



CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISES NUMÉRICAS DO FENÔMENO DE FLAMBAGEM PARA LATAS DE ALUMÍNIO

Rodrigo Villaca Santos, rodrigov@utfpr.edu.br¹
George Gabriel Haubert, georgehaubert@alunos.utfpr.edu.br¹
Leticia Barizon Col Debella, leticiacoldebella@hotmail.com¹

¹DAMEC, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Via do Conhecimento, Km 1, Pato Branco, PR, Brasil

Resumo: Estruturas esbeltas são encontradas em várias aplicações da engenharia como aviação, torres de resfriamento, silos metálicos, vasos de pressão e oleodutos. Devido à espessura dessas estruturas comparativamente com suas outras dimensões, a flambagem corresponde a um possível mecanismo de falha. Portanto torna-se essencial o conhecimento tanto do comportamento como dos métodos a serem utilizados para prever a falha por flambagem. Neste trabalho será determinado o valor da carga crítica de flambagem através de um estudo de caso, utilizando latas de alumínio. Para isso essa determinação será feita, por meio do método dos elementos finitos, através das seguintes análises: análise estática linear pelo método do autovalor, análise estática não linear, análise dinâmica transiente implícita e análise dinâmica transiente explícita. Para as análises, inicialmente foi verificado qual o melhor elemento de casca a ser utilizado e, com isso, determinou-se a carga crítica por meio de gráficos representando as regiões de pré-flambagem e a pós-flambagem e o tempo de computação para cada análise. Como forma de se ter um parâmetro comparativo do valor da carga crítica para as análises numéricas, foi efetuado um ensaio experimental em amostras de latas de alumínio. Como resultado foi observado que com a utilização da análise não linear e das análises dinâmicas, tem-se uma maior quantidade de informações sobre a evolução do carregamento aplicado. Também com o uso da análise dinâmica transiente implícita tem-se um valor de carga crítica mais aproximado em relação ao ensaio experimental.

Palavras-chave: Carga Crítica, Método dos Elementos Finitos, Latas de Alumínio.

1. INTRODUÇÃO

A flambagem é um mecanismo de falha mecânica associada à instabilidade estrutural. Esse fenômeno ocorre quando o valor do carregamento compressivo aplicado ultrapassa um determinado limite conhecido como carga crítica (P_{cr}). A carga crítica corresponde ao valor do carregamento definido entre a pré-flambagem e a pós-flambagem. A pré-flambagem corresponde à região antes da instabilidade estrutural e a pós-flambagem após essa instabilidade.

Muitos trabalhos já foram feitos sobre flambagem, em específico, trabalhos analisando a flambagem de casca, em latas de alumínio, que é o tema deste estudo (TENG, 1996). A determinação da carga crítica de flambagem para latas de alumínio foi estudada em diversos trabalhos analisando características como: efeitos das imperfeições geométricas iniciais das latas, efeitos dos tipos de elementos utilizados na discretização da geometria por elementos finitos, taxa de carregamento de compressão, acoplamentos entre ensaios de identificação e flambagem (DONNELL, 1934; DICK, 1994; REID *et al.*, 2001). Porém, um estudo comparativo entre vários métodos de análises de flambagem como: análise estática linear pelo método do autovalor, análise estática não linear, análise dinâmica transiente implícita e análise dinâmica transiente explícita, ainda não foi investigado.

Portanto, o objetivo desse trabalho é, através de um estudo de caso, utilizando latas de alumínio, determinar o valor da carga crítica, por meio do método dos elementos finitos (MEF), utilizando as seguintes formas de análises: análise estática linear pelo método do autovalor, análise estática não linear, análise dinâmica transiente implícita e análise dinâmica transiente explícita. E como forma de se ter um parâmetro comparativo do valor da carga crítica para as análises numéricas, será efetuado um ensaio experimental em amostras de latas de alumínio.

Para cada análise será obtido um gráfico Deslocamento versus Força ou Tempo versus Força determinando a curva de pré e pós-flambagem. Com isso será verificado a evolução do carregamento aplicado em cada análise e, também,

avaliado qual é a melhor aproximação, em termos do valor da carga crítica, com o valor obtido através do ensaio em laboratório. Ainda serão analisados os efeitos do tipo de elemento de casca utilizado para as análises.

Para todas as análises, será utilizado o *software* Ansys 16.0, e, em específico, para a análise dinâmica transiente explícita também será utilizado o *software* LS-DYNA.

