

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

ESTUDO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS DE
ESPUMAS METÁLICAS.

por

Henrique Chiaradia Rigon

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, Dezembro de 2014

ESTUDO DOS ASPECTOS ESTRUTURAIS DE
ESPUMAS METÁLICAS.

por

Henrique Chiaradia Rigon

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^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Ignácio Iturrioz

Comissão de Avaliação:

Prof. Edson Hikaro Aseka

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 01 de dezembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais pelo suporte que me deram durante a graduação, agradeço aos professores e funcionários que me auxiliaram durante meus anos na universidade. Agradeço também a Claire Marie Cisowski pelo suporte durante a produção deste TCC.

RIGON, H. C., **Estudo Dos Aspectos Estruturais De Espumas Metálicas**. 2014. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

A busca por materiais mais eficientes gerou interesse em criar estruturas que permitam modificar as propriedades dos materiais utilizados. Materiais celulares têm sido uma opção inspirada em estruturas existentes na natureza, como tecidos ósseos e colmeias de abelhas. Em engenharia, os materiais celulares foram criados para se obter estruturas com a menor densidade possível, mantendo um nível de rigidez adequado aos esforços exigidos. No presente trabalho se exploram algumas características estruturais de uma estrutura celular do tipo honeycomb, onde são realizadas simulações numéricas para determinar as cargas de flambagem elástica e a carga de colapso do mesmo. Se verifica a sensibilidade da estrutura frente a imperfeições nas paredes celulares através de um modelo não linear físico e geométrico, analisando a carga de colapso plástico. Os resultados obtidos são discutidos e conclusões são apresentadas sobre as características das estruturas estudadas.

PALAVRAS-CHAVE: ESPUMA METÁLICA, IMPERFEIÇÃO, FLAMBAGEM.

RIGON, H. C., **Structural Aspects of Metallic Foams, a Study**. 2014. 26 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The search for more efficient materials generated interest in creating structures to modify the properties of the materials used. Cellular materials have been an option inspired by existing structures in nature, such as bone tissue and bee hives. In engineering, cellular materials were created to obtain structures with the lowest possible density while maintaining an adequate level of stiffness. In this paper, the structural properties of regular honeycombs are explored, using numerical simulations to determine the elastic buckling loads and the ultimate load. The sensitivity of the structure against geometric imperfections in the cell walls is analysed by using a physical and geometric non-linear model, analysing the plastic collapse load. The results are discussed and conclusions are drawn from the characteristics of the studied structures.

KEYWORDS: METALLIC FOAM, IMPERFECTION, BUCKLING.

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 À esquerda: bloco de espuma de alumínio de célula fechada. À direita, peça fabricada com espuma de alumínio de célula fechada <i>Alulight</i>	1
Figura 2.1 Tipos de materiais celulares: a) Favo hexagonal regular; b) Espuma tridimensional de célula aberta; c) Espuma tridimensional de célula fechada.....	2
Figura 2.2 Processo de fabricação de favos hexagonais por cilindros de ondulação.....	2
Figura 2.3 Processo de fabricação de favos hexagonais por expansão.....	3
Figura 2.4 Célula esquematizada de uma honeycomb.....	3
Figura 2.5 Curva típica de tensão por deformação de espumas metálicas.....	4
Figura 4.1 Modelagem do honeycomb regular no software Ansys.....	8
Figura 5.1 Elementos utilizados para o estudo de convergência.....	9
Figura 5.2 Curvas de convergência dos elementos.....	9
Figura 5.3 Análise de carga crítica com relação à densidade relativa.....	10
Figura 5.4 Primeiro modo de flambagem ampliado 7 vezes da estrutura sobreposta a original.....	11
Figura 5.5 À esquerda: primeiro modo de flambagem ampliado 7 vezes da estrutura com geometria maior sobreposta a original; à direita: modelo da literatura (Ajdari, 2002) sobreposto ao primeiro modo de flambagem.....	11
Figura 5.6 Análise não linear geométrica de modelos com densidade relativa variável.....	12
Figura 5.7 Carga crítica da estrutura quando submetida aos diferentes tipos de imperfeições.....	12
Figura 5.8 Análise não linear do modelo com diferentes níveis de imperfeições.....	13
Figura 6.1 Diagrama de tensão por esbeltez (I/t) para flambagem elástica.....	14

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1 Tipos De Materiais Celulares.....	2
2.2 Manufatura De Materiais Celulares.....	2
2.3 Propriedades Mecânicas De Estruturas Celulares.....	3
2.4 Flambagem Elástica.....	5
2.5 Análise Não Linear.....	6
2.6 Incorporação de Imperfeições.....	6
2.7 Métodos de Análise.....	6
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4. METODOLOGIA.....	8
4.1 Modelagem.....	8
4.2 Aquisição de Dados.....	8
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	9
5.1 Convergência De Resultados.....	9
5.2 Carga Crítica Com Geometria Indeformada.....	10
5.3 Modos De Flambagem.....	10
5.4 Análise da malha com a geometria do favo sem imperfeições.....	11
5.5 Análise da malha com a geometria do favo com imperfeições incorporadas.....	12
6 CONCLUSÕES.....	13
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
ANEXOS E APÊNDICES	16

1. INTRODUÇÃO

Materiais celulares são materiais compósitos formados por uma rede interconectada de barras ou planos que compõe as células. Exemplos dos mesmos são encontrados com facilidade na natureza: em plantas, como é o caso de alguns troncos e folhas, animais, em suas estruturas ósseas e até em estruturas naturais como colmeias. O homem utiliza materiais celulares desde o início da civilização, como madeira e minerais esponjosos tanto para construção quanto para ornamentação, mas recentemente, materiais celulares estão sendo fabricados para aplicações mais nobres, onde baixa densidade, alta absorção de impacto, baixa condutividade térmica e isolamento acústico forem necessárias, como por exemplo em preenchimento de paredes em sistemas aeroespaciais para proteção térmica e redução de peso, aumentando a eficiência energética da aeronave. A Figura 1.1 mostra um bloco de espuma de alumínio de célula fechada e uma peça fabricada com o mesmo tipo de espuma.

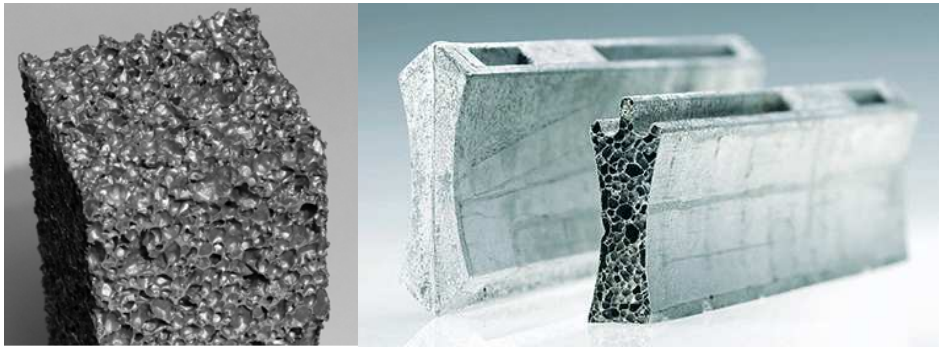


Figura 1.1: À esquerda: bloco de espuma de alumínio de célula fechada. À direita, peça fabricada com espuma de alumínio de célula fechada *Alulight*.

Estruturas celulares podem ser produzidas com diversos tipos de materiais, incluindo polímeros, cerâmicas e metais. Dependendo do tipo de material e da geometria da peça, os defeitos inerentes do processo de fabricação podem possuir uma grande influência na performance da peça em operação pelo surgimento de células irregulares.

Devido às irregularidades da geometria, é necessário ter o conhecimento da sensibilidade que a estrutura possui para poder definir uma faixa de trabalho confiável.

No caso particular de estruturas celulares regulares metálicas a interação entre a flambagem elástica e o colapso plástico das células são os mecanismos que governam o colapso da microestrutura. Uma atenção especial no estudo a ser apresentado vai ser dada na influência das imperfeições na definição desta carga de colapso.

Neste trabalho foi analisada a sensibilidade em relação aos defeitos geométricos que a estrutura possui quando submetida a esforços de compressão uniaxial.

