

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ALAN FRANCO DO COUTO

UMA INTRODUÇÃO SOBRE OS EFEITOS DO COEFICIENTE DE POISSON NEGATIVO E CONCEITOS DE DESENVOLVIMENTO PARA ESTRUTURAS TÊXTEIS AUXÉTICAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2022

ALAN FRANCO DO COUTO

UMA INTRODUÇÃO SOBRE OS EFEITOS DO COEFICIENTE DE POISSON NEGATIVO E CONCEITOS DE DESENVOLVIMENTO PARA ESTRUTURAS TÊXTEIS AUXÉTICAS

An Introduction Concerning the Effects of Negative Poisson Ratio and Development Concepts for Auxetic Textile Structures

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Londrina.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres

Coorientadora: Profa. Dra. Samira da Silva Mendes

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ALAN FRANCO DO COUTO

UMA INTRODUÇÃO SOBRE OS EFEITOS DO COEFICIENTE DE POISSON NEGATIVO E CONCEITOS DE DESENVOLVIMENTO PARA ESTRUTURAS TÊXTEIS AUXÉTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina.

Data da aprovação: 18 de junho de 2022

Prof. Dr. Francisco Rosário
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

Prof. Me. Joziel Aparecido da Cruz
Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

LONDRINA

2022

AGRADECIMENTOS

Abro esta seção dedicando-a aos membros nucleares de minha família: meus pais, Elisângela Andrea Franco do Couto e Marcelo Fonseca do Couto, à minha avó, Catarina Fonseca do Couto, ao meu irmão, Álisson Franco do Couto, e à minha namorada, Carolina Vanco Gandolfi. Grato por todo o apoio e conselhos, sempre.

Ao grande amigo, orientador de Estágio Curricular Obrigatório, Trabalho de Conclusão de Curso e excepcional referência acadêmica, Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres, meus mais sinceros cumprimentos e agradecimentos por toda a parceria prestada.

À Profa. Dra. Samira da Silva Mendes, que prontamente aceitou o convite de coorientar este trabalho, agradeço pela paciência, ensinamentos e amplas contribuições que trouxera.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), instituição centenária da qual me orgulho de ter feito parte em diversos âmbitos, desde a formação acadêmica até a formação pessoal em seus diversos projetos de extensão e contribuições para a comunidade externa.

A todos os professores do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA), os quais influenciaram diretamente em minha formação como Engenheiro de Materiais, agradeço pelos aprendizados proporcionados. Em especial, agradeço ao prof. Dr. Márcio Florian, pelas horas de conversas, pelas experiências trocadas e pelos projetos desenvolvidos em conjunto na UTFPR. À Profa. Dra. Silvia Midori Higa, Coordenadora do Curso de Bacharelado em Engenharia de Materiais, agradeço pelos conselhos, amizade e suporte prestados durante minha graduação.

Ao Prof. Dr. André Luis Trevisan, agradeço pelos dois anos de Iniciação Científica, os quais me trouxeram inúmeros aprendizados pessoais e acadêmicos, além de minhas primeiras publicações em periódicos científicos. Agradeço, igualmente, ao Prof. Dr. Tiago Eurico de Lacerda pelo convite e coautoria na publicação de meu primeiro capítulo de livro.

Aos meus amigos de bacharelado e ora amigos para a vida, Vitor Poli Nakahara e Daniel Daré Luziano da Silva, muito obrigado por todo o companheirismo. Aos demais amigos de curso, com quem partilhei momentos de estudo e de descontração, estendo meus sinceros cumprimentos por todo este tempo juntos.

O planejamento de longo prazo não lida com decisões futuras, mas com o futuro de decisões presentes.

(Peter Drucker)

RESUMO

O comportamento auxético, notadamente a expansão lateral de um material ou estrutura sob tração longitudinal, promove propriedades únicas que resultam do Coeficiente de Poisson Negativo (CPN), como maior tenacidade à fratura, maior dureza, maior resistência à abrasão e maior compressibilidade, em concordância com a Teoria Clássica da Elasticidade. Este trabalho teve por objetivo introduzir os efeitos do CPN através de uma revisão bibliográfica tautológica-corroborativa. Foram apresentados os aspectos do comportamento elástico dos materiais e suas correlações com os princípios físicos do Coeficiente de Poisson, os principais modelos e estruturas propostas na literatura para obtenção do CPN e as possibilidades de desenvolvimento de metamateriais que apresentem CPN, especialmente via tecnologias têxteis. Ademais, foi apresentado o contexto histórico principal dos desenvolvimentos dos materiais auxéticos, desde o âmbito de publicações científicas e principais autores do tema, quanto dos tópicos sobre materiais auxéticos de ocorrência natural e nascimento de seu interesse científico como metamaterial. Relacionaram-se estudos onde foram projetados tecidos têxteis através de fios com propriedades auxéticas (HAYs), não-tecidos através de micro usinagem de estrutura auxética em sua extensão, malhas de trama e de urdume com estruturas de ligamento auxéticas, e tranças auxéticas (BAYs) utilizando-se modificações fabris de trançados têxteis. A pesquisa enfatizou que existe uma tendência de crescimento no interesse pelo tema, desde 1987, quando foi publicado o primeiro estudo e desenvolvimento de material auxético com interesse científico, mas maioria destes estudos encontram-se no exterior. Dessa forma, atestou-se que no Brasil o tema merece maior relevância e é uma oportunidade ímpar para novos trabalhos na área. Propõe-se que a comunidade científica do assunto no país se una para a criação de um periódico científico específico para materiais auxéticos, cujo título sugerido fica sendo “*Auxetica*”, oportunizando expansão e o desenvolvimento local na área de materiais auxéticos.

Palavras-chave: Materiais e Estruturas Auxéticas; Metamateriais; Coeficiente de Poisson Negativo; Comportamento Mecânico dos Materiais; Têxteis Técnicos.

ABSTRACT

The auxetic behavior, notably the lateral expansion of a material or structure under longitudinal tension, promotes unique properties that result from the Negative Poisson Ratio (NPR), such as greater fracture toughness, hardness, abrasion resistance and compressibility, in accordance to the Classical Theory of Elasticity. This work aimed to introduce the effects of NPR through a tautological-corroborative bibliographic review. Aspects of the elastic behavior of materials and their correlations with the physical principles of Poisson Ratio, the main models and structures proposed in the literature to obtain the NPR and the possibilities for developing metamaterials that present NPR were presented, specially via textile technologies. Furthermore, the main historical context on developments of auxetic materials was presented, ranging from the scope of scientific publications and main authors, to naturally occurring auxetic materials and the birth of their scientific interest as metamaterials. Studies where woven fabrics were designed through yarns with auxetic properties (HAYs), non-woven fabrics were designed through micro-machining of auxetic structure in its extension, weft and warp knitted fabrics were designed with auxetic loop structures, and auxetic braids (BAYs) were designed using braiding technology modifications were presented. The research emphasized that there has been a growing trend interest of auxetic behavior since 1987, when the first study and development of auxetic material with scientific interest was published, but most of these studies are abroad Brazil. Thus, it was attested that in Brazil this thematic deserves greater relevance and it's a unique opportunity for new researches. It is proposed that the scientific community on the subject in the country reunite to create a specific journal for auxetic materials, whose suggested title remains "Auxetica", providing opportunities for expansion and local development in auxetic materials.

Keywords: Auxetic Materials and Structures; Metamaterials; Negative Poisson Ratio; Mechanical Behavior of Materials; Technical Textiles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do alongamento de um material na direção z , contraindo-se nas direções x e y	18
Figura 2 – Comportamento de sólidos sob tração e compressão: a) convencionais b) auxéticos	19
Figura 3 – Gráfico ν x KG para alguns materiais isotrópicos $-1 < \nu < 12$	20
Figura 4 – Gráfico K x G evidenciando as diferentes características dos materiais conforme ν	21
Figura 5 – Micrografias de uma cortiça nas seções: a) radial b) tangencial.....	23
Figura 6 – Esquema ilustrativo do comportamento mecânico da estrutura celular de uma cortiça sob compressão.....	24
Figura 7 – Curva tensão-deformação típica de um material têxtil	26
Figura 8 – Exemplos de estruturas têxteis concebidas por diferentes tecnologias de fabricação.....	27
Figura 9 – Publicações referentes ao tema de materiais auxéticos de 1991 a 2020.....	30
Figura 10 – Produção científica de diversos pesquisadores no ramo dos materiais auxéticos	30
Figura 11 – Publicações sobre o tema de materiais auxéticos por nacionalidade (1991 – 2020).....	31
Figura 12 – Comportamento sob indentação de um material (a) convencional e (b) auxético	32
Figura 13 – Modelo de deformação sob flexão em um material (a) convencional e (b) auxético.....	33
Figura 14 – Coeficiente de Poisson de espécimes de diferentes razões de aspecto de úberos bovinos sob carregamento uniaxial	34
Figura 15 - Coeficiente de Poisson de malhas têxteis de diferentes razões de aspecto sob carregamento uniaxial.....	35
Figura 16 – Estereofotografia de espumas de poliéster de baixa densidade convencionais (a e b) e auxéticas (c e d)	37
Figura 17 – Célula hexagonal reentrante 3D idealizada por Roderic Lakes em 1987	37
Figura 18 – Estrutura auxética hexagonal reentrante 2D	38
Figura 19 – Modelos alternativos de estruturas auxéticas reentrantes propostos na literatura	38
Figura 20 – Modelos de polígonos rotacionais a) quadrados b) triangulares	39
Figura 21 – Modelo estrutural quiral com uma célula unitária em ênfase	40
Figura 22 – Diferentes exemplos de modelos estruturais auxéticos meta-quirais a) seis ligamentos b) quatro ligamentos c) três ligamentos.....	40
Figura 23 – a) Estruturas de emaranhamento de fios de Cu, NiTi e poliamida (da esquerda para a direita) e b) tomografia computadorizada em corte da estrutura emaranhada de NiTi.....	41

Figura 24 – Exemplos de folhas auxéticas com inclusão de diferentes formas. a) diamantes ortogonais; b) diamantes diagonais; c) diamantes ortogonais não-simétricos e d) formato de estrela	41
Figura 25 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de politetrafluoretileno (PTFE) auxético	42
Figura 26 – Mecanismo de deformação proposto por Caddock e Evans (1989) para o efeito auxético no politetrafluoretileno (PTFE) auxético	42
Figura 27 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) auxético	43
Figura 28 – a) Esquema do sistema de compressão e b) fotografia da amostra após razão de compressão de $\epsilon_z = 1,7$	44
Figura 29 – Estrutura típica de um HAY nos estados: a) relaxado b) tracionado	45
Figura 30 – Amostras de HAY (a) conforme e (b) não conforme por teste visual	46
Figura 31 – Diferença estrutural e direções das laçadas nas malhas de trama e de urdume	46
Figura 32 – Esquema de construção de uma malha de trama	47
Figura 33 – Esquema de construção de uma malha de urdume	48
Figura 34 – Malha dobrável tipo 1	49
Figura 35 – Amostras de malhas de PA, p-AR e híbridas com tamanhos de laçada (a) 10 e (b) 11	50
Figura 36 – Malha dobrável tipo 2	50
Figura 37 – Malhas de trama auxéticas com diferentes comprimentos de laçada	51
Figura 38 – Estrutura de malha de urdume auxética funcional	52
Figura 39 – Malhas de urdume em corrente sob tração: convencionais (a e b) e auxéticas (c e d)	53
Figura 40 – Padrão construtivo (a) e malha de urdume com estrutura de dupla cabeça-de-flecha (b)	53
Figura 41 – Padrões de tricotagem utilizados por Ma, Chang e Jiang (2016): (a) tipo 1 até (d) tipo 4	54
Figura 42 – Equipamento para ensaio de indentação/ <i>stab resistance</i>	55
Figura 43 – Comparativo entre uma estrutural de espaçamento (a) convencional e (b) auxética	56
Figura 44 – Tecidos planos com HAYs. Ondulação e dobramento naturais em evidência	57
Figura 45 – Tecido plano auxético desenvolvido por Zulifqar, Hua e Hu (2018)	58
Figura 46 – Protótipo de <i>stent</i> não tecido auxético de PCL (policaprolactona) micro usinada (a) e sob consolidação (b e c)	59
Figura 47 – Ilustração esquemática do processo construtivo de um trançado têxtil	59
Figura 48 – Ilustração esquemática da produção de um trançado têxtil tubular	60
Figura 49 – Esquema comparativo: (a) HAY (b) BAY	60
Figura 50 – Amostras de HAY e BAYs produzidas por Jiang e Hu (2018)	61
Figura 51 – Princípio de funcionamento da técnica de DIC	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPN	Coeficiente de Poisson Negativo
CPP	Coeficiente de Poisson Positivo
CP	Coeficiente de Poisson
DIC	Correlação Digital de Imagens (<i>Digital Image Correlation</i>)
EC	Elasticidade Clássica
EM	Elasticidade Micropolar
HAY	Fio auxético-helicoidal (<i>Helical Auxetic Yarn</i>)
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MTC	Malharia de Trama Circular
MTR	Malharia de Trama Retilínea
PA	Poliamida
PE	Poliéster
PET	Poliéster Tereftalato
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno
p-AR	Para-aramida
RKG	Razão K/G
UHMWPE	Poliétileno de Ultra Alto Peso Molecular
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

E	Módulo de rigidez ou de elasticidade	MPa
G	Módulo de cisalhamento	MPa
K	Módulo volumétrico	MPa
H	Dureza	-
K/G	Razão K/G	-
ν	Coefficiente de Poisson	-
ϵ_x	Deformação na direção x , transversal	-
ϵ_y	Deformação na direção y , transversal	-
ϵ_z	Deformação na direção z , longitudinal	-
ϵ_R	Deformação na direção R, radial	-
ρ	Densidade	gcm^{-3}
Cu	Elemento cobre	-
NiTi	Liga de níquel-titânio	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.2 Justificativa	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Aspectos do comportamento elástico dos materiais	16
2.1.1 O Coeficiente de Poisson: definição e compreensão física	17
2.2 Materiais auxéticos	24
2.2.1 Materiais auxéticos naturais	24
2.2.2 Metamateriais auxéticos	25
2.3 Aspectos da mecânica dos materiais têxteis	25
2.4 Aspectos construtivos das estruturas têxteis	26
3 METODOLOGIA	28
4 DADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Interesse científico no comportamento auxético	29
4.2 Propriedades esperadas em decorrência do efeito auxético	31
4.3 Comportamento auxético: ocorrências naturais	33
4.4 Comportamento auxético em metamateriais	36
4.4.1 O primeiro comportamento auxético induzido (LAKES, 1987)	36
4.4.2 Geometrias e modelos auxéticos	37
4.4.2.1 Modelos reentrantes	38
4.4.2.2 Modelos de polígonos rotacionais	39
4.4.2.3 Modelos quirais	39
4.4.2.4 Demais modelos	40
4.5 Tecnologias têxteis e fabricação de têxteis auxéticos	44
4.5.1 Fios e fibras e seus derivados auxéticos	44
4.5.2 Tecnologia de malharia e seus derivados auxéticos	46
4.5.2.1 Malhas de trama auxéticas	48
4.5.2.2 Malhas de urdume auxéticas	51
4.5.3 Tecidos planos e não tecidos e seus derivados auxéticos	56

4.5.4 Têxteis trançados e seus derivados auxéticos	59
4.6 Tecnologias para caracterização da mecânica têxtil	61
4.6.1 Correlação digital de imagens (DIC)	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos da humanidade, a Ciência e a Engenharia de Materiais passaram a conjecturar materiais capazes de apresentar propriedades e comportamentos distintos daqueles observados na natureza, visando novas aplicações e soluções tecnológicas. Neste contexto, incluem-se materiais chamados não-convencionais ou metamateriais, os quais Nicolaou e Motter (2012) definem como

materiais engenheirados para adquirir propriedades de sua estrutura, além da composição, e que levaram ao estudo de uma miríade de propriedades não exibidas pela maioria (e em alguns casos, todos) dos materiais naturais. Essas novas propriedades são tipicamente caracterizadas por constantes, módulos ou índices negativos (NICOLAOU; MOTTER, 2012, p. 1, tradução do autor).

O termo metamaterial deriva do grego “μετα” (transliteração: *meta*) que, em tradução livre, significa “além”. Para o desenvolvimento destes materiais artificiais, técnicas como a engenharia reversa e as simulações computacionais são utilizadas. Exemplos clássicos de propriedades advindas da engenharia de metamateriais incluem, dentre inúmeras outras, o índice de refração negativo, o coeficiente de expansão térmica negativo, o índice acústico negativo e o *comportamento auxético* (KADIC et al., 2019).

Os materiais de comportamento auxético, ou materiais auxéticos, são metamateriais de comportamento mecânico não usual, contraintuitivo, que apresentam uma expansão na seção transversal quando tracionados longitudinalmente. De maneira recíproca, quando a seção longitudinal sofre compressão, nota-se uma redução da seção transversal. Devido a essas deformações possuírem o mesmo sinal, matematicamente o material exibe Coeficiente de Poisson negativo (CPN), que os faz apresentarem características e propriedades bastante distintas dos materiais convencionais, aqueles com Coeficiente de Poisson Positivo (CPP)¹.

A palavra “auxético” origina-se do grego “αυξητος” (transliteração: *afxitos*) e significa “aquilo que pode ser aumentado” (ALDERSON; EVANS, 1992). Também são, às vezes, referidos como antiborrachas ou materiais de dilatação (STAVROULAKIS,

¹ Uma abordagem mais completa sobre a definição do Coeficiente de Poisson (CP) e seus sinais está descrita na seção 2.1.1.

2005), em função de serem materiais que possuem comportamento mecânico elástico oposto ao observado para a maioria das borrachas e elastômeros.

O efeito auxético é conhecido há pelo menos 100 anos, sendo que algumas rochas e minerais (BHULLAR J. L.; MIOUCHOWSKI, A., 2010), por meio de análises matemáticas e álgebra tensorial molecular, demonstraram essa característica em certos níveis microestruturais e direções, bem como fora observado em materiais biológicos que demonstravam efeito similar (LEES; VINCENT; HILLERTON, 1991).

Entre as décadas de 50 e 80, o efeito auxético adquiriu maior notoriedade, sendo observado em muitas estruturas e materiais *anisotrópicos*, nos quais as propriedades dependem das direções. O marco inicial do interesse científico dos materiais auxéticos foi 1987, quando o pesquisador Roderic Lakes, na então Universidade de Iowa (hoje Universidade de Wisconsin-Madison), nos Estados Unidos, produziu uma espuma polimérica de células abertas, de caráter auxético e isotrópica, i.e. de propriedades independentes das direções (EVANS; ALDERSON, 2000), demonstrando ser possível constituir materiais auxéticos a partir de materiais não auxéticos.

Desde as suas primeiras concepções, observou-se que o comportamento auxético era, majoritariamente, um fenômeno anisotrópico e fortemente dependente da construção do material, além de comumente observada em escalas macroscópicas, e não apenas como fruto de manipulação ou processos a nível microestrutural. Em virtude deste fato, dadas as diversas tecnologias de fabricação distintas, a Engenharia dos Materiais Têxteis tem sido responsável por uma parcela importante nos estudos que exploram as especificidades do CPN.

Os materiais têxteis possuem uma grande variedade de padrões construtivos. Isso os torna interessantes sob o ponto de vista tecnológico, uma vez que suas propriedades podem ser moldadas por meio das fibras utilizadas, da construção dos fios, dos parâmetros de máquina e, principalmente, da estrutura têxtil formada. Dentre as tecnologias de construção de estruturas têxteis, a malharia ocupa um espaço importante para o desenvolvimento dos têxteis técnicos (BEHERA, B. K.; HARI, P. K., 2010).

