

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INSTABILIDADE ESTRUTURAL DE UMA CALOTA ESFÉRICA

por

Bruno Grebin Gasparotto

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

INSTABILIDADE ESTRUTURAL DE UMA CALOTA ESFÉRICA

por

Bruno Grebin Gasparotto

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. THAMY CRISTINA HAYASHI
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Ignácio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Jackson Manfredini Vassoler

Porto Alegre, 21, Junho de 2014.

Agradeço ao Dr. e aos meus pais.

GASPAROTTO, B.G. Instabilidade Estrutural de uma Calota Esférica. 2014. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

Com o aumento da resistência mecânica dos materiais, estruturas metálicas estão sendo projetadas com o mínimo de material possível. Estruturas com menos material tem como objetivo baixar o custo de construção além de uma consciência ambiental que deve ser incorporada na elaboração de “qualquer” projeto. Estruturas com pouco material, em um contexto, aonde a geometria do problema tem como objetivo suportar elevadas solicitações, são chamadas de estruturas esbeltas. O conceito de estruturas esbeltas está relacionado com um índice, que combina dimensões características da estrutura e seu valor adimensional permite medir a maior susceptibilidade (facilidade) da estrutura se instabilizar. Se a estrutura instabiliza após sofrer pequenos ou grandes deslocamentos, assim como, a influência das imperfeições na determinação da carga que produz a instabilidade, são aspectos que serão estudados no presente trabalho. Neste contexto se estuda no presente trabalho a instabilidade de uma calota esférica, pesquisando a influência da relação altura e espessura da calota, e das imperfeições geométricas impostas no método de elementos finitos. Este estudo servirá como subsídio para determinar a melhor opção do fechamento inferior de um recipiente de aerossol. A análise numérica foi utilizada para resolver problemas de instabilidade em cascas de calotas esféricas, assim como para o componente fundo, da embalagem de aerossol.

PALAVRAS-CHAVE: Instabilidade, Imperfeições Geométricas, Casca de calota esférica

GASPAROTTO, B.G. Structural Instability of a Spherical Caps. 2014. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

With the high mechanical strength of the materials, metallic structures are being designed with minimum material possible. Structures with less material aims to lower the cost of construction plus an environmental consciousness that must be incorporated in the development of "any" project. Structures with little material, in a context where the geometry of the problem aims to support high requests are called slender structures. The concept of slender structures associated with an index that combines characteristic dimensions of the structure and its dimensionless value measures the susceptibility maire (easily) if destabilize the structure. If the structure unstable after undergoing small or large displacements as well as the influence of imperfections in the determination of load that produces instability are subjects to be studied in the present work. In this context is studied in this paper the instability of a spherical cap, researching the influence of aspect ratio and thickness of the dome, and geometrical imperfections imposed by finite element method. This study will serve as input to determine the best option of the bottom closure of an aerosol container. The numeric analysis was used to solve problems of instability in spherical shells caps, as well as for the background component of the aerosol.

KEYWORDS: Instability, Initial Imperfections, Shallow Spherical Caps

SUMÁRIO

| | | |
|-----|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 1 |
| 2.1 | ESTABILIDADE ESTRUTURAL..... | 2 |
| 2.2 | INSTABILIDADE ESTRUTURAL | 3 |
| 2.3 | IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS | 4 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 4 | METODOLOGIA | 7 |
| 4.1 | ANÁLISE LINEAR DE FLAMBAGEM..... | 8 |
| 4.2 | ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA..... | 8 |
| 5 | SIMULAÇÕES..... | 8 |
| 5.1 | VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO..... | 9 |
| | <i>ANÁLISE LINEAR X ANÁLISE NÃO LINEAR.....</i> | <i>9</i> |
| | <i>IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS.....</i> | <i>10</i> |
| | <i>ESTUDO DE CONVERGÊNCIA.....</i> | <i>11</i> |
| 6 | EMBALAGEM DE AEROSSOL | 12 |
| 7 | MODELO DO FUNDO | 13 |
| 8 | CONCLUSÕES | 14 |
| 9 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 14 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2-1 Painel Cilíndrico | 2 |
| Figura 2-2 Relação Carga Aplicada por deslocamento | 3 |
| Figura 2-3 Flambagem de um arco simetricamente e assimetricamente | 4 |
| Figura 2-4 Relação carga deslocamento para estruturas sem e com imperfeições geométricas | 4 |
| Figura 3-1 Sensibilidade a imperfeições da casca esférica completa sendo q a carga critica com imperfeicoes, e q_{crit} a carga critica sem imperfeicoes..... | 5 |
| Figura 3-2 Carga de flambagem em relação a λ , e a influência das imperfeições | 6 |
| Figura 3-3 Flambagem em casca de calota esférica por Huang e Budiansky | 6 |
| Figura 3-4 Analise de Huang de imperfeições em casca de calota esférica assimétricas | 7 |
| Figura 4-1 Comparação dos resultados utilizando analise não linear (a) e uma análise linear (b) [Ansys [8]]..... | 7 |
| Figura 5-1 Condições de contorno do modelo numérico e malha..... | 8 |
| Figura 5-2 Flambagem Simétrica e Assimétrica | 9 |
| Figura 5-3 Comparação entre valores numéricas e analíticos. * Modelo Numérico | 10 |
| Figura 5-4 Resultados da calota com imperfeições e região delimitada por Huang para imperfeições (assimétrico) [Análise não linear resultados do modelo] | 11 |
| Figura 5-5 Dependência da Malha [Carga Crítica (MPa)] | 11 |
| Figura 6-1 (a)Modelo físico (casca metálica dentro de uma matriz de durepoxi para facilitar seu seccionamento), (b)Modelo numérico..... | 12 |
| Figura 6-2 (a) Detalhe da união entre o croço cilíndrico e o tampo (Recravação) | 12 |
| Figura 6-3 Aplicação das restrições nos pontos | 12 |
| Figura 6-4 Reversão do Fundo | 13 |
| Figura 6-5 Comparação visual da Flambagem em componente atual | 13 |
| Figura 7-1 Modelo Atual X Modelo Estudado..... | 13 |
| Figura 7-2 Carga de Flambagem x Espessura | 14 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 5-1 Propriedades do modelo..... | 9 |
| Tabela 6-1 Análise do fundo da embalagem..... | 13 |

1 INTRODUÇÃO

O mercado de embalagens metálicas tem grande participação nas embalagens confeccionadas para o transporte de alimentos e produtos químicos, são uma adaptação dos antigos copos e caixas de ouro e prata utilizados na antiguidade, conforme Hook, 2014. O revestimento de estanho foi incorporado ao processo na Bavária no início do século 14. A introdução de embalagens para a conservação de alimentos foi realizada pelo cozinheiro e confeitoiro *Nicholas Appert*, o qual ganhou doze mil francos do General Napoleão Bonaparte, por descobrir que a comida, em recipiente de vidro selado e fervido, poderia ser preservada por longos períodos. Esta descoberta acontece meio século antes da teoria do Germe de *Louis Pasteur* que explica o processo de pasteurização.

