

# 1 Introdução

## 1.1 Abordagem desta pesquisa

A engenharia geotécnica aplicada à previsão e análise de terremotos tem mostrado, nestas últimas décadas, um grande avanço com relação ao entendimento do comportamento dos solos durante eventos sísmicos e seus efeitos, tanto na previsão do potencial de dano em geoestruturas, quanto na avaliação da resposta ao carregamento sísmico, em termos de deformação e serviciabilidade da geoestrutura, principalmente na condição logo após o término (final) do carregamento sísmico.

Uma profunda investigação sobre o tema do comportamento dinâmico dos solos é de grande importância para projetos de geoestruturas, tanto em regiões interplacas, onde os países andinos de América do Sul estão localizados e que apresentam vulnerabilidade de ocorrência de terremotos, quanto em regiões intraplaca, cujos eventos sísmicos possuem magnitudes menores e não estão bem associados a comportamentos tectônicos identificáveis. Atualmente, o Brasil, que está localizado em uma região intraplaca, vem desenvolvendo projetos que requerem alta segurança para as estruturas e, também, para a população.

Os sismos, em geral, podem desencadear fenômenos devastadores em estruturas e, em outros casos, rupturas de solos associados a este processo. A distribuição do dano no solo é fortemente influenciada pela resposta do solo ao efeito do sismo. Esta resposta é controlada em grande parte pelas propriedades mecânicas do solo e suas mudanças durante um carregamento sísmico. Estas propriedades e suas variações podem ser obtidas indiretamente de ensaios de laboratório e campo. Associado à resposta dinâmica do solo, é usualmente necessário prever a quantidade de deformação resultante de aplicações do carregamento, para garantir que os movimentos do solo sejam aceitáveis. Para isto, um entendimento da relação tensão-deformação do solo é fundamental.

De acordo com Ishihara (1996) o estudo do comportamento das areias sob efeitos de carregamento dinâmico implica em algumas dificuldades, visto que o comportamento tensão-deformação do solo é fortemente influenciado por muitos fatores, tais como: a trajetória de tensão; a história de tensões; a tensão de confinamento; a duração do carregamento; as condições de drenagem; e os parâmetros de estado. Assim, outras características que também podem influenciar são: o teor de finos; o teor de umidade; e a estrutura e composição do solo. Um tratamento mais detalhado para cada aspecto do comportamento do solo está além do foco deste trabalho.

Dois grandes terremotos ocorridos em 1964, de Niigata no Japão e de Alaska nos Estados Unidos, causaram destruição e mortes, constatando-se a ocorrência de ruptura e fluidificação do solo em areias fofas, e recalques diferenciais nas fundações sem apresentar danos significativos nas superestruturas. Estes devastadores eventos impulsionaram um avanço no estudo da dinâmica dos solos, um melhor conhecimento no tema de liquefação induzida por terremotos e um julgamento da importância de uma profunda investigação dos materiais geológicos que compõem as geoestruturas.

A liquefação de solos é um fenômeno no qual o solo perde grande parte da sua resistência (ou seja, sua rigidez), geralmente, num curto período, mas, longo o suficiente para que este fenômeno seja o causador de muitas rupturas, provocando mortes e perdas financeiras. Liquefação é, simplesmente, outra faceta do comportamento dos solos, o qual demanda que modelos constitutivos capturem os efeitos de densidade e nível de tensões devido ao desencadeamento de tal comportamento. O problema da ocorrência de liquefação induzida por sismos têm sido demonstrado em muitos terremotos. Um seleto número de eventos de liquefação e grandes deslocamentos, de forma bem resumida, são delineados na Tabela 1.1.

A avaliação do fenômeno de liquefação requer uma mistura da teoria constitutiva, das propriedades do solo e das determinações destas propriedades *in situ*, como também de um estudo de registros de casos históricos.

Tabela 1.1 – Alguns eventos importantes de deformação e liquefação induzida por terremotos. (adaptado e atualizado de Beaty, 2001)