Portanto, este trabalho irá expor as particularidades, compreensões físicas e os efeitos do CPN, apresentando os metamateriais auxéticos, suas propriedades e o que as regem, alguns conceitos de fabricação e de aplicações tecnológicas, com enfoque na indústria têxtil. Ademais, buscar-se-á expandir a literatura brasileira sobre o efeito auxético, visto que existem poucas pesquisas engajadas no tema no Brasil atualmente, contribuindo com a produção científica local.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Apresentar os efeitos do Coeficiente de Poisson Negativo, suas implicações nas propriedades dos materiais auxéticos e conceitos de fabricação de artigos têxteis com esta característica, levantando possibilidades contribuições para o tema no Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

- Discorrer sobre os princípios e compreensões físicas do comportamento auxético;
- Descrever os principais modelos de estruturas auxéticas, suas propriedades e alguns métodos conceituais para fabricação de estruturas com CPN;
- Contribuir com o engajamento e o levantamento do tema de estudo no Brasil, expandindo a produção científica no país, além de propor a criação de um periódico científico voltado aos materiais auxéticos no Brasil.

1.2 Justificativa

Os metamateriais auxéticos têm sido desenvolvidos e estudados tecnologicamente há pouco menos de 40 anos. Devido ao seu comportamento contraintuitivo e propriedades únicas, eles representam grandes portas para o avanço da Ciência e Engenharia de Materiais dentro das mais diversas áreas. No âmbito da indústria têxtil, os materiais auxéticos são de interesse nos chamados têxteis técnicos e inteligentes, com potenciais aplicações nas áreas militar, de proteção, de esportes, medicina e outras, embora ainda seja um desafio fabricá-los de forma reproduzível em escala.

A literatura brasileira ainda é defasada em estudos na área dos materiais auxéticos, resumindo-se em apenas alguns pesquisadores e universidades. Este trabalho pode contribuir para a expansão da literatura do tema, provendo base para trabalhos futuros e propondo a criação de um periódico científico específico no Brasil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos do comportamento elástico dos materiais

O comportamento mecânico de um material dentro do regime elástico de deformação é regido primordialmente por suas características a nível atômico. Existem teorias que descrevem o comportamento dos sólidos neste campo de deformação, como a Elasticidade Clássica (EC) e a Elasticidade Micropolar (EM), também conhecida por Elasticidade de Cosserat. Donescu, Chiroiu e Munteanu (2009) asseveram, no entanto, que a EC não leva em conta fatores relevantes a nível atômico e que a EM possui maiores graus de liberdade, além de afirmarem que a EC não seria capaz de descrever com precisão o comportamento dos metamateriais auxéticos.

No entanto, isso não aparenta ser um consenso científico e a maior parte dos trabalhos consultados referentes aos materiais e estruturas auxéticas concordam – e utilizam – os princípios da EC para explicar o comportamento em questão. É possível que essa divergência esteja relacionada com o comportamento auxético em nível microscópico, onde as interações interatômicas regem. Para macroestruturas, a EC sustenta a maior parte dos fenômenos esperados e observados. Desta maneira, este trabalho está pautado especificamente à luz dessa teoria.

No domínio da EC são descritas as propriedades elásticas dos materiais, como o módulo de rigidez (E , *Young Modulus*), o módulo de cisalhamento (G , *Shear Modulus*) e o coeficiente de Poisson (ν , *Poisson Ratio*). O módulo de rigidez mensura a resistência do material à deformação linear, enquanto o módulo de cisalhamento rege sua resistência à mudança de forma sob esforços cisalhantes (CALLISTER; RE-THWISCH, 2016).

Outra propriedade fundamental elástica dos materiais é o módulo volumétrico (K), ou *bulk modulus*, que indica sua resistência à variação de volume ou, em outras palavras, sua elasticidade volumétrica (EVANS; ALDERSON, 2000). De acordo com os autores, para um material isotrópico, as equações do Quadro 1 são válidas:

Quadro 1 – Equações das propriedades do regime elástico de deformação dos sólidos

Equação	Fórmula	Descrição
1	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$	Módulo de Cisalhamento ou de Corte (Shear Modulus): mensura a resistência à mudança de forma/cisalhamento
2	$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	Módulo Volumétrico (<i>Bulk Modulus</i>): mensura a resistência à variação de volume ou a elasticidade volumétrica
3	$E = \frac{9KG}{3K + G}$	Módulo de Rigidez ou Elasticidade (<i>Young Modulus</i>): mensura a resistência à deformação linear
4	$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{3K - 2G}{3K + G} \right)$	Coefficiente de Poisson (<i>Poisson Ratio</i>): mensura a relação entre as deformações de eixos perpendiculares entre si

Fonte: adaptado de (EVANS; ALDERSON, 2000)

Pela sua relevância neste trabalho, o CP será mais detalhadamente tratado na próxima subseção.

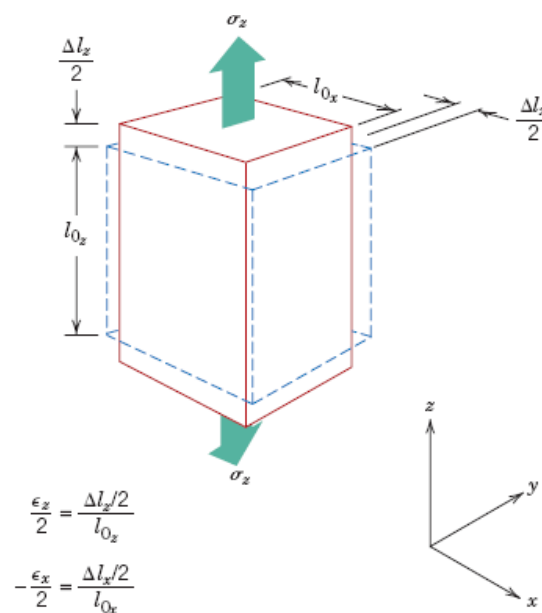
2.1.1 O Coeficiente de Poisson: definição e compreensão física

O Coeficiente de Poisson (CP), normalmente denotado por ν , mensura a propriedade de um material de sofrer uma deformação em eixos perpendiculares a outro que está sob esforço mecânico de tração ou compressão (REN et al., 2018). O nome é em homenagem ao matemático e físico francês, Simeón Denis Poisson (1787-1840), após suas inúmeras contribuições e soluções na física e matemática. Seu nome permaneceu eternizado em partes importantes destas áreas, como: Integral de Poisson, Distribuição de Poisson e, evidentemente, o Coeficiente de Poisson. Poisson observou em alguns estudos contemporâneos que existia uma clara correlação entre o alongamento de um material e a conseqüente deformação na sua seção transversal (GREAVES et al., 2011), propondo o que ficou, mais tarde, conhecido como Coeficiente de Poisson.

Supondo que um material sofra uma tensão uniaxial trativa em um eixo arbitrário longitudinal z , denotada por σ_z , dentro do limite elástico de deformação, ele irá se

alongar nessa direção como consequência do distanciamento das ligações atômicas (lei de Hooke). A deformação causada pelo alongamento do eixo z é denotada por ε_z e calculada como $\varepsilon_z = \frac{\Delta l_z}{l_{0z}}$. Devido ao alongamento na direção z , uma contração na direção dos eixos x e y é normalmente observada. Sendo o material isotrópico, as contrações na direção dos eixos x e y serão equivalentes, $-\varepsilon_x = -\varepsilon_y$ (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). A Figura 1 esquematiza essa constatação:

Figura 1 – Representação esquemática do alongamento de um material na direção z , contraindo-se nas direções x e y



Fonte: Callister e Rethwisch (2016)

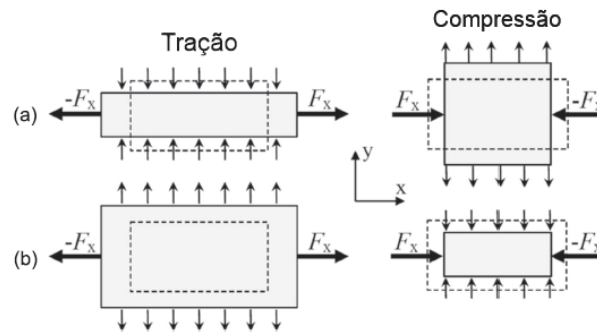
A relação entre as deformações longitudinal e transversal mostradas na Figura 1 define o CP, como exibido na Equação 5. Devido ao fato das deformações axiais e transversais possuírem sinais opostos, o sinal negativo na Equação 5 é inserido para que ν seja um número positivo.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (5)$$

Essa definição fez com que, corriqueiramente, durante os cursos de graduação, se aceitasse a premissa de que o CP seria sempre um número positivo (EVANS; ALDERSON, 2000). Como se ilustra na Figura 2, enquanto em um sólido convencional observa-se a contração da seção transversal durante um carregamento trativo e expansão da seção transversal sob um carregamento compressivo, em um material

auxético o oposto acontece: expansão da seção transversal sob tração e contração da seção transversal sob compressão.

Figura 2 – Comportamento de sólidos sob tração e compressão: a) convencionais b) auxéticos



Fonte: adaptado de Ren et. al (2018)

Normalmente, o CP é observado na faixa de $0,25 < \nu < 0,35$, mas todos os materiais das grandes classes – metais, polímeros, compósitos e cerâmicas – podem existir na forma auxética (DONESCU; CHIROIU; MUNTEANU, 2009) (THILL et al., 2008), uma vez que a teoria clássica da elasticidade indica essa possibilidade e prevê que o CP pode, em concordância com a termodinâmica da energia de tensão no campo elástico de deformação, estar entre $-1 < \nu < \frac{1}{2}$ para materiais isotrópicos (GREAVES et al., 2011) (EVANS et al., 1991). Em uma interpretação matemática, a Equação 6 relaciona as quatro propriedades elásticas conhecidas:

$$E = 2G(1 + \nu) = 3K(1 - 2\nu) \quad (6)$$

Manipulando a Equação 6 para relacionar a razão entre os módulos volumétricos e de cisalhamento, tem-se:

$$\frac{K}{G} = \frac{2}{3} \left(\frac{1 + \nu}{1 - 2\nu} \right) \quad (7)$$

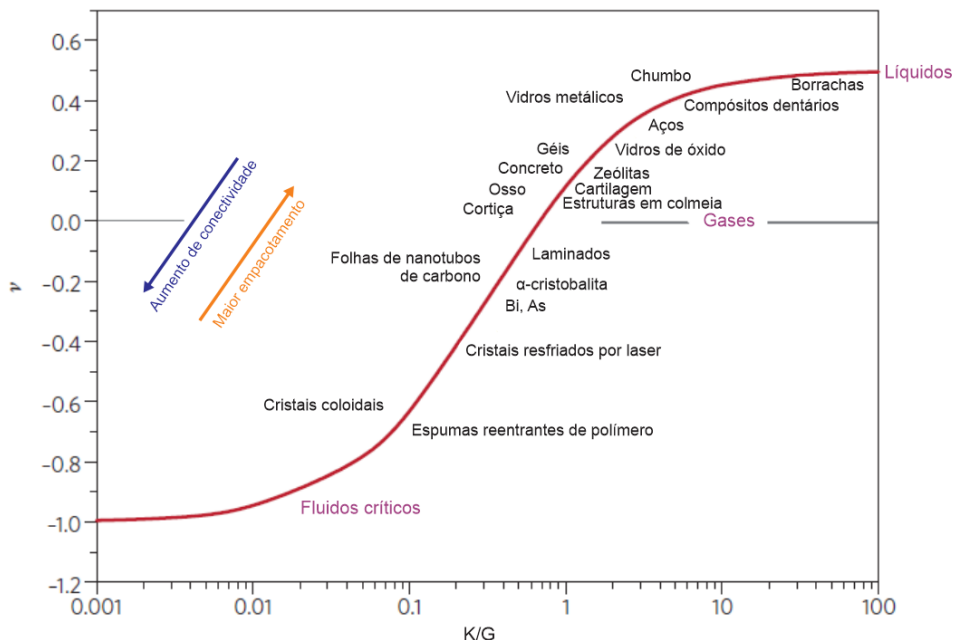
A partir da Equação 7, pode se observar que, matematicamente, o CP em materiais isotrópicos deve estar contido no domínio $-1 < \nu < \frac{1}{2}$. Essa Equação também

é importante por demonstrar que, para a EC, o comportamento elástico de um material (isotrópico e 3D) pode ser explicado por meio de apenas duas das quatro principais constantes elásticas: E , G , K e ν .

Greaves et al. (2011) demonstram que, se $\frac{K}{G} \gg 1$ ($\nu \rightarrow \frac{1}{2}$), o material possui módulo de corte muito mais baixo do que o módulo volumétrico ($G \ll K$). Em outras palavras, ele se torna altamente incompressível e fácil de se cisalhar, como as borrachas. No caso de $\frac{K}{G} \ll 1$ ($\nu \rightarrow -1$), $K \ll G$ e o oposto é observado: alta compressibilidade e difícil cisalhamento, uma das principais características destes metamateriais (daí o nome antiborrachas).

Numa situação corriqueira, seria difícil inferir rapidamente sobre o comportamento de um material em estados de tensão ou compressão, uma vez que o coeficiente de Poisson é, pelo menos, função de 2 variáveis, i.e., $\nu(K, G)$. Para isso, Greaves et al. (2011) compilaram as relações entre $\frac{K}{G}$ e ν graficamente para alguns materiais e classes de materiais isotrópicos, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Gráfico $\nu \times K/G$ para alguns materiais isotrópicos ($-1 < \nu < 1/2$)



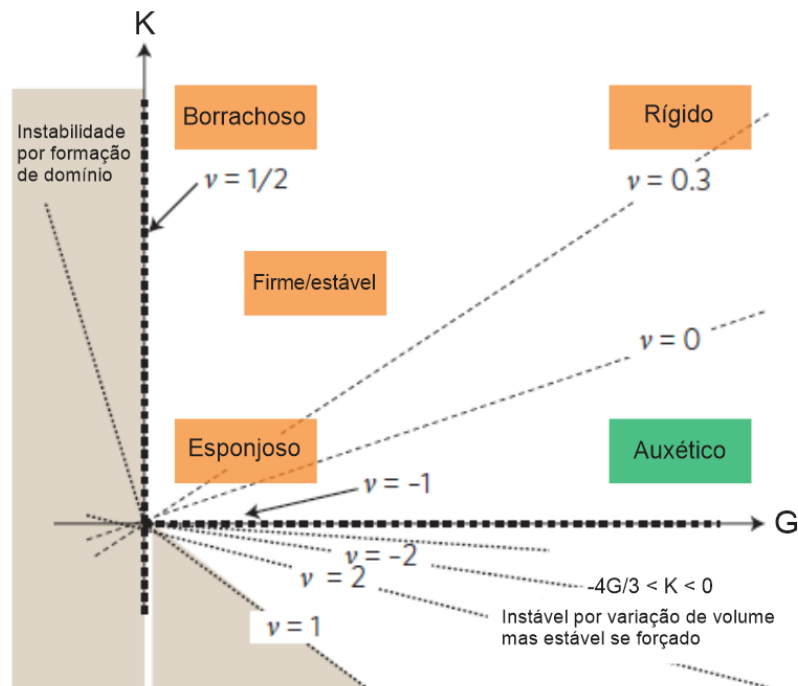
Fonte: adaptado de Greaves et al. (2011)

Na Figura 4, observa-se outro gráfico que demonstra uma clara correlação entre K e G , bem como as características observadas para materiais em cada situação. Conforme já mencionado, materiais com alto módulo volumétrico (K) e baixo módulo

de cisalhamento (G), fisicamente, serão incompressíveis, mas fáceis de se cortar/altear de forma, ou seja, exibirão um aspecto borrachoso.

Já na situação oposta, tem-se materiais com características contrárias: baixo módulo volumétrico (K) e alto módulo de cisalhamento (G), o que implica numa alta capacidade de mudar de volume (maior compressibilidade) e alta dificuldade de corte e mudança de forma – os auxéticos ou antiborrachas (GREAVES et al. 2011).

Figura 4 – Gráfico $K \times G$ evidenciando as diferentes características dos materiais conforme ν



Fonte: adaptado de Greaves et al. (2011)

Os elastômeros são caracteristicamente isotrópicos, de baixo módulo de rigidez (1 a 500 MPa) e normalmente apresentam extensas deformações elásticas sob solicitações mecânicas (GIANNAKOPOULOS; TRIANTAFYLLOU, 2007). De maneira genérica, estes materiais, em compressão livre, possuem alta capacidade de responder à tal solicitação mudando sua forma para manter o volume constante. Porém, sob um carregamento hidrostático (pressão uniformemente aplicada em todas as direções), a compressibilidade nula pode ser observada, uma vez que as deformações geradas em todas as direções são muito pequenas (CAETANO, 2021).

De acordo com Caetano (2021), a Equação 8 é válida para estimar a variação relativa do volume de um sólido sob carregamento de tração ou de compressão:

$$\frac{dV}{V_0} = \frac{dL}{L_0}(1 - 2\nu) \quad (8)$$

onde $\frac{dV}{V_0}$ e $\frac{dL}{L_0}$ são, respectivamente, os diferenciais da variação de volume e de comprimento do sólido durante o carregamento e ν é o CP do material. Dessa maneira, quando $\nu \rightarrow \frac{1}{2}$, temos que $\frac{dV}{V_0} \rightarrow 0$, ou seja, a variação de volume do sólido durante a compressão é nula. Este é o caso da maioria das borrachas e elastômeros conhecidos e que vem sendo debatidos ao longo do texto, razão pela qual atestamos que se tratam de materiais incompressíveis.

Com base no raciocínio proposto pela Equação 8, é razoável presumir que, de maneira recíproca, para um material auxético isotrópico onde $\nu \rightarrow -1$, teríamos $\frac{dV}{V_0} \rightarrow 3 \frac{dL}{L_0}$. Fisicamente, o material demonstraria uma variação de volume proporcional a três vezes sua variação de comprimento, evidenciando sua grande capacidade de variação de volume (alta compressibilidade). Esta dedução corrobora com os limites impostos pelas premissas da EC.

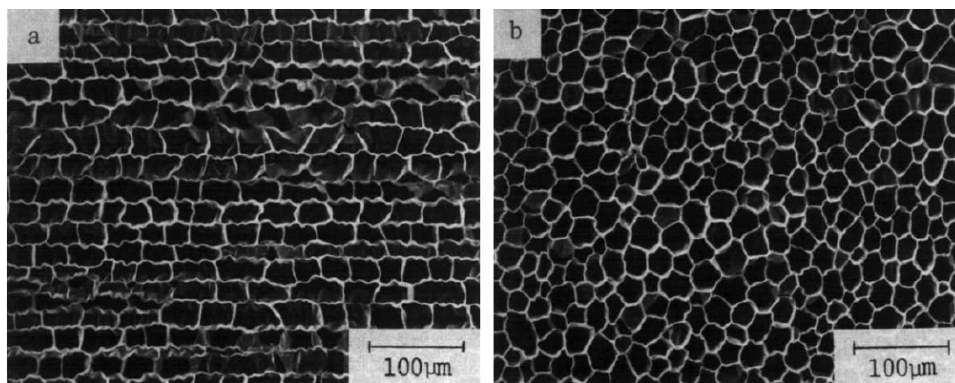
Ainda na Figura 4, observa-se características também de outros materiais, como os rígidos (sólidos convencionais), os esponjosos (tipicamente, espumas) e os firmes/estáveis (materiais com características intermediárias entre os quatro extremos). Estes comportamentos parecem óbvios, mas é importante a observação da correlação entre as características exibidas na prática e outras relações elásticas dos materiais, e não somente seus módulos de rigidez (E).

Neste contexto, podemos perceber que, para se compreender plenamente o comportamento mecânico elástico de um material como um todo, se faz necessário o entendimento de todas as suas variáveis elásticas.

