

## 11 Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho e algumas sugestões para futuras pesquisas.

### 11.1. Conclusões

Esta pesquisa envolveu a realização de quatro etapas fundamentais: (i) Ensaio de laboratório para a determinação dos parâmetros do solo do muro e aterro; (ii) Instrumentação e monitoramento do muro durante construção e ensaios de sobrecarga; (iii) Ensaio de arrancamento das geogrelhas do aterro; (iv) Simulação numérica do comportamento do muro e aterro reforçados. As principais conclusões da pesquisa são apresentadas distintamente para cada etapa.

#### **Em relação aos ensaios de laboratório do solo do muro e aterro reforçados:**

Foram retirados blocos do aterro experimental e do muro de solo reforçado para a realização de ensaios laboratório. Os ensaios corresponderam aos de caracterização, cisalhamento direto na condição natural e inundada (blocos do aterro) e ensaios de compressão triaxial isotropicamente adensados e drenados (blocos do muro) para obtenção de parâmetros de resistência e deformabilidade do solo.

A caracterização dos solos realizada nesta pesquisa apresentou resultados semelhantes às propriedades do solo adotadas no projeto do muro de solo reforçado.

O grau de saturação dos blocos retirados do aterro experimental foram semelhantes aos das camadas compactadas em campo, igual à aproximadamente 93%.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, tanto na condição de umidade natural quanto inundada, forneceram curvas de tensão cisalhante vs. deslocamento horizontal sem picos significativos. Os parâmetros obtidos dos ensaios inundados e ensaios na umidade natural foram bastante diferentes, especialmente o ângulo de atrito.

Os resultados dos ensaios de compressão triaxial isotropicamente adensados e drenados mostraram curvas tensão desviadora vs. deformação axial com pico. Em todas as amostras ocorreu contração durante o cisalhamento, mas na amostra sob menor tensão confinante, a fase de contração foi muito rápida sendo seguida de prolongada expansão. Também foi realizado um ensaio não adensado não drenado (tipo UU) para observar a capacidade de geração de excesso de poropressão pelo solo, constatando-se que o máximo excesso de poropressão representa menos de 5% da tensão desviadora máxima total.

Constatou-se que módulo de rigidez depende da tensão confinante e que os parâmetros de resistência foram maiores que os considerados no projeto do muro de solo reforçado. Nos ensaios triaxiais foram obtidos ângulo de atrito de  $34,2^\circ$  e intercepto coesivo de 10,0kPa, ao invés dos valores de  $29^\circ$  e 5,0kPa, adotados em projeto.

#### **Em relação ao comportamento do muro reforçado instrumentado:**

Não foram constatados recalques diferenciais apreciáveis na base do muro de solo reforçado, conforme as medições efetuadas nas caixas suecas.

A forma das curvas de distribuição de deslocamentos ao longo das geogrelhas, medidas por *tell-tales*, não variou significativamente ao longo do período de construção do muro. Apesar de algumas leituras terem sido prejudicadas, em função de atos de vandalismo e deficiências da estrutura de suporte do equipamento, as leituras dos *tell-tales* mais próximos da face apresentam razoável concordância com as medições dos marcos topográficos correspondentes.

O perfil de deslocamentos obtido a partir dos marcos mostra boa concordância com outros perfis apresentados na literatura e o valor do deslocamento horizontal máximo medido na face é próximo aos valores reportados por outros autores.

Não houve deslocamentos mensuráveis nos testes de sobrecarga realizados nas seções instrumentadas, após a construção do muro. Isto se deve, provavelmente, ao esforço de compactação durante a construção do muro ser superior à sobrecarga aplicada, indicando que a compactação atua como um importante pré-adensamento do solo, reduzindo as deformações no período pós-construtivo.

#### **Em relação aos ensaios de arrancamento das geogrelhas do aterro reforçado:**

Nos ensaios de arrancamento realizados no aterro experimental ocorreram rupturas precoces das amostras, abaixo da resistência à tração nominal. Foram realizados ensaios adicionais para investigar a causa das rupturas. Entretanto, não foi possível determinar a causa das rupturas precoces.

Apesar das rupturas precoces, constatou-se que a resistência ao arrancamento obtida foi superior às previsões baseadas em métodos tradicionais da literatura.

O aumento da tensão vertical, de maneira geral, ocasionou aumento da concentração dos deslocamentos no trecho mais próximo à garra e uma tendência de aumento da resistência ao arrancamento. Entretanto, a ocorrência de rupturas precoces prejudicou a definição de uma correlação.

