

1.

Introdução

“Quem é generoso ao aprender, é generoso ao ensinar; mas nunca terá que se exceder nessa generosidade, pretendendo ensinar antes de haver aprendido.”

Carlos Bernardo González Pecotche.

1.1.

Aspectos gerais

Devido ao avanço dos métodos numéricos aplicados à engenharia, ao emprego de novos materiais, à aplicação de novas tecnologias e ao uso de modernas técnicas de construção, as estruturas têm se tornado cada vez mais leves, esbeltas e flexíveis.

Dentre estas estruturas, destacamos no presente trabalho as estruturas unidimensionais esbeltas (barras) tais como tubulações, micro e nano barras usadas em diversas aplicações tecnológicas, *risers* usados em estruturas *off-shore*, elementos estruturais de estruturas aeroespaciais, onde a minimização do peso é imprescindível, e as barras esbeltas, incluindo nesta categoria mastros, chaminés, torres de telecomunicações, de transmissão de energia e de turbinas eólicas.

Essas estruturas, quando submetidas a cargas dinâmicas, podem apresentar um complexo comportamento dinâmico, principalmente nas regiões de ressonância, em virtude das não linearidades geométricas e inerciais. Ainda, interações de diferentes modos de vibração podem levar a uma série de bifurcações, que, por sua vez, estão relacionadas com as simetrias inerentes à geometria dessas estruturas e a seus espectros de frequências.

A seguir, apresenta-se um resumo de alguns trabalhos relacionados com esta linha de pesquisa.

1.2.

Vibrações não planares de barras esbeltas: interação flexão-flexão-torção

Em virtude da sua grande precisão e capacidade de representar tanto as não

linearidades geométricas quanto as inerciais, este trabalho tem por base as equações desenvolvidas por Crespo da Silva e colaboradores. Em 1978 Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b) formularam e apresentaram um conjunto de equações integro-diferenciais capazes de descrever o movimento não linear acoplado de flexão-flexão-torção de uma barra inextensível, engastada-livre e de material elástico-linear e isotrópico. Utilizando duas das três equações de movimento apresentadas nestes trabalhos, os autores aplicaram o método das múltiplas escalas de tempo para estudar as oscilações forçadas de uma barra com seção transversal quadrada.

No ano seguinte, Crespo da Silva e Glynn (1979.a), investigaram a influência de uma possível ressonância entre os modos de vibração da barra engastada-livre. Em outro trabalho, publicado no mesmo ano, Crespo da Silva e Glynn (1979.b), investigaram o movimento não linear fora do plano de uma barra bi engastada e excitada por uma força harmônica, distribuída ao longo do seu comprimento.

Somente uma década e meio depois, Crespo da Silva e Zaretzky (1994) vieram a utilizar as três equações não lineares integro-diferenciais para estudar o movimento acoplado de flexão-flexão-torção de barras engastada-livres. No mesmo ano, Zaretzky e Crespo da Silva (1994), em uma pesquisa experimental, investigaram o movimento não linear acoplado de uma barra engastada-livre, excitada por um movimento de base transversal.

Antes disso, em 1988, Crespo da Silva (1988.a e 1988.b) reformulou e apresentou um conjunto de equações integro-diferenciais que governam o movimento não linear acoplado de flexão-flexão-torção de uma barra extensível, engastada-livre. Mais tarde, Orloske, Michael e Parker (2006) generalizaram este sistema de equações para incluir no modelo os efeitos de uma possível tensão inicial.

Nayfeh e Pai (1989) aplicaram às duas equações integro-diferencial de movimento formuladas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b), o método de Galerkin e o método das múltiplas escalas de tempo, a fim de investigar as vibrações não lineares, dentro e fora do plano, de uma barra inextensível engastada-livre. Usando a mesma metodologia, Pai e Nayfeh (1990.a) estudaram a resposta não linear fora do plano de uma barra engastada-livre, excitada por um movimento de base.

