

1. INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo da dissertação encontra-se uma descrição geral do problema estudado, uma breve revisão bibliográfica, a descrição dos objetivos desta pesquisa e uma síntese dos capítulos que compõem este trabalho.

1.1. Considerações gerais.

Vigas metálicas de seções abertas e paredes finas são comumente encontradas na maioria das estruturas em engenharia civil, naval e aeronáutica, como exemplificam a Figura 1.1 e Figura 1.2, pelas vantagens decorrentes do emprego de perfis metálicos gerando redução de peso próprio da estrutura e facilidade construtiva, dentre outras vantagens.

Neste contexto, é importante garantir que o seu projeto seja confiável e seguro. Análises preliminares das vigas de seções abertas e paredes finas também ajudam a evitar futuros custos com reparos. Com isto têm-se estruturas cada vez mais leves e esbeltas, aumentando o risco de ruína por perda de estabilidade na presença de cargas estáticas e dinâmicas. É, portanto, essencial que os engenheiros projetistas saibam avaliar a estabilidade e as características dinâmicas das vigas de paredes finas com precisão, bem como a interação entre fenômenos de instabilidade e vibrações não lineares.

A maioria das estruturas de seção aberta têm paredes delgadas. Isto resulta em elementos com uma baixa rigidez à torção. Muitas seções usadas em projeto têm apenas um ou nenhum eixo de simetria, levando ao acoplamento entre os esforços de flexão e torção.

Sabe-se que, quando as seções transversais das vigas têm dois eixos de simetria, o centro de cisalhamento (C) e o centro de gravidade (G) das seções transversais coincidem, e a flexão e torção são fenômenos independentes em uma análise linear. No entanto, para um grande número de vigas de seções de paredes

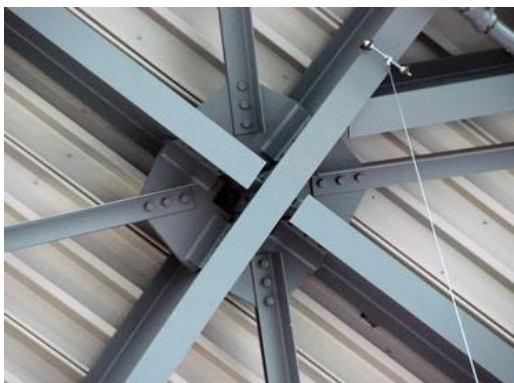
finas encontradas na prática, o centro de cisalhamento e o centro de gravidade não são coincidentes. Quando as seções transversais têm um eixo de simetria, a vibração de flexão na direção do eixo de simetria é desacoplada. Mas a vibração de flexão na direção perpendicular ao eixo de simetria é acoplada com o modo de vibração torsional, mesmo em uma análise linear. Esta característica tem estimulado a pesquisa sobre o comportamento dinâmico de vigas de paredes finas. O acoplamento torna-se ainda mais importante quando se consideram em perfis delgados os efeitos da não linearidade geométrica e a consequente correlação entre os fenômenos de instabilidade sob cargas estáticas e dinâmicas e as vibrações não lineares.



a) Seção "I"



b) Seções "T" e "C"



c) Seções "T", "L" e "C"



d) Seção "C"

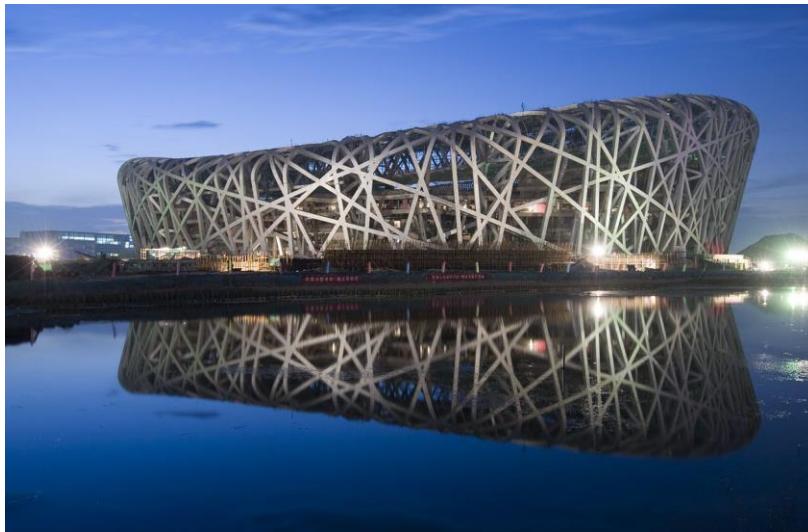
Fontes:

<http://www.tboake.com/SSEF1/understanding.shtml>. - Acesso 10 Jun. 2014

<http://www.tboake.com/SSEF1/shapes.shtml>. - Acesso 11 Jun. 2014

<http://www.gic-edu.com/570/Design-of-Structural-Steel-Connections>. - Acesso 11 Jun. 2014.

