

7 Conclusões e sugestões

7.1 Conclusões

As seguintes conclusões podem ser obtidas do desenvolvimento da presente tese:

- ☞ O estudo da liquefação em solos pode ser compreendido como um caso particular da dinâmica dos meios porosos. Nesta tese, utiliza-se um sistema de equações governantes simplificadas (forma **u-p**) para representar matematicamente o comportamento acoplado de materiais, em termos de deslocamentos do sólido e da pressão no fluido. Este conjunto de equações governantes, previamente discretizadas, proposto por Zienkiewicz e Shiomi [Zienkiewicz, O.C.; Shiomi, T., 1984] para aplicações computacionais, está baseado nas equações desenvolvidas por Biot [Biot, M.A., 1956a] para problemas de propagação de ondas a baixas frequências em meios porosos saturados. Nesta pesquisa opta-se pela utilização da formulação **u-p** devido à maior simplicidade das implementações computacionais.
- ☞ Baseado na formulação simplificada (forma **u-p**) apresenta-se um novo algoritmo para a solução numérica das equações governantes, baseado no emprego de um procedimento alternativo da discretização temporal. Em consequência, estabelece-se um sistema de equações de equilíbrio onde as variáveis primárias são os incrementos de deslocamento no sólido e incrementos da pressão no fluido, diferentemente da formulação desenvolvida por Zienkiewicz [Zienkiewicz, O.C., et al., 1999] onde as incógnitas são os incrementos das acelerações no sólido e incrementos da taxa de variação da pressão no fluido. O algoritmo utilizado nesta pesquisa não executa integrações no tempo para determinação dos valores dos

incrementos de deslocamentos e poropressões, mostrando-se mais eficiente sob o ponto de vista da execução computacional.

- ☞ Com a finalidade de deduzir as equações do MEF, é apresentado em detalhes o processo de discretização das equações diferenciais de equilíbrio do sistema acoplado sólido-fluido. A discretização espacial é obtida considerando-se o método dos resíduos ponderados (formulação de Galerkin) e a discretização temporal com base no método de Newmark Generalizado [Katona, M.G.; Zienkiewicz O.C., 1985]. O desenvolvimento detalhado para obtenção das equações do MEF permitiu constatar-se a existência de grandezas que não são apresentadas em muitas das referências bibliográficas ou que são desconsideradas sem maiores explicações pelos autores. Exemplos são a matriz de fluxo dinâmico \mathbf{G} (equação 5.67) e alguns termos relacionados com o vetor de fluxos nodais no contorno (equação 5.57).
- ☞ Utiliza-se nesta pesquisa o modelo constitutivo proposto de Pastor-Zienkiewicz, modelo P-Z, para representar o comportamento mecânico da fase sólida, em termos de tensões efetivas. O modelo, baseado na teoria da plasticidade generalizada, apresenta como principal vantagem o fato de que as superfícies de escoamento e do potencial plástico são implicitamente definidas apenas por vetores normais unitários, permitindo que a implementação computacional do modelo torne-se mais simples do que no caso de modelos da teoria da plasticidade clássica, por não demandarem algoritmos de retorno (preditor-corretor) para verificação do estado de tensão em relação à superfície de escoamento.
- ☞ Foi verificada, através da comparação com resultados de laboratório tanto em ensaios monotônicos como em ensaios cíclicos, a eficiência do modelo P-Z na previsão da liquefação. Nesta tese, o modelo original P-Z foi modificado permitindo que os parâmetros relacionados com os módulos elásticos sejam também função da tensão de confinamento efetivo.

- ☞ A principal desvantagem do modelo P-Z é a quantidade de parâmetros que utiliza em comparação com outras formulações mais simples utilizadas na prática para solução aproximada de problemas dinâmicos em solos, como o modelo linear equivalente implementado nos programas computacionais SHAKE [Idriss, I.M.; Sun, J.I., 1992] e QUAD4M [Hudson, M.; Idriss, I.M.; Beikae, M., 1994] e o modelo histerético-hiperbólico implementado nos programas TARA3FL [Finn, W.D.L.; Yogendrakumar, M., 1989] e FLAC v.5 [Itasca Consulting Group, 2005]. O modelo P-Z utiliza 11 parâmetros (7 utilizadas nas análises monotônicas e mais 4 nas análises dinâmicas) para simular efeitos como mudanças do comportamento contrativo para dilatante (mobilidade cíclica), variação dos módulos elásticos com o estado das tensões efetivas, condição de ruptura baseada na teoria do estado crítico, efeitos de memória do material em carregamentos cíclicos, etc.
- ☞ Foi desenvolvido um programa computacional, escrito em Fortran 90, para execução das análises dinâmicas não-lineares em solos saturados com capacidade de simulação da ocorrência de fluxo por liquefação em areias fofas saturadas e outros tipos de solo suscetíveis à liquefação. Com base no MEF e formulação apresentada no capítulo 5, o programa foi utilizado para análise de alguns exemplos numéricos cujos resultados mostraram tanto a aplicabilidade do modelo P-Z para simular a resposta dinâmica de solos saturados quanto a confiabilidade do código computacional, evidenciada através da comparação de seus resultados com soluções analíticas ou outros valores numéricos obtidos por diferentes autores.
- ☞ A utilização de modelos elasto-plásticos em situações de carregamentos cíclicos, permite a desconsideração da matriz de amortecimento do material C , empregada usualmente em análises baseadas no amortecimento histerético de solos (como no método linear equivalente) ou no tradicional amortecimento de Rayleigh, C_R . De acordo com Zienkiewicz [Zienkiewicz, O.C. et al., 1999] a utilização da matriz de amortecimento pode ser necessária unicamente para materiais rígidos ou em análises onde o

comportamento tensão-deformação do material é admitido, por simplicidade, linearmente elástico.

7.2

Sugestões para pesquisas futuras

No âmbito do tema desta pesquisa serão propostos os seguintes tópicos a serem considerados:

- ☞ Estender as equações governantes para análise dinâmica de meios porosos parcialmente saturados. No anexo B é deduzido um procedimento de discretização espacial e temporal das equações governantes para este tipo de análise.
- ☞ Estender a aplicação da modelagem numérica para prever a ocorrência de fenômenos de liquefação monotônica mediante a aplicação do modelo P-Z em obras geotécnicas, especificamente em barragens e estruturas de contenção.