



27 a 31 de Maio de 2002 – Universidade de Brasília – UnB
Brasília, DF – Brasil

Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural

Modelagem Numérica de Estruturas de Contenção com Solo Grampeado

André Pereira Lima

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil

Fernanda Otto Springer

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil

Alberto S. F. J. Sayão

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Brasil

Denise Maria Soares Gerscovich

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Brasil

Alberto Ortigão

Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Brasil

RESUMO

A utilização de inclusões passivas para reforços de solos, técnica comumente conhecida como solo grampeado, vem tendo aceitação crescente junto a profissionais de engenharia civil. Os grampos são inclusões rígidas, instaladas subhorizontalmente, sem tensão ou trecho livre. As forças axiais nos grampos são obtidas através da descompressão lateral causada pela escavação do solo. O grampeamento é feito na massa de solo à medida que escavações são executadas em etapas, obtendo-se uma zona reforçada que atua como suporte da massa de solo posterior, sem reforço. A face frontal da escavação é usualmente protegida por concreto projetado, sem funções estruturais. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados da modelagem numérica de uma escavação, em diferentes estágios, com face vertical e superfície do terreno horizontal, estabilizada com grampos injetados. Particular atenção foi dada à influência da escavação no desenvolvimento de esforços axiais nos grampos. As análises feitas indicam, em grampos injetados, que os esforços axiais desenvolvidos nos grampos são maiores nos grampos mais distantes à superfície do terreno.

1. INTRODUÇÃO

O solo grampeado ou solo pregado é uma técnica de reforço de solos na qual o reforço do maciço é obtido através de inclusões passivas semi-rígidas, denominadas grampos ou pregos. Estes elementos devem resistir a tensões de tração, esforços cortantes e momentos de flexão.

Os grampos são introduzidos no maciço por cravação direta de elementos metálicos (grampo cravado) ou através de pré-furo, seguido pela introdução da barra metálica e preenchimento do furo (grampo injetado). No caso do grampo injetado, concluída a perfuração, segue-se a instalação e fixação dos elementos de reforços (barras de aço), posicionadas com auxílio de centralizadores. Em seguida preenche-se o furo com fluido cimentante. Este último tipo de instalação é a mais comum no Brasil, conforme reportado no manual da Fundação GeoRio [1].

A extremidade externa do elemento metálico pode ser rosqueada, recebendo uma placa metálica e porca, ou ser dobrada a 90 graus. No primeiro tipo (Figura 1a), a porca e placa de apoio permitem a aplicação de uma pequena carga de incorporação, que serve para garantir contato solo-concreto projetado, precaução importante no caso de muros com paramento vertical. O segundo tipo (Figura 1b) é mais empregado em taludes inclinados e em grampos de diâmetro até 20 mm.

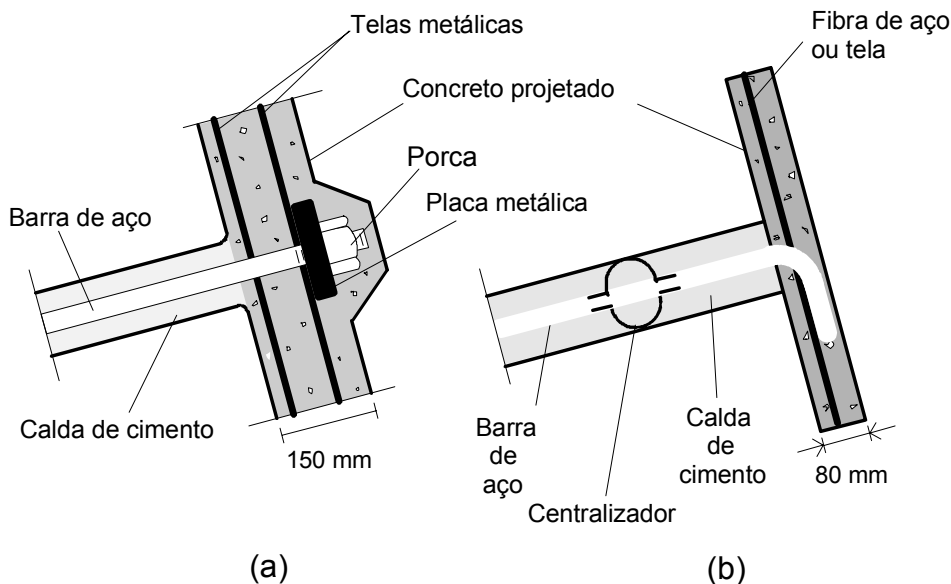


Figura 1 - Cabeças dos grampos: (a) ϕ aço > 20 mm; (b) ϕ aço < 20 mm; [2]

O principal elemento de interação dos grampos está relacionado à mobilização do atrito existente entre a superfície dos mesmos e o solo circundante. Como as inclusões trabalham basicamente à tração, quanto maior 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 obtida com grampos cravados. Para que o atrito na interface seja mobilizado é necessário que haja pequenos deslocamentos (de apenas alguns milímetros) entre o grampo e o material do maciço.

