

DESIGN PARAMÉTRICO COMO FERRAMENTA PROJETUAL DE ESTRUTURAS AUXÉTICAS

Parametric design as a project tool for auxetic structures

Ricardo Augusto Palmieri¹, Silvia Titotto²

Resumo: O presente artigo aborda a possibilidade de utilizar o design paramétrico como método para o desenvolvimento de projetos de estruturas auxéticas. O trabalho expõe os fundamentos teóricos dessas estruturas, seu contexto histórico e seus campos de aplicação, abrangendo áreas como arquitetura, engenharia, biologia e arte. Em seguida, o artigo demonstra três estudos práticos que empregam o software Rhinoceros e Grasshopper para a concepção de grelhas baseadas em estruturas auxéticas, que podem ser adaptadas a diferentes formas e dimensões. O artigo também propõe um algoritmo paramétrico que possibilita alterar a dimensão e a quantidade de tecelas, bem como a espessura de suas linhas, gerando um modelo tridimensional apto para ser impresso em tecnologia 3D. Por fim, o artigo demonstra como o uso de processos paramétricos permitem uma modelagem eficiente e precisa, facilitando o ajuste de diversos parâmetros, como escala, espessura, curvatura entre outros.

Palavras-chave: Design Paramétrico; Estruturas Auxéticas; Projeto; Representação Gráfica.

Abstract: This article addresses the potential of utilizing parametric design as a method for developing auxetic structure projects. It outlines the theoretical foundations of these structures, their historical context, and fields of application, encompassing areas such as architecture, engineering, biology, and art. Subsequently, the article presents three practical case studies that employ Rhinoceros and Grasshopper software for designing grids based on auxetic structures, which can be adapted to various shapes and dimensions. The article also proposes a parametric algorithm that allows for adjustments in the size and quantity of tessellations, as well as the thickness of their lines, generating a three-dimensional model suitable for 3D printing technology. Finally, the article demonstrates how the use of parametric processes enables efficient and precise modeling, facilitating the adjustment of various parameters such as scale, thickness, curvature, among others.

Keywords: Parametric Design; Auxetics Structures; Project; Graphic Representation

Data de submissão: 14 de outubro de 2024

Data de aprovação: 01 de novembro de 2024

1 INTRODUÇÃO

O design paramétrico é um método de projeto que emprega algoritmos e ferramentas de desenho geométrico para manipulação e geração de formas com base em parâmetros e regras predefinidas. Essa abordagem possibilita a exploração do espaço de projeto e a otimização de geometrias para atender a objetivos específicos.

Entre as diversas aplicações do design paramétrico, destacamos o desenvolvimento de estruturas auxéticas, que possuem coeficiente de Poisson negativo, ou seja, expandem-se

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão da Inovação (PPGINV), Universidade Federal do ABC, ricardo.palmieri@ufabc.edu.br

² Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas (CECS), Universidade Federal do ABC, silvia.titotto@ufabc.edu.br

lateralmente quando esticadas e contraem-se ao serem comprimidas (SAXENA et al., 2016). Essas estruturas apresentam vantagens mecânicas, como maior absorção de energia, resistência à indentação, tenacidade à fratura e adaptação a superfícies curvas.

Este artigo discute o uso do design paramétrico no desenvolvimento de estruturas auxéticas. Por meio de revisão bibliográfica, são apresentados os conceitos de design paramétrico e estruturas auxéticas, suas definições, características e vantagens. Além disso, são apresentados três estudos práticos realizados no âmbito da pesquisa de mestrado do autor (2021-2023), no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão da Inovação da Universidade Federal do ABC, sob orientação da Prof.^a Dr.^a Silvia Titotto.

Os experimentos baseiam-se nos trabalhos de Mark (2020), que utilizou o software Rhino e o plugin Grasshopper para customizar topologias e curvaturas de estruturas auxéticas para impressão 3D em multi-materiais, e no estudo de Stavric e Wiltsche (2011), que investigou a elaboração geométrica dessas estruturas a partir do movimento cinético de diferentes estruturas.

