

11

Conclusões e Recomendações

O presente trabalho constou da análise da interação entre geogrelhas e solos através de ensaios de laboratório, utilizando equipamentos de grandes dimensões. O trabalho faz parte de um programa de pesquisas da PUC-Rio na área de reforço de solos, com o apoio da empresa Maccaferri do Brasil, visando uma investigação detalhada sobre o comportamento de geogrelhas embutidas em diferentes tipos de solo.

As geogrelhas utilizadas exibem diferentes características físicas e mecânicas. Desta forma, pretendia-se avaliar as vantagens e eventuais desvantagens de cada tipo de geogrelha. Os solos selecionados foram uma areia quartzosa bem graduada e um silte argiloso.

Os equipamentos utilizados no programa experimental permitiram a reprodução, em laboratório, dos mecanismos mobilizados na interface entre geogrelhas e solos, no caso de maciços reforçados.

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas na presente pesquisa.

11.1.

Sobre os Ensaios de Resistência dos Solos e das Geogrelhas

A influência do efeito escala nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto com os dois solos não foi relevante. As envoltórias de resistência, obtidas de ensaios de cisalhamento direto com $(300 \times 300)\text{mm}^2$ e com $(1000 \times 1000)\text{mm}^2$, foram semelhantes. No entanto, a utilização de diferentes métodos de compactação exerceu uma influência significativa nos resultados, mostrando a importância de se utilizar um procedimento único de compactação em todos os ensaios do programa experimental.

Os ensaios de tração simples nas geogrelhas forneceram, em alguns casos, valores de resistência e deformabilidade sensivelmente distintos aos valores fornecidos em catálogos. O tipo de equipamento, e mais precisamente o tipo de garra, tem influência significativa nos resultados dos ensaios de tração.

11.2.

Sobre os Ensaios de Arrancamento

O aumento da tensão confinante reduz o deslocamento da geogrelha, conduzindo à mobilização de esforços tangenciais elevados nos pontos próximos à aplicação da força de arrancamento. A tensão confinante governa o mecanismo de ruptura. Para níveis baixos de confinamento, ocorre somente a ruptura por arrancamento da geogrelha da massa de solo. Para níveis altos de confinamento, o excesso de sobrecarga inibe os deslocamentos internos da geogrelha, aumentando a resistência ao arrancamento e provocando a ruptura da geogrelha na garra. Existe uma correlação aproximadamente linear entre a tensão confinante vertical e a resistência ao arrancamento, enquanto ocorre somente a ruptura por arrancamento. Da mesma forma, existe uma correlação aproximadamente linear entre os deslocamentos medidos no instante da ruptura e a tensão confinante vertical.

A densidade relativa exerce uma influência semelhante à tensão confinante na resistência da interface solo-geogrelha. O deslocamento da geogrelha diminui com o aumento da densidade, aumentando o módulo de deformabilidade e a força de arrancamento.

Os ensaios executados com areia apresentaram uma resistência ao arrancamento superior aos ensaios com silte argiloso, independente do tipo de geogrelha ensaiada e do nível de confinamento aplicado à geogrelha.

A dimensão das aberturas das geogrelhas influencia a resistência da interface e conseqüentemente a resposta ao arrancamento. Observa-se um aumento na resistência ao arrancamento quando aumenta o diâmetro médio dos grãos de solo (D_{50}) e quando a razão S / D_{50} decresce para valores próximos à unidade (sendo S a menor dimensão da abertura da malha).

A magnitude da resistência ao arrancamento pode ser desmembrada em três parcelas, que correspondem à mobilização do atrito, da adesão e da resistência passiva dos elementos transversais. Dependendo do tipo de geogrelha, observa-se a predominância de uma das parcelas.

Os deslocamentos frontais (medidos na garra) podem ser relacionados à rigidez da geogrelha. As inclusões com rigidez baixa sofrem deformações elevadas antes de mobilizar a resistência ao arrancamento.

Nas análises da mobilização da resistência ao arrancamento ao longo da geogrelha, utilizou-se uma metodologia similar à de Ochiai et al (1996), com base nos deslocamentos internos da geogrelha. As tensões e deformações são

máximas no ponto de aplicação da força de arrancamento e decrescem ao longo da geogrelha. No caso de geogrelhas muito rígidas, os deslocamentos tornam-se mais uniformes, e a geogrelha desloca-se como um corpo rígido

O modelo proposto por Teixeira e Bueno (2002) reproduziu de forma adequada os ensaios de arrancamento do presente trabalho, possibilitando a correção da rigidez inicial ao cisalhamento.

