

# COMPORTAMENTO DE UM MODELO DE LABORATÓRIO EM SOLO GRAMPEADO

## Behavior of a soil nailing model built in the laboratory

Fagner França\*

Benedito Bueno\*\*

**RESUMO** ó Este trabalho descreve o comportamento de um modelo de solo grampeado construído em laboratório, em uma caixa metálica rígida (1,80m x 1,55m x 1,80m) que assegura o estado plano de deformações e permite aplicação de sobrecarga. O modelo foi instrumentado e testado com o propósito de fornecer informações sobre o comportamento deste tipo de estrutura e obter sugestões para os parâmetros de projeto. A instrumentação incluiu a instalação de extensômetros elétricos nos grampos e medidas de deslocamento do modelo. As análises foram executadas para as condições de fim da construção e após a aplicação da sobrecarga. Foram executados ensaios de arrancamento seguidos da extração dos grampos ensaiados. Uma superfície potencial de ruptura foi sugerida para cada caso. Foi possível também avaliar o modelo em relação aos deslocamentos e forças nos grampos.

**SYNOPSIS** ó This paper presents a soil nailing model built in the laboratory. Model construction in a metallic rigid box (1.80m x 1.55m x 1.80m) ensured plane strain conditions. Model instrumentation and tests provided information about soil nailing behavior and design parameters. Instrumentation consisted of strain gages on nails and displacement transducers to monitor face and soil mass movements. We analyzed two different situations, before and after surcharge application, and suggested a potential slip surface for each situation. The last experimental step consisted of nail pullout tests followed by their complete extraction. Finally, we analyzed the prototype behavior related to displacements and load in nails.

**Palavras Chave** ó Solo grampeado, arrancamento, deslocamento do solo.

## 1 ó INTRODUÇÃO

Solo grampeado é uma técnica de estabilização de taludes e escavações. É uma solução de grande flexibilidade, adaptando-se a diferentes geometrias da obra e tipos de solo. Utiliza equipamentos reduzidos e apresenta custos competitivos comparado a outras técnicas. A técnica consiste na introdução de reforços (grampos) no solo após uma etapa de escavação, seguida da execução da face, comumente realizada com concreto projetado reforçado por uma tela metálica ou com adição de fibras. O principal objetivo da técnica de solo grampeado é restringir os deslocamentos do solo durante e após a escavação. Isto resulta em um talude mais seguro e estável.

Apesar das vantagens técnicas e econômicas e do vasto número de obras em solo grampeado já executadas no mundo, apenas um pequeno número de estruturas foi monitorado apropriadamente, especialmente no Brasil (Pitta et al., 2003). A instrumentação usual em obras

---

\* Mestre em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. E-mail: fagner@sc.usp.br

\*\* Professor Titular, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. E-mail: bsbueno@sc.usp.br

consiste em medições de deslocamentos horizontais do maciço reforçado através de inclinômetros (Azambuja et al., 2003; Décourt et al., 2003) e na utilização de extensômetros elétricos para medição dos esforços nos grampos (Feijó e Ehrlich, 2005).

O monitoramento de obras experimentais em escala real apresenta como desvantagem principal a heterogeneidade do maciço de solo, o que pode dificultar a análise dos resultados (Feijó e Ehrlich, 2005). Em vista disso, a utilização de modelos tornou-se uma prática comum (Kim et al., 1995; Raju et al., 1997). O estudo do comportamento de um modelo de solo grampeado permite maior controle das condições de contorno, tais como, a geometria do problema e as condições do solo. É importante frisar que embora tragam vantagens às pesquisas, por se ter um conhecimento mais profundo do seu comportamento, o estudo em modelos de laboratório peca por não reproduzir a estrutura do solo no campo. Apesar desta deficiência, os modelos de laboratório têm sido empregados para se avançar no entendimento fenomenológico da técnica de solo grampeado.

Nas obras de solo grampeado, os deslocamentos são inevitáveis e necessários, pois a mobilização do atrito entre o solo e o grampo requer alguma deformação do solo (Guilloux e Schlosser, 1982). Os deslocamentos horizontais e verticais diminuem com a profundidade e com a distância da face (Clouterre, 1991; Shen et al., 1981), mas há predomínio dos deslocamentos horizontais. O deslocamento horizontal máximo encontra-se comumente entre 0,1 e 0,4% da altura da contenção (Cartier e Gigan, 1983; Clouterre, 1991), valores suficientes para ativar o solo, pois deslocamentos horizontais da ordem de 0,1% da altura do anteparo são suficientes para levar o maciço de solo ao estado ativo. Outros autores relatam valores de 0,67% (Azambuja et al., 2003), o que demonstra a dificuldade em prever tais deslocamentos devido ao elevado número de fatores que podem influenciar neste valor.

As tensões cisalhantes desenvolvidas entre o solo e o grampo é que proporcionam a estabilização da obra de solo grampeado. Portanto, a resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo ( $q_s$ ), também conhecida como atrito unitário, tem papel fundamental nos projetos deste tipo de contenção de taludes e pode ser definida matematicamente como explicitado na Equação 1.

$$q_s = \frac{T}{\pi \phi L} \quad (1)$$

$q_s$  ó resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo (kPa);

$T$  ó força de arrancamento (kN);

$\phi$  ó diâmetro do grampo (m);

$L$  ó comprimento do grampo (m).

