

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CLAUDINE MOLL

EDUARDO FRESSATO HOHMANN

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE  
ESTRUTURAS CELULARES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(TCC2)

CURITIBA

2019

CLAUDINE MOLL

EDUARDO FRESSATO HOHMANN

## **AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE ESTRUTURAS CELULARES**

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. Marco Antônio Luersen, Dr. Eng.

CURITIBA

2019

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Avaliação Numérica de Propriedades Elásticas de Estruturas Celulares”, realizada pelos alunos Claudine Moll e Eduardo Fressato Hohmann, 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. Marco Antônio Luersen, Dr. Eng.  
DAMEC, UTFPR  
Orientador

Prof. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira, Dra. Eng.  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Prof. Tiago Cousseau, Dr. Eng.  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 05 de Dezembro de 2019.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a todos os professores, que contribuíram para nossa formação acadêmica com conhecimentos necessário para a realização do presente estudo, em especial ao caro professor Marco Antônio Luersen, orientador do projeto. Agradecemos também pelo apoio de nossas famílias e amigos que estiveram presentes nessa jornada.

## **RESUMO**

Moll, Claudine; Hohmann, Eduardo. Avaliação Numérica de propriedades elásticas de estruturas celulares. 61 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Desde o princípio dos processos industriais e da manufatura de produtos em série se procurou conferir melhores propriedades aos materiais ou componentes. Com frequência essas propriedades eram obtidas por meio da seleção, mistura ou transformação dos materiais. Seleccionava-se, por exemplo, uma liga de aço tratada termicamente, a fim de atingir os requerimentos necessários. O projeto estrutural era considerado apenas na visão macro, ou seja, focado para atender o formato geométrico do produto e a sua devida função. Com a crescente demanda por estruturas mais leves e resistentes, passou-se a considerar os efeitos da disposição numa visão micro do projeto estrutural de peças e materiais. Surgiu, assim, uma tendência para a utilização de estruturas celulares. Esse tipo de estrutura se caracteriza pela repetição de formas geométricas em torno de núcleos vazios. Isto é, as arestas desta forma geométrica escolhida são os elementos que realmente compõem o material. Isso possibilita não só a economia do material, mas a redução da massa total do produto final, tornando mais leve. Tais estruturas apresentam diversas vantagens quanto às propriedades elásticas e vêm sendo desenvolvidas e aplicadas em diversos setores da indústria, tais como o automotivo, aeronáutico e aeroespacial. Porém, o conhecimento das propriedades desses tipos de estrutura ainda é superficial e não se encontra devidamente documentado. Portanto, o estudo e as possíveis aplicações dos diversos tipos e variações de estruturas celulares tem se mostrado um assunto de grande interesse no cenário industrial e econômico atual. Em função disso, utilizando-se técnicas computacionais, como o método de elementos finitos em conjunto com a ferramenta Abaqus e o método de planejamento de experimentos (*Design of Experiments*), a proposta do presente trabalho é realizar uma avaliação comparativa dos módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson da estrutura celular hexagonal, em função da variação dos parâmetros geométricos de ângulo de célula, tamanho de célula e densidade volumétrica. O escopo do trabalho compreende a averiguação, por meio dos resultados de diversas simulações, da influência, se existente, desses parâmetros nas propriedades mencionadas. Com isso, buscou-se estabelecer uma base teórica suficiente para definir a escolha propícia de geometria desse tipo de estrutura celular (*honeycomb*) para cada finalidade ou requerimento de projeto desejados. O presente estudo confirmou a grande influência do ângulo de célula no coeficiente de Poisson e da densidade volumétrica no módulo de Young, porém não foi possível gerar equações mais precisas para a estimação destas propriedades.

**Palavras-chave:** Materiais celulares; estrutura honeycomb; propriedades mecânicas; elementos finitos.

**ABSTRACT**

Moll, Claudine; Hohmann, Eduardo. Numerical evaluation of elastic properties in cell structures. 61 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Department of Mechanical, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Since the beginning of industrial processes and techniques of mass production, it has been desired to give the best properties to the materials and components made. Frequently, these properties were obtained by selection, mixture or transformation of materials. Could be selected, for example, a heat-treated steel alloy, in order to meet the necessary requirements. The structural design was considered only in a macro view, focused on meeting the geometric shape of the product and its proper function. With a growing demand for lighter and more resistant structures, the industry began to consider the effects of arrangement in a micro view of the structural design of parts and materials. Thus, a tendency emerged for the use of cellular structures. This type of structure is characterized by the repetition of geometric shapes around empty cores. That is, the edges of this chosen geometric shape are the elements that actually make up the material. This makes it possible not only to save material, but to reduce the total mass of the final product, making it lighter. Such structures have several advantages when it comes to elastic properties and are being used and applied in various industry sectors, such as automotive, aeronautics and aerospace. However, knowledge of the properties of these types of structures is still superficial and not properly documented. Therefore, the study and possible applications of various types and setups of cellular structures are shown as a subject of great interest in the current industrial and economic scenario. Because of this, using computational techniques, such as the finite element method in conjunction with the Abaqus tool and the design of experiments technique (DOE), the proposition of the present study is to perform a comparative evaluation of the Young modulus and Poisson coefficient of the hexagonal cellular structure (also known as honeycomb), as a function of the variation of geometric parameters of cell angle, cell size and volumetric density. The scope of the study includes the evaluation, through results of various simulations, of influence, if there is any, of these variations on the mentioned properties. With that, it is desired to establish a theoretical base, sufficient to aid on the choice of a proper geometry of this type of cellular structure (honeycomb) for possible applications and project requirements. The present study has confirmed the great influence of the cell angle in the Poisson coefficient and of the volumetric density in the Young modulus. It was not possible, though, to obtain more accurate equations for estimating this properties.

**Keywords:** Cellular materials, honeycomb structures, mechanical properties, finite elements.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de estruturas celulares .....	12
Figura 2 – Comportamento de um material usual sob tração .....	15
Figura 3 – Estruturas com comportamento convencional (esquerda) e comportamento auxético (direita).....	16
Figura 4- Vista de superfície da membrana encontrada na <i>Knigtheia excelsea</i> , uma espécie de angiosperma da família <i>Elaeocarpaceae</i> .....	17
Figura 5- Canoa de competição VHP, feita com multiplas camadas de fibra de carbono unidirecional com núcleo em formato honeycomb .....	17
Figura 6 – Uso de estrutura celular hexagonal no helicóptero Sikorsky Blackhawk ..	18
Figura 7 - Estrutura celular hexagonal (honeycomb).....	18
Figura 8 – Painel sanduíche com núcleo em estrutura celular hexagonal .....	19
Figura 9 – Exemplo de malha.....	21
Figura 10 – Aproximação de uma função contínua por interpolação .....	22
Figura 11 – Representação de um elemento de barra ou viga .....	23
Figura 12 – Exemplo de elemento plano (esquerda) e elemento sólido (direita) .....	23
Figura 13 – Comparação do método OFAT (a) e método fatorial (b) na análise da influência da pressão e temperatura na pureza de uma mistura.....	26
Figura 14 – Mapeamento dos pontos de um experimento <b>22</b> .....	27
Figura 15 – Método de superfície de resposta empregado na análise da influência da pressão e temperatura na pureza de uma mistura.....	28
Figura 16 – Mapeamento dos pontos estrela em um experimento <b>22</b> .....	29
Figura 17 – Diagrama de corpo livre para análise do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson .....	34
Figura 18 – Comprimento inicial e deslocamentos em y causados pelas tensões aplicadas.....	35
Figura 19 – Comprimento inicial e deslocamentos em x e y causados pelas tensões aplicadas.....	36
Figura 20 – Modelagem da estrutura celular hexagonal utilizada no experimento 15 .....	38
Figura 21 – Estrutura celular hexagonal utilizada no experimento 15 deformada após aplicação do carregamento .....	39

Figura 22 – Modelagem da estrutura celular hexagonal reentrante utilizada no experimento 2 .....	40
Figura 23 – Estrutura celular hexagonal reentrante utilizada no experimento 2 deformada após aplicação do carregamento .....	41
Figura 24 – Efeito padronizado dos parâmetros sobre o módulo de Young.....	45
Figura 25 – Efeito padronizado dos parâmetros sobre o coeficiente de Poisson .....	45
Figura 26 – Gráfico dos efeitos principais para o módulo de Young .....	47
Figura 27 – Gráfico dos efeitos principais para o coeficiente de Poisson .....	48
Figura 28 – Gráfico de interação para o módulo de Young.....	49
Figura 29 – Gráfico de interação para o coeficiente de Poisson .....	49



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores e níveis .....	24
Tabela 2 – Propriedades do Alumínio 5052 .....	31
Tabela 3 – Exemplo das configurações selecionadas para o estudo .....	31
Tabela 4 – Tabela de experimentos .....	33
Tabela 5 – Dados para o cálculo do módulo de elasticidade do experimento 15.....	40
Tabela 6 – Dados para o cálculo do coeficiente de Poisson do experimento 2.....	41
Tabela 7 – Resultados das simulações .....	42
Tabela 8 – Comparação quantitativa dos efeitos .....	44
Tabela 9 – Resumo de características do modelo de regressão.....	50
Tabela 10 – Comparação do módulo de Young obtido por simulação, da literatura e por regressão .....	52
Tabela 11 – Comparação do coeficiente de Poisson obtido por simulação, da literatura e por regressão .....	53

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
	1.1 Tema	11
	1.2 Caracterização do Problema	11
	1.3 Objetivos	12
	1.4 Justificativa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
	2.1 Propriedades Elásticas de Materiais	14
	2.2 Estruturas Celulares	16
	2.2.1 Parâmetros de Estruturas Celulares	19
	2.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)	20
	2.4 Planejamento de experimentos (DOE)	23
	2.4.1 Significância Estatística	25
	2.4.2 Experimento Fatorial	25
	2.4.3 Superfície de resposta	27
3	METODOLOGIA	30
	3.1 Descrição da Metodologia	30
	3.2 Justificativa da Metodologia	37
	3.3 Produtos do Projeto	37
4	RESULTADOS	38
	4.1 Resultados das Simulações por Elementos Finitos	38
	4.2 Resultados do Planejamento de Experimentos	44
5	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56
	Apêndice A	59
	ANEXO A	60
	ANEXO B	61

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Tema

O tema do presente trabalho envolve o estudo de materiais celulares, mais especificamente a avaliação das propriedades elásticas de uma estrutura com células hexagonais (*honeycomb*). É analisada a influência dos parâmetros de forma de tamanho de célula, densidade volumétrica (diretamente relacionado a espessura de paredes) e ângulo entre as paredes nas propriedades elásticas.

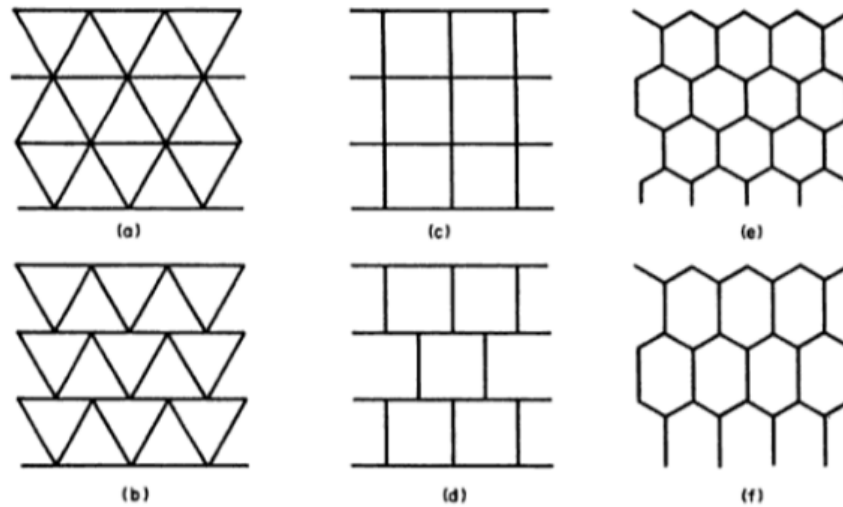
## 1.2 Caracterização do Problema

A relação entre o peso, rigidez e as resistências mecânicas das estruturas sempre foi um problema discutido no cenário da mecânica estrutural. Enquanto se busca diminuir a massa dessas estruturas, principalmente aquelas em que o peso tem influência direta no desempenho do produto final (como em componentes de automóveis e aeronaves), é essencial manter as propriedades mecânicas que atendem os requerimentos do projeto.

Estruturas celulares (Figura 1) são compostas de uma rede interconectada de elementos padronizados, que são chamados de células (GIBSON, 1997). Com as inovações relacionadas à utilização das mesmas, tem-se buscado resolver este problema de peso *versus* resistência, visto que muitas delas têm a capacidade de apresentar propriedades mecânicas satisfatórias e com uma massa reduzida em função da menor quantidade de material utilizada.

Torna-se, portanto, de grande importância entender como estas estruturas se comportam frente a situações de diferentes esforços. Estabelecer quais são as possíveis vantagens e desvantagens dos diferentes formatos de célula e realizar uma avaliação comparativa entre essas estruturas pode fundamentar aplicações práticas diversas.

**Figura 1 – Exemplos de estruturas celulares**



Fonte: Adaptado de Gibson L. J. e Ashby F. (1997).

### 1.3 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é estimar, através de modelos numéricos-computacionais, valores para propriedades elásticas de uma estrutura celular hexagonal, variando três parâmetros geométricos: tamanho de célula, espessura das paredes e ângulo entre paredes da célula. Os resultados obtidos servem para fundamentar uma base de escolha de geometria para possíveis aplicações práticas e são comparados a equações desenvolvidas analiticamente existentes na literatura para validar o modelo numérico e o método de simulação e obtenção das propriedades. Este estudo tem também, como objetivo, gerar equações mais precisas que as existentes na literatura, utilizando a precisão do método de elementos finitos para gerar equações de regressão. A validação de toda a metodologia do estudo permite o estudo e a obtenção de outras propriedades mecânicas, utilizando-se da mesma metodologia, que também podem ser pertinentes para aplicações em projeto. As simulações numéricas, elaboradas a partir da metodologia de planejamento de experimentos, são realizadas empregando a o método dos elementos finitos através do programa comercial Abaqus. A partir dos resultados obtidos das simulações, é feito uma análise posterior utilizando-se do *software* Minitab para se comparar as influências dos parâmetros selecionados nas propriedades elásticas da estrutura e gerar superfícies de resposta que mapeiam o comportamento da mesma frente a variação destes parâmetros.

