

2 Revisão Bibliográfica

O solo grampeado é uma técnica bastante eficaz no que se diz respeito ao reforço do solo “*in situ*” em taludes naturais ou resultantes de processo de escavação.

Na década de 70, esta técnica foi utilizada no Brasil pela primeira vez aplicada em São Paulo. Desde então, ela vem sendo empregada no Brasil por construtores de túneis. Ortigão et al. (1993 e 1995) e GEORIO (1999) divulgaram experiências bem-sucedidas na utilização da técnica de grampeamento.

O grampeamento do solo é obtido pela inclusão de elementos passivos semi-rígidos, resistentes à flexão-composta, denominados grampos. Estes elementos de reforço são posicionados sub-horizontalmente no maciço, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento (Ortigão et al., 1993) e momentos fletores. Sua função é a de minorar os deslocamentos do maciço terroso pelo acréscimo de forças internas contrárias ao sistema natural de acomodação de massa. A decompressão progressiva do solo, em função das sucessivas fases de escavação ou de uma configuração de ruptura do maciço, gera deslocamentos laterais no solo. Estes deslocamentos, então, induzem ao surgimento de forças internas aplicadas no sistema solo-reforço.

A técnica de grampeamento oferece algumas vantagens relevantes, quando comparada com a técnica de cortina atirantada, para a sua aplicação, tais como: baixo custo, adaptabilidade às condições locais, flexibilidade, menores quantidades de equipamentos e materiais de construção, maior velocidade de execução, e possibilidade de ajustes do projeto com o avanço da escavação. No entanto, existem também algumas limitações para a utilização da técnica que devem ser destacadas:

- (i) Deslocamentos lateral e vertical inerentes à técnica. Em áreas urbanas, estes movimentos podem constituir uma limitação, particularmente no caso da presença de estruturas vizinhas. Devem-se medir os deslocamentos em todas as fases de construção, mantendo-os dentro de limites de tolerância a serem pré-definidos;

- (ii) Uso não recomendado em solos abaixo do nível d'água;
- (iii) Uso não recomendado em solos arenosos, sem coesão aparente, ou em solos contendo uma alta porcentagem de argila, onde o teor de umidade poderia aumentar depois da construção. Em solos não coesivos, não é possível garantir a estabilidade de escavações verticais. A eficácia do solo grampeado pode não ser comprovada em solos coesivos, com limite de liquidez (LL) maior que 20% ou solo com N(SPT) menor que 10 golpes;
- (iv) Uso não recomendado em estruturas permanentes, particularmente com os grampos utilizados em solos corrosivos (ambientes agressivos) ou em solos sujeitos ao fenômeno de *creep*. Em argilas muito moles, não se indica este tipo de solução por causa de possíveis movimentações associadas ao fenômeno de fluência (Abramson et al., 1996).

2.1. Histórico e Desenvolvimento

A origem da técnica de solo grampeado vem em parte da técnica de execução de suportes de galerias e túneis denominada NATM (*New Austrian Tunneling Method*). Esta técnica foi desenvolvida por Landislau Von Rabcewicz, a partir de 1945, para avanço de escavações em túneis rochosos (Figura 1a).

O método NATM (Figura 1b) consiste na aplicação de um suporte flexível para permitir que o terreno se deforme ocorrendo a formação de uma região plastificada no entorno da escavação, que pode ser reforçada através de chumbadores.

Logo após a escavação, a cavidade que está submetida ao efeito do peso de terras e tensões confinantes, é estabilizada com um revestimento flexível de concreto projetado (espessura entre 10 e 15 cm), tela metálica e chumbadores curtos radiais introduzidos na zona plástica. Em geral, os chumbadores são dispostos a cada 3 a 6m ao longo da galeria (Clouterre, 1991) e são inseridos no maciço por percussão ou perfuração com posterior injeção de nata de cimento.

Ao contrário, no método convencional de execução de túneis, 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.

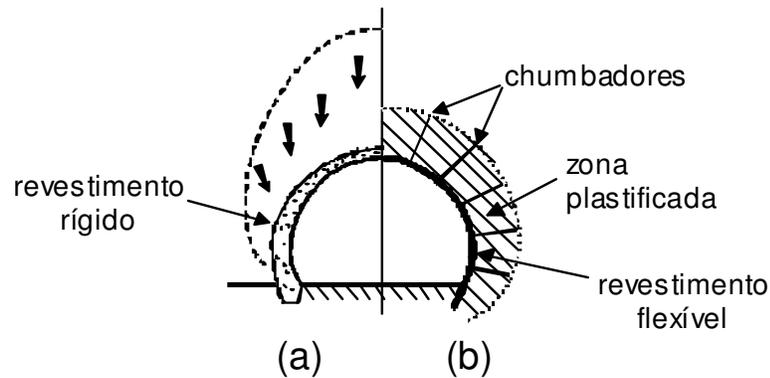


Figura 1 - Comparação entre as técnicas de execução de túneis com revestimento flexível (a) e rígido (b).

Após as aplicações da técnica NATM em rochas duras, novas experiências foram efetuadas em materiais menos resistentes, tais como rochas brandas e posteriormente em solos (siltes, pedregulhos e areia) com o nome de solo grampeado ou pregado (*soil nailing*, em inglês; *clouage du sol*, em francês).

A técnica de solo grampeado passou a se desenvolver então a partir do início dos anos 70. Países como França, Alemanha e Estados Unidos lideraram pesquisas no sentido de se obter conhecimentos deste método de estabilização.

Em 1972 foi empregada pela primeira vez na França com o nome de *sol cloué* e, desde então, tem sido aplicada na Alemanha (Stocker et al., 1979 e 1990; Gässler, 1981), Canadá, EUA (Shen et al., 1981), França (Clouterre, 1991; Plumelle et al., 1990) e Grã-Bretanha (Bruce e Jewell., 1986), entre outros.

No Brasil, a aplicação da técnica iniciou-se em 1966. Naquela época, a empresa Ródio Perfurações e Consolidações, aplicou concreto projetado e tela metálica para estabilização de taludes na barragem de Xavantes (Georio, 1999)

Em 1970, a SABESP utilizou, na construção do túnel de adução do Sistema Cantareira em São Paulo, o método NATM. Na estabilização do talude do emboque, empregaram-se chumbadores curtos, tela metálica e concreto projetado, aproveitando o sistema utilizado na construção de túneis (Zirlis et al., 1999).

Devido às inúmeras vantagens para a sua aplicação, tais como baixo custo, adaptabilidade às condições locais, rapidez na execução, etc., a técnica de solo grampeado, vem sendo difundida no Brasil desde o início da década de 70. Seu desenvolvimento tem sido acelerado, principalmente na última década.

Grande parte da experiência nacional em solo grampeado foi publicada no manual técnico da GeoRio (1999) e em dois encontros promovidos pela ABMS em São Paulo: ABMS/ABEF (1999) e ABMS/SindusCon-SP (2003).

2.2. Princípios da Técnica

O grampeamento do solo consiste em 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, microestacas ou, em casos especiais, estacas. Os grampos são instalados sub-horizontalmente, de forma a introduzir esforços resistentes de tração e cisalhamento. Aplicações típicas na estabilização de taludes bem como em escavações são apresentadas na Figura 2.

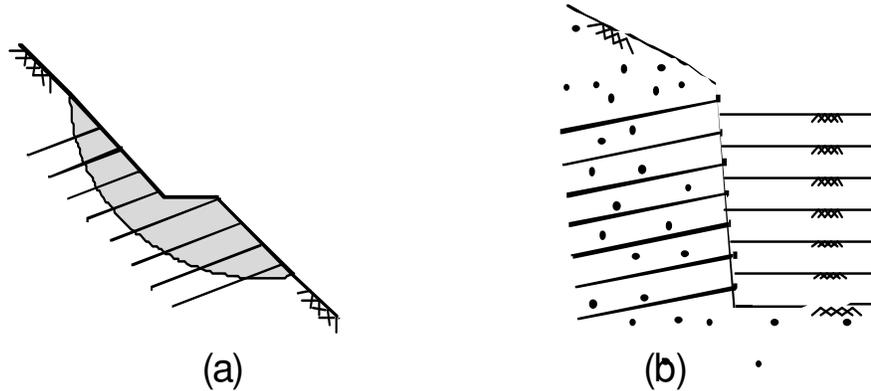


Figura 2 - Aplicações do reforço de solos através do grampeamento: (a) na estabilização de taludes; (b) no escoramento de escavações.

2.3. 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 aperfeiçoar 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 através da utilização de equipamentos adequados, tais como perfuratrizes rotopercussoras. Neste casos o comprimento reduzido dos grampos permite perfuração com poucas manobras da lança da rotopercussora.

A utilização de simples 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 projetado.

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 às 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 através de ensaios centrífugos (Vucetic et. al.,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 pesquisa aqui apresentada refere-se a um estudo em um solo residual. Lima (2007), Springer (2006) e Proto Silva (2005) apresentam resultados obtidos em pesquisas realizadas em solos residuais com um perfil de intemperismo bem desenvolvido.

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 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.

2.4. 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, devem ser previstos 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 seis 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.

2.5.Método executivo

Muros de solo grampeado têm sido empregados tanto em taludes naturais ou previamente escavados, nos quais as condições de estabilidade não são satisfatórias, quanto em escavações. Neste caso, o grampeamento é feito na massa de solo à medida que a escavação é executada em etapas (Figura 3), em geral com 1 a 2m de profundidade, obtendo-se uma zona de solo reforçado que funcionará como suporte do material posterior sem reforço.



Figura 3 - Diversas fases construtivas de um solo grampeado

A Figura 4 apresenta as primeiras fases construtivas de uma grande contenção em solo grampeado. A Figura 5 apresenta a fase de projeção do concreto sobre tela metálica soldada.

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, a instalação do reforço e a aplicação de um revestimento delgado de concreto projetado.

O material a ser escavado deve apresentar uma resistência aparente não drenada ao cisalhamento mínima de 10kPa, do contrário não se poderá executar esta escavação (GeoRio, 1999).

Entretanto, uma resistência como esta 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.



Figura 4 - Fases executivas em solo grampeado: escavação, instalação dos grampos e contenção completa (Linha Amarela, Rio de Janeiro, foto GeoRio).



Figura 5 - Execução do concreto projetado (Linha Amarela, Rio de Janeiro, foto GeoRio).

2.6. Execução dos grampos

Logo após executados um nível de escavação, instalam-se os grampos por percussão, ou por perfuração e injeção sem pressão. A técnica por percussão consiste na cravação de barras ou perfis metálicos esbeltos com auxílio de martelo pneumático. Isso 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 40kPa em solos arenosos. Este processo não pode ser empregado quando há ocorrência de pedregulhos e em solos muito resistentes, como os saprolitos de granito e gnaisse, pois é muito difícil cravar o grampo nessas condições (ABMS/ABEF, 1999).

A técnica mais comum é semelhante à execução de ancoragens de barra: perfura-se o terreno com diâmetro entre 50 e 100mm, introduz-se uma barra de aço com diâmetro entre 25 e 32mm, e aplica-se injeção de nata de cimento com pressões baixas, inferiores a 100 kPa. A maior eficiência da nata de cimento pode ser obtida com o uso de aditivos como os expansores de calda de cimento, que evitam a retração. Com este processo, a resistência ao arrancamento obtida em solos compactos ou rijos é razoavelmente elevada (ABMS/ABEF, 1999).

Detalhes executivos e controles de construção são detalhadamente revistos em Lazart et al. (2003) e Lima (2007).

2.7.Comparação com outras Técnicas de Contenção

O entendimento dos mecanismos envolvidos na mobilização dos esforços ao longo do grampo é aspecto fundamental na concepção da técnica. A comparação do método de grampeamento com técnicas usuais de contenção auxilia na distinção dos aspectos importantes relativos ao funcionamento do solo grampeado. ABMS/ABEF (1999) apresentou comparações com as técnicas de cortinas ancoradas e com a terra armada.

2.7.1.Comparação com a técnica de cortinas ancoradas

Embora aparentemente haja grande similaridade entre os grampos e as ancoragens ou os tirantes convencionais quando utilizados para a estabilização de taludes ou escavações, existem distinções muito importantes com aplicações específicas para cada caso (Bruce e Jewell, 1986).

A Figura 6 esquematiza os mecanismos de transferência de carga em cortinas atirantadas e muro em solo grampeado. Os tirantes desenvolvem esforços na região ancorada e são pré-tensionados. Dessa forma, limitam possíveis deformações na face do talude. Por outro lado, os muros de solo grampeado funcionam como estruturas passivas uma vez que só desenvolvem esforços após deslocamentos da face do talude.

Por exemplo, enquanto as ancoragens são fortemente pré-tensionadas com cargas de 200 a 500 kN, para prevenir deslocamentos da cortina, os grampos sofrem no máximo uma pequena pré-tensão, da ordem de 5kN, com a finalidade exclusiva de garantir a ligação com o concreto projetado, principalmente em paramentos verticais.

