

1

INTRODUÇÃO

Tubos cilíndricos constituem-se em estruturas úteis às mais diversas indústrias, desde setores petro-químicos a armamentos. Como carregamentos típicos a que estão sujeitos, pode-se relacionar aplicação de pressão interna e/ou externa, trações e compressões longitudinais, torções, etc. Uma classe de material que vem sendo pesquisada e empregada estruturalmente são os compósitos. Sendo uma destas opções, o desenvolvimento teórico de compósitos laminados já se apresenta difundido em diversas referências^[1,2,3,4] citadas na Literatura, especialmente para o caso plano. Estes materiais compõem-se pela união de camadas formando um laminado. As lâminas podem ter espessuras iguais ou não, sendo formadas por materiais constituintes diversos e por ângulos de orientação das fibras, definidos para cada camada. Devido a estas diversas configurações, possíveis na sua composição, compósitos laminados são associados a modelos de material ortotrópicos, apresentando um comportamento mecânico que pode incluir o acoplamento axial-torcional em tubos. Desta forma, carregamentos trativos longitudinais podem provocar empenamento em uma chapa plana ou a torção em um tubo; já a aplicação de torques, causa em tubos deformações axiais. A teoria desenvolvida^[1,2], em particular para estruturas planas, é capaz de prever, para a seqüência de empilhamento das camadas, ou *lay-up*, o acoplamento dos efeitos mecânicos. Para tubos, no entanto, seus resultados não são aplicados. A observação destes efeitos deve ser feita a cada exemplo de laminado, através da análise dos campos de deslocamentos circunferenciais do cilindro.

O problema de tubos cilíndricos sujeitos a carregamentos mecânicos, com materiais compósitos laminados, apresenta solução analítica disponível para o regime elástico, sob particulares condições de carregamento e de fixação (contorno). Uma estrutura desta classe é formada por camadas adjacentes, considerando-se a perfeita adesão entre elas. Considerando-se a geometria do tubo, o número e o empilhamento das camadas, parâmetros constitutivos de material e carregamentos como a pressão interna aplicada, um sistema de equações é resolvido para a solução dos campos de deslocamentos, de deformações e de tensões, em pontos ao longo da espessura do tubo. O

desenvolvimento das soluções analíticas teve seu início desde 1950, com contribuições que incluem não linearidades geométricas e do material. A solução elástica^[5] é apresentada para um tubo laminado com apenas uma camada, inicialmente. O tubo é considerado longo, aberto nas extremidades e de materiais homogêneos, macroscopicamente. Os carregamentos são considerados de natureza termomecânica e aplicados axissimetricamente e de valores uniformes ao longo da estrutura. A solução estática do problema satisfaz às condições de equilíbrio, às relações deformações-deslocamentos, às condições de compatibilidade e às condições de contorno impostas. As relações constitutivas são definidas de acordo com modelos de material escolhidos, tais como ortotrópico e transversalmente isotrópico, adequados à constituição das camadas de laminados fibrosos. Na solução para cada camada, obtém-se as componentes dos deslocamentos segundo os três eixos de um sistema definido em coordenadas cilíndricas, e os campos de deformação e os de tensão. A solução é, então, estendida ao caso multi-camadas, ao considerar-se os requisitos da continuidade de deslocamentos.

Neste Trabalho, é proposta a adoção de materiais compósitos laminados fibrosos aplicados à fabricação de cilindros para projetos de engenharia. Materiais compósitos apresentam, geralmente, vantagens estruturais que os levam a serem desenvolvidos e empregados às mais diversas aplicações. Uma destas importantes vantagens, diferencial na sua seleção como material estrutural, é a de aliar características de baixo peso final do componente a uma capacidade de elevada resistência mecânica. Tem-se, por objetivo, apresentar e implementar uma formulação de elementos finitos adequada à análise do problema de carregamentos mecânicos em tubos cilíndricos, laminados por camadas constituídas de materiais compósitos fibrosos. Tubos sujeitos a carregamentos axissimétricos podem ser representados por modelos numéricos de elementos planos, representativos da seção retangular geratriz do cilindro. Neste trabalho, considerou-se análises lineares estáticas e modelos de materiais ortotrópicos, transversalmente isotrópicos e isotrópicos. O modelo obtido com a implementação da formulação proposta permite realizar simulações numéricas de tubos com múltiplas camadas. Diferentes materiais e ângulos de bobinamento das fibras simples podem ser considerados para cada lâmina, além de carregamentos como pressão interna e/ou externa, constantes ou variáveis ao longo do tubo, trações longitudinais e condições de torques externos.

No Capítulo 2 são apresentadas possíveis classificações de compósitos e suas características, e os diferentes modelos matemáticos empregados na caracterização do comportamento mecânico desta classe de material. São obtidas as relações constitutivas para cada lâmina de material compósito fibroso, considerando-se fibras simples, unidirecionais. O Capítulo 3 apresenta os fundamentos e o desenvolvimento do Método de Elementos Finitos aplicado à formulação de modelos planos axissimétricos, adequados à representação da cinemática de deformação associada a cilindros de materiais compósitos sob pressão. Neste caso, há a necessidade de incluir-se os efeitos dos deslocamentos circunferenciais, normais ao plano do elemento associado. São desenvolvidas as equações básicas, para um Método de Elementos Finitos baseado nos deslocamentos, apresentando-se o Princípio dos Trabalhos Virtuais, adequado ao problema em estudo, as matrizes de rigidez resultantes e o vetor de carregamentos para cada elemento. Adotando-se os procedimentos de montagem direta^[6] da matriz de rigidez, obtém-se a matriz global associada ao modelo numérico para um número de elementos na direção radial do modelo. As componentes do campo de deformações são definidas em coordenadas cilíndricas. A obtenção do campo de deslocamentos é resultado da solução das equações de equilíbrio estático. Estas componentes e a obtenção das matrizes de compatibilidade geométrica e das matrizes constitutivas, apresentadas pelo Capítulo 2, fornecem as componentes dos campos de deformações e de tensões.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento analítico do problema de tubos cilíndricos laminados, de acordo com algumas hipóteses e condições de utilização^[5], referentes aos campos de deslocamentos, de deformações e de tensões. Estas soluções são discutidas quanto às suas características e posteriormente utilizadas na comparação com os resultados do modelo numérico, apresentados no Capítulo 5. Os testes utilizados na aferição do modelo de elementos finitos consideram apenas o carregamento de pressão interna uniforme ao longo do tubo. Em relação ao empilhamento dos laminados, os testes foram divididos em dois grupos. O primeiro considera tubos laminados com camadas únicas, variando-se apenas os ângulos de orientação das fibras. Em seguida, são considerados empilhamentos com várias lâminas, permitindo-se arranjos diversos para a mesma espessura total do cilindro. Em uma segunda etapa de avaliação do modelo numérico, foram também realizadas comparações com as simulações

fornecidas pelo programa de elementos finitos comercial ANSYS[®]. Por fim, são apresentadas no Capítulo 6 as conclusões deste estudo, evidenciando-se as principais características do uso do Método de Elementos Finitos, com modelagem axissimétrica, para aplicação no problema de tubos cilíndricos laminados fibrosos. São propostas, ainda, algumas considerações para outros desenvolvimentos referentes a esta aplicação.