O modelo proposto foi construído como sendo uma estrutura celular hexagonal regular 2D, e a modelagem das imperfeições é realizada considerando uma superposição linear de um campo de excentricidades formado por coeficientes de magnificação dos primeiros modos de flambagem. Esta forma de modelar imperfeições em estruturas metálicas já tem sido utilizada em Chodraui (2003), Grigoletti (2008) entre outros.

Dois análises são feitas: a primeira sendo a determinação da carga de flambagem elástica resolvendo um problema de autovalores, e a segunda análise sendo a determinação da carga de colapso levando em conta as não linearidades físicas e geométricas. Nos dois casos a influência das imperfeições são consideradas aplicando um campo de imperfeições como uma combinação linear dos primeiros modos de flambagem da microestrutura analisada.

Desta forma é possível estabelecer os objetivos do presente trabalho, como objetivo geral de explorar as características estruturais das estruturas celulares metálicas, e como objetivos específicos verificar a influência das imperfeições e da densidade relativa na performance estrutural de estruturas celulares regulares metálicas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Tipos de Materiais Celulares

De uma maneira geral as estruturas celulares possuem 3 classificações distintas:

- Estruturas celulares bidimensionais: São comumente chamadas de favos ou *honeycombs*. São um arranjo de polígonos em um plano com arestas mútuas formando células. Estas são as formas mais simples de modelagem de espuma e também é a forma que possui o menor nível de irregularidades na fabricação.
- Espumas tridimensionais de célula aberta: São espumas cujas células são polígonos tridimensionais que contém material apenas nas arestas. Geralmente possuem densidade relativa menor que as espumas de célula fechada, porém possuem uma resistência mecânica menor. São muito utilizadas na indústria química como filtros de partículas e em trocadores de calor compactos.
- Espumas tridimensionais de célula fechada: São espumas cujas células são completamente fechadas com material, tornando-se assim impermeáveis. A fabricação é mais barata se comparada com a de célula aberta, sendo utilizada em maior escala como absorvedores de impacto, já que têm uma resistência mecânica mais elevada, e dissipa grande quantidade de energia quando solicitada com cargas de colapso.

A Figura 2.1 ilustra os três tipos de materiais celulares caracterizados pela geometria.

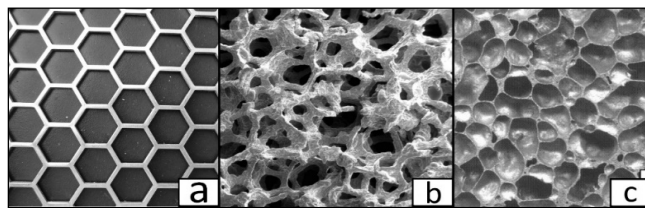


Figura 2.1 – Tipos de materiais celulares: a) Favo hexagonal regular; b) Espuma tridimensional de célula aberta; c) Espuma tridimensional de célula fechada.

2.2 Manufatura de Materiais Celulares

Os processos de manufatura de materiais celulares são bem distintos dependendo da classificação da estrutura denotada no item 2.1. Nesta seção são descritos os métodos mais usuais de manufatura dos mesmos.

Materiais celulares bidimensionais: Favos metálicos podem ser fabricados de diversas formas. Uma das formas é por cilindros de ondulação, onde uma folha de alumínio passa por dois cilindros dentados que a conforma e, em seguida, é empilhada com outras folhas para formar o favo, como demonstrado na Figura 2.2:

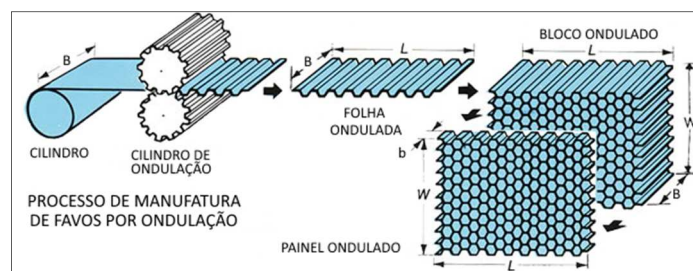


Figura 2.2 – Processo de fabricação de favos hexagonais por cilindros de ondulação.

Outro método também utilizado é o método de expansão de folhas, onde as folhas de alumínio ao invés de serem conformadas inicialmente, são adicionadas fileiras de adesivo fenólico para que as mesmas sejam empacotadas em blocos. Os blocos são então cortados em fatias, dependendo da profundidade necessária, e vão para um forno onde o adesivo junta as folhas da fatia. Após a cura do adesivo, as folhas são estendidas até que formem as células. O processo está ilustrado na Figura 2.3 abaixo:

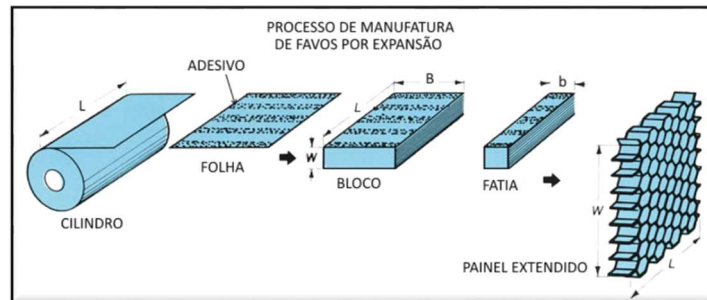


Figura 2.3: Processo de fabricação de favos hexagonais por expansão.

Espumas de Célula Aberta: Espumas metálicas de célula aberta geralmente são fabricadas utilizando um agente preenchedor misturado com o metal poroso. A mistura é então aquecida até que o metal funda e preencha os espaços vazios. O agente é então retirado com o auxílio de um solvente adicionado à mistura, deixando apenas a espuma metálica.

Espumas de Célula Fechada: Espumas de célula fechada são produzidas na maior parte das vezes através da metalurgia do pó, onde pó metálico é comprimido em uma matriz com um agente espumante. Em seguida é levado ao forno até que as células se formem e a porosidade da peça aumente.

2.3 Propriedades Mecânicas de Estruturas Celulares

As estruturas celulares possuem diversas propriedades que as caracterizam, como a densidade relativa e a capacidade de absorção energética. O foco deste trabalho é de estudar honeycombs regulares, cujo desenho esquemático está demonstrado na Figura 2.4.

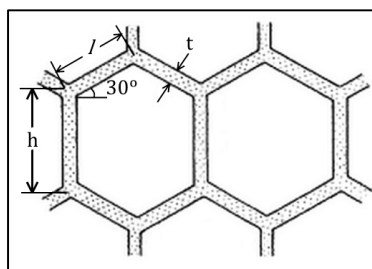


Figura 2.4: Célula esquematizada de uma honeycomb.

Onde l e h são os comprimentos das paredes celulares e são iguais no caso de uma honeycomb regular, e t é a espessura da parede. A seguir serão descritas algumas propriedades mecânicas relevantes para o estudo dessas estruturas.

Densidade Relativa: Peças fabricadas de espumas metálicas possuem uma densidade muito menor do que peças maciças, consequência dos espaços vazios deixados entre as células. Esse fenômeno pode ser quantificado através da densidade relativa e é a característica

estrutural mais importante para caracterizar uma espuma. A densidade relativa é definida como a razão entre a densidade da espuma e a densidade do sólido que a compõe. Valores típicos variam entre 30% e 0.3%, dependendo da geometria da espuma.

Para estruturas com paredes finas, ou seja, $t/l < 0,25$, a densidade relativa pode ser calculada utilizando as equações 2.1 ou 2.2 (Gibson e Ashby, 1997), que dependem também da dimensionalidade da estrutura e do tipo de célula. Para estruturas bidimensionais e espumas com célula fechada se utiliza a equação 2.1 e para estruturas com célula aberta se utiliza a equação 2.2.

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_1 \frac{t}{l} \quad (2.1)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = C_2 \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (2.2)$$

Onde ρ^* é a densidade da estrutura, ρ_s é a densidade do material sólido que compõe a estrutura e as constantes C_1 e C_2 são obtidas de acordo com os detalhes da forma celular e são próximas de 1. Para o caso deste trabalho, onde será trabalhado com honeycombs regulares, $C_1 = 2/\sqrt{3}$.