1.1. Análises Estáticas

a) Análise Linear pelo Método do Autovalor

A análise de flambagem pelo método do autovalor corresponde a uma análise estática elástica linear. Essa análise pode ser considerada conservadora ou idealizada, pois, o valor da carga crítica obtido será maior do que o valor da carga crítica real da estrutura em análise. A Fig. 1 representa um comparativo entre uma análise de flambagem pelo método do autovalor e uma análise de flambagem não linear. Observa-se que pela análise de flambagem pelo método do autovalor somente consegue-se obter a região da pré-flambagem no diagrama deslocamento versus força.

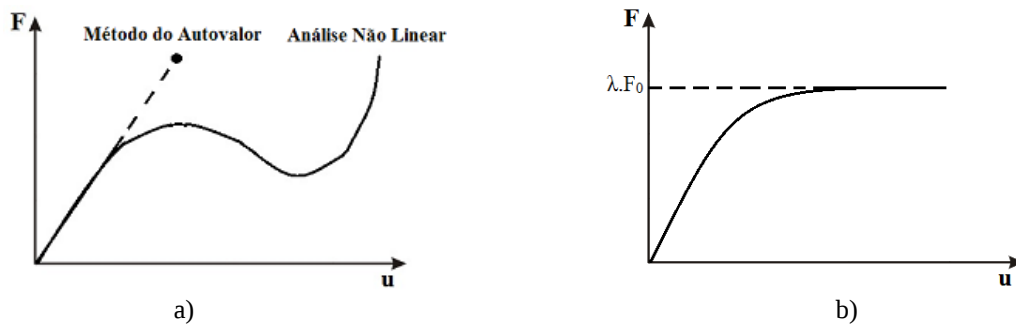


Figura 1: a) Análise de flambagem pelo método do autovalor e análise de flambagem não linear. b) Representação da carga crítica $P_{cr} = \lambda.F_0$, pelo método do autovalor.

O método do autovalor tem por objetivo encontrar a carga crítica de flambagem, representada pelo valor de $P_{cr} = \lambda.F_0$, Fig. 1. A formulação matemática do método pode ser obtida pela seguinte equação:

$$[K_e + \lambda_i.K_g].\Phi_i = 0, \quad (1)$$

sendo $[K_e]$ a matriz de rigidez elástica, λ_i os autovalores, $[K_g]$ a matriz de rigidez geométrica e Φ_i os autovetores. A carga crítica é obtida pelo menor valor de λ calculado (COOK *et al.*, 1989).

b) Análise Não Linear

A análise não linear corresponde a uma análise estática não linear. Na análise não linear existem vários métodos de cálculo, como o controle de carregamento, controle de deslocamento e o método *arc-length* (ANSYS, 2013). Para esse trabalho utilizou-se um controle de deslocamento.

Pelo método do controle de deslocamento, Fig. 2, o carregamento é aplicado através de incrementos de deslocamentos, e a convergência do método é obtida pelo método de Newton-Raphson. Utilizando esse método consegue-se obter as regiões de pré e pós-flambagem no diagrama deslocamento versus força. E, comparativamente, a análise de flambagem não linear é mais precisa do que a análise de flambagem pelo método do autovalor.

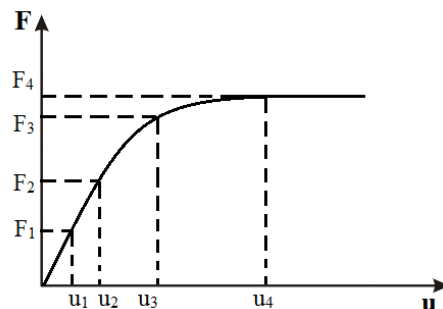


Figura 2: Análise estática de flambagem não linear pelo método de controle de deslocamento.

A formulação matemática do método utilizado neste trabalho foi o método *full* Newton-Raphson, Eq. (2), onde a matriz rigidez é atualizada a cada iteração de equilíbrio,

$$\{F\} = ([K_e] + [K_g]) \cdot \{U\}, \quad (2)$$

e

$$[K_e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV,$$

$$[K_g] = \int_V [B]^T [G] [B] dV,$$

sendo $\{F\}$ o vetor força, $[K_e]$ a matriz de rigidez elástica, $[K_g]$ a matriz de rigidez geométrica e $\{U\}$ o vetor deslocamento (COOK *et al.*, 1989).

1.2. Análises Dinâmicas

a) Análise Dinâmica Transiente Implícita

As análises transientes podem ser determinadas por métodos como a superposição modal e a integração direta. No entanto, como nesse trabalho serão analisados os efeitos não lineares, o método da integração direta se torna mais relevante.

