 90°. Em compensação, em taludes com 60° e 70° de inclinação, os esforços nos grampos praticamente se mantém praticamente constantes ao longo do processo de escavação obtendo-se valores máximos em L/H=4,0 e L/H=0,57, respectivamente.

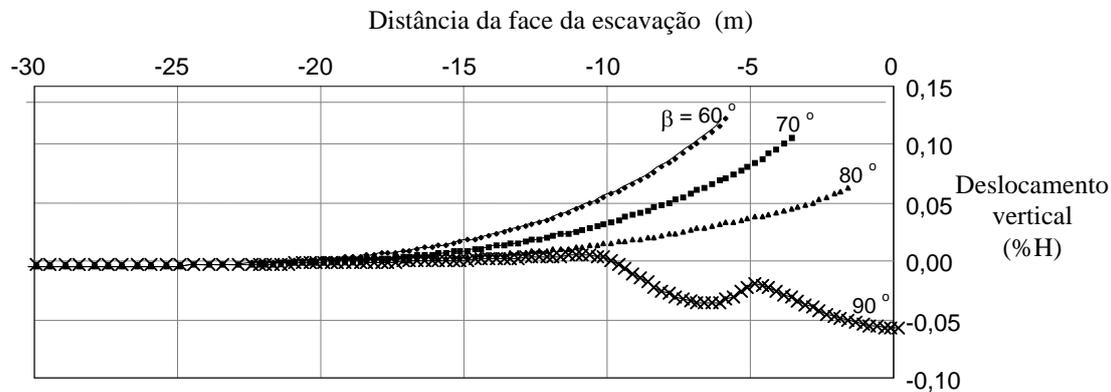


Figura 6. Deslocamentos verticais no topo da escavação para diversos valores de β .

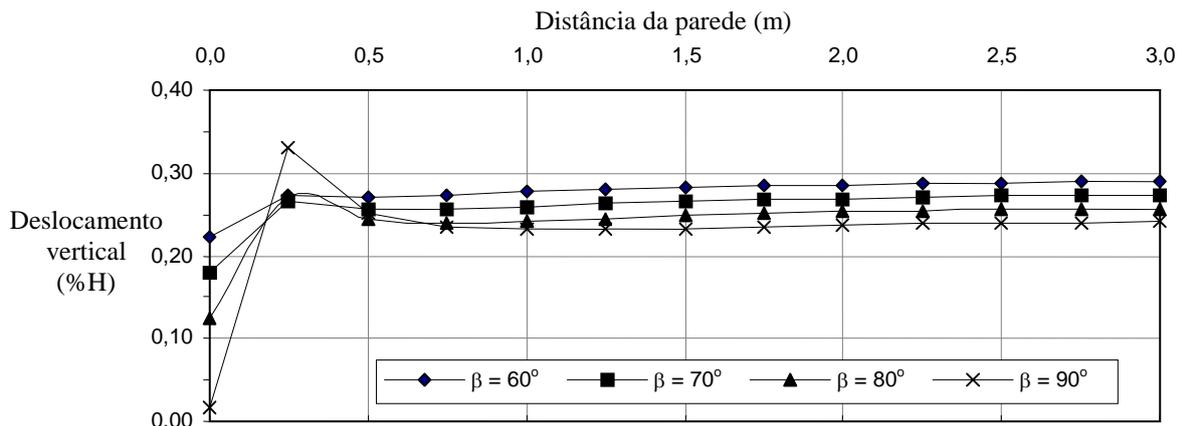


Figura 7. Deslocamentos verticais no fundo da escavação para diversos valores de β .

CONCLUSÕES

O trabalho apresenta os resultados da modelagem numérica de uma escavação com solo grampeado, utilizando o programa computacional FLAC. Neste estudo variou-se a inclinação β da escavação e observou-se sua influência nos deslocamentos horizontal e vertical e no desenvolvimento dos esforços axiais nos grampos. As análises mostram que, em taludes verticais ($\beta=90^\circ$), os deslocamentos horizontais são máximos em pontos próximos ao topo da escavação. Com a redução do valor de β , o ponto de deslocamento horizontal máximo move-se em direção ao fundo da escavação e a magnitude destes deslocamentos reduz-se. Esta redução é mais significativa quando se compara os resultados referentes a um talude vertical com os de um talude com $\beta=80^\circ$.