2 CONTEXTO HISTÓRICO E APLICAÇÕES

2.1 DESIGN PARAMÉTRICO

O desenvolvimento do cálculo no século XVII possibilitou a explicação de fenômenos naturais por meio de abstrações matemáticas (STAVRIC; MARINA, 2011). Essa lógica foi incorporada na arquitetura e engenharia, onde o design paramétrico surgiu como método para criar estruturas complexas e formas orgânicas. A abordagem paramétrica utiliza parâmetros que integram dados formais, estruturais, funcionais e culturais no processo de concepção do design (ARAUJO LARANJEIRA et al., 2018), permitindo a adaptação e personalização dos projetos de acordo com as demandas específicas.

A compreensão matemática aplicada ao design revolucionou o desenvolvimento de formas e geometrias ao longo dos últimos dois séculos. Com o avanço da computação, a criação de padrões geométricos tornou-se amplamente associada à parametrização matemática, facilitada pelas diversas ferramentas de computação gráfica disponíveis no mercado. Esse processo promove uma relação dinâmica entre o meio físico e o digital, onde parâmetros inseridos nas equações matemáticas permitem simular comportamentos e realizar ajustes ao longo do processo criativo (CHOI et al., 2015).

O uso de algoritmos no design digital não só pode acelerar a criação, mas também permite a promoção da integração eficaz entre as formas geométricas e os materiais utilizados

na fabricação (ÁLVAREZ ELIPE; DÍAZ LANTADA, 2012). No design de produtos, o design paramétrico tem sido essencial na personalização de soluções, destacando-se na estamparia de superfícies, possibilitando a criação de padrões complexos e flexíveis que podem ser ajustados conforme as necessidades do cliente (ARAUJO LARANJEIRA et al., 2018).

No design de experiências, parâmetros são utilizados para criar interações que proporcionem sensações e emoções desejadas aos usuários (FREIRE, 2009). Outro campo de aplicação do design paramétrico é a otimização da usabilidade, por meio de ferramentas como o Quality Function Deployment (QFD), que ajusta o design de acordo com as demandas do consumidor (GENRO; KIPPER, 2015).

Por fim, o design paramétrico também se destaca na redução do tempo de desenvolvimento de produtos. A aplicação de modelagem e prototipagem acelera esse processo, permitindo o lançamento mais ágil de produtos no mercado (GUIMARÃES et al., 2014). Em síntese, o design paramétrico, originado na arquitetura e engenharia, tem promovido inovações significativas no design de produtos, destacando-se pela adaptação, personalização e eficiência no desenvolvimento de soluções projetuais.

2.2 ESTRUTURAS AUXÉTICAS

As estruturas auxéticas têm origem no estudo de materiais celulares e suas propriedades mecânicas, com destaque para a descoberta de espumas com taxa de Poisson negativa, feita por Evans e Alderson na década de 1980 (SAXENA et al., 2016). A partir dessa descoberta, pesquisas aprofundaram os mecanismos e aplicações dessas estruturas. Ao longo dos anos, diversos tipos de estruturas auxéticas foram desenvolvidos, como as reentrantes, poligonais rotativas, quirais e em favo de mel (SHI et al., 2021), estudadas por meio de modelagem computacional, testes experimentais e análises teóricas para compreender suas características mecânicas e de deformação (TANG et al., 2020).

Técnicas como manufatura aditiva (AM), corte e trançamento têm sido empregadas (JOSEPH et al., 2021). Métodos de AM, como fusão seletiva a laser e modelagem por deposição fundida, permitem o controle preciso da arquitetura interna (PHOTIOU et al., 2021). Técnicas de corte, como abordagens verticais e horizontais, são usadas para criar estruturas tubulares (TANG et al., 2020). Já o trançamento é aplicado em materiais compostos (MAGALHÃES et al., 2016), permitindo flexibilidade no design e adaptações a diferentes aplicações.

As estruturas auxéticas apresentam propriedades mecânicas únicas, como alta rigidez ao cisalhamento, tenacidade à fratura, dissipação de energia e absorção acústica (XUE et al., 2020). Comparadas a estruturas não auxéticas, oferecem maior resistência à indentação e melhor amortecimento de vibrações (UDDIN et al., 2023). O comportamento de deformação dessas estruturas foi extensivamente estudado, tanto por simulações numéricas quanto por testes experimentais, revelando seus mecanismos de resposta sob diferentes condições de carga (YANG et al., 2013). Tais características as tornam adequadas para aplicações em coletes à prova de balas, painéis leves e andaimes para engenharia de tecidos (KHOSHGOFTAR; ABBASZADEH, 2021).

