

## **Modelagem de modelos biomecânicos e sua aplicação em simulação biomecânica**

**Natasha Campalans Braga<sup>1,2</sup>, Leonardo M. R. Machado<sup>1</sup>, Izaque A. Maia<sup>1</sup>**

(ncbraga, lmachado, izaque.maia)@cti.gov.br

**<sup>1</sup>Laboratório Aberto de Tecnologias Tridimensionais - LAPRINT  
CTI/MCTI Renato Archer – Campinas/SP**

**<sup>2</sup>Faculdade de Engenharia Mecânica  
Universidade Estadual de Campinas – Campinas/SP**

**Abstract.** *The study of unit cells in metamaterials enables a fundamental understanding of how different structural configurations influence the behavior of materials composed of multiple repetitions of these units. A key phenomenon in this context is auxetic behavior, characterized by transverse expansion when the material is under tension and transverse contraction under compression, a response opposite to that of most conventional materials. This article investigates the effect of geometric organization in a cell composed of a re-entrant core combined with chiral struts, evaluating how angular variations of these elements affect the mechanical response of the arrangement. Using the Rhinoceros® software, angular transformations were applied to both the core and the struts of the unit cell, resulting in two models with identical external dimensions, which were then fabricated using additive manufacturing. Subsequently, displacement simulations were carried out in the SimSolid® software under the same boundary conditions. The results revealed clear differences between the models, indicating that the angular reorganization of the cell directly influences the auxetic behavior of the metamaterial.*

**Keywords:** *metamaterials; unit cells; auxetic materials.*

**Resumo.** *O estudo de células unitárias de metamateriais permite compreender, em nível fundamental, como diferentes configurações estruturais influenciam o comportamento de materiais compostos por múltiplas repetições dessas unidades. Um fenômeno de destaque nesse contexto é o comportamento auxético, que se caracteriza pela expansão transversal quando o material é traçado e pela contração transversal sob compressão, comportamento oposto ao da maioria dos materiais convencionais. Neste artigo, investigou-se o efeito da organização geométrica em uma célula composta pela combinação de núcleo re-entrante com trabéculas quirais, avaliando como variações angulares desses elementos afetam a resposta mecânica do arranjo. A partir da modelagem no software Rhinoceros®, foram realizadas transformações angulares na célula unitária, tanto no núcleo quanto nas trabéculas, resultando em dois modelos com mesmas dimensões externas, fabricados por manufatura aditiva. Posteriormente, simulações de deslocamento foram conduzidas no software SimSolid®, sob as mesmas condições de contorno. Os resultados evidenciaram diferenças claras entre os modelos, indicando que a reorganização angular da célula influencia diretamente o comportamento auxético do metamaterial.*

**Palavras-chave:** *metamateriais; células unitárias; materiais auxéticos.*

## 1. Introdução

Metamateriais são materiais projetados artificialmente a fim de exibir propriedades não encontradas na natureza (Matei et al., 2023). Eles são compostos por células unitárias organizadas em padrões repetitivos, de forma que seus componentes são arranjados e interconectados para obter características desejadas no projeto (Xiao et al., 2020). Materiais auxéticos possuem a característica no qual o coeficiente de Poisson é negativo, tais materiais têm como característica principal a expansão transversal quando tracionados, e a contração transversal quando comprimidos (Zhang et al., 2020). Eles podem ser aplicados em contextos relevantes, como em cirurgias ortopédicas, em que materiais auxéticos são projetados para imitar propriedades mecânicas de tecidos humanos, como tendões e também os microambientes celulares, regiões que regulam o comportamento das células por meio de sinais mecânicos e bioquímicos (Sun et al., 2024).

Há diversas categorias de células unitárias já conhecidas atualmente, sendo duas delas interessantes por seu comportamento complementar: as células re-entrantes e as células chirais (Jiang et al., 2019). As células re-entrantes são caracterizadas por um núcleo formado de ângulos internos agudos, ou seja, menores que  $90^\circ$ , sendo ideais para aplicações que exigem grande deformação estrutural sem perder as propriedades do material físico, além de possuir uma simetria espelhada ou rotacional, a qual permite construir redes uniformes (Wang et al., 2017). Já as células chirais não possuem simetria de espelhamento, acarretando a característica de ter um sentido de rotação definido. Dessa maneira, essas células são assimétricas com hastes inclinadas conectadas ao núcleo, as quais tendem a deformar caso uma tensão seja aplicada no modelo (Yoo et al., 2019). Essas células podem apresentar anisotropia, ou seja, podem responder em direções diferentes com a aplicação de tensão em uma direção específica (Hooper et al., 2017).