Num caso mais geral, no âmbito dos materiais anisotrópicos, ainda se pode pensar em inúmeras derivações de um mesmo coeficiente elástico, uma vez que, para cada direção analisada, é razoável esperar diferenças escalares na grandeza (por exemplo, $\nu_{xy} \neq \nu_{xz}$).

Tomando como caso prático relatado na literatura, um sólido celular derivado da casca de sobreiros, oriundas de Portugal e do Mediterrâneo, possui² $v_{NR/NR} = 0,26$ e $v_{R/NR} = 0,064$, sendo $v_{R/NR} \approx 0$ quando $5\% < \varepsilon_R < 8\%$ e até mesmo auxética ($v_{R/NR} = -0,01$) nos instantes iniciais de deformações maiores do que este intervalo, onde se inicia um processo de colapso estrutural por flambagem das células (FORTES; NOGUEIRA; LISBOA, 1989). A Figura 5a mostra a micrografia de uma cortiça em sua seção radial e a Figura 5b em sua seção tangencial.

Figura 5 – Micrografias de uma cortiça nas seções: a) radial b) tangencial

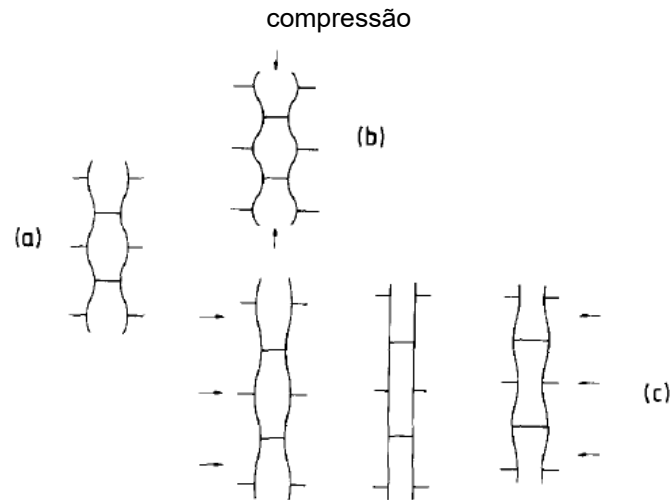


Fonte: adaptado de (FORTES; NOGUEIRA; LISBOA, 1989)

A estrutura da cortiça, ao sofrer compressão na seção radial, promove um ligeiro distanciamento entre as paredes opostas da célula, como ilustram as Figura 6a e Figura 6b. Esse distanciamento promove um CPP nessa direção. Já para um esforço compressivo na direção tangencial, a tendência é de aproximação das paredes opostas da célula, como se observa na Figura 6c. Isso induz um CP aproximadamente nulo ou até mesmo negativo nessa direção, evidenciando a curiosa anisotropia da cortiça (FORTES; NOGUEIRA; LISBOA, 1989).

² R: direção radial; NR: direção não-radial (conforme os autores nomeiam).

Figura 6 – Esquema ilustrativo do comportamento mecânico da estrutura celular de uma cortiça sob compressão



Fonte: adaptado de (FORTES; NOGUEIRA; LISBOA, 1989)

Com base nestas considerações, conjecturam-se questionamentos como: o quão possível é alterar a forma do material em estudo? Essa alteração é igual para todas as direções? Ou, também: o quão resistente à tração é este material ao longo do eixo arbitrário O_{xz} ? Daí o interesse em estudar todos os parâmetros que caracterizam o regime elástico de um material, especialmente quando tratamos de um comportamento tão dependente das direções, como o efeito auxético.

2.2 Materiais auxéticos

Os materiais auxéticos se subdividem em naturais e sintéticos. Os naturais ocorrem com pouquíssima frequência na natureza. Já os sintéticos são aqueles em que o comportamento auxético é projetado. Eles podem ser fabricados desde nano a macro escala (HU; ZHANG; LIU, 2019). Neste caso, pode-se referir a estes como metamateriais auxéticos: aqui se enquadram os têxteis auxéticos.

2.2.1 Materiais auxéticos naturais

Alguns materiais podem apresentar naturalmente o comportamento auxético em determinadas situações, embora se trate de um fenômeno raro. Pesquisadores atestaram que certas estruturas orgânicas (como peles e outros tecidos fibrosos naturais) apresentam esta característica em algum grau e orientação, dada sua complexidade estrutural. Por meio de análises matemáticas e álgebra tensorial molecular,

este efeito foi predito também em estruturas inorgânicas, como algumas cerâmicas naturais (HU; ZHANG; LIU, 2019). Apesar disso, não foi encontrada, na literatura consultada, nenhuma aplicação prática de engenharia utilizando materiais de comportamento auxético natural.

2.2.2 Metamateriais auxéticos

É nos metamateriais auxéticos que reside a maior parte do interesse científico de Engenharia (em várias áreas distintas). Foi por um processo de compressão volumétrica triaxial ortogonal em uma espuma convencional de poliéster que o pesquisador Norte Americano Roderic Lakes, em 1987, uma das maiores referências no tema, produziu o primeiro material auxético da história: uma espuma polimérica sintética, de caráter auxético e isotrópico (LAKES, 1987).

A partir de então, os materiais auxéticos despertaram o interesse de diversos pesquisadores ao redor do mundo, que iniciaram pesquisas nas mais variadas áreas a fim de se desenvolverem novos materiais com estas características, notadamente não convencionais (HU; ZHANG; LIU, 2019).

Por conseguinte, uma das áreas que mais tem se desenvolvido em comportamento mecânico auxético, nos últimos anos, foi a Engenharia Têxtil. Os materiais têxteis se caracterizam por grande versatilidade construtiva, tornando-os especialmente ímpares para projetos de estruturas com propriedades auxéticas (HU; ZHANG; LIU, 2019).

Antes de permear o contexto dos têxteis auxéticos, se faz necessário um entendimento prévio do básico da mecânica e da construção dos materiais têxteis, como está sumarizado ao leitor a seguir.

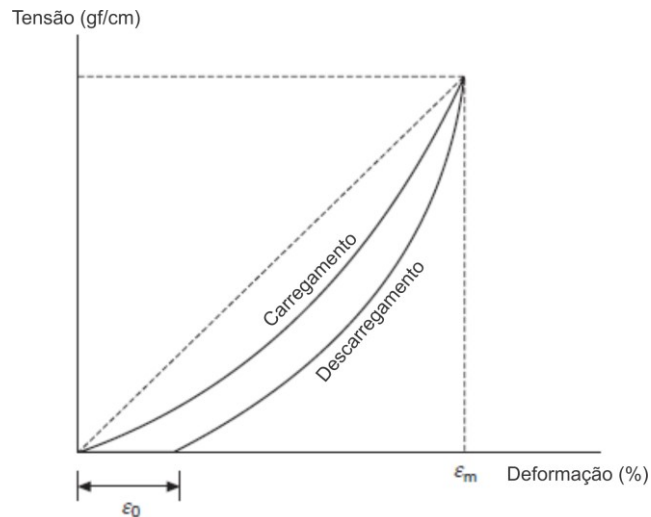
2.3 Aspectos da mecânica dos materiais têxteis

Os materiais têxteis diferem em muitas maneiras dos materiais convencionais de engenharia. Em linhas gerais, eles são descontínuos, anisotrópicos e não homogêneos. O comportamento mecânico de uma estrutura têxtil é não linear e, mesmo sob baixos níveis de tensões aplicadas e à temperatura ambiente, sofrem grandes deformações. Uma de suas características únicas é a baixa susceptibilidade à falha,

visto que as estruturas têxteis se curvam, mas não formam quinas, como um papel quando dobrado (HU, 2004). Na prática, as estruturas têxteis são menos susceptíveis a sofrerem os efeitos de concentradores de tensão

A curva tensão-deformação típica para um material têxtil é mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Curva tensão-deformação típica de um material têxtil



Fonte: adaptado de Hu (2004).

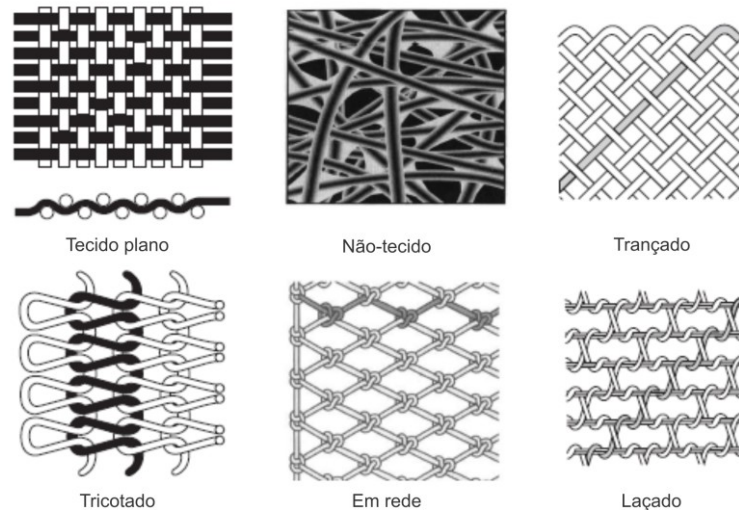
É usual que as tensões aplicadas em uma estrutura têxtil sejam definidas como força por unidade de comprimento, uma vez que sua seção transversal é muito fina. Este comportamento típico em tração (aspecto do gráfico da Figura 7) se deve aos vazios da estrutura. Nos estágios iniciais de deformação ($E \cong 10 \text{ MPa}$), há pouca orientação dos fios no sentido do esforço mecânico, que gradualmente aumenta e atinge um nível mais linearizado com a extensão das fibras/filamentos, onde o tecido se torna mais rígido (HU, 2014). Neste momento, os efeitos relacionados ao próprio material dos fios, e não mais à estrutura, regem o carregamento.

Os aspectos viscoelásticos dos tecidos são evidentes nos ciclos de carregamento, como mostra a histerese da Figura 7. Para outros tipos de esforços mecânicos, como cisalhamento e flexão, a resistência dos tecidos é muito baixa ou praticamente nula (HU, 2014).

2.4 Aspectos construtivos das estruturas têxteis

As estruturas têxteis podem ser fabricadas por diversas tecnologias e para uma infinidade de aplicações distintas. A Figura 8 ilustra algumas construções básicas empregadas nestas tecnologias, que conferem propriedades únicas para cada uma.

Figura 8 – Exemplos de estruturas têxteis concebidas por diferentes tecnologias de fabricação



Fonte: adaptado de BEHERA e HARI (2010).

Os não-tecidos constituem-se de fios não entrelaçados e unidos por ação térmica, mecânica, química ou uma combinação entre estes métodos. Os tecidos planos são os mais comuns e possuem fios que se entrelaçam ortogonalmente (BEHERA; HARI, 2010). Entretanto, sua estrutura é bastante rígida, sendo mais ornamental do que confortável. Este fato fez surgir os tecidos de malha, extremamente flexíveis e populares para artigos vestuários. No caso das estruturas de malha, os entrelaçamentos ocorrem entre as chamadas laçadas, assim como no tricô, primogênito da tecnologia da malharia (ALMEIDA, 2015). Têxteis laçados, em rede ou trançados compõem outras tecnologias de fabricação e aplicações específicas (BEHERA; HARI, 2010).

Mais detalhes sobre os principais tipos de construção têxtil serão mencionados posteriormente, no decorrer do texto e, além disso, será explicitado que o efeito auxético é mais explorado em certos tipos de estruturas e menos explorado em outras, com maiores detalhes.

3 METODOLOGIA

Neste estudo, adotou-se a metodologia de pesquisa bibliográfica³ sistemática, qualitativa e descritiva dos trabalhos publicados, onde buscou-se expor ao leitor os principais aspectos físicos e estruturais do comportamento auxético, as propriedades e características únicas advindas deste fenômeno, algumas rotas e processamentos possíveis para o desenvolvimento destas estruturas e as oportunidades tecnológicas de aplicação que eles podem proporcionar.

Os materiais analisados, tanto em Português quanto em Inglês, foram levantados a partir das seguintes bases de dados: SciELO, Google Scholar, Scribd, Scopus, Science Direct e Web of Science. Em algumas situações, sites na *internet* também foram consultados.

As principais palavras chaves empregadas foram: *auxetic material*, *auxetic behavior*, *auxetic metamaterial*, *auxetic textile*, *knitted textiles*, *textiles' mechanical behavior*, entre outras. Também foram consultados alguns materiais bibliográficos disponíveis no repositório virtual (Repositório de Outras Coleções Abertas – ROCA) da UTFPR.

Para a seleção e análise dos trabalhos utilizados como referência foram adotados os seguintes critérios:

- Reconhecimento da aderência dos conteúdos dos textos aos objetivos estabelecidos (geral e específicos);
- Identificação dos trabalhos, autores e métricas mais relevantes ao escopo desta revisão de literatura;
- Discussão ao longo dos resultados e conclusões mais significativos dos trabalhos selecionados ante às teorias e aspectos relacionados ao tema principal deste trabalho (Coeficiente de Poisson);

Buscou-se expor ao leitor um texto que se configura em fácil ritmo de leitura, além de explicações tautológicas dos conceitos envolvidos.

³ De acordo com Gil (2010), revisão ou pesquisa bibliográfica é a modalidade de pesquisa científica que tem como apoio materiais produzidos e publicados por profissionais da área de interesse, como livros, teses, dissertações e artigos científicos. Embora não tenha cunho experimental, a revisão bibliográfica é imprescindível para contribuir com a expansão da literatura em língua portuguesa sobre o tema, que é escassa atualmente.

4 DADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

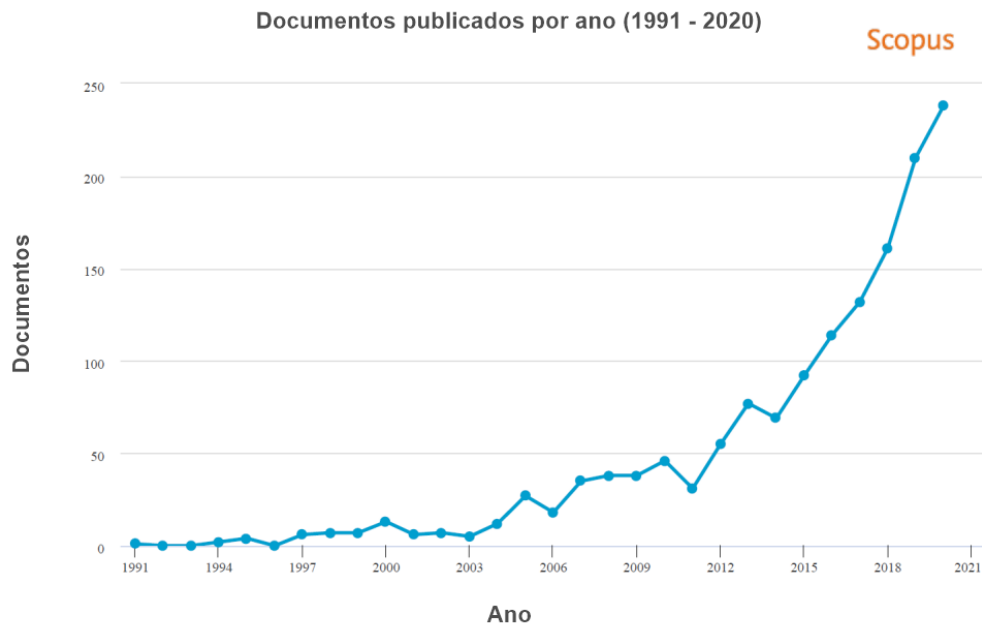
4.1 Interesse científico no comportamento auxético

O comportamento auxético é relativamente novo no campo do interesse científico. Lakes (1987), há menos de 40 anos, foi o responsável por desenvolver o primeiro metamaterial auxético de forma intencional, uma vez que este efeito já havia sido observado em outras estruturas sintéticas anteriormente, mas sem exatamente esta pretensão.

Dessa maneira, é interessante analisar como têm sido a relevância desse tema nos anos seguintes a este fato. Estas análises foram realizadas utilizando algumas das principais palavras-chave que se relacionam com este trabalho, na área de análise de resultados de busca da plataforma de métricas da Elsevier, Scopus. Além disso, foi estabelecido o limite temporal compreendido entre 1991 e 2020. Estas datas referem-se, respectivamente, ao primeiro registro que consta na plataforma ante às buscas e o último ano já completo, a fim de se evitar dados não representativos para o ano de 2021, que ainda não se encerrou.

A primeira questão que podemos analisar é em relação à produção científica relacionada ao tema. É possível perceber que, desde 1991, existe uma tendência exponencial no número de documentos publicados, ano a ano, demonstrando que o efeito auxético é cada vez mais explorado (Figura 9).

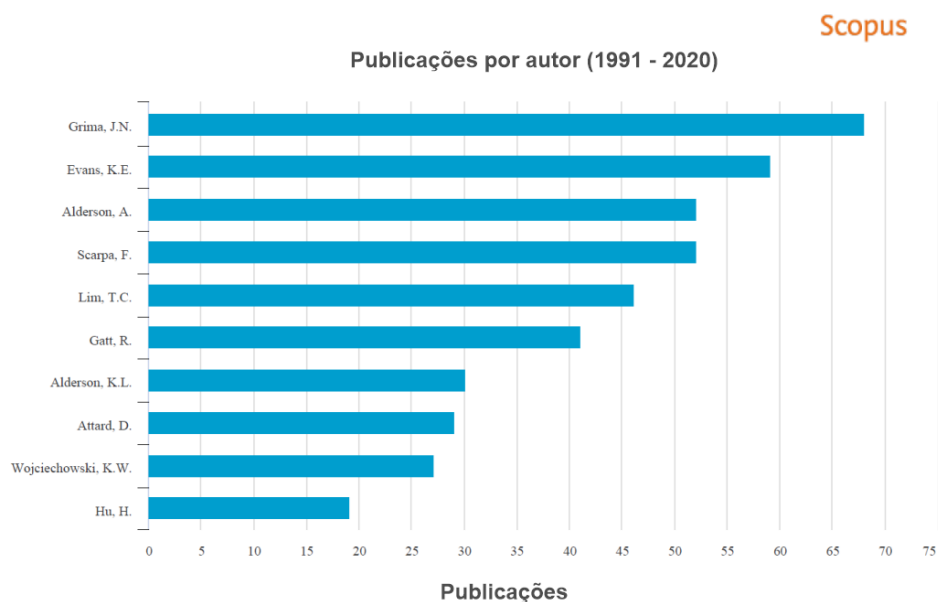
Figura 9 – Publicações referentes ao tema de materiais auxéticos de 1991 a 2020



Fonte: Scopus (2021)

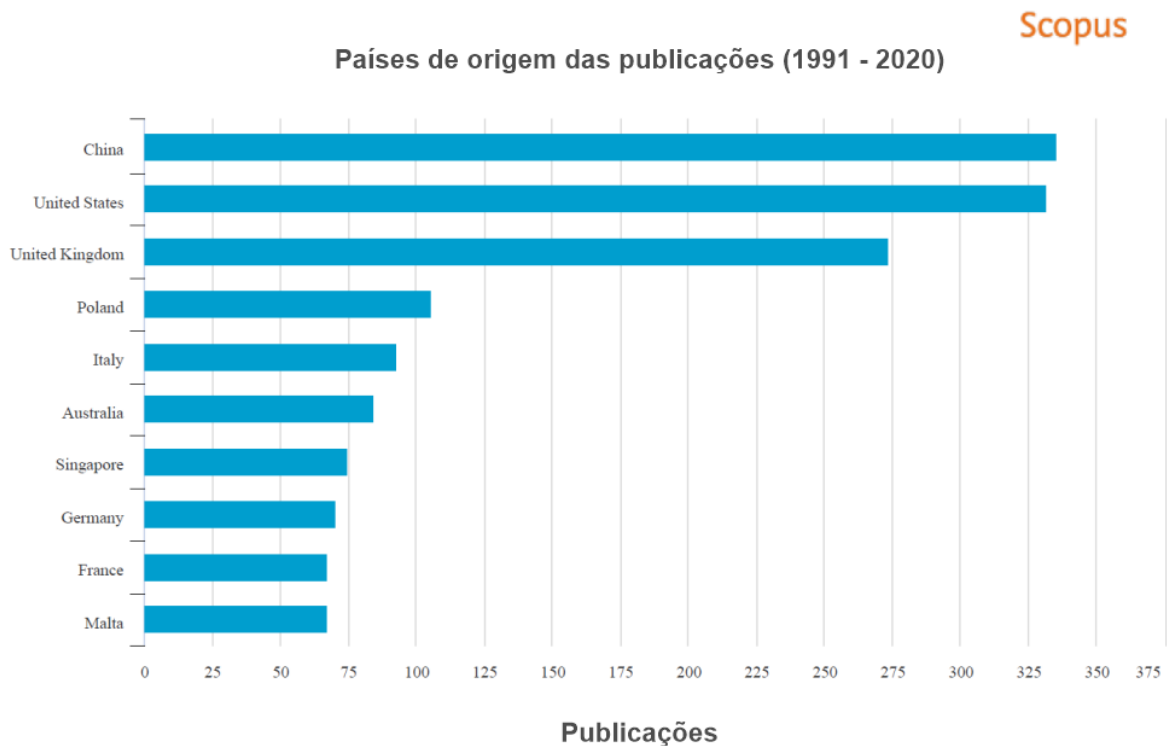
Na Figura 10, percebe-se também que a maioria dos autores que mais publicam na área do comportamento auxético (GRIMA, J. N., EVANS, K. E. e ALDERSON, A.) estão referenciados neste trabalho, sugerindo bom direcionamento das ideias acerca do tema. China e EUA lideram o ranking de nacionalidades que mais estão publicando sobre o tema, o que também vai de encontro essa revisão de literatura (Figura 11).

