

# 1 Introdução

## 1.1. Considerações Iniciais

A resposta dos sistemas estruturais com a consideração de uma base flexível tem sido objeto de grande interesse na dinâmica das estruturas. Isto porque a maioria das estruturas ou obras civis é apoiada direta ou indiretamente sobre sistemas de base que apresentam alguma flexibilidade, como estruturas apoiadas em solo ou sistemas de apoio com dissipação de energia como aqueles usados em sistemas de isolamento de base. Um tópico de particular interesse nesta área é o estudo da resposta dinâmica do sistema base-estrutura submetido a ações sísmicas. Os eventos sísmicos, originados por múltiplas causas, estão presentes em praticamente toda a superfície terrestre em menor ou maior intensidade e magnitude, e representam uma das solicitações dinâmicas mais complexas a serem analisadas na engenharia, tanto pela violência da sua ocorrência como pelo grande conteúdo de frequências que este tipo de solicitação pode apresentar. A importância do estudo deste tipo de ação considerando uma base flexível está ligada à potencial característica do sistema de base mudar suas propriedades mecânicas em função das frequências de vibração. Assim, a resposta da estrutura pode ser modificada de forma acentuada quando considerada uma base deformável em vez de uma base fixa convencional.

Na presente tese, que é uma continuação de pesquisas anteriores, é adotado como base para as implementações numéricas o programa computacional de análise não linear CA-ASA, iniciado por Silveira (1995), e que tem sido modificado com novas implementações no decorrer dos últimos anos por vários autores, formando uma linha de pesquisa orientada ao estudo de estruturas reticulares não lineares. A presente tese tem por base a versão do CA-ASA modificada por Silva (2009), que possui as ferramentas necessárias para a análise não linear estática e dinâmica de pórticos com consideração de plastificação de elementos estruturais e ligações semirrígidas com comportamento não linear. Na

presente tese são usadas as rotinas referentes à montagem e análise dinâmica no domínio do tempo de estruturas reticuladas pelo método de Newton-Raphson para sistemas com não linearidade geométrica. Sobre esta base computacional são feitas as modificações e incorporações necessárias ao estudo da flexibilidade dos apoios, inclusão de solicitação sísmica, algoritmos de integração numérica e demais ajustes necessários à simulação dos exemplos apresentados na presente tese.

## **1.2. Objetivos**

A presente tese tem como objetivo estudar o comportamento não linear de estruturas reticulares planas flexíveis e esbeltas (vigas, pórticos, arcos, etc.) sob ações sísmicas, considerando o efeito da deformabilidade da base e a não linearidade geométrica, usando modelos unidimensionais elasto-plásticos para representar a base flexível. Ênfase é dada à análise dinâmica não linear no domínio da frequência e à obtenção das curvas de ressonância não linear. A partir destas ferramentas, estuda-se a variabilidade da resposta no tempo quando submetidos a diversas solicitações sísmicas reais e geradas artificialmente.

## **1.3. Revisão Bibliográfica**

### **1.3.1. Não Linearidade Geométrica e Física**

O estudo da não linearidade geométrica das estruturas tem sido um tema relevante na análise estrutural, especialmente no caso de estruturas esbeltas como pórticos, arcos, estruturas reticuladas, etc. Em virtude da esbeltes dos membros estruturais e/ou do sistema como um todo, elas são susceptíveis a sofrer grandes deslocamentos e/ou deformações, tornando estes sistemas sensíveis a perda de estabilidade ou danos. Na análise de sistemas estruturais não lineares, geralmente usa-se atualmente o método dos elementos finitos. Dentre as técnicas de análise não linear por elementos finitos, destaca-se o procedimento incremental-iterativo, onde em cada incremento ou passo de análise é calculado o equilíbrio da estrutura.

Referências básicas da análise não linear por elementos finitos podem ser encontrados em Bathe (1996) e Crisfield (1991).

