

DEFORMABILIDADE DE ESCAVAÇÕES COM SOLO PREGADO

DEFORMABILITY OF SOIL NAILING EXCAVATIONS

GERSCOVICH, DENISE M. S. *

SAYÃO, ALBERTO S. F. J. **

SPRINGER, FERNANDA O. ***

LIMA, ANDRÉ P. ****

RESUMO

A utilização da técnica conhecida como solo pregado vem tendo aceitação crescente junto a profissionais de engenharia civil. Os projectos são baseados em análises de equilíbrio limite e, em geral, desprezam os mecanismos provenientes das deformações ocorridas no interior do muro. A partir de considerações sobre as condições de estabilidade externa e interna, definem-se os parâmetros geométricos: espaçamento vertical (S_v), diâmetro, comprimento (L) e inclinação (α) do prego. Com o objectivo de avaliar a influência desses parâmetros no comportamento tensão-deformação de escavações com solo pregado, foi realizado um estudo paramétrico com o programa computacional FLAC. Os resultados mostram pouca influência nos deslocamentos horizontais do maciço reforçado e nas tensões nos grampos quando $L/H \geq 70\%$, $S_v \leq 25\%L$ e $\alpha \leq 15^\circ$.

ABSTRACT

The use of nails as a soil-reinforcing element is receiving increasing acceptance within civil engineering professionals. Soil nailing designs are based on limit equilibrium concepts and usually disregard strain mechanisms within the soil mass. Geometric design parameters, such as vertical spacing (S_v) and nail diameter, length (L) and inclination (α), are inferred by considerations of external and internal stability criteria. A parametric study was carried out with FLAC software aiming at evaluating the influence of those parameters in the stress-strain behavior of soil nailing excavations. The results indicate little influence on the horizontal displacements and nail tensions when $L/H \geq 70\%$, $S_v \leq 25\%L$ and $\alpha \leq 15^\circ$.

(*) Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, deniseg@uerj.br

(**) Depto de Eng. Civil, Universidade Católica do Rio de Janeiro, sayao@civ.puc-rio.br

(***) Depto de Eng. Civil, Universidade Católica do Rio de Janeiro, fos262@icqmail.com

(****) Depto de Eng. Civil, Universidade Católica do Rio de Janeiro, andrepl@globocom

1. INTRODUÇÃO

O solo pregado é uma técnica de reforço utilizada para estabilização de cortes e taludes. Nesta técnica pregos são introduzidos no maciço por cravação directa de elementos metálicos (prego cravado) ou através de pré-furo, seguido pela introdução de barra de aço e preenchimento do furo com material cimentante (prego injectado). Para garantir o correcto posicionamento da barra de aço, centralizadores devem ser instalados no furo, conforme mostra a Figura 1.

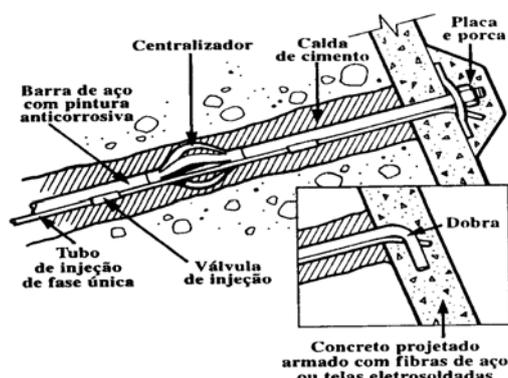


Figura 1 – Esquema de instalação do prego injectado.

Com a deformação do maciço a resistência no contacto solo-prego é mobilizada, melhorando as condições de estabilidade interna. Esta resistência depende não só do tipo e densidade do solo, mas também do tipo do prego. Pregos injectados apresentam resistência no contacto solo-prego superior à obtida com os pregos cravados e, por este motivo, têm sido adoptados com mais frequência.

Na face do talude, os pregos podem ser rosqueados, recebendo uma placa metálica e porca, ou dobrados (Figura 1). No primeiro tipo, a porca e placa de apoio permitem a aplicação de uma pequena carga de incorporação, que serve para garantir contacto solo-concreto projectado, precaução importante no caso de muros com paramento vertical. Já o prego dobrado é mais empregado em taludes inclinados, com pregos de diâmetro até 20mm. Na face do muro lança-se, em geral, uma camada delgada de concreto projectado, a fim de se estabelecer uma protecção contra eventuais processos localizados de erosão superficial.