Em 1825, o inglês Thomas Kensett foi o primeiro a introduzir as folhas de aço para a confecção de embalagens metálicas para condicionamento de alimento, antes era utilizada chapas de ferro estanhado, segundo, Hook,2014.

No mercado de embalagens a embalagem metálica está na terceira colocação das mais utilizadas. Conforme a ABRE, 2014, as embalagens de papelão têm 33.2%, plástico 29.7% e as de metal 26.6%, totalizando 89.5% do mercado e produção total de embalagens no Brasil.

A geometria da embalagem metálica tem como principais componentes, um estrutura cilíndrica, chamada de corpo, uma geometria na forma de uma curva concâva, no fundo da embalagem, e um domo, que não será estudado no presente trabalho. Na medida que o peso das embalagens se torna um item crítico na produção da mesma, por implicar condicionantes relacionados como leveza para baratear o transporte, e rigidez adequada para permitir a estocagem e manuseio do material que a embalagem vai conter no seu interior, temos a confecção de uma estrutura esbelta, que terá como característica de falha, a falha por instabilidade estrutural.

Neste contexto podemos estabelecer o objetivo geral do presente trabalho: Aplicar conhecimentos de estabilidade elástica no projeto do fundo de uma embalagem metálica do tipo aerossol. Como objetivos específicos podem-se citar:

- Comparar valores de carga de colapso de calotas esféricas, utilizando o método dos elementos finitos, realizando diferentes tipos de análise e resultados analíticos.
- Realizar um estudo paramétrico da influência de parâmetros, tais como relação entre altura da calota e espessura da mesma, e inclusão de imperfeições geométricas na forma da calota.
- Determinar as dimensões de um tempo inferior de uma embalagem de aerossol.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: Após a presente introdução no capítulo 2 deste trabalho, será apresentado uma descrição do conceito de estabilidade estrutural. No capítulo 3 se particulariza a fundamentação teórica para o caso de calotas esféricas incluindo a influência das imperfeições geométricas. No capítulo 4 se apresentam os fundamentos teóricos dos diferentes tipos de análise feitos. No capítulo 5 se apresenta a aprovação do método numérico, a apresentação do tempo inferior do aerosol está no capítulo 6, assim como resultados obtidos experimentalmente. No capítulo 7 se apresentam resultados obtidos na análise do tempo inferior do aerossol mudando a espessura empregada. Finalmente no capítulo 8 se apresentam as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na construção de peças e componentes, a estrutura deve ter uma geometria adequada para resistir as condições que lhe são impostas, pois são estruturas contruídas a partir do aço, denominadamente com elevada resistência mecânica. Uma estrutura pode ser tão delgada, que quando submetida a uma condição de

compressão perde a estabilidade, ocorrendo a instabilidade. A Teoria da Estabilidade Estrutural ocupa-se, precisamente, do estudo dos fenômenos que condicionam o comportamento e a segurança de estruturas esbeltas.

Para o projeto de uma estrutura, com elevada resistência mecânica, porém com pouco material associado às condições impostas na sua utilização, temos que a estrutura não irá romper, devido à sua elevada resistência mecânica, porém o sistema está sujeito à ocorrência de instabilidade estrutural. O conceito de estabilidade está associado ao conceito de equilíbrio, este conceito pode ser visualizado e compreendido através de um problema clássico que trata de uma esfera rígida, submetida à ação do seu próprio peso, em repouso sobre uma superfície côncava, situação de equilíbrio estável, sobre uma superfície convexa, equilíbrio instável e sobre uma superfície plana, equilíbrio neutro. Se a esfera que está sobre a superfície côncava é deslocada para longe da posição de repouso, depois liberada, provavelmente irá voltar para sua posição original após alguma oscilação, isso é uma condição de equilíbrio estável. No caso de equilíbrio neutro, a esfera deslocada para uma nova posição não tem nenhuma tendência de voltar para a posição original e nenhuma tendência para ir para outro lugar. Em uma situação de equilíbrio instável, a esfera que está na superfície convexa irá se deslocar para longe da sua posição de origem, sem nenhuma restrição.

A instabilidade também é uma condição na qual um elemento que sofre compressão perde a capacidade de resistir às cargas crescentes e exhibe instantaneamente uma diminuição na capacidade de carregamento. Em outras palavras, a instabilidade ocorre no ponto máximo da curva carga/deslocamento.

Segundo Reis, Camotim, 2001, a verificação de segurança de uma estrutura é efetuada com base no “método dos estados limites”, estados limites estão associados a situações de (i) “colapso global ou local” (estados limites últimos) ou de (ii) “serviço ou exploração deficientes” (estado limite de utilização). Obviamente, os fenômenos de instabilidade estrutural correspondem sempre a situações de estado limite último, estado limite de instabilidade. O termo flambagem tem sido adotado como termo geral para designar fenômenos de instabilidade estrutural.

2.1 ESTABILIDADE ESTRUTURAL

O equilíbrio de uma estrutura sujeita a uma determinada ação pode ser “estável” ou “instável”. Para demonstrar este conceito será apresentado o problema de uma placa cilíndrica, a qual é gerada com uma grande curvatura (valor de $1/R$, elevado), conforme Figura 2-1.

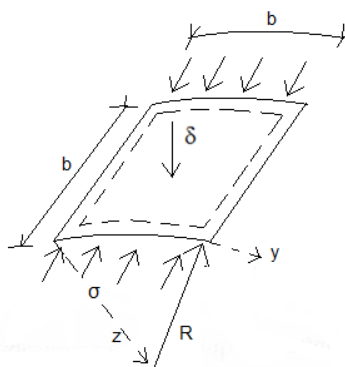


Figura 2-1 Painel Cilíndrico

A placa está apoiada em todo o corpo (linhas traçadas), a mesma está sofrendo uma compressão nas suas bordas com um valor de carga, σ , o ponto de aplicação da

perturbação, δ , está associada a direção radial da geometria. A placa apresenta comprimento e largura iguais, e uma espessura t , para esta configuração a mesma apresenta a seguinte relação carga deslocamento, Figura 2-2.