A análise dinâmica transiente implícita corresponde a uma análise onde a solução dos parâmetros a serem determinados em um dado instante t , como as acelerações, velocidades e deslocamento, é baseada na condição do instante anterior ($t - \Delta t$). A equação do movimento resolvida pela análise dinâmica transiente implícita é:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\} \quad (3)$$

sendo $[M]$, $[C]$ e $[K]$ matrizes massa, amortecimento e rigidez respectivamente e $\{\ddot{U}\}$, $\{\dot{U}\}$ e $\{U\}$ vetores aceleração, velocidade e deslocamento respectivamente (COOK *et al.*, 1989).

Para determinar a solução da Eq. (3) pela análise dinâmica transiente implícita existem diversos métodos como os métodos de Newmark e de Hilber, Hughes and Taylor (HHT), sendo o segundo método uma variação do primeiro. Neste trabalho será utilizado o método HHT através da expansão de diferenças finitas no intervalo do tempo. E para a solução do problema não linear será obtida uma série de aproximações lineares pelo método de Newton-Raphson (BATHE, 1982).

b) Análise Dinâmica Transiente Explícita

Ao contrário da análise dinâmica transiente implícita a análise dinâmica transiente explícita utiliza a integração no tempo por diferenças centrais. Nessa análise a solução dos parâmetros a serem determinados em um dado instante t (acelerações, velocidades e deslocamento) é baseada na condição dos instantes separados por Δt , isto é, $(t - \Delta t)$ e $(t + \Delta t)$. A equação semi-discreta do movimento no instante de tempo t é:

$$[M]\{\ddot{U}_t\} = \{P_t\} - \{F_t\} + \{H_t\} \quad (4)$$

sendo $[M]$ a matriz massa, $\{\ddot{U}_t\}$ as components nodais da aceleração, $\{P_t\}$ o vetor das forças externas e forças de corpo, $\{F_t\}$ é o vetor tensão divergente e $\{H_t\}$ é o vetor *hourglass* (BATHE, 1982; COOK *et al.*, 1989).

2. MODELO

O modelo utilizado neste trabalho foi baseado em 11 amostras de latas de alumínio. Para esse modelo não foram consideradas todas as imperfeições iniciais, como imperfeições geométricas e de material. Assim, foi desenvolvido um modelo aproximado de uma lata real. Com isso a lata utilizada foi modelada em três partes: tampa, corpo e fundo conforme mostra a Fig. 3.

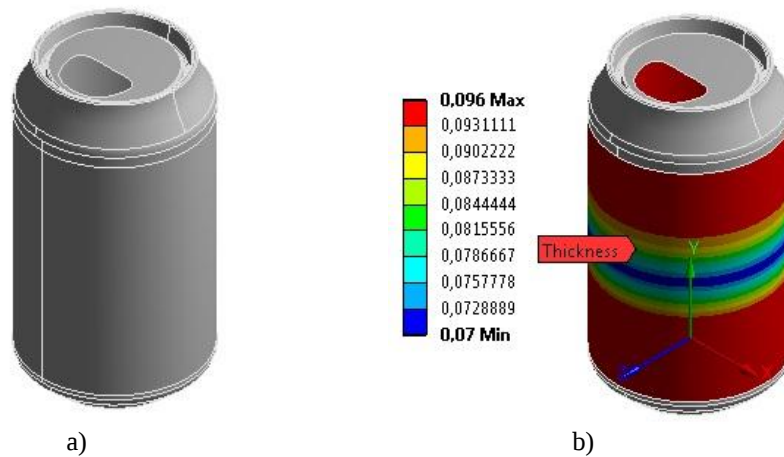


Figura 3: a) Partes da lata: tampa, corpo e fundo. b) Variação da espessura do corpo da lata.

Na Tab. 1 têm-se alguns valores obtidos das 11 amostras das latas, como diâmetro, altura e espessura. Esses valores foram obtidos por meio de medições feitas em dois pontos distintos de cada lata. Assim, através de médias aritméticas de cada dimensão das 11 amostras das latas, a espessura do tampa é de 0,166 mm, do corpo é de 0,096 mm e do fundo é de 0,25 mm. A altura da lata é 122,87 mm. E como forma de proporcionar uma irregularidade geométrica no modelo, foram consideradas duas imperfeições iniciais: diâmetros de 65,97 mm e de 65,96 mm, e uma variação na espessura do corpo da lata conforme mostra a Fig. 3.

Tabela 1: Medidas de 11 amostras de latas de alumínio.

