

EXPERIÊNCIA COM SOLO GRAMPEADO NO BRASIL - 1970-1993

EXPERIENCE WITH SOIL NAILING IN BRAZIL: 1970-1993

J. A. R. Ortigão, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro
A. C. Zirlis, Eng. Civil
Genco Engenharia Geotécnica Ltda
E. M. Palmeira, Ph.D.
Universidade de Brasília

RESUMO

Este artigo versa sobre uma das técnicas de reforço de solos em que se empregam inclusões semi-rígidas denominadas *grampos*, empregando-se a denominação *solo grampeado* em português. Esta técnica tem sido aplicada de maneira intuitiva desde 1970 em taludes de barragens, como Xavantes, SP, emboque do túnel 5 do Sistema Cantareira e taludes da Rodovia dos Imigrantes, em São Paulo. Na sua fase atual, análises de estabilidade em que se simula o efeito do reforço têm levado a obras bastante econômicas. Apresenta-se um histórico do desenvolvimento do método, similaridades e diferenças com técnicas tradicionais de contenção e alguns exemplos de obras no Brasil.

ABSTRACT

This paper addresses soil reinforcement techniques employing semi-rigid inclusions called nails, therefore named soil nailing. It has been intuitively applied for the first time in Brazil back in 1970 by tunneling contractors in São Paulo. Since then, several soil nailed structures have been constructed with success. The development of methods of analysis in Europe and North America is reviewed and its application in Brazil have led to more economical and safer structures. This paper briefly presents the historical development and the use of the soil nailing in Brazil. Differences and similarities with traditional techniques and some examples are discussed.

1. INTRODUÇÃO

O solo grampeado é uma técnica bastante prática e comprovadamente eficiente para a estabilização de taludes de escavações através do reforço do solo "in situ". Foi empregada no Brasil de maneira intuitiva por construtores de túneis em 1970, mas esta experiência bem sucedida não foi devidamente divulgada. Em 1972 foi empregada pela primeira vez na França com o nome de *sol cloué* (Toudic, 1975) e, desde então, tem sido aplicada na Alemanha (Stocker et al., 1979 e 1990; Gässler, 1991), Canadá (Fannin et al., 1991; Bowden, 1991; e Ortigão et al., 1992), EUA (Shen et al., 1981; e Thompson et al., 1990) França (Clouterre, 1991; e

Plumelle et al., 1990) e Grã-Bretanha (Bruce et al., 1986), entre outros.

Suas origens são semelhantes às do NATM (*New Austrian Tunneling Method*) para a construção de túneis (Fig.1). Consiste na aplicação de um suporte flexível para permitir que o terreno se deforme ocorrendo uma região plastificada no entorno da escavação, que pode ser reforçada através de chumbadores. Ao contrário, no método convencional de execução de túneis, com *suporte rígido*, os deslocamentos do terreno são impedidos por um revestimento rígido que, por sua vez, mobiliza no maciço esforços muito maiores e é uma solução mais cara.

Pode-se afirmar, então, que uma escavação de solo grampeado está para o NATM da mesma forma que a solução convencional de túneis se compara a uma cortina ancorada.

O grampeamento do solo consta de um reforço obtido através da inclusão de elementos resistentes à flexão composta, denominados *grampos*, que podem ser barras de aço, barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular, micro-estacas, ou em casos especiais, estacas. Os grampos são instalados sub-horizontalmente, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento. Aplicações típicas tanto na estabilização de taludes quanto em escavações constam na Figura 2. No primeiro caso, (Fig.2a) pode-se afirmar que o uso de micro-estacas ou estacas-raiz (Brasfond Fundações) é uma aplicação de solo grampeado em que o reforço é primordialmente solicitado ao cisalhamento. No segundo (Fig.2b), como no escoramento de escavações, grampos esbeltos são solicitados fundamentalmente à tração, podendo haver alguma contribuição de cisalhamento.

A facilidade com que os engenheiros brasileiros absorveram esta técnica se deve à grande familiaridade com as cortinas ancoradas, introduzidas no país em 1957 (Nunes e Velloso, 1963). Com efeito,

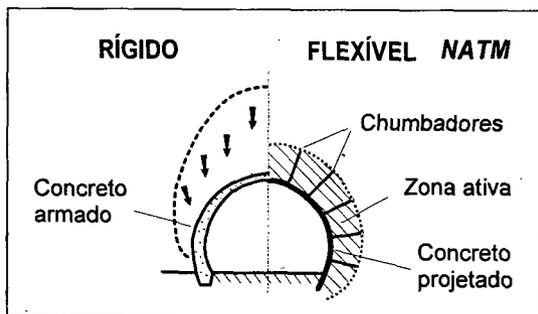


Fig.1 - Comparação do NATM com a técnica convencional do revestimento rígido.

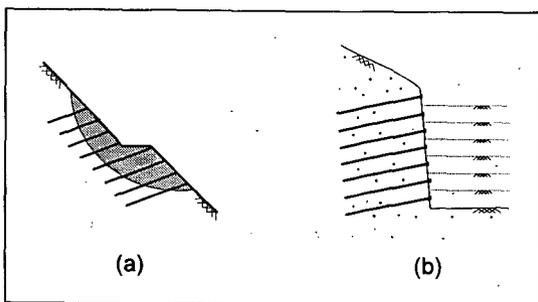


Fig.2 - Aplicações do reforço de solos através do grampeamento: (a) na estabilização de taludes; (b) no escoramento de escavações.

milhares de cortinas ancoradas foram executadas com sucesso no Brasil de cima para baixo, em etapas de 1 a 2m de altura de escavação, *pari passu* com a execução das ancoragens (Hunt e Nunes, 1978). Por outro lado, contribuiu também a experiência com uso de chumbamento de abóbadas de túneis construídos pelo método NATM, tanto nas obras do Sistema Cantareira em São Paulo, quanto na Ferrovia do Aço em Minas Gerais.

O aparecimento de uma alternativa similar, muitas vezes mais barata, tem despertado bastante interesse e levado a aplicações econômicas.

Neste artigo os autores apresentam uma revisão da técnica de solo grampeado, sua experiência em obras e uma revisão sobre os métodos de análise empregados.

2. PROCESSO DE EXECUÇÃO DO MURO DE SOLO GRAMPEADO

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. Neste caso, o grampeamento é feito na massa de solo à medida em que a escavação é executada em etapas (Fig.3), em geral com 1 a 2m de profundidade, obtendo-se uma zona de solo reforçado que funcionará como suporte do material atrás sem reforço.

A altura máxima a escavar em cada etapa depende do tipo de terreno e da inclinação da face de escavação, que deverá ser estável durante a fase crítica que ocorre entre a escavação, instalação do reforço e aplicação de um revestimento delgado de concreto projetado.

O material a ser escavado deve apresentar uma resistência aparente não drenada ao cisalhamento mínima de 10 kPa, do contrário não se poderá executar esta escavação. Uma resistência como esta, entretanto, é possível obter na maioria dos solos argilosos e arenosos, mesmo em areias puras úmidas, devido ao efeito de capilaridade. Somente em areias secas e sem nenhuma cimentação entre grãos, ou em solos argilosos muito moles, este processo dificilmente terá sucesso.



Fig.3 - Fases construtivas.

