

## Materiais auxéticos no design – aplicações e possibilidades

Auxetic materials in design – applications and possibilities

Materiales auxéticos en el diseño: aplicaciones y posibilidades

Recebido: 12/09/2024 | Revisado: 07/10/2024 | Aceitado: 09/10/2024 | Publicado: 14/10/2024

**Maria Adircila Starling Sobreira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9915-6616>  
Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil  
E-mail: [adircila@gmail.com](mailto:adircila@gmail.com)

**Eliane Ayres**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8734-0056>  
Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil  
E-mail: [eliane.ayres.pu@gmail.com](mailto:eliane.ayres.pu@gmail.com)

**Caroline Salván Pagnan**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3641-928X>  
Universidade do Estado de Minas Gerais, Brasil  
E-mail: [carolinespagnan@gmail.com](mailto:carolinespagnan@gmail.com)

### Resumo

Materiais auxéticos são aqueles que possuem coeficiente de Poisson negativo, ou seja, se expandem quando tracionados, diferentemente dos materiais convencionais. Possuem características mecânicas superiores aos convencionais, tais como resistência ao impacto e fratura, cisalhamento e indentação, além de serem atenuadores de vibrações e ruídos. Tais características são devidas a sua estrutura complexa. Nesse sentido, o artigo tem como objetivo explorar as propriedades físicas desses materiais, bem como suas aplicações atuais e potenciais no design de produtos com o intuito de aprimorar seu desempenho e funcionalidade. A partir de revisão bibliográfica é discutido as principais propriedades mecânicas, tipos de materiais auxéticos e aplicações destes materiais no design, nas áreas de moda, aeroespacial, biomédica, proteção e mobiliário. São discutidas possibilidades de aplicação futuras, bem como os principais entraves para a sua implementação em larga escala. Conclui-se que o uso de materiais auxéticos no design contribui para maior funcionalidade e versatilidade dos produtos, mas faz-se necessário mais pesquisas para superar os entraves técnicos, promovendo um maior aproveitamento do seu potencial no mercado.

**Palavras-chave:** Materiais auxéticos; Design; Propriedades mecânicas.

### Abstract

Auxetic materials are those that have a negative Poisson's ratio, that is, they expand when pulled, unlike conventional materials. They have superior mechanical characteristics than conventional ones, such as resistance to impact and fracture, shear and indentation, in addition to being vibration and noise attenuators. Such characteristics are due to its complex structure. In this sense, the article aims to explore the physical properties of these materials, as well as their current and potential applications in product design with the aim of improving their performance and functionality. Based on a literature review, the main mechanical properties, types of auxetic materials and applications of these materials in design, in the areas of fashion, aerospace, biomedical, protection and furniture are discussed. Future application possibilities are addressed, as well as the main obstacles to its large-scale implementation. It is concluded that the use of auxetic materials in design contributes to greater functionality and versatility of products, but more research is needed to overcome technical obstacles, promoting greater use of their potential in the market.

**Keywords:** Auxetic materials; Design; Mechanical properties.

### Resumen

Los materiales auxéticos son aquellos que poseen un coeficiente de Poisson negativo, es decir, se expanden cuando son traccionados, a diferencia de los materiales convencionales. Presentan características mecánicas superiores a las de los materiales tradicionales, como una mayor resistencia al impacto, a la fractura, al corte y a la indentación, además de ser eficaces atenuadores de vibraciones y ruidos. Estas propiedades se deben a su estructura compleja. El objetivo del artículo es explorar las propiedades físicas de estos materiales, así como sus aplicaciones actuales y potenciales en el diseño de productos, con el propósito de mejorar su rendimiento y funcionalidad. A través de una revisión bibliográfica, se analizan las principales propiedades mecánicas, los tipos de materiales auxéticos y sus aplicaciones en áreas como la moda, la industria aeroespacial, biomédica, de protección y mobiliario. También se exploran las posibles aplicaciones futuras y los principales desafíos para su implementación a gran escala. Se concluye que el uso de materiales auxéticos en el diseño puede incrementar la funcionalidad y versatilidad de los

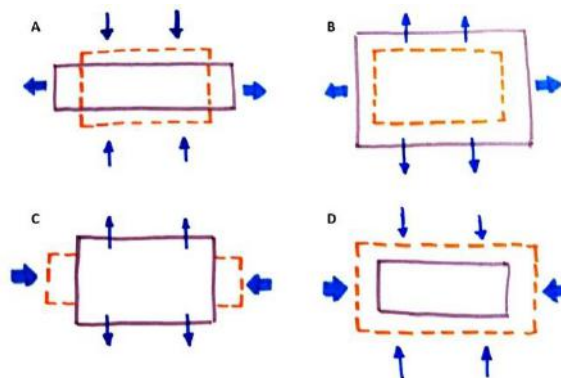
productos, pero es necesario llevar a cabo más investigaciones para superar las barreras técnicas y aprovechar mejor su potencial en el mercado.