<i>Terremoto</i>	<i>Eventos de Liquefação/Deformação</i>
2011 Tohoku	Deformações de calçadas, danificação em edificações, ebulição de areia e deslocamento lateral como resultado de liquefação do solo em zonas residenciais de Mihama-Ku na cidade de Chiba e no distrito de Shinminato. Recalque e entortamento de edificações devido a liquefação, ebulição de areia no Inage Kaihin Park no distrito de Isobe.
2010 Chile	Deslocamento lateral em zonas litorâneas com levantamento e subsidência de estradas e via férrea. Liquefação em depósito de areia. Recalques e ruptura de fundações de pontes e graves danos em estruturas na cidade de Concepcion, Lota e Talca.
2007 Pisco	Deslocamento lateral na zona marítima de Canchamamá. Levantamento e danificação da estrada principal Panamericana Central devido a deslizamentos do terreno e liquefação. Recalques de até 0.9m devido a liquefação induzida em residências de Tambo de Mora em Pisco.
2003 Tokachi-Oki	Danificação de diques nas zonas de Tokachi River. Colapso de estruturas acompanhados de subsidência e suaves deslocamentos laterais. Deslocamento lateral em taludes moderados na região de Kyowa em Tanno. Escorregamentos do terreno em sítios de Tanno e Tikami.
1999 Chi-Chi	Subsidências, deslocamento lateral e encurvamento de estruturas. Grandes deslizamentos em zonas em Taiwan. Ruptura de taludes e ocorrência de Liquefação em algumas zonas em Chi Chi.
1995 Kobe (Hyogoken-Nanbu)	Deslocamentos de amurada do cais e construções litorâneas. Danificação de fundações de estruturas. Ruptura e geração de fendas em 4 reservatórios em barragens de pequeno porte.
1994 Northridge	Fratura de tubulações e rompimento de pavimentos. Fluidificação dos solos dos taludes na barragem de contenção de rejeito Tapo Canyon.
1989 Loma Prieta	Danificação das construções do Distrito de Marina.
1985 Central Chile	Grande danificação em barragens de rejeito.
1979 Izu-Oshima	Deslizamentos na barragem de contenção de rejeito Mochikoshi.
1971 San Fernando	Fluidificação dos solos do talude de montante da barragem de San Fernando superior. Deslocamentos de 2m na barragem de San Fernando inferior. Grande deslocamento lateral em talude moderado.
1968 Tokachi-Oki	Ruptura da barragem Kona Numa de via férrea.
1965 Chile	Ruptura de numerosas barragens de contenção de rejeito.
1964 Niigata	Ruptura nos suportes de edificações e pilares de pontes. Ruptura de uma barragem de via férrea e amurada do cais. Incalculável danificação de edificações devida principalmente a Liquefação.
1964 Anchorage	Estruturas e construções litorâneas que sofreram escorregamento massivo do terreno. Mais de 250 pontes entortadas.
1957 San Francisco	Fluidificação do solo dentro do lago Merced.
1940 El Centro	Ruptura do dique Canal Solfatara.
1925 Santa Barbara	Ruptura da barragem Sheffield.

Uma avaliação do comportamento dos solos, levando em consideração estes aspectos, requer a utilização de modelos constitutivos formulados, em termos de tensões efetivas. Embora a teoria de elasticidade considere que o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de um solo são constantes, os solos não são elásticos e estes apresentam comportamento elasto-plástico não-linear. Assim, seria irrealístico fazer uma

simples abordagem elástica, como convenientemente usada em alguns casos, então, surge uma questão: como ignorar as propriedades plásticas do solo?. O interesse tem aumentado em obter formulações mais elaboradas sobre a relação tensão-deformação para ambos os casos de solos coesivos e não coesivos que incorporem inelasticidade, endurecimento (*strain-hardening*) e dependência de tensões. O modelo UBCSand (Byrne *et al.* 1995; 2004) é um dos modelos atualmente mais usados, calibrado com ensaios de cisalhamento simples em laboratório e relacionados com ensaios de campo. Este modelo tem capturado o comportamento dinâmicos dos solos e seus efeitos, como também a previsão da ocorrência de liquefação em solos potencialmente suscetíveis.

A previsão e análise da resposta sísmica dos solos assim como dos efeitos que os sismos possam causar são, hoje em dia, possíveis de solucionar, com uma maior precisão e rapidez comparado com uns 20 anos atrás. Isto, graças ao aprimoramento de técnicas numéricas e ferramentas computacionais que resolvem e modelam estes tipos de problemas. Em geral, os programas de geotecnia permitem a incorporação (ou já trazem incorporados) de modelos constitutivos de solos que governam o comportamento dos materiais geológicos.

Estas técnicas numéricas empregam soluções implícitas (passo de tempo arbitrário com esquema incondicionalmente estável) ou explícitas (passo de tempo deve ser menor do que o passo de tempo crítico)<sup>1</sup>. Algumas vantagens e limitações se revelam ao empregar uma técnica, principalmente quando o problema envolve dinâmica, como por exemplo, o tradicional Métodos dos Elementos Finitos (MEF), que frequentemente combina as matrizes dos elementos em uma única matriz de rigidez global, enquanto que normalmente, esta operação não é realizada com o Método das Diferenças Finitas (MDF), já que existe uma relativa eficiência em gerar equações de diferenças finitas a cada passo, entre outras diferenças, e isto é muito importante quando se trabalha com problemas de dinâmica.

Neste trabalho, o programa FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*), de diferenças finitas, foi usado como ferramenta numérica para a previsão das respostas sísmicas, sendo incorporado o modelo constitutivo UBCSAND para os solos arenosos.

---

<sup>1</sup> cuja principal diferença está na forma em como estas técnicas abordam as equações a derivar-se, e cujo resultado é quase idêntico e independente da técnica usada.

### 1.1.1 Estudo de caso

Atualmente no Brasil, pode-se identificar um número expressivo de projetos direcionados a estruturas especiais, os quais exigem um nível de segurança elevado. Ainda que o Brasil não seja um país de características tectonicamente ativas, no projeto ou na reavaliação de estruturas especiais faz-se necessário realizar uma análise sísmica com o uso de ferramentas e métodos mais atuais como aqueles empregados em países mais desenvolvidos nesta linha de pesquisa.