A aceitação crescente da técnica de reforço com solo pregado se deve à sua eficácia, à possibilidade de se utilizar barras de aço disponíveis comercialmente e ao fato de se poder adoptar o mesmo equipamento e processo executivo empregados na instalação de tirantes.

A concepção de projectos com solo pregado baseia-se em análises por equilíbrio limite, obtendo-se fatores de segurança em superfícies de ruptura preestabelecidas. A partir de considerações sobre a estabilidade externa e interna, definem-se os espaçamentos vertical e horizontal, diâmetro, comprimento e inclinação do prego. Diversos métodos de análise estão disponíveis na literatura [1]. As diferenças entre estas proposições retractam as incertezas quanto ao mecanismo de ruptura do conjunto solo-prego, assim como quanto à forma da superfície potencial de ruptura. Por não prever deformações no interior da massa reforçada,

análises por equilíbrio limite não incorporam a redistribuição de esforços nos pregos ao longo das etapas de construção e, portanto, fornecem um factor de segurança global que não reproduz correctamente o comportamento da estrutura.

Vários autores observaram que o comportamento do solo pregado é bastante sensível à relação entre comprimento do prego (L) e profundidade de escavação (H). Relações de $L/H < 0,5$ acarretam em baixa eficiência do reforço e devem, portanto, ser evitadas [2, 3, 4]. Verificou-se, também, que, para espaçamentos superiores a $25\%L$, a eficiência do mecanismo de interacção entre o reforço e o solo reduz-se rapidamente [2].

Estruturas reforçadas com pregos, dotadas de instrumentação de campo, têm indicado que os valores máximos de deslocamentos vertical e horizontal ocorrem, em geral, no topo da parede e situam-se na faixa entre 0,1 e 0,5% da altura da escavação [4, 5, 6, 7, 8]. Estes deslocamentos dependem, entretanto, de fatores geométricos, tais como: comprimento, ângulo de instalação e densidade (espaçamento vertical e horizontal) dos pregos, da resistência no contacto solo-prego, do tipo de solo, do processo construtivo (etapas de escavação), além de variáveis ambientais que eventualmente possam vir a alterar as características mecânicas do prego.

Esta comunicação apresenta resultados de estudos paramétricos de escavações de taludes reforçados com pregos, com face vertical. O objectivo desta pesquisa foi avaliar a sensibilidade do comportamento tensão-deformação da estrutura pregada em função da variação dos parâmetros geométricos do projecto. As análises foram realizadas com programa computacional FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua [9].

2. ESTUDO PARAMÉTRICO

O estudo teve como objectivo examinar a influência dos parâmetros geométricos no deslocamento horizontal no topo da escavação e no desenvolvimento dos esforços nos pregos.

Os parâmetros geométricos considerados nas análises foram: altura da escavação (H), comprimento do prego (L), espaçamento vertical (S_v), inclinação dos pregos (α), diâmetros do furo (ϕ_{furo}) e da barra de aço ($\phi_{aço}$), descritos na Figura 2. Nesta figura, a superfície potencial de deslizamento delimita as regiões activa e passiva e coincide com a localização do ponto de força axial máxima actuante em cada prego.

Todas as análises tiveram como base uma escavação vertical, com superfície do terreno horizontal. A sequência executiva consistiu em incrementos de escavação, seguidos da instalação dos pregos (injectado) e colocação da parede. A primeira linha de pregos foi sempre posicionada a 1m de distância da superfície do terreno e o espaçamento horizontal foi considerado igual ao vertical.

A faixa de variação de cada um dos parâmetros geométricos foi estabelecida com base em valores comumente adoptados na prática da engenharia geotécnica. Registros de obras indicam que grande parte das estruturas possui alturas de escavação (H) na faixa de 3 a 12m, comprimentos de prego (L) entre 2 e 12m, diâmetros de furo entre 75 e 200mm e barras de aço de 20 a 32mm de diâmetro. Como regra geral, os pregos são dispostos em linhas, com ângulos

de inclinação variando entre 5 e 15 graus. Quanto ao espaçamento vertical (S_v), os pregos têm sido instalados a distâncias entre 0,7 e 2,2m [10].

