

Avaliação de programas computacionais para a simulação de escavação de taludes em solo grampeado

Lima, A. P.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, *aplima@civ.puc-rio.br*

Gerscovich, D. M. S.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, *deniseg@uerj.br*

Sieira, A. C. C. F.

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, *sieira@uerj.br*

Sayão, A. S. F. J.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, *sayao@civ.puc-rio.br*

Resumo: A magnitude das deformações em escavações grampeadas, assim como os esforços axiais nos grampos, podem ser previstos através de ferramentas numéricas, capazes de simular as seqüências construtivas e incorporar modelos constitutivos que reproduzam o comportamento dos materiais envolvidos. Este trabalho teve como objetivo comparar o comportamento tensão-deformação de taludes em solo grampeado, a partir do uso do programa computacional FLAC (método das diferenças finitas) e do programa computacional PLAXIS (método dos elementos finitos). Os deslocamentos horizontais a 1,0m da face da escavação e os esforços axiais desenvolvidos ao longo dos grampos, na última etapa de escavação, foram comparados para os dois programas computacionais utilizados. As análises numéricas ressaltaram que os deslocamentos horizontais ao longo da profundidade e a distribuição dos esforços axiais nos grampos são significativamente influenciados pelo tipo de modelagem do grampo e pelo sistema de fixação na face.

Abstract: The magnitude of strains in nailed excavations and the axial tension in the nails may be estimated numerically. For this, the numerical tools must be able to reproduce the construction sequence and to incorporate realistic constitutive models for the materials. This paper aims at comparing the stress-strain behavior of nailed slopes, by using the computational programs FLAC (finite difference method) and PLAXIS (finite element method). The horizontal displacements at a point 1.0m from the excavation face and the axial tension along the nails have been estimated and compared for the final excavation stage. The numerical analyses show that the profile of horizontal displacements of the nailed mass and the axial tension in the nails are significantly influenced by the choice of nail's model and by the end condition for the nail at the face wall.

1 INTRODUÇÃO

A técnica de reforço com solo grampeado é bastante eficaz em projetos de contenções ou estabilização de encostas naturais ou resultantes de processo de escavação. O reforço do solo *in situ* consiste na inclusão de elementos passivos semi-rígidos (barras, cantoneiras ou tubos de aço, barras sintéticas, etc.), resistentes à flexão-composta.

De um modo geral, o processo executivo de estabilização de escavações com solo grampeado,

envolve uma seqüência de etapas: escavação, posicionamento e injeção dos grampos em furo pré-executado, e execução de parede em concreto projetado. Em taludes naturais pode-se executar a obra sem a etapa de escavação. Uma alternativa menos comum é a cravação simples do grampo, sem injeção em furo pré-executado.

Existem diversas opções de conexão da extremidade do grampo com a parede de concreto projetado. Esta conexão pode ser rígida, garantindo a compatibilidade dos deslocamentos, ou livre,

possibilitando deslocamento relativo muro-grampo (Springer *et al.*, 2001).

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. 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 – $T_{MÁX.}$ (Figura 1). A partir de considerações sobre a estabilidade externa e interna, definem-se os espaçamentos vertical e horizontal, diâmetro, comprimento e inclinação do grampo.

Diferentes enfoques conceituais quanto ao mecanismo de ruptura do conjunto solo-grampo, assim como quanto à forma da superfície potencial de ruptura e natureza das forças atuantes, têm sido verificados em vários trabalhos publicados na literatura (Shen *et al.*, 1981; Schlosser, 1983; Juran *et al.*, 1988; Bridle, 1989; Anthoine, 1990).

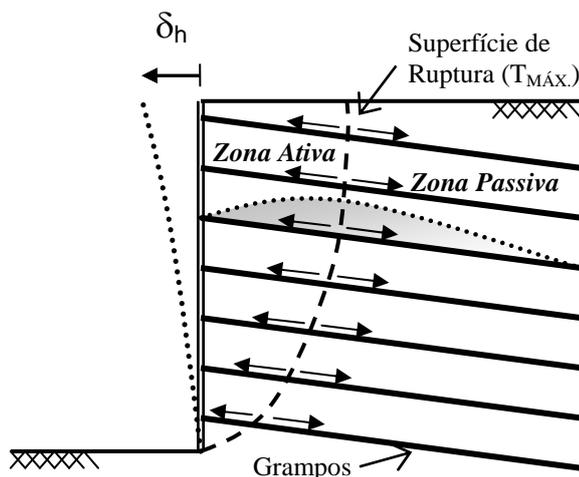


Figura 1: Definição da superfície de ruptura a partir das zonas ativa e passiva de escavações grampeadas.

