



**Politecnico  
di Torino**

# **Politecnico di Torino**

Corso di Laurea in  
Design e Comunicazione Visiva  
A.A. 2022/2023

## **MATERIALI AUXETICI**

I materiali auxetici nel design

Relatrice  
Prof.ssa Beatrice Lerma

Candidati  
Christian Amerio s139786  
Fabio Bologna s186325

***Alla nostra relatrice, prof.ssa Beatrice Lerma,*** un sentito grazie per l'infinita disponibilità e professionalità con cui ci ha guidato nella fase finale del nostro percorso di studi, con ottimi consigli e linee guida per lo svolgimento dell'elaborato.

# INDICE

## INTRODUZIONE

<b>1. CHE COSA SONO I MATERIALI AUXETICI</b>	<b>2</b>
1.1 Definizione .....	3
1.2 Cenni storici.....	4
1.3 Caratteristiche fisiche e strutturali.....	5
1.3.A - Coefficiente di Poisson.....	5
1.3.B - Meccanismi di deformazione.....	6
1.3.C - Memoria di forma.....	7
<b>2. STRUTTURE AUXETICHE</b>	<b>13</b>
2.1 Auxetici naturali come ispirazione.....	14
2.2 I metamateriali.....	16
2.3 Forma e struttura.....	17
2.4 Geometrie auxetiche.....	18
2.5 Origami.....	20
2.6 Tecnologie per la produzione di strutture auxetiche.....	21
2.6.1 - Stampa 3D.....	22
2.6.2 - Taglio laser e punzonatura.....	22
2.6.3 - Termoformatura.....	24
2.6.4 - Tessitura.....	24
2.6.5 - Piegatura.....	25
<b>3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI</b>	<b>30</b>
3.1 Sport e benessere	
3.1. A - <i>Tral Skin Dainese</i> .....	32
3.1. B - <i>Scarpa Nike Free</i> .....	34
3.1. C - <i>Pneumatici Graphene 2.0 Vittoria</i> .....	36
3.1. D - <i>NeoFit Roll</i> .....	38
3.1. E - <i>Gore-Tex</i> .....	40
3.2 Medico sanitario	
3.2. A - <i>Auxetic Neckbrace</i> .....	43
3.2. B - <i>Just-in-time implants</i> .....	45
3.2. C - <i>Stent vascolari</i> .....	47
3.3 Architettura e design	
3.3. A - <i>Lampada Hanabi</i> .....	50
3.3. B - <i>Scarpe col tacco</i> .....	52
3.3. C - <i>Deployable dome</i> .....	54
3.3. D - <i>Heat-actuated auxetic facades</i> .....	56

3.4 Sicurezza	
3.4. A - Protezione per veicoli blindati.....	59
3.4. B - DPI nello sport.....	61
3.4. C - Kevlar.....	63
<b>4. LETTURA CRITICA</b>	<b>69</b>
<b>5. NUOVI SCENARI PER STRUTTURE AUXETICHE</b>	<b>77</b>
5.1 Auxetic jewels: Bee Honey.....	80
5.2 Origami packaging: EasySqueezy.....	82
5.3 Auxetic clothes: Clothes Up !.....	84
<b>6. DISCUSSIONI E CONCLUSIONE</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFIA &amp; SITOGRAFIA</b>	<b>88</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	

# INTRODUZIONE

Questa tesi a carattere metaprogettuale nasce dal desiderio di sapere come e se i materiali auxetici possano, in qualche modo, essere parte di un cambiamento progettuale nel campo del design. Il lavoro che segue inizia analizzando la storia e le origini dei materiali auxetici, per poi continuare con le caratteristiche tecniche del materiale e la descrizione delle sue principali proprietà.

Dalle origini si passa poi all'analisi dei diversi casi studio, suddivisi nei vari ambiti applicativi, per comprendere quali sono le tecnologie più utilizzate per la lavorazione dei materiali auxetici. La schedatura dei casi studio ha permesso di effettuare una lettura critica generale, che poi ha portato alla proposta di tre nuovi scenari futuri.

Il punto di partenza dei concept è stato quello di applicare le migliori tecniche di progettazione per presentare uno dei primi tentativi di lettura, di questi materiali intelligenti, in diversi settori applicativi, quali ad esempio, il design per l'abitare, per la persona, per la mobilità, per il lavoro e per la comunicazione.



# 1. COSA SONO I MATERIALI AUXETICI

# 1. CHE COSA SONO I MATERIALI AUXETICI

## 1.1 Definizione

I materiali auxetici sono materiali aventi coefficiente di Poisson negativo, ovvero **esibiscono una dilatazione o una contrazione laterale, se sottoposti rispettivamente a una trazione o a una compressione longitudinale.**

Da un punto di vista geometrico, considerando la curvatura gaussiana ( $K=K^1K^2$ ), ovvero **il prodotto tra due diverse curvature di una superficie strutturale**, quest'ultima sarà **anticlastica se  $K^1K^2 < 0$** ; e **sinclastica se  $K^1K^2 > 0$** .

Per il concetto appena illustrato, quindi, tutte le superfici che presentano curvature sempre concordi in tutto il loro sviluppo possono considerarsi superfici sinclastiche.

Un **comportamento auxetico** oltre a verificarsi **in compressione** o **in trazione**, si ottiene anche **in flessione**, dove la classica **curvatura anticlastica** è sostituita da una di **tipo sinclastico**.

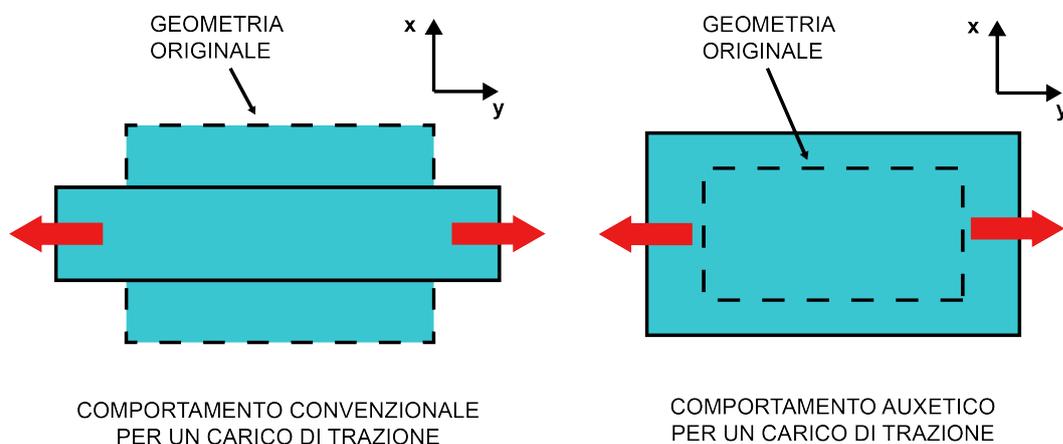
Tale concetto può essere così de-

scritto: se soggetto a flessione un materiale convenzionale mostra una deformazione di tipo a sella, mentre un materiale auxetico tende ad alzarsi nella zona centrale conformandosi adeguatamente alla curvatura.

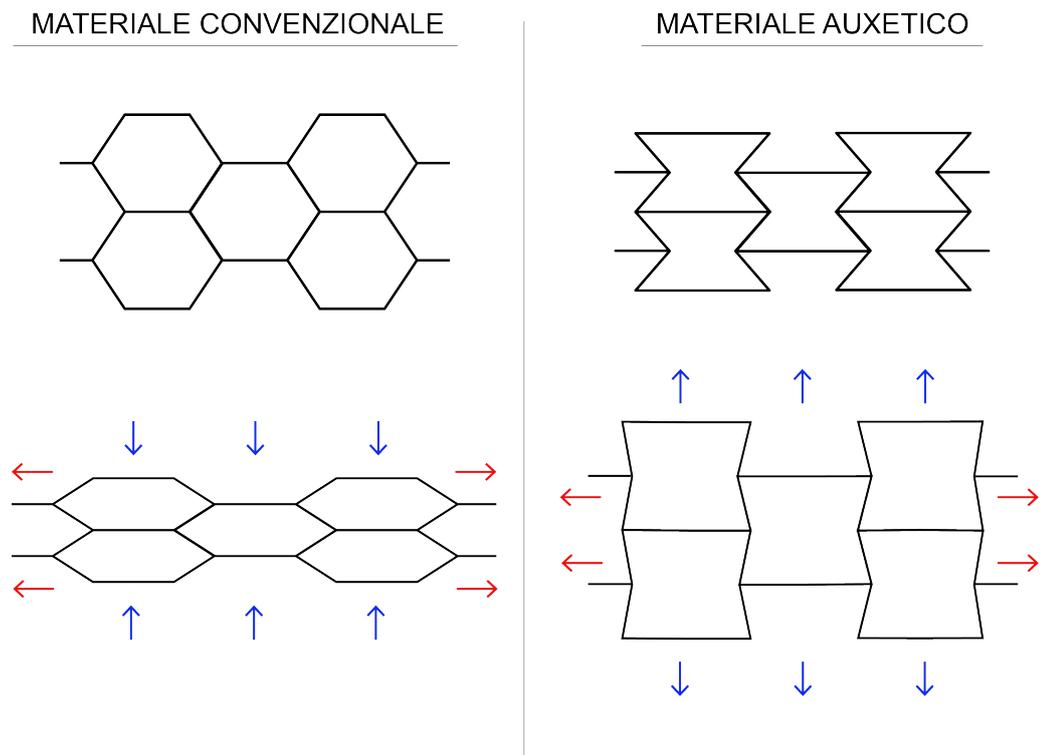
Il termine materiale auxetico si ritiene che sia stato coniato dal professor Ken Evans e dal suo gruppo di lavoro dell'Università di Exeter, in un articolo su Nature nel 1991 [1], durante uno studio per la produzione di polietilene microporoso con coefficiente di Poisson negativo. La parola stessa è tutt'altro che nuova, deriva dalla parola greca αὐξητικός (auxe-tikos), che significa "che tende ad aumentare".



i.1. geometria bidimensionale auxetica realizzata in TPU tramite il processo di stampa 3D



i.2. illustrazione di confronto tra comportamento convenzionale e comportamento auxetico per un carico di trazione



i.3. illustrazione del comportamento di un materiale convenzionale rispetto ad uno auxetico

## 1.2 Cenni storici

La comparsa dei materiali auxetici, risale alla fine della seconda guerra mondiale, ma sono diventati oggetto di studio e ricerca soltanto a metà degli anni ottanta.

**Uno dei primi materiali auxetici prodotti artificialmente è la struttura RFS (struttura a diamante), inventata nel 1978 dal ricercatore berlinese K. Pietsch.**

Sebbene non abbia usato il termine auxetico, è considerato l'inventore della rete auxetica, perché descrive per la prima volta la reazione meccanica non lineare, tipica di questi materiali.

Il primo esempio, pubblicato, di un materiale con costante di Poisson negativa è dovuto ad AG Kolpakov nel 1985, con il nome

di *“Determinazione delle caratteristiche medie delle strutture elastiche”*. [2]

Risale invece al 1987 la scoperta dei primi polimeri con comportamento auxetico.

Si tratta di schiume poliuretatiche (PU) con una struttura rientrante a cella aperta. Questa geometria del reticolo è stata ottenuta attraverso un metodo di compressione triassiale, abbinando una fase termica che serviva al rilassamento delle tensioni interne, necessaria per far sì che la struttura rientrante fosse mantenuta. In questo modo si ottennero valori di Poisson intorno a -0.7. [3]

### 1.3 Caratteristiche fisiche e strutturali

I materiali auxetici hanno proprietà meccaniche con un **elevato assorbimento di energia e resistenza alla frattura**. Tipicamente hanno una **bassa densità**, che è ciò **che consente alle aree a cerniera delle microstrutture auxetiche di flettersi**.

Il comportamento auxetico macroevidente può essere illustrato con una corda anelastica, avvolta attorno ad una corda elastica. Quando le estremità della struttura vengono divaricate, la corda anelastica si raddrizza, mentre la corda elastica si allunga e si avvolge attorno ad essa, aumentando effettivamente il volume della struttura.

#### 1.3. A - Coefficiente di Poisson

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{m, \text{trasm}} \rightarrow \text{DEFORMAZIONE TRASVERSALE}}{\varepsilon_{m, \text{long}} \rightarrow \text{DEFORMAZIONE LONGITUDINALE}}$$

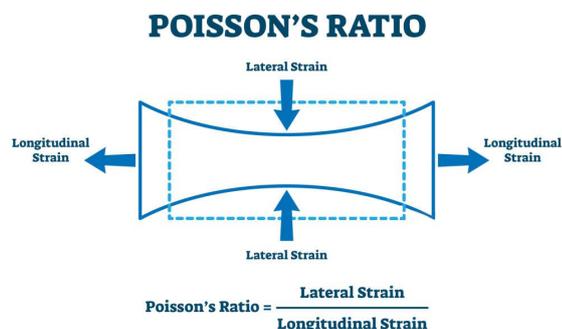
Il coefficiente di Poisson ( $\nu$ ) è così chiamato perché fu introdotto da Simeon Dennis Poisson (1787-1840), un matematico francese che lo definì come **il rapporto tra la deformazione trasversale e la deformazione longitudinale rispetto alla direzione della forza applicata**. È una delle due proprietà che descrive l'elasticità di un solido elastico, ed assume valori adimensionali. [4]

Ricordando che una deformazione di trazione è considerata positiva, mentre una di compressione negativa, la maggior parte dei materiali presenta un coefficiente di Poisson

positivo. Invece, l'anomalo comportamento dei materiali auxetici fa sì che il loro coefficiente di Poisson risulti negativo. [5]

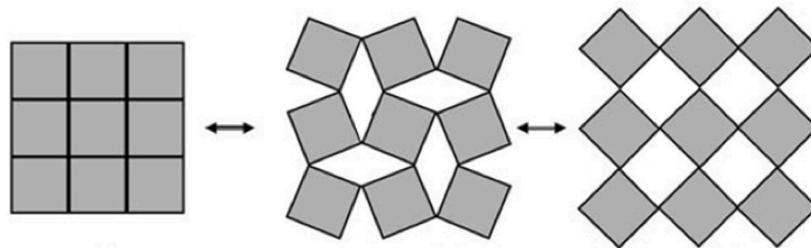
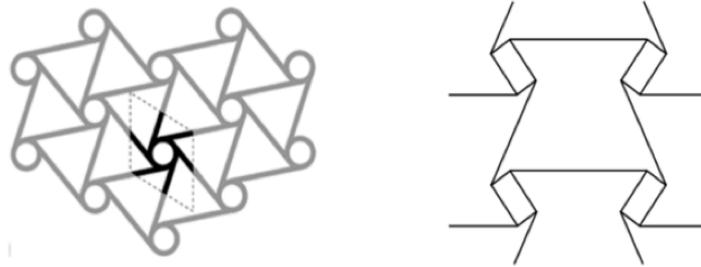
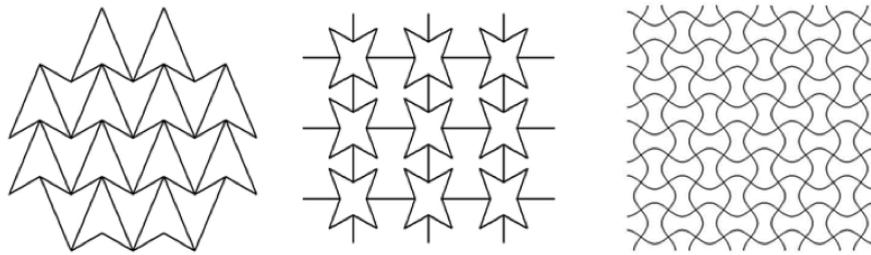
Dal punto di vista microstrutturale la ragione dell'usuale coefficiente di Poisson positivo è dovuta al fatto che i legami interatomici si allineano alla direzione di deformazione; per consentire ciò il sistema tende a mantenere la sua densità e questo si traduce in una contrazione laterale rispetto alla direzione del carico.