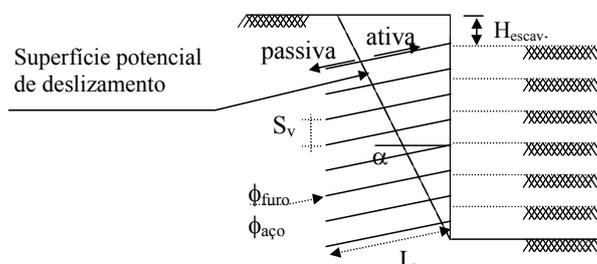


Figura 2 – Mecanismo de ruptura e parâmetros geométricos do muro pregado.

2.1 Modelagem numérica

As análises numéricas foram executadas com o programa de diferenças finitas FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua). Este programa permite simular sequências construtivas de obras de engenharia civil e incorpora modelos constitutivos que reproduzem o comportamento de estruturas constituídas de solo, rocha ou de outros materiais.

Neste trabalho, o comportamento tensão - deformação - resistência do solo foi caracterizado por um modelo linear elastoplástico, delimitado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A simulação dos pregos foi feita por elementos unidimensionais, que trabalham por tracção, não apresentando resistência à flexão. A interface solo-prego foi modelada por um comportamento linear, função dos módulos de deformabilidade da injeção e da geometria do grampo. A resistência no contacto solo-prego foi computada a partir das componentes de adesão e de atrito nesta interface, definidas com base na estimativa da resistência ao arrancamento do prego. A parede foi representada por elementos de viga, que apresentam resistência à flexão. Apesar das características tridimensionais da estrutura grampeada, esta foi idealizada como um problema de deformação plana, dividindo-se determinados parâmetros do grampo pelo espaçamento lateral. Os parâmetros geomecânicos dos materiais envolvidos estão apresentados no Quadro 1 e foram seleccionados a partir de casos de obra observados na literatura [12].

Quadro 1 - Propriedades geomecânicas.

Prego				Parede	Solo						
$\sigma_{aço}$	$E_{aço}$	$G_{injecção}$	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 prego (kPa), ν = coeficiente de Poisson, γ = peso específico natural (kN/m^3), c' = coesão efectiva (kPa), ϕ' = ângulo de atrito, ψ = ângulo de dilatância, k_0 = coeficiente de empuxo no repouso.

A malha adoptada foi constituída de 11954 nós. As condições de fronteira, bem como as dimensões da malha, estão apresentados na Figura 4. Maiores detalhes sobre as simulações numéricas podem ser encontrados em [12, 13].

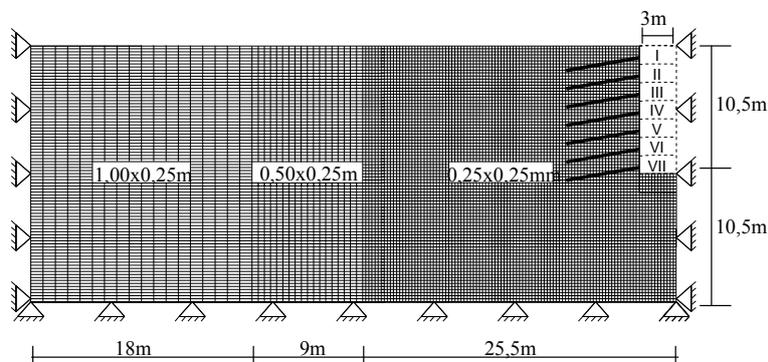


Figura 3. Discretização e dimensões da malha

3. RESULTADOS DAS ANÁLISES

As análises tiveram como principal objectivo avaliar o comportamento tensão-deformação de uma escavação com solo pregado, considerando-se diferentes geometrias. A metodologia adoptada consistiu na definição de uma geometria padrão e posterior variação de cada um dos parâmetros geométricos independentemente. Como padrão, foram admitidos incrementos de escavação de 1,5m e pregos de 6m de comprimento. A inclinação do prego foi adoptada como sendo igual a 10° e os diâmetros do furo e da barra de aço foram considerados iguais a 0,75 e 0,25m, respectivamente. O espaçamento horizontal foi considerado igual ao vertical.