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 a seqüência construtiva e incorporar modelos constitutivos que reproduzam o comportamento dos materiais envolvidos na obra (Lima, 2002).

Este trabalho teve como objetivo comparar a previsão do comportamento tensão-deformação de taludes em solo grampeado, com os programas computacionais FLAC (baseado no método das

diferenças finitas) e PLAXIS (método dos elementos finitos).

O estudo abordou a modelagem numérica de uma escavação com face vertical e superfície horizontal do terreno. A escavação foi executada em diferentes estágios e estabilizada com grampos injetados. Os deslocamentos horizontais a 1,0m da face da escavação e os esforços axiais desenvolvidos ao longo dos grampos, na última etapa de escavação, foram comparados para os dois programas computacionais utilizados.

2 PROGRAMA FLAC

FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) é um programa 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 o limite de resistência é atingido. Os materiais são representados por elementos que se comportam de forma linear ou não linear, segundo a lei tensão-deformação considerada, em resposta às forças aplicadas. O programa dispõe de nove modelos constitutivos para reproduzir o comportamento tensão-deformação e resistência dos materiais.

Este programa utiliza palavras-comando que permitem ao usuário a rápida identificação de suas aplicações. 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 (Itasca, 1996).

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 pelo comprimento do grampo, (F_s^{max} / L) (Figura 2a), a qual pode ser descrita pela equação (1).

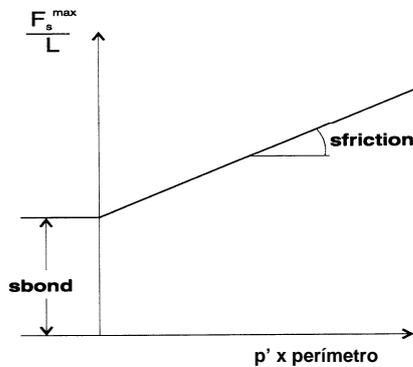
$$\frac{F_s^{max}}{L} = s_{bond} + p' \times \text{perímetro} \times \tan(S_{friction}) \quad (1)$$

onde s_{bond} representa um intercepto de coesivo no contato solo-grampo; p' é a tensão normal efetiva média; e $S_{friction}$ é o parâmetro de atrito no contato solo-grampo.

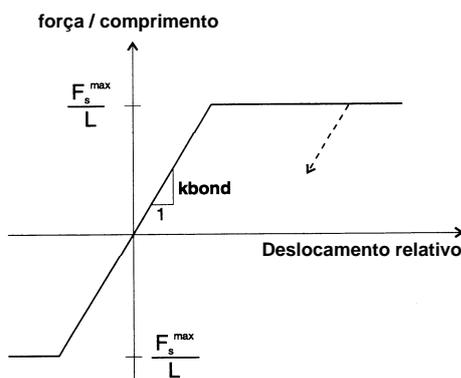
O comportamento cisalhante da injeção em função dos deslocamentos relativos entre o solo e o grampo é representado pelo parâmetro de rigidez k_{bond} , mostrado na Figura 2b.

A introdução dos elementos de reforço na malha pode ser feita de duas maneiras. Os grampos podem ser ancorados em uma região específica na malha (Grampo Fixo), sendo o deslocamento da malha

compatibilizado com o deslocamento de uma das extremidades do grampo. Neste caso, a deformabilidade é governada pela malha e não há transferência de esforços para o elemento estrutural. Os pontos de força axial máxima em cada grampo ocorrem próximo à face de escavação (Jewell, 1990).



a) Resistência ao cisalhamento da injeção



b) Força cisalhante na injeção x deslocamento

Figura 2: Modelo de comportamento da injeção.

Alternativamente, os grampos podem funcionar independentemente da malha; os esforços são desenvolvidos ao longo do seu comprimento à medida que a malha se deforma (Grampo Livre) e os pontos de máxima força axial ocorrem afastados da face (Plumelle & Schlosser, 1990).

A resistência no contato solo-grampo é definida pelas componentes de adesão e atrito.

3 PROGRAMA PLAXIS

O programa PLAXIS foi desenvolvido para análises de problemas geotécnicos com base no método dos elementos finitos (Brinkgreve & Vermeer, 1998).

