

Aplicação de metamateriais em equipamentos de proteção

**Sarah M. Ferraz ^{1 2}, Marcília V. Guimarães ¹, Leonardo M. R. Machado ¹ &
Pedro Y. Noritomi ¹**

[smferraz, mvguimaraes, lmachado, pnoritomi]cti.gov.br

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

**² Faculdade de Engenharia de Computação
Pontifícia Universidade Católica de Campinas/SP**

Abstract.

Safety equipment is essential for impact prevention in many professions. Today, its composition consists of several layers, each with a specific purpose, often making the equipment heavy and less mobile. Advances in additive manufacturing now enable printing with durable materials that can be flexibly molded, acquiring new properties such as dissipating and absorbing impacts. This opens up new ways of designing the parts of this equipment, improving and enhancing its usability.

Keywords: metamaterials, wearables, CAD, helmet, protective equipment.

Resumo.

O uso de equipamentos de segurança é necessário para a prevenção de impactos em diversas profissões. Hoje a sua composição é concretizada por diversas camadas, cada uma com uma especialidade, deixando o equipamento, muitas vezes, pesado e com baixa mobilidade. Agora, os avanços na indústria de manufatura aditiva, possibilitam a impressão com materiais resistentes que podem ser moldados de uma maneira flexível, adquirindo novas propriedades como dissipar e absorver impactos, o que abre espaço para novas maneiras de planejamento para as partes destes equipamentos, aprimorando e trazendo melhor utilidade

Palavras-chave: metamateriais, vestíveis, CAD, capacete, equipamento de proteção.

1. Introdução

Muitas profissões precisam de equipamentos de proteção, sejam elas, eletricitistas e construtores com EPIs ou atletas de alta performance como jogadores de futebol americano e ciclistas com seus equipamentos de proteção, dentre eles o mais importante sendo o capacete. Em ambos os casos essas proteções tem o intuito de prevenir lesões, absorver e dissipar os impactos que podem ocorrer ao executarem suas funções ou em possíveis intercorrências, como acidentes. Já para os atletas ao serem feitos com materiais mais leves, com um desenho aerodinâmico podem promover melhor desempenho em competições, sem que

ocorra quebra das regras esportivas. [MELLO, 2025][HANNA et al., 2021]

Hoje os capacetes são compostos por camadas planejadas de proteção, tendo funções distintas para cada uma das seções e buscando leveza e rigidez simultaneamente. Uma camada externa rígida para proteção, podendo ser plástico, fibra de vidro ou carbono; uma espuma e tecido no interior para proteger a cabeça e conforto. Mas esse conjunto de camadas faz com que o capacete fique mais pesado e dependendo dos materiais utilizados seu preço pode aumentar drasticamente. Para poder resolver o peso, custo e melhorar seu desempenho na segurança, a criação de modelos 3D com o uso de metamateriais para serem impressos é uma solução viável e acessível. [HAID et al., 2023]

Metamateriais são as estruturas planejadas que podem ser feitas por de desenho, molde ou impressão 3D com o intuito de mudar o comportamento de um material específico. Essa mudança toma forma dependendo das propriedades que se precisa para o uso do metamaterial, seja na proteção contra impactos, sendo isolantes térmicos e acústicos, moldando-se para expandir ou comprimir quando uma força for aplicada nele. [KUMAR et al., 2022][SADEGHI et al., 2023]

A estrutura usada para a construção do capacete foi um TPSM (Triply Periodic Minimal Surface) com células do tipo giroide que apresentam uma geometria contínua, caracterizada pela ausência de cantos vivos, que consegue se expandir e contrair quando uma força for aplicada ou absorver e dissipar o impacto que ela pode sofrer. Por conta dessa geometria há uma maior dificuldade na propagação de trincas quando submetidas a esforços mecânicos. [ASBAI-GHOUDAN et al., 2021]

