



## ***ESTUDO DE UMA ESTRUTURA COMPÓSITA PARA ATENUAÇÃO DE IMPACTO VEICULAR.***

**Emanuel Barbosa Pereira De Negreiros<sup>1</sup>, Wanderley Ferreira de Amoim Júnior <sup>2</sup>**

### **RESUMO**

Este estudo tem como objetivo estudo de uma estrutura compósita para atenuação de impacto veicular. Utilizando a metodologia de projeto, passamos por todas as fases desde o projeto informacional de estruturas até a construção de um protótipo de estrutura auxética em favor de mel fabrico por impressão 3D para testes. Os resultados mostraram que o comportamento de um auxético quando submetido a forças de compressão, indicam seu potencial na construção de atenuadores de impacto veicular podendo ser composto polímeros com metais utilizados na indústria automotiva. As principais conclusões do estudo destacam o comportamento de auxéticos densificarem a área de contato quando comprimido oferecendo mais resistência a força em comparação com estruturas não auxéticas tradicionais que quando comprimido não oferece essa resistência e se rompe lateralmente. Este trabalho oferece contribuições importantes para a área de impacto veicular, propondo a construção de atenuadores de impacto veicular com estruturas auxéticas.

**Palavras-chave:** Estruturas auxéticas, Atenuadores de impacto, Impressão 3D.

---

<sup>1</sup>Aluno de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCEG, Campina Grande, PB, e-mail: emanuel.negreiros@estudante.ufcg.edu.br

<sup>2</sup>Doutor, Professor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFCEG, Campina Grande, PB, e-mail: wanderley.ferreira@professor.ufcg.edu.br

## ***STUDY OF A COMPOSITE STRUCTURE FOR VEHICLE IMPACT ATTENUATION.***

### **ABSTRACT**

This study aims to study a composite structure for vehicle impact attenuation. Using the design methodology, we went through all the phases from the informational design of structures to the construction of a prototype of a honeycomb auxetic structure manufactured by 3d printing for testing. The results showed that the behavior of an auxetic when subjected to compression forces indicates its potential in the construction of vehicle impact attenuators and can be composed of polymers with metals used in the automotive industry. The main conclusions of the study highlight the behavior of auxetics to densify the contact area when compressed, offering more resistance to force compared to traditional non-auxetic structures that when compressed do not offer this resistance and break laterally. This work offers important contributions to the area of vehicle impact, proposing the construction of vehicle impact attenuators with auxetic structures.

**Keywords:** Auxetic structures, Impact attenuators, 3D printing.

## INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica em todos os campos da ciência adquiriu velocidade impressionante no final do século XX. O reflexo desse fenômeno nas Engenharias começa a aparecer na nossa vida cotidiana e com certeza fará a história de todo esse século XXI. A utilização de Materiais Compósitos em vários campos da Engenharia é uma das grandes apostas, desta área de pesquisa, para o século XXI. Sua aplicação vai desde as indústrias naval, aeronáutica, aeroespacial, automobilística, de energia eólica, até a utilização como forma de segurança em elevadores, trens, transportadores de cargas, na construção civil, etc. De um modo geral, materiais compósitos consistem de dois ou mais materiais separados, combinados em uma estrutura macroscópica única, onde a melhoria de sua performance acontece pela ação conjugada dos materiais que os constituem. Como exemplo de materiais compósitos, podemos citar o estudo do laminado de compósito polimérico de resina epóxi reforçado com tecido bi-direcional de fibra de carbono [1]. A utilização de materiais compósitos, a partir da aplicação de polímeros e de fibras (vegetais e sintéticas), possibilita uma excelente combinação de rigidez, resistência à tração e à flexão e baixo peso, constituindo excelentes características para aplicação no desenvolvimento de estruturas. A utilização de polímeros para a formação de compósitos, em muitos casos explora a facilidade de processamento que estes materiais apresentam, além do seu baixo custo e suas propriedades características. Em especial, matrizes produzidas a partir de resinas termofixas, como o poliéster, são de grande aplicação em artigos industriais, devido ao baixo custo de processamento (quando comparado ao material compósito de uma maneira geral), e pela boa interação com as fibras vegetais, como as fibras de coco. A grande motivação para isso é o fato de muitas empresas (de qualquer uma das áreas citadas anteriormente), exigirem de seus próprios projetos, um produto final com excelente eficiência, ou seja, aliar um baixo custo de produção, desde a fase de projeto até o produto acabado, com materiais de baixo peso estrutural e alto desempenho em absorção de energia quando submetidos a impactos. Para a área automobilística, o grande número de ensaios de impacto (conhecidos também como crash-tests) que são realizados anualmente, com o intuito principal de avaliar o nível de proteção que o veículo traz a partir de um choque real, a seus ocupantes. [2] Visto que, tais ensaios provocam um grande prejuízo econômico para as montadoras, as mesmas estão cada vez mais investindo na pesquisa de materiais que possuam uma boa relação custo/benéfico e que produzam carrocerias com alta tecnologia, alto grau de segurança e conforto, que provoquem uma diminuição nos custos de reparo e atendam aos requisitos das normas vigentes. [3]

