

4 Ensaio de arrancamento de grampos

Não há uma norma técnica que regulamente a execução de ensaios de arrancamento de grampos. Portanto, neste capítulo são apresentados procedimentos e recomendações de ensaios, esquemas de montagem dos ensaios e interpretações do comportamento de arrancamento do grampo, reunidos da literatura especializada.

4.1. Ensaio típico

A estabilidade de uma contenção em solo grampeado é estudada em seu estado limite último. Assim, o objetivo principal dos ensaios de arrancamento é determinar a resistência ao arrancamento (q_s).

A carga axial de tração nos grampos (T_n) tem papel preponderante e é introduzida como força estabilizante que corresponde à resistência ao arrancamento mobilizada (Figura 30).

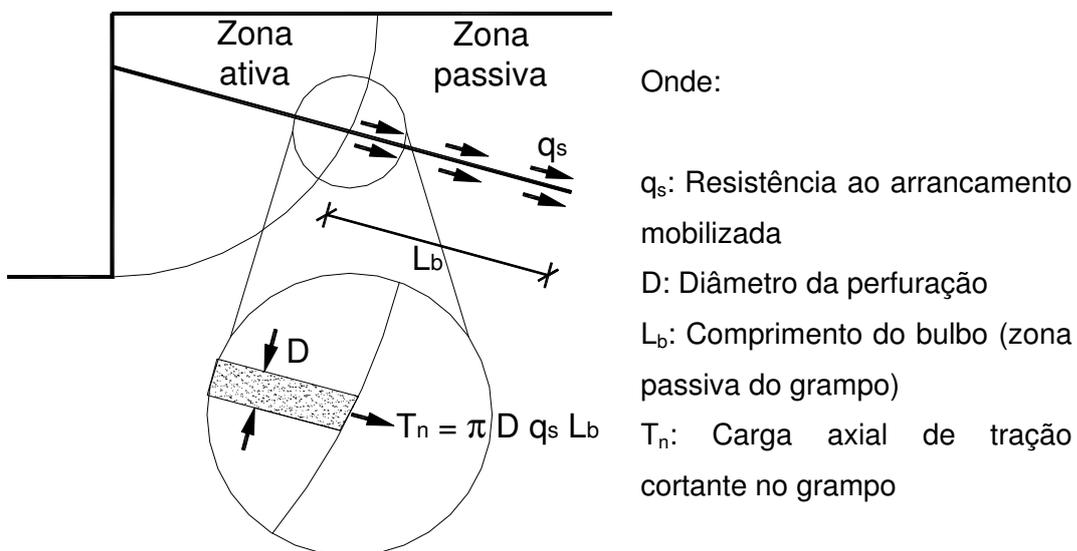


Figura 30 – Tração no grampo (Ortigão e outros, 1993)

A resistência ao arrancamento de grampos, portanto, é o parâmetro essencial para o projeto de estruturas de solo grampeado. Este parâmetro é freqüentemente estimado durante a fase de projeto (baseado na experiência do projetista) para posterior verificação, por meio de ensaios de arrancamento, durante a construção.

O ensaio de arrancamento consiste em se aplicar cargas de tração, por meio de macaco hidráulico, à barra de aço ancorada no terreno. Para cada carga aplicada, registra-se o deslocamento de arrancamento da cabeça do grampo. Da curva *Deslocamento x Carga*, obtém-se a *Máxima carga axial de tração cortante no grampo* do ensaio de arrancamento.

A resistência ao arrancamento [q_s], obtida no ensaio, possui unidade de tensão e é definida como:

$$q_s = \frac{F_{\max}}{\pi D L_{\text{ancorado}}}$$

onde

q_s : Resistência ao arrancamento mobilizada;

F_{\max} : Máxima carga axial de tração cortante no grampo;

D: Diâmetro da perfuração;

L_{ancorado} : Comprimento ancorado ou injetado do grampo.

O procedimento de instalação de grampos destinados aos ensaios de arrancamento (inclinação, perfuração, introdução no furo e injeção) deve ser exatamente o mesmo dos grampos de trabalho (permanentes) da construção, conforme recomendado por Clouterre (1991).

Baseado em resultados de pesquisa e estudos administrados pelo Projeto CLOUTERRE (French National Project CLOUTERRE, de junho de 1988 e de dezembro de 1989), os padrões utilizados para os ensaios de arrancamento podem ser executados com deslocamento controlado (velocidade constante) ou com força controlada.

Por meio dos ensaios de arrancamento, é possível determinar a força máxima de arrancamento, a força residual e também o coeficiente [k_β], correspondente à inclinação inicial da curva de deslocamento x força, conforme ilustrado na Figura 31 (Clouterre, 1991).

Nesta pesquisa foram executados ensaios de força controlada, que correspondem ao procedimento mais usual da prática brasileira.

Para as mesmas condições de solo, tanto o ensaio com controle de deslocamento quanto o ensaio com controle de força, devem levar ao mesmo resultado, ou seja, à mesma força máxima de arrancamento (Clouterre, 1991).

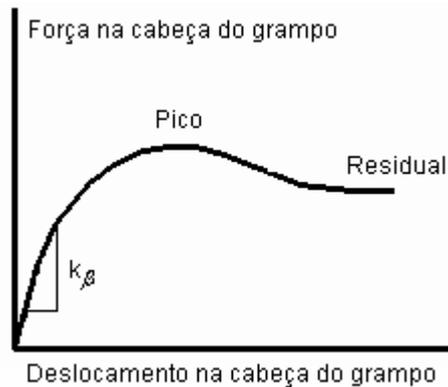


Figura 31 – Curva deslocamento x força de um ensaio de arrancamento (Clouterre, 1991)

4.2. Esquema de montagem

O esquema típico de montagem recomendado para o ensaio de arrancamento é apresentado na Figura 32. Observa-se, na ordem da seqüência, os seguintes componentes: (1) Placa de reação (aço ou concreto); (2) Grade de reação; (3) Macaco hidráulico; (4) Célula de carga; (5) Placa de reação; (6) Placa de referência; (7) Porca; e (8) Extensômetro fixado a suporte externo.

O eixo do macaco e o eixo do grampo devem estar alinhados. Para isto é usada uma grade de reação entre o macaco e a placa de reação (Lazart e outros, 2003). É importante manter os extensômetros também alinhados ao eixo do grampo.

Os ensaios de arrancamento são realizados em grampos com um trecho inicial livre seguido de um trecho injetado. Deve-se garantir que não haja preenchimento de nata no trecho livre (caso dos tirantes, em que a barra fica protegida por um tubo plástico, graxa e envolto por nata). No caso dos grampos, deve-se utilizar um obturador de calda de cimento, para não permitir o preenchimento do furo neste trecho livre. Ao se aplicar o carregamento de tração no grampo, a face e o solo são submetidos à compressão. Caso haja preenchimento com nata, o trecho inicial do grampo estará sujeito à compressão, o que é indesejado. É, portanto, importante manter livre o trecho inicial do grampo no ensaio de arrancamento.

O grampo é tracionado e a carga de tração deve ser monitorada por célula de carga ou por meio da leitura manométrica do macaco hidráulico (Figura 32).

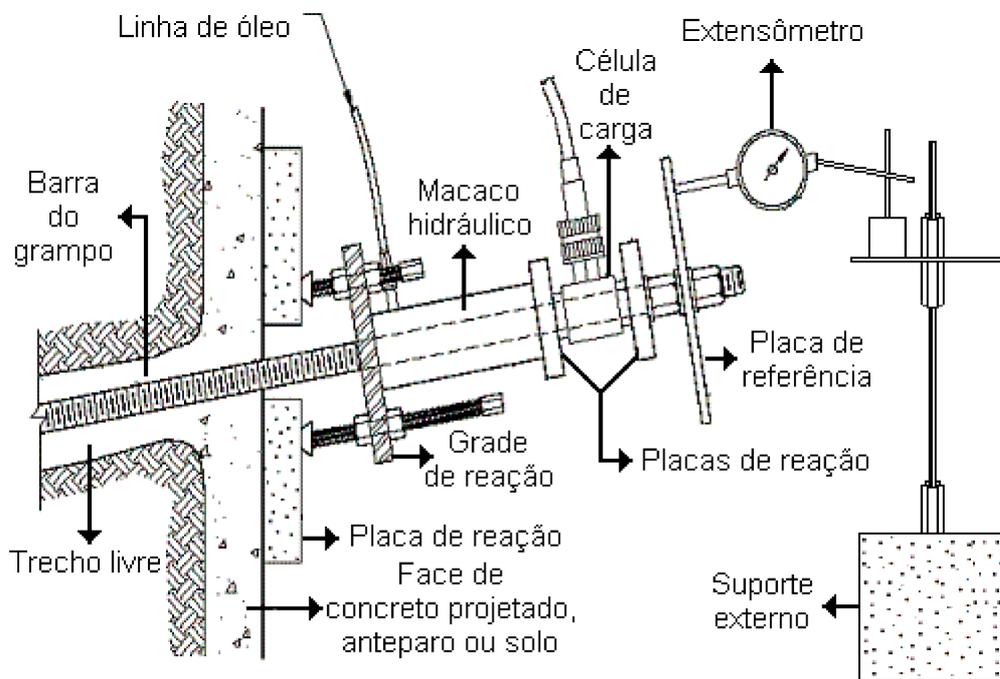


Figura 32 - Montagem do ensaio de arrancamento (adaptado de Lazart e outros, 2003)

4.3. Fatores que influenciam a resistência ao arrancamento

Em solos grampeados, a resistência ao cisalhamento mobilizada entre o elemento de reforço (grampo) e o solo circundante é a responsável pela estabilidade das estruturas. O mecanismo de interação entre o grampo e o solo é complexo, visto que a interação é influenciada por vários fatores, tais como as características do solo, a rugosidade e a resistência do grampo, como reportado por Palmeira e Milligan (1989). Quanto aos parâmetros de projeto, é difícil levar em conta a influência do tipo de perfuração utilizada, características da injeção e a variação do solo local. Desta forma, para que os ensaios de arrancamento forneçam resultados representativos dos grampos permanentes da obra, é necessário que as características de instalação dos grampos de ensaio sejam semelhantes com relação ao tipo de perfuração, fator água-cimento da injeção, tipo de solo, etc.

