

9 Conclusão

A quantificação da resistência ao arrancamento q_s de grampos em solo residual gnáissico foi obtida por meio de ensaios de arrancamento no campo.

O programa de ensaios objetivou estudar a influência de diversos fatores na resistência (q_s), tais como o tempo de cura da nata de cimento, o número de injeções, a lavagem do furo e o tipo de solo.

Vinte e cinco ensaios de arrancamento foram executados com grampos em solo residual de gnaiss, com ângulo de inclinação de 10 graus, diâmetro variando entre 75 e 100mm (3 e 4 polegadas) e comprimento total de 4 metros (3m injetados e 1m livre).

9.1. Conclusões

O desenvolvimento desta pesquisa ofereceu diversas conclusões que se encontram resumidas neste capítulo.

1) Em relação à metodologia de execução dos ensaios de 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) da obra grampeada.

Ensaio com estágios de força controlada correspondem ao procedimento mais usual da prática brasileira.

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

Os eixos do macaco e do grampo devem estar alinhados. O extensômetro deve ter a mesma orientação do eixo do grampo.

Os ensaios de arrancamento são realizados em grampos com um trecho inicial livre, seguido de um trecho injetado. Deve-se garantir o não preenchimento de nata no trecho livre, utilizando-se um obturador. O trecho inicial do grampo deve ter um comprimento livre mínimo de 1m, para evitar efeitos de contorno nos resultados. O grampo de ensaio deve ter, ainda, um comprimento injetado mínimo de 3m.

Em obras de grande porte, os ensaios de arrancamento devem ser realizados antes do início da execução, para melhor definição de q_s para o projeto. Os ensaios realizados durante a execução da obra permitem que o projeto seja reavaliado à medida que se obtém os resultados.

Sugere-se a execução de ensaios em uma quantidade que garanta a representatividade dos resultados - da ordem de 10% do total de grampos da obra.

A montagem de ensaio deve possuir um ou dois extensômetros para leitura dos deslocamentos da cabeça do grampo. Os extensômetros devem estar fixados a um suporte externo, livre da influência dos movimentos do macaco e da face de concreto projetado.

Para garantir o recobrimento da barra de aço ao longo do comprimento do grampo, devem ser colocados centralizadores, fixados à barra por meio de arame, espaçados de 1 a 2m.

O preenchimento do furo com nata era realizado por meio de um tubo introduzido até o final do furo, para que fosse feita a primeira injeção (bainha). Os furos foram preenchidos de forma ascendente (do fundo para a boca).

No caso de re-injeção, a barra de aço era preparada com uma mangueira de polietileno, dotada de válvulas de re-injeção a cada 50cm. A segunda injeção pode ser executada três horas após o preenchimento inicial (bainha) com nata de cimento, registrando-se a pressão de re-injeção com manômetro. Os ensaios de arrancamento foram executados com o mínimo de 3 dias após a injeção do grampo.

Os ensaios de arrancamento devem tracionar o grampo por meio de incrementos de cargas sucessivos, até que a carga máxima seja atingida. Os incrementos de carga devem ser suficientemente pequeno (entre 5 e 10kN) para permitir um número adequado de leituras carga x deslocamento.

2) Em relação à instrumentação dos grampos

A utilização de extensômetros de resistência elétrica (*strain gages*) para a instrumentação das barras proporcionou uma maior previsão e confiabilidade dos resultados com custo reduzido e relativa facilidade de instalação.

Nesta pesquisa foram instrumentadas 14 barras de aço, dos tipos GG50 da Gerdau (com 25,4mm de diâmetro) e INCO-13-D (com diâmetro de 22mm).

Cada barra de aço foi instrumentada com 5 *strain gages* dispostos ao longo dos 3m de comprimento do trecho injetado.

3) Em relação à exumação de grampos

Foram realizadas quatro exumações de grampos pré-ensaiados: duas em solo residual jovem e duas em rocha alterada. O processo de exumação deve ser lento, cuidadoso, de forma a manter os grampos inteiros e intactos.

A seguir, são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir da execução da exumação dos grampos:

(i) Nos grampos exumados em solo residual jovem, cuja perfuração foi feita com uma broca de 100mm de diâmetro e a limpeza do furo realizada com ar comprimido, os solos com partículas grandes foram triturados além do limite do diâmetro da broca. Os grãos pesados ficaram retidos no interior do furo e, ao se efetuar a injeção de preenchimento da bainha, este material granular se misturou à nata, criando bulbos de diâmetros maiores que o da broca.

(ii) Quanto ao aspecto da re-injeção, nos quatro grampos formou-se uma película de nata sobre o grampo que sofreu exsudação. Não houve enraizamento da nata no solo, apenas a formação de uma película de nata sobre a anterior (de primeira injeção).