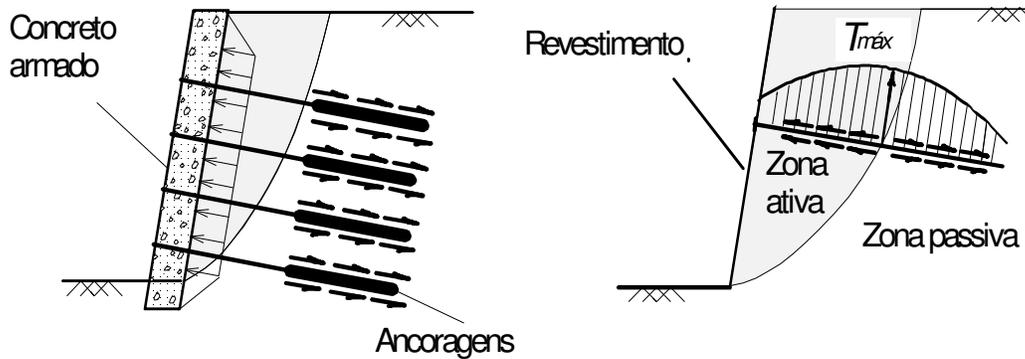


Figura 6 - Mecanismos de transferência de carga: (a) cortina ancorada; (b) muro em solo grampeado

Os grampos, ao contrário das ancoragens, 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.

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.

2.7.2. Comparação com a terra armada

A técnica de solo grampeado é bastante semelhante à da terra armada tanto em conceituação quanto no método de análise. A principal diferença reside na técnica construtiva. A terra armada é executada em aterros, de baixo para cima, e os deslocamentos horizontais do muro ocorrem principalmente na parte de baixo, conforme indicado na Figura 7 (Schlosser, 1983).

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

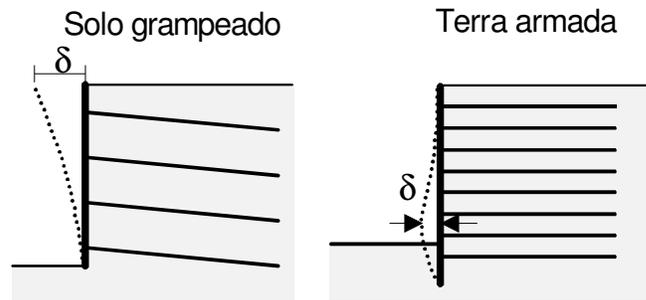


Figura 7 - Deslocamentos horizontais no muro de terra armada e no de solo grampeado.

2.8.Mecanismos e Comportamento de Taludes Grampeados

A função dos grampos no talude é minorar os deslocamentos do maciço terroso pelo acréscimo de forças internas contrárias ao sistema natural de acomodação de massa.

A decompressão progressiva do solo, em função das sucessivas fases de escavação ou de uma configuração de ruptura do maciço, gera deslocamentos laterais no solo. Estes deslocamentos, então, induzem ao surgimento de forças internas aplicadas no sistema solo-reforço. Instrumentação de campo realizada por Unterreiner et al. (1995) confirma este mecanismo.

Geralmente, o comportamento de um sistema de reforço de solo depende da mobilização dos esforços nas inclusões. A Tabela 1 indica os esforços considerados em cada sistema de reforço (Schlosser, 1982). A aplicação e objetivo de alguns métodos são sumariados na Tabela 2 (Gässler, 1990).

Tabela 1 - Tipo de solicitação em reforço de solo (Schlosser, 1982)

Solicitação	Sistema de reforço			
	Terra Armada	Solo Grampeado	Micro-estacas	Colunas de Brita
Tração	(X)	(X)	(X)	
Compressão			(X)	(X)
Cisalhamento		(X)		(X)
Flexão		(X)	(X)	

Tabela 2 - Aplicações e objetivos de um sistema de reforço (Gässler, 1990)

Aplicações e Objetivos	Eficácia do Reforço		
	Grampos	Micro-estacas	Colunas de brita
Aumentar a capacidade de suporte do solo da fundação	-	Grande	Grande
Estabilização (natural) de taludes	Média	Média	Pequena
Estabilização durante escavações	Grande	Pequena	-
Redução de recalques	-	Média	Grande

2.8.1. Interação Solo-Grampo

Durante a construção, devido à descompressão lateral do solo, os grampos são solicitados essencialmente a esforços de tração. A transferência de tensões entre o solo e o reforço envolve um mecanismo de resistência ao atrito entre os dois materiais.

Dois tipos de interação solo-grampo são desenvolvidos em massas de solo grampeado:

- (i) O mais importante é a tensão cisalhante aplicada pelo solo ao longo dos grampos, a qual induz tensões nos grampos. Em solos arenosos, o atrito solo-grampo (q_s) é praticamente independente da profundidade (Schlosser, 1983; Schlosser e Unterreiner, 1990) e, portanto, da tensão confinante (Unterreiner et al., 1995). O valor de q_s pode ser influenciado pelo método de colocação do grampo no maciço (injeção sob baixa pressão, alta pressão ou por gravidade, por exemplo) e pelo grau de saturação do solo (Clouterre, 1991). A mobilização do q_s ao longo dos grampos ocorre para pequenos deslocamentos do grampo em relação ao solo, da ordem de poucos milímetros. São as deformações internas na parede de solo grampeado, e especialmente os descarregamentos laterais, que induzem a mobilização do atrito lateral ao longo dos grampos e as tensões de tração posteriormente. Estas deformações são causadas pela descompressão lateral do solo devido às sucessivas etapas de escavação.
- (ii) O outro tipo de interação, menos importante, diz respeito aos momentos fletores e às forças cisalhantes mobilizadas nos grampos, na zona de cisalhamento desenvolvida na massa de solo grampeado (Clouterre, 1991).

Durante o cisalhamento da massa de solo grampeado, a ruptura do grampo dá-se por esforços de tração na interseção com o plano de ruptura, ou, alternativamente, por plastificação nos pontos correspondentes aos valores máximos de momentos fletores ($M_{m\acute{a}x}$), os quais são localizados fora da superfície de ruptura. Se os grampos forem rígidos, a plastificação dos pontos de máximos momentos fletores não corresponderá à ruptura dos grampos.

Convém lembrar que a ruptura da estrutura de solo-grampeado poderá ocorrer também no contato solo-grampo se as tensões cisalhantes alcançarem o valor limite de q_s .

2.8.2. Distribuição de Tensões/Deformações nos Grampos

Durante a construção, quando as deformações são muito reduzidas, os grampos são essencialmente solicitados à tração. Próximo à face de escavação, em casos onde a face está inclinada em relação aos grampos, baixos valores de esforços cisalhantes e momentos fletores podem ser gerados durante a construção.

Para uma situação próxima à ruptura, forças cisalhantes e momentos fletores irão se desenvolver ao longo da superfície de ruptura e não devem ser desprezados (Schlosser e Unterreiner, 1990).

À medida que se prossegue com a escavação, tensões de tração são geradas nos grampos em função da descompressão lateral do solo. Há um aumento nas solicitações axiais ao longo dos grampos em função do prosseguimento da escavação (Figura 8). O aumento dos esforços de tração ocorre de forma mais significativa nas três subseqüentes fases de escavação (Springer, 2001 e Lima, 2002).

Por meio de análises numéricas, Springer et al. (2001) verificaram que os grampos mais solicitados são aqueles mais distantes da base da escavação, isto é, localizados no topo da escavação. Dessa forma, têm papel mais importante na contenção do solo.

As tensões nos grampos são máximas dentro da massa de solo grampeado e não na face da parede (Clouterre, 1991). A análise das tensões nos grampos mostra que o ponto de tração máxima varia em função do tipo de fixação do grampo à parede. No caso de grampo fixo, o ponto de tração máxima ocorre junto à face. No caso de grampo livre, a tração máxima verifica-se em um ponto mais interno do maciço.

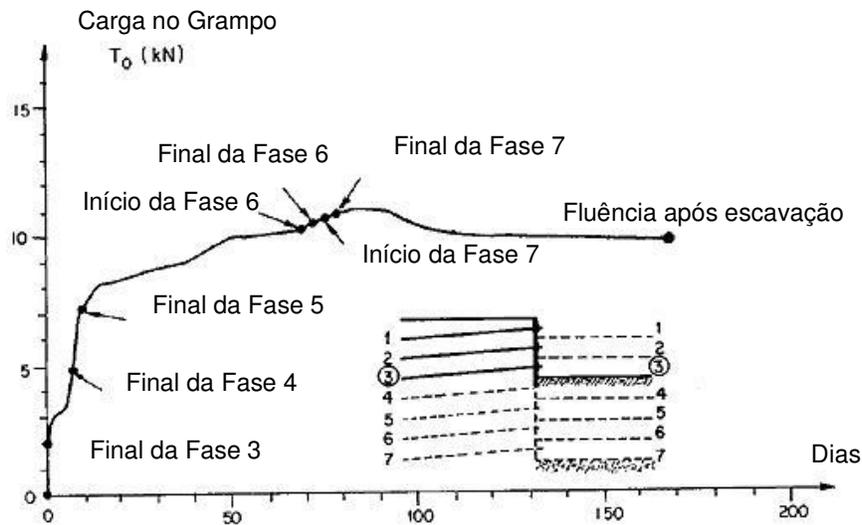


Figura 8 - Carregamento progressivo do grampo durante e após o processo de escavação (Clouterre, 1991).

A Figura 5 mostra o mecanismo de desenvolvimento de regiões ativa e passiva (Clouterre, 1991; Cardoso e Gonçalves, 1997; Springer, 2001). Na zona considerada ativa, as tensões de atrito lateral são direcionadas para fora da estrutura. Ao contrário, na zona passiva, as tensões de atrito lateral são direcionadas para dentro da massa de solo em direção oposta aos deslocamentos laterais da região ativa.

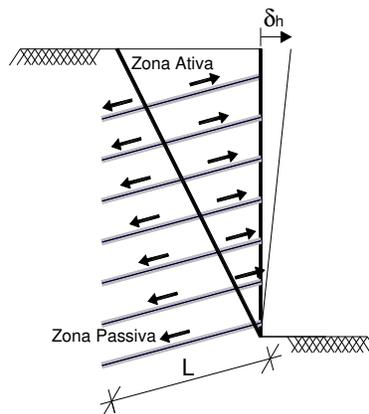


Figura 9 - Zonas ativa e passiva em escavações com grampos livres (Springer, 2001).

A transferência de tensões entre o solo e o reforço envolve um mecanismo de resistência ao atrito entre os dois materiais. Dois tipos básicos de mecanismo de interação solo/grampo podem ser identificados:

1. A interação mais importante é a tensão cisalhante (q_s) aplicada pelo solo ao longo do grampo. Esta tensão induz esforços de tração no grampo. A

mobilização de q_s ao longo dos grampos ocorre para pequenos deslocamentos do grampo em relação ao solo, da ordem de poucos milímetros;

2. A segunda diz respeito aos momentos fletores e forças cisalhantes, mobilizadas nos grampos, na zona cisalhante desenvolvida na massa de solo grampeado (Clouterre, 1991). Plumelle et al. (1990) mostram este comportamento (Figura 10). Se os grampos são flexionados, eles serão submetidos a momentos fletores e esforços cisalhantes na região da superfície de cisalhamento da massa de solo grampeado.

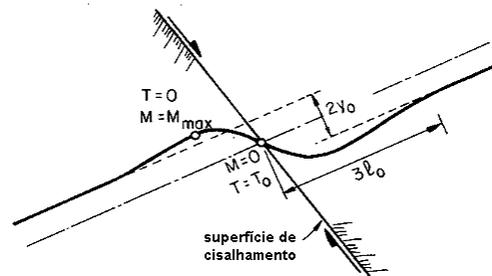


Figura 10 - Grampos submetidos à flexão e esforços cisalhantes (Clouterre, 1991)

A Figura 11 apresenta a linha de tração máxima um grampo. Pode-se observar que o ponto de tração máxima corresponde ao limite entre as zonas passiva e ativa. Este limite deve ser entendido como a superfície potencial de ruptura.

Os grampos concretados (ou chumbados) apresentam resistência à flexão. A mobilização desta resistência depende do desenvolvimento de grandes deformações, isto é, quando se forma uma zona de cisalhamento no grampo. Para as deformações típicas de serviço dos grampos, a parcela de resistência a flexão mobilizada é insignificante (Clouterre, 1991).

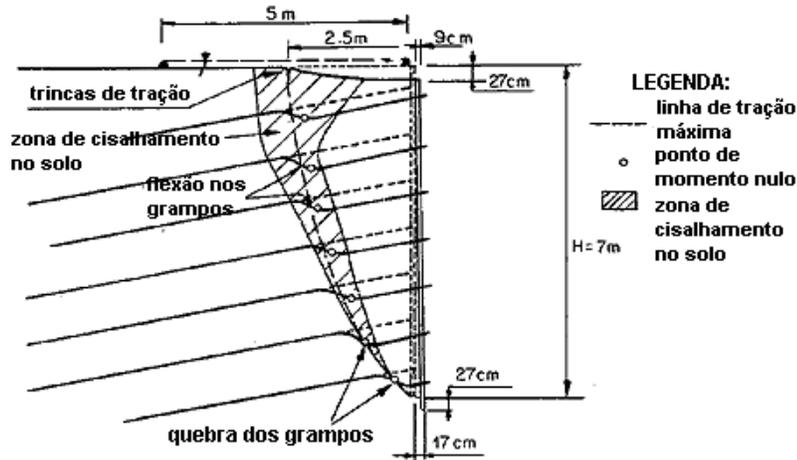


Figura 11 - Desenvolvimento de região de cisalhamento em muro experimental de solo grampeado (Clouterre, 1991)

As deformações nos grampos são calculadas de forma análoga às estacas carregadas com esforço horizontal e momento no topo da estaca. Maiores detalhes podem ser vistos em Clouterre (1991).