Empresas de diferentes setores adotaram essas estruturas em seus produtos. A BMW, por exemplo, as aplica em automóveis para melhorar a absorção de impacto. A Apple utiliza-as em dispositivos como o Apple Watch para aumentar a resistência e durabilidade (VERMA et al., 2022). A Nike e a Under Armour também utilizam essas estruturas em seus tênis esportivos, buscando oferecer maior conforto e ajuste personalizado (VERMA et al., 2022; KELKAR et al., 2020). No setor aeroespacial, as estruturas auxéticas melhoram a resistência e eficiência dos materiais utilizados em aeronaves (PERRICONE et al., 2021). Na medicina, elas são aplicadas em próteses, órteses e implantes personalizados (LVOV et al., 2022), enquanto na indústria têxtil, aprimoram o conforto e adaptabilidade de roupas e bandagens (SHUAIQUAN et al., 2021).

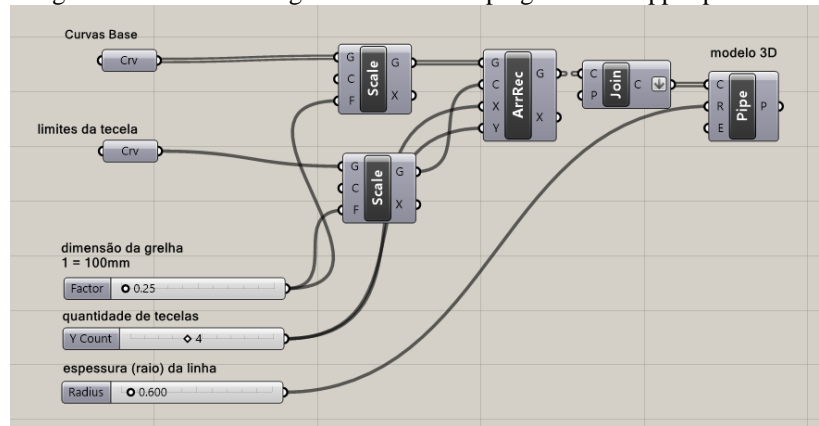
O avanço da impressão 3D possibilita a produção de estruturas complexas com geometrias personalizadas (MOCERINO et al., 2023), permitindo maior liberdade de design. Empresas como a Stratasys exploram essa tecnologia para a produção de estruturas auxéticas em geometrias complexas (JOSEPH et al., 2021). O arquiteto Lorenzo Mirante destaca a importância da classificação de estruturas auxéticas em diferentes escalas, permitindo sua aplicação em engenharia, arquitetura, moda, setor militar e saúde (MIRANTE, 2015).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizados métodos de ampliação de estruturas microscópicas para o universo macro, por meio de técnicas de parametrização de geometrias (GLOBA et al., 2018). O software Rhinoceros e o plugin Grasshopper foram empregados para a criação de modelos destinados à manufatura. A modelagem tridimensional das estruturas foi realizada com a utilização de processos paramétricos (Figura 1), essenciais para o envio dos dados à impressão aditiva (MALHOTRA et al., 2020). Três modelos foram propostos: A, B e C,

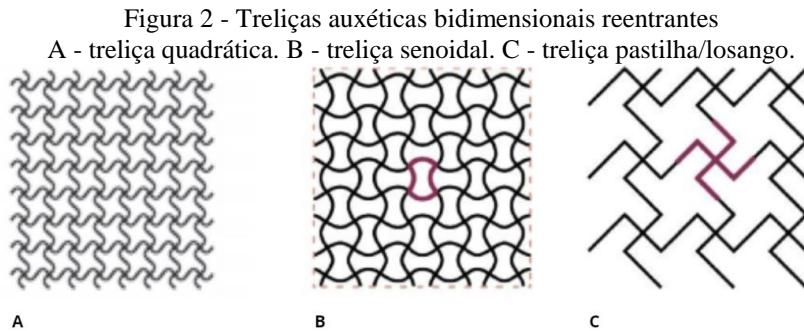
compostos por estruturas auxéticas impressas como um único elemento contínuo, utilizando o mesmo material em toda a sua composição. Esses modelos foram baseados em padrões bidimensionais reentrantes de estruturas auxéticas, processados via design paramétrico.

Figura 1 – Detalhe do algoritmo criado no plugin Grasshopper pelo autor.