Neste trabalho, um estudo de caso foi escolhido para aplicar todos os conceitos anteriormente introduzidos. Assim sendo, o projeto trata de obra costeira marítima que contempla cais que suportam estacas. Esta obra forma parte de um complexo marítimo de cais e docas destinados à proteção de submarinos nucleares.

Este projeto sugere certa complexidade visto que regiões costeiras são normalmente conhecidas por apresentarem solos naturalmente “problemáticos”. Projetos de cais suportando estacas é atualmente um projeto completo em termos de complexidade, neste há, também, a interação de materiais geotécnicos com elementos estruturais tanto estática quando dinamicamente. Este trabalho de pesquisa teve como base outros trabalhos com certa similaridade encontrados na literatura, como os de: Takahashi & Takemura (2005); Dickenson & McCullugh (2006) e Chin *et al.* (2008). Todos estes casos apresentaram resultados de ensaios de centrífuga, com foco nos estudo dos mecanismos de ruptura das estacas por efeitos de liquefação, bem como a verificação dos deslocamentos permanente das geoestruturas.

## 1.2 Motivação e objetivos da tese

### Motivação

Muitos dos países sul-americanos estão expostos à ocorrência de fenômenos naturais de grande magnitude, dentre esses, os terremotos, que geram grandes perdas e

danos, tal como a destruição total de estruturas e no caso de solos, podem causar rupturas ou grandes danos às geoestruturas.

No caso do Brasil, está havendo um aumento na demanda de projetos especiais, tanto aplicados a mineração quanto a instalações nucleares que requerem uma alta segurança das suas estruturas. E, mesmo que o Brasil não esteja localizado em uma região tectonicamente ativa, estes projetos precisam ser cuidadosamente projetados para garantir segurança diante qualquer evento de proporcionalidade. Hoje em dia é um tema de um grande interesse para a comunidade geotécnica de terremotos, devido ao fato de que acertos na previsão das respostas beneficiam aos projetos e sua população.

Conseqüentemente, torna-se necessário o estudo do comportamento que estas geoestruturas teriam perante os sismos para uma melhor projeção da geoestrutura. Esse estudo implica o conhecimento dos efeitos, a aplicação de técnicas numéricas, analíticas e empíricas, modelos constitutivos para solos, que lidem com estes tipos de materiais geológicos para a previsão de repostas sísmicas.

### **Objetivos da tese**

Partindo da motivação da tese, o desenvolvimento desta foi organizada pelos objetivos, os quais podem ser discriminados da seguinte forma:

1. O estudo do comportamento de materiais granulares quando submetidos a carregados cíclicos e dinâmicos, para o entendimento dos efeitos e desempenho que as geoestruturas e materiais de fundação possam ter quando submetidos a eventos sísmicos;
2. Estudo e aplicabilidade de métodos simplificados para avaliação do potencial de liquefação em materiais granulares saturados;
3. Estudo dos aspectos sísmicos e do uso de ferramentas numéricas requeridas para análises sísmicas;
4. Elaborar os lineamentos necessários para a realização de uma análise sísmica (estado da prática) por meio da aplicabilidade de um caso padrão completo. Iniciando por uma avaliação do potencial de liquefação dos materiais de fundação e corpo da geoestrutura, conseqüentemente, uma análise numérica não-linear para a

quantificação dos deslocamentos permanentes com o emprego de modelos constitutivos específicos para os materiais em estudo.

### 1.3 Organização da tese

A presente tese é composta por sete capítulos, referências bibliográficas e três anexos. No capítulo 2 apresenta-se uma revisão geral sobre o comportamento tensão-deformação das areias saturadas, sob carregamento monotônico e cíclico a partir de ensaios de laboratório. Esta revisão visa descrever qual seria o comportamento esperado destes materiais granulares ante solicitação sísmica. No capítulo 3 apresenta-se uma revisão do fenômeno de liquefação e pós-liquefação em areias saturadas, descrevendo e comparando metodologias empíricas aplicadas a camadas horizontais e talude de solos. O capítulo 4 faz uma revisão dos principais aspectos requeridos na dinâmica de solos aplicados a geoestruturas. Além disso, a descrição das características das propriedades dinâmicas dos solos, sua dependência com as deformações e obtenção indireta de ensaio de laboratório e *in situ*. No capítulo 5 descreve-se os diferentes métodos numéricos e procedimentos que são usualmente empregados para estimativa da resposta do terreno e verificação dos deslocamentos permanentes de geoestruturas, quando submetidas a solicitações sísmicas. O capítulo 6 descreve o modelo constitutivo para solos arenosos a ser usado no estudo de caso, condizente com o comportamento cíclico esperado. E o último capítulo da tese é totalmente dedicado ao estudo de um caso padrão onde se faz uma análise integrada que contempla a avaliação da liquefação sísmica em areias e a modelagem numérica não-linear. Assim como, os procedimentos, as técnicas numéricas e os aspectos desta modelagem que estão relacionadas a este tipo de análises. Destacando, a partir destas avaliações, as vantagens e limitações que a análise sísmica abrange. Finalmente, ressaltam-se as conclusões, críticas e sugestões para futuras pesquisas no tema.