A seguir, Pai e Nayfeh (1990.b, 1990.c, 1991.a e 1991.b) generalizaram as equações de movimento formuladas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b) para barras esbeltas de material compósito. Na mesma época, Rand (1994) pesquisou o comportamento não linear de uma barra com material ortotrópico aplicando um método numérico baseado nas diferenças finitas.

Em paralelo às pesquisas anteriores, Luongo, Rega e Vestroni (1989) dedicaram-se à pesquisa do movimento não linear dinâmico de barras engastada-livres, inextensíveis e com seção transversal aberta. O método de Galerkin foi aplicado para redução das três equações de movimento e a solução aproximada para os deslocamentos fora do plano, em vibração livre, foi obtida aplicando-se métodos de perturbação. Alguns anos depois, Egidio, Luongo e Vestroni (2003.a e 2003.b) incluíram na formulação proposta por Luongo, Rega e Vestroni (1989) o efeito das deformações da seção transversal devidas à torção da barra. A validade do modelo analítico proposto pelos autores foi confirmada experimentalmente por Egidio e Vestroni (2011).

Banerjee, Guo e Howson (1996) também contribuíram com o estudo das barras com seção transversal aberta, investigando o acoplamento entre os deslocamentos por flexão e torção de barras com centro de massa e de cortante não coincidentes. Em particular, os autores investigaram as vibrações livres não lineares de uma barra com perfil “U”. As equações de movimento foram apresentadas na forma matricial, próprias para aplicação em elementos finitos.

Voltando às barras com seção transversal compacta, Cusumano e Moon (1995.a e 1995.b) investigaram o comportamento dinâmico não linear de uma barra esbelta, flexível, de seção transversal retangular e excitada na base por um movimento senoidal. Os autores fizeram um estudo experimental do movimento acoplado da barra e propuseram um modelo de dois graus de liberdade para a sua pesquisa.

Arafat, Nayfeh e Chin (1998) mostraram que as equações integro-diferenciais de movimento formuladas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b) também podem ser usadas para estudar o comportamento não linear de barras engastada-livres, excitadas longitudinalmente por um movimento de base. Os autores usaram um pseudo controle de arco, proposto por Nayfeh e Balachandran (1995), para determinar os braços de soluções estáveis e instáveis dos diagramas de bifurcação.

Uma comparação entre duas técnicas analíticas para aproximação da resposta não linear de barras engastada-livres sob excitação paramétrica, foi realizada por Hamdan, Qaisia e Al-Beddor (2001). Os autores utilizaram o método das múltiplas escalas de tempo e do balanço harmônico. A equação obtida por eles descreve o movimento planar de uma barra excitada transversalmente por um movimento de base, a qual deriva das equações de movimento formuladas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b).

Cinco décadas após a publicação dos precursores trabalhos de Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b), Malatkar e Nayfeh (2003) conduziram uma pesquisa teórico e experimental sobre a resposta não linear de uma barra metálica, esbelta, engastada-livre e solicitada por uma excitação harmônica próxima à terceira frequência natural de vibração da barra. No estudo teórico os autores fizeram uma simplificação nas equações não lineares de movimento formuladas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b), as quais passaram a representar apenas o movimento da barra no plano.

Siddiqui, Golnaraghi e Heppler (2003) analisaram as vibrações de grande amplitude de uma barra engastada-livre. A resposta não linear da barra sob movimento de um sistema massa-mola, atuante ao longo do seu comprimento foi obtida. As equações de movimento foram obtidas usando o princípio de Hamilton e as aproximações feitas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b). O método de Galerkin foi utilizado para discretizar as equações de movimento.

Nayfeh e Pai (2004) compilaram em uma única bibliografia, um resumo das principais contribuições publicadas até então nesta linha de pesquisa.

No ano seguinte, Zhang (2005), Zhang, Wang e Yao (2005) e Zhang, Li e Yao (2009) usaram o método da perturbação global e soluções multi-pulso para investigar as bifurcações globais e o comportamento dinâmico caótico de barras engastada-livres.

