

## 6 Conclusões e Sugestões

### 6.1. Conclusões

A utilização da técnica de bulbos de compactação na engenharia geotécnica esteve por muito tempo limitada para compensação de recalque de estruturas. Como técnica de melhoramento de solos arenosos sua aplicação é mais recente, com informações baseadas em métodos analíticos aproximados (El-Kelesh *et al.*, 2001; El-Kelesh & Matsui, 2002) e registro de observações de campo (Warner & Wong, 1974; Graf, 1992). Análises numéricas para simulação dos efeitos da expansão de colunas de bulbos nas propriedades do solo são escassas, o que motivou o desenvolvimento desta dissertação para aprofundar e contribuir com as pesquisas neste tema.

A partir das simulações pelo método dos elementos finitos, em análises bi e tridimensionais fazendo uso de programas computacionais comerciais (Plaxis 2D, Plaxis 3D), cujos resultados foram comparados com aqueles obtidos pelo método analítico de El-Kelesh *et al.* (2001) e, na medida do possível, também com valores de campo documentados na literatura, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- Os valores de pressão limite de injeção ( $P_{lim}$ ) calculados em modelo numérico 2D (estado de tensão axissimétrico), entre as profundidades de 2m a 8m da camada de areia fofa, encontram-se dentro da faixa de valores observados em campo (Warner & Brown, 1974; Graf, 1992; Andrus e Chung, 1995) mas são bastante diferentes dos resultados obtidos com o modelo analítico de El-Kelesh *et al.* (2001), com diferenças entre 500 kPa a 1000 kPa ao longo da profundidade. Tais discrepâncias entre os resultados analíticos e numéricos possivelmente se devem às simplificações e hipóteses introduzidas na formulação analítica para possibilitar seu desenvolvimento matemático.
- De acordo com os resultados numéricos, observou-se que a expansão dos bulbos a partir de raio inicial 0,1m para raio final 0,25m, provocou um

melhoramento do solo que se estendeu até uma distância radial de 1,5m, permanecendo constante com a profundidade.

- Os índices utilizados para medir quantitativamente a eficiência do tratamento do solo, os mais sensíveis foram a variação horizontal das tensões radiais ( $\sigma_r/\sigma_{rini}$ ) e a variação com a profundidade dos módulos de cisalhamento (G) ou de deformação volumétrica (K).
- O tratamento de solo na região dos bulbos mais profundos é influenciado pela presença de estratos mais rígidos nas proximidades, existindo maior eficiência do tratamento quanto menor a distância entre o primeiro ponto de injeção e o topo do estrato rígido.
- Os resultados das análises com a técnica de bulbos de compactação aplicada em depósitos de areia seca e saturada indicam que a eficiência do tratamento é menor em solos saturados.
- Nas análises numéricas pelo método dos elementos finitos foram utilizados os modelos constitutivos de Mohr-Coulomb e HSM para representar o comportamento mecânico do depósito de areia. O modelo HSM tem a vantagem de permitir verificar a eficiência do tratamento em termos das variações dos módulos de cisalhamento (G) ou de deformação volumétrica (K). Adicionalmente, constatou-se que os resultados em termos da variação do índice de vazios ( $e$ ) ou da densidade relativa ( $Dr$ ) são mais fáceis de serem visualizados porque há menos oscilações destes resultados do que no modelo de Mohr-Coulomb.
- Conforme as análises numéricas 3D, não foram constatadas diferenças no tratamento do solo para as apenas duas sequências analisadas da execução das colunas de bulbo. Em campo, como reportado por El-Kelesh e Matsui (2002) em tratamento com muitas linhas de injeção, a importância destas sequências de injeção pode ser significativa para atingir a máxima eficiência possível.
- A distância radial de melhoramento do solo em termos do índice de vazios, nas análises 2D e 3D, conduziram a valores praticamente iguais das distâncias de separação entre colunas de bulbo (média de 1,42m na análise 3D e 1,50m na análise 2D). No entanto, o melhoramento do solo após as injeções foi bastante diferente em ambas as análises, visto que na

representação 3D os efeitos das colunas vizinhas são incorporados. Por exemplo, na análise axissimétrica 2D, na distância de 0,5m do eixo da coluna de bulbos a densidade relativa final do solo resultou no valor médio de 13,06% e o módulo de elasticidade 13230 kPa enquanto que na análise 3D, que incluiu a contribuição de 3 outras colunas, a densidade relativa final atingiu o valor médio de 20,61% e o módulo de elasticidade incrementou para 16990 kPa.

- Finalmente, concluiu-se que a utilização dos programas computacionais Plaxis 2D e Plaxis 3D permitiu verificar vários aspectos do tratamento de bulbos de compactação que não podem ser avaliados através das soluções analíticas disponíveis ou que não são facilmente percebidos nos resultados de tratamentos executados em campo.

## **6.2. Sugestões**

- Realizar análises numéricas para avaliação da mitigação do potencial de liquefação dinâmica através do tratamento de bulbos de compactação, utilizando modelos específicos para carregamentos cíclicos como o UBCSand ou Norsand.
- Avaliar numericamente o processo de tratamento por expansão de bulbos na hipótese de ocorrência de fraturamento no solo, que ocasiona perdas de pressão e escoamento da argamassa para o interior das fraturas.
- Avaliar numericamente o processo de tratamento de solos, considerando as outras técnicas baseadas nas tecnologias de injeção com argamassa mencionada no capítulo 2.
- Análises experimentais da técnica de bulbos de compactação em corpos de prova para diferentes reologias de argamassa (relação água-cimento, etc.).