

## 2 Solo grampeado

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a técnica de grampeamento de solos. Procura-se abordar aspectos importantes da técnica, tais como, execução do grampeamento, tipos de grampos existentes, comportamento mecânico do grampo, modelos de análise e métodos de projeto, vantagens e limitações da técnica de grampeamento, além de comparações entre diferentes técnicas de estabilização.

O capítulo também apresenta uma breve revisão sobre as correlações empíricas para estimativa da resistência ao arrancamento de grampo em função de diversos fatores, tais como, tipo de solo, valor de SPT e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Relata também o desenvolvimento das pesquisas em solo grampeado no Brasil.

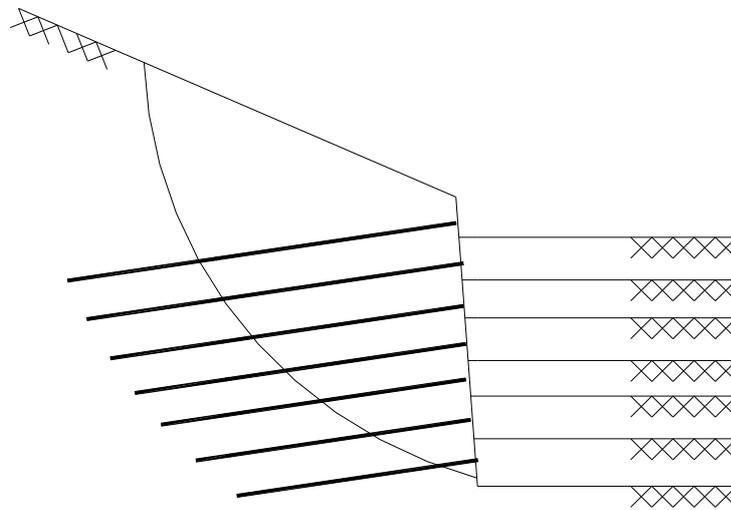
### 2.1. Descrição da técnica

O solo grampeado ou solo pregado (“soil nailing”, em inglês ou “sol cloué”, em francês) é uma técnica em que o reforço do maciço é obtido por meio da inclusão de elementos, como grampos ou pregos (“nails”, em inglês; “clou”, em francês), resistentes às tensões de tração, esforços cortantes e momentos de flexão. Os elementos de reforço são muito semelhantes às ancoragens, porém sem pré-tensão ou trecho livre.

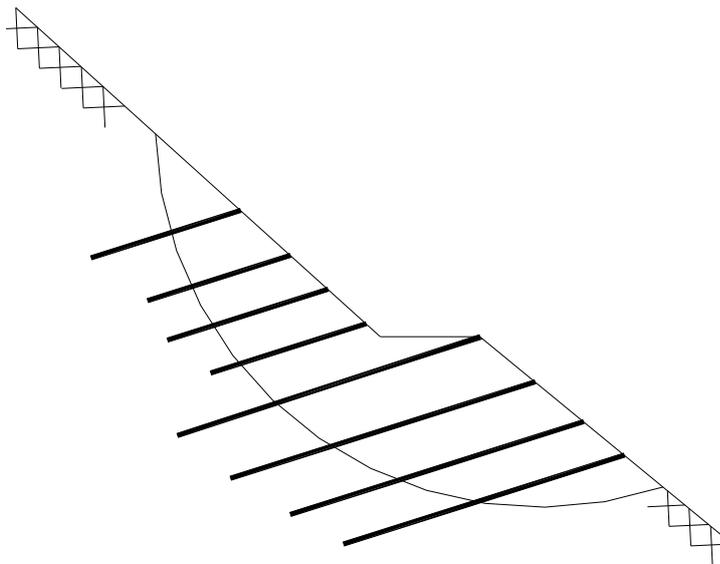
Os grampos podem ser introduzidos no maciço por cravação direta de elementos metálicos (grampo cravado) ou por meio de pré-furo, seguido pela introdução da barra metálica e preenchimento do furo por nata ou argamassa de cimento (grampo injetado).

Muros de solo grampeado têm sido empregados tanto em taludes naturais, ou previamente escavados, quanto em escavações, nos quais as condições de estabilidade não são satisfatórias. No caso de cortes, o solo natural adjacente à escavação é reforçado de modo a manter-se sem suporte a profundidades que exigiriam, normalmente, a instalação de cortinas de estacas ou paredes moldadas, ancoradas ou escoradas.

O solo grampeado é, portanto, uma técnica recomendada para a contenção de escavações e estabilização de taludes (Figura 1).



(a) escavações



(b) estabilização de taludes

Figura 1 - Aplicações da técnica do solo grampeado (GeoRio, 1999)

Nestes casos, o grampeamento é realizado na massa de solo à medida que a escavação é executada, em etapas. A altura de escavação máxima, em cada etapa, depende do tipo de terreno e da inclinação da face. Deve ser estável ao longo da fase de escavação, instalação do reforço até a aplicação de um revestimento delgado de concreto projetado.

O material a ser escavado e grampeado deve apresentar uma coesão efetiva mínima de 10 kPa, devido à capilaridade, para se manter estável. Em

geral, a maioria dos solos argilosos e arenosos apresenta a coesão mínima exigida, incluindo-se as areias puras úmidas, devido ao efeito da sucção. Portanto, a técnica de solo grampeado somente exclui areias secas e sem qualquer cimentação entre grãos ou solos argilosos muito moles.

A Tabela 1 apresenta valores típicos de alturas de escavação para diferentes tipos de solos, apresentados por Gässler (1990) e Clouterre (1991).

Tabela 1 - Tipos de solos e alturas de escavação

Solo	Altura de escavação em cortes vertical (m)
Silte	1,2 a 2,0
Argila	1,5 (normalmente adensada) 2,5 (pré-adensada)
Areia	1,2 (medianamente densa com cimentação) 1,5 (densa com cimentação) 2,0 (cimentada)
Pedregulho	0,5 (com coesão aparente) 1,5 (cimentado)

A técnica de solo grampeado também é empregada em maciços com nível d'água, ou expostos à água. Nestas circunstâncias, procedimentos especiais são adotados para prevenir o contato entre o grampo e a água.

Na técnica de solo grampeado a estrutura de reforço é executada em fases sucessivas de corte do terreno e colocação do grampo. O processo de corte e grampeamento pode ser ascendente ou descendente (do topo em direção ao pé do talude). Se o material da região escavada for estável, os grampos são imediatamente instalados. Caso contrário, pode-se aplicar uma fina camada de concreto projetado, a fim de minimizar os deslocamentos prévios dos cortes antes do grampeamento.

Os equipamentos utilizados na escavação devem perturbar o mínimo possível o material a ser escavado. Caso existam áreas desagregadas de solo na face escavada, as mesmas devem ser retiradas.

No caso de escavação, são quatro as etapas constituintes do reforço com grampos: escavação da camada; perfuração do solo, introdução dos elementos resistentes e proteção da face (revestimento do paramento). Para o caso de estabilização de taludes naturais, apenas as três últimas etapas são executadas. Após o término de um ciclo inicia-se nova escavação, dando continuidade ao processo. A Figura 2 ilustra as fases de execução da técnica do solo grampeado.

Durante as escavações sucessivas, o solo que forma o muro de solo grampeado é sujeito à descompressão lateral. Ao final da construção, em geral os valores máximos de deslocamentos vertical e horizontal ocorrem no topo. Os deslocamentos esperados para estruturas contidas com a técnica de solo grampeado são da ordem de  $0,1\%H$  até  $0,5\%H$ , onde “H” é a profundidade total de escavação (Guilloy e Schlosser (1982); Cartier e Gigan (1983); Gassler e Gudehus (1981); Shen e outros (1981); Plumelle (1986); Mitchell e Villet (1987); Juran e Elias (1987 e 1990)). A Tabela 2 apresenta valores típicos de deslocamentos vertical e horizontal máximos, para diferentes tipos de solos, registrados na literatura.

Os deslocamentos no topo do paramento são dependentes de alguns fatores, tais como: seqüência construtiva; altura das faces de escavação; espaçamento entre grampos; comprimento dos grampos; fator de segurança global do muro; razão entre o comprimento do grampo/altura do muro; inclinação dos grampos; capacidade de suporte do solo de fundação.

Quando os deslocamentos laterais no topo do muro são excessivos, utiliza-se o recurso de estruturas mistas, que consistem em uma estrutura de solo grampeado enrijecido com ancoragem no topo.

Tabela 2 - Deslocamentos horizontais em muros de solo grampeado

Solo	Grampo	Deslocamentos Horizontais	Referências
Areia média	Cravado	$3H/1000$	Gassler e Gudehus (1981)
Areia siltosa	Injetado	$H/1000$	Shen e outros (1981)
Areia fina (SP) a areia argilosa (SC)	Cravado	$H/1000$	Cartier e Gigan (1983)
Folhelho alterado e Arenitos	Injetado	$0,5H/1000$	Juran e Elias (1987)
Areia siltosa (SM)	Injetado	$0,5H/1000$	Juran e Elias (1990)
Rochas brandas	*	$H/1000$	Schlosser e Unterreiner (1990)
Solo Arenoso	*	$2H/1000$	
Solo Argiloso	*	$4H/1000$	
Nota: * Não informado			

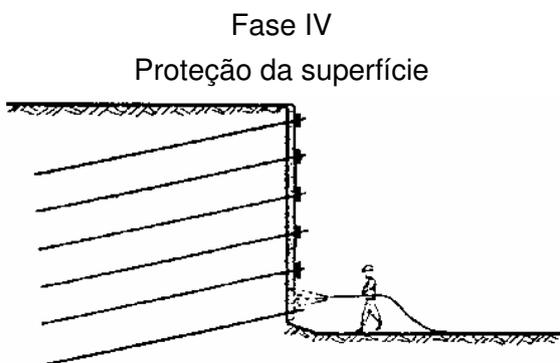
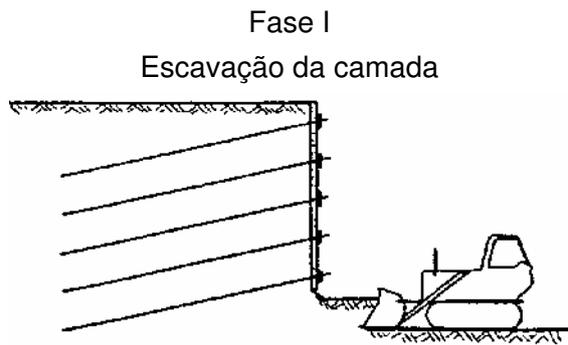


Figura 2 - Etapas construtivas de muros de solo grampeado (adaptado de Clouterre, 1991)

### **2.1.1. Execução do grampeamento**

Grampos são inclusões semi-rígidas capazes de resistir à tração e ao cisalhamento. Os grampos podem ser introduzidos no maciço por meio de pré-furo, seguido pela introdução de elemento metálico e preenchimento do furo com material cimentante (grampo injetado) ou por cravação direta de elementos metálicos (grampo cravado).

A pesquisa de novos materiais sintéticos e compostos tem levado à utilização dos plásticos reforçados por fibras (FRP - *Fiber reinforced plastics*), que são imunes à corrosão por uma grande maioria de agentes agressivos (Ortigão, 1995). As barras de FRP são produzidas por um processo denominado *pultrusão* e o produto final apresenta grande resistência à tração (até três vezes a do aço) e baixo peso específico, mas o custo é mais elevado. O uso do plástico reforçado só é recomendado em ambientes de extrema agressividade, o que não ocorre, em geral, no Rio de Janeiro.