2.1 Execução dos grampos

Logo após a escavação instalam-se os grampos por percussão, ou por perfuração e injeção sem pressão. A técnica por percussão consta da cravação de barras ou perfis metálicos esbeltos com auxílio de martetele pneumático, o que leva a um processo de execução muito rápido, mas a resistência ao cisalhamento do contato solo-grampo é em geral pequena, sendo típicos valores da ordem de 30 a 40 kPa em solos arenosos. Este processo não pode ser empregado quando há ocorrência de pedregulhos e é inconveniente no caso de argilas, como as porosas de São Paulo e de Brasília, pois o atrito resultante é muito baixo. Há também limitações no comprimento máximo, da ordem de 6m, em que se pode cravar com eficiência um grampo.

A técnica mais comum é semelhante à execução de ancoragens de barra: perfura-se o terreno com diâmetro entre 50 a 100 mm, introduz-se uma ou duas barras de aço com diâmetro entre 13 e 25 mm, seguido de injeção de nata de cimento com pressões baixas, inferiores a 100 kPa. Com este processo, o atrito lateral unitário obtido em solos compactos ou rijos é razoavelmente elevado, superior a 100 kPa.

A Figura 4 apresenta detalhes de grampos empregados no Brasil, tanto para o caso de grampos que empregam barra de aço com diâmetro maior que 20 mm (Fig.4a), ou menor (Fig.4b). No primeiro tipo, a porca e placa de apoio permitem a aplicação de uma pequena carga de incorporação da ordem de 5 kN, que serve para garantir contato solo-concreto projetado, precaução importante no caso de muros com paramento vertical. No segundo tipo, empre-

gado em taludes inclinados, a extremidade do grampo é dobrada para fixação ao revestimento.

Outros métodos de instalação do reforço em que a injeção de calda se dá pela ponta de um tubo têm sido desenvolvidos. É o caso do processo Hurlpinoise (Louis, 1981), francês, e do Titan (Dywidag, Gässler, 1991), alemão. Os autores desconhecem aplicações no Brasil.

2.2 Proteção contra a corrosão

A experiência brasileira acumulada desde 1957 na execução de milhares de ancoragens em solo, tem demonstrado que houve um pequeno número de acidentes em cortinas ancoradas em que se diagnosticou corrosão. Todos eles ocorreram devido à proteção inadequada do trecho livre junto à cabeça da ancoragem. No trecho injetado não há nenhum registro de problemas.

A utilização de dupla proteção, envolvendo-se o grampo com um revestimento plástico preenchido com nata de cimento é prática obrigatória em alguns países (Clouterre, 1991 e Gässler, 1991), e foi incorporada na norma brasileira ABNT NBR 5629 (Tabela 1) para proteção classe 1 e 2 aplicada em ancoragens permanentes em ambientes medianamente agressivos, tendo sido adotada por alguns executores de ancoragens (Cerqueira, 1978 e Geobrás, 1992).

2.3 O revestimento de concreto projetado

A rapidez na execução tem favorecido o uso de concreto projetado nas obras de solo grampeado, contrariamente à prática brasileira das cortinas ancoradas, em que paredes de concreto moldadas in loco são mais utilizadas. O concreto pode ser pro-

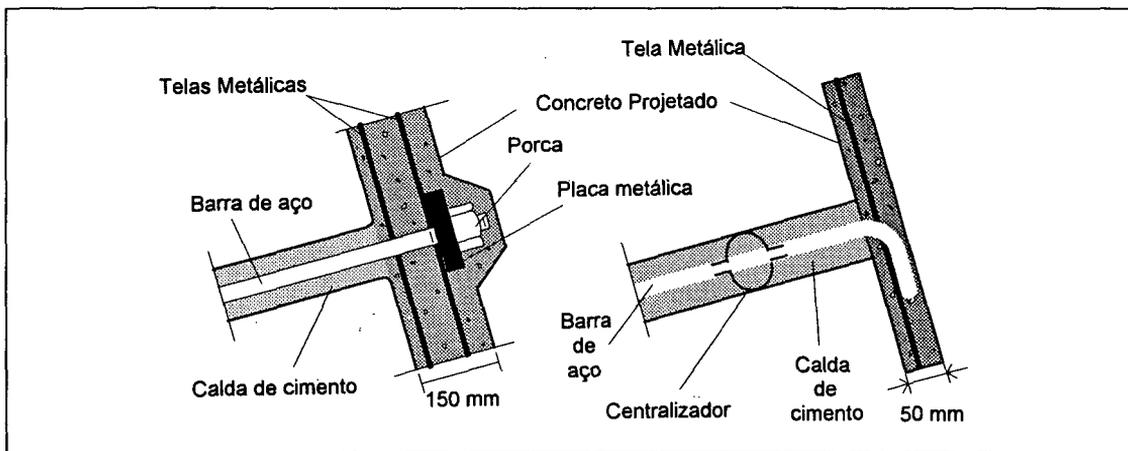


Fig.4 - detalhes de grampos mais comuns: (a) barra de aço com diâmetro igual ou maior que 20 mm; (b) barra de aço com diâmetro inferior a 20 mm.

Tabela 1 - Prática de proteção de ancoragens contra a corrosão (ABNT NBR 5629).

Proteção	Aplicação	Trecho livre	Trecho ancorado
Classe 1	Ancoragens permanentes em meio agressivo, ou provisórias em meio muito agressivo	Proteção dupla com emprego de tubo plástico ou metálico corrugado preenchido com calda de cimento	Proteção dupla com emprego de tubo plástico ou metálico corrugado preenchido com calda de cimento
Classe 2	Ancoragens permanentes em meio não agressivo, ou provisórias em meio medianamente agressivo	Proteção dupla com emprego de tubo plástico ou metálico corrugado preenchido com calda de cimento	Proteção simples através de calda de cimento injetada. O uso de centralizadores é obrigatório.
Classe 3	Ancoragens provisórias em meio não agressivo	Proteção de um tubo plástico	Proteção simples através de calda de cimento injetada. O uso de centralizadores é obrigatório.

Obs.: O grampo pode ser encarado como um trecho ancorado, na inexistência de norma específica no Brasil.

jetado via úmida ou seca, sendo este último o método escolhido na maioria dos casos. A armadura de aço consta de uma ou duas telas soldadas.

Recentemente alguns construtores vêm aplicando a técnica de misturas de elementos metálicos ou sintéticos, chamados de *fibras*, ao concreto, em substituição às telas soldadas, melhorando bastante sua característica de resistência à tração e permeabilidade. Este processo foi empregado em túneis da Barragem de Xingó com sucesso (Minicucci, 1993).

3. COMPARAÇÃO COM A TÉCNICA DE CORTINAS ANCORADAS

Embora possa parecer que há grande similaridade entre os grampos e as ancoragens ou os tirantes convencionais, quando utilizados para a estabilização de taludes ou escavações, há distinções muito importantes com aplicações específicas para cada caso (Bruce e Jewel, 1986 e Ortigão e Fannin, 1992) (Fig.5). Por exemplo, enquanto as ancoragens são fortemente pré-tensionadas com cargas de 150 a 1000 kN, para prevenir deslocamentos da cortina, os grampos sofrem no máximo uma pequena pré-tensão, da ordem de 5 a 10 kN, com a finalidade exclusiva de garantir a

ligação com o concreto projetado, principalmente em paramentos verticais.

Os grampos, ao contrário das ancoragens, não têm trecho livre, transferindo tensões para o solo ao longo de todo seu comprimento. Em consequência, a distribuição de tensões na massa de solo é diferente.