Curvas de Tensão por Deformação: A curva típica de tensão por deformação de materiais celulares é mostrada na Figura 2.5 abaixo:

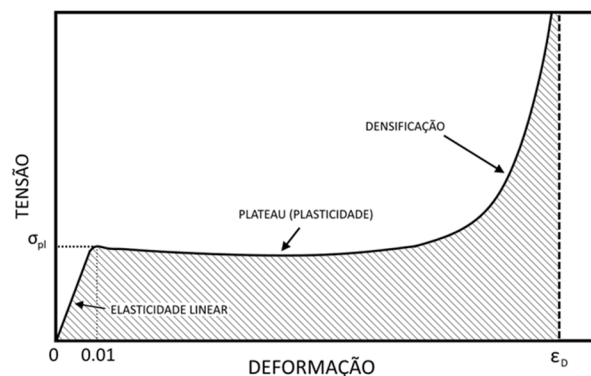


Figura 2.5 – Curva típica de tensão por deformação de espumas metálicas.

Como pode ser visto na Figura 2.5, a curva possui três regiões distintas:

- **Elasticidade linear:** área onde há uma dependência linear entre a tensão e a deformação. Isto se deve a propriedades elásticas das paredes das células.
- **Plateau:** é uma área de deformação plástica, ou seja, quando a carga é retirada do sistema, a estrutura não volta mais para a posição original. Nesta zona, a tensão se mantém aproximadamente constante em σ_{pl} enquanto as células são deformadas continuamente. Segundo *Andrews et al*, 2001, a zona de plateau inicia quando a estrutura atinge uma deformação de cerca de 1%. Esta é uma área de muita importância para o dimensionamento da espuma pois é a zona onde se produz a maior absorção de energia.
- **Densificação:** área onde há um empacotamento contínuo das células. Devido a grandes deformações, as paredes celulares começam a se encostar e a tensão da espuma começa a aumentar indefinidamente até se tornar uma estrutura completamente compactada na deformação nominal ϵ_D . A espuma perde a sua capacidade de absorver energia na área de densificação, já que quando a estrutura começa a densificar, a maior parte das suas células já foi deformada e já absorveu boa parte da energia que é possível absorver.

Absorção Energética: Absorção energética é a habilidade de um material de transformar a energia imposta em uma outra forma de energia como calor, ou usá-la para deformar a estrutura permanentemente. Para que o material esteja trabalhando em uma zona de segurança, a energia cinética deve ser menor que o limite máximo de absorção energética do material. Materiais celulares têm alta capacidade de absorver energia através da flambagem, flexão ou fratura plástica das paredes celulares, dependendo do tipo de material base.

A quantidade de energia que a estrutura pode absorver está ligada à curva de tensão e deformação do material utilizado para a fabricação da peça, como mostra a Equação 2.3.

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.3)$$

Onde W é a energia absorvida, σ é a tensão na estrutura e ε é a deformação da mesma. A equação 2.3 corresponde à área hachurada na Figura 2.5. Pode-se concluir que a área de plateau é a mais importante para a estabilidade da estrutura quando for submetida a uma carga dinâmica, deixando a área de densificação como uma zona de segurança para a absorção energética, não sendo considerada no dimensionamento final da peça. A tensão máxima do plateau está diretamente relacionada a interação entre a tensão de flambagem elástica e da plastificação da estrutura.

Para se obter uma estrutura com grande eficiência de absorção, a tensão de plateau deve ser a mais alta possível. Isso se obtém maximizando o valor de força crítica de flambagem da estrutura. Para isso deve-se analisar os modos de flambagem da estrutura.

2.4 Flambagem Elástica

Flambagem elástica é um fenômeno onde momentos transversais são criados a partir de cargas compressivas em estruturas esbeltas, como barras e chapas finas. No caso de materiais celulares metálicos, a flambagem das paredes das células é um dos fenômenos que podem levar a falha, por isso a carga crítica é um indicador que deve ser analisado no dimensionamento de estruturas celulares.

Os modos de flambagem correspondem a forma que a estrutura toma antes de sair do equilíbrio. A cada modo de flambagem está associada uma carga que leva a estrutura até o estado correspondente.

A carga crítica é aquela que faz com que a estrutura saia do equilíbrio estável. Esta carga está associada a carga de colapso. Muitos métodos de análise utilizados no dimensionamento de estruturas metálicas consistem em determinar a carga de colapso através de expressões semi-empíricas que utilizam a carga crítica como argumento. Para analisar estruturas celulares, será utilizada a Equação 2.4 para calcular a carga crítica de Euler para barras esbeltas modificada segundo Timoshenko e Gere, 1961:

$$P_{crit} = \frac{n^2 \pi^2 E_s I}{h^2} \quad (2.4)$$

Onde P_{crit} é a carga crítica de flambagem, E_s é o módulo de Young do material que forma as células, I é o momento de inércia da seção da parede da célula, h é o comprimento da parede que se encontra colinear à carga e n é proporcional à rigidez rotacional do nó onde as paredes das células se encontram.

Neste trabalho a estrutura analisada foi um honeycomb regular de alumínio, simplificando a equação 2.4 para:

$$P_{crit} = \frac{0.686^2 \pi^2 (70000) \left(\frac{bt^3}{12}\right)}{l^2} \quad (2.5)$$

Onde $n = 0.686$ (Gibson et al., 1997), $E_s = 70.000 MPa$, b é a profundidade da parede da célula, t é a espessura da parede da célula e l é o comprimento da parede da célula.

2.5 Análise Não Linear

Também no trabalho, foi realizada uma análise não linear físico-geométrica do modelo para analisar a plasticidade do modelo quando são impostas imperfeições na geometria. O método que foi utilizado é o método de encruamento multilinear isotrópico, considerando a superfície de escoamento de Von Mises.

O encruamento é o aumento da resistência mecânica do material devido à deformação plástica a temperaturas abaixo da temperatura de recristalização. Esse fenômeno ocorre devido ao aumento de discordâncias entre os grãos do material, impedindo o deslizamento dos planos atômicos. O encruamento isotrópico sugere que toda a superfície de escoamento plastifique de uma maneira uniforme, aumentando o tamanho do círculo de escoamento de Von Mises de uma maneira que o seu centro permaneça no mesmo lugar. Mais informações sobre o método no Anexo 1.

2.6 Incorporação de Imperfeições

A incorporação de imperfeições no modelo é realizada adicionando um campo de excentricidades nos nós formado por uma combinação linear dos primeiros modos de flambagem da estrutura multiplicados por coeficientes que modulam ditos modos. Esta forma de trabalho foi apresentada em Chodraui (2003) e Grigoletti (2008) aplicada no contexto de perfis formados por chapas conformadas a frio.

2.7 Métodos de Análise

Se apresentam a continuação em forma resumida a formulação básica utilizada tanto para calcular a carga de flambagem elástica como para realizar uma análise não linear física e geométrica. Detalhe sobre a sua implementação pode ser encontrada em Zieman et al., 2000.

Quando se tem um problema linear estático onde se realiza a discretização utilizando elementos finitos, a seguinte equação é obtida:

$$Ku = P \quad (2.6)$$

Onde K representa a matriz de rigidez, que não depende do nível de carga aplicada, u é o vetor de deslocamentos nodais, e P o vetor de cargas.

No caso em que se deseja incluir o comportamento não linear físico e geométrico da estrutura em análise, chegaríamos a um sistema de equações do tipo:

$$K_{NL}(P)u = P \quad (2.7)$$

Onde a matriz de rigidez é função não linear do nível de carga aplicado. Neste caso não é possível obter o vetor de deslocamentos u diretamente. Para a sua obtenção utiliza-se métodos iterativos, entre eles pode-se citar o método de Newton-Raphson que é geralmente empregado quando a relação $P \times u$ é monotonicamente crescente (Chen e Han, 1988).

Quando se deseja prever a relação $P \times u$ após atingir um valor máximo de carga é necessário empregar outros métodos, entre eles se destaca o Método de Comprimento do Arco (Arc-Length). O método de comprimento de arco para análise estrutural foi originalmente desenvolvido por Riks (1972, 1979) e Wempner (1971) e mais tarde modificado por vários estudiosos.