Além de suas propriedades serem diversas por conta da sua possibilidade de adaptação por meio do planejamento de design, o uso prático também é muito variado, pois a técnica possibilita gerar células para praticamente qualquer desafio de engenharia, sendo o foco deste trabalho as aplicações mecânicas. Estes podem estar em equipamento médico, em roupas, ou em equipamentos de proteção. Em cada caso eles são estruturados para suprir uma necessidade, ao colocar em um capacete, nas funções que o metamaterial assume são: rígido no exterior, maleável entre as partes rígidas e moldável no interior. [VALIPOUR et al., 2022] [HOLMES et al., 2022)]

2. Materiais e métodos

2.1. Desenho do capacete

Para ser feito o desenho do capacete foi usado o software de desenho em 3D Rhinoceros® e um modelo de referência de capacete de bicicleta comum (<https://www.thingiverse.com/thing:5320966>), deste foi tirado contorno das partes rígidas e separadas em 3 partes: a de baixo (azul), do meio (roxa) e a de cima (verde) - Figura 1a.. Nas partes que eram vazadas do capacete foi criada a ideia de colocar um metamaterial de expansão para ajudar no ajuste do tamanho da circunferência da cabeça e conforto do usuário - Figura 1b.

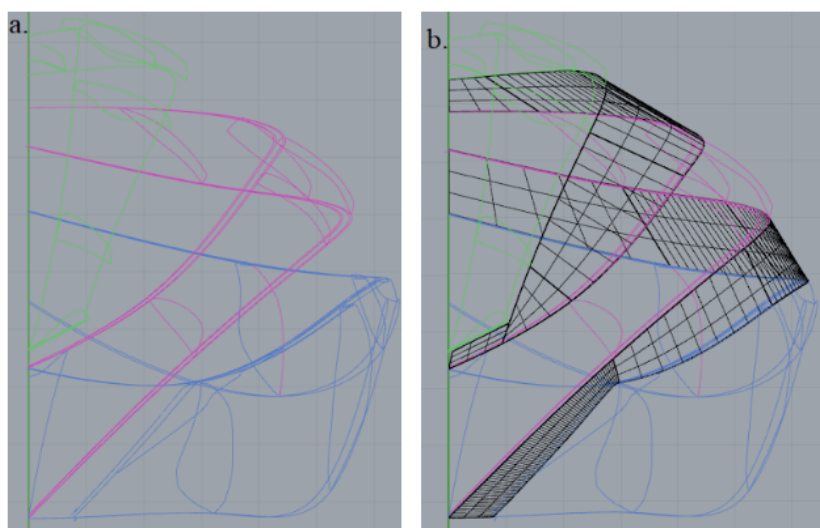


Figura 1: Desenho inicial da estrutura do capacete

Após a criação desse contorno, foi preciso ser feito o “rabo de andorinha”, uma técnica de encaixe para prender as partes rígidas e o metamaterial de expansão. Primeiro foram criadas três linhas paralelas todas do lado interno do capacete, duas para serem os trilhos que o rabo de andorinha iria percorrer e uma última, mais longe, para ser as coordenadas da parede interna. Esse processo foi repetido ao longo de todas as partes rígidas do capacete. Em seguida foi feito o desenho do rabo de andorinha e colocado no final de cada trilho.

Com todas essas partes prontas, foi feito o “rabo de andorinha” por toda a estrutura - Figura 2, logo após, foi iniciada a construção das paredes. A priori foi feita a parede exterior do capacete.