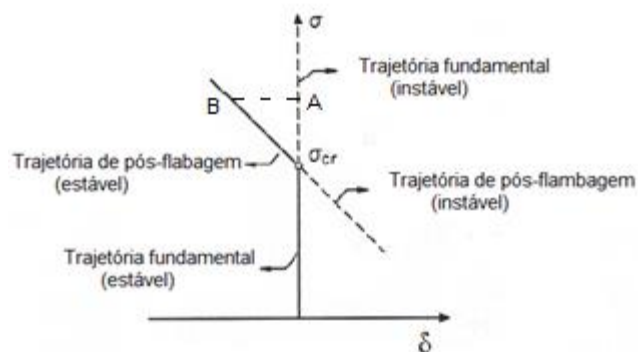


Figura 2-2 Relação Carga Aplicada por deslocamento

A trajetória de equilíbrio, relação carga/deslocamento radial δ , está apresentada na Figura 2-2. Este deslocamento δ será uma pequena perturbação radial, que quando aplicado com um valor de carga σ inferior a um determinado valor crítico, o sistema manterá a situação de equilíbrio estável. Em uma situação, aonde o σ for igual a um valor crítico, σ_{cr} , se aplicarmos uma perturbação no sentido radial positivo o sistema voltará a sua posição de equilíbrio ($\delta=0$), se no mesmo ponto, aplicarmos uma perturbação no sentido radial negativo, teremos uma trajetória de pós flambagem instável, não indicando aonde o sistema irá parar. Percebe-se também a existência de uma trajetória fundamental instável, que a mesma não perde o equilíbrio se não houver uma perturbação, porém, se aplicarmos uma perturbação na estrutura com uma carga acima de um valor crítico a mesma irá apresentar uma trajetória de equilíbrio estável, ponto A e B, ver na Figura 2-2.

2.2 INSTABILIDADE ESTRUTURAL

Problemas de instabilidade em sistemas estruturais podem ser subdivididos em duas categorias:

O problema de instabilidade bifurcacional tem como característica a existência de uma trajetória de equilíbrio, linear ou não linear, que se inicia na origem do diagrama carga/deslocamento, uma trajetória de equilíbrio de pós-flambagem, que não passa na origem do diagrama e um ponto de bifurcação, que corresponde à intersecção das duas trajetórias no qual as configurações de equilíbrio passam de estáveis para instáveis.

A segunda categoria de instabilidade é por ponto limite, que tem como característica a existência de uma trajetória de equilíbrio não linear que passa na origem do diagrama carga/deslocamento, um ponto limite, que corresponde ao anulamento do declive da trajetória de equilíbrio, no qual as configurações passam de estáveis para instáveis e, após esse ponto, com um pequeno aumento do carregamento, a estrutura irá passar dinamicamente para uma configuração de equilíbrio afastada e estável.

Percebe-se que o aumento do carregamento provoca uma diminuição progressiva na rigidez da estrutura, até que está se anula no ponto limite. Uma trajetória com essas características demonstra que não é possível prever o fenômeno de *snap-through* utilizando uma análise linear. Arcos rasos e cápsulas esféricas são exemplos desse segundo tipo de instabilidade.

Se uma fina casca de esfera for comprimida por uma pressão externa uniforme, primeiramente ela mantém a sua forma e depois sofre uma contração uniforme. Se a pressão for aumentada, a casca se torna instável e a flambagem ocorre.

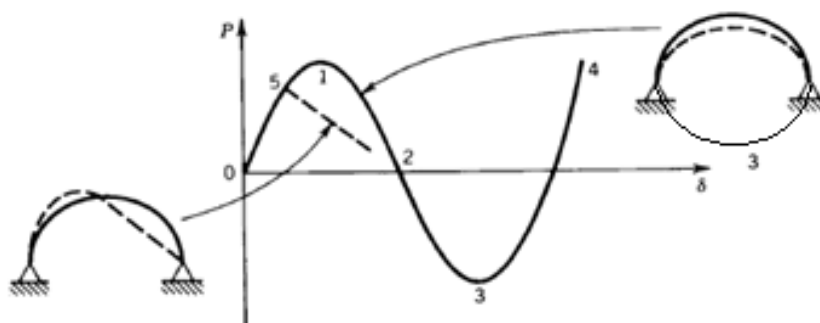


Figura 2-3 Flambagem de um arco simetricamente e assimetricamente

Percebe-se na Figura 2-3 que o acontecimento da flambagem simétrica nos resulta em uma flambagem por ponto limite, ou snap-through, sendo que uma flambagem assimétrica ocorrerá por instabilidade bifurcacional.

2.3 IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS

A carga crítica de uma estrutura real não necessariamente coincide com a carga de colapso de uma estrutura ideal. Para determinar a carga de colapso de uma estrutura é necessário considerar nos cálculos as imperfeições geométricas, na forma da geometria e excentricidades no carregamento, que estão presentes em todas as estruturas reais, para isto se deve considerar termos não lineares nas equações de equilíbrio. Conforme [Reis, Camotim, 2012] as imperfeições iniciais reduzem a carga de instabilidade do modelo perfeito, respeitando a lei de sensibilidade à imperfeição, porém, o mesmo menciona que nem todos os sistemas estruturais, cuja instabilidade é bifurcacional, são sensíveis às imperfeições geométricas. Conforme Figura 2-4, as imperfeições geométricas (linhas traçadas indicadas na Figura) podem tornar a relação carga/deslocamento não linear durante toda a aplicação da carga, deixando de existir o ponto limite, ou ponto de bifurcação.

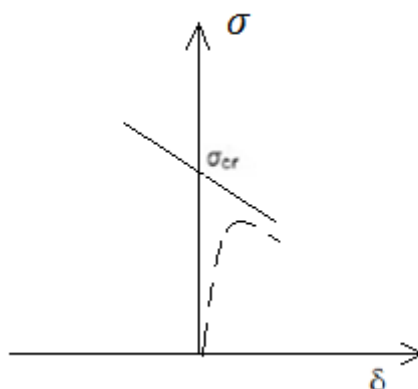


Figura 2-4 Relação carga deslocamento para estruturas sem e com imperfeições geométricas

Com a aplicação das imperfeições geométricas no sistema (linhas traçadas), percebemos que a ocorrência do ponto de bifurcação, no caso da placa cilíndrica, deixa de existir, além de deixar de existir outras trajetórias possíveis para o sistema, percebe-se também que para este caso, a colocação de imperfeições geométricas resultada em um valor muito abaixo do esperado, ver Figura 2-4.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme [Allen, Bulson,1980] uma esfera completa, sofrendo compressão uniforme, gera uma tensão na casca, que é dada pela Equação 3.1.

$$\sigma = \frac{qr}{2t} \quad [3.1]$$

Onde q é a carga aplicada, r o raio da esfera, t a espessura da casca. Com o aumento da tensão, a casca se torna instável e a flambagem acontece. Ao considerar que a flambagem aconteça de forma simétrica no primeiro modo e atribuindo a condição clássica de pequenos deslocamentos a carga crítica é encontrada de maneira similar a flambagem em um tubo cilíndrico e dada pela Equação 3.2.

$$q_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{r}\right)^2 \quad [3.2]$$

A análise da flambagem, demonstra que o fenômeno é similar as cascas cilíndricas, no qual, se utilizarmos as imperfeições geométricas, o valor da carga crítica cai.