No mesmo ano, Gousskov *et al* (2005) investigaram o acoplamento não linear entre os movimentos de torção e flexão de um equipamento comumente usado na perfuração de poços. O referido equipamento foi modelado como uma barra inextensível e contínua.

Em outra aplicação prática, Bochenski, Warminski e Cartmell (2007), por meio de um estudo teórico-experimental, investigaram as vibrações não lineares de um sistema composto por duas barras com seções transversais retangulares e

rigidezes diferentes nas direções ortogonais. Com base no princípio de Hamilton, excitações randômicas e harmônicas foram consideradas. Os autores chamaram a atenção para a interação entre as duas barras e para os movimentos produzidos a partir desta interação.

Nos últimos anos as micro-barras tem recebido grande atenção por parte dos pesquisadores. Mahmoodi e Jalili (2007), por exemplo, apresentaram as equações não lineares de movimento de uma micro-barra engastada-livre e não homogênea. Termos não lineares devido à presença de um material piezoelétrico anexado à micro barra, bem como o acoplamento eletromecânico do sistema foi considerado e investigado. O método das múltiplas escalas de tempo foi aplicado às equações de movimento, as quais, cabe destacar, derivam das equações apresentadas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b), porém, simplificadas para o plano.

Aplicações similares das equações de movimento formuladas por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b) para estudo de micro barras aparece em Mahmoodi e Jalili (2008) e Hornstein e Gottlieb (2008) que estudaram o problema na microscopia atômica, bem como Vyas, Peroulis e Bajaj (2008) que estudaram um microresonador.

O conceito de estabilidade de Synge e o mapeamento de Poincaré aparecem em Lee, Lee e Pak (2008) para investigar a estabilidade e dinâmica de uma barra inextensível engastada-livre. Os autores utilizaram-se do modelo com dois graus de liberdade proposto por Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b) e aplicaram o método de Galerkin às equações não lineares de movimento.

Problemas de interação modal em barras esbeltas são particularmente importantes em aplicações envolvendo interação fluido-estrutura. Wauer e Moon (2007), por exemplo, apresentaram uma formulação para estudo de barras esbeltas, engastada-livres, de seção transversal quadrada e excitadas pela injeção de fluxo na extremidade livre. Yamashita *et al* (2008), por sua vez, investigaram o movimento tridimensional de um tubo flexível, apoiado em uma extremidade por molas e com escoamento de um fluido no seu interior. Neste caso, os autores demonstraram que as vibrações no plano e fora dele dependem da velocidade do fluxo e das rigidezes das molas.

Elementos finitos hierárquicos de barra foram empregados por Alonso e Ribeiro (2008) para investigar, geometricamente, as vibrações não lineares de barras bi engastadas, isotrópicas e de seção transversal circular. Deformações

longitudinais, transversais e torcionais foram consideradas. A não linearidade geométrica foi levada em conta no tensor de Green. A matriz de rigidez foi obtida usando o princípio de d'Alembert e o dos trabalhos virtuais. O método do balanço harmônico foi empregado para mapear as equações de movimento no domínio da frequência e métodos de continuação foram empregados para resolvê-las. Posteriormente, Stoykov e Ribeiro (2010) empregaram uma formulação semelhante para investigar as vibrações não lineares de barras baseadas na teoria de Euler-Bernoulli e na teoria de Timoshenko.

Finalmente, as equações não lineares e condições de contorno que governam o movimento fora do plano de barras inextensíveis e com imperfeições geométricas foram escritas por Aghababaei, Nahvi e Ziaei-Rad (2009), usando para tanto as mesmas hipóteses de Crespo da Silva e Glynn (1978.a e 1978.b).

1.3.

Análise de barras autoportantes

Em engenharia civil, dentre os diversos tipos de estruturas unidimensionais esbeltas (barras), as mais simples e de grande importância prática são as barras autoportantes, ou seja, estruturas compostas por uma barra vertical engastada na base e livre na outra extremidade (Figura 1.1 e Figura 1.2). A seguir, apresenta-se um resumo de alguns trabalhos relacionados com esta classe de estruturas.

