

1

Introdução

Neste primeiro capítulo da dissertação encontra-se uma breve revisão bibliográfica, além de uma descrição dos objetivos, metodologia e abrangência do trabalho. Apresenta-se também uma pequena síntese dos capítulos desta dissertação.

1.1

Generalidades

Assim como outros sistemas estruturais, o estudo de cascas cilíndricas é de grande relevância e complexidade, fato este corroborado pela vasta literatura sobre este tema.

Segundo Prado (2005):

Nos anos recentes, devido a fatores técnicos e econômicos, além do grande desenvolvimento da engenharia estrutural em função de métodos numéricos eficientes e a utilização de novos materiais, foram geradas mudanças sensíveis nas concepções estruturais, tornando as estruturas cada vez mais leves e esbeltas.

Se em 2005 a citação de *Prado* já era cabível, hoje, em 2013, ela se torna ainda mais oportuna devido aos avanços na engenharia através da busca de novos materiais que conjugam múltiplas propriedades como maior resistência, melhor proteção térmica, proteção contra corrosão e adequado nível de amortecimento, dentre outros. Um material que pode atender a estas exigências é o chamado material com gradação funcional, onde se conjugam dois ou mais materiais com

propriedades distintas para se obter um material otimizado. Este é o caso da maioria dos compósitos. Entretanto, o material com gradação funcional apresenta certas vantagens sobre os compósitos laminados tradicionais, não apresentando problemas de delaminação ou descontinuidades no campo de tensões.

Materiais com gradação funcional são particularmente indicados para a construção de cascas. Como a maioria destas estruturas estão sujeitas a cargas dinâmicas, torna-se a cada dia mais importante o estudo do comportamento dinâmico de cascas feitas com materiais de gradação funcional. Dentre as diversas geometrias de cascas usadas em aplicações industriais, destacam-se as cascas cilíndricas esbeltas.

Silva (2008) afirma que o comportamento de cascas cilíndricas ainda não está totalmente compreendido, em particular no regime não linear, o que justifica o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2

Breve histórico bibliográfico

São inúmeros os trabalhos que abrangem o estudo de cascas cilíndricas e materiais com gradação funcional.

Historicamente, sabe-se que a estabilidade de cascas vem sendo estudada desde o final do século XIX (Brush & Almroth, 1975). Algumas das soluções mais antigas podem ser encontradas, por exemplo, em Lorenz (1911).

Em Southwell (1913) e von Mises (1914) se encontram pesquisas realizadas sobre a flambagem de cascas submetidas a pressão lateral uniforme.

Donnell (1933) desenvolve suas formulações através do estudo de cascas cilíndricas sujeitas a carga torsional. Segundo Brush & Almroth (1975), a formulação proposta por *Donnell*, apesar de certas limitações, forma o alicerce para análises da estabilidade e vibrações de cascas no regime não linear, sendo até hoje a teoria mais utilizada.

Posteriormente, Thurston & Holston (1966) desenvolveram um trabalho para a NASA¹, alusivo à flambagem de cascas cilíndricas sob pressão interna.

A partir da década de 1960 já se encontram trabalhos referentes à dinâmica não linear de cascas cilíndricas, como o de Chu (1961) que analisou as vibrações de cascas cilíndricas simplesmente apoiadas, deduzindo que a não linearidade faz com que a frequência cresça com o aumento da amplitude de vibração.

Nesta época, Sanders (1961) desenvolveu sua teoria não linear para análise de cascas finas, sendo esta considerada como uma das melhores aproximações de primeira ordem para análise de problemas de instabilidade e dinâmica.

Brush & Almroth (1975) apresentam um estudo detalhado da flambagem de casca cilíndricas usando a teoria de *Donnell*. Na mesma época, Donnell (1976) publica um estudo detalhado sobre a flambagem de cascas e outros elementos estruturais sob diversos carregamentos.

Gonçalves (1987) realizou a análise dinâmica linear e não linear de cascas cilíndricas delgadas em um meio fluido usando as teorias de *Sanders* e *Donnell-Mushatari-Vlasov*.

Prado (2001) estudou a instabilidade dinâmica de cascas cilíndricas, destacando os fenômenos de acoplamento e interação modal, demonstrando sua importância no comportamento dinâmico não linear de cascas cilíndricas. O estudo das vibrações não lineares foi baseado nas equações não lineares de *Donnell* para cascas abatidas.

Silva (2008) pesquisou as vibrações não lineares e instabilidade dinâmica de uma casca cilíndrica contendo um fluido e desenvolveu modelos de dimensão reduzida, isto é, modelos com um número reduzido de graus de liberdade, baseados em métodos de perturbação. Esse estudo também teve por base a teoria de *Donnell* para cascas abatidas.

Estes estudos consideraram cascas cilíndricas de material homogêneo e isotrópico, como as cascas metálicas. Shen (2009) enfatiza que, apesar de haver um elevado número de publicações sobre placas e cascas, não há um único livro inteiramente dedicado ao problema de cascas com material de gradação funcional.

