

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNA AIMI TAKII

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS
CELULARES CILÍNDRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(Tcc2)

CURITIBA

2018

BRUNA AIMI TAKII

**ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS
CELULARES CILÍNDRICAS**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Luersen

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa Pesquisa "ANÁLISE NUMÉRICA DE ESTRUTURAS CELULARES CILÍNDRICAS", realizado pela aluna Bruna Aimi Takii, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Eng. Marco Antônio Luersen

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Eng. Ivan Moura Belo

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof.^a Dr.^a Eng.^a Ana Paula Carvalho da Silva

DAMEC, UTFPR

Avaliadora

Curitiba, 05 de dezembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antônio Luersen, pelos conselhos e tempo dedicado para que tornasse este trabalho viável.

Agradeço ao meu colega Felipe Aragão Sviech, ao qual me ensinou pacientemente e me apoiou durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos de faculdade, com os quais compartilhei conhecimento, momentos de tensão e também de alegria durante todos esses anos.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família pelo suporte e amor incondicional. Vocês são a base de todo o sucesso e realizações que venho construindo e alcançando em minha vida.

“Quando uma criatura humana desperta para um grande sonho e sobre ele lança toda a força de sua alma, todo o universo conspira a seu favor.”

Johann Goethe

RESUMO

TAKII, B. A. Análise numérica de estruturas celulares cilíndricas. 47 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Na indústria petrolífera, a redução do peso de dutos flexíveis influencia diretamente nos custos de todo o sistema de extração. Esses dutos estão normalmente sujeitos a situações de alta pressão e compressão axial, podendo gerar falhas repentinas. Por isso, estudos intensivos estão sendo realizados a fim de encontrar alternativas para melhorar as propriedades das diversas camadas funcionais que constituem os dutos flexíveis. Uma opção aos dutos formados por camadas de materiais compósitos é a de inserir, de forma complementar, um reforço metálico tubular celular, possibilitando escolher uma forma geométrica que melhore alguma propriedade mecânica desejada. Assim, este trabalho estuda, de forma isolada, o comportamento mecânico do reforço metálico cilíndrico celular. Este estudo tem como objetivo realizar uma análise qualitativa comparando sete geometrias: triangular, quadrada, hexagonal ($\theta = 30^\circ$, 20° e 40°) e auxética reentrante ($\theta = -20^\circ$ e -10°). As estruturas são submetidas a esforços de compressão, para análise estática e de flambagem linear, e de pressão interna. Esses esforços são avaliados de forma independente e, posteriormente, de forma combinada. Nas análises estruturais utiliza-se a modelagem por elementos finitos através do *software* comercial ABAQUS. Os resultados das análises mostram que a estrutura com células triangulares é a mais rígida na direção axial e a que suporta maior carga até falhar por flambagem. Quando comprimida, a estrutura com células quadradas apresenta, particularmente, deslocamento radial praticamente nulo. Porém, é caracterizada por uma baixa resistência à flambagem linear. As células hexagonais apresentam menor peso, maior deslocamento radial para compressão e maior deslocamento axial quando sujeitas a pressão interna. Já as células auxéticas reentrantes apresentam maior flexibilidade axial em compressão e também baixa resistência à flambagem. Porém, são as que apresentam as menores tensões quando submetidas à pressão.

Palavras-chave: estruturas celulares, *honeycomb*, elementos finitos, dutos.

ABSTRACT

TAKII, B. A. Numerical analysis of cellular cylindrical structures. 47 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

In the oil industry, the decrease of weight of flexible pipelines influences the costs of the entire extraction system. These ducts are usually exposed to high pressures and axial compression, which may cause sudden failures. Therefore, intensive studies are being carried out to find alternatives that enhance the properties of the functional layers that constitute the flexible pipes. An option to the pipes formed by layers of composite materials is to insert, additionally, a cellular tubular metallic reinforcement. Cellular solids enable to choose a geometric shape that can improve a desired mechanical property. Thus, this work studies the mechanical behavior specifically of the cellular cylindrical metallic reinforcement. The objective is to obtain a qualitative analysis comparing seven geometries: hexagonal ($\theta = 30^\circ$, 20° and 40°), reentrant auxetic ($\theta = -20^\circ$ and -10°), triangular and square. The structures are subjected to compression loads, for static analysis and linear buckling, and internal pressure. These loads are evaluated independently and, subsequently, in combined modes. For the structural analysis, finite element modeling is performed using the commercial software ABAQUS. The results of the simulations show that the structure with triangular cells is the most rigid in the axial direction and the one which supports the highest load before failing through linear buckling. When compressed, the square cell structure shows, particularly, negligible radial displacement. Although, it presents low resistance to linear buckling. The structures with hexagonal cells result in the lightest weight, the highest radial displacement when compressed and the highest axial displacement when submitted to internal pressure. The reentrant auxetic cells shows the highest axial flexibility and low resistance to buckling. But when exposed to internal pressure, they result in the lowest stress values.

Keywords: cellular structures, honeycomb, finite elements, pipelines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 Aplicação de estruturas tubulares celulares (a) <i>stent</i> (b) representação de nanotubo de carbono	11
Figura 1.2 Principais camadas e funções presentes nos dutos flexíveis convencionais	12
Figura 1.3 Duto flexível enrolado em carretel.....	13
Figura 1.4 Duto convencional e compósito, desenvolvido pela GE Oil & Gas	14
Figura 2.1 Parâmetros geométricos de uma célula hexagonal	17
Figura 2.2 Diferentes geometrias e disposições de células (a) e (b) triangulares, (c) e (d) quadradas (e) hexagonal regular (f) hexagonal irregular	18
Figura 2.3 Deformação de estrutura hexagonal irregular de alumínio (a) sem deformação (b) compressão na direção x (c) compressão na direção y.....	19
Figura 2.4 Diferentes estruturas celulares variando-se o ângulo θ	20
Figura 2.5 Curva de flambagem da carga versus deslocamento transversal	22
Figura 2.6 Tensões nominais (a) longitudinal (b) circunferencial e (c) cisalhamento	24
Figura 3.1 Comprimento e diâmetro dos cilindros modelados	27
Figura 3.2 Geometria das células modeladas (a) quadrada (b) triangular (c) hexagonal (d) auxética reentrante.....	28
Figura 3.3 Carregamento e condições de contorno para análise estática linear e flambagem linear.....	30
Figura 3.4 Carregamento e condições de contorno para a análise de pressão interna	30
Figura 3.5 Carregamento e condições de contorno para a análise combinada (compressão + pressão)	31
Figura 4.1 Deslocamento radial para estrutura triangular submetida a pressão interna	33
Figura 4.2 Tensão na estrutura quadrada sob compressão	34

Figura 4.3 Deslocamento radial com aplicação de esforço compressivo (a) auxética $\theta = -20^\circ$ (b) hexagonal $\theta = 40^\circ$ 37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contexto do Trabalho	11
1.2	Objetivo	15
1.3	Justificativa	15
1.4	Conteúdo do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Propriedades geométricas e mecânicas de sólidos celulares	17
2.2	Flambagem linear e pressão interna em cascas cilíndricas de paredes finas.....	21
2.3	Estruturas cilíndricas celulares.....	23
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
3.1	Modelagem das estruturas cilíndricas.....	27
3.2	Condições de contorno e esforços aplicados	29
3.3	Obtenção dos resultados	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
5	CONCLUSÕES.....	39
	REFERÊNCIAS	41
	APÊNDICE A – MODELO DAS ESTRUTURAS CILÍNDRICAS.....	43
	APÊNDICE B – MODELO DAS ESTRUTURAS CILÍNDRICAS QUANDO SUBMETIDAS A FLAMBAGEM LINEAR	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Trabalho

De acordo com Gibson e Ashby (1997), um sólido celular é composto de uma rede interconectada de estruturas sólidas ou placas que formam as arestas e faces de células. Tais estruturas são comumente utilizadas quando há uma demanda para o uso de materiais leves. Abrangem desde estruturas hexagonais do tipo colmeia de abelhas (*honeycombs*) até materiais tridimensionais desordenados, como ocorre em espumas e esponjas. Quando se trata de elementos celulares organizados de forma a constituir as paredes de estruturas tubulares, podem ser encontrados desde a macro até a nano escala. Como exemplo, na medicina são utilizados em procedimentos de angioplastia através da inserção do *stent* (Figura 1.1 (a)), elemento tubular que se expande na veia ou artéria e auxilia na desobstrução do fluxo sanguíneo. Outra aplicação são os nanotubos de carbono (*carbon nanotubes – CNT*), com estrutura representada pela Figura 1.1 (b). Os nanotubos de carbono são amplamente empregados nos ramos da microeletrônica, biotecnologia, em baterias de íon-lítio, entre outras aplicações. Como principais características, eles conferem aos materiais alta resistência mecânica, excelente condutividade térmica e apresentam comportamento metálico ou semicondutor, dependendo da orientação da estrutura (Volder et al., 2013).

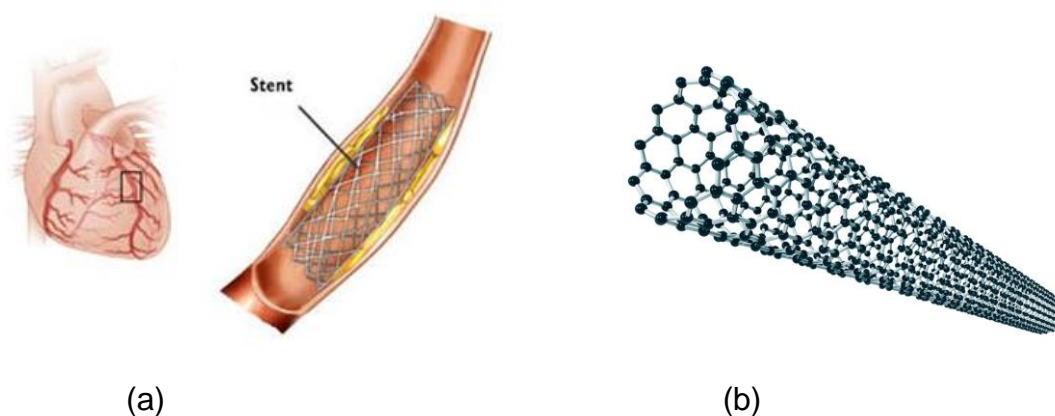


Figura 1.1 Aplicação de estruturas tubulares celulares (a) *stent* (b) representação de nanotubo de carbono

Fonte: (a) adaptado de www.michaelwest.com.au (b) www.azonano.com

Na indústria petrolífera, comercialmente, existem dutos rígidos e dutos flexíveis para transporte de fluidos da produção. Dutos rígidos são compostos inteiramente de ligas de aço ou até mesmo de titânio. Porém, seu peso pode sobrecarregar a plataforma de exploração, além de gerar desvantagens como: alto custo de manutenção, suscetibilidade a carregamentos cíclicos devido à ação de correntes e ondas marinhas e baixa resistência à corrosão sob a ação de calor, causando desgaste e falha na sua operação. Esta corrosão pode ser interna, causada pela ação dos produtos transportados, ou externa, devido ao ambiente em que a tubulação se encontra (Touça e Bastian, 2003). Já os dutos flexíveis de camadas não aderentes são as soluções mais empregadas na exploração petrolífera brasileira. Tais camadas são constituídas por diversos materiais, metálicos e termoplásticos, cada uma atuando com uma função específica (Figura 1.2). Por isso, dutos flexíveis possuem a vantagem de permitir uma liberdade de customização das camadas individualmente, de acordo com os requisitos de aplicação. Também apresentam alta resistência à tração, bom isolamento térmico, baixa rigidez à flexão e podem ser enroladas em carretéis, facilitando a instalação e o transporte (Figura 1.3).