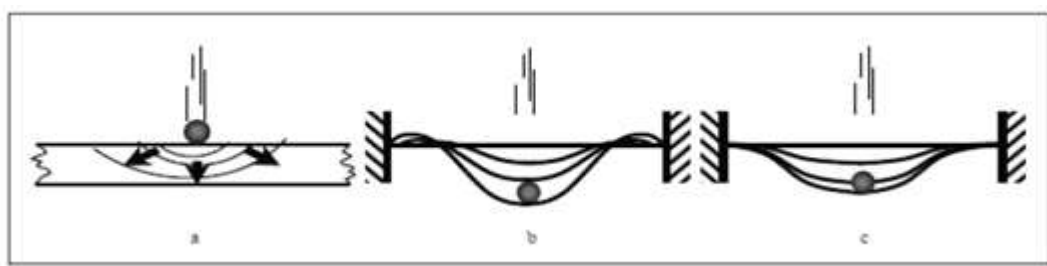
### 1. IMPACTO EM COMPÓSITOS

Os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando sob a ação de esforços e que são expressas em função de tensões e/ou deformações. Entre as principais propriedades dos materiais obtidas por ensaio, podem-se citar: resistência, elasticidade, plasticidade, resiliência e tenacidade. Nos materiais compósitos é muito importante conhecer as propriedades mecânicas do material da matriz, pois se uma propriedade deve ser melhorada, a seleção adequada de um material para a matriz pode ser suficiente para resolver este problema. Por exemplo, a utilização de uma

matriz com um módulo de elasticidade ligeiramente maior pode reduzir um problema na fibra de microflambagem para um nível aceitável. [5]

O ensaio de impacto consiste numa carga aplicada na forma de esforços por choque (dinâmicos), sendo o impacto obtido por meio da queda de um martelete ou pêndulo, de uma altura determinada, sobre a peça a examinar. As massas utilizadas no ensaio são intercambiáveis, possuem diferentes pesos e podem cair de alturas variáveis. Como resultado do ensaio, obtém-se a energia absorvida pelo material, força de impacto, entre outras variáveis. O impacto em materiais compósitos pode ser classificado em baixa velocidade, velocidade intermediária, alta velocidade (balística) e regimes de hipervelocidade. A figura 1 ilustra o dano causado em função da velocidade de impacto.

Figura 1 - Dano causado em função da velocidade de impacto.



O primeiro caso (a) da Figura 1 ilustra o impacto de alta velocidade, geralmente é resultado do impacto de pequenos fragmentos causado por armas de fogo (balística) ou fragmentos de ogivas explosivas. Este impacto ocorre pela propagação da onda de tensão através da espessura do material, em que a estrutura não tem tempo de responder, levando a um dano localizado. Impactos de alta velocidade variam de 50m/s a 1.000 m/s; O segundo caso (b) caracteriza o dano causado por impacto de velocidade intermediária que ocorrem na faixa entre 10 e 50m/s, esse impacto pode ser classificado tanto como impacto de baixa ou alta velocidade, objetos lançados por um furacão ou tornado, e objetos estranhos em estradas lançados contra veículos são exemplo de impacto de velocidade intermediária; O terceiro caso (c) caracteriza o impacto de uma massa em um material compósito, também conhecido como impacto de baixa velocidade pode-se citar, por exemplo, a queda de uma ferramenta, onde normalmente ocorrem em velocidades inferiores a 10 m/s.[5]

Existe ainda o impacto de hipervelocidade com velocidades de 2 a 5 km/s, neste caso o projétil está se movendo em velocidades muito altas e o material alvo se comporta como um fluido. Este tipo de impacto é mais frequentemente estudado no desenvolvimento de proteção das espaçonaves contra o impacto de micrometeoritos, que pode causar grandes danos à estrutura.

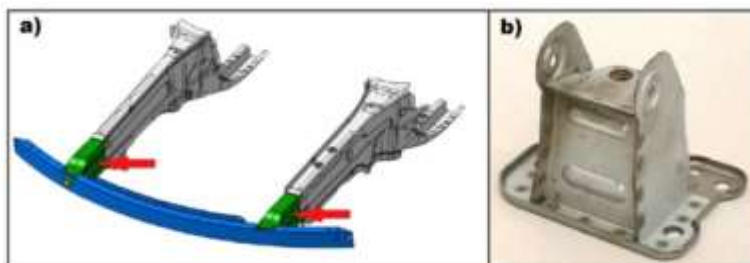
## 2. ATENUADORES DE IMPACTO

Um atenuador de impacto é uma estrutura que serve para desacelerar gradualmente um veículo sujeito a uma energia de impacto, garantindo que tanto a estrutura do veículo quanto a integridade dos passageiros sejam protegidas. [6]

Alguns veículos de passeio possuem como dispositivo de segurança um anteparo denominado Crash Box. Este são absorvedores metálico, em aço ou alumínio, localizados na parte frontal dos automóveis, conforme apresentado na

Figura 2. Essas estruturas são capazes de absorver até 90% da energia em um impacto, pois são projetadas para deformar e dissipar a energia no caso de um impacto frontal, mantendo a célula dos ocupantes em segurança. [6]

Figura 2 - Representação de um para-choque com o conceito crash box (a), crash box feito em aço (b)



O atenuador de impacto, aplicado ao carro Fórmula SAE, possui um funcionamento similar ao do Crash Box. O regulamento estabelecido pela competição SAE, sugere um modelo padrão de atenuador de impacto. No entanto, deixa a escolha do projetista o modo construtivo, tipo de matéria-prima e formato que julgar mais adequado para seu projeto, apenas impondo especificações quanto ao dimensionamento, fixação e níveis de absorção de energia. [6]

Portanto, o atenuador de impacto é um dispositivo deformável e absorvedor de energia localizado no anteparo frontal do veículo e que deve ser projetado visando proteger o piloto no caso de uma colisão frontal, garantindo a integridade estrutural do veículo.

