

7 Conclusões

Esta tese tem por objetivo estudar numericamente e experimentalmente o comportamento não-linear e estabilidade de membranas e cascas cilíndricas de material hiperelástico. Nesta tese, os conceitos gerais de elasticidade finita foram apresentados como base para o desenvolvimento de uma formulação geral para membranas de forma axissimétrica submetidas a carregamentos de tração, torção e pressões interna e externa. A seguir, esta formulação foi particularizada para membranas cilíndricas sob a ação de cargas de tração axial e pressão interna uniforme, geometria e carregamento base da análise experimental.

Através de ensaios experimentais de tração, da integração numérica das equações diferenciais e do programa de Elementos Finitos ABAUS, foram determinadas as constantes elásticas dos materiais e estabelecidas as leis constitutivas que melhor representam o comportamento do material tanto das membranas quanto das cascas utilizadas nos ensaios. Observou-se que, dentre as três leis constitutivas analisadas, a que melhor representou o comportamento do material da casca e da membrana foi a lei proposta por Mooney-Rivlin.

Também foram realizados ensaios experimentais para membranas e cascas cilíndricas submetidas a combinações de forças de tração e pressão interna uniforme. A seguir, análises numéricas foram conduzidas através do programa ABAQUS, para as mesmas configurações das membranas e cascas cilíndricas utilizadas nos ensaios experimentais. Uma boa concordância entre resultados numéricos e experimentais foi obtida. Os ensaios realizados, também mostram a existência de diversos fenômenos de perda de estabilidade, ocasionando mudanças bruscas de forma e do nível de pressão interna das estruturas em estudo.

Observou-se que tanto membranas quanto cascas hiperelásticas submetidas a forças de tração e pressão interna apresentam um comportamento inicial praticamente linear, mas, à medida que o ar é injetado, o caminho de equilíbrio apresenta uma não-linearidade com crescente perda de rigidez até se atingir um ponto limite onde a estrutura perde a estabilidade com a formação de um bulbo e

um decréscimo instantâneo da pressão interna em função do aumento repentino do volume da membrana. Ao se injetar mais ar na estrutura, observa-se que a pressão no interior da casca continua a decrescer até atingir um valor mínimo. Após atingir este valor mínimo, a pressão interna permanece praticamente constante em virtude de um aumento de volume proporcional ao volume de ar injetado. Para estruturas sem tração ou com baixa tração inicial, pode-se observar, além do modo local de instabilidade, um modo global similar ao exibido pela coluna de Euler. Dependendo das imperfeições locais, o bulbo pode ser axissimétrico ou não-simétrico.

Estes dados serviram de base para o desenvolvimento de um estudo paramétrico detalhado, através do programa ABAQUS, onde, variando-se as dimensões das membranas e cascas dentro do espectro das amostras experimentais disponíveis, pode-se caracterizar o comportamento destas estruturas. Foi realizado um estudo da influência da geometria das estruturas (comprimento, espessura ou raio inicial), podendo-se assim verificar a influência de cada um destes parâmetros no seu equilíbrio e estabilidade. Nesta análise a estrutura foi submetida a um nível de tração axial e a pressão interna uniforme. Observou-se que a pressão crítica é diretamente proporcional tanto à variação da espessura quanto do comprimento da estrutura e inversamente proporcional à variação do raio. Observou-se também, para o caso de cascas cilíndricas, que certas geometrias levam a configurações críticas bem diferentes das demais.

Outro tópico estudado em detalhe foi o efeito das imperfeições geométricas iniciais no comportamento de membranas e cascas, em particular variações locais ou globais da espessura da estrutura. Três tipos de imperfeições geométricas iniciais foram analisadas, sendo dois tipos de imperfeições locais e um tipo de imperfeição global.