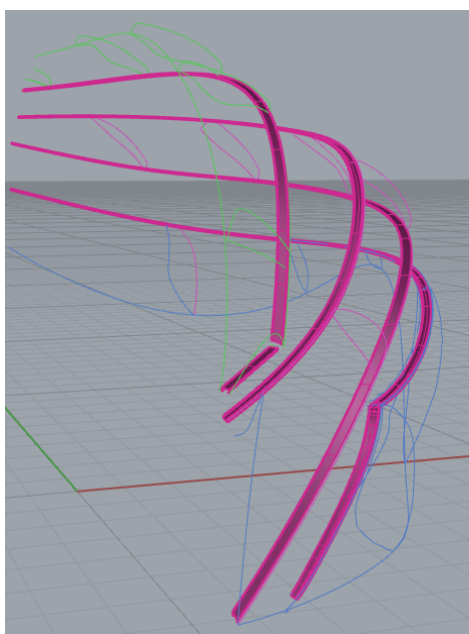


Figura 2: Desenho do “rabo de andorinha” por todo o capacete

Com a estrutura pronta, uma cópia foi realizada e sua escala ajustada para caber na parte interna, neste momento do desenho foi notado um problema na construção da parede de baixo do capacete por conta de um corte realizado na estrutura o que levou o encontro das paredes com um trilho em formato rabo de andorinha - Figura 3a. Para poder resolver isso foi criada uma parede inclinada e moldada para não interferir um no outro e assim finalizando a primeira construção do capacete.

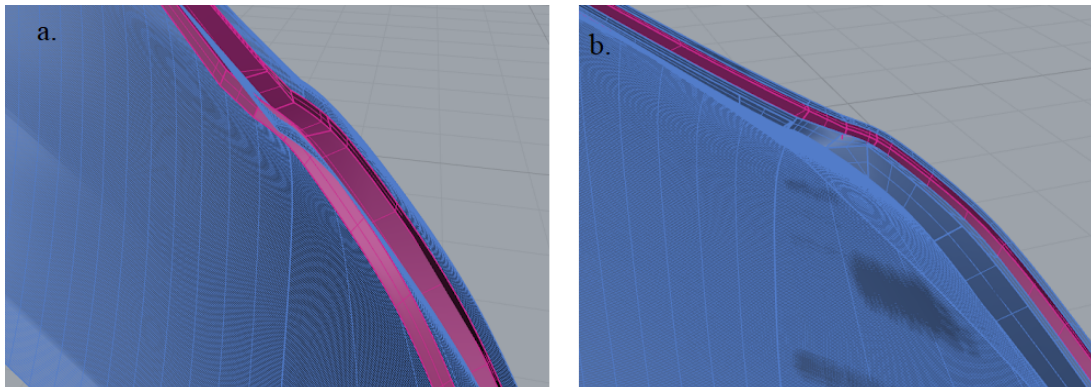


Figura 3: Interferência dos trilhos com as paredes

Para dar continuidade com o desenho, foi necessário que a estrutura rígida formasse um polígono fechado, mas por conta dos ajustes e reconstruções, as paredes tinham partes abertas que não eram possíveis serem fechadas, então uma nova estratégia para formar as paredes foi desenvolvida.

Agora, ao invés de fazer primeiro a parte externa e depois a interna, as duas seriam feitas ao mesmo tempo, como se elas fossem revestir a estrutura já desenhada. Essa solução foi bem executada no início mas depois foi notado que a superfície não estava ficando liza. Por estar seguindo ponto a ponto do desenho havia muitas imperfeições e qualquer mudança na posição da sequência do ponto davam um resultado impreciso e inconsistente - Figura 4.