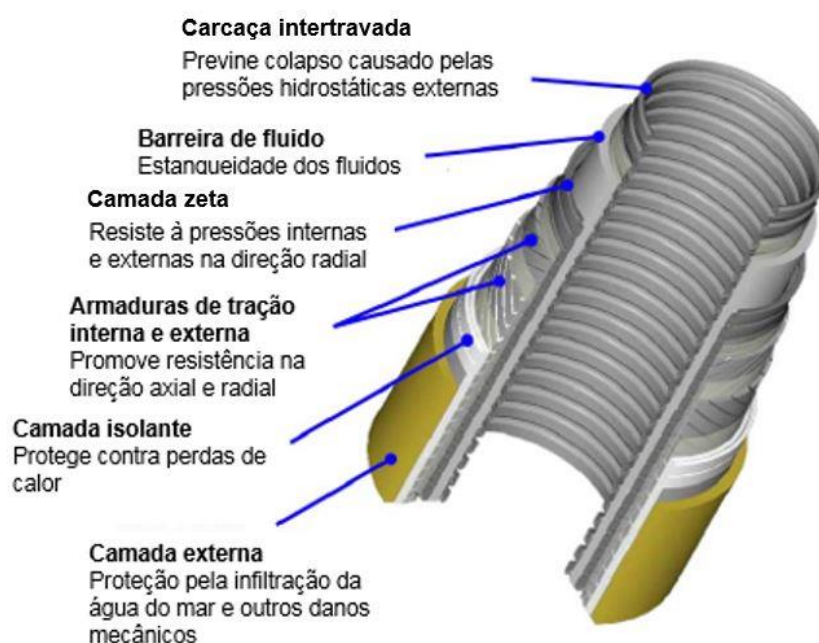


Figura 1.2 Principais camadas e funções presentes nos dutos flexíveis convencionais

Fonte: Anderson et al., 2013



Figura 1.3 Duto flexível enrolado em carretel

Fonte: www.huismanequipment.com

No Brasil, com a descoberta de petróleo na camada pré-sal, novos desafios às soluções usuais para dutos surgiram. Esses desafios são causados pelas condições extremas existentes a profundidades de 5000 a 7000 metros abaixo do nível do mar, como altas pressões e a presença de elementos altamente corrosivos, como o H_2S e o CO_2 . Dessa forma, acentua-se a necessidade de se obter dutos mais leves e que sejam capazes de resistir a esforços de tração, pressão interna, esforços gerados pelas despressurizações dinâmicas do sistema, alta capacidade de isolamento térmico e não falharem por fadiga (Sousa et al., 2009). Na aplicação de *risers* (tubulações que transportam óleo e gases do poço à plataforma ou ao navio) a redução de peso dos dutos é de extrema relevância, pois resulta em baixa tração no topo do *riser* e a consequente baixa carga que a plataforma deve suportar. Reduzem-se as tensões no *riser* e nos sistemas de suporte, simplificando o sistema de amarras, ancoragem e fundação, trazendo consequentemente redução de custos. Além disso, faz-se necessário desenvolver tecnologias que previnam acidentes por falhas, pois na indústria petroquímica estas podem gerar irreparáveis prejuízos ambientais.

Estudos intensivos estão sendo realizados para substituir algumas camadas das tubulações flexíveis convencionais por materiais compósitos (Oliveira et al., 2011), sendo uma possível solução para exploração em águas profundas. Materiais compósitos também podem trazer a combinação das propriedades das fases dos materiais aos quais são constituídos, assegurando alta resistência à fadiga e servindo como ótimos isolantes térmicos. Um exemplo é o recente produto desenvolvido pela companhia GE Oil & Gas, representado na Figura 1.4.

Outra alternativa que visa melhorar o desempenho dos dutos de exploração de petróleo é a inserção de um reforço metálico tubular celular. O reforço metálico pode agregar as características mecânicas dos dutos promovendo alta capacidade de flexão, resistência à pressão interna e resistência à fadiga.

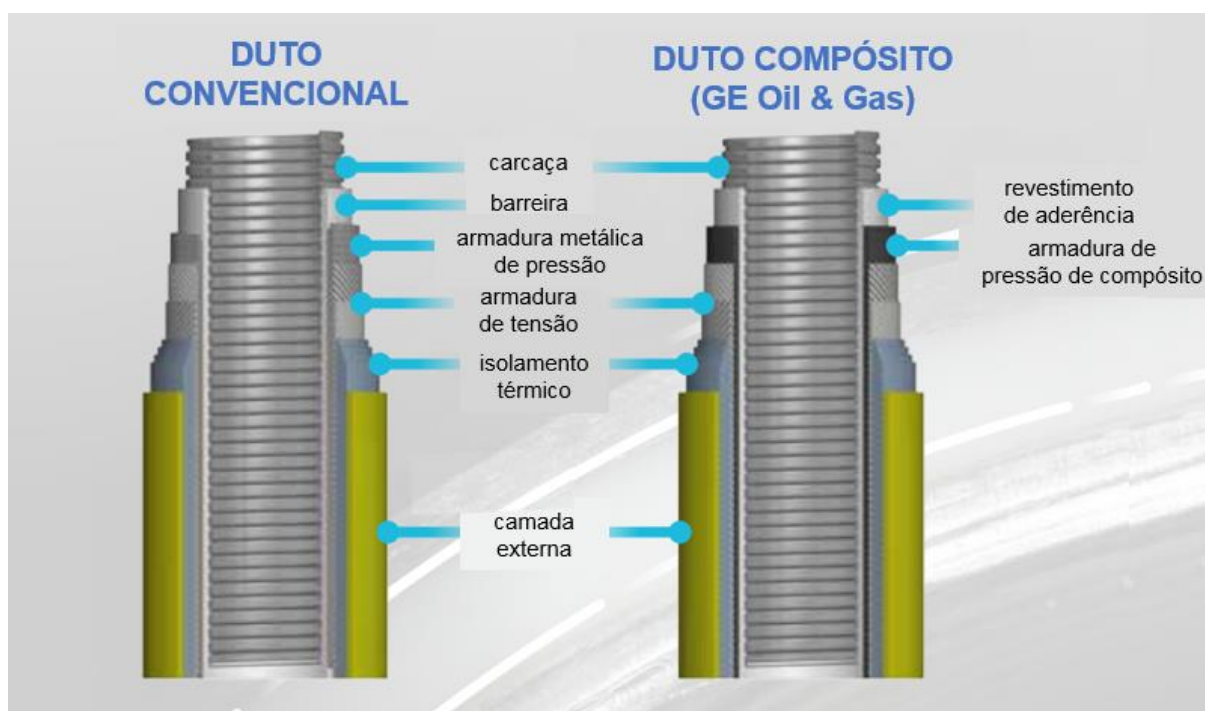


Figura 1.4 Duto convencional e compósito, desenvolvido pela GE Oil & Gas

Fonte: www.geoilandgas.com

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é conhecer o comportamento mecânico dos reforços celulares metálicos a serem utilizados em dutos flexíveis compósitos. Avalia-se a influência de sete formatos de células que constituem as suas paredes: triangular, quadrada, hexagonal ($\theta = 30^\circ$, 20° e 40°) e auxética reentrante ($\theta = -20^\circ$ e -10°). As estruturas são submetidas a esforços mecânicos de compressão, para análise estática e de flambagem linear, e de pressão interna. Esses esforços são aplicados de forma independente e, posteriormente, de forma combinada, para entender a influência da pressão interna na análise estática e na flambagem linear. As magnitudes das cargas impostas às estruturas são representativas e servem somente para a realização de uma análise comparativa qualitativa entre as diferentes geometrias celulares.

O estudo é efetuado através de simulações numéricas utilizando o método dos elementos finitos com o auxílio do *software* comercial ABAQUS. Finalmente, dentre as configurações topológicas estudadas, é possível identificar a mais adequada para suportar os esforços requeridos.

1.3 Justificativa

Dutos aplicados à indústria petrolífera estão sujeitos a diversos esforços mecânicos, como efeitos compressivos e de pressão interna. Conseqüentemente, tais efeitos podem resultar na flambagem, expondo a estrutura a um colapso repentino mesmo antes de se atingir a tensão de escoamento do material. Ciente de que acidentes estruturais em dutos de exploração de petróleo acarretam desastres graves para a economia e a natureza, faz-se necessário desenvolver o conhecimento para prever e diminuir possíveis falhas. A utilização complementar de reforços metálicos em formato celular pode aumentar a capacidade de carga e a durabilidade de dutos de materiais compósitos. Isso pode ser uma possível solução na exploração de petróleo em águas profundas. Existem diferentes formas construtivas de reforços celulares, sendo importante estudar o comportamento e saber a influência do formato da geometria da célula na resposta mecânica do material.

Além disso, este estudo possui sua relevância para a formação de um engenheiro mecânico, visto que análises numéricas computacionais possuem uma ampla abrangência de aplicação. Desenvolvem-se conceitos multidisciplinares do curso de Engenharia Mecânica, envolvendo além da mecânica estrutural, conhecimentos em métodos numéricos e ciência dos materiais.

1.4 Conteúdo do Trabalho

Este trabalho apresenta cinco capítulos. O primeiro contempla uma introdução, abordando a contextualização, os objetivos e a justificativa para o desenvolvimento do tema proposto.

O segundo capítulo tem como objetivo o estudo dos conceitos existentes na literatura, que servirão como referências para as análises dos resultados obtidos no trabalho. São apresentadas as propriedades geométricas e mecânicas de cada formato de célula, além de conceitos de flambagem e de efeitos de pressão interna em cascas cilíndricas de paredes finas. Ao final do capítulo explicam-se comportamentos de estruturas cilíndricas celulares quando submetidas a diferentes tipos de esforços.

O terceiro capítulo compreende os procedimentos metodológicos utilizados para a análise numérica, mostrando as etapas e os parâmetros utilizados para a modelagem das estruturas. São definidas as cargas e condições de contorno aos quais os reforços celulares estão sujeitos em sua aplicação.

No quarto capítulo, os resultados obtidos pelas simulações no *software* comercial ABAQUS são apresentados e discutidos.

O quinto capítulo é composto pelas conclusões resultantes do desenvolvimento deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propriedades geométricas e mecânicas de sólidos celulares

Segundo Ajdari et al. (2011), sólidos celulares podem apresentar propriedades estruturais superiores se comparados às propriedades dos materiais base aos quais são feitos. Destaca-se a alta resistência mecânica para baixas relações de peso. Ou seja, são amplamente utilizados em aplicações que demandam redução de peso. Além disso, materiais celulares apresentam alta capacidade de absorção de energia e resistência ao impacto.

Gibson e Ashby (1997) afirmam que o comportamento mecânico dos sólidos celulares depende não somente das propriedades do material, mas também da forma e da estrutura das células. Assim, é possível modificar a propriedade de um sólido celular somente mudando a geometria da célula, sem a necessidade de mudança do material base. A geometria unitária de uma célula convencional hexagonal está ilustrada na Figura 2.1. θ é o ângulo interno da célula, h é altura da célula, l é o comprimento da célula e t é a espessura da parede.

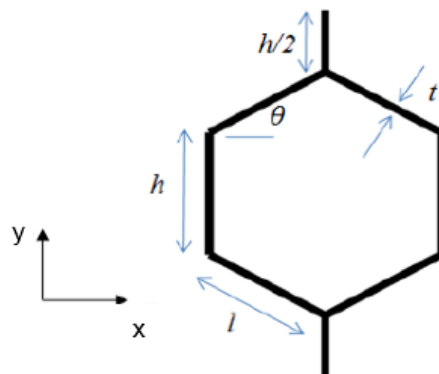


Figura 2.1 Parâmetros geométricos de uma célula hexagonal

Fonte: Ju et al., 2010

De acordo com Gibson e Ashby (1997), as propriedades mecânicas das estruturas celulares podem ser estimadas através de cinco parâmetros:

- a) Módulo de elasticidade do material base (E);

- b) Coeficiente de Poisson do material base (ν);
- c) Razão de aspecto da célula (α), obtida pela razão entre a altura (h) e o comprimento lateral da célula (l);
- d) Densidade relativa β , obtida pela razão da densidade do sólido celular e a densidade do material base;
- e) O ângulo interno da célula θ .

As células bidimensionais podem ser organizadas de diferentes maneiras, como ilustrado na Figura 2.2.