Mikus (1994) realizou uma das primeiras pesquisas numéricas sobre análise sísmica de barras autoportantes. O autor considerou seis barras com alturas variando entre 20 e 90 metros, bem como três diferentes tipos de acelerogramas. Ele concluiu que os quatro primeiros modos de vibração fornecem uma boa aproximação para uma análise modal.

No ano seguinte, Galvez (1995), utilizando uma análise estática, simulou a ação de 45 diferentes tipos de sismos em três barras com alturas de 90, 103 e 121 metros. Com este estudo, o autor propôs tabelas para determinar a força cortante na base da barra. Posteriormente, Sackmann (1996) contribuiu com estas tabelas estudando dez barras com alturas entre 30 e 120 metros.

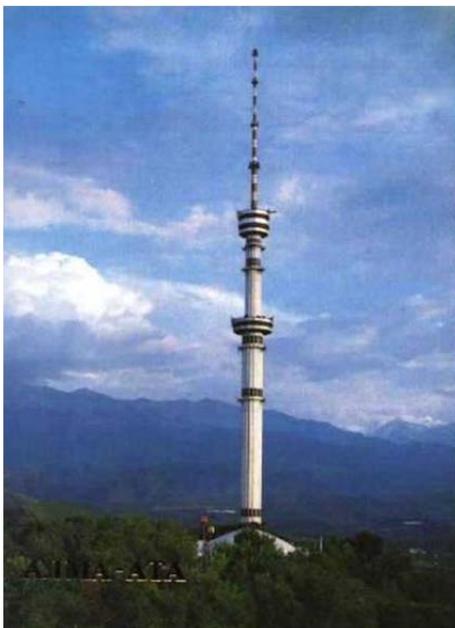
Khedr e McClure (1998) propuseram um novo modelo estático, baseado no espectro de resposta e na superposição modal, para estudar o comportamento das barras autoportantes sob carregamento sísmico. Os resultados de deslocamentos

foram comparados com o *software* SAP90. O erro encontrado pelos autores foi, em média, de 7%. Dois anos depois, Khedr e McClure (1999) deram continuidade aos seus estudos desenvolvendo uma função para representar a distribuição da aceleração do vento ao longo da altura de uma barra autoportante.



(a) Barras de turbinas eólicas;

Fonte: http://www.solarnabarrator.net/wind_turbines.htm. Acesso em 13 set. 2011.



(b) *Alma-Ata Television Tower*, Almaty;

Fonte:

<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=5057>
Acesso em 13 set. 2011.



(c) *KL Tower*;

Fonte:

<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=107677>
Acesso em 13 set. 2011.

Figura 1.1 – Barras autoportantes: eólicas e de transmissão.



(a) *Aufhausen Transmission Tower*;

Fonte:

<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=48971>

Acesso em 13 set. 2011.



(b) *Berlin Television Tower*;

Fonte:

<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=147102>

Acesso em 13 set. 2011.



(c) *Bicentennial Tower*;

Fonte:

<http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0058058>

Acesso em 13 set. 2011.



(d) *Tokyo Sky Tree*;

Fonte:

<http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=184820>

Acesso em 13 set. 2011.

Figura 1.2 – Barras autoportantes: maciças e treliçadas.

No mesmo ano, Sophianopoulos e Michaltos (1999) investigaram as vibrações não lineares de uma ponte sob carregamento veicular. A formulação apresentada considerava o acoplamento flexão-torção do movimento da ponte, que foi modelada como uma barra bi apoiada, não amortecida e de seção transversal aberta. Os autores adotaram para o veículo um movimento com velocidade constante. A resposta da barra foi obtida por meio de uma análise modal e de aproximações numéricas.

Amiri e Boostan (2002) investigaram o comportamento dinâmico de barras autoportantes por meio da modelagem, no *software* SAP2000, de dez barras com alturas variando entre 18 e 67 metros, sob a ação do vento e de sismos. Os resultados evidenciaram a importância de se considerar estas solicitações na análise e dimensionamento das barras. Mais especificamente, os autores propuseram algumas relações para determinar o esforço cortante atuante na base da barra e seu deslocamento horizontal máximo.