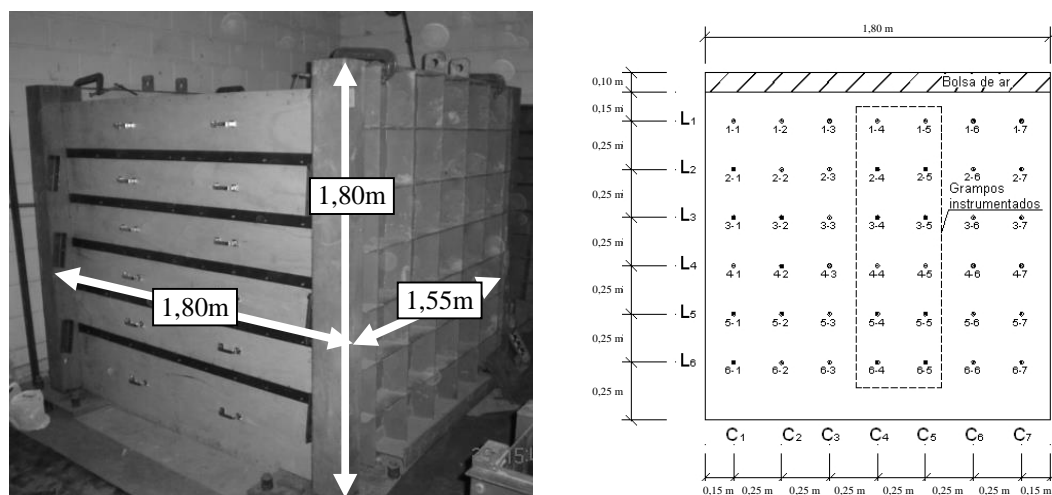
A determinação de  $q_s$  pode ser feita a partir de métodos empíricos nas fases preliminares do projeto. Clouterre (1991) propõe que os a resistência de interface seja estimada a partir da pressão limite obtida nos ensaios pressiométricos. Lazarte et al. (2003), por sua vez, apresenta correlações obtidas computacionalmente para a previsão inicial da resistência de interface, recomendadas pela *Federal Highway Administration*. Contudo, para a elaboração de projetos, esta estimativa inicial deve, preferencialmente, ser comprovada através de ensaios de arrancamento em campo. A falta desses ensaios em campo pode levar a casos de ruptura da obra por arrancamento dos grampos (Guilloux e Schlosser, 1982). A definição da superfície de ruptura e as quantificações da resistência de interface e das deformações horizontais são fatores que devem ser adequadamente definidos para elaborar projetos seguros e econômicos.

Diante do exposto, verifica-se a necessidade de trabalhos que utilizam a técnica de solo grampeado em solos tropicais, típicos do Brasil. Nesse contexto, este trabalho apresenta a construção de um modelo no Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. O modelo foi construído em solo laterítico de acordo com as recomendações de projeto encontradas na literatura (Clouterre, 1991; Bruce e Jewell, 1987) e instrumentado com extensômetros elétricos nos grampos e medidas de deslocamentos. Foram executados ensaios de arrancamento seguidos da extração completa dos grampos. O objetivo deste trabalho abrange a obtenção de informações sobre o comportamento desse tipo de estrutura (deslocamento do maciço, superfície de ruptura potencial), de sugestões para os parâmetros de projeto e de definições relacionadas ao arrancamento dos grampos (valores máximos de resistência ao arrancamento e deslocamento para a sua total mobilização). Este artigo discute os principais resultados obtidos na pesquisa.

## 2 6 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 6 Caixa de ensaio

O modelo em solo grampeado foi construído em uma caixa metálica rígida, com 1,80 m de altura, 1,55 m de largura e 1,80 m de comprimento (Figura 1). A face frontal da caixa de ensaio é formada por segmentos horizontais de madeira, com 50 mm de espessura e 250 mm de altura, exceto pelo segmento inferior, que possui 425 mm de altura. Após a compactação do solo no interior da caixa de ensaio, a remoção dos segmentos frontais simulou as etapas sucessivas de escavação.



**Fig. 1 6** Caixa de ensaio utilizada nesta pesquisa (esquerda) e distribuição dos grampos em seu interior (direita).

As paredes laterais da caixa de ensaio foram forradas por um par de geomembranas entremeadas com graxa para reduzir a influência das paredes laterais da caixa de ensaio. A seção central foi tomada como representativa do comportamento da estrutura em solo grampeado.

Os grampos consistiam de barras de aço (CA-50), com 1,3 m de comprimento e diâmetro nominal de 8 mm, envoltas em calda de cimento. Para tanto, os grampos foram instalados em

furos com 26 mm de diâmetro, inclinação de 10° com a horizontal e preenchidos com calda de cimento sob ação da gravidade. O espaçamento entre grampos, vertical e horizontal, foi mantido constante e igual a 250 mm. A Figura 1 também apresenta a distribuição dos grampos na caixa de ensaio com destaque para as duas seções instrumentadas com extensômetros elétricos (C4 e C5) de forma a registrar as deformações e forças nos grampos. Os grampos foram numerados segundo a sua localização na caixa de ensaio, cujo primeiro valor corresponde à linha e o segundo refere-se à coluna na qual o grampo se encontra.

Para simular carregamentos externos aplicou-se uma sobrecarga no topo do modelo usando uma bolsa de ar comprimido. O programa experimental previu a aplicação de uma pressão de 50 kPa.

O modelo representa um protótipo em solo grampeado com altura de 6,8 m. Isto foi obtido através da consideração de um fator de escala igual a quatro. As dimensões simuladas foram baseadas nas recomendações de projeto de Bruce e Jewell (1987) e Clouterre (1991). A comparação entre as propriedades do modelo e aquelas obtidas dos autores citados acima são apresentadas no Quadro 1.

**Quadro 1** Comparação entre as propriedades do modelo e as recomendações dadas por Bruce e Jewell (1987) e Clouterre (1991).

Propriedade	Dimensão no modelo (dimensão simulada)	Bruce e Jewell (1987)	Clouterre (1991)
Espaçamento ( $S_h=S_v$ )	0.25 m (1.0 m)	0.7 a 2.2 m	1m2 $\ddot{O}$ Sv.Sh $\ddot{O}$ 6m2
L/H	0.80	0.50 a 0.80	0.80 a 1.20
Diâmetro do furo	27.0 mm (108.0 mm)	49 a 127 mm	200 a 600 mm
Diâmetro da barra de aço	8.0 mm (32.0 mm)	16 a 57,2 mm	-
Inclinação do grampo	10°	10° a 15°	5° a 20°

Nota:  $S_h$  = espaçamento horizontal entre grampos;  $S_v$  = espaçamento vertical entre grampos; L = comprimento dos grampos; H = altura máxima do muro em solo grampeado.

## 2.2 ó Solo

O solo utilizado na pesquisa foi uma areia argilosa de média plasticidade ou SC, segundo o *Unified Soil Classification System* (USCS). Os resultados destes ensaios são resumidos no Quadro 2. A Figura 2 apresenta a curva granulométrica e a curva de compactação (teor de umidade ótimo igual a 16,0% e peso específico seco máximo igual a 17,8 kN/m³).