Figura 10 – Produção científica de diversos pesquisadores no ramo dos materiais auxéticos



Fonte: Scopus (2021)

Figura 11 – Publicações sobre o tema de materiais auxéticos por nacionalidade (1991 – 2020)



Fonte: Scopus (2021)

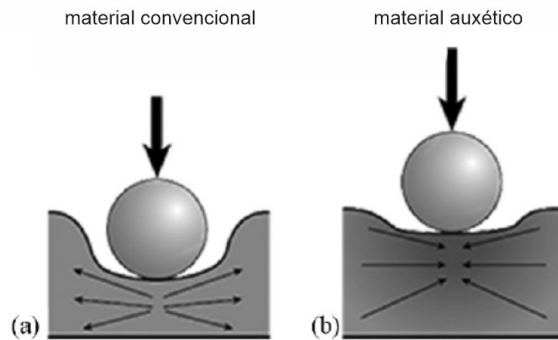
4.2 Propriedades esperadas em decorrência do efeito auxético

Uma das propriedades mais marcantes decorrentes do efeito auxético é a resistência à indentação (ou dureza, H), que mensura a resistência do material à uma deformação localizada. Ao se indentar um material convencional, a compressão local causa um escoamento de material perpendicularmente à força aplicada, de forma a aliviar as tensões internas que ali se acumulam, como se exibe na Figura 12a. De maneira oposta, em um material auxético isotrópico, durante a indentação ocorre um acúmulo de material na região que o densifica e o torna mais resistente à deformação local, conforme a Figura 12b ilustra. A Equação 9⁴ relaciona a resistência à indentação H com o ν , demonstrando que para materiais auxéticos e isotrópicos em 3D, se $\nu \rightarrow -1$, $H \rightarrow \infty$. Porém, sabe-se que materiais 2D admitem valores ν próximos de 1, o

⁴ γ , neste caso, é uma constante que assume valores de 1 para distribuição uniforme de pressão ou 2/3 no caso de indentação hertziana (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013).

que também implicaria em $H \rightarrow \infty$ para estes sistemas (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013).

Figura 12 – Comportamento sob indentação de um material (a) convencional e (b) auxético



Fonte: adaptado de (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013)

$$H \cong \left(\frac{E}{1 - \nu^2} \right)^{\gamma} \quad (9)$$

A resistência ao corte também é superior nos materiais auxéticos para condições similares de esforços. Conforme demonstrado na Seção 2.1.1, para materiais isotrópicos 3D, a EC expressa que seu comportamento elástico pode ser descrito se duas das quatro constantes elásticas (E, G, K e ν) forem conhecidas, conforme a Equação 10.⁵ Observando-se a Equação 10 e também a Equação 1, ambas resolvidas para G , denota-se que se $\nu \rightarrow -1, G \rightarrow \infty$. O aumento do módulo de cisalhamento induz a uma maior resistência ao corte para estes materiais (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013).

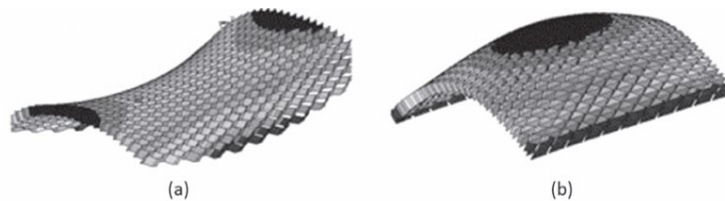
$$G = \frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (10)$$

Também são arroladas na literatura as seguintes propriedades para os materiais auxéticos (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013): **a)** podem apresentar resistên-

⁵ A Equação 10 é uma derivação matemática da Equação 7, resolvida para G .

cia à fratura superior à dos materiais convencionais simplesmente devido à sua natureza constituinte. A observação macroscópica da auxeticidade é, puramente, um resultado derivado da expansão de cada parte infinitesimal da metaestrutura auxética. Portanto, é esperado que sempre que existam trincas em um material desta natureza, haja uma tendência delas se fecharem sob estados de deformação; **b)** em termos de absorção de energia, a absorção acústica demonstra-se ser superior para espumas auxéticas, em relação a espumas similares convencionais, especialmente para baixas frequências (LIU; HU, 2010) e dependendo do ângulo de inclinação dos ligamentos (*ribs*); **c)** apresentam o chamado “comportamento sinclástico”, correspondente à exibição de uma curvatura em forma de abóbada quando submetidos a esforços fletores, ao invés do formato de sela (Figura 13a e b); entre outras.

Figura 13 – Modelo de deformação sob flexão em um material (a) convencional e (b) auxético



Fonte: adaptado de REN et al. (2018)

4.3 Comportamento auxético: ocorrências naturais

O comportamento auxético já fora observado anteriormente na natureza, apesar de serem casos raros. Não existe um aparente consenso científico, mas as referências consultadas sugerem que os primeiros relatos e observações deste comportamento data de 100 a 150 anos atrás.

Carneiro, Meireles e Puga (2013) asseveram que o primeiro estudo científico acerca dos materiais auxéticos foi conduzido pelo físico alemão Woldemar Voigt, que em 1882 demonstrou este comportamento em um monocristal de pirita de ferro (FeS_2). Através de experimentos em torção e flexão, um CP de cerca de -0,14 fora aferido. Já Thill et al. (2008) atesta que o primeiro comportamento auxético foi relatado apenas em 1944, mas sem discorrer maiores detalhes sobre esta afirmação.

Independente de qual tenha sido o primeiro reporte acerca do comportamento auxético, é fato que já se conhecem diversos materiais que, naturalmente, exibem este efeito em algum grau. Exemplos inorgânicos são alguns zeólitos e silicatos, além

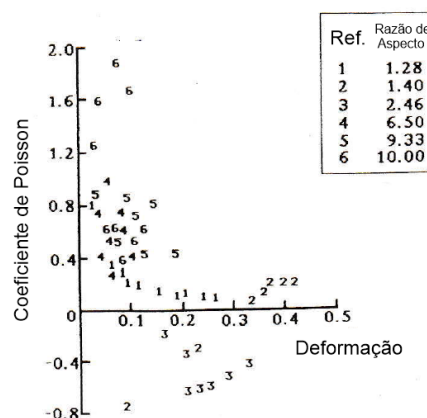
de materiais biológicos fibrosos, como a pele de felinos e do útero bovino (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013).

Lees, Vincent e Hillerton (1991) elucidam que a pele é uma extensa rede fibrosa de colágeno e elastina, tornando seu comportamento mecânico completamente diferente de materiais convencionais (normalmente isotrópicos e que se deformam não mais do que 1%), uma vez que a EC deriva destes materiais e seus modelos não são capazes de prever comportamentos sob diferentes níveis de carregamento. Neste estudo, os autores demonstraram que a pele do útero bovino poderia apresentar CPN dependendo da sua razão de aspecto (relação entre o comprimento e a largura), do tipo de carregamento (uniaxial ou biaxial) e do nível do carregamento.

Sob carregamentos uniaxiais, altos valores como $\nu \cong 2$ foram mensurados com espécimes de razão de aspecto igual a 10,00, enquanto baixos valores como próximos de $\nu \cong -0,8$ foram obtidos quando a razão de aspecto fora igual a 1,28. Outros tipos de carregamento (como em espécimes circunferenciais e do útere completo do animal) também foram estudados e alguns casos demonstraram CPN, mas fica o convite ao leitor se aprofundar nestes casos no estudo aqui mencionado.

A Figura 14 mostra que, aparentemente, existe uma relação inversa entre a razão de aspecto e o CP para estes tecidos sob as mesmas condições de carregamento uniaxial, além de sugerir que o comportamento auxético exibido até certo nível de deformação ocorre por conta do desdobramento inicial do tecido, que só então passa a se estirar e, assim, retoma o caráter positivo do CP.

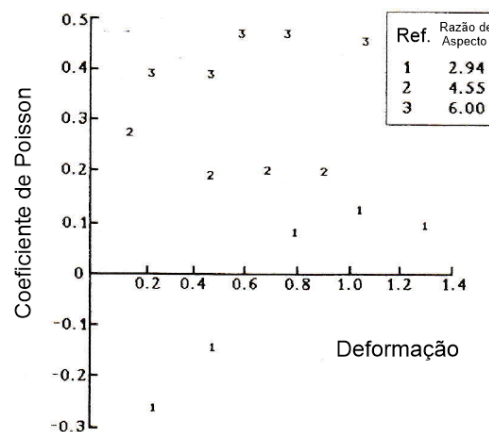
Figura 14 – Coeficiente de Poisson de espécimes de diferentes razões de aspecto de úteros bovinos sob carregamento uniaxial



Fonte: adaptado de Lees, Vincent e Hillerton (1991)

No mesmo estudo, Lees, Vincent e Hillerton (1991) ensaiam uma malha têxtil para fins comparativos com os resultados observados no tecido do útero bovino e atestam que este comportamento pode ser reproduzido por essa tecnologia, o que corrobora com o grande potencial que tem a malharia no que tange ao desenvolvimento de artigos têxteis com efeito auxético.

Figura 15 - Coeficiente de Poisson de malhas têxteis de diferentes razões de aspecto sob carregamento uniaxial



Fonte: adaptado de Lees, Vincent e Hillerton (1991)

Para os materiais inorgânicos, existem alguns casos preditos de caráter auxético relatados na literatura. É o exibido por um polimorfismo da sílica (SiO_2) chamado α -cristobalita. Este comportamento foi deduzido para o material através de análises tensoriais locais, onde há uma rotação estrutural entre tetraedros de SiO_4 que demonstram valores de até $\nu = -0,5$ (YANG et al., 2004). Os autores ainda mencionam o caso de zeólitos, bastante utilizados como peneiras moleculares pelos seus nanoporos capazes de filtrar moléculas de tamanhos específicos e possuem uma estrutura poliédrica que possibilita mecanismos de deformação que produzem caráter auxético.

Apesar do caráter auxético preditas por estudos em mecânica molecular dos sólidos nos casos destes exemplos inorgânicos, diferentemente dos materiais biológicos, não foram encontrados estudos que demonstram, através de leituras diretas, este comportamento. Ademais, Yang et al. (2004) não mencionam nenhuma aplicação prá-

tica ou direta destas constatações, mas é interessante observar como até mesmo materiais cerâmicos podem apresentar o caráter auxético, ainda que em níveis moleculares.

4.4 Comportamento auxético em metamateriais

Tratar-se-á nesta seção alguns estudos sobre a sintetização de metamateriais auxéticos, ou seja, a construção de materiais e estruturas que foram desenvolvidos para apresentarem este comportamento e suas propriedades.

4.4.1 O primeiro comportamento auxético induzido (LAKES, 1987)⁶

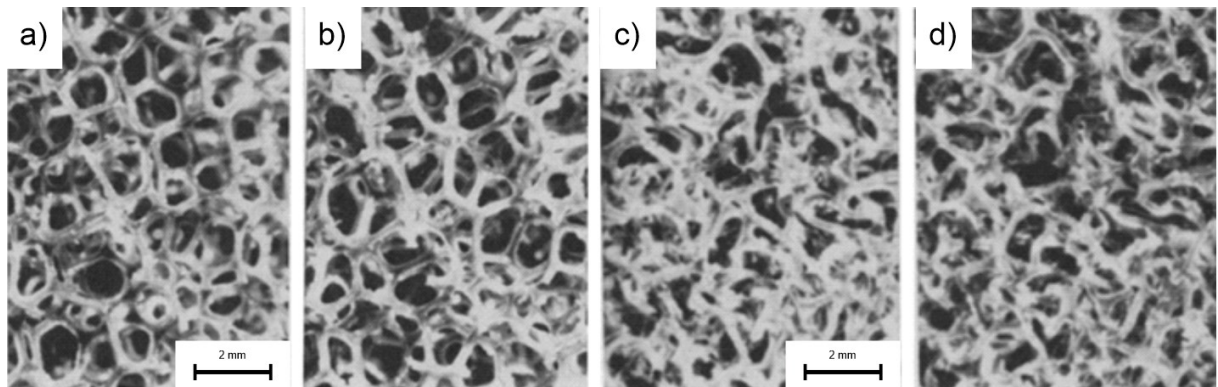
Em 1987, o pesquisador Roderic Lakes produziu espumas de células abertas de poliéster de baixa densidade, de caráter auxético e isotrópica, que marcou o início do interesse científico acerca de materiais com CPN. Foi o primeiro desenvolvimento de um material com propriedades auxéticas a ser publicado.

O processo consistiu em comprimir uma espuma convencional ($\rho = 0,03 \text{ g cm}^{-3}$; $E = 71 \text{ kPa}$; $\nu = 0,4$; *tamanho de célula = 1,2 mm*) triaxialmente, de forma ortogonal, colocá-la num molde, aquecê-la até a temperatura de amolecimento (entre 163 e 171 °C) e resfriá-la à temperatura ambiente. Esse processo foi realizado com espumas de célula de diferente tamanhos (de 0,3 a 2,5 mm) e todas apresentaram CPN após o processamento.

Lakes descreve que o processo teria causado um colapso permanente nas células alveolares da espuma, projetando-as para seu interior. Nas Figura 16a e b, observa-se uma espuma convencional de poliéster de células abertas. Após um processo de compressão volumétrica de fator 2,7, para o mesmo material, observa-se uma macroestrutura de caráter auxético, com células apresentando protusão interiormente e $\nu = -0,7$ (Figura 16c e d).

⁶ Esta seção trata em específico deste artigo.

Figura 16 – Estereofotografia de espumas de poliéster de baixa densidade convencionais (a e b) e auxéticas (c e d)

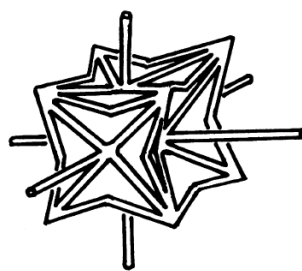


Fonte: adaptado de Lakes (1987)

Lakes, então, idealizou um modelo 3D de célula hexagonal reentrante para explicar a origem física do comportamento auxético e do CPN, exibido na Figura 17. Nesta estrutura, tensões trativas nas ligações verticais fariam a célula se reabrir e expandir lateralmente, conforme observado nas espumas auxéticas produzidas.

Gibson e Ashby (1982) já propunham estruturas macroscópicas de materiais engenheiradas em 2D, incluindo as células (hexágonos) reentrantes. No entanto, não se tratava de uma abordagem sobre fenômenos auxéticos claramente explícitos ou propositais, como o realizado por Lakes (1987).

Figura 17 – Célula hexagonal reentrante 3D idealizada por Roderic Lakes em 1987



Fonte: Lakes (1987)

A concepção de modelos e estruturas que pudessem promover um comportamento auxético, e não somente o material base, corroborou com os avanços na escala em que este fenômeno ocorre (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013).

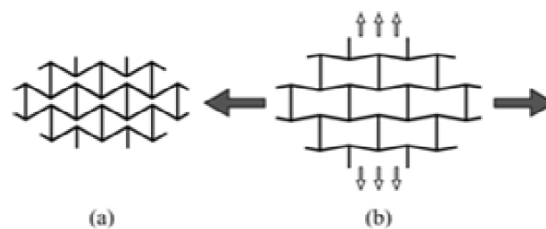
4.4.2 Geometrias e modelos auxéticos

Esta seção tratará de um resumo de algumas das principais estruturas auxéticas teorizadas e presentes na literatura e em artigos de desenvolvimento conceitual-experimental, sem muito aprofundamento em sua essência matemática devido às suas complexidades e não ser parte do escopo deste trabalho.

4.4.2.1 Modelos reentrantes

Os modelos de estruturas reentrantes (*reentrant structures*) são como primeiramente descritos pelas células hexagonais reentrantes 2D de Gibson e Ashby (1982) (Figura 18) e também como demonstrado anteriormente na espuma de poliéster com células hexagonais reentrantes 3D por Lakes (1987) (Figura 17).

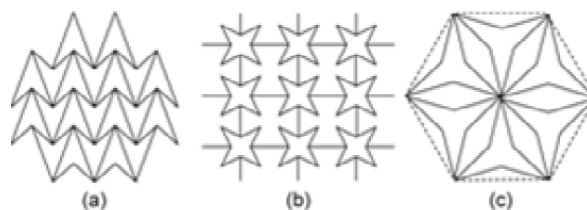
Figura 18 – Estrutura auxética hexagonal reentrante 2D



Fonte: Liu e Hu (2010)

Contudo, existem modelos que não seguem a geometria hexagonal, mas mantêm a essência do mecanismo de deformação: o desdobramento de células unitárias (ou unidades) dentro de uma rede. A Figura 19 compila demais exemplos destas estruturas.

Figura 19 – Modelos alternativos de estruturas auxéticas reentrantes propostos na literatura



Fonte: adaptado de Liu e Hu (2010)

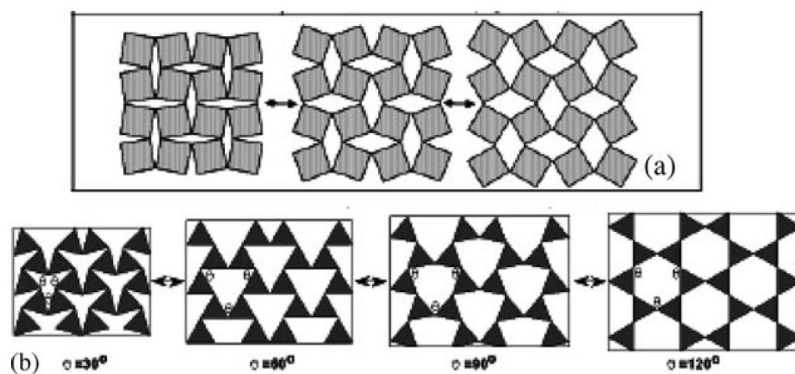
Em tese, as estruturas hexagonais reentrantes exibiriam comportamento auxético puramente pelo estiramento axial (tração) das arestas protudidas interiormente, mas, na realidade, a maior parte das estruturas assim desenvolvidas demonstram flexão destas arestas concomitantemente com o estiramento axial, o que também contribui para o caráter auxético observado (LIU; HU, 2010).