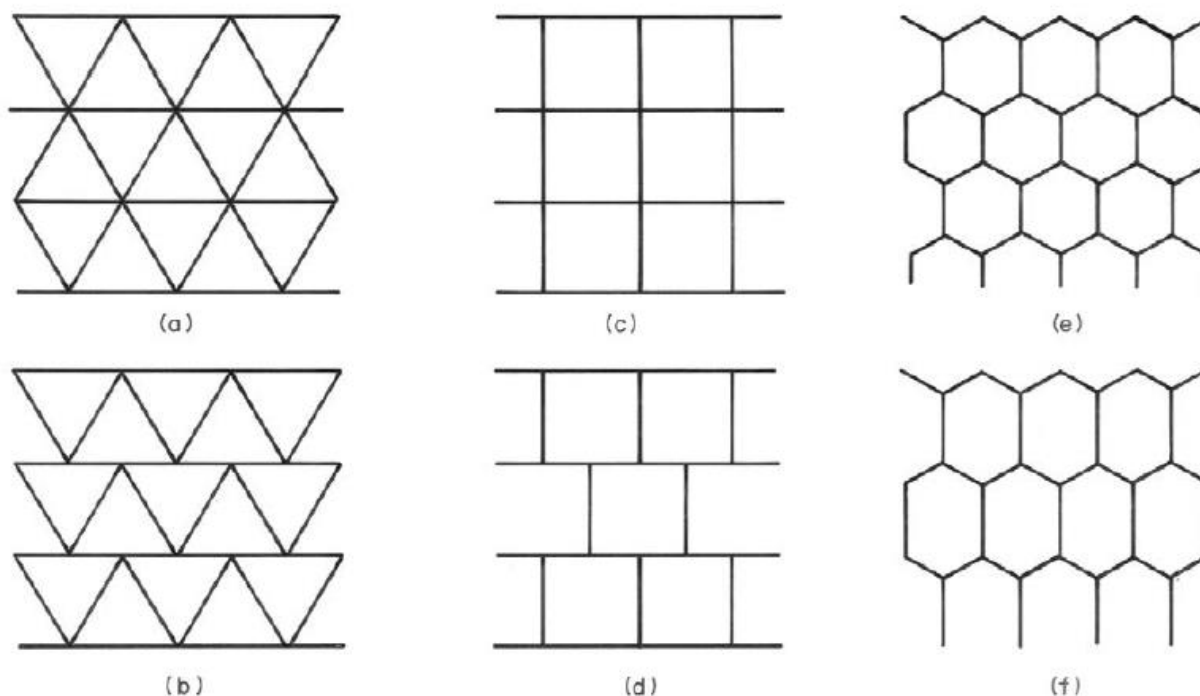


Figura 2.2 Diferentes geometrias e disposições de células (a) e (b) triangulares, (c) e (d) quadradas (e) hexagonal regular (f) hexagonal irregular

Fonte: Gibson e Ashby, 1997

Geralmente, células que possuem geometrias equiaxiais (arestas de tamanhos iguais) apresentam propriedades isotrópicas, ou seja, o comportamento mecânico é independente da direção à qual um esforço é aplicado. Porém, qualquer irregularidade como diferentes espessuras de parede e mudança no formato das células ou de seu conjunto acaba tornando as propriedades das estruturas

anisotrópicas. Ou seja, quando o formato das células é alongado ou seu arranjo é alinhado em uma direção particular, as conexões entre as arestas celulares são diferentes e as propriedades mecânicas acabam se tornando dependentes da direção às quais são medidas (Gibson e Ashby, 2017).

A Figura 2.3 ilustra o comportamento anisotrópico em uma estrutura celular hexagonal irregular quando aplicado um esforço de compressão nos planos x e y .



Figura 2.3 Deformação de estrutura hexagonal irregular de alumínio (a) sem deformação (b) compressão na direção x (c) compressão na direção y

Fonte: Gibson e Ashby, 2017

A seguir, são abordados alguns aspectos sobre as propriedades das formas geométricas celulares comumente aplicadas em estruturas do ramo industrial: as células triangular, quadrada, hexagonal e auxética.

Gibson e Ashby (1997) explicam que células triangulares equiláteras com paredes de mesma espessura possuem comportamento isotrópico. São especialmente utilizadas quando se buscam estruturas com alta rigidez. Isso porque tais geometrias necessitam de mais material para abranger a mesma relação de volume ocupada quando comparadas aos demais tipos de células.

Células quadráticas possuem acentuado comportamento anisotrópico. Já células hexagonais regulares ($\theta = 30^\circ$) apresentam propriedades isotrópicas. Gibson e Ashby ainda destacam que células hexagonais são especialmente empregadas por serem flexíveis nas direções axiais e de cisalhamento. Masters e Evans (1996) afirmam que a geometria base de uma célula hexagonal possibilita criar outras formas e propriedades no plano somente alterando-se o ângulo θ das células, como mostra a Figura 2.4.

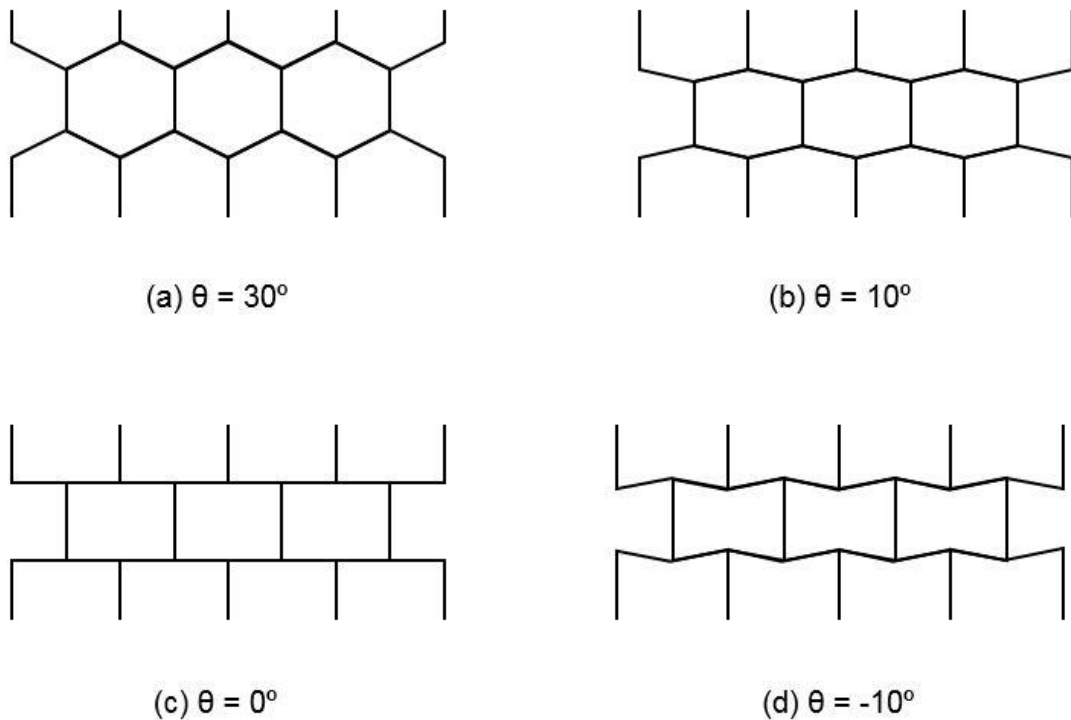


Figura 2.4 Diferentes estruturas celulares variando-se o ângulo θ

Fonte: Autoria própria¹

Geometrias hexagonais modificadas com ângulo θ assumindo valores negativos são denominadas auxéticas reentrantes, hexagonais reentrantes ou *honeycombs* invertidas (Figura 2.4 (d)). Um sólido celular auxético é caracterizado por valores negativos de coeficiente de Poisson (ν). Ou seja, a compressão em uma determinada direção ocasiona a contração da estrutura na direção perpendicular à força aplicada. E, caso seja aplicado um esforço de tração, a seção transversal do material tende a aumentar (Sun e Pugno, 2013). Segundo Scarpa et al. (2003), estruturas auxéticas reentrantes no plano também conferem outras vantagens nas propriedades mecânicas como uma maior resistência à flexão e à flambagem. Ju et al. (2009) estudam a influência de células hexagonais e auxéticas bidimensionais, variando-se θ e t de uma célula com altura fixa. Eles constatam que as propriedades mecânicas das células são extremamente sensíveis à variação da espessura t . Além

¹ Todas as ilustrações e tabelas sem indicação de fonte são de Autoria Própria.

disso, essa sensibilidade aumenta com o acréscimo de células unitárias na direção y . Estruturas auxéticas apresentam menores módulos de cisalhamento efetivos e em consequência maiores deformações cisalhantes.

Ju et al. (2010) obtêm variadas propriedades mecânicas celulares no plano de acordo com a influência de diferentes valores de θ , de razão de aspecto ($\alpha=h/l$) e de espessura em uma célula unitária hexagonal feita de liga de alumínio 7075-T6. Os autores concluem que, para o material estudado, a célula unitária auxética de alta densidade (θ com menores valores) e com maior espessura de filamento é a configuração que possui maior resistência a flambagem linear. Porém, deve-se considerar que baixos valores de θ influem em maior densidade relativa e, conseqüentemente, aumento no peso da estrutura.

Schultz et al. (2012) realizam um estudo de otimização de geometria celular visando o melhor comportamento de absorção de energia de esmagamento para estruturas periódicas com superfície plana. Consideram-se valores constantes para a massa e a densidade efetiva. Para este estudo, células hexagonais com valores de $\theta = 10^\circ$ e $t = 0,35$ mm apresentam a maior energia absorvida e células com $\theta = 45,4^\circ$ e $t = 0,27$ mm resultam na menor energia absorvida por esmagamento.

2.2 Flambagem linear e pressão interna em cascas cilíndricas de paredes finas

Estruturas delgadas sujeitas a uma força compressiva tendem a sofrer falhas por flambagem. Leissa (1983) explica o comportamento de um material sob efeito de uma carga compressiva P em função do deslocamento transversal w , de acordo com a teoria clássica da flambagem (Figura 2.5). Para materiais homogêneos, isotrópicos e sem imperfeições que se encontram no regime linear elástico, inicialmente a estrutura pode suportar a carga compressiva P sem sofrer deslocamento lateral (curva I). Em um determinado estágio do carregamento, a curva tende a se aproximar de um ponto de divergência, ou ponto de bifurcação, até uma carga crítica (P_{cr}). A partir deste ponto a estrutura pode continuar suportando a carga sem se deslocar transversalmente (curva II) ou pode flambar de forma linear (curva III), tornando o sistema instável. Quando atinge a região de flambagem linear, a carga se mantém constante com o aumento do deslocamento lateral. Entretanto, há casos em

que este mesmo material pode sofrer o processo de pós-flambagem. Ao atingir a carga crítica P_{cr} , a estrutura pode apresentar um comportamento não-linear (curva IV), sofrendo deslocamento lateral até a ocorrência de uma falha ou de uma flambagem secundária. Porém, de uma perspectiva mais realista, normalmente essas estruturas apresentam imperfeições causadas pelo próprio processo de manufatura ou pela presença de tensões residuais. Este material imperfeito acaba se comportando como a curva V. Ou seja, quando aplicada a carga P , o material apresenta deslocamento transversal progressivo mesmo antes de atingir a carga crítica P_{cr} .

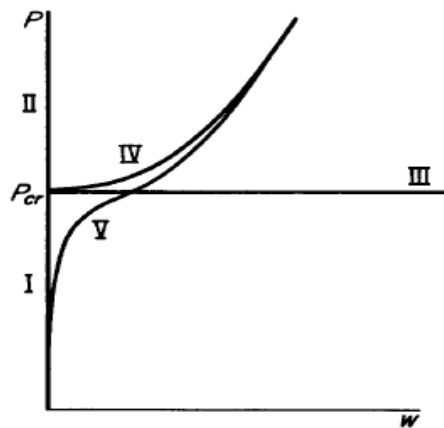


Figura 2.5 Curva de flambagem da carga versus deslocamento transversal

Fonte: Leissa, 1983

Para o escopo deste trabalho, são abordados somente os efeitos estáticos e de flambagem linear causados pela carga compressiva. Segundo Cook (1995), para o estudo da flambagem linear, é possível determinar a carga crítica à qual a estrutura se torna instável pelo método dos elementos finitos resolvendo o problema generalizado de autovalores e autovetores representado pela Equação (1):

$$([\mathbf{K}_0] + \lambda [\mathbf{K}_\sigma]) \{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{0}\} \quad (1)$$

onde $[\mathbf{K}_0]$ é a matriz de rigidez correspondente ao estado inicial, λ é o autovalor que representa a razão entre a carga de flambagem e a carga aplicada, $[\mathbf{K}_\sigma]$ é a matriz de rigidez geométrica e depende das tensões atuantes e $\{\mathbf{u}\}$ é o autovetor que descreve o modo de flambagem da estrutura.

