

**Rômulo Sily Guimarães Pinto**

**Avaliação numérica de painéis sanduíche com núcleo  
composto por estruturas auxéticas e não auxéticas**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Anderson Pereira

Rio de Janeiro,  
fevereiro de 2022

## **Resumo**

### **Avaliação numérica de painéis sanduíche com núcleo composto por estruturas auxéticas e não auxéticas**

Painéis sanduíches são compostos basicamente de duas placas feitas de material resistente intercaladas por outro material, as combinações e as geometrias do núcleo desses materiais resultam em um ganho na eficiência estrutural. Dessa forma, essas estruturas vêm sendo utilizadas em diversos processos industriais, principalmente na área militar, em situações, por exemplo, de impacto de um projétil, como em carros militares e coletes a prova de bala. Os conceitos abordados neste estudo são de grande interesse pois no caso de painéis sanduíches com estruturas auxéticas, é possível projetar um produto que apresenta uma alta rigidez comparado a uma estrutura não auxética.

O objetivo desta monografia é estudar e avaliar o comportamento de painéis sanduíches com estruturas auxéticas e não auxéticas. O estudo será feito a fim de avaliar a influência dos núcleos compostos por estruturas auxéticas e não auxéticas, pelos resultados das tensões e deslocamentos gerados através de uma força de compressão uniforme na superfície das estruturas. Dessa forma, serão utilizados softwares, como, OpenSCAD [7], para modelar a geometria e o ANSYS [8], para calcular e analisar as propriedades das microestruturas através do método de elementos finitos.

## **Palavras-chave**

Painéis sanduíches, metamateriais, estruturas auxéticas, coeficiente de Poisson negativo, OpenSCAD, ANSYS.

## **Abstract**

### **Numerical evaluation of sandwich panels with a core composed of auxetic and non-auxetic structures**

Sandwich panels are basically composed of two plates made of resistant material interspersed with another material, the combinations and core geometries of these materials realize a structural efficiency gain. Thus, these structures has been used in various industrial processes, especially in the military area, in situations, for example, impact of a projectile, in military cars and bulletproof vests. The concepts addressed in this study are important because in the case of sandwich panels with auxethical structures, it is possible to design a product with high rigidity compared to non-auxethical structures.

The objective of this monograph is to study and evaluate the behavior of sandwich panels with auxetic and non-auxethical structures. The study will be done to evaluate the influence of core composed of auxetic and non-auxethical structures, by the results of displacement and stresses generated through a uniform compression force on the surface of the structures. Thus, will be used software, such as OpenSCAD [7], to model the geometry and ANSYS [8], to calculate and analyze the properties of microstructures through the finite element method.

## **Keywords**

Sandwich panels, metamaterials, auxethical structures, negative Poisson coefficient, OpenSCAD, ANSYS.

## Sumário

1. Introdução.....	8
1.1. Metamateriais.....	8
1.2. Materiais auxéticos.....	9
1.3. Células unitárias auxéticas.....	11
1.4. Painéis sanduíches.....	12
1.5. Objetivos.....	13
2. Fundamentação teórica.....	15
2.1. Modelagem geométrica.....	17
2.2. Análise de elementos finitos.....	21
2.3. Simulação numérica.....	23
3. Resultados.....	28
4. Conclusão.....	35
5. Referências.....	37
6. Anexos.....	41

## Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de treliça no formato de diamante [16] .....	8
Figura 2 – Compressão nos tubos de cerâmica [13] .....	9
Figura 3 – (a) Deformação não-auxética e (b) deformação auxética [19]...	10
Figura 4 – (a) Diagrama de frequência para um edifício de concreto, (b) edifício sobre uma placa homogênea de concreto e (c) edifício sobre uma placa estruturada de metamaterial auxético [14] .....	11
Figura 5 – Célula unitária auxética para suportar ondas sísmicas [14] .....	12
Figura 6 – Painel sanduiche honeycomb [20] .....	12
Figura 7 – (a) Células unitárias cúbicas não auxéticas e (b) célula unitária auxética. ....	15
Figura 8 – Painel sanduiche com núcleo composto por estruturas auxéticas [2] .....	15
Figura 9 – Tensão de flexão [11] .....	16
Figura 10 – Dimensões da célula unitária auxética [2] .....	18
Figura 11 – Código das dimensões da célula unitária auxética. ....	19
Figura 12 – Célula unitária auxética. ....	19
Figura 13 – Painel sanduiche auxético. ....	20
Figura 14 – Célula unitária não auxética [16] .....	20
Figura 15 – Painel sanduiche não auxético. ....	21
Figura 16 – Malha do painel sanduiche não auxético. ....	22
Figura 17 – Malha do painel sanduiche auxético. ....	22
Figura 18 – Peça do painel sanduiche auxético. ....	23
Figura 19 – Peça do painel sanduiche auxético no ANSYS. ....	23
Figura 20 – Suportes fixos e carga no painel sanduiche não auxético. ....	24
Figura 21 – Detalhes dos Suportes fixos no painel sanduiche não auxético. ....	25
Figura 22 – Suportes fixos e carga no painel sanduiche auxético. ....	26
Figura 23 – Detalhes dos Suportes fixos no painel sanduiche auxético. ....	27
Figura 24 – Deslocamento no eixo X no painel sanduiche auxético. ....	28
Figura 25 – Deslocamento no eixo Y no painel sanduiche auxético. ....	28

Figura 26 – Deslocamento no eixo Z no painel sanduiche auxético. ....	29
Figura 27 – Deslocamento no eixo X no painel sanduiche não auxético. ...	29
Figura 28 – Deslocamento no eixo Y no painel sanduiche não auxético. ...	30
Figura 29 – Deslocamento no eixo Z no painel sanduiche não auxético. ...	30
Figura 30 – Tensão axial no eixo Z do painel sanduiche auxético. .....	31
Figura 31 – Tensão axial no eixo Z do painel sanduiche não auxético. .....	32
Figura 32 – Tensão equivalente de von Mises do painel sanduiche auxético. .....	33
Figura 33 – Tensão equivalente de von Mises do painel sanduiche não auxético.....	33

## **Lista de Tabelas**

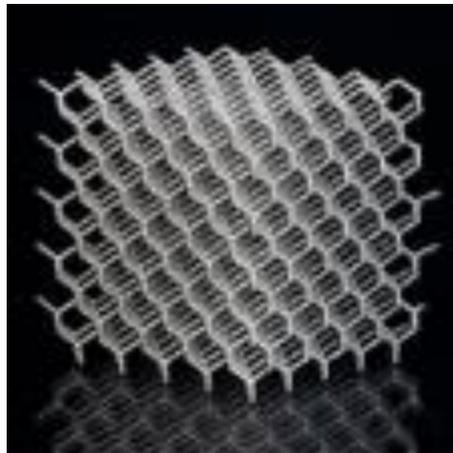
Tabela 1 – Volumes e massas dos painéis sanduiches. ....	21
Tabela 2 – Resultados finais. ....	34

# 1. Introdução

## 1.1. Metamateriais

A palavra “Meta” vem do grego e, significa “além”. Neste caso, interpreta-se para salientar as superiores características deste tipo de material em comparação a um material convencional [15].

Os metamateriais mecânicos podem ser divididos em duas categorias principais, dependendo do seu coeficiente de Poisson, sendo ele positivo ou negativo. Os materiais que possuem um Poisson negativo são mais conhecidos como metamateriais auxéticos, com o formato cúbico, Octet e mais outros tipos. Esses materiais têm recebido muita atenção nos últimos anos, com artigos e pesquisas dedicados ao assunto. Já os materiais com o coeficiente positivo representam os materiais convencionais ou não auxéticos, como borrachas, alumínio, aço e entre outros [16].



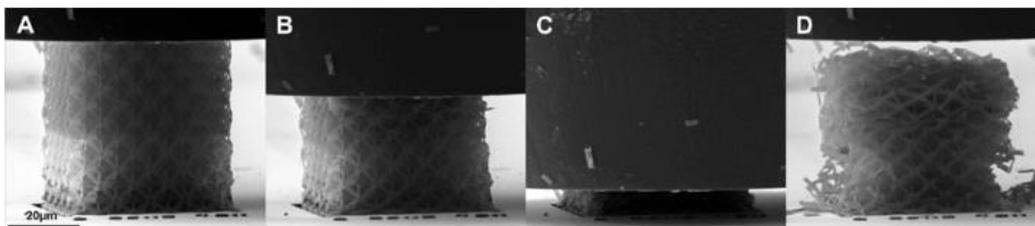
*Figura 1 – Exemplo de treliça no formato de diamante [16].*

Os metamateriais, também conhecidos como materiais arquitetados, caracterizam-se por obterem as propriedades desejadas através das manipulações, em sua geometria, na disposição física, tamanho e orientação das diferentes estruturas que o compõem. Em contrapartida, um material comum, obtém as suas

propriedades através das composições químicas, pelas características do seu material [17].

Esses materiais são artificialmente modificados, com o objetivo de serem projetados conforme as propriedades interessadas, principalmente em busca de uma maior resistência do material contra diversos ciclos de impacto, maior tenacidade à fratura, uma melhor absorção da vibração, maior módulo de cisalhamento [2]. Além de características, como, condutividade elétrica e térmica ideais e uma boa permeabilidade, segundo Al-Ketan & Al Rub [5]. Essas mudanças na topologia da estrutura dos materiais influenciam em seu comportamento físico.

Existem estudos em tubos de cerâmicas que após serem comprimidos, voltam em até aproximadamente 50% do seu estado inicial. Uma pesquisa muito interessante, pois as cerâmicas são materiais frágeis e possuem uma recuperação elástica muito baixa. A técnica utilizada foi construir um painel de microestruturas, para criar uma rede de tubos cerâmicos ocos, que possuem espessura na escala nanométrica [13].



*Figura 2 – Compressão nos tubos de cerâmica [13].*

## **1.2. Materiais auxéticos**

Dentro desta família de metamateriais, os auxéticos estão ganhando espaço na indústria e nas pesquisas, principalmente pela grande procura de elementos estruturais com maior durabilidade e aliada à segurança mesmo tempo.

Um dos principais assuntos a ser abordado com relação as microestruturas auxéticas é o coeficiente de Poisson, ele é a peça-chave para o material atingir as

estruturas específicas e, é dado pela razão entre a deformação transversal e a deformação longitudinal, como mostrada na seguinte equação:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (1)$$

As estruturas auxéticas possuem um coeficiente de Poisson negativo como característica, logo, a geometria das células unitárias auxéticas são responsáveis pelo resultado da deformação longitudinal e transversal terem o mesmo sinal, ou seja, conseguem a expansão e a contração de acordo com a direção de uma força aplicada, diferentemente dos materiais convencionais, nos quais as deformações transversal e longitudinal possuem sinais opostos, segundo Lim [3].

Sendo negativo, as seções transversais e longitudinais diminuem com o aumento da compressão, e aumentam quando tracionadas. Tal comportamento permite obter características mecânicas superiores, tais como a resistência ao impacto, absorção de energia e deformação [18]. A Figura 3, representa o comportamento físico para o efeito de Poisson em materiais convencionais e materiais auxéticos.

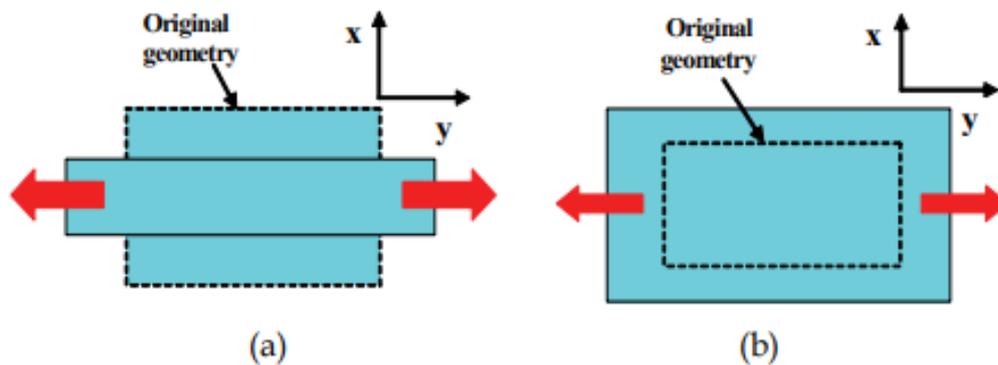


Figura 3 -(a) Deformação não-auxética e (b) deformação auxética [19].