Neste programa, os materiais são representados por elementos ou zonas de tal forma que a malha gerada pode se adequar perfeitamente às condições de contorno do problema em questão.

Em análises bi-dimensionais, podem ser adotados elementos triangulares de 6 ou 15 nós. Na versão utilizada no presente trabalho (versão 7), não há limitação quanto ao número de elementos. Assim sendo, sugere-se o emprego do elemento de 6 nós, uma vez que elementos de 15 nós exigem esforço computacional relativamente alto.

Cada elemento obedece a relações tensão-deformação pré-definidas, lineares ou não-lineares, em resposta às forças e condições limites impostas ao modelo.

O software possui 5 modelos constitutivos para representação do comportamento dos solos.

As malhas de elementos finitos são geradas automaticamente, considerando-se as restrições impostas pela geometria do problema.

Ao contrário do FLAC, o programa não possui elemento específico para representar o grampo. No entanto, alguns elementos geométricos podem ser utilizados; como por exemplo, elementos de barra ou geotêxteis.

Os elementos de barra permitem a modelagem de estruturas esbeltas, que apresentam rigidez à flexão e axial. Os parâmetros representativos dos elementos de barra são: módulos de rigidez à flexão (EI) e rigidez axial (EA), coeficiente de Poisson (ν) e o peso relativo (w). No meio contínuo, o elemento de barra se superpõe ao solo; como conseqüência, o cálculo de w é feito através da equação:

$$w = (\gamma_{concreto} - \gamma_{solo}) \times e \quad (2)$$

onde γ_i é o peso específico do material i e e a espessura da barra.

Os geotêxteis são elementos esbultos, que não apresentam rigidez à flexão. Estes elementos são capazes de suportar altos esforços de tração, mas não possuem resistência à compressão. No PLAXIS, a única propriedade representativa de um geotêxtil é a rigidez axial (EA).

No caso de interfaces solo-elemento, o programa disponibiliza um elemento característico (Elemento de Interface), o qual é regido pelo modelo elasto-plástico. Os níveis de tensão correspondentes aos comportamentos elástico e plástico são definidos a partir de critério de resistência de Mohr-Coulomb, cujas propriedades são estimadas a partir da resistência do solo, através das equações:

$$c_{inter} = R \times c_{solo} \quad (3)$$

$$\tan \phi_{inter} = R \times \tan \phi_{solo} \leq \tan \phi_{solo} \quad (4)$$

onde, R representa o fator de redução de resistência nas interfaces. More (2003) sugere valores de R entre 0,5 e 1,0, dependendo do tipo de solo e do tipo de material do elemento em contato.

Na fase elástica, os deslocamentos relativos podem ser perpendiculares (separação) ou paralelos à interface.

Para evitar descontinuidades na distribuição de tensões e deformações, o programa sugere ainda que nos cantos da estrutura, ou em regiões de mudança abrupta de condições de contorno, esses elementos sejam estendidos ao solo.

O PLAXIS recomenda que trechos ancorados de tirantes sejam representados por elementos tipo geotêxtil acrescido de interface. Esta sugestão pode ser estendida aos grampos, face à semelhança entre o comportamento desses elementos.

4 CASO ESTUDADO

4.1 Geometria

A análise numérica considerou uma escavação vertical de 3,0m de largura e 10,5m de profundidade. Não foi considerado nível d'água.

O processo construtivo foi simulado através de 7 etapas, considerando-se cada uma delas com escavação de 1,5m de altura e subsequente introdução do grampo.

Os grampos consistiram em barras cilíndricas de 25mm de diâmetro e 6m de comprimento, introduzidos em pré-furos de 75mm de diâmetro. Com exceção da primeira linha de grampo, situada a 1,0m do topo de escavação, o espaçamento vertical e horizontal foi mantido constante e igual a 1,5m. Os grampos foram introduzidos com uma inclinação de 10° com a superfície horizontal.

As malhas adotadas com os programa FLAC e PLAXIS foram constituídas, respectivamente, de 138 divisões horizontais e 84 verticais (Figura 3) e 8877 elementos triangulares de 6 nós (Figura 4). A definição das condições de contorno foi discutida por Briaud & Lim (1997).