## **1.4 Justificativa**

A compreensão do comportamento das estruturas a serem estudadas ainda não é bem consolidada na literatura e é insuficiente para a avaliação de suas possíveis aplicações. Portanto, se justifica o presente estudo, devido a necessidade e demanda pelo aprofundamento desse conhecimento quanto à influência da geometria das estruturas celulares nas propriedades mecânicas do material, como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Utilizando-se do método de elementos finitos, já consolidado e reconhecido pela sua confiabilidade em diversas aplicações industriais e acadêmicas, é realizada a avaliação da influência de três parâmetros da geometria de células hexagonais nas propriedades elásticas da estrutura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Propriedades Elásticas de Materiais

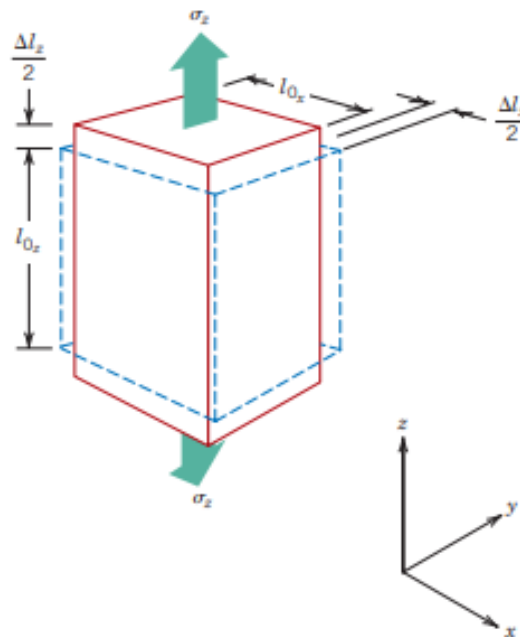
As propriedades mecânicas de um material são o que relaciona a sua deformação a uma força ou carga aplicada sobre o mesmo. Estas propriedades, quando avaliadas, podem ser utilizadas para projetar estruturas e componentes de tal forma que níveis inaceitáveis de deformação ou falha não ocorram (CALLISTER; RETHWISCH, 2009). A resposta quanto aos diferentes esforços e condições sob os quais o material é submetido é alvo de estudos há séculos e o comportamento tensão-deformação para tração ou compressão, dentro do regime linear-elástico, foi equacionado e então publicado em 1676, denominado como Lei de Hooke:

$$\sigma = E \varepsilon , \quad ( 1 )$$

onde  $\sigma$  representa a tensão aplicada, enquanto  $E$  e  $\varepsilon$  representam o módulo de elasticidade (ou módulo de Young) e a deformação específica respectivamente. O módulo de elasticidade pode ser visto como a rigidez de um material, e serve como importante parâmetro no projeto de estruturas.

Ainda quanto às deformações do material, quando aplicada uma tração na direção longitudinal de um material, usualmente pode-se observar o fenômeno de alongamento do mesmo na mesma direção da carga enquanto há uma contração no sentido lateral do corpo (Figura 2) No caso de compressão o efeito é um encurtamento na direção da carga e uma expansão no sentido lateral.

**Figura 2 – Comportamento de um material usual sob tração**



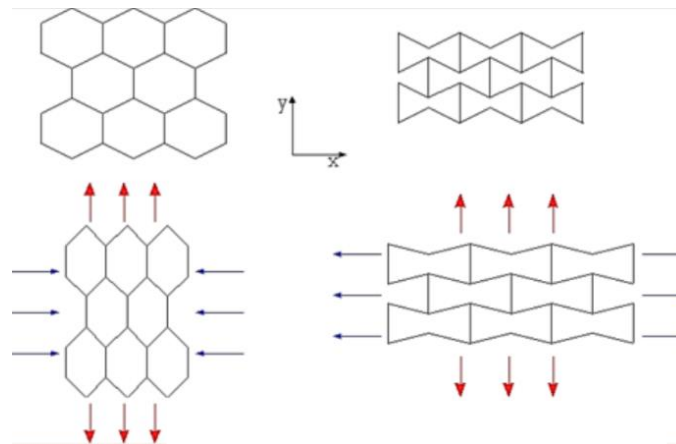
Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch (2009)

Tal comportamento pode ser descrito pelo coeficiente de Poisson, que relaciona as deformações longitudinal  $\epsilon_z$  e laterais  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$ :

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} . \quad (2)$$

No entanto, nem todos os materiais e estruturas apresentam contração nos eixos laterais quando tracionados na direção longitudinal. Quando apresentam esta exceção à regra, são denominados materiais auxéticos, termo que foi introduzido por Evans et al. (1991) para descrever aqueles materiais que apresentam coeficiente de Poisson negativos, ou seja, que desenvolvem um alongamento em ambas as direções quando tracionados e contração em ambas as direções quando comprimidos (Figura 3). Esses materiais são conhecidos há mais de um século, porém, só passaram a ganhar atenção até a sua produção proposital realizada por Lakes (1987). Tais estruturas apresentam propriedades mecânicas vantajosas, como maior resistência à flexão e à flambagem (SCARPA ET AL., 2003).

**Figura 3 – Estruturas com comportamento convencional (esquerda) e comportamento auxético (direita)**



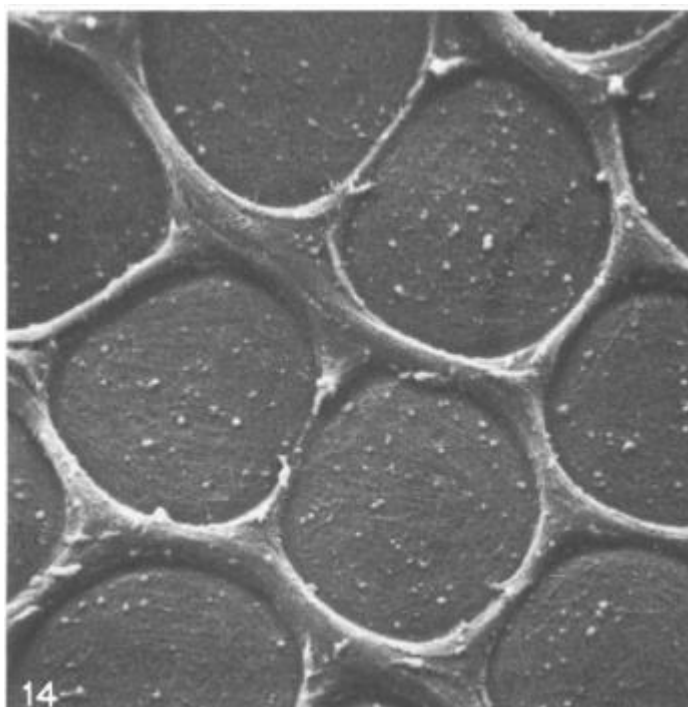
Fonte: Saadatmand S., Rasoulian A. e Ashjari M. (2017).

## 2.2 Estruturas Celulares

Estruturas celulares são aquelas que apresentam a repetição do padrão de uma mesma célula bi ou tridimensionalmente. Esse tipo de estrutura, que é vista inclusive em materiais naturais biológicos, como a madeira (Figura 4), pode apresentar propriedades superiores aos materiais e estruturas convencionais. Entre elas, pode-se destacar a rigidez dessas estruturas, principalmente quando relacionada à massa reduzida, o que é interessante em diversas aplicações de projeto, desde embarcações de competição (Figura 5) até aplicações aeroespaciais (Figura 6). Tal característica pode ser vista por meio da ótica de que materiais celulares têm uma baixa razão entre a sua densidade e a densidade do material que compõe sua estrutura. A densidade relativa é tida usualmente como parâmetro importante na determinação do comportamento mecânico de materiais celulares (DAOUDI et al., 2018). No entanto, uma densidade relativa muito pequena não é necessariamente o melhor cenário. No caso do módulo de elasticidade, por exemplo, estudos demonstram que seu módulo aumenta conforme a densidade relativa também aumenta. Outras vantagens conhecidas desses materiais são a dissipação de calor, a absorção de impacto e a boa flutuabilidade em água.



**Figura 4- Vista de superfície da membrana encontrada na *Knigheia excelsea*, uma espécie de angiosperma da família *Elaeocarpaceae***



Fonte: Adaptado de Butterfield B. (1980)

**Figura 5- Canoa de competição VHP, feita com multiplas camadas de fibra de carbono unidirecional com núcleo em formato honeycomb**



Fonte: Vespoli High Performance

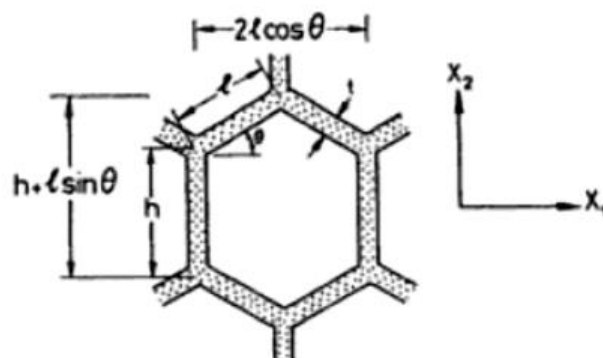
**Figura 6 – Uso de estrutura celular hexagonal no helicóptero Sikorsky Blackhawk**



**Fonte: New Atlas (2006)**

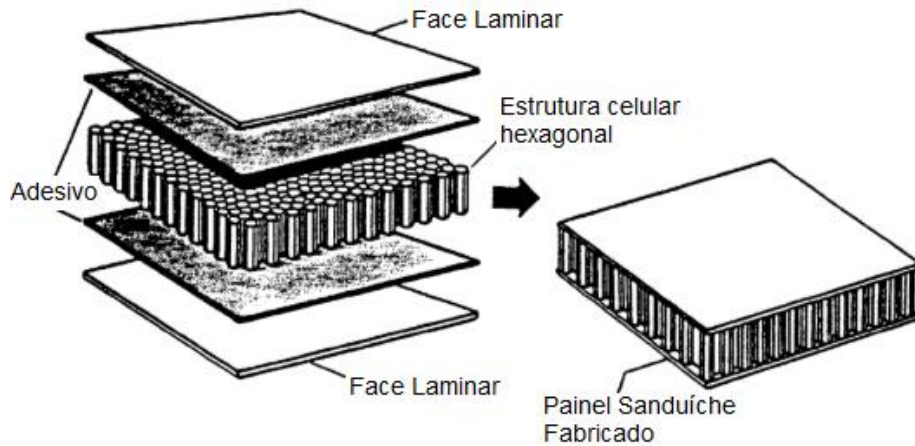
Uma das estruturas celulares mais estudadas e empregadas até hoje se trata da estrutura de célula hexagonal, também conhecida como *honeycomb* (Figura 7). Sua geometria confere excelentes propriedades e tem sido utilizada em aplicações tais como o núcleo de estruturas sanduíche no setor aeronáutico (Figura 8). Muitos estudos foram desenvolvidos no tema que envolve estruturas cujo núcleo é formado pela estrutura celular hexagonal, envolvida por painéis comuns (não celulares). Tal configuração se mostra extremamente vantajosa em diversas aplicações que envolvem limitações quanto ao peso final, mas também requerem certos níveis de rigidez.

**Figura 7 - Estrutura celular hexagonal (honeycomb)**



**Fonte: Gibson L. J. e Ashby F. (1997).**

**Figura 8 – Painel sanduíche com núcleo em estrutura celular hexagonal**



Fonte: Adaptado de Bitzer, T. (1997)

### 2.2.1 Parâmetros de Estruturas Celulares

O coeficiente de Poisson e o módulo de Young de uma estrutura composta células *honeycomb* foram estudados e tiveram sua aproximação equacionada a partir dos parâmetros geométricos representados na Figura 7 (GIBSON e ASHBY, 1997). A resposta para o módulo de Young paralelo a  $X_1$  (Figura 7) foi descrita como:

$$\frac{E_1^*}{E_s} = \left(\frac{t}{l}\right)^3 \frac{\cos \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \sin^2 \theta} \quad (3)$$

Enquanto a resposta para o coeficiente de Poisson na direção  $X_1$  foi definida como:

$$\nu_{12}^* = \frac{\cos^2 \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right) \sin \theta} \cdot \quad (4)$$

A fim de conferir diferentes propriedades mecânicas ao material celular, os parâmetros da geometria da célula podem ser variados. No caso da célula *honeycomb* (Figura 7), o comprimento vertical  $h$ , comprimento inclinado  $l$ , espessura  $t$  e ângulo de

célula  $\theta$  da estrutura hexagonal podem ser variados. Cada combinação de parâmetros confere ao material diferentes comportamentos elásticos.

Particularmente, quanto menor o módulo do ângulo  $\theta$ , menor será a magnitude do coeficiente de Poisson (LI et. al., 2018). Portanto, esse ângulo tem influência direta no coeficiente de Poisson da estrutura. Para ângulos positivos, obtém-se estruturas com coeficientes de Poisson positivos, como a estrutura *honeycomb* original mostrada na Figura 7, que possui um coeficiente de Poisson teoricamente igual a 1 quando o modelo de deformação é tido como de pura flexão. Se  $\theta$  vale zero, tem-se a estrutura retangular, cujo coeficiente de Poisson é numericamente também igual a zero. Pode-se, ainda, conferir a  $\theta$  valores negativos, obtendo-se assim estruturas auxéticas, ou seja, com coeficiente de Poisson negativo.

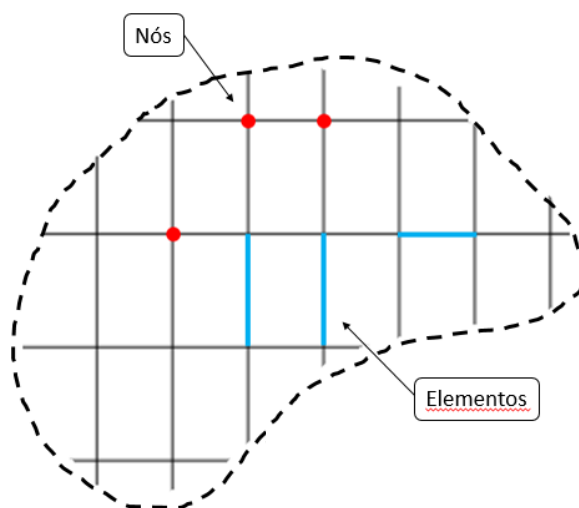
Segundo Ju et. al. (2010), essas estruturas auxéticas, se associadas a baixos valores de  $\theta$ , são as estruturas que possuem maior resistência à flambagem linear. Assim como, quanto maior a magnitude deste ângulo negativo, menor será o módulo de elasticidade associado (Lee et. al., 1996). Quanto ao efeito de escala (diretamente relacionado à densidade relativa) dessas estruturas *honeycomb* auxéticas, pode-se observar que a rigidez ao cisalhamento aumenta, enquanto a rigidez a compressão uniaxial diminui quando o tamanho de célula é reduzido (Janus-Michalska 2017). Isto demonstra a importância da definição de um valor padrão de densidade relativa para a comparação de estruturas celulares, garantindo, também, que as estruturas comparadas tenham massas semelhantes, o que se mostra importante na maioria dos requerimentos de projeto.

### **2.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)**

Na área estrutural da engenharia, frequentemente depara-se com problemas de equações diferenciais complexas, nos quais a solução dificilmente pode ser obtida analiticamente. Nos modelos analíticos têm-se geometrias simples, como retângulos, discos ou semiplanos. Já na análise de estruturas mais complexas e mais próximas das reais, o domínio de tais equações se torna extremamente elaborado. Nestes casos, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é extensamente utilizado, por ser robusto e aplicável em domínios complexos.

A característica principal do MEF é discretizar o domínio, como uma região ou área de estudo e, em seguida, resolver o problema discretizado. Assim, a representação do domínio é uma reunião de um número finito de elementos. Resolver este subdomínio de geometria simples, mesmo que de forma aproximada, é mais acessível em relação ao de uma solução analítica. Dependendo da complexidade do domínio, esta solução sequer existe. O domínio do problema, antes contínuo, passa a ser tais subdivisões da geometria. Neste cenário (Figura 9), os elementos são interligados por meio de nós ou pontos nodais. O conjunto de todos os itens, elementos e nós, é conhecido como malha.