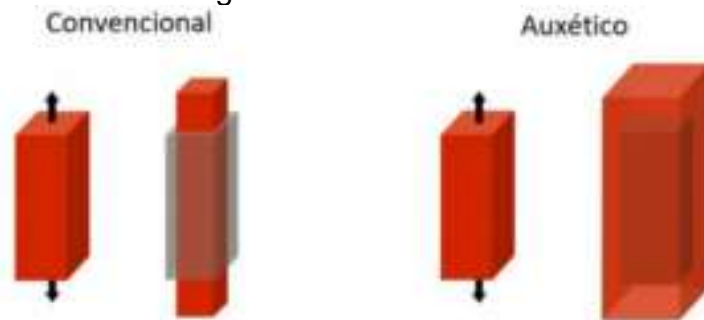
### 3. MATERIAIS AUXÉTICOS

Materiais auxéticos se diferenciam dos convencionais por possuírem um coeficiente de Poisson negativo (-v), o coeficiente de Poisson é um número adimensional que descreve a relação entre as deformações laterais e longitudinais de um material submetido a uma carga externa. [7]

$$\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$

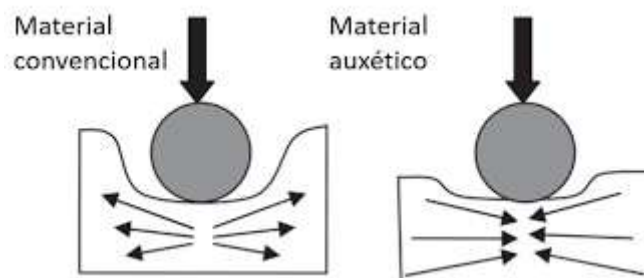
Ter esse coeficiente negativo significa que quando são tensionados longitudinalmente, sua seção transversal aumenta como mostra a figura 3, o que leva a uma notável melhoria em suas propriedades mecânicas. A explicação desse comportamento auxético reside na geometria e no mecanismo de deformação desses materiais. [7]

Figura 3 – Comportamento de material auxético quando tensionado longitudinalmente



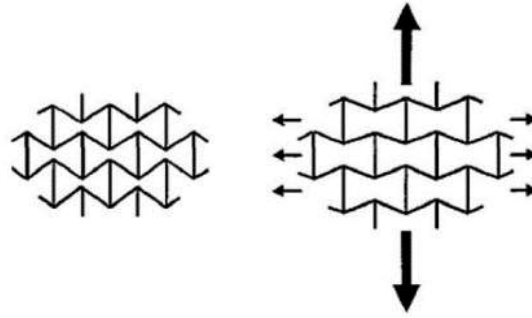
Os materiais auxéticos se caracterizam por comportamentos e características peculiares quando comparados com materiais não auxéticos. Quando um material não auxético é submetido a uma compressão aplicada localmente pelo indentador, para compensar esta pressão localizada o material se espalha na direção perpendicular a carga aplicada (Figura 4a). No entanto, quando o mesmo ocorre em um material auxético observa-se uma contração local e um acúmulo sob o indentador e uma área de material mais denso com maior resistência a compressão é criada (Figura 4b). Dessa forma, os materiais auxéticos apresentam uma resistência a compressão aprimorada, quando comparados aos materiais convencionais [7]

Figura 4 – Material convencional sob compressão (a), material auxético sob compressão (b)



Um tipo de variante de células auxéticas é uma classe de material chamada de colmeia auxética. Um dos modelos de colmeia auxética é o de estruturas reentrantes formada por células de face hexagonal esquematizada na figura 5. A figura mostra uma célula auxética reentrante bidimensional submetida a uma carga de tração, observa-se que as costelas celulares tendem a se abrir, forçando o aumento da área da célula, confirmando o comportamento auxético da estrutura. [7]

Figura 5 – Ilustração do comportamento auxético em estrutura reentrante.