Lata	Diâmetro 01 – ϕ_1 – (mm)	Diâmetro 02 – ϕ_2 – (mm)	Altura 01 (mm)	Altura 02 (mm)	Espessura do corpo 01 (mm)	Espessura do corpo 02 (mm)
01	66,01	65,85	122,93	122,87	0,099	0,099
02	65,87	66,00	122,97	122,91	0,096	0,096
03	66,03	65,95	122,81	122,84	0,094	0,099
04	66,09	65,96	122,89	122,90	0,092	0,099
05	65,82	65,93	122,72	122,89	0,098	0,097
06	65,98	65,95	122,78	122,88	0,098	0,098
07	65,98	66,01	122,83	122,94	0,093	0,094
08	66,11	65,92	123,09	123,07	0,094	0,096
09	65,86	66,03	122,76	122,78	0,100	0,093
10	66,03	66,01	122,89	122,79	0,093	0,094
11	65,81	65,97	122,84	122,81	0,095	0,096
Média de $\phi_1 = 65,97$ e $\phi_2 = 65,96$			Média da altura = 122,87		Média da espessura = 0,096	

As propriedades do material para as análises foram baseadas na liga de alumínio 3004-H19 (LAMPMAN *et al.*, 1990), sendo o material elasto-plástico com encruamento isotrópico bilinear. Módulo de Young de 69 GPa e coeficiente de Poisson de 0,34. A tensão de escoamento é de 260 MPa com um módulo tangente de 500 MPa.

3. SIMULAÇÃO DO CORPO DA LATA

Inicialmente foi verificado qual o melhor tipo de elemento de casca a ser utilizado nas análises deste trabalho. Foram analisados os elementos de casca de quatro (*shell 181* no Ansys) e oito nós (*shell 281* no Ansys), Fig. 4. Esses elementos têm seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações).

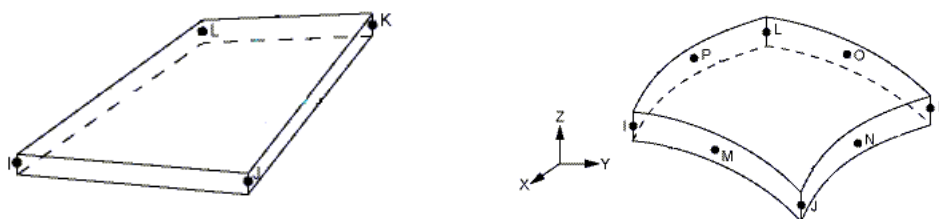


Figura 4: *Shell 181* com quatro nós I, J, K e L. *Shell 281* com oito nós I, J, K, L, M, N, O e P.

Para essa verificação inicial utilizou-se um modelo simplificado da lata, analisando somente o seu corpo, conforme definição das partes da lata representadas na Fig. 3. A razão dessa simplificação é explicada porque a flambagem ocorre nesta parte da lata, e essa afirmativa será verificada nas próximas seções desse trabalho.

Assim, por meio de uma análise de flambagem pelo método do autovalor, foi aplicada uma carga compressiva unitária (1 N) na aresta superior e foi utilizado um suporte fixo na aresta inferior do corpo, Fig. 5. Como resultados foram obtidos a carga crítica e o tempo de simulação, Tab. 2.

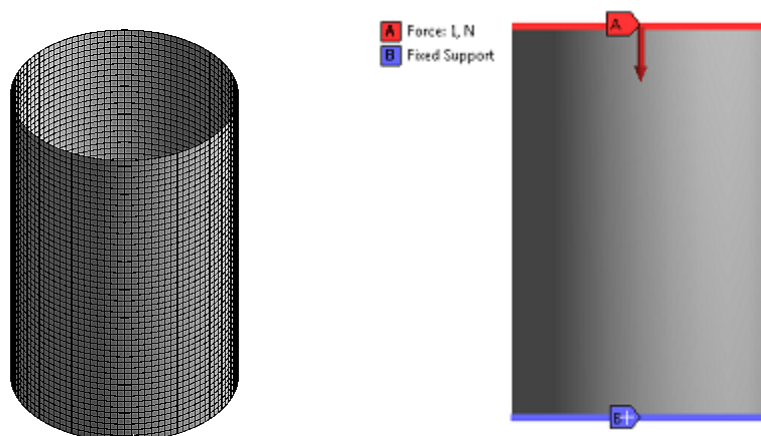


Figura 5: Simulação do corpo da lata utilizando uma análise de flambagem pelo método do autovalor.

Pela Tab. 2 verifica-se que um bom tipo de elemento utilizado para o corpo da lata, em termos de convergência do resultado do valor da carga crítica e do tempo de simulação, é o elemento quadrangular *shell* 281 (elemento de oito nós) de 2,0 mm de tamanho. Esse elemento tem uma boa eficiência em termos de valor aproximado da carga crítica e um baixo valor de tempo de simulação. Observa-se que a convergência do valor da carga crítica ocorre no valor de aproximadamente 900 N.