**Figura 9 – Exemplo de malha**



**Fonte: Autoria Própria**

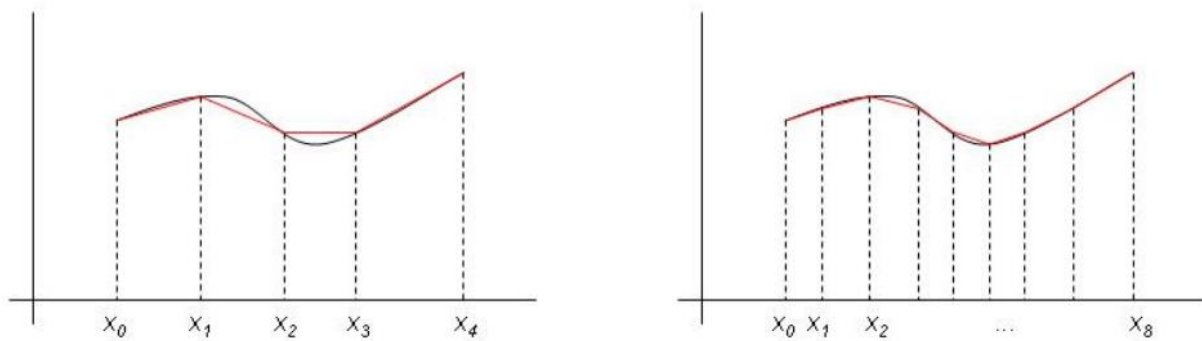
A fim de resolver o problema dado, as equações dos elementos finitos que compõem o domínio são agrupadas em um sistema de equações matriciais, que corresponde ao comportamento geral do domínio. Por fim, ao invés de solucionar uma equação complexa para a região inteira, a combinação das equações para cada elemento é solucionada e as variáveis de interesse podem ser obtidas. Em problemas estruturais, isto significa determinar o deslocamento de cada nó e a tensão em cada elemento (LOGAN, 2011).

Existem dois tipos de análises que podem ser feitas: o método da força e o método do deslocamento. A primeira tem como variável desconhecida as forças internas do corpo. Já na segunda, o deslocamento dos nós é a incógnita. Estudos mostram que o método do deslocamento, também conhecido como método da rigidez,

é o mais utilizado e implementado em *softwares* (LOGAN, 2011). Sua formulação é mais simples e, conseqüentemente, demanda um poder computacional menor.

A precisão da aproximação do MEF depende diretamente de certas propriedades da malha, como o tamanho dos elementos e a quantidade de nós. Como é possível observar na Figura 10, a aproximação de uma função contínua qualquer  $q(x)$  por funções de interpolação se torna mais precisa com um maior número de funções e também maior número de valores numéricos de  $q$ . Entretanto, quanto maior o número de elementos ou mais complexa a malha, maior a capacidade computacional necessária para resolvê-la (GIACCHINI, 2012). Deste modo, um equilíbrio entre precisão e simplicidade deve ser alcançado no projeto.

**Figura 10 – Aproximação de uma função contínua por interpolação**



**Fonte: Adaptado de Giacchini (2012)**

Outro fator que afeta a análise por elementos finitos é o tipo de elemento a ser utilizado e, no momento da escolha, é necessário ter cautela. Concepções uni-, bi- ou tridimensionais estão disponíveis e a decisão de qual é mais apropriada é um dos maiores desafios do analisador (LOGAN, 2011).

Os elementos mais simples utilizados são os de barra e de viga. São normalmente representados por uma linha (Figura 11) e, por este motivo, é necessário determinar características sobre as respectivas áreas de secção. A diferença principal entre os dois tipos é a quantidade de graus de liberdade e o tipo de esforços suportados. Em um sistema bidimensional, o elemento de barra tem dois graus de liberdade (g.d.l) por nó e suporta somente esforços de tração e compressão, enquanto o elemento de viga possui 3 g.d.l e também possui esforço cortante e momento fletor.

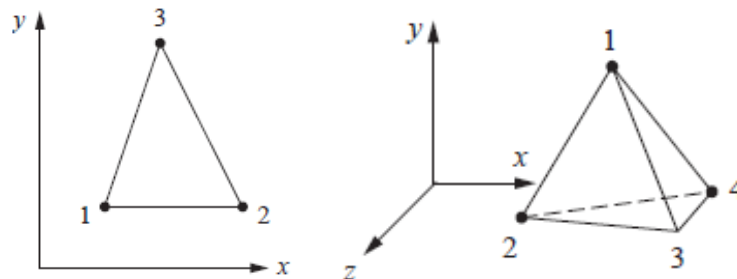
**Figura 11 – Representação de um elemento de barra ou viga**



Fonte: LOGAN 2011

Em uma análise bidimensional, são utilizados elementos planos que contêm números de nós e formatos variáveis. Estes suportam forças aplicadas no plano, diferentemente dos elementos unidimensionais. Já os elementos sólidos (Figura 12) são utilizados quando se faz necessária uma análise tridimensional. Neste caso, o modelo suporta cargas em todas as direções.

**Figura 12 – Exemplo de elemento plano (esquerda) e elemento sólido (direita)**



Fonte: LOGAN 2011

## 2.4 Planejamento de experimentos (DOE)

O planejamento de experimentos, também conhecido como DOE (*Design of experiments*), é um método sistemático que ajuda na tomada de decisões sobre certo processo. De uma forma coordenada e organizada, permite a determinação do efeito de parâmetros sobre um produto ou processo. Em um conceito geral, é uma ferramenta que auxilia na determinação de causa e efeito entre variáveis de entrada e variáveis resultantes de um processo (WAGNER ET AL., 2014).

O diferencial do DOE, quando comparado com outras ferramentas de processo ou de qualidade, é a metodologia estatística utilizada para a análise de dados e a previsão de comportamentos sob qualquer condição dentro dos limites definidos no

experimento. Assim, é possível entender a importância de um parâmetro, bem como controlá-lo para otimizar o processo (WAGNER et al., 2014).

O DOE consiste em uma série de ensaios, nos quais fatores de um processo são variados deliberadamente. A cada ensaio, dados de variáveis resposta são extraídos. Uma variável resposta é aquela observada em um experimento. É o resultado dos experimentos e a característica que se espera otimizar. Normalmente de caráter quantitativo, a variável resposta deve ser efetiva para quantificar os resultados desejados.

A escolha dos fatores estudados em um DOE depende da sua relevância em relação ao processo e da magnitude do seu efeito. Ou seja, se tal fator realmente afeta o desempenho do produto (HOWARD, 2018). Estes fatores são variáveis modificadas com o objetivo de entender o impacto ou influência sobre uma variável resposta. Um fator pode ser quantitativo ou qualitativo. O primeiro é aquele que se baseia em números ou cálculos e, conseqüentemente, é mensurável (temperatura, tamanho, velocidade ou densidade). Já o fator qualitativo está relacionado à uma característica não mensurável do processo ou produto, como, por exemplo cor, máquina ou operador.

Os níveis dos fatores são os valores específicos escolhidos para cada variável quantitativa, sendo estes normalmente um nível baixo (menor valor) e um nível alto (maior valor). Já para uma variável qualitativa, os níveis são opções específicas, e o nível alto e baixo são escolhidos aleatoriamente. A Tabela 1 mostra exemplos de como estes níveis podem ser definidos, tanto para variáveis quantitativas, quanto para variáveis qualitativas.

**Tabela 1 – Fatores e níveis**

<b>Fator</b>	<b>Nível baixo</b>	<b>Nível alto</b>
Tamanho [m]	1	5
Temperatura [°C]	50	70
Cor	Preto	Azul
Máquina	A	B

**Fonte: Autoria própria**



### 2.4.1 Significância Estatística

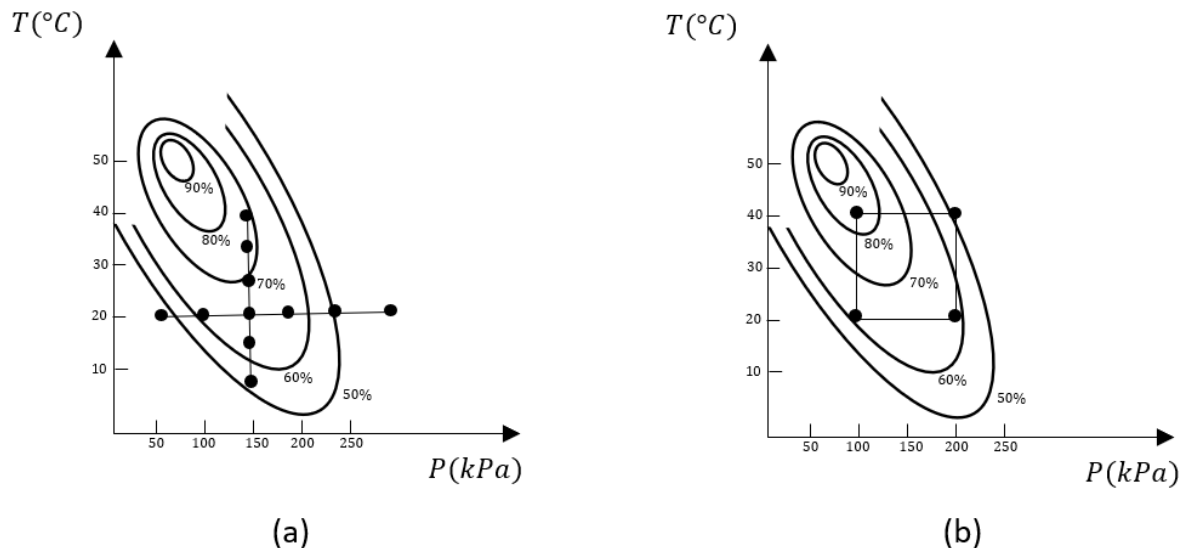
Em diversos estudos que se utilizam de aproximações, predições e equações de regressão para descrever fenômenos, é avaliada a significância estatística dos achados. A base da significância estatística está em provar a falsidade da hipótese nula, que, em termos gerais, afirma não existir relação entre dois fenômenos medidos. Rejeitar a hipótese nula possibilita a aceitação de uma hipótese alternativa, que estabelece relação entre tais fenômenos (JOHNSON e LARRY, 2004). Utilizando como exemplo ainda a Tabela 1, a hipótese nula poderia afirmar, neste caso, que não há relação entre a temperatura e o tamanho, ou seja, um fator não tem influência sobre o outro. Enquanto isso, a hipótese alternativa afirmaria que existe essa relação e influência entre os fatores. O método para se provar a hipótese nula falsa consiste em se obter um *valor-p* menor que o nível de significância pré-definido. O *valor-p* é a probabilidade, por meio de amostragens, de se obter o valor presente no estudo levando em conta as possíveis flutuações. Consensualmente, se é utilizado um nível de significância de 0,05 em pesquisas educacionais. Então, se o *valor-p* é menor que 0,05 é possível rejeitar a hipótese nula e afirmar que os resultados encontrados são estatisticamente significativos.

### 2.4.2 Experimento Fatorial

O experimento fatorial é um método que permite avaliar os efeitos que diversos fatores têm sobre uma variável de resposta. A modelagem do teste se dá pela alteração dos níveis de todos os fatores simultaneamente, estudando, assim, a interação entre os mesmos.

Quando comparado com outros métodos, como o OFAT (*one factor at a time*), é possível observar algumas vantagens na aplicação. Por exemplo, o OFAT não é capaz de detectar uma interação entre os fatores, levando o observador a determinar resultados incompletos ou insuficientes. A interação ocorre quando o comportamento de certo fator depende do nível do outro – seu efeito varia conforme o outro fator também varia. Diversos processos apresentam esse tipo de interação, como na Figura 13, que ilustra como a temperatura e a pressão influenciam o teor de pureza de uma mistura qualquer. Cada ponto na imagem é um experimento realizado na temperatura e pressão correspondentes.

**Figura 13 – Comparação do método OFAT (a) e método fatorial (b) na análise da influência da pressão e temperatura na pureza de uma mistura**

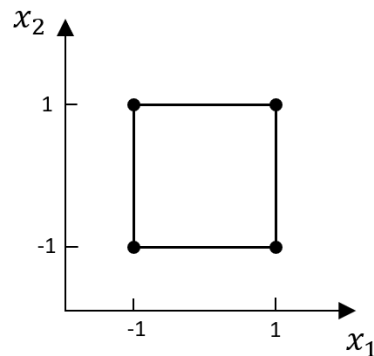


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 13(a), o método OFAT foi utilizado e cada fator é variado separadamente. Assim, a interação entre os fatores é ignorada e o resultado encontrado se restringe somente aos pontos sobre as linhas traçadas. Tal resultado pode levar a conclusões errôneas sobre o processo, como a dedução de que a temperatura mais alta sempre eleva o teor de pureza da mistura. Na Figura 13(b), um experimento fatorial foi utilizado e, nele, percebe-se a interação existente entre a pressão e temperatura, pois o ponto superior direito está submetido à uma temperatura elevada, mas tem como resultado um teor de pureza baixo. Neste caso, é possível visualizar que o teor não é diretamente proporcional aos fatores individualmente e a escolha dos parâmetros se dá de forma combinada.

O número de ensaios a serem executados depende do número de fatores ( $k$ ) e respectivos níveis ( $N$ ), seguindo a lógica ( $Experimentos = N^k$ ). Nota-se que quando o número de níveis aumenta, a quantidade de experimentos se eleva exponencialmente. A Figura 14 ilustra um experimento com 2 fatores ( $x_1$  e  $x_2$ ) e 2 níveis pra cada fator. Quando o experimento fatorial se diz completo, todas as combinações dos níveis dos fatores são estudadas. Já o experimento fatorial fracionado compreende o estudo de somente uma parcela dos ensaios de um estudo completo. Essa opção se torna vantajosa quando o número de fatores é alto ou os recursos são limitados.

**Figura 14 – Mapeamento dos pontos de um experimento  $2^2$**



**Fonte: Autoria Própria**

Alimentando o *software* Minitab com os valores dos fatores e as variáveis resposta, é possível, então, a obtenção de gráficos de efeitos de cada fator e um gráfico de Pareto dos efeitos, que auxilia na identificação da significância dos fatores.

### 2.4.3 Superfície de resposta

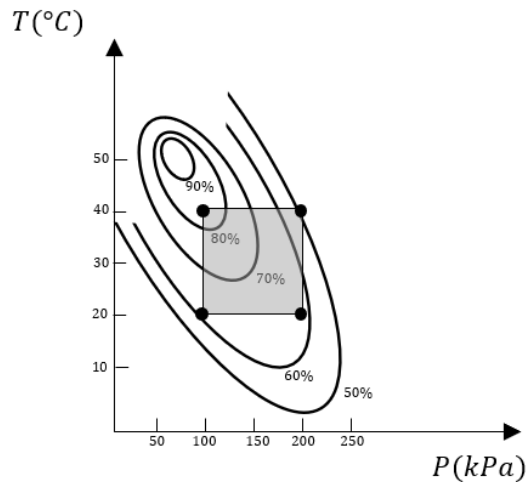
A geração de uma superfície de resposta é uma metodologia que visa refinar modelos já existentes ou, também, a obtenção direta de um modelo refinado. Diferentemente do método de experimento fatorial, a superfície de resposta permite encontrar uma equação representativa da variável resposta. Sendo assim, um mapeamento de uma superfície de resposta dentro dos limites determinados pelos níveis dos fatores escolhidos. Isto se deve à incorporação de termos quadráticos na equação utilizada nesta metodologia.

Este método é amplamente utilizado quando o objetivo da pesquisa é entender como uma variação nos fatores alteram o resultado do teste. Com o mapeamento e a equação gerada pelo experimento, pode-se encontrar facilmente quais valores dos fatores otimizam o resultado do processo, isto é, qual a configuração ideal para o valor procurado.

Enquanto no experimento fatorial a escolha dos pontos de operação se restringe aos pontos testados, o experimento de superfície de resposta oferece uma gama de opções muito maior. Quaisquer pontos situados na área delimitada pelos níveis dos fatores podem ser utilizados. Aproveitando o exemplo da mistura mostrado na seção

anterior, a Figura 15 mostra a área do gráfico na qual os pontos ótimos estariam localizados.