Fonte: Autor, 2023

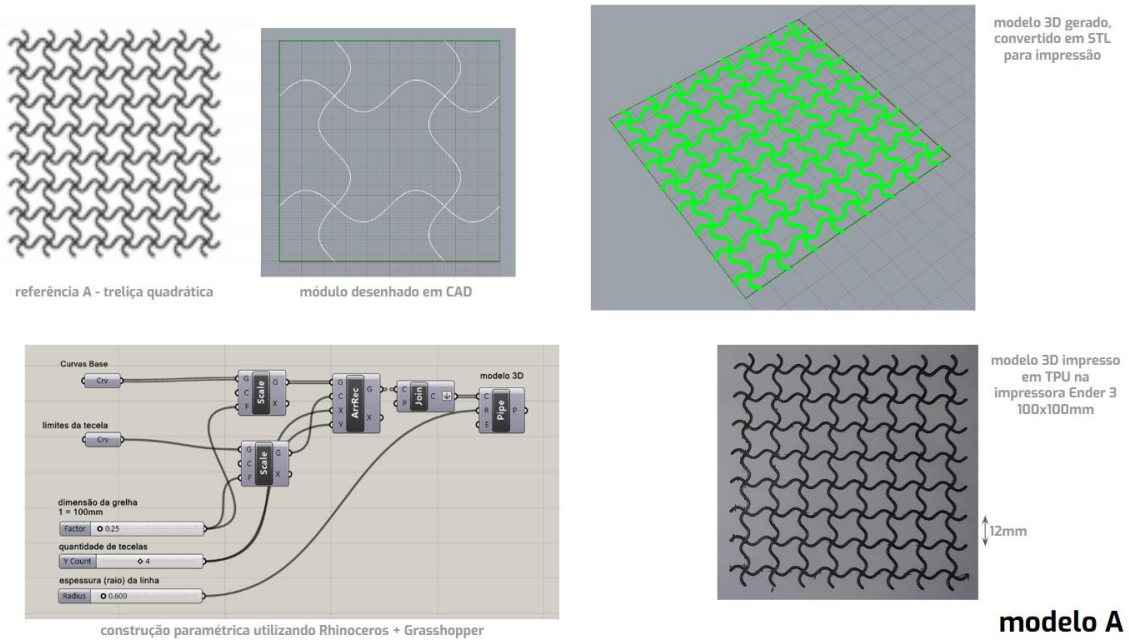
O fluxo de trabalho compreendeu desde a seleção da tecela até a preparação do modelo final para impressão no formato STL (*Stereolithography*), assegurando eficiência e precisão. Primeiramente, a tecela foi escolhida com base em exemplos revisados na literatura, considerando resistência, flexibilidade e propriedades geométricas (Figura 2).



Fonte: KÖRNER e LIEBOLD-RIBEIRO, 2015; MIRANTE, 2015

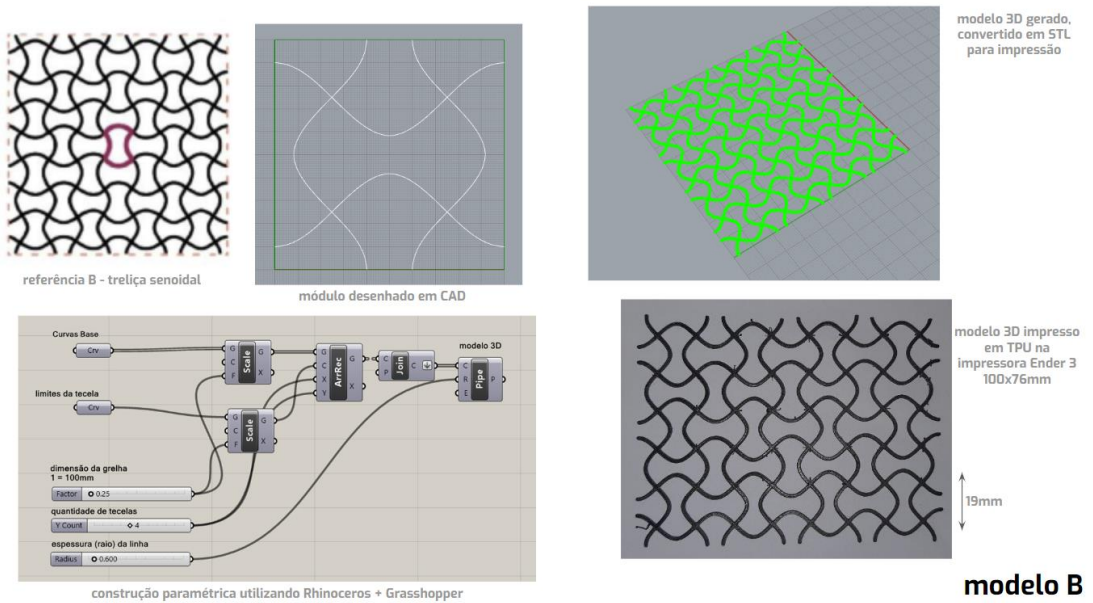
Após a seleção, a geometria da tecela foi adaptada para um formato bidimensional, limitado a um quadrante. A extração das linhas centrais da tecela guiou a criação da base geométrica. Cada lado do quadrante foi definido como 1(uma) unidade de medida. Em seguida, a expansão tridimensional ocorreu por meio do processamento dessas linhas, gerando a estrutura ao longo do eixo Z. O fechamento do sólido finalizou o processo, resultando em um modelo pronto para impressão, após ajustes para eliminar imperfeições. Esse fluxo de trabalho garantiu a integridade e funcionalidade da estrutura tridimensional paramétrica.