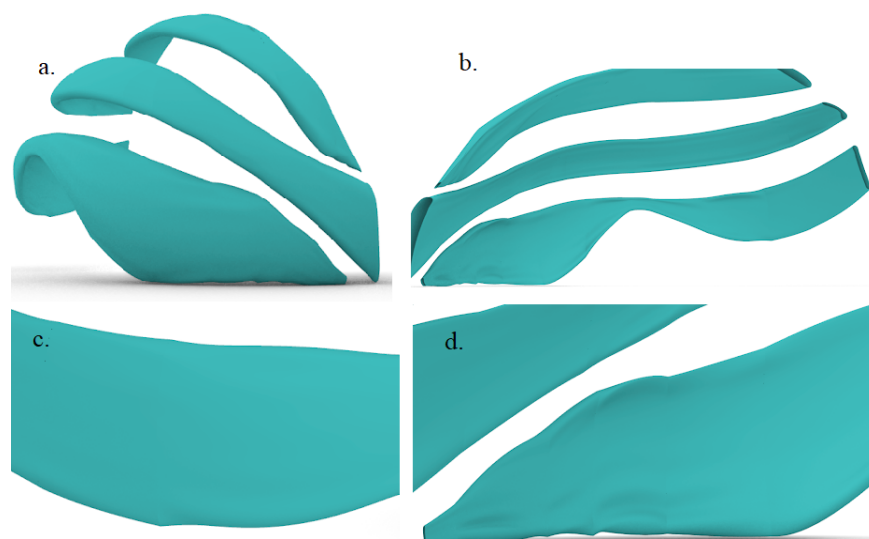


Figura 4: Superfícies das paredes

Mais uma vez foi necessário desenvolver o modelo de uma nova maneira de construir as paredes do equipamento, foi então que teve-se a ideia do uso da mesma maneira que foi feito o rabo de andorinha para fazer a parede, ou seja, usando a borda do capacete como trilhos. E ao invés de usar a curvatura do próprio capacete, foi feito o desenho de uma curva que procurava não interferir no trilho e ainda sim deixar uma superfície lisa e uniforme. Sendo desta forma possível de ajustar as paredes internas e externas independentemente, criando um aspecto limpo e fluido para o capacete - Figura 5.

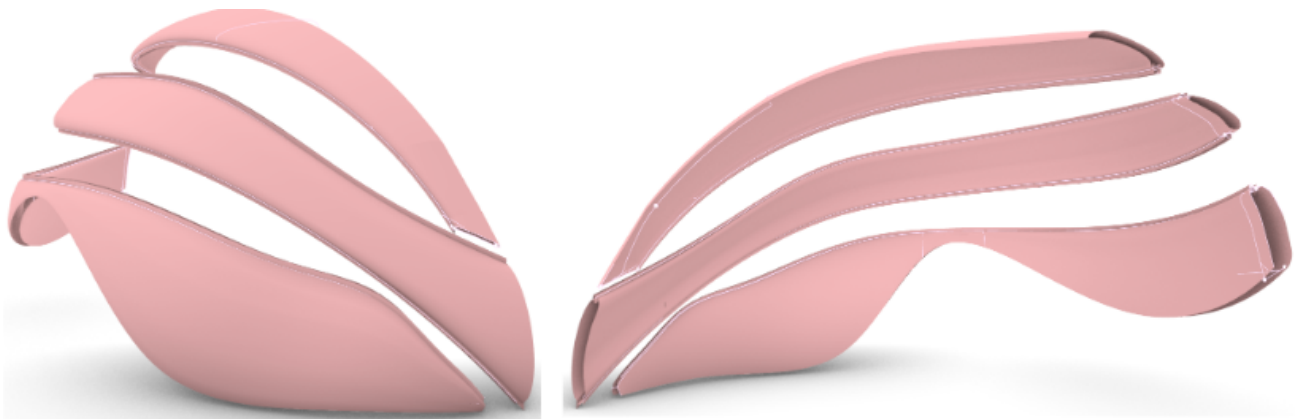


Figura 5: Superfícies das paredes

Com o desenvolvimento da nova solução, com todas as partes do capacetes construídas, foi necessário aumentar sua largura. Então as paredes foram afastadas uma da outra e as partes em aberto foram completadas concluindo a construção do capacete - Figura 6.