Os valores de deslocamento vertical na superfície do terreno variam em função do valor de β , para pontos situados a uma distância inferior a 1,5 H da borda da escavação. Observou-se ainda um processo de elevação do fundo da escavação, com magnitude pouco sensível à inclinação β .

Com relação aos esforços nos grampos, quanto mais inclinado for o talude da escavação, maior é a força de tração mobilizada em cada grampo. Esta força torna-se mais acentuada quando a escavação atinge uma profundidade superior ao comprimento do grampo (ou seja, $L/H < 1,0$), independente do valor de β .

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que uma suavização moderada do talude da escavação (por exemplo, de 90° para 80°), acarreta benefícios significativos, em termos de redução dos deslocamentos na superfície do terreno e de aumento da segurança da escavação grampeada.

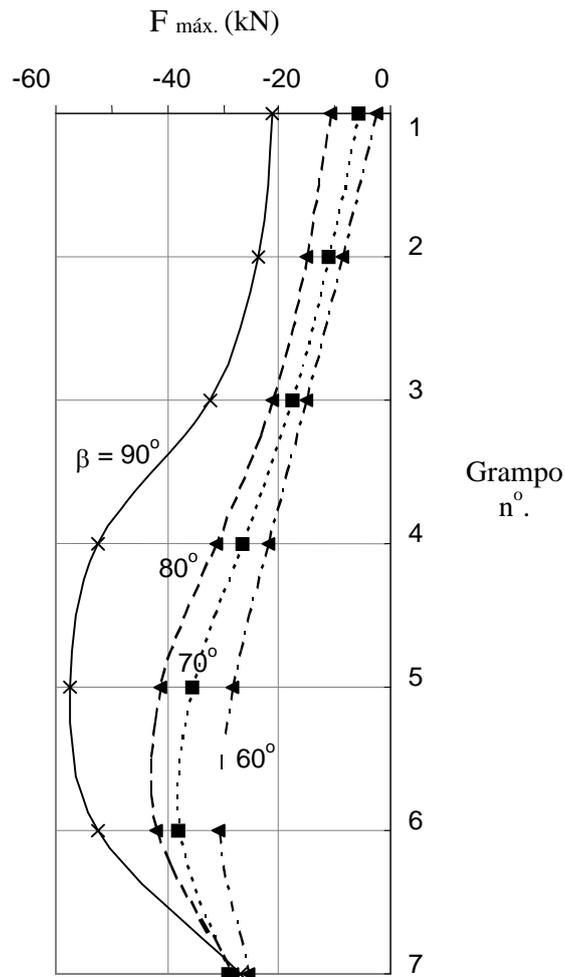


Figura 8. Esforços de tração máximos nos grampos na última fase de escavação ($H = 10,5\text{m}$; $L/H=0,57$).