(iii) Os grampos em solo residual jovem, apresentaram padrão de fissuração transversal, constatando-se muitas fraturas diametrais ao longo de todo o comprimento. Não houve vestígio de fraturamento longitudinal. As fraturas transversais encontradas evidenciam que o grampo (nata + aço) foi arrancado no contato nata/solo. Outra indicação de que os grampos foram arrancados no contato nata/solo, foi a verificação de vazios no solo de cerca de 5cm na parte de trás dos grampos, observados durante o processo de escavação.

(iv) Nos grampos executados em rocha alterada o arrancamento se deu no contato barra/nata, em função da resistência do maciço. O padrão de fissuração apresentado foi de fraturas longitudinais, evidenciando o arrancamento no contato barra/nata, uma vez que a barra rasgou a nata na direção do deslocamento.

(v) A espuma (obturador de nata) se mostrou ineficiente para o preenchimento do furo entre 1,0 e 1,5m. Logo após a espuma, a nata só conseguiu preencher a parte inferior do grampo. Apesar disto, o *strain gage* inicial (SG 0) ficou coberto por nata.

(vi) Os grampos apresentaram regiões em que houve exsudação, caracterizadas como natas brilhantes e de aspecto abatido, horizontalizadas. A exsudação não permitiu que houvesse o preenchimento total dos vazios do furo em seu diâmetro.

4) Em relação às calibrações dos grampos instrumentados

Por meio das calibrações pode-se definir uma correlação entre carga e deformação para cada *strain gage*. Desta forma, pode-se levar em consideração fatores intrínsecos ao processo de instrumentação que afetam as condições ideais de trabalho (Proto Silva, 2005):

- Ocorrência de bolhas de ar no contato *strain gage* / barra;
- Interferência na corrente de alimentação devido ao contato entre os cabos de transmissão e a barra;
- Isolamento elétrico inadequado;
- Alinhamento incorreto dos *strain gages* a colagem;
- Ocorrência de umidade no contato do *strain gage*;
- Rugosidade da superfície de contato.

5) Em relação aos ensaios de arrancamento

A resistência ao arrancamento de grampos com 1 injeção compreende valores entre 94 e 162kN/m², enquanto que grampos com 2 injeções apresentam resultados entre 159 e 217kN/m².

Comparando-se os resultados dos ensaios pode-se concluir que, em média, os grampos re-injetados são cerca de 30% menos deformáveis e 50% mais resistentes que os grampos sem re-injeção.

No comportamento Carga x Deslocamento, foram identificadas quatro fases com diferentes valores de rigidez para os ensaios de arrancamento:

- Fase 1: Correspondente ao ajuste do sistema, quando a montagem do sistema de ensaio é inadequada;
- Fase 2: É a etapa de maior valor de rigidez;
- Fase 3: O grampo apresenta rigidez nitidamente inferior à da Fase 2;

- Fase 4: Corresponde ao cisalhamento e é identificada em alguns ensaios. Apresenta rigidez nula, em que o grampo se desloca sem incremento de carga.

Excetuando-se a Fase 1 de ajuste, a maior parte dos ensaios de arrancamento de grampos desta pesquisa identificou 3 etapas de resistência ao arrancamento:

- Fase 2 → por adesão nata-solo;
- Fase 3 → por atrito e/ou embricamento mecânico; e
- Fase 4 → por cisalhamento.

Quando o arrancamento ocorre no contato grampo-solo, a mobilização da resistência é gradual, a partir da cabeça, em direção à parte interna do grampo. Ao se aproximar da carga de ruptura do grampo, o comportamento carga x deslocamento tende a se tornar linear, da cabeça do grampo até a extremidade final, com uma distribuição aproximadamente triangular.

Alguns dos ensaios de arrancamento apresentaram comportamento anormal, ruptura inesperada ou tiveram que ser interrompidos, devido à montagem inadequada do sistema de ensaio.

Um grampo re-injetado apresentou resistência ao arrancamento inferior à do grampo sem re-injeção. Este fato foi explicado pela presença orifícios no solo maduro, provocados por cupins, que infestaram a região escolhida para tais ensaios. Este fato requereu um tratamento com injeção de nata de cimento no solo, para preenchimento dos vazios, antes da execução da obra grampeada.

6) Em relação à influência da re-injeção

Ensaio de arrancamento de grampos re-injetados, executados em solo residual maduro, apresentaram resistência ao arrancamento, em média, 37% superiores aos grampos com 1 injeção (bainha). Nos casos de grampos em solo residual jovem, a resistência q_s foi, em média, 27% superior para os grampos com re-injeção (bainha + 1 injeção).

Os grampos re-injetados foram mais rígidos que os grampos executados com somente 1 injeção.

A maior resistência ao arrancamento obtida em ensaios com 2 injeções (bainha + 1 injeção), deve-se ao preenchimento dos vazios causados pela exsudação da calda de cimento na primeira injeção (bainha) e aumento do confinamento do grampo. Se o furo não está totalmente preenchido, o grampo fica com sua função prejudicada, devido ao menor confinamento.