A aplicação dos materiais auxéticos pode ser encontrada, por exemplo, em metamateriais sísmicos, que são aqueles desenvolvidos para neutralizar os efeitos dos terremotos. A chamada “camuflagem sísmica” utiliza materiais estruturados em treliças elásticas que podem envelopar prédios, de forma que eles resistam aos movimentos de um tremor de terra [14].

Testes realizados em pesquisas, mostraram um aumento da rigidez da estrutura com os metamateriais auxéticos em situações de vibrações longitudinais e de cisalhamento, as duas mais recorrentes em abalos sísmicos [14]. Como mostrado na figura 4, a geometria da estrutura auxética para este caso.

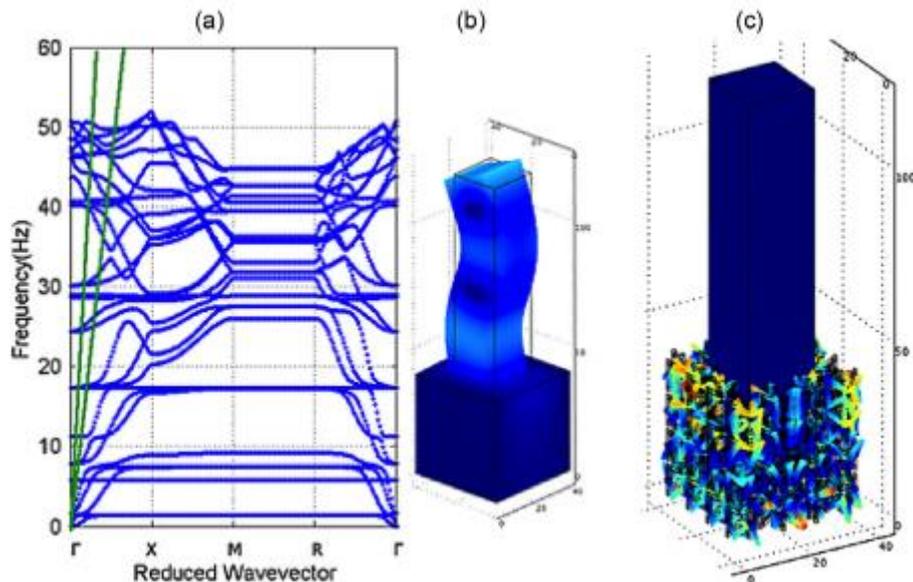


Figura 4– (a) Diagrama de frequência para um edifício de concreto, (b) edifício sobre uma placa homogênea de concreto e (c) edifício sobre uma placa estruturada de metamaterial auxético [14].

### 1.3. Células unitárias auxéticas

As células unitárias possuem um padrão simétrico organizado e são replicadas ao longo de toda a geometria estrutural do material. E para o estudo dessa monografia, as microestruturas serão repetidas e utilizadas no propósito de construir os painéis sanduíches auxéticos e não auxéticos.

A mudança na topologia das microestruturas impacta diretamente nas propriedades mecânicas dos materiais, segundo Becker [6]. Além da geometria, alguns parâmetros da célula unitária auxética como, a espessura, ângulo e altura, também influenciam, como por exemplo, o coeficiente de Poisson [2].

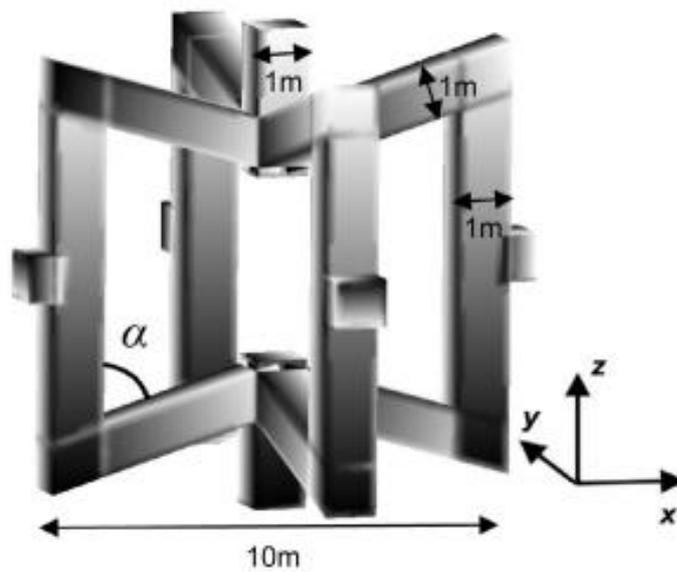


Figura 5 – Célula unitária auxética para suportar ondas sísmicas [14].

#### 1.4. Painéis sanduíches

Uma estrutura do tipo sanduíche é composta basicamente de duas placas feitas de material resistente intercaladas por um conjunto de células unitárias de metamateriais, como por exemplo, células compostas por núcleo *honeycomb*, que apresentam alta razão entre resistência e massa, além de possuírem boa eficiência contra fadiga e alta capacidade de manter sua integridade superficial mesmo sob deformação [20].

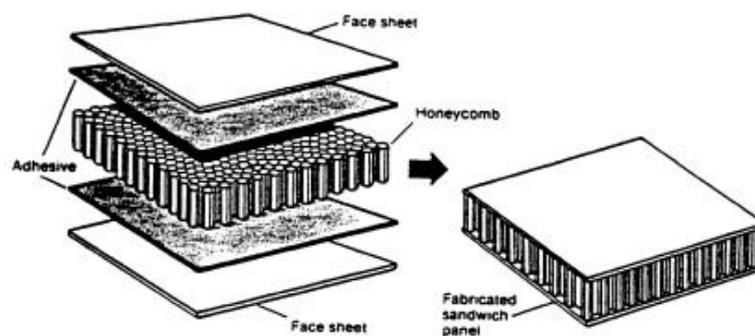


Figura 6 – Painel sanduiche honeycomb [20].

As faces superiores e inferiores do painel sanduíche possuem a função de suportar as tensões geradas, como por exemplo, a tração, que está associada à flexão ocasionada no painel sanduíche. Enquanto isso, o núcleo composto por células unitárias replicadas, tem a função de manter as faces superiores e inferiores separadas uma da outra, para isso, é imprescindível ter uma rigidez elevada entre elas, no intuito de todo o conjunto painel sanduíche funcione e resista as forças acarretadas para a obtenção dos resultados do estudo em questão, como por exemplo, as propriedades elásticas e os valores de resistência [21].

Utilizando as geometrias das células unitárias, replicando-as ao longo dos eixos das abscissas, ordenadas e de cotas, é possível criar um painel sanduíche em busca de uma maior eficiência estrutural, que suporte os vários tipos de pesquisas que envolvem ações dinâmicas, como por exemplo, o impacto de projéteis [1].

## **1.5 Objetivos**

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo avaliar numericamente o comportamento dos painéis sanduíche sob a ação de cargas transversais. O estudo foi realizado no intuito de avaliar numericamente a influência dos núcleos compostos por estruturas auxéticas e não auxéticas nos painéis sanduíches.

Estudando os conceitos relacionados a Materiais de Engenharia, principalmente direcionado ao estudo dos metamateriais e as estruturas auxéticas e não auxética, será possível a compreensão das equações que descrevem o processo de avaliação numérica dos painéis sanduíche, como por exemplo, a resistência dos materiais, que estuda as relações entre as cargas externas aplicadas a um corpo e as deformações provocadas a partir dessa ação dinâmica [11], as propriedades das microestruturas auxéticas, que possuem o coeficiente de Poisson negativo [3] e além disso, será proposto uma comparação entre as duas topologias, auxéticas e não auxéticas, que mostrará as diferentes propriedades mecânicas dos materiais [6].

Para a realização da comparação topológica do projeto, será modelado as geometrias no software OpenSCAD [7] e exportado no formato STL para o

software ANSYS [8], que através do método de elementos finitos, serão analisadas as estruturas com os resultados do deslocamento, da tensão axial devido a flexão e a tensão equivalente de von Mises através de uma força de compressão uniforme aplicada na superfície do painel sanduíche bi apoiada.

## 2. Fundamentação teórica

Para a pesquisa em análise, foram escolhidas as duas geometrias para as células unitárias em estudo: a cúbica e a auxética. É importante frisar que por possuírem geometrias distintas é necessário ter atenção com relação aos seus volumes e massas, de modo a obter resultados satisfatórios.

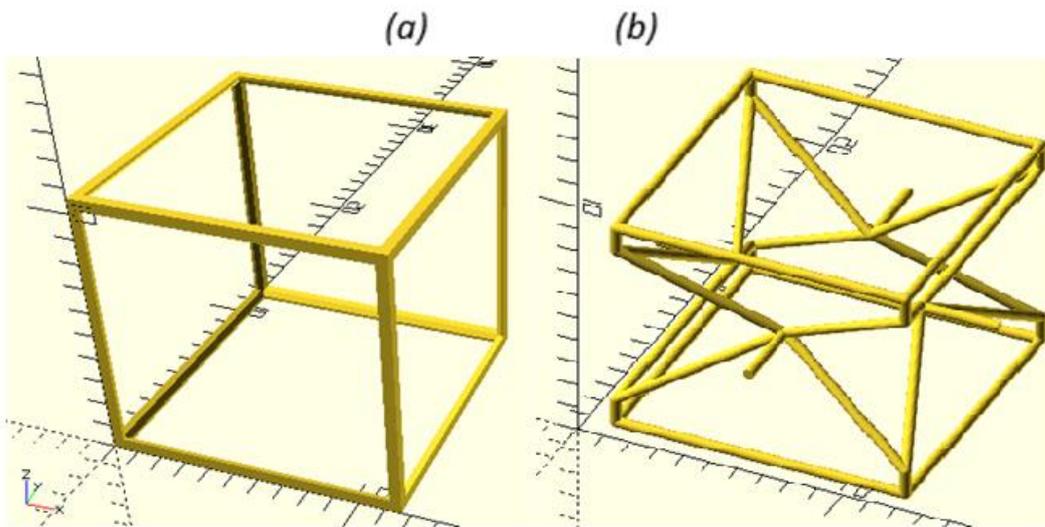


Figura 7 – (a) Célula unitária cúbica não auxética e (b) célula unitária auxética.

Para a construção dos painéis sanduíches e a realização das análises comparativas, foram utilizadas as dimensões, altura ( $10.6134\text{ mm}$ ) e comprimento ( $11.6459\text{ mm}$ ), referentes ao estudo da estrutura auxética [2] como base para a construção da estrutura não auxética [16]. Como será demonstrado com maiores detalhes na seção 2.1.



Figura 8 – Painel sanduíche com núcleo composto por estruturas auxéticas [2].

A criação das modelagens das geometrias, foram realizadas usando o software OpenSCAD [7], onde foi possível modelar as estruturas pelos códigos do programa e então foi possível exportar os arquivos STL para o software ANSYS [8] e consolidar os estudos do coeficiente de Poisson e da tensão normal de flexão para analisar as suas resistências a uma excitação uniaxial de compressão.

Com o intuito de estudar a influência dos parâmetros estruturais geométricos de uma célula unitária auxética e não auxética, será encontrado os valores das tensões e deslocamento através de uma simulação numérica no programa ANSYS [8].

É importante, mencionar o estudo da tensão axial na análise estrutural da geometria, devido a flexão do painel sanduiche perante a uma carga de transversal. O seu máximo valor fornece um dos critérios de falha e modelagem dos componentes mecânicos.

Quando uma viga sofre uma carga como a mostrada na figura 9, as fibras superiores da viga sofrem uma tensão de compressão normal. A tensão no plano horizontal do neutro é zero. As fibras inferiores da viga sofrem uma tensão de tração normal. Pode-se concluir, portanto, que o valor da tensão de flexão irá variar linearmente com a distância da linha neutra e quanto menor o seu valor, maior é a resistência do material [23].