Já para cascas cilíndricas de paredes finas sujeitas à pressão interna, considera-se que a distribuição de tensões normais ao longo de sua espessura sejam uniformes, gerando uma tensão circunferencial σ_c . Craveiro e Neto (2016) relatam que dutos sem fixação em suas extremidades e sujeitos a pressão interna tendem a gerar forças trativas na direção axial pelo efeito de Poisson. Porém, quando o movimento é restringido na direção axial, a tensão nas paredes dos dutos aumenta.

Lo et al. (1951) investigam cascas cilíndricas de paredes finas sujeitas a tensões compressivas e à pressão interna, simultaneamente. Segundo os autores, os critérios clássicos de flambagem linear não podem ser aplicados quando há uma combinação de esforços, pois a pressão interna modifica o comportamento do material. Os experimentos, aliados à teoria, provam que a pressão interna auxilia no aumento da resistência de cascas cilíndricas por falhas de flambagem causadas por tensões compressivas.

2.3 Estruturas cilíndricas celulares

Estruturas cilíndricas celulares se comportam de acordo com as propriedades mecânicas das unidades celulares às quais são compostas. Ou seja, tubos formados por geometrias com coeficiente de Poisson positivo submetidos à tração axial tendem a diminuir sua seção transversal. Já quando sujeitos à compressão, a seção tende a aumentar. E, assim como mencionado na seção 2.1, tubos constituídos de células com coeficiente de Poisson negativo sujeitos à tração apresentam aumento na seção transversal. Quando comprimidos, a seção transversal é diminuída.

Quando sujeitos a uma carga axial, circunferencial e torque axial, os cilindros celulares apresentam, respectivamente, tensão nominal longitudinal (σ_z), tensão nominal circunferencial (σ_c) e tensão nominal de cisalhamento (τ_{cz}). Essas tensões estão representadas na Figura 2.6, sendo D o diâmetro do cilindro.

Karnesis e Burriesci (2013) simulam numericamente o colapso de tubo celular auxético, sujeitando-o à flexão pura. Para o estudo, os autores utilizam três tipos de células (hexagonal, auxética reentrante e retangular) e variam três parâmetros: o ângulo θ das células, a razão de aspecto h/l e o número de células ao longo da direção circunferencial N_c . Inicialmente, nota-se a tendência da seção transversal

assumir formato oval, reduzindo-se o seu diâmetro. Quando submetido a uma carga maior, ondulações são formadas no lado comprimido do tubo. Os autores afirmam que esta configuração é instável e uma ou mais ondulações tornam-se dominantes e rapidamente transformam-se em dobras. Isso relaxa as cargas compressivas de outros locais, removendo as ondulações. Na maioria dos casos, as dobras são observadas nas proximidades do centro do tubo. Porém, para tubulações longas, há uma probabilidade maior de se formar uma série de dobras equidistantes. Realizando a simulação numérica para tubos com células auxéticas e hexagonais, os autores concluem que tubos auxéticos com números de células na região circunferencial entre quatro a doze apresentam maior contribuição à resistência a dobras. Quanto menor N_c de células auxéticas reentrantes, maior é esta resistência. E para o maior número de células auxéticas circunferenciais estudados pelos autores ($N_c = 12$), a resistência à dobras diminui a ponto de alcançar uma capacidade ligeiramente similar à resistência a dobras de células hexagonais com N_c equivalente.

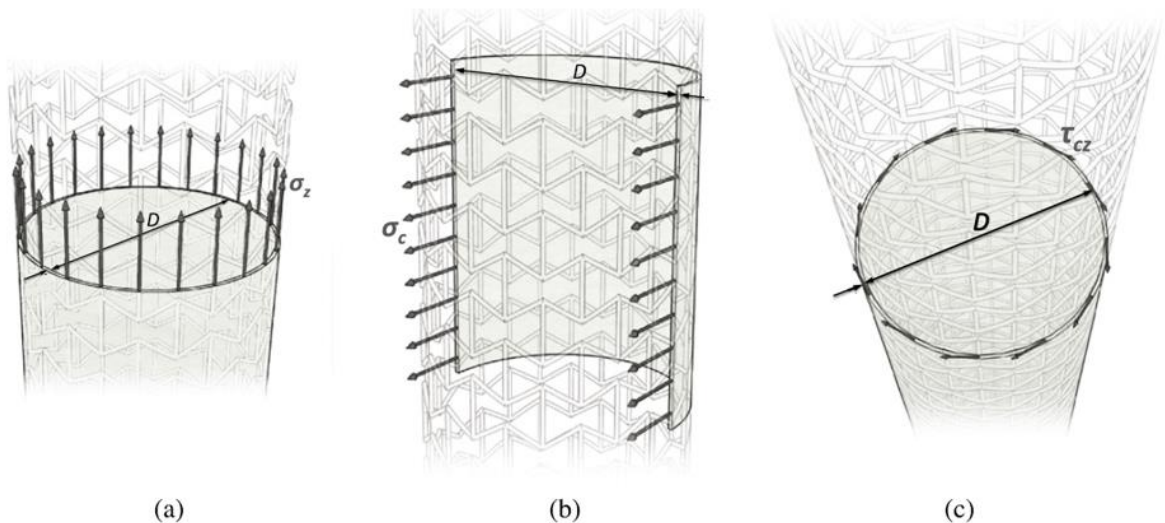


Figura 2.6 Tensões nominais (a) longitudinal (b) circunferencial e (c) cisalhamento

Fonte: Karnesis e Burriesci, 2013

Scarpa et al. (2007) também realizam análises numéricas com tubos celulares no regime linear elástico do material. Os autores aplicam cargas compressivas na direção axial, variando o ângulo θ das células e com número fixo de células na

região circunferencial de $N_c = 12$. Percebe-se que para pequenos ângulos internos, tanto negativos como positivos, prenominam-se o efeito de alongamento dos elementos de barra. Enquanto isso, a flexão é predominante para altos valores de θ . Tais eventos são acentuados para flambagem devido à interferência dos efeitos das células adjacentes. Os autores explicam que em um esforço axial, a estrutura tubular criará uma reação de deformação combinada de flexão, dobramento e alongamento das vigas. Porém, experimentalmente, eles afirmam observar uma maior tendência de deformação por dobramento. Assim como Karnesis e Burriesci (2013), Scarpa et al. também relatam que o comportamento mecânico dos tubos celulares possui alta dependência do número de células na direção circunferencial, com o aumento da rigidez para menores valores de N_c .

Jopek (2017) analisa o comportamento de tubos compósitos reforçados por estruturas celulares auxéticas reentrantes. O objetivo é saber se o diâmetro se expande ou se contrai quando aplicada uma força de tração no eixo longitudinal da tubulação. Realizam-se variações dos módulos de elasticidade do reforço (E_R), da matriz de compósito (E_m) e aplicam-se materiais com diferentes coeficientes de Poisson para o reforço tubular (ν_R). Constata-se que quanto mais rígido o material de reforço for em relação ao material da matriz, maior é a predominância do comportamento do reforço, levando ao comportamento auxético na tubulação. Porém, quando o material da matriz é mais rígido que do reforço, a tubulação como um todo apresenta deformação circunferencial similar ao comportamento mecânico do material da matriz. Ou seja, quando é aplicado um esforço de tração, a seção transversal média do tubo tende a diminuir. Variando-se os valores de coeficientes de Poisson para o reforço tubular (ν_R), verifica-se que quanto maior a divergência entre os módulos de elasticidades da matriz e do reforço, menor é o impacto do coeficiente de Poisson do tubo metálico de reforço.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As principais etapas do desenvolvimento deste trabalho estão listadas abaixo:

1. Revisão bibliográfica sobre estruturas celulares, seus aspectos geométricos e exploração de conceitos de flambagem e pressão interna em cilindros de parede fina.
2. Definição dos tipos de estruturas celulares a serem analisadas e seus parâmetros geométricos.
3. Aprendizado do *software* comercial ABAQUS (versão 6.14) através de tutoriais e apostilas educativas.
4. Modelagem das estruturas no ABAQUS e geração da malha através de elementos de viga.
5. Aplicação dos esforços e análise computacional de forma individual:
 - a) carga compressiva, para realização de análise estática das estruturas sob baixas tensões e pequenas deformações. Através do deslocamento na direção axial e radial, é possível ter conhecimento sobre a rigidez que cada tipo de célula confere ao reforço metálico;
 - b) carga compressiva para avaliação de flambagem linear, possibilitando uma análise comparativa da capacidade de estabilidade das estruturas;
 - c) pressão interna para análise estática dos cilindros celulares, observando-se a capacidade de deslocamento na direção radial, axial e tensões geradas nos filamentos que compõem as arestas das células.
6. Aplicação de pré-carga causada por esforços gerados pela pressão interna nas estruturas e posterior carga de compressão, a fim de estudar o comportamento mecânico das estruturas com cargas combinadas:
 - d) pressão interna (pré-carga) e análise estática compressiva;
 - e) pressão interna (pré-carga) e análise de flambagem linear.
7. Análise dos resultados obtidos através das simulações numéricas.

Na seção seguinte encontram-se os detalhes dos procedimentos metodológicos.

3.1 Modelagem das estruturas cilíndricas

A modelagem das estruturas celulares é realizada no *software* comercial ABAQUS. Todos os cilindros possuem diâmetro $D = 0,2$ m, comprimento $L = 1$ m e o mesmo número de células ($N_c = 16$) ao longo da região circunferencial, como mostra a Figura 3.1. A seção transversal dos filamentos é circular, com raio de 3 mm.

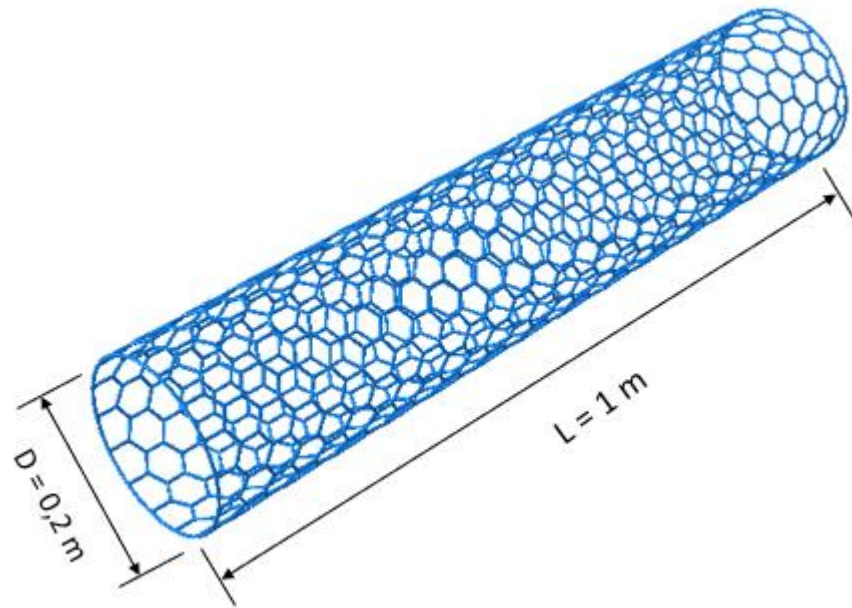


Figura 3.1 Comprimento e diâmetro dos cilindros modelados

São modeladas sete estruturas celulares cilíndricas com células:

- a) quadrada;
- b) triangular;
- c) hexagonal regular com $\theta = 30^\circ$;
- d) hexagonal com $\theta = 20^\circ$;
- e) hexagonal com $\theta = 40^\circ$;
- f) auxética com $\theta = -10^\circ$;
- g) auxética com $\theta = -20^\circ$.