Essa combinação estrutural apresenta grande potencial em aplicações biomédicas. Células re-entrantes podem ser aplicadas em implantes flexíveis para mimetizar o comportamento do tendão de Aquiles, que possui resposta não linear e variações locais no coeficiente de Poisson, permitindo melhor adaptação ao movimento corporal (Hedayati et al., 2023). Já células quirais têm sido utilizadas em stents traqueais, substituindo modelos de silicone por estruturas mais flexíveis e porosas, que otimizam o fluxo de ar e reduzem complicações pós-implante (Liu et al., 2021).

Para visualização e entendimento de metamateriais, a técnica de manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, é utilizada, na qual se constroem objetos camada a camada a partir de modelos *Computer-Aided Design* (CAD), permitindo criar formas complexas em prototipagem rápida, amplamente utilizada na área médica (Junio et al., 2019). Outra técnica aplicada é a simulação computacional, onde a análise de modelos em CAD é feita a partir de parâmetros inseridos, como as propriedades mecânicas do material, a força aplicada ou até mesmo a quantidade de deslocamento desejada (Nguyen et al., 2008).

Tendo em vista a vasta aplicabilidade de metamateriais, o objetivo deste projeto é explorar diferentes formas de organização de uma célula composta por um núcleo re-entrante e trabéculas chirais, com o intuito de observar o comportamento auxético da estrutura. Para isso, foram impressos dois modelos do metamaterial e, em seguida, foram feitas duas simulações destes modelos a fim de obter valores de seu desempenho mecânico de deslocamento.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Modelagem CAD 3D Rhinoceros®

A primeira etapa do projeto constituiu no desenvolvimento de uma célula unitária para posterior formação de metamaterial no *software* Rhinoceros®. O núcleo re-entrante e a trabécula quiral da célula estudada foi baseada no modelo apresentado por Jiang et al., (2018).

As dimensões da célula unitária e das trabéculas influenciam diretamente o comportamento mecânico global do metamaterial. A variação do tamanho da célula altera a densidade estrutural e a resposta macroscópica do sistema: células menores promovem maior resolução e continuidade na deformação, enquanto células maiores tendem a gerar comportamento mais segmentado e menor rigidez global. A espessura e o comprimento das trabéculas determinam a rigidez local, a capacidade de rotação interna e a intensidade do efeito auxético. Isso significa que, se a espessura das trabéculas for exagerada, o arranjo não terá o comportamento móvel esperado.

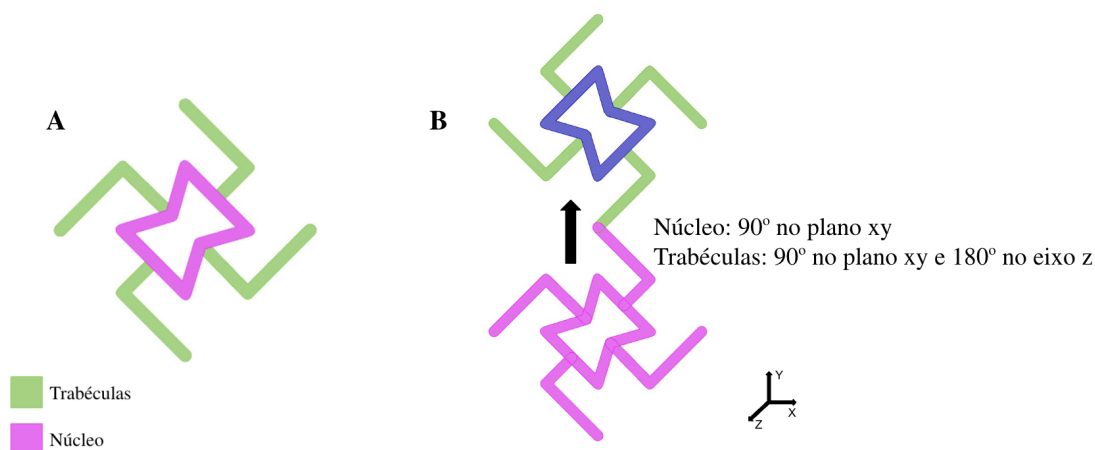


Figura 1. Células unitárias desenvolvidas no software Rhinoceros®  
Fonte: Autoral