Para o caso em que interessa modelar uma estrutura apenas com não linearidade geométrica, que se instabiliza para um determinado valor de carga (flambagem) e esta instabilidade acontece antes que a estrutura tenha sofrido deformações consideráveis, há um método alternativo que permite chegar a uma solução simplificada. Nesta solução, a matriz de rigidez não linear que tem embutida através de equações não lineares transcendentais a

influência de P é desenvolvida em série de Taylor, onde apenas permanece o termo constante e linear em P , assim é possível reescrever a equação 2.7 como segue:

$$(K + K_g \alpha)u = P \quad (2.8)$$

Onde a matriz K , u e P têm o mesmo significado já indicado, e a matriz K_g é chamada de matriz geométrica. É possível determinar o valor do escalar α que produz a singularidade do sistema de equações. A carga crítica será o vetor P escalado pelo valor dos autovalores. Determinado o valor de α (menor autovalor) será possível determinar o autovetor associado a este autovalor que fisicamente permitira determinar a forma modal que determinara como a estrutura se instabiliza.

Esta forma de calcular a carga crítica em estruturas elásticas é válida se a estrutura sai para o desequilíbrio a partir da configuração indeformada. No caso de acontecer o desequilíbrio após acontecer grandes deformações ou grandes deslocamentos, então se deve calcular a carga crítica utilizando algum método iterativo, que resolva o problema não linear.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ensaio para analisar a absorção de energia de espumas de alumínio utilizando diferentes índices de esbeltez globais foram realizados por Iluk, 2013. Foi concluído que espumas com relações de comprimento/diâmetro menores que 2 não sofrem flambagem; já corpos de prova com razão de comprimento por diâmetro maior que 3,6 apresentam grande susceptibilidade à flambagem e perda parcial de potencial de absorção energética.

A influência do tamanho de célula com relação ao tamanho do corpo de prova foi analisada por Andrews, Gioux, Onck e Gibson, 2001. Vários testes foram conduzidos para analisar os efeitos de tamanho de célula em espumas. Focando nos ensaios de compressão, utilizando uma taxa de deformação de 10^{-4} /s até alcançarem 20% de deformação. Foi realizado uma pré carga para retirar o "módulo elástico de descarga". Bandas locais de células colapsadas começaram a surgir na espuma de célula fechada, dando à mesma uma deformação não homogênea.

Para as espumas de célula fechada, o ângulo da curva de carregamento é menor que o de descarga, indicando que deformações plásticas ocorrem até mesmo em tensões abaixo das de escoamento. Para espumas de célula aberta, o ângulo de carregamento na parte elástica é o mesmo que o de descarga.

Para espumas de célula fechada é recomendado possuir $D/d > 6$, e para célula aberta $D/d > 8$, onde D é o diâmetro da estrutura e d é o tamanho médio das células, para diminuir os efeitos de tamanho de célula.

Os efeitos que podem ocorrer devido à velocidade de deformação que é aplicada na compressão de espumas de alumínio foram estudados por Wang, Shen, Lu e Zhao, 2011. Em baixas taxas de carregamento, as espumas apresentam uma taxa de deformação quase constante. Em altas taxas porém, a taxa de deformação decresce conforme avança a compressão. A tensão de plateau tem uma grande dependência com a taxa de carregamento aplicada, onde quanto maior a taxa, maior a tensão. Em ensaios dinâmicos percebe-se uma variação maior de tensão no plateau conforme se aumenta a taxa de compressão. Isso se dá devido à instabilidade das células da espuma que flambam e colapsam em altas velocidades, causando vibrações.

A energia absorvida pela espuma é diretamente proporcional à taxa de carregamento, chegando a absorver 61% mais energia quando forem comparados ensaios com velocidades de 10^{-3} m/s e 450m/s.

Ensaio de compressão para analisar mecanismos de fratura de espumas de alumínio foram realizados por Olurin, Fleck e Ashby, 2000, obtendo grandes discrepâncias com relação ao modelo teórico. Segundo os mesmos, a diferença comportamental das espumas se deve às imperfeições geométricas dos corpos de prova.

O comportamento de estruturas celulares, mais particularmente estruturas hexagonais e arranjos bidimensionais não periódicos, ou também chamados de favos de Voronei foi verificado por Ajdari, A., 2008. O mesmo achou um erro de cerca de 8% entre o modelo numérico e o modelo teórico, o que é confirmado por este trabalho.

Em relação aos mecanismos de falha de favos hexagonais, Gibson e Ashby, 1997, citam que para estruturas feitas com metais cuja razão entre a tensão de escoamento e o módulo de Young é da ordem de 10^{-3} , há colapso plástico antes de haver flambagem elástica em estruturas com a densidade relativa acima de 0.3%.

4. METODOLOGIA

A análise numérica feita neste trabalho foi realizada com o software de elementos finitos Ansys® 14, com o auxílio do software Microsoft Excel® 2013 para determinação das coordenadas e conectividade dos nós da estrutura.

4.1 Modelagem

A estrutura foi modelada como um favo hexagonal regular, obedecendo os princípios vistos na literatura para evitar falhas por flambagem global (Iluk, 2013), e minimizando efeitos de tamanho de célula (Andrews et al, 2001). Para a construção da geometria da estrutura foi criado um algoritmo no software Microsoft Excel®, 2013, para determinar a coordenada dos vértices e a conectividade de cada um utilizando equações geométricas para um comprimento de parede especificado.

Para que as análises feitas sejam coerentes entre si, foi fixado um comprimento de parede de 5mm e uma profundidade de parede de 1mm de seção retangular. A espessura das paredes para ensaios com densidade relativa constante foi fixada em 0.2mm. A largura total da estrutura é de 142.5mm, com altura de 86.6mm. São aplicadas condições de contorno para que a estrutura tenha graus de liberdade apenas no plano XY. No extremo esquerdo todos os nós ficam apenas com a rotação livre enquanto no extremo direito os nós têm apenas o grau de liberdade em X livre. Uma força unitária é aplicada nos nós da extremidade direita da estrutura, caracterizando uma compressão unidimensional.

A Figura 4.1 ilustra a estrutura com as condições de contorno aplicadas:

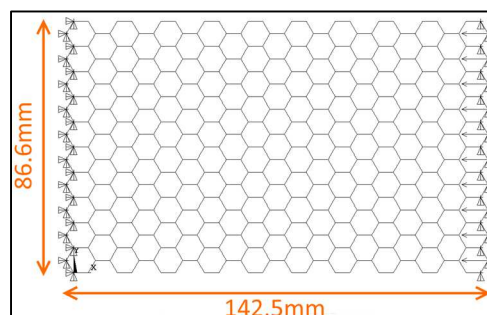


Figura 4.1 – Modelagem do honeycomb regular no software Ansys.

O material utilizado foi Alumínio, com módulo de Young de 70GPa, coeficiente de Poisson 0,34 e densidade de 2,7g/mm³.

4.2 Aquisição de dados

Para que sejam extraídos os dados demonstrados na seção 5 deste trabalho foram utilizados nós de referência para que seja possível demonstrar o comportamento que a estrutura possui quando aplicadas as forças. A variável de deslocamento citada ao longo do

trabalho diz respeito ao deslocamento no eixo horizontal dos nós onde são aplicadas as forças compressivas incrementais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o honeycomb ser modelado segundo a Figura 4.1, foram feitas várias análises de verificação de resultados para avaliar a consistência dos mesmos.

5.1 Convergência de Resultados

Para garantir resultados confiáveis das análises foram realizados vários testes de convergência de elementos. Foram propostos dois tipos de elementos de viga da biblioteca do Ansys:

- **Beam188:** Elemento de barra linear de dois nós (I,J) baseado na teoria de vigas de Timoshenko. Possui um baixo custo computacional ao custo de uma menor precisão devido à linearidade imposta nas condições de contorno. O elemento possui um nó (K) onde é apenas definida a orientação da seção.
- **Beam189:** Elemento de barra quadrático de três nós (I,J,K) baseado na teoria de vigas de Timoshenko. Apresenta um maior custo computacional em relação ao elemento linear, porém possui uma precisão muito maior devido a adição do terceiro nó, permitindo ter configurações mais complexas. O elemento também possui um nó (L) onde é apenas definida a orientação da seção.