No estudo da não linearidade geométrica, as formulações são divididas de acordo com o tipo de referencial usado. Os dois tipos de referenciais mais usados na literatura são o referencial Lagrangiano total (RLT), que é caracterizado por ter como sistema de referência a configuração inicial da estrutura indeformada, e o referencial Lagrangiano atualizado (RLA), onde o sistema de referência para cada passo de análise corresponde à configuração do sistema no passo anterior. Distintos pesquisadores têm desenvolvido formulações em referenciais Lagrangianos totais e atualizados. Galvão (2004) e Silva (2009) destacam os trabalhos feitos por Wen e Ramhinzadeh (1983), Chajes e Churchill (1987), Goto e Chen (1987), Wong e Tin-Loi (1990), Alves (1993), Torkamani *et al.* (1997) e Pacoste e Erikson (1995, 1997) como contribuições importantes no estudo de formulações Lagrangianas.

Estudos comparativos entre as formulações não lineares geométricas têm também despertado o interesse de muitos pesquisadores. Wong e Tin-Loi (1990) e Alves (1993b) mostraram que os resultados obtidos em referencial Lagrangiano total tendem a se afastar do comportamento real à medida que a configuração deformada se distancia da original. Galvão (2000) programou e comparou várias formulações não lineares, avaliando a sua eficiência computacional através do estudo de pórticos planos.

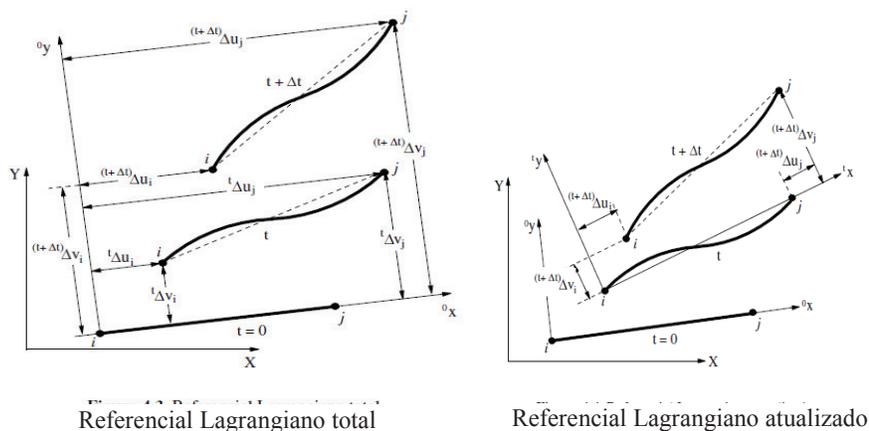
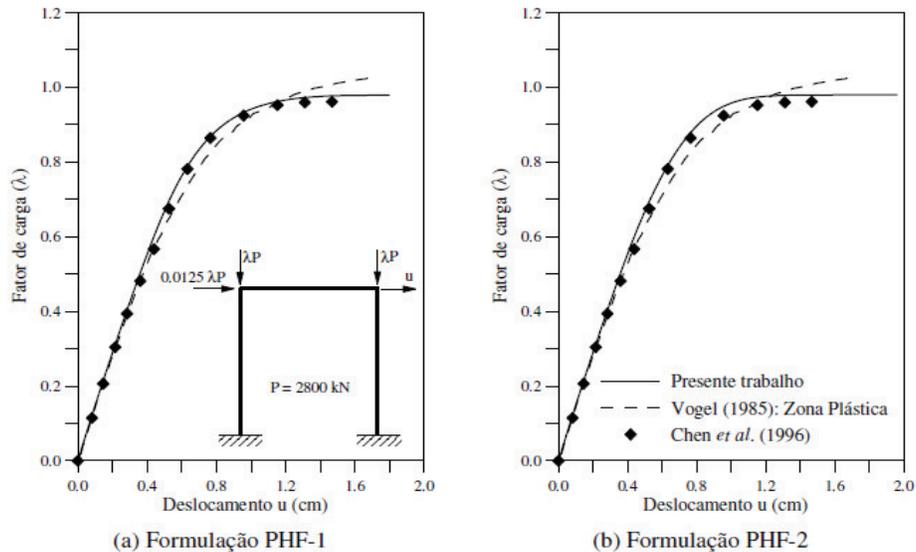


Figura 1.1 – Referenciais Lagrangianos. Ref. Silva (2009).