11.3. Sobre os Ensaios de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado mostraram que existe uma inclinação ótima da geogrelha, próxima a $\theta=60^\circ$, correspondente a um valor máximo de resistência. Os resultados sugerem que, em maciços reforçados, a geogrelha deve ser posicionada na direção horizontal, pois o ângulo θ entre a superfície potencial de ruptura e a geogrelha seria de aproximadamente 60° . Estes resultados concordam com Jewell e Wroth (1987) e Palmeira e Milligan (1989).

A introdução do reforço ocasiona um aumento no valor do intercepto coesivo (coesão aparente). Em termos de ângulo de atrito, a variação não é tão significativa. Em projetos de maciços reforçados, considera-se que o conjunto solo-geogrelha apresenta uma coesão adicional igual à coesão aparente indicada nos resultados. Nos ensaios com a geogrelha vertical ($\theta=90^\circ$), a envoltória foi praticamente coincidente com a envoltória da areia não reforçada.

Análises experimental e numérica da configuração deformada da geogrelha na caixa de cisalhamento permitiram definir que a zona central, onde ocorre o cisalhamento, corresponde a aproximadamente 40% da altura da caixa. Nas regiões externas, correspondentes aos 60% restantes, praticamente não ocorre distorção do solo e da geogrelha.

11.4. Sobre os Ensaios Triaxiais

A resistência e a rigidez do material reforçado aumentam com o confinamento e com o número de camadas de reforço.

A introdução do reforço exerce uma influência similar a um aumento da tensão confinante, ou seja, faz com que seja necessária uma tensão axial mais elevada para provocar a ruptura por cisalhamento do corpo de prova.

Nos ensaios em corpos de prova arenosos, as geogrelhas apresentaram danos e distorções, sugerindo solicitações de tração durante o ensaio. Neste caso, o aumento da tensão confinante é provocado pelo esforço de tração atuante na geogrelha. No campo, este mecanismo corresponde ao arrancamento da geogrelha da massa de solo, e ocorre quando a superfície de ruptura intercepta o reforço segundo uma determinada inclinação.

Os resultados em silte argiloso sugeriram que a geogrelha sofreu um deslizamento em relação ao solo. Neste caso, o aumento de tensão confinante é provocado pela resistência ao cisalhamento na interface solo-geogrelha. No campo, este mecanismo corresponde ao deslizamento de parte da massa de solo em relação à geogrelha, ou seja, corresponde ao cisalhamento direto mobilizado na interface solo-geogrelha.

Os ensaios triaxiais mostraram que as camadas de geogrelha localizadas nas proximidades do topo e base dos corpos de prova não exercem influência significativa na resistência do material reforçado, pois estão localizadas em uma região que não é solicitada durante o cisalhamento.

11.5.

Sobre os Ensaios para Avaliação do Dano Mecânico

O dano natural, provocado por simulações de procedimentos de compactação, mostrou-se mais acentuado quando se utilizam solos de granulometria grosseira e métodos de compactação agressivos.

O dano artificial foi induzido para avaliar a influência da ruptura de elementos da malha na resposta ao arrancamento de geogrelhas. Foi definido o índice de susceptibilidade S , obtido a partir da declividade da curva resistência ao arrancamento normalizada vs número de elementos danificados. Quanto maior o valor de S , mais susceptível é a geogrelha à perda de resistência com o dano. O valor de S mostrou-se aproximadamente constante, para um dado tipo de solo. No entanto, S mostrou-se menor para solos mais finos e para menores densidades relativas.

Em solicitações de cisalhamento direto, os resultados sugerem que, em situações com superfície de ruptura perpendicular à geogrelha, a ocorrência de danos não compromete a integridade do maciço reforçado. Este tipo de situação ocorre usualmente nas camadas superiores dos maciços reforçados.

A influência do dano deve ser avaliada não somente em função das propriedades obtidas a partir de ensaios não confinados. A análise deve

considerar, também, o mecanismo de interação da geogrelha com o solo envolvente.