Ilustrações de todas as estruturas tubulares encontram-se no Apêndice A.

Os respectivos parâmetros geométricos de cada célula são ilustrados na Figura 3.2, sendo $a \approx 39,27$ mm, $h \approx 22,67$ mm.

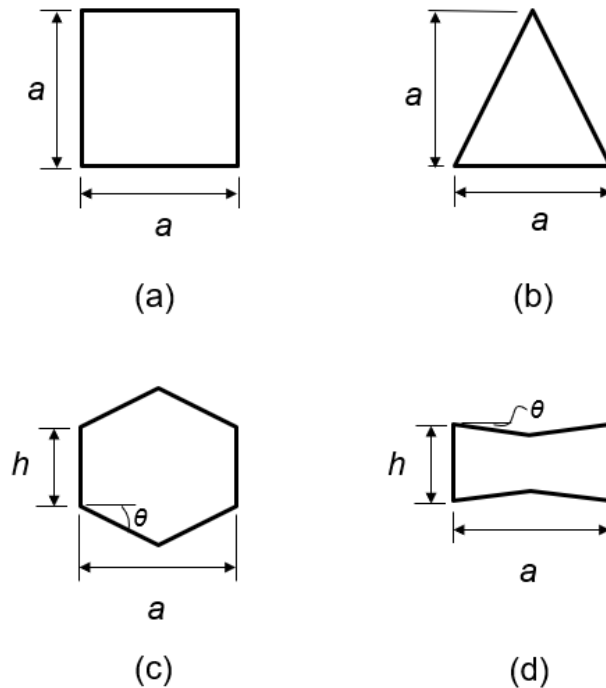


Figura 3.2 Geometria das células modeladas (a) quadrada (b) triangular (c) hexagonal (d) auxética reentrante

Para possibilitar uma análise comparativa entre as estruturas, é utilizado um material comum para todos os modelos: aço AISI 4140 normalizado, com densidade 7850 kg/m^3 , módulo de elasticidade 205 GPa e coeficiente de Poisson $0,29$. Este material é comumente utilizado para compor a armadura de tração dos dutos flexíveis. O escopo deste trabalho engloba somente o comportamento do material na região linear elástica.

As estruturas tubulares são modeladas com elementos de viga do tipo B31, sendo “B” referente a viga (do inglês *beam*), “3” para tridimensional e “1” para interpolação do tipo linear. Esse elemento apresenta, portanto, dois nós com 6 graus de liberdade por nó (3 deslocamentos lineares e 3 rotações).

A estrutura é discretizada com quatro elementos por aresta de cada célula. O número de nós e elementos totais gerados para cada estrutura encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Detalhes da malha gerada para as diferentes estruturas

	Triangular	Quadrada	Hexagonal $\theta = 20^\circ$	Hexagonal $\theta = 30^\circ$	Hexagonal $\theta = 40^\circ$	Auxética $\theta = -10^\circ$	Auxética $\theta = -20^\circ$
Número de nós	6320	3968	10256	9040	7824	15952	19600
Número de elementos	7120	4400	10800	9520	8240	16800	20640

3.2 Condições de contorno e esforços aplicados

Para simular as condições em que os dutos flexíveis se encontram durante o transporte dos produtos da extração petrolífera e possibilitar a obtenção dos resultados desejados, são aplicadas as mesmas condições de contorno para todas as estruturas. Na base dos cilindros impõem-se restrições nos movimentos de translação ($u_x = u_y = u_z = 0$), deixando-se livre os movimentos de rotação. Já para a outra extremidade, onde as cargas de compressão em z são aplicadas, considera-se que não há translação nos eixos x e y ($u_x = u_y = 0$) e que existem somente movimentos de translação em z e rotação nos três eixos.

Para cada análise de esforço mecânico, são aplicadas as seguintes cargas:

- a) Análise estática linear (Figura 3.3): impõe-se uma carga distribuída ao longo da circunferência superior dos cilindros onde a extremidade é livre em u_z , de $F_z = -100$ N/mm.
- b) Flambagem linear (Figura 3.3): aplica-se o mesmo tipo de carregamento da análise estática linear (a), porém com uma magnitude de $F_z = -1$ N/mm. Na flambagem linear, é utilizado o método *Lanczos* para a solução do problema de autovalores e autovetores.

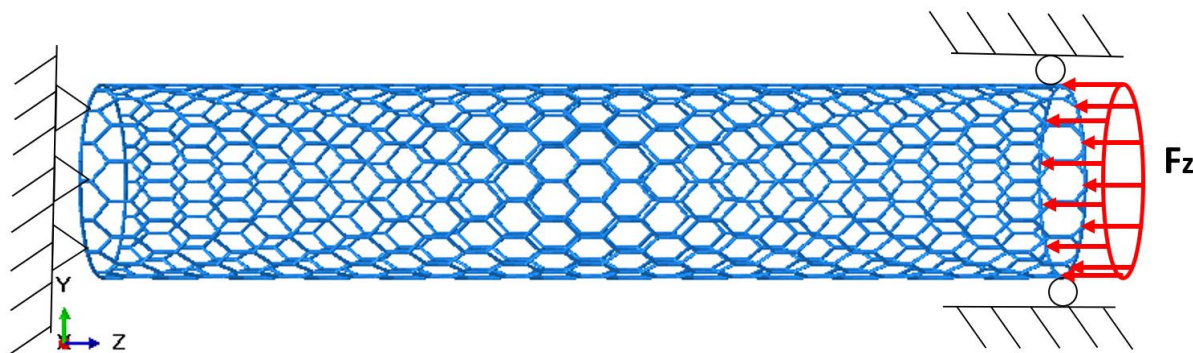


Figura 3.3 Carregamento e condições de contorno para análise estática linear e flambagem linear

- c) Pressão interna (Figura 3.4): para avaliar os efeitos mecânicos decorrentes da pressão interna, aplicam-se forças concentradas radiais em cada nó gerado pela malha equivalente a uma carga de 40 bar de pressão.

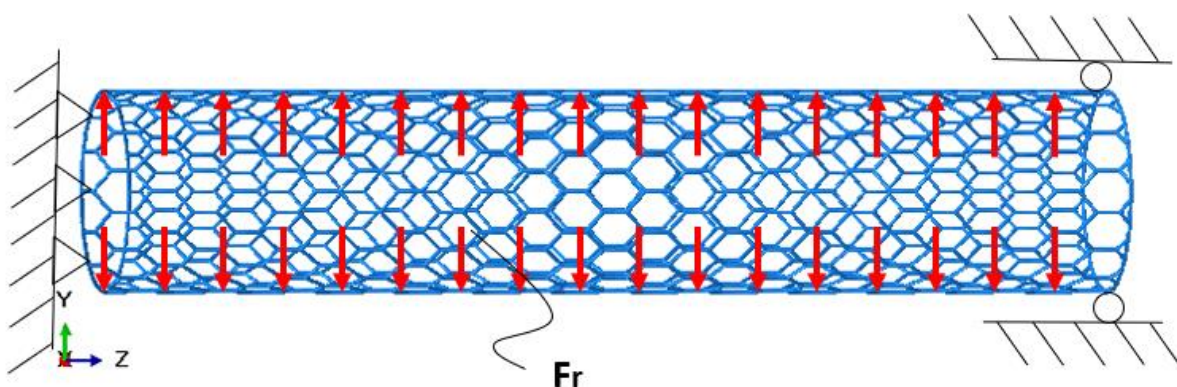


Figura 3.4 Carregamento e condições de contorno para a análise de pressão interna

- d) Análise combinada - linear estática com condição de pressão interna (Figura 3.5): consideram-se que as estruturas estejam sujeitas a uma pré-carga referente à pressão interna de 40 bar. Posteriormente, é aplicada uma força distribuída compressiva de $F_z = -100 \text{ N/mm}$ ao longo da circunferência na extremidade superior cilindros.
- e) Análise combinada - flambagem linear com condição de pressão interna (Figura 3.5): os reforços são submetidos à condição inicial de pressão

interna equivalente a 40 bar. Em seguida, é realizada a análise de flambagem linear aplicando-se uma carga distribuída de $F_z = -1$ N/mm.

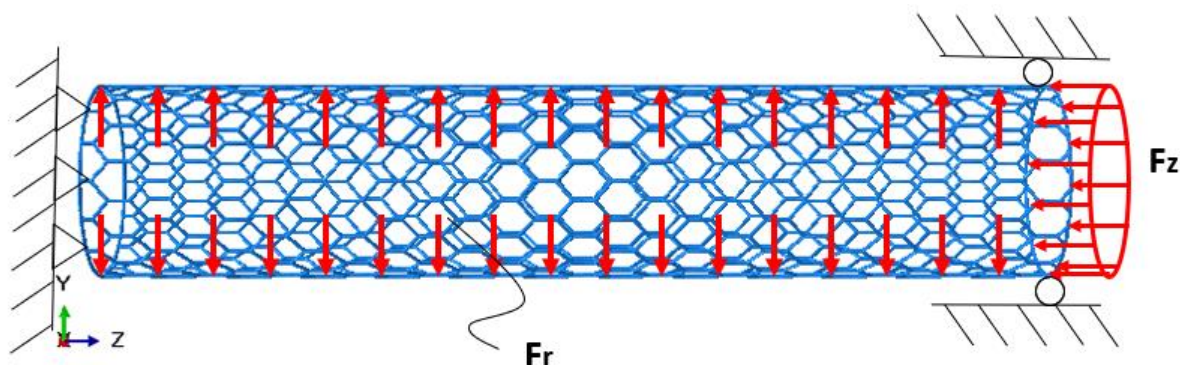


Figura 3.5 Carregamento e condições de contorno para a análise combinada (compressão + pressão)

3.3 Obtenção dos resultados

Ao objetivo deste estudo, interessam os resultados de deslocamento na direção axial e radial, a tensão máxima nos filamentos e o autovalor λ para flambagem linear.

O deslocamento axial é extraído da extremidade do cilindro que possui movimento livre em z , ou seja, onde ocorre o deslocamento máximo longitudinal da estrutura.

Já os resultados de tensão máxima e deformação radial são extraídos na porção média do cilindro ($L/2$). Devido às condições de contorno e localização das forças empregadas, os esforços mecânicos podem gerar distorções excessivas nas extremidades das estruturas. Estas distorções não são relevantes para o escopo deste trabalho pois os dutos flexíveis, em seu contexto de aplicação, assumem comprimentos maiores do que o estudado. Sendo assim, o comprimento $L = 1$ m adotado neste trabalho é apenas representativo. A tensão utilizada para a obtenção dos resultados é a de von Mises, à qual representa a tensão trativa equivalente para materiais dúcteis.

Após a execução da simulação numérica de flambagem linear obtém-se o menor autovalor λ , extraído do primeiro modo de flambagem. O menor autovalor está associado à carga crítica necessária para ocorrer a flambagem da estrutura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através das simulações numéricas encontram-se sumarizados na Tabela 4.1. u_z refere-se ao deslocamento da estrutura na direção axial, u_r ao deslocamento na direção radial (aumento da seção transversal do cilindro), $\sigma_{\text{máx}}$ é a tensão máxima encontrada na porção média do cilindro. λ é o autovalor que representa a carga crítica para a ocorrência da flambagem linear.

Figuras ilustrando o primeiro modo de flambagem linear de cada estrutura, sob cargas únicas (compressão) e combinadas (compressão + pressão), encontram-se no Apêndice B.

Verifica-se que o cilindro constituído por células triangulares é o mais pesado após as estruturas auxéticas. Assim como observado por Gibson e Ashby (1997), a estrutura triangular também é caracterizada como a mais rígida, pois apresenta o menor valor para deslocamento axial quando aplicada uma carga de compressão. Além disso, a estrutura apresenta baixo valor de deslocamento na direção radial. O esforço exigido para que ocorra falha por flambagem também é o maior, pois possui o maior autovalor λ , fazendo com que a estrutura triangular seja a mais estável. Essa força crítica obtida por λ para geometria triangular praticamente não muda quando o cilindro está pré-condicionado a uma pressão interna. Assim, mesmo com a combinação de pressão interna e compressão até a flambagem, o autovalor continua sendo o mais alto dentre as estruturas. Na presença de esforços causados somente pela pressão interna, as arestas transversais dos triângulos causam a contração da estrutura no sentido axial (Figura 4.1).