### **2.1.2. Grampo Injetado**

Os grampos injetados podem ser executados no maciço por meio da execução de pré-furos classificados como simples ou duplos. A perfuração simples é realizada com um trado ou equipamento motorizado e pode ser que não haja necessidade de revestimento das paredes do furo. A perfuração dupla se dá por meio de sonda rotativa ou sonda rotativa combinada com a técnica à percussão, além do revestimento do furo.

No processo de perfuração, utiliza-se água ou ar comprimido. O uso de lama bentonítica não é recomendado, devido à potencial redução do atrito entre o solo e o reforço. Caso seja utilizada, recomenda-se a execução de lavagem eficiente do furo com calda de cimento.

As perfurações são normalmente executadas por equipamentos, pesando entre 0,05kN (5kgf) e 10kN (1000kgf), portanto leves, de fácil transporte, manuseio e operação em qualquer talude, uma vez que as perfurações são de pequeno diâmetro (até 200mm) e não muito longas (até 25m).

Concluída a perfuração, segue-se à instalação e fixação dos elementos de reforços (barras de aço). Usualmente utilizam-se barras de aço comerciais, típicas da construção civil, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de barras de aço (GeoRio, 1999)

Aço	Seção	Diâmetro (mm)
Dywidag Gewi ST 50/55	Plena	32
Dywidag ST 85/105	Plena	32
CA 50 A	Plena	Entre 12,5 e 32,0mm
CA 50 A	Reduzida com rosca	Entre 12,5 e 32,0mm
Rocsolo ST 75/85	Rosqueada	Entre 14,0 e 41,1mm
Incotep	Rosqueada	Entre 19,0 e 50,0mm
Resinex	Rosqueada	Entre 14,0 e 41,1mm

Após as barras terem sido introduzidas nos furos e posicionadas com o auxílio de centralizadores, preenche-se os vazios com fluido cimentante qualquer, usualmente calda de cimento ou resinas. Normalmente utiliza-se calda com elevado teor de cimento para solos, reservando-se as resinas para materiais rochosos.

A injeção de calda de cimento é realizada por meio de tubulação acessória, cuja extremidade é posicionada no fundo da perfuração, injetando-se a calda de cimento do fundo para a superfície (processo ascendente), preenchendo-se totalmente a cavidade. A injeção deve ser feita a baixas pressões, aproximadamente 0,5MPa, ou utilizando-se somente a força da gravidade. Uma pequena inclinação do furo auxilia este processo.

A Figura 3 mostra uma seção típica do grampo injetado. Observa-se a presença de centralizadores que têm a função de evitar o contato do elemento metálico com o solo. Desta forma, garante-se uma espessura constante de material cimentante no entorno da barra. A extremidade do grampo pode ser dobrada ou fixada com placa e porca, no revestimento de concreto projetado.

Adjacente à barra, pode-se prever a instalação de um ou mais tubos de re-injeção perdidos, de polietileno ou similar, com diâmetro de 8 a 15 mm, providos de válvulas a cada 0,5 m, a até 1,5 m da boca do furo. A quantidade de tubos depende das fases de injeção previstas, e deve-se considerar um tubo para cada fase. Sugere-se que todo grampo receba, pelo menos, uma fase de re-injeção além da bainha. A re-injeção (segunda injeção), além de promover a melhor ancoragem do grampo, trata o maciço, adensando-o e preenchendo fissuras. Para o local onde foram cravados elementos de aço, é considerada desnecessária a aplicação de proteção contra a corrosão. Neste caso, deve-se adotar uma espessura de aço adicional (Zirlis e outros, 2003).

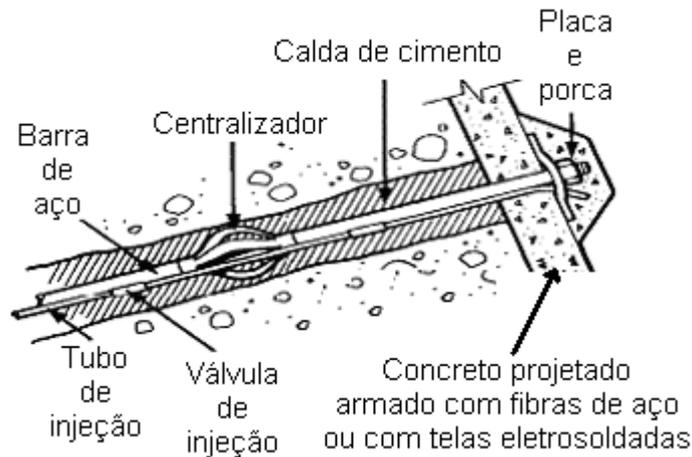


Figura 3 - Detalhes dos grampos injetados (adaptado de ABMS / ABEF, 1999)

Souza e outros (2005) apresentam os resultados da escavação de 12 grampos examinando-se detalhes relativos a diferentes estágios de injeção. Nos grampos com apenas injeção de preenchimento do furo (bainha), verificou-se que a exsudação da calda de cimento provoca vazios em grande parte do furo, não reconstituindo totalmente o confinamento provocado pela perfuração. Se a injeção do grampo não promove um perfeito preenchimento do furo, o grampo tem sua função prejudicada. Nos grampos que receberam uma re-injeção, após a execução da bainha, houve o preenchimento dos vazios causados pela exsudação da calda de bainha. Este fato foi comprovado pela coloração diferente da calda de re-injeção. Esta re-injeção reconstituiu o confinamento do furo e possibilita o tratamento do solo no entorno do grampo, promovendo uma redução dos deslocamentos da contenção.

Zirlis e Pitta (2000) recomendam que a bainha (primeira injeção ou injeção de preenchimento do furo) seja injetada por tubo auxiliar removível, de forma ascendente, com calda de fator água/cimento próximo de 0,5 (em peso), proveniente de misturador de alta turbulência até o seu extravasamento na boca do furo. Sugerem ainda que a re-injeção seja realizada após um tempo de cura da bainha mínimo de 12 horas, por meio do tubo de re-injeção que contem as válvulas manchetes e que permanece no interior do furo.

Decorrido o tempo de cura da calda, pode ser dada uma pequena protensão aos grampos, de cerca de 10% da sua carga de trabalho, para que haja uma melhor acomodação entre o solo e a argamassa e sejam assim minorados possíveis deslocamentos. Este procedimento, porém, não é obrigatório, nem tampouco utilizado na maior parte das obras de solo grampeado.

Em relação às cabeças dos grampos, a Figura 4 apresenta os tipos mais utilizados. No primeiro tipo (Figura 4a), a porca e a placa de apoio permitem a aplicação de uma pequena carga de incorporação, que serve para garantir o contato solo-concreto projetado, precaução importante no caso de muros com paramento vertical. O segundo tipo (Figura 4b), empregado em taludes inclinados, a extremidade do grampo com diâmetro até 20 mm é dobrada para a fixação ao revestimento. No terceiro tipo (Figura 4c), a extremidade do grampo é embutida no terreno.

A barra de aço não deve perder suas características de resistência ao longo do tempo. Portanto, deve receber tratamento anticorrosivo adequado, usualmente por meio de resinas epóxicas ou proteção eletrolítica. No caso do grampo injetado, a própria camada de cimento (de pelo menos 20 mm) fornece uma proteção considerável à barra metálica. Ainda pode-se utilizar tubo plástico, metálico ou de fibra (todos corrugados), preenchido com calda de cimento para proporcionar uma proteção dupla aos grampos, como recomendado em algumas situações pela ABNT NBR 5629. Esta prática é obrigatória em países, tais como França e Alemanha.

A Tabela 4 resume alguns cuidados a serem tomados durante a execução do grampo, que contribuem para melhoria do seu desempenho.

Tabela 4 - Especificações de projeto com grampos injetados (adaptada de Ortigão, 1997)

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>
Limpeza do furo	Em solos secos é realizada a seco e com ar comprimido, durante a perfuração. Em solos úmidos, o equipamento de perfuração deve utilizar água ou outro fluido na lavagem.
Aditivos	O expansor de calda de cimento é um aditivo que evita a retração e, conseqüentemente, a diminuição do atrito solo-grampo. Outro aditivo recomendado é o acelerador de cura, que reduz os prazos de execução do reforço.
Tubo lateral de injeção	Deve ser obrigatório especialmente em grampos longos ( $L > 3m$ ), para garantir o preenchimento adequado do furo.
Espaçadores ou Centralizadores	Os espaçadores podem ser fabricados na própria obra com tubos de PVC e instalados a cada 3 m ao longo da barra de aço, garantindo a sua centralização no furo.

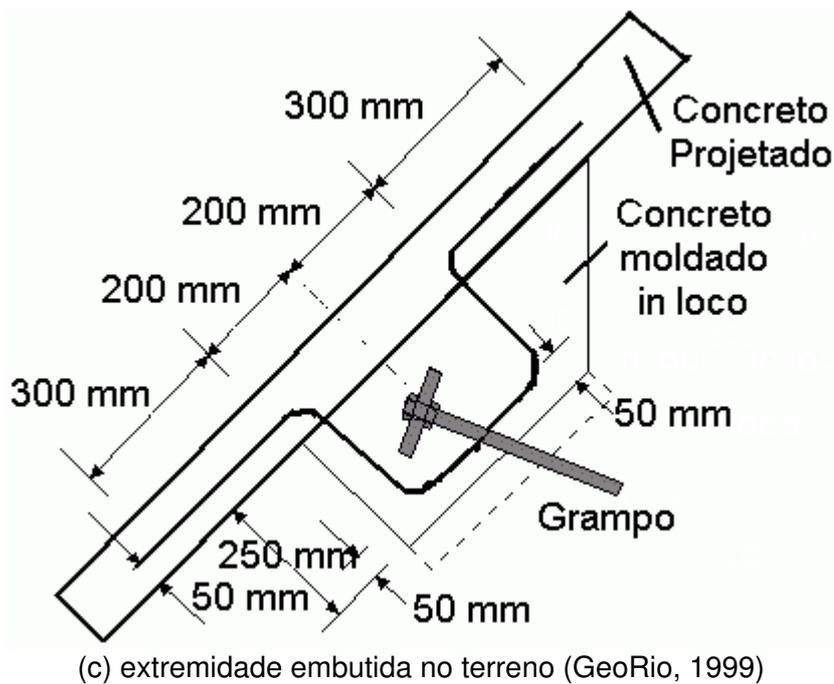
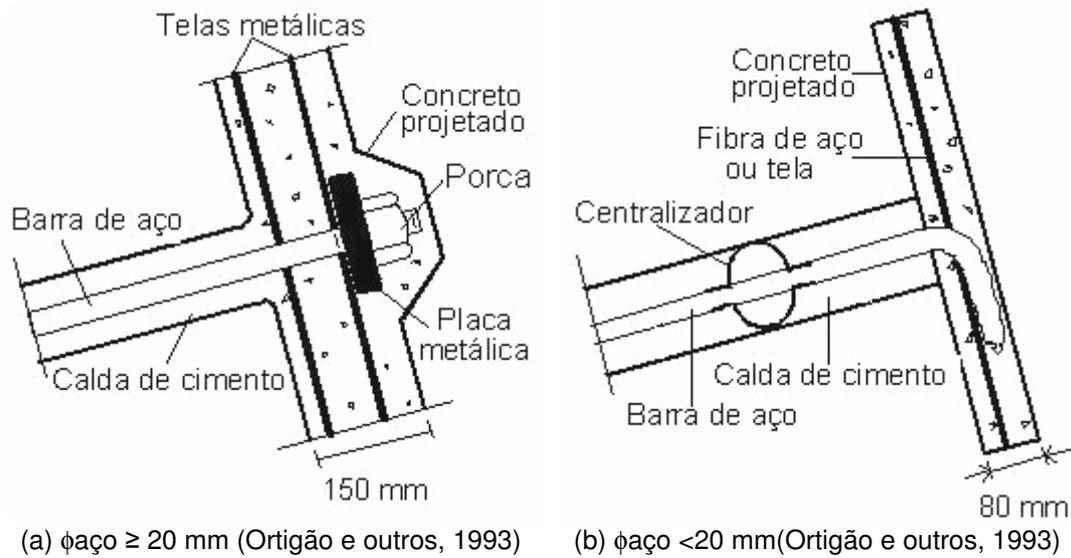


Figura 4 – Tipos de cabeça de grampos

### 2.1.3. Grampo Cravado

Os grampos podem resultar da cravação direta de barras, cantoneiras ou tubo de aço, a qual pode ser feita manualmente ou com equipamentos mecânicos. Esta não é, entretanto, a prática brasileira.