Franzén (1998) descreve que a resistência ao arrancamento de um grampo é definida por quatro variáveis: a tensão normal atuando na superfície do grampo, o coeficiente de atrito, a adesão entre o grampo e o solo e o

perímetro do grampo. Estas variáveis são dependentes do tipo de solo, do método de instalação do grampo, do nível de tensão de confinamento, da densidade relativa e da posição do nível d'água. Ortigão (1997) também destaca como relevantes, as características do terreno, a profundidade de ensaio, o método de perfuração e a limpeza do furo, as propriedades da calda de cimento e os fatores ambientais, tais como a temperatura e a umidade.

4.4. Quantidade de ensaios

Em obras de grande porte, os ensaios de arrancamento devem ser realizados antes do início da execução, para melhor se definir o projeto (Ortigão, 1997). Em obras menores, isto raramente ocorre. Os ensaios realizados durante a execução da obra permitem que o projeto seja ajustado à medida em que se obtém os resultados.

Zirlis e outros (2003) sugerem a execução de ensaios em uma quantidade de 10% do total de grampos, ou numa quantidade tal que garanta a representatividade dos resultados.

Falconi e Alonso (1996) também propõem a realização de ensaios de arrancamento na proporção de um para cada dez grampos permanentes de uma massa de solo a ser estabilizada. Ressaltam, porém, que não se pretende que todos os ensaios sejam feitos antes do início da obra. O número de ensaios deve ser adequado ao tamanho da obra. Para pequenas obras, pode-se ensaiar quatro grampos no início, em locais representativos e indicados em projeto. Outros grampos podem ser testados por meio de ensaios do tipo “inspeção”, durante a construção, garantindo controle de qualidade à obra.

No manual técnico da GeoRio (1999), recomenda-se que os ensaios de arrancamento devem ser realizados, durante a obra, em pelo menos dois grampos ou em 1%, para que sejam confirmados os valores de resistência q_s especificados em projeto. Ensaio realizado à medida que a obra avança permitem ajustes de projeto.

Dependendo do objetivo e da fase de construção em que é executado, o ensaio de arrancamento pode ser classificado como (Clouterre, 1991):

- Ensaio preliminar: executado na fase de projeto, antes que os trabalhos de construção comecem;
- Ensaio de conformidade: executado quando os trabalhos de construção são iniciados no local;

- Ensaio de inspeção: executado durante a construção.

Todos os ensaios de arrancamento (preliminar, de conformidade e de inspeção) são idênticos e objetivam determinar a magnitude da resistência q_s . O ensaio de arrancamento é realizado aplicando-se uma tensão estática à cabeça do grampo, até que haja movimento excessivo de cisalhamento. Nenhum dos grampos submetidos ao ensaio de arrancamento pode ser usado novamente ou ser incorporado à estrutura permanente da contenção (Clouterre, 1991).

Ensaio de arrancamento preliminares: Têm a finalidade de validar uma nova técnica executiva de solo grampeado, para um local importante da construção, ou por exigência do proprietário da obra. O objetivo é determinar a tensão máxima de arrancamento. Ensaio preliminares são realizados com antecedência, várias semanas antes de qualquer grampo permanente ser instalado. O número mínimo de ensaios preliminares deve levar em conta a variabilidade dos solos encontrados localmente. A Tabela 10 fornece o número mínimo de ensaios preliminares a serem especificados para cada tipo de solo como uma função da área da face a ser grampeada. Os grampos utilizados nos ensaios preliminares são instalados no terreno e injetados na camada de solo a ser investigada quanto à resistência ao arrancamento (Clouterre, 1991).

Ensaio de arrancamento de conformidade: O objetivo deste ensaio, executado no início da construção, é verificar a estimativa da resistência ao arrancamento de grampos (q_s), utilizada na fase de planejamento. São executados a cada camada diferente de solo, quando a profundidade apropriada de escavação é atingida (um ensaio para cada novo solo). A face da parede da contenção pode ser usada como placa de reação. Neste caso, verifica-se a possibilidade de dano do revestimento ao se aplicar a força máxima de arrancamento. Caso nenhum ensaio preliminar tenha sido executado, os ensaios de conformidade deveriam ser obrigatórios para toda a contenção em solo grampeado. A Tabela 10 fornece o número mínimo de ensaios de conformidade a serem especificados para cada tipo do solo, dependente da área da face da contenção para um determinado tipo do solo. O número total de ensaios deve ser distribuído uniformemente ao longo de toda a estrutura. O número mínimo recomendado considera a inexistência de ensaios preliminares. Se a empresa que executa os ensaios preliminares não é a executora da obra grampeada, então os ensaios de conformidade ainda terão que ser executados no começo de construção. Caso seja utilizada uma única técnica de grampeamento, o número de ensaios pode ser reduzido à metade. Se a empresa que executa os ensaios preliminares é também a executora da obra grampeada, então nenhum

ensaio de conformidade é requerido. Os grampos a serem usados nos ensaios de conformidade devem ser instalados na face de concreto quando os trabalhos de contenção se iniciarem (Clouterre, 1991).

Tabela 10 – Número mínimo de ensaios de arrancamento (Clouterre, 1991)

Área da face [m ²]	Ensaio preliminar ou de conformidade
Até 800	6
800 a 2.000	9
2.000 a 4.000	12
4.000 a 8.000	15
8.000 a 16.000	18
16.000 a 40.000	25

Ensaio de arrancamento de inspeção: Estes ensaios devem ser executados em grampos escolhidos com antecedência e com seção transversal tenha sido dimensionada de tal forma que a resistência ao arrancamento ocorra sem que haja ruptura do grampo. Ensaio de inspeção são obrigatórios para todos os locais. Para cada camada de solo, o número mínimo é de cinco ensaios até 1000 m² de face e de um ensaio para cada fase de escavação. Acima de 1 000 m², o número de ensaios será aumentado em um ensaio para cada 200 m² adicionais. O número total de ensaios deve ser distribuído uniformemente ao longo de toda a estrutura. Os grampos usados em ensaios de inspeção serão instalados entre os grampos permanentes (de serviço) da contenção em solo grampeado e executados durante a sua construção (Clouterre, 1991).

4.5. Acessórios de ensaio

Lazart e outros (2003) recomendam que a montagem de ensaio possua preferencialmente dois extensômetros para leitura dos deslocamentos da cabeça do grampo. Os extensômetros devem estar fixados a um suporte externo que não seja afetado pelos movimentos do macaco e da parede (Figura 32). Os extensômetros devem apresentar resolução mínima de 0,01mm. Por meio dos dois extensômetros, é possível calcular uma média das leituras, no caso de carregamentos levemente excêntricos, ou seja, no caso de haver alguma imperfeição no alinhamento entre os eixos do macaco e do grampo. A medição redundante dos deslocamentos pode ser vital no caso de um dos extensômetros apresentar funcionamento deficiente durante o ensaio.

Clouterre (1991) recomenda que o deslocamento da cabeça do grampo deve ser medido em relação a um ponto fixo, com um sistema que assegure uma base estável, externa ao sistema de montagem do ensaio.

Lazart e outros (2003) recomendam que haja um macaco hidráulico vazado e um medidor de pressão, uma célula de carga eletrônica e uma placa de reação (Figura 32). Eles sugerem que o medidor de pressão tenha uma resolução mínima de 500kPa e alertam sobre a necessidade de alinhamento do macaco com o eixo do grampo, para garantir carregamento uniforme. Sugerem que, para adequada distribuição da carga do macaco, deve-se utilizar uma placa de reação na região da área do ensaio (Figura 32).

Clouterre (1991) recomenda que o equipamento de ensaio tenha um sistema de ajuste para aplicar uma força no mesmo eixo da barra, um macaco vazado e bomba, além de uma célula de carga. A célula de carga deve ter uma precisão de pelo menos 1% da força máxima.

Feijó e Ehrlich (2001) reportaram a utilização de um conjunto macaco-bomba, hidráulico, com capacidade de 800kN e célula de carga de 500kN de capacidade, alimentada por uma bateria de 12 volts, medindo-se a variação da voltagem, associada à variação da carga.

4.6. Comprimento livre e comprimento injetado

Clouterre (1991) recomenda um comprimento livre mínimo de 1m para evitar efeitos de contorno, quando a placa de apoio de reação afetar diretamente o solo ao redor da cabeça do grampo. Se não houver comprimento livre, as tensões induzidas pelo macaco poderão ser transferidas do solo para o grampo.

Em ensaios preliminares, o comprimento livre pode ser maior, para simular as reais condições de sobrecarga e de tipo de solo, conforme esquematizado na Figura 33 (Clouterre, 1991).

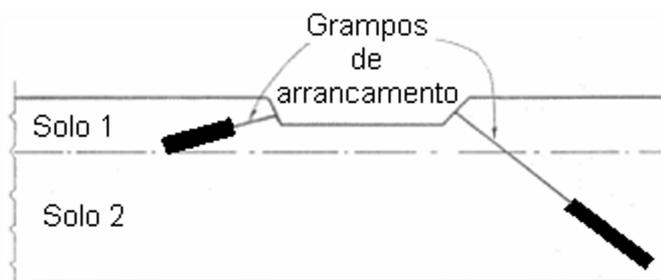


Figura 33 – Ensaio de arrancamento de grampos preliminares (Clouterre, 1991)

Lazart e outros (2003) recomendam um trecho livre não inferior a 1m e um comprimento injetado de no mínimo 3m.