Observa-se que para toda as estruturas, u_z e u_r da análise combinada é aproximadamente igual à soma dos deslocamentos das análises isoladas de pressão e de compressão estática linear.

Tabela 4.1 Resultados das análises numéricas

		Triangular	Quadrada	Hexagonal $\theta = 20^\circ$	Hexagonal $\theta = 30^\circ$	Hexagonal $\theta = 40^\circ$	Auxética $\theta = -10^\circ$	Auxética θ $= -20^\circ$	
Massa [kg]		11,418	7,669	7,826	7,278	6,839	11,817	14,916	
Estática linear	u_z [mm]	-0,55	-0,75	-4,40	-4,07	-3,81	-6,74	-8,53	
	u_r [mm]	0,02	4,92E-14	0,21	0,35	0,57	-0,10	-0,20	
	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	65,30	138,85	142,13	144,04	144,13	140,5	140,88	
Flambagem	λ [-]	3706,2	558,7	1071,0	1047,0	986,7	834,2	674,0	
	Pressão interna		u_z [mm]	-0,65	-2,56E-04	-7,83	-13,08	-20,52	3,68
		u_r [mm]	0,30	0,31	0,67	1,65	4,03	0,20	0,34
		$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	308,31	544,84	467,08	561,50	670,45	269,57	206,20
Pressão + Est. Linear	u_z [mm]	-1,19	-0,75	-12,22	-17,14	-24,33	-3,07	-0,62	
	u_r [mm]	0,31	0,31	0,89	2,01	4,52	0,11	0,14	
	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	355,01	544,84	476,61	568,16	671,13	297,33	248,17	
Pressão + Flamb.	λ [-]	3704,7	613,9	1340,9	1350,9	1159,8	913,9	753,2	

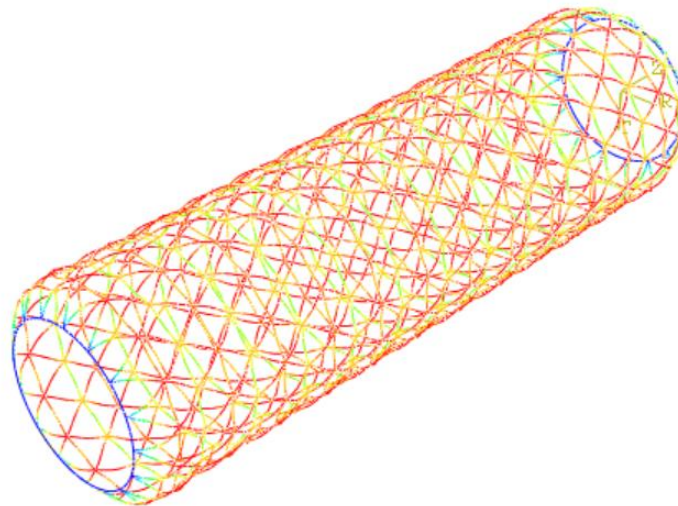


Figura 4.1 Deslocamento radial para estrutura triangular submetida a pressão interna

O reforço com células quadradas é a segunda estrutura mais rígida, com baixos deslocamentos em u_z . Nota-se que quando comprimida na direção axial, a

estrutura quadrada possui a particularidade de apresentar deslocamento praticamente nulo na direção radial. Consequentemente, nas arestas circunferenciais as tensões normais geradas pelos efeitos isolados de compressão são aproximadamente zero. A representação das tensões de von Mises geradas na análise estática se encontra na Figura 4.2, onde as regiões em azul indicam tensão aproximadamente nula e em vermelho, a tensão máxima ($\sigma_{\text{máx}} = 138,85 \text{ MPa}$). Nota-se que há um aumento das tensões somente nas arestas longitudinais ao cilindro, ou seja, as localizadas na direção z (linhas vermelhas).

Porém, quando submetidas a pressão interna, percebe-se que o deslocamento axial é desprezível. Sendo assim, na análise combinada de pressão interna com esforço estático linear, somente os efeitos da compressão influenciam em u_z . Com esta mesma combinação de esforços, porém, há um deslocamento na direção radial causado pelos efeitos da pressão interna. A pressão interna também ajuda a melhorar a capacidade de estabilidade do cilindro. Apesar disso, a estrutura quadrada é a mais instável dentre as outras geometrias analisadas, possuindo o menor valor de λ tanto para compressão, de forma isolada, quanto para compressão combinada por uma pressão interna.

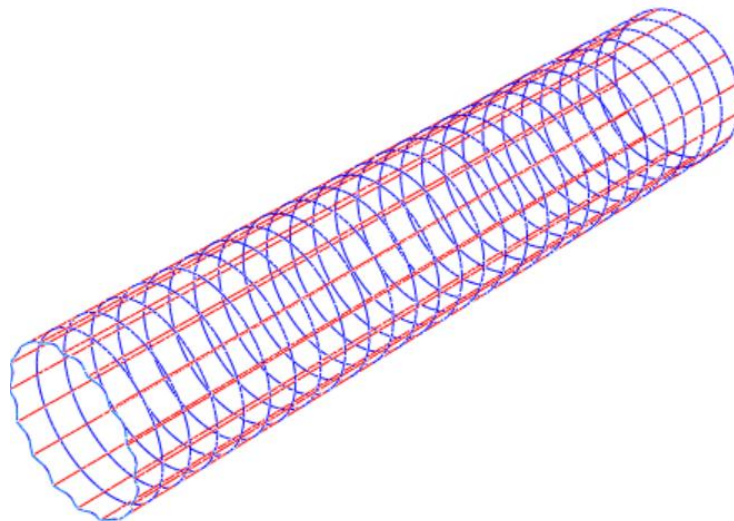


Figura 4.2 Tensão na estrutura quadrada sob compressão

Para os cilindros que possuem células hexagonais, quanto maior o valor do ângulo θ , menor é a massa da estrutura. Quando os cilindros estão sujeitos a cargas compressivas, células com maiores valores de θ causam menores deslocamentos

na direção axial, porém, maiores deslocamentos na direção radial. Ao aplicar somente esforços de pressão interna, as estruturas hexagonais são as que apresentam maiores deslocamentos na direção radial, gerando conseqüentemente maiores tensões nos filamentos e maior contração no sentido longitudinal. O carregamento combinado (compressão e pressão interna) influi diretamente no aumento da seção transversal e no aumento do deslocamento axial no sentido negativo.

O aumento de θ faz com que a carga crítica necessária para flambar a estrutura de forma linear (sem a presença da pressão interna) diminua. Isso faz com que as células hexagonais de 40° suportem um menor esforço compressivo que as hexagonais de 20° . Os autovalores λ para estruturas hexagonais apresentam aproximadamente o dobro do valor da estrutura quadrada. Assim como nas estruturas quadradas, percebe-se que na presença de esforços combinados de pressão interna e flambagem, a pressão auxilia na estabilidade das estruturas hexagonais, aumentando λ . Observando as Figuras (f), (h) e (j) do Apêndice B para flambagem combinada de células de $\theta = 20^\circ$, 30° e 40° , respectivamente, observa-se que θ influencia no formato que a estrutura assumirá quando atingir a força crítica de flambagem. Sendo $\theta = 30^\circ$ e $\theta = 40^\circ$ assumindo formas similares de instabilidade, porém, diferindo da estrutura com célula hexagonal $\theta = 20^\circ$. Esta diferença reflete nos resultados de autovalores para as cargas combinadas.

Em suma, dentre todas as estruturas, a hexagonal com $\theta = 40^\circ$ é a mais leve e a que apresenta maior deslocamento radial para esforço estático linear, para pressão interna e para os esforços combinados. Isso causa uma maior tensão nos filamentos que constituem as arestas celulares.

Os cilindros formados por células auxéticas do tipo hexagonais reentrantes são os que possuem maior massa dentre as analisadas neste trabalho. Entretanto, são as estruturas menos rígidas na direção axial, pois apresentam os maiores valores de deslocamento em z para uma carga compressiva. Os valores correspondem a aproximadamente o dobro do deslocamento observado nas células hexagonais. Assim como esperado, para esforços isolados de compressão as células auxéticas respondem com uma diminuição da seção transversal do cilindro (Figura 4.3). Ou

seja, os deslocamentos radiais possuem valores negativos, sendo que células com $\theta = -20^\circ$ apresentam o dobro do valor u_r em comparação com células com $\theta = -10^\circ$.

As células auxéticas necessitam de baixas magnitudes de força para a ocorrência de flambagem linear, sendo a célula com $\theta = -20^\circ$ a mais instável. A pressão auxilia na resistência à flambagem das estruturas, porém, estas continuam assumindo autovalores menores que as constituídas por células hexagonais e triangular. Em contrapartida, Karnesis e Burriesci (2013) e Scarpa et al (2007) afirmam que cilindros formados por células auxéticas reentrantes resultam nas maiores resistências à flambagem linear. Porém, os mesmos atestam que o comportamento das células auxéticas reentrantes é extremamente sensível ao número de células na região circunferencial N_c . Quanto maior é N_c , menor é a estabilidade estrutural. O número máximo de células estudado pelos autores é de $N_c = 12$. Entretanto, o número de células utilizado pelo presente trabalho é de $N_c = 16$. É possível que esse aumento em N_c cause uma diminuição da carga crítica de flambagem ao ponto de estruturas cilíndricas compostas por células hexagonais com mesma quantidade de N_c se tornem mais vantajosas e estáveis que células auxéticas.

Quando sofrem esforços isolados por pressão interna, as células auxéticas reentrantes apresentam baixos valores de deslocamento radial e geram menores tensões. Singularmente, por apresentarem coeficiente de Poisson negativo, a pressão interna faz com que a estrutura auxética tenda a se expandir longitudinalmente. Portanto, quando há uma conciliação dos esforços de compressão estática e de pressão interna, o deslocamento u_z e u_r é resultado dos movimentos contrapostos de compressão e expansão gerados por esses esforços. Este deslocamento resultante pode ser na direção positiva ou negativa em z e r , dependendo da magnitude da força compressiva e da pressão no cilindro.

Para o caso das forças aplicadas nas análises, o esforço expansivo radial causado pela pressão interna prevalece perante a diminuição da seção transversal gerada pelas forças compressivas na estrutura. Portanto, no esforço combinado para as células auxéticas de $\theta = -20^\circ$ e $\theta = -10^\circ$, u_r aumenta. Já para o deslocamento axial u_z , os efeitos causados pela compressão surtem maiores proporções do que os efeitos expansivos da pressão interna.