Na Figura 1, estão modeladas as duas células unitárias utilizadas no projeto, sendo que ambas apresentam núcleo com características re-entrantes e trabéculas com características chirais. A Figura 1A corresponde à primeira célula unitária desenvolvida para o primeiro metamaterial analisado. A Figura 1B representa as modificações da

célula da Figura 1A para o segundo metamaterial, na qual as trabéculas e o núcleo foram alteradas em rotações distintas: o núcleo foi rotacionado em  $90^\circ$  no plano xy; e as trabéculas foram rotacionadas em  $90^\circ$  no plano xy e  $180^\circ$  no eixo z.

Para desenvolvimento dos metamateriais em si, a partir dos modelos geométricos da Figura 1, foi aplicado o comando *Array* no *software* Rhinoceros® com o intuito de replicar essa célula em uma matriz bidimensional. Esse processo permitiu a construção de um metamaterial com padrão regular e contínuo, preservando as características estruturais das células originais. A replicação possibilita a análise do comportamento mecânico da estrutura composta, sendo uma etapa fundamental no estudo das propriedades obtidas pela configuração adotada.

A Figura 2A corresponde ao metamaterial da primeira célula unitária (Figura 1A), a qual foi extrudada em 6mm na visão em perspectiva (Figura 2B). Esse primeiro arranjo é inteiramente quiral, ou seja, não apresenta simetria em nenhuma direção. A Figura 2C representa o metamaterial da segunda célula unitária desenvolvida (Figura 1B), a qual foi extrudada em 6mm na visão em perspectiva (Figura 2D). Esse segundo arranjo é espelhado em linha, ou seja, na direção horizontal ele apresenta simetria.

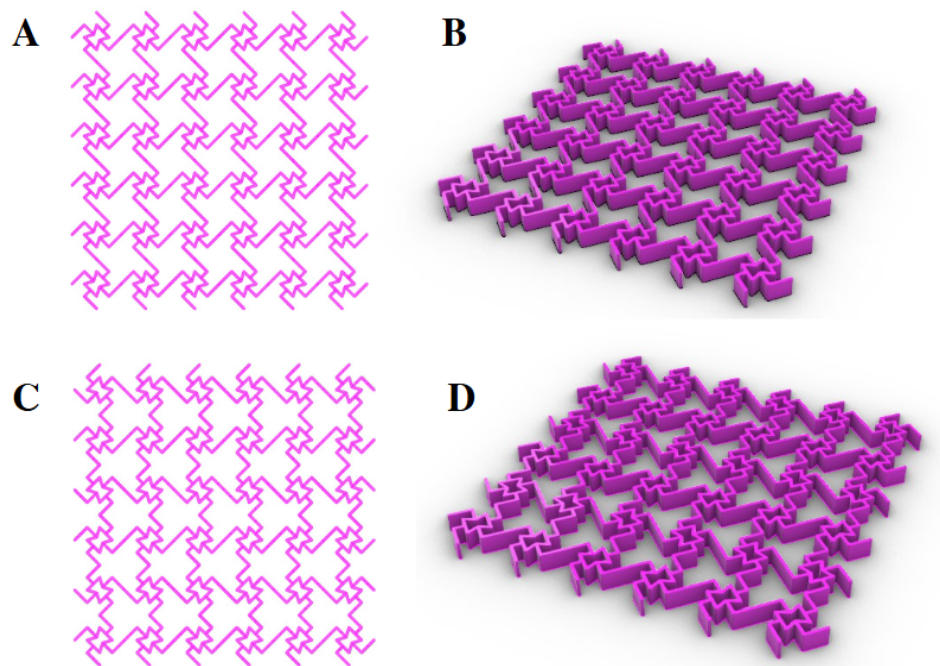


Figura 2. Metamateriais desenvolvidos

A e B) Primeiro arranjo desenvolvido; C e D) Segundo arranjo desenvolvido

Fonte: Autoral

Modelos em formato *Standard Tessellation Language* (STL) foram gerados para cada metamaterial com o objetivo de criar um modelo tridimensional que possa ser