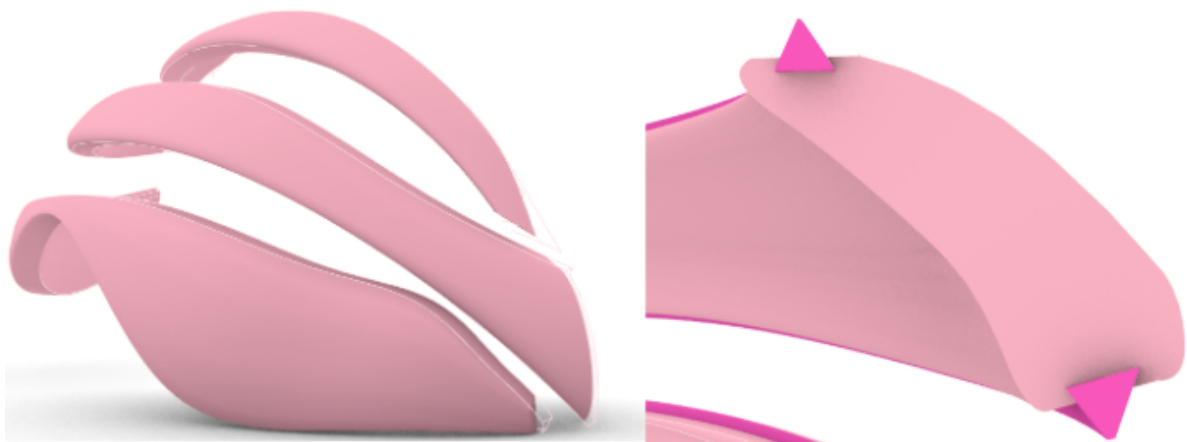


Figura 6: Desenho final das paredes

2.2. Aplicação do metamaterial

Para a escolha do metamaterial foi usado o software Inspire 2024[®], e com os metamateriais já existentes, foi escolhido um TPMS com células do tipo giroide, utilizando uma configuração do metamaterial ficou em 60% de preenchimento, com 16 células no plano cartesiano. Foi escolhido este tipo de célula repetitiva, pois dentre as disponíveis ela apresentava a melhor relação de absorção de impacto. [Miralbés et al. 2022; Bao et al., 2024; Tilley et al., 2024; Holmes et al., 2022]

Junto a ela, foi utilizado um modelo de metamaterial mesoestrutura, de forma a possibilitar a adequação do dispositivo na cabeça de seu usuário, sendo esta posicionada nas guias em forma de rabo de andorinha.

Com essa escolha feita, é necessário inserir este metamaterial no capacete. Para isso, o desenho foi transformado em uma malha SLT, - Imagem 16 - o que facilita a exportação entre aplicativos e para a aplicação foi usado o software 3D Builder[®] e após algumas tentativas, de modo a unir as malhas STL tanto das placas rígidas do giroide com os detalhes do capacete - Figura 7.

