

1 Introdução

1.1 Aspectos gerais

Mudanças do comportamento mecânico de maciços de solo devido à aplicação de carregamentos monotônicos ou dinâmicos são responsáveis por danos significativos ocorridos em geoestruturas, tais como em barragens, aterros, encostas, estruturas de contenção, fundações, etc. Neste sentido, a ocorrência de um fenômeno denominado *liquefação de solos* [Hazen, A., 1920] em materiais saturados como areias [Castro, G., 1975] ou em areias com matriz fina de pouca ou nula plasticidade ([Finn, W.D.L., et al., 1994], [Singh, S., 1994], [Puri, V.K., et al., 1996], [Lade, P.V.; Yamamuro, J.A., 1997]) representa um tipo freqüente de resposta dinâmica desastrosa de solos.

Comumente o fenômeno da liquefação manifesta-se em depósitos de solos suscetíveis¹ submetidos a ondas cisalhantes propagadas durante um terremoto. No movimento sísmico a duração da aplicação de cada ciclo de carregamento é muito pequena em comparação com o tempo necessário para que ocorra algum tipo de drenagem (prevalece a condição não-drenada) e a tendência deste material em diminuir de volume (comportamento contrativo) durante ciclos de cisalhamento é então refletida no incremento progressivo da poropressão [Seed, H.B.; Lee, K.L., 1966]. Este efeito acumulativo produz uma redução contínua da tensão de confinamento efetiva, e conseqüentemente, uma diminuição na resistência ao cisalhamento do material.

Se durante o intervalo de duração do terremoto, a poropressão aumentar até um valor igual ao da tensão de confinamento, a tensão efetiva atuante no esqueleto sólido (*sólido*), é reduzida a zero e o material perde então a sua resistência. Dito de outra forma, o material sofre um processo de liquefação,

¹ Em solos argilosos, solos granulares secos e solos granulares densos saturados não se esperam significativa perda de resistência devido ao fenômeno da liquefação.

comportando-se como um líquido viscoso, com a ocorrência de grandes deformações que podem dar origem a diversos mecanismos de ruptura. Alguns acontecimentos catastróficos, envolvendo rupturas de barragens [Seed, H.B., et al., 1975], colapso de pontes [Ross, G., et al., 1969], deslizamento de taludes [Keefer, D., 1984], etc., representam tipos de possíveis efeitos decorrentes da liquefação de solos.

Com base no tipo do carregamento aplicado, o fenômeno pode ser classificado em: (1) *liquefação dinâmica* e (2) *liquefação monotônica ou estática*. A liquefação dinâmica acontece quando o carregamento aplicado é do tipo cíclico ou dinâmico [Robertson, P.K.; Wride, C.E., 1998], enquanto que se o carregamento for monotônico este fenômeno na literatura é conhecido como liquefação monotônica ou estática [(Kramer, S.L.; Seed, H.B., 1988), (Yamamuro, J.A.; Lade, P.V., 1997), (Olson, S.M., et al., 2000)].

De acordo com o mecanismo de ruptura observado, definem-se também as seguintes duas situações: (1) *fluxo por liquefação* e (2) *mobilidade cíclica* ([Casagrande, A., 1975], [Castro, G., 1975], [Seed, H.B., 1976], [Ishihara, K., 1993]). Colapsos causados por fluxo por liquefação são freqüentemente caracterizados por movimentos rápidos e acompanhados de grandes deformações, enquanto que na mobilidade cíclica observa-se um gradual desenvolvimento de deformações cíclicas acumulativas².

Sob o ponto de vista histórico, os danos catastróficos provocados por dois sismos ocorridos no início do século XX (Kwanto, no Japão, em 1923, e Santa Bárbara, nos EUA, em 1925) foram os principais fatores que motivaram o início da realização de estudos sobre liquefação e seus mecanismos. Estes desastres, sob perspectiva histórica, marcaram a introdução das considerações de efeitos dinâmicos em projetos da engenharia geotécnica [Mononobe, N., 1925] bem como o início das primeiras pesquisas em dinâmica de solos. No entanto, apenas 4 décadas mais tarde, em 1964, com a ocorrência de devastadores terremotos em Niigata, no Japão, figura 1.1, e no Alaska, EUA, figura 1.2, é que finalmente se constatou a necessidade urgente de se estabelecerem metodologias de análises mais adequadas, confiáveis e realistas para previsão das respostas dinâmicas de

² Seed, H.B. [Seed, H.B., 1976] inicialmente denominou este comportamento como *liquefação cíclica*.

solos sob excitação sísmica [Marcuson III, W.F., et al., 2007]. A partir de então, numerosos estudos foram desenvolvidos, tanto na área experimental como na numérica, documentados em várias publicações da literatura ([Ishihara, K., 1995], [Kramer, S.L., 1996], [Lade, P.V.; Yamamuro, J.A., 1999], [Jefferies, M.; Been, K., 2006], dentre outros).