**Palabras clave:** Materiales auxéticos; Diseño; Propiedades mecánicas.

## 1. Introdução

Materiais auxéticos são aqueles que possuem coeficiente de Poisson negativo (NPR, Negative Poisson's Ratio). O coeficiente de Poisson de um material diz respeito às suas propriedades mecânicas fundamentais, e estabelece uma relação entre as deformações transversais e longitudinais quando sujeitos a tração. Quando expostos a tração, os materiais convencionais diminuem sua seção transversal, o que caracteriza coeficiente de Poisson positivo. Os materiais auxéticos, ao contrário, se expandem quando tracionados, em suas seções transversais e longitudinais, o que caracteriza coeficiente de Poisson negativo (NPR- Negative Poisson's Ratio) (Magalhães, 2015). A Figura 1 ilustra de forma esquemática o comportamento auxético.

**Figura 1** - Comportamento em tensão e compressão nos materiais auxéticos (B e D) e convencionais (A e C).



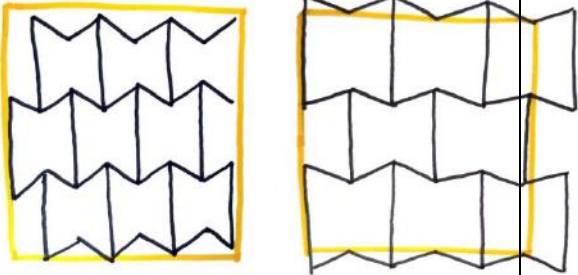
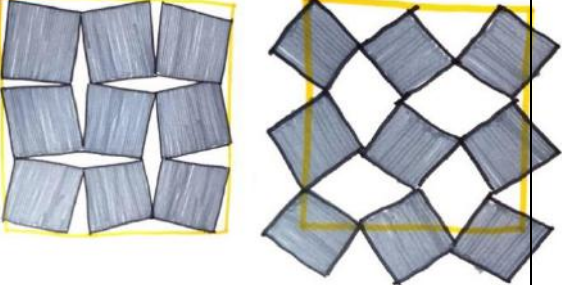
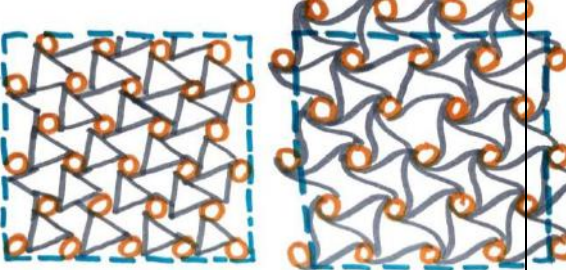
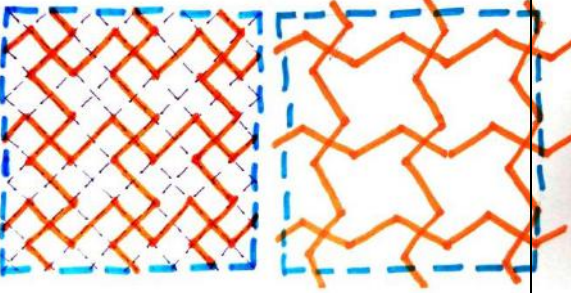
Fonte: Adaptado de Wang e Hu (2016).

Araújo (2023) acrescenta que esse material é conhecido conceitualmente desde 1944 e sua amostra experimental foi apresentada por Lakes em torno da década de 1990, com razão de Poisson negativa. O nome auxético deriva do grego αὐξητικός (auxetikos), que significa 'aquilo que tende a aumentar' (Wu et al., 2019). Este tipo de material é também conhecido por antiborracha, dada sua característica de expansão quando submetidos a tração. Um outro termo também encontrado na literatura é metamaterial auxético/mecânico. Segundo Zadpoor e Kilken (2017), o termo metamaterial inicialmente foi usado no contexto de óptica e eletromagnetismo, mas atualmente é utilizado para materiais projetados que exibem novas propriedades não encontradas usualmente na natureza.

Suas características especiais advêm de sua microestrutura, que refletem nas propriedades macroscópicas. Liu (2006) corrobora com essa afirmativa. As microestruturas não mudam de propriedades de acordo com a escala, como mostrado por Novak et al. (2016). Magalhães (2015) acrescenta que o comportamento auxético é decorrente de uma propriedade intrínseca dos materiais em função das características de suas estruturas, embora sejam poucos os casos de materiais que apresentam naturalmente esse comportamento. Na natureza são encontrados alguns materiais auxéticos, como a  $\alpha$ -cristobalita e o grafite pirolítico, como afirmam Novak *et al.* (2016). Zadpoor e Kilken (2017) acrescentam que este comportamento é encontrado em osso esponjoso, pele viva de boi, tendões e algumas zeólitas, ainda que haja controvérsia do ponto de vista da mecânica tradicional. No entanto, há possibilidades do material auxético ser projetado. A espuma de poliuretano foi o primeiro polímero auxético feito pelo homem em 1987. Lakes, seu autor, utilizou métodos de compressão e aquecimento para seu desenvolvimento, segundo Wang e Hu (2014).