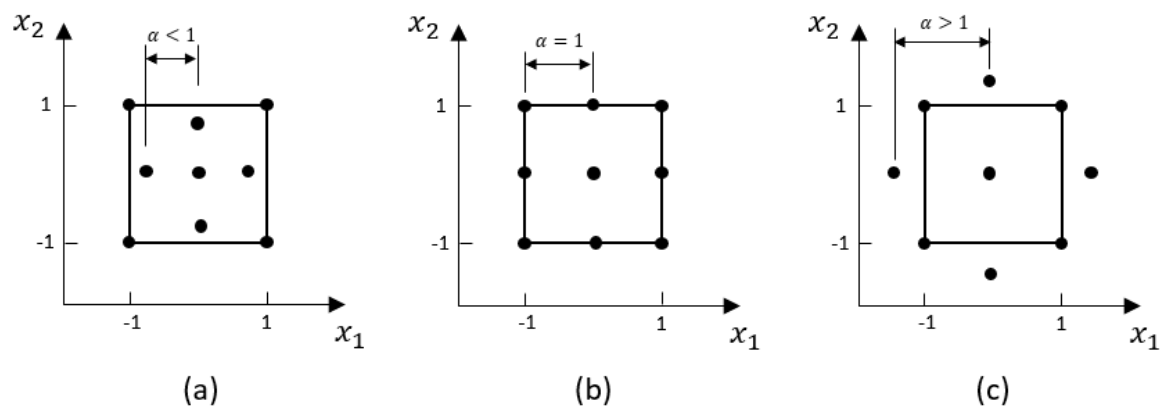
**Figura 15 – Método de superfície de resposta empregado na análise da influência da pressão e temperatura na pureza de uma mistura**



**Fonte: Autoria Própria**

Uma variação do experimento de superfície de resposta é o experimento central composto, sendo basicamente um experimento fatorial completo com a adição de pontos estratégicos. Um deles é o ponto central, localizado na média dos níveis (no centro do experimento). Outros pontos, conhecidos por pontos estrela ou pontos axiais, recebem o valor da média de dois níveis, variando somente um fator. Para este, a distância entre o ponto estrela e o ponto central em unidades é denotado pelo símbolo  $\alpha$ . A Figura 16 ilustra o mesmo experimento fatorial  $2^2$  já mostrado na seção anterior, porém, agora com o ponto central e pontos estrela. É possível visualizar que, quando  $\alpha < 1$ , os pontos estrela ficam localizados dentro da região de estudo. Já quando  $\alpha = 1$ , os pontos estrela ficam alinhados com os demais pontos, no centro da aresta da região experimental. E, por fim, quando  $\alpha > 1$ , os pontos estão além dos limites dos fatores.

Figura 16 – Mapeamento dos pontos estrela em um experimento  $2^2$



Fonte: Autoria Própria

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Descrição da Metodologia

O método empregado para o desenvolvimento do presente estudo pode ser descrito pelos seguintes passos:

1. Revisão bibliográfica das propriedades mecânicas envolvidas, das estruturas celulares e seus mecanismos de deformação, do método dos elementos finitos e da metodologia de planejamento de experimentos;
2. Capacitação na utilização da ferramenta computacional Abaqus, escolhida para a avaliação numérica das estruturas a serem estudadas e na ferramenta de planejamento de experimentos Minitab;
3. Modelagem e simulação das estruturas celulares escolhidas, variando os parâmetros geométricos definidos sob as mesmas solicitações estáticas, de forma a se obter as propriedades equivalentes desejadas;
4. Análise dos resultados obtidos a partir da simulação por meio do DOE;
5. Discussão dos resultados provenientes da análise DOE;
6. Redação do trabalho.

Primeiramente, a revisão bibliográfica busca apresentar os conceitos básicos relacionados às propriedades mecânicas a serem avaliadas. Visando, ainda, aprofundar os conhecimentos sobre estruturas celulares diversas e seu comportamento sob tensão. Para tanto, estudos antecedentes de autores que também investigaram estruturas celulares servirão como base teórica para a construção desta análise.

O passo seguinte é direcionado ao treinamento nos *softwares* Abaqus e Minitab. O terceiro passo busca, por meio dos conhecimentos obtidos no passo anterior, avaliar numericamente as propriedades elásticas da célula sob tensão, utilizando o método de elementos finitos através da ferramenta Abaqus.

O material base utilizado no estudo é o Alumínio 5052, ou, conforme definido na ISO, o Al Mg2.5. Esse material é comercial e amplamente utilizado na confecção

de estruturas celulares *honeycomb*. As propriedades do mesmo são apresentadas na Tabela 2.

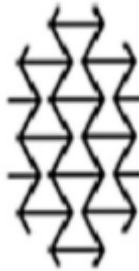
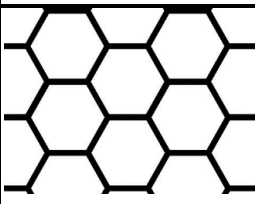
**Tabela 2 – Propriedades do Alumínio 5052**

Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de elasticidade [GPa]	Módulo de Cisalhamento [GPa]	Coefficiente de Poisson	Tensão de escoamento [MPa]	Tensão de ruptura [MPa]
2,68	69,3	25,9	0,33	90	195

Fonte: Adaptado de ASM Handbook (1992)

Como um dos parâmetros a ser avaliado nas simulações, o ângulo da célula tem como intervalo de estudo valores entre  $-15^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$ , havendo pontos experimentais fora deste intervalo apenas para atender à metodologia de planejamento de experimentos (pontos estrela). O ângulo negativo é característica de uma estrutura hexagonal reentrante e o ângulo positivo uma característica de uma estrutura hexagonal. Quando o ângulo se iguala a zero, tem-se uma estrutura retangular. Exemplos dos dois extremos dessas configurações estão ilustrados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Exemplo das configurações selecionadas para o estudo**

Identificação	Geometria	Descrição
$\theta = -15^\circ$		Hexagonal Reentrante
$\theta = 30^\circ$		Hexagonal

Fonte: Autoria própria

Outro fator avaliado é o tamanho de célula  $2l \cos \theta$ , apresentado na Figura 7, tendo como intervalo de estudo valores entre  $1/8$  até  $3/8$  de polegada, tidos como referências em catálogos disponibilizados por fabricantes de malhas *honeycomb* em alumínio. Por fim, o parâmetro de densidade volumétrica foi variado a partir da mudança na espessura de parede das células no intervalo de 3 a 6 pcf (*pounds per cubic foot*), equivalentes a 0,064 e 0,192 g/cm<sup>3</sup>. Os catálogos de estruturas celulares comerciais consultados pertencem à dois fornecedores – Hexcel e Plascore – e serviram de referência para estipular os intervalos de estudo previamente descritos. Os catálogos com as propriedades desses materiais estão apresentados nos Anexos A e B. A área total da estrutura, ou seja, o produto das medidas  $Y_0$  e  $X_0$ , é a base de comparação das estruturas simuladas e se mantém constante para todas as estruturas estudadas. Uma representação está presente no Apêndice A.

Tais intervalos mencionados para cada parâmetro servem, ainda, de entrada para a metodologia de planejamento de experimentos. Utilizando-se do *software* Minitab, foi criado um experimento fatorial completo  $2^3$ , ou seja, com 3 fatores e 2 níveis. Foram adicionados um ponto central e 6 pontos estrela a uma distância de  $\alpha = 1,33$  do ponto central, totalizando, assim, 15 experimentos. A partir destas especificações, foram obtidos não só o número total de experimentos a serem realizados, como também as especificações de cada experimento, ou seja, os valores de cada parâmetro geométrico para cada simulação, gerando uma tabela de experimentos que pode ser visualizada na Tabela 4.



**Tabela 4 – Tabela de experimentos**

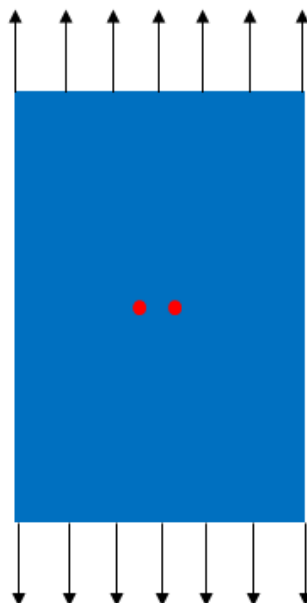
Experimento	Ângulo $\Theta$ [graus]	Densidade [pcf]	Tamanho de célula [pol]
1	7,5	4,5	0,083
2	-15	3	0,375
3	-22,5	4,5	0,25
4	7,5	2,5	0,25
5	7,5	6,5	0,25
6	30	3	0,125
7	37,5	4,5	0,25
8	-15	6	0,375
9	7,5	4,5	0,416
10	-15	6	0,125
11	-15	3	0,125
12	30	6	0,125
13	7,5	4,5	0,25
14	30	6	0,375
15	30	3	0,375

**Fonte: Autoria própria**

Para o presente trabalho, a simulação é realizada no plano, sendo, assim, bidimensional. Para a avaliação das propriedades escolhidas, uma análise bidimensional é satisfatória. Tendo em vista este cenário, o elemento finito do tipo viga foi escolhido para a modelagem dessas estruturas. Além das informações de tamanho das células, é necessário indicar o tamanho de secção destes elementos. Para que não exista influência dessa dimensão nas direções x e y, foi estipulada uma secção quadrada, que garante a simetria na direção do elemento. No *software*, a forma mais simplificada de secção para uma viga é a retangular ou quadrada, portanto, esta escolha também diminui a complexidade de cálculo.

Ressalta-se que todas as simulações são feitas no regime linear elástico, o que possibilita a utilização das equações (1) e (2). Para a avaliação do módulo de Young, o material é tracionado por forças igualmente distribuídas em ambas as faces superior e inferior enquanto dois pontos no centro da estrutura estavam com restrição total de movimentação (Figura 17).

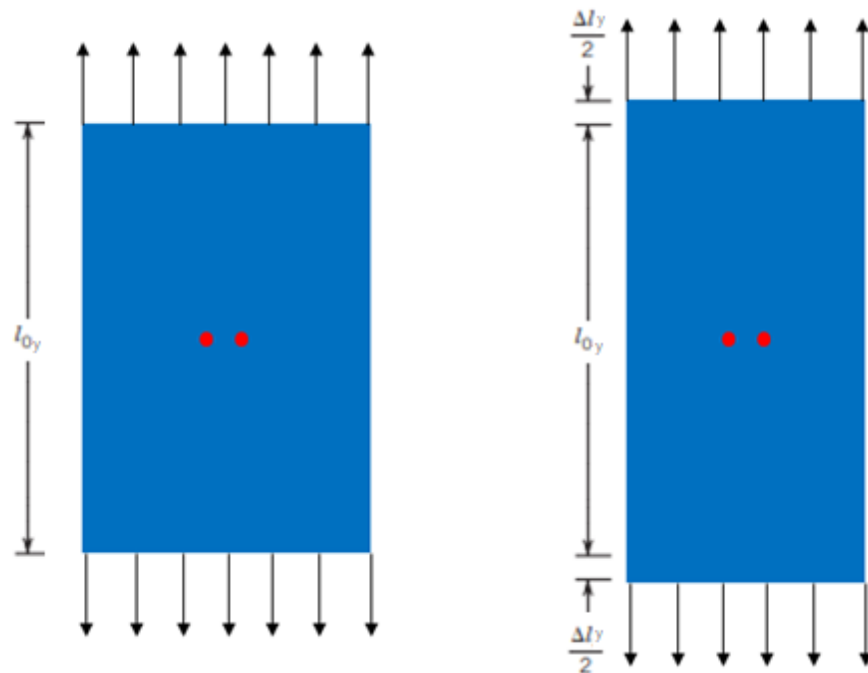
**Figura 17 – Diagrama de corpo livre para análise do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson**



**Fonte: Autoria própria**

A restrição no centro da estrutura garante que ela não se movimente, rotacione ou gere tensões residuais durante a aplicação das tensões. Então, foi observado o deslocamento dos nós destas faces da estrutura, com o objetivo de encontrar a deformação específica  $\varepsilon$ . Esta pode ser calculada como sendo a razão do deslocamento total de ambas as faces – superior e inferior – pelo comprimento inicial do material nesta mesma direção (Figura 18). O deslocamento de cada face foi calculado a partir da média de deslocamento de cada nó que compõe a mesma.

**Figura 18 – Comprimento inicial e deslocamentos em y causados pelas tensões aplicadas**

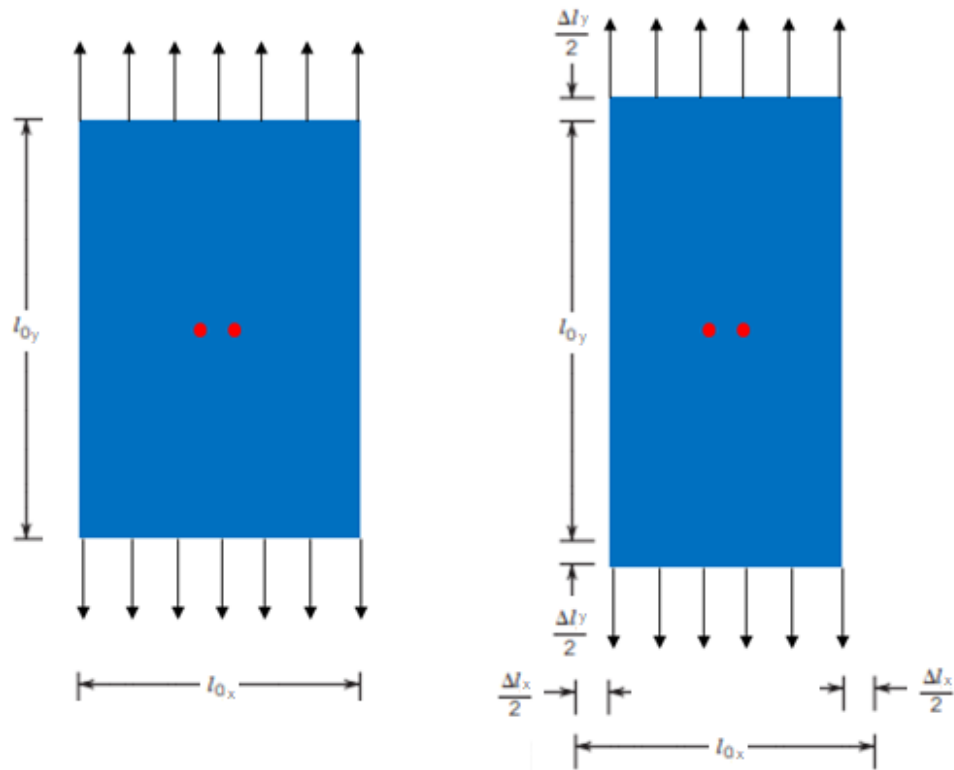


Fonte: Autoria própria

A tensão  $\sigma$ , por sua vez, pode ser encontrada dividindo a soma das forças aplicadas pela área transversal total da estrutura – área esta que, por sua vez, pode ser obtida multiplicando-se a largura total pela espessura da estrutura. Com a deformação específica e a tensão aplicada definidas, pode-se substituir os valores encontrados na equação (1) para a obtenção do módulo de Young.

Para o cálculo do coeficiente de Poisson, o material foi tracionado exatamente da mesma forma apresentada na etapa anterior. Porém, nesse caso, foi observado não apenas o deslocamento dos nós em y, mas também os deslocamentos no eixo x (Figura 19).