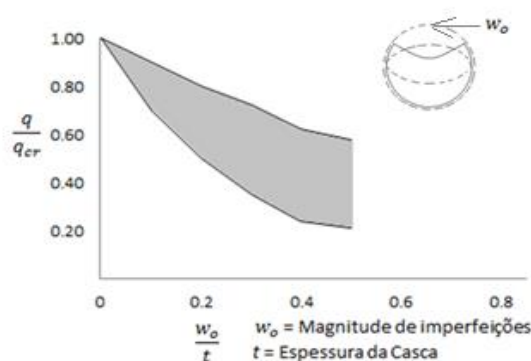


Figura 3-1 Sensibilidade a imperfeições da casca esférica completa sendo q a carga crítica com imperfeições, e q_{crit} a carga crítica sem imperfeições.

[Camotim et al., 2001]

A Figura 3-1 mostra que imperfeições geométricas, impostas no centro da onda de flambagem diminuem a carga crítica q , sendo que com uma imperfeição no ponto central da casca igual $w_0=0.5t$ a relação entre a carga crítica com e sem imperfeições será $q/q_{crit}= 0.25$.

A flambagem de uma casca de calota rasa (altura da calota menor que seu raio), submetida a uma carga uniformemente distribuída de compressão, acontece quando o valor da carga atinge o valor dado pela Equação 3-2, a qual representa a carga para flambagem inicial associado a um modo de flambagem simétrico, formando diferentes número de lobulos. O número de lobulos do modo está associado com a pressão de flambagem e varia de acordo com a geometria da calota, em termos de H/t , altura e espessura.

No entanto, as bordas da calota são fixas, distorcendo a simetria da casca esférica completa para uma forma assimétrica, tornando o problema de instabilidade por bifurcação de equilíbrio. Se assumirmos que a flambagem aconteça associada a um modo simétrico a relação carga/deslocamento se torna não linear até um valor limite de pressão, o qual, quando atingido, torna a calota instável, então *snap-through* acontece, com uma pressão constante até um valor limite no qual o deslocamento se torna muito grande, fazendo que a ondulação primária tenha uma grande depressão no meio da calota.

A pressão para acontecer o *snap-through* foi calculada por *Budiansky Apud Bulson 1980*, que expressou a existência de uma relação entre a carga crítica de flambagem de uma completa casca esférica com a carga de flambagem por *snap-through*, em função de um parâmetro de esbelteza, que é função da relação entre a altura da calota e a espessura, H/t , conforme Equação 3-3. Ele também demonstrou que, com a utilização de pequenas imperfeições geométricas, a carga de flambagem por *snap-through* diminui. Isto está ilustrado na Figura 3-2.

$$\lambda = 2(3(1 - \nu^2))^{1/4} \left(\frac{H}{t}\right)^{1/2} \quad [3.3]$$

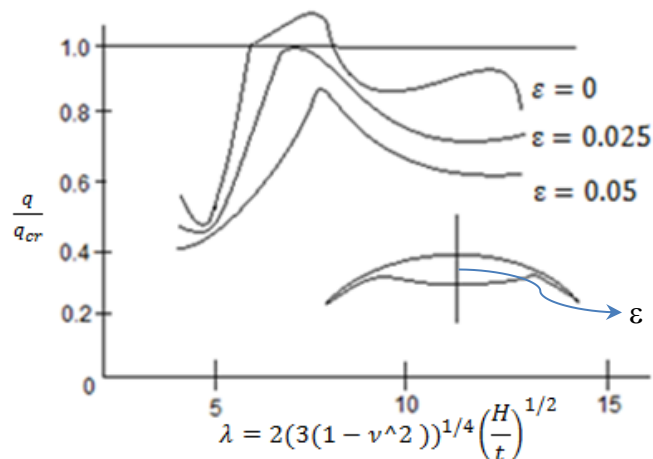


Figura 3-2 Carga de flambagem em relação a λ , e a influência das imperfeições

[Camotim et al., 2001]

Conforme a Figura 3-2 percebe-se que se a flambagem acontece-se de maneira simétrica, existiria um valor de λ a qual a carga de flambagem poderia ser maior que a carga crítica da calota esférica completa (valor definido na expressão 3.2). No entanto foi observado por Huang que, para relações de λ maior que 5.5, a flambagem poderia acontecer de forma assimétrica a qualquer instante, com uma linha nodal ao longo da circunferência passando pelo centro da calota (a configuração de flambagem acontece passando pelo centro da calota sem deslocar).

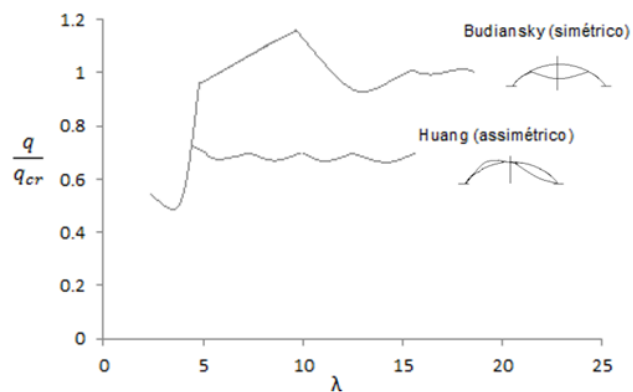


Figura 3-3 Flambagem em casca de calota esférica por Huang e Budiansky

[Camotim et al., 2001]

Com a Figura 3-3 Huang Apud Bulson 1980 ilustra que se a flambagem acontecesse de forma assimétrica, ela teria uma relação de 0,76 vezes o valor da carga crítica. Huang também demonstrou que o efeito das imperfeições geométricas impostas no centro da calota podem fazer com que a carga de flambagem caia para 0,25 vezes o valor da carga crítica, conforme Figura 3-4.