Outro tipo de referencial usado na análise não linear geométrica é o referencial corrotacional. Formulações baseadas em referencial corrotacional são caracterizadas por utilizarem eixos ortogonais ligados aos extremos dos elementos que se movimentam conjuntamente com as deformações. O cálculo da matriz de rigidez e do vetor de força interna é feito usando o campo dos deslocamentos naturais, ou seja, os que causam deformação efetiva no elemento. Dentre os autores que estudaram formulações em referencial corrotacional, pode-se citar: Wempner (1969), Belytscho e Hsieh (1973), Crisfield (1990) e Pacoste (1998). Na presente tese são empregadas apenas formulações em referencial Lagrangiano atualizado.

Além da não linearidade geométrica, a não linearidade física ou de material é um tópico importante na análise não linear de pórticos, em especial pórticos metálicos. Diversos pesquisadores têm estudado e proposto metodologias para a consideração de comportamentos não lineares do material em estruturas esbeltas. Dentre estes pode-se citar Chen e Sohal (1995), Chen *et al* (1996) e Chan e Chui (1997, 2000). Recentemente, Silva (2009) abordou este tema através do estudo de pórticos planos de material com comportamento elasto-plástico (ver Figura 1.2).

No caso de pórticos metálicos, o estudo do comportamento semirrígido das ligações é uma linha de pesquisa de muito interesse, já que a distribuição de esforços e a estabilidade deste tipo de estruturas variam sensivelmente com o tipo de ligação considerada. Distintos pesquisadores têm estudado o comportamento das ligações em estruturas metálicas. Galvão (2000) destaca como um dos primeiros estudos sobre a avaliação da rigidez de uma ligação metálica o trabalho de Wilson e Moore (1917) na Universidade de Illinois. Mais recentemente, pode ser citado o trabalho de Seculovic e Salatic (2001), que propuseram o elemento viga-coluna híbrido, incluindo a ligação como um grau de liberdade interna de rotação. Formulações para análise de pórticos com ligações semirrígidas podem ser encontradas também em Chen *et al*(1996), Chan e Chui (2000) e Xu (2001). Dentre os estudos mais recente em estruturas metálicas com ligações semirrígidas podem ser citados os trabalhos de Galvão (2004) e Silva (2009), que estudaram pórticos metálicos planos submetidos a cargas estáticas e dinâmicas. Silva (2009) inclui também a consideração do comportamento não linear físico do elemento em conjunto com o comportamento semirrígido não linear das ligações.



**Figura 1.2 – Análise não linear geométrica e inelástica de pórtico metálico. Ref. Silva (2009).**

### 1.3.2. Aspectos de Dinâmica Estrutural e Análise Sísmica

Dentro da análise estrutural, a dinâmica de estruturas constitui-se como um tópico de relevante importância, já que na prática as estruturas estão constantemente submetidas a ações que variam com o tempo. Vários fenômenos estruturais importantes, como a perda de estabilidade, são de natureza dinâmica. Conceitos básicos da dinâmica das estruturas podem ser encontrados, por exemplo, nos livros de Timoshenko e Young (1965), Clough e Penzien (1995) e Paz (1997).

Um item de relevante importância no estudo da análise dinâmica é o estudo de sistemas estruturais submetidos a excitações sísmicas. De diferentes origens, os fenômenos sísmicos estão presentes em praticamente toda a superfície terrestre em maior ou menor intensidade. Este item é abordado pelos autores anteriormente citados como uma subdivisão ou capítulo de suas correspondentes publicações. Em todas elas os sismos são representados por um deslocamento da base da estrutura. Chopra (1997) apresenta um estudo mais detalhado da chamada engenharia de sismos ou engenharia sísmica abordando diversos aspectos da análise linear de estruturas submetidas a eventos sísmicos. Recentemente, Villaverde (2009) publicou um amplo estudo dos conceitos básicos que envolvem

a engenharia de sismos, sendo esta publicação particularmente importante para a realização do presente trabalho, já que resume uma grande quantidade de aspectos práticos referentes a este assunto, tais como elementos de dinâmica estrutural, elementos de sismologia e métodos de solução para problemas dinâmicos com sismos.