Uma visão esquemática de ambos os elementos pode ser vista na Figura 5.1:

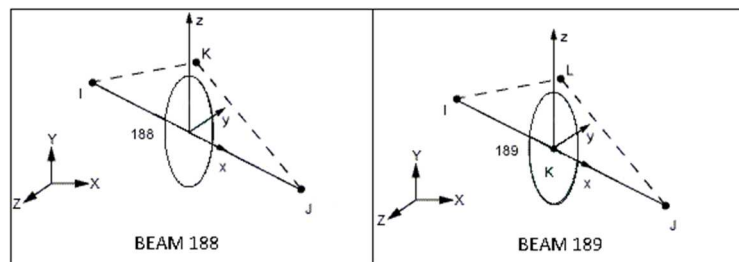


Figura 5.1 – Elementos utilizados para o estudo de convergência.

Foram feitas análises com a geometria e as condições de contorno fixas, variando apenas o tipo e a quantidade de elementos por parede. A espessura de parede para os ensaios foi de 0.1mm. A Figura 5.2 demonstra o valor de carga crítica pelo número de elementos por parede. A Figura A.3 no Apêndice 1 demonstra uma célula discretizada com 5 elementos por parede.

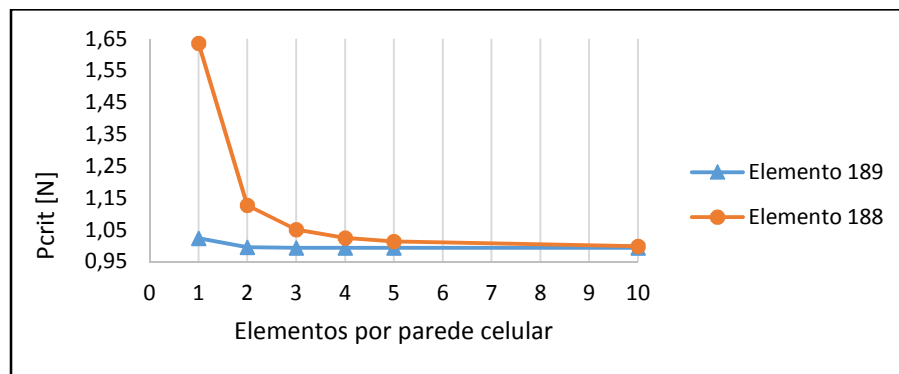


Figura 5.2 – Curvas de convergência dos elementos.

Como foi visto na Figura 5.2, o elemento 189 converge muito mais rapidamente do que o elemento 188 devido à sua natureza não linear, por isso as simulações foram feitas utilizando o elemento 189 com 5 elementos por parede celular.

5.2 Carga Crítica com Geometria Indeformada

A análise de carga crítica da estrutura com a geometria indeformada foi feita utilizando 5 elementos por parede celular e variando a espessura da parede, que por sua vez varia a densidade relativa da estrutura, como pode ser visto na Equação 2.1. O valor da carga crítica é então comparado com a literatura (Equação 2.5) para avaliar a disparidade entre ambas. A Figura 5.3 abaixo denota valores obtidos de carga crítica com seus respectivos valores teóricos juntamente com a densidade relativa correspondente à esquerda, juntamente com o erro entre os resultados numéricos e teóricos.

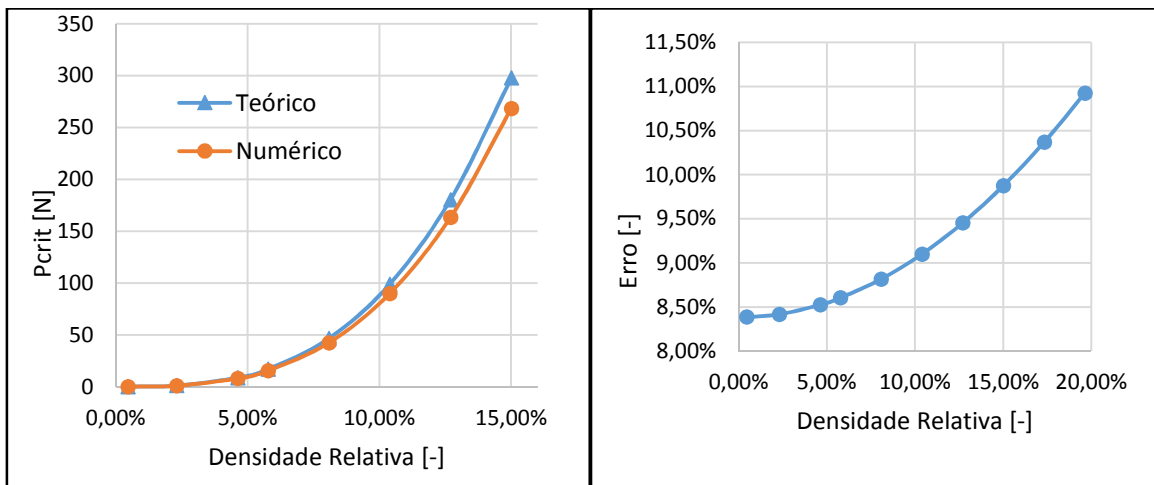


Figura 5.3 – Análise de carga crítica com relação à densidade relativa.

Os erros demonstrados na Figura 5.3 foram calculados segundo a equação 5.1:

$$ER = \frac{P_{teor} - P_{num}}{P_{teor}} \quad (5.1)$$

Onde ER é o erro calculado, P_{teor} é a carga crítica teórica e P_{num} é a carga crítica numérica obtida. Percebe-se que o erro começa em cerca de 8% e sobe conforme aumenta a densidade relativa. Segundo a literatura, Ajdari, 2008, essa magnitude de erro entre a teoria e os ensaios numéricos é esperada, validando assim o modelo.

5.3 Modos de Flambagem

Os modos de flambagem foram extraídos do modelo para que seja possível analisar quais partes da estrutura se deformam mais. A Figura 5.4 mostra o primeiro modo de flambagem com a geometria original sobreposta. Os demais modos de flambagem estão denotados no Apêndice 2. As deformações referentes ao primeiro modo estão amplificadas 7 vezes para uma melhor visualização.

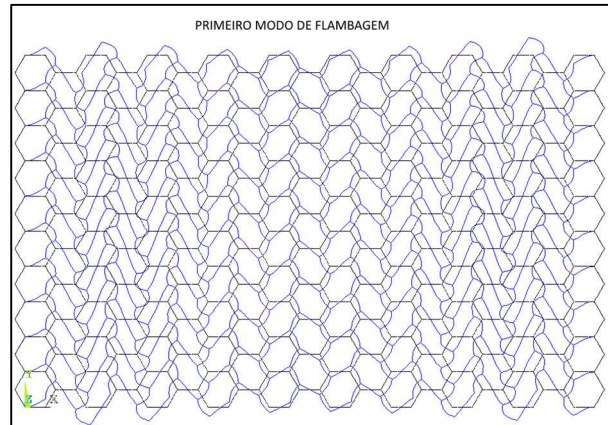


Figura 5.4 – Primeiro modo de flambagem ampliado 7 vezes da estrutura sobreposta a original.

Para fins de validação se calcula a carga crítica e modo associado de uma estrutura celular apresentada na bibliografia. Na Fig. 5.5 se compara os resultados calculados com o modelo implementado e o apresentado na bibliografia em termos da forma modal.