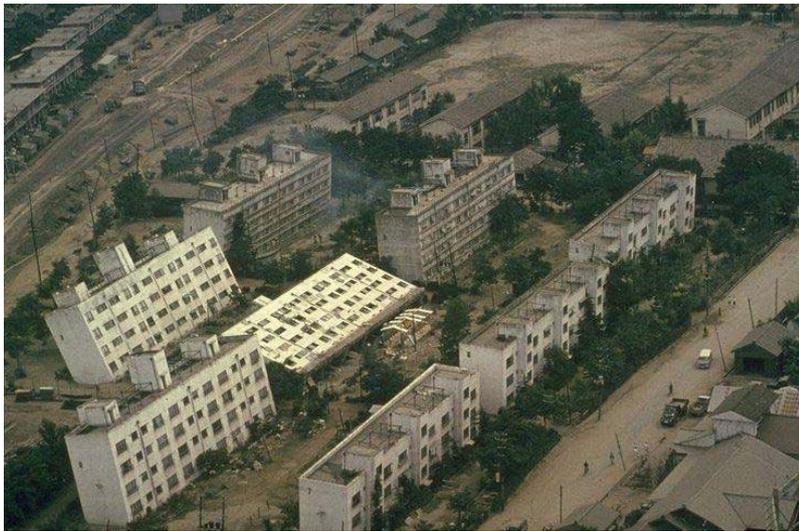


Figura 1.1 - Liquefação do solo de fundação em Niigata, Japão, 1964, causando colapso do conjunto habitacional Kawagishi-cho [Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA].



Figura 1.2 - Liquefação do solo no terremoto Good Friday, Alaska - EUA, 1964, causando grandes movimentos de massas [Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA].

O estudo da liquefação de solos trata de um problema particular da dinâmica de meios porosos, onde se analisa o comportamento dinâmico de sistemas ou de fases acopladas (sólido-fluido). Em termos gerais, a análise inicia-se com uma adequada representação das fases do solo através da utilização da formulação da mecânica dos meios contínuos ([Biot, M.A., 1955], [Malvern, L.E., 1969], [Prévost, J.H., 1980]), pela qual o comportamento dos materiais pode ser definido em função de equações diferenciais parciais conhecidas como *equações governantes* ([Bear, J., 1972], [Astarita, G.; Marrucci, G., 1974], [Slattery, J.C., 1999], [Bird, R.B., et al., 2002]). O comportamento de cada fase e as interações entre elas resultam no acoplamento dessas equações ([Lewis, R.W.; Schrefler, B.A., 1987], [Prevost J.H., 1993], [Zienkiewicz, et al., 1999], [Li, X.; Zienkiewicz, O.C., 1992], [Schrefler, B.A., 2004], [Chen, Z., et al., 2006]) que devem ainda atender a condições de contorno e iniciais apropriadas.

Geralmente, os sistemas de equações governantes não apresentam solução analítica, o que leva à necessidade do emprego de métodos numéricos, como o método dos elementos finitos, dos elementos de contorno, dos elementos discretos e das diferenças finitas, principalmente. Em uma modelagem numérica, os seguintes pontos devem ser cuidadosamente considerados [Pastor, M., et al., 2000]: (1) formulação matemática (equações governantes) para descrição apropriada do fenômeno investigado; (2) adequadas equações constitutivas para os materiais envolvidos; (3) um procedimento de discretização espacial e temporal das equações governantes, tendo em vista o cálculo de uma resposta numérica aproximada.

A formulação matemática para o caso específico da liquefação em meios porosos saturados, requer que sejam escritas: (a) equações de movimento da mistura sólido-fluido; (b) equações de movimento do fluido; (c) equações de continuidade do fluido; (d) princípio das tensões efetivas; (e) equações constitutivas dos materiais. Este sistema de equações governantes, na forma discreta, é conhecido como equações de *Biot-Zienkiewicz*.