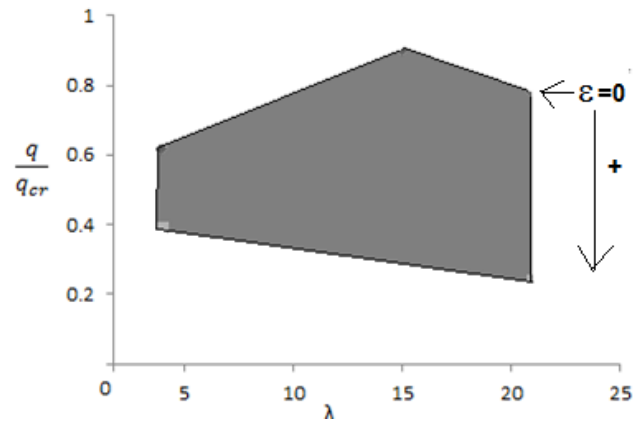


Figura 3-4 Análise de Huang de imperfeições em casca de calota esférica assimétricas
[Camotim et al., 2001]

4 METODOLOGIA

O modelo numérico foi realizado no software de elementos finitos *Ansys*[5], o qual diz que a análise de flambagem pode ser realizada de duas maneiras: uma análise linear e uma análise não linear. A análise linear pode ser usada para obtenção da bifurcação de equilíbrio (a estrutura sai do equilíbrio a partir da configuração indeformada), um dos tipos de instabilidade. A segunda análise leva em consideração as não linearidades da estrutura ou do componente, uma vez que a estrutura pode sofrer grandes deslocamentos e a geometria da estrutura pode mudar ao longo do carregamento, isto é, a matriz de rigidez $[K]$, que leva em conta os deslocamentos, muda devido à mudança de geometria da estrutura ou devido à rotação do material, esta análise pode ser usada para a obtenção do segundo tipo de instabilidade.

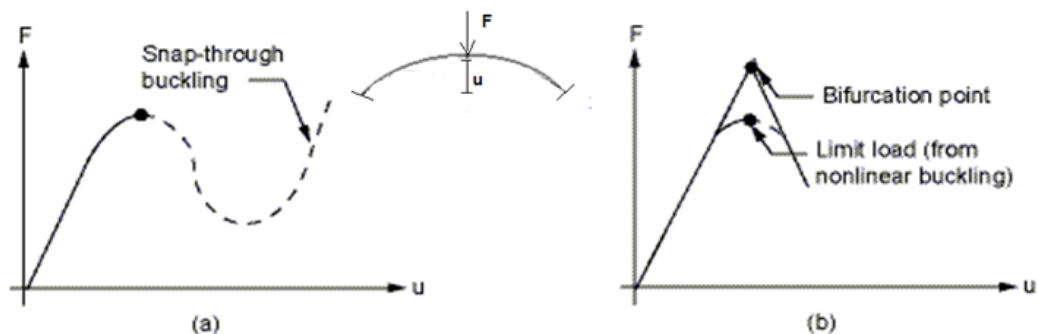


Figura 4-1 Comparação dos resultados utilizando análise não linear (a) e uma análise linear (b) [Ansys [8]]

Conforme a Figura 4-1 nota-se que quando se utiliza uma análise linear de flambagem, acontece uma aproximação do resultado, sendo necessária uma análise não linear geométrica para identificar a instabilidade por snap-through, ou termos no caso da ocorrência de bifurcação de equilíbrio um resultado mais preciso.

4.1 ANÁLISE LINEAR DE FLAMBAGEM

A análise linear de flambagem, *EigenValue Buckling*, prevê a força de flambagem de uma estrutura elástica ideal. O mesmo informa que imperfeições e não linearidades não são levadas em consideração para o cálculo da carga crítica. A análise linear de flambagem utiliza o método *Block Lanczos apud [Ansys[8]]* para a extração dos autovalores de flambagem. O método é uma variação do clássico algoritmo *Lanczos*, onde as recursões são realizadas usando um bloco de vetores.

4.2 ANÁLISE NÃO LINEAR GEOMÉTRICA

A análise não linear geométrica é realizado resolvendo o problema em forma incremental, procurando o equilíbrio em cada incremento de cargas empregando o método de *Newton-Raphson*.

5 SIMULAÇÕES

O modelo numérico foi construído a partir da Equação [5.1].

$$a = \sqrt{(R_1)^2 - (R_1 - H)^2} \quad [5.1]$$

Aonde o R_1 , e o raio da calota, H sendo a altura da calota e o a sendo a base da calota esférica, sendo que $R_1 = 60$ mm, a altura da calota foi de 1 mm gerando uma base, a , de de 10.1 mm, como se ilustra na Figura 5-1.

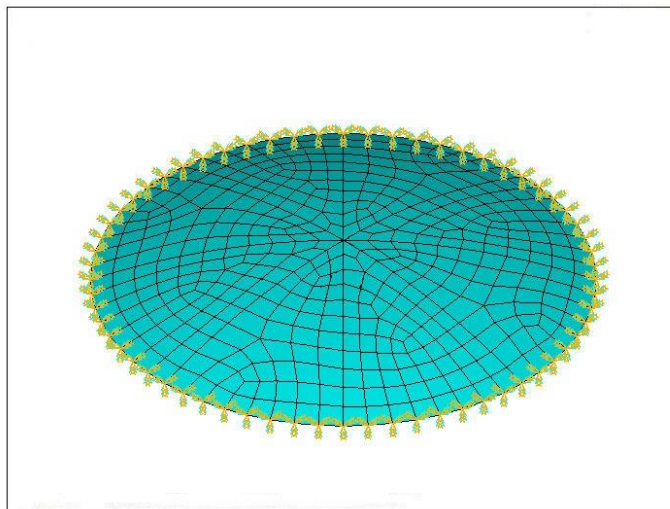


Figura 5-1 Condições de contorno do modelo numérico e malha

O elemento utilizado para a simulação numérica foi o Shell181, que contém 4 nós por elementos, assim como 6 graus de liberdade. Segundo Ansys[5] o elemento pode ser utilizado quando temos problemas com grandes deformações (não linearidades geométricas). Para a geração da malha, foi estipulado o tamanho máximo do elemento em, $a/10$. Foi realizado um estudo preliminar de convergência da malha para definir a discretização utilizada como adequada. As condições de contorno levam

em consideração que a borda da calota esteja engastada. A tabela [5.1], apresenta as propriedades dos materiais e principais dimensões da geometria modelada.

Tabela 5-1 Propriedades do modelo

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|----------------------------------|-------|---------|
| Modulo de elasticidade (E) | 200E9 | N/m^2 |
| Coeficiente de Poisson (ν) | 0.30 | - |
| Altura da calota (H) | 0.001 | m |
| Raio da base (a) | 0.011 | m |
| Raio da calota (R_1) | 0.06 | m |

5.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A verificação do modelo numérico foi realizada em três partes, primeiramente se avaliou os dois tipos de análise que o software dispõe para a resolução de problemas de flambagem, em uma segunda abordagem, foi realizada a comprovação das imperfeições geométricas, e em uma terceira análise foi analisada a dependência da malha nos resultados gerados.