Cardoso (1987) avaliou a força transversal máxima mobilizável para um grampo em uma situação de equilíbrio limite utilizando o método de determinação da resistência última de estacas solicitadas lateralmente proposto por Broms (1977). A Figura 12 apresenta a distribuição dos esforços para o trecho compreendido na zona passiva.

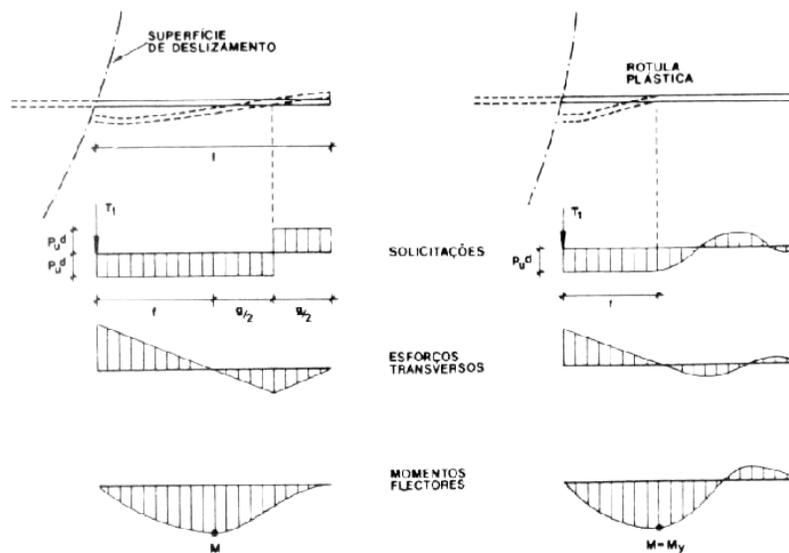


Figura 12 - Esforços desenvolvidos na zona passiva do grampo (Analogia de Broms) (Cardoso, 1987).

Stocker e Riedinger (1990) apresentaram um estudo da distribuição de forças em vários grampos instrumentados com *strain gages*, executados para a estabilização de um talude na Alemanha. A Figura 13 apresenta o comportamento dos mesmos. Nota-se que a distribuição de trações máximas está de acordo com a linha de tração máxima. Os autores também apresentam a evolução das forças em um grampo em função do processo de escavação (Figura 14). Nota-se que, após a 4ª etapa de escavação subsequente, o aumento da tração é bastante reduzido.

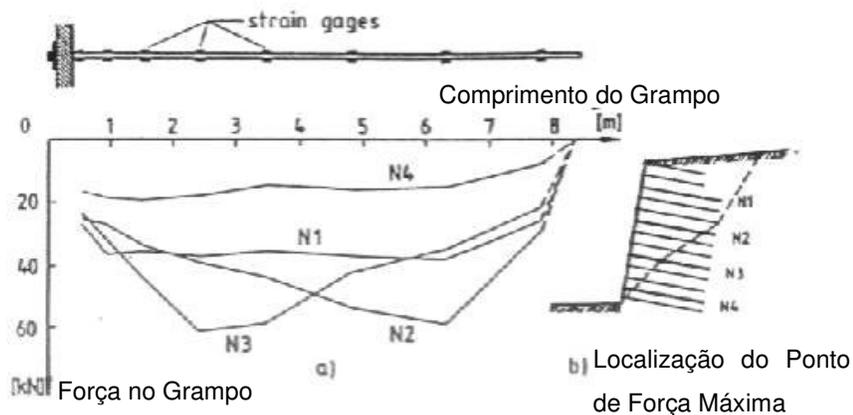


Figura 13 - Distribuição de forças ao longo dos grampos (Stocker e Riedinger, 1990).

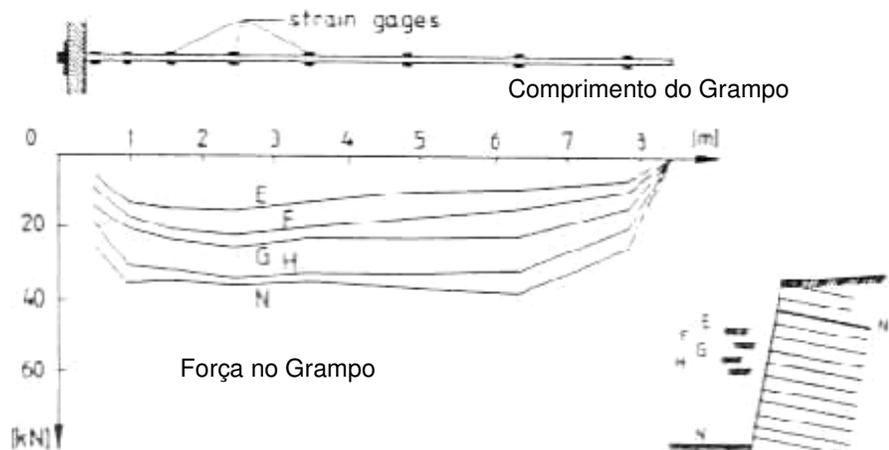


Figura 14 - Distribuição da tração no grampo em relação ao processo de escavação (Stocker e Riedinger, 1990).

Springer (2001) avaliou o desenvolvimento das forças axiais nos grampos. A Figura 15 apresenta a mobilização das forças axiais máximas (F_{ax} Máx) para cada um dos grampos, em três fases de escavação. Na etapa inicial, somente o primeiro grampo (01) está instalado. Com o avanço da escavação e instalação

de novos grampos, o grau de mobilização de forças axiais máximas nos grampos superficiais vai reduzindo. O grampo 03, que na etapa intermediária suporta a maior carga, sofre um incremento de mobilização de resistência inferior ao observada para os grampos 04, 05 e 06.

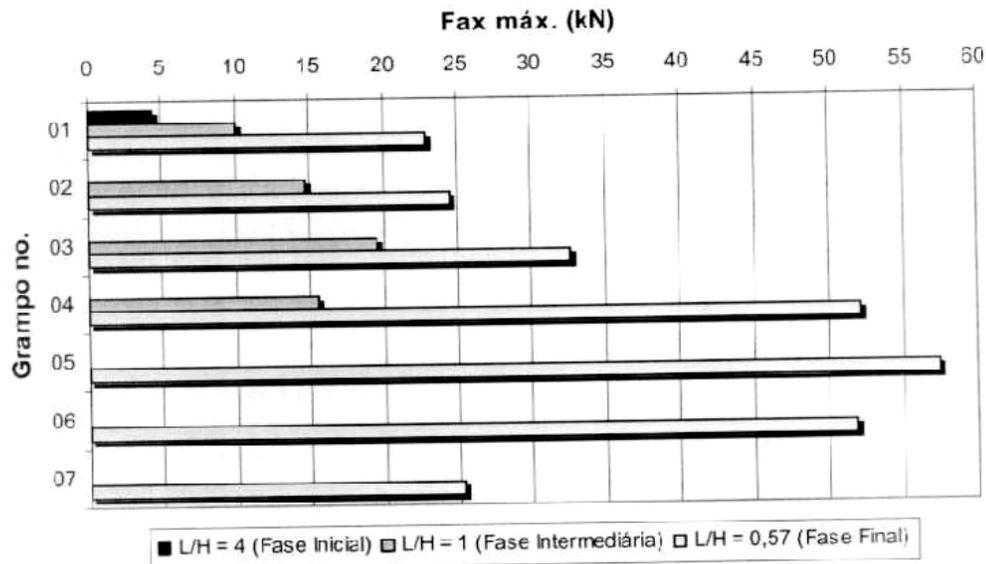


Figura 15 – Magnitude das forças axiais máximas desenvolvidas nos grampos em função da profundidade de escavação (Springer , 2001).

Gerscovich et al. (2002) avaliaram a evolução da linha de tensões máximas, para o caso de grampos de 6m de comprimento, em função do aumento da altura de escavação. Com o avanço da escavação, a superfície potencial de deslizamento, que delimita as regiões ativa e passiva, se afasta da face, mantendo uma inclinação média aproximadamente constante (Figura 16).

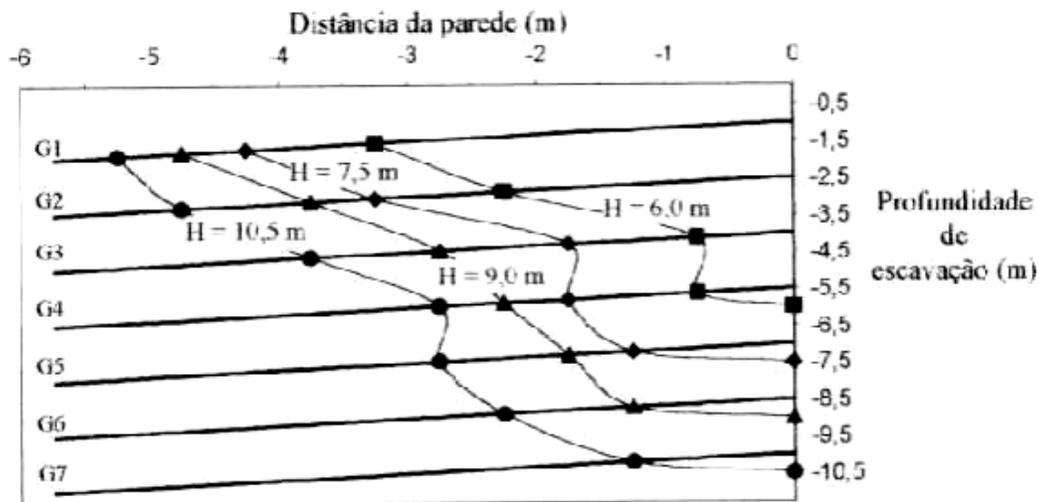


Figura 16 - Localização dos pontos de força axial máxima nos grampos (Gerscovich et al., 2002)

Stocker e Riedinger (1990) também avaliaram a distribuição de deformações no grampo ao longo do processo de escavação. A Figura 17 apresenta medidas iniciais de deformação para um grampo em função do tempo. A execução das etapas de escavação abaixo do nível do grampo 06 está associada a um rápido aumento nas deformações para este grampo nas etapas seguintes de escavação.

Este tipo de comportamento repete-se para todos os grampos instalados. A influência do avanço de escavação nas deformações é significativa para três etapas posteriores à instalação do grampo 06. O efeito do avanço da escavação decresce progressivamente depois disso, mas ainda se manifesta, mesmo que bastante reduzido, para cada fase de escavação subsequente.

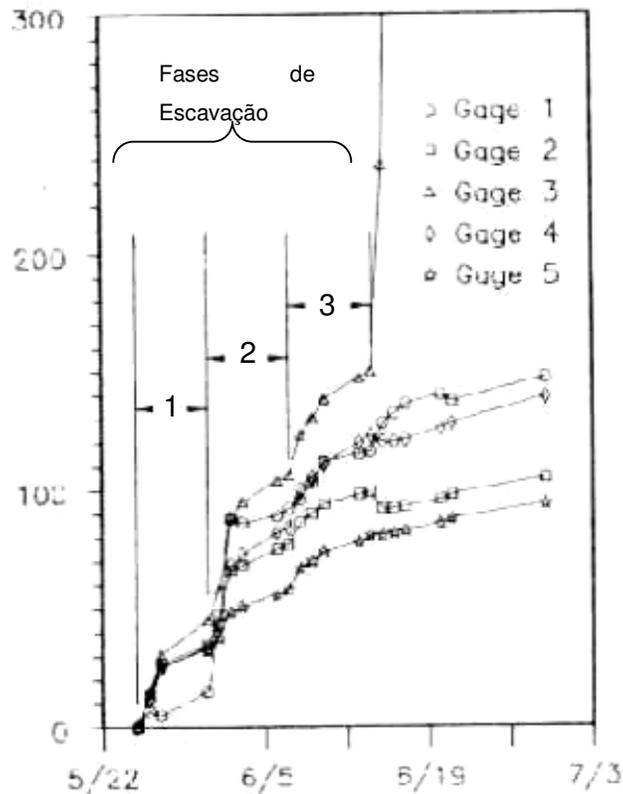


Figura 17 – Deformações relativas a um grampo em função das datas de monitoramento (Stocker e Riedinger, 1990)

Quanto à distribuição de tensões e deformações no grampo, em condições de serviço, provocadas pelo avanço da escavação do maciço do solo, pode-se afirmar que:

- O alívio de tensões provocado pela descompressão lateral do solo durante a escavação origina esforços de tração nos grampos. Estes esforços são mobilizados para pequenos níveis de deformação;
- A distribuição dos esforços de tração ao longo dos grampos permite a identificação do ponto de tração máxima, que limita as zonas passiva e ativa;
- Ao longo do processo de escavação, o ponto de tração máxima desloca-se para o interior do maciço, trazendo consigo a linha de tração máxima. Conseqüentemente, há um aumento da área da zona ativa;
- Estudos (Clouterre, 1991; Springer, 2001 e Lima, 2002) mostraram que, para um mesmo grampo, a tração máxima aumenta significativamente até o 3º estágio de escavação subsequente à instalação do grampo.