Ricercatori ed ingegneri hanno ritrovato in questo coefficiente un campo di studio molto interessante, la cui comprensione rende possibile la creazione di nuovi materiali, tra cui gli auxetici, e da questi la conseguente applicazione in diversi settori e in modo particolare quello aerospaziale, medico, sportivo e dove in generale sono richieste prestazioni elevate e pesi contenuti. Si deve ricordare che vi sono comunque delle limitazioni energetiche che non consentono ad un materiale, soggetto ad esempio ad una forza longitudinale, di espandersi o restringersi lateralmente oltre un certo limite.



i.4. illustrazione del rapporto di Poisson (rapporto di elasticità)

1. CHE COSA SONO I MATERIALI AUXETICI



i.5. meccanismi di deformazione di varie geometrie auxetiche

**1.3. B - Meccanismi di deformazione**

Quando la forza tira la struttura in una direzione, ad esempio verticalmente, si ha una contemporanea apertura o espansione orizzontale e quindi perpendicolarmente alla direzione del carico. **I materiali auxetici possono essere pensati come una serie di array (contenitore, le cui caselle sono dette celle dell'array stesso) regolari connessi, che guidano l'intera deformazione.**

Le celle elementari che costituiscono la struttura base della mag-

gior parte dei materiali auxetici possono essere rappresentate in diverse forme.

Tramite formule trigonometriche, è possibile calcolare la rotazione delle singole celle in relazione al carico applicato, descrivendo in maniera piuttosto accurato il comportamento complessivo della struttura[6].

I materiali auxetici attualmente prodotti dall'uomo sono per la maggiore schiume, fibre e compositi. In natura però esistono materiale che, senza la necessità di trasformazione alcuna, hanno proprietà e comportamenti auxetici.

riali auxetici. Rientrano in questa categoria la grafite pirolitica ed alcuni minerali ricchi di silicio, come ad esempio la cristobalite e la pirite. Quest'ultimi però non trovano applicazione in quanto le loro proprietà auxetiche non sono controllabili, infatti si tratta deformazioni che avvengono in scala atomica per cui è impossibile avere una replicabilità stabile del comportamento.

### 1.3. C - Memoria di forma

I materiali a memoria di forma assieme ai materiali ferromagnetici (FM) come il Nichel, ed ai materiali ferroelettrici (FE) come il piombo-zirconato-titanato (PZT) rappresentano una classe di materiali metallici dalle particolari proprietà meccaniche. [7]

**La loro caratteristica principale è quella di essere in grado di recuperare una forma preimpostata per effetto del semplice cambiamento di temperatura o dello stato di sollecitazione applicato.**

A tale proprietà si dà il nome di **pseudoelasticità** in quanto l'effetto complessivo è quello di un materiale che accetta notevoli deformazioni (anche del 6-8%) ed immediatamente recupera la sua for-



i.6. montatura per occhiali in lega a memoria di forma

ma iniziale, in gran parte a sforzo costante.

Per capire meglio il significato di pseudoelasticità è utile il paragone con altre due tipologie di materiali: i metalli tradizionali e quelli anelastici. Nei metalli tradizionali si evince un andamento lineare nel grafico della curva tensioni/defor-



i.7. molla metallica in Nitinol

mazioni, di cui la pendenza determina il modulo di Young; i materiali anelastici (tra cui ghise e polimeri) mostrano un rapporto non lineare tra tensioni e deformazioni, ma quest'ultime sono condizionate dal tempo e dalla velocità di applicazione della forza.

I materiali pseudoelastici presentano un comportamento simile ai materiali anelastici, ma con la diversità che possono avere deformazioni elastiche, mentre per un materiale anelastico ciò rappresenterebbe una deformazione in campo non elastico, ovvero plastico.

Un'altra differenza è che la curva tensioni-deformazioni dei materia-

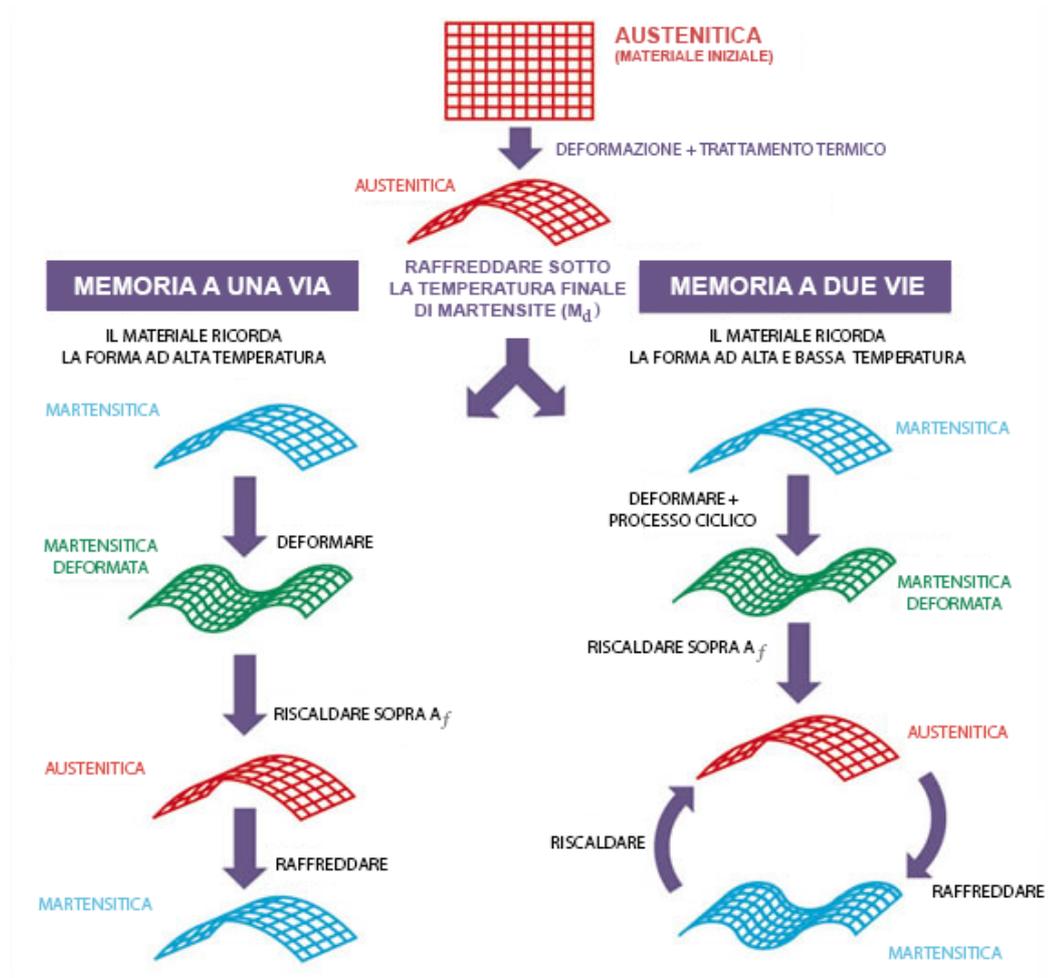
1. CHE COSA SONO I MATERIALI AUXETICI

li pseudoelastici non dipende dal tempo, ne dalla velocità d'applicazione del carico, come accade per i materiali anelastici.

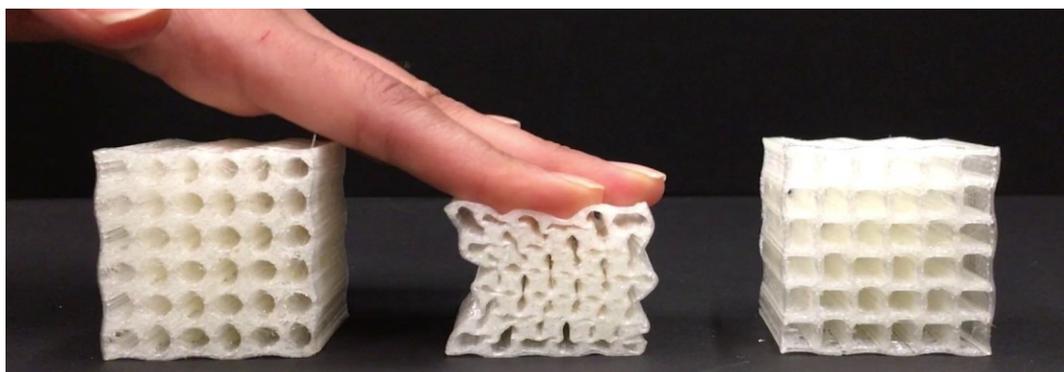
**La pseudoelasticità consente di deformare significativamente il materiale in campo elastico, evi-**

**tando tutti i problemi provocati dalle deformazioni plastiche come il moto delle dislocazioni.**

Tale processo è dovuto al fatto che sotto l'azione di uno stato di sollecitazione, applicato a un materiale a memoria di forma nell'in-



i.8. processo del trattamento a memoria di forma per leghe di acciaio inossidabile composte da Cromo e Nichel



i.9. dimostrazione del comportamento elastico di un materiale a memoria di forma, realizzato tramite il processo di stampa 3D

intervallo di temperature  $A_f < T < M_d$  si ha martensite indotta da sforzo. Togliendo lo stato di sollecitazione si ha la riconversione da martensite in fase genitrice (generalmente in un intervallo di temperatura di 30-50 °C al di sopra di  $A_f$ ). **Tutte le leghe a memoria di forma sono contraddistinte dall'aver due fasi cristalline o fasi ben distinte.** L'esistenza di una fase o di un'altra dipende dalla temperatura e dallo sforzo a cui l'oggetto è sottoposto: la fase più stabile a bassa temperatura è la **martensite ( $\alpha$ )**; mentre quella presente ad alta temperatura è l'**austenite ( $\gamma$ )**. Le proprietà di una lega a memoria di forma dipendono dalla quantità con cui una fase è presente; quindi bisogna studiare come avviene la trasformazione austenite/martensite. [8]

**La martensite**, chiamata in nome del metallurgista tedesco Adolf Martens (1850–1914), **generalmente si riferisce ad una forma**

**dura della struttura cristallina dell'acciaio**, ma si può anche utilizzare per denominare una qualsiasi struttura ottenuta mediante trasformazione displasiva.

Le trasformazioni displasive riguardano un movimento coordinato di atomi, quando il reticolo austenitico viene deformato in quello della martensite. Non avviene diffusione e quindi esiste una corrispondenza atomica fra la fase austenitica originante e quella prodotta (martensitica).

**L' austenite è la fase più resistente delle leghe a memoria di forma e si forma a temperature elevate.** Esiste una temperatura ( $M_d$ ) sotto la quale si può avere formazione di martensite per deformazione meccanica; se una lega di memoria di forma presenta la temperatura di fine trasformazione austenitica ( $A_f$ ) più bassa della temperatura ( $M_d$ ), si ha il fenomeno della pseudoelasticità o superelasticità.



i.10. apparecchio dentale con filo metallico di Nitinol

## **BIBLIOGRAFIA (CAPITOLO 1)**

- [1] “Molecular network design” K.Evans - Nature, 1991 - Vol. 353 n° 6340
- [2] AG Kolpakov, 1985 - Journal of Applied Mathematics and Mechanics - Vol. 49, n° 6.
- [3] “Foam structures with a negative Poisson’s ratio” R.S. Lakes - Science, 1987 - Vol. 235 n°4792
- [4] “Mémoire sur les surfaces élastiques” S.D.Poisson - 1814
- [5] “Examination of negative Poisson’s ratio materials” B.Howell, P.Prendergast, L.Hansen - Applied Acoustics, 1994 - Vol. 43, 2, p. 141-148
- [6] “Auxetic Materials: Functional Materials and structures from lateral thinking” K.Evans, A.Alderson - Advanced Materials, 2000
- [7] “Shape Memory Materials” K.Otsuka, C.M.Wayman - Cambridge University Press - 1999
- [8] “Shape memory and phase transition for auxetic materials” M.Ciarletta, M.Fabrizio, V.Tibullo - *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2012

## SITOGRAFIA (CAPITOLO 1)

[s.1] <https://materiability.com/portfolio/auxetics/>

[s.2] <https://www.britannica.com/science/Poissons-ratio>

[s.3] <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/Poisson.html>

[s.4] [https://www.esa.int/gsp/ACT/projects/auxetic\\_materials/](https://www.esa.int/gsp/ACT/projects/auxetic_materials/)

[s.5] <https://webthesis.biblio.polito.it/15195/1/tesi.pdf>

s.6] <https://1library.net/article/history-of-auxetic-materials-literature-review.q2kd3x2q>

[s.7] <https://www.worldwidewords.org/turnsofphrase/tp-aux1.htm>

[s.8] [https://www.leeds.ac.uk/news/article/4334/new\\_material\\_that\\_thickens\\_as\\_its\\_pulled](https://www.leeds.ac.uk/news/article/4334/new_material_that_thickens_as_its_pulled)

[s.9] <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/115125>

## SITOGRAFIA IMMAGINI (CAPITOLO 1)

[i.1] <https://www.designboom.com/design/auxetic-wear-tensile-3d-printed-shoe-tpu-wertel-oberfell-08-01-2022/>

[i.2] <https://core.ac.uk/download/pdf/18590454.pdf>

[i.3] <https://it.frwiki.wiki/wiki/Auxétisme>

[i.4] <https://www.istockphoto.com/it/vettoriale/illustrazione-vettoriale-del-rapporto-di-poisson-etichettato-effetto-laterale-gm1221942091-358381311>

[i.5] <https://core.ac.uk/download/pdf/288499843.pdf>

[i.6] <http://lmcivil.unipv.eu/chi-siamo/laboratori/meccanica-computazionale-e-materiali-avanzati/>

[i.7] <https://buildingcue.it/leghe-a-memoria-di-forma-materiali-innovativi-per-la-protezione-sismica-degli-edifici/12099/>

[i.8] <https://inma.unizar-csic.es/en/dissemination/topics/shape-memory-bi-omaterials/>

[i.9] <https://www.quora.com/Is-there-a-smart-material-that-can-shrink-and-then-return-to-its-original-size>

[i.10] <http://www.centromedicoedentalesantalucia.com/web/2020/03/12/ap-parecchio-dentale-in-eta-adulta-consigli/>



## **2. STRUTTURE AUXETICHE**

## 2. STRUTTURE AUXETICHE

### 2.1 Auxetici naturali come ispirazione

La natura ripete in modo ossessivo sempre la stessa struttura cellulare, modificandola per microvariazioni o per approssimazioni.