Figura 3 - Modelo A executado pelo autor



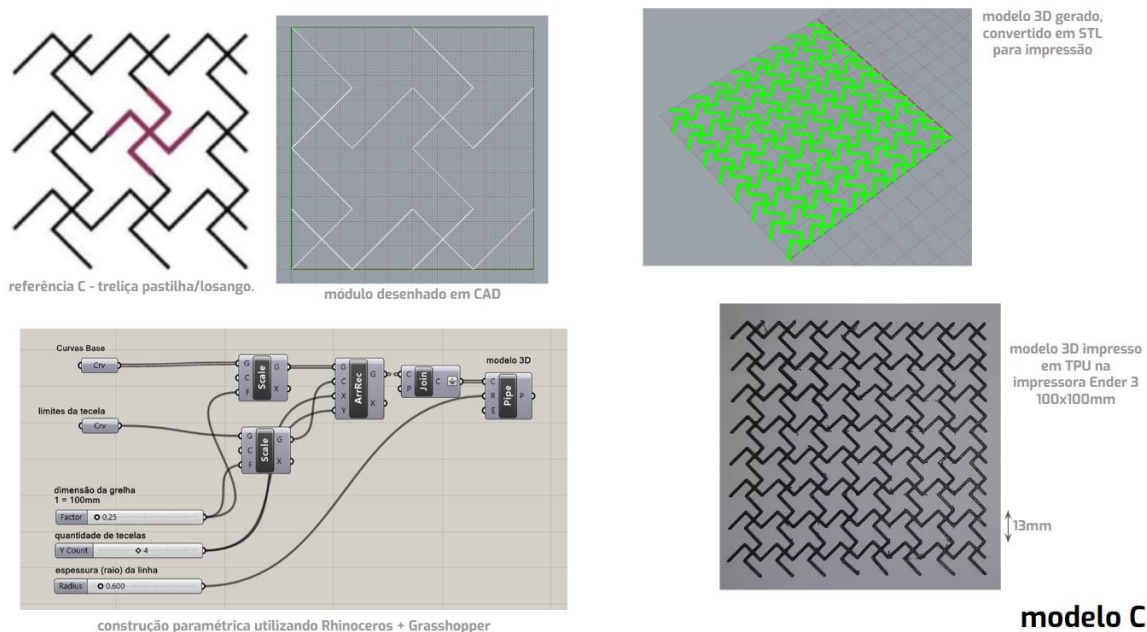
Fonte: Autor, 2023

Figura 4 - Modelo B executado pelo autor



Fonte: Autor, 2023

Figura 5 - Modelo C executado pelo autor



Fonte: Autor, 2023

Os testes iniciais confirmaram a viabilidade dos modelos de estruturas auxéticas (Figuras 3, 4 e 5). O próximo passo envolverá testes de impressão 3D do tipo FDM - ou Modelagem por Fusão e Deposição desses modelos, visando avaliar sua performance e aplicabilidade em condições reais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, apresentamos como é possível utilizar o design paramétrico como método para o desenvolvimento de projetos de estruturas auxéticas. Ao longo da pesquisa, relacionamos os temas estruturas auxéticas e design paramétrico com o objetivo de explorar as potencialidades das estruturas auxéticas para o desenvolvimento de objetos com propriedades mecânicas e estéticas diferenciadas, para que possam ser aplicados em diversas áreas do design.