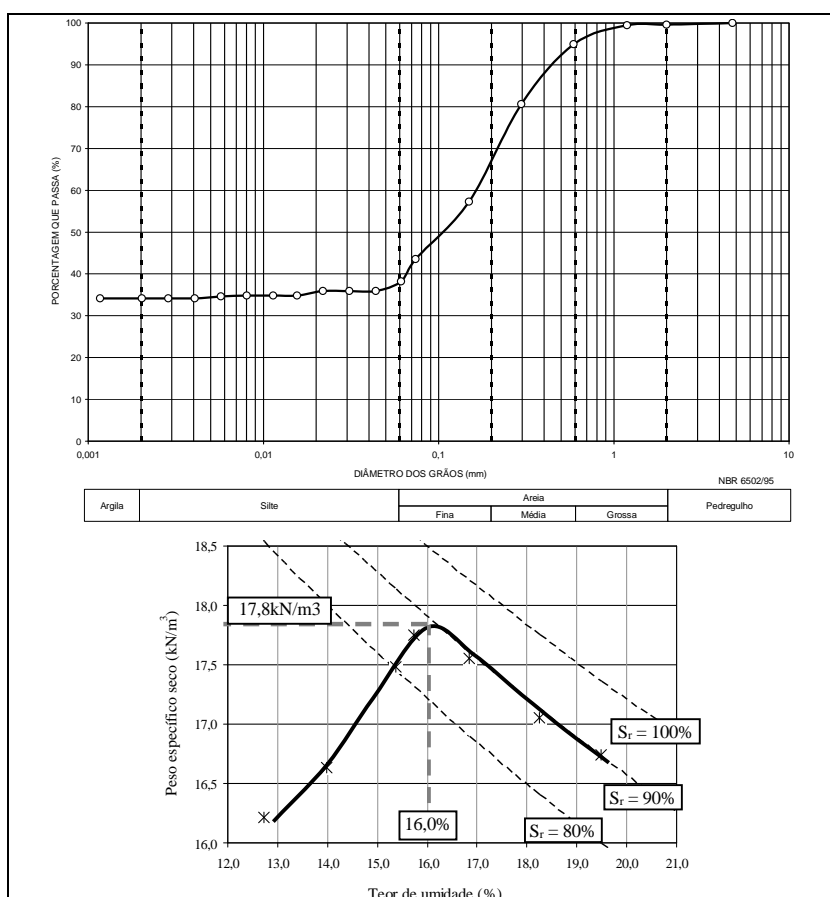
## 2.3 ó Instrumentação

A instrumentação consistiu na instalação de extensômetros elétricos ao longo dos grampos em quatro posições diferentes (Figura 3a) e em medidas de deslocamento da face durante e após a construção. Os extensômetros elétricos foram instalados na lateral das barras de aço para reduzir a influência de possíveis momentos fletores (Figura 3b). Durante a construção, os deslocamentos da face foram medidos através de relógios comparadores instalados na superfície do modelo

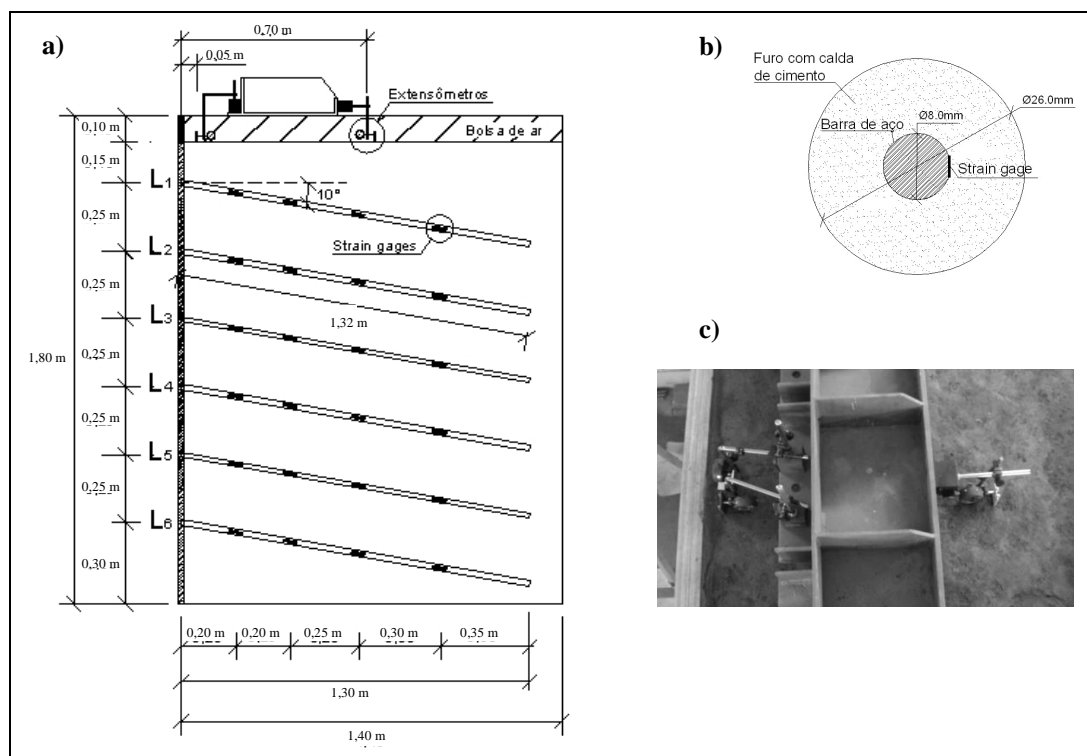
(Figura 3c). A 50 mm da face foram dispostos dois medidores de deslocamento para determinar o deslocamento horizontal e vertical da face. Um terceiro medidor de deslocamento foi posicionado a 750 mm da face para medida dos deslocamentos horizontais. Após o término da construção, os deslocamentos da face foram tomados através de *Linear Variable Displacement Transducers* (LVDTs).

**Quadro 2** ó Resultados dos ensaios de caracterização e compactação (energia normal) do solo utilizado nesta pesquisa.

Propriedade	Valor
Peso específico dos sólidos ( $\text{kN/m}^3$ )	26,4
Limite de liquidez (%)	39
Índice de plasticidade (%)	10
Peso específico seco máximo ( $\text{kN/m}^3$ )	17,8
Teor de umidade ótimo (%)	16,0
Teor de areia (%)	62,0
Teor de silte (%)	4,0
Teor de argila (%)	34,0
Classificação SUCS	SC



**Fig. 2** ó Curva granulométrica (acima) e curva de compactação com energia normal (abaixo) obtidos para o solo utilizado nesta pesquisa.



**Fig. 3** ó a) Localização dos extensômetros elétricos ao longo dos grampos instrumentados (colunas C4 e C5). b) Posição do extensômetros elétricos na barra de aço que forma o grampo. c) Detalhe da disposição dos medidores de deslocamento na superfície do modelo.