Questo permette alla natura di fornire ai materiali delle proprietà inedite, per esempio i materiali possono essere auxetici, cioè aumentare la loro sezione (allargarsi) quando vengono sollecitati a trazione (cioè tirati).

Sembra una curiosità, ma il fatto che la pelle di alcuni rettili, come le salamandre, sia auxetica, permette dei movimenti bruschi ed improvvisi senza cedere di schianto. Ed al fatto che la pelle dei serpenti sia auxetica è dovuta una loro proprietà caratteristica come la macrofagia (inghiottire bocconi molto grossi aprendo all'improvviso la bocca).

**Dal punto di vista strutturale, non è un materiale specifico ad essere auxetico, ma (potenzialmente) tutti i materiali cellulari possono essere auxetici, basta che abbiano le cellule non esagonali, o di altre forme più complesse,**



i.11. primo piano di un cobra

per esempio tetradecagonali (a 14 lati), ma della forma a “farfallino”. Un nuovo studio dell’Empa (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology) recentemente pubblicato su Nature Communications mostra come questo comportamento straordinario può essere migliorato e persino utilizzato per trattare lesioni e danni ai tessuti [9].

Gli scienziati dell’Empa hanno condotto alcune loro ricerche studiando le interessanti proprietà fisiche del capezzolo dei mammiferi, in particolare osservando un vitello succhiare il latte dalla mammella di una mucca madre. I tessuti del capezzolo sotto tensione anziché restringersi permettevano la fuoriuscita del latte. Da questa ricerca si è potuto dimostrare le straordinarie proprietà di questi tessuti auxetici che hanno portato allo sviluppo di membrane in nanofibra.

Lo studio pubblicato su Nature Communications mostra una vasta serie di applicazioni per materiali auxetici, tra le quali l’utilizzo di membrane auxetiche per rigenerare il tessuto umano dopo lesioni. La natura si rivela una grande fonte di ispirazione anche per quanto riguarda la tecnica degli origami, che nella maggior parte dei casi possiamo ricondurre a “strutture

auxetiche”, in quanto soggette a ad una forza di trazione longitudinale queste aumentano il loro volume anche in direzione trasversale.

Per esempio le ali degli insetti forbice si modellano quando necessario per il volo, espandendosi più di dieci volte più grandi delle loro dimensioni piegate. Sono un ottimo esempio di un modello di piegatura naturale ottimizzato sia per la forza di volo che per la flessibilità. Nonostante le loro dimensioni relativamente grandi, le ali degli insetti contengono muscoli attivi solo dove l’ala si attacca al corpo. Ma questo non toglie nulla alla capacità delle ali di sostenere il peso dell’insetto e mantenere la stabilità nell’aria.

Nelle forbicine, la chiave è nella struttura dell’ala, che si è evoluta per ripiegarsi rapidamente dallo stato aperto a quello chiuso. Invece di utilizzare i muscoli, all’interno della struttura pieghevole, utilizzando articolazioni simili a quelle che si trovano nell’antico arte giapponese degli origami. A forma di ventaglio pieghevole, l’ala è divisa in una regione esterna rigida e una interna più flessibile, con il bordo d’attacco che fornisce una certa rigidità dalla base alla punta dell’ala. Un meccanismo centrale conferisce all’ala la capacità di passare da uno stato piegato a uno stato aperto quando piegato assume la forma di pieghe convesse e concave, mentre nello stato aperto

diventa una piramide concava, bloccandosi in posizione per il volo e dando stabilità all’ala aperta.

L’intera ala è leggermente curva nel mezzo, permettendole di sopportare forze di flessione più elevate che se fosse completamente piatta.

La forza di un’ala così flessibile è dovuta alla presenza e alla distribuzione della resilina, un tipo di proteina presente nelle articolazioni, o pieghe. La resilina rafforza l’ala lungo queste articolazioni, che forniscono sia linee di piegatura che linee di flessione (linee lungo le quali l’ala si piega verso l’alto o verso il basso durante il volo). Le articolazioni sono disponibili in due forme: le articolazioni asimmetriche danno all’ala una molla di rotazione, mentre le articolazioni simmetriche consentono una maggiore estensione o allungamento. Le ali flessibili presentano una serie di vantaggi: le forbicine possono volare lentamente, muoversi a un’ampia gamma di velocità ed un alto livello di manovrabilità nell’aria. Tutto questo in aggiunta alla capacità di essere riposti per protezione e leggerezza.



i.12. dettaglio delle ali di un dermattero

## 2.2 I metamateriali

Un metamateriale è un **materiale composito artificiale la cui microstruttura è progettata per conferire proprietà fisiche speciali** (elettromagnetiche, acustiche, meccaniche), generalmente non presenti nei materiali naturali e, in particolare, non presenti nei singoli materiali che lo costituiscono. [10]

Elementi fondamentali di un metamateriale sono la sua natura composita, ovvero costituita da più materiali assemblati; e il fatto che le sue proprietà sono generate non dagli atomi che lo costituiscono, ma dai blocchi unitari con il quale vengono assemblati, la cui struttura e dimensione sono opportunamente progettati. [11]

**Tra i metamateriali più studiati vi sono quelli di tipo elettromagnetico**, i quali manifestano proprietà diverse in risposta ad una radiazione, in base a specifici valori di costante dielettrica, permeabilità magnetica e indice di rifrazione. Tali proprietà si manifestano maggiormente quando la dimensione delle celle è decisamente inferiore alla lunghezza d'onda (inferiore allo 0,25%) della radiazione. Questa condizione è relativamente semplice nelle microonde, dove la lunghezza d'onda è dell'ordine del centimetro, perciò le celle di costruzione avranno dimensioni intorno al millimetro, per quanto riguarda invece il campo dell'infrarosso i blocchi unitari avranno dimensioni

nanometriche con le conseguenti complessità di fabbricazione. Negli ultimi anni le moderne nanotecnologie hanno permesso la produzione di materiali che possano operare in questi intervalli di radiazione. Per descrivere lo stato di polarizzazione circolare della luce si fa riferimento, per convenzione, al solo vettore E. Si distingue tra polarizzazione circolare destrorsa o sinistrorsa a seconda che l'estremo del vettore E, visto da un osservatore verso cui si propaga l'onda, descriva nel tempo una circonferenza in senso orario o antiorario.

Tra i materiali elettromagnetici, **particolarmente importanti** sono quelli indicati con la sigla **NIM (Negative index materials)**, caratterizzati da indice di rifrazione negativo; vengono anche detti LHM (Left-handed materials, «materiali sinistrorsi»), **perché la terza formata dai vettori campo elettrico, campo magnetico e vettore di propagazione dell'onda elettromagnetica al loro interno non è destrorsa ma sinistrorsa.**

Come **conseguenza di queste proprietà, i NIM presentano una serie di comportamenti anomali e permettono un'elasticità eccezionale nella possibilità di manipolare le onde elettromagnetiche e perciò di generare nuove proprietà** come ad esempio la capacità di costruire sistemi ottici con potere risolutivo molto inferiore alla lunghezza d'onda e di rendere invisibili oggetti macroscopici.

### 2.3 - Forma e struttura

La struttura molecolare e la geometria realizzativa, costituiscono le proprietà microscopiche di un Metamateriale avente delle caratteristiche elettromagnetiche che lo rendono unico rispetto a tutti gli altri.

**Le sue proprietà provengono dalla sua struttura fisica e non direttamente da quella chimica.**

Essendo i metamateriali creati artificialmente, questi hanno la possibilità, grazie alla loro struttura periodica, di ottenere delle proprietà uniche, ad esempio, hanno la capacità di riscrivere la struttura interna sfruttando la non linearità a livello di meccanica non lineare. Se dovesse essere modificata la struttura a livello microscopico del materiale, si otterrebbero quindi delle caratteristiche maggiori rispetto al materiale originale.

Modificando più disposizioni, nelle 3 dimensioni, come se fossero "mattoncini", il risultato sarebbe un Metamateriale tridimensionale. In base alla composizione della struttura del materiale, questo può risultare più rigido, più resistente, più denso o addirittura presentare diverse caratteristiche ottiche, il tutto dovuto a queste "semplici" modifiche, eseguite a livello microscopico sul materiale di base. Inoltre, andando a lavorare sul numero di ripetizioni delle celle strutturali del materiale originale, si possono ottenere dei risultati incredibili, ottenendo un prodotto

finale ed una struttura con peculiarità meccaniche uniche nel suo genere, superando addirittura i limiti fisici e strutturali del materiale di partenza.

**I metamateriali hanno quindi la possibilità di essere modificati ottenendo delle caratteristiche quasi contrarie al materiale di partenza**, ad esempio hanno la capacità di allungarsi quando subiscono una sollecitazione trasversale, di raffreddarsi quando vengono espansi o di contrarsi quando vengono riscaldati.

I materiali che vengono creati, potrebbero essere quasi definiti come metamateriali capaci di adattarsi alle sollecitazioni esterne a cui è sottoposto in quel momento. Potrebbe essere dotato quasi di una intelligenza propria.

Una delle proprietà scoperte di recente è proprio la **Chiralità [12]**, ovvero **la proprietà di un oggetto rigido (o di una disposizione spaziale di punti o atomi) di essere non sovrapponibile alla sua immagine speculare.**

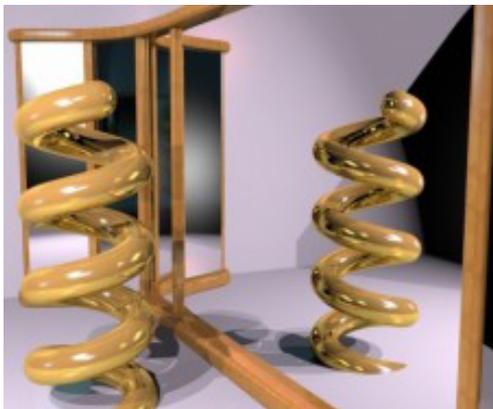
A livello strutturale, molte molecole hanno delle disposizioni a due strutture tridimensionali che non possono essere sovrapposte l'una con l'altra essendo speculari. **Questa particolarità prende il nome di enantiomero.**

La Chiralità è quindi fondamentale nello studio dei materiali, poi-

**ché utile per far eseguire delle rotazioni (in un verso stabilito in precedenza) su loro stesse a strutture microscopiche quando soggette a delle particolari sollecitazioni o pressioni, eseguendo una “trasgressione” dei principi delle leggi sulle variazioni dei corpi fisici.**

Nei regimi ordinari ad esempio, un comune materiale, se sottoposto ad una forza verticale e quindi “schiacciato”, si riduce in altezza e si allarga lateralmente, oppure se viene “tirato” questo si assottiglia. Queste caratteristiche possono essere sovvertite quando si parla di un metamateriale Chirale.

**Le strutture Chirali possono creare il Dicroismo Circolare**, ovvero un fenomeno che si presenta quando quest’ultime lavorano con la luce. Si tratta di un processo di assorbimento differente da parte di una “sostanza” chirale della luce polarizzata circolarmente, il quale trova diverse applicazioni nel campo della fotonica. [13]



i.13. rappresentazione figurativa di una struttura chirale riflessa

La luce piano-polarizzata può essere definita in termini di due componenti:

- luce circolarmente polarizzata destra (LCPD);
- luce circolarmente polarizzata sinistra (LCPS).

**Le due componenti vengono assimilate in maniera differente da un mezzo chirale, e nella misura di questa differenza è basata la tecnica spettroscopica**, utilizzata per studi sulla stereoisomeria delle sostanze e nella definizione della struttura secondaria delle proteine. Infine questi, possono essere utilizzati anche come polarizzatori circolari in miniatura.

#### 2.4 - Geometrie auxetiche

I materiali auxetici sono dei materiali che, se sottoposti ad uno sforzo di trazione, presentano una struttura che si “apre ad ombrello”, determinando così, una dilatazione in direzione trasversale a quella di sollecitazione.

Al contrario, se sottoposti a compressione, la disposizione “si chiude”, determinando una strizione (riduzione della sezione trasversale subita da un corpo sottoposto a trazione) del campione.

Questa proprietà è dovuta all’organizzazione geometrica microscopica delle molecole, la quale determina alcune altre proprietà meccaniche tra cui, l’alto assorbimento di energia e la resistenza alla frattura.

**I materiali in questione, i quali possono essere semplificati geometricamente con forme esagonali, presentano una bassa densità, caratteristiche che permette a singole zone specifiche delle microstrutture auxetiche di flettersi, generando così, a seguito di una qualsivoglia forza applicata, l'aumento dell'area della struttura.**

I materiali in questione, i quali possono essere semplificati geometricamente con forme esagonali, presentano una bassa densità, caratteristiche che permette a singole zone specifiche delle microstrutture auxetiche di flettersi, generando così, a seguito di una qualsivoglia forza applicata, l'aumento dell'area della struttura.