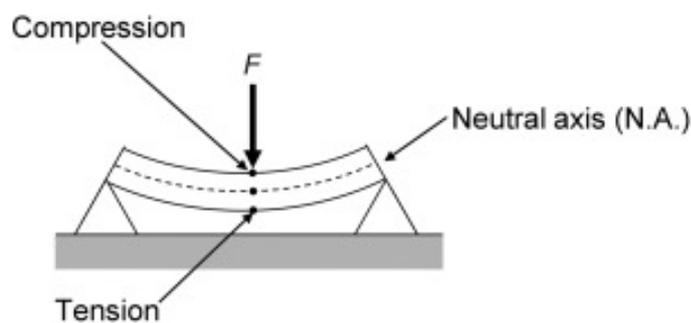


Figura 9 – Tensão de flexão [11].

O valor da tensão de flexão é obtido pela seguinte equação [23]:

$$\sigma_b = \frac{My}{I} \quad (2)$$

Onde  $M$  é o cálculo do momento de flexão,  $y$  é a distância vertical do eixo neutro até a superfície e  $I$  é o momento de inércia no eixo neutro.

Outro fator interessante de ser relatado é o conhecimento sobre o critério de falha de von Mises, o valor da tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eq}$ ) é usada para prevenir o escoamento do material quando submetido a qualquer condição de carregamento, a partir de resultados obtidos de testes, um material se encontra em estado de início de escoamento quando a sua tensão equivalente de von Mises atinge um [11].

O valor da tensão equivalente de von Mises para as tensões principais, é obtido pela seguinte equação [25]:

$$\sigma_{eq}^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (3)$$

E de acordo com o tipo de carregamento, esta equação (3) é simplificada, como por exemplo, em um caso de carregamento uniaxial, a equação de von Mises simplificada é:

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \quad (4)$$

Dessa forma, é importante o conhecimento da teoria que envolve o conteúdo sobre a tensão normal de flexão e tensão equivalente de von Mises. Estes assuntos são essenciais na análise de um dos principais estudos sobre a funcionalidade de um painel sanduíche, a resistência da estrutura perante a uma carga transversal.

## 2.1. Modelagem geométrica

Com as simulações numéricas e a análises experimentais realizadas no artigo [2], foi possível identificar as seguintes escolhas nas dimensões para a construção do painel sanduíche com estrutura auxética:

- Painel sanduíche com dimensões 25 x 25 x 3 de células unitárias;

- Os ângulos  $\theta = 50^\circ$  e  $\gamma = 20^\circ$ ;
- Espessura igual a 2 mm nas faces superiores e inferiores;
- $L = 6.7$  mm;
- $a = 1$  mm;
- $c = 1$  mm;
- $b = L \cos(\gamma) \sin(\theta) (1 - \tan(\gamma)) + c$ ;
- $L_2 = 2L \cos(\gamma) \sin(\theta)$ ;
- $H = 2a + 2L \cos(\theta)$ ;
- $W = 2c + L_2$ ;

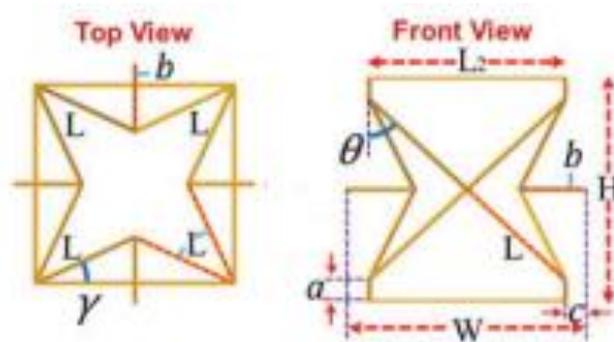


Figura 10 – Dimensões da célula unitária auxética [2].

Com as dimensões da modelagem da célula unitária, foi reproduzida a mesma no software OpenSCAD, que é um programa de linguagem simples de programação usado no intuito de gerar geometrias complexas através da união de formas geométricas básicas, como por exemplo, cilindros e esferas [7].

Neste estudo, em específico, a célula unitária foi reproduzida com 36 nós através de barras cilíndricas e seguindo as medições antes mencionadas, com os seguintes resultados:

- $b = 4.06755$  mm
- $L_2 = 9.64594$  mm
- $H = 10.6134$  mm
- $W = 11.6459$  mm

Dessa maneira, foi criada a linha de código para gerar a peça em estudo:

```
1 //Painel Sanduiche auxético
2
3 theta = 50;
4 gamma = 20;
5 r = 0.2; // mm
6 c = 1; //mm
7 L = 6.7; //mm
8 a = 1; //mm
9 b = L*cos(gamma)*sin(theta)*(1-
    1-tan(gamma)) + c;
10 L2 = 2*L*cos(gamma)*sin(theta);
11 H = 2*a + 2*L*cos(theta);
12 W = 2*c + L2;
```

Figura 11 – Código das dimensões da célula unitária auxética.

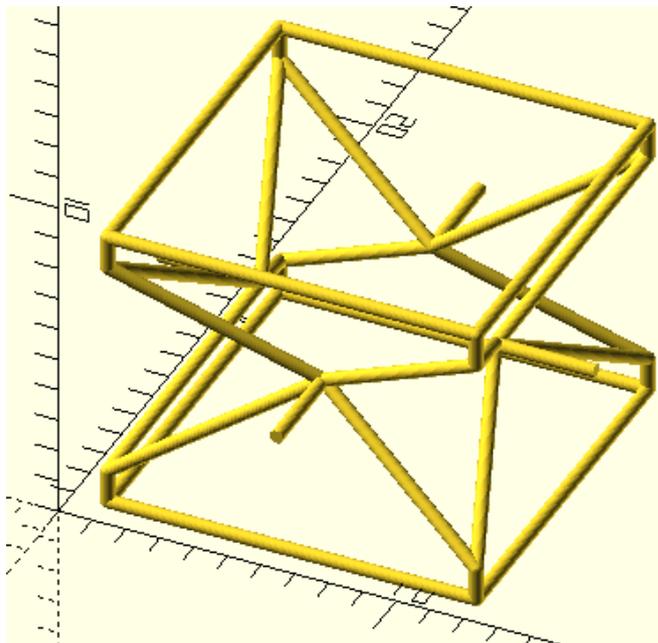
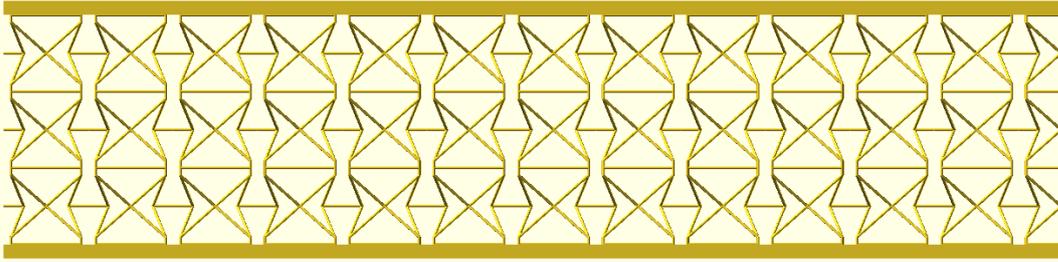


Figura 12 – Célula unitária auxética.

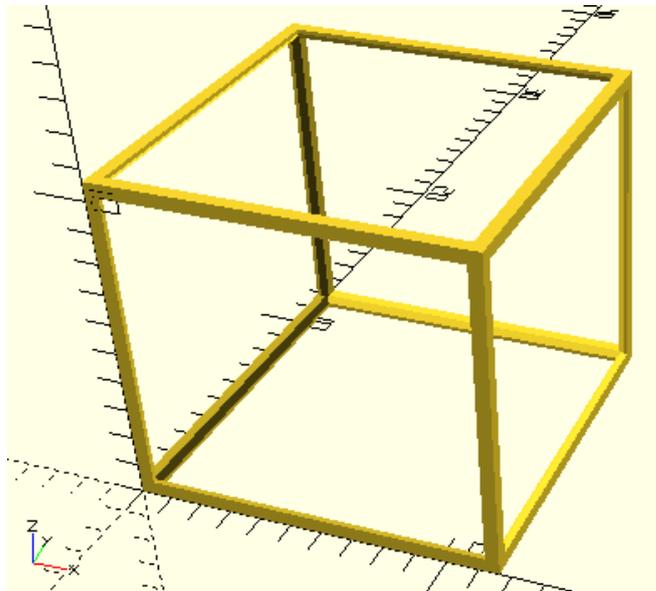
Com a geometria base da célula unitária construída no OpenSCAD [7], a estrutura auxética do painel sanduiche foi então formada através da ligação de uma repetição destas células, além da implantação das faces de 2 mm de espessura, superior e inferior.



*Figura 13 – Painel sanduiche auxético.*

Para a construção do painel sanduiche composto pela estrutura não auxética, foi necessário um cuidado especial no ajuste nas dimensões das suas células unitárias, no intuito de obter um mesmo volume e massa da geometria auxética.

Com isso, foi definida a geometria da célula unitária não auxética com 12 nós através de barras cilíndricas, uma largura igual a  $W = 11.6459 \text{ mm}$ , altura igual a  $H = 10.6134 \text{ mm}$  e o raio da estrutura igual a  $0,44 \text{ mm}$ .



*Figura 14 – Célula unitária não auxética.*

Com a geometria base da célula unitária construída no OpenSCAD [7], a estrutura não auxética do painel sanduiche foi então formada através da ligação de uma repetição destas células, além da implantação das faces de 2 mm de espessura.

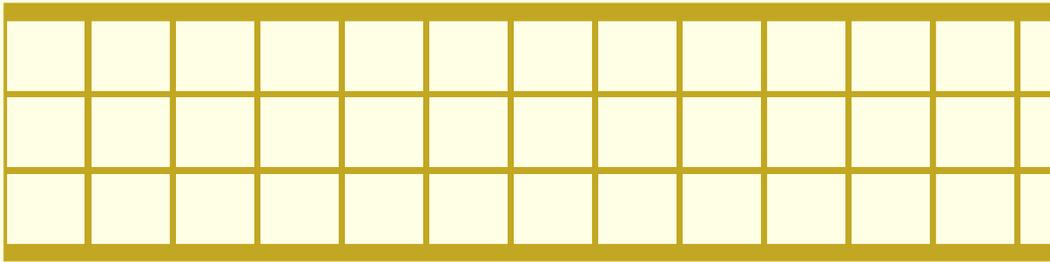


Figura 15 – Painel sanduiche não auxético.

Com o auxílio do programa Autodesk Meshmixer [22], foi possível analisar os volumes e massas finais de cada painel sanduiche.

Painel sanduiche	Volume [mm <sup>3</sup> ]	Massa [kg]
Auxético	7482,7	$5,8739 \times 10^{-2}$
Não auxético	7472,1	$5,8656 \times 10^{-2}$

Tabela 1 – Volumes e massas dos painéis sanduiches.

## 2.2. Análise de elementos finitos

Com a finalização da modelagem geométrica dos painéis sanduiches no OpenSCAD [7], foram exportados os para um arquivo no formato STL para análise no software ANSYS [8], utilizando o método de elementos finitos, gerando uma malha que permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples, ajudando na simulação para prever possíveis falhas nas estruturas [12].

Para que a análise seja feita no ANSYS, é necessária a abertura da estrutura no programa ANSYS Mechanical, onde encontra-se a função de originar a malha e realizar o processo de divisão da estrutura em pequenos elementos finitos.

A confecção da malha é uma etapa imprescindível para a simulação dos painéis sanduiches, ela discretiza a peça em pequenos elementos e que na junção das arestas são compostos de nós. Dessa maneira, para se obter os resultados

satisfatórios na análise de elementos finitos, é necessário ter uma boa perspectiva e um equilíbrio nas escolhas dos parâmetros na construção da geometria da malha.

As Figuras 16 e 17, mostram respectivamente as malhas de elementos finitos, das estruturas não auxéticas e auxéticas, representadas por seus elementos e nós, onde serão resolvidas as equações de interesse.