Feijó e Ehrlich (2001) garantiram o controle dos comprimentos injetado e livre dos grampos de arrancamento por meio de um obturador constituído de espuma enrolada na barra de aço. Foram utilizados comprimentos livre de 2m e injetado de 3 ou de 6m.

4.7. Metodologia de carregamento

Em Caltrans Foundation Manual (1997), recomenda-se que cada incremento de carga deve ser aplicado rapidamente ($t < 1\text{min}$) e que a carga deve ser mantida constante entre um e dois minutos. Deve-se registrar os deslocamentos da cabeça do grampo nos tempos de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 10 minutos seguintes. Considera-se o fim do deslocamento para um dado nível de carregamento, quando a variação de deslocamento se situa em torno de 0,0254mm (0,001 polegadas). Assim que o deslocamento da cabeça do grampo atingir 2mm, o que deve ocorrer entre 6 minutos (taxa de 0,339mm/minuto) e 60 minutos (taxa de 0,034mm/minuto), considera-se que o grampo está estabilizado naquele nível de carregamento. A partir disto, dá-se prosseguimento ao ensaio, por meio de um novo incremento de carga.

No manual técnico de encostas da GeoRio (1999), recomenda-se que as cargas devem ser aplicadas em pequenos estágios que não excedam 20% da carga máxima esperada, aguardando-se pelo menos 30 minutos para estabilização das deformações. Durante este tempo, a carga deve ser mantida constante e os deslocamentos lidos a intervalos de 0, 1, 2, 4, 8 e 15 minutos. Recomenda-se ainda a execução de pelo menos um ciclo de carga-descarga, a ser iniciado quando a carga atingir cerca da metade da carga total máxima estimada.

Azambuja e outros (2001) executaram ensaios de arrancamento com ciclos de carga e descarga nos grampos. O primeiro estágio de cada ensaio era iniciado com uma carga da ordem de 25% da carga de trabalho e os incrementos de carga subseqüentes eram da mesma magnitude.

Feijó e Ehrlich (2001) descrevem uma metodologia onde inicialmente se aplicou uma pequena carga, visando um melhor ajuste do conjunto de placas, macaco-bomba, célula de carga e extensômetros. A partir daí, foram aplicadas cargas em estágios de 10kN no início do ensaio, e de 20kN após 5mm de

deslocamento da cabeça do grampo, intercalados por ciclos de descarregamentos. As medidas de deslocamento foram feitas ao final de cada estágio de carga, sendo computados os intervalos de tempo entre os estágios.

Falconi e Alonso (1996) sugerem que o incremento de carga deve ser suficientemente pequeno para permitir um número mínimo de leituras carga x deslocamento. Sugerem incrementos de 5kN (500kgf), com 5 minutos em cada estágio de carga até a ruptura.

Os procedimentos recomendados por Clouterre (1991) para incrementos de carga em ensaios de força controlada são os seguintes:

- O grampo é gradualmente submetido à força de arrancamento, que cresce até o limite estimado (T_{LE}) e que deve ser inferior a 60% da carga de escoamento do aço. Carregamentos sucessivos são mantidos por 60 minutos, com exceção do passo correspondente a 70% de T_{LE} , que deve ser mantido durante 3 horas. A primeira carga aplicada corresponde a 20% de T_{LE} . O primeiro deslocamento deve ser registrado a 10% de T_{LE} .

- A força aplicada na cabeça do grampo é medida com uma célula de carga. O nível desta força deve ser mantido constante a cada passo do carregamento. Entretanto, uma variação do valor da força em até 0,1% de T_{LE} é aceita.

- O tempo inicial de cada etapa de carregamento (t_0) corresponde ao momento em que a carga é atingida. Em seguida, são medidos força e deslocamento nos tempos de: 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60 minutos e, depois, a cada 15 minutos, para a etapa de carregamento correspondente a 70% de T_{LE} , que deve ser mantida por 3 horas.

- As medidas de temperatura são feitas no início e ao final de cada etapa de carregamento.

- Se a ruptura não ocorrer para a carga limite estimada (T_{LE}), é possível continuar o ensaio de arrancamento com incrementos iguais a 10% de T_{LE} até o décimo quinto passo, não excedendo 90% da tensão de escoamento do aço.

- Após o último estágio de carga, inicia-se o descarregamento. A leitura dos deslocamentos deve ser feita a cada 1/10 da carga máxima de arrancamento obtida pelo ensaio.

4.8. Re-injeção de grampos

No que se refere à re-injeção de grampos, Feijó e Ehrlich (2001) reportaram o emprego de um obturador constituído de espuma enrolada na barra de aço e três tubos de injeção/re-injeção. As injeções foram procedidas de forma ascendente, do fundo para a superfície, com o auxílio de uma bomba manual de baixa pressão. Uma vez observada a drenagem da calda de cimento por um dos tubos de retorno, o bombeamento era interrompido e o tubo retirado. Para minimizar os efeitos da exsudação, foram procedidas re-injeções. A seguir, os dois tubos ainda remanescentes foram retirados. A calda de cimento utilizada tinha fator água-cimento igual a 0,6.

Zirlis e outros (2003) recomendam a instalação de um ou mais tubos de re-injeção perdidos, de polietileno ou similar, com diâmetro de 8 a 15 mm, providos de válvulas a cada 0,5 m, a até 1,5 m da boca do furo. A quantidade de tubos depende das fases de injeção previstas. Deve-se considerar um tubo para cada fase. Os autores sugerem que todo grampo receba, pelo menos, uma re-injeção além da bainha. Esta técnica é a mais segura, pois minimiza erros operacionais, além de permitir uma melhor fixação da barra ao solo. A re-injeção, além de promover a melhor ancoragem do grampo, trata o maciço, promovendo confinamento e preenchendo fissuras.

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

4.9. Interpretação de resultados

Os ensaios de arrancamento de grampos reportados por Azambuja e outros (2001) foram executados com incremento de carga de 25% da carga de trabalho com um ciclo completo de carregamento e descarregamento. Em cada estágio de tensão, verificou-se o comportamento do grampo em função do tempo e os resultados foram ajustados por regressão não linear. A resistência última foi considerada no estágio onde se constatou a instabilidade dos deslocamentos

para cargas constantes, o que resultava na tensão máxima mobilizada no contato solo-grampo (q_s).

Em Caltrans Foundation Manual (1997) define-se como ruptura o ponto correspondente ao deslocamento contínuo do grampo sem incremento de carga.

No manual técnico de encostas da GeoRio (1999), os resultados são apresentados em um gráfico carga x deslocamento da cabeça do grampo. O valor da carga de ruptura do grampo corresponde ao valor de pico, observado neste gráfico.

Em Feijó e Ehrlich (2001), uma vez atingida a carga máxima, os grampos foram solicitados até o deslocamento máximo registrado pelos extensômetros, buscando acompanhar o comportamento pós-ruptura.

O ensaio de arrancamento, portanto, consiste em se testar o grampo por meio de incrementos de cargas sucessivos, até que a carga máxima ou a ruptura sejam atingidas.

Couto (2002) apresenta uma curva força-deslocamento típica obtida por meio de ensaios de arrancamento (Figura 34). Esta curva revela três trechos distintos: curva inicial de ajuste do sistema (rigidez crescente); fase elástica em que se verifica proporcionalidade entre forças e deslocamentos (rigidez constante); e fase plástica com grandes deslocamentos para pequenos acréscimos de carga aplicada (rigidez decrescente).

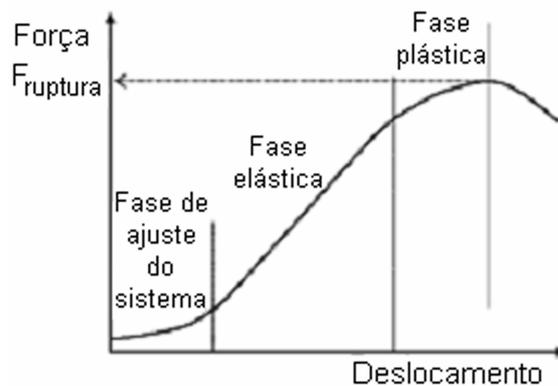


Figura 34 – Curva típica de ensaio de arrancamento de grampo (Couto, 2002)

Segundo Clouterre (1991), o ensaio deve ser considerado finalizado quando a força de tração atingir o valor máximo (Figura 35a) ou se estabilizar (Figura 35b).

Se, durante o ensaio, somente forem medidas as forças de arrancamento, o resultado obtido será apenas o valor máximo da força de arrancamento. Se, além da força, forem medidos os correspondentes deslocamentos da cabeça do

grampo, toda a curva carga x deslocamento pode ser obtida, correspondente à lei que descreve a interação solo/grampo. Isto é útil para a estimativa dos deslocamentos da obra em solo grampeado e vital para cálculos futuros do estado limite de utilização (Clouterre, 1991).

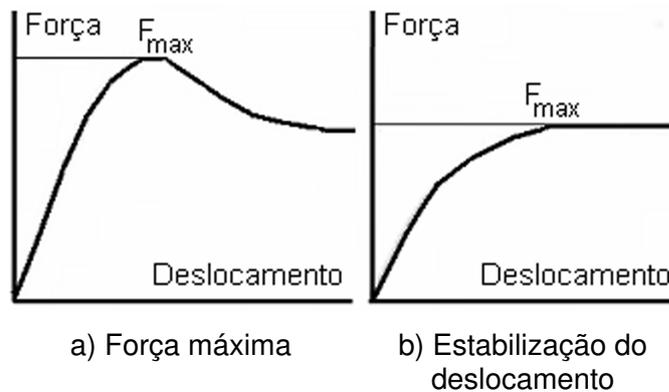


Figura 35 - Critério de ruptura de arrancamento de grampos (Clouterre, 1991)

A interpretação dos resultados pode ser baseada na lei de mobilização da resistência ao arrancamento de grampos apresentada na Figura 36. Eventualmente, a resistência da injeção pode ser levada em conta nos cálculos (Clouterre, 1998).