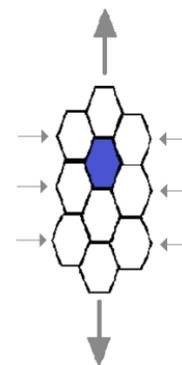
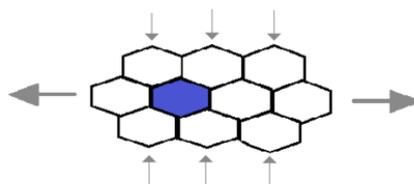
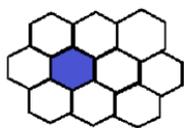
Questo processo può essere applicato a una struttura più complessa, tanto più che queste geometrie vengono solitamente utilizzate nella progettazione e realizzazio-

ne di packaging, (ad esempio nei materiali per l'imballaggio), oppure nell'abbigliamento sportivo, come ad esempio nelle soles delle scarpe da running dove, le caratteristiche geometriche, permettono, una volta sottoposte ad uno sforzo, di espandere la superficie a contatto con il terreno, migliorando così la flessibilità della suola e di conseguenza, la corsa stessa.

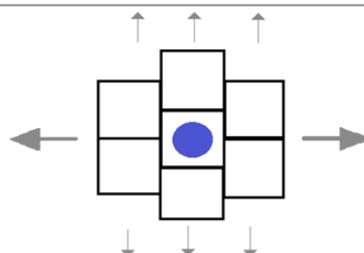
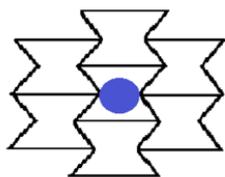
In seguito allo sforzo elastico, **le geometrie auxetiche permettono inoltre ai materiali di ritornare al loro stato originale, contraendosi trasversalmente e donando quindi al materiale un coefficiente di Poisson negativo.**

Come visto nel capitolo precedente il coefficiente di Poisson, o coefficiente di contrazione trasversale, è una proprietà legata all'elasticità di un solido, che non è soggetto a rompersi proprio perché ha una **buona resistenza alla frattura.**

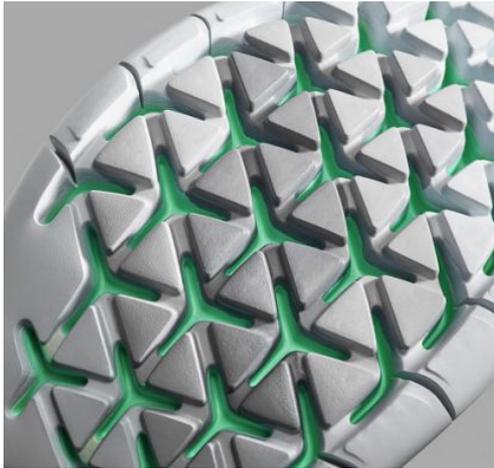
NORMALE MATERIALIEN



AUXETISCHE MATERIALIEN



i.14. illustrazione di confronto tra materiali normali e materiali auxetici



i.15. suola auxetica di una scarpa della Nike

Esso, inoltre, rappresenta il grado in cui il campione di materiale si restringe o si dilata trasversalmente in presenza di una sollecitazione unidirezionale longitudinale.

Oggi, le geometrie auxetiche ed il loro comportamento all'interno di un materiale, dapprima poco intuitive e poco conosciute, stanno cominciando a prendere sempre più piede; per questo, la loro produzione attuale trova applicazione non soltanto nelle schiume, fibre e compositi.

Infatti, esistono anche alcuni materiali naturali, (che quindi non necessitano di nessuna trasformazione da parte dell'uomo) [14] composti da geometrie auxetiche: ne sono un esempio la grafite pirolitica, alcuni minerali ricchi di silicio come la  $\alpha$ -Cristobalite ( $\text{SiO}_2$ ) o la pirite ( $\text{FeS}_2$ ).

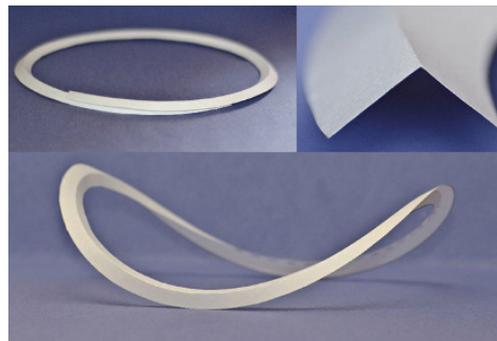
### 2.5 - Origami

La parola "origami" ha origini Giapponesi e viene interpretata come la maestria di piegare la carta mol-

teplici volte al fine di ottenere delle forme riconoscibili.

Questa arte non è solo diffusa in Giappone ma anche in altri paesi come l'occidente, la Cina e anche tra gli Arabi. All'origine dell'arte dell'origami, ci sono le basi della religione Giapponese, ossia lo Shintoismo che, metaforicamente, fa riferimento al ciclo di vita infinito delle persone e che si rigenera ogni volta, dando l'idea che dopo ogni decesso, la forma di carta, venga rigenerata creando un loop infinito (questo rappresenta la vera e propria rinascita nella vita).

L'origami originale, era una procedura più semplice, e comprendeva dei costanti tagli al foglio, a differenza della tecnica rivisitata, che prevede l'utilizzo di poche tipologie di piegature ma con una vastissima scelta di modi per rappresentare anche i modelli più complessi.



i.16. origami a piega curva

Normalmente, per queste figure è fondamentale che ci sia come punto di partenza un foglio quadrato avente colori diversi nelle diverse facce del foglio. Il principio di piegatura degli origami è stato utilizza-

to in molti settori nelle industrie, ad esempio è stato applicato il principio di piegatura nelle chiusure degli Air-Bag delle automobili.

Gli origami hanno anche una sottile **correlazione con i metamateriali, in quanto negli ultimi tempi, si sta progettando e ricercando una nuova tipologia di fogli polimerici**, che siano in grado di piegarsi in modo indipendente, dando origine ad una serie di nuovi metamateriali con delle proprietà meccaniche che possono essere bilanciate per sviluppare delle caratteristiche attivamente modificabili. [15]



i.17. Orizuru (ori: piegato; tsuru: gru)

Oltre a questo, alcune caratteristiche sono già state utilizzate nel caso delle scatole che prendono forma con un semplice movimento; sulle antenne; e sulle strutture dei satelliti.

Quest'ultimo campo di ricerca, che sta prendendo piede, risulta avere prospettive di applicazioni molto più ampie soprattutto nei campi tecnologici più all'avanguardia.

Alcuni fisici importanti, come Santangelo e Dias, sono stati i primi in assoluto a sviluppare una serie di

equazioni per descrivere un esempio di caso-base della fisica delle curvature e piegature di strutture ed essi si sono concentrati molto su una fascia anulare circolare che viene piegata lungo una linea circolare centrale per formare una struttura tridimensionale.

## 2.6 - Tecnologie per la produzione di strutture auxetiche

Le strutture auxetiche variano molto sia per dimensioni che per materiale, quindi in base al prodotto che si vuole realizzare o al tipo di materiale che si vuole utilizzare, vi sono varie tecnologie per la produzione. Tendeziamente si tratta di lavorazioni complesse quindi sono spesso usate tecnologie all'avanguardia. Le principali che siamo andati ad analizzare sono:

**la stampa 3D; il taglio laser; la punzonatura; la termoformatura; la tessitura, e la piegatura.**

### 2.6.1 - Stampa 3D

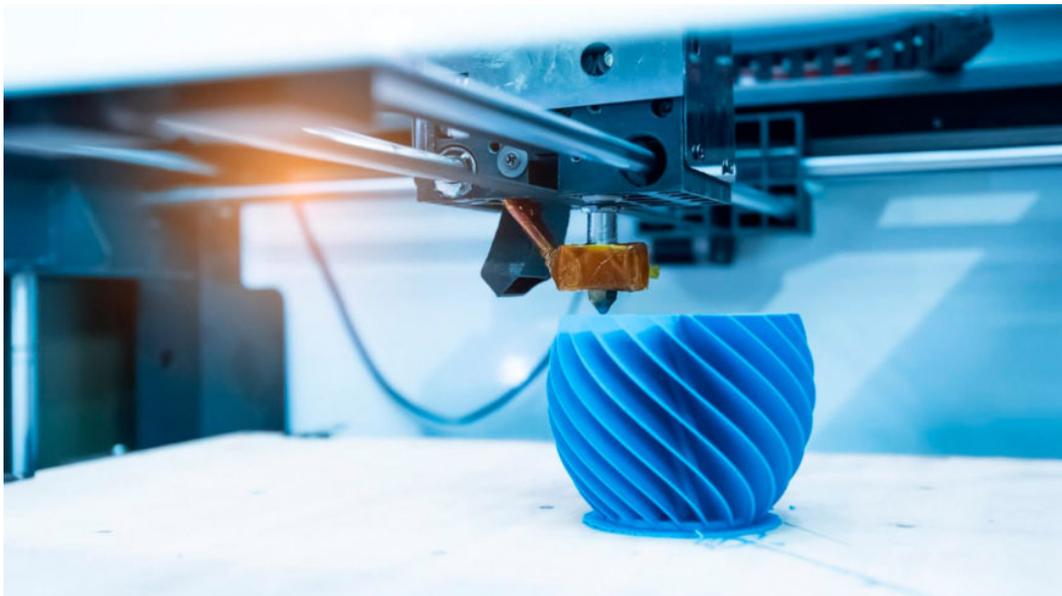
**La stampa 3D è una delle tecnologie più versatili per realizzare strutture auxetiche.**

Grazie alla modellazione sui tre assi (XYZ) è possibile creare moduli di cellule tridimensionali, inoltre la libertà di forma delle strutture ottenibili è ineguagliabile con qualsiasi altra tecnologia. Le tecniche più idonee alla realizzazione di auxetici sono:

- **la tecnica SLS** (Sinterizzazione Laser Selettiva) che è una tecnologia di produzione addittiva (AM), dove il materiale più utilizzato è il Nylon (polimero termoplastico sintetico che appartiene alla famiglia dei poliammidi), di cui ne esistono diverse

varianti e che può essere potenziato con il vetro per diversificarne le proprietà fisiche e garantire di realizzare parti robuste e funzionali;

- **la tecnica MJF** (Multi Jet Fusion), che utilizza materiali come Poliammide e Poliuretano Termoplastico: quest'ultimo si distingue per l'elevata flessibilità e resistenza agli urti. Con la stampa 3D MJF i disegni non hanno bisogno di strutture di supporto, perchè gli spazi vuoti vengono riempiti con la polvere sciolta inutilizzata, rendendo le stampe MJF auto-portanti. Inoltre, è possibile produrre parti funzionali con proprietà meccaniche ottimali direttamente a colori, riducendo i costi di post-elaborazione. [16]



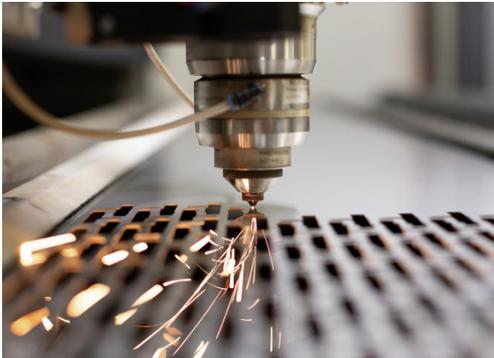
i.18. dettaglio del processo di stampa 3D

### 2.6.2 - Taglio laser e punzonatura

**La tecnologia del taglio laser è un procedimento estremamente preciso**, che riesce ad incidere o tagliare un disegno su un materiale prescelto; quest'ultimo può variare

dai metalli, al legno o mdf, al plexiglass, alla carta o cartone. [17] Le macchine a taglio laser, o laser cutter, sono macchine a controllo numerico (CNC), ovvero azionate grazie ad software presente su di

un computer; esse utilizzano un raggio laser sottile e focalizzato per perforare e ritagliare motivi e geometrie, specificati dai progettisti.



i.19. taglio laser di una lastra d'acciaio

In base al gas utilizzato esistono tre tipologie di tagli laser: **taglio laser a fibra**, che permette di realizzare oggetti complessi senza passaggi ulteriori; il **taglio laser CO2**, che garantisce un rendimento elevato anche su lamiere spesse; e il **taglio laser a diodo**, che è più veloce del 15% rispetto al taglio laser a fibra e garantisce un consumo energetico inferiore perchè il rapporto tra la potenza sviluppata e quella utilizzata è inferiore del 50% rispetto agli altri due metodi. Il taglio laser è comunemente utilizzato per lavorare su superfici piane in 2D, come lamiere o fogli.

Esiste anche però la tecnologia in 3D per creare ritagli o incisioni su supporti che hanno già subito un

processo di piegatura o stampa.

**La punzonatura è un procedimento** che necessita di un punzone, situato nella parte mobile della pressa, **che produce la formatura della lamiera in seguito alla pressione applicata su di essa.** Il contrasto tra matrice e punzone determina il grado di uniformità della lamiera, che segue la morfologia della matrice definendo così la forma desiderata all'oggetto lavorato.

Nelle lavorazioni più complesse è presente nella matrice il premilamiera, che ha il compito di bloccare la lamiera, evitando così pieghe indesiderate. Lo stampo di trancia è l'operazione, dove durante il taglio tramite punzoni, la lamiera viene inizialmente deformata ed in seguito tranciata. Il punzone compenetra nel materiale e ne causa la deformazione, generando il distacco tra il particolare da ottenere e il materiale in eccesso.