A quantificação da resistência solo-grampo deve ser obtida através de ensaios de arrancamento, executados no campo. Em obras de grande porte os ensaios de arrancamento são realizados antes da obra para se estabelecer o valor unitário da resistência solo-grampo (q_s) a ser adotada no projeto. Em obras menores, isso raramente ocorre. Nestes casos, os ensaios são realizados durante a obra e o projeto é ajustado à medida que se obtêm resultados desses ensaios. Recomenda-se que sejam efetuados ensaios de arrancamento, na quantidade mínima de um por fileira de reforços e a cada mudança de material constituinte do terreno.

Muros de solo grampeado têm sido empregados tanto em taludes naturais ou previamente escavados, em que as condições de estabilidade não são satisfatórias, quanto em escavações. No caso de cortes, o grampeamento é realizado à medida que a escavação é executada, trabalhando-se do topo em direção ao pé do talude, obtendo-se uma zona de solo reforçado que funciona como suporte do material atrás sem reforço. A altura máxima de cada etapa de escavação depende do tipo de terreno e da inclinação da face de escavação. Se o material da região escavada for estável, os grampos são imediatamente instalados. Caso contrário, pode-se aplicar uma fina camada de concreto projetado, a fim de evitar que a parede sofra deslocamentos inadmissíveis. A Figura 2 demonstra as fases de execução da técnica do solo grampeado.

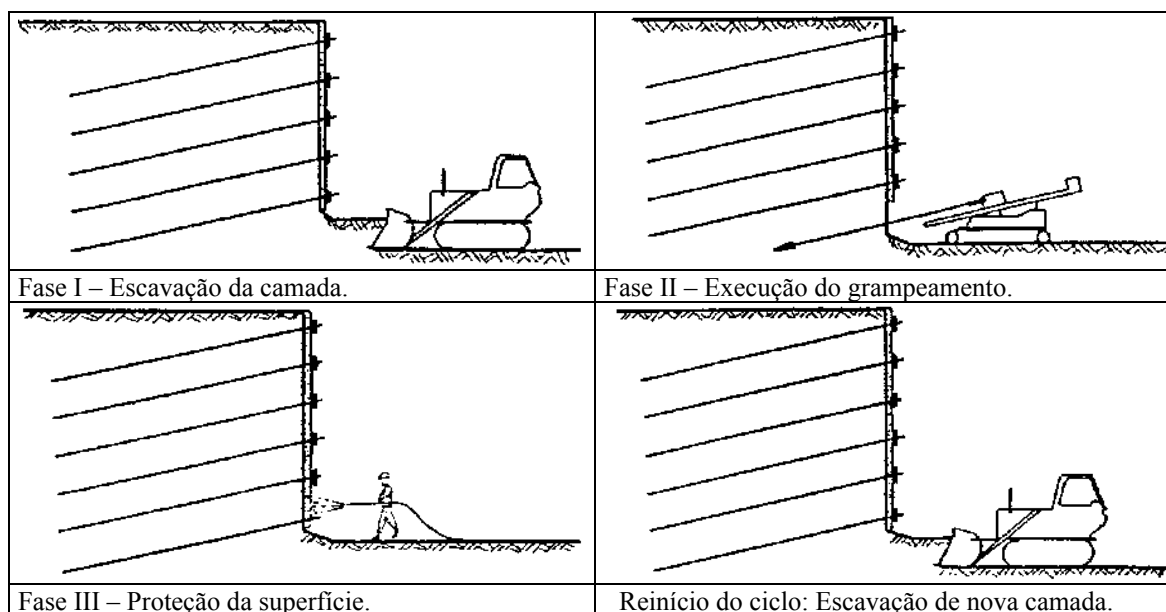


Figura 2 - Ciclo construtivo de muros de solo grampeado [3].