fatiado para a impressão em tecnologia de manufatura aditiva. Ambos os modelos foram definidos com altura extrudada de 6 mm, largura de 120 mm e comprimento de 120 mm, totalizando 36 células unitárias no primeiro arranjo e 18 células unitárias no segundo arranjo. Além disso, a espessura das trabéculas e hastes do núcleo central foi padronizada em 1 mm, valor escolhido para garantir tanto a coerência geométrica entre os modelos quanto a viabilidade de fabricação por impressão 3D, utilizando a tecnologia *Fused Filament Fabrication* (FFF). Essa espessura permite preservar os detalhes da geometria sem comprometer a integridade estrutural das peças durante o processo de impressão, respeitando os limites técnicos, de mínimo 0,8 mm, da tecnologia utilizada.

## 2.2. Impressão do modelo em PETG por manufatura aditiva FFF

Após a modelagem de ambos os modelos (Figura 2), a fabricação dos modelos físicos foi realizada por meio de impressão 3D utilizando a tecnologia FFF. Para isso, foi empregada a impressora Catbolt modelo PIC300, com o uso do polímero *Polyethylene Terephthalate Glycol-modified* (PETG) como material de impressão. A escolha do PETG se deve à sua boa resistência mecânica, estabilidade dimensional e facilidade de extrusão, características que o tornam adequado para a reprodução de geometrias complexas como as presentes nos metamateriais analisados. A combinação entre o equipamento e o material permitiu a obtenção de peças com qualidade superficial satisfatória e boa fidelidade às dimensões projetadas.

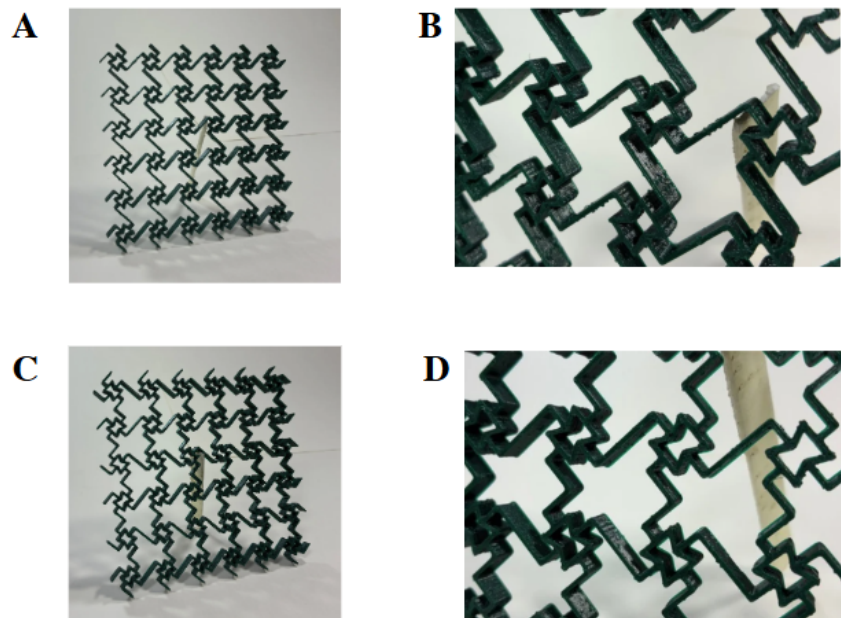


Figura 3. Impressões 3D dos metamateriais desenvolvidos

A) Impressão 3D do primeiro arranjo desenvolvido; B) Destaque da impressão do primeiro arranjo; C) Impressão 3D do segundo arranjo desenvolvido; D) Destaque da impressão do segundo arranjo

Fonte: Autoral

## 2.2. Simulação de deslocamento SimSolid®

Para a realização da simulação no *software*, foram adicionadas manualmente as informações do material isotrópico linear PETG empregado no processo de impressão 3D por FFF. O módulo de Young e o coeficiente de Poisson foram adotados conforme reportadas por Ciganas et al. (2022). Já a densidade foi adotada conforme Pandžić et al. (2022). Os valores utilizados estão sintetizados na Tabela 1.