Os materiais auxéticos, em sua maioria, podem ser classificados em três grandes grupos, segundo Novak et al. (2016): favos de mel auxéticos (*auxetics honeycombs*), polímeros microporosos auxéticos e compósitos auxéticos. Os favos de mel auxéticos são estruturas com geometrias específicas, que podem ter comportamento de reentrância, unidades rotacionais, estruturas quirais e nervura ausente (Figura 2). Este último é derivado da estrutura de favo de mel, porém com alguma nervura estrutural ausente. Zadpoor e Kilken (2017) consideram apenas as três estruturas básicas: reentrantes, quirais e estruturas rotacionais. Todas essas estruturas se expandem ao ter uma carga aplicada, caracterizando o comportamento auxético, o que os diferencia é como isso acontece.

**Figura 2** - Estruturas tipo favo de mel em materiais auxéticos.

Tipo de favos de mel	Ilustração sem e com aplicação de carga
Reentrâncias	
Unidades Rotacionais	
Estruturas Quirais	
Nervura Ausente	

Fonte: Adaptado de Novak et al. (2016).

Wu et al. (2019) ressalta a característica quiral como um dos diferenciais dos materiais auxéticos. De acordo com o autor, a propriedade de quiralidade, foi introduzida por Lord Kelvin em 1883, e diz respeito a uma propriedade físico-geométrica, referente ao objeto não poder ser sobreposto à sua imagem espelhada apenas por rotações e translações. Wu et al. (2019) complementa que na natureza tais estruturas são comuns em plantas e materiais, e exemplifica com os chifres de cabra, a própria estrutura do DNA, e as mãos humanas, como ilustrado na Figura 3.

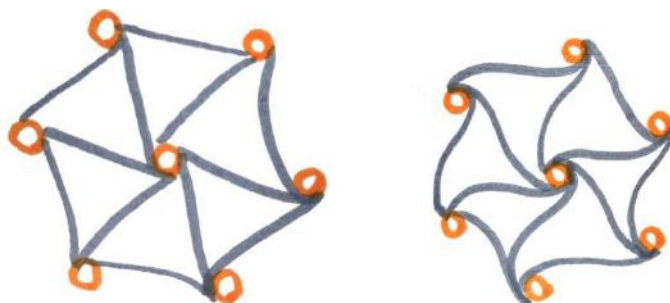
**Figura 3 – Mãos.**



Fonte: Autoria própria.

A quiralidade explica o comportamento incomum dos materiais auxéticos, como a razão de Poisson negativa e alta compressibilidade. Quanto a quiralidade, Wu et al. (2019) os classifica como quirais, antiquirais e metaquirais. Zadpoor e Kilken (2017) complementam que estruturas quirais típicas possuem cilindros que possibilitam rotações da unidade básica, alterando sua forma, como ilustrado na Figura 4.

**Figura 4 - Alteração da forma por rotação da estrutura quiral típica.**

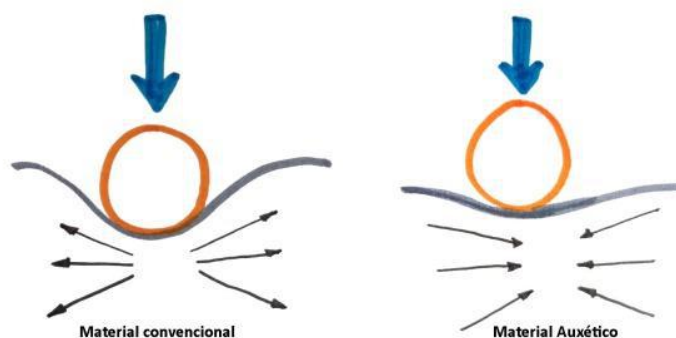


Fonte: Adaptado de Novak et al. (2016).