ANÁLISE LINEAR X ANÁLISE NÃO LINEAR

Neste capítulo será realizado um estudo de diferentes alturas da calota, para a verificação e comprovação da teoria de Budiansky, assim como a teoria de Huang, que nos diz que a flambagem em uma casca de calota esférica pode acontecer de forma simétrica e de forma assimétrica tendo uma dependência com a relação de altura e espessura, λ . Na Fig 5-2 se ilustram exemplos de modo de flambagem simétrica e assimétrica para a calota esférica estudada.

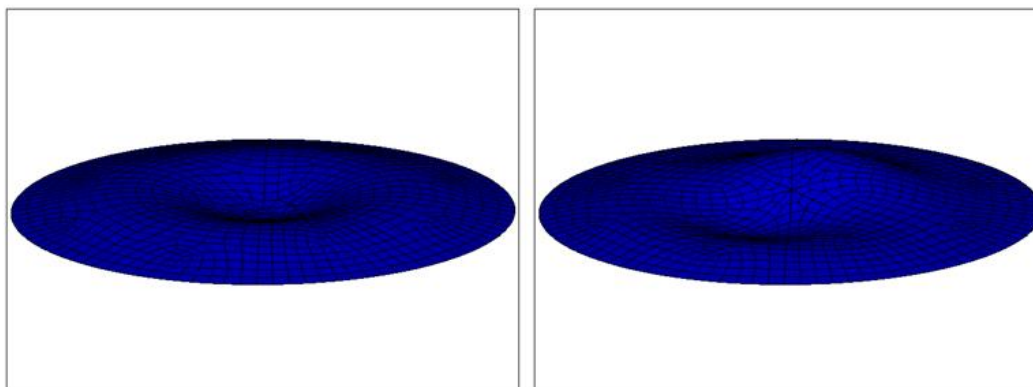


Figura 5-2 Flambagem Simétrica e Assimétrica

Para a verificação do modelo foi testada a calota acima, com o mesmo valor de raio, modificando a sua altura H [1 mm até 4,25 mm]. Estipulou-se que a carga aplicada para a análise não linear é de 1,5 vezes a carga crítica para o primeiro modo de flambagem encontrado na análise linear. A carga crítica pela Equação 3-2 é de 2,43 MPa.

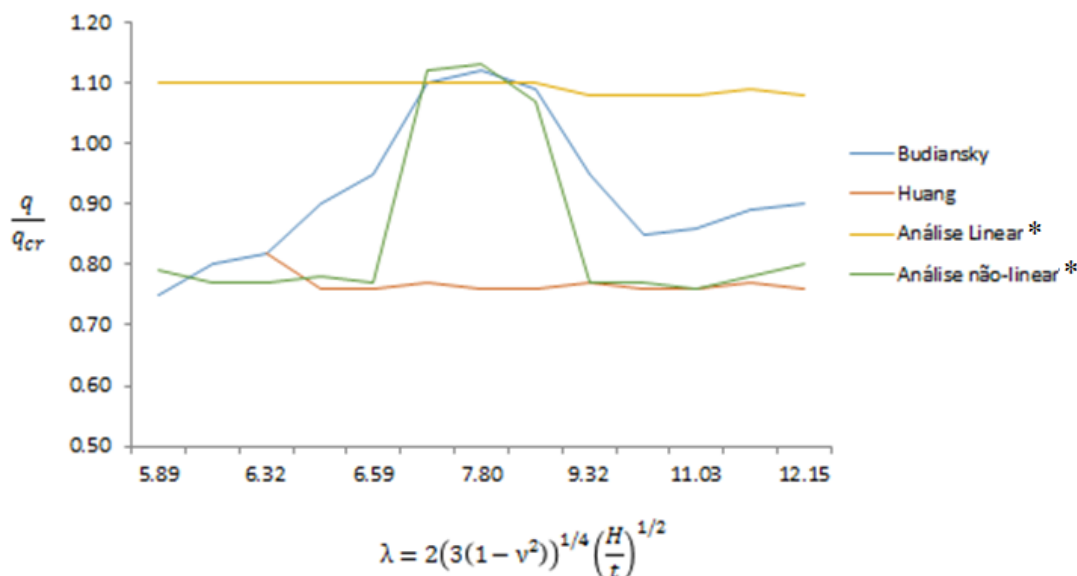


Figura 5-3 Comparação entre valores numéricos e analíticos. * Modelo Numérico

Para a configuração da calota esférica estudada, percebeu-se que o modelo está convergindo e que uma análise não linear tem resultados mais precisos.

A análise numérica demonstrou que a flambagem assimétrica gerou uma carga de flambagem de 0,78 vezes a carga crítica, gerando resultados próximos ao de Huang, e também demonstrou um pico, carga de flambagem acima da carga crítica, quando o λ está entre 7 e 8, o qual está de acordo com o predito por Budiansky [Apud Bulson 1980].

IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS

Para analisar o efeito das imperfeições geométricas no modelo, foi utilizado uma análise linear de flambagem a qual gravou-se o primeiro modo de flambagem escalado por um coeficiente. Os deslocamentos iniciais são adicionados a geometria, utilizando o comando UPGEOM do sistema ANSYS. Com a configuração inicial assim modificada se realizou uma análise não linear com o valor de carga de 1,5 vezes a carga encontrada no primeiro modo de flambagem.