A escolha do comprimento do grampo (L), ângulo de instalação (α) e dos espaçamentos vertical (S_v) e horizontal (S_h) entre grampos, depende de alguns fatores tais como: altura (H) e ângulo de inclinação da face; tipo de grampo (injetado ou cravado), quantidade de grampos; resistência mobilizada no contato solo/grampo (q_s) e variáveis ambientais que eventualmente venham a alterar características mecânicas do grampo.

A técnica de solo grampeado possui restrições quanto a possibilidade de existência de água no terreno. Nestas circunstâncias procedimentos especiais devem ser adotados para prevenir o contato entre o grampo e a água e o desenvolvimento de poro-pressões.

Durante as escavações sucessivas, o solo que forma o muro de solo grampeado é sujeito a descompressão lateral. Ao final da construção, em geral, os valores máximos de deslocamentos vertical e horizontal ocorrem no topo, sendo esperados valores da ordem de $0,1\%H$ até $0,5\%H$, sendo H a profundidade total de escavação [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12]. A magnitude desses deslocamentos depende de fatores, tais como: seqüência construtiva; profundidade da escavação; espaçamento entre grampos; comprimento dos grampos; fator de segurança global do muro; razão entre o comprimento do grampo/altura do muro; inclinação dos grampos; capacidade de suporte do solo de fundação.

Não há uma metodologia padrão e bem definida para dimensionamento de uma estrutura em solo grampeado. Nos vários trabalhos publicados na literatura [7, 13, 14, 15, 16 e 17] vêem-se enfoques conceituais diferentes quanto aos mecanismos de ruptura. Em geral, os métodos baseiam-se na análise por equilíbrio limite, não considerando as condições de deformabilidade da estrutura, assim como a distribuição dos esforços transmitidos aos grampos.

Maiores detalhes sobre os métodos de dimensionamento podem ser vistos em [2 e 18]. Em todos os casos, o terreno atrás do muro é subdividido em uma zona ativa, limitada por uma superfície potencial de deslizamento, sendo o restante considerado zona passiva (Figura 3). Os termos ativo e passivo, ao contrário do preconizado na teoria de empuxos de terra, 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 máxima força axial.

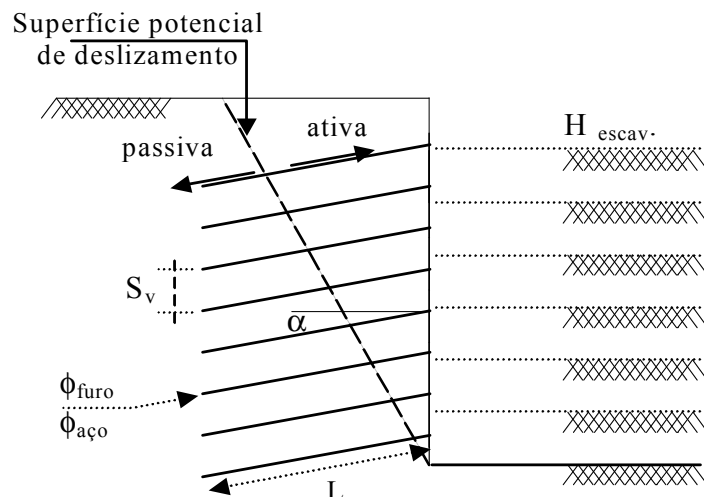


Figura 3 - Mecanismo de ruptura e parâmetros geométricos do muro pregado [12].

Este trabalho tem por objetivo apresentar resultados da modelagem numérica de estruturas de contenção com solo grameado, utilizando o programa computacional FLAC [19]. O foco principal da análise foi observar a magnitude dos esforços axiais desenvolvidos ao longo de grampos injetados em função das etapas de escavação.

2. MODELAGEM NUMÉRICA

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) é um programa computacional bidimensional de diferenças finitas que simula o comportamento de estruturas constituídas de solo, rocha ou outros materiais que possam ser submetidos ao escoamento plástico quando seus limites de resistência são atingidos.

Os materiais são representados por elementos que se comportam de forma linear ou não linear segundo a lei da tensão e deformação imposta, em resposta às forças aplicadas. O material pode romper ou escoar e a malha pode deformar (a grandes deformações) e mover-se como o material que representa. O programa FLAC possui nove modelos constitutivos para reproduzir o comportamento tensão-deformação e resistência dos materiais prescritos.