11.6.

Sobre o Comportamento dos Diferentes Tipos de Geogrelha

As geogrelhas utilizadas no programa experimental apresentam características físicas e mecânicas distintas. Além das diferenças geométricas e de resistência à tração, as geogrelhas ensaiadas possuem diferentes porcentagens de área aberta. O grande número de variáveis dificulta conclusões definitivas sobre a influência da rigidez ou das características geométricas nos resultados dos ensaios. Entretanto, foi apresentada uma discussão qualitativa a respeito do comportamento dos três tipos de geogrelha em solicitações de arrancamento.

As geogrelhas ensaiadas apresentaram-se mais resistentes ao arrancamento quando imersas em solo arenoso. Nos ensaios executados com solo silto-argiloso, a Malha Metálica apresentou uma resistência ao arrancamento superior à da ParaGrid, verificando-se que esta era facilmente arrancada da massa de solo. Na ruptura por arrancamento, a geogrelha deslizava com facilidade, demonstrando pouca interação com o solo silto-argiloso.

A geogrelha MacGrid mobilizou a maior interação na interface para tensões confinantes inferiores a 25kPa, com ambos os tipos de solo. A partir deste valor, ocorreu ruptura por tração da malha, com uma redução do coeficiente de interação f .

A geogrelha ParaGrid apresentou baixo valor de f , com ambos os solos. No entanto, os ensaios não indicaram ruptura da malha, mesmo para tensões confinantes mais elevadas (50kPa). Este fato pode ser justificado pela maior resistência à tração desta geogrelha na direção longitudinal.

Pode-se concluir que a geogrelha MacGrid é a que desenvolve a maior interação na interface solo-geogrelha, seguida da Malha Metálica Hexagonal. No entanto, a geogrelha ParaGrid é a que apresenta a maior resistência à tração.

A geogrelha ParaGrid, apesar de possuir rigidez à tração superior, apresenta uma rigidez na interface inferior à MacGrid e à Malha Metálica. Esta observação sugere que a rigidez na interface possui uma relação direta com a interação solo-reforço e não, com a rigidez à tração da geogrelha. No dimensionamento de maciços reforçados, a escolha do tipo de geogrelha deve

levar em consideração a interação do reforço com o tipo de solo e não apenas a rigidez e a resistência à tração da geogrelha. Os ensaios de arrancamento sugerem que a geogrelha ParaGrid, apesar da resistência e rigidez à tração elevadas, apresenta a menor interação com ambos os solos ensaiados.

Provavelmente, esta geogrelha é mais indicada quando se utilizam solos de granulometria mais grosseira, uma vez que as grandes aberturas da malha permitem um maior entrosamento com solos mais granulares.

A geogrelha MacGrid apresentou uma alta parcela de resistência devido à contribuição dos elementos transversais. Esta parcela predomina sobre as parcelas de adesão e atrito solo-grelha. Em relação à ParaGrid, verificou-se um equilíbrio entre as parcelas de resistência..

Em relação ao dano mecânico, a geogrelha MacGrid demonstrou ser a mais susceptível a danos de compactação. As lesões da geogrelha ParaGrid e da Malha Metálica restringiram-se apenas à ruptura da proteção de PVC, não se verificando perda de resistência a curto prazo. No entanto, a ruptura da proteção expõe os filamentos do núcleo, podendo causar uma perda de resistência a longo prazo.

As geogrelhas MacGrid e Metálica, apesar de possuírem características físicas e mecânicas distintas, apresentaram índices de susceptibilidade S aproximadamente iguais. Este fato indica a necessidade de avaliação do dano sob condições confinadas.

11.7. Sobre os Diferentes Ensaios

Os coeficientes de interação f e λ obtidos em ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto apresentaram valores divergentes. A adequação de cada um dos ensaios para a definição das características da interface baseia-se no movimento relativo mais provável de ocorrer na interface solo-geogrelha.

Nos ensaios de cisalhamento direto, a geogrelha não se desloca em relação ao solo envolvente. A principal dificuldade encontrada nos ensaios com geogrelhas horizontais consiste na garantia de que o cisalhamento realmente ocorra na interface solo-geogrelha.