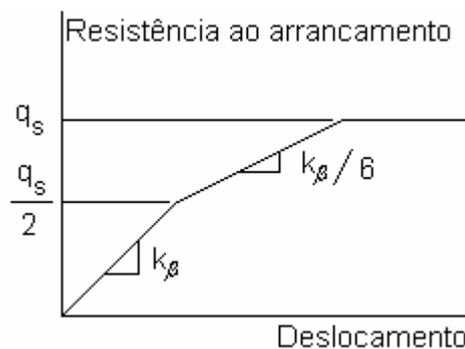


Figura 36 - Lei de mobilização da resistência ao arrancamento (Frank e Zhao, 1982)

Quando uma força T_0 é aplicada na cabeça do grampo, ocorre um movimento deste com relação ao solo e a mobilização da resistência ao arrancamento no contato solo/grampo, equilibrando a força T_0 . A mobilização da resistência solo/grampo é feita gradualmente, a partir da cabeça, em direção à parte mais interna do grampo. O aumento progressivo da força T_0 , aplicada na cabeça do grampo, induz à mobilização da resistência ao arrancamento na interface solo/grampo. A mobilização completa progride a partir da cabeça até o final do grampo. Quanto menor o grampo, maior a mobilização ao longo de todo o seu comprimento (Clouterre, 1991), conforme apresentado a seguir (Figura 37, Figura 38 e Figura 39).

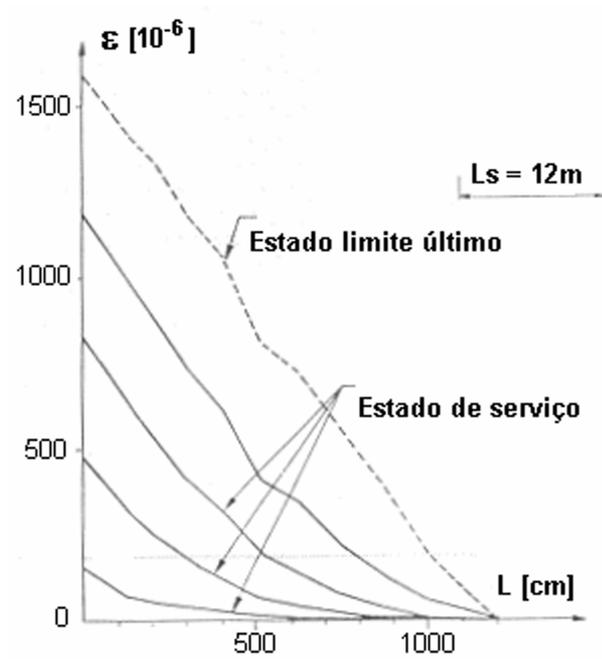


Figura 37 - Distribuição de deformação em grampo longo de 12m (Clouterre, 1991)

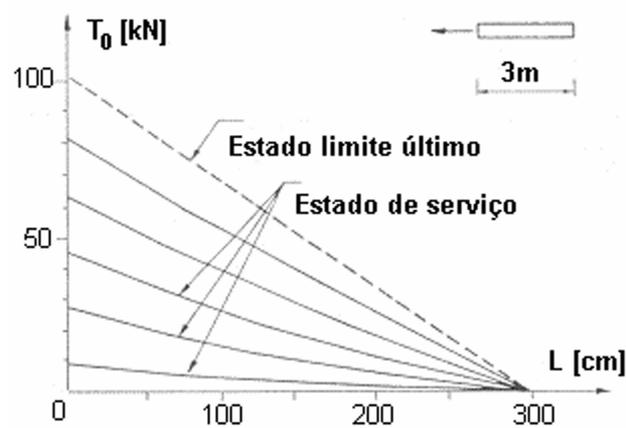


Figura 38 - Distribuição teórica de carga em grampo curto de 3m (Clouterre, 1991)

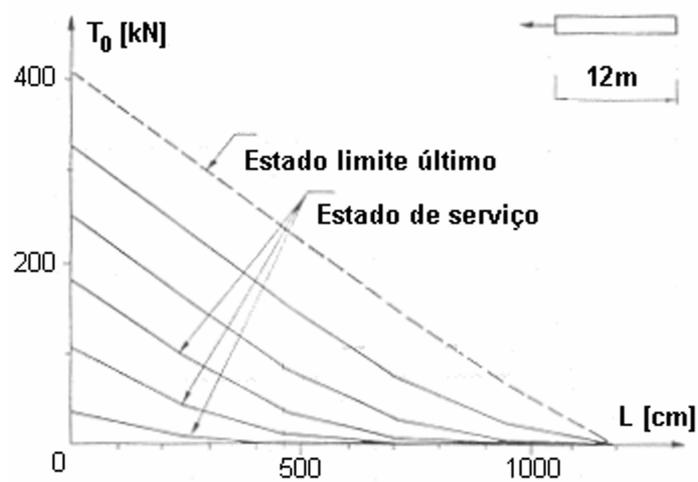


Figura 39 - Distribuição teórica de carga em grampo longo de 12m (Clouterre, 1991).

4.10. Resultados da literatura

A literatura nacional reporta vários resultados de ensaios de arrancamento, executados em diferentes obras, principalmente na região sudeste. Procurou-se organizar as informações sob a forma de tabelas e em função da referência, destacando-se os seguintes aspectos:

- (i) Local da obra/ensaio de arrancamento;
- (ii) Presença de nível d'água;
- (iii) Características do solo: coesão; ângulo de atrito; peso específico; coeficiente de poisson; e módulo de Young;
- (iv) Características do grampo: tipo de aço; tensão de trabalho; carga e tensão de escoamento do aço; diâmetro da barra; diâmetro do furo; inclinação dos grampos; comprimento do trecho injetado e comprimento livre; intervalo entre centralizadores / espaçadores; método de limpeza do furo (ar ou água); método de perfuração (ar ou água); profundidade de confinamento dos grampos;
- (v) Características da injeção: número de injeções; fator água/cimento; intervalo de tempo entre injeções; tempo de cura pré-ensaio de arrancamento; espaçamento entre válvulas de injeção; tipo de mangueira utilizada na re-injeção;
- (vi) Características dos ensaios de arrancamento: técnica; Incremento de carga durante o ensaio de arrancamento; capacidade nominal do conjunto macaco-bomba hidráulico; presença de célula de carga; presença de extensômetro analógico; resolução do extensômetro analógico; uso de *strain gages*; uso de sistema de aquisição de dados;

Resultados dos ensaios de arrancamento: número de injeções do grampo, carga de ruptura, deslocamento da cabeça do grampo, q_s ; aumento de q_s comparando-se grampos com o aumento do número de fases de injeção;

Ortigão e outros (1992) apresentam um artigo que descreve a experiência de campo pela GeoRio em um muro experimental executado por meio da técnica de solo grampeado, no Morro da Formiga, RJ. Os resultados dos ensaios de arrancamento realizados são apresentados na Tabela 11.

Feijó e Ehrlich (2001) realizaram uma campanha envolvendo 20 ensaios de arrancamento em perfis de solo residual no município do Rio de Janeiro. Os ensaios foram realizados em grampos injetados em furos de 75mm de diâmetro, alguns grampos foram instrumentados com *strain gages* para acompanhamento das deformações ao longo do grampo durante a execução dos experimentos.

Foram utilizados grampos com comprimentos de 3 e 6m, para se avaliar o efeito do comprimento no valor da resistência ao arrancamento (q_s). Os resultados dos ensaios de arrancamento são apresentados na Tabela 12 e na Tabela 13.

Pitta e outros (2003) apresentaram resultados de ensaios de arrancamento realizados em 5 obras diferentes na cidade de São Paulo, analisando os efeitos e as melhorias decorrentes das sucessivas fases de injeção (os dados estão reproduzidos da Tabela 14 até a Tabela 19). A primeira injeção de nata no furo é denominada “bainha”. Observa-se um aumento da resistência ao arrancamento do grampo com o aumento do número de injeções.

Azambuja e outros (2001) realizaram ensaios de arrancamento em uma obra de contenção em Porto Alegre (RS) com a finalidade de verificar a relação tensão/deformação dos grampos utilizados. Os ensaios foram realizados com grampos protótipos que obedeceram aos mesmos critérios executivos dos grampos definitivos do sistema de contenção (Tabela 20).

Soares e Gomes (2003) executaram ensaios de arrancamento com ciclos de carga e descarga em uma encosta da BR 101 em Angra dos Reis (RJ). Os ensaios permitiram definir a resistência ao arrancamento e as tensões admissíveis para a técnica de solo grampeado (Tabela 21).

Moraes e Arduíno (2003) apresentaram resultados de ensaios de arrancamento de grampos realizados em encosta na borda de um platô, no distrito industrial da Zona Franca de Manaus (Tabela 22).

Alonso e Falconi (2003) apresentaram solução de estabilização de talude junto à Av. Wenceslau Brás. Os ensaios de arrancamento desta obra são apresentados na Tabela 23.

Souza e outros (2005) executaram seis ensaios de arrancamento de grampos. Os resultados demonstraram a eficiência da re-injeção (Tabela 24).

Proto Silva (2005), realizou 8 ensaios de arrancamento de grampos re-injetados (bainha + 1 injeção) em uma encosta em solo residual de gnaiss da cidade de Niterói / RJ (Tabela 25 e Tabela 26).

