

# 1

## Introdução

As cascas cilíndricas são elementos básicos para a modelagem de muitos tipos de estruturas mecânicas utilizadas na indústria de construção civil, aeronáutica ou aeroespacial, entre outras. Portanto, o comportamento dinâmico destas estruturas é importante pelas muitas aplicações que têm na engenharia. Estas aplicações vão desde estruturas simples como um pequeno sistema de tubulação até aplicações mais complexas como mísseis, veículos marinhos, etc.

A análise do comportamento dinâmico destes tipos de estruturas está relacionada a problemas de vibração, danos de fadiga, transmissão de ruídos, entre outros. Outra aplicação do estudo da resposta dinâmica de cascas cilíndricas se dá no campo da indústria do petróleo, onde a detecção dos defeitos em dutos e vasos de pressão pode ser feita através de métodos ultrassônicos. Com esta técnica se estuda o comportamento dos elementos na presença de ondas elásticas, utilizando faixas de médias a altas frequências.

O maior número de estudos de cascas cilíndricas que podem ser encontrados na literatura foram feitos para cascas cilíndricas delgadas. Estas teorias, que são chamadas teorias clássicas (*Classical Theory of Shells-CST*), estão baseadas nas aproximações de Love e têm suas aplicações, principalmente, na análise de vibrações. Leissa [1], por exemplo, agrupou e comparou mais de doze destas teorias. No entanto, a maior desvantagem das teorias clássicas é que só podem ser utilizadas para cascas cilíndricas finas ou em uma faixa de baixas frequências, uma vez que elas não levam em consideração o efeito do cisalhamento transversal, o efeito da inércia rotacional nem o efeito da tensão normal transversal.

As teorias de cascas cilíndricas de maior ordem, que fazem um refinamento das teorias clássicas, oferecem melhores resultados que as teorias de cascas finas, mas ainda têm problemas na modelagem de cascas relativamente mais grossas ou quando a análise é feita em altas frequências

(Bhimaraddi [2], Reddy [3]). Para aplicações em cascas grossas, os efeitos da tensão normal transversal e as componentes da deformação de cisalhamento, que são ignorados nas teorias de primeira ordem, têm que ser considerados para obter resultados coerentes. Por exemplo, Loy and Lam [4], So and Leissa [5] desenvolveram uma análise de cascas cilíndricas baseada na teoria tridimensional da elasticidade. No entanto, suas aplicações são em baixas frequências.

Na faixa de altas frequências, os efeitos das deformações transversais e da inércia rotacional das cascas cilíndricas são importantes para conseguir resultados satisfatórios. Porém, as equações de movimento como as derivadas por Mirsky e Herrmann [6], Naghdi e Cooper [7], devem ser utilizadas.

O objetivo da presente dissertação é propor uma modelagem para obter a resposta dinâmica de cascas cilíndricas laminadas na faixa de altas frequências (pequenos comprimentos de onda em relação à espessura). Empregou-se uma formulação baseada na teoria discreta de Reddy para compósitos laminados (*Reddy's discrete layerwise theory* [8]). Esta teoria tem como característica o emprego de funções de interpolação de ordem arbitrária para descrever a variação dos campos de deslocamentos ao longo da espessura do laminado. Estes campos de deslocamentos têm como particularidade uma rápida variação espacial ao longo da espessura do laminado, o que é representativo daqueles associados com ondas guiadas em altas frequências.

A teoria discreta de Reddy tem sido aplicada por outros pesquisadores em cascas cilíndricas. Por exemplo, Loy e Lam [4] utilizaram esta teoria para estudar as vibrações de cascas cilíndricas grossas. Huang e Dasgupta [9] também utilizaram a teoria discreta de Reddy para calcular as frequências naturais e os modos de vibração de cascas cilíndricas compósitas. Na faixa de altas frequências é comum utilizar a teoria de propagação de ondas para estudar a resposta dinâmica de uma estrutura. Por exemplo, Gamma e Braga [10] estudaram a modelagem da resposta dinâmica em altas frequências para vigas compósitas piezoelétricas, usando para isso a teoria de Reddy. Eles utilizaram a teoria de propagação de ondas para solucionar a equação de estado da viga. Zhang, Liu, e Lam [11] também utilizaram a teoria de propagação de ondas para fazer a análise de vibrações de cascas cilíndricas delgadas.

No Capítulo 2 desta dissertação apresenta-se uma revisão bibliográfica dos conceitos básicos e úteis no estudo do problema de propagação de ondas em coordenadas cilíndricas. Para isto aborda-se as definições dos modos de propagação, espectro de frequência e curva de dispersão, que serão utilizadas na análise dos resultados nos capítulos seguintes.

No Capítulo 3 desenvolve-se a formulação da equação de estado que governa a dinâmica da casca cilíndrica. As equações que descrevem a resposta dinâmica do cilindro são obtidas a partir da inserção das hipóteses cinemáticas da teoria de Reddy. Nesta etapa utilizou-se a transformada de Fourier para simplificar as variáveis na formulação variacional. No domínio da frequência, o sistema de equações obtido é colocado na forma de uma equação de estado, onde as variáveis de estado são os deslocamentos e as forças generalizadas.

No Capítulo 4 é discutida a solução da equação de estado obtida no capítulo 3, assim como a solução exata ao problema de propagação de ondas para cilindros laminados. Esta formulação foi desenvolvida por Braga, Barbone e Hermann [12] e está baseada na teoria linear de elasticidade. Na solução da teoria exata define-se a Impedância Superficial, e na teoria aproximada define-se o Tensor Impedância. Estes termos, que relacionam as forças generalizadas e as velocidades, são de vital importância para a solução da equação exata e para a solução da equação de estado, respectivamente. Além disso é importante destacar que o algoritmo de solução empregado na solução aproximada está baseado no método da varredura, também conhecido como método de Riccati [13]. Esta técnica oferece uma ampla faixa de trabalho, especialmente na faixa de altas frequências.

No Capítulo 5, realiza-se a validação da teoria proposta neste trabalho. Com este propósito compara-se, primeiro, o espectro de frequência aproximado e o exato para um cilindro infinito. Esta técnica de comparação foi escolhida para avaliar a faixa de frequências onde a teoria discreta de Reddy é válida. O espectro de frequência é formado por curvas que relacionam a frequência com o número de onda de sinais harmônicos que se propagam no guia de ondas. Os resultados destas comparações mostram que a teoria de Reddy é capaz de representar a resposta dinâmica de cascas cilíndricas em altas frequências. Na faixa de baixas frequências, os resultados obtidos pela teoria desenvolvida neste trabalho são comparados com soluções fornecidas pelo programa de elementos finitos ANSYS<sup>TM</sup>, versão 5.5. Assim, são

analisadas duas configurações: a primeira é um cilindro com condições de contorno livre-livre e o segundo é um cilindro engastado-livre. Estes dois conjuntos são sujeitos a uma força concentrada axi-simétrica no extremo livre com frequência variável. As respostas analisadas são as primeiras frequências naturais, a resposta em frequência e o campo de deslocamento ao longo da espessura. Finalmente, no Capítulo 6 se indicam as conclusões deste trabalho.