Para isso, realizamos uma revisão bibliográfica sobre os conceitos, as características e as aplicações das estruturas auxéticas, bem como sobre os princípios e as vantagens do design paramétrico e da impressão 3D. Em seguida, descrevemos o processo de criação de três modelos tridimensionais de estruturas auxéticas, baseados em padrões de treliças auxéticas bidimensionais reentrantes, utilizando o software Rhinoceros em conjunto com o plugin de parametrização Grasshopper. Os modelos foram desenvolvidos para serem impressos em trabalhos futuros em um único elemento contínuo, utilizando o mesmo material em toda a sua estrutura. Os resultados obtidos demonstraram que o uso de processos paramétricos permite a modelagem tridimensional das estruturas propostas com eficiência e precisão, possibilitando o

posterior ajuste de parâmetros como a escala, a espessura, a curvatura e o número de repetições das treliças de forma simples.

Como contribuições deste trabalho, destacamos a aplicação de uma metodologia de design paramétrico para a criação de estruturas auxéticas tridimensionais a partir de tecelas bidimensionais, bem como a potencial produção de objetos com propriedades auxéticas, que podem servir como inspiração para futuros projetos de design. Como limitações, apontamos a dificuldade de avaliar as propriedades mecânicas das estruturas devido à falta de equipamentos adequados e a necessidade de otimizar o tempo e o custo da impressão 3D, dada a complexidade das geometrias.

Para trabalhos futuros, sugerimos a realização de testes experimentais para medir o coeficiente de Poisson, a rigidez e a resistência das estruturas, bem como a exploração de outras tecelas auxéticas, materiais e técnicas de impressão 3D, visando ampliar o repertório de possibilidades para o design de objetos com propriedades auxéticas.

5 REFERÊNCIAS

- ÁLVAREZ ELIPE, J. C.; DÍAZ LANTADA, A. Comparative study of auxetic geometries by means of computer-aided design and engineering. *Smart Materials and Structures*, v. 21, n. 10, p. 105010, 2012. DOI: 10.1088/0964-1726/21/10/105010.
- ARAUJO LARANJEIRA, Mariana; MARAR, João Fernando; PASCHOARELLI, Luis Carlos; LANDIM, Paula da Cruz. Design generativo de superfícies: uma análise do uso de programação para o desenvolvimento de estamparia. *Modapalavra e-periódico*, Florianópolis, v. 11, n. 21, p. 005–020, 2018. DOI: 10.5965/1982615x11212018005.
- CHOI, J.; KWON, O.-C.; JO, W.; LEE, H. J.; MOON, M.-W. 4D printing technology: A review. *3D Printing and Additive Manufacturing*, v. 2, n. 4, p. 159–167, 2015. DOI: 10.1089/3dp.2015.0039.
- FREIRE, K. Reflexões sobre o conceito de design de experiências. *Strategic Design Research Journal*, v. 2, n. 1, p. 37-44, jul. 2009. DOI: 10.4013/sdrj.2009.21.05.
- GENRO, J. P.; KIPPER, L. M. O uso do QFD como ferramenta para otimizar a usabilidade de produtos: um estudo exploratório. *Tecno-Lógica*, v. 19, n. 1, p. 43-50, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.17058/tecnolog.v19i1.5506>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- GLOBA, A. A.; ULCHITSKIY, O. A.; BULATOVA, E. K. The effectiveness of parametric modelling and design ideation in architectural engineering. *Scientific Visualization*, v. 10, n. 1, p. 99–109, 2018. DOI: 10.26583/sv.10.1.08.
- GUIMARÃES, M. G.; SELBITTO, M. A.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. Redução no tempo de desenvolvimento de uma coleção de produtos de uma empresa calçadista. *BASE - Revista de Administração e Contabilidade da Unisinos*, v. 11, n. 3, p. 73–85, 2014. DOI: 10.4013/base.2014.113.04.