Após este estágio, observa-se uma redução progressiva dos esforços de tração, como indica a Figura 18;

- A partir do 3º estágio de escavação, a linha de tração máxima desloca-se para o interior do maciço em uma proporção menor (Figura 19a);
- A distribuição de tensões ao longo do grampo apresenta um valor máximo no ponto onde intercepta a linha que separa as regiões ativa e passiva. Este valor máximo decresce a partir do 3º estágio subsequente de escavação, como indica a Figura 19b;
- A distribuição das deformações ao longo do grampo acompanha a distribuição de tensões. A Figura 19 apresenta a variação da deformação axial (ϵ_{ax}) ao longo do comprimento do grampo (L) para diferentes estágios de escavação. A área da distribuição de deformações axiais delimita uma região geométrica que corresponde aos deslocamentos máximos nos pontos de tração máxima;
- Observa-se que, até o 3º estágio de escavação, as áreas aumentam, refletindo um aumento nos deslocamentos pontuais máximos e, conseqüentemente, nas deformações máximas pontuais. No entanto, os incrementos de área diminuem, mostrando que o aumento de deformação ocorre em menores proporções relativas;
- Após o 3º estágio, as áreas diminuem progressivamente, refletindo uma redução nos deslocamentos pontuais máximos e, conseqüentemente, nas deformações máximas pontuais. Comportamento semelhante também foi observado em termos das tensões nos grampos;

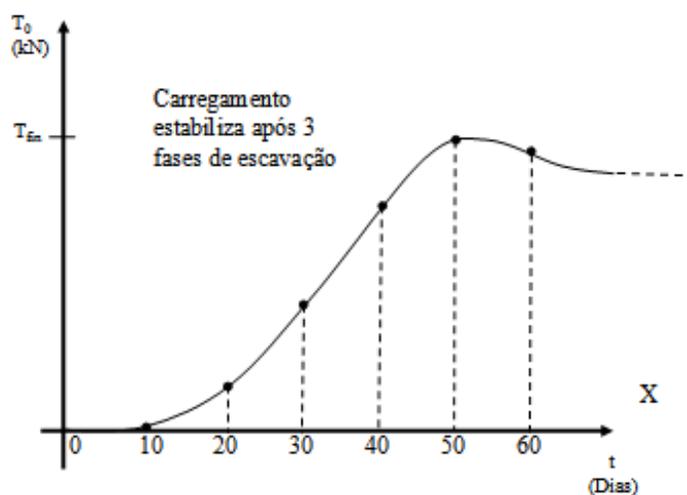


Figura 18- Evolução do carregamento com as etapas de escavação

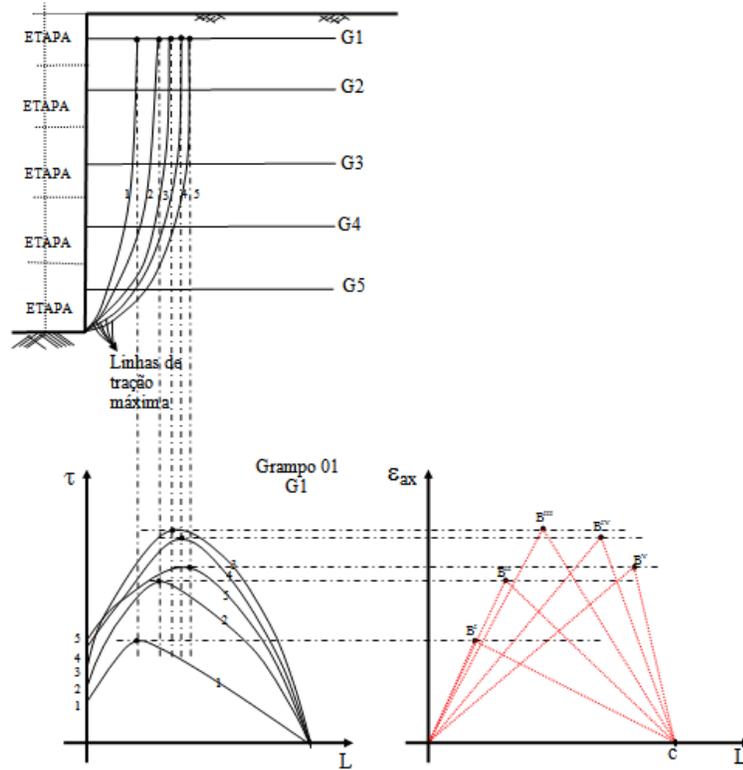


Figura 19 - Distribuição tensão-deformação de um grampo submetido ao avanço da escavação

2.8.3. Distribuição de Tensões/Deformações no Grampo Provocadas por Ensaios de Arrancamento

Um dos mais importantes parâmetros em projetos de estruturas em solo grampeado é a resistência ao arrancamento no contato solo-grampo (q_s). É obtido experimentalmente em ensaio de arrancamento (*pull out test*), esquematizado na Figura 20.

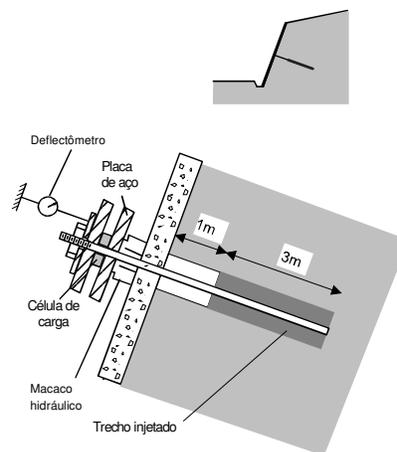


Figura 20 - Ensaio de arrancamento (Ortigão e Sayão, 2000).

Clouterre (1991) apresentou uma sugestão quanto à interpretação dos ensaios de arrancamento realizados em grampos. Se durante o ensaio, somente as forças forem medidas, a tensão máxima obtida será a tensão de arrancamento. Por outro lado, se forem medidos as forças e os deslocamentos, será possível conhecer a lei de que determina a interação solo-grampo.

Para certo esforço de tração aplicado na cabeça do grampo, o mesmo move-se em relação ao solo e mobiliza o atrito de interface que será combatido pelo esforço de tração. Quanto à distribuição de tensões/deformações no grampo durante o ensaio de arrancamento, pode-se afirmar que (Clouterre, 1991):

- as deformações serão maiores próximos a região de fixação do grampo, isto é, na cabeça do grampo e menores nas proximidades da extremidade do grampo (Figura 21);
- da mesma forma, as tensões (tração) serão maiores próximas à região de fixação do grampo, isto é, na cabeça do grampo e menores nas proximidades da extremidade do grampo (Figura 22);
- as forças de atrito são mobilizadas gradualmente da cabeça do grampo até a extremidade do mesmo. Quanto menor o grampo, maior a mobilização de atrito para níveis de tensão mais reduzidos (Figura 22 e Figura 23);
- à medida que as forças de arrancamento aumentam, as tensões de atrito (tração) aproximam-se do limite de ruptura do contato solo-grampo e estas tensões desenvolvem-se ao longo de toda a extensão do grampo (Figura 24 e Figura 25);

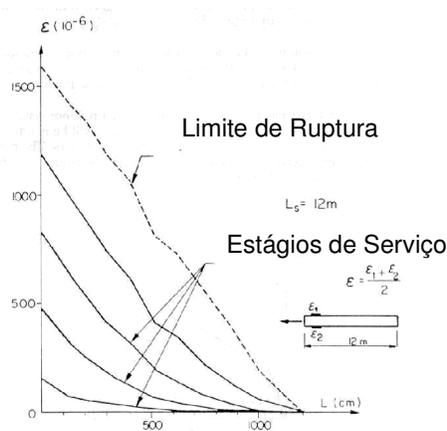


Figura 21 – Distribuição das deformações medidas em um ensaio de arrancamento ao longo de um grampo (Clouterre, 1991).

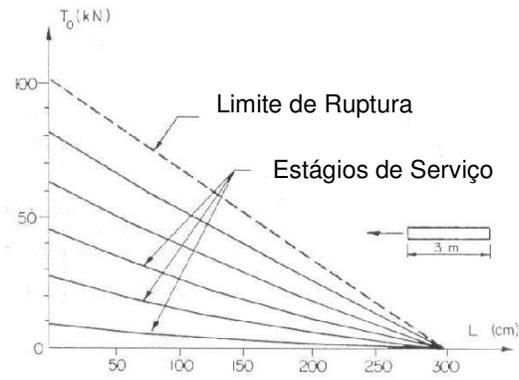


Figura 22 – Distribuição de forças de tração ao longo de um grampo com $L = 3\text{ m}$ (Clouterre, 1991).

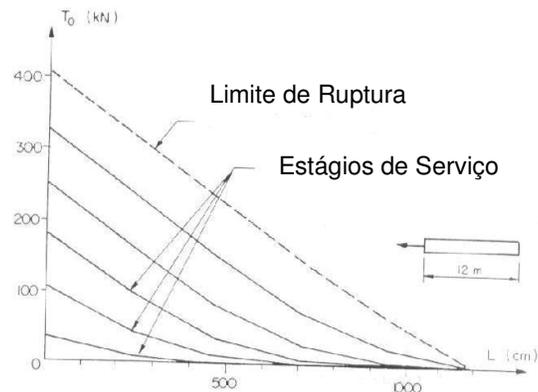


Figura 23 – Distribuição de forças de tração ao longo de um grampo de $L = 12\text{ m}$ (Clouterre, 1991).

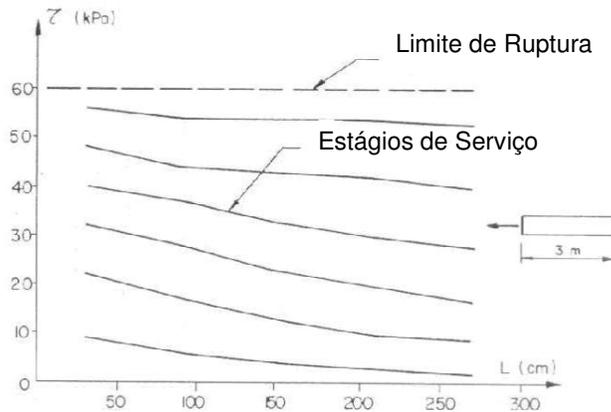


Figura 24 - Mobilização das tensões de cisalhamento em um grampo de $L = 3\text{ m}$ submetido ao ensaio de arrancamento (Clouterre, 1991).

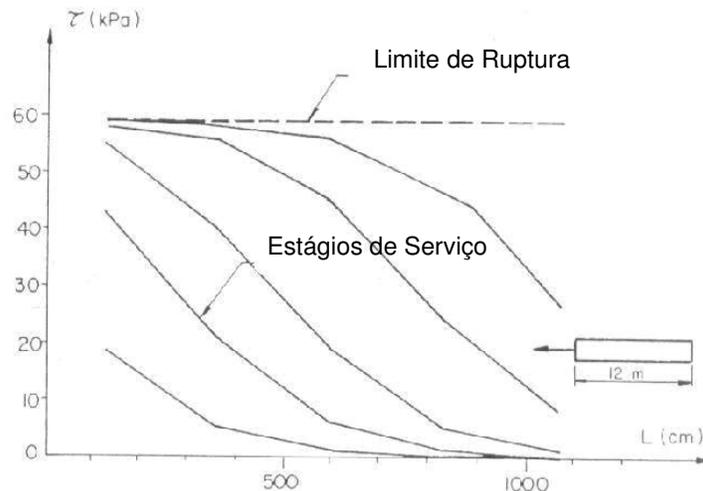


Figura 25 - Mobilização das tensões de cisalhamento em um grampo de $L=12$ m submetido ao ensaio de arrancamento (Clouterre, 1991).

2.8.4. Estado de Tensões no Maciço de Solo Grampeado

Em relação às forças de tração, forças cisalhantes e momentos fletores que podem ocorrer nos grampos, uma clara distinção deve ser feita entre construção, serviço e ruptura.

Durante a construção e em serviço, quando as deformações são pequenas, os grampos são essencialmente solicitados à tração. Localmente, próximo à face de escavação, valores baixos de esforços cisalhantes e momentos fletores podem ser gerados durante a construção somente em casos extremos onde os grampos têm inclinação desfavorável em relação à face. Em situações próximas à ruptura, forças cisalhantes e momentos fletores nos grampos irão aparecer ao longo da superfície de ruptura e não devem ser desprezados (Schlosser e Unterreiner, 1990).