Figura 1.1: Aplicação dos perfis de seção aberta e paredes delgadas na engenharia estrutural.



a) Estádio Nacional de China - Beijing.

Fonte:

<http://www.homesthetics.net/the-chinese-national-stadium-in-beijing-the-birds-nest-stadium>.

Acesso 10 Jun. 2014



b) Conservatório Gardens by the Bay - Cingapura.

Fonte:

<http://www.telegraph.co.uk/property/propertypicturegalleries/9594232/World-Building-of-the-Year-the-World-Architecture-Festival-Awards-2012.html>. - Acesso 10 Jun. 2014



c) Ponte Helix - Cingapura.

Fonte: <http://list25.com/25-of-the-worlds-most-unique-bridges>. - Acesso 11 Jun. 2014



d) Aeroporto Internacional de San Francisco - USA.

Fonte:
http://www.som.com/projects/san_francisco_international_airport_structural_engineering. -
Acesso 11 Jun. 2014

Figura 1.2: Exemplos da aplicação de perfis metálicos na engenharia estrutural.

Neste trabalho, um modelo não linear para vigas de seção aberta e paredes finas, considerando grandes deslocamentos, os efeitos de encurtamento e acoplamentos entre flexão e torção, é adotado. Inicialmente um estudo das frequências naturais, das cargas críticas e da relação frequência-carga axial é

apresentado. Com base nestes resultados, faz-se um estudo detalhado do comportamento dinâmico não linear destes perfis, com destaque para o efeito do acoplamento não linear na região de ressonância e sua influência na estabilidade dinâmica da estrutura. Para isto são usadas diversas ferramentas de dinâmica não linear, tais como diagramas de bifurcação, respostas no tempo, planos de fase e bacias de atração. Os resultados mostram que a consideração dos acoplamentos não lineares é essencial para se avaliar o nível de segurança destas estruturas.

1.2. Breve histórico bibliográfico.

Apesar da extensa literatura sobre perfis de parede delgada, pouco se conhece sobre o seu comportamento dinâmico não linear. Formulações para a análise do acoplamento dos esforços de flexão e torção em vigas de paredes finas foram inicialmente desenvolvidas por Timoshenko e Young (1955), Gere e Lin (1958) e Vlasov (1961).

Em particular a teoria de Vlasov tem desempenhado um papel bastante importante na análise destas estruturas (Barsoum e Gallagher, 1970; Wang, 1986; Laudiero e Zaccaria, 1988; Trahair, 1993). Neste modelo, o momento de torção aplicado é equilibrado pelos momentos devidos ao cisalhamento St-Venant e empenamento. Entretanto, Gregory (1961), Gobarah, Black (1967) e Tso (1971), estudando o comportamento de perfis de secção aberta sob grandes deslocamentos, verificaram que as equações contêm termos não lineares que são negligenciados na formulação de Vlasov, e que levam ao chamado “efeito de encurtamento”. Moore (1986) prova que este efeito é importante e leva a uma melhor correlação entre resultados teóricos e experimentais. Posteriormente esta formulação foi usada para estudar a estabilidade e vibrações lineares de várias estruturas de parede delgada.

Para grandes ângulos de torção, vários modelos não lineares têm sido desenvolvidos, levando a sistemas de equações acopladas altamente não lineares (Gobarah e Tso, 1971; Attard, 1986; Ronagh, Bradford e Attard, 2000). Mohri *et al.* (2001) desenvolveram uma formulação não linear onde as relações de deslocamento são expressas primeiro sem qualquer hipótese simplificadora em relação à magnitude do ângulo de torção. Relações não lineares entre os

momentos de flexão e curvaturas principais são usadas e as equações de equilíbrio são estabelecidas, levando-se em conta os efeitos de encurtamento e o acoplamento entre torção e flexão. Este modelo pode ser utilizado para prever o comportamento das estruturas carregadas em flexão e torção e submetida a grandes deslocamentos. Posteriormente esta formulação foi usada para estudar a estabilidade e vibrações lineares de várias estruturas de parede delgada (Mohri, Brouki e Roth, 2003; Mohri, Azrar e Potier-Ferry 2004, Mohri et al. 2008, Mohri, Damil e Potier-Ferry, 2010).