Nella zona di deformazione si genera sul bordo del particolare un'area dall'aspetto lucido chiamato zona di tranciatura o linea di bava. Si tratta della zona più sensibile della tecnologia dove possono emergere i difetti di una lavorazione non ottimale.



i.20. punzonatura avanzata di una lastra d'acciaio, tramite gli strumenti Shearbutton e Easynap

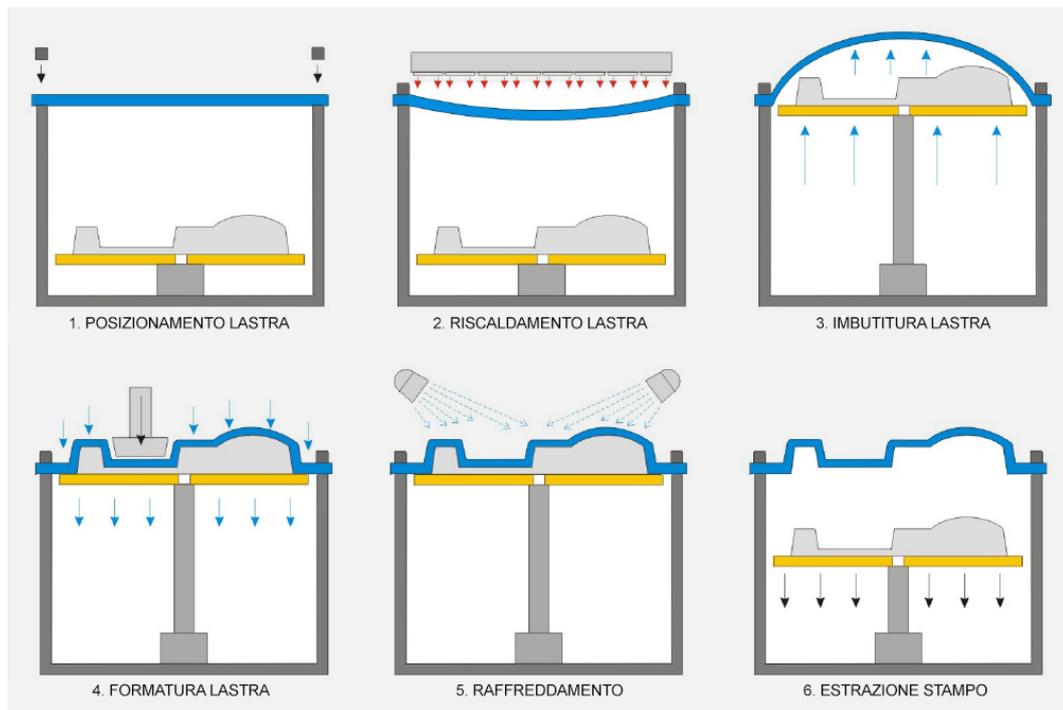
### 2.6.3 - Termoformatura

La termoformatura è una tecnica di stampaggio a caldo di vari materiali plastici, che necessita di uno stampo con il negativo del profilo dell'oggetto da ottenere. I materiali "lavorabili" in termoformatura sono: MDF, che permette di fabbricare prototipi velocemente; le tavole; e le resine termocompounding.

Vi sono due metodi per produrre un oggetto termoformato: con la **procedura sotto vuoto**, con la quale la lastra in plastica viene posata su uno stampo per aspirazione; e la **tecnica di sotto pressione**, con il quale il film plastico viene spinto

sullo stampo grazie alla pressione ricavata dall'aria esterna. Rispetto ad altri processi di modellazione di materiali plastici, **la termoformatura valutando i bassi costi iniziali, gli strumenti impiegati e i tempi di consegna è una tecnica conveniente**. Studiando uno stampo con le opportune geometrie è possibile conferire proprietà auxetiche al particolare da realizzare, gli "spigoli" del negativo vanno a formare pieghe/cerniere che consentono il movimento.

Successivamente, è probabile che sia necessaria una lavorazione di tranciatura per eliminare il materiale in eccesso. [18]



i.21. esempio del processo di termoformatura

### 2.6.4 - Tessitura

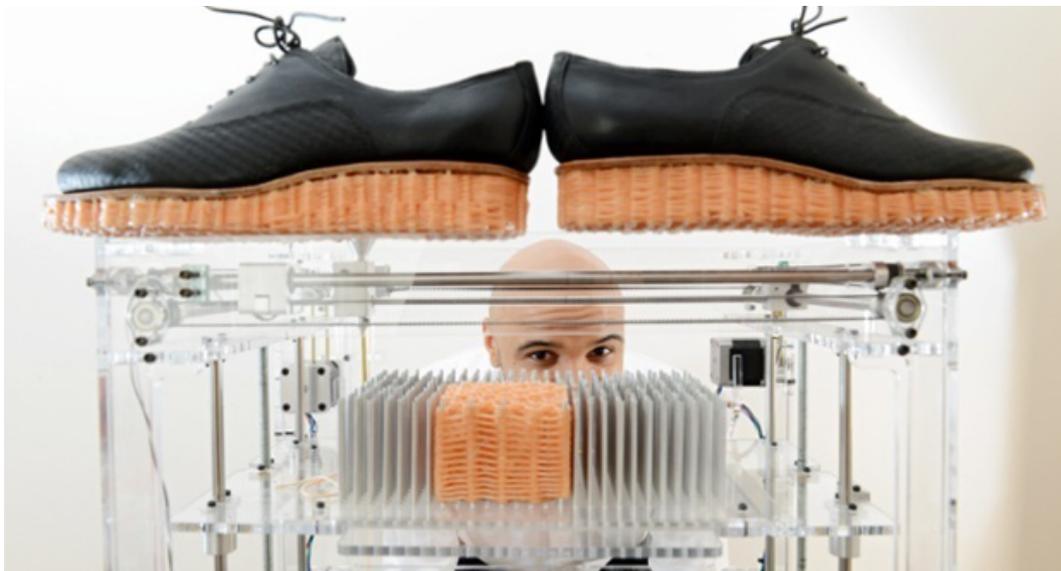
Quando si parla di tessitura di materiali auxetici il riferimento è alle tecniche di **tessitura 3D**, ciò vuol dire lavorare facilmente oggetti

che abbiano una determinata forma, ma vuol dire anche produrre tessuti a più strati e con piccoli elementi base, connessi liberamente fra loro in modo da essere

nel loro complesso morbidi. [19] Il vantaggio della tessitura 3D è che **gli elementi base possono avere una forma diversa a seconda della singola sezione di tessuto**, il che permette un certo grado di personalizzazione dell'oggetto da realizzare.

Il designer industriale **Oluwaseyi Sosanya** ha codificato un software, che permette a qualsiasi geometria solida di essere suddivisa in strati e tessuti.

Successivamente ha creato una macchina per tessere in 3D: la **3D Weaver**, che fa riferimento alle coordinate XYZ per tessere il tessuto in forme tridimensionali. Il risultato è una struttura auxetica fine con vari motivi geometrici, che crea un cuscinetto assorbente. Una volta che il disegno è tessuto si immerge nel silicone per renderlo più forte e più resistente. La prima creazione del designer sono state delle intersuole per calzature.



i.22. il designer Oluwaseyi Sosanya e il tessitore 3D, da lui inventato

### 2.6.5 - Piegatura

**La piegatura è una tecnica applicabile a semilavorati sotto forma di fogli o lamiere, che prevede la deformazione permanente tramite un'azione di flessione.**

I materiali principalmente utilizzabili sono carta e cartone, ma è possibile "piegare" anche lamiere in metallo o polimeri.

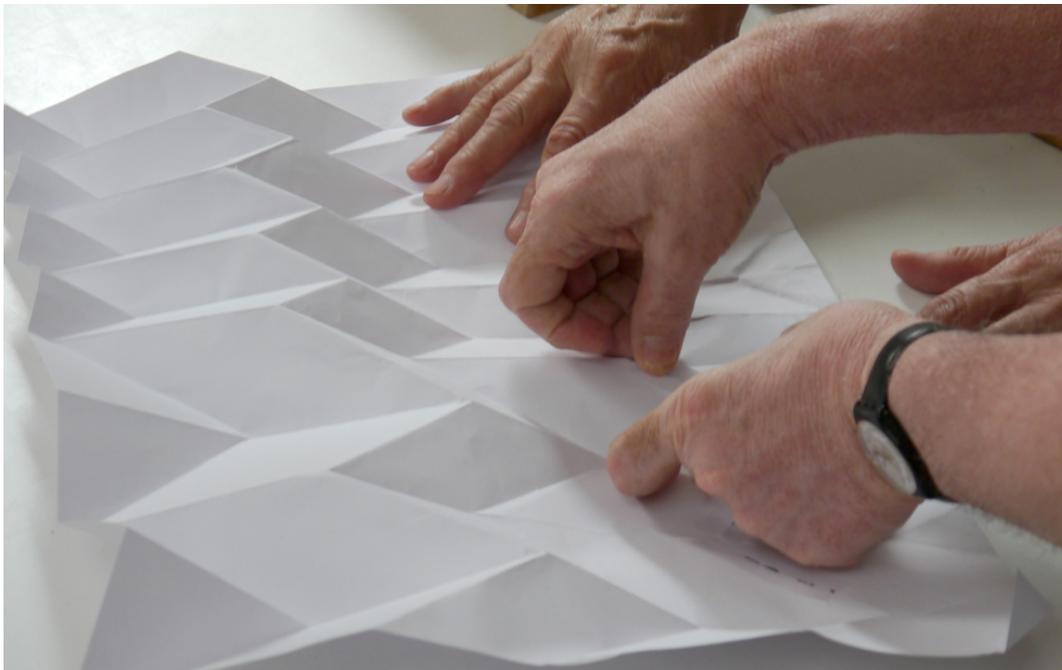
La piegatura è stata pensata per sfruttare le proprietà di alcuni metalli di deformarsi, senza né al-

lungarsi né contrarsi. Effettuando la piega sul materiale si conferisce rigidità al particolare, l'insieme delle pieghe va a formare la struttura con la quale si possono ottenere geometrie auxetiche.

**La piegatura deve essere sempre effettuata in senso ortogonale rispetto all'andamento della laminazione**, per evitare di creare crepe sul materiale.

È una tecnologia molto versatile come realizzazione e per libertà

di forme ottenibili, ma limitata dal punto di vista dei supporti applicabili. **[19]**



i.23. tecnica di piegatura della carta

## **BIBLIOGRAFIA (CAPITOLO 2)**

- [9] “Paradoxical replacement tissue for medicine” A.Morel(Empa) - Nature communications, 2019
- [10] “A brief intro to metamaterials” R. S.Kshetrimayum - IEEE Potentials, 2004 - Vol. 23, p. 44–46.
- [11] “Composite materials with Poisson’s ratio close to (-1)” G.Milton - J. Mech. Phys. Solids, 1992 - Vol. 40, p. 1105-1137
- [12] “Negative refractive index in chiral metamaterials” S.Zhang, Y.S.Park, J.Li, X.Lu, W.Zhang, X.Zhang - Physical Review Letters 102, 2009
- [13] “Properties of a chiral honeycomb with a Poisson’s ratio (-1) D.Prall, R.S.Lakes - International Journal of Mechanical Sciences, 1996 - Vol.. 39, p. 305-314
- [14] “Shape memory behaviour in auxetic foams: mechanical properties” M.Bianchi, F.Scarpa, C.W.Smith - Acta Materials, 2010
- [15] “Origami based Mechanical Metamaterial”  
D.Krishnaraju, G.Konjevod, H.Hu, H.Jiang, Lv.Cheng - 2015
- [16] “Design and evaluation of 3D-printed auxetic structures coated by CWPU/graphene as strain sensor” H.Y.Choi, E.J.Shin, S.H.Lee - Nature, 2022
- [17] “Highly stretchable two-dimensional auxetic metamaterial sheets fabricated via direct-laser cutting” L.Mizzi, E.Salvati, A.Spaggiari, J.C.Tan, A.M.Korsunsky - Science direct, 2020 - Vol. 167
- [18] “Impact properties of uniaxially thermoformed auxetic foams” Q.Zhang, F.Scarpa, D.Barton, Y.Zhu, Z.Q.Lang, H.X.Peng - Science direct, 2022 - Vol. 163
- [19] “Expanding materials and applications: exploiting auxetic textiles” A.Alderson, K.Alderson - Technical Textiles International, 2005 - Vol. 777, p. 29-34
- [20] “Folding Techniques for Designers: From sheet to form” P.Jackson - 2011

## SITOGRAFIA (CAPITOLO 2)

[s.10] [https://lgg.epfl.ch/research\\_auxetics.php](https://lgg.epfl.ch/research_auxetics.php)

[s.11] <https://www.nature.com/articles/s41467-018-07587-y>

[s.12] [https://issuu.com/lorenzomirante/docs/2015\\_12\\_mirante\\_b](https://issuu.com/lorenzomirante/docs/2015_12_mirante_b)

[s.13] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706121001562>

[s.14] <https://www.technosprings.com/materiali-a-memoria-di-forma/>

[s.15] [http://elea.unisa.it/jspui/bitstream/10556/3023/1/tesi\\_di\\_dottorato\\_F\\_Pugliese.pdf](http://elea.unisa.it/jspui/bitstream/10556/3023/1/tesi_di_dottorato_F_Pugliese.pdf)

[s.16] [https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/17181?1/Tesi\\_zecchetto\\_auxetici.pdf](https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/17181?1/Tesi_zecchetto_auxetici.pdf)

[s.17] <http://amirshahrokhi.christopherconnock.com/2011/12/11/auxetic-origami-surface/>

## SITOGRAFIA IMMAGINI (CAPITOLO 2)

- [i.11] <https://pixabay.com/it/photos/linea-cobra-pericoloso-rettile-1974382/>
- [i.12] <https://fandomhopper14.tumblr.com/page/2>
- [i.13] <http://old.nanotec.cnr.it/it/research-activities/photronics-optoelectronics/metamaterials/>
- [i.14] <http://it.scienceaq.com/nanotecnologia/1002099063.html>
- [i.15] <https://parametrichouse.com/nike-free/>
- [i.16] <https://physicsworld.com/a/physicists-unfold-the-mechanics-of-origami/>
- [i.17] <https://www.ehabitat.it/2020/03/27/origami/>
- [i.18] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/it/fusion-360-additive-manufacturing-3d-printing-capabilities/>
- [i.19] <https://www.bbw-lasertechnik.de/en/>
- [i.20] [https://it.123rf.com/photo\\_68992838\\_stock-illustration-rotation-punching-nibbling-machine-in-action-metal-perforating-industrial-machine-.html](https://it.123rf.com/photo_68992838_stock-illustration-rotation-punching-nibbling-machine-in-action-metal-perforating-industrial-machine-.html)
- [i.21] <https://www.civiesse.com/termoformatura/>
- [i.22] <https://www.theguardian.com/business/2015/may/03/the-innovators-the-3d-weaving-machine-putting-new-heart-into-soles>
- [i.23] <https://www.cbl-ascona.ch/it/tecniche-di-piegatura-e-carta-movimento-0>



# **3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI**

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

Nella ricerca dei campi di applicazione dei materiali auxetici abbiamo individuato quattro macro-aree in cui l'utilizzo e lo sviluppo di queste strutture è più significativo. I settori in questione sono **Sport e benessere**, **Medico sanitario**, **Architettura e design** e **Sicurezza**.