| Propriedades                   | PETG   |
|--------------------------------|--------|
| Módulo de Young (MPa)          | 2950.0 |
| Coeficiente de Poisson         | 0.4    |
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.29   |

Tabela 1. Propriedades adotadas do PETG  
Fonte: Autoral

Condições de contorno são restrições impostas a um modelo numérico que define como a estrutura pode se mover ou interagir com o ambiente ao seu redor durante a simulação. Em termos práticos, elas representam apoios, fixações, deslocamentos ou cargas aplicadas ao sistema. No contexto de simulações realizadas no *software* SimSolid®, a definição correta das condições de contorno é fundamental para garantir que o modelo represente fielmente o comportamento real da estrutura sob análise. Ambos os materiais nesse projeto estão sobre análise de deslocamento dos arranjos, ou seja, para conseguir realizar a simulação no *software*, foram inseridas duas condições de contorno: a superfície superior dos metamateriais é presa, ou seja, ela não sofre deslocamento, e a superfície inferior é tracionada até uma distância de 10mm no eixo y.

A Figura 4 mostra em A o modelo do primeiro metamaterial sem sofrer nenhum deslocamento, e em B sofrendo o deslocamento máximo programado de 10mm.

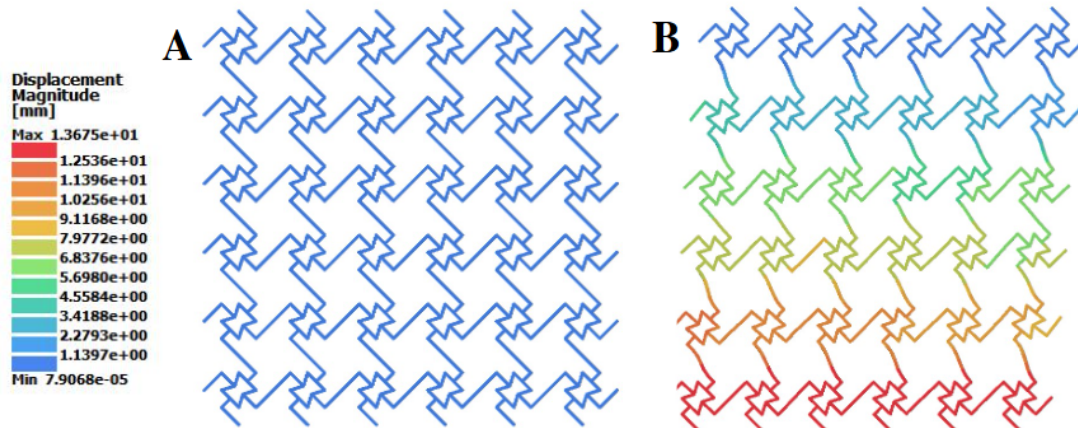


Figura 4. Simulação no SimSolid do metamaterial da Figura 2 (A e B)

A) Modelo não deformado; B) Modelo deformado

Fonte: Autoral

A Figura 5 mostra em A o modelo do segundo metamaterial sem sofrer nenhum deslocamento, e em B sofrendo o deslocamento máximo programado de 10mm.

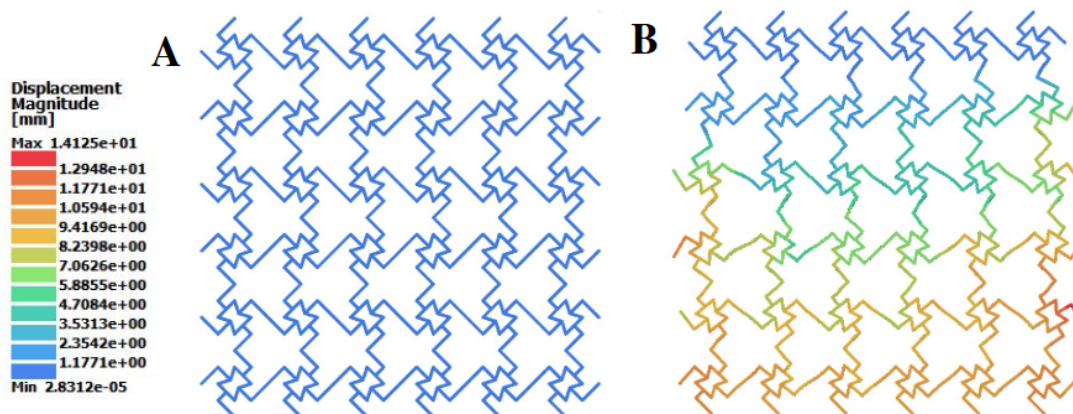


Figura 5. Simulação no SimSolid do metamaterial da Figura 2 (C e D)