4.4.2.2 Modelos de polígonos rotacionais

As estruturas de polígonos rotacionais (*rotating polygonal structures*) consistem em estruturas poligonais geometricamente unidas de forma que o comportamento da estrutura macroscópico seja dilatante e bidirecional (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013).

A parte poligonal deve ser rígida e o que as une semirrígido, permitindo rotação para que a estrutura interna se desdobre sob tensão (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013), daí a exibição do efeito auxético. Os autores relatam que a literatura já reportou diversos polígonos como precursores destas estruturas, como retângulos, quadrados, triângulos e outros. Alguns exemplos são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Modelos de polígonos rotacionais a) quadrados b) triangulares

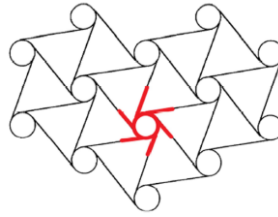


Fonte: YANG et al. (2004)

4.4.2.3 Modelos quirais

Estruturas quirais (*chiral structures*) são aquelas que não podem ser sobrepostas por elas mesmas num plano espelhado e que possuem apenas simetria rotacional (CARNEIRO; MEIRELES; PUGA, 2013) (REN et al., 2018), como exemplificado na Figura 21.

Figura 21 – Modelo estrutural quirai com uma célula unitária em ênfase



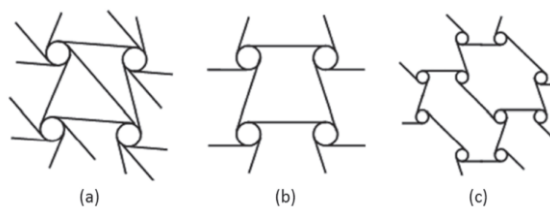
Fonte: Ren et al. (2018)

O efeito auxético deste tipo de estrutura foi inicialmente reportado por Roderic Lakes, onde ligamentos tangenciais a um nó central se desenrolam sob tensão (REN et al., 2018) (LIU; HU, 2010).

Ao contrário da maior parte das outras estruturas auxéticas conhecidas, as estruturas quirais possuem a capacidade de se manterem apresentando CPN mesmo sob maiores níveis de deformação (LIU; HU, 2010).

Com base nas estruturas quirais, Grima e outros pesquisadores conceberam as chamadas estruturas meta-quirais, considerados intermediários entre estruturas quirais e anti-quirais (REN et al., 2018). O estado relaxado destas estruturas não são simetricamente tangenciais aos nós centrais como no caso das estruturas quirais, mas ao longo do esforço mecânico elas se desdobram em células quirais (Figura 22).

Figura 22 – Diferentes exemplos de modelos estruturais auxéticos meta-quirais a) seis ligamentos b) quatro ligamentos c) três ligamentos



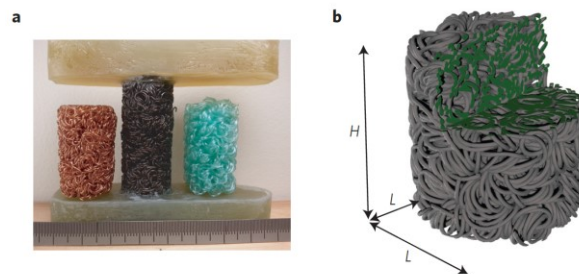
Fonte: Ren et al. (2018)

4.4.2.4 Demais modelos

Existem diversos modelos conceituais alternativos presentes na literatura idealizados para a obtenção do efeito auxético na estrutura do material, sendo impossível abordar todos eles no escopo deste trabalho, resguardando-se esta seção para resumir mais alguns exemplos, como é o caso dos materiais de estrutura “emaranhada” (*entangled materials*). O efeito auxético nesta estrutura advém da sinergia entre o

alongamento de um fio único, emaranhado ao redor de si, e dos rearranjos estéricos na estrutura durante esforços de tração. No entanto, para esforços compressivos seu CP pode ser superior a 1, tornando-os materiais híbridos entre os comportamentos opostos. Ademais, utilizando-se fibras de ampla elasticidade, é possível se observar uma histerese de deformação após os carregamentos (RODNEY et al., 2016). Na Figura 23a são mostradas algumas estruturas de emaranhamento produzidas pelos pesquisadores em questão, enquanto na Figura 23b é apresentada a tomografia computadorizada de uma estrutura emaranhada de fio de NiTi (nitinol), em corte, demonstrando sua homogeneidade interna (detalhes em verde).

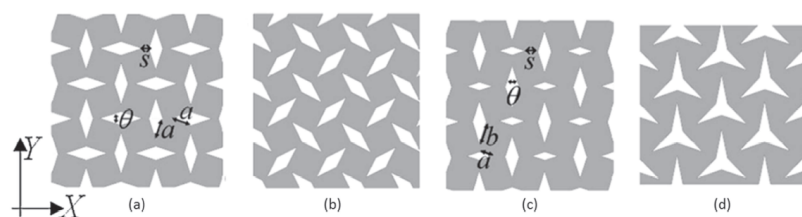
Figura 23 – a) Estruturas de emaranhamento de fios de Cu, NiTi e poliamida (da esquerda para a direita) e b) tomografia computadorizada em corte da estrutura emaranhada de NiTi



Fonte: Rodney et al. (2016)

São relatadas estruturas descritas como “folhas perfuradas” (*perforated sheets*), que na prática mimetizam o comportamento das estruturas de polígonos rotacionais. São obtidas através da inclusão de elementos geométricos na superfície, e sob compressão e tração há auxeticidade. A Figura 24a ilustra alguns exemplos. Os ângulos dos elementos de inclusão, suas dimensões e direcionamentos, além do grau de simetria entre essas inclusões são fatores que determinam o CP da estrutura (REN et al., 2018).

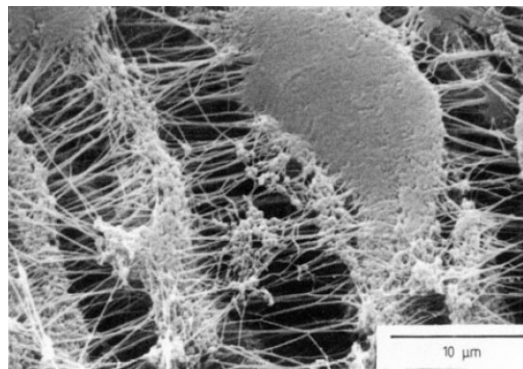
Figura 24 – Exemplos de folhas auxéticas com inclusão de diferentes formas. a) diamantes ortogonais; b) diamantes diagonais; c) diamantes ortogonais não-simétricos e d) formato de estrela



Fonte: REN et al. (2018)

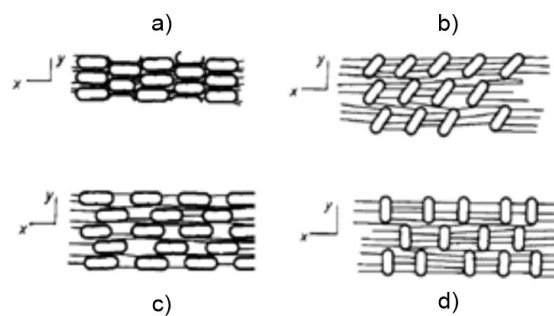
Também existem modelos que se propõem a explicar o comportamento de alguns polímeros auxéticos microporosos já explorados experimentalmente, como é o caso do politetrafluoretileno (PTFE) microporoso, anisotrópico e com CP de até $\nu = -12$, dependendo das condições de deformação (Figura 25) (CADDOCK; EVANS, 1989). Sob condições especiais de processamento, é possível modificar a microestrutura do polímero ao ponto em que a mesma se sustente através de pequenos nódulos e fibrilas. Com o auxílio de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), os autores propuseram o seguinte mecanismo de deformação (Figura 26): **a)** estrutura densificada e relaxada; **b)** tensão nas fibrilas, causando deslocamento dos nódulos e expansão lateral; **c)** rotação dos nódulos, incrementando a expansão lateral; e **d)** estágio final de deformação elástica, à iminência de deformação plástica devido ao rompimento dos nódulos.

Figura 25 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de politetrafluoretileno (PTFE) auxético



Fonte: Caddock e Evans (1989)

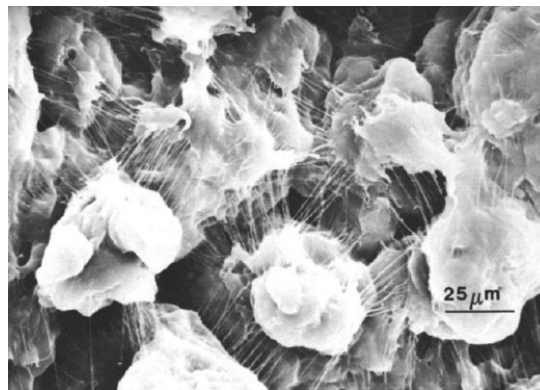
Figura 26 – Mecanismo de deformação proposto por Caddock e Evans (1989) para o efeito auxético no politetrafluoretileno (PTFE) auxético



Fonte: adaptado de Caddock e Evans (1989)

Alderson e Evans (1992) fabricaram, através de uma rota especial de processamento, um polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) microporoso auxético, com micrografia eletrônica de varredura (MEV) evidenciada na Figura 27, que muito se assemelha à microestrutura porosa e sustentada por nódulos e fibrilas do PTFE auxético desenvolvido por Caddock e Evans (1989). No entanto, o UHMWPE demonstrou ser mais isotrópico, com valores de até $\nu = -1,2$, o que pode ser explicado pela maior equidade estrutural e de das próprias fibrilas no UHMWPE, quando comparadas as suas micrografias com as do PTFE (ALDERSON; EVANS, 1992).

Figura 27 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) auxético

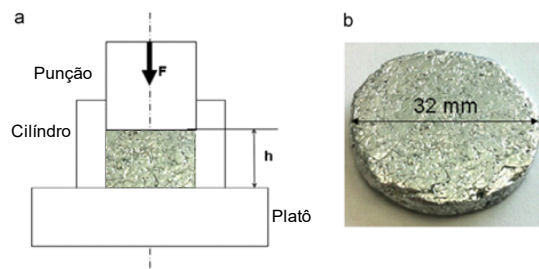


Fonte: ALDERSON e EVANS (1992)

Pode-se mencionar também os materiais de estruturas de amassamento (*crumpled materials*), que tendem a exibir um comportamento intermediário entre espumas e materiais “emaranhados”. Em um estudo recente, finas folhas de alumínio randomicamente amassadas e comprimidas axialmente obtiveram CPN mensurados próximos a $\nu = -0,7$ a partir de um mecanismo de desamassamento (BOUAZIZ et al., 2013), como visto na Figura 28, dependendo da densidade relativa da folha.

Um conceito de estrutura nanométrica e com comportamento similar foi idealizado por Grima et al. (2015) para folhas de grafeno através da inserção de defeitos pontuais de vacância, conceituando o que seria o menor e mais fino metamaterial auxético já projetado. Os autores, no entanto, ressaltam a importância de estudos experimentais que apliquem as simulações e conceitos utilizados para tornar possível este metamaterial, que possui potencial de aplicação na área de dispositivos nanoeletromecânicos e nanofiltração inteligente.

Figura 28 – a) Esquema do sistema de compressão e b) fotografia da amostra após razão de compressão de $\varepsilon_z = 1,7$



Fonte: adaptado de Bouaziz et al. (2013)

4.5 Tecnologias têxteis e fabricação de têxteis auxéticos

Os esforços de produção e desenvolvimento de estruturas têxteis auxéticas ainda são limitados, por isso raramente chegam à uma aplicação funcional (UGBOLUE et. al, 2012). Em virtude desse fato, a maioria dos trabalhos encontrados demonstra possibilidades e conceitos de desenvolvimento de estruturas têxteis com propriedades auxéticas elucidando a necessidade de estudos posteriores otimizarem tais projetos para aplicações específicas e escalabilidade.

4.5.1 Fios e fibras e seus derivados auxéticos

Fios e fibras constituem a base construtiva de qualquer artigo têxtil, sendo ambas derivadas da tecnologia do *spinning* (fiação), que apesar de se desdobrar em vários tipos e processos distintos, todos possuem o mesmo princípio: produzir fibras a partir de polímeros naturais ou sintéticos, ou transformar fibras naturais e/ou sintéticas em fios através da união destas, proporcionando continuidade e resistência ao material para que seja utilizado em aplicações específicas, como tecelagem, costura, malharia etc. (LAWRENCE, 2010).

Normalmente, fios e fibras exibem CPP, mas já se encontram na literatura casos de desenvolvimento de fibras poliméricas auxéticas baseadas em polímeros auxéticos microporosos (HU; ZHANG; LIU, 2019), como as fibras auxéticas de PP (polipropileno) desenvolvidas por Alderson et al. (2002), chegando a apresentar $\nu = -0,60 \pm 0,05$, e as fibras de PET (poliéster tereftalato) e PA (poliamida) desenvolvidas por Ravirala et al. (2005) e Ravirala et al. (2006), com CPs mensurados entre $\nu = -0,15$

e $\nu = -0,25$ para as fibras de PA e entre $\nu = -0,65$ e $\nu = -0,75$ para as fibras de PET.

O desenvolvimento de métodos para a fabricação de fibras poliméricas com propriedades auxéticas trouxe contribuições importantes para aplicações de polímeros auxéticos, uma vez que, até então, este efeito só houvera sido desenvolvido em polímeros onde o formato obtido (hastes cilíndricas) não trazia possibilidades práticas de utilização pela difícil trabalhabilidade para formas mais úteis (ALDERSON et al., 2002) (RAVIRALA et al., 2005).

Enquanto fibras auxéticas normalmente aduzem este efeito pelo método de fabricação utilizado, os fios auxéticos são construídos para exibi-lo. Ambos os casos possuem grandes potenciais de aplicação na indústria de compósitos reforçados e sistemas de proteção pessoal (HU; ZHANG; LIU, 2019).

Quando nos referimos a fios auxéticos, a princípio tratam-se de fios convencionais unidos especialmente (HU; ZHANG; LIU, 2019) para apresentarem CPN na macroestrutura. Apesar de algumas variantes, estas estruturas são conhecidas, em sua essência, como fios auxético-helicoidais (HAY, *helical auxetic yarn*), consistindo em um núcleo com um fio de caráter menos rígido, envolto por outro fio de maior rigidez, helicoidalmente disposto (STEFFENS et al., 2013).

Quando a estrutura está num estado relaxado (Figura 29a), não há qualquer efeito perceptível, mas quando o sistema sofre tração (Figura 29b), o fio invólucro comprime o fio do núcleo, que é menos rígido, fazendo com que um ligeiro caráter auxético seja exibido pela estrutura como um todo.

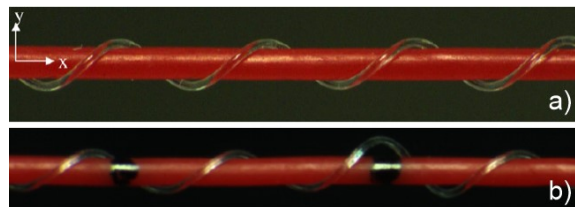
Figura 29 – Estrutura típica de um HAY nos estados: a) relaxado b) tracionado



Fonte: adaptado de HU, ZHANG e LIU (2019)

Em praticamente qualquer estrutura auxética, fatores geométricos são essenciais e servem de controle de qualidade para o efeito auxético esperado, como demonstra um teste visual feito por Sloan, Wright e Evans (2011), em um estudo onde investigaram os efeitos geométricos construtivos de HAYs. A partir de relações trigonométricas, os autores inferiram que o “ângulo de enrolamento” (*wrap angle*) é a variável mais importante para o efeito auxético nesses fios. Nas Figura 30a e b se nota uma clara diferença entre um fio conforme e outro não conforme, em termos do ângulo de enrolamento dos fios invólucros.

Figura 30 – Amostras de HAY (a) conforme e (b) não conforme por teste visual

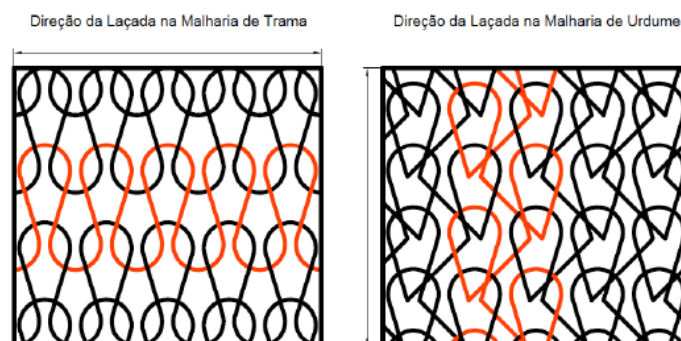


Fonte: adaptado de SLOAN, WRIGHT e EVANS (2011)

4.5.2 Tecnologia de malharia e seus derivados auxéticos

As estruturas de malha diferem das outras construções têxteis devido ao entrelaçamento por meio de laçadas ao invés do entrelaçamento de fios, possibilitando maior flexibilidade ao tecido. A malharia se desdobra em dois principais tipos de estruturas: as malhas de trama e as malhas de urdume (RAY, 2011), cujas construções-base estão apresentadas na Figura 31 e serão discutidas a seguir.

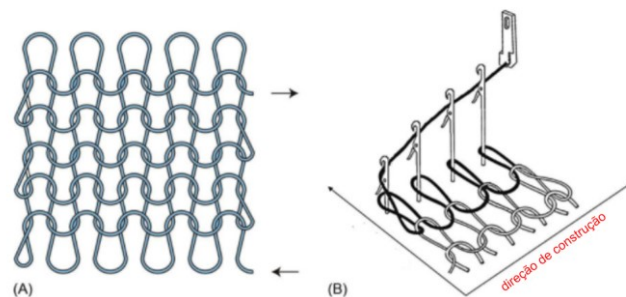
Figura 31 – Diferença estrutural e direções das laçadas nas malhas de trama e de urdume



Fonte: adaptado de ALMEIDA (2015)

As malhas de trama caracterizam-se por tecidos de maior flexibilidade, menor estabilidade dimensional (consequentemente, maior flexibilidade/caimento) e acessibilidade financeira dos equipamentos. Devido a tais características, compõem a maior parte da indústria de vestuários e de têxteis técnicos (HU; ZHANG; LIU, 2019). As laçadas das malhas de trama são formadas na direção horizontal, no sentido da largura do artigo têxtil (RAY, 2011), conforme a Figura 32 exibe.

Figura 32 – Esquema de construção de uma malha de trama



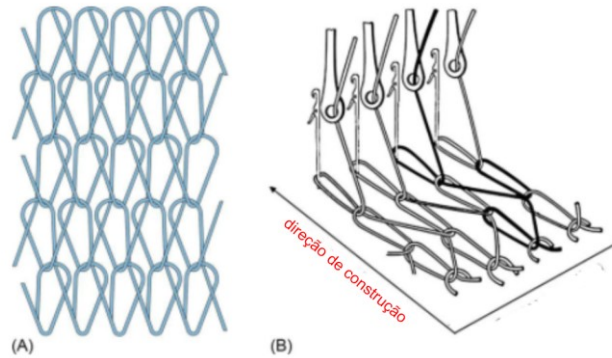
Fonte: adaptado de HU, ZHANG e LIU (2019)

A Tecnologia da Malharia de Trama pode ser dividida em: Malharia de Trama Retilínea (MTR) e Malharia de Trama Circular (MTC). A MTR reúne algumas vantagens em relação à malharia de urdume, como a relativa simplicidade do processo, onde apenas um fio alimenta todas as agulhas simultaneamente, e a facilidade de substituição do padrão de construção. É ideal para pequenos fabricantes e indústrias, sendo um processo mais barato e com equipamentos de menor porte, normalmente sendo um processo de menor eficiência e não contínuo, pois os passos para a construção das laçadas são intermitentes entre cada carreira (HU; ZHANG; LIU, 2019). No caso da MTC o processo é contínuo por natureza, uma vez que não há intermitência entre as carreiras de laçadas. Possuem maiores limitações de padrões construtivos em relação à MTR, mas são bastante eficientes no que produzem, como estruturas tubulares (HU; ZHANG; LIU, 2019).