O processo iterativo de cálculo utilizado pelo FLAC é ilustrado na Figura 4. Este procedimento invoca primeiro as equações do movimento para obter velocidades e deslocamentos. Então, taxas de deformação são obtidas e novas tensões são calculadas [19].

O programa FLAC utiliza palavras-comando que permitem ao usuário a rápida identificação de suas aplicações. Deste modo, as obras de engenharia que usualmente consistem em uma seqüência de operações, podem ser facilmente simuladas através de uma série de comandos de entrada. Cada etapa executiva pode ser armazenada em arquivo independente, facilitando a análise final dos resultados. Maiores detalhes podem ser vistos em [12 e 19].

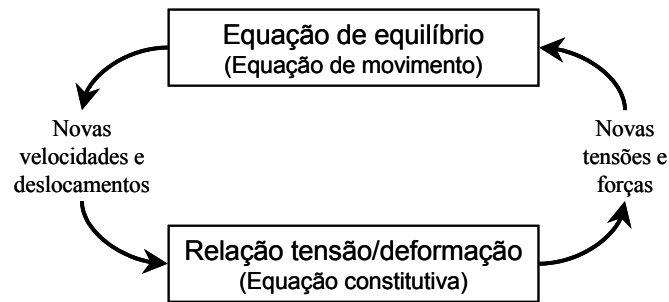


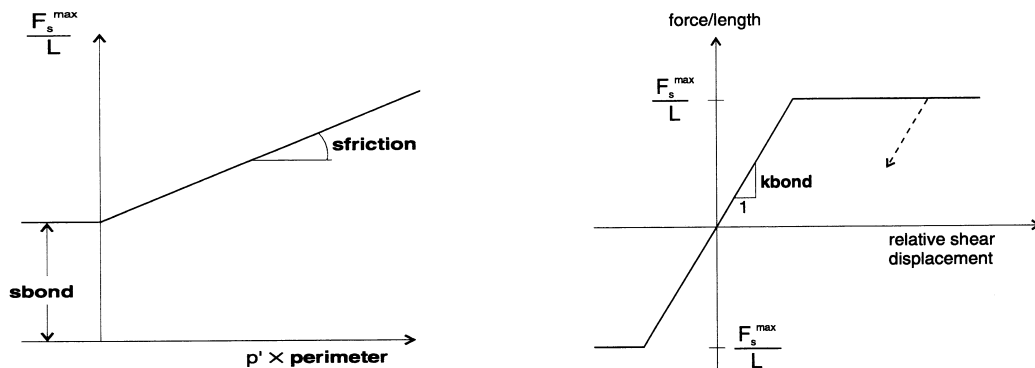
Figura 4 - Ciclo de cálculo do método explícito utilizado pelo programa FLAC [19].

Para a simulação dos grampos, o FLAC utiliza elementos unidimensionais que trabalham por tração, não apresentando resistência à flexão. A resistência no contato solo-grampo é representada pela relação entre a força axial, normalizada em função do comprimento do grampo, (F_s^{\max} / L) e o esforço normal (Figura 5a), descrita pela equação (1), apresentada a seguir.

$$\frac{F_s^{\max}}{L} = s_{bond} + p' \times \text{perímetro} \times \tan(S_{friction}) \quad (1)$$

onde S_{bond} representa uma “coesão” no contato solo-grampo; p' a tensão normal efetiva média; $S_{friction}$ o parâmetro de atrito no contato solo-grampo.

O comportamento cisalhante da injeção em função dos deslocamentos relativos entre o solo e o grampo é representado pelo parâmetro de rigidez k_{bond} , mostrado na Figura 5b.



a) Resistência ao cisalhamento da injeção.

b) Força cisalhante na injeção x deslocamento.

Figura 5 - Modelo de comportamento da injeção.

3. CASO ESTUDADO

As análises foram feitas considerando um talude vertical com 10,5m de altura, escavado em 7 estágios de 1,5m. Em cada etapa da escavação do talude, grampos de 6m de comprimento eram introduzidos simultaneamente com a consideração de uma parede de concreto com espessura de 100mm. O espaçamento vertical e horizontal entre grampos foi mantido constante e igual a 1,5m, sendo que a instalação da primeira linha de grampos foi feita a 1m de profundidade. Os grampos eram compostos por uma barra de aço com diâmetro $\phi_{aço} = 25\text{mm}$ e calda de cimento injetada em furos com diâmetro $\phi_{furo} = 75\text{mm}$. Todos os grampos foram inclinados de $\alpha = 10^\circ$ com a horizontal.