A técnica por percussão, semelhante ao processo de enfilagem usado por construtores de túneis NATM leva a um processo de execução muito rápido, mas a resistência ao arrancamento é, em geral, pequena. 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 Brasília, pois o atrito resultante é muito baixo. Este processo também não pode ser empregado em solos muito resistentes, como os saprolitos de granito e gnaisses, face à dificuldade de cravação do grampo nessas condições.

Uma técnica alternativa, desenvolvida na França (Louis, 1981), consiste na cravação, por percussão, de um tubo de aço à medida que se injeta calda de cimento. Os muros assim executados são denominados *Hurpinoise*, em reconhecimento ao técnico Hurpin que desenvolveu o método. Por meio de uma pressão de injeção elevada (superior a 20 MPa), o solo à frente da ponta é destruído, facilitando a cravação do grampo (Ortigão e Palmeira, 1992). Este processo é comumente utilizado em obras provisórias, em virtude da livre exposição dos reforços à corrosão (Ehrlich e Silva, 1992). Neste método, utilizam-se barras mais curtas e menos resistentes, com espaçamento reduzido entre elas (Mitchell e Villet, 1987). Este processo é contra-indicado para solos muito rijos, pois o esforço de cravação é muito grande, e também para solos muito moles ou fofos, devido à destruição da estrutura do material em volta do grampo, que ocasiona diminuição do atrito entre o solo e o reforço.

O grampo pode também ser introduzido no solo “a fogo”, utilizando-se um equipamento a ar comprimido a altas pressões, que injeta a barra metálica para o interior do maciço a grandes velocidades. Contudo, esta técnica tem restrições quanto ao comprimento (aproximadamente até 10m) e diâmetro (25 a 38 mm) dos grampos, além de exigir equipamento especial para a sua execução.

Quanto à proteção das barras contra a corrosão, os elementos metálicos devem receber tratamento anticorrosivo adequado (resinas epóxicas ou proteção eletrolítica).

## **2.2. Geometria do grampo**

A escolha do comprimento do grampo (L), ângulo de instalação e dos espaçamentos vertical e horizontal entre grampos, depende de alguns fatores tais como altura e ângulo de inclinação da face, tipo de grampo (injetado ou cravado), quantidade de grampos, resistência ao arrancamento ( $q_s$ ) e variáveis ambientais que eventualmente possam alterar as características mecânicas do grampo.

Como regra geral, os grampos são dispostos em linhas, suavemente inclinados em relação à horizontal. Entretanto, os grampos são mais eficientes

no controle de deslocamentos laterais da estrutura quando instalados na horizontal. Na prática, a tecnologia de instalação dos grampos permite que se adote ângulos de inclinação variando de 5 a 15°.

A Tabela 5 apresenta valores típicos de parâmetros geométricos e características de grampos para estruturas com face vertical e superfície do terreno horizontal.

Tabela 5 - Estruturas com face vertical e topo horizontal (adaptado de Clouterre, 1991)

Parâmetros	Espaçamento entre grampos	
	Reduzidos (1)	Elevados (2)
Comprimento dos grampos	0,5 a 0,7 H	0,8 a 1,2 H
Número de grampos por m <sup>2</sup> de face	1 a 2	0,15 a 0,40
Perímetro de grampo	150 a 200 mm	200 a 600 mm
Resistência à tração	120 a 200 kN	100 a 600 kN
(1)	Grampos cravados ou grampos injetados de pequenos diâmetros.	
(2)	Grampos injetados com grandes diâmetros.	

Recomenda-se em projetos que os grampos possuam o mesmo diâmetro, comprimento e ângulo de inclinação. Diferentes inclinações podem ser justificadas em casos especiais e quando os grampos são localizados próximos de obstáculos, tais como fundações de edificações vizinhas, pilares, cabos e interferências de qualquer espécie.

### 2.3.

#### Proteção da face da escavação

Após a introdução dos grampos, deve-se executar a proteção da face do maciço, a fim de que a mesma não sofra processos de rupturas localizadas e de erosão superficial, causados principalmente pela ação da chuva e outras intempéries naturais. Em solos, a proteção é geralmente executada por meio de jateamento de concreto sobre uma malha metálica, com espessura entre 5cm e 15cm e com armadura suficiente para resistir à tração gerada pela dilatação térmica do próprio concreto. Para um melhor efeito estético, podem-se utilizar elementos pré-fabricados de concreto para proteção da face.

O concreto projetado é aplicado em todo o talude, obtendo-se uma superfície protetora com boa resistência à erosão e grande durabilidade. Pode-se utilizar a aplicação por via seca ou úmida. Em obras de menor porte, como é o caso da maioria das obras de contenção, emprega-se o concreto por via seca, em face da extrema praticidade de aplicação. Ou seja, o trabalho pode ser interrompido e reiniciado sem perda de material e tempo para limpeza do equipamento. A via úmida só é utilizada, em geral, em casos de grandes volumes, superiores a  $5\text{m}^3$  aplicados ininterruptamente, pois a cada paralisação é necessário efetuar uma limpeza geral no mangote, o que não seria prático em pequenas obras (GeoRio, 1999). Porém, a perda por reflexão do concreto na parede da contenção é bem maior no caso de concreto projetado por via seca (cerca de 40% maior) em comparação com o processo por via úmida.

A elevada energia de projeção produz uma ótima compactação do concreto que colabora sobremaneira com sua alta resistência, bem como o adensamento da capa superficial do solo com uma eficiente colagem (GeoRio, 1999).

A bomba de projeção mais comum é esquematizada na Figura 5. A mistura do cimento e agregados é introduzida no funil superior e encaminhada para um conjunto de cilindros rotativos. Quando a mistura atinge a posição do suprimento de ar comprimido, é impulsionada por meio do mangote (GeoRio, 1999).

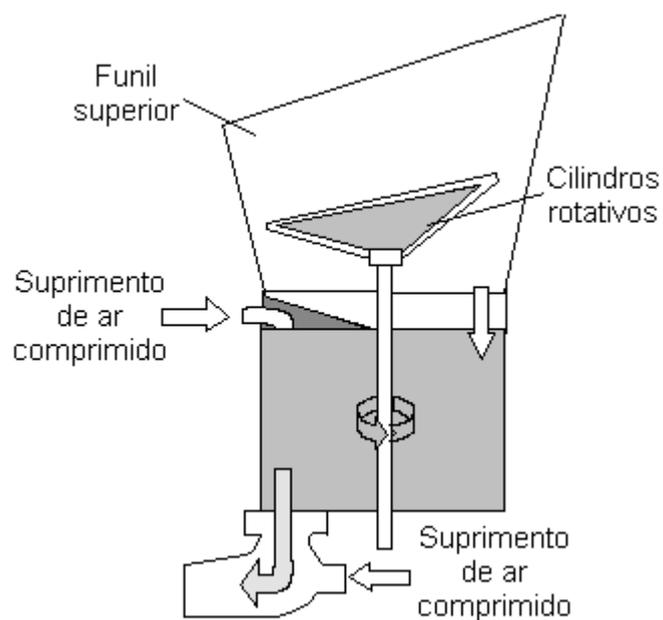


Figura 5 - Máquina ou bomba de projeção por via seca (GeoRio, 1999)

No caso do processo por via seca (Figura 6), o controle do volume de água adicionado é regulado pelo operador ao final do mangote, diretamente no bico de projeção, de acordo com a sua experiência (“à sentimento”). No caso do concreto projetado por via úmida (Figura 7), o concreto já entra na bomba devidamente dosado e no bico de projeção é injetado ar comprimido para o seu lançamento. Neste caso o concreto projetado é de maior qualidade e homogeneidade.

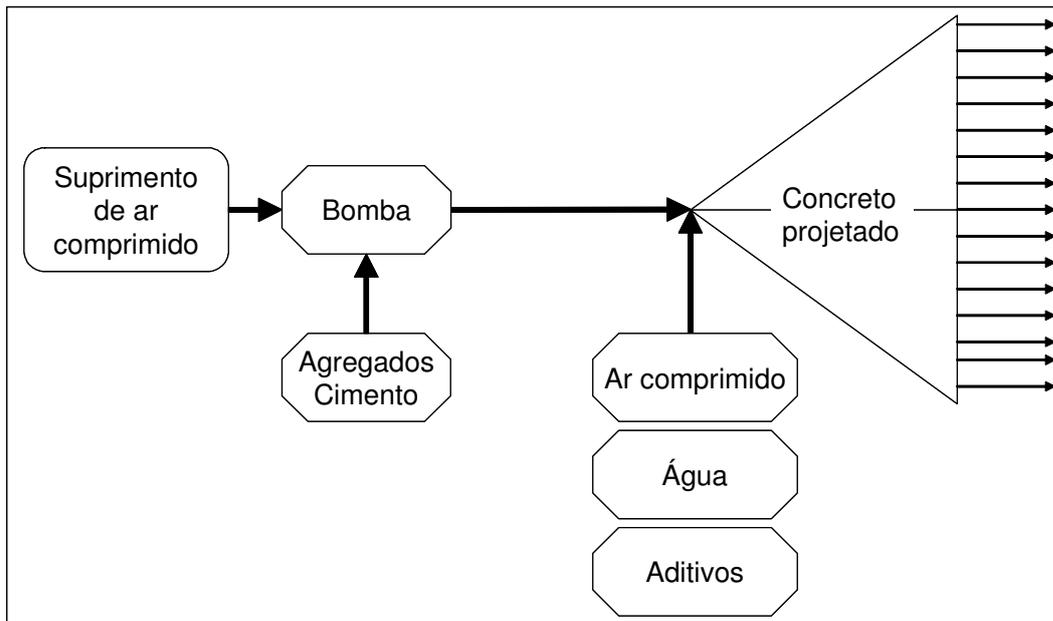


Figura 6 - Projetado via seca

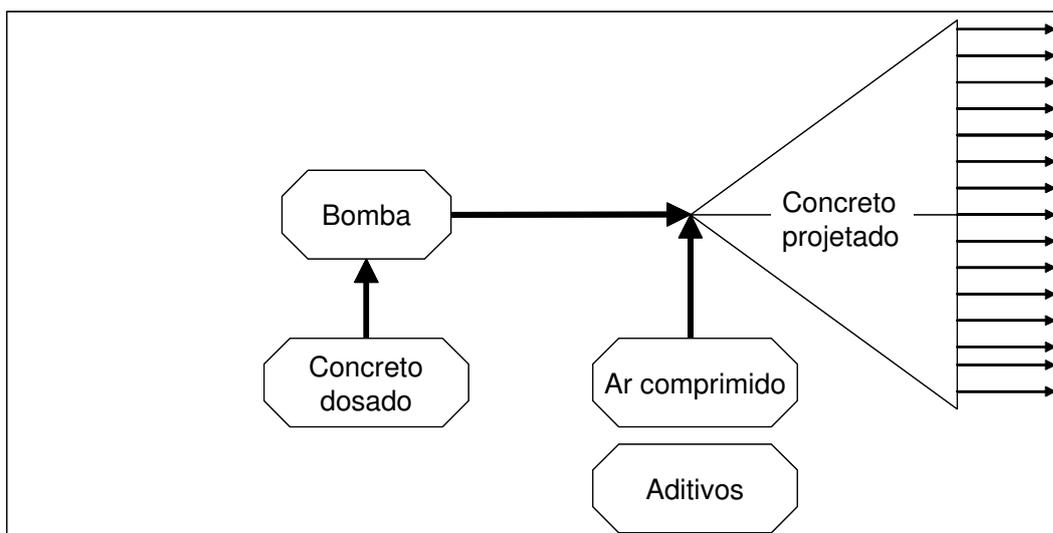


Figura 7 - Projetado via úmida

O uso de telas soldadas confere ao concreto uma armação muito prática e eficiente. Ressalta-se a necessidade de garantir seu cobrimento, além de garantir a boa ligação entre ambos.