In ognuno di questi settori abbiamo individuato degli oggetti/strutture che sfruttano ed esaltano le peculiarità dei materiali auxetici.

#### Sport e benessere



Prodotti per la pratica dello sport. Sono per lo più oggetti che vanno a contatto con il corpo durante il loro utilizzo. La loro produzione è in larga scala, per mezzo di tecnologie collaudate. Si tratta di prodotti di medio-alta gamma.

#### PECULIARITÀ



*leggerezza*



*assorbimento urti*



*resistenza ad usura*

#### AUXETICITÀ



**Geometria**  
nei casi studio in cui l'esigenza principale è l'assorbimento di urti/elasticità



**Materiale**  
nei casi studio in cui l'esigenza principale è la resistenza all'usura o la traspirabilità/waterproof



*stampaggio*



*espansione*



*tessitura*

## Sport e benessere

### TRAIL SKINS DAINESE

Dainese Technology Center

anno 2020

<https://demonerosso.dainese.com/it/le-forme-auxetiche-per-la-pedalata-perfetta>



Il Trail Skins Dainese è una ginocchiera per chi pratica mountain bike. Come già successo in passato per altre tipologie di prodotti, i progettisti di Dainese si sono ispirati alla natura riproponendo in questo caso forme auxetiche. Le caratteristiche di queste geometrie conferiscono al prodotto un'elevata capacità di assorbire gli urti. All'assorbimento di un urto il materiale tenderà a comprimersi in ogni direzione, la struttura si irrigiderà rinforzandosi, fungendo da armatura e limitando potenziali traumi ed abrasioni. La tecnologia Dainese utilizzata si chiama Auxagon, applicata nelle protezioni Pro Shape 2.0. Caratterizzate da estrema mobilità, traspirazione e leggerezza, la loro superficie traforata raggiunge il 55%. Grazie a queste tecnologie, i protettori Trail Skins hanno un peso molto contenuto, e ottengono la certificazione europea EN 1621.1 di Livello 1.

dall'alto: i.24. ginocchiera Trail Skins Dainese

i.25. zoom sulla geometria auxetica della ginocchiera Trail Skins Dainese

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

Esistono diverse versioni di ginocchiere tra cui la Trail Skins Lite, la più leggera della gamma che grazie all'assenza di chiusure in velcro e all'estrema flessibilità della shell protettiva è possibile richiuderla su se stessa con un minimo ingombro. Oppure la versione Enduro 2.0 che è stata disegnata per seguire la forma del ginocchio e quindi non è necessario sfilarla a discesa ulti-

mata poiché consente il movimento in tutte le fasi della pedalata.

#### TECNOLOGIA

La Dainese è un'azienda specializzata nella realizzazione di elementi protettivi per motociclisti e bikers. Gli studi del centro ricerche hanno portato grandi innovazioni in questo campo come la tecnologia Auxagon, ispirata alla forme auxetiche. tale tecnologia viene applicata a diverse famiglie di prodotti come para schiena, protezioni per sciatori, ginocchiere e come nel caso preso in esame ginocchiere.

Diversi materiali e tecniche di produzione accomunate dallo stesso concept, per raggiungere le massime prestazioni ottenibili con una geometria auxetica.

#### PECULIARITA'

- grande assorbimento degli urti
- elevata traspirabilità
- leggerezza
- adattamento alla conformazione fisica

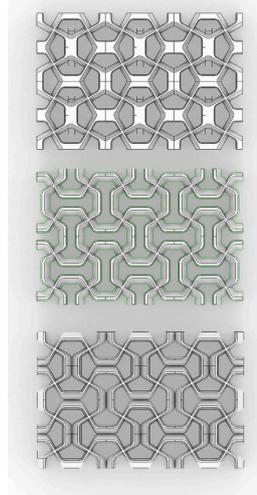
#### MATERIALI

##### AREA PROTETTIVA:

- NBR (gomma nitrilica)
- Polietere sulfone

##### CALZA:

- Polietere sulfone
- Elastan



i.26. studio della geometria auxetica della ginocchiera Trail Skins Dainese

## Sport e benessere

# SCARPE NIKE FREE

Nike Design Center

anno 2016

<http://runandthecity.it/free-rn-flyknit-la-rivoluzione-del-running/>



Il concetto di Nike Free è nato nel 2001, quando le intuizioni di un leggendario allenatore hanno ispirato i designer a creare calzature che imitavano la sensazione dell'allenamento a piedi nudi ma incorporavano protezione e supporto importanti. La prima espressione di questo studio è stata rilasciata nel 2004 attraverso una scarpa con suola scanalata, composta da scanalature profondamente tagliate che hanno permesso alla suola di flettersi liberamente e trasferire una sensazione di piedi nudi su tutte le superfici. 12 anni dopo, la Nike Free RN Motion Flyknit porta ulteriormente quella tecnologia originale. Basandosi su nuovi studi che rivelano come il piede si espande e si contrae all'impatto e al decollo da terra, i designer Nike hanno sviluppato un'intersuola auxetica, o allargata. Diffondendosi su due piani, la forma geometrica a tre stelle imita il

dall'alto: i.27. paio di scarpe Nike Free

i.28. dettaglio della suola delle scarpe Nike Free

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

modo in cui il corpo e il piede reagiscono alla forza e spiega i massicci cambiamenti nelle dimensioni del piede (circa una misura in lunghezza e due in larghezza) che si verificano durante il passo di un corridore. La flessibilità multidirezionale della suola imita questa forma che cambia, sia che esegua un movimento lineare oppure multidirezionale durante il training.

La flessibilità che ne risulta consente di tenere il piede, piuttosto che la scarpa, sotto controllo.

#### TECNOLOGIA

Per realizzare i nuovi modelli, i progettisti hanno utilizzato una nuova tecnologia di stampaggio a doppia iniezione. Usando il calore, anziché la colla, hanno fuso due schiume in un unico pezzo che presenta un supporto in schiuma ad alta densità e un nucleo più morbido. Questa particolare tecnologia di stampaggio ad iniezione sfruttando il calore consente di ottenere migliori risultati in particolare nell'ammortizzare le sollecitazioni.

#### PECULIARITA'

- adattamento della suola alla conformazione del piede
- ritorno elastico
- leggerezza

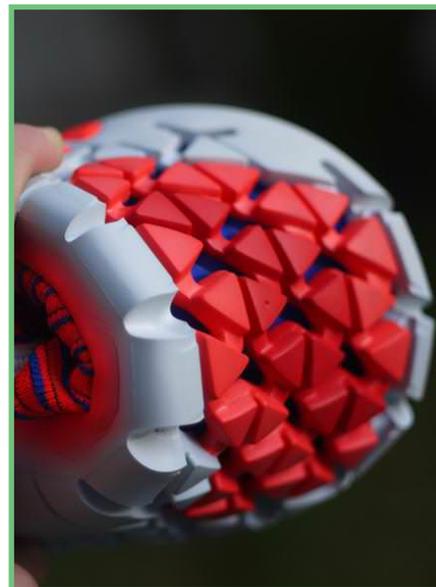
#### MATERIALI

Per la suola delle scarpe:

- schiume a diverse densità

Per la tomaia:

- tessuti variabili in base ai diversi modelli



i.29. dimostrazione del comportamento auxetico delle scarpe Nike Free

## Sport e benessere

# PNEUMATICI BICI GRAPHENE 2.0

Vittoria Corsa

anno 2019

[https://www.vittoria.com/it/it/storie/tech/graphene-2\\_0](https://www.vittoria.com/it/it/storie/tech/graphene-2_0)



L'azienda italiana Vittoria, casa produttrice di pneumatici per biciclette, nel 2019 ha rilasciato la seconda generazione di pneumatici da competizione su strada: Vittoria Corsa Graphene 2.0.

Il Graphene 1.0 era stato messo sul commercio all'inizio del 2016, ed è diventato subito popolare soprattutto per la sua morbidezza e bassa resistenza al rotolamento. Come per il Graphene 1.0, i nuovi pneumatici contengono fino a quattro mescole di gomma diverse, che permette di ottenere le migliori prestazioni su ogni parte del pneumatico, peculiarità dell'azienda che l'unica sul mercato degli pneumatici da ciclismo in grado di mescolare quattro differenti composti in un pneumatico. Con l'aggiunta del grafene, che interagisce con la gomma riempiendo lo spazio tra le molecole della gomma, i nuovi pneumatici dell'azienda italiana incarnano la perfezione della perfor-

dall'alto: i.30. pneumatici per biciclette - Graphene 2.0 di Vittoria Corsa

i.31. dettaglio del pneumatico Graphene 2.0

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

mance: morbidezza, rotolamento, durata, e prestazioni massimizzate in curva ed in frenata. A differenza del grafene di prima generazione, che l'azienda utilizzava in quantità limitate solo per migliorare certi aspetti del composto finale, il Graphene 2.0 è stato studiato per migliorare le prestazioni specifiche, ovvero punta sui singoli parametri di prestazione e li aumenta rispetto

agli altri per migliorare aderenza, velocità e resistenza.

#### TECNOLOGIA

Nello specifico si tratta di un'unione tra 4 mescole diverse, posizionate sia alla base del battistrada che in superficie, in posizione laterale e centrale, che permettono di ottenere le migliori proprietà su ogni parte del copertone.

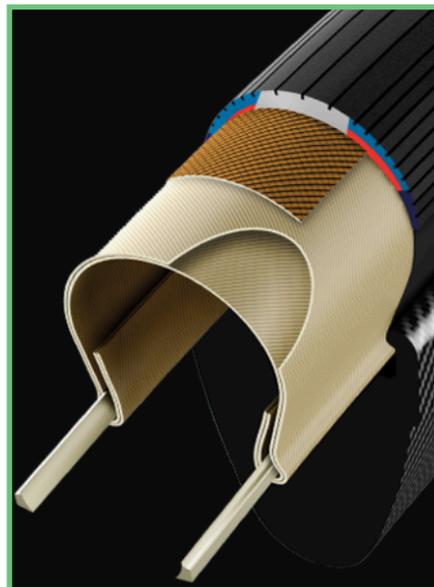
La parte centrale della carcassa: migliora la durevolezza del copertone e la resistenza alle forature; il battistrada centrale: migliora la velocità, la motricità e l'efficacia delle frenate; la parte laterale della carcassa: offre stabilità e rigidità sull'angolo; e i tasselli laterali: migliorano l'aderenza sull'angolo ed il grip su terreno bagnato.

#### PECULIARITA'

- morbidezza
- resistenza alle forature
- durata nel tempo
- migliore aderenza al terreno
- prestazioni migliori in frenata

#### MATERIALI

- Grafene
- 4 mescole composte da diversi tipi di gomma naturale e sintetica



i.32. composizione del pneumatico Graphene 2.0

## Sport e benessere

# NEOFIT ROLL

Neofit Products

anno 2018

<https://parametrichouse.com/neofit-roller/>



Neofit roll è un rullo fitness ripiegabile su se stesso, pensato per un mondo in continuo movimento, dove viaggiare è all'ordine del giorno.

Il rullo è realizzato in schiuma EVA ad alta densità tramite stampa 3D, che gli conferisce buona flessibilità, ottima elasticità e resistenza.

Il design in schiuma ad incastro si estende in modo coerente su tutto il corpo distribuendo uniformemente il peso sul rullo, che fornisce un potente rilascio miofasciale, della tensione muscolare, delle aderenze e dei punti trigger.

Neofit roll ha un diametro di 14 cm., quando è chiuso misura 10 cm. fino ad arrivare a 30 cm. di larghezza quando è completamente aperto. Nonostante sia ripiegabile è lo stesso estremamente resistente; è testato per resistere fino ad un peso massimo di 160 kg. circa, grazie alle caratteristiche geometriche applicate al rullo e alla scelta

dall'alto: i.33. rullo fitness - Neofit Roll

i.34. apertura e chiusura massima del rullo Neofit Roll

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

del materiale. È semplicissimo da usare: basta impugnarlo dai due manici laterali, tirarlo verso l'esterno fino all'altezza desiderata, usarlo come un qualsiasi altro rullo fitness, ed infine spingere da i due manici verso l'interno per richiuderlo. Grazie al sistema di autobloccaggio non c'è problema che si apra o si chiuda, se non appositamente tirato.

#### TECNOLOGIA

L'etilene vinil acetato, comunemente indicato con la dicitura EVA, è una materia plastica copolimerica di etilene e acetato di vinile.

L'EVA anche grazie alla sua capacità ammortizzante, che può essere in EVA morbido o EVA duro, è utilizzata per realizzare prodotti leggeri, flessibili, elastici e resistenti. E' anallergico, atossico ed è inattaccabile dai batteri, per questo viene anche utilizzato nella realizzazione dei giocattoli per bambini. La stampa 3D di schiume possiede una grande flessibilità nella realizzazione di strutture programmabili e risposta meccanica regolabile.

#### PECULIARITA'

- tascabile: dimensioni ridotte
- resistenza
- praticità
- adattamento alla conformazione fisica

#### MATERIALI

- schiuma EVA ad alta densità



i.35. dimostrazione di uno dei vari utilizzi del rullo Neofit Roll

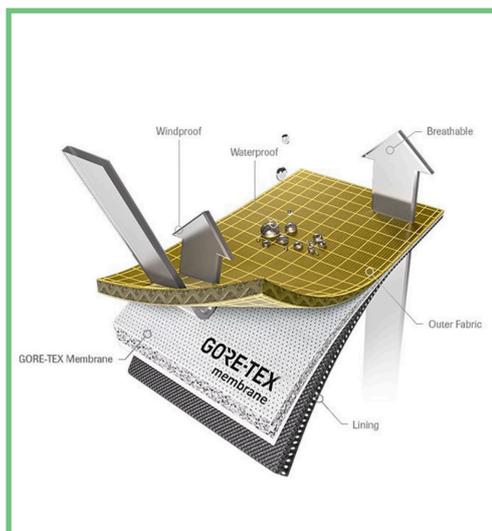
## Sport e benessere

# GIACCA PUEZ GORE-TEX SALEWA

Centro Design Salewa

anno 2021

<https://www.salewa.com/it-it/puez-gore-tex-paclite-giacca-uomo-00-0000028476>



La giacca Puez è progettata per essere il più leggera, comprimibile e traspirante possibile, senza compromettere la sua durabilità. La struttura a 2 strati presenta una membrana GORE-TEX unita direttamente a un guscio esterno coperto da uno strato protettivo durevole e dotato di una finitura DWR (idrorepellente a lunga durata) senza PFC. Inoltre, considerando l'attenzione per l'impegno ambientale, si è scelto di utilizzare una versione riciclata, anch'essa con la certificazione bluesign®. Questo guscio è estremamente traspirante ( $RET < 6 \text{ m}^2\text{Pa/W}$ ) e offre una considerevole protezione impermeabile (colonna d'acqua: 28.000 mm) con cuciture saldate e una cerniera frontale anch'essa impermeabile. Caratteristica principale della giacca Puez sono la sua traspirabilità unitamente all'impermeabilità, questo grazie alla membrana in GORE-TEX al suo interno.

dall'alto: i.36. composizione della membrana della giacca Puez di Salewa

i.37. zoom sulla tecnologia della membrana che conferisce l'impermeabilità alla giacca

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

Si tratta di una membrana in PTFE espanso, un materiale microporoso estremamente resistente. La membrana contiene oltre 1,4 miliardi di pori per centimetro quadrato. Ciascuno di questi pori microscopici è 20.000 volte più piccolo di una goccia d'acqua. È questa caratteristica a rendere impermeabile la membrana. Ciascuno di quei miliardi di pori è 700 volte più grande di

una molecola di vapore acqueo, ciò significa che l'umidità prodotta dal sudore fuoriesce facilmente.