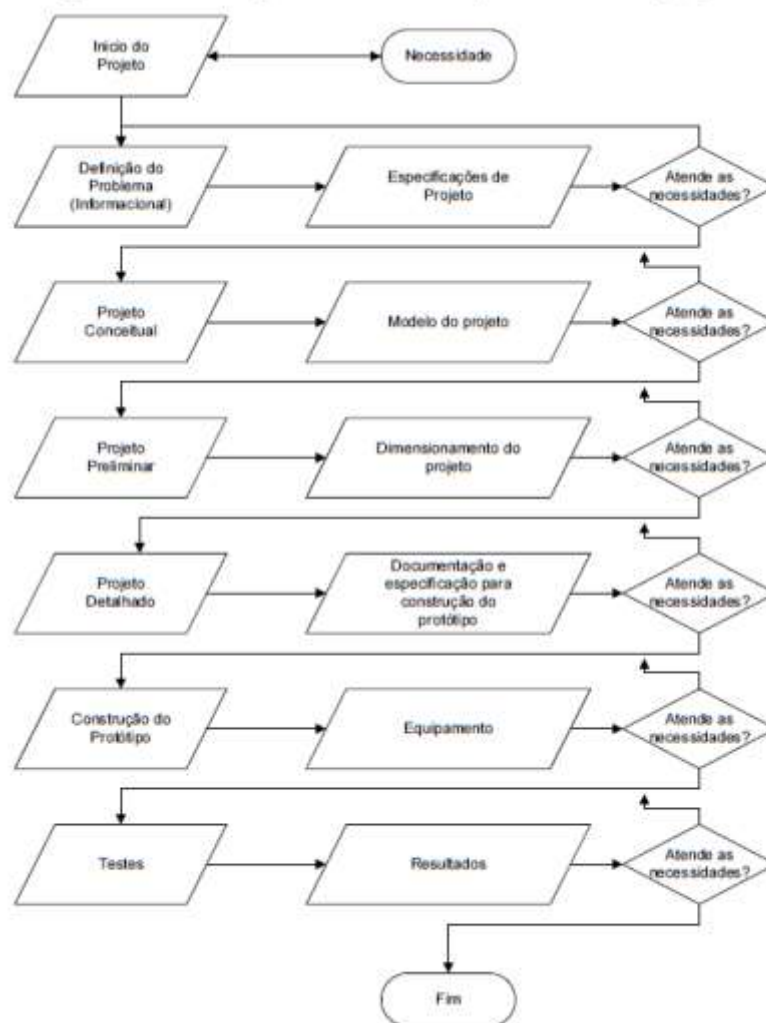


Uma desvantagem do modelo de colmeia auxética é a dificuldade na geração dessas espumas usando métodos de fabricação tradicionais. Embora a impressão 3D ofereça, uma forma para resolver essa desvantagem graças a sua capacidade de fabricar praticamente qualquer design com uma alta repetibilidade, sendo a escalabilidade ainda uma barreira na sua adaptação comercial. [8]

## **MATERIAIS E MÉTODOS (OU METODOLOGIA)**

Cada projeto de componentes, sistemas ou subsistemas possuem suas peculiaridades próprias e características inerentes para cada caso. No entanto, ao iniciar um projeto, o processo de desenvolvimento segue numa sequência de eventos, organizada cronologicamente, formando um modelo, o qual quase sempre se encontra em comum a todos os projetos (BACK, 1983). A Figura 6 a seguir, ilustra o fluxograma da metodologia de projeto utilizada como referência para a execução deste trabalho que nesse trabalho. [9]

Figura 6 - Fluxograma da metodologia utilizada no projeto



**Definição do problema ou projeto informacional:** Consiste na interpretação e limitação dos requisitos disponíveis, de forma clara e objetiva. Para tanto, reuniram-se todas as possíveis informações necessárias ao desenvolvimento do trabalho. Foi realizada uma pesquisa buscando informações referentes aos requisitos do projeto e do dispositivo a ser desenvolvido. As fontes de informação utilizadas foram normas ou padrões, artigos e equipamentos já presentes no mercado, focando nos aspectos funcionais e de projeto;

**Projeto conceitual:** Busca-se apresentar na forma de croquis, diagramas, desenhos esquemáticos a visualização da(s) ideia(s) que melhor atendem à demanda de projeto.

**Projeto preliminar:** Estabelece os materiais e dimensões que resistam aos esforços solicitados, em conformidade com os coeficientes de segurança estabelecidos;



**Projeto detalhado:** Com os processos de fabricação e as normas vigentes no país, quanto à segurança operacional e a confiabilidade do produto, detalhando a documentação para a construção do protótipo.

**Construção do protótipo:** Faz-se uso dos recursos disponíveis, fabricação e montagem, para a obtenção da forma física estabelecida e dimensionada nas fases anteriores.

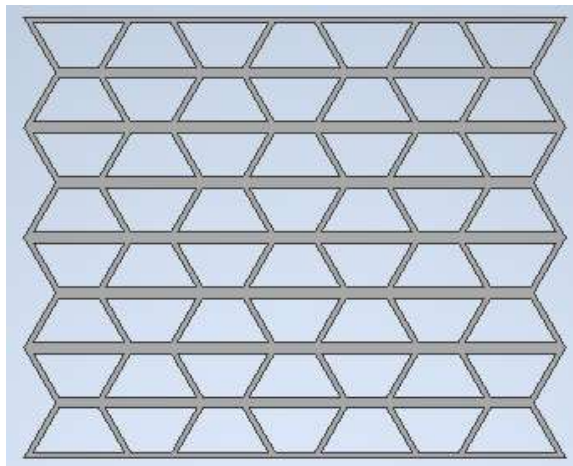
**Teste de validação:** Para saber se atende às especificações de projeto e, conseqüentemente, a demanda inicial.

## DESENVOLVIMENTO

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

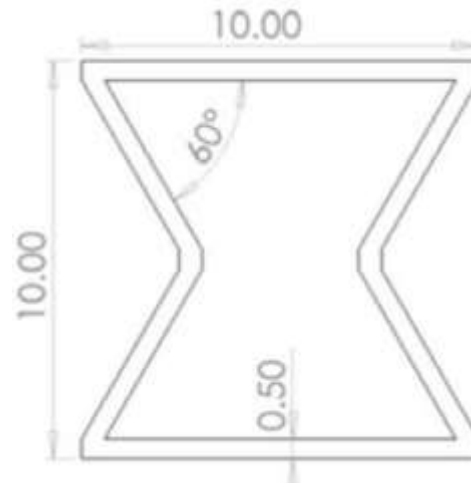
A amostra foi projetada computacionalmente utilizando o Inventor® 2024 (software de projetos mecânicos 3D, documentação e simulação de produtos) e é detalhado na figura 6. A estrutura é composta por uma estrutura celular reentrante de 30° repetida. Cada célula tem a altura fixa de 10mm, uma profundidade de 25mm e uma espessura de parede individual de 0,5mm que quando intersectada com outra célula forma uma espessura de 1mm. Os detalhes da célula são fornecidos na figura 7.