Uma primeira imperfeição axissimétrica local foi gerada através da diminuição ou acréscimo no raio da estrutura em uma região em forma de anel ao longo do comprimento da estrutura. O estudo deste tipo de imperfeição foi realizado em três etapas: variando-se a espessura da imperfeição, variando-se a posição da imperfeição e finalmente variando-se o comprimento da imperfeição. Observou-se que a pressão crítica sofre uma pequena variação com as dimensões da imperfeição. A carga crítica decresce a medida que decresce a espessura da casca na região da imperfeição e à medida que a imperfeição local se afasta dos

apoios. Verifica-se também que a carga crítica é inversamente proporcional ao comprimento da imperfeição. Novamente verificou-se uma boa concordância em termos do comportamento global entre os resultados obtidos na análise numérica e os resultados experimentais para cascas imperfeitas.

Verifica-se que a estrutura é sensível não só a imperfeições locais expressas por uma diminuição da espessura, mas também, a imperfeições locais que ocasionem um aumento local da espessura, como aquelas causadas por obstruções locais ao longo do cilindro.

O outro tipo de imperfeição local analisado foi uma pequena imperfeição numa região quadrada ao longo do comprimento da estrutura. O mesmo comportamento observado anteriormente também foi obtido. Analisou-se também, somente para cascas, a influência de múltiplas imperfeições. Considerou-se para isso duas imperfeições localizadas de forma simétrica em relação ao plano central e transversal ao comprimento da casca. Variando-se o ângulo entre as imperfeições de 0 a 180 graus, observou-se que bulbos de deformação se formam nos locais onde são inseridas as imperfeições para ângulos variando entre 0 e 120 graus e 165 e 180 graus. Entretanto, para ângulos próximos a 150 graus, o bulbo de deformação se forma somente em um dos locais de imperfeição.

A imperfeição global foi gerada somente para a casca, através de modificações na curvatura inicial. Observou-se que, para curvaturas iniciais negativas, a pressão crítica sofre um pequeno acréscimo em relação àquela obtida para a casca perfeita. No entanto, para curvaturas iniciais positivas, o comportamento é inverso, a pressão crítica sofre um pequeno decréscimo em relação à estrutura perfeita com o aumento da curvatura positiva.

Outro fenômeno estudado experimentalmente, para a casca, foi o estudo do comportamento pós-crítico avançado, continuando o processo de injeção de ar na casca após atingir a pressão crítica e perder a estabilidade com a formação de um bulbo local e uma queda no valor da pressão interna. Observou-se que, ao se injetar mais ar na estrutura, a deformação radial da região onde se formou o bulbo de deformação continua a sofrer acréscimo significativos. Entretanto a pressão no interior da casca continua a decrescer até atingir um valor mínimo. Após atingir este valor mínimo, a pressão interna permanece praticamente constante em virtude de um aumento de volume proporcional ao volume de ar injetado. Verifica-se também que na região do bulbo a casca passa a se comportar praticamente como

uma membrana, não apresentando o resto da estrutura grandes deformações. Este comportamento pós-crítico avançado está também de acordo com os resultados numéricos.

7.1. Sugestões

A análise de membranas e cascas hiperelásticas é um assunto de grande relevância científica e tecnológica. Apesar disto, pouco ainda se conhece sobre o comportamento destas estruturas, particularmente quando as mesmas estão submetidas a grandes deformações. Nesta tese alguns tópicos relativos à estabilidade e sensibilidade a imperfeições destas estruturas foram analisados. A boa concordância entre resultados numéricos e experimentais indica que a modelagem do problema é confiável e precisa. Assim, com base nos resultados apresentados nesta tese, sugere-se o prosseguimento dos estudos nesta área de pesquisa, enfocando, dentre outros, os seguintes tópicos:

- Análise de estruturas com outras geometrias, tais como cascas esféricas.
- Análise do equilíbrio e estabilidade de membranas e cascas hiperelásticas sob a ação de pressão hidrostática, considerando a presença de fluido externo e interno.
- Análise do comportamento dinâmico e estabilidade de membranas e cascas hiperelásticas sujeitas a cargas variáveis com o tempo.
- Análise experimental e numérica de biomembranas e estudo das leis constitutivas adequadas para este tipo de material e estudo de aplicações destes conhecimentos em bioengenharia e outras áreas da engenharia.