Outra alternativa é representada pela adição de fibras metálicas ou sintéticas ao concreto, resultando em maior resistência à tração e impermeabilização da camada.

Geralmente as faces dos muros de solo grampeado são executadas na vertical. No entanto, a inclinação da face induz a uma apreciável melhoria nas condições de estabilidade durante a construção e à vida útil da estrutura.

Em muros de grande altura, a construção de bermas se apresenta como uma boa solução estética e técnica. Possibilita o acesso facilitado a diferentes partes da estrutura, provando ser extremamente útil nas fases de manutenção e monitoramento ou quando algum serviço posterior à construção venha a ser realizado.

Em projetos, recomenda-se ainda o embutimento do pé do paramento, a fim de prevenir o carreamento dos finos dos solos, devido à presença de algum fluxo de água, e manter o confinamento do solo atrás da face. Este embutimento depende das características do solo e da geometria da face (altura e inclinação). Para estruturas médias a longas, o valor mínimo é de 20 cm para solo rochoso e  $H/20$  para solos menos resistentes.

Recentemente, outros tipos de proteção vêm sendo executados, tais como a utilização, em solos, de malha metálica revestida de plástico ou geogrelha e a posterior plantação de vegetação para conter a erosão superficial da face (Wheeler, 1994). Além de ser uma opção econômica, é a que mais se integra ao meio ambiente.

## **2.4.**

### **Medidas preventivas quanto à presença de água**

A drenagem é um aspecto muito importante em estruturas de solo grampeado. Um sistema de drenagem adequado deve prevenir a geração de poropressões, além de proteger a face contra a deterioração causada pela água.

É vital que a estrutura esteja protegida contra infiltração de água, que pode resultar em carregamentos na face que podem causar deslizamento ou ruptura do solo. A água pode também induzir uma rápida redução na resistência da estrutura, por meio da corrosão das barras, especialmente quando a água contiver substâncias corrosivas.

Mesmo quando o terreno não possui um nível d'água permanente (situação em que a técnica do solo grampeado não se aplica sem rebaixamento), pode ocorrer a presença de água por infiltração na superfície, ou pela existência ou desenvolvimento de fluxo subterrâneo, gerado, por exemplo, pela ruptura accidental de tubulações de água e esgoto.

Para proteger a estrutura contra os efeitos nocivos da água, algumas medidas preventivas devem ser tomadas. A prática usual recomenda a execução dos convencionais serviços de drenagem profunda e de superfície.

No caso de drenagem profunda, recomenda-se drenos sub-horizontais, executados com tubos plásticos drenantes, de diâmetro variando entre 40 e 50mm, em perfurações no solo de 60 a 100mm de diâmetro (Figura 8). O comprimento dos drenos deve ser maior que o dos grampos, sendo o espaçamento dependente das condições locais. Na prática, os drenos profundos têm uma vida útil relativamente limitada, em face da ocorrência de processos de colmatação ao longo do tempo. Assim sendo, este tipo de drenagem é mais recomendado para obras temporárias. Entretanto, é utilizado em obras permanentes, desde que garantidas as operações de manutenção.

Para os drenos de sub-superfície, recomenda-se a instalação de barbacãs na face do talude, além de drenos verticais, atrás da parede de concreto projetado.

O dreno tipo barbacã é executado escavando-se uma cavidade com cerca de 40 x 40 x 40 cm, a qual é preenchida com material arenoso. A ligação entre a cavidade com areia e a atmosfera é realizada por meio de um tubo de PVC perfurado, encoberto com tela de nylon ou geotêxtil drenante, com inclinação decrescente (Figura 9). Mitchell e Villet (1987) recomendam o uso de tubos de PVC de aproximadamente 100mm diâmetro, comprimento entre 0,3m a 0,5m e espaçamento idêntico ao dos grampos.

O dreno vertical atrás da parede pode ser executado a partir da instalação de calha plástica revestida por manta geotêxtil numa escavação de 10 x 30 cm, na direção vertical da crista até o pé do talude (Figura 9). A água coletada neste dreno é recolhida em uma canaleta instalada no pé da escavação. Esta alternativa é bastante eficiente e recomendada para o caso de estruturas permanentes.

As canaletas de crista e pé, bem como as escadas de descida d'água são moldadas in loco e revestidas por concreto projetado.

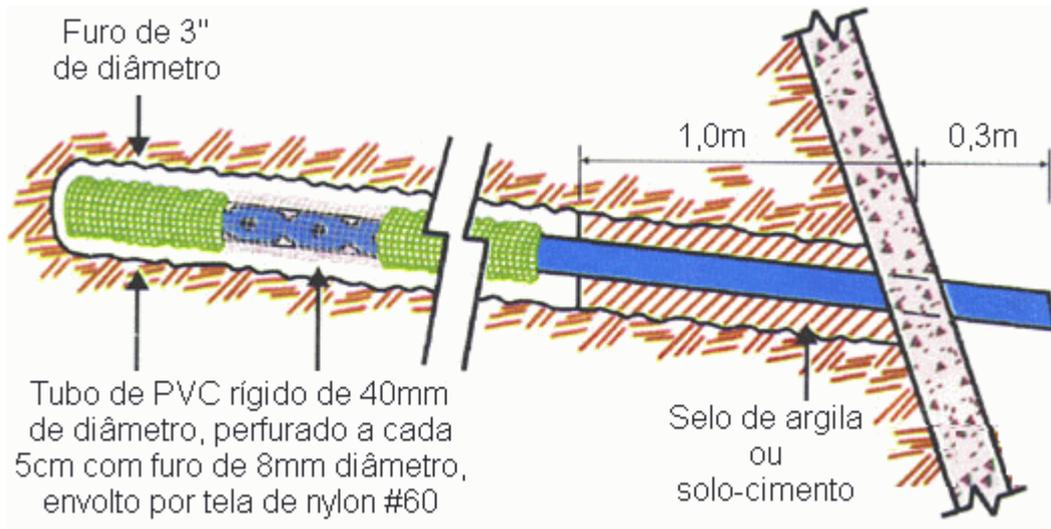


Figura 8 - Detalhe do dreno profundo (ABMS / ABEF, 1999)

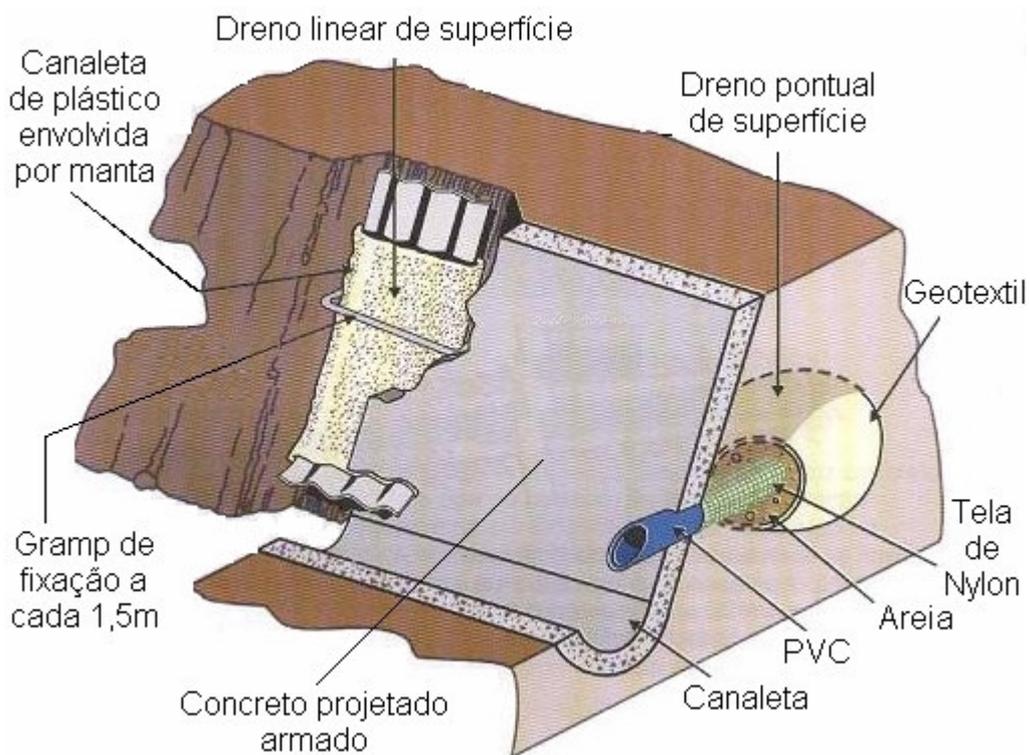


Figura 9 - Detalhe dos drenos tipo barbacã e de paramento (ABMS / ABEF, 1999)

## 2.5. Comparação entre técnicas de estabilização

### 2.5.1. Solo Grampeado e Cortina Ancorada

Embora possa parecer que haja grande similaridade entre os grampos e as ancoragens ou os tirantes convencionais, quando utilizados para estabilização de taludes ou escavações, há distinções muito importantes e com aplicações específicas para cada caso (Bruce e Jewel, 1986; Ortigão e Fannin, 1992). Enquanto as ancoragens são fortemente pré-tensionadas com cargas de 150kN a 1000kN, para garantir a estabilidade desejada, os grampos, em alguns casos, podem ser submetidos a apenas uma pequena pré-tensão, da ordem de 5kN a 10 kN, com a finalidade exclusiva de garantir a ligação com o concreto projetado, principalmente em paramentos verticais.

Os mecanismos de transferência de carga também apresentam diferenças marcantes, conforme mostra a Figura 10. Basicamente, os grampos são intervenções com mobilização passiva, enquanto os tirantes apresentam mobilização ativa. Ao contrário das ancoragens, os grampos não têm trecho livre, transferindo tensões para o solo ao longo de todo o seu comprimento. Em consequência, a distribuição de tensões na massa de solo é diferente. Por outro lado, como os grampos são instalados com uma maior densidade (tipicamente 1 grampo para cada 1,0m<sup>2</sup> até 5,0m<sup>2</sup> de parede), a possibilidade de ruptura em um grampo é, em geral, pequena e as tolerâncias construtivas não exigem o rigor que se pratica nas cortinas convencionais.