3.1 Comprimento do prego vs altura da escavação

A Figura 4a apresenta os deslocamentos horizontais no topo da parede, para comprimentos de prego variando entre 3m a 12m, para alturas de escavação até 10,5m. Pregos com 3m de comprimento se mostraram eficientes em alturas de escavação até 7,5m ($L/H=0,4$). Maiores profundidades de escavação resultaram na ruptura do maciço reforçado. Relações entre comprimento do prego (L) e alturas de escavação (H) superiores a 0,6, forneceram deslocamentos horizontais relativamente baixos (Figura 4b), inferiores a $0,2\%H$.

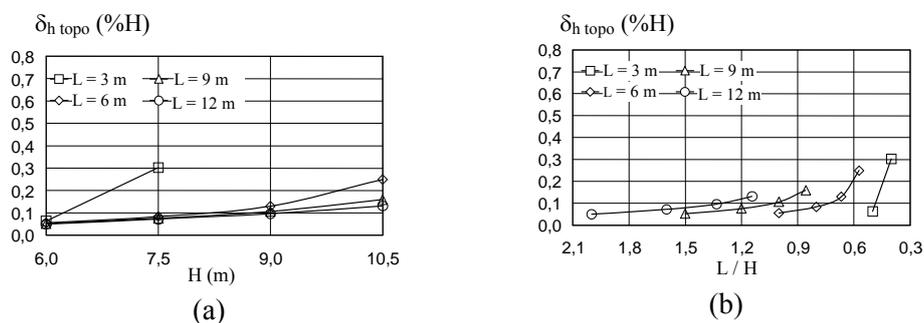


Figura 4 - Influência do comprimento do prego (L) nos deslocamentos horizontais (δ_{h-topo}).

A Figura 5 apresenta o desenvolvimento das forças axiais máximas nos pregos, normalizadas em relação à força de escoamento do aço ($F_{max} / F_{escoamento}$), para 2 profundidades. Os resultados indicam que os pregos mais próximos à superfície contribuem menos do que os localizados na região mais próxima à base do muro. O comprimento do prego interfere directamente na distribuição de tensões no interior do maciço. Quanto maior a profundidade de escavação, maiores esforços são transmitidos aos pregos. Entretanto, quando a relação L/H é inferior a 0,67, a influência do comprimento do prego passa a ser mais significativa.

A Figura 6 indica a posição das forças axiais máximas, para o caso de pregos de 6m de comprimento, em função do aumento da altura de escavação. Com o avanço da escavação a superfície potencial de deslizamento, que delimita as regiões activa e passiva, se afasta da face, mantendo uma inclinação média aproximadamente constante. Escavações superiores a 10,5m ($L/H < 0,57$) acarretariam numa total ineficiência do reforço, uma vez que a superfície potencial de deslizamento ultrapassaria o comprimento dos pregos próximos à superfície do terreno. Com base nos resultados acima, sugere-se que a relação de L/H não seja inferior a 0,67.

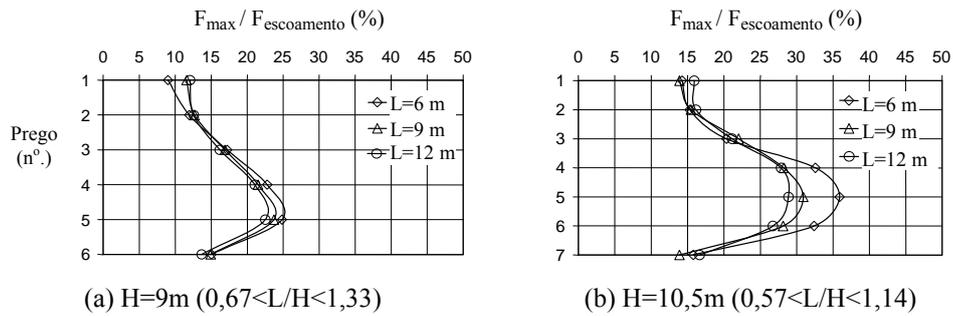


Figura 5 - Influência do comprimento do prego (L) nas forças axiais máximas.