**Figura 19 – Comprimento inicial e deslocamentos em x e y causados pelas tensões aplicadas**



**Fonte: Autoria própria**

Desta forma, obtém-se as deformações específicas para ambos os eixos. Como descrito pela Equação (2), a razão entre essas deformações resulta no coeficiente de Poisson.

A partir da listagem de experimentos previamente mostrada na Tabela 4, as estruturas selecionadas foram modeladas e as simulações e cálculos descritos foram realizados. Obtém-se, desta forma, as propriedades elásticas referentes à cada experimento. No *software* Minitab, cada lista de experimentos foi complementada com os respectivos valores resultantes de cada propriedades elásticas. As análises DOE do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade foram realizadas separadamente, sendo cada propriedade considerada um resultado independente, ou seja, uma variável resposta de cada análise.

A combinação destes resultados pelo método de planejamento de experimentos (DOE) através do *software* Minitab gera uma série de gráficos e dados, incluindo equações de regressão, gráficos de Pareto e superfícies de resposta, que

são formas gráficas de se representar a influência dos parâmetros selecionados nas duas propriedades mecânicas propostas. Esta informação disposta de forma visual e intuitiva pode ser utilizada como base teórica na decisão do tipo de geometria ser utilizado em projetos.

### **3.2 Justificativa da Metodologia**

A fundamentação teórica advinda dos artigos e estudos previamente publicados pela comunidade acadêmica sobre estruturas celulares e seu comportamento sob tensão se mostra essencial na construção deste estudo. Tanto os resultados quanto as metodologias empregadas nos mesmos servem como modelo e base comparativa para o desenvolvimento do trabalho.

Fundamentada também por esses estudos e pela ampla utilização acadêmica e comercial, foi realizada a escolha da ferramenta Abaqus para a realização da avaliação computacional de elementos finitos.

Do mesmo modo, o *software* Minitab foi escolhido para o planejamento de experimentos baseado em sua ampla utilização industrial e nos significativos resultados que o mesmo pode prover.

### **3.3 Produtos do Projeto**

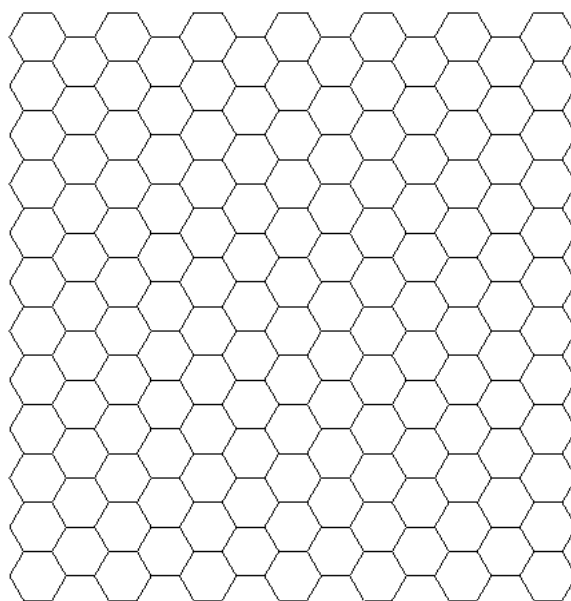
A partir das respostas em termos de propriedades elásticas para os experimentos propostos pela metodologia DOE, que buscam se aproximar dos resultados obtidos pelas equações matemáticas propostas pela literatura, tem-se como resultado deste estudo, a validação da metodologia usada para simulação de estruturas celulares por meio do método de elementos finitos empregado através da ferramenta computacional Abaqus. O estudo tem como objetivo também, servir de guia e suporte na escolha de configurações geométricas da estrutura celular hexagonal em possíveis aplicações de projeto.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados das Simulações por Elementos Finitos

A partir da metodologia apresentada e dos experimentos propostos pelo método de planejamento de experimentos, foram executadas 15 simulações numéricas com diferentes combinações de parâmetros de forma de célula, especificadas no Apêndice A. O experimento 15 servirá de exemplo para a demonstração dos resultados para o módulo de elasticidade. Na Figura 20 é possível visualizar a malha construída no *software* Abaqus para este experimento. O número de elementos e de nós utilizados nas simulações variou de acordo com as configurações de cada experimento. O experimento 15, que utiliza uma estrutura com tamanho de célula relativamente grande e ângulo positivo, resultando em um número menor de células para a mesma área. A malha de elementos finitos correspondente possui 2346 nós e 2495 elementos de viga. Enquanto isso, o experimento 1 por exemplo, com o menor tamanho de célula, possui 9494 nós e 14097 elementos de viga.

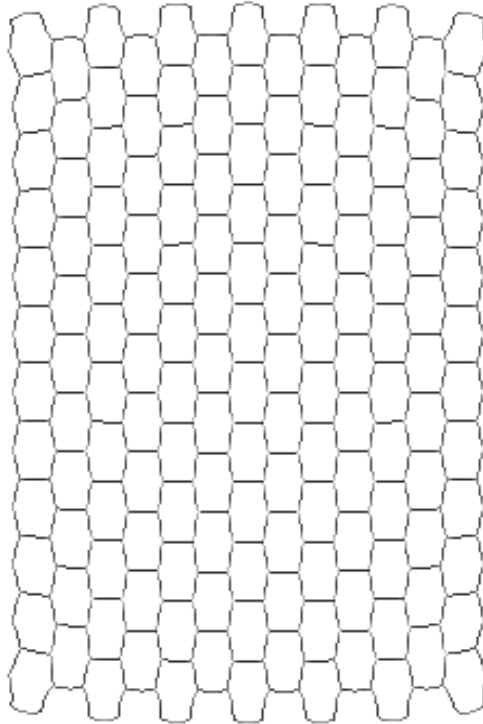
**Figura 20 – Modelagem da estrutura celular hexagonal utilizada no experimento 15**



Fonte: Autoria própria

Por meio da modelagem por elementos finitos, as condições de contorno e forças foram aplicadas conforme descrito na metodologia, resultando em uma estrutura deformada conforme representado na Figura 21.

**Figura 21 – Estrutura celular hexagonal utilizada no experimento 15 deformada após aplicação do carregamento**



**Fonte: Autoria própria**

Um dos objetivos deste estudo foi a determinação do módulo de elasticidade da estrutura celular. Para tal, observando a estrutura deformada, foi obtido um deslocamento resultante na direção  $y$  para as faces superior e inferior da estrutura. Foram selecionados diversos pontos dessas faces para análise e o deslocamento de cada ponto foi anotado. Por fim, uma média aritmética foi calculada.

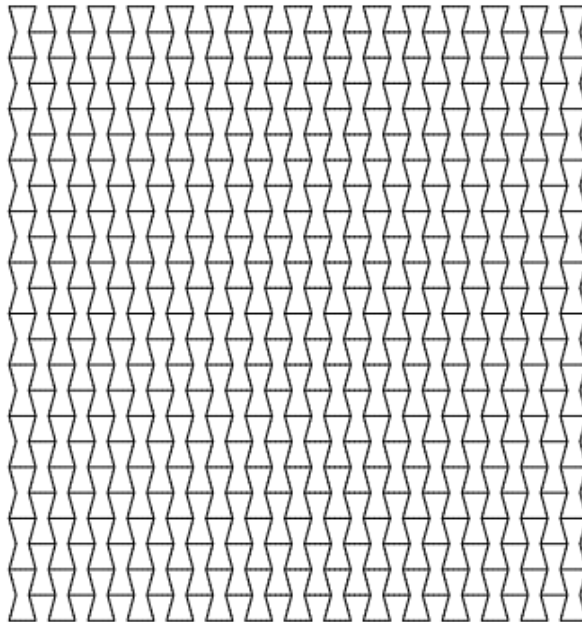
Com os dados extraídos da simulação, e se utilizando da Equação (1), o módulo de elasticidade da estrutura foi obtido. Os resultados estão listados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Dados para o cálculo do módulo de elasticidade do experimento 15**

<b>Exp</b>	<b>Força aplicada [N]</b>	<b>Área [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Tensão aplicada [Pa]</b>	<b>Média do deslocamento [m]</b>	<b>Módulo de elasticidade [Pa]</b>
15	10	9,03E-06	7,92E+04	1,76E-02	5,14E+05

Fonte: Autoria Própria

Outro objetivo do estudo foi encontrar o coeficiente de Poisson da estrutura. Para a demonstração da resposta desse coeficiente, é utilizada como exemplo a estrutura modelada para o experimento 2, que utiliza como base uma estrutura auxética (Figura 22).

**Figura 22 – Modelagem da estrutura celular hexagonal reentrante utilizada no experimento 2**

Fonte: Autoria própria

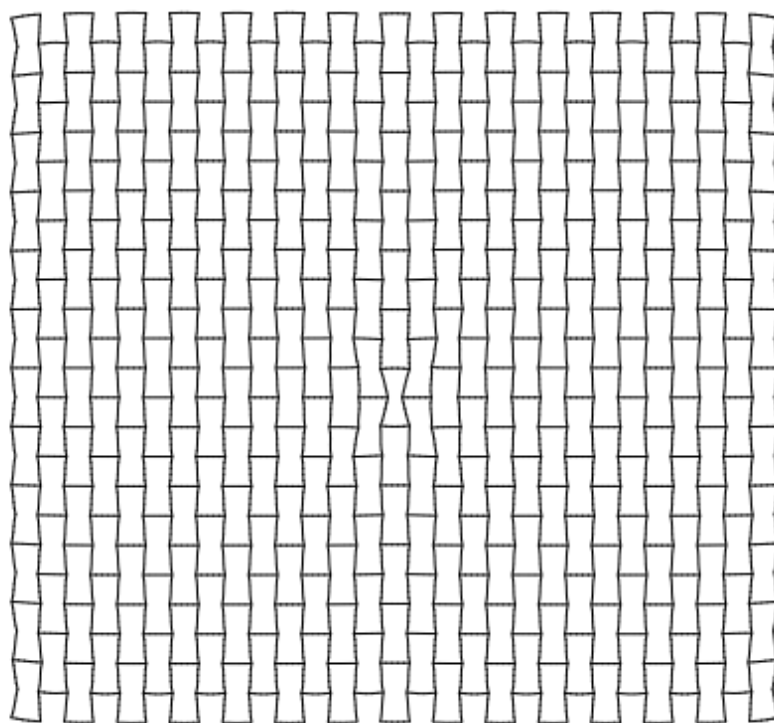
As mesmas modelagens e simulações utilizadas para o módulo de elasticidade foram analisadas. As condições de contorno e cargas aplicadas foram mantidas, assim como a magnitude e posicionamento das mesmas.

Porém, para o cálculo do coeficiente de Poisson, foi necessário determinar não apenas o deslocamento em y, mas também o deslocamento resultante na direção x. Portanto, foram selecionados pontos sobre as faces esquerda e direita da estrutura.



Após simulação, a partir da estrutura deformada (Figura 23), foram obtidos os deslocamentos em x para os pontos selecionados.

**Figura 23 – Estrutura celular hexagonal reentrante utilizada no experimento 2 deformada após aplicação do carregamento**



Fonte: Autoria própria

Após a obtenção desses dados e utilizando-se da equação 2, foram realizados os cálculos necessários para se obter o coeficiente de Poisson. Os resultados estão listados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Dados para o cálculo do coeficiente de Poisson do experimento 2**

Exp	Comprimento total xo [m]	Comprimento total yo [m]	Deslocamento em x [m]	Deslocamento em y [m]	Coeficiente de Poisson
2	1,07E-01	1,14E-01	-1,95E-01	4,34E-02	-0,209

Fonte: Autoria Própria

Os resultados observados tanto para o módulo de Young quanto para o coeficiente de Poisson, para estes e os demais experimentos sugeridos pela metodologia DOE, são condizentes com as fórmulas presentes na literatura estudada (equações 3 e 4). Validam, assim, a metodologia quanto às configurações

empregadas na ferramenta Abaqus e quanto às condições de contorno empregadas para a simulação. Tais resultados de simulação sumarizados e os correspondentes valores alcançados pelo modelo matemático sugerido pela literatura podem ser observados na Tabela 7. Quando comparados os resultados de simulação com encontrados pelas equações sugeridas pela literatura, o maior erro encontrado foi de 24,5% para o módulo de Young no Experimento 1. Este experimento representa um ponto estrela da metodologia DOE e o tamanho de célula adotado para o mesmo foi consideravelmente menor do que o restante dos experimentos e do encontrado em catálogos comerciais. Para todos os outros experimentos, as respostas – tanto para o coeficiente de Poisson, como para o módulo de Young – encontradas tiveram erros menores do que 8% quando comparadas às fórmulas sugeridas pela literatura (Equações 3 e 4).

**Tabela 7 – Resultados das simulações**

Exp	Ang $\Theta$ [Graus]	Densidade [pcf]	Tamanho de Célula [pol]	Módulo de Young [Pa]	Módulo de Young segundo literatura [Pa]	Erro [%]	Coef. de Poisson da estrutura	Coef. de Poisson segundo literatura	Erro [%]
1	7,5	4,5	0,083	3,49E+07	2,80E+07	24,5	0,153	0,150	2,2
2	-15	3	0,375	8,51E+05	7,89E+05	7,9	-0,208	-0,205	1,5
3	-22,5	4,5	0,25	7,50E+05	7,32E+05	2,5	-0,279	-0,276	1,0
4	7,5	2,5	0,25	4,39E+06	4,54E+06	3,3	0,154	0,150	3,2
5	7,5	6,5	0,25	7,39E+07	7,93E+07	6,9	0,160	0,150	7,0
6	30	3	0,125	5,95E+05	5,71E+05	4,0	1,002	1	0,3
7	37,5	4,5	0,25	1,04E+06	1,02E+06	1,5	1,551	1,555	0,3
8	-15	6	0,375	6,76E+06	6,29E+06	7,5	-0,209	-0,205	1,8
9	7,5	4,5	0,416	2,50E+07	2,54E+07	1,8	0,161	0,150	7,8
10	-15	6	0,125	7,02E+06	6,59E+06	6,5	-0,205	-0,205	0,1
11	-15	3	0,125	8,81E+05	8,24E+05	6,9	-0,205	-0,205	0,2
12	30	6	0,125	4,73E+06	4,57E+06	3,6	1,053	1	5,4
13	7,5	4,5	0,25	2,54E+07	2,67E+07	4,7	0,157	0,150	4,7
14	30	6	0,375	4,13E+06	4,30E+06	3,8	1,008	1	0,8
15	30	3	0,375	5,14E+05	5,33E+05	3,5	1,005	1	0,6

Fonte: Autoria própria

Com base nestes resultados, podem-se destacar alguns experimentos. O experimento 5, por exemplo, foi o que obteve o maior módulo de Young, partindo de uma estrutura com alta densidade (6,5 pcf), um ângulo  $\Theta$  pequeno e positivo (7,5

graus) e um tamanho de célula intermediário (0,25 pol). Enquanto isto, o experimento 15 foi o que demonstrou o menor módulo de elasticidade, partindo de uma baixa densidade (3 pcf), um ângulo  $\Theta$  positivo e grande dentro do domínio de estudo (30 graus) e um tamanho de célula também elevado (0,375 pol). Já para o coeficiente de Poisson, os extremos para esta propriedade são populados pelos experimentos 7 e 3. O experimento 7, apresentou um coeficiente de Poisson de aproximadamente 1,5 parte do maior ângulo utilizado (37,5 graus), uma densidade média (4,5 pcf) e um tamanho de célula intermediário (0,25 pol). O experimento 3, por outro lado, apresentou um coeficiente de Poisson aproximado de -0,28 parte do menor ângulo experimentado (-22,5 graus), uma densidade média (4,5 pcf) e um tamanho de célula também intermediário (0,25 pol).