Um aspecto importante na análise sísmica é a geração de sismos artificiais, isto porque geralmente os registros de aceleração sísmica no lugar de interesse normalmente são insuficientes, pouco disponíveis, ou não levam em conta as características particulares do lugar do projeto estrutural (condições de sítio). Nestes casos, é necessária a geração de registros artificiais, obtidos a partir de registros de sismos próximos, buscando sempre manter uma compatibilidade no conteúdo de frequências. Uma das formas mais adotadas para a geração de sismos é através do método de superposição aleatória de harmônicos, partindo de certo espectro de potência especificado em projeto ou de um sismo característico da região. Algoritmos simples para a geração de sismos artificiais são mostrados em Roehl (2000) e Park e Chang (1997), nos quais o sismo é gerado por superposição de harmônicos. A cada harmônico é adicionado um ângulo de fase gerado randomicamente, dando assim o caráter aleatório ao processo. Cabe ressaltar que a análise sísmica com fins de projeto deve levar em conta a característica aleatória do evento sísmico. Em adição à análise determinística, deve-se adotar um método de análise estocástica (Almeida, 2002).

Outro aspecto importante na análise dinâmica é o estudo dos sistemas estruturais não lineares no domínio da frequência, já que a resposta dinâmica de uma estrutura pode variar substancialmente segundo as propriedades em frequência do sistema e da excitação que age sobre esta, principalmente na análise de estruturas sob excitações sísmicas as quais possuem grande conteúdo de harmônicos. A distribuição e intensidade destes harmônicos, caracterizados pela função densidade de espectro de potência, pode dar a informação sobre a faixa de valores de frequências nas quais a potência do sismo é concentrada, sendo mais perigosos para as estruturas que possuem frequências de vibração natural próximas a estas regiões de concentração. Um desafio para analisar a resposta em frequência das estruturas é a transformação do sistema de equações não lineares de movimento, geralmente formulado no domínio do tempo, para o domínio da frequência. Para isto, diversos métodos têm sido propostos na literatura. Dentre

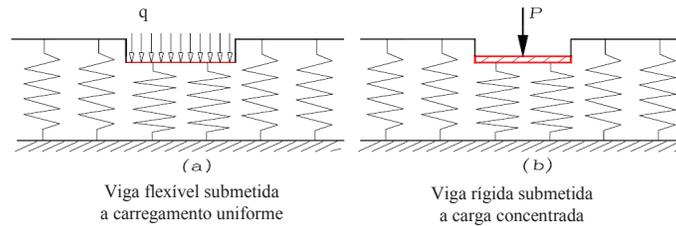
eles podem ser destacados métodos de transformação integral, tais como os métodos da transformada de Fourier e transformada de Laplace, usados por Fybra (1972) e Kim (2005) para analisar sistemas de vigas submetidos a cargas móveis ou por Wolf (1985) para analisar sistemas discretos submetidos a solicitações dinâmicas considerando iteração solo-estrutura. Um dos métodos mais populares para a passagem das equações de movimento para o domínio da frequência é o método do balanço harmônico, MBH. Lau *et al* (1981) formulou um processo incremental do método do balanço harmônico, para analisar vibrações não lineares em sistemas elásticos. Cheung e Chen (1990) estudaram as vibrações de sistemas com não linearidade cúbica associando o processo incremental ao método de Galerkin para a obtenção do sistema algébrico de equações não lineares. Já Chen *et al.* (2001), generaliza esta metodologia para a consideração de não linearidades cúbicas e quadráticas de sistemas reticulares modelados através de elementos finitos. Outro aspecto importante no uso do MBH é a solução do sistema algébrico de equações não lineares. Para isto são necessárias técnicas de solução tais como o método de Newton Raphson, usadas por Lau *et al* (1981), Cheung e Chen (1990) e Chen *et al* (2001). Porém este método não é apropriado se houver presença de pontos limites de frequência ao longo da curva amplitude-frequência. Para salvar estes inconvenientes são necessários métodos de continuação como o método do controle de arco usado por Ferreira e Serpa (2005).