As cortinas convencionais têm a parede de concreto dimensionada ao puncionamento das cargas elevadas dos tirantes. Já os grampos, como suportam pequenas cargas, não exigem maiores cuidados.

A grande maioria das cortinas tradicionais tem parede moldada in loco vertical, pois a concretagem inclinada apresenta problemas executivos que devem ser evitados. Ao contrário, os muros de solo grampeado podem facilmente ter paredes inclinadas, acompanhando a inclinação natural do terreno, reduzindo-se escavações e com vantagens para a estabilidade da obra.

As ancoragens convencionais tendem a ser longas (15 a 45 m), necessitando de um equipamento de maior porte, ao contrário dos grampos que são curtos, de comprimento máximo da ordem da profundidade da escavação. Para a estabilização de uma ruptura profunda, as ancoragens convencionais longas são mais indicadas. Já para a execução de uma

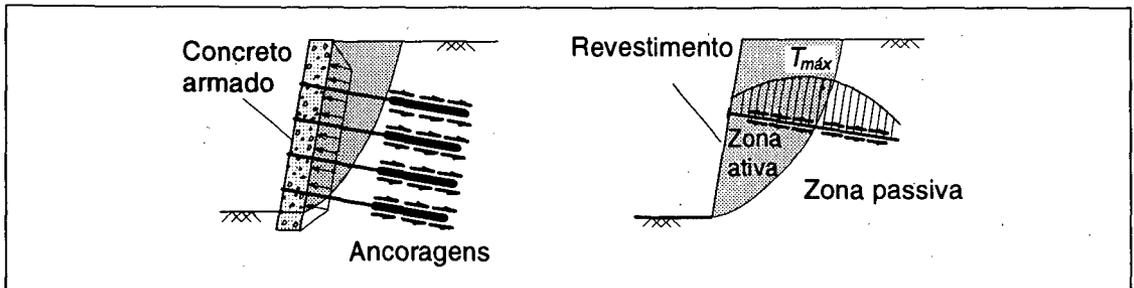


Fig.5 - Mecanismos de transferência de carga: (a) cortina ancorada; (b) muro em solo grampeado.

escavação, a técnica de solo reforçado por grampos certamente será uma alternativa atraente, tanto técnica quanto economicamente.

4. COMPARAÇÃO COM A TERRA ARMADA

A técnica de solo grampeado é bastante semelhante à terra armada tanto em conceituação quanto no método de análise. A principal diferença reside na técnica construtiva. A terra armada é executada de baixo para cima e os deslocamentos horizontais do muro ocorrem principalmente na parte de baixo, conforme indicado na Figura 6 (Schlosser, 1983).

No muro de solo grampeado, como a execução é de cima para baixo, os maiores deslocamentos ocorrem na parte de cima do muro.

5. PRINCIPAIS VANTAGENS DA TÉCNICA DE GRAMPEAMENTO DO SOLO

Muitos fatores têm contribuído para a disseminação na Europa e América do Norte da técnica de solo grampeado, entre os quais se incluem (Bruce e Jewel, 1986 e Ortigão e Fannin, 1992):

- *economia*: uma avaliação limitada de algumas obras (Ortigão e Palmeira, 1992) mostrou, em relação às cortinas atirantadas, um custo de apenas 30% do valor da obra;
- *velocidade de execução do reforço*: o grampeamento do solo pode ser executado rapidamente se utilizados equipamentos adequados, como as perfuratrizes rotopercussoras. O comprimento reduzido dos grampos permite perfuração com somente uma, ou no máximo duas, manobras da lança da rotopercussora;
- *velocidade de execução do paramento*: o uso de concreto projetado permite obras mais rápidas e menor utilização de mão-de-obra;
- *inclinação da parede*: os muros de solo grampeado

do podem facilmente ser inclinados no sentido do terreno, ao contrário das cortinas tradicionais com parede moldada in loco que são construídas verticalmente para evitar dificuldades na concretagem. Com isso, é possível melhorar a estabilidade do muro e acompanhar a inclinação natural do terreno, reduzindo o movimento de terra da obra. Além disso, a inclinação da parede reduz a perda por reflexão do concreto jateado;

- *comportamento*: medições de campo em escavações com solo grampeado (Clouterre, 1991 e Juran e Elias, 1991) indicam que os deslocamentos necessários para a mobilização do reforço são surpreendentemente menores que o esperado, em taludes verticais os valores máximos observados são da ordem de 0,3% da altura. Além disto, desde que o grampeamento seja aplicado no menor tempo possível após a escavação, os deslocamentos do solo são minimizados, prevenindo-se danos a estruturas adjacentes; e
- *aumento da rigidez da estrutura*: o aumento da rigidez da estrutura de solo grampeado é possível através da adoção de soluções mistas em que grampos são combinados com ancoragens convencionais, permitindo reduzir os movimentos do terreno. Em escavações próximas a estruturas sensíveis aos deslocamentos do terreno, esta alternativa permite projetar um muro de solo grampeado enrijecido em locais específicos.

6. PRINCIPAL DESVANTAGEM DA TÉCNICA DE SOLO GRAMPEADO

A principal desvantagem da técnica de solo grampeado são os maiores deslocamentos provocados pela flexibilidade da estrutura, discutida no item anterior. A execução de um muro deste tipo próximo a uma estrutura muito sensível a movimentos do terreno requer cuidados especiais, como a adoção de ancoragens convencionais para diminuir a sua flexibilidade.

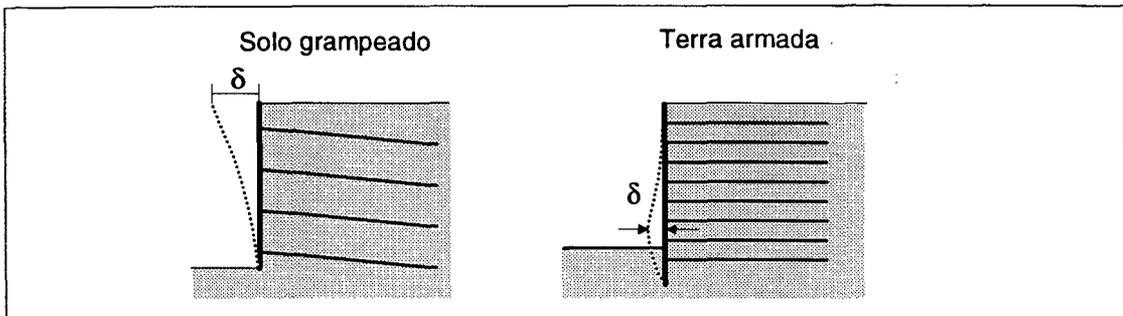


Fig.6 - Deslocamentos horizontais no muro de terra armada e no de solo grampeado.

7. OBRAS DE SOLO GRAMPEADO NO BRASIL

O desenvolvimento da técnica de solo grampeado no Brasil pode ser subdividido em duas fases: uma empírica, em que a técnica foi aplicada com base na experiência de construtores em NATM, sem um esforço de análise do comportamento, e a fase atual, iniciada mais recentemente em que obras mais arrojadas têm sido projetadas de maneira racional, através dos métodos de análise que serão discutidos mais adiante.

O início da primeira fase se deu por volta de 1970 na contenção de emboques de túnel no Sistema Cantareira, SP (Figura 7). Estas obras foram projetadas empiricamente com base na experiência na execução de túneis (Zirlis et al., 1992).