Como as equações de movimento (ou *equilíbrio*) e de continuidade (ou *conservação de massa*) são obtidas independentemente do comportamento do material, a completa descrição do fenômeno requer equações constitutivas que representem o comportamento das fases do material perante solicitações externas. As equações constitutivas adotadas, chamadas também de *modelos constitutivos*,

devem ter capacidade de reproduzir os dois tipos de ruptura característicos na liquefação de solos (fluxo por liquefação e mobilidade cíclica) e, adicionalmente, devem também considerar as variações da resistência efetiva do solo com as variações de poropressão.

O princípio das tensões efetivas [Terzaghi K., 1936] é utilizado para estabelecer em solos saturados uma relação entre poropressões no fluido e tensões (efetivas) no sólido, podendo ser estendido para uma condição de saturação parcial [Lewis, R.W.; Schrefler, B.A., 1998]. Uma discussão da aplicabilidade numérica do princípio das tensões efetivas pode ser encontrada em Zienkiewicz [Zienkiewicz, O.C., et al., 1999].

Importantes avanços no desenvolvimento de modelos constitutivos para liquefação de solos foram feitos com o objetivo de mais bem representar os efeitos de carregamentos cíclicos. Com base na teoria da plasticidade, mencionam-se aqui, por exemplo, os modelos de superfícies aninhadas (*nested surfaces*) proposto por Mroz [Mroz, Z., et al., 1981], de superfícies limites (*bounding surfaces*) sugerido por Dafalias [Dafalias, Y.F.; Hermann, L.R., 1986], de superfícies de sub-carregamento (*subloading surfaces*) sugerido por Hashiguchi [Hashiguchi, K., 1989] e a teoria da plasticidade generalizada desenvolvido por Zienkiewicz [Zienkiewicz, O.C.; Mroz, Z., 1984], dentre outros. Outros modelos inelásticos, tais como os baseados na teoria endocrônica ([Bazant, Z.P.; Krizet, R. J., 1976], [Valanis, K.C., 1971]), teoria da hipoplasticidade ([Romano, M., 1974], [Bardet, J.P., 1990]), modelo linear equivalente [Seed, H.B.; Idriss, I.M., 1970], modelo hiperbólico-histerético [Martin, G.R., et al., 1975] são também utilizados em simulações numéricas de problemas da dinâmica dos solos. Uma descrição detalhada de modelos constitutivos para solos submetidos a carregamentos transientes pode ser obtida em Pande [Pande, G.; Zienkiewicz, O.C., 1982].

Nesta tese, o procedimento numérico adotado para a discretização das equações diferenciais governantes é o *método dos elementos finitos* (MEF), através da técnica de Galerkin para a discretização espacial e a técnica das diferenças finitas para a discretização temporal (esquema de integração temporal explícito proposto por Newmark, chamado também de *esquema de Newmark*). O processo de discretização no espaço independentemente do tempo é conhecido

como semi-discretização ([Hughes, T.J.R.; Belytschko, T., 1983], [Zienkiewicz, O.C.; Morgan, K., 1983]).

A discretização espacial das equações governantes, inicialmente proposta por Biot, considera três variáveis: deslocamento do sólido, velocidade do fluido relativo ao sólido e poropressão. Esta formulação é chamada de formulação geral ou formulação completa ou formulação **u-w-p** ([Zienkiewicz, O.C., et al., 1999], [Jeremic, B., et al., 2006]).

Embora a consideração das 3 variáveis possa ser adequada quando em associação com um esquema explícito de solução no tempo, é no entanto na maioria das vezes conveniente empregar a formulação simplificada ou formulação **u-p**, que produz resultados bastante próximos aos calculados com a formulação geral ([Chan, A.H.C., 1988], [Zienkiewicz, O.C., et al., 1990], [Zienkiewicz, O.C., et al., 1999], [Parra-Colmenares, E.J., 1996], dentre outros) com menor esforço computacional quando associada com esquemas temporais implícitos (incondicionalmente convergentes). A desconsideração da velocidade do fluido é aparentemente pouco significativa para o caso de movimentos dinâmicos de baixa frequência. Uma análise da validade desta simplificação, considerando carregamentos de baixa e alta frequência, está apresentada em Zienkiewicz [Zienkiewicz, O.C., et al., 1990].