Um tema de estudo que tem atraído recentemente a atenção dos pesquisadores no ramo análise de estruturas sob ações sísmicas é o estudo da resposta não linear de uma estrutura perante a uma sucessão ou repetição de eventos sísmico, centrado no efeito sobre a integridade do sistema estrutural. Podem ser citadas nesta área as publicações de Abdelnaby (2012), que estudou o efeito de vários sismos em sistemas de concreto reforçado, Liolios e Lioslios (2013), que estudou efeitos de ações sísmicas múltiplas sobre pórticos reforçados com elementos de cabo, e Sarno (2013), que estudou o efeito de ações sísmicas múltiplas sobre as resposta de sistemas inelásticos.

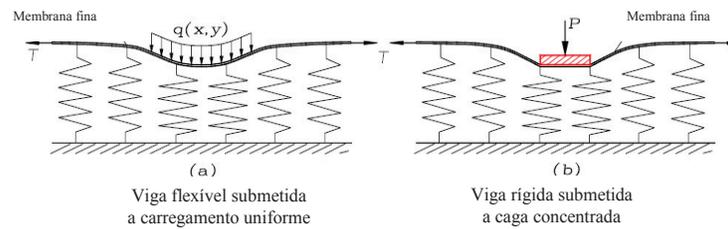
### 1.3.3. Consideração de base flexível

A interação base-estrutura torna-se um tópico imprescindível na abordagem de problemas de estruturas submetidas a sismos, já que a muitas estruturas são apoiadas sobre uma base deformável. A consideração de uma base flexível que interage com a estrutura tem sido estudada por uma grande quantidade de pesquisadores. Uma das hipóteses mais simples é considerar o sistema de base como um meio elástico (base elástica) que interage com a estrutura, como proposto em Hetenyi (1946), Vlasov (1960) e Aristizábal-Ochoa (2003). Com base nesta consideração, existe uma grande quantidade de modelos para representação da base considerada como meio elástico. Selvadurai (1979) descreve os modelos de fundação elástica mais usados na literatura. Este tipo de representação de base resulta vantajoso para a formulação do problema e sua posterior solução, porém não considera aspectos importantes intrínsecos à natureza de uma boa parte de sistemas de base flexível, tais como a não linearidade física, a propagação de ondas e a variação das propriedades da base com a frequência de vibração, principalmente quando se considera a interação solo-estrutura. No entanto, em alguns casos particulares, a hipótese de considerar o solo como meio elástico continua sendo usada como uma ferramenta útil, como pode ser observado nos trabalhos de Kim (2005), Nguyen (2008), Nguyen e Duhamel (2008), e Paullo (2010), onde se estudam vigas submetidas a cargas móveis apoiadas em fundação elástica. Os modelos mais utilizados na literatura são apresentados na Figura 1.3.