Devido às suas características únicas, os materiais auxéticos apresentam propriedades mecânicas melhoradas, tais como resistência ao impacto e fratura, resistência à indentação, atenuação de ruídos e vibrações, resistência ao cisalhamento, dentre outras (Boakye et al., 2019; Wu et al, 2019; Wang et al., 2016; Magalhães, 2015; Liu, 2006). Materiais convencionais, quando sujeitos a indentação, se comprimem e se afastam de forma perpendicular à carga aplicada. Já os materiais auxéticos, segundo Boyake et al., (2019) se tornam mais densos na região da indentação, pois se expandem, caracterizando uma maior resistência à indentação do que os materiais convencionais. Liu (2006) acrescenta que embora materiais com coeficiente de Poisson negativo possuam tais características mecânicas superiores, é importante ressaltar que usualmente são mais porosos e

menos rígidos que os materiais convencionais. Como são altamente anisotrópicos, não são os mais adequados para várias aplicações estruturais usuais, como mostrado por Novak et al. (2016) e sim específicas. Tais propriedades encontram aplicações em diversos segmentos, tais como equipamentos de proteção, biomédicos, moda esportiva e indústria aeroespacial. A Figura 5 ilustra o comportamento auxético em relação à indentação.

**Figura 5** – Comportamento de material convencional e auxético em relação à indentação.



Fonte: Adaptado de Boakye et al. (2019).

Apesar de suas propriedades físicas promissoras, os materiais auxéticos ainda não são amplamente aplicados no design. Esses materiais ainda enfrentam desafios significativos de implementação, principalmente no que se refere à aplicação em larga escala.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo explorar possibilidades de aplicação dos materiais auxéticos no design, sobretudo nas áreas de moda, aeroespacial, biomédica, proteção e mobiliário. Além disso, são apresentadas aplicações comerciais destes materiais e como suas propriedades contribuem para ampliar as funcionalidades de seus produtos. Ademais, são discutidos os principais entraves à ampliação da aplicação desses materiais no escopo do design.

## 2. Metodologia

A metodologia utilizada nesta pesquisa é a pesquisa bibliográfica, método que faz o pesquisador entrar em contato com tudo o que foi produzido sobre determinado assunto, segundo Lakatos e Marconi (2021). As autoras ressaltam que tal método possibilita uma análise de um tema sob nova perspectiva, o que permite chegar a conclusões inovadoras. É uma metodologia particularmente adequada para pesquisas exploratórias, como é o caso da presente pesquisa.

A partir de uma revisão bibliográfica narrativa, ou seja, uma revisão menos sistemática do universo bibliográfico, foi realizada seleção de materiais bibliográficos sobre o uso de materiais auxéticos no design. Essa abordagem é qualitativa e busca identificar o que foi escrito sobre o tema, sem desenvolver generalizações. (Cavalcanti & Oliveira, 2020; Pereira et al., 2018, Rohter, 2007).

O presente artigo apresenta uma síntese de pesquisas sobre o uso de materiais auxéticos no design. O tema ainda é pouco explorado de forma acadêmica no Brasil, mas tem se mostrado promissor, tanto do ponto de vista acadêmico como mercadológico. Academicamente, tem-se percebido aumento expressivo de pesquisas sobre estes materiais, principalmente na China e nas áreas de proteção e defesa. Mercadologicamente, devido às crescentes demandas por novas funcionalidades de materiais, as características auxéticas tem sido valorizadas nos setores de moda, saúde, mobiliário e também na área de segurança pessoal, como no desenvolvimento de capacetes.



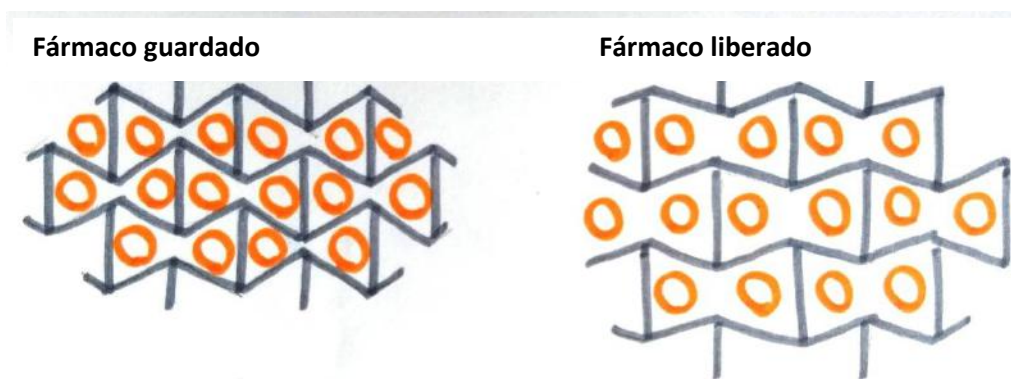
### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Aplicações e Possibilidades dos Materiais Auxéticos no Design

Foster et al. (2018) mostram como espumas auxéticas atualmente são aplicadas no setor esportivo para equipamentos de proteção, uma vez que absorvem mais impactos do que materiais convencionais e ainda possuem menor densidade, tornando os equipamentos de proteção mais leves e eficientes do que os feitos com espumas convencionais. O estudo comparativo foi realizado especificamente em capacetes, uma vez que lesões por impacto na cabeça são potencialmente mais danosas do que em outras partes do corpo. Liu (2006) sugere uma aplicação potencial de espumas auxéticas na área de aviação cargo, para proteção de equipamentos e cargas ao impacto. O autor pondera que para tal é necessário que o material seja comercialmente disponível e satisfaça os requisitos específicos.