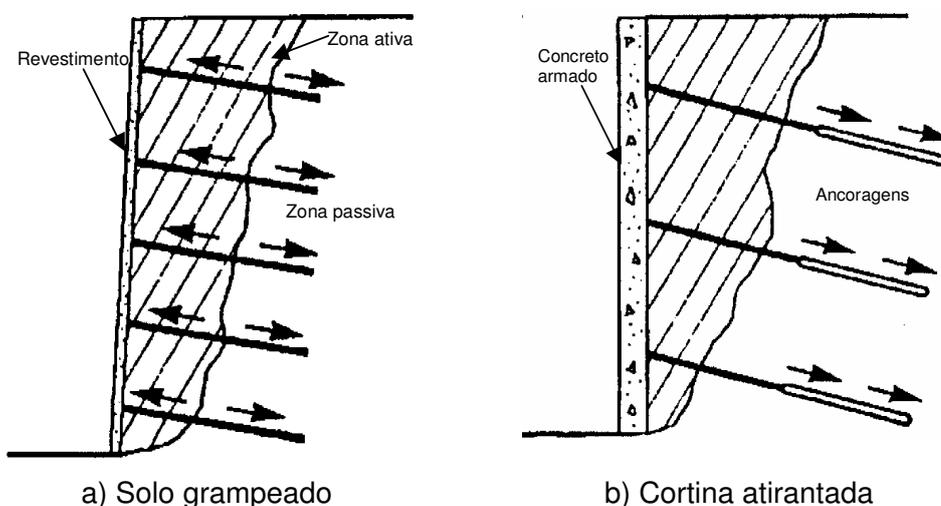


Figura 10 - Mecanismos de transferência de carga (ABMS / ABEF, 1999)

A grande maioria das cortinas tradicionais tem parede vertical moldada in loco, em função da facilidade de execução, quando comparada com a parede inclinada. Ao contrário, os muros de solo grampeado podem facilmente ter paredes inclinadas, com vantagens para a estabilidade da obra e redução de escavações.

As ancoragens convencionais tendem a ser longas (entre 9 e 25m), necessitando de um equipamento de maior porte, ao contrário dos grampos que são curtos, de comprimento máximo da ordem da profundidade da escavação.

Os tirantes são protendidos assim que a estrutura de contenção vai ficando pronta, mobilizando-se sem necessidade de deformação do maciço. Ao contrário, os grampos não são protendidos. Somente após a deformação do maciço, eles se mobilizam. Sabe-se, entretanto, que as deformações necessárias para mobilização da interação solo/grampo são muito pequenas.

No caso de estruturas com solo grampeado, os avanços dos serviços de contenção ocorrem de forma contínua não necessitando de paralisações para aguardar cura, ensaios e protensão das ancoragens atirantadas.

Cuidados especiais no dimensionamento das peças de concreto armado ou vigas metálicas devem ser tomados para os tirantes, especialmente em relação à punção. No caso dos grampos, a carga junto à cabeça é mínima ou nula, sendo suficiente o simples dobramento com gancho ou o uso de pequena placa metálica, porca e aperto com chave.

A corrosão dos tirantes pode ser maior, visto que o mesmo pode estar exposto ao efeito da corrosão sob tensão, necessitando de cuidados especiais de tratamento, principalmente para obras permanentes.

### **2.5.2.**

#### **Solo Grampeado e Terra armada**

Em 1960, Henry Vidal patenteou o sistema de contenção denominado Terra Armada. Esta técnica consiste na construção de aterros em que, durante sua execução, são colocadas tiras, entre as camadas de solo. O atrito lateral destes elementos implantados no solo compactado permite a formação de arrimos verticais de grande altura.

A técnica de solo grampeado é bastante semelhante à terra armada, tanto em princípios quanto no método de análise. A principal diferença reside na seqüência construtiva. A terra armada é executada em aterros, de baixo para cima e os deslocamentos horizontais do muro ocorrem principalmente na parte

de baixo. Já o muro em solo grampeado é executado de cima para baixo e os maiores deslocamentos ocorrem na parte superior do muro. A Figura 11 apresenta a comparação entre os deslocamentos horizontais do muro de solo grampeado e do muro de terra armada.

Ao contrário da terra armada, a técnica de solo grampeado pode ser aplicada a um solo existente explorando suas características naturais. Na terra armada, as características do material de aterro são previamente controladas, determinadas e determinante (há fabricação de material).

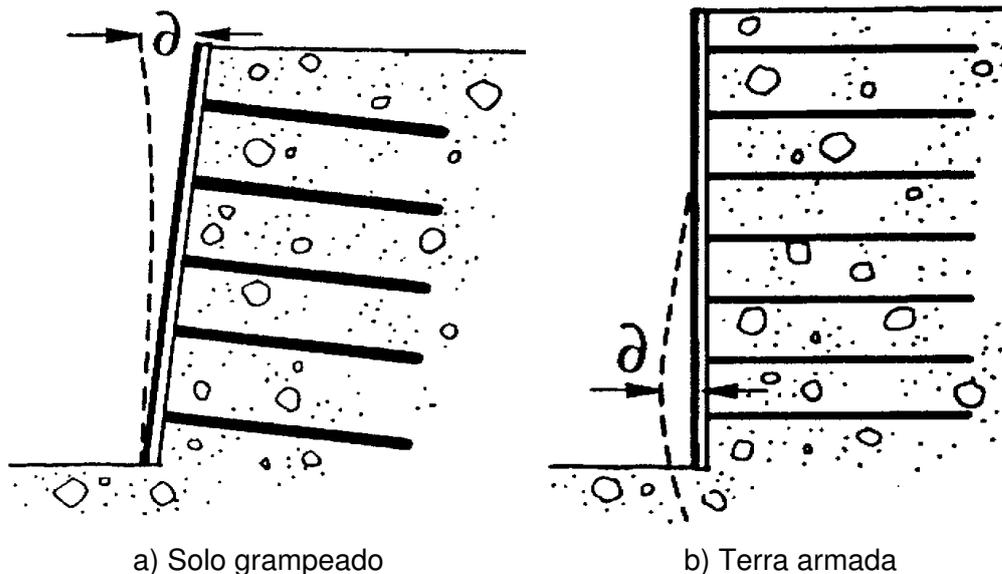


Figura 11 - Deslocamentos horizontais de muros (Schlosser, 1983)

Ambas as técnicas apresentam os seguintes pontos em comum:

- (i) Os reforços são instalados no solo sem tensão, sendo mobilizados somente após a deformação do conjunto;
- (ii) Os grampos trabalham basicamente por atrito lateral, e a área reforçada assemelha-se a um muro de gravidade;
- (iii) O revestimento na face do talude não desempenha papel estrutural relevante, utilizando comumente o concreto projetado para a técnica de solo grampeado e, geralmente, estruturas pré-moldadas para a terra armada;
- (iv) Há uma interação física e química entre os grampos e o solo, devido à injeção de calda de cimento no furo que contém a barra de aço, ou seja, tem-se uma resistência por atrito e adesão. Na terra armada tem-se basicamente o atrito entre o solo e as nervuras.

## 2.6. Vantagens

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.

A evolução dos métodos de análise, a experiência na execução e os bons resultados permitem otimizar o projeto, reduzindo-se o comprimento total de grampos em relação aos projetos elaborados nas décadas de 70 e 80.

A disseminação da técnica de solo grampeado deve-se a diversas vantagens:

### **(i) Baixo Custo**

A execução da obra requer poucos tipos de equipamentos: máquina para remover o solo de escavação, sonda de perfuração, equipamento de injeção de calda de cimento ou martelo mecânico para cravação dos grampos e máquina para lançamento do concreto projetado do paramento.

A espessura do concreto projetado é relativamente pequena (0,05 a 0,15m), o que representa uma economia de material.

### **(ii) Facilidade de Execução**

A técnica pode ser executada utilizando-se equipamentos convencionais de perfuração e chumbamento.

### **(iii) Velocidade de Execução**

Os avanços dos serviços de contenção ocorrem de forma contínua.

A velocidade na execução do reforço é conferida por meio da utilização de equipamentos adequados, tais como perfuratrizes rotopercussoras, em que o comprimento reduzido dos grampos permite perfuração com poucas manobras da lança da rotopercussora.

A utilização de concreto projetado na execução do paramento também confere velocidade à obra.

### **(iv) Acessibilidade**

Os equipamentos utilizados são de fácil transporte, sendo, portanto particularmente interessantes em locais de difícil acesso, de área limitada, densamente ocupados ou instáveis.

**(v) Segurança**

Os muros de solo grampeado podem facilmente ser inclinados no sentido do terreno, contribuindo para uma maior estabilidade do muro e redução do movimento de terra na obra. Além disso, a inclinação da parede minimiza a perda por reflexão do concreto jateado.

Um grampo que venha a sofrer uma sobrecarga, não induzirá o colapso do sistema como um todo.

Medições de campo em escavações com solo grampeado realizadas na Europa indicaram que os deslocamentos necessários para 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 (Clouterre, 1991 e Juran e Elias, 1991).

As estruturas utilizadas em solo grampeado são mais flexíveis que as estruturas convencionais de concreto armado. Conseqüentemente, essas estruturas podem adaptar-se melhor ao terreno circundante e resistir melhor aos recalques diferenciais. Essa característica do solo grampeado pode oferecer economia para escavações em taludes instáveis.

O solo grampeado é um excelente método de contenção em regiões sísmicas. O desempenho e estabilidade das estruturas de solo grampeado durante terremotos têm sido analisados e confirmados por meio de ensaios centrífugos (Vucetic e outros, 1993).

**(vi) Versatilidade**

Embora a maioria das pesquisas e estudos em solo grampeado empreendidos até os dias de hoje estejam limitados a solos homogêneos, esta técnica também se adapta aos solos heterogêneos.

A técnica pode ser empregada a diferentes tipos de solo, sendo as melhores condições observadas em solos granulares compactos ou argilas arenosas rijas de baixa plasticidade. O aumento da rigidez da estrutura de solo grampeado é possível por meio 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.

## **2.7. Limitações**

Apesar das vantagens expressivas, a técnica de solo grampeado também apresenta algumas restrições:

### **(i) Tipo de Solo**

O solo deve possuir alguma coesão ou cimentação, para que o talude permaneça estável por algumas horas até a instalação dos grampos.

A técnica não se aplica a solos com alto teor de argila ou que sejam suscetíveis a variações volumétricas significativas (argilas expansivas, argilas orgânicas).

### **(ii) Presença de Nível d'água**

O uso da técnica limita-se a maciços de solo sem nível d'água estabelecido. Na presença de nível d'água, deve-se projetar sistemas eficientes de rebaixamento permanente do NA.

### **(iii) Monitoramento obrigatório da Obra**

Taludes resultantes de escavações junto a estruturas pré-existentes, sujeitas a danos por recalques, somente devem ser estabilizados pelo processo de grampeamento, se houver uma análise adequada e controle de recalques da estrutura desde o início da escavação até os 6 meses seguintes após o término da obra. Tal recomendação é decorrente das deformações inevitáveis que ocorrem durante a mobilização da resistência do solo e alongamento do grampo até atingir a sua carga de trabalho, que induzem recalques na superfície de montante do talude escavado.

### **(iv) Qualidade do Grampo**

Em estruturas de longa vida útil, deve-se prestar atenção particular a durabilidade dos grampos usados em solos corrosivos e para movimentos a longo prazo, tais como o rastejo.

## **2.8. Modelos de análise e métodos de projeto**

Não há uma metodologia padrão ou única para dimensionamento de uma estrutura em solo grampeado. A literatura apresenta diferentes enfoques conceituais quanto à fenomenologia de funcionamento. Em alguns casos, considera-se que o maciço tratado deve ser assemelhado a um muro de gravidade e, como tal, analisado, tanto para esforços externos como internos. Desta forma, o bloco reforçado deve resistir, sem escorregamento ou

tombamento, aos empuxos do solo contido. A verificação da estabilidade interna se dá pelo dimensionamento do espaçamento e comprimento do grampo, os quais devem ser suficientes para estabilizar o volume de solo abrangido.