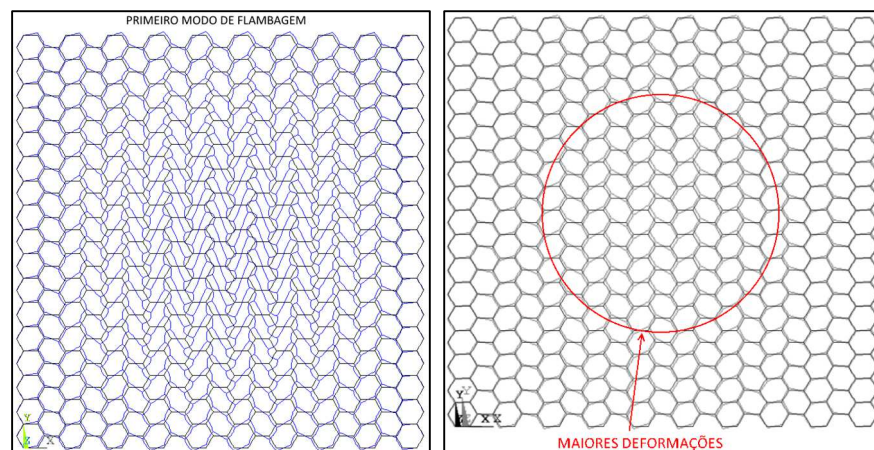


Figura 5.5 –À esquerda: primeiro modo de flambagem ampliado 7 vezes da estrutura com geometria maior sobreposta a original; à direita: modelo da literatura (Ajdari, 2008) sobreposto ao primeiro modo de flambagem.

Percebe-se a similaridade entre os dois modelos, validando assim as condições de contorno empregadas na geometria original.

5.4 Análise da malha com a geometria do favo sem imperfeições

Foram realizadas análises não lineares físicas e geométricas da malha com variação de espessura da parede, consequentemente variando a densidade relativa do material. A Figura 5.6 abaixo demonstra curvas de força por deslocamento da estrutura para diversas densidades relativas.

É notável a importância que a densidade relativa da estrutura tem com o comportamento estrutural a partir de observações da Figura 5.6, a qual demonstra grandes variações tanto na resistência mecânica quanto no potencial de absorção energética dos diferentes favos.

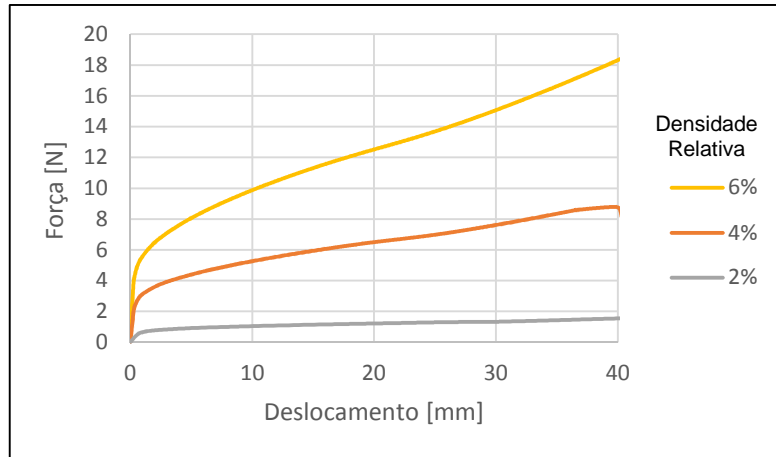


Figura 5.6 – Análise não linear geométrica de modelos com densidade relativa variável.

5.5 Análise da malha com a geometria do favo com imperfeições incorporadas.

As análises realizadas nesta subseção do trabalho foram feitas com 5 elementos BEAM189 por parede celular e com uma densidade relativa de 4,6%, seguindo os estudos de convergência supracitados.

Foram realizadas análises seguindo dois tipos de deformação da estrutura, uma utilizando apenas uma fração do deslocamento do primeiro modo de flambagem, e outra utilizando uma fração dos 5 primeiros modos de flambagem segundo a equação 5.2 a seguir:

$$\Delta u = \frac{w_0 u_1}{2^0} + \frac{w_0 u_2}{2^1} + \frac{w_0 u_3}{2^2} + \frac{w_0 u_4}{2^3} + \frac{w_0 u_5}{2^4} \quad (5.2)$$

Onde w_0 é um coeficiente que será utilizado para aumentar o nível de imperfeição da estrutura, u_n são vetores de deslocamentos unitários dos nós correspondentes do modo de flambagem n e Δu é o vetor de deslocamentos resultante dos nós que será aplicado nos nós da geometria inicial. A Figura 5.7 abaixo demonstra os resultados obtidos utilizando a Equação 5.2 e utilizando o w_0 apenas no primeiro modo de flambagem. Os deslocamentos u_n são vetores cujos componentes variam de 0 a 1 dependendo do nó e do modo de flambagem correspondente.

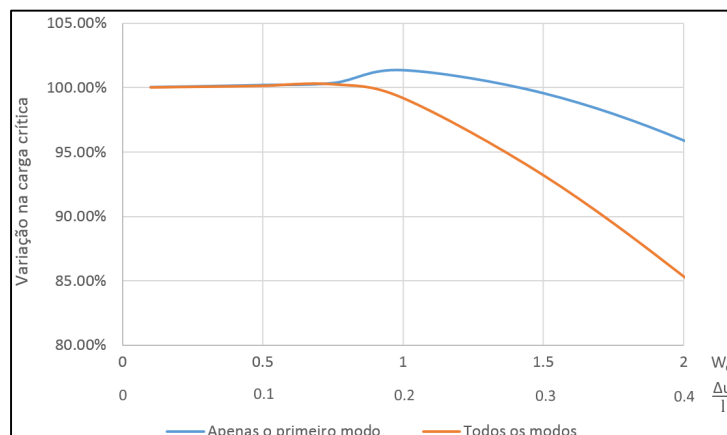


Figura 5.7 – Carga crítica da estrutura quando submetida aos diferentes tipos de imperfeições.

Como pode ser visto na Figura 5.7, quando o coeficiente de imperfeição w_0 for menor que 0,8, as imperfeições inseridas na geometria utilizando apenas o primeiro modo ou utilizando os cinco primeiros modos não influenciam radicalmente na resistência da estrutura.

Porém, quando o coeficiente for maior que 0.8 percebe-se que quando se utilizam os 5 modos de flambagem como uma imperfeição, a carga crítica da estrutura cai mais bruscamente em relação à quando se utiliza apenas o primeiro modo. São utilizados apenas os 5 primeiros modos devido a menor contribuição que cada modo subsequente possui na determinação das imperfeições, como é denotado na Equação 5.2.

Como não há variação significativa na carga crítica até que as imperfeições chegassem no primeiro modo de flambagem, a estrutura não apresenta grande sensibilidade às deformações iniciais que possam ser provenientes do processo de fabricação.

Em um segundo momento, foram realizadas análises não lineares com o modelo geométrico portando diversos níveis de deformação dados pela Equação 5.2. As simulações foram realizadas utilizando um modelo de encruamento isotrópico multilinear de Von Mises e resolvidas pelo software Ansys® 14 com as mesmas condições de contorno utilizadas anteriormente.

Para resolver este problema no Ansys, foi realizada uma análise considerando grandes deslocamentos e utilizando a não linearidade físico geométrica levando em conta a lei constitutiva indicada acima. O algoritmo de iteração utilizado para resolver o sistema não linear foi baseado no método de Newton Rapshon. Não foi necessário neste caso realizar o controle das iterações empregando o método do comprimento de arco devido a não se apresentar instabilidades na faixa da curva analisada. Os dados do material foram retirados do livro do Gibson, 1997, e foram calculadas as forças com os respectivos deslocamentos nodais, que foram plotados na Figura 5.8. O valor da carga de colapso elástico sem imperfeições dada pela teoria (Equação 2.4) também está inserido na Figura 5.8 abaixo.

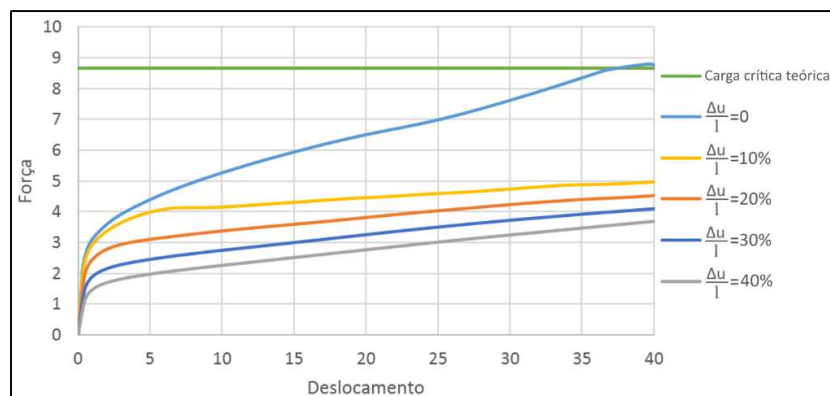


Figura 5.8 – Análise não linear do modelo com diferentes níveis de imperfeições.