Figura 7 - Vista celular da estrutura reentrante de 30°



Fonte: Autoria Própria

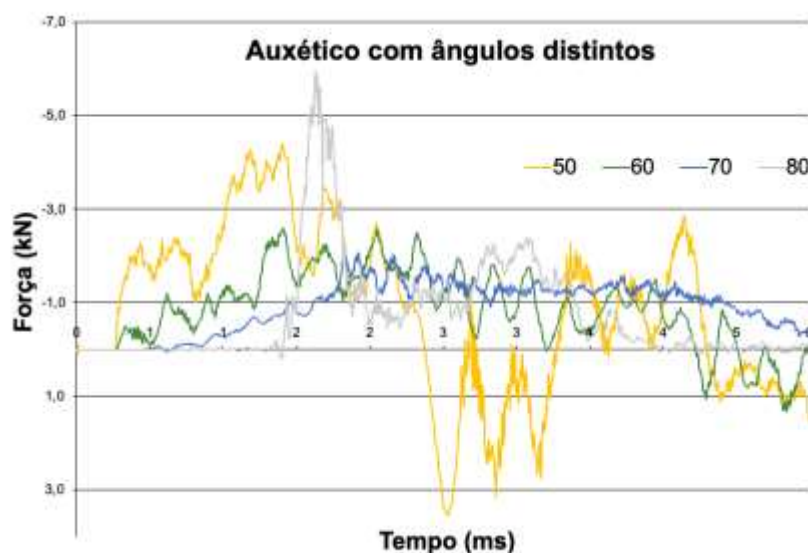
Figura 8 – Detalhes da célula Reentrante de 30°



Fonte: Autoria Própria

O ângulo de interno de 60° como mostrado nos detalhes da célula na figura 8 foi escolhido com base na tese de mestrado de Coutinho (2019) para a Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, onde mostra a comparação da força de impacto de geometrias auxéticas com diferentes ângulos internos e o ângulo de 60° mostra um bom desempenho com uma reação baixa e um tempo maior até que a força se manifeste.

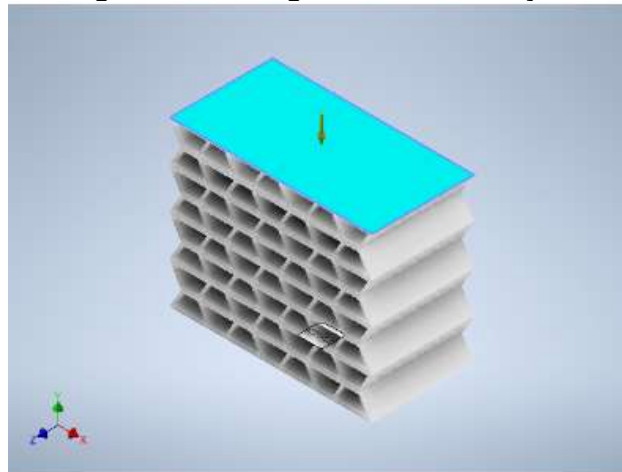
Figura 9 - Gráfico de comparação da força de impacto de geometrias auxéticas com diferentes ângulos internos.



Fonte: Coutinho, 2019

Utilizando também o Inventor® 2024 para a simulação, o diagrama de simulação é mostrado na figura 8. O meio do modelo é a estrutura com células reentrantes de 30°, a parte inferior é uma placa rígida e a superior é uma força aplicada de 100 kN.

Figura 10 – Diagrama de simulação



Fonte: Autoria Própria

O material do modelo é o plástico ABS, que é um material com propriedades parecidas com o PLA. De acordo com o Software os parâmetros do material são: módulo de Young  $E = 2,24 \text{ GPa}$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0,38$ , tensão de escoamento  $\sigma = 29,6 \text{ MPa}$  e densidade  $\rho = 1,08 \text{ g/cm}^3$ . O resultado da divisão da malha estrutural é mostrado na Figura 9, com um tamanho médio de  $0,1 \text{ mm}$  e com 58125 nós e 30184 elementos

Figura 11 – Divisão da malha na estrutura

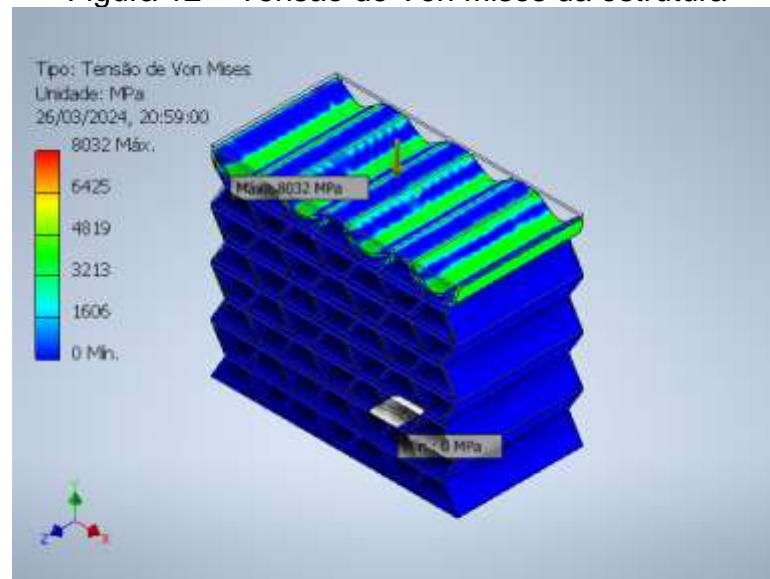


Fonte: Autoria Própria

Após a compressão computacional, o software nos mostra a tensão de Von Mises do material, o critério de falha de Von Mises indica que o escoamento de um

material sólido inicia quando o mesmo atinge um valor crítico, na figura 10 temos a tensão de Von Mises do material em, a esquerda temos uma escala que mostra o valor crítico que o material suporta (8032 MPa) antes de falhar e observando a compressão no material indicada pelas cores temos que esse valor não é atingido, sendo essa tensão um valor intermediário na escala, mostrando a resistência da estrutura para o teste com 100 KN.