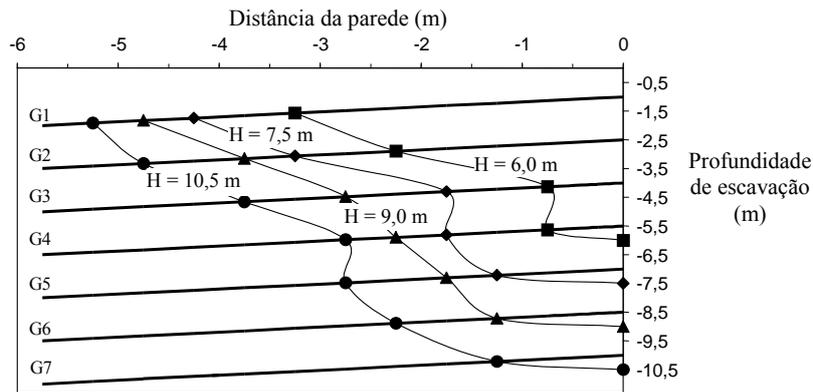


Figura 6 – Localização dos pontos de força axial máxima nos pregos.

3.2 Diâmetro do furo e da barra de aço

A Figura 7 mostra que o diâmetro do furo interfere nos deslocamentos horizontais na parede somente para relações L/H inferiores a 0,68. Nestas análises, o comprimento do prego foi mantido constante e igual a 6m. Quanto aos esforços desenvolvidos nos pregos (Figura 8), verifica-se praticamente nenhuma influência do diâmetro do furo. Entretanto, maiores diâmetros de furo tendem a ampliar a solicitação nos pregos mais próximos ao fundo da escavação.

O diâmetro das barras de aço pouco influi nos deslocamentos do muro e nas forças axiais máximas desenvolvidas nos pregos. Ressalte-se que os resultados não consideram os efeitos locais 3D do problema.

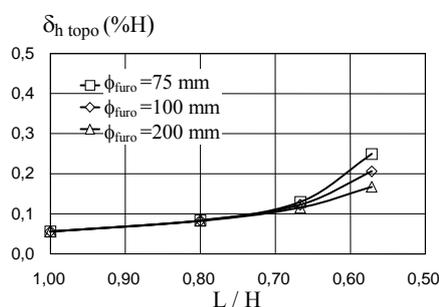


Figura 7 - Influência do diâmetro do furo (ϕ_{furo}) nos deslocamentos horizontais ($\delta_{h\text{-topo}}$).

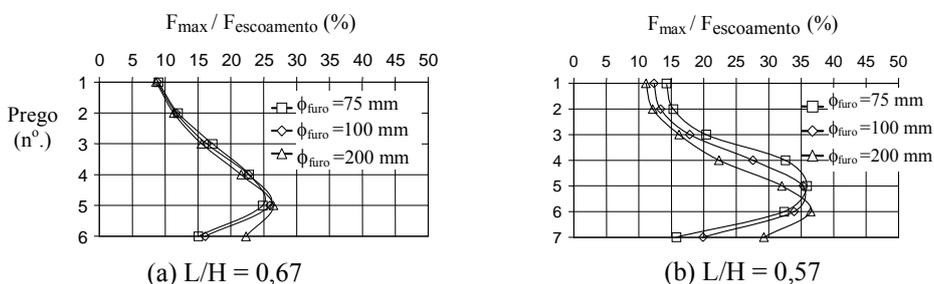


Figura 8 - Influência do diâmetro do furo (ϕ_{furo}) nas forças axiais máximas.