Como pode-se notar, quando o modelo não apresenta nenhuma imperfeição, ou seja, $\frac{\Delta u}{l} = 0$, possui uma resistência mecânica muito superior ao modelo com uma pequena imperfeição. Isso se deve ao fato das paredes celulares estarem colineares à aplicação da força, melhorando a rigidez do sistema.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizadas simulações numéricas para determinar a sensibilidade de espumas metálicas em relação aos defeitos inerentes do processo de fabricação. Para isto foram realizadas análises de flambagem e não linearidade com diferentes níveis de imperfeições geométricas atribuídas ao modelo.

É possível identificar uma grande dependência das propriedades mecânicas da estrutura com relação a sua densidade relativa a partir da Figura 5.6, onde demonstra claramente a maior resistência mecânica e maior potencial de absorção energético em estruturas com maior densidade relativa. Tal afirmação é suportada pelo fato de haver mais

material resistindo às cargas aplicadas, melhorando assim a performance porém aumentando o peso final da estrutura.

Outra conclusão que pode ser tirada da Figura 5.6 é o fato de, com 2% de densidade relativa, a estrutura apresenta uma flambagem predominantemente elástica, com um plateau bem definido, estando na parte direita do diagrama demonstrado na Figura 6.1. Quando a densidade relativa aumenta, efeitos de interação entre elasticidade e plasticidade começam a surgir devido à maior espessura das paredes, estando à esquerda da Figura 6.1, divergindo ainda mais do resultado teórico dado pela Equação 2.4 (equação de Euler modificada).

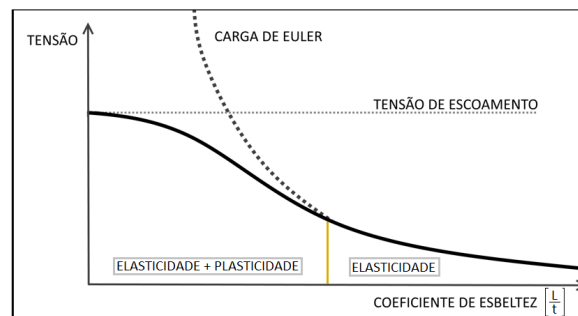


Figura 6.1: Diagrama de tensão por esbeltez (l/t) para flambagem elástica.

Como pode ser visto na Figura 5.7, um modelo com um coeficiente de imperfeição w_0 de até 1 possui uma carga crítica de flambagem muito próxima da nominal, indicando uma resistência que o favo hexagonal possui com relação à flambagem das paredes das células. Porém, se analisarmos a Figura 5.8, vimos que com uma pequena imperfeição inserida no modelo, o mesmo perde resistência mecânica e potencial de absorção energética significativa.

Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato da estrutura começar um processo de colapso plástico antes da flambagem. Segundo a literatura (Gibson et al., 1997), para metais cuja tensão de escoamento é 10^3 vezes menor que o módulo de elasticidade, a flambagem elástica precede o colapso plástico apenas quando a densidade relativa é menor que 0,3%. Como as simulações foram realizadas utilizando uma densidade relativa de 4,61%, as mesmas estão condizentes com a literatura.

Nota-se também que, com a geometria sem nenhuma imperfeição, na Figura 5.8 existe um grande aumento no potencial de absorção energética e na resistência mecânica se comparada com as geometrias com algum defeito incluso. Isso se deve ao fato das paredes celulares estarem perfeitamente alinhadas com as forças compressivas, aumentando a rigidez geral do sistema.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altenajji, M., Schleyer G.K., Zhao, Y.Y., **“Characterisation of Aluminium Matrix Syntactic Foams under Static and Dynamic Loading”**, University of Liverpool Impact Research Centre, 2012.

Ajdari, A., **“Mechanical behavior of cellular structures- a finite element study”**, Mechanical Engineering Master's Theses, Paper 13, Northeastern University, 2008.

Andrews, E.W., Gioux, G., Onck, P., Gibson, L.J., **“Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results”**, International Journal of Mechanical Sciences 43, pp 701-713, 2001.

ANSYS® Academic Research, Release 14.0, ANSYS Inc., 2013.

Bonaldi, P., Schaeffer, L., **“Obtenção de Espuma Metálica de Alumínio Via Metalurgia do Pó”**, 65º Congresso Anual da ABM, pp 677-683, 2010.

Chen, W. F., HAN D. J. **“Plasticity for Structural Engineers”**, 1. ed. New York: Springer-Verlag, 1988. 606p.

Chodraui, G. M. B. **“Análise Teórica e Experimental de Perfis de Aço Formados a Frio Submetidos à Compressão”**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos. 2006. 294p.

Chodraui, G. M. B. **“Flambagem Por Distorção da Seção Transversal em Perfis de Aço Formados a Frio Submetidos à Compressão Centrada e à Flexão”**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos, 2003. 173p.

Dennehy, K., **“Composites Manufacturing”**, lecture notes, Winona State University, 2014.

Gibson L.J., **“Mechanical behaviour of metallic foams”**, Mater Science, Vol.30, pp. 191-227, 2000.

Gibson, L.J., Ashby, M.F., **“Cellular Solids: Structure and Properties”**, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997.

Grigoletti, G. C., **“Otimização Via Algoritmos Genéticos de Perfis U Formados a Frio Submetidos à Compressão Utilizando o Método da Resistência Direta”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

Natal, J.R.M., Dinis, L.M.J.S., **“Teoria da Plasticidade”**, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto, 2004/2005.

Illuk, A., **“Global stability of an aluminium foam stand-alone energy absorber”**, archives of civil and mechanical engineering 13, pp 137–143, 2013.

Olurin, O.B., Fleck, N.A., Ashby, M.F., **“Deformation and fracture of aluminium foams”**, Materials Science and Engineering A291, pp 136–146, 2000.

Popov, E.P., **“Introdução à Mecânica dos Sólidos”**, 1ª edição, Editora Blücher, Brasil, 1978.

Riks, E. **“An Incremental Approach to The Solution of Snapping and Buckling Problems”**. International Journal of Solids and Structures, 1979.

Riks, E. **“The Application of Newton’s Method to the Problem of Elastic Stability”**. Journal of Applied Mechanics, 1972.

Timoshenko, S.P., Gere, J.M., **“Theory of Elastic Stability”**, 2nd edition, McGraw-Hill, Japan, 1961.

Wang, Z., Shen, J., Lu, G., Zhao, L., **“Compressive behavior of closed-cell aluminum alloy foams at medium strain rates”**, Materials Science and Engineering A528, pp 2326–2330, 2011.

Wempner, G. A. **“Discrete Approximation Related to Nonlinear Theories of Solids”**. International Journal of Solids and Structures, 1971.

Ziemian, R. D. **“Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures”**. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 1078p.

Ziemian, R. D., MCGUIRE W. **“Tutorial for Mastan2: Version 3.0”**. New York: John Wiley & Sons, 2007. 68p.

ANEXO 1

Encruamento isotrópico multilinear de Von Mises

O encruamento isotrópico multilinear de Von Mises se baseia no alongamento da superfície de escoamento de Von Mises mantendo o centro da mesma fixo, o que caracteriza a isotropia do modelo. A Figura A.1 abaixo demonstra o alongamento da superfície de escoamento.

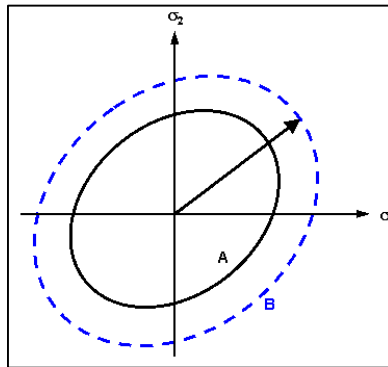


Figura A.1: Superfície de escoamento de Von Mises

Quando o material se encontra na situação **A**, o mesmo encontra-se em regime elástico. Quando as tensões crescem de tal maneira que o material atinge o limite de **A**, o modelo então expande o círculo até **B** em incrementos infinitesimais até obter um resultado satisfatório.