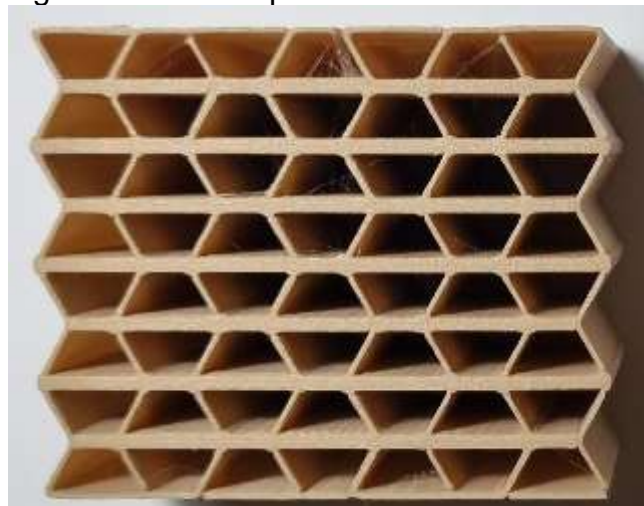
Figura 12 – Tensão de Von Mises da estrutura



Fonte: Autoria Própria

Foi então fabricado o protótipo em PLA utilizando impressão 3D para observação do comportamento auxético da estrutura quando comprimido, foi fabricado também um corpo de prova com estrutura não auxética para comparação dos dois tipos de estruturas quando comprimidas.

Figura 13 – Protótipo da Estrutura Reentrante



Fonte: Autoria Própria

Na compressão da estrutura auxética as imagens a seguir mostram o aparecimento dos primeiros rompimentos de célula, neste caso duas praticamente em simultâneo. Observa-se que esta quebra não ocorre na linha vertical do carregamento, mas um pouco desviada, mostrando a característica da estrutura em desviar a força aplicada para diagonais não se concentrando no local de aplicação.

Figura 14 – Aparecimento dos primeiros rompimentos



Fonte: Autoria Própria

Em seguida observa-se o rompimento das células superiores e inferiores tendo em vista que essas células possuem uma espessura menor, com 0,5mm, do que as células do interior da estrutura enquanto essas tem 1,0 mm devido a intersecção de células.

Figura 15 – Rompimento das células superiores e inferiores da estrutura

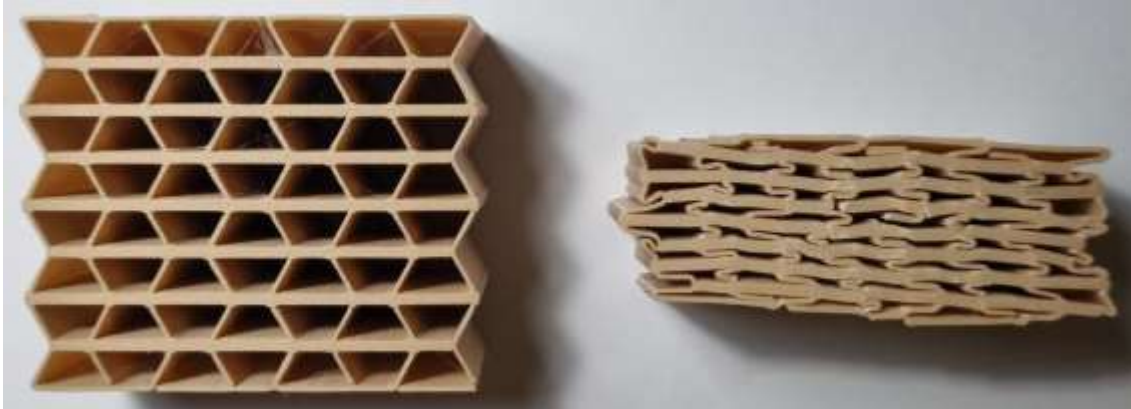


Fonte: Autoria Própria

Por fim temos o resultado final da compressão, onde foi mensurado uma redução de aproximadamente 50% no sentido vertical da peça e sem grandes deformações no sentido horizontal



Figura 16 - Comparação da estrutura antes e depois de comprimida



Fonte: Autoria Própria

Sendo esse resultado final da compressão comparável com resultados encontrados na literatura como mostra a figura a seguir do artigo *“Material minimization in 3D printing with novel hybrid cellular structures”*