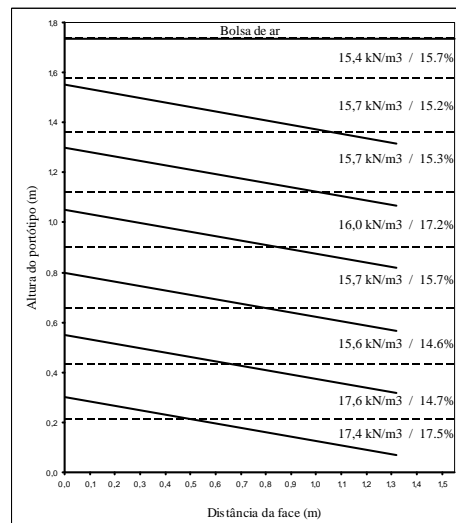
## 2.4 ó Construção do modelo

O primeiro estágio da execução do modelo foi o enchimento da caixa de ensaio com solo compactado. A compactação do maciço foi efetuada com soquete manual e resultou nos valores (peso específico seco e teor de umidade) mostrados na Figura 4.

A seqüência executiva da construção do modelo reproduziu a prática comum em obra de solos grampeados, ou seja, escavação, instalação dos grampos e execução da face. A remoção sucessiva dos segmentos de madeira simulou a etapa de escavação.

A instalação dos grampos consistiu na perfuração do maciço com trado manual de 25 mm de diâmetro, seguida da introdução da calda de cimento no furo e da barra de aço. Introduziu-se a calda de cimento no furo sob ação da gravidade, por meio de um tubo o que garantiu que toda a extensão do furo fosse preenchida. A calda foi produzida com cimento de alta resistência inicial e água, com fator água-cimento igual a 0,5 em peso. A resistência a compressão uniaxial da calda de cimento atingiu 45 MPa aos sete dias de cura submersa e foi mensurada a partir de ensaios em corpos de prova moldados durante a aplicação da calda de cimento. A calda de cimento apresentou boa trabalhabilidade até duas horas após o seu preparo, tempo suficiente para a execução de uma linha de grampos. Dois centralizadores instalados em cada barra de aço

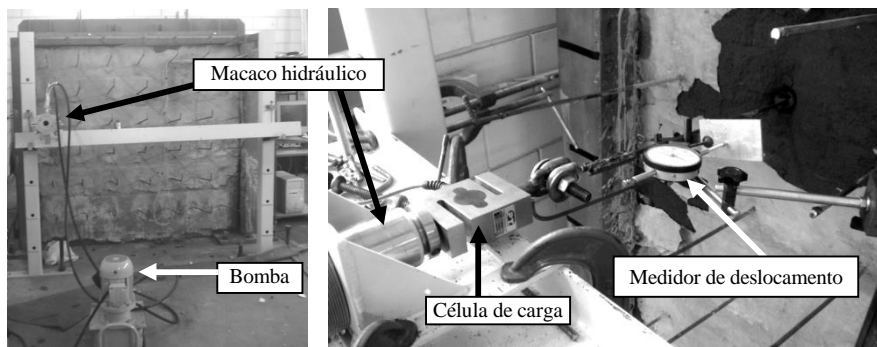
garantiram um recobrimento homogêneo de calda de cimento (9,5 mm). A face exposta foi revestida apenas com aplicação de calda de cimento com o objetivo de conter erosões superficiais e de reduzir a perda de umidade do maciço de solo. Aplicou-se uma sobrecarga de 50 kPa três dias após o término da construção do modelo em solo pregado, ou seja, com tempo suficiente para a cura da calda de cimento da última linha de grampos.



**Fig. 4** ó Peso específico seco e teor de umidade para cada camada compactada.

## 2.5 ó Ensaios de arrancamento

Os ensaios de arrancamento foram executados com velocidade média de 2,3 kN/min após a aplicação da sobrecarga (50 kPa). Para isto, foi montado um pórtico metálico rígido fixo ao chão, sem nenhum contato com o modelo, onde todo o sistema de medição foi acoplado. Nestes ensaios aplicou-se força de tração com um macaco hidráulico e registraram-se deslocamentos ao longo do tempo, com o uso de medidor de deslocamento (Figura 5) até atingir um valor residual da força de arrancamento. A extração completa dos grampos foi feita em seguida e visou verificar a redistribuição dos esforços no interior do maciço com a ausência de cada grampo.

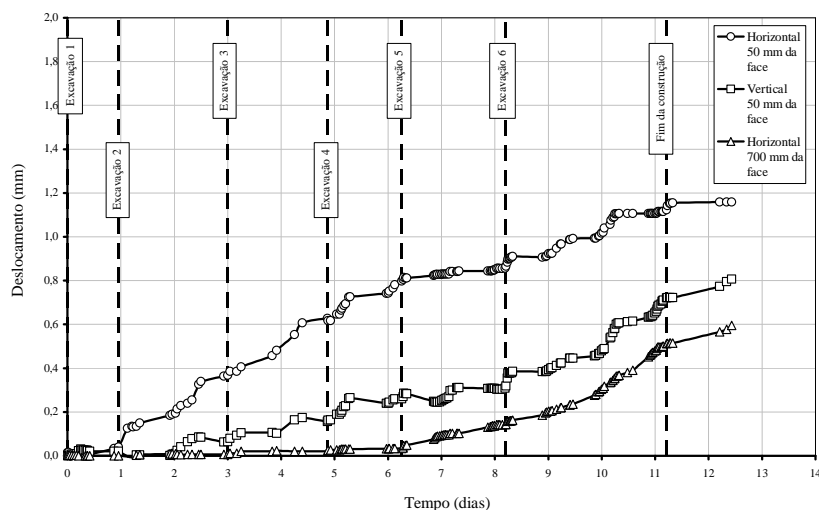


**Fig. 5** ó Equipamentos utilizados nos ensaios de arrancamento (vista geral à esquerda e vista detalhada à direita).

### 3.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1.6 Deslocamentos do solo

As medidas de deslocamentos durante a construção do modelo foram realizadas a partir de extensômetros mecânicos instalados na superfície. A evolução dos deslocamentos é apresentada na Figura 6 que permitiu o cálculo da taxa de variação dos deslocamentos, em mm/dia (Quadro 3).