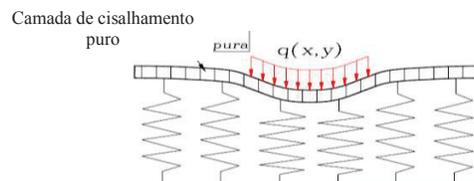
## a) Modelo de Winkler



## b) Modelo de Filomenko-Borodich



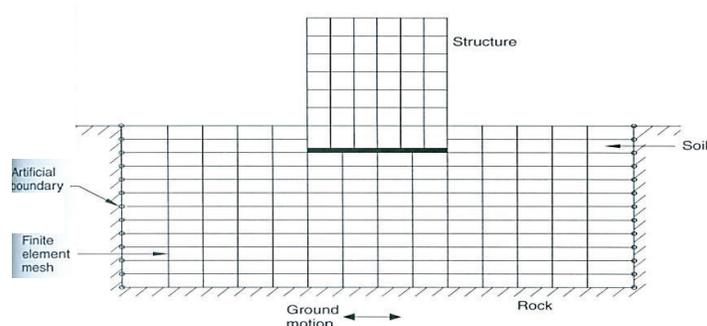
## c) Modelo de Pasternak



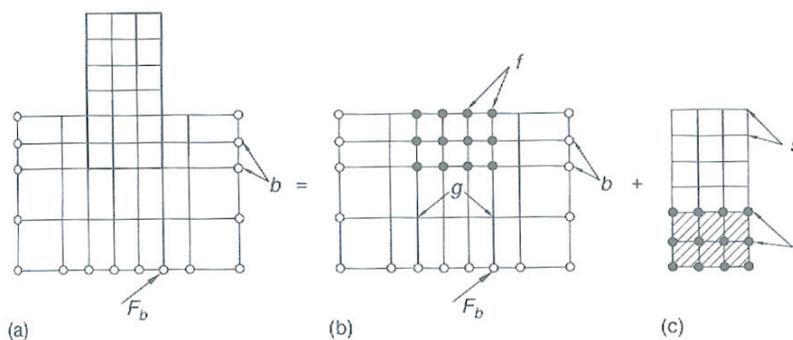
**Figura 1.3 – Modelos de solo como meios elásticos contínuos. Ref. Paulo (2010).**

Como indicado anteriormente, a hipótese de meio elástico pode ser uma ferramenta prática e de fácil emprego em alguns problemas. Porém, em muitos casos, é necessária a consideração de modelos mais precisos para modelar a base flexível, incluindo seu comportamento inelástico e variação de parâmetros de resistência com o tempo e a frequência. Formalmente, uma análise de interação base-estrutura em elementos finitos consiste em modelar conjuntamente o sistema de base como uma estrutura contínua com características próprias em contato com a superestrutura ou edificação. Para esta análise é necessário fazer uma estimativa da porção do sistema de base que interage com a estrutura. Neste tipo de análise conjunta são empregadas duas técnicas de análise. A primeira é chamada método direto, no qual é analisado conjuntamente o sistema de base e a estrutura como um único sistema. Esta técnica, embora seja a mais próxima do real, leva a um esforço de cálculo muito elevado, principalmente em análises dinâmicas. A segunda

técnica é a chamada subestruturação, que consiste em dividir o problema em dois sistemas, um formado pela porção do sistema de base que interage com a estrutura e outro formado pela estrutura. Nesta análise calcula-se em primeiro lugar a resposta do sistema de base e em uma segunda etapa é considerada a estrutura, sendo que a solicitação na estrutura corresponde à imposição de deslocamentos de base que foram calculados na primeira etapa. Este método é aplicado também por alguns softwares comerciais, por ser um processo mais rápido que o método direto. Estes métodos de análise são descritos em Villaverde (2009), quem aplica estes métodos para modelar a interação base-estrutura sendo a base composta por solo. As duas técnicas são ilustradas na Figura 1.4.



a) Método Direto

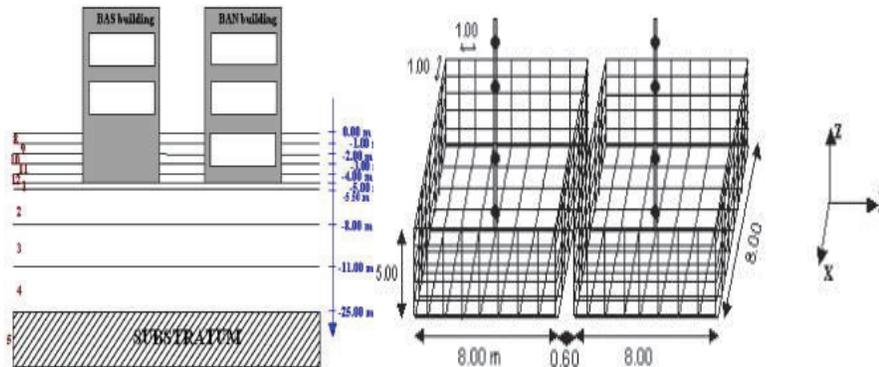


b) Método de Subestruturação

**Figura 1.4 – Métodos diretos e de sub estruturação na análise de interação solo-estrutura. Ref. Villaverde (2009).**

Uma referência básica no estudo do comportamento dinâmico da interação base-estrutura, quando a base é composta por solo, é o trabalho de Wolf (1985), que apresenta um estudo detalhado dos elementos que envolvem a análise da