#### TECNOLOGIA

La membrana di GORE-TEX si ottiene dal politetrafluoroetilene (PTFE) espanso. L'espansione di questo polimero avviene aggiungendo materiali espandenti quali, per esempio, il pentano, o qualsiasi altro idrocarburo, che bollono a temperature basse. Durante la fase di preparazione del polimero, che avviene a caldo, il materiale espandente si allontana e lascia "traccia" di sé nelle bolle che conferiscono "leggerezza" al prodotto finale. Nel caso specifico del GoreTex, l'espansione si ottiene termomeccanicamente, ovvero il filamento caldo viene teso con uno stratto secco.

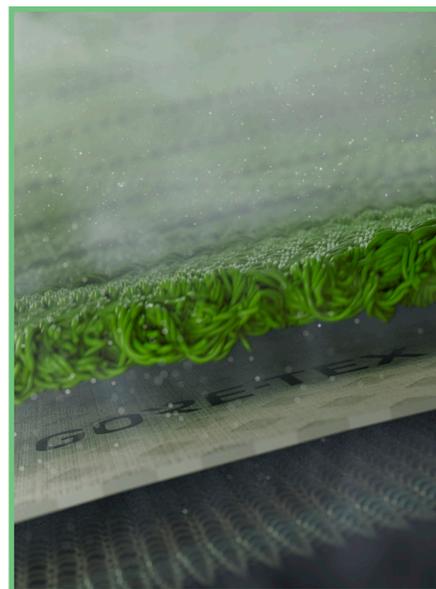
#### PECULIARITA'

- waterproof
- windproof
- traspirante
- leggerezza
- confortevole

#### MATERIALI

- GORE-TEX
- Poliestere

\*Le cuciture sono termosaldate



i.38. zoom sulla tecnologia della membrana che conferisce la traspirabilità alla giacca

### Medico sanitario



Ausili, protesi ed impianti che consentono la guarigione o la riabilitazione a problematiche di salute più o meno gravose. Si tratta di prodotti realizzati per lo più su misura, sfruttando il 3D Printing. Questa tecnologia consente di realizzare oggetti che si adattano alle misure antropologiche dell'utilizzatore ma anche estrema libertà nella geometria della struttura. Essendo supporti medicali che vanno a contatto o all'interno del corpo umano vengono utilizzati materiali biocompatibili.

#### PECULIARITÀ



*Realizzazione su misura*



*Flessibilità*



*Memoria di forma*

#### AUXETICITÀ



**Geometria**  
nei casi studio in cui l'esigenza principale è l'assorbimento di urti/elasticità

#### TECNOLOGIA



*Stampa 3D*



*Piegatura*



*Taglio*

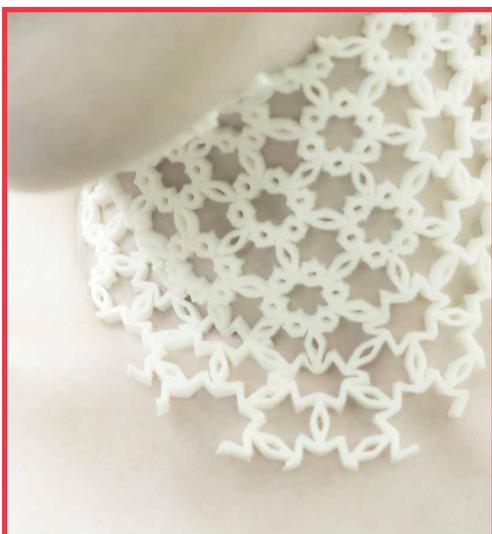
## Medico sanitario

# AUXETIC NECKBRACE

Fab Lab

anno n.d.

<https://www.hybriddesignlab.org/project/auxetic-neckbrace/>



La persona che utilizza un collare cervicale necessita di un massimo comfort, che si ottiene creando un ambiente stabile e protettivo, limitando i disagi causati dai comuni collari, come la perdita di traspirabilità e libertà di movimento, la non adattabilità alla morfologia del collo, difficoltà a svolgere alcune attività quotidiane e, infine, la sensazione di essere “malati” o “disabili” con quindi benefici fisici, ma anche psicologici. L'utilizzo della struttura auxetica è l'innovazione centrale del collare: sfruttando la logica intrinseca secondo cui queste strutture vengono utilizzate in natura, è in grado di offrire proprietà significative rispetto ai prodotti esistenti, permettendo la traspirazione cutanea grazie alla sua trama che non copre completamente il collo. Avendo la funzione di sostegno della testa, favorendo quindi la scarica meccanica dei muscoli ed il rilassamento degli stessi, la strut-

dall'alto: i.39. collare cervicale Auxetic Neckbrace

i.40. dettaglio geometria del collare Auxetic Neckbrace

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

tura auxetica garantisce soprattutto il movimento del collo, che è un'esigenza fondamentale per la guarigione delle patologie cervicali, contraendosi ed espandendosi in risposta alle azioni in arrivo dai dintorni. In pratica, se il collo presenta una deflessione, inducendo da un lato una contrazione dei muscoli e dall'altro la loro estensione, la struttura si contrarrebbe e

si espanderebbe contemporaneamente in diverse parti di esso con ingombro e fastidio minimo.

#### TECNOLOGIA

La geometria del collare e l'ottimizzazione strutturale saranno definite grazie a tecnologie di fabbricazione digitale, attraverso le quali si potranno ottenere protesi cervicali personalizzate, quindi centrate sullo specifico caso clinico.

Il materiale selezionato per la realizzazione del collare tramite stampa 3D, un materiale a base di gomma poliuretanic, Flex Skin, è stato sviluppato appositamente per essere sicuro al contatto con la pelle umana, priva di agenti cancerogeni e che non rilasci sostanze chimiche in il sistema endocrino.

#### PECULIARITA'

- resistente
- flessibile
- traspirante
- gradevole esteticamente
- adattamento conformazione fisica

#### MATERIALI

- gomma poliuretanic Flex Skin



i.41. vista laterale del collare Auxetic Neckbrace

## Medico sanitario

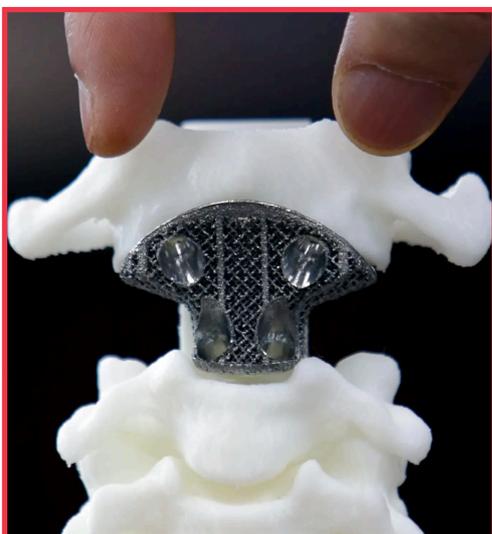
# JUST-IN-TIME IMPLANTS

Stryker  
anno 2016

<https://www.imcrc.org/just-in-time-implants/>



Il progetto di ricerca si chiama “Just in time implants” ed è sviluppato dall’azienda australiana Stryker, specializzata nella produzione di dispositivi medici, cofinanziato dall’Innovative Manufacturing Cooperative Research Center (IM-CRC). La collaborazione combinerà la produzione avanzata, la chirurgia robotica e la stampa 3D per realizzare impianti personalizzati per i pazienti affetti da cancro alle ossa.



Ciò sarà raggiunto attraverso lo sviluppo di un software di analisi delle immagini e di progettazione implantare, combinato con una precisa resezione robotica del tumore. Riducendo l’attuale lead time per produrre un impianto solido, gli impianti personalizzati a struttura reticolare hanno lo scopo di migliorare l’integrazione a lungo termine con l’osso. La rimozione robotica del tumore consentirà di ottenere margini più esatti, riducendo così il

dall’alto: i.42. ricostruzione di un bacino tramite il processo di stampa 3D

i.43. modello di una colonna vertebrale con un asse artificiale stampato in 3D

tasso di recidiva del tumore. L'approccio combinato massimizzerà la ritenzione delle ossa e dei tessuti molli del paziente e ridurrà la durata della degenza ospedaliera.

### TECNOLOGIA

La produzione additiva, o stampa 3D, è il settore manifatturiero in più rapida crescita a livello globale, grazie ai numerosi vantaggi che offre in termini di sviluppo di nuovi prodotti, riduzione degli sprechi e costo del prodotto.

Grazie alla stampa 3D si ha la massima libertà nel realizzare la geometria del reticolo strutturale della protesi.

Una forma auxetica conferisce una maggior resistenza.

### PECULIARITA'

- rapidità nella realizzazione
- riduzione rischio recidività tumore
- degenza del paziente più rapida
- realizzazione su misura della protesi
- integrazione con il tessuto osseo

### MATERIALI

- materiali biocompatibili



i.44. ricostruzione di una sezione ossea mediante stampa 3D

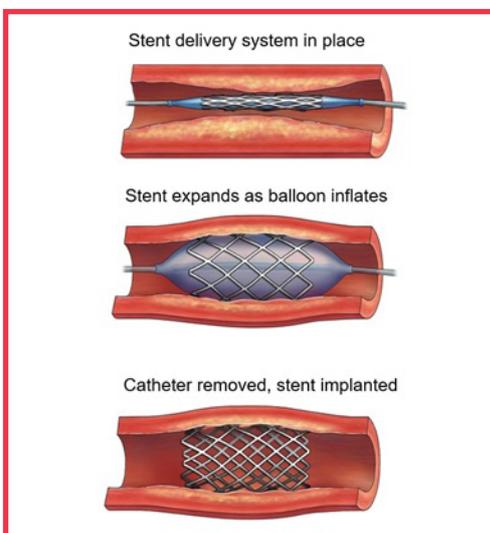
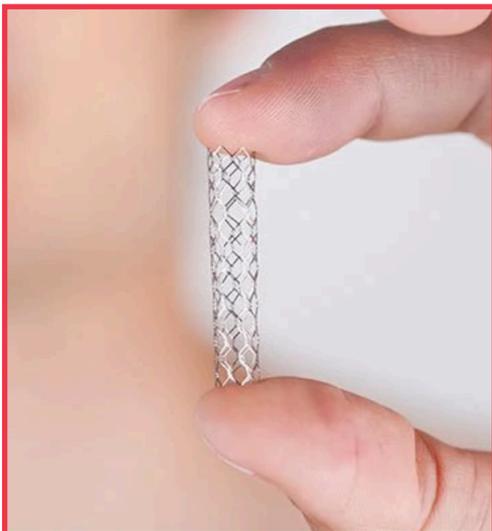
## Medico sanitario

# STENT VASCOLARI

Hans Wallstén

anno 1982

<https://www.humanitas.it/enciclopedia/strumenti-medici/stent/>



Lo stent è un tubicino a rete metallica che può essere introdotto negli organi a lume (cioè cavi, come i vasi sanguigni o l'intestino) al fine di sostenerne le pareti interne. Il suo utilizzo è particolarmente comune in ambito vascolare, con inserimento di stent nelle arterie che presentano restringimenti o caratterizzate da debolezza. È il caso dell'intervento di angioplastica coronarica, in cui il posizionamento dello stent consente di mantenere pervio il vaso consentendo il flusso ematico. Giunti nella sede da trattare viene posizionato il catetere che ha lo stent nella parte terminale (alle volte con l'ausilio di un palloncino portante) nel punto preciso all'interno del vaso: questa tecnica va eseguita sotto stretto monitoraggio radiologico e con il mezzo di contrasto, che permette di vedere il lume dell'arteria. Grazie alla sua struttura auxetica, lo stent una volta posizionato, applican-

dall'alto: i.45. stent vascolare periferico

i.46. illustrazione dell'impianto di uno stent vascolare

do una forza longitudinale questo si “apre” andando a contatto con le pareti dell’arteria e mantenendola in condizioni che permetta il regolare afflusso di sangue.

### TECNOLOGIA

Le leghe di nitinol (nickel-titanio) presentano una combinazione di proprietà che rendono queste leghe particolarmente adatte per stent autoespandibili. Il meccanismo di deformazione è molto diverso dall’elasticità convenzionale o semplicemente dall’allungamento dei legami atomici. Mentre la superelasticità è il risultato di una trasformazione di fase indotta dallo stress, la memoria di forma è il risultato di una trasformazione di fase termica. Quando il Nitinol superelastico viene raffreddato al di sotto di una temperatura critica, cambia anche la sua struttura cristallina.

### PECULIARITA’

- miglior aderenza
- evita la migrazione dello stent
- maggior efficacia
- nessun restringimento dell’arteria

### MATERIALI

- materiali biocompatibili
- lega Nitinol



i.47. stent vascolare con catetere a palloncino

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

#### Architettura e design



I casi studio analizzati sono oggetti e strutture di design. Si tratta di prototipi, serie limitate e pezzi unici. La caratteristica che li accomuna è la geometria auxetica che va a definire il design della struttura, inoltre in alcuni casi consente la mutabilità della forma di quest'ultima. Il caso studio della Lampada di Hannabi pur avendo le stesse peculiarità si differenzia per le proprietà intrinseche del Nitinol con cui viene realizzata.