Tabela 2: Carga crítica e tempo de simulação utilizando os elementos *shell* 181 e *shell* 281.

Tamanho do elemento (mm)	Shell 181 (elemento de quatro nós)		Shell 281 (elemento de oito nós)	
	Carga Crítica (N)	Tempo de simulação (s)	Carga Crítica (N)	Tempo de simulação (s)
3,0	1213,2	6,0	943,68	11,0
2,0	1088,4	9,0	903,74	23,0
1,5	1010,9	12,0	899,84	39,0
1,0	953,55	22,0	899,22	262,0
0,5	915,52	380,0	-	-

Portanto, neste trabalho será utilizado para as análises o elemento quadrangular *shell* 281 de 2,0 mm de tamanho.

4. ANÁLISES DE FLAMBAGEM

Para todas as análises computacionais foram utilizadas as seguintes condições de contorno: engaste na superfície inferior da lata (fundo) e extremidade livre na superfície superior da lata (tampa). O carregamento (força, deslocamento ou velocidade) foi aplicado na superfície superior (tampa). E para o ensaio experimental, o qual será utilizado somente como um parâmetro do valor da carga crítica, tem-se as seguintes condições de contorno: contato entre as superfícies da máquina de ensaio em ambas as superfícies superior e inferior da lata. Também o carregamento é aplicado na superfície superior (tampa).

a) Análise Estática pelo Método do Autovalor

Para a análise estática pelo método do autovalor foi utilizado o elemento *shell* 281 no Ansys. Como resultado obteve-se um tempo aproximado de simulação de 31 segundos e a carga crítica obtida de $P_{cr} = 1528,7$ N conforme mostra a Fig. 6. Essa carga crítica corresponde ao menor valor calculado de λ , Eq. (1).

Conforme anteriormente mencionado, essa análise não considera os efeitos não lineares, obtendo-se somente a região da pré-flambagem no gráfico deslocamento versus força, Fig. 6.

b) Análise Estática Não Linear

Para a análise estática não linear também foi utilizado o elemento *shell* 281 no Ansys. Nessa análise foi aplicado um deslocamento com uma variação de 0 a 0,851 mm na superfície superior da lata (tampa), Fig. 6.

Assim a Fig. 6 mostra em gráfico Deslocamento (mm) x Força (N) a curva desta análise e nela pode-se verificar as regiões de pré e pós-flambagem, correspondente as regiões antes e após a instabilidade estrutural. Para essa análise o tempo aproximado de simulação foi de 180 segundos e a carga crítica obtida foi de $P_{cr} = 1448,8$ N.

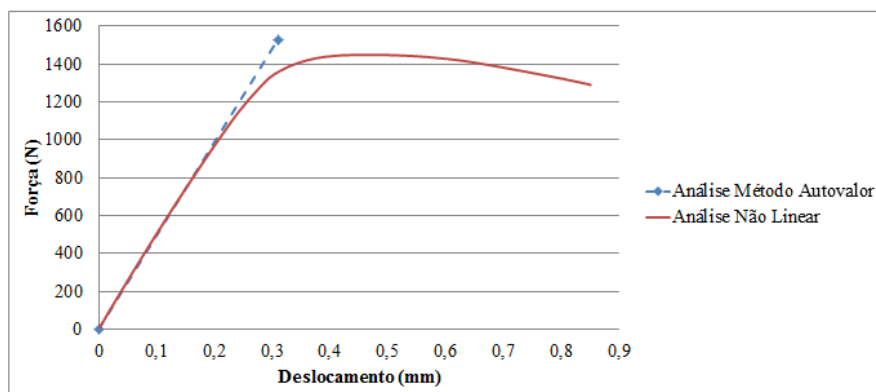


Figura 6: Gráfico Deslocamento (mm) x Força (N) para as análises estáticas pelo método do autovalor e não linear.

c) Análise Dinâmica Transiente Implícita

Para a análise dinâmica transiente implícita também foi utilizado o elemento *shell* 281 no Ansys. Nessa análise foi aplicado uma velocidade de compressão constante de 5 mm/min na superfície superior da lata (tampa).

A Fig. 7 mostra em um gráfico Tempo (s) x Força (N) a curva desta análise e nela pode-se verificar as regiões de pré e pós-flambagem. Para essa análise o tempo aproximado de simulação foi de 55 segundos e a carga crítica obtida foi de $P_{cr} = 1448,5$ N.