De maneira geral, pode-se afirmar que os deslocamentos diminuem quando a tensão vertical aumenta ou o teor de umidade do solo compactado diminui.

A tensão cisalhante equivalente média (considerando a área mobilizada da geogrelha) foi utilizada para comparação entre os ensaios, apresentando valores mínimos da ordem de 60kPa para geogrelhas tipo 55A e 40kPa para as demais geogrelhas, sob tensões verticais acima de 10kPa.

#### **Em relação à simulação numérica do muro e aterro reforçados:**

Foram realizadas simulações numéricas do comportamento do muro de solo reforçado e dos ensaios de arrancamento, pelo método dos elementos finitos. A ferramenta computacional escolhida foi o programa PLAXIS 2D v.8.

Na simulação dos ensaios de arrancamento foram testadas várias configurações de geometrias, seqüências construtivas e parâmetros do solo em busca do melhor ajuste. Neste processo, concluiu-se que as deformações ocorridas durante a compactação do solo não influenciam significativamente os resultados dos ensaios de arrancamento. Além disto, constatou-se que, para um mesmo carregamento aplicado, a ausência da manga metálica reduz os deslocamentos da geogrelha.

A distribuição de deslocamentos nos ensaios de arrancamento prevista pela simulação numérica foi semelhante à verificada em campo, sem necessidade de ajuste dos parâmetros de resistência e deformabilidade do solo obtidos em laboratório. Entretanto, os ensaios de campo apresentaram uma concentração de deslocamentos no trecho inicial da geogrelha que não pôde ser prevista por nenhuma das combinações de parâmetros testadas, provavelmente em virtude do modelo constitutivo da geogrelha desprezar a resistência passiva do solo.

Dentre as várias alternativas de geometria e seqüência construtiva para simulação da construção do muro de solo reforçado, a melhor foi aquela que empregou o mesmo número de camadas de solo utilizadas no campo e sacaria com rigidez diferente do solo.

As previsões de deslocamento horizontal da face apresentaram boa concordância com as leituras dos marcos topográficos. Similarmente, as previsões de deslocamentos horizontais e forças nas geogrelhas apresentaram valores semelhantes aos obtidos através dos *tell-tales*, entretanto, com maior dispersão.

A influência relativa de cada parâmetro do solo nos deslocamentos horizontais da face foi avaliada por meio de uma análise paramétrica e uma análise estatística, concluindo-se que o parâmetro que mais contribui com a variância do deslocamento horizontal máximo da face é o intercepto coesivo, seguido da tangente do ângulo de atrito e da rigidez.

## 11.2. Sugestões para futuras pesquisas

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, vários questionamentos surgiram, muitos dos quais foram analisados no trabalho e outros sugeridos para futuras pesquisas, tais como:

- Investigar a influência do teor de umidade nos parâmetros de resistência obtidos a partir de ensaios de cisalhamento direto no solo silto-argiloso empregado na obra, através de mais ensaios;
- Comparar os parâmetros de resistência obtidos por ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto para o solo em questão;
- Utilizar estruturas rígidas para leitura dos deslocamentos internos medidos por *tell-tales* para que as deformações das estruturas não influenciem as leituras dos instrumentos;
- Desenvolver e utilizar células de carga que permitam a medição das forças atuantes em geossintéticos e resistam aos esforços de compactação impostos por equipamentos pesados e às intempéries;
- Desenvolver equipamentos protegidos contra atos de vandalismo para a instrumentação de obras em campo;
- Realizar ensaios de arrancamento de grandes dimensões com o solo empregado nesta pesquisa, utilizando-se geogrelhas de resistência à tração mais elevada, para afastar a possibilidade de rupturas precoces;
- Investigar a causa das rupturas precoces ocorridas por meio de comparações entre ensaios de tração tipo “faixa larga”, ensaios de tração confinada e ensaios de arrancamento com outras condições de contorno, controle direto de velocidade e outros modelos de garra;
- Realizar simulações numéricas dos ensaios de arrancamento e da construção do muro com modelos constitutivos que permitam a consideração da resistência passiva do solo;
- Investigar os parâmetros de rigidez e deformabilidade da sacaria que compõe o faceamento do muro de solo reforçado;
- Realizar simulações numéricas da construção do muro considerando o envelopamento das geogrelhas e os parâmetros obtidos para a sacaria.