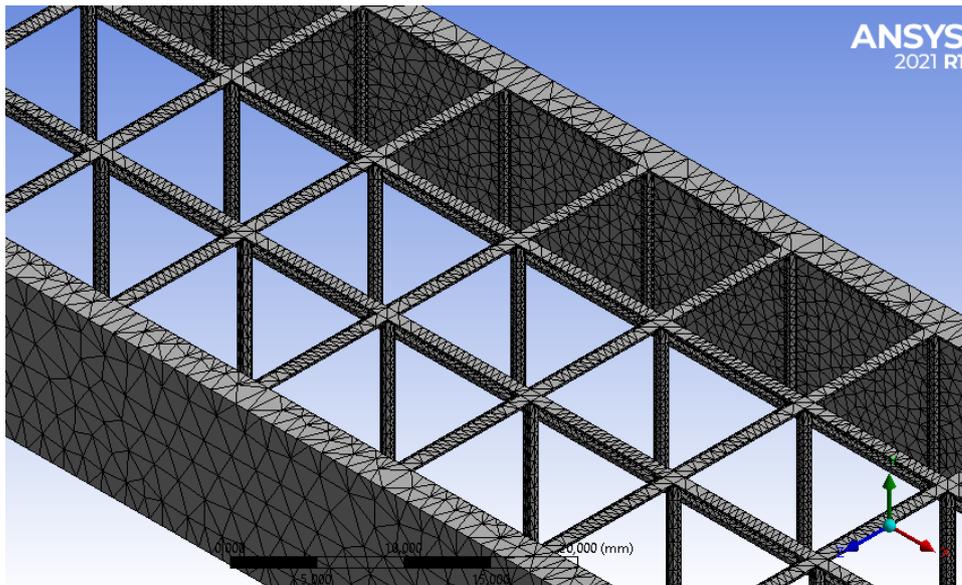


Figura 16 – Malha do painel sanduiche não auxético.

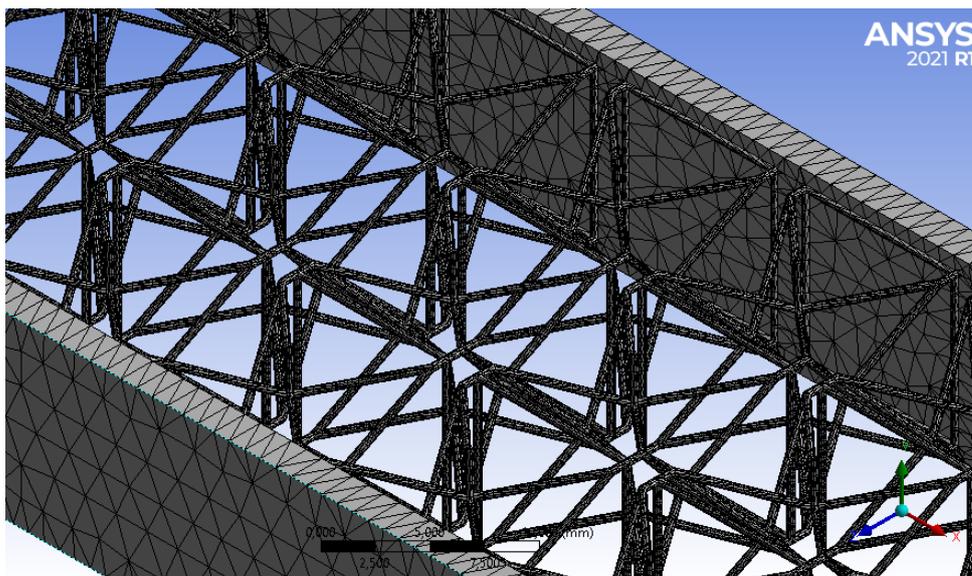


Figura 17 – Malha do painel sanduiche auxético

## 2.3. Simulação numérica

Para a simulação ser feita, após a geração da malha, as dimensões para as análises foram baseadas em uma fatia simétrica do tamanho total do painel sanduíche auxético estudado pelo Imbalzano [2], com uma dimensão 12,5 x 1 x 3 de células unitárias, a fim de simplificar a aplicação das condições de contorno e reduzir o tempo de processamento por conta da falta de recursos computacionais disponíveis para conseguir a simulação.

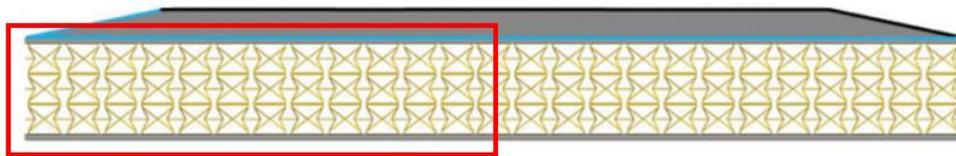


Figura 18 – Peça do painel sanduíche auxético.

O primeiro passo para realizar a simulação é abrir o arquivo STL gerado no OpenSCAD [7] no ANSYS SpaceClaim, software CAD para modelagem de sólidos do próprio ANSYS [8], na intenção de conferir as dimensões e gerar um arquivo no formato. SCDOC, para conseguir abri-lo no ANSYS Workbench, onde será selecionado o tipo de sistema de análise, que para o caso em estudo será um problema estrutural estático.

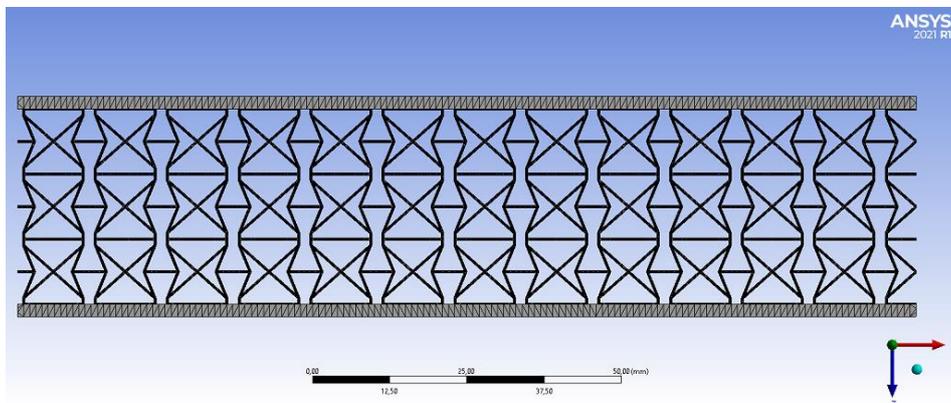


Figura 19 – Peça do painel sanduíche auxético no ANSYS.

Após esta etapa, transfere-se a geometria ao ANSYS Mechanical, a qual tem a função de originar a malha, que neste estudo, o tamanho do elemento definido dentro da configuração da malha foi de 1 milímetro, com 421473 elementos e 805347 nós para a estrutura auxética e 1 milímetro, com 104102 elementos e 208957 nós para a estrutura não auxética, além disso, é o local de escolha do tipo de material a ser simulado, no caso, foi utilizado o aço estrutural com Poisson de 0,3, Módulo de Young 200 GPa e limite de escoamento 250 MPa. Também, é selecionado os parâmetros a serem investigados, como a tensão axial, tensão equivalente de von Mises e os deslocamentos, a colocação da carga de compressão uniforme de 5N na face superior e das condições de contorno, como os apoios bi apoiados nas extremidades, que restringem os deslocamentos.

As figuras 20, 21, 22 e 23, mostram os suportes fixos nas estruturas e a direção e a intensidade da força aplicada nas superfícies superiores das estruturas.

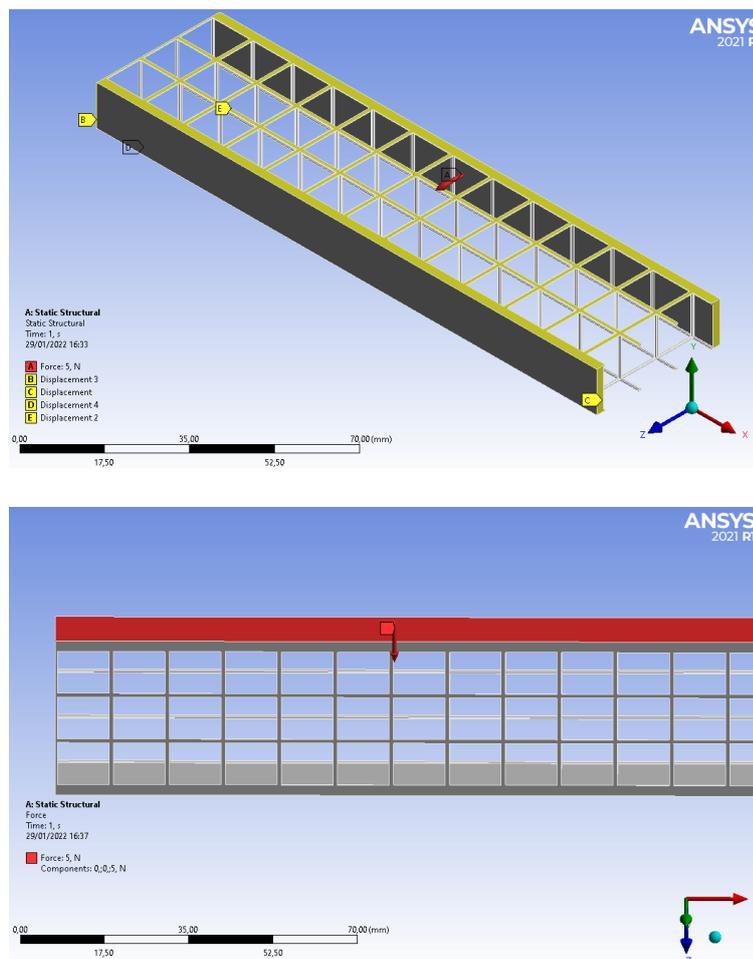


Figura 20 – Suportes fixos e carga no painel sanduiche não auxético.