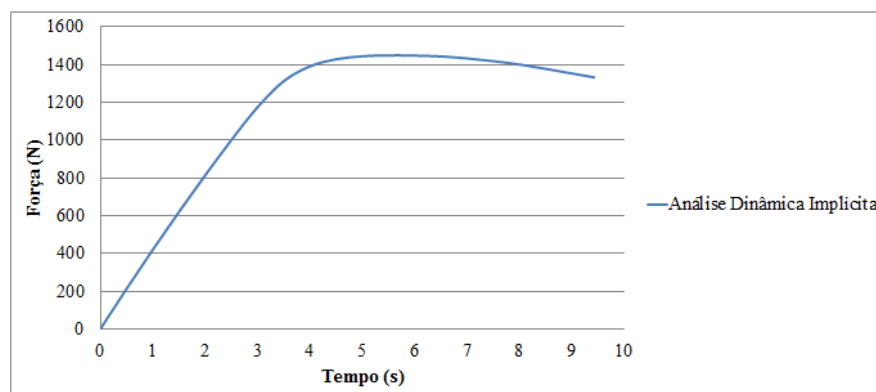


Figura 7: Gráfico Tempo (s) x Força (N) para a análise dinâmica transiente implícita.

d) Análise Dinâmica Transiente Explícita

Para a análise transiente explícita foi necessário aumentar a velocidade de compressão em relação à utilizada na análise transiente implícita. A razão dessa modificação é porque, para essa análise, o tempo de solução se tornaria muito grande, aumentando o custo computacional. Com isso, a velocidade foi definida com base nos trabalhos dos autores Dick (1994) e Reid *et al.* (2001) os quais, por meio de ensaios, definiram velocidade de compressão para se obter resultados quase estáticos. Assim, a velocidade de compressão constante utilizada neste trabalho foi de 212 mm/s na superfície superior da lata (tampa).

Também diferentemente das outras análises, o elemento utilizado foi o *shell type* 16 no LS-DYNA, é um elemento de casca com integração completa, o qual tem como característica ser rápido por ser um elemento de integração completa e obter boa precisão. A razão da sua utilização também é devido ao custo computacional, em termos de tempo, para esse tipo de análise. Esse elemento, representado na Fig. 8, é quadrilateral com quatro nós e com três

pontos de integração através da espessura (HALLQUIST, 2006). A utilização de mais pontos de integração, por exemplo, cinco pontos de integração, não alteram o resultado final da análise.

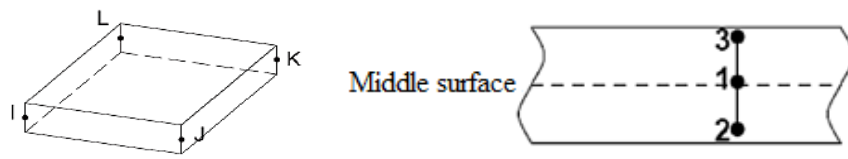


Figura 8: Elemento de casca com quatro nós I, J, K e L, e com três pontos de integração através da espessura.

A Fig. 9 mostra em um gráfico Tempo (s) x Força (N) a curva desta análise e nela pode-se verificar as regiões de pré e pós-flambagem. Para essa análise o tempo aproximado de simulação foi de 1700 segundos e a carga crítica obtida foi de $P_{cr} = 1628,3$ N.

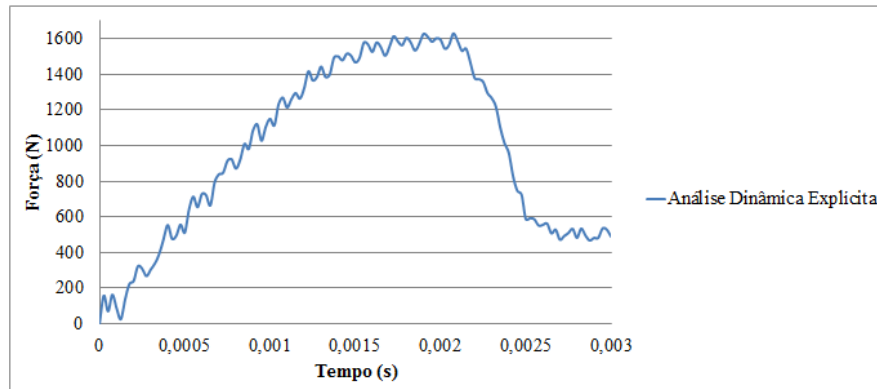


Figura 9: Gráfico Tempo (s) x Força (N) para a análise dinâmica transiente explícita.

e) Ensaio Experimental

O ensaio experimental foi utilizado como um parâmetro comparativo do valor da carga crítica para as demais análises. Conforme foi relatado, as latas têm imperfeições iniciais (geométricas e de material) que não foram contabilizadas nas análises numéricas deste trabalho.