3.3 Espaçamento vertical

O espaçamento entre pregos afecta directamente os deslocamentos no maciço reforçado, conforme é observado na Figura 9. Para os parâmetros de resistência do solo e de interacção solo-prego adoptados nas análises, espaçamentos de 2,5m (42%L) são estáveis somente para relações L/H \geq 0,8. Abaixo deste valor verifica-se a ruptura do muro. Para espaçamentos de 2m (33%L), este limite reduz-se para 0,67. Observa-se ainda que espaçamentos de 2m acarretam em deslocamentos no topo sensivelmente maiores aos observados com espaçamento de 1,5m (25%L), quando L/H < 0,8. Com base nesses resultados, os autores concordam com a sugestão Bruce e Jewell [2] em que o espaçamento vertical deva ser limitado a 25% do comprimento do prego.

O desenvolvimento das forças axiais nos pregos está apresentado na Figura 10, para diferentes alturas de escavação. O incremento na mobilização dos deslocamentos em $L/H=0,67$ e $L/H=0,57$, respectivamente, para os espaçamentos de 2,0m e 1,5m, geram, portanto, um aumento na parcela da carga transferida para os pregos.

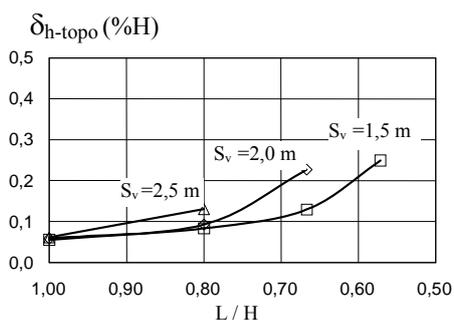


Figura 9 - Influência do espaçamento vertical (S_v) nos deslocamentos horizontais (δ_{h-topo}).

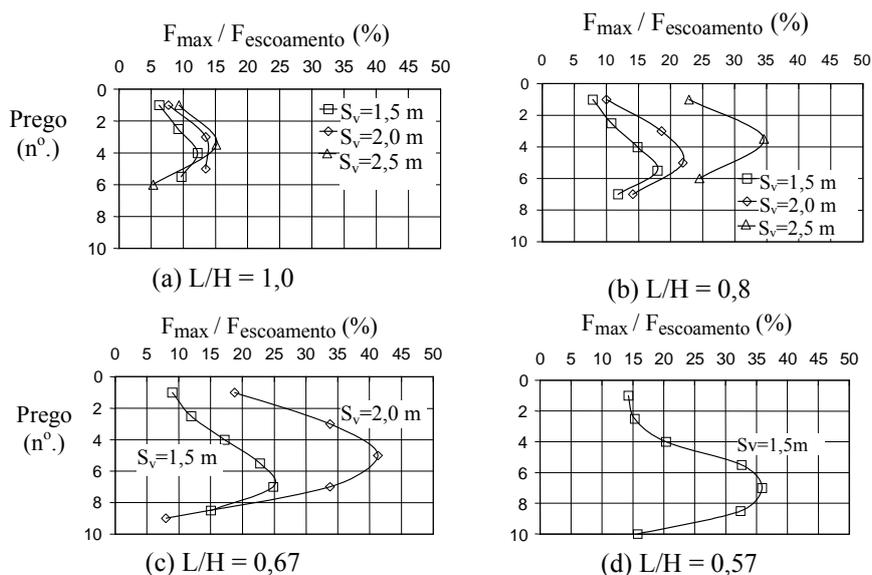


Figura 10 - Influência do espaçamento vertical (S_v) nas forças axiais máximas.

3.4 Inclinação dos pregos

A Figura 11 mostra a inclinação do prego pouco afecta os deslocamentos máximos no topo da escavação, para ângulos inferiores a 15° . Estes resultados são particularmente interessantes do ponto de vista de execução, pois inclinações da ordem de 10° facilitam os procedimentos de injeção de calda de cimento no campo. Para inclinações iguais a 30° , os deslocamentos são

significativamente mais elevados, assim como as cargas transmitidas aos pregos, conforme mostra a Figura 12. Nesta figura foram apresentados somente os resultados relativos a baixas relações de comprimento do prego e altura de escavação, por serem estas as condições mais críticas.