Comumente a utilização de procedimentos numéricos para a análise de liquefação de solos não é adotada na prática, seja pela complexidade na determinação dos parâmetros do modelo constitutivo, que requer ensaios de laboratório especiais, seja pela pouca familiaridade do engenheiro geotécnico com o método de solução e com os modelos constitutivos incorporados em programas computacionais. Assim, pode-se diferenciar o *estado da prática* e o *estado de arte*. No primeiro, considera-se a aplicabilidade de procedimentos plenamente aceitos pela comunidade de engenharia, enquanto que no segundo avança-se com o estado atual de conhecimentos através da investigação de pesquisas numéricas e experimentais, geralmente no âmbito acadêmico.

O estado da prática para a avaliação da ocorrência da liquefação em solos saturados utiliza critérios para separadamente: (1) estabelecer condições de início da liquefação com o emprego de critérios de suscetibilidade; (2) determinar o potencial de ocorrência da liquefação através do cálculo de um fator de segurança obtido pela aplicação de métodos de equilíbrio limite (métodos quase-estáticos);

(3) estimar deslocamentos permanentes através de técnicas baseadas na analogia do bloco deslizante proposto por Newmark [Newmark, N.M., 1965]. Este conjunto de análises é inteiramente independente entre si e, embora simples e rápidas, pode por vezes levar a valores de acelerações e deslocamentos não-confiáveis [Byrne, P.M., et al., 2003].

O estado de arte envolve análises dinâmicas mais sofisticadas em termos de tensões efetivas, com previsão do comportamento do sólido e do fluido. O início da liquefação, os deslocamentos permanentes e a ruptura devida a fluxo por liquefação são consideradas numa única análise através do acoplamento das diversas variáveis presentes nas equações governantes. Segundo diversos autores ([Prevost, J.H., 1985], [Finn, W.D.L., et al., 1989], [Chan, A.H.C., 1995], [Byrne, P.M., et al., 2003]), a análise acoplada permite acompanhar o desenvolvimento da liquefação da mesma forma com que é observada em ensaios de laboratório, com precisão dependente dos modelos constitutivos considerados. Análises acopladas para situações de carregamentos dinâmicos podem ser executadas nos seguintes programas computacionais, comercialmente disponíveis: DYNAFLOW [Prevost, J.H., 1981], DIANA³ [Kawai, T., 1985], FLAC⁴ ([Cundall, P.A.; Board, M.A., 1988], [Itasca Consulting Group, 2005]), TARA-3 ([Finn, W.D.L., et al., 1986], [Finn, W.D.L., et al., 1989]), DIANA-SWANDYNE II⁵ (Chan, A.H.C., 1995), OpenSees⁶ (desenvolvido pelo PEERC⁷), dentre os principais.

1.2 Motivação e objetivo

O objetivo principal desta tese é a modelagem numérica da liquefação dinâmica de solos, avaliando-se os efeitos da variação da poropressão sob ação de carregamentos sísmicos. A modelagem é feita com base no MEF, implementado em um programa de computador escrito em linguagem FORTRAN, desenvolvido

³ DIANA: Dynamic Interaction Approach and Nonlinear Analysis.

⁴ FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua.

⁵ DIANA-SWANDYDNE II: Dynamic Interaction And Nonlinear Analysis – SWANsea DYNamic vErsion II.

⁶ OPEN SEES: The Open System for Earthquake Engineering Simulation.

⁷ PEERC: Pacific Earthquake Engineering Research Center

especialmente para esta pesquisa. Na formulação do MEF foi utilizada a técnica de Galerkin para discretização espacial, o esquema de Newmark para a discretização temporal e o modelo constitutivo Pastor-Zienkiewicz, ou *modelo P-Z*, para representação do comportamento dinâmico tensão-deformação do sólido, com base na teoria da plasticidade generalizada. Esta teoria, inicialmente proposta por Zienkiewicz [Zienkiewicz, O.C.; Mroz, Z., 1984] e depois adaptada para comportamento dinâmico de solos por Pastor [Pastor, M., et al., 1990], representa uma generalização da teoria da plasticidade infinitesimal tradicional para casos de carregamentos monotônicos, sem necessidade da definição prévia das funções correspondentes às superfícies de escoamento e do potencial plástico.