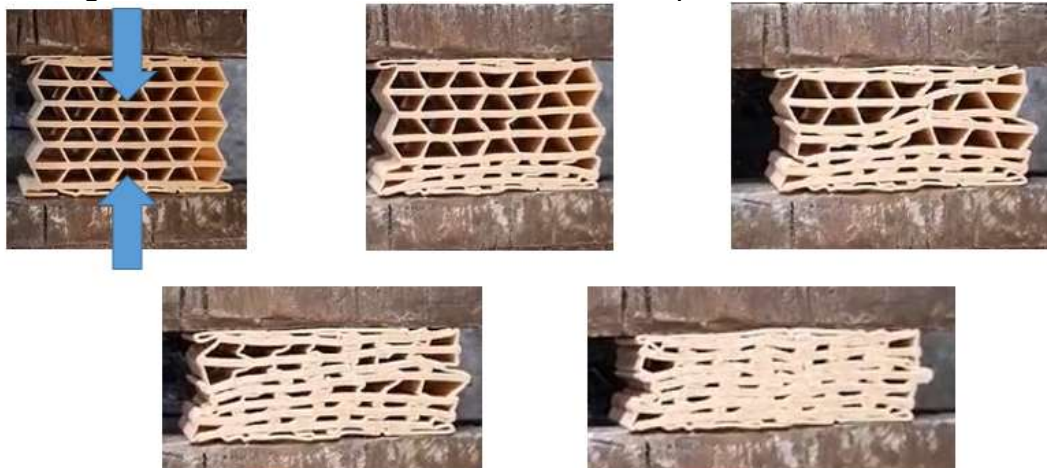
Figura 17 – Resultado da compressão da literatura



Fonte: Hazrat Ali, 2021

A seguir mostram-se distintos momentos da compressão do material auxético desde o sentido das forças atuando no início até a sua compressão e estado final.

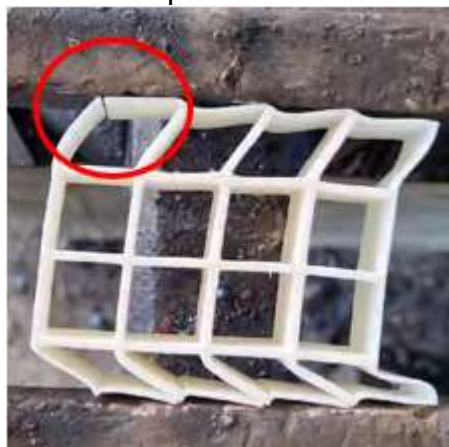
Figura 18 - Distintos momentos da análise qualitativa da estrutura



Fonte: Autoria Própria

Foi colocado então a estrutura não auxética submetida aos mesmos esforços para comparação qualitativa do comportamento entre as diferentes estruturas, fabricada também em PLA. A seguir tem-se a imagem dos primeiros rompimentos na estrutura auxética que também foram nas placas superiores que semelhante ao que aconteceu com a estrutura auxética já que tanto a placa inferior quanto a superior possuem menor espessura.

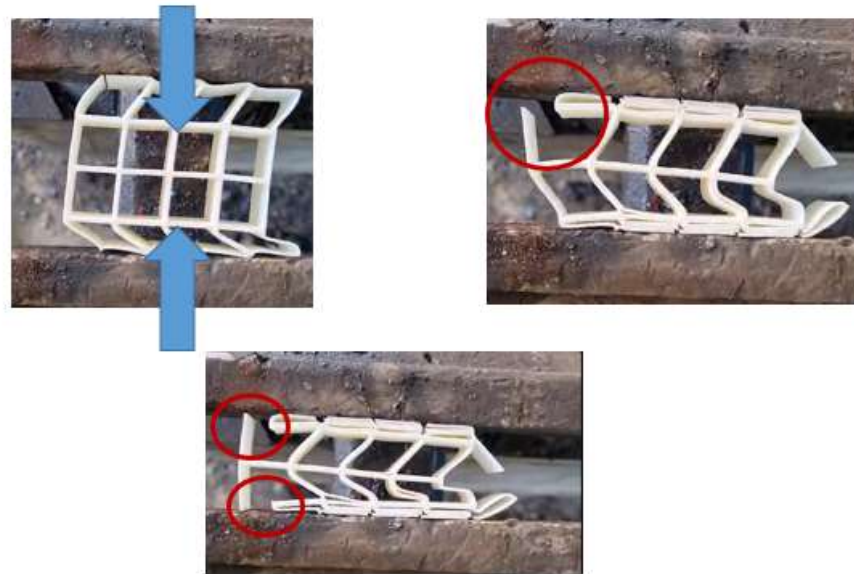
Figura 19 – Primeiros rompimentos na estrutura não auxética



Fonte: Autoria Própria

Ao seguir com a compressão porém começam a aparecer as diferenças as estruturas pois a estrutura não auxética, quando comprimida começam a se romper as paredes laterais, comportamento esse que não foi observado na estrutura auxética já que essa possui a característica de sofrer uma contração local e um acúmulo sob o carga onde é criada uma área de material mais denso com maior resistência a compressão. Na imagem a seguir temos as forças atuante na compressão e a sequência de rompimentos laterais na estrutura não auxética.

Figura 20 – Distintos momentos da análise qualitativa da estrutura não auxética



Fonte: Autoria Própria

Foi então realizado um ensaio quase estático em um corpo de prova auxético fabricado em PLA com o detalhe de que esse novo corpo de prova foi fabricado com dimensões de altura e largura dobradas na impressora BiquB B1 com o objetivo de se ter mais resistência mecânica já que como a espessura de 0,5 mm era muito pequena para o tipo de impressão FDM, o bico da impressora tem 0,4mm o que poderia não garantir a resistência mecânica desejada por isso foram dobrados as dimensões de altura e largura. O ensaio foi realizado com uma velocidade de penetração de 0,5 mm/min conforme determina a norma para ASTM C365-16 para estruturas do tipo “honeycomb”. A máquina utilizada para ensaiar foi a INSTRON 5582 essa é uma máquina de ensaio universal que permite testar uma ampla gama de propriedades mecânicas. Com ajustes simples, é possível medir propriedades de tração, flexão, compressão e outras propriedades de interesse.