As malhas de urdume são corriqueiramente encontradas em artigos têxteis de interiores, automóveis e onde há menor necessidade de conforto, como tecidos ornamentais, vestimentas de primeira qualidade e estofamentos (HU; ZHANG; LIU, 2019). Possuem maior estabilidade dimensional e são menos flexíveis comparados às malhas de trama, mas ainda assim mais flexíveis que os convencionais tecidos planos

(ALMEIDA, 2015). Os tecidos de malha de urdume são construídos na direção vertical da estrutura no sentido do comprimento da mesma (RAY, 2011), conforme se exhibe na Figura 33.

Figura 33 – Esquema de construção de uma malha de urdume



Fonte: adaptado de HU, ZHANG e LIU (2019)

Na malha de urdume, existe maior complexidade na preparação dos fios e do *setup* do processo como um todo, uma vez que todas as agulhas trabalham e precisam ser alimentadas simultaneamente por fios independentes. Uma das vantagens é o fluxo contínuo e não intermitente da tricotagem, produzindo o artigo têxtil de forma rápida e eficiente. No entanto, estes fatores tornam esta tecnologia mais custosa, demandando maior capital de investimento (HU; ZHANG; LIU, 2019).

4.5.2.1 Malhas de trama auxéticas

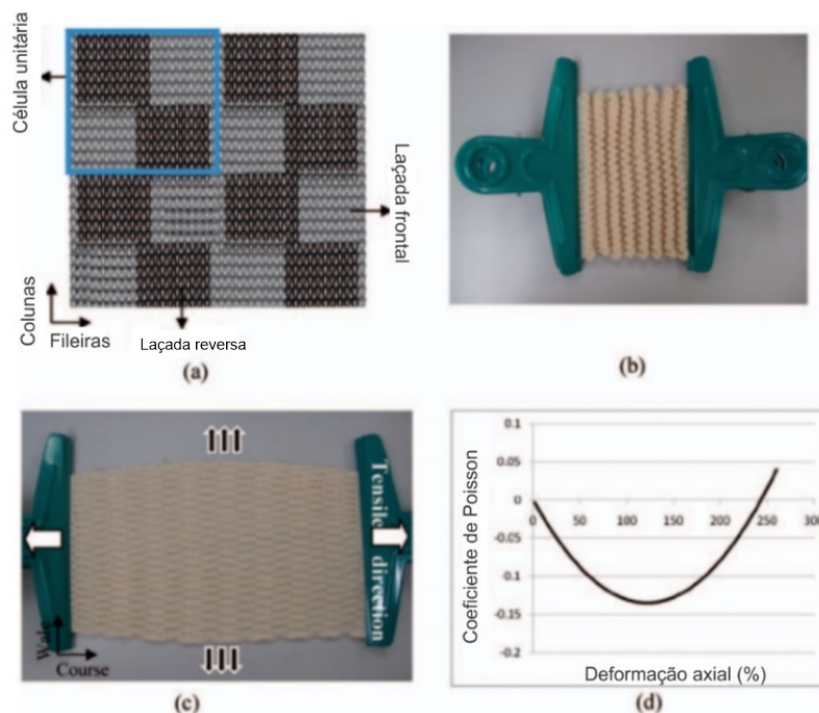
Para Hu, Zhang e Liu (2019), a malharia de trama é a mais promissora e versátil tecnologia para projetos de estruturas auxéticas a partir de fios de materiais convencionais. Existem várias estruturas baseadas em MTR já catalogadas e descritas na literatura onde efeitos auxéticos foram alcançados, normalmente utilizando-se teares eletrônicos/computadorizados capazes de confeccionar complexos padrões de tricotagem para obtenção do CPN.

Um exemplo clássico é a malha dobrável, construída por tramas de laçadas especiais que, no estado relaxado, apresentam uma contração estrutural natural. Ao sofrerem tração, a malha se desdobra, apresentando CPN. Hu, Wang e Liu (2011)

desenvolveram alguns tipos de estruturas de MTR auxéticas baseadas nesta geometria. A primeira possui como princípio laçadas frontais e reversas⁷ em um padrão alternado quadricular, causando um desequilíbrio estrutural e levando-a se contrair no estado relaxado. Quando uma tensão é aplicada, a malha sofre expansão na direção longitudinal e transversal até se “desdobrar” completamente. Nesse momento, o CP começa a retornar para um patamar mais positivo. As Figura 34a, b e c ilustram o padrão construtivo e os referidos momentos de deformação da malha. Conforme a Figura 34d, o efeito auxético desta malha foi observado em formato parabólico, apenas na direção das fileiras (horizontal) e até por volta de $\varepsilon \cong 250\%$.

Baseados nesta estrutura, Steffens, Rana e Fanguero (2016) fabricaram malhas auxéticas similares, utilizando fios de poliamida (PA), para-aramida (p-AR) e híbridas PA-(p-AR), variando-se também os parâmetros de máquina para a tricotagem da malha. É extremamente evidente que o CPN depende de tais variáveis: um tamanho de laçada pouco maior foi capaz de inverter a tendência do efeito auxético nas malhas produzidas pelos autores (Figura 35).

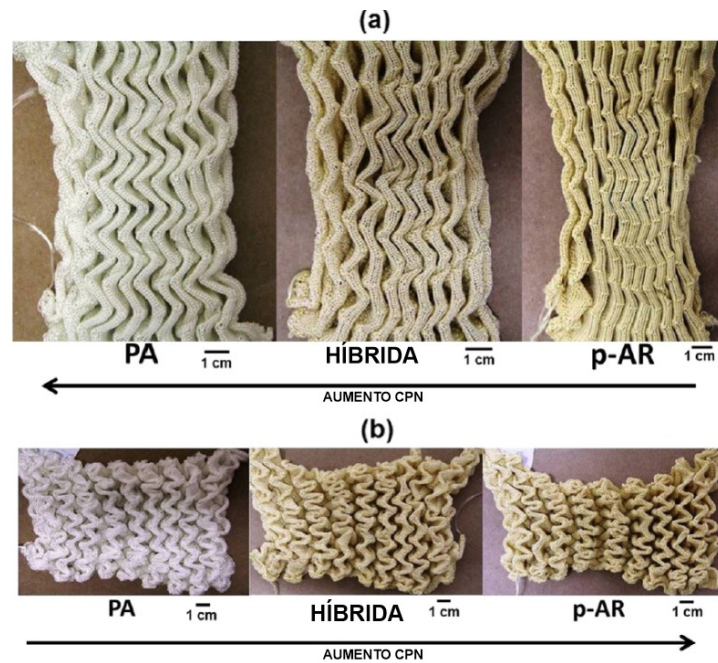
Figura 34 – Malha dobrável tipo 1



Fonte: adaptado de HU, WANG e LIU (2011)

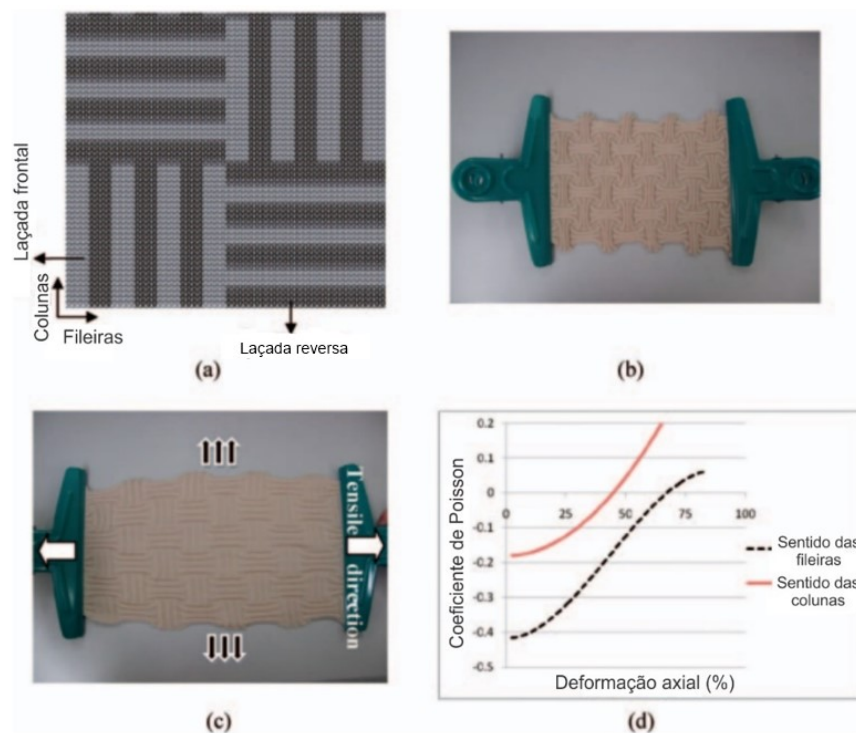
⁷ Laçadas frontais e reversas diferem na maneira em que se entrelaçam (pela frente ou por trás da laçada anterior), ainda que, estruturalmente, ambas sejam tramas. A face de laçadas frontais é chamada de frente técnica, enquanto a face de laçadas reversas é denominada verso técnico (GLAZZARD; BREEDON, 2014).

Figura 35 – Amostras de malhas de PA, p-AR e híbridas com tamanhos de laçada (a) 10 e (b) 11



Fonte: adaptado de STEFFENS; RANA; FANGUEIRO (2016)

Figura 36 – Malha dobrável tipo 2



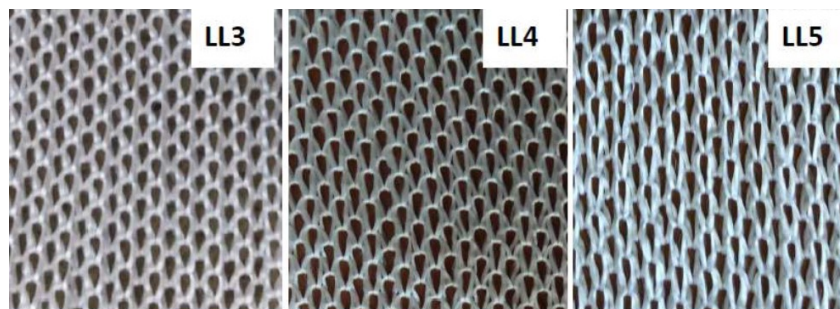
Fonte: adaptado de HU, WANG e LIU (2011)

Hu, Wang e Liu (2011) também desenvolveram uma malha auxética que detém auxeticidade tanto na direção das colunas (vertical), quanto das fileiras (horizontal). O

padrão dos ligamentos é o mesmo da malha exibida na Figura 34a, com laçadas frontais e reversas, porém com padrão alternado retangular, conforme a Figura 36a. O efeito auxético apresenta-se maior quando a malha é tensionada no sentido das fileiras (horizontal) devido a maior proximidade das laçadas na direção das colunas, o que aumenta o fator de expansão transversal da malha neste sentido (sua capacidade de se desdobrar neste sentido, já que as laçadas se encontram mais próximas umas das outras).

Osman e Mohamed (2020) desenvolveram malhas de trama auxéticas variando o comprimento da laçada: LL3, LL4 e LL5 (Figura 37). Como material, utilizaram fios de PP convencionais, mas as três estruturas fabricadas exibiram algum nível de CPN, tanto na direção vertical, quanto na horizontal. O principal resultado obtido foi que a auxeticidade se mostrou mais elevada na malha com laçadas maiores, sendo $\nu \cong -0,46$ para a direção vertical.

Figura 37 – Malhas de trama auxéticas com diferentes comprimentos de laçada



Fonte: OSMAN e MOHAMED (2020)

4.5.2.2 Malhas de urdume auxéticas

Apesar de padrões construtivos mais complexos, as malhas de urdume auxéticas também são bastante exploradas na literatura, em conjunto com as malhas de trama auxéticas. Isso porque, em comparação com outros tipos de estruturas têxteis, elas ainda possuem a versatilidade construtiva, assim como as malhas de trama.

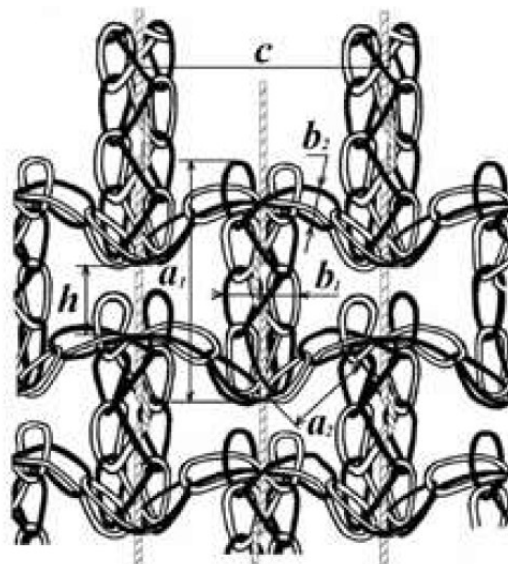
Hu, Zhang e Liu (2019) introduzem algumas formas de se urdir malhas para obtenção de propriedades auxéticas, como as estruturas “em corrente” (*chain stitches*), “em rede” (*net structures*), “espaçadoras” (*spacer structures*) e “de fio embutido” (*yarn inlay*). Na prática, são combinações entre estas estruturas-base que são utilizadas. As expressões aqui estão traduzidas conforme o próprio autor.

Ugbolue et. al (2012) atestam que a malha de urdume é o padrão construtivo mais adequado para estruturas de rede, uma vez que o tear é alimentado por vários fios ao mesmo tempo, possibilitando entrelaçamentos mais complexos e estabilidade para a estrutura, além de permitir, por meio da correta seleção de materiais e do tipo de ponto, o desenvolvimento de formas variadas para a célula unitária têxtil, como hexagonais, quadriculares, romboédricas e até mesmo quasi-esféricas.

Os mesmos autores projetaram uma malha de urdume que combina uma rede hexagonal em corrente, com fios embutidos entre determinados pontos, conforme a Figura 38. Os fios utilizados nas laçadas são mais espessos e de menor rigidez, enquanto os fios utilizados no entrelaçamento embutido são mais finos e de maior rigidez, mas todos convencionais. A estrutura pode ser entendida como uma derivação dos HAYs (HU, ZHANG; LIU, 2019), mas aqui em uma composição mais abstrusa.

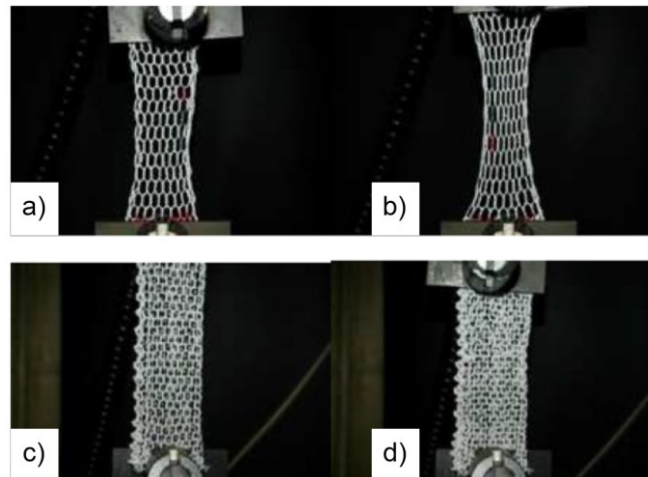
Na prática, o fio embutido suporta a propriedade auxética e faz a estrutura como um todo se deformar lateralmente, já que a estrutura em corrente fica travada pelo mesmo, conforme exhibe-se nas Figura 39a-d (tração ao longo do eixo vertical). Foram atingidos valores para ν tão baixos quanto $\nu = -0,7$ para algumas amostras na direção das colunas (vertical) e $\nu = -0,2$ na direção dos cursos (horizontal).

Figura 38 – Estrutura de malha de urdume auxética funcional



Fonte: Ugbolue et. al (2012)

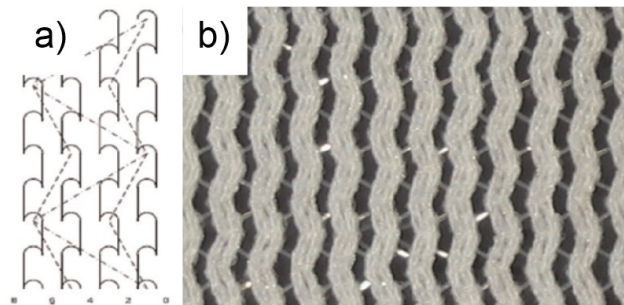
Figura 39 – Malhas de urdume em corrente sob tração: convencionais (a e b) e auxéticas (c e d)



Fonte: Adaptado de UGBOLUE et. al (2012)

Alderson et al. (2012), por sua vez, efetuaram um *approach* às estruturas reentrantes, desenvolvendo malhas de urdume com estruturas de dupla cabeça-de-flecha (*double arrowhead*), aqui em tradução livre do próprio autor. A caracterização do artigo têxtil confeccionado chegou a demonstrar $\nu \cong -0,22 \pm 0,03$ a $+45^\circ$ ou -45° da direção do urdume (vertical).

Figura 40 – Padrão construtivo (a) e malha de urdume com estrutura de dupla cabeça-de-flecha (b)



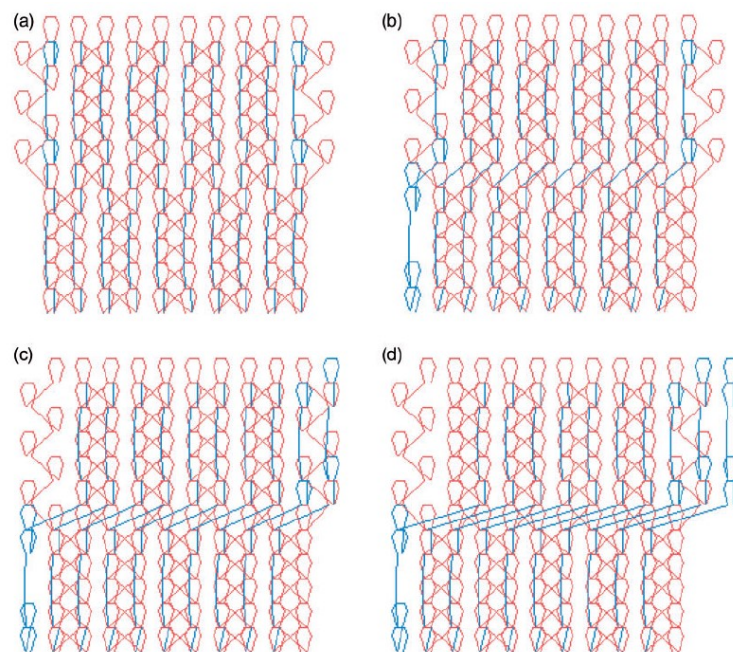
Fonte: adaptado de ALDERSON et al. (2012)

Ma, Chang e Jiang (2016) se basearam na estrutura de polígonos rotacionais para elaborar malhas de urdume com propriedades auxéticas. A construção se baseia em combinações de padrões de tricotagem diferentes entre si: enquanto uma parte forma hexágonos simétricos e balanceados, a outra promove um desbalanço nos ligamentos, através de pontos faltantes ou em excesso em determinadas regiões. Dessa maneira, o desbalanço de tricotagem causa efeitos de retração da estrutura,

que quando tracionadas, tanto longitudinal quanto verticalmente, tende a recuperar a estabilidade dimensional simétrica, demonstrando CPN (Figura 41).