Tabela 11 – Características do solo grampeado - Morro da Formiga (Ortigão e outros, 1992)

Características do local de ensaio	
Local da Obra	Nível d'água
Morro da Formiga, Tijuca. Rio de Janeiro, RJ	Não encontrado

Características do solo		
Tipo	Peso específico	Ângulo (efetivo) de atrito
Solo residual arenoso	17kN/m ³	Mínimo de 32°
Coesão (efetiva)	Coefficiente de Poisson	Módulo de Young
~ zero kN/m ²	ND	ND

Características do grampo			
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço	
		Carga	Tensão
CA50A	ND	ND	ND
Diâmetro da barra	Diâmetro do Furo	Inclinação dos grampos	Espessura da parede
32 mm	0,075 m	20°	150 mm
Injeção		Intervalo de tempo entre as injeções	Tempo de cura dos grampos arrancados
Tipo	Fator água / cimento		
ND	ND	ND	ND
Espaçamento entre as válvulas de injeção	Comprimento do trecho injetado	Comprimento do trecho livre	Intervalo entre centralizadores / espaçadores
			ND
ND	3m	1m	ND
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Método de perfuração	Tipo de mangueira utilizada na re-injeção	Profundidade de Confinamento
ND	ND	ND	ND

Características do ensaio de arrancamento					
Incremento de carga	Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Bomba de injeção de calda		Célula de carga	Extensômetro analógico
		Pressão de Injeção	Volume		
ND	ND	ND	ND	PRESENTE	PRESENTE
Resolução do extensômetro analógico	Strain gages			Sistema de aquisição de dados	
ND	Não			Não	

Resultados dos ensaios de arrancamento									
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento		
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s
1*	1	ND	ND	ND	2,6mm	ND	250kN/m ²	250kN/m ²	ND
2	1	ND	ND	ND	7mm	ND	250kN/m ²		ND
3	1	ND	ND	ND	7mm	ND	250kN/m ²		ND

* - ruptura no contato aço / nata de cimento

Tabela 12 – Características do solo grampeado da Rua Atí (Feijó e Ehrlich, 2001)

Características do local de ensaio									
Local da Obra							Nível d'água		
Final da Rua Atí. Colina da Covanca. Rio de Janeiro / RJ							ND		
Características do solo									
Tipo			Peso específico			Ângulo (efetivo) de atrito			
SR de biotita gnaiss. Solo residual maduro, de cor amarela. Silte arenoso de alta plasticidade e cor amarela.			ND			ND			
Coesão (efetiva)			Coeficiente de Poisson			Módulo de Young			
ND			ND			ND			
Características do grampo									
Aço		Tensão de trabalho do grampo		Escoamento do aço					
CA50		ND		Carga			Tensão		
ND		ND		ND			ND		
Diâmetro da barra		Diâmetro do Furo		Inclinação dos grampos			Espessura da parede		
25,4mm		0,075 m		ND			ND		
Injeção				Intervalo de tempo entre as injeções			Tempo de cura dos grampos arrancados		
Tipo		Fator água / cimento							
ND		0,6		ND			ND		
Espaçamento entre as válvulas de injeção			Comprimento do trecho livre			Intervalo entre centralizadores / espaçadores			
ND			2m			ND			
Método de limpeza do furo (água ou ar)			Método de perfuração			Tipo de mangueira utilizada na re-injeção			
ND			ND			ND			
Características do ensaio de arrancamento									
Incremento de carga			Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico		Célula de carga		Presença de extensômetro analógico		
Inicial	após 5mm de Δl				alimentação	capacidade			
10kN	20kN		80kN		12V	50kN	ND		
Extensômetro analógico					Strain gages		Sistema de aquisição de dados		
curso	extensão		resolução						
50mm	2m		0,01mm/dv		5 por barra		multímetro de 6,5 dígitos		
Resultados dos ensaios de arrancamento									
Comprimento do trecho Injetado	Profundidade de confinamento	Nº de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento	
			Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q_s médio	Ganho médio de q_s
6m	1m	ND	ND	ND	ND	ND	ND	185 kN/m ²	ND
6m	2m	ND	ND	ND	ND	ND		205 kN/m ²	ND
3m	1m	ND	ND	ND	ND	ND		145 kN/m ²	ND
3m	2m	ND	ND	ND	ND	ND		295 kN/m ²	ND

Nota: Foram utilizados três tubos de injeção / re-injeção. Os furos foram preenchidos do fundo para fora, com o auxílio de uma bomba manual de baixa pressão e, uma vez observada a drenagem da calda por um dos tubos de retorno, o bombeamento era interrompido e o tubo retirado. Para minimizar o efeito de exsudação, foram procedidas re-injeções após o tempo mínimo de observação da trabalhabilidade da calda remanescente. A seguir, os dois tubos ainda restantes eram retirados.

Tabela 13 – Características do solo grampeado da Cardoso Júnior (Feijó e Ehrlich, 2001)

Características do local de ensaio									
Local da Obra								Nível d'água	
Vertente Norte do Morro Dona Marta. Rua Cardoso Júnior – Laranjeiras. Rio de Janeiro / RJ								ND	
Características do solo									
Tipo			Peso específico			Ângulo (efetivo) de atrito			
SR de gnaiss leptinitico. SR jovem, claro e SR maduro, avermelhado. Silte arenoso de alta plasticidade, cor avermelhada e silte arenoso de baixa plasticidade, cor avermelhada.			ND			ND			
Coesão (efetiva)			Coeficiente de Poisson			Módulo de Young			
ND			ND			ND			
Características do grampo									
Aço		Tensão de trabalho do grampo		Escoamento do aço					
CA50		ND		Carga			Tensão		
ND		ND		ND			ND		
Diâmetro da barra		Diâmetro do furo		Inclinação dos grampos			Espessura da parede		
25,4mm		0,075m		ND			ND		
Injeção				Intervalo de tempo entre as injeções		Tempo de cura dos grampos arrancados			
Tipo		Fator água / cimento		h:min		h:min			
ND		0,6		ND		ND			
Espaçamento entre as válvulas de injeção			Comprimento do trecho livre			Intervalo entre centralizadores / espaçadores			
M			m			M			
ND			2			ND			
Método de limpeza do furo (água ou ar)			Método de perfuração			Tipo de mangueira utilizada na re-injeção			
ND			ND			ND			
Características do ensaio de arrancamento									
Incremento de carga			Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico		Célula de carga		Presença de extensômetro analógico		
Inicial		após 5mm de Δl	80kN		alimentação	capacidade	ND		
10kN		20kN	80kN		12V	50kN	ND		
Extensômetro analógico					Strain gages		Sistema de aquisição de dados		
curso		extensão	resolução		5 por barra		multímetro de 6,5 dígitos		
50mm		2m	0,01mm/dv		5 por barra		multímetro de 6,5 dígitos		
Resultados dos ensaios de arrancamento									
Comprimento do trecho injetado	Profundidade de confinamento	Nº de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento	
			Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q_s médio	Ganho médio de q_s
6m	5m	ND	ND	ND	ND	ND	95kN/m ²	ND	
6m	10m	ND	ND	ND	ND		120kN/m ²	ND	
6m	15m	ND	ND	ND	ND		190kN/m ²	ND	
3m	5m	ND	ND	ND	ND		108kN/m ²	ND	
3m	10m	ND	ND	ND	ND		148kN/m ²	ND	
3m	15m	ND	ND	ND	ND		248kN/m ²	ND	

Nota: Foram utilizados três tubos de injeção / re-injeção. Os furos foram preenchidos do fundo para fora, com o auxílio de uma bomba manual de baixa pressão e, uma vez observada a drenagem da calda por um dos tubos de retorno, o bombeamento era interrompido e o tubo retirado. Para minimizar o efeito de exsudação, foram procedidas re-injeções após o tempo mínimo de observação da trabalhabilidade da calda remanescente. A seguir, os dois tubos ainda restantes eram retirados.

Tabela 14 – Características do solo grampeado da obra 130 (Pitta e outros, 2003)

Características do local de ensaio					
Local da Obra					Nível d'água
Obra 130. Rua Indubel – Cumbica. Guarulhos / SP					ND

Características do solo		
Tipo	Peso específico	Ângulo (efetivo) de atrito
Silto argiloso	ND	ND
Coesão (efetiva)	Coeficiente de Poisson	Módulo de Young
ND	ND	ND

Características do grampo			
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço	
		Carga	Tensão
CA50A	ND	ND	ND
Diâmetro da barra	Diâmetro do furo	Inclinação dos grampos	Espessura da parede
20mm	0,075m	ND	ND
Injeção		Intervalo de tempo Entre as injeções	Tempo de cura dos grampos arrancados
Tipo	Fator água / cimento	ND	ND
ND	0,5 A 0,7	ND	ND
Espaçamento entre as válvulas de injeção	Comprimento do trecho injetado	Comprimento do trecho livre	Intervalo entre centralizadores / espaçadores
0,5m	4m	ND	2m
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Método de perfuração	Tipo de mangueira utilizada na re-injeção	Profundidade de Confinamento
ND	ND	polietileno, de 9 a 12 mm	2 a 4m

Características do ensaio de arrancamento					
Incremento de carga	Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Bomba de injeção de calda		Célula de carga	Presença de extensômetro analógico
		Pressão de injeção	Vazão		
10kN	ND	4MPa	60l/min	ND	ND
Resolução do extensômetro analógico	Strain gages			Sistema de aquisição de dados	
ND	ND			ND	

Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	
1	1	77kN	19kN/m	20kN/m	ND	ND	82kN/m ²	85kN/m ²	ND	ND
2		77kN	19kN/m		ND		82kN/m ²			
3		84kN	21kN/m		ND		89kN/m ²			
4		77kN	19kN/m		ND		82kN/m ²			
5		70kN	18kN/m		ND		74kN/m ²			
6		97kN	24kN/m		ND		103kN/m ²			
7	2	119kN	30kN/m	29kN/m	ND	44%	126kN/m ²	123kN/m ²	44%	1,5MPa
8		112kN	28kN/m		ND		119kN/m ²			1,5MPa
9		119kN	30kN/m		ND		126kN/m ²			1,2MPa
10		112kN	28kN/m		ND		119kN/m ²			1,5MPa

Tabela 15 – Características do solo grampeado da obra 268 (Pitta e outros, 2003)

Características do local de ensaio										
Local da Obra								Nível d'água		
Obra 268. Avenida Oscar Americano. Hospital São Luiz – Morumbi. São Paulo/ SP								ND		
Características do solo										
Tipo		Peso específico			Ângulo (efetivo) de atrito					
Argilo arenoso		ND			ND					
Coesão (efetiva)		Coeficiente de Poisson			Módulo de Young					
ND		ND			ND					
Características do grampo										
Aço		Tensão de trabalho do grampo		Escoamento do aço						
CA50A		ND		Carga			Tensão			
Diâmetro da barra		Diâmetro do furo		ND			ND			
20mm		0,075m		Inclinação dos grampos			Espessura da parede			
				ND			ND			
Injeção				Intervalo de tempo entre as injeções		Tempo de cura dos grampos arrancados				
Tipo		Fator água / cimento		ND		ND				
ND		0,5 a 0,7								
Espaçamento entre as válvulas de injeção		Comprimento do trecho injetado		Comprimento do trecho livre		Intervalo entre centralizadores / espaçadores				
0,5m		6m		ND		ND				
Método de limpeza do furo (água ou ar)		Método de perfuração		Tipo de mangueira utilizada na re-injeção		Profundidade de Confinamento				
ND		ND		ND		2 a 4m				
Características do ensaio de arrancamento										
Incremento de carga		Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico			Célula de carga		Presença de extensômetro analógico			
ND		ND			ND		ND			
Resolução do extensômetro analógico			Strain gages				Sistema de aquisição de dados			
ND			ND				ND			
Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q_s	q_s médio	Ganho médio de q_s	
1	1	98kN	16kN/m	17kN/m	ND	ND	69kN/m ²	71kN/m ²	ND	ND
2		98kN	16kN/m		ND		69kN/m ²			
3		105kN	18kN/m		ND		74kN/m ²			
4		105kN	18kN/m		ND		74kN/m ²			
5	2	98kN	16kN/m	25kN/m	ND	51%	69kN/m ²	108kN/m ²	51%	1,2Mpa
6		161kN	27kN/m		ND		114kN/m ²			1,5Mpa
7		147kN	25kN/m		ND		104kN/m ²			1,0Mpa
8		161kN	27kN/m		ND		114kN/m ²			1,5Mpa
9		140kN	23kN/m		ND		99kN/m ²			1,5Mpa
10		154kN	26kN/m		ND		109kN/m ²			1,5Mpa

Tabela 16 – Características do solo grampeado da obra 479 (Pitta e outros, 2003)

Características do local de ensaio										
Local da Obra									Nível d'água	
Obra 479. Rua Bahia, 945/965 – Higienópolis. São Paulo/ SP									ND	
Características do solo										
Tipo			Peso específico				Ângulo (efetivo) de atrito			
Argila vermelha porosa paulista			ND				ND			
Coesão (efetiva)			Coeficiente de Poisson				Módulo de Young			
ND			ND				ND			
Características do grampo										
Aço		Tensão de trabalho do grampo		Escoamento do aço						
CA50A		ND		Carga			Tensão			
ND		ND		ND			ND			
Diâmetro da barra		Diâmetro do Furo		Inclinação dos grampos			Espessura da parede			
20mm		0,075m		ND			ND			
Injeção				Intervalo de tempo entre as injeções			Tempo de cura dos grampos arrancados			
Tipo		Fator água / cimento		ND			ND			
ND		0,5 a 0,7		ND			ND			
Espaçamento entre as válvulas de injeção		Comprimento do trecho injetado		Comprimento do trecho livre			Intervalo entre centralizadores / espaçadores			
0,5m		6m		ND			ND			
Método de limpeza do furo (água ou ar)		Método de perfuração		Tipo de mangueira utilizada na re-injeção			Profundidade de confinamento			
ND		ND		ND			2 a 4			
Características do ensaio de arrancamento										
Incremento de carga		Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico			Célula de carga			Presença de extensômetro analógico		
ND		ND			ND			ND		
Resolução do extensômetro analógico		Strain gages					Sistema de aquisição de dados			
ND		ND					ND			
Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q_s	q_s médio	Ganho médio de q_s	
1	1	53kN	9kN/m	9kN/m	ND	ND	37kN/m ²	37kN/m ²	ND	ND
2	2	Não foi possível realizar o ensaio.								
3		130kN	22kN/m	22kN/m	ND	145%	92kN/m ²	92kN/m ²	145%	0,4Mpa
4	3	160kN	27kN/m	29kN/m	ND	233%	113kN/m ²	125kN/m ²	233%	0,6Mpa
5		185kN	31kN/m		ND		131kN/m ²			0,6Mpa
6 (*)		177kN	30kN/m		ND		125kN/m ²			0,6Mpa
7 (*)		185kN	31kN/m		ND		131kN/m ²			0,6Mpa
6	4	193kN	32kN/m	31kN/m	ND	249%	137kN/m ²	131kN/m ²	249%	0,6Mpa
7		177kN	30kN/m		ND		125kN/m ²			0,6Mpa

Tabela 17 – Características do solo grampeado da obra 479 (Pitta e outros, 2003)

Características do local de ensaio			
Local da Obra			Nível d'água
Obra 479. Rua Bahia, 945/965 – Higienópolis. São Paulo/ SP			ND

Características do solo		
Tipo	Peso específico	Ângulo (efetivo) de atrito
Argila vermelha porosa paulista	ND	ND
Coesão (efetiva)	Coeficiente de Poisson	Módulo de Young
ND	ND	ND

Características do grampo			
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço	
		Carga	Tensão
CA50A	ND	ND	ND
Diâmetro da barra	Diâmetro do Furo	Inclinação dos grampos	Espessura da parede
20MM	0,075M	ND	ND
Injeção		Intervalo de tempo entre as injeções	Tempo de cura dos grampos arrancados
Tipo	Fator água / cimento		
ND	0,5 a 0,7	ND	ND
Espaçamento entre as válvulas de injeção	Comprimento do trecho injetado	Comprimento do trecho livre	Intervalo entre centralizadores / espaçadores
0,5m	4m	ND	ND
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Método de perfuração	Tipo de mangueira utilizada na re-injeção	Profundidade de Confinamento
ND	ND	ND	2 a 4m

Características do ensaio de arrancamento			
Incremento de carga	Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Célula de carga	Presença de extensômetro analógico
ND	ND	ND	ND
Resolução do extensômetro analógico	Strain gages		Sistema de aquisição de dados
ND	ND		ND

Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q_s	q_s médio	Ganho médio de q_s	
13	1	53kN	13kN/m	16kN/m	ND	ND	56kN/m ²	69kN/m ²	ND	ND
12		77kN	19kN/m		ND		82kN/m ²			
11	2	146kN	37kN/m	37kN/m	ND	125%	155kN/m ²	155kN/m ²	125%	0,4Mpa
10		146kN	37kN/m		ND		155kN/m ²			
9	3	123kN	31kN/m	29kN/m	ND	78%	131kN/m ²	123kN/m ²	78%	0,6Mpa
8		108kN	27kN/m		ND		115kN/m ²			

Tabela 18 – Características do solo grampeado da obra 490 (Pitta e outros, 2003)

Características do local de ensaio										
Local da Obra								Nível d'água		
Obra 490. Ed. Urban Loft. Rua Samia Haddad, 151 – Morumbi. São Paulo / SP								ND		
Características do solo										
Tipo		Peso específico			Ângulo (efetivo) de atrito					
Saprolito de Gnaiss Morumbi (silo argiloso)		ND			ND					
Coesão (efetiva)		Coeficiente de Poisson			Módulo de Young					
ND		ND			ND					
Características do grampo										
Aço		Tensão de trabalho do grampo		Escoamento do aço						
CA50A		ND		Carga			Tensão			
ND		ND		ND			ND			
Diâmetro da barra		Diâmetro do Furo		Inclinação dos grampos			Espessura da parede			
20mm		0,075m		ND			ND			
Injeção				Intervalo de tempo entre as injeções		Tempo de cura dos grampos arrancados				
Tipo		Fator água / cimento		ND		ND				
ND		0,5 a 0,7		ND		ND				
Espaçamento entre as válvulas de injeção		Comprimento do trecho injetado		Comprimento do trecho livre		Intervalo entre centralizadores / espaçadores				
0,5m		6m		ND		ND				
Método de limpeza do furo (água ou ar)		Método de perfuração		Tipo de mangueira utilizada na re-injeção		Profundidade de Confinamento				
ND		ND		ND		2 a 4m				
Características do ensaio de arrancamento										
Incremento de carga		Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico			Célula de carga		Presença de extensômetro analógico			
ND		ND			ND		ND			
Resolução do extensômetro analógico			Strain gages				Sistema de aquisição de dados			
ND			ND				ND			
Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	
5	1	115kN	19kN/m	19kN/m		ND	81kN/m ²	81kN/m ²	ND	ND
6		Não foi possível realizar o ensaio.								
1	2	170kN	28kN/m	33kN/m	ND	71	120kN/m ²	139kN/m ²	71%	1,1Mpa
2		224kN	37kN/m		ND		158kN/m ²			1,3Mpa
3	3	232kN	39kN/m	35kN/m	ND	85	164kN/m ²	150kN/m ²	85%	2,0 Mpa
4		193kN	32kN/m		ND		137kN/m ²			1,3MPa

