6

CONCLUSÕES

Neste Trabalho foi desenvolvida uma formulação de elemento finito axissimétrico com o objetivo de modelar problemas mecânicos de tubos cilíndricos laminados por camadas de material compósito fibroso. Sendo esta classe de material caracterizada matematicamente por modelos ortotrópico e/ou transversalmente isotrópico, estes laminados podem apresentar um acoplamento axial-torsional, com movimento circunferencial da seção reta do tubo. Deste modo, na formulação utilizada definiu-se três graus de liberdade por cada um dos quatro nós do elemento quadrilateral: deslocamentos nas direções principais de um sistema de coordenadas cilíndrico – axial, circunferencial e radial.

Para os testes numéricos do modelo desenvolvido, na obtenção das componentes dos campos de deslocamentos, de deformações e de tensões, com o tubo submetido à pressão interna uniforme, foram usadas duas ferramentas distintas para uma série de exemplos de laminados. São estas a implementação de soluções analíticas disponíveis na literatura e modelagens com elementos sólidos em programa comercial. Em ambos os casos, o modelo axissimétrico, reproduzindo as condições de contorno distintas, apresentou excelentes resultados para a maioria das grandezas analisadas. Nos resultados para as componentes de deslocamentos, a convergência numérica foi obtida para um pequeno número de elementos na malha. No entanto, os resultados para a componente de deformação radial apresentou limitações com o emprego das funções de forma linear: o modelo axissimétrico utilizado resulta em valores constantes desta grandeza, no domínio de cada elemento. As características da convergência monotônica, típicas do método de elementos finitos, foram observadas ocorrendo a diminuição dos erros percentuais e uma maior aproximação da distribuição dos resultados, para um número crescente de elementos. Na comparação de resultados com o programa ANSYS[®], apesar de serem usados elementos também com funções de forma linear, os resultados foram apresentados linearizados ao longo dos domínios da estrutura. Efetuando-se médias de valores nodais do modelo axissimétrico, referentes a elementos adjacentes, quando apropriado, houve uma concordância direta das distribuições.

Os exemplos utilizados para testes representam laminados simples e de múltiplas camadas, com ângulos extremos e intermediários no intervalo $[0^\circ + 90^\circ]$, para a orientação de fibras simples em cada camada. O compósito adotado para todas as camadas, o T300/5208, apresenta o comportamento transversalmente isotrópico. Os testes de camadas com orientações a 0° ou $+90^\circ$ apresentaram uma matriz constitutiva transformada, $\bar{C}$, com a forma característica dos materiais isotrópicos. Laminados com estas orientações, apenas, não apresentam o acoplamento axial-torsional, com resultados nulos para deslocamentos circunferenciais. Nos demais empilhamentos simples no intervalo considerado, como o exemplo $[+45^\circ]$, apresentam aquela matriz na forma característica de um material monoclinico. Arranjos com múltiplas camadas podem, ainda, minimizar o efeito secundário de torção do tubo, como em laminados planos simétricos. Nas comparações com a solução analítica, sua expressão para o deslocamento circunferencial é dada por (4.62), ou por (4.67), para tubos de múltiplas camadas. No desenvolvimento apresentado pelo Capítulo 4, estas respostas tem origem nas equações de compatibilidade do problema em coordenadas cilíndricas. Estas condições compreendem derivadas de segunda ordem de componentes do campo de deformações e não são diretamente atendidas pela formulação com elementos finitos com funções de forma lineares. A imposição de equações de vinculação entre graus de liberdade circunferenciais, apresentada na Seção 5.3.1, se mostrou satisfatória para atender a esta condição. Os testes comparados com o ANSYS® apresentam distribuições circunferenciais distintas daquelas obtidas com a solução analítica, sem a adoção de um ângulo de torção constante ao longo das camadas. Ocorre neste caso, para exemplos com múltiplas camadas, grandes variações nos resultados de deslocamentos e de deformações, com forte concentração de tensoes interlaminares, evidência demonstrada pelo modelo numérico desenvolvido.

Na avaliação numérica deste trabalho testou-se o comportamento numérico do modelo sob as diversas condições de contorno, obtendo-se resultados satisfatórios. Para o desenvolvimento posterior desta pesquisa, aplicando-se a implementação do modelo desenvolvido de modo mais específico, são sugeridos os seguintes tópicos:

- A adaptação do modelo para testes com outros carregamentos, como trações longitudinais, aplicação de momentos nas extremidades do tubo e outros de natureza térmica. Sugere-se, também a expansão da malha de discretização na direção axial, possibilitando assim análises para pressões internas e/ou externas não uniformes.
- A adaptação do algoritmo da solução da equação de equilíbrio do sistema para análises sob carregamentos transientes.
- A extensão da formulação do modelo de elementos finitos axissimétricos empregando funções de forma diversas da linear. O algoritmo desenvolvido permite, também, a um único elemento considerar mais de uma camada. Outras funções de forma de ordem maior deverão permitir a convergência numérica com um número menor de elementos, representando melhor tubos com maior número de camadas.
- A aplicação do modelo a análises de resistência de tubos laminados. Sugere-se aplicar os resultados das componentes de tensão aos critérios de falha adotados para materiais compósitos, como os de Tsai-Wu e de Tsai-Hill^[1], além de diversas estratégias de projetos com materiais compósitos^[13]. Podem, ainda, ser comparados os comportamentos mecânicos de laminados para diversos outros compósitos. Literaturas mais específicas^[14] de aplicações militares permitem uma série de escolhas de materiais de altas resistências.