Desde 1976 vem sendo construído em São Paulo muros de solo grampeado de até 12 m de altura, com grampos executados em concreto moldado *in loco* e a face de elementos pré-moldados, com denominação comercial de Rimobloco (Ortigão e Palmeira, 1992).

Uma relação de outras obras executadas no Brasil está apresentada na Tabela 2 e as seções transversais correspondentes constam das Figuras 8 a 13 (Zirlis et al., 1992). Desta relação duas obras se destacam e serão comentadas a seguir:

7.1 Icarai, Niterói, RJ (obra nº 4)

Em uma área residencial muito valorizada junto à Praia de Icarai, Niterói, RJ, foi executado em 1984 um corte de 35 m de altura (Fig.8) em solo saprolítico de gnaiss com ocorrência de veios de pegmatito. A parte inferior do corte, com altura até 18 m, foi estabilizada com ancoragens injetadas protendidas. A parte superior, com altura de 17 m e inclinação de 75° foi grampeada com grampos de aço de 6 e 9 m de comprimento e 25 mm de diâmetro instalados em furos de 90 mm e preenchidos com calda de cimento. Foi adotado espaçamento de 1,5 m

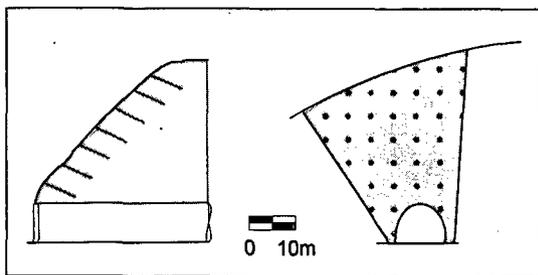


Fig.7 - Contenção de talude do emboque do túnel 5 do Sistema Cantareira, São Paulo.

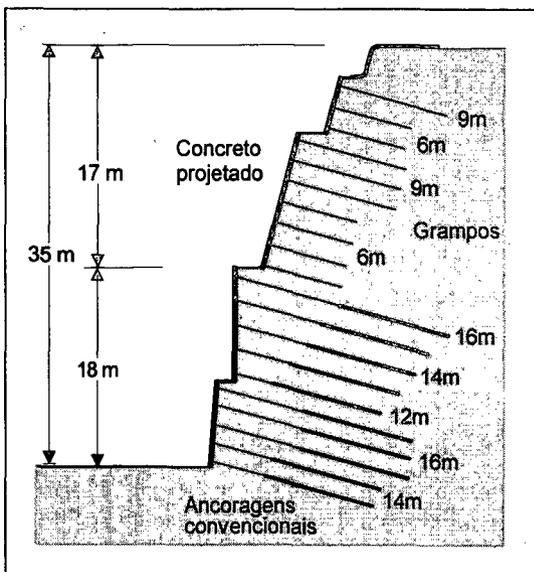


Fig.8 - Contenção de escavação em solo residual de gnaiss para implantação de prédio de apartamentos, Icarai, Niterói, RJ, (obra nº 4).

tanto na direção vertical, quanto na horizontal. O paramento do muro, tanto na parte superior quanto na inferior, foi executado em concreto projetado com 150 mm de espessura, armado com duas telas metálicas.

Durante a obra verificou-se a ocorrência de trincas de tração na crista do talude, que chegaram a abrir cerca de 5 mm. Foram preenchidas com calda de cimento e desde então não houve indícios de movimentação.

7.2 Estabilização de talude de filito sob a fundação de viaduto ferroviário (obra nº 3)

Em um encontro de ponte ferroviária (Fig.9) decidiu-se estabilizar o talude de 26 m de altura e 75° de inclinação através de grampeamento. O solo é constituído de filito bastante alterado com descontinuidades que provocaram a ocorrência de deslocamentos. Foram projetados grampos de 75 mm de diâmetro armados com barra de aço de 25 mm e injetados com calda de cimento sem pressão. O espaçamento vertical foi de 2 m e o horizontal de 2,5 m. O revestimento de concreto projetado teve espessura de 50 mm.

8. MÉTODOS DE ANÁLISE

Os principais métodos de análise de obras de solo grampeado estão sumarizados na Tabela 3. Foram comparados detalhadamente por Clouterre

Tabela 2 - Relação das obras executadas no Brasil.

Número	Obra	Área (m ²)	Ano	Solo	Altura H (m)	Incli- nação β Graus	Compri- mento L (m)	Barras de aço		Furo	Espaçamento		Revestimento			
								N ^o	ϕ (mm)		D (mm)	Horiz. (m)	Vert. (m)	Espes. (mm)	Tela de aço	
															kg/m ²	Tipo
1	Taboão da Serra, SP	700	83	Residual	25	55	4	1	25	75	75	2.0	1.5	70	1 Q47	0.75
2	F. Guedes, Fepasa, SP	350	83	Aterro	6.5	75	10.5	1	25	75	75	1.5	1.8	100	1 Q47	0.75
3	CBPO, Fepasa, SP	1400	84	Filito	26	75	23	1	25	75	75	2.0	4.0	100	1 Q283	4.48
4	Soter, Icarai, RJ	1500	84	Residual	17	75	9	1	25	90	90	1.5	1.5	150	2 Q283	8.96
5	Odebrecht, BR-324, BA	800	86	Massapê	24	60	12	1	25	90	90	1.5	1.5	60	1 Q47	0.75
6	Surcap, BA	850	86	Residual	18.5	50	5	1	20	75	75	2.0	2.0	50	1 Q47	0.75
7	Ergon, BA	400	86	Residual	12.4	60	5	1	20	75	75	2.0	2.0	50	1 Q47	0.75
8	Multiformas, SP	1800	86	Saprolito de gnaiss	12	60	8.5	1	25	75	75	2.5	2.0	70	1 Q47	0.75
9	Cometa, SP	1350	87	Residual	15	60	7	1	20	75	75	2.5	2.5	50	1 Q47	0.75
10	Ciscea, Petrópolis, RJ	500	88	Residual	9	75	5	1	25	50	50	1.5	1.5	100	1 Q47	0.75
11	P Berça, SP	450	88	Residual	10.7	70	4	1	25	75	75	1.5	1.5	100	1 Q47	0.75
12	OAS, Copene, BA	300	89	Aterro arenoso	3.9	90	4	1	20	90	90	1.0	0.8	100	2 Q75	2.42
13	Hospital Benef. Port, SP	250	89	Aterro arenoso	8	90	2.5	1	25	75	75	1.3	1.5	80	1 Q113	1.8
14	Granja Saito, SP	750	90	Aterro arenoso	5.1	90	6	1	23	75	75	1.2	1.2	120	2 Q47	1.5
15	Construtora Itajubá, BA	1100	91	Residual	11.5	70	6	1	25	75	75	2.0	2.0	70	1 Q47	0.75
16	Shell, Estr. dos Pilões, SP	1800	92	Residual	10	75	3	1	22	crav.	crav.	1.5	1.5	70	1 Q47	0.75
17	Shell, Posto Chame, BA	800	92	Residual	10	75	4	2	16	75	75	2.0	2.0	60	1 Q47	0.75
18	Votocel, SP*	1300	93	Siltito	6	90	4	1	12.5	75	75	1	1	100	1 Q92	1.48
19	Rua dos Críticos, SP*	800	93	Silte	7 a 16	60	6 a 10	1	25	75	75	1.5	2.1	100	2 Q92	2.96
20	Pecten, SP*	350	93	Residual	10	75	3	1	22	crav.	crav.	1.5	1.5	70	1 Q47	0.75

* Construção Genco Engenharia, SP; demais Este Engenharia (Zirlis et al., 1992).