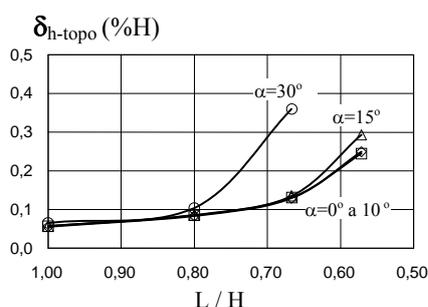


Figura 11 - Influência da inclinação do prego (α) nos deslocamentos horizontais (δ_{h-topo}).

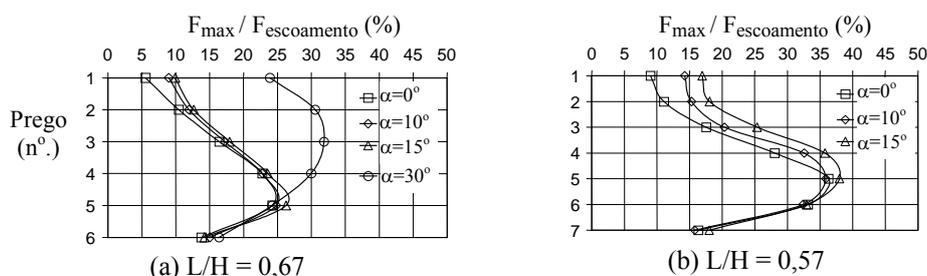


Figura 12 - Influência da inclinação do prego (α) nas forças axiais máximas.

CONCLUSÕES

Este trabalho examinou a influência dos parâmetros geométricos, relativos a projectos de estruturas estabilizadas com linhas de pregos injectados, nos deslocamentos horizontais no topo da escavação e no desenvolvimento de esforços nos pregos. Todas as análises tiveram como base uma escavação vertical, com superfície do terreno horizontal. Foram consideradas diferentes alturas de escavação (H), comprimentos de prego (L), espaçamentos verticais (S_v), inclinações dos pregos (α), diâmetros de furo (ϕ_{furo}) e da barra de aço ($\phi_{aço}$).

Os resultados mostram que a relação entre comprimento de grampo e altura de corte (L/H) e o espaçamento vertical (S_v) influenciam significativamente o comportamento tensão-deformação da estrutura pregada. Entretanto, para os casos analisados neste trabalho, verificou-se que o comportamento da estrutura não é influenciado pelos parâmetros geométricos desde que $L/H \geq 70\%$, $S_v \leq 25\%L$ e $\alpha \leq 15^\circ$. Convém ressaltar que nas análises foi admitido um comprimento constante de prego. Na prática é também usual adoptar comprimentos crescentes em profundidade.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] Bruce, D.A.; Jewell, R.A. (1986). Soil Nailing: Application and Practice. Part 1, Ground Engineering, 19(8), 10-15.
- [3] Bruce, D.A.; Jewell, R.A. (1987). Soil Nailing: Application and Practice. Part 2, Ground Engineering, 20(1), p. 21-33.
- [4] Gassler, 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.
- [5] Guilloux, A. et al. (1982) Soil Nailing: Practical Applications, Proc. Symp. on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, p. 389-397.
- [6] Cartier, G.; Gigan J.P. (1983). Experiments and Observations on Soil Nailing Structures, Proc. 8th European Conf. on S.M.F.E., Helsinki, Vol. 2, p. 473-476.
- [7] Mitchell, J.K.; Villet, W.C.B. (1987). Reinforcement of Earth Slopes and Embankments, NCHRP Report 290, USA Transp. Research Board, Washington D.C.
- [8] Juran, I.; Elias, V. (1987). Soil Nailed Retaining Structures: Analysis of Case Histories. Soil Improvement, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE Geotechnical Special Publication Nº 12, New York, N.Y, p. 232-244.
- [9] Itasca Consulting Group, Inc. (1996). FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 3.3, User's Manual, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [10] ABMS / ABEF (1999). Fundações: Teoria e Prática. 2a.edição, Editora PINI, 755p.
- [11] Springer, F.O. (2001). Estudos da Deformabilidade de Escavações com Solo Pregado. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 94p.
- [12] Springer, F.O. et al. (2001). Deformabilidade de Taludes Estabilizados com Solo Grampeado – III Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, ABMS, Rio de Janeiro, v. 1, p. 483-490.