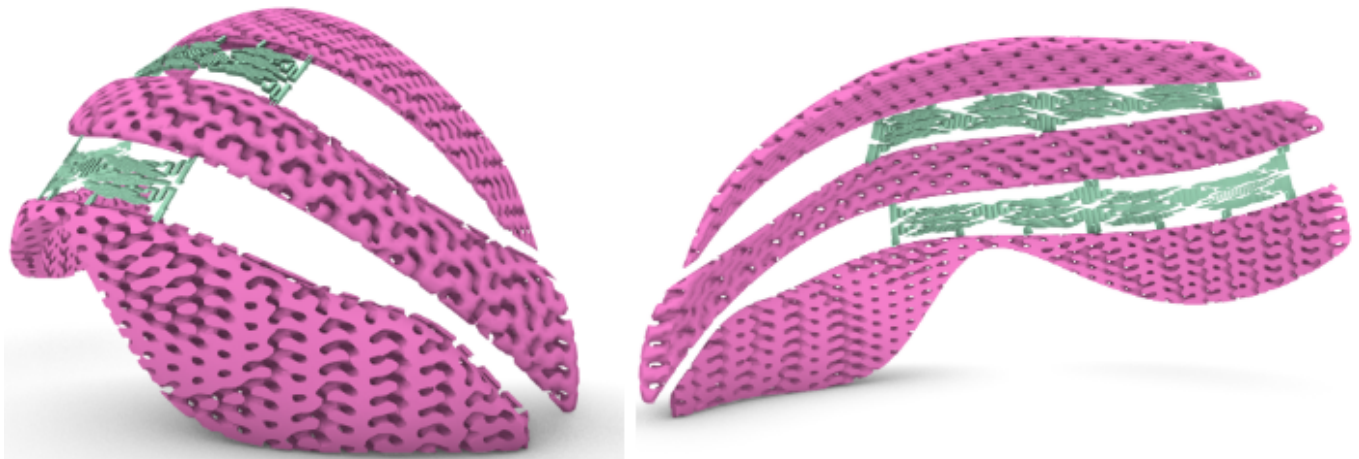


Figura 7: Superfícies das paredes com metamaterial

3. Resultado

Como resultado, foi obtido um modelo de capacete em metamaterial, unindo duas células de funções distintas, agindo tanto para adaptabilidade da geometria em relação à anatomia de seu usuário, bem como na absorção de impactos - Figura 8.

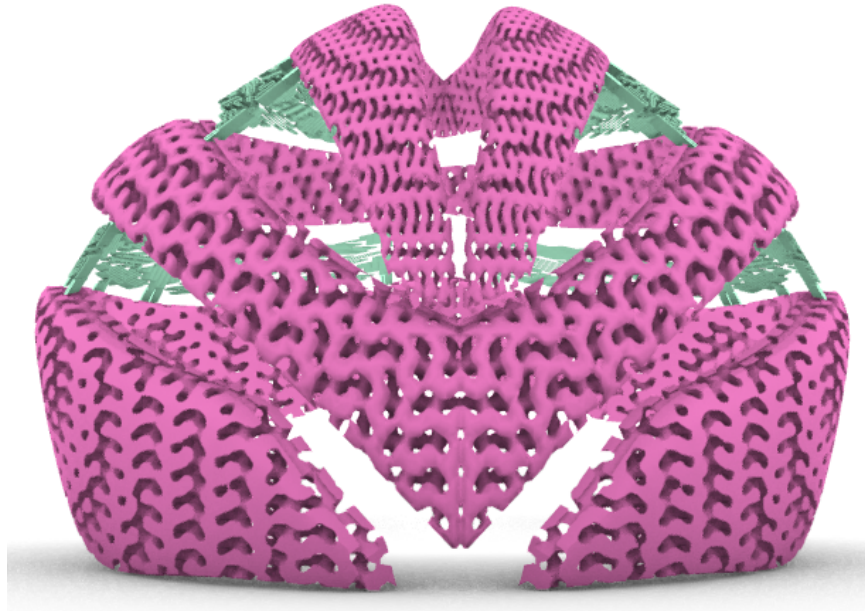


Figura 8: Modelo final do capacete

4. Conclusão

Através do estudo foi possível desenvolver um modelo conceitual de capacete em multi material, mesmo sendo necessárias algumas alterações ao longo de sua criação

Os uso combinado dos softwares de modelagem (Rhinoceros), edição de malha STL (*3D Builder*) e aplicação de estruturas TPMS (*Inspire*) se mostraram eficazes em suprir as condições necessárias para a criação do dispositivo, cumprindo assim com a ideia proposta

Como trabalho futuro ficam como desafios melhoras a área coberta da região de aplicação da célula mesoestruturada, bem como a simulação do comportamento mecânico do dispositivo, através de uma simulação computacional pelo método de elementos finitos.

5. Agradecimentos

Agradeço ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à Comissão PIBIC (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica pela oportunidade de realização desta Iniciação Científica, assim como ao Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer e à equipe do LAPRINT (Laboratório Aberto de Impressão 3D) pelos aprendizados. Esta experiência foi extremamente enriquecedora, proporcionando crescimento fundamental tanto para minha formação profissional quanto para meu desenvolvimento pessoal.