Tabela 19 – Características do solo grampeado da obra 355/500 (Pitta e outros, 2003)

Características do local de ensaio										
Local da Obra									Nível d'água	
Obra 355/500. Rua Martiniano de Carvalho, 969. Hospital da Beneficência Portuguesa – Paraíso. São Paulo / SP									ND	

Características do solo		
Tipo	Peso específico	Ângulo (efetivo) de atrito
Argila vermelha porosa paulista	ND	ND
Coesão (efetiva)	Coeficiente de Poisson	Módulo de Young
ND	ND	ND

Características do grampo			
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço	
		Carga	Tensão
CA50A	ND	ND	ND
Diâmetro da barra	Diâmetro do Furo	Inclinação dos grampos	Espessura da parede
20mm	0,075m	ND	ND
Injeção		Intervalo de tempo entre as injeções	Tempo de cura dos grampos arrancados
Tipo	Fator água / cimento		
ND	0,5 a 0,7	ND	ND
Espaçamento entre as válvulas de injeção	Comprimento do trecho injetado	Comprimento do trecho livre	Intervalo entre centralizadores / espaçadores
0,5m	6m	ND	ND
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Método de perfuração	Tipo de mangueira utilizada na re-injeção	Profundidade de Confinamento
ND	ND	ND	2 a 4m

Características do ensaio de arrancamento			
Incremento de carga	Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Célula de carga	Presença de Extensômetro analógico
ND	ND	ND	ND
Resolução do extensômetro analógico	Strain gages		Sistema de aquisição de dados
ND	ND		ND

Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	
1	1	128kN	21kN/m	25kN/m	ND	ND	91kN/m ²	108kN/m ²	ND	ND
2		176kN	29kN/m		ND		124kN/m ²		ND	
3	2	Não foi possível realizar o ensaio.								
4		199kN	33kN/m	33kN/m	ND	31%	141kN/m ²	141kN/m ²	31%	1,5Mpa
5	3	212kN	35kN/m	36kN/m	ND	42%	150kN/m ²	153kN/m ²	42%	1,5Mpa
6		221kN	37kN/m		ND		156kN/m ²			1,5MPa

Tabela 20 – Características do solo grampeado (Azambuja e outros, 2003)

Características do local de ensaio												
Local da Obra					Nível d'água							
Conjunto de Obras da Terceira Perimetral – Porto Alegre / RS					ND							
Características do solo												
Tipo		Peso (médio) específico do solo			Ângulo (efetivo) de atrito							
Dique de Riolito e SR de Paragnaisse		18kN/m ³			34°							
Coesão (efetiva)		Coeficiente de Poisson			Módulo de Young							
22kN/m ²		ND			ND							
Características do grampo												
Aço (1)		Escoamento do aço										
		Carga			Tensão							
CA50A		ND			ND							
Diâmetro da barra	Diâmetro do Furo		Inclinação dos grampos		Espessura da parede (concreto projetado)							
20mm	0,100m		18° (5h/1v)		12cm							
Injeção			Intervalo de tempo entre as injeções		Tempo de cura dos grampos arrancados							
Tipo	Fator água / cimento											
ND	ND		ND		ND							
Espaçamento entre as válvulas de injeção	Comprimento do trecho injetado		Comprimento do trecho livre		Intervalo entre centralizadores / espaçadores							
ND	ND		ND		ND							
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Perfuração					Tipo de mangueira utilizada na re-injeção						
	Método		diâmetro mínimo									
ND	roto-percussivo		100mm			ND						
Características do ensaio de arrancamento												
Incremento da carga de trabalho		Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico		Célula de carga		Presença de extensômetro analógico						
25%		600kN		ND		ND						
Resolução do extensômetro analógico		Strain gages			Sistema de aquisição de dados							
0,01mm		ND			ND							
Resultados dos ensaios de arrancamento												
Profundidade de confinamento	Tensão de trabalho especificada para o grampo	N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			
				Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
2,50m	200kN/m ²	1	1	ND	ND	ND	6,50mm	ND	260kN/m ²	245kN/m ²	ND	ND
6,76m	75kN/m ²	2		ND	ND		7,80mm		264kN/m ²			
4,60m	150kN/m ²	3		ND	ND		15,76mm		261kN/m ²			
4,30m	125kN/m ²	4		ND	ND		9,30mm		270kN/m ²			
1,50m	120kN/m ²	5		ND	ND		5,40mm		210kN/m ²			
4,00m	150kN/m ²	6		ND	ND		10,73mm		204kN/m ²			

Nota (1): Número de barras do feixe = 3.

Tabela 21 – Características do solo grampeado (Soares e Gomes, 2003)

Características do local de ensaio	
Local da Obra	Nível d'água
Encosta na BR-101. Angra dos Reis / RJ	ND

Características do solo		
Tipo	Peso específico	Ângulo (efetivo) de atrito
Descrição minuciosa	19 kN/m ³	30°
Coesão (efetiva)	Coeficiente de Poisson	Módulo de Young
5kN/m ²	ND	ND

Características do grampo			
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço	
		Carga	Tensão
ND	ND	319kN	ND
Diâmetro da barra	Diâmetro do Furo	Inclinação dos grampos	Espessura da parede
25mm	0,05m	25°	ND
Injeção		Intervalo de tempo entre as injeções	Tempo de cura dos grampos arrancados
Tipo	Fator água / cimento		
ND	0,5	ND	ND
Espaçamento entre as válvulas de injeção		Intervalo entre centralizadores / espaçadores	
ND		ND	
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Método de perfuração	Tipo de mangueira utilizada na re-injeção	Profundidade de Confinamento
ND	ND	ND	ND

Características do ensaio de arrancamento				
Incremento de carga		Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Célula de carga	Presença de extensômetro analógico
até 90 kgf/cm ²	acima de 90 kgf/cm ²			
6 estágios de ≈15kgf/cm ²	estágios de ≈5kgf/cm ²	ND	ND	ND
Resolução do extensômetro analógico	Strain gages		Sistema de aquisição de dados	
ND	ND		ND	

Resultados dos ensaios de arrancamento													
Comprimento do trecho livre	Comprimento do trecho injetado	N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento				
				Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)	
3m	3m	1	1	126,9kN	42,3kN/m	47kN/m	ND	ND	269kN/m ²	299kN/m ²	ND		ND
3m	3m	2		132,9kN	44,3kN/m		ND		282kN/m ²				
1m	5m	3		123,6kN	41,2kN/m		ND		262kN/m ²				
ND	ND	4		(1)			ND		ND				
3m	3m	33		176,1kN	58,7kN/m		ND		374kN/m ²				
3m	3m	44		146,1kN	48,7kN/m		ND		310kN/m ²				

Nota (1): Não foi possível realizar o ensaio.

Nota (2): O trecho livre foi garantido pela colocação de graxa e mangueira plástica em volta da barra, até a superfície.

Nota (3): Placa de reação em concreto, com 0,8 x 0,8m em todos os ensaios, com exceção do ensaio 3, para o qual a placa utilizada foi de 0,9 x 0,9m.

Tabela 22 – Características do solo grampeado (Moraes e Arduíno, 2003)

Características do local de ensaio											
Local da Obra										Nível d'água	
Encosta localizada na borda de platô. Zona Franca. Manaus / AM										Oscila sazonalmente na camada de areia siltosa	
Características do solo											
Tipo			Peso específico			Ângulo (efetivo) de atrito					
Areno siltoso			18 kN/m ³			30°					
Coesão (efetiva)			Coeficiente de Poisson			Módulo de Young					
5kN/m ²			ND			ND					
Características do grampo											
Aço		Tensão de trabalho do grampo		Escoamento do aço							
CA50		ND		Carga		Tensão		Carga		Tensão	
ND		ND		ND		ND		ND		ND	
Diâmetro da barra		Diâmetro do Furo		Inclinação dos grampos				Espessura da parede			
20mm		0,054m		ND				ND			
Injeção				Intervalo de tempo entre as injeções				Tempo de cura dos grampos arrancados			
Tipo		Fator água / cimento									
ND		ND		ND				ND			
Espaçamento entre as válvulas de injeção		Comprimento do trecho injetado		Comprimento do trecho livre				Intervalo entre centralizadores / espaçadores			
ND		3m		3m				ND			
Método de limpeza do furo (água ou ar)		Método de perfuração		Tipo de mangueira utilizada na re-injeção				Profundidade de Confinamento			
ND		ND		ND				ND			
Características do ensaio de arrancamento											
Incremento de carga		Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico			Célula de carga			Presença de extensômetro analógico			
2,8Tf		ND			ND			ND			
Resolução do extensômetro analógico			Strain gages				Sistema de aquisição de dados				
ND			ND				ND				
Resultados dos ensaios de arrancamento											
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)	
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s		
1 e 2	1	83kN	27,5kN/m	ND	12mm	ND	162 kN/m ²	ND	ND	ND	ND

NOTA: Foi utilizada placa de concreto de reação.