Além destes pontos extremos mencionados, quando isolados os pontos de estudo que apresentam 2 parâmetros fixos e o terceiro variado, pôde-se observar alguns padrões de comportamento da estrutura. Para todos os experimentos que obtiveram o mesmo valor numérico para o ângulo e para a densidade, foi observado que quanto menor o tamanho de célula, maior o módulo de Young. Da mesma maneira, quando observados os resultados para os experimentos que tinham o mesmo tamanho de célula e o mesmo ângulo, prevaleceu a tendência de que quanto maior a densidade, maior o módulo de Young.

Para uma análise mais quantitativa dessa influência, pode-se, ainda, a partir dos experimentos utilizados, realizar uma comparação de influência dos fatores dentro do domínio de estudo. Para esta comparação, foram utilizados 3 subgrupos de experimentos. O primeiro contém os experimentos 2 e 11, ambos possuindo um ângulo de -15 graus e densidade de 3 pcf. Quando se varia o tamanho de célula de 0,375 para 0,125 polegadas, valores estes que representam os extremos do domínio de estudo para este parâmetro, observa-se um aumento em 1,04 vezes no módulo de Young. Para o segundo subgrupo, contendo os experimentos 2 e 15, tem-se que ambos apresentam uma densidade de 3 pcf e um tamanho de célula de 0,375 polegadas. Quando variado o ângulo de 30 para -15 graus, valores que analogamente também representam os extremos do domínio de estudo para este parâmetro, observa-se um aumento em 1,48 vezes no módulo de Young. Já para o subgrupo 3, que apresenta os experimentos 6 e 12, tem-se que ambos apresentam um ângulo de 30 graus e um tamanho de célula de 0,125 polegadas. Quando variada a densidade de 3 para 6 pcf, valores representativos dos extremos do domínio de estudo para a

densidade, observa-se dessa vez um aumento em 8 vezes no módulo de Young. Portanto, quando comparadas as influências isoladas de cada parâmetro nos experimentos mencionados, pode-se concluir que, dentro dos domínios de estudo, para as variações sugeridas, a densidade é cerca de 7,7 vezes mais influente comparada ao tamanho de célula, e 5,4 vezes mais influente do que o ângulo em termos de módulo de Young. Ressalta-se que, essa é uma análise superficial e simplista de experimentos selecionados, que sugere padrões que possivelmente não são reproduzidos em todos os cenários e campos do domínio de estudo. Essa comparação sumarizada foi descrita pela tabela 8.

**Tabela 8 – Comparação quantitativa dos efeitos**

Subgrupo	Experimentos	Parâmetro Variado	De	Para	Fator de Aumento	Varição Absoluta [Pa]
1	2 e 11	Tamanho	0,375 pol	0,125 pol	1,04	3,50E+04
2	2 e 15	Ângulo	-15 graus	30 graus	1,48	2,56E+05
3	6 e 12	Densidade	3 pcf	6 pcf	8,00	4,00E+06

**Fonte: Autoria própria**

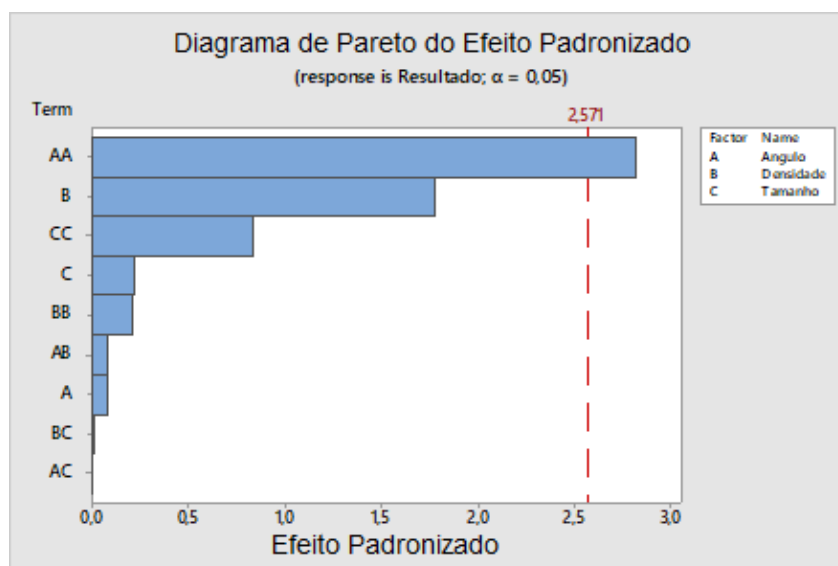
Quanto ao coeficiente de Poisson, ao realizar a mesma análise, se confirma o sugerido pela literatura revisada de que o único fator que influencia esta propriedade de maneira relevante é o ângulo. Quando utilizada a formulação presente na literatura, todos os experimentos com o mesmo ângulo apresentam o mesmo coeficiente de Poisson, independentemente dos outros dois parâmetros. As variações no coeficiente de Poisson para esses experimentos provenientes dos resultados das simulações em Abaqus estão associadas a margem de erro do método. Quanto maior o ângulo no sentido positivo, maior foi o coeficiente de Poisson, também positivo. Quanto maior este ângulo no lado negativo, mais auxético o comportamento da estrutura, ou seja, maior o coeficiente de Poisson, desta vez negativo.

## 4.2 Resultados do Planejamento de Experimentos

A partir dos resultados obtidos para cada experimento, uma análise complementar foi realizada inserindo os valores dos módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson no *software* Minitab. A primeira característica que pode ser observada a partir dos resultados disponibilizados pelo *software* Minitab é a influência

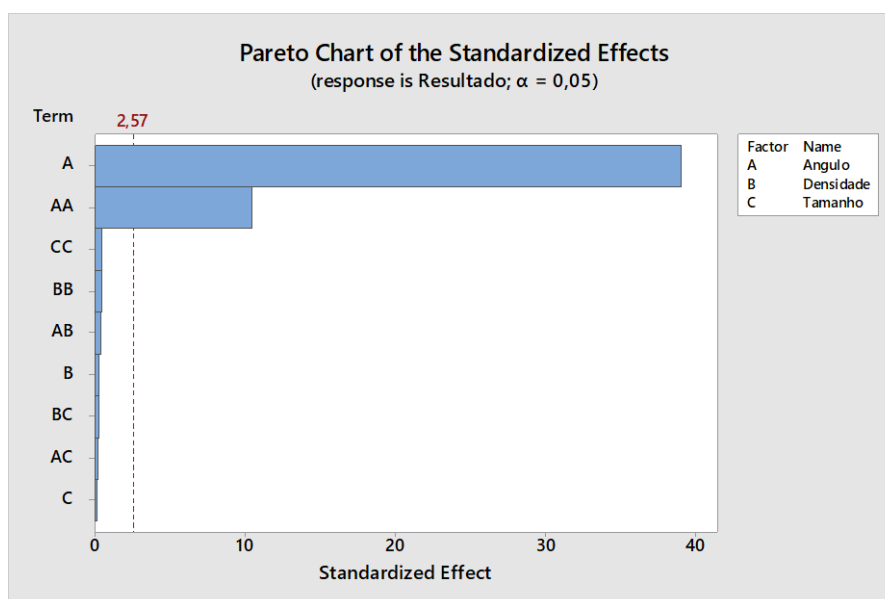
dos parâmetros sobre as variáveis resposta. As Figuras 24 e 25 ilustram os diagramas de Pareto destas influências sobre o módulo de Young e o coeficiente de Poisson respectivamente.

**Figura 24 – Efeito padronizado dos parâmetros sobre o módulo de Young**



Fonte: Autoria própria

**Figura 25 – Efeito padronizado dos parâmetros sobre o coeficiente de Poisson**



Fonte: Autoria própria

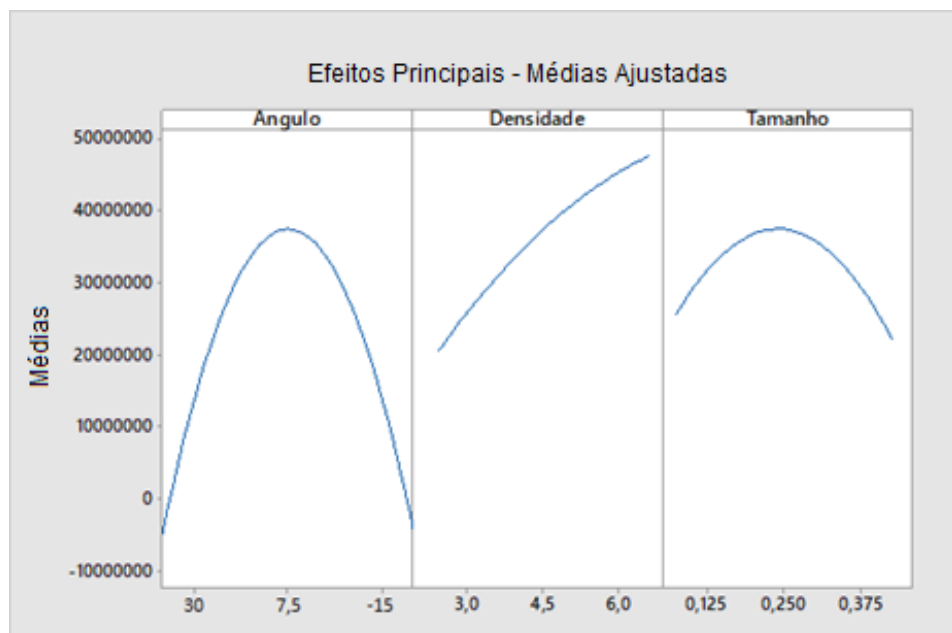
Analisando o gráfico de Pareto, são considerados estatisticamente significativos, ao nível de 95% de confiança, os fatores que cruzam a linha de

referência do nível de significância ( $\alpha = 100\% - 95\% = 0,05$ ). Os valores representados pelos rótulos “AB”, “BC” e “AC” indicam as interações entre os fatores e os rótulos “AA”, “BB” e “CC” são os termos quadráticos. Quando observada a influência dos parâmetros no Módulo de Young, pode-se notar que, para este estudo de DOE, somente o termo quadrático do ângulo é estatisticamente significativo. Nesse caso, é possível concluir que as mudanças nessas variáveis estão associadas à variável de resposta, mas a associação não é linear (Minitab). Os outros fatores não são estatisticamente significativos, não sendo possível rejeitar a hipótese nula. Já no gráfico de Pareto referente ao coeficiente de Poisson, o único fator estatisticamente significativo é o ângulo, juntamente com o seu termo quadrático. É possível afirmar que alterações nesse fator afetam a variável de resposta e que a superfície de resposta correspondente contém curvatura (Minitab). Estas afirmações não implicam que os fatores, considerados não significativos, não exercem qualquer influência nas variáveis resposta, mas que, possivelmente, os valores dos níveis escolhidos para cada fator não foi apropriada.

O gráfico de efeitos principais pode ser utilizado para melhor ilustrar as afirmativas anteriores. Nesse gráfico é possível verificar a diferença entre os valores dos níveis de cada fator. Quanto maior essa diferença, ou seja, quanto maior a inclinação com a horizontal da linha que representa os pontos, maior a magnitude do efeito do fator. Por outro lado, quanto mais horizontal essa linha estiver traçada, menos influência o fator tem sobre a variável resposta, pois cada nível do fator afeta a variável resposta de modo similar, sendo a variação do fator em si pouco significativa para a variável resposta. Porém, a análise da influência de um fator deve levar em conta tanto o gráfico de Pareto quanto o de efeitos principais para chegar a conclusões assertivas. Se um fator tem seu termo quadrático mais significativo que seu termo linear e seu termo linear é considerado não estatisticamente significativo, não se pode comparar a sua influência baseado na inclinação observada no gráfico de efeitos principais. É possível observar, por exemplo, na Figura 26 que, para o módulo de Young, o ângulo tem uma parábola como representação sugerida para o efeito deste fator frente à sua variação. Essa representação é coerente com o gráfico de Pareto presente na Figura 24, que demonstra uma significância maior do termo quadrático do ângulo (AA) sobre o módulo de Young quando comparado ao termo linear (A). Porém, pelo fato do termo linear A não ser estatisticamente significativo, não se pode afirmar que ele é o efeito principal para esta propriedade, mesmo que o fator ângulo

tenha a maior inclinação observada no gráfico de efeitos principais. O mesmo ocorre para o tamanho de célula, representado pelos termos C e CC, com a diferença de que, dessa vez, o termo quadrático também não é estatisticamente significativo. Enquanto isso, nota-se que para o intervalo de estudo, o efeito da densidade, representado pelos termos B e BB, teve uma representação sugerida que se aproxima de um comportamento mais linear, também coerente com o gráfico de Pareto que demonstra uma significância para o termo linear quando comparado ao quadrático.

**Figura 26 – Gráfico dos efeitos principais para o módulo de Young**

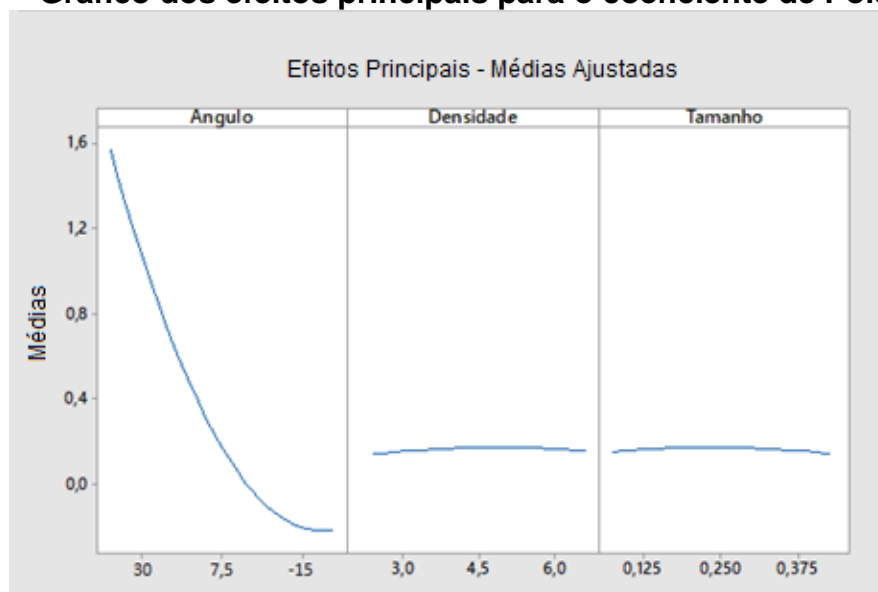


Fonte: Autoria própria

Já para o coeficiente de Poisson, quando analisada a Figura 27, nota-se que o ângulo tem o efeito de maior inclinação. Não apenas isso, ambos os termos linear e quadrático são estatisticamente significativos e portanto o ângulo representa, para essa propriedade, o efeito principal. Enquanto isso, os efeitos da densidade e do tamanho, dentro dos limites dos níveis, estão representados de maneira similar a uma reta horizontal, tendo em vista que seus valores afetam minimamente o valor das variável resposta. A Figura 25 ilustra que, de fato, os efeitos dos fatores densidade e tamanho são ínfimos quando comparados ao efeito do ângulo sobre o coeficiente de Poisson. Estes resultados corroboram com a afirmação feita na análise dos

experimentos, na qual afirma-se que o ângulo é o único fator relevante para o valor do coeficiente de Poisson.