**Fig. 6** 6 Evolução dos deslocamentos medidos durante a construção do modelo em solo grampeado.

**Quadro 3** 6 Taxa média de incremento dos deslocamentos medidos (mm/dia).

Etapa	$d_h$ 50 mm	$d_v$ 50 mm	$d_h$ 750 mm	Tempo (dias)
Linha L1	0,027	0,021	0,000	0,96
Linha L2	0,161	0,022	0,002	2,04
Linha L3	0,139	0,049	0,008	1,86
Linha L4	0,123	0,075	0,009	1,39
Linha L5	0,030	0,025	0,056	1,94
Linha L6	0,088	0,137	0,123	3,02

Nota: Linha  $L_i$  = execução da linha de grampos de índice  $i$ ;  $d_h$  50 mm = taxa de incremento dos deslocamentos horizontais a 50 mm da face;  $d_v$  50 mm = taxa de incremento dos deslocamentos verticais a 50 mm da face;  $d_h$  750 mm = taxa de incremento dos deslocamentos horizontais a 750 mm da face; Tempo = tempo para a execução da etapa.

Os deslocamentos horizontais a 50 mm da face apresentaram um pequeno incremento durante a execução da primeira linha de grampos (0,026 mm) e o maior acréscimo durante a construção da segunda linha de grampos (0,161 mm). A taxa de crescimento dos deslocamentos horizontais a 50 mm da face foi reduzida à medida que cada linha de grampo foi executada, exceto pela última linha ( $L_6$ ), cuja execução provocou um deslocamento de 0,088 mm no maciço, devido, provavelmente, à sua maior profundidade de escavação (425 mm). Ao final da



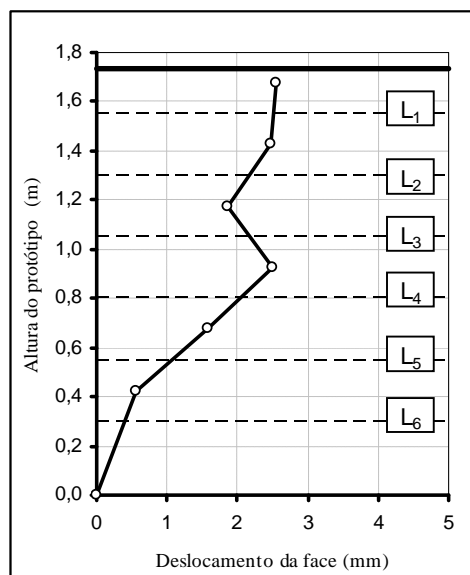
construção, o deslocamento horizontal a 50 mm da face atingiu 1,123 mm e 1,159 mm 29 horas depois.

Os deslocamentos verticais a 50 mm da face apresentaram taxas de incremento crescentes até a execução da linha L<sub>4</sub>. A construção da linha L<sub>5</sub> impôs um deslocamento vertical de 0,025 mm. Contudo, a execução da linha L<sub>6</sub> resultou num deslocamento vertical de 0,137 mm. O deslocamento vertical a 50 mm da face atingiu 0,721 mm ao final da construção e 0,807 mm 29 horas depois.

Os deslocamentos horizontais a 750 mm da face também apresentaram incrementos crescentes à medida que o modelo foi executado. Contudo, o início desses deslocamentos ocorreu, expressivamente, apenas a partir da quinta etapa de escavação, atingindo 0,512 mm ao final da construção e 0,596 mm 29 horas depois.

A comparação entre as leituras de deslocamento horizontal (50 mm e 750 mm da face) mostrou que os maiores valores ocorrem no topo da obra, junto à face. Ao final da construção, os deslocamentos verticais a 50 mm da face foram da ordem de 64% dos deslocamentos horizontais neste ponto. Este comportamento é coerente com as observações relatadas na literatura (Clouterre, 1991; Shen et al., 1981). O deslocamento horizontal máximo na face corresponde a 0,07% da altura do modelo. A estimativa inicial para este valor era de 0,1 a 0,4% da altura do muro (Clouterre, 1991; Bruce e Jewell, 1987).

Os deslocamentos horizontais da face após a aplicação da sobrecarga foram medidos com a utilização de LVDTs em seis alturas diferentes e tomando a seção central como representativa do modelo. O maior valor medido ocorreu no topo do modelo (Figura 7) e atingiu 2,540 mm.

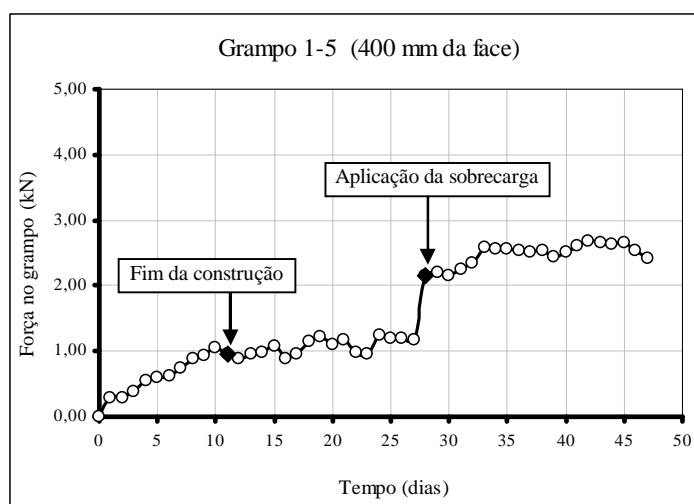


**Fig. 7** Deslocamentos horizontais da face após a aplicação da sobrecarga (50 kPa).

### 3.2 Força nos grampos

Um exemplo ilustrativo da evolução da força de tração nos grampos instrumentados ao longo do tempo, acompanhada através das leituras dos extensômetros elétricos, é apresentado na Figura 8. Nota-se que a força de tração cresce com a execução da escavação e que permanece aproximadamente constante até aplicação da sobrecarga, quando apresenta um crescimento

súbito. Pequenas oscilações ocorreram ao longo do tempo devido às operações efetuadas no maciço.