O movimento de expansão ou contração das superfícies de escoamento ou do potencial plástico é unicamente definido pelos vetores unitários normais às superfícies, dependentes das trajetórias de tensão durante cada ciclo: (1) carregamento; (2) descarregamento e (3) recarregamento. Esta importante característica torna menos complicada a implementação numérica do modelo constitutivo, sem a necessidade de serem aplicados algoritmos de retorno de tensão (método preditor-corretor), utilizados para verificação do estado de tensão atual em relação à superfície de escoamento, visto que a matriz constitutiva elasto-plástica não depende das superfícies de escoamento e do potencial plástico.

Nesta tese os parâmetros elásticos do modelo P-Z foram considerados dependente da tensão de confinamento efetiva ([Gutierrez, M.,; Verdugo, R., 1995] e [Cárdenas, J.L., et al., 2004]) e um novo procedimento, em relação àquele proposto por Zienkiewicz [Zienkiewicz, O.C., et al., 1999], foi implementado. No procedimento original as variáveis primárias do sistema de equações são as acelerações do sólido e a taxa de variação da poropressão no fluido, enquanto que a alternativa proposta neste trabalho estabelece uma equação similar à equação de equilíbrio para problemas estáticos, tendo como incógnitas os deslocamentos do sólido e a poropressão no fluido, calculados diretamente e com maior eficiência computacional.

1.3 Organização da tese

A presente tese compõe-se de sete capítulos, de referências bibliográficas, anexos e apêndices. No capítulo 2 apresentam-se os conceitos básicos da liquefação de solos, estabelecendo-se diferenças entre a ocorrência de fluxo por liquefação e por mobilidade cíclica. Aspectos sobre o comportamento não-drenado de areias saturadas, bem como sobre os mecanismos de iniciação e critérios de suscetibilidade à liquefação de solos, são também apresentados e discutidos.

O capítulo 3 faz uma revisão histórica sobre o desenvolvimento dos modelos constitutivos para aplicações dinâmicas, com destaque especial para uma descrição detalhada da teoria da plasticidade generalizada em areia, especificamente o modelo P-Z, enquanto que o capítulo 4 é dedicado ao estudo das equações de Biot-Zienkiewicz utilizadas em problemas de interação dinâmica sólido-fluido.

O capítulo 5 trata sobre a metodologia utilizada para solucionar numericamente as equações de equilíbrio dinâmico, com base em discretização pelo MEF. A formulação do problema através da técnica de Galerkin é discutida, bem como o esquema de Newmark para sistemas acoplados (sólido-fluido). O capítulo termina com a apresentação, na forma vetorial, do sistema discreto de equações governantes, previamente linearizadas.

O capítulo 6 é dedicado a validações do código computacional desenvolvido nesta tese, comparando-se os resultados numéricos com valores obtidos através de soluções analíticas ou outras soluções numéricas aproximadas disponíveis na literatura, enquanto que o capítulo 7 apresenta as conclusões finais do trabalho e sugestões para pesquisas futuras na modelagem da liquefação monotônica (estática) ou dinâmica de solos.

O anexo A descreve um método simplificado para avaliação do potencial da liquefação de solos, o anexo B apresenta uma proposta para a descrição das equações governantes na formulação **u-p** para condição de solo não-saturado e o anexo C contém um diagrama de blocos resumando os procedimentos adotados no código computacional.

Finalmente, nos apêndices são mostrados gráficos das histórias dos deslocamentos, velocidades e acelerações, elaborados a partir dos resultados das análises dinâmicas efetuadas no capítulo 6.

1.4

Notação utilizada

Nesta tese as formulações foram expressas com base na notação vetorial, com utilização de letras maiúsculas, gregas ou romanas, em negrito para representação de matrizes e minúsculas para vetores. Foi adotada também a notação de Voigt que permite escrever tensores de segunda ordem através de vetores e tensores de quarta ordem, como o tensor constitutivo, através de matrizes.

Na dedução das equações discretizadas do elemento finito foi utilizada a notação indicial. Para representação dos valores de uma variável em determinados intervalos de tempo, foram utilizados subscritos como indicação destes intervalos, enquanto que em processos iterativos para representação dos valores de uma variável em determinada iteração foram utilizados superescritos como indicação das iterações.