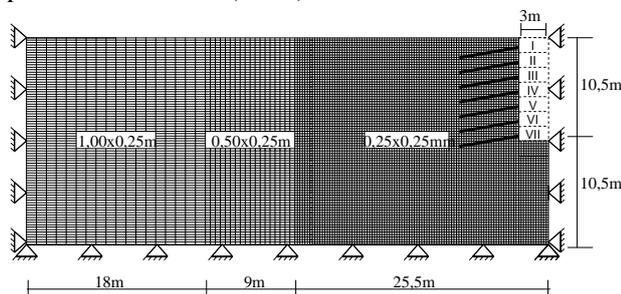


Figura 3: Discretização da malha (FLAC).

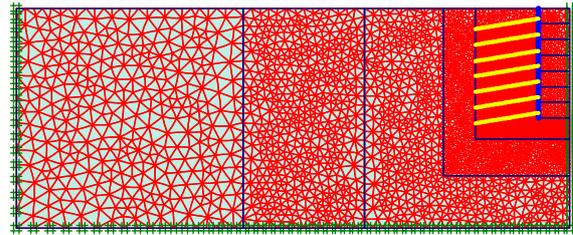


Figura 4: Discretização da malha (PLAXIS).

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

4.2 Parâmetros Adotados

O solo foi representado por modelo Elasto-Plástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. O modelo de Mohr-Coulomb requer o conhecimento de 5 parâmetros: módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão do solo (c), ângulo de atrito do solo (ϕ) e ângulo de dilatância (ψ). Os valores adotados foram selecionados a partir de casos de obra observados na literatura (Lima, 2002) e encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do solo

Parâmetro	Valor
Módulo de Young (E)	45 MPa
Coeficiente de Poisson (ν)	0,25
Peso específico natural (γ)	18,5 kN/m ³
Coesão efetiva (c')	10 kPa
Ângulo de atrito (ϕ')	32°
Ângulo de dilatância (ψ)	7,5°
Coeficiente de empuxo no repouso (k_0)	0,50

Os parâmetros mecânicos dos elementos de barra utilizados pelo programa FLAC estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros mecânicos - FLAC

Material	Parâmetro	Valor
Grampo	$\sigma_{aço}$	500 MPa
	$E_{aço}$	205 GPa
	$G_{injeção}$	9 GPa
	q_s	150 kPa
Parede	E_{parede}	24 GPa

Nota: $\sigma_{aço}$ = tensão de escoamento do aço, E = módulo de Young, G = Módulo cisalhante, q_s = resistência ao arrancamento do grampo.

No programa PLAXIS, o grampo foi simulado como geotêxtil. O módulo de elasticidade (\bar{E}) foi calculado em função da média ponderada das áreas relativas ao aço e ao material de injeção, conforme equação (6). Os parâmetros mecânicos utilizados pelo programa PLAXIS estão descritos na Tabela 3.

$$\bar{E} = \frac{(E_{injeção} \times A_{injeção}) + (E_{aço} \times A_{aço})}{A} \quad (6)$$

onde E é o módulo de Young, $A_{injeção}$ é a área da seção correspondente ao trecho injetado, $A_{aço}$ é a área da seção da barra de aço, e A é a área total.

Tabela 3 – Parâmetros mecânicos (PLAXIS)

Material	Parâmetro	Valor
Grampo	\bar{EA}	185 MN
	\bar{EI}	130 kN.m ²
	w	0,74 kN/m
Parede	EA	1,6x10 ⁹ kN/m
	EI	1,3x10 ⁶ kN.m ² /m
	w	0,65 kN/m
	v	0,20

Nota: EA = módulo de rigidez axial, EI = módulo de rigidez à flexão, v = coeficiente de Poisson, w = peso relativo.

Nos dois programas, a característica tridimensional do solo grampeado é transformada em condição bidimensional, através da divisão de alguns parâmetros do grampo (módulo de elasticidade, carga de escoamento, rigidez no contato, etc) pelo espaçamento horizontal entre grampos.

5 RESULTADOS

A Figura 5 apresenta as distribuições de deslocamento horizontal, ao final da escavação, previstas pelos programas FLAC e PLAXIS, para diferentes condições de conexão entre o grampo e a parede (grampo fixo e grampo livre, ou solto). Os deslocamentos horizontais são significativamente maiores quando ambas as extremidades do grampo são livres, como resultado da condição de punção do grampo (Lima *et al.*, 2003).