Tabela 23 – Características do solo grampeado (Alonso e Falcone, 2003)

Características do local de ensaio											
Local da Obra									Nível d'água		
Poços de Caldas - MG									ND		
Características do solo											
Tipo			Peso específico			Ângulo (efetivo) de atrito					
Argila silto arenosa			20kN/m ³			25°					
Coesão (efetiva)			Coeficiente de Poisson			Módulo de Young					
25kN/m ²			ND			ND					
Características do grampo											
Aço		Tensão de trabalho do grampo		Escoamento do aço							
ND		ND		Carga				Tensão			
Diâmetro da barra		Diâmetro do Furo		Inclinação dos grampos				Espessura da parede			
20mm		0,100m		ND				ND			
Injeção				Intervalo de tempo entre as injeções				Tempo de cura dos grampos arrancados			
Tipo		Fator água / cimento		12:00h:min				ND			
ND		0,5		12:00h:min				ND			
Espaçamento entre as válvulas de injeção		Comprimento do trecho injetado		Comprimento do trecho livre				Intervalo entre centralizadores / espaçadores			
0,5m		ND		ND				ND			
Método de limpeza do furo (água ou ar)		Método de perfuração		Tipo de mangueira utilizada na re-injeção				Profundidade de Confinamento			
ND		ND		ND				ND			
Características do ensaio de arrancamento											
Incremento de carga			Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico			Célula de carga			Presença de extensômetro analógico		
ND			ND			ND			ND		
Resolução do extensômetro analógico			Strain gages						Sistema de aquisição de dados		
ND			ND						ND		
Resultados dos ensaios de arrancamento											
N°	N° de injeções (Nota 1)	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)	
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s		
1 e 2	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,4 a 1,2MPa	

Nota (1): As re-injeções foram executadas em dois tubos de PVC, com 10 mm de diâmetro, dotados de válvulas a cada 50 cm, para posteriores injeções de calda de cimento, após a pega da argamassa do grampo.

Tabela 24 – Características do solo grampeado (Souza e outros, 2005)

Características do local de ensaio										
Local da Obra				Nível d'água						
Campo de provas da Solotrat Engenharia Geotécnica Ltda. São Paulo / SP				ND						
Características do solo										
Tipo		Peso específico		Ângulo (efetivo) de atrito						
Silto arenoso		ND		ND						
Coesão (efetiva)		Coeficiente de Poisson		Módulo de Young						
ND		ND		ND						
Características do grampo										
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço								
		Carga		Tensão						
CA50A	ND	ND		ND						
Diâmetro da barra	Diâmetro do furo	Inclinação dos grampos		Espessura da parede						
16mm	0,075m	15°		ND						
Injeção		Intervalo de tempo entre as injeções	Tempo de cura dos grampos arrancados							
Tipo	Fator água / cimento		ND							
ND	0,5	ND		ND						
Espaçamento entre as válvulas de injeção	Comprimento do trecho injetado	Comprimento do trecho livre	Intervalo entre centralizadores / espaçadores							
0,5m	6m	ND		2m						
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Método de perfuração	Tipo de mangueira utilizada na re-injeção		Profundidade de Confinamento						
ND	ND	polietileno, de 9 a 12 mm		ND						
Características do ensaio de arrancamento										
Incremento de carga	Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Bomba de injeção de calda		Célula de carga	Presença de extensômetro analógico					
		Pressão de Injeção	Volume							
ND	ND	2MPa	20l/fase	ND	ND					
Resolução do extensômetro analógico		Strain gages		Sistema de aquisição de dados						
ND		ND		ND						
Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	
7	1	50,1kN	8,4kN/m	7,3kN/m	ND	78%	ND	ND	ND	ND
8	1	37,6kN	6,3kN/m				ND			
7	2	100,0kN	16,7kN/m	13,0kN/m			ND			
8	2	56,4kN	9,4kN/m				ND			
7	3	62,7kN	10,5kN/m	11, kN/m			57%			
8	3	75,2kN	12,5kN/m				ND			

Tabela 25 – Características do solo grampeado do Morro do Palácio (Proto Silva, 2005)

Características do local de ensaio										
Local da Obra					Nível d'água					
Morro do Palácio. Niterói / RJ – Museu 2					ND					
Características do solo										
Tipo		Peso específico		Ângulo (efetivo) de atrito						
Argila-arenosa		ND		29,6°						
Coesão (efetiva)		Coeficiente de Poisson		Módulo de Young						
36,4kN/m ²		ND		ND						
Características do grampo										
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço								
		Carga		Tensão						
CA75 – INCO-13-D	ND	ND		750MPa						
Diâmetro da barra		Diâmetro do Furo		Inclinação dos grampos						
22mm		0,075m		11°						
Injeção		Intervalo de tempo entre as injeções		Tempo de cura dos grampos arrancados						
Tipo		Fator água / cimento		Tempo de cura dos grampos arrancados						
ND		0,6		72 h:min						
Espaçamento entre as válvulas de injeção		Comprimento do trecho injetado		Comprimento do trecho livre						
0,5m		6m		ND						
Método de limpeza do furo (água ou ar)		Método de perfuração		Tipo de mangueira utilizada na re-injeção						
ar		Perfuratriz manual		polietileno, de 9 a 12 mm						
				Profundidade de Confinamento						
				ND						
Características do ensaio de arrancamento										
Incremento de carga	Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Bomba de injeção de calda		Célula de carga	Presença de extensômetro analógico					
		Pressão de Injeção	Volume							
8,5kN	ND	ND	ND	200kN	Sim					
Resolução do extensômetro analógico		Strain gages			Sistema de aquisição de dados					
0,01mm		5 por barra instrumentada			Sim					
Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	
1	2	117,4kN	39,1kN/m	52,9kN/m	6mm	ND	166kN/m ²	166kN/m ²	ND	ND
2	2	>200kN	>56,7kN/m		ND		ND			

Tabela 26 – Características do solo grampeado do Morro do Palácio (Proto Silva, 2005)

Características do local de ensaio					
Local da Obra					Nível d'água
Morro do Palácio. Niterói / RJ – Museu 2					ND

Características do solo		
Tipo	Peso específico	Ângulo (efetivo) de atrito
Areia-argilosa	ND	36,4°
Coesão (efetiva)	Coeficiente de Poisson	Módulo de Young
59,0kN/m ²	ND	ND

Características do grampo			
Aço	Tensão de trabalho do grampo	Escoamento do aço	
		Carga	Tensão
CA75 – INCO-13-D	ND	ND	750MPa
Diâmetro da barra	Diâmetro do Furo	Inclinação dos grampos	Espessura da parede
22mm	0,075m	11°	ND
Injeção		Intervalo de tempo entre as injeções	Tempo de cura dos grampos arrancados
Tipo	Fator água / cimento		
ND	0,6	3:00 h:min	72:00 h:min
Espaçamento entre as válvulas de injeção	Comprimento do trecho injetado	Comprimento do trecho livre	Intervalo entre centralizadores / espaçadores
0,5m	6m	ND	1m
Método de limpeza do furo (água ou ar)	Método de perfuração	Tipo de mangueira utilizada na re-injeção	Profundidade de Confinamento
Ar	Perfuratriz manual	polietileno, de 9 a 12 mm	ND

Características do ensaio de arrancamento					
Incremento de carga	Capacidade nominal do conjunto bomba-macaco hidráulico	Bomba de injeção de calda		Célula de carga	Presença de extensômetro analógico
		Pressão de injeção	Volume		
8,5kN	ND	ND	ND	200kN	Sim
Resolução do extensômetro analógico	Strain gages			Sistema de aquisição de dados	
0,01mm	5 por barra instrumentada			Sim	

Resultados dos ensaios de arrancamento										
N°	N° de injeções	Carga de ruptura			Deslocamento do grampo no início do arrancamento	Ganho médio de resistência com a re-injeção	Resistência ao arrancamento			Pressão de re-injeção (pressão da bomba de injeção de pistão)
		Do grampo	Por metro linear	Carga média de ruptura			q _s	q _s médio	Ganho médio de q _s	
3	2	150,4kN	50,1kN/m	53,1kN/m	21mm	ND	216kN/m ²	227kN/m ²	ND	ND
4	2	168,2kN	56,1kN/m		19mm		249kN/m ²			
5	2	190,1kN	53,4kN/m	23mm	269kN/m ²					
6	2	198,3kN	66,1kN/m	23mm	280kN/m ²					
7	2	182,8kN	50,9kN/m	24mm	258kN/m ²					
8	2	185,6kN	51,9kN/m	24mm	263kN/m ²					

4.11. Considerações finais

A estabilidade de uma contenção em solo grampeado é estudada em seu estado limite último. Assim, o objetivo principal dos ensaios de arrancamento é determinar a resistência ao arrancamento.

O procedimento de instalação de grampos destinados aos ensaios de arrancamento (inclinação, perfuração, introdução no furo e injeção) deve ser exatamente o mesmo dos grampos de trabalho (permanentes).

Ensaio de arrancamento com carregamento controlado correspondem ao procedimento mais usual da prática brasileira.

O eixo do macaco, o eixo do grampo e os extensômetros devem estar alinhados.

Deve-se utilizar um obturador de calda de cimento, para não permitir o preenchimento do furo no trecho livre. Caso haja preenchimento com nata, o trecho inicial do grampo estará sujeito à compressão, o que é indesejado.

Em obras de grande porte, os ensaios de arrancamento devem ser realizados antes do início da execução, para melhor se definir o projeto. Ensaio realizado durante a execução da obra permitem que o projeto seja ajustado à medida em que se obtém os resultados.

A montagem do ensaio deve preferencialmente utilizar dois extensômetros para leitura dos deslocamentos da cabeça do grampo. Os extensômetros devem estar fixados a um suporte externo que não seja afetado pelos movimentos do macaco e da parede. A resolução mínima é de 0,01mm.

Para minimizar os efeitos da exsudação, devem ser procedidas re-injeções. Pelo menos uma nova injeção além da bainha. Este procedimento minimiza erros operacionais, além de permitir uma melhor fixação da barra ao solo.

O ensaio de arrancamento consiste em se testar o grampo por meio de incrementos de cargas sucessivos, até que a carga máxima, a ruptura ou a estabilização seja atingida. O incremento de carga deve ser suficientemente pequeno (entre 5kN ou 10kN) para permitir um número mínimo de leituras carga x deslocamento.

A mobilização da resistência solo/grampo é feita gradualmente, a partir da cabeça, em direção à parte mais interna do grampo. Quanto menor o grampo, maior a mobilização ao longo de todo o seu comprimento.