Com relação à distribuição de tensões nos grampos, à medida que se prossegue com a escavação, tensões de tração são desenvolvidas nos grampos em função da descompressão lateral do solo, resultante do processo de escavação. Há um aumento nas solicitações axiais ao longo dos grampos em função do prosseguimento da escavação.

Observa-se que as tensões nos grampos são máximas dentro da massa de solo grampeado e não na face da parede (Clouterre, 1991). Esta afirmativa só é válida para o caso de grampos sem fixação à parede (grampos livres). Análises de tensões nos grampos mostram que o ponto de tração máxima varia em função da forma de fixação do grampo à parede (Springer, 2001; Lima et al.,

2003). No caso de grampos fixos, o ponto de tração máxima ocorre junto à face. No caso de grampos livres, a tração máxima verifica-se em um ponto mais interno.

Nota-se ainda que o mecanismo de ruptura com regiões ativa e passiva (Clouterre, 1991) ocorre somente quando os grampos são livres em relação à face do talude escavado (Cardoso e Gonçalves, 1997). Neste caso, a zona considerada ativa está situada atrás da face. Nesta região, as tensões de cisalhamento lateral aplicadas pelo solo nos grampos são direcionadas para fora. Na zona passiva, as tensões de cisalhamento lateral são direcionadas para dentro da massa de solo, em direção oposta aos deslocamentos laterais da região ativa.

2.9. Estudo do Comportamento e Instrumentação de Obras em Solo Grampeado

A interpretação do monitoramento de obras, isto é, a análise em escala real dos fenômenos envolvidos na técnica de solos reforçados com grampos, permite o conhecimento dos princípios de seu funcionamento. O grande número de fatores de influência (geometria, comprimento, inclinação, natureza do solo, etc.) limitou o melhor entendimento deste comportamento (Clouterre, 1991).

O comportamento do grampo é comandado por três principais grupos de fatores de influência: propriedades da interface solo-grampo, propriedades do grampo e aspectos construtivos associados à obra. A Tabela 3 apresenta os fatores de influência relativos a cada um dos grupos. Nota-se que existem alguns fatores que são comuns a diferentes grupos. Os diversos subfatores de influência estão apresentados nos itens subseqüentes.

a) Tipo de grampo e Método de colocação

Os grampos são elementos passivos semi-rígidos, resistentes à flexão composta. Podem ser barras, cantoneiras ou tubos de aço, barras sintéticas de seção cilíndrica ou retangular, micro-estacas, e, em casos especiais, estacas.

Clouterre (1991) investigou o atrito em vários tipos de grampos instalados a partir de diferentes métodos em uma areia:

- Barras cravadas;
- Tubos cravados e concretados;
- Barras (grampos) concretadas sob gravidade em pré-furos;
- Barras (grampos) concretadas sob baixa pressão em pré-furos;

- Barras (grampos) concretadas sob alta pressão em pré-furos;

Os resultados mostraram que os grampos concretados sob gravidade apresentaram uma grande variabilidade em seu atrito lateral quando comparados aos outros tipos de grampo. Grampos concretados (ancorados) com alta taxa de pressão desenvolvem uma maior zona de plastificação e, portanto, apresentam maiores valores de atrito lateral ou de resistência ao cisalhamento.

Grampos cravados apresentam um maior valor de q_s quando comparados com grampos simplesmente posicionados em pré-furos preenchidos com nata de cimento. Para o segundo caso, o processo de escavação altera as condições naturais do terreno, isto é, altera o estado de tensões do solo.

Ainda no caso de grampos cravados, um fator importante é a rugosidade da barra. A rugosidade deve ser entendida como um fator diretamente relacionado com o tamanho da zona de plastificação em solos grampeados. Grampos rugosos são capazes de mobilizar maior empuxo quando solicitados. Por esta razão, apresentam maior resistência ao cisalhamento.

A mobilização de momentos fletores nos grampos requer que o elemento de reforço (grampos) possua certa rigidez. Deste modo, grampos flexíveis ($\phi_{aço}$ pequeno) não podem mobilizar momentos fletores por oferecerem baixa rigidez transversal.

Tabela 3 - Principais Fatores de Influência no Comportamento de Grampos

<i>Fatores</i>	<i>Interface Solo-Grampo</i>	<i>Propriedades</i>	<i>Construtivos</i>
Comprimento (L)	x	x	
Inclinação da face do talude (β)			x
Diâmetro do grampo (ϕ_{grampo})	x	x	
Avanço da escavação (L/H)			x
Saturação (S)	x	x	
Etapa da obra			x
Tipo de solo	x		
Inclinação do grampo (i)		x	x
Durabilidade		x	x
Fluência		x	x
Tipo de ancoragem	x	x	x
Método de instalação	x	x	x
Tipo de grampo na face	x	x	x
Profundidade (z)	x	x	x

b) Comprimento (L)

A variação do coeficiente de atrito solo-grampo com o comprimento dos grampos foi estudada através de ensaios de arrancamento. Os resultados sugerem que o q_s aumenta com o aumento do comprimento do grampo. O motivo apresentado pelos autores é o fato da tensão normal próxima da face do aterro ser menor do que no interior do maciço (ancoragem livre).

Feijó e Erhlich (2001) apresentaram resultados de ensaios de arrancamento, em grampos injetados com calda de cimento, executados em solos tropicais no Município do Rio de Janeiro. Foram efetuados ensaios em solos residuais jovens e maduros de biotita-gnaiss e gnaiss leptinítico. Grampos com diferentes comprimentos (3 e 6m) foram estudados, buscando-se verificar, dentre outros fatores, cargas de ruptura, mecanismos de colapso e a distribuição de tensões ao longo do comprimento dos grampos. Os autores observaram que, considerando-se um mesmo tipo de solo, os valores de q_s foram praticamente constantes para os grampos de 3m e 6m.

c) Diâmetro do grampo (ϕ_{grampo})

O diâmetro do grampo influencia a resistência ao arrancamento no contato solo-grampo (q_s), que é um dos parâmetros mais importantes para o projeto de estruturas de solo grampeado. O valor de q_s pode ser obtido a partir de resultados de ensaios de arrancamento, segundo a expressão:

$$q_s = \frac{T_N}{\pi \cdot \phi_{\text{grampo}} \cdot L_a} \quad \text{Equação 1}$$

onde: q_s = resistência ao arrancamento;

T_N = força normal máxima (carga que leva o grampo a ruptura por atrito com o solo);

ϕ_{grampo} = diâmetro do furo;

L_a = comprimento injetado do grampo.

d) Grau de Saturação (S)

O grau de saturação do solo influencia a resistência ao cisalhamento no contato solo-grampo. Clouterre (1991) mostra que, no caso de solos arenosos, com uma parcela significativa de finos, a força máxima de arrancamento pode

ser reduzida em mais de 50% quando o solo passa do ponto de umidade ótima até o ponto de saturação.

e) Profundidade (z)

A resistência ao arrancamento q_s relaciona-se com a tensão vertical normal através de um coeficiente de atrito (μ), segundo a expressão:

$$q_s = \mu(Z)\gamma z \quad \text{Equação 2}$$

onde: $\mu(z)$ = coeficiente de atrito (variável ao longo da profundidade).

Schlosser (1983) mostrou que q_s não varia com a profundidade. O coeficiente de atrito (μ) decresce com a profundidade, compensando o aumento da tensão normal. Desta forma, o valor de q_s permanece praticamente constante.

f) Tipo de ancoragem (fixação)

As tensões nos grampos são máximas dentro da massa de solo grampeado e não na face da parede (Clouterre, 1991). Segundo Springer (2001) esta afirmativa só é válida para o caso de grampos livres (sem fixação). A análise das tensões nos grampos mostra que o ponto de tração máxima varia em função da forma de fixação do grampo à parede. No caso de grampo fixo, o ponto de tração máxima ocorre junto à face. No caso de grampo livre, a tração máxima verifica-se em um ponto mais interno.

g) Inclinação da face do talude (β)

Lima (2002) avaliou a influência da inclinação da face do talude na estabilidade de escavações em solo grampeado. Quatro inclinações distintas foram estudadas (60° , 70° , 80° e 90°) para uma mesma disposição final dos grampos, correspondendo à última fase de escavação, conforme ilustra a Tabela 4. Todos os grampos possuem comprimento (L) de 6,0m.

Tabela 4 - Estabilidade do talude da escavação (Lima, 2002)

Inclinação	Fator de Segurança (método de Bishop Simplificado)	
	Sem Grampo (FS_{SG})	Com Grampo (FS_{CG})
$\beta=60^\circ$	0,96	1,58
$\beta=70^\circ$	0,80	1,47
$\beta=80^\circ$	0,66	1,22
$\beta=90^\circ$	0,57	1,05

Pode-se concluir que o fator de segurança diminui com a verticalidade do talude. O aumento da inclinação do talude por ser traduzido como um aumento das tensões solicitantes no grampo.

h) Avanço da escavação

Com o avanço da escavação, e conseqüente descompressão lateral do solo, há um aumento nas solicitações axiais ao longo dos grampos.

Análises numéricas, executadas por Springer (2001), mostraram que os grampos mais solicitados são aqueles localizados no topo da escavação, portanto, têm papel mais importante na contenção do solo. A distribuição de esforços no grampo é determinada pela velocidade do avanço da escavação.

i) Etapa da Obra

As forças de tração e cisalhantes e os momentos fletores variam durante as etapas da obra (construção, serviço e ruptura).

Durante a construção e em serviço, as deformações são muito pequenas e os grampos são essencialmente solicitados à tração. Próximo à face de escavação, baixos valores de esforços cisalhantes e momentos fletores podem ser gerados durante a construção, em casos extremos onde a face está inclinada em relação aos grampos.

Numa situação próxima à ruptura, forças cisalhantes e momentos fletores irão aparecer ao longo da superfície de ruptura e não devem ser desprezados (Schlosser e Unterreiner, 1990).

j) Tipo de Solo

No caso de solos arenosos, a resistência da superfície de contato é fortemente condicionada pelas características de dilatância do material. A dilatância de solos granulares é função da densidade do maciço e do estado de tensões. Cardoso (1987) afirma que:

- A resistência ao arrancamento aumenta com a densidade do maciço;
- Os coeficientes de atrito crescem com o aumento da tensão de confinamento.

Schlosser e Elias (1978) apresentam os resultados de ensaios de cisalhamento e de arrancamento em grampos (Tabela 5). Os ensaios foram realizados para diferentes densidades.

Pode-se observar que quanto maior for a densidade, isto é, mais restrito estiverem os deslocamentos, maiores serão os coeficientes de atrito. O grau de compactação é diretamente proporcional ao tamanho da zona de cisalhamento mobilizada.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a variação do atrito com o estado de tensões existente na superfície de contato. Os ensaios de arrancamento mostram que os coeficientes de atrito diminuem com o aumento da tensão vertical. Para pequenos valores de tensão vertical, o atrito é elevado. Por outro lado, resultados experimentais (Schlosser e Elias, 1978) indicam que o declínio dos coeficientes de atrito ocorre somente até tensões verticais na ordem de 100 a 150 kPa. Pode-se assumir que os coeficientes permanecem inalterados quando as tensões verticais ultrapassam este limite.

A influência que as partículas finas exercem no comportamento dos solos depende de diversos fatores, entre os quais citam-se: a granulometria, a composição mineralógica e a grandeza da fração fina. Ensaio de laboratório indicam que para uma dada granulometria do material grosso e uma dada composição mineralógica da fração fina, existe um limite percentual a partir da qual o comportamento do conjunto é essencialmente controlado por partículas finas (Figura 26).

Tabela 5 - Ensaio de cisalhamento direto e arrancamento para diferentes graus de densidade de solos (Schlosser e Elias, 1978)

<i>Areia média uniforme</i>			<i>Atrito do solo com a barra metálica lisa</i>		
Ensaio			Cis. direto	Arrancamento	
γ_d (kN/m ³)	e	tg ϕ	tg δ	tg δ_{pico}	tg δ_{res}
15,3	0,73	0,50	0,34	0,30	0,17
16,3	0,62	0,70	0,38	0,54	0,30
17,3	0,53	1,00	0,51	2,50	2,36

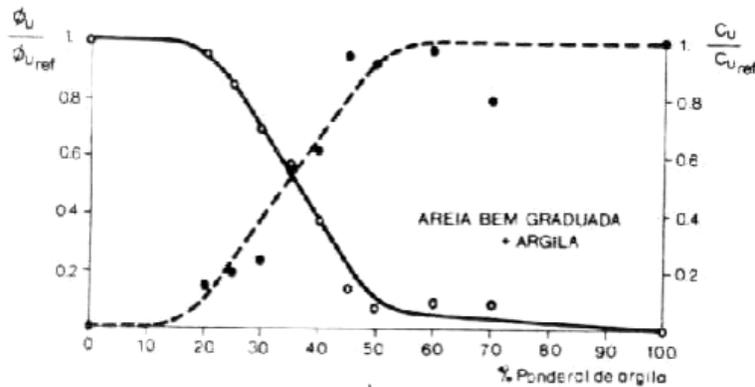


Figura 26 - Evolução dos parâmetros de resistência a curto prazo em função do percentual de argila (Schlosser e Elias, 1978).