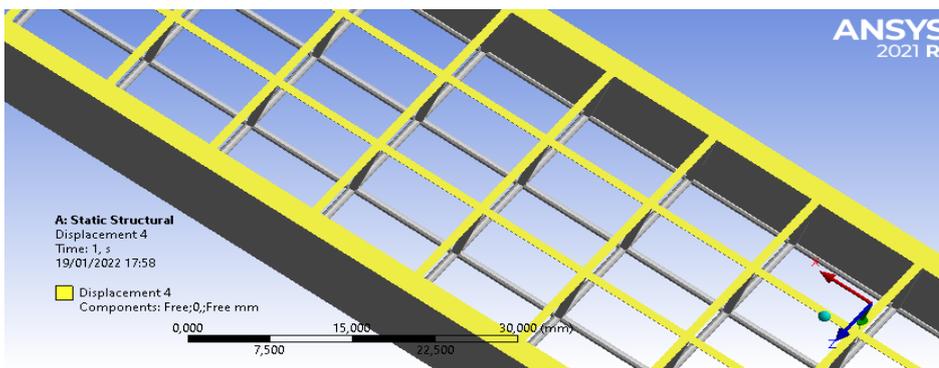
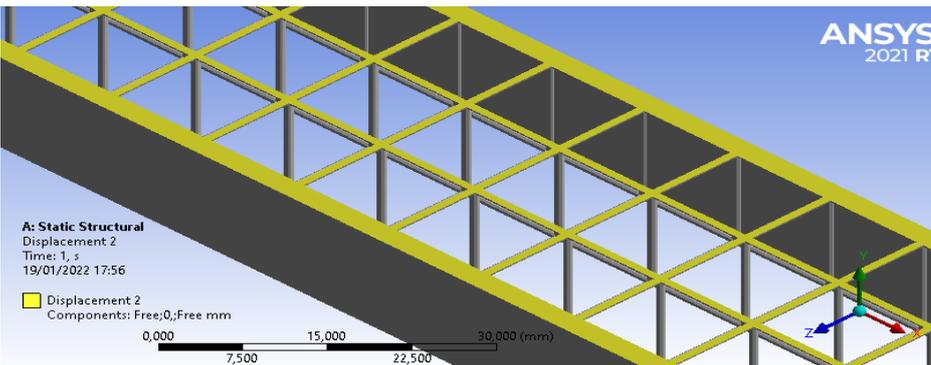
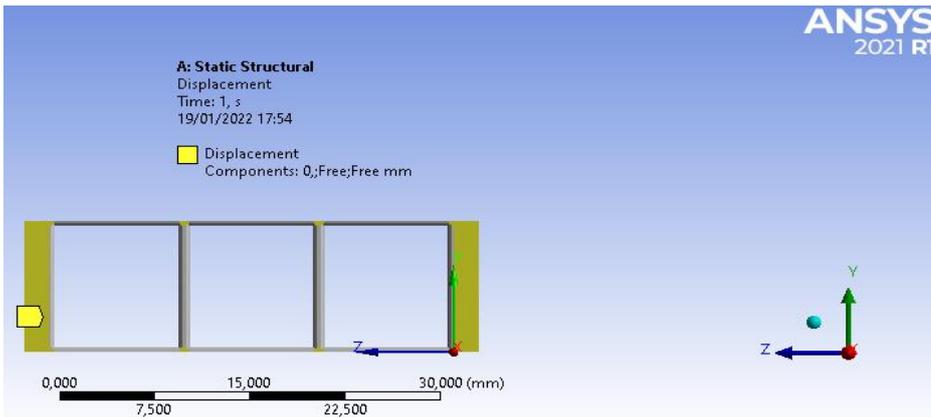
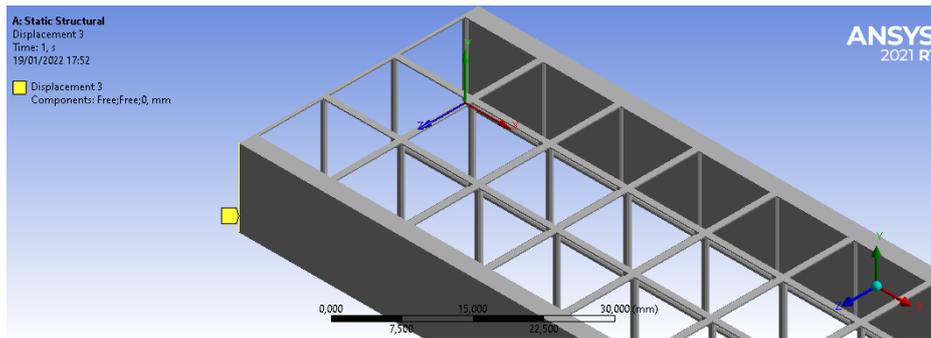
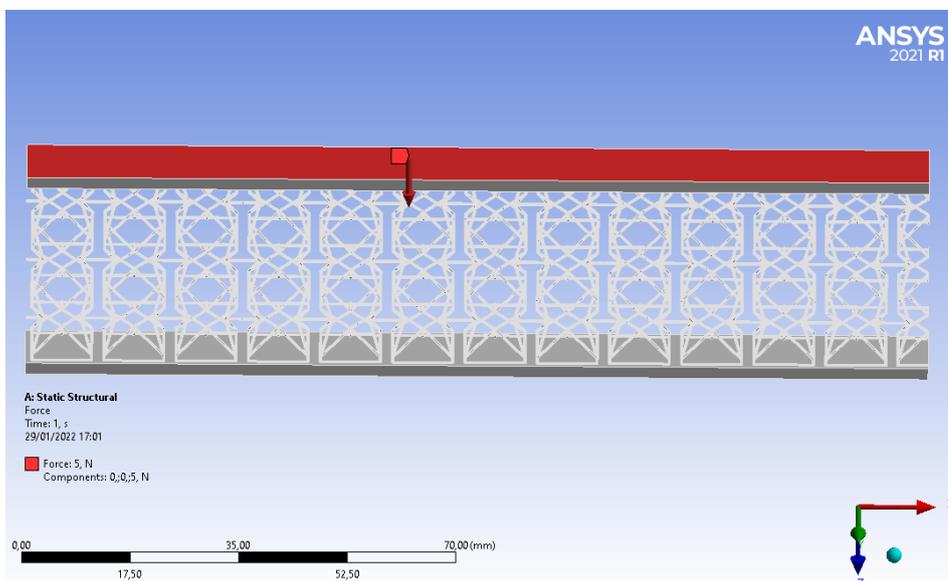
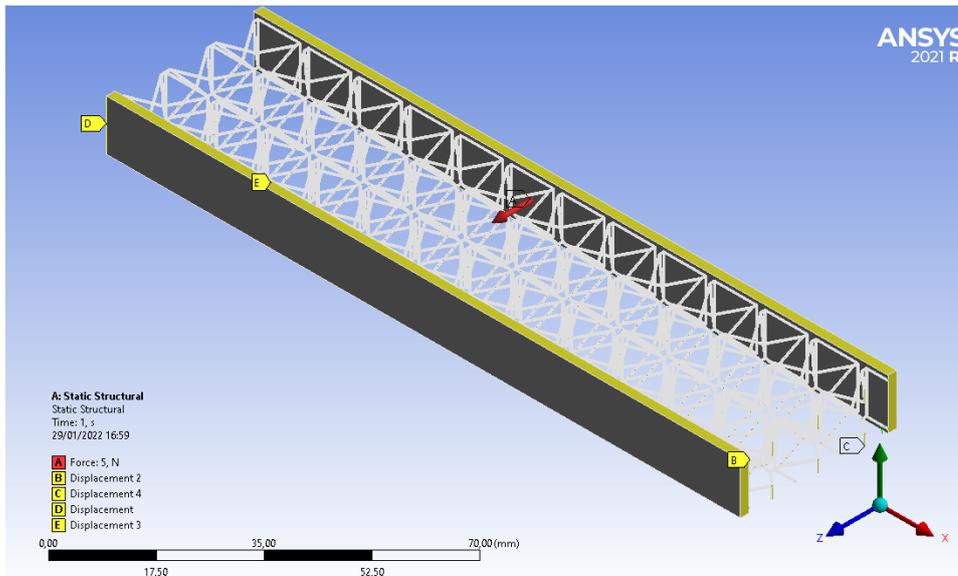


Figura 21 – Detalhes dos Suportes fixos no painel sanduiche não auxético.



*Figura 22 – Suportes fixos e carga no painel sanduiche auxético.*

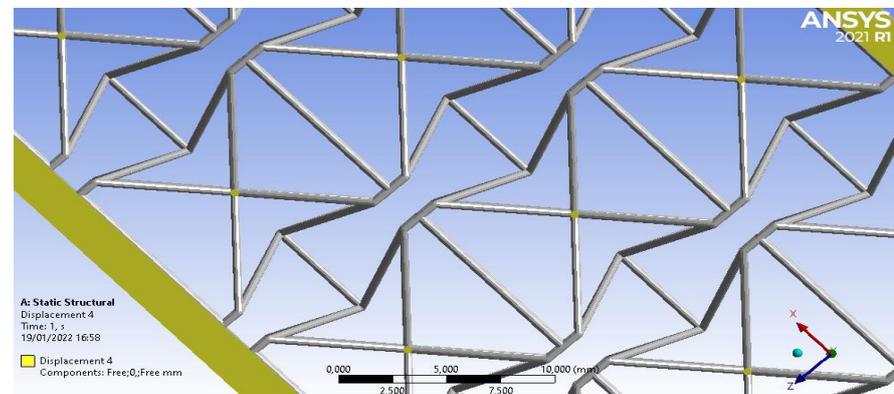
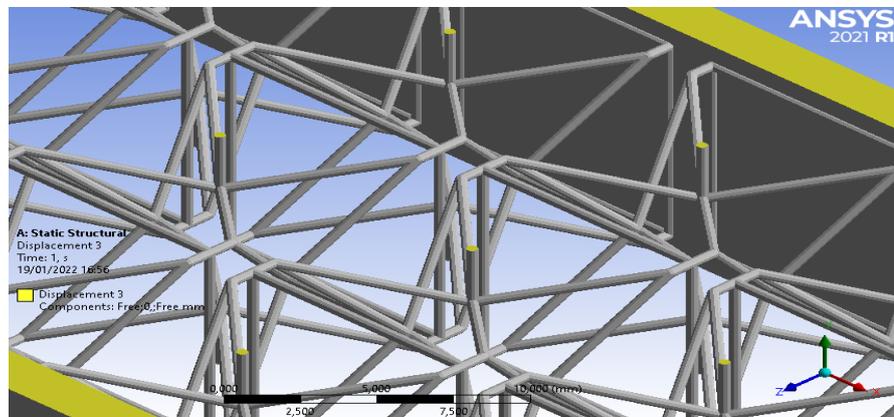
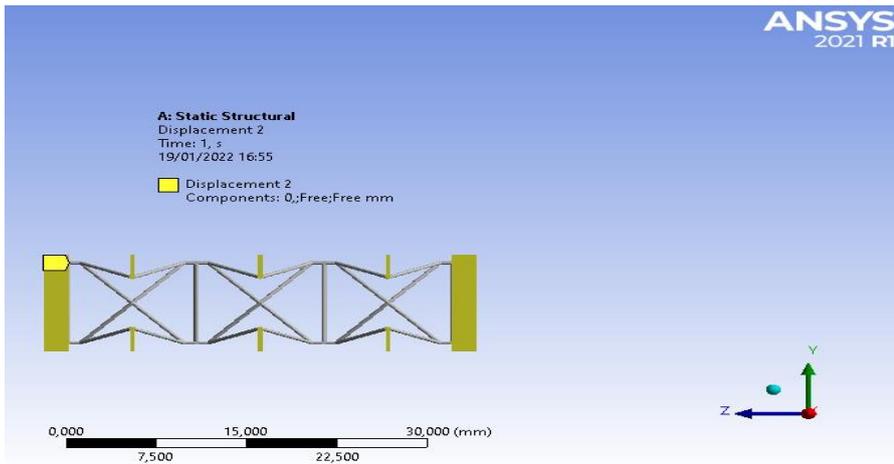
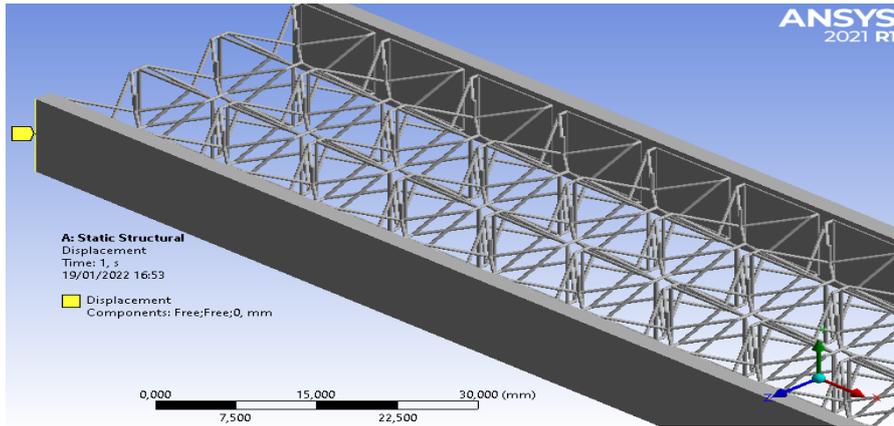


Figura 23 – Detalhes dos Suportes fixos no painel sanduiche auxético.

### 3. Resultados

Com as condições de contorno e a carga transversal aplicadas, foi possível através de uma análise linear elástica, obter das estruturas auxéticas e não auxéticas os deslocamentos nas direções dos eixos X, Y e Z, a tensão axial de flexão e a tensão equivalente de von Mises.

Na Figura 24 é indicado o deslocamento na direção X da estrutura auxética, com um valor máximo de 0,035916 mm.

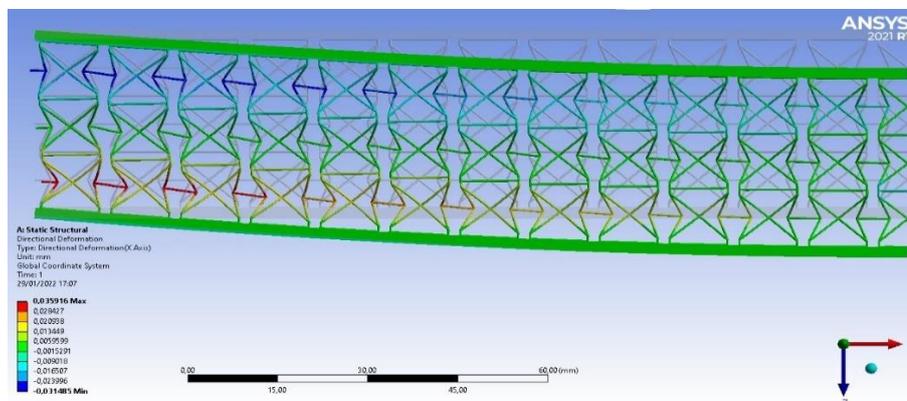


Figura 24 – Deslocamento no eixo X no painel sanduiche auxético.