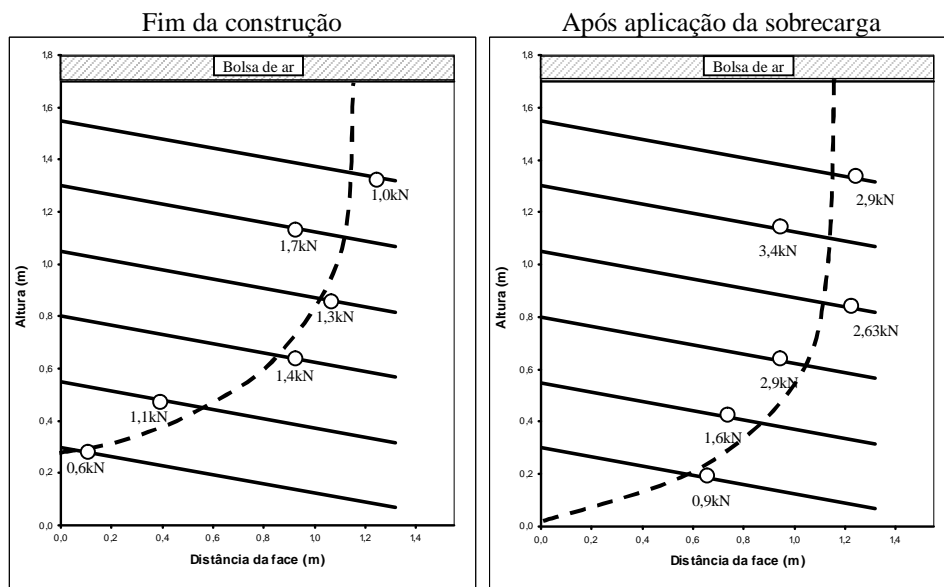


**Fig. 8** Gráfico típico da evolução da força de tração nos grampos instrumentados (grupo 1-5) para o extensômetro elétrico localizado a 400 mm da face.

A instrumentação com extensômetros elétricos permitiu a verificação dos esforços de tração em todos os grampos instrumentados. Na fase de construção, este valor atingiu um máximo de 1,7 kN, na linha  $L_2$ . Nesta mesma linha registrou-se o maior esforço de tração após aplicação da sobrecarga (3,4 kN). Verificou-se ainda que a linha inferior ( $L_6$ ) foi pouco solicitada nas duas situações analisadas (antes e após a aplicação da sobrecarga). A aplicação da sobrecarga levou a um aumento da força no grampo da linha  $L_1$  de cerca de três vezes em relação ao valor verificado ao final da construção. Esse aumento foi da ordem de duas vezes para as linhas  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$  e de cerca de 50% para os grampos das linhas  $L_5$  e  $L_6$ .

As superfícies potenciais de ruptura para as duas situações apresentaram a forma de uma espiral logarítmica e permaneceram com uma forma semelhante nas duas situações analisadas, porém mais rasa para antes da aplicação da sobrecarga. Este comportamento foi esperado devido à presença da camada mais compacta na base do modelo com cerca de 430 mm de espessura. A determinação da superfície potencial de ruptura é um parâmetro essencial para projetos, pois condiciona a análise da estabilidade da obra. Comparada com a superfície de ruptura simplificada, sugerida pela norma ABNT/NBR-9286 para terra armada, percebe-se que as superfícies sugeridas na Figura 9 são mais profundas, interceptando o topo do maciço a uma distância entre 0,6 e 0,7H, ao invés do valor 0,3 H recomendado pela referida norma, considerando H como a altura do maciço contido.

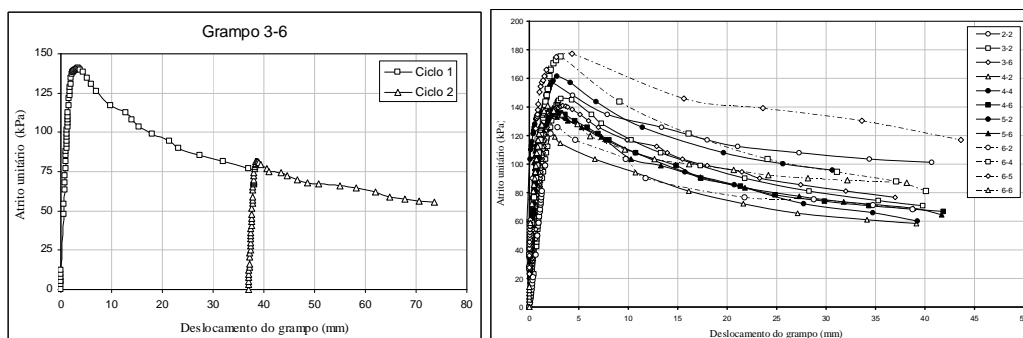
A extração completa dos grampos resultou em um incremento de força nos demais grampos da ordem de 1,0 kN, com um valor máximo de 4,2 kN na linha  $L_2$ . As maiores variações foram detectadas próximas à face e nos grampos superiores (linhas  $L_1$  e  $L_2$ ).



**Fig. 9** 6 Superfície potencial de ruptura sugerida para as duas situações analisadas: fim da construção (esquerda) e após aplicação da sobrecarga (direita). São indicados os pontos de máxima força de tração nos grampos e os seus respectivos valores.

### 3.3 6 Ensaios de arrancamento

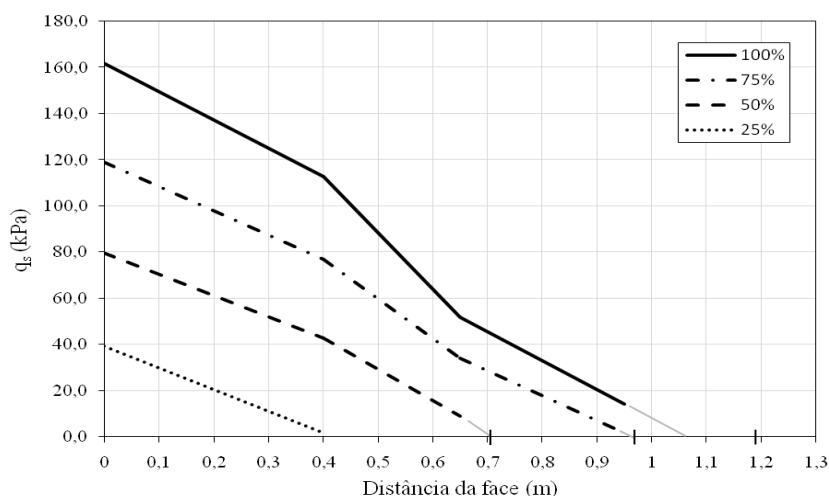
Os ensaios de arrancamento foram executados em 12 grampos (4-4, 6-4 e 6-5 e grampos das colunas  $C_2$  e  $C_6$ , exceto 1-2, 1-6 e 2-6). A Figura 10 apresenta um resultado típico (grampo 3-6), com os dois ciclos de carregamento e o primeiro ciclo de carregamento em todos os ensaios executados.