O comportamento tensão-deformação do solo foi representado pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb e os parâmetros geomecânicos dos materiais envolvidos estão apresentados na Tabela 1 [12].

Tabela 1 - Propriedades geomecânicas.

Grampo				Parede	Solo						
$\sigma_{aço}$	$E_{aço}$	$G_{injeção}$	q_s	E	E	ν	γ	c'	ϕ'	ψ	k_0
500	205	9,0	150	24	45×10^{-3}	0,25	18,5	10	32°	$7,5^\circ$	0,5

Obs.: $\sigma_{aço}$ = tensão de escoamento do aço (MPa), E = módulo de Young (GPa), G = Módulo cisalhante (GPa), q_s = resistência ao arrancamento do grampo (kPa), ν = coeficiente de Poisson, γ = peso específico natural (kN/m^3), c' = coesão efetiva (kPa), ϕ' = ângulo de atrito, ψ = ângulo de dilatação, k_0 = coeficiente de empuxo no repouso.

A malha adotada foi constituída de 11954 nós (139 x 86), conforme mostra a Figura 6. As condições de contorno também estão apresentadas nesta figura.

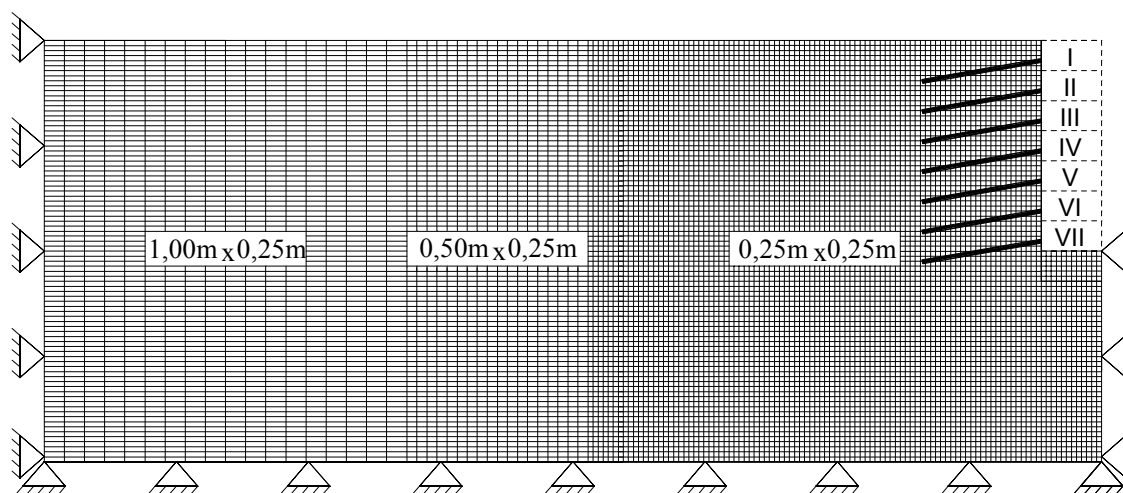


Figura 6 – Malha e condições de contorno [12]

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Ao final das etapas de escavação, observou-se deslocamentos horizontais crescentes em direção ao topo do talude. No topo, a magnitude do deslocamento horizontal variou entre 0,05%H e 0,25%H, sendo H a profundidade de escavação. Estudos anteriores mostraram que estes deslocamentos podem também ser afetados pelo processo de execução do grampo [20].

Quanto ao desenvolvimento das forças axiais nos grampos, a Figura 8 apresenta a mobilização da forças axiais máximas (F_s^{max}), em cada grampo, para três fases de escavação. Na primeira etapa de escavação, denominada fase inicial, a profundidade de escavação é de 1,5m, o que corresponde a uma relação comprimento do grampo (L) e altura de escavação (H) de 4. Nesta etapa, somente o grampo superficial está instalado. Com o avanço da escavação e instalação de novos grampos o grau de mobilização dos grampos superficiais vai reduzindo. Este comportamento pode ser visto nas etapas denominadas intermediária (H=6m, L/H = 1) e final (H=10,5m, L/H = 0,57). O grampo 3, por exemplo, que na etapa intermediária suporta a maior carga, sofre, com o avanço da escavação, um incremento de mobilização de sua resistência inferior à observada para os grampos 4, 5 e 6. Resultados similares foram encontrados em [21].