Na direção Y, o deslocamento é mostrado na Figura 25, com um valor máximo de 0,002049 mm.

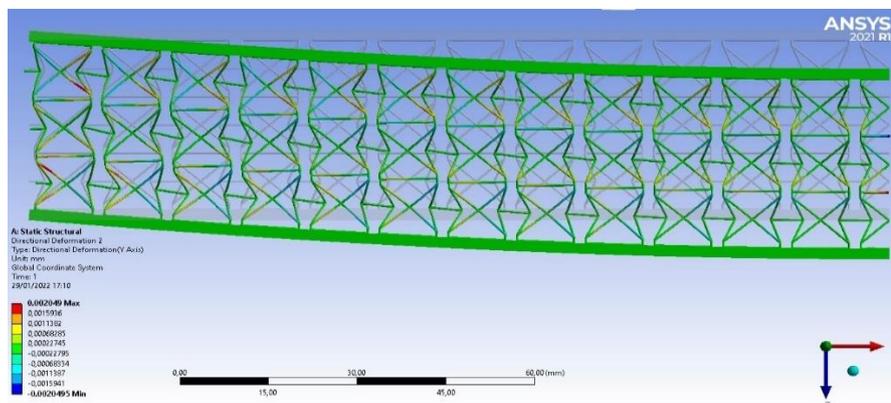


Figura 25 – Deslocamento no eixo Y no painel sanduiche auxético.

Por outro lado, na Figura 26, é apresentado o deslocamento na direção Z, com o valor máximo de 0,25579 mm.

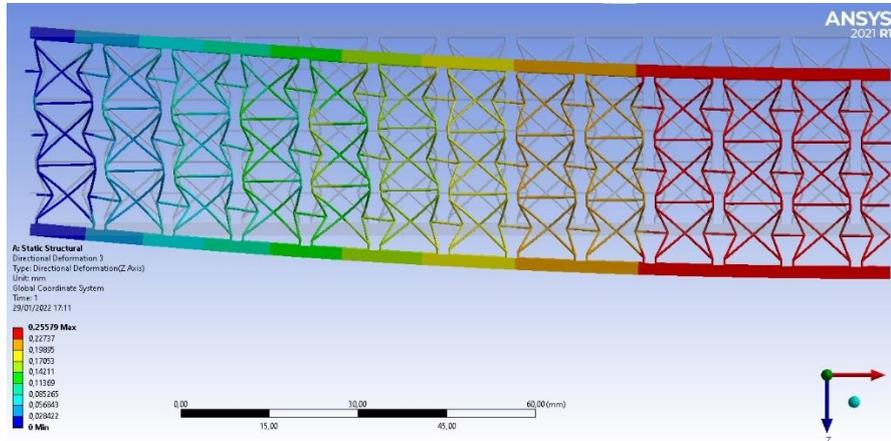


Figura 26 – Deslocamento no eixo Z no painel sanduiche auxético.

Já na Figura 27 é indicado o deslocamento na direção X da estrutura não auxética, com o valor máximo de 0,0064581 mm.

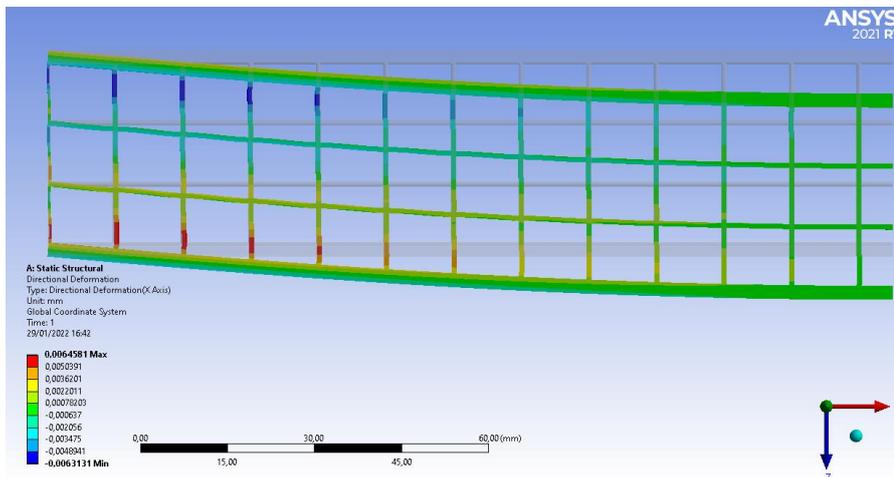


Figura 27 – Deslocamento no eixo X no painel sanduiche não auxético.

Na Figura 28, é observado o valor do deslocamento na direção Y, com o valor máximo de 0,000037661 mm.

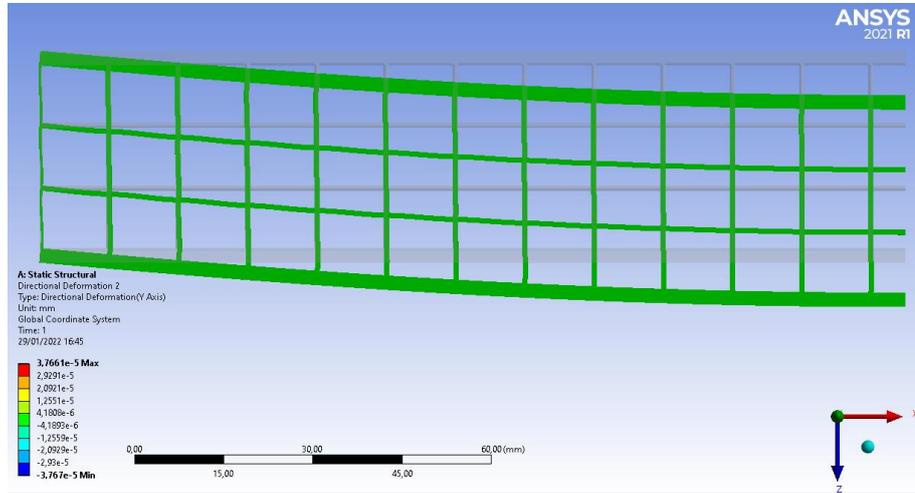


Figura 28 – Deslocamento no eixo Y no painel sanduiche não auxético.

Além disso, na Figura 29, é apresentado o deslocamento na direção Z, com o valor máximo de 0,23532 mm.

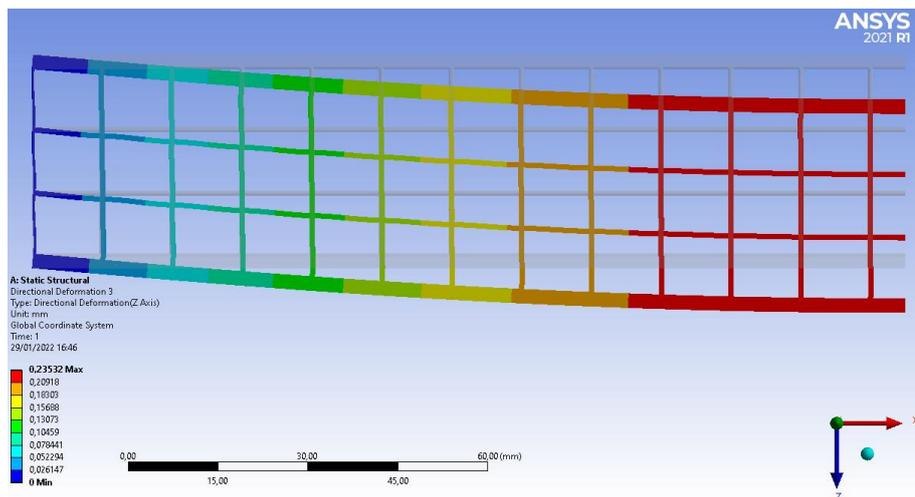


Figura 29 – Deslocamento no eixo Z no painel sanduiche não auxético.

Outro parâmetro que se obteve valores foi com relação a tensão axial. Foi possível observar que os máximos valores se encontram nos pontos de junção das barras das geometrias, onde ocorre as concentrações de tensões.

Para o painel sanduiche composto por núcleo auxético encontrou-se um valor máximo de 63,049 Mpa.

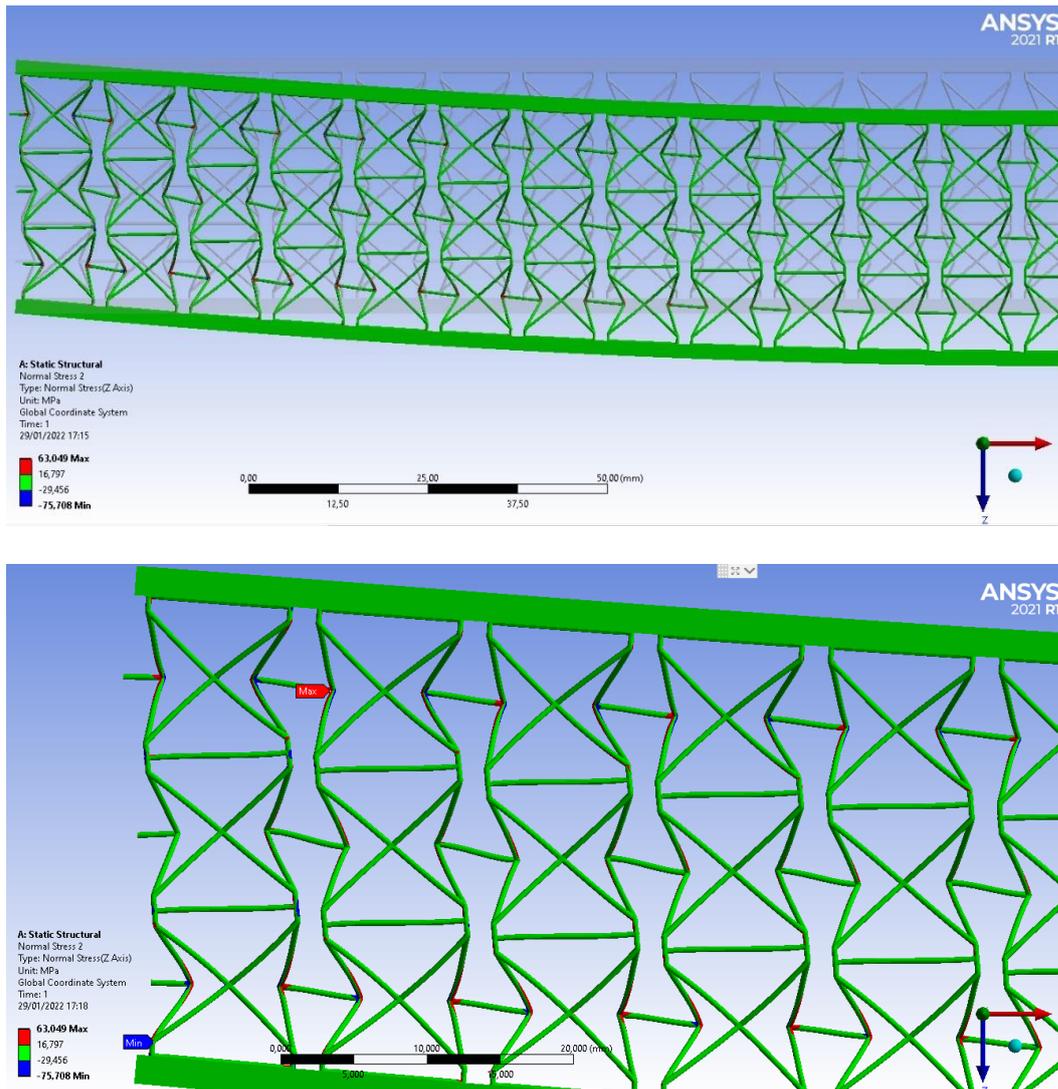


Figura 30 – Tensão axial no eixo Z do painel sanduiche auxético.