**Fig. 10** 6 Resultado típico do ensaio de arrancamento (grampo 3-6) à esquerda e primeiro ciclo de carregamento dos ensaios de arrancamento realizados no modelo à direita.

O arrancamento de grampos instrumentados (4-4, 6-4 e 6-5) permitiu verificar a distribuição

das forças nos grampos ao longo do ensaio. A Figura 11 apresenta um resultado típico da evolução da força de arrancamento durante o ensaio, no qual são apresentados quatro níveis de carregamento referentes ao atrito lateral do grampo 4-4 (25, 50, 75 e 100% de  $q_s$ ). A resistência ao cisalhamento de interface reduziu-se a partir da face do modelo, atingindo valores nulos na próximos à extremidade do grampo quando a força máxima de arrancamento foi aplicada.



**Fig. 11** Resultado típico do ensaio de arrancamento dos grampos instrumentados (grampo 4-4). Apresentam-se quatro níveis de carregamento em relação à resistência ao cisalhamento de interface.

O Quadro 4 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de arrancamento. Os grampos situados na linha  $L_6$  foram considerados isoladamente, pois estão inseridos na camada mais inferior do maciço, mais compacta, e fornecem valores que não podem ser comparados aos grampos inseridos na camada menos compacta.

**Quadro 4** Resultados dos ensaios de arrancamento.

Grampo	$T_{\text{máx}}$ (kN)	Desl. (mm)	$q_s$ (kPa)	$q_{70\text{mm}}$ (kPa)	$\frac{q_s}{q_{70\text{mm}}}$
2-2	17,6	2,22	157,1	93,8	1,67
3-2	16,3	3,18	145,9	63,4	2,30
3-6	15,8	3,38	140,9	56,3	2,50
4-2	13,7	2,13	122,5	50,9	2,41
4-4(*)	18,1	2,78	161,7	---	---
4-6	15,2	2,71	135,9	54,5	2,49
5-2	15,5	1,58	138,3	39,3	3,52
5-6	14,9	2,79	133,0	53,6	2,48
6-2	14,1	2,85	125,8	65,2	1,93
6-4	19,6	3,15	175,1	57,5	3,04
6-5	19,8	4,32	176,8	85,7	2,06
6-6	15,8	1,86	141,0	73,2	1,93

Nota:  $T_{\text{máx}}$  = força máxima de arrancamento durante o ensaio; Desl. = deslocamento do grampo para atingir a força máxima de arrancamento;  $q_s$  = resistência ao cisalhamento de interface;  $q_{70\text{mm}}$  = tensão de cisalhamento de interface para um deslocamento do grampos igual a

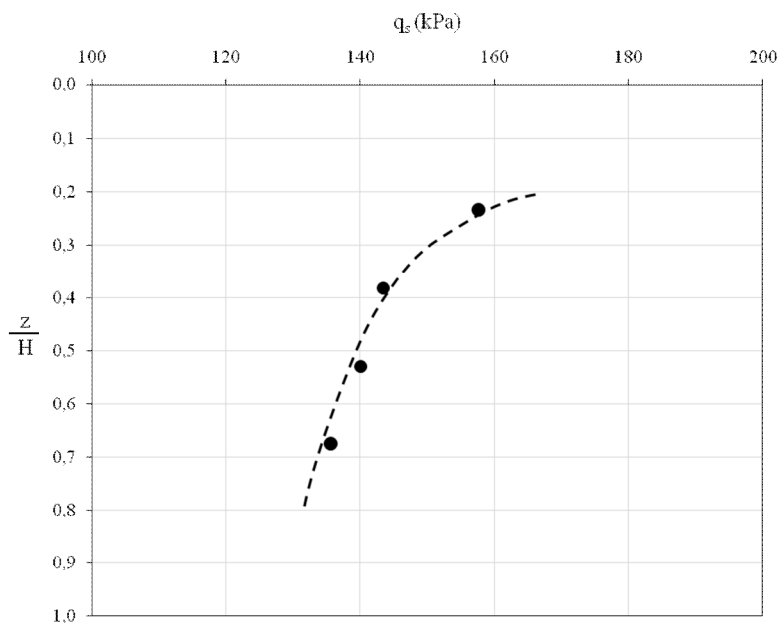
70 mm. (\*) Este ensaio não atingiu 70 mm de deslocamento do grampo.

As resistências ao cisalhamento de interface ( $q_s$ ) foram obtidas a partir dos valores de pico das curvas força de arrancamento *versus* deslocamento dos grampos. Para os grampos inseridos na camada superior o valor médio de  $q_s$  foi de 141,9 kPa e para os grampos da linha L<sub>6</sub> foi igual a 154,7 kPa. Contudo, de forma geral, as resistências ao cisalhamento de interface dos grampos inseridos nas duas camadas apresentaram valores com a mesma ordem de grandeza. Não foi possível quantificar precisamente a variação de  $q_s$  devido ao grau de compactação do solo. Verifica-se, portanto, a dificuldade em prever tais valores devido às diferentes condições de contorno (tipo e condições do solo e a geometria da obra, por exemplo). Em termos estatísticos, a média obtida a partir dos resultados dos ensaios não é apropriada para a definição do  $q_s$  de projeto devido à grande variabilidade dos dados. Sugere-se a adoção de um tratamento estatístico apropriado para a definição deste parâmetro.

Os deslocamentos necessários para a mobilização total da resistência ao cisalhamento de interface (pico da curva força de arrancamento *versus* deslocamento do grampo) foram pequenos, da ordem de 2 a 4 mm, com valor médio de 2,75 mm. Este valor corresponde a 0,21% do comprimento do grampo.

O Quadro 4 também apresenta as tensões de cisalhamento de interface residual, correspondente a 70 mm de deslocamento do grampo ( $q_{70\text{mm}}$ ) e a relação entre  $q_s$  e  $q_{70\text{mm}}$ . O valor médio dessa relação foi 2,39 e para  $q_{70\text{mm}}$  foi de 63,0 kPa, relativo a todos os ensaios.