Os resultados indicam que, ao menos para este tipo de padrão construtivo, existe uma tendência-limite onde a deformação causada pela falta de pontos em determinadas regiões pode contribuir para o efeito auxético, uma vez que o melhor resultado foi demonstrado pelo padrão de tricotagem tipo 1, com $\nu \cong -0,5$ para $\varepsilon \cong 8\%$, e o pior fora o padrão tipo 4, que não apresentou nenhuma auxeticidade.

Figura 41 – Padrões de tricotagem utilizados por Ma, Chang e Jiang (2016): (a) tipo 1 até (d) tipo 4



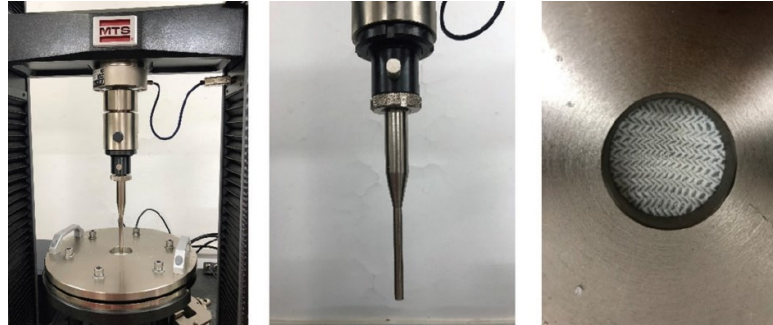
Fonte: MA, CHANG e JIANG (2016)

A malharia de urdume também é explorada nas chamadas estruturas “espaçadoras”, onde o objetivo é criar artigos têxteis com uma espécie de preenchimento, como uma estrutura sanduíche, bastante conhecida nos estudos em materiais compósitos.

Xu et al. (2020) desenvolveram compósitos macios com reforço de estruturas espaçadoras tricotadas por malharia de urdume e matriz de elastômero de silicone. Este tipo de estrutura combina várias das propriedades listadas como as primazias da auxeticidade (resistência ao corte, resistência à indentação, efeito sinclástico e outras). O estudo conduziu testes de indentação profunda (*stab resistance*, Figura 42), em tradução livre do próprio autor, para diferentes padrões construtivos e níveis de preenchimento do compósito. Os resultados mostraram que este tipo de compósito é

capaz de resistir e absorver grandes quantidades de energia mecânica, especialmente para maiores níveis de preenchimento.

Figura 42 – Equipamento para ensaio de indentação/*stab resistance*



Fonte: adaptado de Xu et al. (2020)

Além de maior resistência à indentação, os auxéticos são convenientes nas estruturas de espaçamento porque podem cumprir papel importante em aplicações onde a capacidade de preenchimento ou de assumir determinada forma seja importante, devido ao efeito sinclástico destes metamateriais (Figura 43) (WANG; HU, 2014).

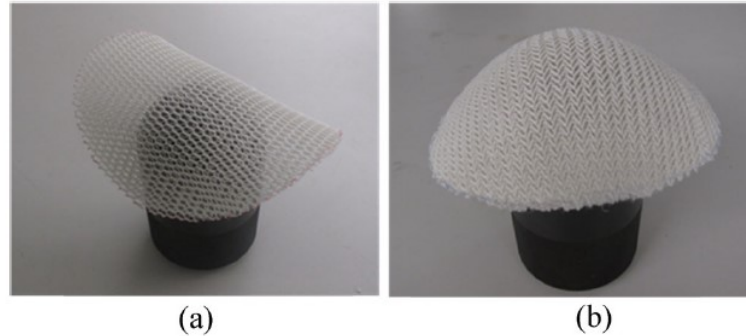
Wang e Hu, (2014) desenvolveram algumas estruturas com essa característica e obtiveram resultados de $\nu \cong -2$, para $\varepsilon \cong 12,5\%$ na direção horizontal. No entanto, de acordo com os mesmos, o efeito tende a diminuir com esforços cíclicos, mantendo apenas cerca de 65% de sua auxeticidade em torno de 10 ciclos de deformação. Sendo assim, a auxeticidade demonstra indícios de que, além de um efeito dependente do nível de deformação e da direção de aplicação do esforço, também pode depender da quantidade de ciclos de esforços, no caso de materiais têxteis.

Nesta mesma linha de raciocínio, Shuaiquan et al. (2021) estudaram o comportamento de algumas malhas de urdume sob esforços cíclicos e, no estudo, um dos primeiros que analisam o efeito auxético em materiais têxteis sob esforços de repetição, já que normalmente os experimentos em metamateriais auxéticos analisam a propriedade em ensaios mecânicos únicos, demonstraram que as malhas permaneceram com caráter auxético sob 25% de deformação, mesmo após 100 ciclos de tensão.

Os autores, no entanto, afirmam que se trata de uma baixa quantidade de ciclos de tensão para ser considerada satisfatória, e que estudos de maior longo prazo de

esforços cíclicos são importantes para melhorar o entendimento da auxeticidade sob tais condições.

Figura 43 – Comparativo entre uma estrutural de espaçamento (a) convencional e (b) auxética



Fonte: WANG e HU (2014)

4.5.3 Tecidos planos e não tecidos e seus derivados auxéticos

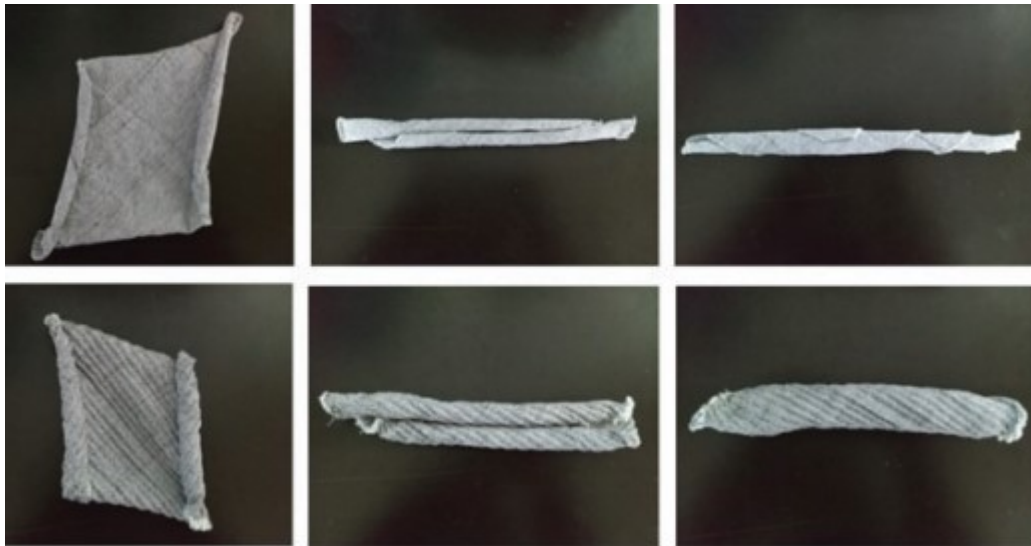
Apesar da malharia se fadar como uma das técnicas mais versáteis para o desenvolvimento de artigos têxteis auxéticos, a literatura também relata possibilidades de se desenvolverem tecidos planos e não tecidos auxéticos. Os tecidos planos (ou tecidos têxteis) consistem em entrelaçamentos de pares de fios – trama no sentido da latitude e urdume no sentido da longitude do tecido. Ao ato de se entrelaçarem fios ortogonalmente é dado o nome de tecelagem (BEHERA; HARI, 2010) (HU; ZHANG; LIU, 2019).

Diferentemente das malhas têxteis, que possuem grande flexibilidade estrutural e, portanto, suas propriedades mecânicas quase independem dos fios utilizados nas laçadas, nos tecidos planos as propriedades mecânicas são, em grande parte, provenientes das propriedades dos fios utilizados (HU; ZHANG; LIU, 2019). Como consequência, tecidos planos com propriedades auxéticas normalmente são construídos a partir de fios que já apresentam CPN, como é o caso de HAYs.

Liu et al. (2020) reiteram a necessidade de maiores estudos na área de tecidos têxteis auxéticos, uma vez que a maioria dos estudos neste sentido são direcionados para a área de malhas têxteis auxéticas. Desta maneira, desenvolveram tecidos planos a partir de HAYs compostos por fios multifilamentos de poliuretano como núcleo e fios multifilamentos de poliéster como invólucro (por possuir maior módulo de rigidez). Para o urdume foram utilizados fios de polietileno de ultra alto peso molecular

(UHMWPE). Os autores avaliaram três padrões de tecelagem (ligamento entre os fios de trama e urdume): plano (*plain*), sarja pontiaguda (*pointed twill*) e sarja diamante (*diamond twill*). HAYs de até $\nu = -0,88$ foram utilizados, obtendo-se um máximo de $\nu = -0,3$ para o ligamento de sarja diamante, na direção diagonal. As amostras demonstraram ondulações e dobramentos em estado relaxado (sem tensão), fruto do desbalanço estrutural causado pelo efeito auxético. Os autores propõem que estudos futuros podem utilizar destes resultados para o desenvolvimento de materiais para aplicações especiais, como revestimentos inteligentes.

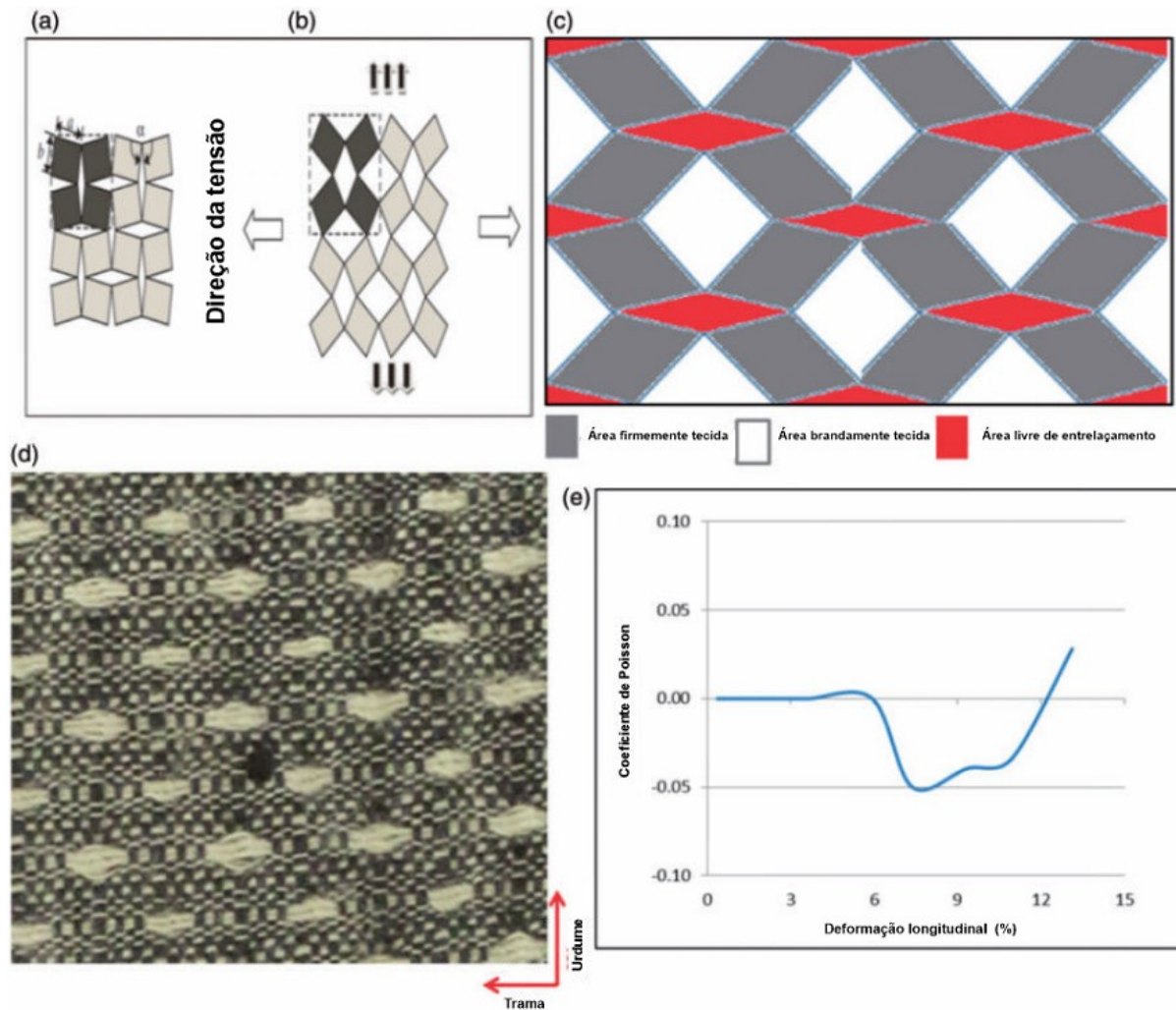
Figura 44 – Tecidos planos com HAYs. Ondulação e dobramento naturais em evidência



Fonte: adaptado de LIU et al. (2020)

Zulifqar, Hua e Hu (2018), dois anos antes, já asseveravam que os tecidos têxteis demandavam maior atenção no meio científico. Na oportunidade, os pesquisadores desenvolveram diversos padrões de tecelagem e estruturas (estruturas dobrável, de polígonos rotacionais e de hexágonos reentrantes) utilizando fios convencionais e obtendo-se auxeticidade nas amostras, evidenciando que é possível adquirir este efeito mesmo utilizando equipamentos simples e fios convencionais. A Figura 45a-d mostra um dos tecidos auxéticos elaborados pelos autores, com estrutura de polígonos rotacionais, bem como seus resultados experimentais. Fica o leitor convidado a explorar este trabalho com mais ênfase, onde comparam o CPN das diversas estruturas fabricadas.

Figura 45 – Tecido plano auxético desenvolvido por Zulifqar, Hua e Hu (2018)



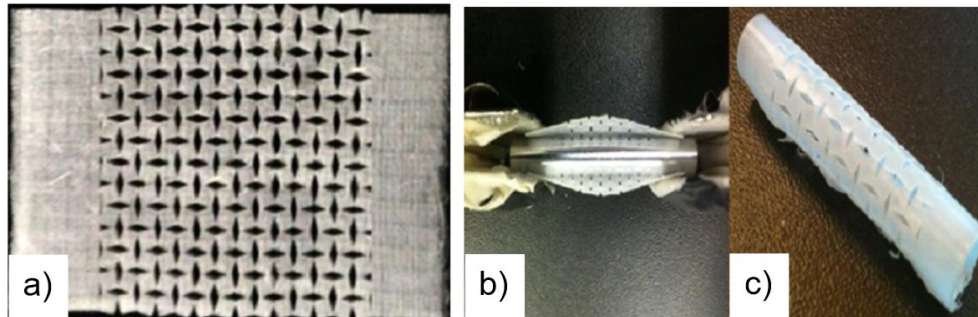
Fonte: adaptado de ZULIFQAR, HUA e HU (2018)

Os artigos não tecidos referem-se a “uma rede, com fibras direcionadas ou randômicas, unidas por fricção e/ou coesão e/ou adesão, exceto papéis e produtos que sejam tecidos, tricotados [...]” (HU; ZHANG; LIU, 2019, p. 453, tradução do autor). A fabricação de não tecidos consiste em métodos especiais, uma vez que não existe entrelaçamento de fios ou de laçadas, como em outros casos construtivos já vistos.

Hu, Zhang e Liu (2019) reiteram a dificuldade de produção deste tipo de artigo têxtil com caráter auxético dada a natureza não estruturalmente bem definida que eles possuem. Os autores, no entanto, mencionam casos recentes onde esse feito foi alcançado, dentre eles o de Bhullar et al. (2015), que elaboraram *stents* poliméricos de PCL (policaprolactona) com base em *electrospinning* (método de produção de nanofibras poliméricas) e posterior acabamento por micro usinagem à laser (*micromachining laser cutting*).

A construção do produto se baseou na geometria estrutural auxética de retângulos rotacionais, como mostra a Figura 46.

Figura 46 – Protótipo de *stent* não tecido auxético de PCL (policaprolactona) micro usinada (a) e sob consolidação (b e c)

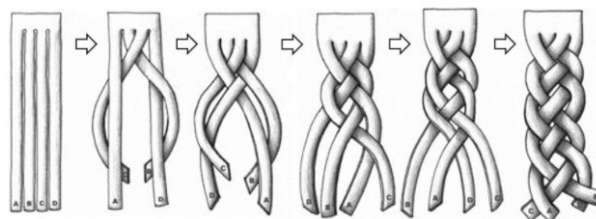


Fonte: adaptado de Bhullar et al. (2015)

4.5.4 Têxteis trançados e seus derivados auxéticos

Os trançados constituem estruturas têxteis bastante distintas em relação aos outros tipos de construções mencionadas anteriormente. São necessários, no mínimo, três fios distintos, que são entrelaçados entre si diagonalmente (Figura 47). Esta construção influi nos trançados propriedades como maior resistência à torção, estabilidade dimensional e resistência ao impacto (HU; ZHANG; LIU, 2019).

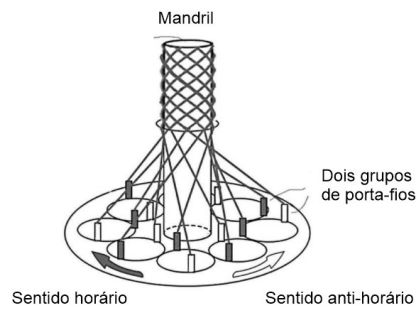
Figura 47 – Ilustração esquemática do processo construtivo de um trançado têxtil



Fonte: adaptado de HU, ZHANG e LIU (2019)

Por se tratar de um tipo de estrutura têxtil ainda brandamente explorado cientificamente, em especial no que tange ao comportamento auxético, o conteúdo que se encontra a respeito são menções a estruturas tubulares de trançados auxéticos (HU; ZHANG; LIU, 2019) e de BAYs (*braided auxetic yarns*) – fios auxético-helicoidais trançados. A Figura 48 ilustra o esquema de construção de um trançado tubular convencional.

Figura 48 – Ilustração esquemática da produção de um trançado têxtil tubular

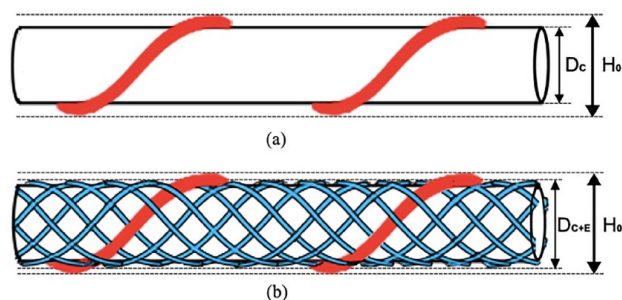


Fonte: adaptado de HU, ZHANG e LIU (2019)

Para a produção de estruturas trançadas auxéticas, existem dois caminhos: utilizar o próprio sistema convencional como exibido na Figura 48 ou fazendo adaptações com fios adicionais no processo (HU; ZHANG; LIU, 2019).

Jiang e Hu (2018) produziram BAYs a partir de uma modificação do processo convencional de trança, adicionando-se um fio mais rígido em meio aos outros fios utilizados normalmente para a execução da trança. Dessa maneira, o fio mais rígido cria um invólucro no sistema de fios e núcleos menos rígidos, similar aos HAYs (Figura 49). Os autores demonstram que este sistema é de simples execução e soluciona um problema comum aos HAYs – o escorregamento dos fios entre si, que acarreta em problemas geométricos no ângulo de enrolamento, já descrito anteriormente como variável fundamental para o CPN nestas estruturas, além de promover um efeito auxético superior em relação aos mesmos. A Figura 50 exibe as amostras desenvolvidas pelos referidos autores. Uma tendência nos resultados fora observada: BAYs apresentaram maior efeito auxético quanto maior o seu núcleo e maior os fios menos rígidos, em diâmetro.