Os mecanismos de interação mobilizados durante o arrancamento de geogrelhas são significativamente diferentes dos mobilizados durante o cisalhamento direto. Neste, não é possível considerar a contribuição da resistência passiva mobilizada nos elementos transversais.

Nos ensaios de arrancamento, a geogrelha se deforma, ocorrendo uma variação da área disponível para atrito superficial. Além disso, há uma distribuição não uniforme do esforço de tração ao longo do comprimento da geogrelha. Desta forma, a distribuição de esforços cisalhantes não é uniforme e a resistência máxima não é atingida ao longo de todo o comprimento da geogrelha.

Os valores do parâmetro f obtidos para a Malha Metálica nos ensaios de cisalhamento direto foram próximos aos obtidos nos ensaios de arrancamento. Para as demais geogrelhas, os valores de f obtidos a partir dos diferentes ensaios apresentaram diferenças significativas.

A geogrelha ParaGrid apresentou valores de f superiores nos ensaios de cisalhamento direto. Ressalta-se que esta geogrelha apresentou baixa interação com ambos os tipos de solo durante os ensaios de arrancamento. Além disso, a ruptura da solda dos elementos transversais reduziu a contribuição do empuxo passivo.

Para a geogrelha MacGrid, os valores de f foram maiores nos ensaios de arrancamento do que no cisalhamento, com ambos os tipos de solo. Isto foi devido à grande contribuição da resistência passiva dos elementos transversais desta geogrelha no arrancamento.

No caso dos ensaios de arrancamento, os mecanismos de atrito superficial e mobilização da resistência passiva dos elementos transversais não ocorrem simultaneamente. Para pequenos deslocamentos relativos solo-geogrelha, ocorre mobilização do atrito superficial ao longo das superfícies inferior e superior da grelha. Posteriormente, para maiores deslocamentos relativos na interface, ocorre a mobilização da resistência passiva dos elementos transversais.

É importante ressaltar que o mecanismo de interação que ocorre na interface solo-geogrelha, quando a superfície de ruptura intercepta o reforço, é reproduzido adequadamente em ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado. Os ensaios de arrancamento apresentam o inconveniente de conduzir a malha a uma ruptura precoce, sob condições não confinadas.

11.8.

Sobre o Desempenho dos Equipamentos

Os equipamentos permitiram a reprodução dos diferentes mecanismos de interação solo-geogrelha, mostrando-se satisfatórios. A execução de ensaios em equipamentos de grandes dimensões torna-se necessária quando a malha

apresenta grandes aberturas, como é o caso da geogrelha ParaGrid e da Malha Metálica.

11.9.

Sugestões para Futuras Pesquisas

A partir dos resultados e das análises do presente trabalho, são apresentadas algumas sugestões e recomendações que podem ser úteis para eventuais estudos experimentais com geogrelhas.

Deve-se buscar a padronização dos procedimentos e equipamentos utilizados para ensaios de arrancamento e tração simples, tendo em vista que o tipo de garra exerce uma influência significativa nos resultados de ensaios onde geogrelha é tracionada.

Recomenda-se uma maior atenção aos ensaios de cisalhamento direto com reforço inclinado. O equipamento deve ser desenvolvido com dimensões suficientes para permitir o arrancamento da geogrelha da caixa de ensaios durante o processo de cisalhamento. Com isso, poder-se-ia reproduzir mais adequadamente a situação que ocorre em maciços reforçados no campo.

Sugere-se a execução de ensaios de arrancamento com tiras longitudinais isoladas, de forma a permitir uma quantificação da influência do empuxo passivo mobilizado nos elementos transversais das geogrelhas. Aconselha-se a realização de estudos complementares sobre danos em geogrelhas. O dano natural deve ser investigado através de ensaios sob condições confinadas, utilizando-se métodos de compactação agressivos. O dano artificial, com a ruptura de elementos da grelha (em particular, a malha metálica) pode ser avaliado através de análises numéricas que considerem a malha como uma treliça.

Recomenda-se a execução de ensaios de arrancamento e de cisalhamento direto com solos sob graus de saturação previamente estabelecidos, para tentar esclarecer o efeito da sucção nos parâmetros de interação solo-geogrelha.

Finalmente, devem ser avaliados os métodos de interpretação dos ensaios que permitem a compreensão dos mecanismos de interação solo-geogrelha, buscando-se uma repetitividade de resultados.