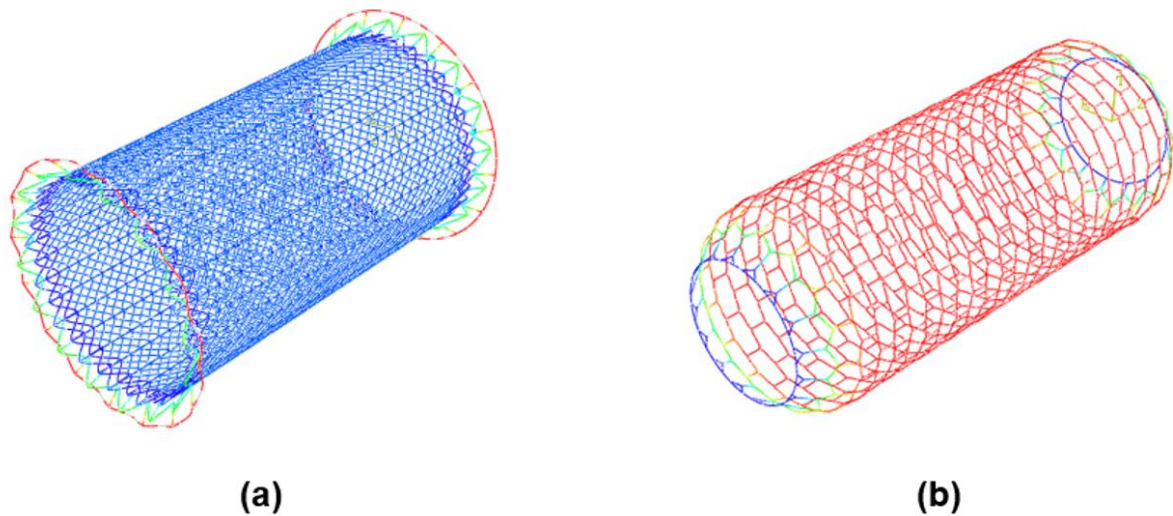


Figura 4.3 Deslocamento radial com aplicação de esforço compressivo (a) auxética $\theta = -20^\circ$ (b) hexagonal $\theta = 40^\circ$

Dividindo os resultados da Tabela 4.1 pela massa de cada estrutura, obtêm-se os resultados específicos, apresentados na Tabela 4.2. $u_{z,esp}$ representa o deslocamento axial do cilindro por unidade de massa, $u_{r,esp}$ o deslocamento radial por unidade de massa, $\sigma_{m\acute{a}x,esp}$ a tensão máxima de von Mises pela massa da estrutura e λ_{esp} o autovalor por unidade de massa, associado à flambagem linear.

Sob a perspectiva das relações específicas, é possível identificar que a estrutura triangular continua possuindo a maior rigidez axial por unidade de massa, apresentando o menor valor de deslocamento em z para esforços compressivos. A estrutura triangular também tem o maior autovalor específico para casos de ocorrência de falhas por flambagem. Seguidamente, a estrutura quadrada também apresenta alta rigidez específica na direção longitudinal.

O deslocamento axial por unidade de massa para as células hexagonais e auxéticas reentrantes é aproximadamente igual. Porém, quando comprimidas, as células auxéticas apresentam tensões máximas por unidade de massa menores que as quadradas e as hexagonais.

Tabela 4.2 Resultados específicos (por unidade de massa) das análises numéricas

		Triangular	Quadrada	Hexagonal $\theta = 20^\circ$	Hexagonal $\theta = 30^\circ$	Hexagonal $\theta = 40^\circ$	Auxética $\theta = -10^\circ$	Auxética θ $= -20^\circ$
Massa [kg]		11,418	7,669	7,826	7,278	6,839	11,817	14,916
Estática linear	$U_{z,esp}$ [mm/kg]	-0,048	-0,098	-0,562	-0,559	-0,557	-0,570	-0,572
	$U_{r,esp}$ [mm/kg]	0,002	6,42E-15	0,027	0,048	0,083	-0,008	-0,013
	$\sigma_{máx,esp}$ [MPa/kg]	5,719	18,105	18,161	19,791	21,075	11,890	9,445
Flam- bagem	λ_{esp} [-/kg]	324,593	72,770	136,852	143,858	144,183	70,593	45,186
Pressão interna	$U_{z,esp}$ [mm/kg]	-0,057	-3,34E-05	-1,001	-1,797	-3,000	0,311	0,53
	$U_{r,esp}$ [mm/kg]	0,026	0,040	0,086	0,227	0,589	0,017	0,023
	$\sigma_{máx,esp}$ [MPa/kg]	27,002	71,044	59,683	77,15	98,033	22,812	13,824
Pressão + Est. Linear	$U_{z,esp}$ [mm/kg]	-0,104	-0,098	-1,561	-2,355	-3,558	-0,26	-0,042
	$U_{r,esp}$ [mm/kg]	0,027	0,040	0,114	0,276	0,661	0,009	0,009
	$\sigma_{máx,esp}$ [Mpa/kg]	31,092	71,044	60,901	78,065	98,133	25,161	16,638
Pressão + Flamb.	λ_{esp} [-/kg]	324,461	79,944	171,339	185,614	169,586	77,337	50,494

Estruturas compostas por células hexagonais resultam nos maiores valores específicos de deslocamento radial e conseguem suportar maiores cargas até que falhem por flambagem. A pressão interna combinada com carregamentos compressivos também fazem com que as estruturas hexagonais possuam maiores deslocamentos axiais e radiais, sendo portanto as mais flexíveis.

As células auxéticas apresentam baixos deslocamentos radiais tanto para compressão isolada quanto para cargas combinadas (pressão e compressão). O autovalor específico é maior para $\theta = -10^\circ$. São as estruturas que apresentam, por unidade de massa, a menor carga crítica de flambagem.

5 CONCLUSÕES

Através de modelos numéricos construídos no *software* comercial ABAQUS é possível verificar que os tipos de células constituintes dos reforços metálicos mudam as propriedades mecânicas da estrutura, utilizando-se o mesmo material base.

Algumas das características do comportamento mecânico das células no plano abordadas por Gibson e Ashby (1997) também são reproduzidas nas estruturas cilíndricas celulares. Observa-se que células triangulares apresentam elevado peso e são caracterizadas por alta rigidez axial e radial. Porém, são extremamente estáveis, falhando por flambagem linear somente na presença de altas cargas em comparação com as outras estruturas.

As células quadradas, apesar de não apresentarem deslocamento radial quando sofrem compressão axial, apresentam baixa resistência à flambagem.

As estruturas compostas por células hexagonais são caracterizadas como as estruturas mais leves e as mais flexíveis em sua seção transversal, em especial a hexagonal com $\theta = 40^\circ$. Porém, tal flexibilidade acarreta em altos valores de tensão nos filamentos que constituem as paredes celulares.

Para os parâmetros geométricos estabelecidos neste trabalho, as estruturas auxéticas apresentam maiores densidades celulares, causando aumento na massa. Quando comprimidas, as células auxéticas apresentam o maior deslocamento na direção axial dentre as estruturas analisadas. Porém, quando sujeitas somente a pressão interna, a tendência é de expansão na direção z. Logo, quando as cargas de compressão e de pressão interna são combinadas, deslocamentos em direções opostas são gerados. Por isso, é possível obter como resultado final tanto deslocamentos positivos quanto negativos, dependendo da magnitude do esforço aplicado. Os parâmetros geométricos utilizados neste trabalho resultam na estrutura auxética como sendo a mais instável, em contraposição aos estudos de Karnesis e Burriesci (2013) e Scarpa et al (2007). Porém, os autores utilizam parâmetros diferentes, principalmente em relação ao número de células na região circunferencial, afetando substancialmente na estabilidade dos cilindros.

Lo et. al (1951) explicam que a carga crítica para ocorrer flambagem linear em cascas cilíndricas é aumentada quando se têm a influência da pressão interna. Tal comportamento também é verificado para as estruturas cilíndricas através do aumento do autovetor λ em cargas combinadas (flambagem linear com pressão interna). A única exceção ocorre em estrutura com células triangulares, onde λ não apresenta mudanças significativas quanto à presença da pressão interna.

Com base nos comportamentos mecânicos resultantes deste trabalho, faz-se necessário ponderar cada propriedade e realizar a escolha do tipo de estrutura celular de acordo com a necessidade da aplicação dos dutos flexíveis.

Para trabalhos futuros recomenda-se que sejam realizadas análises numéricas de flambagem não-linear nas estruturas para se obter resultados mais realistas. Isso porque imperfeições podem ocorrer, por exemplo, no processo de fabricação ou pela presença de tensões residuais.

Também é relevante realizar uma análise numérica comparando a capacidade de flambagem linear para variados números de células de diferentes geometrias na direção circunferencial.

É importante observar que os conhecimentos desenvolvidos ao longo deste trabalho abordando o estudo de reforços tubulares celulares possuem uma gama de aplicação ampla, que podem ir além da utilização na indústria petrolífera.

REFERÊNCIAS

AJDARI, A.; NAYEB-HASHEMI, H.; VAZIRI, A. **Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures.** International Journal of Solids and Structures, v. 48, p. 506–516, 2011.

ANDERSON, T. A.; VERMILYEA, M. E.; JHA, V.; DODDS, N.; FINCH, D.; LATTO, J. R. **Qualification of flexible fiber-reinforced pipe for 10,000-foot water depths.** Offshore Technology Conference. Houston, 2013.

AZONANO. **Carbon nanotubes for energy storage applications.** 2016. Disponível em: <<https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=4298>> Acesso em: 20 de junho de 2018.

COOK, R. **Finite element modeling for stress analysis.** John Wiley & Sons. Nova York, 1995.

CRAVEIRO, M. V.; NETO, A. G. **Buckling of pipelines due to internal pressure.** XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Brasília, 2016.

DEMASI, M. **Inside the stent: investigating the boom in cardiac surgery.** Disponível em: <<https://www.michaelwest.com.au/inside-the-stent-investigating-the-boom-in-cardiac-surgery>> Acesso em: 15 de outubro de 2018.

GE OIL AND GAS. **Driving cost efficiency in deeper water: Next-generation flexible pipe.** Disponível em: <<https://www.geoilandgas.com/sites/geog/files/ge-next-generation-flexible-pipe-brochure.pdf>> Acesso em: 20 de junho de 2018.

GIBSON L. J.; ASHBY F. **Cellular solids: structure and properties.** 2ª edição. Cambridge University Press. Cambridge, 1997.

HUISMAN EQUIPMENTS. **Reel drive systems.** Disponível em: <https://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/pipelay_components/reel_driv_systems>. Acesso em: 20 de novembro de 2018.

JOPEK, H. **Finite element analysis of tunable composite tubes reinforced with auxetic structures.** Materials, v. 10, n^o. 1359, 2017.

JU, J.; SUMMERS, J. D.; ZIEGERT, J.; FADEL, G. **Shear compliant hexagonal meso-structures having both high shear strength and high shear strain.** ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Montreal, 2010.

JU, J.; SUMMERS, J. D.; ZIEGERT, J.; FADEL, G. **Design of honeycomb meta-materials for high shear flexure.** ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. San Diego, 2009.

KARNESSIS, N.; BURRIESCI, G. **Uniaxial and buckling mechanical response of auxetic cellular tubes**. *Smart Materials and Structures*, v. 22, nº 084008. Londres, 2013.

LEISSA, A. W. **Buckling of composite plates**. *Composite Structures*, v. 1, p. 51-66, 1983.

LO, H.; CRATE, H.; SCHWARTZ, E. B. **Buckling of thin-walled cylinder under axial compression and internal pressure**. Washington, 1951.

MASTERS, I. G.; EVANS, K. E. **Models for the elastic deformation of honeycombs**. *Composite Structures*, v. 35, p. 403-422. 1996.

OLIVEIRA, L. F. R.; SANTOS, A. S. F.; COSTA, M. C. B. **Utilização de nanocompósitos poliméricos para revestimento de dutos de aço na indústria de petróleo**. 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, 2011.

SCARPA, F.; BURRIESCI, G.; SMITH, F. C.; CHAMBERS, B. **Mechanical and electromagnetic behaviour of auxetic honeycomb structures**. *The Aeronautical Journal*, nº 107, p. 175–183, 2003.

SCARPA, F.; SMITH, C. W.; RUZZENE, M.; WADEE, M. K. **Mechanical properties of auxetic tubular truss-like structures**. *physica status solidi (b)*, v. 245, nº 3, p. 584-590, 2007.

SCHULTZ, J.; GRIESE, D.; JU, J.; SHANKAR, Pr.; SUMMERS, J. D.; THOMPSON, L. **Design of honeycomb mesostructures for crushing energy absorption**. *Journal of Mechanical Design*, v. 134, nº 71004, 2012.

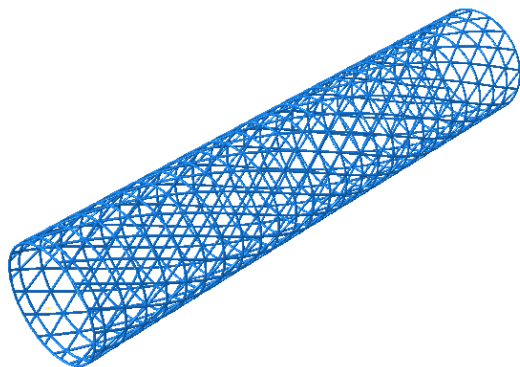
SOUSA, S. M. de; FILHO, A. C. de P.; DUTRA, M. S. **Um estudo sobre materiais compósitos e sua aplicação na produção de dutos para perfuração de petróleo**. V Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação. Belo Horizonte, 2009.