Quanto à linearidade, as análises utilizaram um método multilinear, onde a curva de tensão por deformação do material é composta de vários segmentos de reta com diferentes angulações para formar uma curva não linear, como demonstrado na Figura A.2 abaixo.

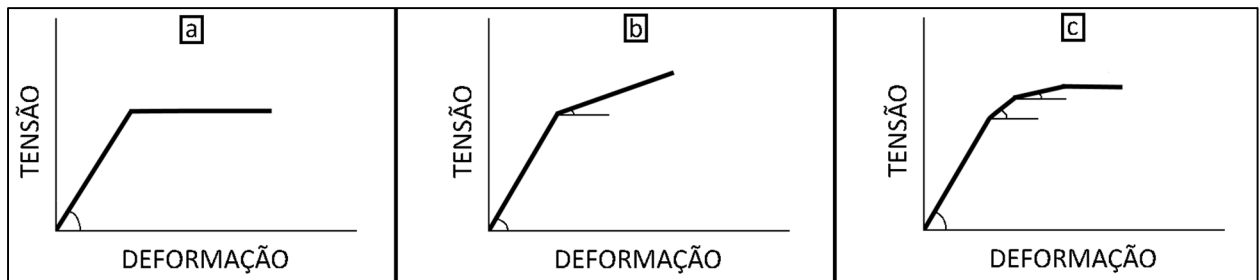


Figura A.2: Modelos de plasticidade: a) Material elástico perfeitamente plástico; b) Material elasto-plástico com encruamento bilinear; c) Material elasto-plástico com encruamento multilinear.

Essa multilinearidade se dá através de vários incrementos homogêneos que são realizados na superfície de escoamento, dando assim o formato da curva.

APÊNDICE 1

Discretização das paredes celulares.

A discretização das paredes celulares é feita conforme a Figura A.3, onde são denotados apenas os nós do começo e do fim dos elementos (I,J), omitindo-se o nó intermediário (K) para melhor visualização.

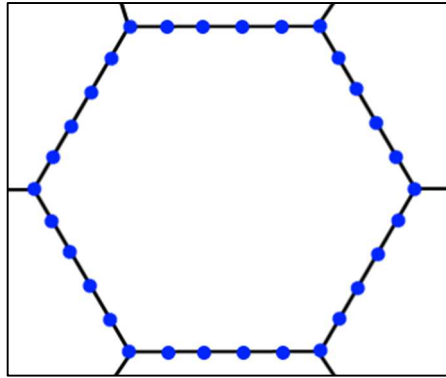


Figura A.3: Célula do modelo discretizada com 5 elementos BEAM189 por parede.

APÊNDICE 2

Modos de Flambagem

Os modos de flambagem calculados a partir do modelo representado na Figura 4.1 que foram utilizados para a determinação das imperfeições adicionadas no modelo estão denotados nas Figuras A.4 até A.8. As deformações dos modos de flambagem estão ampliadas 7 vezes para uma melhor visualização.

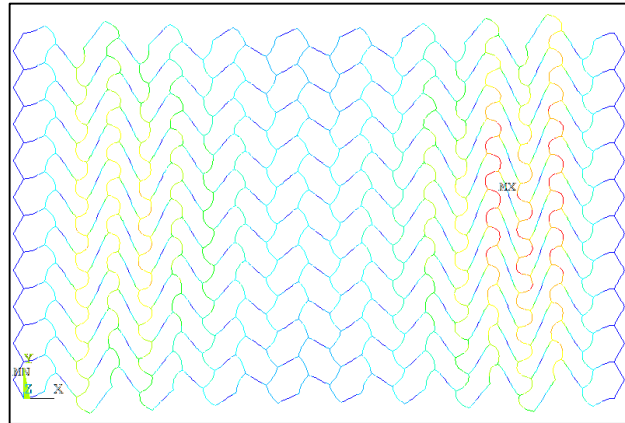


Figura A.4: Primeiro modo de flambagem.

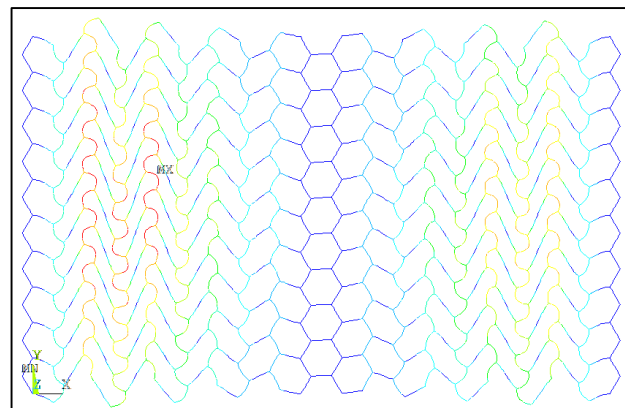


Figura A.5: Segundo modo de flambagem.

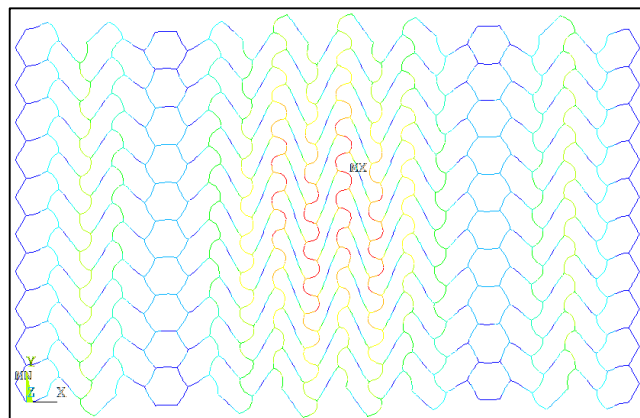


Figura A.6: Terceiro modo de flambagem.

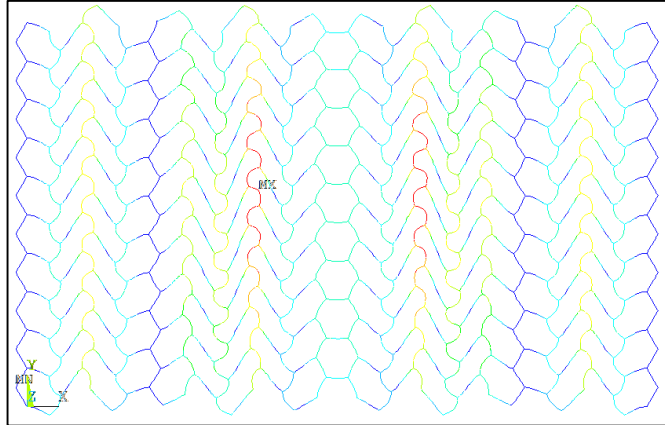


Figura A.7: Quarto modo de flambagem.

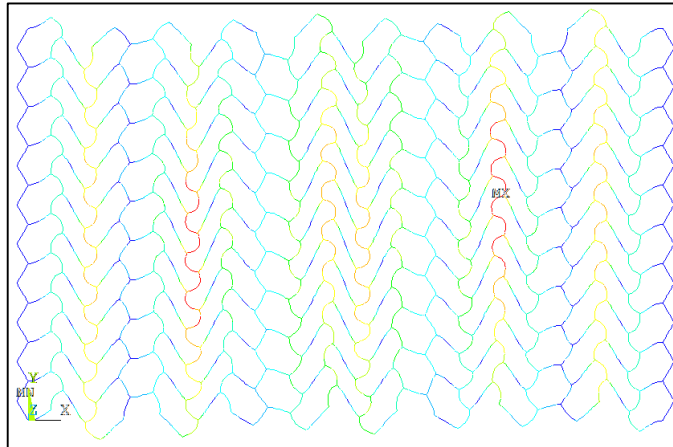


Figura A.8: Quinto modo de flambagem.