A) Modelo não deformado; B) Modelo deformado

Fonte: Autoral

Vale destacar que a análise foi conduzida principalmente com base na interpretação das escalas de cores apresentadas nas simulações. Nessas escalas, os tons mais frios, como o azul, indicam regiões com menor magnitude de deslocamento, enquanto os tons mais quentes, como o vermelho, correspondem às áreas com maior deslocamento. Além da intensidade do deslocamento, a direção na qual a célula se expande é determinante para a caracterização do comportamento auxético do arranjo.

Outro aspecto relevante refere-se ao valor mínimo de deslocamento exibido na legenda da simulação: embora numericamente diferente de zero, esse valor é desprezível e tende a zero, caracterizando um deslocamento insignificante. Assim, para fins de análise, o deslocamento mínimo será considerado nulo.

### **3. Resultado e discussão**

As Figuras 4 e 5 apresentam os resultados de deslocamento obtidos nas simulações realizadas para os dois arranjos distintos de metamateriais. A análise dos mapas de deslocamento revela diferenças significativas no comportamento estrutural entre os modelos, evidenciando a influência da configuração geométrica na resposta mecânica.

Na Figura 4, correspondente ao primeiro modelo, observa-se uma concentração de deslocamento predominante na porção inferior da estrutura, com a região inferior assumindo coloração vermelha intensa e transições em tons de laranja logo acima. O deslocamento geral do modelo tende para baixo e levemente à esquerda, indicando um comportamento direcional e não auxético. Esse comportamento é consistente com o observado na versão física do mesmo modelo na Figura 3A, validando a coerência entre simulação e protótipo.

Por outro lado, a Figura 5, que representa o segundo modelo simulado, mostra um padrão de deslocamento distribuído de forma mais abrangente. As tensões se concentram nas três bordas livres, inferior, esquerda e direita, evidenciando que a estrutura sofre expansão lateral simultânea à tração vertical. Essa distribuição espacial de deslocamento é característica de um comportamento auxético, no qual a estrutura se expande em múltiplas direções, ao invés de apenas alongar-se na direção da força aplicada como na Figura 4. A resposta, evidenciada pela coloração uniforme nas bordas laterais, reforça o efeito geométrico desejado, alcançado por meio das modificações do arranjo da célula unitária.

Ao analisar os valores de deslocamento obtidos nas simulações, observa-se que ambos os modelos apresentaram deslocamentos máximos superiores ao deslocamento prescrito de 10 mm. O primeiro arranjo (Figura 4) atingiu um deslocamento máximo de aproximadamente 13,7 mm, enquanto o segundo arranjo (Figura 5) apresentou um deslocamento máximo em torno de 14,1 mm. Embora o primeiro arranjo indique numericamente um deslocamento compatível com comportamento auxético, a ausência de expansão lateral visível descarta essa interpretação, revelando um comportamento estrutural não auxético. Por outro lado, o segundo arranjo apresenta, além de um maior deslocamento total, um deslocamento visualmente compatível com a expansão lateral característica de materiais auxéticos. Esses resultados confirmam que a reorganização geométrica aplicada ao segundo modelo favoreceu o comportamento auxético da estrutura, evidenciando sua maior eficiência em comparação ao primeiro arranjo.

## 4. Conclusão

Diante do objetivo proposto, os resultados obtidos por meio da impressão 3D e das simulações computacionais permitiram identificar com clareza a influência da arquitetura na resposta mecânica dos metamateriais. A análise comparativa entre os dois modelos demonstrou que, embora ambos compartilhem os mesmos elementos geométricos básicos, a reorganização espacial dessas unidades alterou significativamente seu desempenho estrutural.