SUN, Y.; PUGNO, N. **Hierarchical fibers with a negative poisson's ratio for tougher composites**. *Materials*, v. 6, p. 699-712, 2013.

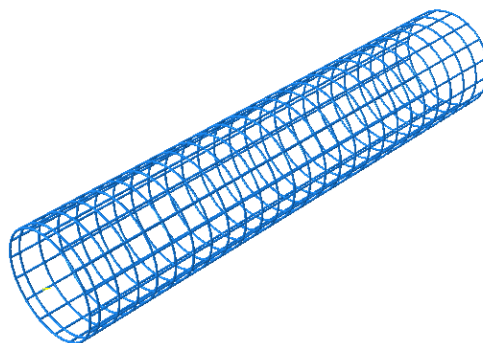
TOUÇA, J. M. R.; BASTIAN, F. L. **Fatura de materiais compósitos utilizados no reparo de dutos**. *Petro & Química*, Ano XXVII, nº 253, p. 99-102, 2003.

VOLDER, M. de; TAWFICK, S.; BAUGHMAN, R. H.; HART, A. J. **Carbon nanotubes: present and future commercial applications**. *Science*, v. 339, nº 535, p.535-539, 2013. DOI: 10.1126/science.1222453.

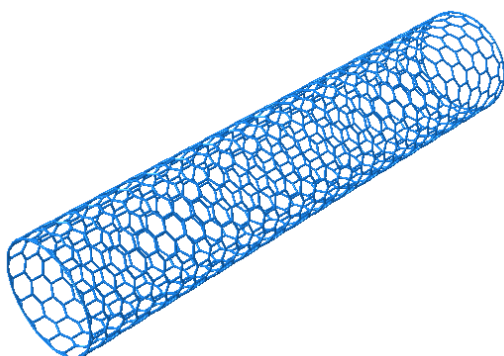
APÊNDICE A – MODELO DAS ESTRUTURAS CILÍNDRICAS



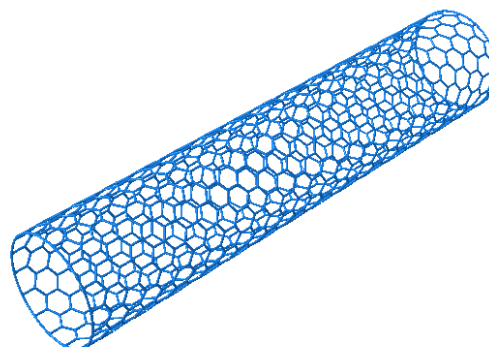
(a) Triangular



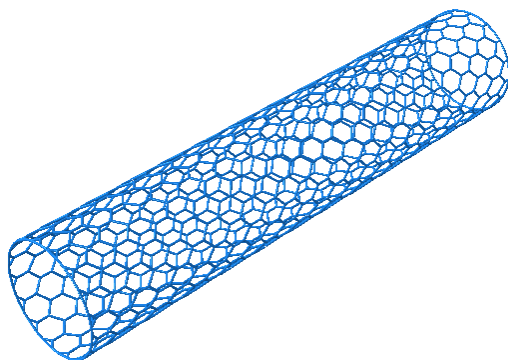
(b) Quadrada



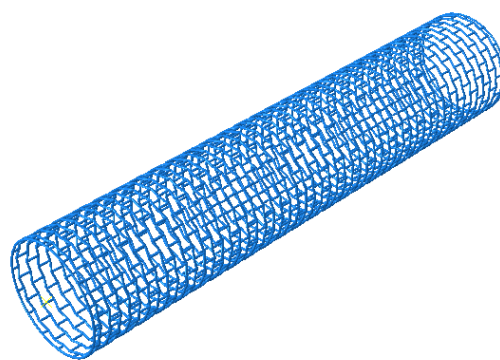
(c) Hexagonal $\theta = 20^\circ$



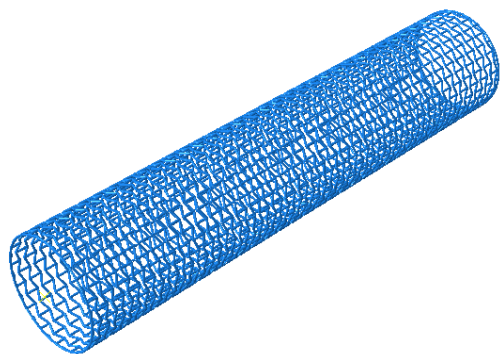
(c) Hexagonal regular $\theta = 30^\circ$



(d) Hexagonal $\theta = 40^\circ$



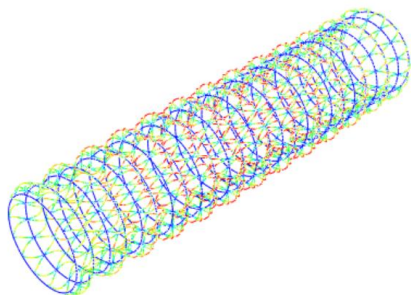
(e) Auxética $\theta = -10^\circ$



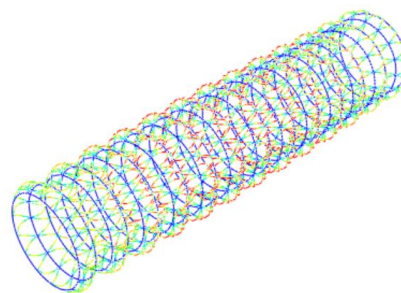
(f) Auxética $\theta = -20^\circ$

APÊNDICE B – MODELO DAS ESTRUTURAS CILÍNDRICAS QUANDO SUBMETIDAS A FLAMBAGEM LINEAR

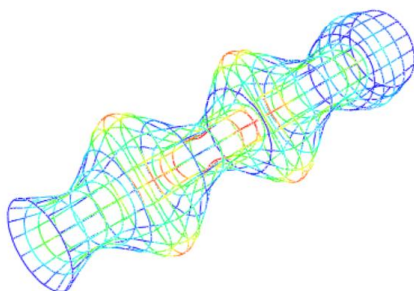
As cores representam os deslocamentos das estruturas.



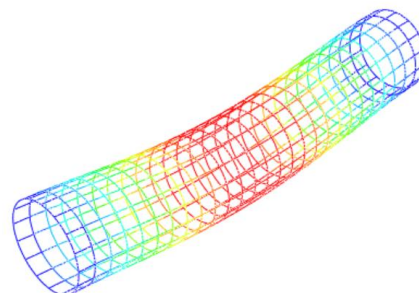
(a) Triangular:
flambagem (carga axial)



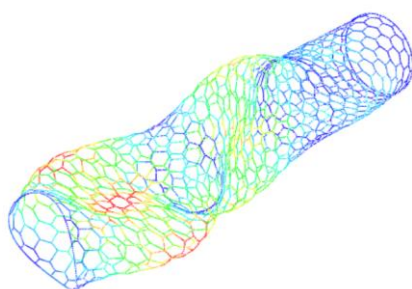
(b) Triangular:
flambagem (carga axial + pressão)



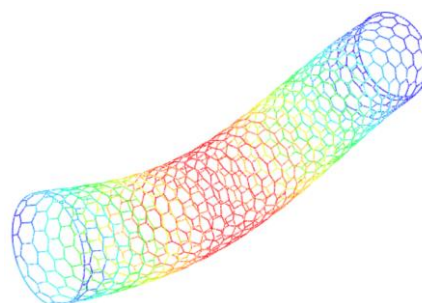
(c) Quadrada:
flambagem (carga axial)



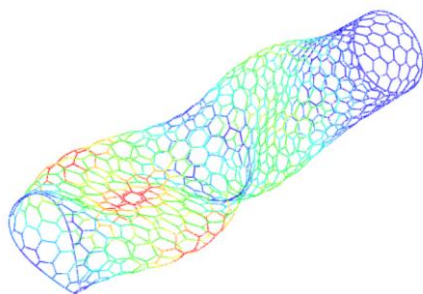
(d) Quadrada:
flambagem (carga axial + pressão)



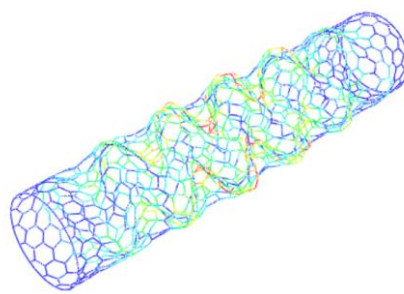
(e) Hexagonal $\theta = 20^\circ$:
flambagem (carga axial)



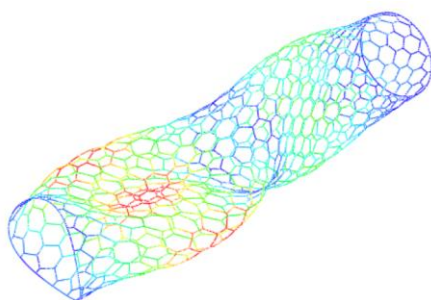
(f) Hexagonal $\theta = 20^\circ$:
flambagem (carga axial + pressão)



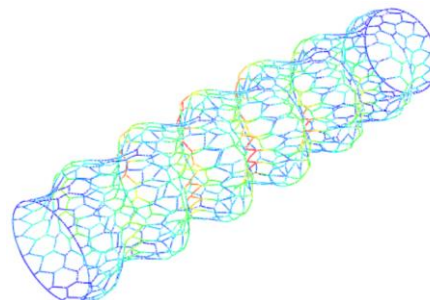
**(g) Hexagonal regular $\theta = 30^\circ$:
flambagem (carga axial)**



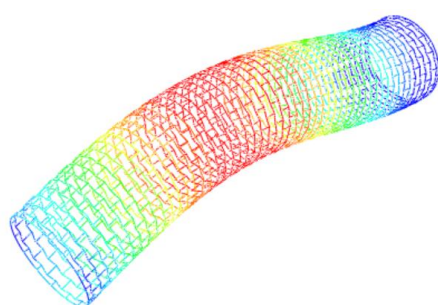
**(h) Hexagonal regular $\theta = 30^\circ$:
flambagem (carga axial + pressão)**



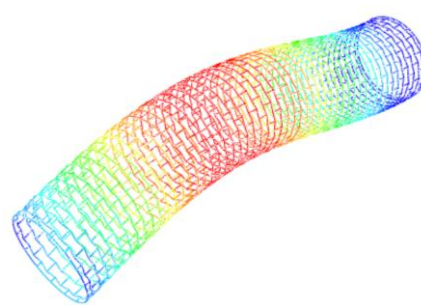
**(i) Hexagonal $\theta = 40^\circ$:
flambagem (carga axial)**



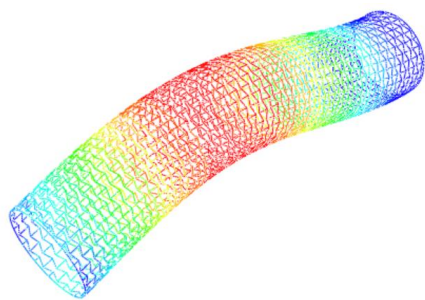
**(j) Hexagonal $\theta = 40^\circ$:
flambagem (carga axial + pressão)**



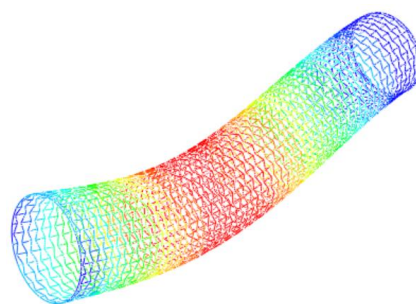
**(l) Auxética $\theta = -10^\circ$:
flambagem (carga axial)**



**(m) Auxética $\theta = -10^\circ$:
flambagem (carga axial + pressão)**



(n) Auxética $\theta = -20^\circ$:
flambagem (carga axial)



(o) Auxética $\theta = -20^\circ$:
flambagem (carga axial + pressão)