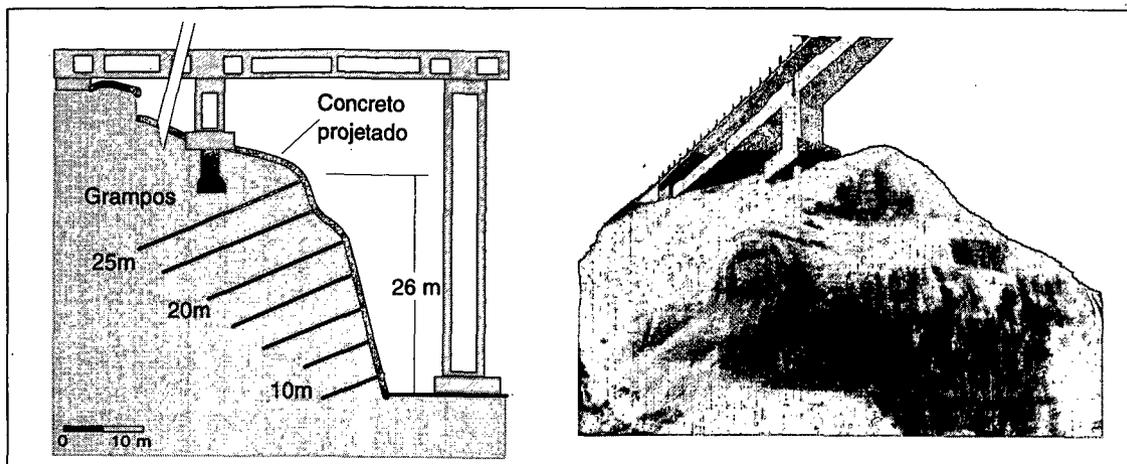


Fig.9 - Contenção de talude em filito sob a fundação de viaduto ferroviário (Obra nº 3): (a) seção transversal; (b) foto.

(1991), Christopher et al. (1990), Gigan e Delmas (1987), Gigan (1986) e Juran et al. (1990). Alguns foram incorporados em programas de computador

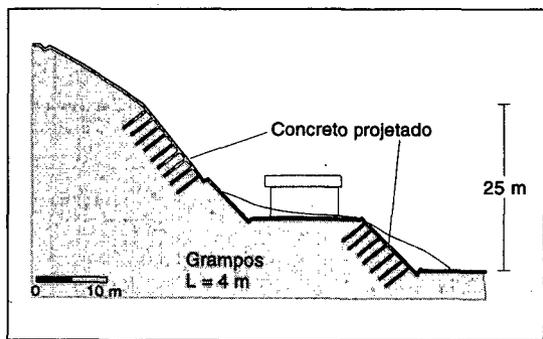


Fig.10 - Contenção de talude em solo residual, Taboão da Serra, SP (Obra nº 1).

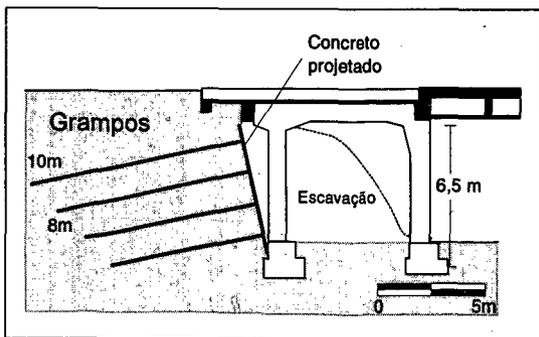


Fig.11 - Contenção do encontro de viaduto ferroviário (Obra nº 2).

que facilitam a sua aplicação (Anthoine, 1990; Blondeau et al., 1984 e Delmas et al., 1986). Todos eles subdividem o terreno atrás do muro em uma *cunha ativa*, limitada por uma superfície potencial de deslizamento, sendo o restante considerado *zona passiva*, onde os grampos são fixados. A análise de estabilidade global é feita considerando os esforços estabilizantes dos grampos atuando nesta *cunha ativa*.

Os métodos diferem, entretanto, quanto à forma da superfície de ruptura, quanto ao método de cálculo do equilíbrio das forças atuantes e quanto à natureza dessas forças.

O método Alemão considera superfície de ruptura com forma bi-linear, isto é, composta de dois segmentos de reta. Este método foi avaliado principalmente através de observações em modelos reduzidos e modelos de campo em que cargas concentradas foram aplicadas sobre o aterro. Esta avaliação foi questionada (Clouterre, 1991; e Plumelle et al., 1990) porque não representaria bem situações reais de campo. Entretanto, pesquisas na Universidade de Brasília com modelos reduzidos de muros reforçados (Lanz, 1992) mostraram boa concordância entre a superfície de ruptura observada e a superfície bi-linear mais desfavorável.

Os métodos de Davis, o Alemão e o de Escocamento consideram os elementos de reforço sujeitos unicamente à tração. O atrito unitário máximo na interface solo-grampo é admitido como tendo um valor constante q_s e o valor da tração aplicada em cada grampo na superfície de ruptura é então calculado. O valor de q_s é estimado a partir de observações experimentais em ensaios de arrancamento e posteriormente verificado in loco, através de ensaios de arrancamento

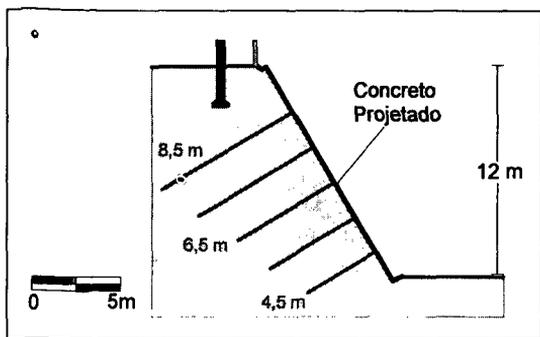


Fig.12 - Contenção de escavação em areia fina argilosa residual (Obra nº 9).

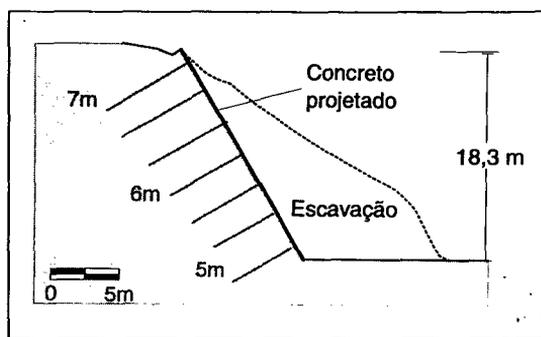


Fig.13 - Contenção de escavação próxima a um prédio existente em saprolito de gnaiss, Taboão da Serra, SP (Obra nº 8).

durante a construção (Ortigão e Palmeira, 1992).

Os métodos Cinemático e Multicritério consideram a flexão composta nos grampos. Os valores dos esforços de tração T_n e de cisalhamento T_c são obtidos através de uma análise tipo Winkler, considerando o grampo sobre apoio elástico suportado por molas não-lineares que representam a pressão do terreno (Ortigão e Palmeira, 1992).