¹ NASA: National Aeronautics and Space Administration (United States of America). Em Português significa: Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (Estados Unidos da América).

Não obstante, Silva *et al.* (2006) relatam que desde 1999 têm sido publicadas pesquisas sobre placas e cascas de materiais com gradação funcional. Exemplo disso, é o trabalho de Loy *et al.* (1999) que apresentam resultados obtidos para vibração livre de cascas cilíndricas simplesmente apoiadas e feitas com material de gradação funcional.

Shen (2009) relata em seu livro que:

MGF foram inicialmente concebidos como materiais de barreira térmica para aplicações estruturais aeroespaciais e reatores de fusão. Eles agora são desenvolvidos para uso geral em componentes estruturais em ambientes extremos de alta temperatura. A capacidade de prever a resposta de placas e cascas de MGF, quando submetidos a cargas térmicas e mecânicas, é de interesse primordial para a análise estrutural. De fato, muitas estruturas são sujeitas a elevados níveis de carga que podem resultar em relações não lineares de carga-deflexão devido a grandes deformações. Um dos problemas importantes que merecem uma atenção especial é o estudo da sua resposta não linear sob grandes deslocamentos, comportamento pós-flambagem e vibração não linear.

1.3

Objetivos específicos e metodologia

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise paramétrica das vibrações livres não lineares de cascas cilíndricas esbeltas com gradação funcional, considerando um campo de tensões iniciais, preenchendo assim uma lacuna na literatura técnica hoje existente. Para isto, utiliza-se a teoria não linear de cascas de Sanders, considerada uma das teorias mais precisas para a análise de cascas esbeltas. Inicialmente, derivam-se as equações de movimento considerando um estado de tensões iniciais. Usando as equações linearizadas, obtêm-se as frequências naturais e cargas críticas, sendo estes resultados comparados favoravelmente com resultados encontrados na literatura para materiais homogêneos e com gradação funcional. A seguir, usando uma expansão modal

que atende as condições de contorno e continuidade, além de expressar os acoplamentos modais característicos de cascas cilíndricas no regime não linear, as equações de movimento são discretizadas usando-se o método de *Galerkin*. As equações algébricas resultantes são resolvidas pelo método de *Newton-Raphson*, sendo assim obtida a relação não linear frequência-amplitude. Finalmente, realiza-se uma análise paramétrica para estudar a influência da geometria da casca, da gradação do material funcional, dos modos de vibração e do estado de tensões iniciais no grau e tipo de não linearidade da casca cilíndrica, sendo esta a principal contribuição deste trabalho de pesquisa. Na análise paramétrica, estuda-se especificamente a influência da gradação do material, da geometria da casca, dos modos de vibração e de um carregamento estático inicial nas frequências naturais e na relação não linear frequência-amplitude.

1.4

Descrição dos capítulos da dissertação

Esta dissertação está dividida em oito capítulos, sendo o primeiro este de introdução.

No segundo capítulo há a apresentação do sistema estrutural casca cilíndrica. Em seguida, apresenta-se o desenvolvimento da formulação de casca cilíndrica, usando a teoria não linear de cascas de *Sanders*. A formulação correspondente à teoria de *Donnell* para cascas abatidas pode ser obtida como um caso particular da formulação de *Sanders*. Especificamente, apresenta-se o campo de deslocamentos, a lei constitutiva, os esforços de membrana e flexão, os funcionais de energia, as três equações de equilíbrio e as condições de contorno para uma casca cilíndrica biapoada e submetida a um estado inicial de tensão devido a cargas axiais ou pressão lateral.

O terceiro capítulo contém uma breve introdução sobre materiais compósitos e, de forma mais específica, sobre materiais com gradação funcional. Em seguida, apresenta-se a lei constitutiva do material com gradação funcional.

No quarto capítulo faz-se inicialmente a análise linear de casca cilíndrica com material isotrópico, isto para validar as formulações, e, em seguida, se realiza a análise linear com material de gradação funcional. Neste capítulo, calculam-se as frequências do sistema e as cargas críticas para diversas geometrias de cascas e materiais constitutivos.

O quinto capítulo trata da análise não linear de casca cilíndrica. Este capítulo apresenta inicialmente o processo de discretização das equações não lineares de movimento usando o método de *Galerkin* e como funções de interpolação expansões modais que atendem as condições de contorno e continuidade, além de expressar os acoplamentos modais característicos de cascas cilíndricas no regime não linear. Para a análise do sistema de contínuo discretizado, utiliza-se o método de *Newton-Raphson*, obtendo-se assim as amplitudes modais. Finalmente, apresenta-se uma análise paramétrica onde se estuda a influência da geometria da casca, da gradação do material funcional e dos modos de vibração no grau e tipo de não linearidade da casca cilíndrica.

O último capítulo apresenta de forma sucinta as conclusões e sugestões.