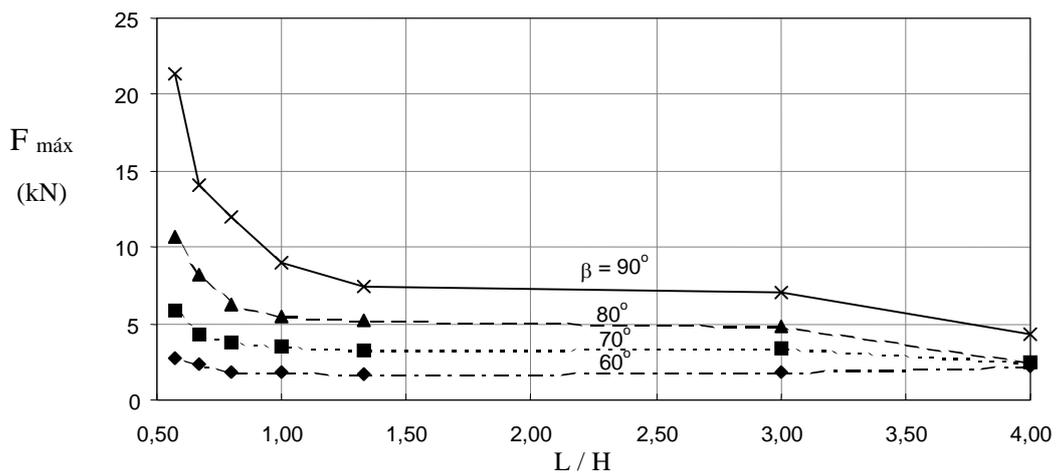


Figura 9. Esforços axiais máximos na linha de grampos n.º 1 ($z = 1,50\text{m}$), para diversas etapas de escavação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo auxílio financeiro proporcionado pelas bolsas de mestrado e de pesquisa. Os autores agradecem também à Eng^a Fernanda Springer (PUC-Rio) e ao Prof. J.A.R. Ortigão (UFRJ) pelas contribuições e sugestões durante todo o estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Springer F.O.; Gerscovich, D.M.S. & Sayão, A.S.F.J. (2001). **Deformabilidade de taludes com solo grampeado**, 3ª COBRAE, Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, Rio de Janeiro, pp. 483-490.
- [2] Guilloux, A., Notte G. & Schlosser, F. (1982). **Soil Nailing: Practical Applications**, Symp. on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, p.389-397.
- [3] 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.
- [4] Gässler, G. & Gudehus, G. (1981). **Soil Nailing – Some Aspects of a New Technique**, Proc. 10th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol. 3, Session 12, p. 665-670.
- [5] Shen, C.K., Bang, S., Romstad, K.M., Kulchin, L. & DeNatale J.S. (1981). **Field Measurements of Earth Support System**, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 107, No. 12, pp. 1625-1642.
- [6] Plumelle, C. (1986). **Full Scale Experimental Nailed Soil Retaining Structures**, Revue Française de Géotechnique, no. 40, p. 45-50.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Clouterre (1991). **Recomendations Projet National Clouterre**, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ENPC, Paris, 269 p.
- [10] Stocker, M.F.; Korber, G.W.; Gassler, G. & Gudehus, G. (1979). **Soil nailing: Cloutage du sol**, Proceedings of the International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques, Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, France, vol.2, pp. 469-474.
- [11] Schlosser, F. (1983). **Analogies et différences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en terre armée et par clouage du sol**, Annales de L'Institut Technique de Batiment et des Travaux Publics, n° 418, 473p., Sols et Foundations 184, pp. 8-23;
- [12] Juran, I.; Baudrand, G.; Farag, K. & Elias, V. (1988). **Kinematical limit analysis approach for the design of nailed soil retaining structures**, International Geotechnical Symposium on Theory and Practice of Earth Reinforcement. Fukuoka Japan, pp. 301-306.
- [13] Bridle, R.J. (1989). **Soil nailing – analysis and design**, Ground Engineering, September, pp. 52-56.
- [14] Anthoine, A. (1990). **Une méthode pour le dimensionnement à la rupture des ouvrages en sols renforcés**, Revue Française de Géotechnique, (50), pp.5-17.
- [15] Springer F.O.; Gerscovich, D.M.S. & Sayão, A.S.F.J., Lima, A.P. & Ortigão, J.A.R. (2001). **Uso do programa FLAC para modelagem numérica de estruturas grampeadas**, IV Encontro sobre Modelagem Computacional, IPRJ-UERJ, Nova Friburgo, R.J., pp. 240-250.
- [16] Gerscovich, D.M.S., Springer F.O., Sayão, A.S.F.J. & Lima, A.P. (2002). **Deformabilidade de escavações com solo pregado**, 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, Portugal, vol. 3, pp. 1579-1588
- [17] Itasca (1996). **FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)**, Version 3.3, User's Manual, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.
- [18] Purdue University (2000). **STABL for Windows**, Version 1.14, User's Manual, Geotechnical Software Solutions, LLC, USA.
- [19] Springer, F.O. (2001). **Estudos da Deformabilidade de Escavações com Solo Grampeado**, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.
- [20] Cardoso, A.S. & Carreto, A.P. (1989). **Performance and analysis of a nailed excavation**, Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2, Rio de Janeiro, August, 1989.
- [21] Barley, A.D. (1993). **Soil nailing case histories and developments**, Retaining Structures, Thomas Telford, London, U.K.
- [22] Unterreiner, P.; Schlosser F. & Benhamida B. (1995). **Calculation of the displacements of a full scale experimental soil nailed wall – French National Research Project Clouterre**, The Practice of Soil Reinforcing in Europe, I.G.S., London, U.K.
- [23] Shiu, Y.K.; Yung, P.C.Y. & Wong, C.K. (1997). **Design, construction and performance of a soil nailed excavation in Hong Kong**, XIV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, vol.2, pp.1339-1342, Hamburg.