Ikeda (2007) investigou o movimento dinâmico não linear de uma barra com um tanque cilíndrico no topo. Considerou-se o tanque parcialmente cheio de fluido, bem como uma excitação harmônica horizontal atuando na barra. A formulação apresentada considera, portanto, o efeito das forças hidrodinâmicas. Resultados experimentais validaram sua análise teórica. A vibração de uma barra elevada com reservatório de água também foi estudada por Ibrahim e Li (1988).

Problemas de interação fluido-estrutura (barra esbelta), em particular, vibrações induzidas por vórtices, são tratados em um grande número de publicações. Os fundamentos básicos e avanços recentes nesta área são tratados em Sarpkaya (2004), Williamson e Govardhan (2004), Simiu e Scanlan (1986), Scruton (1963), Blevins (1990) e Luongo e Zulli (2011).

Além das pesquisas mencionadas, algumas normas internacionais apresentam parâmetros relativos à análise sísmica de barras autoportantes. Entre estas citamos o *NEHRP Guideline-TS13*, o *Canadian standard CSA-S37*, o *Australian standard AS 3995-95*, e o *Euro code 8 parte 3 (En7 1998-3)*.

Na maioria destas pesquisas a não linearidades da coluna é desprezada e a quantidade de trabalhos voltados ao estudo do comportamento dinâmico não linear de estruturas unidimensionais esbeltas (barras) é relativamente pequena, justificando a necessidade de se observar e compreender melhor os aspectos relacionados à estabilidade e dinâmica não linear deste sistema estrutural.

1.4.

Objetivos

O objetivo desta tese de doutorado é estudar o comportamento dinâmico não linear de barras esbeltas, em particular, o efeito das simetrias e imperfeições, inerentes a esta classe de estruturas, nos modos de vibração não lineares, nas relações frequência-amplitude, na interação modal, nas ressonâncias internas, nas curvas de ressonância e bifurcações associadas, nas bacias de atração e suas medidas de integridade e na estabilidade da estrutura sob cargas estáticas e dinâmicas, sejam axiais ou laterais, concentradas ou distribuídas.

Um modelo não linear baseado na teoria de vigas/colunas espaciais, inextensíveis e com interação flexão-flexão-torção é considerado no estudo da dinâmica não linear de barras esbeltas. Este modelo deriva das premissas assumidas nos trabalhos de Crespo da Silva e colaboradores (1978.a, 1978.b, 1979.a, 1979.b, 1991).

Imperfeições geométricas iniciais, presentes em todas as estruturas reais, ainda que imperceptíveis a olho nu, também podem ser consideradas na formulação apresentada.

Para a condução deste trabalho são utilizados diversos programas de análise numérica tendo por base os algoritmos já desenvolvidos nesta linha de pesquisa e apresentados anteriormente nos trabalhos de Santee (1999), Del Prado (2001), Silva (2008), Soares (2009) e Orlando (2010).

1.5.

Escopo do trabalho

No capítulo dois deste trabalho, apresenta-se o conjunto de equações integro-diferenciais que governam o movimento dinâmico tridimensional não linear de barras inextensíveis, sujeitas a diversos tipos de solicitações. Este conjunto de equações é simplificado para incluir apenas os termos não lineares até terceira ordem. O método de Galerkin é, então, usado para discretização das equações de movimento no espaço.

Em seguida, nos capítulos três, quatro e cinco, o conjunto de equações não lineares resultante é aplicado ao estudo de diversos exemplos numéricos,

considerando, respectivamente, barras com elevada rigidez à torção, baixa rigidez à torção e imperfeições geométricas iniciais.

No sexto capítulo estão as considerações finais e listam-se algumas propostas para continuação desta tese. As referências bibliográficas relativas aos trabalhos citados no corpo da tese aparecem no sétimo e último capítulo, o qual é seguido por dois apêndices.