Os materiais microporosos auxéticos são baseados na porosidade deste tipo de material. Os poros destes materiais se alargam na direção axial e perpendicular, segundo Boakye et al. (2019). Tal característica única possibilita a aplicação em filtros inteligentes com permeabilidade variável, em escalas tanto macro quanto nano. Atualmente esse comportamento é explorado em bandagens inteligentes na área biomédica, que liberam fármaco quando comprimidas, e param de liberar o fármaco quando cessa a compressão (Mir et al., 2014). Os autores sugerem que as bandagens com microporos auxéticos podem fazer uma liberação controlada do fármaco de acordo com o grau de inflamação da ferida. Uma vez que os poros auxéticos aumentam de tamanho quando pressionados, quanto mais inchada a ferida, maior ela fica e mais pressiona o curativo. Quanto mais pressionado, maior o poro e liberação do fármaco. Ou seja, o fármaco é liberado de acordo com o grau de inchaço da ferida, o que caracteriza a bandagem como inteligente, responsiva à interface na qual está inserida. A Figura 6 ilustra o comportamento auxético de tais bandagens.

**Figura 6** - Comportamento auxético nas bandagens inteligentes.

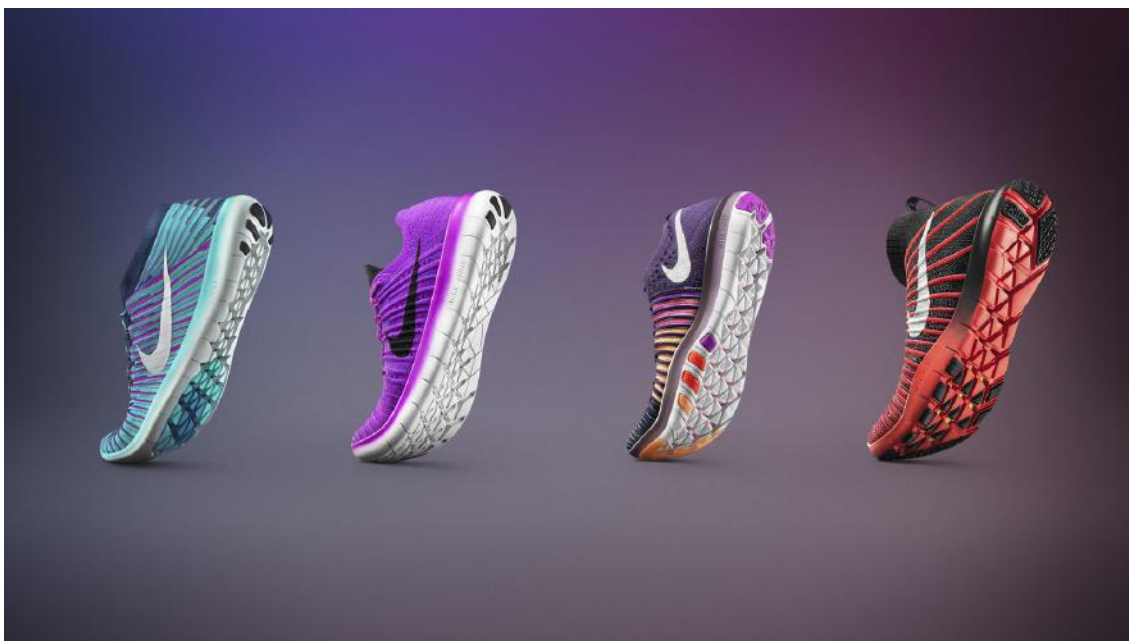


Fonte: Adaptado de Boakye et al. (2019).