Ressalta-se que, independente do tipo de simulação, os valores máximos de deslocamento foram inferiores a 0,2%H, exceto para o caso do grampo solto (FLAC). Este limite é sugerido para o caso de solos arenosos (Clouterre, 1991).

As distribuições dos esforços nos grampos estão apresentadas nas Figuras 6 e 7. O programa PLAXIS fornece as cargas nos grampos em kN/m. Entretanto, como os parâmetros de deformabilidade das inclusões estão divididos pelo espaçamento

horizontal, o resultado do programa já incorpora a condição tridimensional dos grampos. Como resultado, o valor da carga pode ser interpretado como sendo dado em kN.

Os resultados mostram 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. Verifica-se que a hipótese de mecanismo de ruptura envolvendo 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 (Springer *et al.*, 2001).

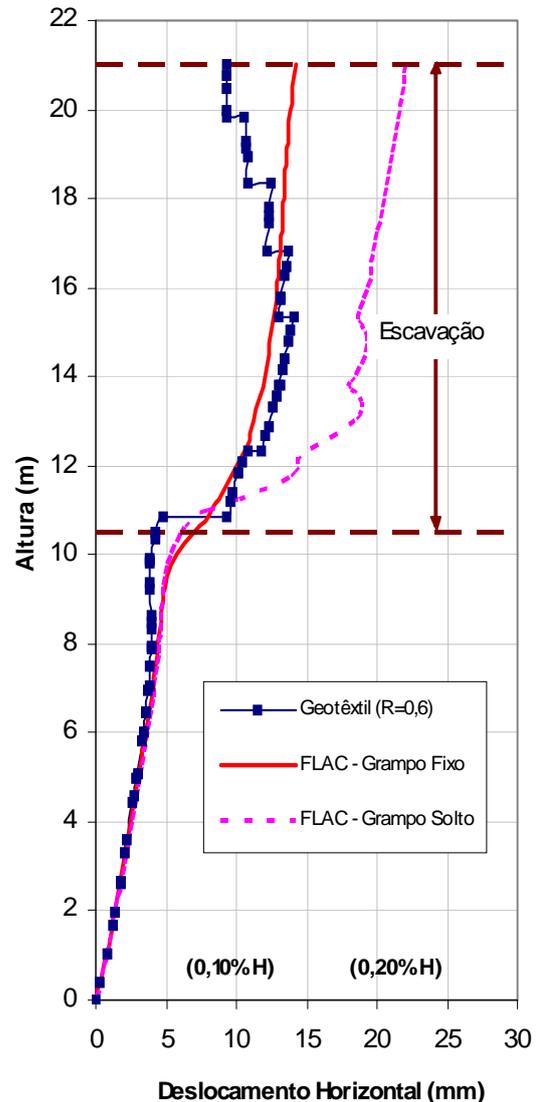


Figura 5: Distribuição de deslocamento horizontal (PLAXIS x FLAC).

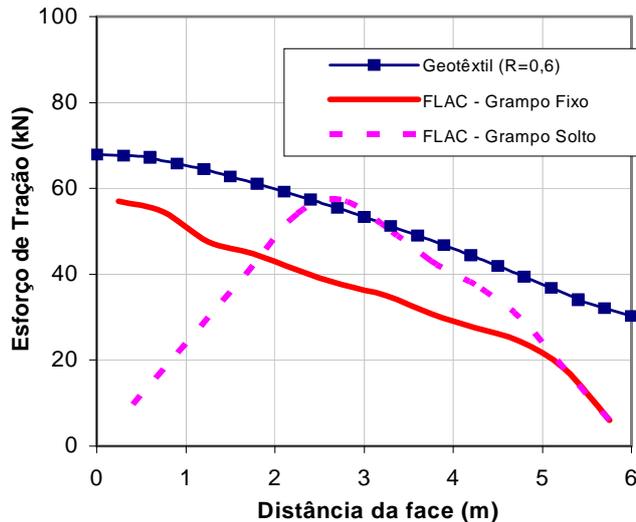


Figura 6: Distribuição de esforços ao longo do grampo 5 (PLAXIS x FLAC).