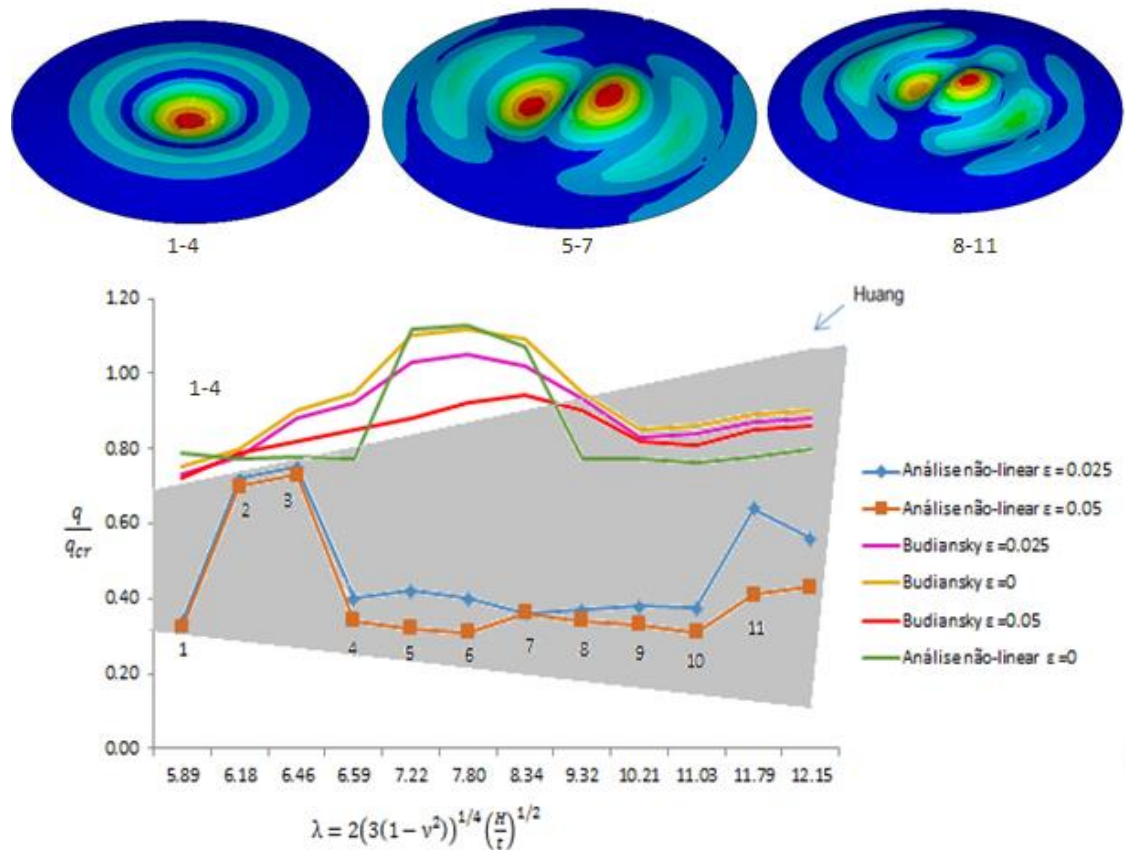


Figura 5-4 Resultados da calota com imperfeições e região delimitada por Huang para imperfeições (assimétrico) [Análise não linear resultados do modelo]

Com a Figura 5-4, comprovou-se que as imperfeições geométricas diminuem a carga de flambagem. Conclui-se que a análise do tempo inferior da embalagem de aerossol vai conter imperfeições de um valor de $\epsilon = 0,025$, para a realização da simulação, este valor de imperfeições foi escolhido devido a Budiansky, utilizar este valor para explicar as imperfeições impostas em uma flambagem simétrica.

ESTUDO DE CONVERGÊNCIA

Para comprovar a não dependência da malha na simulação realizou uma análise de flambagem linear de uma casca esférica com 1 mm de altura, base de 10.90 mm, espessura de 0.19 mm de casca e um raio de 60 mm.

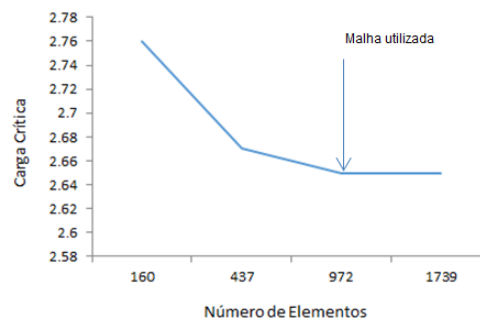


Figura 5-5 Dependência da Malha [Carga Crítica (MPa)]

A Figura 5-5 mostra que com um número menor de elementos, a análise resultou em um valor acima do esperado, e que para uma discretização maior de 972 elementos não há perceptível melhora no resultado.

6 EMBALAGEM DE AEROSSOL

Para realizar a análise do fundo do aerossol simplificou-se a embalagem mantendo somente o fundo, conforme Figura 6-1, 6-2 e 6-3. O fundo atualmente é produzido na espessura de 0.34 mm.

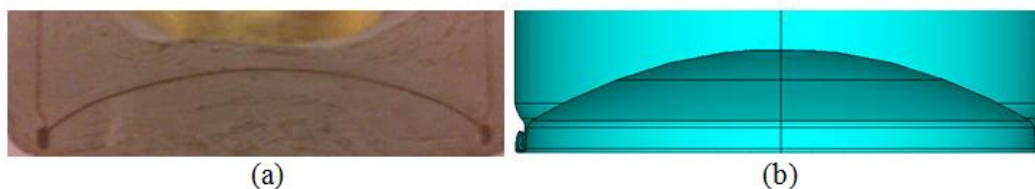


Figura 6-1 (a) Modelo físico (casca metálica dentro de uma matriz de durepoxi para facilitar seu seccionamento), (b) Modelo numérico

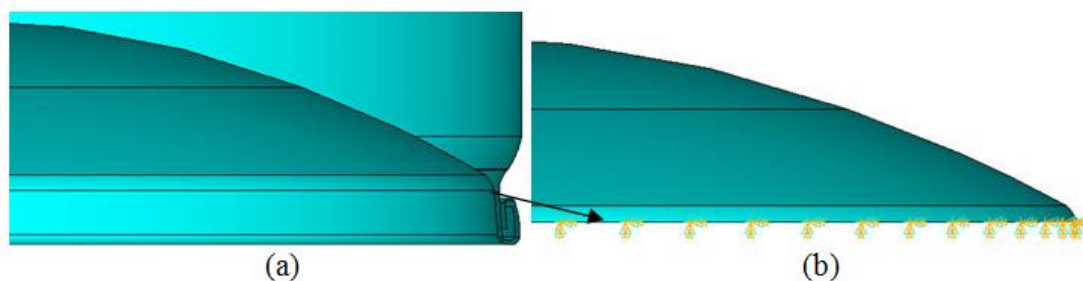


Figura 6-2 (a) Detalhe da união entre o corpo cilíndrico e o tampo (Recravação)

(b) Condições de contorno

Na figura 6-2(b) temos a aplicação de restrição de deslocamento na direção perpendicular a linha, assim como a aplicação de restrição de momentos para todas as direções. Na figura 6-3, temos a colocação da restrição para que o componente possa expandir de maneira parecida com a realidade.

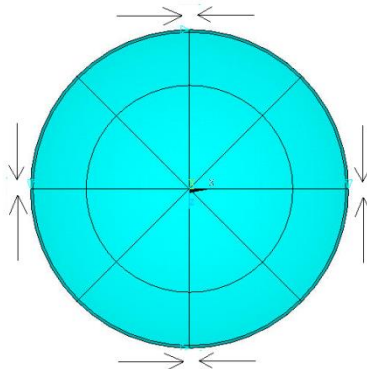


Figura 6-3 Aplicação das restrições nos pontos

Com a aplicação dessas restrições, Figura 6-3, é possível que a geometria se expanda na direção radial. Para esta configuração de fundo, atualmente usada, a mesma apresentou uma flambagem assimétrica, ocorrendo a flambagem por instabilidade bifurcacional, os resultados são apresentados na tabela 6-1.