O comportamento dinâmico tridimensional de vigas tem sido objeto de várias pesquisas nas últimas décadas. Uma das primeiras teorias foi desenvolvida por Crespo da Silva e Glynn (1978) para seções compactas onde a componente de torção é condensada estaticamente e o empenamento é desprezado. Rosen e Friedmann (1979), na mesma época, desenvolveram uma formulação para seções compactas considerando o empenamento. Em Crespo da Silva (1988, 1991) e Crespo da Silva e Zaretsky (1994) o acoplamento flexo-torção é estudado considerado empenamento. Schulz e Filippou (1998) desenvolveram um modelo onde um empenamento não uniforme de barras é considerado. Mais recentemente Di Egidio et al. (2003a, 2003b) desenvolveram um modelo mecânico não linear para vigas de seção aberta a partir de um contínuo tridimensional. Aproximações para mudanças de curvatura devidas a torção e flexão de mesma ordem de magnitude são consideradas e o empenamento é obtido estendendo a teoria de Vlasov para o regime não linear.

A seguir descrevem-se, em ordem cronológica, os trabalhos que formam a base teórica da presente pesquisa.

Mohri, Azrar e Potier-Ferry (2001) apresentaram uma análise pós-flambagem de elementos de parede delgada e seção aberta sob compressão axial. Efeitos de deformação e encurtamento são considerados na equação de equilíbrio de torção. Com base no método de Galerkin, as três equações resultantes de flexão e torção, altamente acopladas, são obtidas e resolvidas através do método de Newton-Raphson. Considera-se uma viga simplesmente apoiada, tendo como resultado os caminhos não lineares de equilíbrio para diferentes perfis.

Mohri, Brouki e Roth (2003) estudaram a estabilidade de elementos de parede delgada e seção aberta, derivando uma solução analítica para a carga

crítica lateral de vigas sem restrições, chegando a obter as constantes para os parâmetros de Wagner.

Mohri, Azrar e Potier-Ferry (2004) estudaram as vibração de vigas de parede delgada e seção aberta, para entender as características do comportamento pós-flambagem destas estruturas sob cargas axiais e laterais. Nesta análise foi utilizado um modelo que representa a interação não linear de flexão-flexão e acoplamentos de flexo-torção. Os resultados foram obtidos mediante métodos numéricos.

Mohri, Bouzerira e Potier-Ferry (2008), baseados em um modelo não linear, derivaram soluções analíticas para elementos de viga-coluna simplesmente apoiados de seção simétrica. As soluções propostas são validadas mediante um programa de elementos finitos não lineares, onde elementos de casca são usados para discretizar a estrutura.

Mohri, Damil e Potier-Ferry (2010) pesquisaram a estabilidade lateral de elementos de seção monossimétrica de paredes delgadas. Com base em um modelo de elementos finitos, desenvolvido para vigas de parede delgada, sujeitas a grandes ângulos de torção, diferentes tipos de carregamento e considerando os coeficientes de Wagner, os autores chegaram à conclusão que a flambagem lateral das vigas não depende apenas da pré-deformação, mas também da forma da seção e da distribuição de carga.

Di Egídio e Vestroni (2011) fizeram uma avaliação numérica e experimental do comportamento estático e dos diagramas de bifurcação de vigas de parede delgada e seção aberta com um eixo de simetria, utilizando um modelo unidimensional e inextensível de uma viga em balanço, apresentando resultados para os valores críticos das cargas de instabilidade em flexo-torção.

Entretanto nenhum destes trabalhos investigou as vibrações não lineares e instabilidade dinâmica destes perfis.

1.3. Objetivos.

Este trabalho faz parte da linha de pesquisa em Instabilidade e Dinâmica das Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. O objetivo desta pesquisa é enfatizar o comportamento dinâmico e estudar as vibrações não

lineares e não planares de perfis de seções abertas e paredes delgadas com um único eixo de simetria.

1.4. Escopo.

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, sendo o primeiro esta introdução. No Capítulo 2 são apresentados alguns conceitos básicos e as equações da teoria clássica de vigas esbeltas sob flexo-torção.

No Capítulo 3 são deduzidos, com auxílio do programa de álgebra simbólica Maple, os funcionais de energia e as equações de movimento para uma viga sob carregamentos axiais e laterais. As equações de movimento daí decorrentes são utilizadas nos capítulos seguintes.

No Capítulo 4 faz-se a análise linear dos perfis de seção aberta de paredes delgadas simétricas, monosimétricas e assimétricas. Este capítulo apresenta inicialmente o processo de discretização das equações não lineares de movimento usando-se o método de Galerkin. Também, calculam-se as frequências do sistema e as cargas críticas, assim como as relações entre as cargas aplicadas, frequências e comprimento da viga.

O Capítulo 5 trata da análise não linear de uma viga simplesmente apoiada, de seção aberta e paredes delgadas com um único eixo de simetria. Para a resolução do sistema, utiliza-se o método de Runge Kutta, obtendo-se assim as amplitudes modais. Com a finalidade de entender e explicar o comportamento dinâmico não linear apresentam-se os diagramas de bifurcação, respostas no tempo, planos de fase e seções de Poincaré para diversos casos de carregamento.

O último capítulo apresenta, de forma sucinta, as principais conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.