A re-injeção mostrou-se, portanto, eficiente e deve ser sempre adotada.

7) Em relação ao tipo de re-injeção

Foram comparados os efeitos de se re-injetar os grampos a partir da boca, com a re-injeção por meio de mangueira de polietileno e válvulas manchetes, a cada 0,5m ao longo do grampo.

Os resultados não mostraram diferenças significativas entre os dois modos de re-injeção (apenas 4% a favor da injeção pela boca).

Alguns detalhes sobre os procedimentos de re-injeção merecem estudos adicionais. Uma pressão de re-injeção inferior a 2,0MPa poderia ser insuficiente para abrir a válvula manchete no interior da nata da primeira injeção. A mangueira de polietileno pode sofrer danos ou ruptura no trecho livre, o que equivaleria a uma re-injeção pela boca do furo. As exumações de grampos pré-ensaiados permitem uma visualização adequada dos efeitos de re-injeção e geometria do grampo.

8) Em relação à pré-lavagem do furo

Os furos dos grampos foram realizados com perfuratriz rotativa hidráulica, por via seca. A limpeza do furo foi feita com ar comprimido (grampo não lavado) e com ar comprimido e água (grampo lavado). Este tipo de equipamento é recomendado para solos com baixo teor de umidade. Em terrenos úmidos, a própria perfuratriz deve utilizar água para perfuração e limpeza do furo.

Para grampos re-injetados, a lavagem do furo forneceu resistência ao arrancamento 5% maior que a obtida em furos secos (não lavados). A influência da re-injeção parece ser preponderante sobre os resultados de q_s .

Já em grampos com apenas 1 injeção (bainha), a lavagem do furo aumentou q_s em cerca de 27%. Os grampos lavados também apresentaram maior rigidez.

A lavagem do furo com água acarreta, porém, um aumento significativo dos custos de execução do solo grampeado. Além disso, o procedimento de lavagem torna o solo úmido e enlameado na região de trabalho, prejudicando a movimentação de equipamentos e pessoas. A lavagem do furo com água justifica-se, portanto, apenas em terrenos úmidos, nos quais a própria perfuratriz deve utilizar água para perfuração.

9) Em relação ao tempo de cura da nata de cimento

Foram realizados ensaios com tempos de cura de 3 e de 10 dias. Em nenhum dos ensaios constatou-se aumento significativo de q_s para tempo de cura da nata de 10 dias.

Como os reforços apresentaram valores de q_s satisfatórios com períodos de cura mínimos (3 dias), o tempo de execução da obra pode ser reduzido, proporcionando redução de custos.

10) Em relação da aplicabilidade de correlações empíricas da literatura

A resistência ao arrancamento (q_s) deve ser obtida em ensaios de arrancamento antes ou durante a obra de grampeamento. Porém, na fase de pré-dimensionamento e na ausência de experiência específica, pode-se estimar a resistência o valor de q_s por meio de correlações empíricas da literatura.

A correlação obtida por Ortigão e Palmeira (1997) pode ser utilizada para solos residuais maduros, quando os valores de N(SPT) forem inferiores a 30. Para N(SPT) superior a 30, o valor de q_s em solos gnáissicos deve ser estimado a partir da correlação mencionada neste trabalho.

Proto Silva (2005) apresentou 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.

Foram apresentadas comparações entre os resultados experimentais de resistência ao arrancamento da presente pesquisa e os resultados obtidos por meio da relação proposta por Proto Silva (2005) para estimativa de q_s . Da análise destes resultados, pode-se concluir que a relação é conservativa, com q_s entre 70 e 92% dos valores obtidos em ensaios de arrancamento;

9.2. Recomendações para futuras pesquisas

Durante a execução desta pesquisa surgiram alguns questionamentos e sugestões que poderiam ser considerados e aprofundados em pesquisas futuras, tais como:

- 1) Estudar o efeito de re-injeções com pressões maiores que as utilizadas na presente pesquisa que ficaram entre 0,4 e 2,0MPa;
- 2) Realizar exumações de grampos, testando-se 1 injeção, 2 injeções e 3 injeções, para uma gama maior de solos.
- 3) Avaliar numericamente os mecanismos de transferência de carga em interfaces solo/grampo durante a execução dos ensaios de arrancamento;

4) Estudar os mecanismos de transferência de carga em grampos por meio de ensaios de arrancamento em escala reduzida, sob diferentes níveis de confinamento;

5) Criar uma normatização dos procedimentos de ensaio. Isto pode ser conseguido por meio da realização de ensaios de arrancamento em diferentes tipos de solos;

6) Estudar a influência das características geométricas do grampo (inclinações, comprimentos e diâmetros) no valor de q_s .