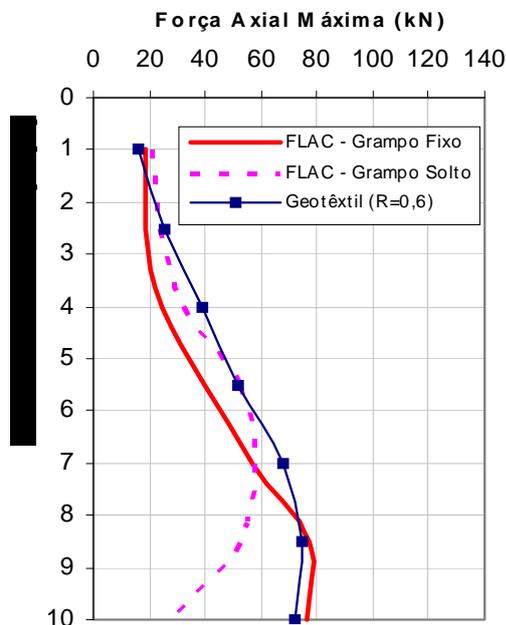


Figura 7: Distribuição de força máxima no grampo (PLAXIS x FLAC).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma avaliação dos programas FLAC e PLAXIS para simulações numéricas de escavações grampeadas. As análises ressaltaram que os deslocamentos horizontais ao longo da profundidade, na última etapa de escavação, são significativamente influenciados pelo tipo de modelagem do grampo, e pelo sistema de fixação do grampo na parede. A simulação do reforço como um geotêxtil (PLAXIS) forneceu os menores deslocamentos horizontais no topo da escavação. Quando a modelagem numérica empregou um elemento de barra (FLAC), com as duas extremidades livres (grampo solto), percebeu-se um aumento na magnitude dos deslocamentos.

Com relação à distribuição dos esforços nos grampos, os resultados mostram que o tipo de fixação dos grampos interfere não só na forma da distribuição dos esforços, mas também na intensidade de mobilização do grampo. A forma de distribuição dos esforços na modelagem com geotêxtil (PLAXIS) foi similar à observada com grampo fixo (FLAC), entretanto a magnitude dos esforços difere da ordem de 30% para os grampos do terço central da escavação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o auxílio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPERJ (Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro).

REFERÊNCIAS

- Anthoine, A. (1990). “Une méthode pour le dimensionnement à la rupture des ouvrages en sols renforcés”, *Revue Française de Géotechnique*, n.50, pp.5-17.
- Briaud, J.L. & Lim, Y. (1997). “Soil-nailed wall under piled bridge abutment”, *Journal of Geotech. & Geo-environmental Engineering*, v.123, n.11, pp. 1043-1050.
- Bridle, R.J. (1989). “Soil nailing. Analysis and design”, *Ground Engineering*, September, 52-56.
- Brinkgreve, R.B.J. & Vermeer, P.A. (1998). “Plaxis, Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. A.A.Balkema, Netherlands.
- Clouterre (1991). “Soil Nailing Recommendations Project National Clouterre”, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, France, 301p.
- Itasca (1996). “FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua”, Version 3.3, User’s Manual, *Itasca Consulting Group*, Minnesota, USA.
- Jewell, R.A. (1990). “Review of theoretical models for soil nailing”, *International Reinforced Soil Conference*, British Geotech. Society. Edited by A.McGown, K.C.Yeo & K.Z.Andrawes, London.
- 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.
- Lima, A.P. (2002). “Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado”, *Dissertação de Mestrado*, Depart.Engenh.Civil, PUC-Rio, 176p.
- Lima, A.P., Gerscovich D.M.S. & Sayão, A.S.F.J. (2003). “Deformability Analysis of Nailed Soil Slopes”, *12th Panamerican Conference for Soil Mechanics & Geotech. Engineering*, ISSMGE, Boston, USA, Session 4.4, pp.2127-2132.

- More, J.Z.P. (2003). “Análise Numérica do Comportamento de Cortinas Atirantadas em Solos”, *Dissertação de Mestrado*, Depart.Engenh.Civil, PUC-Rio, 136p.
- Plumelle, C. & Schlosser, F. (1990). “A French national research project on soil nailing: CLOUTERRE”, *Proc. Int. Reinforced Soil Conference*, Glasgow. p.219.
- Schlosser, F. (1983). “Analogies et differences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en terre armée et par clouage du sol.”, *Sols et Fondations*, Japan, 184, pp.8-23.
- Shen, C.K., Bang, S., Romstad, K.M., Kulchin, L. & DeNatale J.S. (1981). “Field Measurements of Earth Support System”, *ASCE*, v.107, GT12, pp.1625-1642.
- 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.