Tabela 6-1 Análise do fundo da embalagem

| Carga crítica para Flambagem Linear | Carga não-linear com Imperfeições |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 45.6 bar | 20.9 bar |

A análise do fundo do aerosol, demonstra-se compatível com os resultados experimentais, aonde a pressão de reversão do fundo é de 17 bar, sendo que com a simulação computacional conclui-se que a carga de flambagem é de 20.9 bar. Compreende-se que quando a estrutura real está sobre pressão o fundo do aerosol possa empurrar a linha na qual foi imposta as condições de contorno na direção perpendicular a linha. A Figura 6-4, representa a reversão completa do fundo. A Figura 6-5 representa o modo de flambagem em componente atual, comparando a simulação com o real.



Figura 6-4 Reversão do Fundo

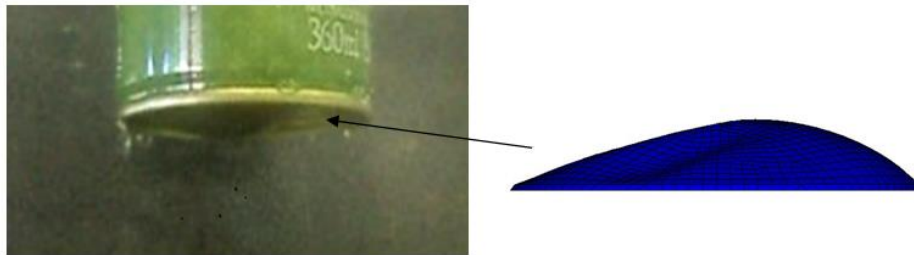


Figura 6-5 Comparação visual da Flambagem em componente atual

7 MODELO DO FUNDO

Levou-se em consideração que o fundo do aerosol deveria ter uma base de 30.96 mm. A construção do modelo foi efetuada a partir do conceito de um tampo torisférico utilizado em vasos de pressão.

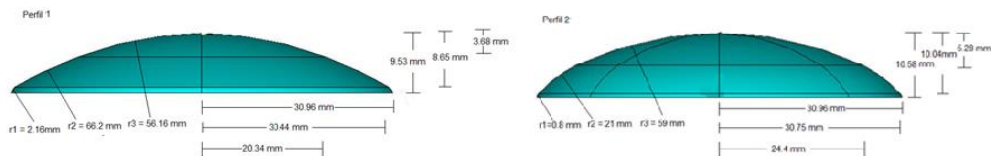


Figura 7-1 Modelo Atual X Modelo Estudado

A construção do modelo, foi baseada na Figura 7-1, e os resultados encontrados estão expressos na figura 7-2.

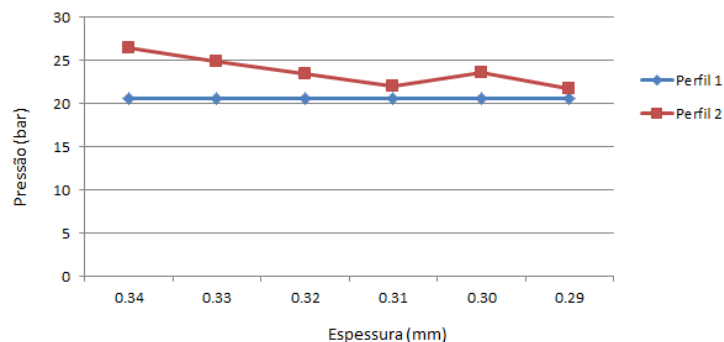


Figura 7-2 Carga de Flambagem x Espessura

8 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se o conceito de estabilidade estrutural, o qual demonstrou a difícil percepção dos diferentes modos de instabilidade em uma casca de calota esférica, assim como a caracterização do ponto de transição de estável para instável dependendo da geometria da estrutura. Aprendeu-se também que o conceito de flambagem está associada a perda de instabilidade da geometria do problema, e não do material imposto no sistema.

Para a realização de uma análise de flambagem é necessário o conhecimento do conceito de instabilidade, assim como da análise não linear. A dificuldade de se realizar uma análise não linear está embutida nas condições de contorno que são aplicadas no modelo. O conceito de imperfeições geométricas mostra-se muito importante na análise de flambagem, demonstrando que para certas estruturas a mesma apresenta um decréscimo no valor da carga de flambagem, para outras a mesma não tem importância.

Percebe-se que para um melhor resultado, deve-se simular o fundo do aerossol com menos simplificações, porém o modelo de fundo simulado nestas condições apresentou resultados satisfatórios, o qual, houve uma diminuição da espessura de 0.34 mm para 0.29 mm, gerando a mesma carga de flambagem.

Novos testes práticos podem ser realizados com uma espessura de folha mais fina no fundo, para que a instabilidade aconteça antes, e podermos ter uma maior aproximação do valor, assim como a mudança do valor das imperfeições geométricas, que pode ser aperfeiçoada com novas análises

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ABRE/FGV. (February de 2014). *Associação Brasileira de Embalagens*. Acesso em 25 de May de 2014, disponível em Associação Brasileira de Embalagens: <http://www.abre.org.br/setor/dados-de-mercado/>
- Allen, H., & Bulson, P. (1980). *Background to Buckling*. Berkshire: McGraw-Hill Book Company.
- Camotim, A. R.-D. (2001). *Estabilidade Estrutural*. Alfragide: Mc-GRAW-HILL.
- Dinar Camotim, A. R. (2012). *Estabilidade e Dimensionamento de Estruturas*. Apartado: Edições Orion.
- HELP, ANSYS. (v 14). *HELP, ANSYS*.
- Hook, P., & Heimlich, J. E. (24 de May de 2014). *A History of Packaging*. Columbus, OH 43202-1578, United States of America. Acesso em 2014, disponível em Ohio State University Fact Sheet.
- Juvandes, L. F. (2002). *Ressistência dos Materiais 2. Instabilidade Elástica*, p. 4.

Theodore V. Galambos. (1988). *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*.
Canada: John Wiley & Sons, INC.

Wikipedia. (s.d.). <http://pt.wikipedia.org>. Acesso em 28 de 05 de 2014, disponível em
<http://pt.wikipedia.org>: http://pt.wikipedia.org/wiki/Louis_Pasteur