Schlosser e Elias (1978) identificaram três trechos distintos nas curvas de variação dos parâmetros de resistência com o percentual de argila:

- Se a fração fina for pequena, os vazios não serão totalmente preenchidos. A estrutura formada por partículas grossas permanece estável e o solo comporta-se como um solo granular;
- O aumento da quantidade de partículas finas faz diminuir os contatos entre os grãos e, por isso, conduz à progressiva instabilização da estrutura granular (ângulo de atrito diminui e coesão aumenta);
- A partir de uma dada porcentagem de fração fina, os contatos intergranulares deixam de existir e o solo comporta-se como um solo argiloso.

k) Inclinação do grampo (i)

A principal função dos reforços consiste em absorver os esforços de tração. O acréscimo de resistência conferido ao solo será máximo quando os grampos estiverem orientados na posição em que se desenvolvem as deformações principais de tração no solo não reforçado (Cardoso, 1987).

Marchal (1984) mostra que a orientação do grampo em relação à superfície potencial de ruptura influencia na mobilização de tração e cisalhamento em estruturas de solo reforçado (Figura 27).

Jewell (1980) verificou que a direção ótima para a mobilização de tração em reforços (flexíveis) corresponde a direção de máxima extensão em solos não reforçados aproximadamente 30° em relação a normal da superfície de ruptura (Figura 28).

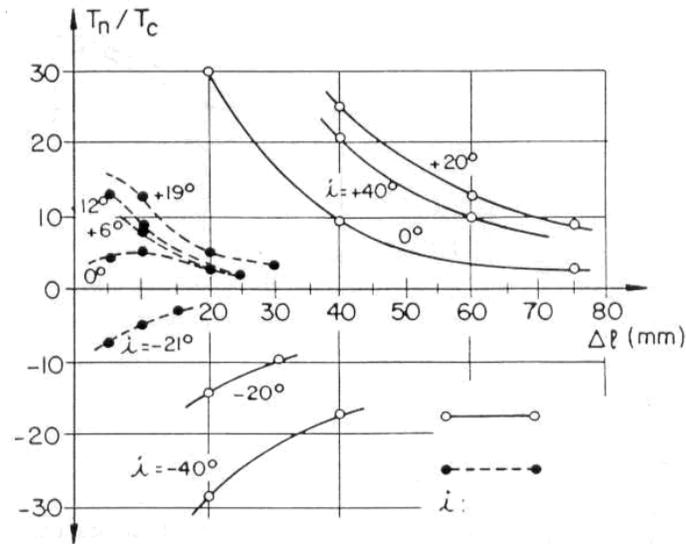


Figura 27 - Variação da razão entre as forças de tração e cisalhamento em função do deslocamento (Marchal, 1984)

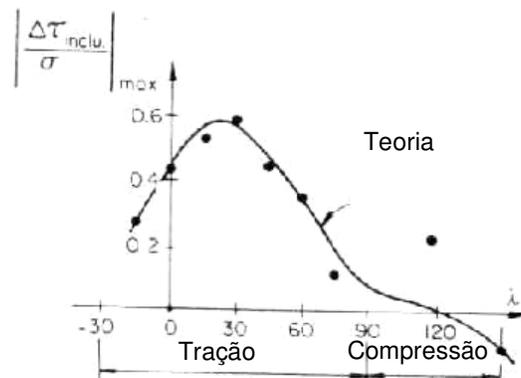


Figura 28 - Influência da orientação dos grampos na mobilização de esforços de tração e aumento de resistência ao cisalhamento (Jewell, 1980)

I) Durabilidade

Quando os sistemas de reforço de solos são projetados como estruturas permanentes e por longo período de serviço, deve-se garantir a manutenção da capacidade resistente (q_s) dos reforços ao longo da vida útil da obra.

Cardoso (1987) afirma que a questão da durabilidade dos grampos deve ser analisada com base na possibilidade da diminuição da seção transversal do grampo devido ao processo de corrosão. O potencial de corrosão de metais é determinado pelas quantidades de água e oxigênio no solo, bem como pela distribuição granulométrica do solo. Solos argilosos com grande capacidade de

absorção e retenção de água, além de baixa permeabilidade, possuem maior potencial de desenvolvimento de corrosão, quando comparados com solos de natureza arenosa.

m) Fluência

Todas as observações e monitoramento de obras em solo grampeado têm indicado que o fenômeno de *creep* ou fluência ocorre após o término da construção da estrutura (Plumelle et al., 1990). Isto acarreta um pequeno aumento nos deslocamentos e nos esforços nos grampos, especialmente naqueles situados próximos à base da escavação. Instrumentações de campo em estrutura de solo grampeado na França (Unterreiner et al., 1995) relatam aumentos consideráveis de deslocamentos, durante um período de interrupção da obra, atribuídos ao efeito de *creep* (ou fluência) (Lima, 2002).

Os resultados em alguns experimentos e programas de instrumentação realizados na França ajudaram a definir a ordem da magnitude das extensões e deformações que ocorrem em taludes de solo grampeado (Clouterre, 1991).

Em escavações verticais, os deslocamentos horizontais e verticais serão máximos no topo da estrutura. Segundo as observações de campo, no estágio final da construção, estes deslocamentos variam entre 0,10%H e 0,30%H, sendo reduzidos à medida que se distanciam da face. Variações de 0,07 a 3,00 %H foram observadas em obras nos Estados Unidos e entre 0,25%H a 0,30%H na Alemanha (Schlosser et al., 1992).

Os deslocamentos no topo da face de escavação dependem dos seguintes parâmetros:

- Velocidade da construção da estrutura;
- Altura dos incrementos de escavações e espaçamento entre grampos;
- Fator de segurança global da face de solo grampeado (quando os valores são baixos, os deslocamentos horizontais e verticais tendem a ser altos);
- Comprimento dos grampos;
- Relação L/H;
- Inclinação e rigidez à flexão dos grampos;
- Capacidade de suporte do solo da fundação da estrutura de solo grampeado;

- Inclinação da face uma vez que a leve inclinação da face reduz os deslocamentos no topo, aumentando a estabilidade da estrutura (Lima et al., 2002);

Com relação ainda aos deslocamentos na face, a estabilidade local durante as etapas de escavação é um dos tópicos mais importantes na construção de estruturas em solo grampeado. O efeito de arqueamento é um dos principais fenômenos em estabilidade local de escavações. Deve-se exigir um suporte eficiente do nível do grampo superior à escavação até a base da mesma, pois os deslocamentos são sensíveis a estes suportes.

Existe uma altura crítica de escavação que não deve ser excedida, para manter o efeito de arco e evitar, deste modo, um processo de instabilidade global do solo. A altura crítica é principalmente função do tipo de solo, não devendo, na prática, ultrapassar 2m (Clouterre, 1991).

Diversas observações e monitoramento de obras em solo grampeado têm demonstrado que o fenômeno de *creep* ou fluência ocorre após o término da escavação (Plumelle et al., 1990). Isto acarreta um aumento suave nos deslocamentos e nos esforços nos grampos, especialmente naqueles situados próximos à base da escavação.

2.10. Parâmetros de Projeto e 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) através de correlações empíricas da literatura, tais como as disponibilizadas nos trabalhos de Bustamante e Doix (1985) e Ortigão (1997).

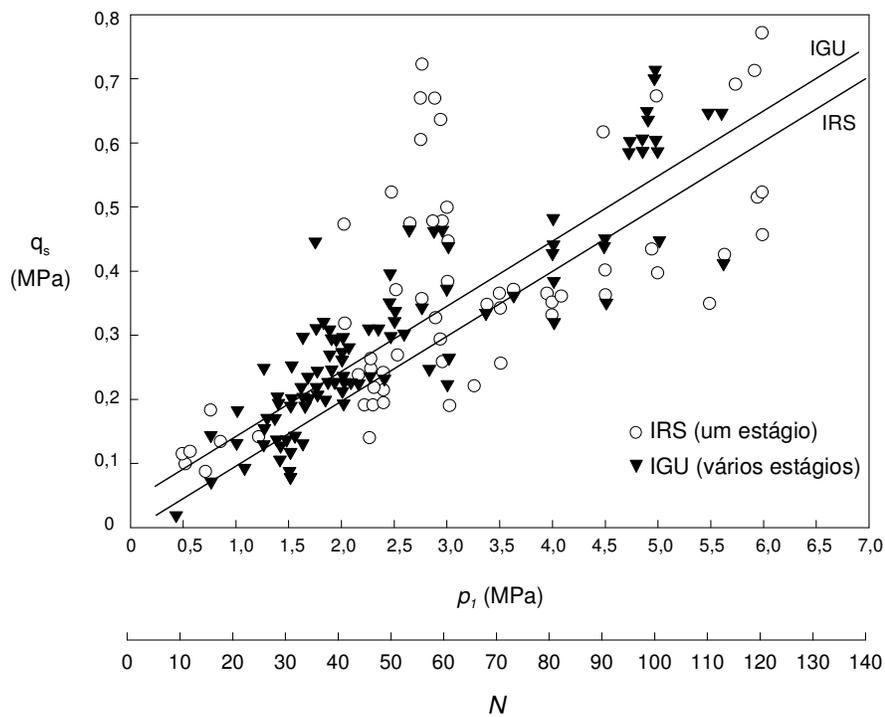
Bustamante e Doix (1985) relacionam o valor de q_s com a pressão limite do pressiômetro Ménard (p_1) e com o índice de resistência à penetração (N_{SPT}). Os resultados apresentados na Figura 29 incluem ensaios de arrancamento realizados em ancoragens com somente um estágio de injeção e as de múltiplo estágio, 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_{SPT} , também, apresenta valores

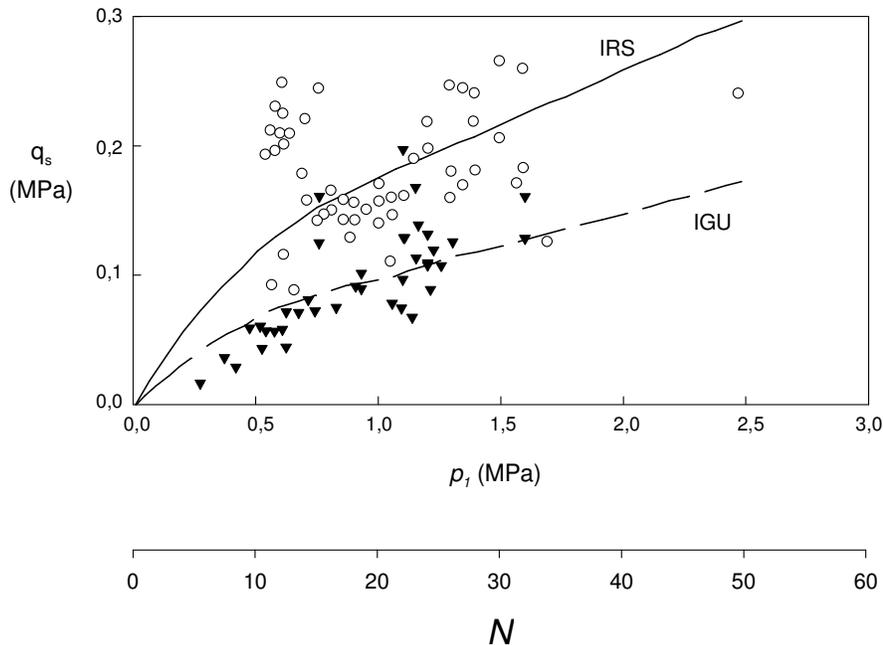
de N muito elevados, os quais podem ser atribuídos a procedimentos diferentes de ensaio, adotados nos países onde os dados foram obtidos.

Ortigão e Palmeira (1992) analisam ensaios de arrancamento realizados no Rio de Janeiro, São Paulo e Brasília e sugerem a correlação apresentada na Figura 30. 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.

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.



a) areias



b) argilas e siltes

Figura 29 – Correlação entre resistência ao arrancamento q_s , pressão limite do pressiômetro de Ménard p_1 e índice de resistência a penetração N_{SPT} (Bustamante e Doix, 1985)

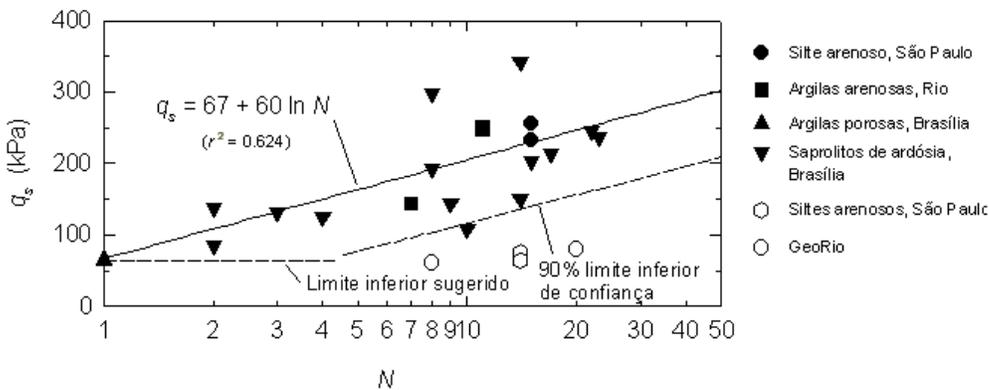


Figura 30 – Correlação entre a resistência ao arrancamento q_s e número de golpes $N(SPT)$ (Ortigão e Palmeira, 1992).