Outra aplicação sugerida na área biomédica por Zadpoor e Kilken (2017) é na área ortopédica, dada a semelhança dos materiais microporosos auxéticos com o osso esponjoso, possibilitando seu uso como substituição óssea. O comportamento auxético permite neutralização da variação de volume ósseo, e quando aplicado em próteses ou articulações, evitam afrouxamento. Isso aumenta o uso das mesmas pelo usuário, adiando cirurgias de revisão. Um outro diferencial é a curvatura sinclástica característica de materiais auxéticos, que permitem maior acomodação à cavidade óssea. Com a manufatura aditiva aliada a produção de materiais auxéticos, é possível desenvolver próteses customizadas para cada paciente com maior precisão e menor custo e tempo de produção. Visto que não há lotes na manufatura aditiva, ao contrário das técnicas convencionais de produção, é possibilitada a alta personalização e individualização de produtos, o que torna a técnica muito utilizada no segmento médico e odontológico para produção de próteses, por exemplo. (Lima & Santos, 2018)

Suas características de adaptação à formas complexas sugerem aplicações na moda e no design de móveis. Por outro lado, a alta adaptabilidade de forma dos materiais auxéticos criam possibilidades funcionais e estéticas, na moda, design e arquitetura. Na moda, podem proporcionar maior conforto e adaptabilidade a quaisquer tipos e tamanhos de corpos. Papadopoulou et al. (2017) mostram duas grandes marcas do segmento esportivo, Nike e Under Armour, que utilizam superfícies auxéticas em seus calçados, trazendo propriedades de adaptação a cada usuário, tanto em formato quanto em pisada. A Nike utiliza superfícies auxéticas no solado, como mostrado na Figura 7, permitindo maior adaptação à pisada de cada corredor. Já a marca *Under Armour* utiliza a superfície auxética no cabedal (Figura 8), proporcionando total adaptação do calçado à forma única do pé de cada cliente.

**Figura 7** - Superfície auxética no solado do tênis para corridas da Nike.



Fonte: Nike (2016).

**Figura 8** - Superfície auxética no cabedal do tênis para corridas da Under Armour.



Fonte: Gizmodo (2014).

Os mesmos autores sugerem aplicação na moda visando também adaptabilidade de formas, de maneira que uma roupa de tamanho único possa cobrir perfeitamente corpos de formas e tamanhos distintos com conforto. Wang e Hu (2014) propõem ainda a aplicação para roupas infantis, uma vez que crianças crescem rapidamente o que torna as suas roupas rapidamente sem uso. Dado que materiais têxteis auxéticos podem se expandir nas direções do comprimento e largura, o vestuário infantil seria mais duradouro se o tecido utilizado fosse auxético, evitando compras sucessivas de vestuário, diminuindo o descarte e proporcionando economia. Além disso, visto que tecidos auxéticos possuem maior adaptabilidade de forma do que os convencionais, proporcionam melhor caimento e conforto às crianças. Tais propriedades seriam bem-vindas também para moda gestante, como afirmam os autores, em que o corpo feminino muda radicalmente em pouco tempo. Atualmente se utiliza muito elástico na região da barriga na moda gestante, causando pressões excessivas e desconforto. O tecido auxético, com sua adaptação para as formas complexas e possibilidade de expansão, evitaria tal desconforto. Outra possibilidade de aplicação proposta pelos autores é a dos cintos de segurança, visto que os tecidos auxéticos ficam mais densos com impacto e distribuem melhor a pressão, além de possuírem maior resistência a compressão, tornando-os mais seguros e confortáveis do que os cintos de segurança atuais.

Tais características são importantes também para aplicação em mobiliário, visando conforto e adaptação a peso, forma e postura de cada usuário de uma cadeira, por exemplo. Jasinska et al. (2012) mostram que os assentos sofrem cargas estáticas e dinâmicas na condição de uso, e dada sua adaptabilidade de forma e comportamento de expansão quando tracionado, os materiais auxéticos aplicados aos assentos melhoram a qualidade ergonômica deles, após estudo paramétrico. A Figura 9 mostra uma superfície auxética utilizada em um assento.

**Figura 9** - Assento desenvolvido com superfície auxética.



Fonte: Papadoupoulou et al. (2017).

Os têxteis auxéticos proporcionam maior conforto ao usuário, que pode ser percebido por maior respirabilidade do tecido e maior flexibilidade, visto que se ajusta facilmente ao movimento do corpo. Cao *et al.* (2019) mostram que há duas maneiras de se produzir tecidos auxéticos, sendo a primeira a partir de fibras ou fios auxéticos e a segunda utilizando fios convencionais, porém tecendo em arranjos geométricos especiais, visto que o comportamento auxético se relaciona com padrões estruturais geométricos. Como limitações, os tecidos auxéticos apresentam baixa recuperação elástica, baixa estabilidade estrutural e alta espessura, o que dificulta sua aplicação em vestuário. Outro ponto que precisa ser mais estudado, segundo Wang e Hu (2014) é se o comportamento auxético persiste após usos repetidos. Além disso, como a maioria dos



materiais auxéticos estudados, seu processo de produção é complexo, muitas vezes dependente de alta tecnologia, como manufatura aditiva, o que impossibilita a produção em larga escala.