Quanto à distribuição dos esforços ao longo dos grampos, a Figura 9, mostra que esta também varia ao longo do grampo. Os pontos de máxima força axial ocorrem no interior da massa de solo, estabelecendo uma superfície limite entre as zonas elástica e plástica. Nesta figura estão também indicados as relações entre a força máxima e força de escoamento do aço para cada um dos 7 grampos instalados. Os resultados mostram que as cargas previstas são baixas, se comparadas com a resistência admissível para barra de aço CA-50. Assumindo, para carga de trabalho, um fator de majoração de 1,4, e limitando as cargas à condição de 90% da carga de escoamento, o limite máximo para relação $F_{max}/F_{escoamento}$ é de 64,3%.

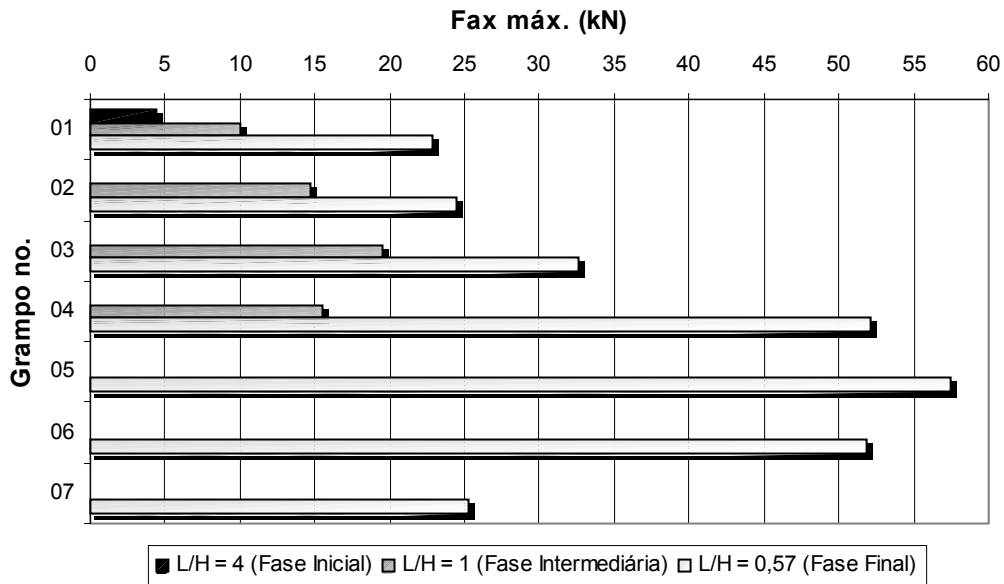


Figura 8 - Magnitude das forças axiais máximas desenvolvidas nos grampos em função da profundidade de escavação.

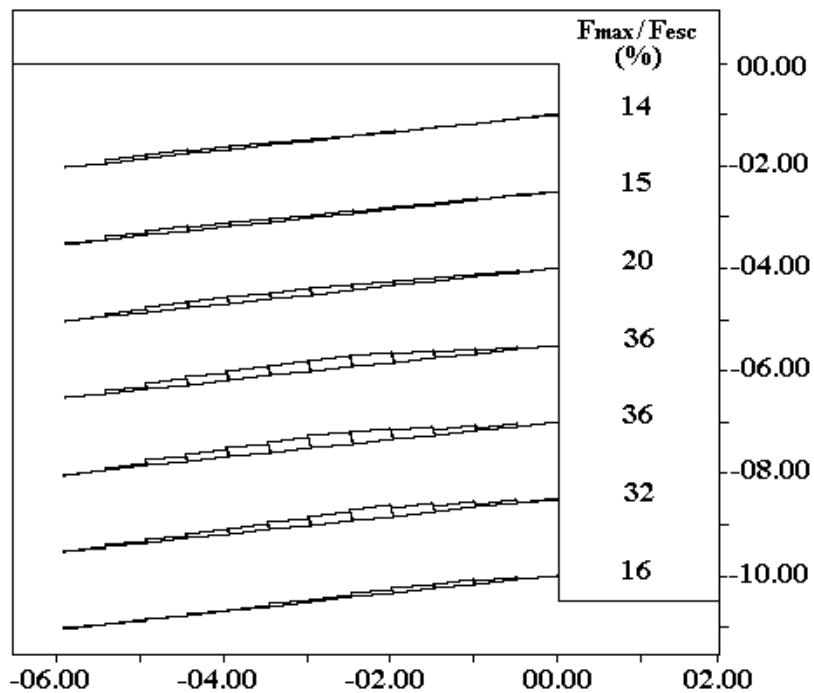


Figura 9 - Forças axiais nos grampos para a profundidade de escavação de 10,5m (L/H = 0,57).