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, a resistência ao arrancamento (q_s) obtida nos ensaios de campo é considerada 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):

$$q_s = \lambda_1 (c_a' + \sigma_n \operatorname{tg} \delta') \quad \text{Equação 3}$$

onde:

q_s = resistência ao arrancamento;

λ_1 = fator de carga;

c_a' = adesão da interface;

σ_n = tensão normal aplicada ao grampo;

δ' = 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):

$$q_s = \lambda_1^* \alpha (c' + \sigma_n \operatorname{tg} \phi') \quad \text{Equação 4}$$

onde:

q_s = resistência ao arrancamento;

λ_1^* = fator de carga para solo residual de gnaisse;

α = coeficiente de interface;

c' = coesão do solo;

σ_n = tensão normal aplicada ao grampo;

ϕ' = ângulo de atrito do solo.

As equações apresentam um fator de carga λ_1 e λ_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 31a apresenta o fator de carga λ_1^* em função da tensão normal ao grampo considerando solo residual de gnaisse tanto jovem quanto maduro. A Figura 31b apresenta a variação do fator de carga (λ_1) com o aumento da tensão normal ao grampo para o solo residual jovem de gnaisse estudado (Proto Silva, 2005).

A Equação 5 apresenta o coeficiente de interface (α) que associa os parâmetros de resistência da interface solo-nata aos parâmetros de resistência do solo, expresso por:

$$\alpha = \frac{c_a' + \sigma_n \operatorname{tg} \delta'}{c' + \sigma_n \operatorname{tg} \phi'} \quad \text{Equação 5}$$

onde:

α = coeficiente de interface;

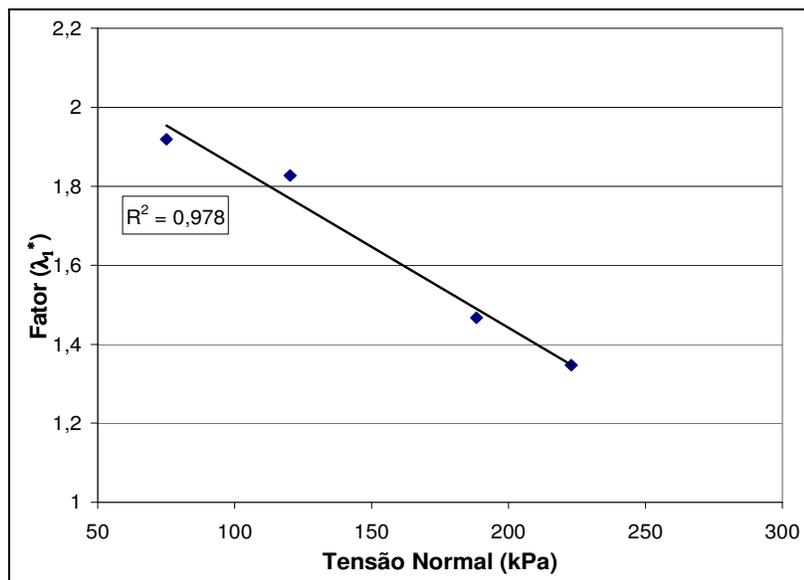
c_a' = adesão solo/nata de cimento;

σ_n = tensão normal;

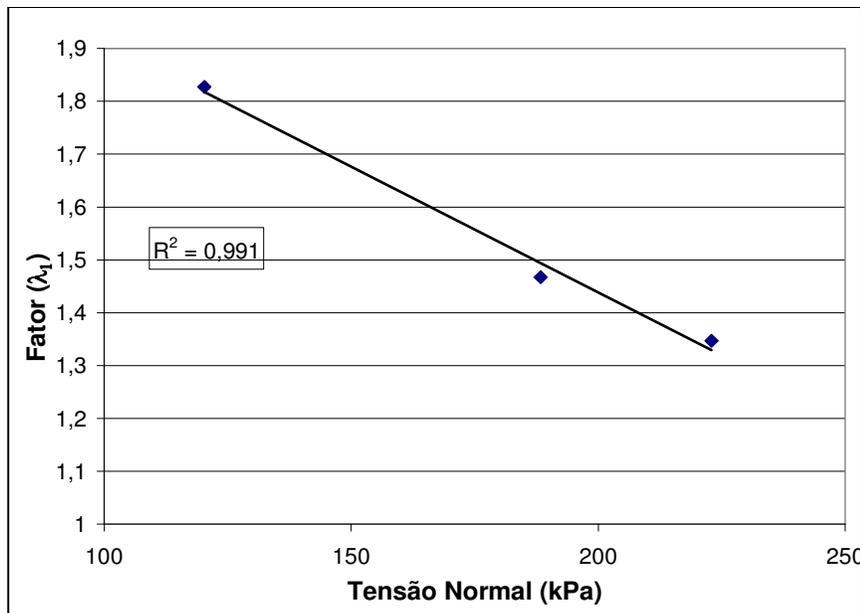
δ' = ângulo de atrito na interface solo/nata de cimento;

c' = coesão do solo;

ϕ' = ângulo de atrito do solo.



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



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

Figura 31 – Variação dos fatores de carga λ_1 e λ_1^* em função da tensão normal (Proto Silva, 2005).

A Figura 32 ilustra a variação do coeficiente de interface (α) em função da tensão normal ao grampo para o solo residual de gnaisse maduro (1) e jovem (2).

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 gnaisse. Os resultados obtidos indicaram uma expressiva adequação da relação proposta.

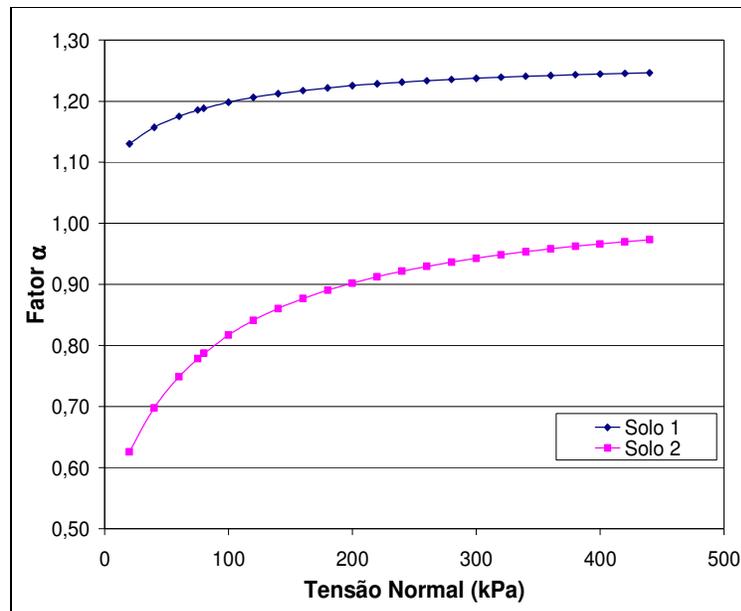


Figura 32 – Variação do Coeficiente de interface (α) em função da Tensão normal para solo residual de gnaiss maduro e jovem (Proto Silva, 2005).

2.11. Casos de Obras e Estudos

Ortigão et. al. (1992) reportaram a experiência de campo pioneira da Diretoria de Geotécnica do Rio de Janeiro em um muro experimental executado através 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. Através 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 através 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_{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 alguns métodos de reforço de solos: os métodos de Palmeira (1992), Clouterre, (1991). 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 (1996), 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 através 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 (2001b) 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

concebiu 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.

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).

Feijó (2007) monitorou as cargas de uma escavação em solo grampeado na cidade do Rio de Janeiro. Os extensômetros elétricos indicaram baixos valores de carga em função da altura de escavação da obra.

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 100.000m² 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.

2.11.1. Instrumentação de Obras em Solo Grampeado:

O conceito básico da técnica de solo grampeado consiste no uso de inclusões passivas para reforçar o solo “in situ”. As inclusões são instaladas durante a construção, imediatamente após cada etapa de escavação, para restringir deformações no maciço à medida que se executa o corte no talude. A mobilização efetiva da resistência dos grampos limita os deslocamentos no solo. Conseqüentemente, o comportamento de obras em solo grampeado deve ser verificado através de monitoramento dos deslocamentos na face das estruturas e, em alguns casos, em pontos distantes da face (Unterreiner et al., 1995), além da medição dos esforços mobilizados nos grampos. Deslocamentos obtidos por instrumentação podem fornecer valores maiores que os estimados na fase de projeto, conforme reportado por Azambuja et al. (2001).

Springer (2006) e Proto Silva (2005) realizaram estudos relativos a ensaios de arrancamentos realizados em encostas da cidade de Niteroi-Rj. As cargas nos grampos foram monitoradas por meio de *strain gages*.

No Brasil, pode-se dizer que existem poucas obras instrumentadas, sendo que, em geral, apenas os deslocamentos horizontais e verticais são monitorados através da instalação de marcos superficiais e de tubos de inclinômetros. Recentemente, duas obras em solo grampeado foram estudadas por meio de instrumentação: Museu I (Lima, 2007 e Sayão et al., 2005) e Museu II, apresentada nesta pesquisa.

O desempenho da obra em solo grampeado deve ser verificado através de monitoramento dos deslocamentos da massa reforçada, além da medição dos esforços mobilizados nos grampos, ao longo das diversas etapas de execução e operação.

2.11.2. Parâmetros a Serem Monitorados

Os principais parâmetros a serem monitorados para a avaliação do comportamento de taludes em solo grampeado são Lima (2007):

- Movimentações horizontais e verticais da face: podem ser obtidas por marcos superficiais na face, levantamento topográfico e inclinômetros instalados tipicamente a 1m da face. As movimentações na superfície do terreno podem ser obtidas por nível óptico. Movimentações em pontos pré-determinados na

massa grampeada podem ser obtidas através da instalação de *tell tales*;

- Movimentações locais ou deterioração do revestimento da face: podem ser observadas durante inspeções diárias ao longo da execução da obra e, eventualmente, utilizando-se medidores de trincas;
- Drenagem da massa reforçada: pode ser monitorada visualmente ou por piezômetros instalados no talude;
- Desempenho de qualquer estrutura próxima à crista do talude grampeado (edificações, encontros ou fundações de pontes, rodovias, etc.): possíveis movimentações de estruturas vizinhas podem ser avaliadas com a instalação de marcos superficiais e levantamento topográfico com aparelho óptico;
- Esforços atuantes nos grampos, com especial atenção para a magnitude e localização dos esforços axiais máximos: medidores de carga ou deformação tais como os *strain-gages* instalados ao longo do comprimento do grampo determinam a magnitude e localização dos esforços axiais máximos no reforço. Idealmente, os *strain-gages* devem ser colados em pares diametralmente opostos, para se avaliar o efeito da flexão nos grampos. Em geral, são fixados a cada 1,5m;
- Esforços atuantes na extremidade do elemento de reforço, próximo à face de escavação: podem ser obtidos com o auxílio de células de carga instaladas na extremidade do grampo (próxima à face) ou por leituras dos *strain-gages* localizados na região de interesse;
- Precipitação pluviométrica: podem ser utilizados pluviômetros do tipo gangorra ou báscula.
- Infiltração da água no terreno: provoca redução da sucção e aumento de poropressões e, conseqüentemente, pode causar deslocamentos do talude. Pode ser avaliada com o auxílio de piezômetros e indicadores de nível d'água.

Uma revisão mais completa sobre o assunto pode ser vista em Dunncliff e Green (1988). Lima (2007) descreve em detalhes vários instrumentos e técnicas que podem ser utilizados na instrumentação de taludes grampeados.

2.12. Dimensionamento de Taludes Grampeados

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 geral, 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.

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 33). 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).

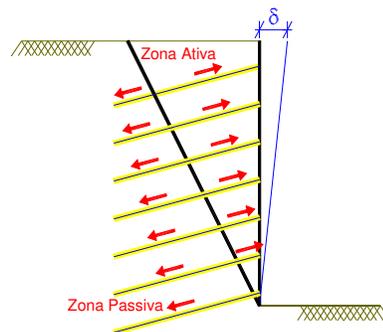
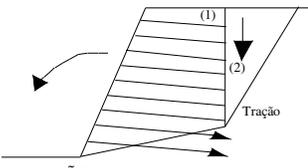


Figura 33 - Mobilização de esforços nos grampos nas zonas ativa e passiva

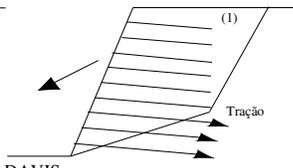
A análise de estabilidade global é feita considerando os esforços estabilizantes dos grampos atuando nesta cunha ativa. Os métodos diferem, entretanto, quanto à forma da superfície de ruptura, quanto ao método de cálculo do equilíbrio das forças atuantes e quanto à sua natureza. Maiores detalhes sobre os métodos são apresentados por Stocker et al. (1979), Shen et al. (1981), Schlosser (1983), Juran et al. (1988), Bridle (1989), Anthonie (1990), Ortigão et al. (1993) e Dyminski (1994).