Sou grata também ao meu orientador Pedro Noritomi e meus coorientadores Marcília Guimarães e Leonardo Machado, por seus ensinamentos, dedicação e apoio durante o meu período como orientanda, todos foram de grande valia e serão muito importantes para a minha vida acadêmica e pessoal, obrigada mais uma vez.

Meu último agradecimento é para meus pais, familiares e amigos, que sempre se interessam pela minha pesquisa na iniciação científica. Vocês me incentivam a ser melhor e buscar mais. Soli Deo Gloria

6. Referências

ASBAI-GHOUDAN, Reduan; RUIZ DE GALARRETA, Sergio; RODRIGUEZ-FLOREZ, Naiara. Analytical model for the prediction of permeability of triply periodic minimal surfaces. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 124, art. 104804, dez. 2021. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104804

BAO, C.; AGRON, D. J.; KIM, T.; VATTATHICHIRAYI, C.; THOMAS, E. L.; KIM, W. S. Enhancing helmet pressure sensing with advanced 3D printed gyroid architectures. *Materials & Design*, v. 249, p. 113535, dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113535>

HAID, Daniel; FOSTER, Leon; HART, John; GREENWALD, Richard; ALLEN, Tom; SAREH, Pooya; DUNCAN, Olly. Mechanical metamaterials for sports helmets: structural mechanics, design optimisation, and performance. *Smart Materials and Structures*, v. 32, n. 11, art. 113001, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/acfdff>

HANNA, Benjamin; ADAMS, Rhosslyn; TOWNSEND, Scott; ROBINSON, Michael; SOE, Shwe; STEWART, Matthew; BUREK, R.; THEOBALD, Peter. Auxetic metamaterial optimisation for head impact mitigation in American football. *International Journal of Impact Engineering*, v. 157, art. 103991, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103991>

HOLMES, D. W. et al. Mechanical behaviour of flexible 3D printed gyroid structures as a tuneable replacement for soft padding foam. *Additive Manufacturing*, v. 50, art. 102555, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102555>

KUMAR, Rakesh; SHARMA, Manish Singh; SINGH, Rupinder; KUMAR, Santosh. Overview on metamaterial: History, types and applications. *Materials Today: Proceedings*, v. 56, p. 3016–3024, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.423>

MELLO, Danielli Braga de. A nova era do atleta tático: utilização das tecnologias vestíveis no desempenho operacional. *Revista de Educação Física / Journal of Physical Education*, v. 94, n. 1, p. 336–342, 2025. DOI: <https://doi.org/10.37310/ref.v94i1.3049>

MIRALBÉS, R.; RANZ, D.; HIGUERA, S. Study of the Application of Gyroid Structures in Cyclist Helmets. In: CAVAS MARTÍNEZ, F.; PERIS-FAJARNES, G.; MORER CAMO, P.; LENGUA LENGUA, I.; DEFEZ GARCÍA, B. (eds.). *Advances in Design Engineering II. INGEGRAF 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer, 2022. p. 64–70. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92426-3_8

SADEGHI, Fatemeh; BANIASSADI, Majid; SHAHIDI, Alireza; BAGHANI, Mostafa. TPMS metamaterial structures based on shape memory polymers: mechanical, thermal and thermomechanical assessment. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 25, p. 1–??, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.014>

TILLEY, R.; HOLMES, D.; PICKERING, E.; WOODRUFF, M. A. 3D Printed Metamaterials for Energy Absorption in Motorsport Applications. *International Journal of Automotive Technology*, v. 25, n. 6, p. 1529–1540, 19 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-024-00136-1>

VALIPOUR, Ali; KARGOZARFARD, Mohammad Hasan; RAKHSHI, Mina; YAGHOOTIAN, Amin; SEDIGHI, Hamid M.; [e outros]. Metamaterials and their applications: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 236, n. 11, p. 2171–2210, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464420721995858>