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 mostraram, para o caso estudado, que os grampos mais solicitados são aqueles mais distantes da superfície e, portanto, têm um papel mais importante na contenção do solo. Ao longo do comprimento do grampo, a distribuição de tensões mostra valores mais elevados no interior da massa de solo, definindo o limite entre as regiões ativa e passiva. Observa-se ainda que os grampos estão trabalhando sobre tensões bem menores que a tensão de escoamento do aço.

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 ainda ao eng. Hélio Brito (Fundação GeoRio) pelas informações e apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GeoRio (1999). “Manual Técnico de Encostas: Vol. IV - Ancoragens e Grampos”. Fundação GeoRio; Editores: J.A.R. Ortigão e A.S.F.J Sayão, 184 p.
- [2] Ortigão, J. A. R. et al. (1995). Experience with soil nailing in Brazil: 1970-1994. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, London, Vol. 113, paper 10584, pp. 93-106.
- [3] Clouterre (1991). Recommendations Projet National Clouterre, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Presses de l'ENPC, Paris, 269 p.
- [4] Guilloux, A.; Notte G.; e Schlosser, F. (1982). “Soil Nailing: Practical Applications.” Proc. Symp. on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, pp. 389-397.
- [5] Cartier, G.; e 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, pp. 473-476.
- [6] Gässler, G.; e Gudehus, G. (1981). “Soil nailing – Some aspects of a new technique”, Proc. 10th Int. Conf. S.M.F.E, Stockholm, Vol. 3, Session 12, pp. 665-670.
- [7] Shen, C. K.; Bang, S.; Romstad, K. M.; Kulchin, L.; DeNatale J. S. (1981). “Field Measurements of Earth Support System”, ASCE, Vol. 107, GT 12, pg. 1625-1642.
- [8] Plumelle, C. (1986). “Full scale experimental nailed soil retaining structures”, Revue Française de Geotechnique, no. 40, pp. 45-50.
- [9] Mitchell, J. K. e Villet, W. C. B. (Editors, 1987). “Reinforcement of earth slopes and embankments”, NCHRP Report 290, USA Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.
- [10] Juran, I.; e Elias, V. (1987). “Soil nailed retaining structures: Analysis of case histories”, Soil Improvement, ASCE Geotechnical Special Publication Nº 12, ASCE, New York, N.Y, 232-244.

- [11] Juran, I. e Elias, V. (1990). "Preliminary Draft – Manual of Practice for Soil Nailing", Prepared for the U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Contract DTFH-61-85-C-00142.
- [12] Springer, F. O. (2001) Estudos da Deformabilidade de Escavações com Solo Pregado, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.
- [13] Stocker, M. F.; Korber, G. W.; Gassler, G.; e Gudehus, G. (1979). "Soil Nailing: Cloutage du Sol", Proc. Int. Conf. on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques, Ecole des Ponts et Chaussées, Paris, France, Vol. 2, pp. 469-474.
- [14] Schlosser, F. (1983). "Analogies et differences 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 Publiques, no. 418, 473 pp., Sols et Fondations 184, 8-23.
- [15] Juran, I. et al (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, 5-7 oct 1988.
- [16] Bridle, R. J. (1989). "Soil nailing – analysis and design", Ground Engineering, September, pp. 52-56.
- [17] Anthoine, A. (1990). "Une méthode pour le dimensionnement à la rupture des ouvrages en sols renforcés", Revue Française de Géotechnique, (50) : 5-17.
- [18] Dyminski, A. S. (1994). "Análise de Estabilidade e Desempenho de Taludes com Inclusões Passivas", Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.
- [19] Itasca Consulting Group, Inc. (1996). "FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 3.3, User Manual", Minneapolis, Minnesota, USA.
- [20] Springer F. O.; Gerscovich D. M. S. e Sayão A. S. F. J. (2001). "Deformabilidade de taludes com solo grampeado", III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – COBRAE, ABMS, Rio de Janeiro, pp. 483-490.
- [21] 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.