Tabela 6 - Métodos de análise e modelos de ruptura (adaptado de Ortigão et al., 1993)

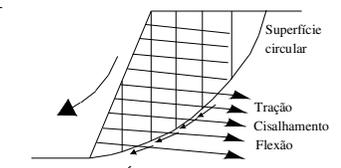
<i>Características</i>	<i>Métodos</i>					
	Alemão	Davis	Multicritério ou Francês	Cinemático	Cardiff	Escoamento
Referência	Stocker et al. (1979)	Shen et al. (1981)	Schlosser (1983)	Juran et al. (1988)	Bridle (1989)	Anthoine (1990)
Análise	Equilíbrio limite	Equilíbrio limite	Equilíbrio limite	Tensões internas	Equilíbrio limite	Teoria de escoamento
Divisão da massa de solo	2 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



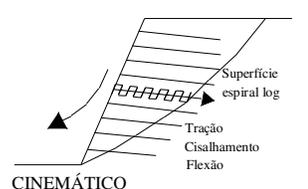
ALEMÃO



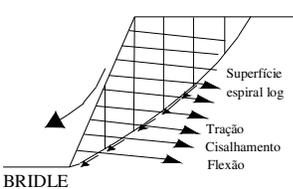
DAVIS



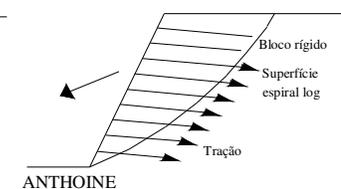
MULTICRITÉRIO



CINEMÁTICO



BRIDLE



ANTHOINE

2.12.1.Comparação entre Métodos

Pockoski e Duncan (2000) apresentaram uma comparação entre os diversos programas computacionais para o dimensionamento de taludes reforçados com grampos. Foram relatadas a facilidade de uso, aplicabilidade, acurácia e eficiência de 8 *softwares* para uma série de casos práticos. Estudos semelhantes foram realizados por Vieira (1996) para o caso de três programas computacionais desenvolvidos na Universidade de Brasília.

Outra comparação entre os diversos métodos de análise existentes para estruturas em solo grampeado foi apresentada por Camargo (2001) e Hachich e Camargo (2003 e 2006). Segundo os autores, o método de Cardiff (Bridle, 1989; Bridle e Barr, 1990) apresentou erros grosseiros em sua formulação e resultados discrepantes em comparação a todos os demais. Já o método Multicritério (Schlosser, 1982 e 1983) demonstrou ser o mais completo, intuitivo e versátil de todos os processos analisados (Camargo, 2001).

2.13.Análises Tensão Deformação

A análise da estabilidade de taludes grampeados com base em análises tensão x deformação é realizada com o auxílio de programas computacionais baseados nos métodos dos elementos finitos (MEF) ou das diferenças finitas (MDF). O estudo do comportamento tensão x deformação de uma estrutura em solo grampeado é uma opção interessante, uma vez que as diferentes etapas de construção da obra podem ser avaliadas.

Silva (1999) e Silva et al. (2001) comprovaram a eficiência de um modelo computacional implementado para análise de estruturas grampeadas. Com esta ferramenta foi possível avaliar esforços axiais e cisalhantes, solicitados na interface grampo/nata, nata/solo e no próprio aço (grampo) além de, momentos fletores de um material “equivalente”, formado pela combinação da rigidez do grampo e da nata. Testes preliminares comprovaram a eficiência da instalação dos grampos na horizontal e mostraram que o efeito do reforço é equivalente ao aumento de tensão confinante ou da coesão do maciço terroso. Adicionalmente, os estudos mostraram que a rigidez à flexão dos grampos é muito importante quando as cargas se aproximam da condição de colapso.

Análises da rigidez dos grampos em estudos paramétricos realizados por Lima (1996) e Ehrlich et al. (1996) têm demonstrado a importância da rigidez à flexão no controle do escoamento do solo. Segundo os autores, grampos com

rigidez à flexão elevada e inclinações próximas a zero são mais eficientes no controle da plastificação do material, por estarem associados a menores deslocamentos horizontais. Quanto maior a inclinação dos grampos, maior será a influência da rigidez à flexão nas tensões internas. Para grampos rígidos, o aumento da inclinação das barras reduz as tensões nos grampos e aumenta os momentos fletores. Em grampos flexíveis, verifica-se um comportamento inverso.

Segundo Lima (1996), a flexão afeta o comportamento do modelo de ancoragem, para o caso de taludes de pequenas dimensões. O autor também chama atenção para o fato de que as análises realizadas sob deformação plana podem ser ditas aproximadas, e que certamente análises 3D seriam mais representativas do comportamento real do maciço. Entretanto tais análises são muito mais dispendiosas do ponto de vista computacional. O autor sugere então, a simulação de um “efeito tridimensional” a partir da consideração do espaçamento entre grampos, já que este é, geralmente, fixado como unitário.

Unterreiner et al. (1995) confirmaram que análises numéricas bidimensionais são aceitáveis pelo menos para pequenas deformações, durante a fase de construção, quando a estrutura está distante da ruptura.

Lima (2002), com o auxílio do programa computacional FLAC, estudou a influência dos parâmetros de projeto no comportamento de escavações grampeadas. Foi simulado o comportamento tensão-deformação de taludes em solos residuais, usualmente encontrados nas encostas do Rio de Janeiro.

Segundo o autor, a influência da inclinação do talude é significativa nos deslocamentos horizontais, os quais crescem de magnitude à medida que o talude torna-se mais íngreme. A execução de escavações com taludes ligeiramente inclinados reduzem significativamente a magnitude dos deslocamentos no topo. Esta redução chega a 75% quando se passa de uma escavação vertical ($\beta=90^\circ$) para uma inclinação de $\beta=80^\circ$ (Lima, 2002).

Lima et al. (2003) demonstraram a aplicação do programa computacional FLAC (Itasca, 1996) em simulações de escavações grampeadas obtendo-se os deslocamentos, tensões, e forças axiais nos grampos, a cada etapa construtiva.

Lima et al. (2005) e Gerscovich et al. (2005) compararam o comportamento tensão-deformação de taludes em solo grampeado, a partir do uso do programa computacional FLAC (método das diferenças finitas; Itasca, 1996) e do programa computacional PLAXIS (método dos elementos finitos, Brinkgreve e Vermeer; 1998). Os deslocamentos horizontais a 1,0m da face da escavação e os esforços axiais desenvolvidos ao longo dos grampos, na última etapa de escavação,

foram comparados para os programas computacionais utilizados e forneceram resultados com erro inferior a 30%.

2.14.Casos de Simulação

A metodologia de projetos de taludes em solo grampeado baseia-se, na maioria dos casos, em métodos de análise de estabilidade por equilíbrio limite. Em geral, os projetos desprezam os mecanismos das deformações ocorridas no interior da massa de solo grampeada. A necessidade de se obter informações sobre as deformações inerentes ao sistema de estabilização por solo grampeado requer estudos de estabilidade por métodos numéricos (Lima, 2002).

O dimensionamento de estruturas de contenção de encostas é geralmente executado com base em métodos de equilíbrio limite e na experiência acumulada com as obras já executadas. No entanto, os métodos de equilíbrio limite só fornecem os fatores de segurança e não permitem a determinação das deformações. Dessa forma, avaliar a deformabilidade do muro levando em conta a influência das etapas de escavação, dos parâmetros do solo e da geometria requer o uso de uma ferramenta computacional mais eficiente. A previsão da deformabilidade é fundamental devido ao crescente aumento da dimensão das escavações e conflito com estruturas vizinhas.

Por não prever deformações no interior da massa reforçada, análises por equilíbrio limite não incorporam a redistribuição de esforços nos grampos ao longo das etapas de construção e, portanto, fornecem um fator de segurança global que não reproduz corretamente o comportamento da estrutura. Resultados experimentais e programas de instrumentação em estruturas de solo grampeado ajudaram a definir a ordem da magnitude das deformações (Clouterre, 1991). Segundo observações de campo, no estágio final de construção, os deslocamentos horizontais no topo da escavação variam entre 0,10%H e 0,30%H, sendo reduzidos à medida que se distanciam da face. Variações de 0,07%H a 3,0%H foram observadas em obras nos Estados Unidos e entre 0,25%H a 0,30%H na Alemanha (Schlosser et al., 1992).

A previsão das deformações em maciços grampeados torna-se possível a partir da utilização de ferramentas numéricas, capazes de simular seqüências construtivas e incorporar modelos constitutivos, que reproduzam o comportamento dos materiais envolvidos neste tipo de obra (Lima, 2002).

Vários autores têm empregado técnicas numéricas para realização de estudos paramétricos de obras de solo grampeado (Ehrlich et al., 1996; Cardoso

e Gonçalves, 1997; Springer et al., 2001; Gerscovich et al., 2002; Lima et al., 2002, 2003 e 2004).

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

2.15.O Projeto Solo Grampeado PUC-Rio/COPPE

O projeto Solo Grampeado englobou duas universidades (PUC-Rio e COPPE/UFRJ) além da construtora SEEL. Duas áreas foram selecionadas para a realização do estudo. Trata-se de uma escavação em solo residual de gnaiss com o objetivo de construir um edifício residencial de apartamentos no bairro da Boa Viagem, em Niterói. O solo local apresenta um perfil de intemperismo muito bem definido.

As rochas, quando expostas na superfície da Terra estão sujeitas à ação de processos naturais de aquecimento e resfriamento, decorrentes da alternância de dias e noites e da ação das águas, que se infiltram a partir das chuvas e percolam, tipicamente, através de fissuras ou fraturas nos materiais existentes. A estes processos, de ordem química, física ou biológica, que desintegram e/ou decompõem a rocha, dá-se o nome de intemperismo.

A formação do solo ocorre quando o intemperismo, além de provocar alterações químicas na rocha, começa a modificar sua microestrutura, de forma gradual, promovendo uma importante reorganização dos minerais neoformados. O intemperismo leva à formação de um perfil de solo.

Entende-se por perfil de solo a seção de um terreno constituída por uma seqüência de camadas distintas por suas características físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas, biológicas e microestruturais. A camada superficial recebe o nome de solo maduro e a camada superficial é denominada solo residual jovem ou solo saprolítico. Na seqüência encontra-se a camada de rocha alterada ou saprolítico e, abaixo, a rocha sã.

Solos residuais jovens são materiais complexos e heterogêneos especialmente quando desenvolvidos de rochas metamórficas. Suas propriedades de engenharia são influenciadas à medida que o intemperismo evolui até a formação de uma nova microestrutura, dando origem ao solo

residual maduro. Os solos residuais jovens vão desde aqueles que guardam características reliquias da rocha matriz e a maioria dos minerais primários ou parte significativa deles passando por aqueles em que o material já não guarda mais a estrutura da rocha mãe, no entanto mantém parte dos minerais primários intemperizados. Por outros lados, os solos residuais maduros praticamente não possuem minerais primários, a exceção de minerais resistentes ao intemperismo.

Os parágrafos a seguir resumem as diversas fases da pesquisa já realizadas.

Proto Silva (2005), 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.

Springer (2006) estudou o comportamento tensão-deformação-resistência de grampos sob solicitação de arrancamento, em função do método de instalação. Os grampos foram executados em solo residual (maduro ou jovem) e em rocha alterada de gnaiss na cidade de Niterói, RJ. Alguns dos grampos ensaiados foram exumados, destacando-se os aspectos da superfície de

arrancamento, a uniformidade do diâmetro, a presença de fissuras no grampo, e a litologia dos materiais encontrados ao longo do comprimento do grampo.

Lima (2007) analisou uma escavação em solo residual (Museu I) reforçada com grampos. A escavação foi instrumentada para o monitoramento dos deslocamentos do maciço e dos esforços nos grampos. O comportamento do talude foi influenciado pelo processo executivo e por uma outra escavação (Museu II) no terreno vizinho. O monitoramento indicou que os deslocamentos do maciço e os esforços nos grampos cresceram significativamente com o avanço da escavação e não cessaram ao final da obra.

Leite (2007) estudou a viabilidade do emprego de grampos reforçados com fibras de polipropileno em substituição às barras de aço, na técnica de solo grampeado. O desempenho dos grampos com fibras foi avaliado por meio de ensaios de arrancamento. Concluiu-se que os grampos com fibras apresentaram uma resistência ao arrancamento 40% menor do que os grampos convencionais.

Henrique Jr. (2007) executou simulações numéricas com o objetivo de prever o comportamento de ensaios de arrancamento de grampos e permitir uma comparação com as curvas carga - deslocamentos experimentais. As análises indicaram a grande influência do módulo de deformabilidade do solo nas simulações numéricas.