

5

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

5.1

Conclusões

O presente trabalho se propôs a realizar uma primeira avaliação dos processos de instalação de estaca e prova de carga estática, através do método de elementos discretos. Devida à escassa literatura específica encontrada sobre este tema, foi julgada necessária a realização de algumas análises de sensibilidade com diferentes fatores que poderiam influenciar nos resultados, além do esforço para uma comparação quantitativa com resultados experimentais, por meio de processos de calibração e geração de amostra adequados.

A calibração foi realizada a partir da simulação numérica de ensaios biaxiais, na qual foram variados os parâmetros de contato, a porosidade e o formato das partículas, para tentativa de obter um comportamento similar ao verificado em um ensaio triaxial de laboratório. A partir deste procedimento foi observado um bom ajuste entre as curvas numéricas e experimentais na condição de partículas circulares com rotação inibida. A metodologia de geração dos modelos utilizados para instalação da estaca, desenvolvida no presente trabalho, apresentou boa repetibilidade de resultados e condições de homogeneidade e isotropia dos modelos. Esta metodologia foi realizada pela aplicação de uma tensão isotrópica nas paredes do modelo e a posterior aplicação da força de gravidade, para três formas distintas de geração de amostra. A partir destes dois procedimentos foi realizada a instalação da estaca até a profundidade de execução do ensaio de prova de carga. Através dos resultados obtidos, foi observada uma razoável comparação quantitativa da resistência de ponta com os resultados experimentais avaliados. Tal fato indica, desta forma, uma metodologia adequada para a correspondência de valores de resistência de ponta numéricos com valores verificados experimentalmente.

A resistência de fuste não apresentou valores próximos aos medidos por Bernardes (1989) apesar da retroanálise realizada mostrar valores de K_s e δ dentro das faixas de valores apresentadas na literatura.

A partir das simulações de prova de carga, foram obtidas as curvas de resistência de ponta e de fuste, tensões horizontais nas paredes das estacas e os campos de deslocamento de partículas. Os formatos das curvas de resistência obtidas apresentaram uma razoável concordância com relatos e discussões da literatura técnica, onde foi verificada uma clara tendência de ruptura na curva de resistência de fuste e um contínuo aumento da resistência de ponta com o recalque, mesmo para grandes deformações, com exceção da simulação realizada com rotação livre, onde foi observada um pico de resistência seguido de um valor quase constante de resistência com o recalque. As retroanálises das resistências de fuste realizadas apresentaram relações diretas com as tensões horizontais no fuste da estaca, medidas antes da simulação de prova de carga, e com o atrito entre estaca e partícula mostrando coerência com as soluções analíticas apresentadas.

Os campos de deslocamento analisados apresentaram comportamentos similares para os modelos com instalação da estaca na condição de rotação livre. A simulação de prova de carga com rotação livre e a simulação no modelo com instalação na condição de rotação inibida apresentaram campos de deslocamento diferentes das demais simulações, mas com certa semelhança entre si, indicando um possível modo de ruptura.

As avaliações dos fatores analisados, no comportamento dos modelos e nas curvas de resistência, mostraram claras influências da condição de rotação das partículas, no momento da instalação da estaca, e do atrito entre estaca e partícula, no processo de equilíbrio de forças, resultando em diferentes curvas de resistência. A comparação entre a instalação da estaca com velocidade constante e a instalação retirando partículas mostrou diferenças similares às observadas em campo, entre estacas cravadas e estacas escavadas, respectivamente. Os demais fatores investigados não apresentaram grandes efeitos na simulação de prova de carga, mostrando, por exemplo, que a questão de geração de amostra, amplamente discutida na literatura, não oferece grandes influências, contanto que sejam realizados os cuidados mínimos para sua homogeneização.

Em algumas das simulações de prova de carga foram observados problemas numéricos decorrentes do contato simultâneo de partículas com a base e fuste da estaca, podendo ser minimizados, por exemplo, pela utilização de partículas menores e pela modificação da geometria das paredes da base da estaca.

A análise de prova de carga acoplada, representando a estaca como um meio elástico contínuo se mostrou válida e, portanto uma ferramenta interessante para futuras pesquisas, em condições onde a compressibilidade da estaca seja relevante para os resultados, como para estacas longas e para a simulação de ensaios de carregamento dinâmico e avaliação da propagação de ondas de compressão.

5.2

Sugestões para trabalhos futuros

As principais limitações da abordagem numérica utilizada para simular os processos de instalação de estaca e prova de carga estática, foram: a utilização do método em duas dimensões, oferecendo restrições cinemáticas discutidas no presente trabalho, o formato idealizado de partícula e a transposição deste efeito pela restrição da rotação, além da utilização de partículas com diâmetros bastante superiores aos diâmetros dos grãos de areia usuais. Portanto, apesar das comparações qualitativas obtidas e dos diversos atrativos oferecidos por este método para a simulação deste processo, considera-se que ainda existe um longo caminho até a obtenção de um modelo em elementos discretos que represente adequadamente todos os aspectos do comportamento de uma fundação profunda em solos granulares.

A partir das discussões dos resultados obtidos no presente trabalho e das limitações apresentadas foram consideradas as seguintes sugestões:

- a) Primeiramente, a utilização do método de elementos discretos em 3D para verificação das conclusões obtidas na presente análise além do estudo do comportamento de resistência de fuste e utilização das metodologias de calibração e geração de modelo propostas, com o objetivo de obter comparações quantitativas com resultados experimentais.

- b) Avaliar a influência de fatores como distribuição granulométrica e formato dos grãos, a partir de um processo adequado de calibração, nos resultados das diversas escalas avaliadas, em especial na movimentação das partículas e possíveis superfícies de ruptura.
- c) Verificar a calibração da amostra em comparação com ensaios triaxiais de laboratório, para diferentes níveis de tensão, de forma a representar adequadamente o comportamento do material granular às alterações produzidas pela instalação de um elemento de fundação profunda.
- d) Utilizar a o acoplamento mecânico apresentado para avaliar a simulação de um ensaio de carregamento dinâmico. Para tal, seria necessário utilizar o amortecimento viscoso de Hertz para o contato, como recomendado por Itasca (2008), e calibrar a viscosidade com ensaios de diferentes taxas de deformações. A partir desse processo seria possível obter relações mais reais para a dependência da velocidade de ensaio e utilizar esta relação para estudar as propagações de onda, considerando os efeitos de amortecimento viscoso e amortecimento geométrico.