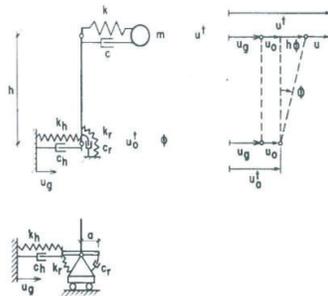
interação solo-estrutura, tais como modelagem do solo, propagação de ondas no solo, modelagem da superestrutura, solução do sistema de equações, análise na frequência, entre outros. Estudos considerando o solo como um contínuo em geral requerem grande esforço de cálculo. Seu emprego é muito importante em problemas onde grande parte da estrutura está em contato com o solo, tais como túneis, estacas e pavimentos, entre outros. Trabalhos nesta área foram realizados por, dentre outros, Bull (1994), que desenvolveu um estudo do comportamento dinâmico de blocos de fundação, adotando o método de elementos finitos para modelar a estrutura e o método de elementos de contorno na modelagem do perímetro do solo. Hashash *et al.* (2001) estudaram estruturas subterrâneas sob ação sísmica, considerando propagação de ondas em meios não lineares. Dentre os últimos estudos podem ser mencionados os trabalhos de Alsaleh e Shahrour (2009), que estudam a influência do comportamento plástico do solo na interação solo-estrutura de estacas submetidas à ação sísmica, Sáez *et al* (2011), que estuda recalques em prédios causados por eventos sísmicos; e Clouteau *et al.* (2012), que estudam a interação entre prédios com apoios próximos, como ilustra a Figura 1.5.



**Figura 1.5 – Esquema e modelo de elementos finitos no estudo de interação estrutura-solo-estrutura através de modelo contínuo. Ref. Clouteau et al. (2009).**

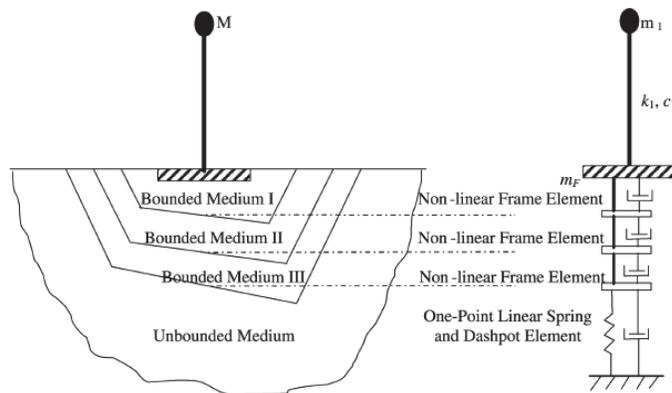
É importante destacar, que os métodos que modelam o sistema de base como um contínuo são os mais adequados quando o conhecimento do comportamento da resposta do sistema de base é de interesse, como, por exemplo, no estudo de fundações de estruturas de grande porte tais como túneis, viadutos, barragens e diques. Dentre estes estudos podemos citar os trabalhos de Carvalho (2001), que estuda problemas geotécnicos de sistemas solo-estrutura em túneis e

dutovias, acoplando o método de elementos finitos à transformada de Fourier para a redução do problema tridimensional a bidimensional, e o trabalho de Hurtado (2009), onde se estuda o potencial de liquefação de uma fundação de barragem pertencente a um sistema de lixiviação de minérios quando submetidos a eventos sísmicos. Em muitos problemas de interação base-estrutura, quando o objetivo principal é analisar a resposta da estrutura, o emprego de modelos simplificados que representem o sistema de apoio resulta em uma ferramenta útil e de análise significativamente mais rápida que os modelos contínuos. Uma aplicação desta metodologia é vista em Wolf (1994), que faz um amplo estudo de diversos problemas de interação solo-estrutura modelando o sistema de base composto por solo através de sistemas discretos do tipo mola-amortecedor, demonstrando que, em geral, esta simplificação fornece respostas próximas às obtidas com modelos contínuos. Um exemplo é ilustrado na Figura 1.6.