**Figura 27 – Gráfico dos efeitos principais para o coeficiente de Poisson**

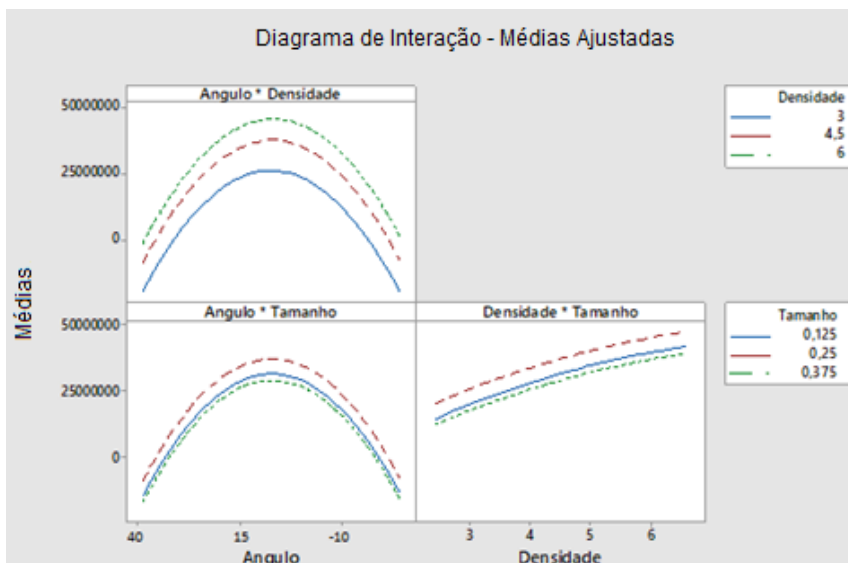


Fonte: Autoria própria

Além da análise dos efeitos dos fatores separadamente, pode-se verificar a interação entre os mesmos e qual a influência nas propriedades. As Figuras 28 e 29 representam os gráficos de interação extraídos da análise com o *software* Minitab. Em cada bloco de cada gráfico, os fatores são analisados dois a dois, buscando entender como a relação entre um fator e uma resposta contínua depende do valor do segundo fator escolhido.

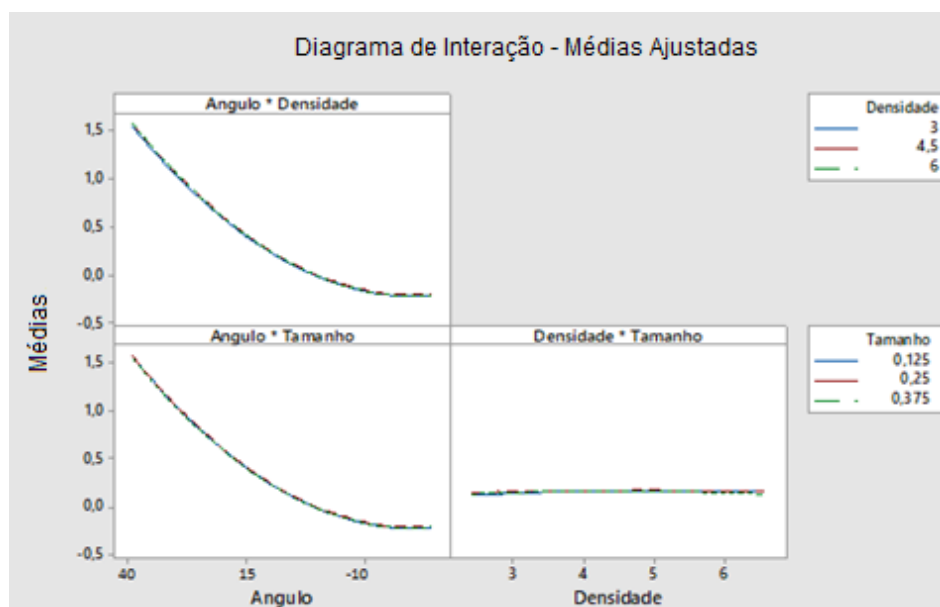


**Figura 28 – Gráfico de interação para o módulo de Young**



Fonte: Autoria própria

**Figura 29 – Gráfico de interação para o coeficiente de Poisson**



Fonte: Autoria própria

Nos dois gráficos tem-se linhas paralelas ou quase paralelas. Neste caso não há uma interação ou a interação entre os fatores é muito fraca, pois as linhas não se cruzam. Analisando as interações “AB”, “BC” e “AC” no gráfico de Pareto de ambas as propriedades em conjunto com os gráficos de interação, pode-se afirmar que a

interação entre os fatores escolhidos, quando existente, é muito pequena e não interfere de maneira significativa nos resultados obtidos.

Além da análise da influência dos fatores, é necessário que o modelo gerado represente de forma confiável o comportamento da variável resposta. Para verificar a acurácia dos modelos gerados, pode-se observar a tabela 9, com informações extraídas do *software*. O indicador “S” representa o desvio padrão da distância entre os valores dos dados e os valores ajustados (Minitab). Em outras palavras, representa a discrepância entre o resultado do valor ajustado pelo modelo e o resultado real do valor. Portanto, quanto menor o valor de S, mais assertivo é o modelo de regressão (Minitab). Já o indicador  $R^2$  representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, portanto, quanto mais próximo de 100% está o valor de  $R^2$ , melhor o modelo ajusta os dados (Minitab). Analisando os valores encontrados para o modelo de regressão referente ao Módulo de Young, percebe-se que o valor de S é demasiado alto e, comparativamente, é maior que alguns resultados encontrados para a propriedade. Observa-se também que o valor de  $R^2$  é baixo, ou seja, o modelo explica somente 69,58% da variação na resposta. Isso significa que vários pontos fornecidos estão afastados da linha de regressão ajustada. Já para o coeficiente de Poisson, o valor de  $R^2$  é alto, então os pontos fornecidos e pontos ajustados tem valores similares. Porém, o valor de S ainda é proporcionalmente alto, pois representa cerca de 3,5% do maior valor em módulo encontrado e 36% do menor valor em módulo.

**Tabela 9 – Resumo de características do modelo de regressão**

Variável resposta	S	$R^2$
Módulo de Young ( $E$ )	18587729 Pa	69,58%
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,055	99,70%

Fonte: Autoria Própria

Com base em todos os dados apresentados, as equações de regressão encontradas e respectivas superfícies de resposta não representam fielmente o comportamento da estrutura frente à variação de parâmetros. A equação de regressão encontrada para o módulo de Young ( $E$ ) pode ser descrita pela Equação 5:

$$\begin{aligned}
 E = & -342677756 + 3778379 * A + 12233674 * B + 212839421 * C \\
 & - 11535 * A^2 - 770671 * B^2 - 443657992 * C^2 \\
 & + 7957 * A * B + 8689 * A * C - 499333 * B * C
 \end{aligned} \tag{5}$$

onde  $A$  representa o fator ângulo,  $B$  a densidade e  $C$  o tamanho de célula. Já a equação 6 representa a equação de regressão para o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ).

$$\begin{aligned}
 \nu = & 5,745 - 0,05606 * A + 0,074 * B + 0,36 * C + 0,000128 * A^2 \\
 & - 0,0051 * B^2 - 0,74 * C^2 - 0,000101 * A * B \\
 & + 0,00079 * A * C - 0,032 * B * C
 \end{aligned} \tag{6}$$

A fim de testar a acuracidade das equações de regressão resultantes, os valores de entrada para os parâmetros de cada experimento foram inseridos nessas equações. Essa análise foi feita com o objetivo de comparar o resultado provindo do Abaqus, os resultados provenientes dos modelos matemáticos existentes na literatura e os resultados preditivos das equações de regressão. Esses resultados e comparações estão presentes nas Tabelas 10 e 11 e a comparação utilizou a equação (7) para o cálculo do percentual de erro obtido, onde  $R$  representa o resultado obtido pelas equações de regressão e  $S$  representa o resultado obtido pelas simulações ou pela utilização das fórmulas presentes na literatura.

$$\text{Erro}[\%] = \frac{|R-S|}{S} * 100 . \tag{7}$$

**Tabela 10 – Comparação do módulo de Young obtido por simulação, da literatura e por regressão**

Exp.	Módulo de Young - Equação de Regressão	Módulo de Young - literatura	Erro em relação a literatura [%]	Módulo de Young - simulação	Erro em relação a simulação [%]
1	2,67E+07	2,80E+07	4,87	3,49E+07	23,56
2	-5,59E+06	7,89E+05	808,03	8,51E+05	756,23
3	-3,59E+06	7,32E+05	590,70	7,50E+05	578,67
4	2,13E+07	4,54E+06	368,99	4,39E+06	384,96
5	4,72E+07	7,93E+07	40,47	7,39E+07	36,06
6	-3,13E+06	5,71E+05	647,87	5,95E+05	626,61
7	-4,77E+06	1,02E+06	566,22	1,04E+06	559,45
8	1,48E+07	6,29E+06	134,64	6,76E+06	118,30
9	2,34E+07	2,54E+07	7,97	2,50E+07	6,27
10	1,73E+07	6,59E+06	162,51	7,02E+06	146,46
11	-3,42E+06	8,24E+05	515,21	8,81E+05	488,31
12	1,54E+07	4,57E+06	238,18	4,73E+06	226,51
13	3,73E+07	2,67E+07	40,11	2,54E+07	47,08
14	1,27E+07	4,30E+06	195,46	4,13E+06	207,24
15	-5,49E+06	5,33E+05	1131,20	5,14E+05	1168,08

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 11 – Comparação do coeficiente de Poisson obtido por simulação, da literatura e por regressão**

Exp.	Coef. de Poisson - Equação de Regressão	Coef. de Poisson - literatura	Erro em relação a literatura [%]	Coef. de Poisson - simulação	Erro em relação a simulação [%]
1	0,158	0,150	5,49	0,153	3,18
2	-0,213	-0,205	-3,68	-0,208	2,15
3	-0,208	-0,276	-24,54	-0,279	25,29
4	0,147	0,150	1,61	0,154	4,68
5	0,161	0,150	7,54	0,160	0,49
6	1,034	1,000	3,40	1,002	3,11
7	1,480	1,555	4,86	1,551	4,61
8	-0,228	-0,205	-11,14	-0,20	9,12
9	0,150	0,150	0,24	0,161	7,04
10	-0,219	-0,205	-6,75	-0,205	6,61
11	-0,228	-0,205	-10,97	-0,205	11,20
12	1,069	1,000	7,00	1,053	1,55
13	0,174	0,150	16,55	0,157	11,31
14	1,043	1,000	4,32	1,008	3,46
15	1,031	1,000	3,12	1,005	2,53

Fonte: Autoria Própria

Como é possível observar na Tabela 10, os resultados provenientes da equação de regressão para o módulo de Young diferem de forma desproporcional dos resultados obtidos através do *software* Abaqus, retornando valores de erro percentual de mais de 1000%. Já para o coeficiente de Poisson, como pode ser verificado na Tabela 11, a equação de regressão gerada retorna valores relativamente próximos aos valores encontrados na simulação e na literatura. Porém, os resultados ainda são demasiadamente discrepantes, com erros percentuais de até 25%.

A escolha de intervalos de estudo reduzidos para densidade e tamanho de célula pode ser vista como causa da não identificação dos fatores pelo método DOE como significativos e, conseqüentemente, da baixa acuracidade averiguada para as equações de regressão para o coeficiente de Poisson e o módulo de Young. Levando em consideração que os domínios de estudo para estes parâmetros foram escolhidos com base em catálogos comerciais existentes, optou-se por não redefinir estes intervalos, mas abordar o fato de que, para as estruturas comercialmente disponíveis, a análise pela metodologia DOE não se mostrou adequada e capaz de gerar superfícies de resposta com acuracidade.

## 5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados para as simulações propostas, foi possível validar a metodologia utilizada por meio da comparação dos resultados encontrados por meio das simulações com os resultados obtidos pelas fórmulas presentes na literatura revisada, uma vez que os resultados apresentados pelas simulações foram similares aos obtidos por meio de equações encontradas na literatura. A coerência dos resultados encontrados valida esta metodologia escolhida para avaliar propriedades de estruturas celulares por meio do método computacional de elementos finitos, possibilitando a utilização da mesma em futuros estudos e para outras propriedades mecânicas não abordadas neste estudo.

O presente trabalho pode ser utilizado como guia para a seleção de uma possível configuração de estrutura celular em aplicações reais. Tendo em vista as necessidades de projeto e se utilizando as tabelas de resultados encontrados neste estudo, é possível escolher uma combinação satisfatória. Em outra etapa de análise levantou-se a hipótese de que, para o domínio de estudo, não se mostrou adequada a utilização do método de planejamento de experimentos (DOE), visto que dois dos parâmetros propostos apresentavam intervalos pequenos de variação baseados em catálogos comerciais existentes. Tal configuração não possibilitou que a metodologia gerasse as superfícies de resposta e as equações de regressão esperadas, que mapeariam o comportamento da estrutura frente à variação dos parâmetros escolhidos com considerável precisão. Outra hipótese, é de que as configurações utilizadas no software Minitab para a geração das equações de regressão que representariam o comportamento da estrutura frente a variação dos parâmetros geométricos selecionados não foram adequadas. A escolha pela utilização de equações quadráticas, por exemplo, pode não ter sido apropriada, visto que as equações encontradas na literatura continham termos ao cubo e termos de seno e cosseno, não utilizados na equação de regressão gerada neste estudo.

Tendo em vista o interesse crescente pela utilização de estruturas celulares, sugere-se que, em trabalhos futuros sejam refeitas as análises de elementos finitos e posterior análise DOE com intervalos maiores para os parâmetros selecionados, na tentativa de criar uma superfície de resposta confiável para as propriedades elásticas da estrutura. Outra contribuição que agregaria conhecimento ao presente estudo,

seria uma análise comparativa das propriedades que incluísse a variação dos materiais constituintes das estruturas, com o propósito de estudar a aplicabilidade de diferentes materiais em estruturas celulares. As simulações podem também ser aprimoradas com a avaliação tridimensional da estrutura, procurando entender a influência da terceira dimensão nestas propriedades elásticas. Por fim, sugere-se a realização de análises experimentais em modelos físicos das simulações computacionais realizadas neste estudo, com o objetivo de validar e testar a acuracidade dos resultados encontrados.

## REFERÊNCIAS

ASHJARI, Mehrdad; SAADATMAND, Sanaz; RASOULIAN, Akbar. Auxetic Materials Materials with Negative Poisson's Ratio. **Material Sci. & Eng. Int. J.** Edmond, v. 1, n. 2, p. 62-64, 2017.

ATTARD, Daphne; GRIMA, Joseph. Modelling of hexagonal honeycombs exhibiting zero Poisson's ratio. **Phys Status Solidi B.** Weinheim, v. 248, n. 1, p. 52-59, 2011.

BITZER, T. **Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing.** 1<sup>a</sup> ed. New York City: Springer, 1997.

BUTTERFIELD, B. **Three-dimensional structure of wood: An Ultrastructural Approach.** 1<sup>a</sup> ed. New York City: Springer, 1980.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering: an introduction.** 8<sup>a</sup> ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

DAOUDI, N; HARKATI, El Haddi; BOUTAGOUGA, Djamel; LOUAFI, Messaoud. A refined analytical model for studying the effect of the relative density on the homogenised elastic constants of a honeycomb cell structure. **Multidiscipline Modeling in Materials and Structures.** Bingley, v. 14, n. 1, 2017.

EVANS, Ken. Auxetic polymers: a new range of materials. **Endeavour.** Boston, v. 15, n. 4, p. 170-174, 1991.

GIACCHINI, Breno Loureiro. **Uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos.** Belo Horizonte, 2012.