Para o ensaio foi utilizado uma máquina de ensaios mecânicos, EMIC DL10000, sendo aplicada na superfície superior das latas (tampas) uma velocidade de compressão constante de 5 mm/min, a mesma utilizada na análise dinâmica transiente implícita.

Na Tab. 3 tem-se os valores das cargas críticas das 11 amostras das latas de alumínio. Observa-se na tabela a grande variação entre esses valores, sendo o valor mínimo e máximo correspondendo respectivamente a 415,93 N e 875,32N. A média aritmética dos valores das cargas críticas foi de 581,90 N com um desvio padrão de 157,40 N.

Tabela 3: Carga crítica das 11 amostras de latas.

Lata	Carga Crítica (N)
01	502,84
02	844,28
03	415,93
04	875,32
05	614,59
06	509,05
07	670,46
08	571,13
09	478,01
10	502,84
11	415,93
Mínimo	415,93
Máximo	875,32
Média	581,90
Desvio Padrão	157,40

A Fig. 10 mostra em um gráfico Deslocamento (mm) x Força (N), as regiões de pré e pós-flambagem para as latas 03, 04 e 08, com valores de carga crítica de 415,93 N, 875,32 N e 571,13 N, respectivamente.

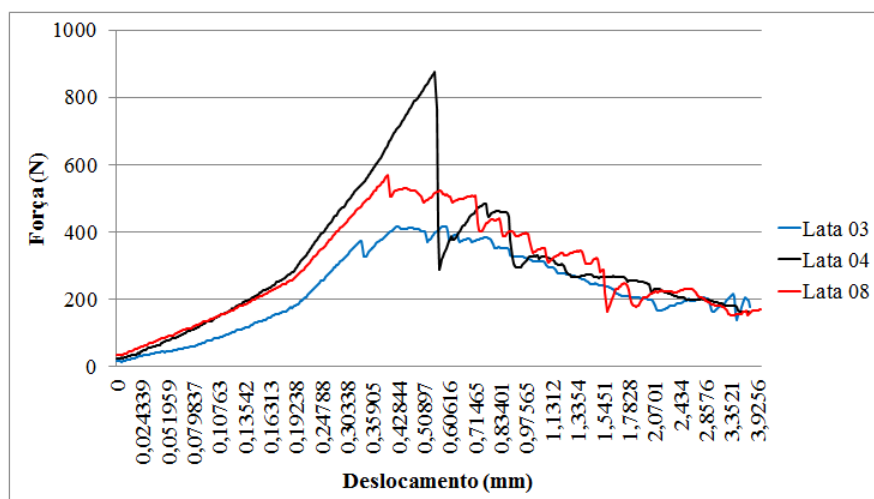


Figura 10: Gráfico Deslocamento (mm) x Força (N) para o ensaio experimental. No gráfico verifica-se as regiões de pré e pós-flambagem para as latas 03, 04 e 08.

A Tab. 4 apresenta um resumo de todos os resultados de carga crítica e do tempo aproximado de simulação para cada análise. Em relação ao valor da carga crítica, a análise dinâmica transiente implícita foi a que obteve um valor mais próximo do ensaio experimental. No entanto, a diferença entre o maior e o menor valor de carga crítica (análises implícita e explícita) é de 12,4%. E em relação ao tempo aproximado de simulação, a análise explícita é a que tem um maior custo computacional.

Tabela 4: Resumo da carga crítica e tempo aproximado de simulação para cada análise.

ANÁLISES	Carga Crítica (N)	Tempo Aproximado de Simulação (s)
Estática Linear pelo Método do Autovalor	1528,7	31
Estática Não Linear	1448,8	180
Dinâmica Transiente Implícita	1448,5	55
Dinâmica Transiente Explícita	1628,3	1700
Ensaio Experimental	415,93 a 875,32	-

Em relação aos resultados das análises estáticas, conclui-se que utilizando a análise não linear tem-se um maior número de informações sobre a evolução do carregamento aplicado. E com a utilização da análise pelo método do autovalor só tem a informação de apenas um valor do carregamento.

Também observa-se que o resultado da análise dinâmica implícita é semelhante a da análise estática não linear, isso ocorre devido a velocidade utilizada pela análise dinâmica ser baixa, tornando essa análise quase estática.