O método Cinemático, entretanto, leva somente a fatores de segurança parciais, calculados a partir de análise do estado de tensões internas na massa de solo. Sua aplicação é simplificada através

de ábacos disponíveis na literatura (Christopher et al., 1990; Juran et al., 1988 e Juran e Elias, 1989).

O método Multicritério é baseado em método de equilíbrio limite de fatias em que os grampos aplicam na base de cada fatia os esforços estabilizantes de tração e de cisalhamento. O fator de segurança global pode então ser calculado para a massa de solo. As demais hipóteses estabelecidas por Schlosser (1983) para este método constam da Tabela 4.

O primeiro critério diz respeito à resistência do material de reforço empregado que deve ser satisfeita

Tabela 3 - Métodos de análise de muros de solo grampeado.

Características	Métodos					
	Alemão	Davis	Multicritério	Cinemático	Cardiff	Escoamento
Referência	Stocker et al, 1979	Shen et al, 1981	Schlosser, 1983	Juran et al, 1988	Bridle, 1989	Anthoine, 1990
Análise	Equilíbrio limite	Equilíbrio limite	Equilíbrio limite	Tensões internas	Equilíbrio limite	Teoria de escoamento
Divisão da massa de solo	2 cunhas	2 blocos	Fatias	-	Fatias	Bloco rígido
Fator de segurança	Global	Global	Global e local	Local	Global	Global
Superfície de ruptura	Bi-linear	Parabólica	Circular ou poligonal	espiral log	espiral log	espiral log
Grampos resistem a:						
Tração	x	x	x	x	x	x
Cisalhamento			x	x	x	
Flexão			x	x	x	
Inclinação da parede	vertical ou inclinada	vertical	qualquer	vertical ou inclinada	vertical ou inclinada	vertical ou inclinada
Nº de camadas de solo	1	1	qualquer	1	1	1

Tabela 4 - Multicritério: hipóteses (Schlosser, 1983).

Critério		Modelo matemático	
1	Resistência dos elementos de reforço	Tração	$T_n \leq A_s f_y$
		Cisalhamento	$T_c \leq R_c = A_s f_y / 2$
2	Atrito solo-grampo		$T_{max} \leq q_s A_{lat}$
3	Tensão normal solo-grampo		$p \leq p_{max}$
4	Resistência ao cisalhamento ao longo da superfície de ruptura		$\tau \leq \sigma' \tan \phi'$

quanto à tração e ao cisalhamento, sendo A_s a área da seção transversal, f_y a tensão limite de escoamento do material de reforço e R_c a resistência ao cisalhamento do material empregado no reforço. O segundo, supõe o atrito solo-grampo constante e igual a q_s .

O terceiro critério admite que a tensão p aplicada pelo terreno normal ao eixo de um elemento de reforço deve ser inferior a um valor limite $p_{m\acute{a}x}$. Este critério advém das hipóteses adotadas na análise de comportamento de estacas sujeitas a carregamento horizontal, em que a pressão de reação do terreno p está limitada por um valor $p_{m\acute{a}x}$, além do qual o solo escoava ao redor da estaca.

Finalmente, o quarto critério admite a equação de Mohr-Coulomb para a resistência do solo.

Os métodos Cinmático e Multicritério, ambos de origem francesa, foram postos em cheque por Jewell e Pedley, então pesquisadores da Universidade de Oxford, que discordaram da consideração de flexão composta nos grampos (Jewel e Pedley, 1990a, 1990b, 1990c, 1990d, 1991). A controvérsia gerou discussões muito interessantes e acaloradas (Schlosser, 1991).

Se de fato os pesquisadores de Oxford têm razão de desprezar o cisalhamento em grampos de pequeno diâmetro, pois o seu efeito contribui com somente 10 a 15% no fator de segurança global (Schlosser, 1991), o método Multicritério tem a grande vantagem de ser um método mais geral. Isto

significa que pode ser empregado tanto para grampos de pequeno diâmetro quanto para estacas, que seguramente contribuem com grande resistência à flexão composta. Outro aspecto importante é a consideração da flexão composta no fator de segurança localizado do material do grampo, que foi desprezado por Jewell e Pedley.

8.1 Introdução do efeito do grampo no método de análise

O efeito estabilizante do grampo pode ser traduzido como forças aplicadas à cunha de ruptura. Estas forças podem ser incorporadas no método de análise de estabilidade, pois produzem momentos e forças estabilizantes.

O emprego do método de equilíbrio limite de fatias, a partir de um programa computacional existente, apresenta algumas vantagens. Análises tanto de estabilidade interna, externa ou mistas, podem ser realizadas, conforme indicado na Figura 14. Entretanto, tanto o método de análise, quanto a maneira como o efeito do reforço é incorporado, afetam o valor do fator de segurança obtido.

Por exemplo, os métodos de fatias de Bishop e Fellenius, que definem o fator de segurança como uma relação entre somatórios de momentos resistentes e instabilizantes, o efeito do reforço pode ser considerado de duas formas: primeiro, provocando um momento resistente adicional; segundo, decom-

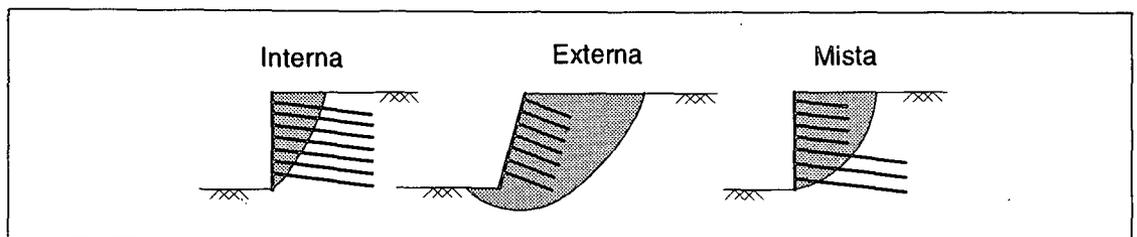


Fig.14 - Tipos de análise de estabilidade em função da localização da superfície de ruptura.

pondo as forças aplicadas pelo grampo incorporando-as às demais forças atuantes na fatia. Essas abordagens levam a fatores de segurança diferentes.

Os métodos que definem fatores de segurança somente através de relação de momentos apresentarão superfícies críticas, não necessariamente realistas, que minimizem os momentos gerados pelo reforço. O resultado obtido será certamente diferente dos métodos que definem o fator de segurança por relações de forças, ou através do fechamento de polígono de forças.

Os métodos de equilíbrio limite têm sido aplicados com sucesso na análise de estruturas de arimo tanto no campo (eg., Clousterre, 1991) como em vários modelos de laboratório (eg., Palmeira, 1987, Palmeira e Milligan, 1989 e Lanz, 1992). Entretanto, parecem ainda necessários estudos adicionais para quantificar a influência dos aspectos discutidos acima na magnitude do fator de segurança.

8.2 Otimização de projeto

Várias obras relacionadas na Tabela 2 foram executadas no início da década de 80, antes que os métodos de análise de solo grampeado estivessem suficientemente desenvolvidos e disponíveis. Esses projetos foram certamente influenciados pelas técnicas tradicionais de análise de cortinas ancoradas em que o comprimento dos tirantes é inversamente proporcional a sua distância à crista do talude. Em outros casos, como no encontro de viaduto ferroviário da Figura 9, trata-se de solo residual estruturado em que as descontinuidades têm papel preponderante no comportamento e podem condicionar o espaçamento e o comprimento dos grampos.