GIBSON, Lorna. J.; ASHBY, Michael F. **Cellular Solids: Structure and Properties.** 2<sup>a</sup> ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

GILES, Harold, F.; WAGNER, John R.; MOUNT, Elridge M. **Extrusion: the definitive processing guide and handbook.** 2<sup>a</sup> ed. Norwich: William Andrew, 2013.



HANLON, MIKE. New Atlas. Tiger fires Hellfire II during French Evaluation, 2006. Notícia. Disponível em: <https://newatlas.com/tiger-fires-hellfire-ii-during-french-evaluation/6616/>. Acesso em: 15 de novembro de 2019.

JANUS-MICHALSKA, M. Study on the Size Effect of Auxetic Cellular Materials. **Int. J. of Applied Mechanics and Engineering**. Cracow, v. 22, n. 3, p. 749-757, 2017.

JOHNSON, Burke R.; CHRISTENSEN, Larry B.; **Educational Research: Quantitative, Qualitative, and Mixed Approaches**. 4<sup>a</sup> ed. SAGE Publications Inc, 2014.

JU, Jaehyung; et. al. Shear compliant hexagonal meso-structures having both high shear strength and high shear strain. **ASME2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference**. Montreal, 2010.

LEE, Jenhee.; CHOI, J. B.; CHOI K. Application of homogenization FEM analysis to regular and re-entrant honeycomb structures. **Journal of Materials Science**. Richmond Hill, v. 31, n. 15, p. 4105-4110, 1996.

LI, Tiantian; et. al. Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties. **Materials & Design**. Amsterdam, v. 142, p. 247-258, 2018.

LOGAN, Daryl. **A first course in the Finite Element Method**. 5<sup>a</sup> ed. Boston: Cengage Learning, 2011.

PRAWOTO, Yunan. Seeing auxetic materials from the mechanics point of view: A structural review on the negative Poisson's ratio. **Computational Materials Science**. Boston, v. 58, p. 140-153, 2012.

ROBINSON, Peter. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. 2<sup>a</sup> ed. Materials Park: ASM International, 1992.

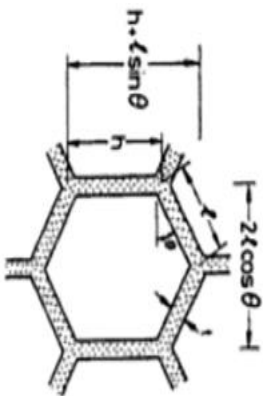
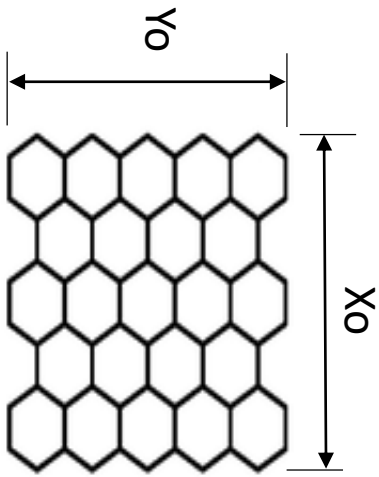
SCARPA, Fabrizio; et. al. Mechanical and electromagnetic behaviour of auxetic honeycomb structures. **The Aeronautical Journal**. Cambridge, v. 107, n. 1069, p. 175-183, 2003.

VESPOLI. **Vespoli High Performance**, 2019. Folheto de publicidade. Disponível em: [http://amandabloom.com/media/VES\\_Printable%20Sell%20Sheet.pdf](http://amandabloom.com/media/VES_Printable%20Sell%20Sheet.pdf). Acesso em: 06 de novembro de 2019.

ZHANG, Xiangwen; YANG, Deqing. Mechanical Properties of Auxetic Cellular Material Consisting of Re-Entrant Hexagonal Honeycombs. **Materials**. Basel, v. 9, n. 11, p. 1-13, 2016

# APÊNDICE A

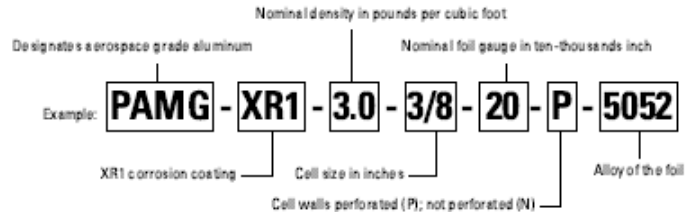
Experimento	Angulo $\theta$ [Graus]	Densidade [pcf]	Tamanho de Célula [pol]	Altura total (Yo) [m]	Largura total (Xo) [m]	Volume Total [m <sup>3</sup> ]	Massa [kg]	Comprimento Vertical (h) [m]	Comprimento Inclinado (l) [m]	Espessura de Parede (t) [m]	Deformação Total em Y [m]	Modulo de Young da estrutura [Pa]	Modulo de Young segundo literatura [Pa]	Deformação Total em X [m]	Deformação Espectral (Ex)	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de Poisson segundo literatura
1	7,5	4,5	0,083388	1,06E-01	1,12E-01	2,53E-07	1,82E-05	0,001068	0,001098	0,00002123	1,26E-03	3,49E+07	2,89E+07	8,24E-03	0,077780831	0,153482915	0,150120902
2	-15	3	0,375	1,14E-01	1,07E-01	5,06E-07	2,43E-05	0,009493053	0,009495053	0,00004124	4,34E-02	8,51E+05	7,89E+05	-1,95E-01	-1,819725196	-0,208665813	-0,205604647
3	-22,5	4,5	0,25	1,08E-01	1,10E-01	4,11E-07	2,98E-05	0,003437	0,003437	0,00003475	6,63E-02	7,50E+05	7,32E+05	-2,40E-01	-2,196097814	-0,279536666	-0,276768654
4	7,5	2,5	0,25	1,08E-01	1,13E-01	4,22E-07	1,68E-05	0,003202	0,003202	0,0000347	1,43E-03	4,39E+06	4,54E+06	4,20E-02	0,37365208	0,154952182	0,150120902
5	7,5	6,5	0,25	1,08E-01	1,13E-01	1,10E-06	1,14E-04	0,003202	0,003202	0,00009005	1,43E-04	7,39E+07	7,93E+07	9,29E-04	0,008244424	0,160554056	0,150120902
6	30	3	0,125	1,11E-01	1,14E-01	3,54E-07	1,70E-05	0,001833087	0,001833087	0,000028018	4,41E-02	5,95E+05	5,77E+05	4,90E-02	0,395872698	1,002810439	1
7	37,5	4,5	0,25	1,08E-01	1,12E-01	1,08E-06	7,77E-05	0,004002	0,004002	0,00008925	7,09E-03	1,04E+06	1,02E+06	4,73E-03	0,042297956	1,551909851	1,558985207
8	-15	6	0,375	1,14E-01	1,07E-01	1,01E-06	9,71E-05	0,009493053	0,009495053	0,00008285	2,74E-03	6,76E+06	6,29E+06	-1,23E-02	-0,114303901	-0,20940247	-0,205604647
9	7,5	4,5	0,416662	1,16E-01	1,15E-01	1,38E-06	9,94E-05	0,00537269	0,00537269	0,0001027	3,99E-04	2,50E+07	2,54E+07	2,44E-03	0,021193993	0,161871256	0,150120902
10	-15	6	0,125	1,05E-01	1,09E-01	3,18E-07	3,08E-05	0,001644	0,001644	0,0000279	7,19E-03	7,02E+06	6,59E+06	-3,63E-02	-0,334439052	-0,205894881	-0,205604647
11	-15	3	0,125	1,05E-01	1,09E-01	1,59E-07	7,66E-06	0,001644	0,001644	0,00001395	1,15E-01	8,81E+05	8,24E+05	-5,80E-01	-5,332487142	-0,205181445	-0,205604647
12	30	6	0,125	1,11E-01	1,14E-01	7,04E-07	6,77E-05	0,001833087	0,001833087	0,00005601	2,77E-03	4,73E+06	4,57E+06	2,69E-03	0,023698256	1,053614183	1
13	7,5	4,5	0,25	1,08E-01	1,13E-01	7,61E-07	5,48E-05	0,003202	0,003202	0,0000626	5,98E-04	2,54E+07	2,67E+07	3,97E-03	0,035764474	0,1571916072	0,150120902
14	30	6	0,375	1,14E-01	1,10E-01	2,07E-06	1,99E-04	0,005499261	0,005499261	0,000164703	1,09E-03	4,13E+06	4,30E+06	1,04E-03	0,009466944	1,008234459	1
15	30	3	0,375	1,14E-01	1,10E-01	1,03E-06	4,98E-05	0,005499261	0,005499261	0,000082103	1,76E-02	5,14E+05	5,33E+05	1,68E-02	0,1530792378	1,005790259	1



## ANEXO A

### PAMG-XR1 5052 aluminum honeycomb is specified as follows:

Trade Name - Corrosion Coating - Density - Cell Size - Foil Gauge - Perforation - Alloy



PAMG-XR1 5052 Mechanical Properties								
			Bare Compressive - typical*		Plate Shear - typical*			
CELL SIZE inch	NOMINAL FOIL GAUGE inch	NOMINAL DENSITY PCF	STRENGTH PSI	MODULUS KSI	STRENGTH PSI		MODULUS KSI	
					"L"	"W"	"L"	"W"
1/8	.0007	3.1	270	75	210	130	45	22
1/8	.001	4.5	520	150	340	220	70	31
1/8	.0015	6.1	870	240	505	320	98	41
1/8	.002	8.1	1400	350	725	455	135	54
3/16	.001	3.1	270	75	210	130	45	22
3/16	.0015	4.4	500	145	330	215	68	30
3/16	.002	5.7	770	220	460	300	90	38
3/16	.0025	6.9	1080	285	590	375	114	46
3/16	.003	8.1	1400	350	725	455	135	54
1/4	.0007	1.6	85	20	85	50	21	11
1/4	.001	2.3	165	45	140	85	32	16
1/4	.0015	3.4	320	90	235	150	50	24
1/4	.002	4.3	480	140	320	210	66	29
1/4	.0025	5.2	670	190	410	265	82	35
1/4	.003	6.0	850	235	495	315	96	40
1/4	.004	7.9	1360	340	700	440	130	52
3/8	.0007	1.0	30	10	45	30	12	7
3/8	.0015	2.3	165	45	140	85	32	16
3/8	.002	3.0	260	70	200	125	43	21
3/8	.0025	3.7	370	105	260	170	55	26
3/8	.003	4.2	460	135	310	200	65	29
3/8	.004	5.4	720	200	430	280	86	36

Tested at 0.625" per AMS C743 Rev A at room temperature. \*Minimum values may be up to 25% lower than typical values.



Plascore, Inc., employs a quality management system that is Nadcap, AS9100, ISO 9001 and ISO 14001 certified.

**IMPORTANT NOTICE:** The information contained in these materials regarding Plascore's products, processes, or equipment, is intended to be up to date, accurate, and complete. However, Plascore cannot warrant that this is always the case. Accordingly, it is a purchaser's or user's responsibility to perform sufficient testing and evaluation to determine the suitability of Plascore's products for a particular purpose. Information in these materials and product specifications does not constitute an offer to sell. Your submission of an order to Plascore constitutes an offer to purchase which, if accepted by Plascore, shall be subject to Plascore's terms and conditions of sale. PLASCORE MAKES NO WARRANTIES OF ANY KIND REGARDING THESE MATERIALS OR INFORMATION, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Plascore owns and shall retain all worldwide rights in its intellectual property, and any other trademarks used in these materials are the property of their respective owners. The information in these materials shall not be construed as an inducement, permission, or recommendation to infringe any patent or other intellectual property rights of any third parties.



#### Corporate Headquarters

**Plascore Incorporated**  
615 N. Fairview St.  
Zeeland, MI 49684-0170  
Phone (616) 772-1220  
Toll Free (800) 830-9257  
Fax (616) 772-1289  
Email sales@plascore.com  
Web www.plascore.com

#### Europe

**Plascore GmbH & Co KG**  
Feldborn 6  
D-55444 Weidauersheim  
Germany  
Phone +49(0) 6707-9143 0  
Fax +49(0) 6707-9143 40  
Email sales.europe@plascore.com  
Web www.plascore.de

## ANEXO B



HexWeb® CR III

Corrosion Resistant Specification Grade Aluminum Honeycomb



Product Data Sheet

**Table I: HexWeb® CR III 5052 Hexagonal Aluminum Honeycomb**

Typical values (typ) are presented below, as well as minimum average (min) for a product type.

Cell Size	Nominal Density pcf	Compressive Strength					Crush Strength psi	Plate Shear					
		Bare		Stabilized		Modulus ksi		L Direction			W Direction		
		Strength psi		Strength psi				Strength psi	Modulus ksi	Strength psi		Modulus ksi	
		typ	min	typ	min					typ	min		typ
1/8	3.1	285	200	300	215	75	130	210	155	45.0	130	90	22.0
1/8	4.5	550	375	570	405	150	260	340	285	70.0	220	168	31.0
1/8	6.1	980	560	1020	680	240	450	560	455	98.0	340	272	41.0
1/8	8.1	1500	1000	1560	1100	350	750	800	670	135.0	470	400	54.0
1/8	10.0	2100p	1575p	2250p	1685p	-	-	980p	735p	175.0p	550p	415p	65.0p
1/8	12.0	2700	2100	2900	2200	900	-	1940	1250	-	1430	1000	-
5/32	2.6	220	150	240	160	55	90	165	120	37.0	100	70	19.0
5/32	3.8	395	285	410	300	110	185	270	215	56.0	165	125	26.4
5/32	5.3	690	490	720	535	15	340	420	370	84.0	270	215	36.0
5/32	6.9	1080	770	1130	800	285	575	590	540	114.0	375	327	46.4
5/32	8.4	1530	1070	1160	1180	370	800	760	690	140.0	475	420	56.0
3/16	2.0	160	90	175	100	34	60	120	80	27.0	70	46	14.3
3/16	3.1	290	200	335	215	75	130	210	155	45.0	125	90	22.0
3/16	4.4	520	360	550	385	145	250	330	280	68.0	215	160	30.0
3/16	5.7	820	560	860	600	220	390	460	410	90.0	300	244	38.5
3/16	6.9	1120	770	1175	800	285	575	590	540	114.0	375	328	46.4
3/16	8.1	1600	1000	1720	1100	350	750	725	670	135.0	480	400	54.0
1/4	1.6	90	60	100	70	20	40	85	60	21.0	50	32	11.0
1/4	2.3	190	120	210	130	45	75	140	100	32.0	85	57	16.2
1/4	3.4	340	240	370	250	90	150	230	180	50.0	140	105	24.0
1/4	4.3	500	350	540	370	140	230	320	265	66.0	200	155	29.8
1/4	5.2	590	500	760	510	190	335	410	360	82.0	265	200	35.4
1/4	6.0	990	630	1100	660	235	430	530	445	96.0	340	265	40.5
3/8	1.0	50	20	55	20	10	25	45	32	12.0	30	20	7.0
3/8	1.6	90	60	95	70	20	40	85	60	21.0	50	32	11.0
3/8	2.3	190	120	200	130	45	75	135	100	32.0	80	57	16.2
3/8	3.0	285	190	310	200	70	120	200	145	43.0	125	85	21.2
3/8	3.7	370	270	410	285	105	180	250	200	55.0	160	115	26.0
3/8	4.2	520	335	560	355	135	220	310	255	65.0	200	150	29.0

Test data obtained at 0.625 inch thickness.

p = preliminary

x = predicted values

l = beam shear for 12.0 pcf products

maximum block size 48 in. x 60 in., maximum thickness = 1.00 in.

Other cell sizes, densities, and dimensions are available on special request. Please contact your nearest Hexcel Sales Office for additional information. One block minimum buy may apply.