Já, o painel sanduiche composto por núcleo não auxético foi simulado um valor máximo de 97,166 Mpa.

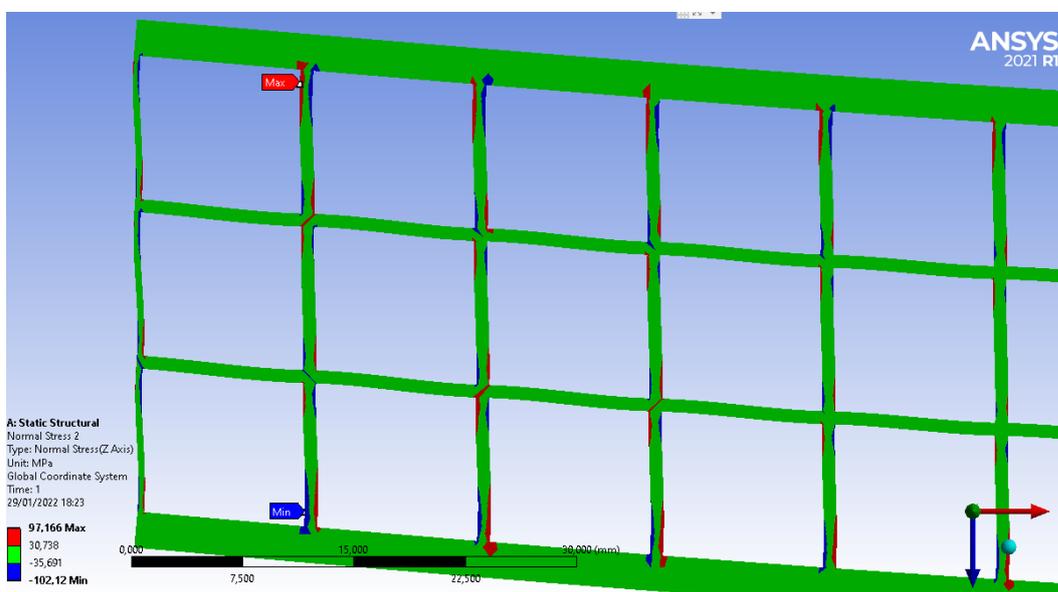
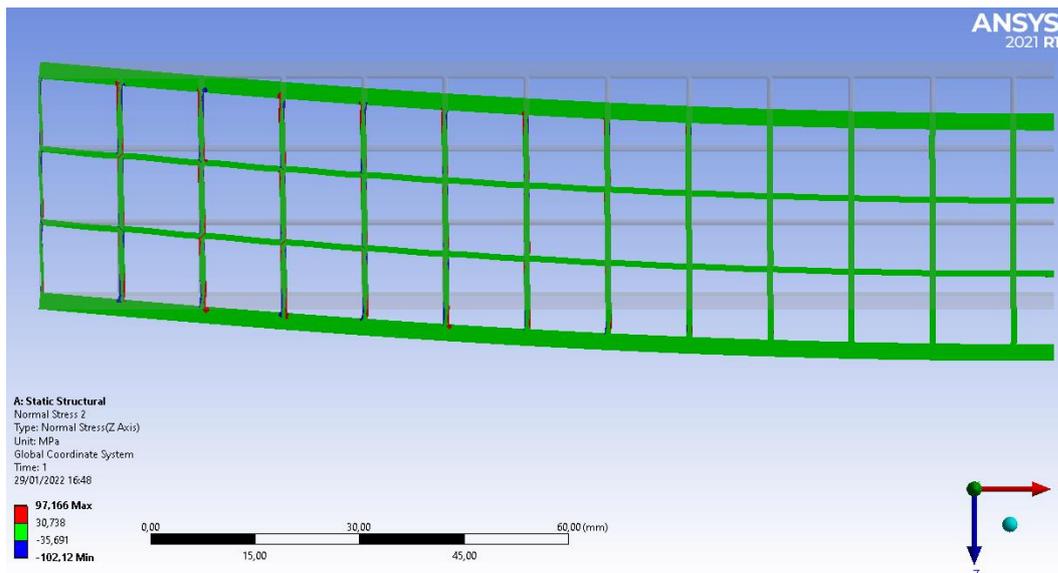


Figura 31 – Tensão axial no eixo Z do painel sanduiche não auxético.

Dessa maneira, com os resultados das tensões, em conjunto com a teoria mencionada nos capítulos anteriores, o painel sanduiche com núcleo composto por estrutura auxética possui um máximo valor menor para a tensão axial do que o núcleo composto por uma estrutura não auxética, apresentando então, em uma condição de carga transversal uniforme, melhores propriedades mecânicas para resistir a carga.

Outro fator que se obteve valores foi com relação a tensão equivalente de von Mises. Para o painel sanduiche composto por núcleo auxético encontrou-se um valor máximo de 155,28 Mpa.

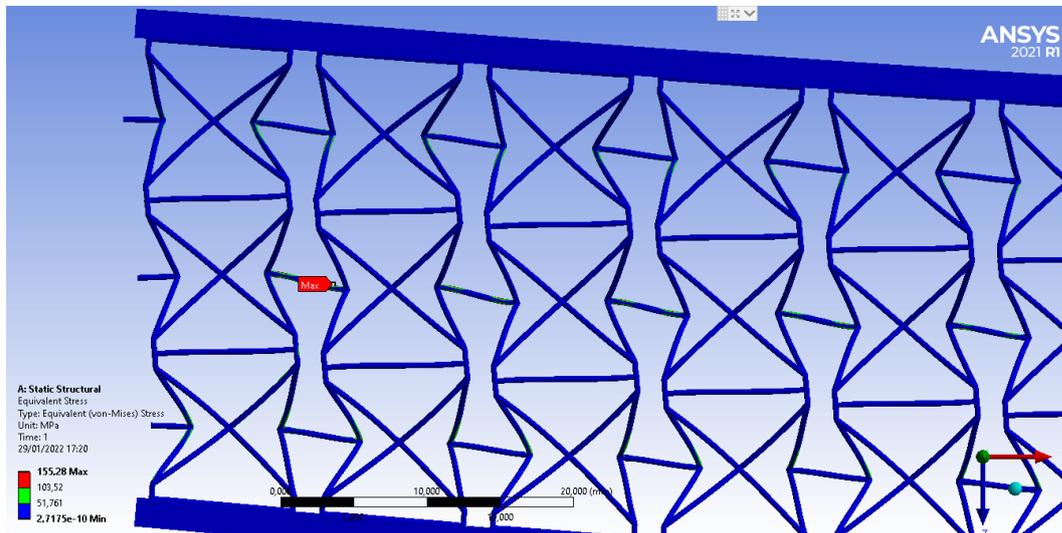


Figura 32 – Tensão equivalente de von Mises do painel sanduiche auxético.

Já, o painel sanduiche composto por núcleo não auxético foi simulado um valor máximo de 102,3 Mpa.

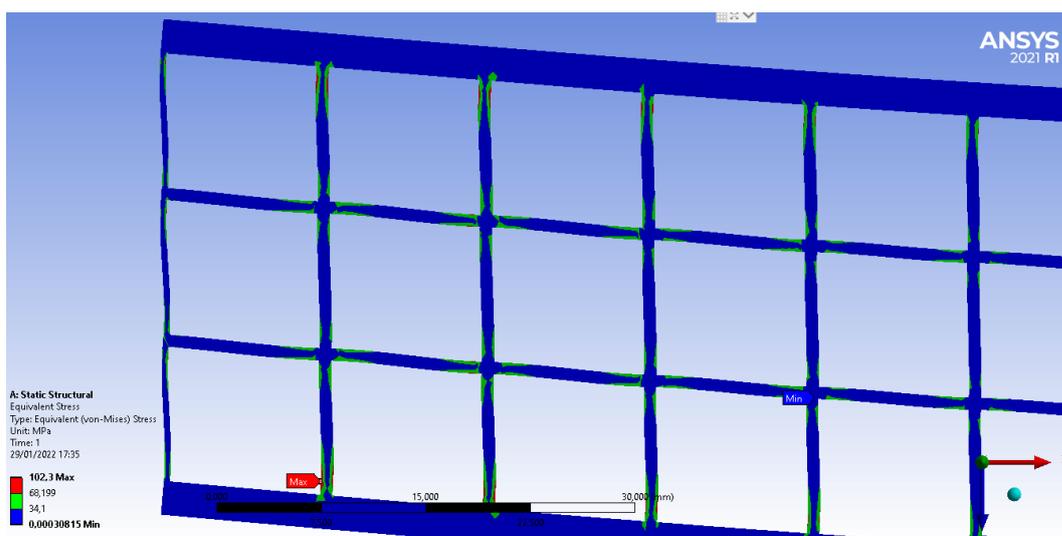


Figura 33 – Tensão equivalente de von Mises do painel sanduiche não auxético.

De acordo, com os resultados das tensões equivalentes de von Mises, é possível observar que ambos os painéis possuem um valor menor que o limite de escoamento do material, que é um aço estrutural com um valor de 250 Mpa para o limite de escoamento. Logo, as análises realizadas se encontram na região linear elástica.

Os resultados das simulações realizadas nos painéis sanduíches auxéticos e não auxéticos, encontram-se na tabela abaixo.

Resultados	Painel Sanduíche Auxético	Painel Sanduíche Não Auxético
Deslocamento no eixo X	0,035916 mm	0,0064581 mm
Deslocamento no eixo Y	0,002049 mm	0,000037661 mm
Deslocamento no eixo Z	0,25579 mm	0,23532 mm
Tensão axial de flexão	63,049 MPa	97,166 MPa
Tensão equivalente von Mises	155,28 MPa	102,3 MPa

*Tabela 2 – Resultados finais.*

## 4. Conclusão

Nesta monografia foi realizada uma avaliação numérica da influência dos núcleos compostos por uma microestrutura auxética e não auxética nos painéis sanduíches.

Os principais estudos foram as comparações dos parâmetros da tensão axial devido a flexão e os deslocamentos entre as estruturas, além da garantia de que as condições de segurança do projeto fossem respeitadas para projetar as geometrias, com o valor da tensão equivalente de von Mises menor que o valor da tensão de escoamento do material.

Dessa maneira, obteve-se os deslocamentos, pelo método dos elementos finitos no ANSYS [7], e ao analisar os resultados e o comportamento das geometrias, a estrutura auxética, apresentou uma das suas principais características, os deslocamentos nas seções transversais e longitudinais sob uma carga. Já com a estrutura não auxética, foi obtido valores em uma ordem de grandeza bem menor nas seções transversais, apenas com um valor coerente no deslocamento longitudinal.

Outro parâmetro analisado foi a resistência das estruturas perante a uma carga transversal, onde foi possível avaliar também, pelo método dos elementos finitos no ANSYS [7], os valores da tensão axial em cada estrutura, auxética e não auxética. Com isso, foi identificado que o painel composto por núcleo de estruturas auxéticas obteve um menor valor da tensão normal de flexão para a mesma carga aplicada, tendo um melhor desempenho, neste caso, do que o painel sanduíche composto pelo núcleo de estruturas auxéticas.

Entre as diversas outras opções de pesquisa mais aprofundadas que esse assunto pode proporcionar, é interessante mencionar algumas outras formas de estudos para comparar e identificar diferentes comportamentos dos painéis sanduíches, como por exemplo, a consolidação do projeto com a fabricação do protótipo dessas geometrias na impressora 3D, além de outras maneiras de aplicação da excitação, como a estrutura sob o impacto em velocidade de um projétil balístico ou aumentando de forma gradativa o valor da carga de compressão uniaxial, seriam alternativas a fim de fornecer uma maior gama de dados e

resultados em uma pesquisa de comparação e análise entre uma estrutura auxética e não auxética.

## 5. Referências

[1] Shaoyu Houa, Tiantian Li, Zian Jia, Lifeng Wang, Mechanical properties of sandwich composites with 3d-printed auxetic and non-auxetic lattice cores under low velocity impact, Elsevier (2018). Materials and Design, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.002> 0264-1275

[2] Gabriele Imbalzano, Phuong Tran, Tuan D Ngo and Peter VS Lee. Three-dimensional modelling of auxetic sandwich panels for localised impact resistance, Sage (2017). Journal of Sandwich Structures and Materials 2017, Vol. 19(3) 291–316. DOI: 10.1177/1099636215618539

[3] Teik-Cheng Lim, Engineering Materials - Auxetic Materials and Structures, Springer. (2015).