Com o desenvolvimento dos métodos de análise e o acúmulo da experiência no comportamento, obras ainda mais econômicas tem sido projetadas e construídas. A evolução nos conceitos de projeto está apresentada na Figura 15. A Figura 15a apresenta um projeto típico no Brasil da década de 70 e

do início dos anos 80, em que o comprimento variável dos grampos era baseado na experiência em cortinas ancoradas, em que se procura ancorar todo o reforço além da superfície de ruptura. Este é um conceito errado, pois um muro de peso do que a uma cortina. Reforços curtos, como o apresentado na Figura 15b são adotados em obras de pequena e média altura, isto é, até 8 m. Para alturas maiores o projeto pode ser otimizado, analisando-se a obra para várias etapas construtivas (Fig.15c) e adotando-se o reforço mínimo necessário.

A Figura 16 apresenta a seção transversal de uma obra de proteção de talude com 14,5 m de altura em silte arenoso de São Paulo em que conceitos atuais de projeto levaram a uma redução considerável no comprimento do reforço. Com efeito, a figura indica que as duas linhas superiores de grampos têm apenas 4m de comprimento e as linhas seguintes têm comprimentos maiores. Os comprimentos dos grampos aumentam com a distância à crista do talude, um conceito oposto ao que foi empregado em várias obras do início dos anos 80. Esta economia gera, em contrapartida, maior deslocabilidade na parte superior do muro, o que pode ser combatida com tirantes convencionais próximos ao topo da obra.

A otimização quanto aos deslocamentos ainda é feita empiricamente, baseada na experiência anterior. Espera-se entretanto, que os métodos numéricos de análise de deslocamento possam contribuir para a otimização no caso de grandes projetos.

O esforço na observação do comportamento de obras de solo grampeado ainda está muito incipiente em relação à experiência já acumulada em obras. Reconhecendo isto, o Instituto de Geotécnica do Rio de Janeiro, atual Geo-Rio, responsável pelas encostas desta cidade, tem procurado instrumentar algumas obras, algumas delas ainda em fase de leituras (em 1993), projetado para a medição de tração e momentos ao longo dos grampos (Ortigão et al., 1992).

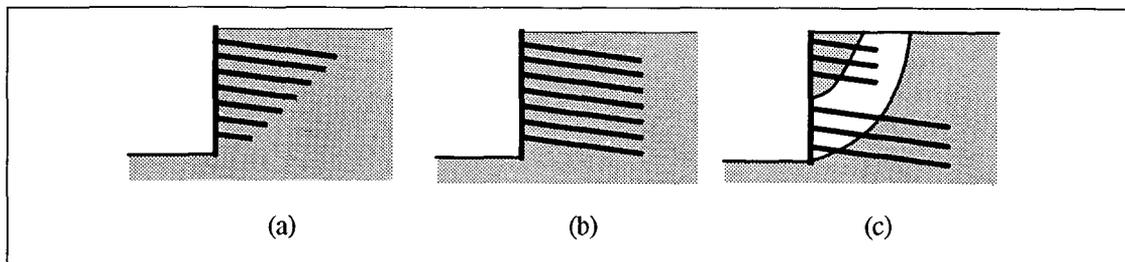


Fig.15 - Otimização de comprimento dos grampos: (a) projeto não otimizado, baseado na experiência com cortinas ancoradas; (b) solução típica de solo grampeado em taludes de altura até 6 - 8 m; (c) otimização de comprimento de grampos para taludes com altura superior a 8 m.

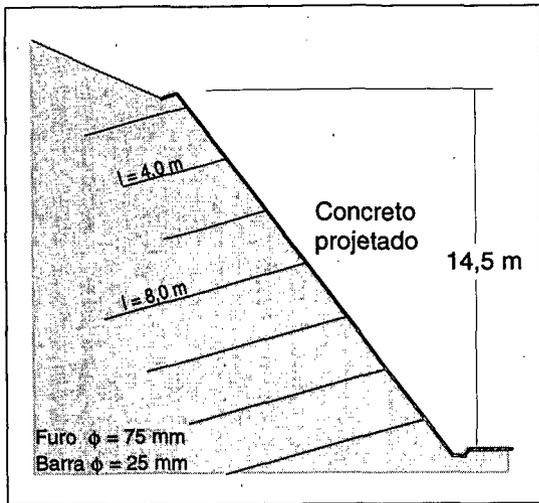


Fig.16 - Exemplo de otimização de comprimento dos grampos (Obra nº 19).

9. OBSERVAÇÕES FINAIS

A técnica de solo grampeado apresenta vantagens econômicas tanto no escoramento de escavações quanto na estabilização de taludes. Desde o primeiro emprego no Brasil em 1970 vários projetistas e construtores têm optado por esta solução e já se obteve uma razoável experiência em obras executadas, mas muito pouco esforço na observação de deslocamentos e tensões no reforço.

A evolução dos métodos de análise e a experiência na execução e nos bons resultados permite otimizar o projeto, reduzindo-se o comprimento total de grampos em relação aos projetos elaborados da década de 70-80.

AGRADECIMENTOS

O apoio de Lúcia Alves e Alejandro Far na elaboração deste artigo é registrado.

REFERÊNCIAS

- ANTHOINE, A. Une méthode pour le dimensionnement à la rupture des ouvrages en sols renforcés. *Revue Française de Géotechnique*, nº 50, p. 5-17, 1990.
- ABNT NBR 5629 Ancoragens injetadas no terreno, Norma Brasileira. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- BLONDEAU, F., CHRISTIANSEN, M., GUILLOUX, A.; SCHLOSSER, F. *Talren:*

méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée. *CR Colloq. Int Renforcement en Place des Sols et des Roches*, Paris, p. 219-224, 1984.

- BOWDEN, R. K. Royal Roads Military College geogrid wall design. In: *Symp on Geosynthetics: Design and Performance, 6th Annual Vancouver Geotechnical Society Symp.*, Vancouver, BC, May, 1991.
- BRASFOND FUNDAÇÕES S.A. - Catálogos técnicos, São Paulo.
- BRIDLE, R. J. Soil nailing - analysis and design. *Ground Engineering*, September, p. 52-56, 1989.
- BRUCE, D. A.; JEWELL, R. A. Soil nailing: application and practice - part 1. *Ground Engineering*, v.19:8, p. 10-15, 1986.
- BRUCE, D. A. E.; JEWELL, R. A. Soil nailing: application and practice. *Ground Engineering*, v.20:1, p. 21-38, 1987.
- CERQUEIRA, C. Estabilização de taludes com ancoragens: vinte anos de atividades, Tecnosolo SA. *Tópicos de Geomecânica*, Número Especial 29, Rio de Janeiro, 1978.
- CLOUTERRE Recommendations Clouterre, Projet National Clouterre. Presses de l'ENPC, Paris, 269 p., 1991.
- CHRISTOPHER, B. R., GILL, S. A., GIROUD, J. P., JURAN, I., MITCHELL, J. K., SCHLOSSER, F.; DUNNICLIFF, J. Reinforced Soil Structures, Vol I, Design and Construction Guidelines. Report FHWA-RD-89-043, US DOT Federal Highway Administration, 301 p., 1990.
- DELMAS, P., BERCHE, J. C., CARTIER, G.; ABDELHEDI, A. Une nouvelle méthode de dimensionnement du clouage des pentes: programme Prosper. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, nº 141, p. 57-65, 1986.
- DYWIDAG, Catálogos Técnicos, Dywidag Canada Ltd.
- FANNIN, R. J.; BOWDEN, R. K. Soil nailing: an in situ reinforcement technique, *Geotechnical News*, June 1991, p. 32-34, 1991.
- GÄSSLER, G. German practice of soil nailing, Transportation Research Board. *70th Annual Meeting*, Session 138, Washington, DC, 35, p. 1991.
- GEOBRÁS Tirante Geobrás reinjetável, Relatório Técnico Geobrás, São Paulo, SP, 1992.
- GIGAN, J. P.; DELMAS, P. Mobilisation des efforts dans les ouvrages cloués - Etude comparative des différentes méthodes de