Os principais métodos de análise de obras de solo grampeado estão sumariados na Tabela 6. Em todos os casos o terreno atrás do muro é subdividido em uma zona ativa, limitada por uma superfície potencial de deslizamento, sendo o restante considerado zona passiva (Figura 12). Os termos ativo e passivo, ao contrário do preconizado na teoria de empuxos de terra, referem-se à forma de mobilização dos esforços no grampo. O limite entre as duas regiões é definido pela localização em cada grampo do ponto de máxima força axial. A força axial é desenvolvida a partir do deslocamento do solo causado pela descompressão lateral (escavação).

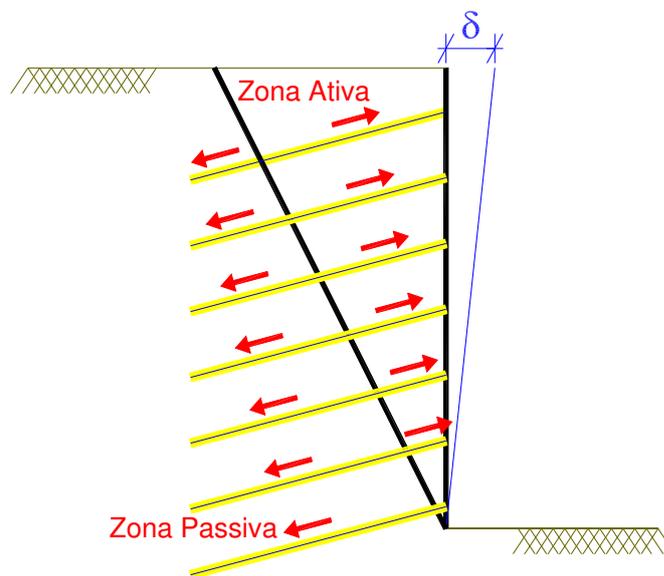


Figura 12 - Mobilização de esforços nos grampos nas zonas ativa e passiva

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 sua natureza. Maiores detalhes sobre os métodos são apresentados por Stocker e outros (1979), Shen e outros (1981), Schlosser (1983), Juran e outros (1988), Bridle (1989), Anthonie (1990), Ortigão e outros (1993) e Dyminski (1994).

Tabela 6 - Métodos de análise e modelos de ruptura (adaptado de Ortigão e outros, 1993)

Características	Métodos					
	Alemão	Davis	Multicritério ou Francês	Cinemático	Cardiff	Escoamento
Referência	Stocker e outros (1979)	Shen e outros (1981)	Schlosser (1983)	Juran e outros (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 Blocos	2 Blocos	Fatias	-	Fatias	Bloco Rígido
Fator de segurança	Global	Global	Global ou Local	Local	Global	Global
Superfície de ruptura	Bilinear	Parabólica	Circular ou Polinomial	Espiral log	Espiral log	Espiral log
Grampo resistente à tração	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Grampo resistente ao cisalhamento	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Grampo resistente à flexão	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Não
Inclinação da parede	Qualquer	Vertical	Qualquer	Qualquer	Qualquer	Qualquer
Camadas de solo	1	1	Qualquer	1	1	1

<p>ALEMÃO</p>	<p>DAVIS</p>	<p>MULTICRITÉRIO</p>
<p>CINEMÁTICO</p>	<p>BRIDLE</p>	<p>ANTHOINE</p>

## 2.9. Comportamento mecânico do grampo

O principal elemento de interação dos grampos está relacionado à mobilização do atrito existente entre a superfície dos mesmos e o solo circundante. Como as inclusões trabalham basicamente à tração, quanto maior o atrito entre os dois materiais, melhor será o desempenho do reforço. A resistência ao arrancamento depende não só do tipo e densidade do solo, mas também do tipo do grampo. Grampos injetados apresentam resistência ao arrancamento superior à obtida com os grampos cravados. Para que o atrito na interface seja mobilizado é necessário que haja pequenos deslocamentos (de apenas alguns milímetros) entre o grampo e o material do maciço.

A quantificação da resistência ao arrancamento é obtida por meio de ensaios de arrancamento, executados no campo. Estes ensaios podem ser realizados com um trecho livre de 1m seguido de trecho injetado com 3m de comprimento (não há normatização). O grampo é tracionado e a carga de tração deve ser acompanhada por célula de carga.

Em obras de grande porte os ensaios de arrancamento devem ser realizados antes da obra para se estabelecer o valor da resistência ao arrancamento ( $q_s$ ) a ser adotada no projeto. Em obras menores, isso raramente ocorre. Os ensaios são realizados durante a obra e o projeto é ajustado à medida que se obtêm resultados desses ensaios.

Recomenda-se que sejam efetuados ensaios de arrancamento, na quantidade mínima de um por fileira de reforços e a cada mudança de material constituinte do terreno.

Ao contrário do que se poderia imaginar, foi constatado experimentalmente que, em maciços homogêneos, a resistência ao arrancamento ( $q_s$ ) é constante e não aumenta com a profundidade (Cartier e Gigan, 1983; Mitchell e Villet, 1987). Comportamento semelhante foi observado em ensaios de arrancamento em malhas de pneus usados (Gerscovich e outros, 2000). Segundo os autores, para pequenas tensões confinantes há uma tendência de dilatação, atribuindo ao solo uma resistência adicional.

Além do atrito, outros fatores influenciam na interação do material do maciço com as inclusões, porém de maneira bem mais secundária. O empuxo passivo do solo sobre o grampo age de diferentes formas, dependendo da rigidez do reforço. Caso muito flexível, o grampo tende a se deformar junto com o material circundante. Caso rígido, o grampo reage aos esforços aplicados

sobre ele, aumentando assim sua resistência ao cisalhamento na superfície de ruptura. Este é o principal mecanismo de resistência de estacas de maior diâmetro, bastante utilizado para rupturas profundas. No caso dos grampos, que não apresentam grande rigidez, mas também não são totalmente flexíveis, o empuxo atua, contudo, de forma pouco relevante. Observa-se que este tipo de resistência da inclusão só é mobilizado com deslocamentos relativamente grandes, para os quais o solo entre as barras já teria sofrido deformações inadmissíveis.

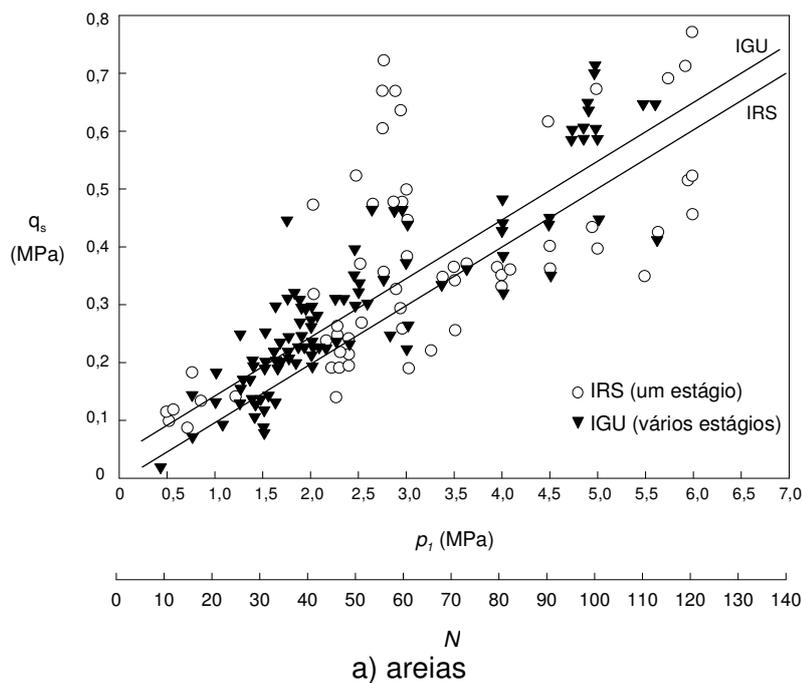
A inclinação dos grampos em relação à superfície de ruptura influi de maneira bastante significativa na contribuição de resistência que os reforços podem fornecer ao maciço. Em escavações ou taludes, os grampos devem ser instalados horizontalmente ou com pequena inclinação com a horizontal, para que apresentem um melhor comportamento quando tracionados.

## **2.10. Correlações empíricas**

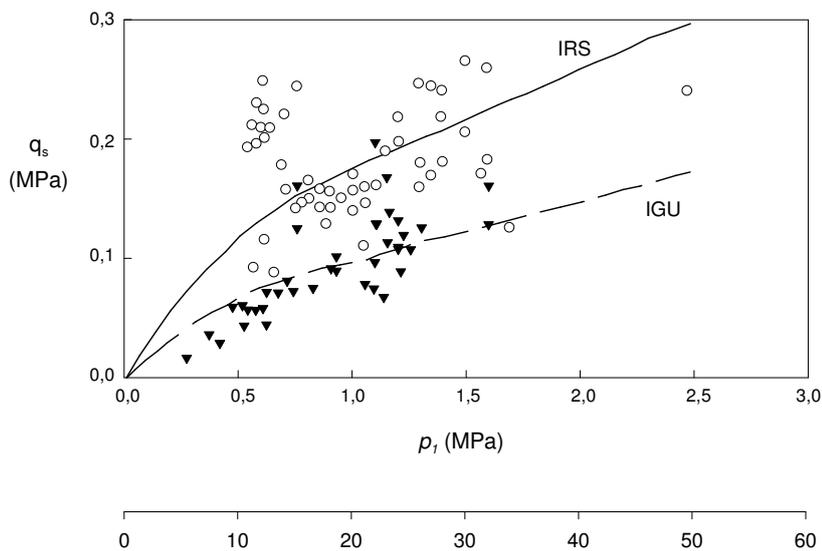
A resistência ao arrancamento ( $q_s$ ) deve ser obtida em ensaios de arrancamento durante a obra. Porém, na fase de pré-dimensionamento e na ausência de experiência específica, estima-se a resistência ao arrancamento ( $q_s$ ) por meio de correlações empíricas da literatura, tais como as disponibilizadas nos trabalhos de Bustamante e Doix (1985) e Ortigão (1997).

Bustamante e Doix (1985) relacionam o valor de  $q_s$  com a pressão limite do pressiômetro Ménard ( $p_1$ ) e com o índice de resistência à penetração (N-SPT). Os resultados apresentados na Figura 13 incluem ensaios de arrancamento realizados em ancoragens com somente um estágio de injeção (IGU) e as de múltiplo estágio (IRS), com tubo de injeção com válvula manchete. Ressalta-se que as correlações apresentadas entre a pressão limite do pressiômetro de Ménard e o número de golpes do ensaio SPT são válidas apenas para os solos estudados pelos autores citados.

Os resultados apresentados por Bustamante e Doix (1985) mostram dispersão considerável. A correlação entre  $p_1$  e N, também, apresenta valores de N muito elevados, os quais podem ser atribuídos a procedimentos diferentes de ensaio, adotados nos países onde os dados foram obtidos.



a) areias



b) argilas e siltes

Figura 13 – Correlação  $q_s$ ,  $p_1$  e  $N$ (SPT) (Bustamante e Doix, 1985)

Ortigão e Palmeira (1997) analisam ensaios de arrancamento realizados no Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília e sugerem a correlação apresentada na Figura 14. Nestes ensaios, todos os grampos foram executados em furos com diâmetros entre 75 e 150 mm com injeção de calda de cimento sem pressão. A dispersão dos resultados é grande, provavelmente em função dos procedimentos diferentes empregados por vários executores de grampos.