[4] Gabriele Imbalzano, Steven Linforth, Tuan D. Ngo, Peter V. S. Lee, Phuong Tran, Blast Resistance of Auxetic and Honeycomb Sandwich Panels: Comparisons and Parametric Designs, Elsevier (2018). Composite Structures, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.018>

[5] AL-KETAN, Oraib; AL RUB, Rashid. The effect of architecture on the mechanical properties of cellular structures based on the IWP minimal surface. Journal of Materials Research Volume issue 2018, [S. l.], v. 225, p. 1-17, 28 dez. 2017.

[6] Daniela Becker. Estrutura de Sólidos Cristalinos. USP (2009). [http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/2166002/LOM3092/Aula\\_3\\_Estrutura\\_Cristalinos.pdf](http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/2166002/LOM3092/Aula_3_Estrutura_Cristalinos.pdf)

- [7] OpenSCAD <http://www.openscad.org/>
- [8] ANSYS <https://www.ansys.com/>
- [9] Lucas Gonçalves Moreira Lopes. Avaliação numérica do comportamento de estruturas auxéticas, Projeto de Graduação - PUC – Rio (2020). <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/51094/51094.PDF>
- [10] GOMES, M. N. Tratamento térmico pré e pós-cura de diferentes compósitos: análise térmica, resistência à flexão e grau de conversão. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo. (2008).
- [11] HIBBELER, R.C. Resistência dos Materiais, 5ª edição, Pearson Education do Brasil. (2004).
- [12] Giuseppe Miralisenna. Método dos Elementos Finitos: o que é? (2016). <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>
- [13] Lucas R.Meza, SatyajitDas, Julia R.Greer. Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices. Published 12 September 2014, Science345, 1322 DOI: 10.1126/science.1255908. (2014).
- [14] Bogdan Ungureanu, Younes Achaoui, Stefan Enoch, Stéphane Brûlé, and Sébastien Guenneau. Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections. DOI: 10.1051/epjam/2016001. (2015)
- [15] Juliana Bezerra. Toda Matéria. <https://www.todamateria.com.br/metafisica/>

- [16] De Jonge, C.P.; Kolken, H.M.A.; Zadpoor, A.A. Non-Auxetic Mechanical Metamaterials. *Materials* 2019, 12, 635. <https://doi.org/10.3390/ma12040635>
- [17] Liu, Y., Zhang, X. Metamaterials: a new frontier of science and technology. *Chem. Soc. Rev.* 40, 2494-2507. (2010).
- [18] Evans, K., Alderson, A. Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking! *Advanced Materials*, 12 No. 9. (2000).
- [19] Liu, Q. Literature review: Materials with negative Poisson's ratios and potential applications to aerospace and defence. DSTO-GD-0472. (2006).
- [20] Bitzer, T. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Springer Science & Business Media. (1997).
- [21] TITA, V. Projeto e fabricação de estruturas em material compósito polimérico. Universidade de São Paulo/Escola de Engenharia de São Carlos. (2007).
- [22] Meshmixer. <https://www.meshmixer.com/>
- [23] The Vitruvius Project. <https://www.thevitruviusproject.com/blog/formula-for-bending-stress-shear-stress-and-normal-stress-in-beam-calculations/>
- [24] Bending Stress. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bending-stress>

[25] Luciano Rodrigues Ornelas de Lima. Capítulo 2 – Critérios de Resistência.  
UERJ. [http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/Cap\\_2\\_criterios.pdf](http://www.labciv.eng.uerj.br/rm4/Cap_2_criterios.pdf)

## 6. Anexos

### 6.1. Painel Sanduíche não auxético

```
1 // GridBox - Painel Sanduíche não auxético
2
3 W = 11.6459;
4 H = 10.6134;
5 GRID = [
6 [1, 0.000000, 0.000000, 0.000000],
7 [2, W, 0.000000, 0.000000],
8 [3, 0.000000, W, 0.000000],
9 [4, 0.000000, 0.000000, H],
10 [5, W, 0.000000, H],
11 [6, 0.000000, W, H],
12 [7, W, W, 0.000000],
13 [8, W, W, H]
14 ];
15 STRUT = [
16 [1, 1, 2],
17 [2, 1, 3],
18 [3, 1, 4],
19 [4, 4, 5],
20 [5, 4, 6],
21 [6, 3, 7],
22 [7, 3, 6],
23 [8, 6, 8],
24 [9, 2, 7],
25 [10, 2, 5],
26 [11, 5, 8],
27 [12, 7, 8]
28 ];
```

```

29 $fn = 10;
30 size = 1; //mm
31 r = 0.44;
32 nx = 25; ny = 1; nz = 3;
33
34 intersection() {
35   Lattice(GRID,STRUT,r,size,nx,ny,nz);
36   translate( v=[0,0,0] ) {
37     cube( size=[((nx/2)*W),ny*W,nz*H]*size,
38           center=false );
39   }
40 }
41 module Lattice(GRID,STRUT,r,size,nx,ny,nz)
42   for(x=[0:nx-1])
43     for(y=[0:ny-1])
44       for(z=[0:nz-1])
45         translate([x*W,y*W,z*H]*size)
46           Voxel(GRID*size,STRUT,r*size);
47
48 module Voxel(GRID,STRUT,r) {
49   for (i = [0:(len(GRID)-1)]) {
50     a = [GRID[i][1],GRID[i][2],GRID[i][3]];
51     translate(a)
52     sphere(r);
53   }
54   for (i = [0:(len(STRUT)-1)]) {
55     ni = STRUT[i][1]-1;
56     nj = STRUT[i][2]-1;
57     echo ("Strut ",i+1,"ni",ni+1,"nj",nj+1);
58     a = [GRID[ni][1],GRID[ni][2],GRID[ni][3]];
59     b = [GRID[nj][1],GRID[nj][2],GRID[nj][3]];
60     rod(a,b,r);
61   }
62 }
63 translate( v=[0,0,(nz*H)] ) {
64   cube( size=[((nx/2)*W),(ny*W),2], center=
65         false );
66 }
67 translate( v=[0,0,-2] ) {
68   cube( size=[((nx/2)*W),(ny*W),2], center=
69         false );

```

```

69 module rod(v1,v2,radius){
70     x1=v1[0];
71     y1=v1[1];
72     z1=v1[2];
73     x2=v2[0];
74     y2=v2[1];
75     z2=v2[2];
76
77     x = x2-x1;
78     y = y2-y1;
79     z = z2-z1;
80
81     length = norm([x,y,z]); // radial distance
82     b = acos(z/length); // inclination angle
83     c = atan2(y,x); // azimuthal angle
84
85     translate(v=[x1,y1,z1])
86     rotate([0, b, c])
87     cylinder(h=length, r=radius);
88 }

```

## 6.2. Painel Sanduíche auxético

Para a realização do código da microestrutura auxética, foi baseado no artigo [9].

```
1 //Painel Sanduíche auxético
2
3 theta = 50;
4 gamma = 20;
5 r = 0.2; // mm
6 c = 1; //mm
7 L = 6.7; //mm
8 a = 1; //mm
9 b = L*cos(gamma)*sin(theta)*(1-tan(gamma)) + c;
10 L2 = 2*L*cos(gamma)*sin(theta);
11 H = 2*a + 2*L*cos(theta);
12 W = 2*c + L2;
13 echo("W",W,"H",H,"L",L,"L2",L2,"b",b,"a",a);
14 Lxyz = L*[sin(theta)*cos(gamma),sin(theta)*sin(gamma),
           cos(theta)];
15 echo("Lxyz",Lxyz,"norm(Lxyz)",norm(Lxyz));
16 C1 = [c+Lxyz[0], c+Lxyz[1]];
17 C2 = [W-c-Lxyz[1], c+Lxyz[0]];
18 C3 = [c+Lxyz[0], W-c-Lxyz[1]];
19 C4 = [c+Lxyz[1], c+Lxyz[0]];
20
21
22 GRID = [
23     [1,c,c,0],
24     [2,c+L2,c,0],
25     [3,c+L2,c+L2,0],
26     [4,c,c+L2,0],
27     [5,c,c,a],
28     [6,c+L2,c,a],
29     [7,c+L2,c+L2,a],
30     [8,c,c+L2,a],
31     [9,C1[0],C1[1],H/2],
32     [10,C2[0],C2[1],H/2], [11,C3[0],C3[1],H/2],
33     [12,C4[0],C4[1],H/2],
34     [13,c,c,H-a],
35     [14,c+L2,c,H-a],
36     [15,c+L2,c+L2,H-a],
37     [16,c,c+L2,H-a],
38     [17,c,c,H],
39     [18,c+L2,c,H],
40     [19,c+L2,c+L2,H],
41     [20,c,c+L2,H],
42     [21,C1[0],0,H/2],
43     [22,W,C2[1],H/2],
44     [23,C3[0],W,H/2],
45     [24,0,C4[1],H/2]
46 ];
```

```

47 STRUT = [
48     [1,1,2],
49     [2,2,3],
50     [3,3,4],
51     [4,4,1],
52     [5,1,5],
53     [6,2,6],
54     [7,3,7],
55     [8,4,8],
56     [9,5,9],
57     [10,6,10],
58     [11,7,11],
59     [12,8,12],
60     [13,5,12],
61     [14,6,9],
62     [15,7,10],
63     [16,8,11],
64     [17,9,13],
65     [18,10,14],
66     [19,11,15],
67     [20,12,16],
68     [21,12,13],
69     [22,9,14],
70     [23,10,15],
71     [24,11,16],
72     [25,13,17],
73     [26,14,18],
74     [27,15,19],
75     [28,16,20],
76     [28,17,18],
77     [30,18,19],
78     [31,19,20],
79     [32,20,17],
80     [33,9,21],
81     [34,10,22],
82     [35,11,23],
83     [36,12,24]
84 ];
85
86 $fn = 10;
87 size = 1; //mm
88 nx = 25; ny = 1; nz = 3;
89
90 intersection() {
91   Lattice(GRID,STRUT,r,size,nx,ny,nz);
92   translate( v=[0,0,0] ) {
93     cube( size=[((nx/2)*W),ny*W,nz*H]*size,
94           center=false );
95   }
96 }
97 module Lattice(GRID,STRUT,r,size,nx,ny,nz)
98   for(x=[0:nx-1])
99   for(y=[0:ny-1])
100   for(z=[0:nz-1])
101     translate([x*W,y*W,z*H])
102       Voxel(GRID*size,STRUT,r*size);
103

```

```

104 module Voxel(GRID,STRUT,r) {
105   for (i = [0:(len(GRID)-1)]){
106     a = [GRID[i][1],GRID[i][2],GRID[i][3]];
107     translate(a)
108     sphere(r);
109   }
110   for (i = [0:(len(STRUT)-1)]){
111     ni = STRUT[i][1]-1;
112     nj = STRUT[i][2]-1;
113     echo ("Strut ",i+1,"ni",ni+1,"nj",nj+
114           1);
115     a = [GRID[ni][1],GRID[ni][2],GRID[ni
116           ]][3]];
117     b = [GRID[nj][1],GRID[nj][2],GRID[nj
118           ]][3]];
119     rod(a,b,r);
120   }
121 }
122 translate( v=[0,0,nz*H] ) {
123   cube( size=[(nx/2)*W,ny*W,2], center=
124         false );
125 }
126 translate( v=[0,0,-2] ) {
127   cube( size=[(nx/2)*W,ny*W,2], center=
128         false );
129 }

```

```

125 module rod(v1,v2,radius){
126   x1=v1[0];
127   y1=v1[1];
128   z1=v1[2];
129   x2=v2[0];
130   y2=v2[1];
131   z2=v2[2];
132
133   x = x2-x1;
134   y = y2-y1;
135   z = z2-z1;
136
137   length = norm([x,y,z]); // radial
138   distance
139   b = acos(z/length); // inclination angle
140   c = atan2(y,x); // azimuthal angle
141
142   translate(v=[x1,y1,z1])
143   rotate([0, b, c])
144   cylinder(h=length, r=radius);
145 }

```