Figura 21 – Máquina INSTRON 5582

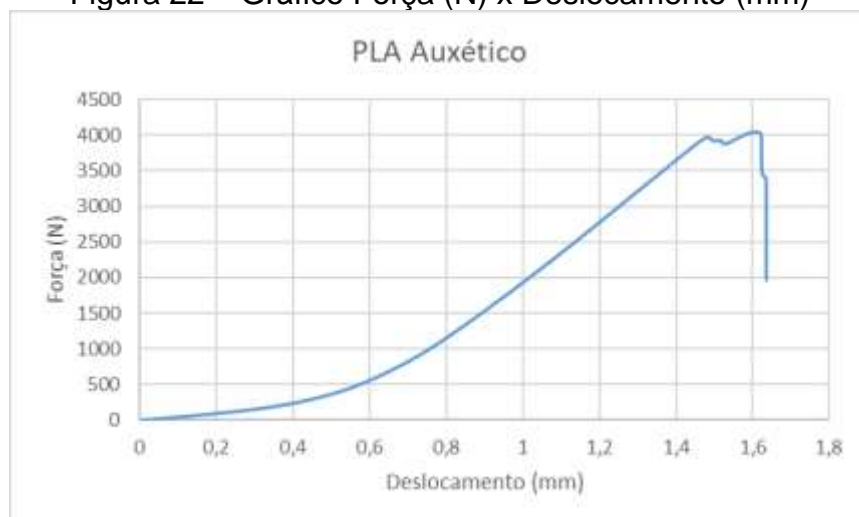




Fonte: Autoria Própria

Foi obtido então um gráfico força (N) x deslocamento (mm) para o auxético em PLA, observa-se no gráfico que a força aumenta com o deslocamento, fenômeno explicado pela densificação da estrutura à medida que sofre rupturas nas células, essa densificação no local da compressão faz com que a estrutura resista a mais força, sendo esse um resultado comparável com a literatura, detalhe para a ruptura do PLA auxético nesse caso aconteceu primeiro nas células inferiores e o ensaio foi parado assim que se teve a primeira ruptura com cerca de 4000N sem acontecer a compressão total pela máquina e por isso observou-se uma queda brusca no final do gráfico.

Figura 22 – Gráfico Força (N) x Deslocamento (mm)



Fonte: Autoria Própria

A imagem a seguir mostra o dano sofrido nas células inferior no auxético fabricado em PLA com as dimensões de altura e largura dobradas e que foi ensaio na INSTRON 5582

## **CONCLUSÃO**

Neste trabalho, conseguimos baseado na literatura conceber uma célula auxética que resista a compressão. Nossos resultados de simulação no Inventor® 2024 sugere que os primeiros rompimentos acontecem nas placas com menor espessura como a superior e a inferior, semelhante ao experimento realizado no auxético desenvolvido nesse trabalho. Além disso, observou-se que a estrutura auxética fabricada teve resultados comparáveis aos da literatura quando submetido a uma compressão, onde foi observado o fenômeno da densificação, já o material não auxético quando submetido a compressão devido ao coeficiente de Poisson positivo acabou falhando previamente por fratura o que pode ser visto com o rompimento de suas paredes laterais. Por fim, esses estudos mostram o quanto é promissor o uso de materiais auxético para o futuro desenvolvimento de estruturas para atenuação de impacto veicular.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil. PIBITI/CNPq-UFCG

## REFERÊNCIAS

- [1] ROMARIZ, L. A. Dano em placas laminadas devido ao impacto a baixas velocidades. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Págs. 165, São Paulo, 2008;
- [2] BUGELLI, Eduardo Barjud. Modelos de falha em análise numérica de estrutura veicular submetida a impacto de baixa velocidade / E. B. Bugelli. – São Paulo, 2010. 130p.
- [3] CESVI Brasil. I CONGRESSO PÓS-VENDA CESVI.
- [4] NETO, ANDRÉ LUIZ DE SOUZA. Projeto e construção de um dispositivo de absorção de impacto para veículo de competição fórmula SAE®. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, OURO PRETO, 2019
- [5] JUNIOR, FRANCISCO GALDINO. Desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- [6] GALHARDI, CAIO HENRIQUE. Projeto, construção e avaliação do comportamento mecânico de um atenuador de impacto de um veículo fórmula SAE. trabalho de conclusão de curso, Engenharia Automotiva, UFSC, Joinville, 2017.
- [7] Carneiro, Vitor & Meireles, José & Puga, Hélder. (2013). Auxetic materials — A review. MATERIALS SCIENCE-POLAND. 31. 561-571. 10.2478/s13536-013-0140-6.
- [8] Gaspar N (2010) A granular material with a negative Poisson's ratio. Mechanics of Materials 42(7): 673–677.
- [9] BACK, N.. **Metodologia de Projeto de Produtos Industriais**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1983, p. 10.
- [10] ASTM C365-16. Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. West Conshohocken, PA, USA: ASTM international, 2004.
- [11] MD. HAZRAT ALI SAGIDOLLA BATAI DULAT KARIM. Material minimization in 3D printing with novel hybrid cellular structures. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.185>, p. 10, 2021.