A Figura 12 apresenta os valores médios de resistência ao cisalhamento de interface obtidos dos ensaios de arrancamento executados sob as mesmas condições (grampos inseridos na camada menos compacta e aplicação de sobrecarga de 50 kPa) em função do parâmetro  $z/H$ , onde  $z$  é a profundidade do grampo e  $H$  é a altura total do modelo. Embora autores como Clouterre (1991) tenham sugerido que os valores de atrito unitário sejam constantes ao longo da profundidade do muro, isto não foi observado neste caso, como se pode notar na análise dos resultados apresentados na Figura 12. A explicação sugerida para se admitir valores de atrito unitário constantes com a profundidade tem sido creditada à dilatância do solo. O solo superficial pode dilatar-se, no entanto, à medida que a profundidade cresce, crescem também as tensões confinantes que restringem a dilatância a ponto de impedi-la abaixo de certa profundidade. A dilatância impedida gera um acréscimo de tensão confinante na superfície do grampo. O decréscimo da dilatância com a profundidade seria então compensado pelo acréscimo da tensão confinante sobre o grampo. Este é um argumento simplista, pois ao se escavar a face, permite-se a expansão do maciço, que caminha para o campo ativo. Isto gera uma intensa redistribuição das tensões que se intensifica no entorno da superfície hipotética de ruptura. Como as tensões verticais são afetadas pela intensidade do arqueamento, suas ações sobre os grampos dependem também dos fatores que determinam a ação do arqueamento, entre eles citam-se os parâmetros de resistência do solo e de suas evoluções com os deslocamentos do maciço. Disto resulta uma enorme dificuldade de se prever com segurança valores de atrito unitário em maciços de solo grampeado.



**Fig. 12** Resistência ao cisalhamento de interface média *versus* profundidade dos grampos.

#### 4.6 CONCLUSÕES

Avaliou-se o comportamento de um modelo de solo grampeado construído em laboratório. As principais conclusões que podem ser estabelecidas a partir dos resultados são:

- Durante a construção do modelo, os maiores deslocamentos horizontais ocorreram no topo, próximo à face (0,07% da altura do modelo). O maior incremento ocorreu durante as etapas que compreendem a execução da segunda linha de grampos. Os deslocamentos horizontais a 750 mm da face foram 48,5% menores que aqueles obtidos na face. Os deslocamentos verticais máximos da face atingiram cerca de 64% do deslocamento horizontal máximo. Após a aplicação da sobrecarga (50 kPa), o deslocamento horizontal máximo aumentou 119%.
- As superfícies potenciais de ruptura inferidas das forças de tração calculadas a partir das deformações dos extensômetros elétricos apresentaram a forma de uma espiral logarítmica e se mostraram com forma semelhante para as duas situações estudadas (antes e após a aplicação da sobrecarga). Contudo, a superfície sugerida para antes da sobrecarga apresentou-se mais rasa, com pouca inserção na camada de solo mais compacta.
- Quando comparadas com as superfícies potenciais de ruptura simplificadas apresentadas pela ABNT/NBR 9286 sobre terra armada, as superfícies obtidas são mais profundas, distanciando-se da face, na superfície do maciço reforçado, de uma distância entre 0,6 e 0,7H ao invés de 0,3H sugeridos por estas especificações.
- Os ensaios de arrancamento forneceram valores de  $q_s$  de mesma ordem de grandeza de valores citados na literatura consultada (média igual a 141,9 kPa para a camada superior e 154,7 kPa para a camada inferior, mais compacta). A mobilização total de  $q_s$  ocorreu com pequenos deslocamentos dos grampos (2 a 4 mm).
- A execução dos ensaios em dois ciclos mostrou-se aplicável quando existem restrições no curso máximo do equipamento de medição de deslocamentos. As curvas consecutivas

produzidas nos dois ciclos de carregamento apresentaram boa concordância. Porém, recomenda-se que o primeiro ciclo permita a verificação da força de arrancamento máxima.

- A extração completa dos grampos resultou num incremento da ordem de 1 kN. As maiores variações foram detectadas próximas à face, nos grampos superiores (linhas L<sub>1</sub> e L<sub>2</sub>).

## 5 ó AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelo suporte técnico a esta pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro.

## 6 ó REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1986) NBR 9286, Terra armada, Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 20p.
- Azambuja, E.; Strauss, M.; Silveira, F.G. (2003) *Sistemas de contenção em solo grampeado na cidade de Porto Alegre, RS*. In. Workshop Solo Grampeado ó Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, São Paulo, p. 21-34.
- Bruce, D.A.; Jewell, R.A. (1987) *Soil Nailing: Application and Practice - part 2*. Ground Engineering, v. 20:14, p. 21-33.
- Cartier, G.; Gigan, J.P. (1983) *Experiments and Observations on Soil Nailing Structures*. Proceedings of 8<sup>th</sup> European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ECSMFE, Helsinki, p. 473-476.
- Clouterre (1991). *Recommendations Clouterre*, Project National Clouterre, Presses de l'ENPC, Paris, 269 p.
- Décourt, L.; Zirlis, A.; Pitta, C.A. (2003) *Projeto e comportamento de escavações estabilizadas com solo grampeado em Salvador*. In. Workshop Solo Grampeado ó Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, São Paulo, p. 105-120.
- Feijó, R.L. & Ehrlich, M. (2005) *Resultados do monitoramento de uma obra experimental em solo grampeado*. In. Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, IV COBRAE, Salvador, p. 633-642.
- Guilloux, A. e Schlosser, F. (1982) *Soil Nailing: Practical applications*. In. Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, p. 389-397.
- Kim, D.; Juran, I.; Nasimov, R.; Drabkin, S. (1995) *Model study on the failure mechanism of soil-nailed structure under surcharge loading*. Geotechnical Testing Journal, v. 18:04, p. 421-430.
- Lazarte, C.A.; Elias, V.R.; Espinoza, D.; Sabatini, P.J. (2003) *Geotechnical Engineering Circular No 7, Soil Nail Walls*. Federal Highway Administration, Office of Tech. Application, Report No FHWA01IF-03-017.
- Pitta, C.A.; Souza, G.J.T.; Zirlis, A. (2003) *Solo grampeado: alguns detalhes executivos ó ensaios ó casos de obras*. In. Workshop Solo Grampeado ó Projeto, Execução, Instrumentação e Comportamento, São Paulo, p. 1-20.

- Raju, G.V.R.; Wong, I.H.; Low, B.K. (1997) *Experimental nailed soil walls*. Geotechnical Testing Journal, v. 20:01, p. 90-102.
- Shen, C.K.; Bang, S. Romstad, J.M.; Kulchin, L.; Denatale, J.S. (1981) *Field Measurements of an Earth Support System*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v. 107, p. 1625-1642.