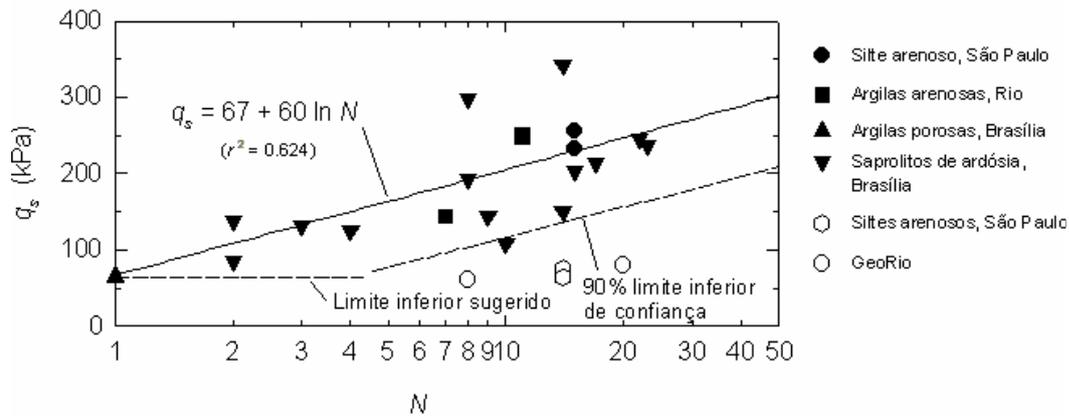


Figura 14 – Correlação entre  $q_s$  e número de golpes  $N$ (SPT) (Ortigão e Palmeira, 1997)

Proto Silva (2005) apresenta uma relação semi-empírica para se avaliar a resistência ao arrancamento de grampos, baseada nos parâmetros de resistência do solo e da interface solo/nata de cimento, obtidos em ensaios de cisalhamento direto no laboratório. Para isto foram realizados ensaios de arrancamento em uma obra de solo grampeado executada em um maciço de solo residual de gnaiss e ensaios de cisalhamento direto no solo e na interface solo/nata de cimento para avaliação das propriedades mecânicas destes materiais.

Com o objetivo de se determinar a resistência ao arrancamento em função dos parâmetros de resistência da interação solo/nata de cimento, admitiu-se que o mecanismo de transferência de carga na interação solo/grampo se dá pelo deslizamento da nata de cimento no contato com o solo. Assim, é considerada a resistência ao arrancamento ( $q_s$ ) obtida nos ensaios de campo igual à resistência ao cisalhamento na interface solo/grampo, definida em laboratório pelos ensaios de cisalhamento direto na interface solo/nata de cimento e expressa por (Proto Silva, 2005):

$$q_s = \lambda_1 (c_a' + \sigma_n \operatorname{tg} \delta')$$

**Equação 01**

onde:

$q_s$  = resistência ao arrancamento;

$\lambda_1$  = fator de carga;

$c_a'$  = adesão da interface;

$\sigma_n$  = tensão normal aplicada ao grampo;

$\delta'$  = ângulo de atrito da interface.

Alternativamente, a resistência ao arrancamento pode ser expressa em função dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo (Proto Silva, 2005):

$$q_s = \lambda_1^* \alpha (c' + \sigma_n \operatorname{tg}\phi') \quad \text{Equação 02}$$

onde:

$q_s$  = resistência ao arrancamento;

$\lambda_1^*$  = fator de carga para solo residual de gnaiss;e;

$\alpha$  = coeficiente de interface;

$c'$  = coesão do solo;

$\sigma_n$  = tensão normal aplicada ao grampo;

$\phi'$  = ângulo de atrito do solo.

As equações 1 e 2 apresentam um fator de carga  $\lambda_1$  e  $\lambda_1^*$ , respectivamente, que envolvem um conjunto de condicionantes de interação solo/grampo, tais como fator de escala, interação física entre a nata de cimento e o solo, sucção dos solos não saturados, efeito tridimensional do grampo, condicionantes de projeto (espaçamento entre os grampos), efeitos da re-injeção dos grampos estudados (Proto Silva, 2005).

A Figura 15a apresenta o fator de carga  $\lambda_1^*$  em função da tensão normal ao grampo considerando solo residual de gnaiss tanto jovem quanto maduro. A Figura 15b apresenta a variação do fator de carga ( $\lambda_1$ ) com o aumento da tensão normal ao grampo para o solo residual jovem de gnaiss estudado pelo autor.

A Equação 03 apresenta o coeficiente de interface ( $\alpha$ ) que associa os parâmetros de resistência da interface solo-nata aos parâmetros de resistência do solo, expresso por:

$$\alpha = \frac{c_a' + \sigma_n \operatorname{tg}\delta'}{c' + \sigma_n \operatorname{tg}\phi'} \quad \text{Equação 03}$$

onde:

$\alpha$  = coeficiente de interface;

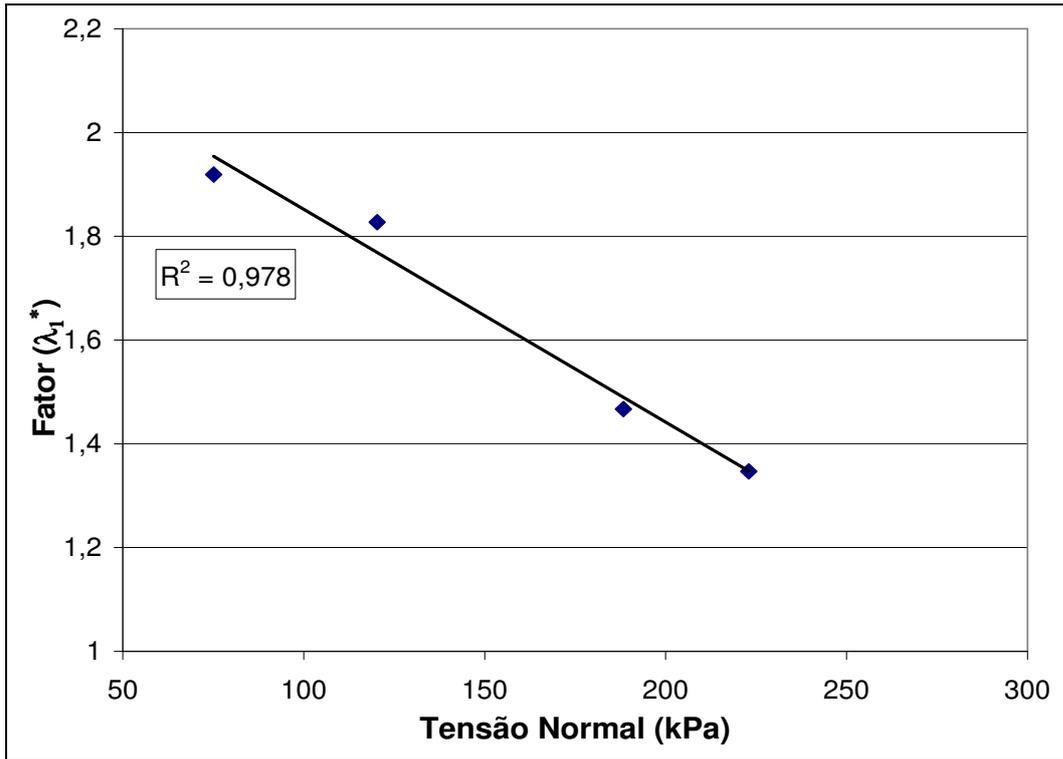
$c_a'$  = adesão solo/nata de cimento;

$\sigma_n$  = tensão normal;

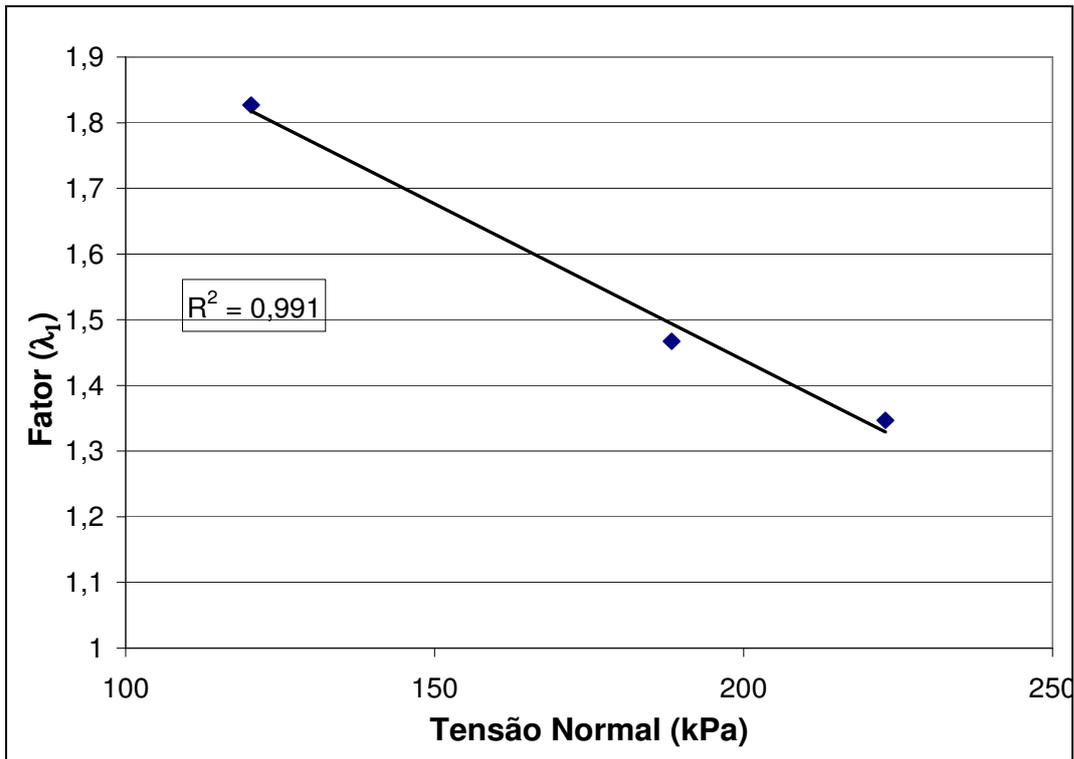
$\delta'$  = ângulo de atrito na interface solo/nata de cimento;

$c'$  = coesão do solo;

$\phi'$  = ângulo de atrito do solo.



a) solo 1: argila-arenosa - solo residual maduro



b) solo 2: areia-argilosa - solo residual jovem

Figura 15 – Tensão normal x Fator de carga ( $\lambda_1$  e  $\lambda_1^*$ ) (Proto Silva, 2005)

A Figura 16 ilustra a variação do coeficiente de interface ( $\alpha$ ) em função da tensão normal ao grampo para o solo residual de gnaissado maduro (1) e jovem (2).