Por fim, a Fig. 11 mostra um comparativo representando a instabilidade estrutural da lata através do ensaio experimental e da análise dinâmica transiente explícita. Nota-se que a flambagem ocorre em ambas às análises no corpo da lata.



Figura 11: Comparativo da flambagem por meio do ensaio experimental e da análise dinâmica transiente explícita.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou, através de um estudo de caso, utilizando latas de alumínio, diferentes métodos para determinar o valor da carga crítica de flambagem, analisando parâmetros como o carregamento aplicado e o tempo de simulação. Foram avaliadas, por meio do método dos elementos finitos (MEF), as seguintes análises: análise estática linear pelo método do autovalor, análise estática não linear, análise dinâmica transiente implícita e análise dinâmica transiente explícita. Em todas elas foi utilizado o *software* Ansys 16.0 e, em específico, para a análise dinâmica transiente explícita também foi utilizado o *software* LS-DYNA.

Inicialmente foram verificados os efeitos do tipo de elementos de casca a serem utilizados em cada análise. Após, foram determinados gráficos Deslocamento versus Força ou Tempo versus Força, onde se pôde analisar a evolução do carregamento compressivo aplicado, bem como, as regiões de pré e pós flambagem. Em específico, para a análise utilizando o método do autovalor, e ao contrário das outras análises, tem-se somente a informação de um único valor do carregamento. Com isso, esses gráficos foram comparados a um gráfico Deslocamento versus Força, para amostras de latas de alumínio, através de um ensaio experimental.

Portanto conclui-se que com a utilização da análise não linear e das análises dinâmicas consegue-se uma maior quantidade de informações sobre a evolução do carregamento aplicado. E com a utilização da análise dinâmica transiente implícita obtêm-se um valor de carga crítica mais próxima do valor obtido pelo ensaio experimental.

6. REFERÊNCIAS

- Ansys, Release 15.0, 2013, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- Bathe, K. J., 1982, "Finite element procedures in engineering analysis", New Jersey: Prentice-Hall.
- Cook, R. D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E., 1989, "Concepts and applications of finite element analysis", 3 edition. John Wiley and Sons.
- Dick, R. E., 1994, "Axial buckling of beverage can sidewalls", Second International LS-DYNA3D Conference, Westin, St. Francis, San Francisco, 20-21 September, Paper No. 21LSD3D103.
- Donnell, L. H., 1934, "A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bending", Transactions ASME, Vol. 56, pp. 795-806.
- Hallquist, J. O., 2006, "LS-DYNA theory manual", March.
- Lampman S. R. et al., 1990, "Metals Handbook, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", ASM International. 10 edition.
- Reid, J. D.; Bielenberg, R. W.; Coon, B., 2001, "A. Identing, buckling and piercing of aluminum beverage cans", Finite Elements in Analysis and Design. Vol. 37, pp. 131-144.
- Teng, J. G., 1996, "Buckling of thin shells: recent advances and trends". Applied Mechanics Reviews, Vol. 49, No. 4, pp. 263-274.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL ANALYSIS OF BUCKLING PHENOMENON FOR ALUMINUM CANS

Rodrigo Villaca Santos, rodrigov@utfpr.edu.br¹
George Gabriel Haubert, georgehaubert@alunos.utfpr.edu.br¹
Leticia Barizon Col Debella, leticiacoldebella@hotmail.com¹

¹DAMEC, Federal University of Technology - Parana, Via do Conhecimento, Km 1, Pato Branco, PR, Brazil

Abstract. *The thin shell structures are found in many applications of engineering as aircraft, cooling towers, steel silos, pressure vessels and pipelines. Due to the thickness of these structures compared with its other dimensions, it corresponds to a possible buckling failure mechanism. Therefore it is essential the knowledge of both the behavior and the methods to be used to predict the failure by buckling. In this work we will be given the value of the critical load of buckling through a case study, using aluminum cans. For that this determination will be made by means of the finite element method through the following analysis: linear static analysis by eigenvalue method, non-linear static analysis, implicit transient dynamic analysis and explicit transient dynamic analysis. For the analysis, it was initially found that the best shell element to be used and, therefore, we determined the critical load by means of graphs representing the pre-buckling and the post-buckling regions, and the computation time for each analysis. In order to have a comparison parameter of the critical load value for the numerical analysis, an experimental test was conducted on samples of aluminum cans. As a result it was observed that the use of non-linear analysis and dynamic analysis, there is a greater amount of information about the evolution of the applied load. Also with the use of the implicit transient dynamic analysis has become a critical load closer in value to the experimental test.*

Keywords: *Critical Load, Finite Element Method, Aluminum Cans.*