O primeiro modelo apresentou um comportamento não auxético, com deslocamento concentrado principalmente na direção da carga, sem expansão lateral. Em contraste, o segundo modelo evidenciou deformações distribuídas também nas direções laterais, o que caracteriza a presença de efeito auxético. Isso confirma que a combinação e o arranjo entre núcleo re-entrante e trabéculas quirais são capazes de gerar respostas mecânicas distintas, mesmo utilizando o mesmo material isotrópico linear.

Assim, conclui-se que a organização geométrica da célula unitária é determinante para o comportamento do metamaterial, e que pequenas alterações no arranjo espacial podem induzir ou suprimir propriedades auxéticas. Os dados de deslocamento obtidos nas simulações validam a eficácia do segundo arranjo na promoção desse efeito, reforçando o papel central da organização da geometria no desenvolvimento de estruturas funcionais avançadas.

## 5. Agradecimentos

Gostaria de expressar meu agradecimento ao comitê, ao CNPq, ao CTI e ao MCTI pela oportunidade e suporte com a bolsa.

Agradeço profundamente ao meu co-orientador, Leonardo M. R. Machado e ao meu orientador Izaque A. Maia.

Agradeço, também, ao Railson Bolsoni Falcão pela impressão 3D das peças deste projeto.

## Referências

- MATEI, A. T.; VIŞAN, A. I.; POPESCU-PELIN, G. F. Design and processing of metamaterials. *Crystals*, Basel, v. 15, n. 4, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst15040374>.
- XIAO, S. et al. Active metamaterials and metadevices: a review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, [S.l.], v. 53, n. 50, p. 503002, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abaced>.
- ZHANG, J.; LU, G.; YOU, Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: a review. *Composites Part B: Engineering*, [S.l.], v. 201, p. 108340, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108340>.

- SUN, M. et al. Auxetic biomedical metamaterials for orthopedic surgery applications: a comprehensive review. *Orthopaedic Surgery*, [S.l.], v. 16, n. 8, p. 1801-1815, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/os.14142>.
- JIANG, Y. et al. Limiting strain for auxeticity under large compressive deformation: chiral vs. re-entrant cellular solids. *International Journal of Solids and Structures*, [S.l.], v. 162, p. 87-95, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.11.035>.
- WANG, X. T. et al. Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, [S.l.], v. 131, p. 396-407, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.05.048>.
- YOO, S.; PARK, Q. H. Metamaterials and chiral sensing: a review of fundamentals and applications. *Nanophotonics*, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 249-261, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2018-0167>.
- HOOVER, D. C. et al. Strong rotational anisotropies affect nonlinear chiral metamaterials. *Advanced Materials*, [S.l.], v. 29, n. 13, p. 1605110, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201605110>.
- HEDAYATI, R. et al. Analytical relationships for 2D re-entrant auxetic metamaterials: an application to 3D printing flexible implants. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, [S.l.], v. 143, p. 105938, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105938>.
- LIU, J. et al. A flexible porous chiral auxetic tracheal stent with ciliated epithelium. *Acta Biomaterialia*, [S.l.], v. 124, p. 153-165, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.01.044>.
- JUNIO, R. F. P. et al. Development and applications of 3D printing-processed auxetic structures for high-velocity impact protection: a review. *Eng*, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 903-940, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/eng4010054>.
- NGUYEN, V. P. et al. Meshless methods: a review and computer implementation aspects. *Mathematics and Computers in Simulation*, [S.l.], v. 79, n. 3, p. 763-813, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.01.003>.
- JIANG, Y.; LI, Y. 3D printed auxetic mechanical metamaterial with chiral cells and re-entrant cores. *Scientific Reports*, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20795-2>.
- CIGANAS, J. et al. Development of finite element models of PP, PETG, PVC and SAN polymers for thermal imprint prediction of high-aspect-ratio microfluidics. *Micromachines*, [S.l.], v. 13, n. 10, p. 1655, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi13101655>.
- PANDŽIĆ, A.; HODŽIĆ, D. Tensile mechanical properties comparison of PETG, ASA and PLA-strongman FDM printed materials with and without infill structure. In: DAAAM INTERNATIONAL SYMPOSIUM, 33., 2022. Proceedings [...]. [S.l.: s.n.], 2022. p. 0221-0230. DOI: 10.2507/33rd.daaam.proceedings.xxx.