- KELKAR, P. U. et al. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review. *Sensors*, v. 20, n. 11, p. 3132, 1 jun. 2020. DOI: 10.3390/s20113132.
- KHOSHGOFTAR, M. J.; ABBASZADEH, H. Experimental and finite element analysis of the effect of geometrical parameters on the mechanical behavior of auxetic cellular structure under static load. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, v. 56, n. 3, p. 131–138, 20 abr. 2021. DOI: 10.1177/0309324720957573.
- KÖRNER, C.; LIEBOLD-RIBEIRO, T. Auxetic trusses and their applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 215, n. 1, p. 15–26, 2015. DOI: 10.1007/s00170-014-6267-2.
- LVOV, V. A.; SENATOV, F. S.; VEVERIS, A. A.; SKRYBYKINA, V. A.; DÍAZ LANTADA, A. Auxetic metamaterials for biomedical devices: Current situation, main challenges, and research trends. *Materials (Basel)*, v. 15, n. 4, p. 1439, 15 fev. 2022. DOI: 10.3390/ma15041439.
- MAGALHÃES, R. et al. Development, characterization and analysis of auxetic structures from braided composites and study the influence of material and structural parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 87, p. 86–97, ago. 2016. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.04.018.
- MARK, Brittany. Applied auxetics: utilising parametric customisation to translate auxetic structure theory into additively manufactured multi-material performative geometries. 2023. Disponível em: https://openaccess.wgtn.ac.nz/articles/thesis/Applied_Auxetics_Utilising_Parametric_Customisation_to_Translate_Auxetic_Structure_Theory_into_Additively_Manufactured_Multi-Material_Performative_Geometries/14113058. Acesso em: 29 ago. 2024. DOI: 10.26686/wgtn.14113058.
- MISHRA, V.; NEGI, S.; KAR, S. FDM-based additive manufacturing of recycled thermoplastics and associated composites. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 25, p. 758–784, 2023. DOI: 10.1007/s10163-022-01588-2.
- MIRANTE, Lorenzo. Auxetics structures: Towards bending-active architectural applications. 2015. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Politecnico di Milano, Milão, 2015.
- PHOTIOU, D. et al. Experimental and numerical analysis of 3D printed polymer tetra-petal auxetic structures under compression. *Applied Sciences*, v. 11, n. 21, p. 10362, 4 nov. 2021. DOI: 10.3390/app112110362.
- ROBEV, C. What is parametric design? — Robazzo. [S.l.: s.n.], jan. 2020. Disponível em: <https://robazzo.com/journal/what-is-parametric-design>. Acesso em: 29 ago. 2024.
- SHI, Z. et al. Study of mechanical properties and enhancing auxetic mechanism of composite auxetic structures. *Engineering Reports*, v. 3, n. 12, p. 12436, 15 dez. 2021. DOI: 10.1002/eng2.12436.
- SHUAIQUAN, Z. et al. Applications of auxetic structures in the textile industry. *Journal of Textile Science & Engineering*, v. 11, n. 2, p. 256-265, 2021. DOI: 10.4172/2165-8064.1000457.
- STAVRIC, Milena; MARINA, Ognen. Parametric modeling for advanced architecture. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*, v. 5, p. 9–16, 2011. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/285467523_Parametric_modeling_for_advanced_architecture. Acesso em: 29 ago. 2024.

TANG, C. et al. Numerical and experimental studies on the deformation of missing-rib and mixed structures under compression. *physica status solidi (b)*, v. 257, n. 10, p. 2000150, 8 out. 2020. DOI: 10.1002/pssb.202000150.

UDDIN, K. Z. et al. Multiscale strain field characterization in flexible planar auxetic metamaterials with rotating squares. *Advanced Engineering Materials*, v. 25, n. 2, p. 2201248, 28 jan. 2023. DOI: 10.1002/adem.202201248.

VERMA, P. et al. Reversibility of out-of-plane auxetic response in needle-punched nonwovens. *physica status solidi (b)*, v. 259, n. 12, p. 2200387, 17 dez. 2022. DOI: 10.1002/pssb.202200387.

XUE, Y. et al. An enhanced three-dimensional auxetic lattice structure with improved property. *Materials*, v. 13, n. 4, p. 1008, 24 fev. 2020. DOI: 10.3390/ma13041008.

YANG, L. et al. A comparison of bending properties for cellular core sandwich panels. *Materials Sciences and Applications*, v. 4, n. 8, p. 471–477, 2013. DOI: 10.4236/msa.2013.48057.