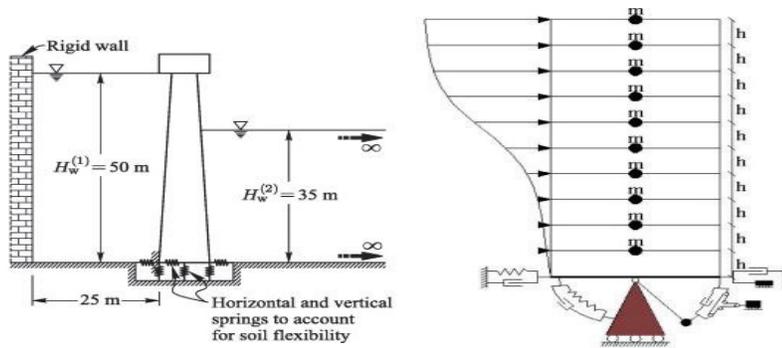
**Figura 1.6 – Sistema discreto de interação base-estrutura. Ref. Wolf (1994).**

Um estudo empregando esta técnica foi publicado por Halabian (2002), que representa a porção de sistema de base composta por solo que interage com a estrutura através de barras unidimensionais não lineares cujas componentes de rigidez e amortecimento são calculadas com base nas soluções fundamentais do solo (Figura 1.7).



**Figura 1.7 – Representação de solo por sistema de barras unidimensionais. Ref. Halabian (1994).**

Esta metodologia é amplamente utilizada na atualidade para o estudo do comportamento de estruturas considerando o efeito de base flexível, com grande aplicabilidade na interação solo-estrutura. Por exemplo, Miquel e Bouaanani (2011) estudam uma estrutura esbelta submersa apoiada em uma fundação representada por um sistema de molas verticais e horizontais. Viana (2012) estuda a resposta de sistemas de pórticos submetidos a cargas cíclicas transmitidas por compressores alternativos, onde os apoios são sistemas de mola-amortecedor que simulam o solo de fundação. O trabalho mais recente encontrado nesta revisão bibliográfica com respeito ao tema é o artigo de Ganjavi e Hao (2012) que apresenta um estudo paramétrico de um sistema de vários graus de liberdade apoiado em uma base flexível, sendo esta representada por um sistema discreto mola-amortecedor, modelado segundo a metodologia de Wolf (1994) (veja Figura 1.6.).



**Figura 1.8 – Modelos unidimensionais de solo. Esquerda: Sistema de molas Ref. Miguel e Bouaanani (2011). Direita: Sistema de mola-amortecedor Ref. Ganjavi e Hao (2012).**

#### 1.4. Organização e Descrição da Tese

No presente Capítulo é feita uma pequena revisão bibliográfica sobre aspectos relacionados aos temas de estudo da presente pesquisa, tais como análise estática e dinâmica não linear de pórticos planos, solicitações sísmicas e interação solo-estrutura, sendo descrito em cada caso as técnicas e modelos utilizados na literatura.

No Capítulo 2 é apresentada a formulação do elemento finito não linear, inclusão de ligação semirrígida no elemento, formulação para análise dinâmica no domínio do tempo, algoritmos de integração no tempo e as adaptações na formulação dinâmica no tempo para a consideração da flexibilidade do solo que simule o efeito da interação solo-estrutura.

No Capítulo 3 é feita uma descrição resumida sobre aspectos relacionados com a excitação sísmica, assim como a formulação para a geração de sismos artificiais.

No Capítulo 4 são apresentados diversos exemplos numéricos para validação das formulações apresentadas nos Capítulos 2 e 3, assim como para o estudo de características dos sistemas submetidos à ação sísmica.

No Capítulo 5 é apresentada a formulação para a análise dinâmica não linear no domínio da frequência, onde são descritas as técnicas usadas para a passagem do sistema de equilíbrio dinâmico no domínio do tempo para o domínio da frequência e para a resolução do sistema algébrico de equações não lineares.

No Capítulo 6 são apresentados exemplos de validação da formulação apresentada no Capítulo 5, assim como é feito o estudo em frequência de pórticos esbeltos considerando não linearidade geométrica.

No Capítulo 7 é apresentado o estudo de sistemas reticulares esbeltos submetidos a ações sísmicas reais e artificiais gerados a partir de espectros de potência dos sismos reais e com concentração de potência nas regiões de ressonância.

Finalmente, no Capítulo 8 são descritas as conclusões do trabalho realizado e as sugestões para a continuação da presente pesquisa em trabalhos futuros.