Os compósitos auxéticos também apresentam melhor performance mecânica do que os compósitos convencionais além de terem aplicações especiais, segundo Wang et al. (2016). Podem ser feitos com materiais convencionais, com atenção especial à sua geometria estrutural, ou com inclusões de materiais auxéticos, com atenção a proporção, geometria e propriedades, segundo os mesmos autores. Os compósitos convencionais apresentam usualmente, problemas como baixo módulo de Young, o que restringe suas aplicações. Já nos compósitos com inclusões auxéticas, tal comportamento mecânico é minimizado, como relatam Wang e Hu (2014). Além disso possuem alta resistência ao cisalhamento, resistência à indentação, resistência a fratura, resistência ao amortecimento e curvatura sinclástica. Tais características tornam os compósitos auxéticos adequados para aplicações específicas, como engenharia aeroespacial, segundo Wang et al. (2016). Os autores citam como exemplo a aplicação de compósitos auxéticos no nariz da aeronave, para aumentar a propriedade de amortecimento da peça, que sofre grandes esforços estruturais a alta velocidade. Os mesmos autores ainda observam que os novos compósitos auxéticos ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, o que impossibilita a aplicação comercial em aeronaves, mas acreditam que são materiais com potencial para substituir os compósitos convencionais no segmento. Liu (2006) acrescenta ainda que materiais auxéticos possuem boa resistência ao cisalhamento, o que é fundamental para aplicação em componentes estruturais na aviação.

Na aviação, os materiais auxéticos, dado seu comportamento em alta temperatura e de redução de vibração, podem ter utilidade no interior dos motores, principalmente nos motores a reação, usualmente chamados de jatos. Os motores a jato estão sujeitos a altas temperaturas em seu interior, na ordem de 2000°C, dependendo da parte do motor em questão. Pasternaka et al. (2016) mostram que as deformações térmicas e tensões induzidas termicamente têm papel crítico em seus usos em engenharia, o que pode ser ilustrado pelos dispositivos microeletrônicos e ópticos e até turbinas a gás e motores a jato. Os autores ainda acrescentam que é comum que tensões térmicas comumente levem a falhas mecânicas, como fraturas e deformações excessivas, bem como degradação do material e possibilidade de flambagem. Em um motor a reação de aviões a jato tais falhas mecânicas são críticas e comprometem a performance e segurança da operação. “Atualmente a forma de refrigeração da câmara de combustão de motores a reação, que é a parte sujeita a maior temperatura, é a ar. Em torno de 75% do ar admitido neste tipo de motor é utilizado para arrefecimento, e apenas 25% para a combustão” (Palharini, 2015, p. 48), o que torna o bocal de admissão muito grande. Ao se utilizar materiais com características térmicas superiores, como os materiais auxéticos, o motor pode ter o tamanho reduzido, diminuindo seu peso e arrasto parasita, e com isso reduzindo o consumo de combustível, melhorando a performance ambiental do avião e reduzindo o seu custo operacional.

Motores a reação são ultrasensíveis a vibrações, que devem ser evitadas de toda forma. Vibrações podem levar o motor e/ou até mesmo as asas a fadiga, caso a mesma entre em ressonância, segundo Fabry e Ceskovic (2017). Materiais auxéticos têm excelente absorção de ruídos e vibrações, como mostrado por Liu (2006). Por esse motivo, Liu sugere aplicações potenciais na área aeroespacial. Outra possibilidade de uso dos materiais auxéticos na aviação comercial são nos assentos. As espumas auxéticas, ao serem comprimidas, se expandem, o que gera maior conforto e possibilidade de se utilizar menos material, reduzindo o peso, que é um grande fator para o setor, pois gera maior uso de combustível, impactando nos custos operacionais e ambientais.

Um desafio para o uso de materiais auxéticos na aviação é o custo, processo de fabricação e atendimento às normas vigentes. A indústria aeronáutica conquistou um alto patamar de segurança e respeitabilidade pautada em altos padrões de segurança e normatização. A indústria aeronáutica é a segunda mais regulamentada do mundo, perdendo apenas para a indústria nuclear. O atendimento a todos os padrões exigidos é mandatório para que tais materiais alcancem a aviação comercial e mantenha ou até mesmo aumente o nível de segurança exigido, bem como o de impacto ambiental.

#### 4. Considerações Finais

Os materiais auxéticos, devido às suas propriedades mecânicas únicas, como alta resistência a indentação, cisalhamento e impacto; bem como atenuação de ruídos e vibração e porosidade responsiva, possuem aplicações potenciais específicas, tais como para cobrir topologias complexas, como na moda, no uso aeroespacial e biomédico etc. Por serem responsivos ao ambiente podem revolucionar o design, como na área esportiva, de proteção individual ou mesmo na medicina. No entanto, têm como principal desafio para sua implementação comercial em larga escala o processo de fabricação. Dada sua geometria complexa, a manufatura aditiva é a principal técnica de fabricação destes tipos de materiais, porém enfrenta o alto custo e grande tempo de produção como principal entrave. Muitos estudos e protótipos estão sendo realizados e aprimorados na atualidade, e como a manufatura aditiva tem sido continuamente desenvolvida, há possibilidades que materiais auxéticos com estruturas ainda mais complexas sejam fabricados em breve, com propriedades otimizadas e ainda mais possibilidades de aplicação no design, principalmente para resolução de problemas específicos.