- calcul. **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, nº147, p. 49-58, 1987.
- GIGAN, J. P. Applications du clouage en soutènement - Paramètres de conception et de dimensionnement des ouvrages. **Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées**, nº147, p. 51-64, 1986.
- HUNT, R. E., NUNES, A. J. C. Retaining walls: taking it from the top. **Civil Engineering**, ASCE, May, p. 73-75, 1978.
- JEWELL, R. A.; PEDLEY, M. J. Soil nailing: the role of bending stiffness, **Ground Engineering**, March, p. 30-36, 1990a.
- JEWELL, R. A.; PEDLEY, M. J. Soil nailing: the role of bending stiffness, Author's reply to discussion by Bridle and Barr. **Ground Engineering**, July-August, p. 32-33, 1990b.
- JEWELL, R. A.; PEDLEY, M. J. A large scale experimental study of soil-reinforced interaction, Part 1. **Ground Engineering**, July-August, p. 44-50, 1990c.
- JEWELL, R. A.; PEDLEY, M. J. A large scale experimental study of soil-reinforced interaction, Part 2. **Ground Engineering**, Sept., p. 45-49, 1990d.
- JEWELL, R. A.; PEDLEY, M. J. Closure. **Ground Engineering**, Nov 1991, p. 34-39, 1991.
- JURAN, I., BAUDRAND, G., FARRAG, E.; ELIAS, V. Kinematical limit analysis for soil nailed structures. **ASCE JGE**, v.116:1, p. 54-73, 1988.
- JURAN, I., BAUDRAND, G., FARRAG, E.; ELIAS, V. Design of nailed retaining structures. **ASCE Conf on Design and Performance of Earth Retaining Structures**, Cornell University, Ithaca, NY, Geotechnical Publication nº 25, p. 644-659, 1990.
- JURAN, I.; ELIAS, V. Manual of practice for soil nailing, **Report FHWA-RD89-198**, prepared by Earth Engineering & Sciences Inc, for US DOT Federal Highway Administration, 1989.
- JURAN, I.; ELIAS, V. Ground anchors and soil nails in retaining structures; Ch. 26 in **Foundation Engineering Handbook**, 2nd Ed., Editor: H Fang, van Nostrand Reinhold, p. 868-905, 1991.
- LONG, J. H., SIECZKOWSKI, W. F., CHOW, E.; CORDING, E. J. Stability analysis of soil nailed walls. **ASCE Conf on Design and Performance of Earth Retaining Structures**, Cornell University, Ithaca, NY, Geotechnical Publication nº 25, p. 676-691, 1987.
- LANZ, D. **Estudo de deformabilidade e tensões em estrutura de arrimo em solo reforçado com geotêxteis**. Tese de MSc, UnB Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, 150 p., 1992.
- LOUIS, C. Nouvelle méthode de soutènement des sols en déblais. **Travaux**, 553:3, p. 67-75, 1981.
- MINICUCCI, L. A. Comunicação pessoal, 1993.
- NUNES, A. J. C.; VELLOSO, D. A. Estabilização de taludes em capas residuais de origem granito-gnaissica. In: **PanAm Conf on SMFE**, 2, v.2, p. 383-394, Brasil, 1963.
- ORTIGÃO, J. A. R.; PALMEIRA, E. M. Solo grampeado: técnica para estabilização de encostas e escavações. In: **Cobrae Congresso Brasileiro de Encostas, ABMS Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**, v.1, Rio de Janeiro, p. 57-74, 1992.
- ORTIGÃO, J. A. R., D'ÁVILA, C. J. R., SILVA, S.P.; MAIA, H. S. Solo grampeado no Morro da Formiga, RJ. In: **Cobrae Congresso Brasileiro de Encostas, ABMS Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**, v.1, Rio de Janeiro, p. 47-56, 1992.
- ORTIGÃO, J. A. R.; FANNIN, R. J. From tiedback walls to soil nailing: the practice in Vancouver and in Rio de Janeiro. Submitted for publication in **Geotechnical News**, Bitech Publishers, Vancouver, Canada, 1992.
- PALMEIRA, E. M. **The study of soil-reinforcement interaction by means of large scale laboratory tests**. DPhil thesis, University of Oxford, 237 p., 1987.
- PALMEIRA, E. M.; MILLIGAN, G. W. E. Large scale direct shear tests on reinforced sands. **Soil and Foundations**, v.29, nº 1, p. 1-18, 1989.
- PLUMELLE, C., SCHLOSSER, F., DELAGE, P.; KNOCHENMUS, G. French National Research Project on Soil Nailing: Clouterre. **ASCE Conf on Design and Performance of Earth Retaining Structures**, Cornell University, Ithaca, NY, Geotechnical Publication nº 25, p. 660-675, 1990.
- SCHLOSSER, F. Analogies et différences dans le comportement et le calcul des ouvrages de soutènement en terre armée et par clouage du sol. **Annales de l'ITBTP** 473, p. 8-23, Oct., 1983.
- SCHLOSSER, F. Discussion: The multicriteria theory in soil nailing, **Ground Engineering**, Nov., 1991, p. 30-33, 1991.
- SHEN, C. K., BANG, S.; ROMSTAD, J. M. Field measurements of an earth support system.

- ASCE **Journal of Geotechnical Engineering**, v.107: 12, 1981.
- STOCKER, M. F., KORBER, G. W., GÄSSLER, G.; GUDEHUS, G. Soil Nailing. In: **Int Conf on Soil Reinforcement**, Paris, v.2, p. 469-474, 1979.
- STOCKER, F. S.; RIEDINGER, G. The bearing behaviour of nailed retaining structures. **ASCE Conf on Design and Performance of Earth Retaining Structures**, Cornell University, Ithaca, NY, Geotechnical Publication nº 25, p. 612-628, 1990.
- THOMPSON, S. R.; MILLER, I. R. Design, construction and performance of a soil nailed wall in Seattle, Washington. **ASCE Conf on Design and Performance of Earth Retaining Structures**, Cornell University, Ithaca, NY, Geotechnical Publication no 25, p. 629-643, 1990.
- TOUDIC, P. Desserte ferroviaire a la ville nouvelle de St Quentin-en-Yvelines. **Travaux**, Jan, p. 37-43, 1975.
- ZIRLIS, A. C., PITTA, C. A., SOUZA, G. J. T.; OLIVEIRA, M. Soil nailing: chumbamento de solos, experiência de uma equipe na aplicação do método. In: **Cobrae Congresso Brasileiro de Encostas, ABMS Associação Brasileira de Mecânica dos Solos**, v.1, Rio de Janeiro, p. 81-99, 1992.

Recebido em 12/08/93.

Acceptação final 22/10/93.

Discussões abertas até 30/04/94.