Figura 49 – Esquema comparativo: (a) HAY (b) BAY



Fonte: JIANG e HU (2018)

Figura 50 – Amostras de HAY e BAYs produzidas por Jiang e Hu (2018)



Fonte: JIANG e HU (2018)

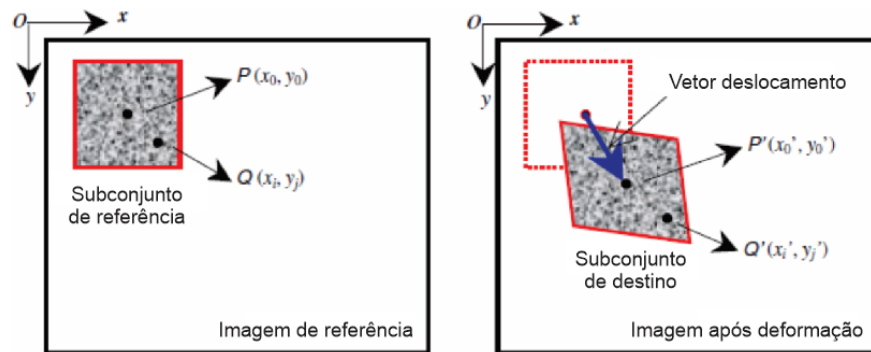
4.6 Tecnologias para caracterização da mecânica têxtil

4.6.1 Correlação digital de imagens (DIC)

A caracterização mecânica é a mais importante classe de caracterizações em que um material auxético deve ser analisado. Portanto, técnicas nesse contexto são sempre abordadas na literatura do tema, mesmo com aparatos simples, como utilizado por Alderson e Evans (1992), Jiang e Hu (2018) e Steffens, Rana e Fangueiro (2016). No entanto, os avanços tecnológicos, especialmente na área de computação e no audiovisual, potencializaram progressos também na área de caracterização mecânica e não-interferométrica de materiais. Possivelmente, em um momento oportuno, normas para a caracterização mecânica para materiais auxéticos sejam elaboradas.

A Correlação Digital de Imagens (*Digital Image Correlation - DIC*) é uma técnica de não-interferência utilizada para avaliação de campos de deformação superficiais em um sólido. Seu princípio de funcionamento consiste na comparação da posição de um ponto na superfície de referência não deformada, $P(x_0, y_0)$ e $Q(x_0, y_0)$, com sua posição instantes posteriores após o início da deformação, $P'(x_0', y_0')$ e $Q'(x_0', y_0')$ (PAN et al., 2009). Essa comparação é realizada por algoritmos matemáticos de vetores de deslocamento, que correlacionam as escalas de cinza dos diferentes quadros (*frames*) de imagens gravados ao longo do teste (Figura 51).

Figura 51 – Princípio de funcionamento da técnica de DIC



Fonte: adaptado de (PAN et al., 2009)

A DIC possui vantagens e desvantagens em relação aos métodos convencionais ou de interferência para estudos de deformação. Elas são mais simples no preparo de amostras, além de permitir o uso de vários tipos de câmeras e até mesmo microscópios. Em contrapartida, precisam de um bom contraste (escala de cinza) para o *software* bem correlacionar a sequência de imagens durante a deformação (PAN et al., 2009).

Para a DIC ter maior precisão, geralmente se faz necessário o preparo do corpo de prova para a obtenção de uma boa escala de cinza, suficientemente contrastante, a fim de que o *software* consiga rastreá-la (LOMOV, 2008). Dridi, Morestin e Dogui (2012) utilizaram *spray* de tinta preta em suas amostras para possibilitar uma boa escala de cinza para suas análises. As estruturas têxteis podem ter na DIC uma promissora técnica de análise de deformação, uma vez que extensômetros convencionais não se adequam às mesmas para caracterização mecânica (PIERCE et al., 2015).

Dridi, Morestin e Dogui (2012) ressaltam que o comportamento mecânico de artigos têxteis ainda é pouco compreendido devido ao seu alto nível de anisotropia, mas os autores encontram boas concordâncias com as medidas realizadas pelo uso da técnica DIC e o esperado pela teoria. Williams et al. (2005) conseguiram utilizar com sucesso a técnica de DIC como proposta de controle de qualidade para artigos de tapeçaria, evidenciando a aplicabilidade da técnica para a análise quantitativa de deformação nos tapetes de tecidos planos, elaborando, inclusive, modelos preditivos de danos para os mesmos, a partir dos dados coletados.

Não foram encontrados estudos abordando o uso da DIC em estruturas auxiliares, ficando este fato como registro e sugestão para trabalhos futuros no tema.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a abordagem elucidada no decorrer do texto, em relação ao efeito auxético, sua compreensão histórica e a perspectiva de conceitos de desenvolvimento de metamateriais com estas propriedades, pode-se sumarizar que:

- A Teoria da Elasticidade Clássica, ao que fora observado na literatura, é assumida como principal sustentação matemática para os fenômenos esperados e observados para as propriedades auxéticas. O Coeficiente de Poisson Negativo é a base elementar das propriedades auxéticas, mas é apenas uma resposta do material em seu estado auxético. Para o desenvolvimento de metamateriais com CPN, outras características precisam ser levadas em conta. A principal delas é a geometria estrutural, pois é o fator preponderantemente observado em estruturas e materiais que apresentam CPN;
- As propriedades auxéticas são consideradas superiores às dos materiais convencionais, mas são normalmente projetadas para que aconteçam, obedecendo-se a natureza dos materiais empregados, do projeto de desenvolvimento do material e de sua aplicação final, haja visto que todos estes elementos são condições de contorno para o projeto de um metamaterial. O fato das propriedades auxéticas derivarem basicamente de projetos para tal as tornam menos contínuas, anisotrópicas e essencialmente mais específicas. Materiais auxéticos naturais são escassos e, ao que tudo indica, não possuem tanto interesse científico e tecnológico para que possam solucionar problemas de engenharia relevantes atualmente;
- Dadas as variadas e versáteis tecnologias de fabricação têxtil, a Engenharia Têxtil se enaltece a uma área promissora tecnologicamente em relação ao desenvolvimento de estruturas com propriedades auxéticas. Foram apresentados fios e fibras, malhas de trama e de urdume, tecidos planos e até mesmo têxteis trançados com propriedades auxéticas advindas de sua estrutura, demonstrando a possibilidade de administrar esta característica modificando seus processos fabris;
- A caracterização é etapa fundamental no estudo de materiais e de metamateriais para compreensão de sua natureza e de suas propriedades a determinados estímulos. Para os materiais auxéticos, a caracterização mecânica é a mais

relevante e indica, além de outros aspectos, se o CPN foi atingido e em quais níveis de deformação, de direção e de condições. A DIC pode ser uma técnica relevante a ser utilizada em estudos futuros de materiais têxteis com propriedades auxéticas;

- Materiais auxéticos possuem interesse científico há menos de quatro décadas, embora já sejam conhecidos há mais de um século, o que implica em estarem em um patamar relativamente inicial do seu estado da arte de desenvolvimento tecnológico. Também fica evidente que existem dificuldades práticas e de processos fabris para obtenção do CPN, barreiras que ainda precisam ser vencidas para a escalabilidade industrial desta classe de material;
- As pesquisas nessa área se mostram em constante crescimento desde 1987, quando foi publicado o primeiro desenvolvimento de material auxético com interesse científico, mas a maioria dos trabalhos e pesquisadores debruçados no tema encontram-se no exterior, abrindo um leque de possibilidades no Brasil. Desta maneira, o presente estudo também visou trazer, principalmente, destaque ao tópico de materiais auxéticos em nosso país e, como sua herança na continuidade acadêmica do tema, se dispõe a convidar e ser base ideológica para pesquisadores no ramo se unirem para a elaboração e manutenção de um periódico científico a fim de tratar, especificamente, dos materiais auxéticos no Brasil. Fica sendo "*Auxética*" a sugestão de título para o mesmo.

REFERÊNCIAS

- ALDERSON, K. L.; EVANS, K. E. The fabrication of microporous polyethylene having a negative Poisson's ratio. **Polymer**, v. 33, n. 20, p. 4435–4438, 1992.
- ALDERSON, K. L.; ALDERSON, A.; SMART, G.; SIMKINS, V. R.; DAVIES, P. J. Auxetic polypropylene fibres Part 1 - Manufacture and characterisation. **Plastics, Rubber and Composites**, v. 31, n. 8, p. 344–349, 2002.
- ALDERSON, K. L.; ALDERSON, A.; ANAND, S.; SIMKINS, V. R.; NAZARE, S.; RAVIRALA, N. Auxetic warp knit textile structures. **Physica Status Solidi B**, v. 249, n. 7, p. 1322–1329, 2012.
- ALMEIDA, J. L. S. **Malharia de trama e urdume: uma abordagem da construção dos tecidos no software AutoCAD**. 2017. 92 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Têxtil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Apucarana, 2017.
- BEHERA, B. K.; HARI, P. K. **Woven textile structure**. 1 ed. Nova Deli: Woodhead Publishing India, 2010.
- BHULLAR J. L.; MIOUCHOWSKI, A. S. K. W. Auxetic behavior of a thermoplastic layered plate. **Journal of Engineering and Technology Research**, v. 9, n. January 2010, p. 161–167, 2010.
- BHULLAR, S. K. et al.; KO, J.; CHO, Y.; JUN, M. B. G. Fabrication and Characterization of Nonwoven Auxetic Polymer Stent. **Polymer - Plastics Technology and Engineering**, v. 54, n. 15, p. 1553–1559, 2015.
- BOUAZIZ, O.; MASSE, J. P.; ALLAIN, S.; ORGÉAS, L.; LATIL, P. Bouaziz, O. Masse, J. P. Allain, S. Orgéas, L. Latil, P.. Compression of crumpled aluminum thin foils and comparison with other cellular materials. **Materials Science and Engineering A**, v. 570, p. 1–7, 2013.
- CADDOCK, B. D.; EVANS, K. E. Microporous materials with negative Poisson's ratios. I. Microstructure and mechanical properties. **Journal of Physics D**, v. 22, n. 12, p. 1877–1882, 1989.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2016. xix, 882 p.
- CAETANO, M. J. L. **A borracha Como Material de Engenharia**. CT BORRACHA. 2021.
- CARNEIRO, V. H.; MEIRELES, J.; PUGA, H. Auxetic materials - A review. **Materials Science - Poland**, v. 31, n. 4, p. 561–571, 2013.
- DONESCU, S.; CHIROIU, V.; MUNTEANU, L. On the Young's modulus of a auxetic composite structure. **Mechanics Research Communications**, v. 36, n. 3, p. 294–301, 2009.

DRIDI, S.; MORESTIN, F.; DOGUI, A. Use of Digital Image Correlation to Analyse the Shearing. **Experimental Techniques**, v. 36, n. 5, p. 46-52, 2012.

EVANS, K. E.; NKANSAH, M. A.; HUTCHINSON, I. J.; ROGERS, S. C. Molecular network design. **Nature**, 1991.

EVANS, K. E.; ALDERSON, A. Auxetic materials: Functional materials and structures from lateral thinking! **Advanced Materials**, v. 12, n. 9, p. 617–628, 2000.

FORTES, M. A.; NOGUEIRA, M. T.; LISBOA, U. N. The Poisson Effect in Cork. **Materials Science and Engineering**, v. 122, p. 227–232, 1989.

GIANNAKOPOULOS, A. E.; TRIANTAFYLLOU, A. Spherical indentation of incompressible rubber-like materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 55, n. 6, p. 1196–1211, 2007.

GIBSON L. J., ASHBY M. F., S. G. S. R. C. I. The Mechanics of Two-Dimensional Cellular Materials. **Proceedings of the Royal Society**, v. 382, n. 1782, p. 25–42, 1982.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo, SP: Atlas, 2010. 184 p.

GLAZZARD, M.; BREEDON, P. Weft-knitted auxetic textile design. **Physica Status Solidi B**, v. 251, n. 2, p. 267–272, 2014.

GREAVES, G. N.; GREER, A. L.; LAKES, R. S.; ROUXEL, T. Poisson's ratio and modern materials. **Nature Materials**, v. 10, n. October, p. 823–837, 2011.

GRIMA, J. N.; WINCZEWSKI, S.; MIZZI, L.; GRECH, M. C.; CAUCHI, R.; GATT, R.; ATTARD, D.; WOJCIECHOWSKI, K. W.; RYBICKI, J. Tailoring graphene to achieve negative poisson's ratio properties. **Advanced Materials**, v. 27, n. 8, p. 1455–1459, 2015.

HU, H.; WANG, Z.; LIU, S. Development of auxetic fabrics using flat knitting technology. **Textile Research Journal**, v. 81, n. 14, p. 1493–1502, 2011.

HU, H.; ZHANG, M.; LIU, Y. **Auxetic Textiles**. 1 ed. Reino Unido: Woodhead Publishing Limited, 2019.

HU, J. **Structure and mechanics of woven fabrics**. Boca Raton: Woodhead Publishing Limited, 2004.

JIANG, N.; HU, H. A study of tubular braided structure with negative Poisson's ratio behavior. **Textile Research Journal**, v. 88, n. 24, p. 2810–2824, 2018.

KADIC, M. et al. 3D metamaterials. **Nature Reviews Physics**, v. 1, n. 3, p. 198–210, 2019.

LAKES, R. Foam structures with a negative Poisson's ratio. **Science**, v. 235, p. 1038–1040, 1987.

LAWRENCE, C. A. Overview of developments in yarn spinning technology. In: **Advances in yarn spinning technology**. Reino Unido: Woodhead Publishing Limited, 2010.

LEES, C.; VINCENT, J. F. V.; HILLERTON, J. E. Poisson's ratio in skin. **Bio-Medical Materials and Engineering**, v. 1, n. 1, p. 19–23, 1991.

LIU, S.; PAN, X.; ZHENG, D.; LIU, G.; DU, Z. The manufacture and characterization of auxetic, self-curling, and self-folding woven fabrics by helical auxetic yarns. **Journal of Industrial Textiles**, v. 50, n. 1, p. 3–12, 2020.

LIU, Y.; HU, H. A review on auxetic structures and polymeric materials. **Scientific Research and Essays**, v. 5, n. 10, p. 1052–1063, 2010.

LOMOV, S. V.; BOISSE, P.; DELUYCKER, E.; MORESTIN, F.; VANCLOOSTER, K.; VANDEPITTE, D.; VERPOEST, I.; WILLEMS, A. Full-field strain measurements in textile deformability studies. **Composites: Part A**, v. 39, p. 1232–1244, 2008.

MA, P.; CHANG, Y.; JIANG, G. Design and fabrication of auxetic warp-knitted structures with a rotational hexagonal loop. **Textile Research Journal**, v. 86, n. 20, p. 2151–2157, 2016.

NICOLAOU, Z. G.; MOTTER, A. E. Mechanical metamaterials with negative compressibility transitions. **Nature Materials**, v. 11, n. 7, p. 608–613, 2012.

OSMAN, N.; MOHAMED, R. Negative Poisson's Ratio Based on Weft knitted Fabric with Different Loop Length. **International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)**, v. A, n. 4, p. 21–26, 2020.

PAN, B.; QIAN, K.; XIE, H.; ASUNDI, A. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 6, 2009.

PIERCE, R. S.; FALZON, B. G.; THOMPSON, M. C.; BOMAN, R. A Low-Cost Digital Image Correlation Technique for Characterising the Shear Deformation of Fabrics for Draping Studies. **Strain**, v. 51, n. 3, p. 180–189, 2015.

RAVIRALA, N.; ALDERSON, A.; ALDERSON, K. L.; DAVIES, P. J. Expanding the range of auxetic polymeric products using a novel melt-spinning route. **Physica Status Solidi B**, v. 242, n. 3, p. 653–664, 2005.

RAVIRALA, N.; ALDERSON, A.; ALDERSON, K. L.; DAVIES, P. J. Negative Poisson's Ratio Polyester Fibers. **Textile Research Journal**, v. 76, n. 7, p. 540–546, 2006.

RAY, S. C. **Fundamentals and advances in knitting technology**. Nova Deli: Woodhead Publishing, 2011.

REN, X. et al. Auxetic metamaterials and structures: A review. **Smart Materials and Structures**, v. 27, n. 2, 2018.

RODNEY, D. et al. Reversible dilatancy in entangled single-wire materials. **Nature Materials**, v. 15, n. 1, p. 72–77, 2016.

ZHAO, S.; CHANG, Y.; YANG, Y.; ZHANG, M.; KAMRUL, H.; HU, H. Auxetic behavior of warp knitted fabric under repeating tension. **Textile Research Journal**, v. 91, n. 15–16, p. 1732–1741, 2021.

SLOAN, M. R.; WRIGHT, J. R.; EVANS, K. E. The helical auxetic yarn - A novel structure for composites and textiles; Geometry, manufacture and mechanical properties. **Mechanics of Materials**, v. 43, n. 9, p. 476–486, 2011.

STAVROULAKIS, G. E. Auxetic behaviour: Appearance and engineering applications. **Physica Status Solidi B**, v. 242, n. 3, p. 710–720, 2005.

STEFFENS, F. **Desenvolvimento de estruturas fibrosas com comportamento auxético**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Têxtil) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Azurém, 2015.

STEFFENS, F.; RANA, S.; SUBRAMANI, P.; FANGUEIRO, R. In: **AUTEX World Textile Conference**, 13, 2013, Dresden, Alemanha. **Anais eletrônicos [...]**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262301119_Auxetic_Materials-General_Concepts. Acesso em: 2 nov. 2021.

STEFFENS, F.; RANA, S.; FANGUEIRO, R. Development of novel auxetic textile structures using high performance fibres. **Materials and Design**, v. 106, p. 81–89, 2016.

THILL, C. et al. Morphing skins. **Aeronautical Journal**, v. 112, n. 1129, p. 117–139, 2008.

UGBOLUE, S. C.; KIM, Y. K.; WARNER, S. B.; FAN, Q.; YANG, C. L.; KYZYMCHUK, O.; FENG, Y.; LORD, J. Engineered Warp Knit Auxetic Fabrics. **Journal of Textile Science and Engineering**, v.2, n. 1, 2012. .

WANG, Z.; HU, H. 3D auxetic warp-knitted spacer fabrics. **Physica Status Solidi B**, v. 251, n. 2, p. 281–288, 2014.

WILLIAMS, H. R.; LENNARD, F.; EASTOP, D.; DULIEU-BARTON, J.M.; CHAMBERS, A. R. 2010. Application of Digital Image Correlation to Tapestry & Textile Condition Assessment. In: THOMPSON, J. **Proceedings of AIC Textile Specialty Group**, Los Angeles, maio de 2009. Washington DC: AIC, p. 156–70.

Williams, H.R., Lennard, F., Eastop, D., Dulieu-Barton, J.M. & Chambers, A.R. 2010. Application of Digital Image Correlation to Tapestry & Textile Condition Assessment. In: J. Thompson, ed. **Proceedings of AIC Textile Specialty Group**, Los Angeles, May 2009. Washington, DC: AIC, p. 156–70

XU, W.; SUN, Y.; LIN, H.; WEI, C.; MA, P.; XIA, F. Preparation of soft composite reinforced with auxetic warp-knitted spacer fabric for stab resistance. **Textile Research Journal**, v. 90, n. 3–4, p. 323–332, 2020.

Yang, W.; Li, Z. M.; SHI, W.; XIE, B. H.; YANG, M. B. On auxetic materials: Review. **J. Mater. Sci.**, v. 39, p. 3269–3280, 2004.

ZULIFQAR, A.; HUA, T.; HU, H. Development of uni-stretch woven fabrics with zero and negative Poisson's ratio. **Textile Research Journal**, v. 88, n. 18, p. 2076–2092, 2018.