#### Conflito de Interesses

Os autores informam que não há conflito de interesses.

#### Referências

- Boakye, A.; Chang, Y.; Raji, R. K. & Ma, P. (2019). A Review on Auxetic Textile Structures, Their Mechanism and Properties. *Journal of Textile Science & Fashion Technology (2) 1*. DOI: 10.33552/JTSFT.2019.02.000526.
- Cao, H.; Zulifqar, A.; Hua, T. & Hu, H. (2019). Bi-stretch auxetic woven fabrics based on foldable geometry. *Textile Research Journal*, 89(13): 2694–2712. DOI:10.1177/0040517518798646
- Cavalcante, L. T. C. & Oliveira, A. A. S. (2020). Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos. *Psicol. Rev.* 26 (1). <https://doi.org/10.5752/P.1678-9563.2020v26n1p82-100>.
- Fabry, S. & Ceskovic, M. (2017). Aircraft Gas Turbine Engine Vibration Diagnostic. *Magazine of Aviation Development* 5(4):24-28. DOI:10.14311/MAD.2017.04.04.
- Foster, L.; Peketi, P.; Allen, T.; Senior, T.; Duncan, O. & Alderson, A. (2018). Application of Auxetic Foam in Sports Helmets. *Applied Sciences*, 8(3), 354. <https://doi.org/10.3390/app8030354>.
- Gizmodo. (2014) *Under Armour's Clutchfit Shoes Conform to the Shape of Your Movement*. <https://gizmodo.com/under-armours-clutchfit-shoes-conform-to-the-shape-of-1555301144>.
- Jasinska, D.; Janus-Michalska, M. & Smardzewski, J. (2012). A study on the design of auxetic structure of a seat skeleton. *Mechanics and Control*, 31(2):72-76. DOI:10.7494/mech.2012.31.2.72.
- Lakatos, E. M. & Marconi, M. A. (2021). *Técnicas de Pesquisa*. Atlas.
- Lima, T. M. & Santos, B. (2018). Indústria 4.0: Desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 4 (1),111-124. <https://www.researchgate.net/publication/325060590>.
- Liu, Q. (2006). Literature Review: Materials with Negative Poisson's Ratios and Potential Applications to Aerospace and Defence. *DSTO Defence Science and Technology Organisation*. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA460791.pdf>.
- Magalhães, R. M. P. (2015). *Desenvolvimento de Materiais Auxéticos para Aplicações Estruturais*. [Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho]. <https://hdl.handle.net/1822/40649>.
- Mir, M.; Ali, M. N.; Sami, J. & Ansari, U. (2014). Review of Mechanics and Applications of Auxetic Structures. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2014/753496>.
- Nike. (2016). *The New Dimensions of Nike Free*. <https://news.nike.com/news/nike-free-2016-running-training>
- Novak, N.; Vesenjaj, M. & Ren, Z. (2016). Auxetic Cellular Materials: a Review. *Journal of Mechanical Engineering* 62(9), 485-493. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2016.3656>.
- Papadopoulou, A.; Laucks, J. & Tibbits, S. (2017). Auxetic materials in design and architecture. *Nature Reviews Materials*. 2(12). DOI:10.1038/natrevmats.2017.78.
- Palharini, M. J. A. (2015). *Motores a reação*. (13ª ed.). Bianchi.

Pasternaka, E.; Shufrin, I.; Dyskin & Arcady, V. (2016). Thermal stresses in hybrid materials with auxetic inclusions. *Composite Structures*, 138(15), 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.11.032>.

Pereira A. S.; Shitsuka, D. M.; Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Ed. UAB/NTE/UFSM.

Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta paul. enferm.* 20 (2). <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>.

Wang, Z. & Hu, H. (2014). Auxetic materials and their potential applications in textiles. *Textile Research Journal*, 84(15), 1600–1611. DOI:10.1177/0040517512449051.

Wang, Z.; Zulifqar, A. & Hu, H. (2016). Auxetic composites in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00007-9>.

Wu, W.; Hua, W.; Qian, G.; Liao, H.; Xud, X. & Berto, F. (2019). Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. *Materials and Design*, 180. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107950.

Zadpoor, A. A. & Kilken, H.M.A. (2017). Auxetic mechanical metamaterials. *Royal Society of Chemistry Adv.*, 7 (9), 5111-5129. DOI:10.1039/C6RA27333E.