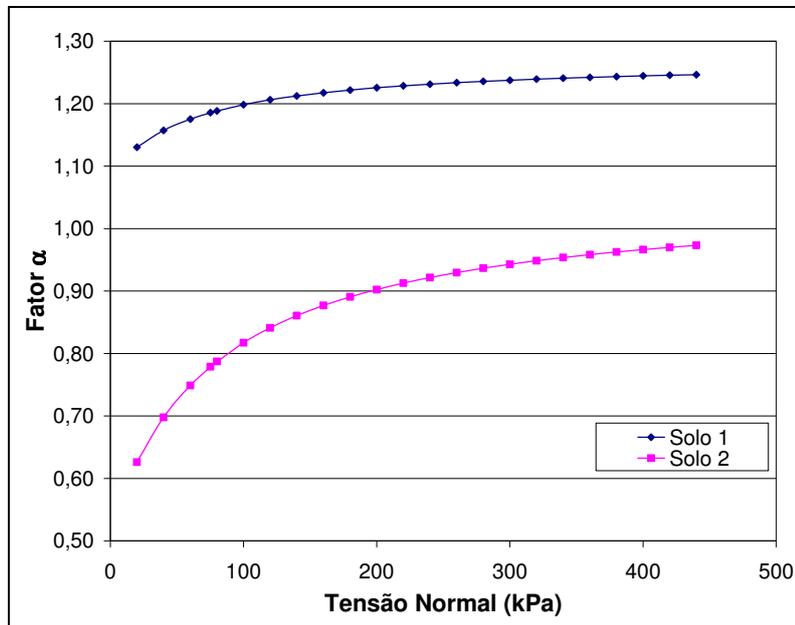


Figura 16 – Tensão normal x Coeficiente de interface ( $\alpha$ ) (Proto Silva, 2005).

Proto Silva (2005) avaliou a relação proposta para a estimativa de  $q_s$  considerando resultados experimentais de resistência ao arrancamento obtidos por diferentes autores em solo residual de gnaissado. Os resultados obtidos indicaram uma expressiva adequação da relação proposta.

## 2.11. Pesquisas sobre solo grampeado no Brasil

Ortigão e outros (1992) reportaram a experiência de campo pioneira da Diretoria de Geotécnica do Rio de Janeiro em um muro experimental executado por meio da técnica de solo grampeado, no Morro da Formiga, RJ. As condições e as características geotécnicas do local foram descritas, seguidas de um relato sobre a construção, a instrumentação e ensaios realizados. Uma análise de estabilidade foi apresentada, concluindo-se sobre vantagens técnicas e econômicas do solo grampeado.

Dyminski (1994), da PUC-Rio, na sua dissertação intitulada “Análise de estabilidade e desempenho de taludes com inclusões passivas”, realizou uma análise dos modelos e métodos de projeto de estruturas grampeadas. Por meio deste estudo, pôde ser efetuada uma adaptação de métodos de análise de

estabilidade de taludes por equilíbrio limite englobando os grampos (inclusões passivas). Utilizou-se métodos de Bishop simplificado e Sarma. As forças entre fatias foram quantificadas por meio da teoria de capacidade de suporte de Terzaghi. A pesquisa apresentou uma avaliação do incremento do fator de segurança devido à introdução dos grampos no talude e também analisou a validação do uso de métodos de equilíbrio limite neste tipo de caso.

Vieira (1996), da UNB, na dissertação intitulada “Estudo da Análise de Estabilidade de Estruturas em Solo Grampeado”, apresenta análises de estabilidade de estruturas em solo grampeado. Nessas análises foram utilizados programas de equilíbrio limite desenvolvidos na Universidade de Brasília especificamente para esta finalidade. Foram analisadas escavações com diferentes alturas, números de grampos e espaçamento e comprimento de grampos. A influência da presença de sobrecarga na superfície do terrapleno também foi investigada. O estudo envolveu a utilização de métodos de análise disponíveis na literatura. Os resultados obtidos mostram a importância da presença dos elementos de reforço para a estabilidade do talude e identificam aspectos relevantes a serem considerados em análises por equilíbrio limite deste tipo de estrutura de contenção.

Lima (1996), da Coppe UFRJ, na dissertação intitulada “Análise numérica do comportamento de solos grampeados”, apresentou o estudo numérico de uma escavação de 5 m de comprimento e 10 m de profundidade executada utilizando solo grampeado. O estudo objetivou verificar os fatores de maior importância no comportamento desse tipo de técnica. Na modelagem, o solo foi considerado como elasto-plástico e os grampos como elástico-lineares. Comparando-se os resultados das simulações com e sem grampo, destacou-se a grande contribuição do grampeamento à estabilidade.

Ortigão (1997) apresentou resultados de ensaios de arrancamento correlacionados com o índice N do SPT. A correlação proposta pode avaliar o desempenho dos grampos com relação à resistência ao arrancamento nos primeiros estágios de uma obra, antes da realização ensaios no local.

Na USP, Montezuma (1998) defendeu sua dissertação intitulada “Solo pregado (Soil nailing) - Análise da técnica para reforço de solos”. O estudo compreendeu a análise de taludes típicos (de geometria simples) e a análise de um caso de uma obra, estudados sobre a ótica de três métodos de reforço de solos: os métodos reportados por Palmeira (1992), Clouterre, (1991) e Alonso (1995). Nas análises considerou-se a influência da introdução dos reforços. Avaliou-se também os comprimentos de ancoragem e comprimentos totais

sugeridos por cada um dos métodos, obtendo-se uma comparação entre os três métodos estudados e uma análise dos resultados sugeridos para a obra estudada em relação aos dados fornecidos pelo projetista.

Silva (1999), da PUC-Rio, na sua dissertação intitulada “Análise Numérica de Estruturas Grampeadas”, teve como objetivo a implementação de uma ferramenta numérica que contabiliza as inclusões horizontais e subhorizontais na parcela de solo devidamente discretizada por elementos finitos. Este modelo implementa a análise de esforços axiais e cisalhantes solicitados nas interfaces aço/nata, nata/solo e no próprio aço e, também, esforços fletores de um material "equivalente" formado pela combinação das rigidezes do aço e da nata. A pesquisa resultou na implementação de um conjunto de sub-rotinas, denominado GRAMPO, no programa DYNREL, desenvolvido no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. A formulação proposta para contabilizar o efeito das inclusões considerou, além dos deslocamentos nodais horizontal e vertical, a influência das rotações no sistema de forças envolvido.

Springer (2001), também da PUC-Rio, na sua dissertação intitulada “Estudos da deformabilidade de escavações com solo grampeado”, avaliou a influência dos diversos parâmetros geotécnicos e geométricos no comportamento tensão-deformação de escavações grampeadas com face vertical e superfície do terreno horizontal. A análise paramétrica foi realizada por meio do programa FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) baseado no método das diferenças finitas.

Camargo (2001), USP, na sua dissertação intitulada “Comparação de métodos de análise de estruturas de solo grampeado”, comparou diversos métodos de análise existentes para estruturas em solo grampeado. Foram analisados métodos baseados em Equilíbrio Limite, comparando suas cinemáticas de ruptura, hipóteses simplificadoras e definições de segurança. Estruturas com diferentes configurações geométricas e de parâmetros de resistência foram estudadas, verificando a influência das diferentes hipóteses adotadas por cada método nos resultados finais dos cálculos.

Feijó e Ehrlich (2001a) apresentaram resultados de um programa de pesquisa realizada pela Fundação GeoRio, no ano de 1997, que objetivou verificar o comportamento de grampos injetados com calda de cimento em solos tropicais. Descreveram os procedimentos de ensaio e a monitoração que consistiu em medições das cargas e deslocamentos ao longo do comprimento do grampo. Foram efetuados ensaios de arrancamento em solos residuais jovens e maduros de biotita-gnaiss e gnaiss leptinítico, ocorrentes no Município do Rio

de Janeiro. Grampos com diferentes comprimentos foram estudados e buscou-se verificar, dentre outros fatores, cargas de ruptura, mecanismos de colapso e a distribuição de tensões ao longo do comprimento dos grampos.

Feijó e Ehrlich (2002) também reportaram o emprego de um novo procedimento para as medições extensométricas de longo prazo de uma escavação em solo grampeado. O objetivo desta monitoração foi caracterizar a natureza dos esforços atuantes nos grampos. Este novo procedimento buscou ultrapassar as dificuldades comumente envolvidas neste tipo de medição e conciliou confiabilidade, robustez e acurácia. Foram instrumentados 18 grampos de 3m de comprimento, de uma obra experimental em verdadeira grandeza, executada pela GeoRio. Além da descrição do projeto de instrumentação, foram apresentados os equipamentos, dispositivos utilizados e alguns resultados. Discutiu-se também os procedimentos convencionais de medições extensométricas aplicadas em geotecnia.

Lima (2002), da PUC-Rio, na sua dissertação intitulada “Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado”, utilizou-se do programa Flac para estudar a influência da inclinação da parede da contenção na magnitude dos deslocamentos do talude e dos esforços axiais máximos, mobilizados em cada grampo durante o processo de escavação.

Proto Silva (2005), também da PUC-Rio, na sua dissertação intitulada “Resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss”, abordou a questão da resistência ao arrancamento de grampos em solo residual de gnaiss. Com base em ensaios de cisalhamento direto de laboratório, o autor propôs uma relação semi-empírica para avaliação da resistência ao arrancamento de grampos.

Magalhães (2005), Coppe UFRJ, na sua dissertação intitulada “Resistência ao arrancamento de grampos com fibras de polipropileno”, teve por objetivo estudar a viabilidade do emprego de grampos não convencionais, reforçados com fibras de polipropileno na técnica de contenção conhecida como solo grampeado. Propôs que os grampos, convencionalmente executados com barras de aço e nata de cimento, sejam substituídos por uma mistura de argamassa com fibras de polipropileno. Para atestar esta viabilidade, foram realizados ensaios de arrancamento em grampos moldados em cotas distintas do talude de uma obra de solo grampeado, situada no município de Niterói, RJ.

Gomes Silva (2006), Coppe UFRJ, na dissertação intitulada “Condicionantes geológico-geotécnicos de escavação grampeada em solo residual de gnaiss”, apresentou um modelo geológico-geotécnico tridimensional

da área de solo grampeado estudada na presente pesquisa. O autor utiliza os dados de boletins de perfuração de cerca de 300 grampos executados nas obras para o desenvolvimento do modelo 3D. Compara as resistências ao arrancamento de grampos de Springer (2005), Proto Silva (2005) e Magalhães (2005) em função dos tipos de solos e estruturas geológicas da área.

Atualmente mais duas teses de doutorado estão em andamento na PUC-Rio e abordam os aspectos relativos ao monitoramento de contenções em solo grampeado na mesma área de estudo da presente tese (Lima e Saré).

Também na Coppe UFRJ, duas teses de doutorado (Feijó e Bergman) estão em andamento e tratam de obras grampeadas.

Souza, Pitta e Zirlis têm contribuído desde 1976, durante a construção da rodovia dos Imigrantes em São Paulo, para o desenvolvimento do solo grampeado no Brasil. Registram, atualmente, cerca de 100.000m<sup>2</sup> de obras executadas. Um histórico bibliográfico destes autores mostra as evoluções sobre este tema:

- Em 1992, no 1º COBRAE e em 1996, no livro “Fundações Teoria e Prática”, apresentam relatos de obras executadas e seus detalhes executivos;
- Em 1998 na edição inicial do “Manual de Especificações de Produtos e Procedimentos da ABEF”, descrevem os procedimentos executivos para grampo e concreto projetado;
- Em 2000 no SEFE IV, apresentam resultados de ensaios de arrancamento de grampos, mostrando a importância da re-injeção;
- Em 2003, em evento no SINDUSCON-SP, reportam diversas obras permanentes de grandes alturas, obras instrumentadas, uso de concreto projetado com fibras de aço e polipropileno e algumas comparações com obras internacionais;
- Em 2005, no IV COBRAE, abordam alguns detalhes executivos de grampos, sistema de drenagem e revestimento de paramento, visando colaborar no estudo de causas de acidentes.