#### PECULIARITÀ



*Design*



*Mutabilità di forma*



*Libertà di forma*

#### AUXETICITÀ



**Geometria**  
nei casi studio in cui l'esigenza principale è l'assorbimento di urti/elasticità



*Taglio*



*Stampa 3D*



*Giunti e cerniere*

## Architettura e design

# LAMPADA HANABI

Oki Sato per Nendo

anno 2006

<https://www.nendo.jp/en/works/hanabi-2/>



Hanabi è una lampada contemporanea, realizzata nel 2006 in occasione del Salone del Mobile di Milano, dal designer giapponese Oki Sato, per Nendo azienda da lui stesso fondata.

L'idea è quella di illuminare attraverso una forma mutevole e mutante.

La lampada è realizzata in Nitinol, una lega a memoria di forma di nichel e titanio con una percentuale atomica pressappoco uguale dei due elementi, che ha la capacità di ripristinare la sua forma iniziale dopo aver subito un dato trattamento termico. La lampada si presenta con un corpo bianco opaco, costituito da una parte lineare e da un'altra che mutua la sua forma grazie alla temperatura della lampadina. Hanabi termine giapponese che indica i fuochi d'artificio, significa letteralmente "fiore e fuoco", infatti la lampada Hanabi oltre a svolgere la funzione per la

dall'alto: i.48. lampada Hanabi in transizione da accesa a spenta

i.49. lampada Hanabi accesa

quale è stata progettata, rimanda alla morfologia del fiore: ovvero una bellezza effimera, e come esso è volta a svenire in poco tempo (i viticci alludono ai petali, il bulbo di vetro al pistillo e il cavo allo stelo). Hanabi è un oggetto di design ipercodificato, in quanto sulla base di un prodotto già esistente (Lampada Protea, 2005, di Karl Zahn), propone una regola addittiva per un'applicazione migliore.

#### TECNOLOGIA

L'intermetallo Ni-Ti (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory), nonostante sia composto per circa la metà da Nichel è un materiale con un'elevata biocompatibilità, inoltre ha una buona duttilità e presenta una deformazione recuperata del 8,5%. Grazie a queste caratteristiche insieme alla sua superelasticità lo rendono appropriato per varie applicazioni, dove può operare da attuatore recuperando la sua forma iniziale. Si deve però prestare attenzione alla temperatura di esercizio nella specifica applicazione per ottenere il massimo rendimento della sua proprietà di memoria di forma.

#### PECULIARITA'

- memoria di forma
- mutabilità
- superelasticità
- simbolismo
- oggetto ipercodificato

#### MATERIALI

- Nitinol: nichel e titanio



i.50. lampada Hanabi spenta

## Architettura e design

# SCARPE COL TACCO

Carnegie Mellon University

anno 2016

[https://lgg.epfl.ch/auxetics\\_case\\_study.php?case=shoe](https://lgg.epfl.ch/auxetics_case_study.php?case=shoe)



La scarpa ausiliare è un progetto sviluppato nel 2016 dai ricercatori del Carnegie Mellon University, con sede a Pittsburg in Pennsylvania.

I ricercatori hanno stampato in 3D la base della scarpa, successivamente hanno modellato il foglio di metallo attraverso uno strumento di progettazione computazionale in grado, anche, di determinare il modello di fessure necessarie per rendere la lastra conforme alla forma desiderata. Infine, il prodotto viene trasferito al taglio laser per il processo di fabbricazione.

In questo progetto attraverso la geometria conforme, che studia le mappe tra spazi in cui le lunghezze si espandono e si restringono uniformemente, vengono realizzate una serie di fessure esagonali nel foglio di metallo per creare elementi triangolari capaci di ruotare rispetto a quelli adiacenti, consentendo al materiale di espandersi uniformemente fino ad un certo punto.

dall'alto: **i.51.** scarpa ausiliare della Carnegie Mellon University

**i.52.** vista posteriore del progetto della scarpa ausiliare

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

Alla cucitura della scarpa una fila di triangoli viene raddoppiata per consentire un facile incollaggio lungo i bordi. I fogli di metallo sono convenienti per esplorare come realizzare questi disegni complessi, ma lo strumento di progettazione computazionale potrebbe dimostrarsi molto utile per una grande varietà di materiali auxetici, che posseggono già qualità distintive grazie alla loro struttura.

#### TECNOLOGIA

Per risolvere i problemi di progettazione i progettisti si affidano all'intuizione e all'esperienza, mentre la progettazione computazionale migliora tale processo codificando le decisioni di progettazione tramite un linguaggio informatico.

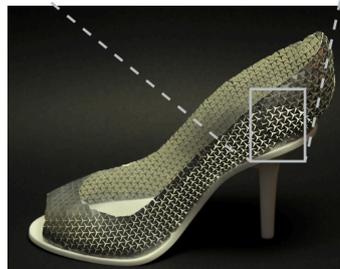
La progettazione computazionale si basa sulla programmazione visiva, rispetto alla progettazione tradizionale che si basa sulla programmazione testuale. L'obiettivo dello strumento computazionale non è quello di dimostrare il risultato finale, ma piuttosto è quello di documentare i passaggi necessari per ottenere quel risultato.

#### PECULIARITA'

- leggerezza
- resistenza
- elevata traspirabilità
- adattamento alla conformazione fisica

#### MATERIALI

- foglio di metallo
- PLA



i.53. dettaglio della geometria della scarpa ausiliare

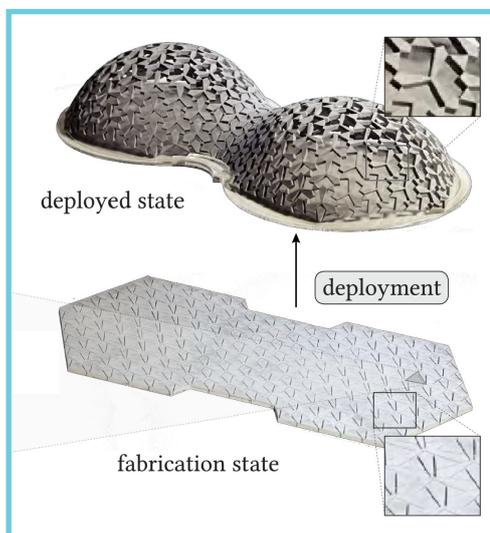
## Architettura e design

# DEPLOYABLE DOME

Association for Computing Machinery

anno 2018

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2019.00086/full>



Le strutture dispiegabili concepite principalmente per requisiti di spazio, spesso sono utilizzate per antenne o pannelli solari sui satelliti, come stent coronarici in applicazioni mediche, per spazi per eventi temporanei o trasferibili.

Il deployable dome si basa su un collegamento planare di trinagoli rigidi collegati ai vertici da giunti rotazionali. La rotazione dei triangoli nel piano induce un espansione o contrazione isotropa in area, che consente un'interpretazione geometrica in termini di mappe conformi. La maggior parte delle strutture dispiegabili esistenti sono geometricamente semplici e spesso mostrano forti simmetrie. Per mezzo dello strumento di progettazione computazionale viene precalcolato una libreria di celle auxetiche bistabili, per coprire una gamma di rapporti di espansione/contrazione nel piano, massimizzando la bistabilità e la rigidità del-

dall'alto: **i.54.** struttura dispiegabile come spazio per eventi, copertura campi sportivi ed altro  
**i.55.** processo di transizione di una struttura dispiegabile

la cella per garantire un'implementazione robusta. La struttura dispiegabile può essere fabbricata e assemblata in piano, e distribuita automaticamente nella sua configurazione di destinazione 3D, senza la necessità di impalcature o altre strutture di supporto temporanee. Il dispiegamento automatico avviene tramite inflazione o carico gravitazionale, per il quale è viene fornita una rigorosa analisi.

#### TECNOLOGIA

Al contrario delle geometrie semplici della maggior parte delle strutture dispiegabili, il design computazionale coinvolge geometrie complesse e design avanzato.

Per mezzo degli strumenti di progettazione computazionale si semplifica la simulazione delle prestazioni della struttura progettata.

Ovviamente gli architetti dovranno imparare i linguaggi e i codici di programmazione, dato che i problemi che dovranno risolvere non saranno tra le capacità di un software, perciò la necessità è quella di creare e personalizzare gli strumenti di lavoro.

#### PECULIARITA'

- resistenza
- facilità di fabbricazione e assemblaggio
- cupole a forma libera: nessuna limitazione di dimensione e forma

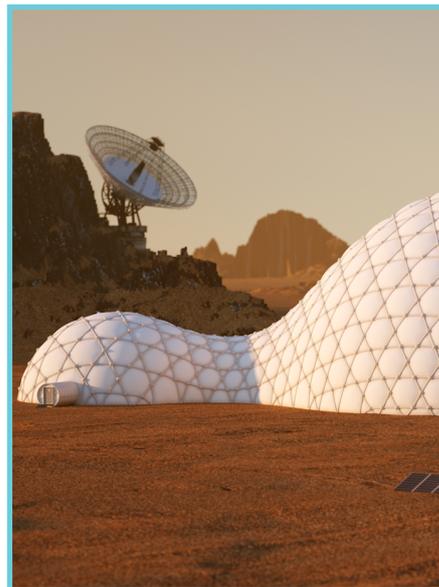
#### MATERIALI

copertura:

- PVC

giunti rotazionali:

- metallo



i.56. render di una struttura dispiegabile come base spaziale

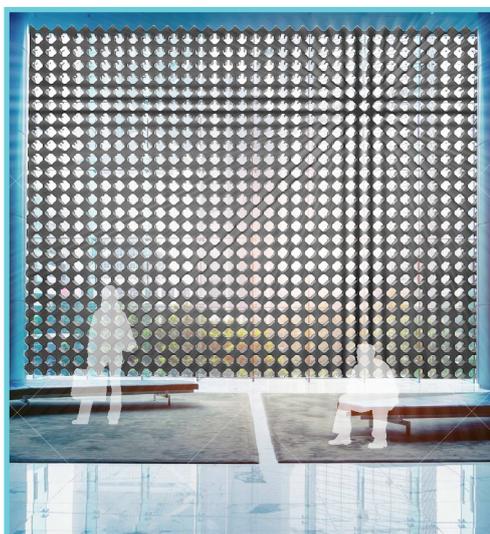
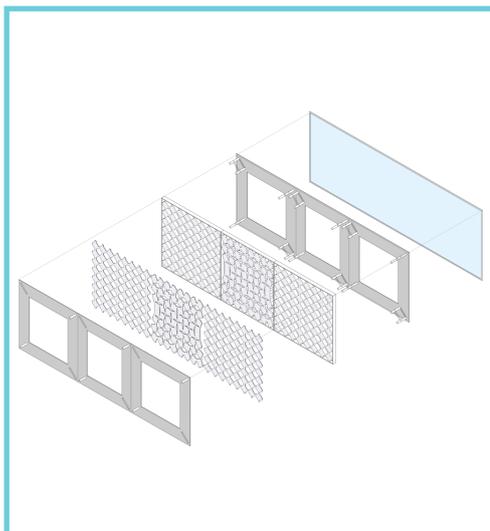
## Architettura e design

# HEAT-ACTUATED AUXETIC FACADES

Amira Abdel-Rahman

anno 2015

<http://www.amiraabdelrahman.com/portfolio/heat-actuated-auxetic-facades/>



Questo progetto è un'indagine sperimentale e computazionale incentrata sulla progettazione e lo sviluppo di materiali e modelli auxetici che, possono essere utilizzati come sistemi adattivi di ombreggiamento esterno, sfruttando la relazione tra stimoli esterni (calore) e facciate riconfigurabili al fine di progettare nuovi sistemi cinetici passivi.

I primi prototipi sono stati realizzati utilizzando la stampa 3D multi materiale con polimeri a memoria di forma, mentre i prototipi su larga scala sono stati realizzati con schiume ad alta densità tagliate con getti d'acqua. Le geometrie appartengono ad una famiglia di modelli auxetici composti da piccole unità, che si deformano individualmente sotto l'influenza di forze esterne provocando l'apertura e la chiusura graduale delle porosità, nell'intera struttura. Per testare l'illuminazione diurna del sistema di

dall'alto: **i.57.** composizione della facciata auxetica che reagisce alla luce ed al calore

**i.58.** render della facciata auxetica come sistema di ombreggiamento

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

ombreggiamento è stato applicato un sistema dinamico che utilizza un modello auxetico, che quindi è stato simulato e ottimizzato utilizzando Honeybee su Grasshopper. Il movimento risultante delle celle su un sistema di facciata offre nuove funzionalità e un'estetica particolare. Infine, il sistema di ombreggiamento proposto può aiutare a ridurre il consumo energetico to-

tale di un edificio, migliorandone le prestazioni di luce diurna.

#### TECNOLOGIA

Quasi certamente Grasshopper è lo strumento di progettazione computazionale più noto: strumento di modellazione algoritmica per Rhino (software di modellazione 3D).

E' facilissimo generare centinaia o addirittura migliaia di opzioni codificando le regole in un framework computazionale. Per di più, ogni opzione può essere analizzata con criteri specifici per definire la soluzione più adatta. Per realizzare un progetto non esiste un unico software capace di fare tutto quello di cui necessitiamo, ma possiamo creare gli strumenti per adattare il software in modo che lavori per noi.

#### PECULIARITA'

- mutabilità
- miglioramento estetico
- riduzione consumo energetico
- migliore prestazione della luce naturale

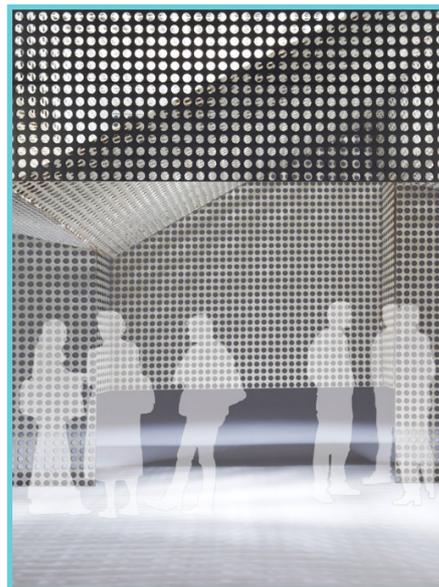
#### MATERIALI

PRIMI PROTOTIPI:

- multi materiale con polimeri a memoria di forma per stampa 3D

PROTOTIPI DEFINITIVI:

- schiume ad alta densità



i.59. render della facciata auxetica come divisore di spazi

## Sicurezza



I casi studio analizzati non sono veri e propri prodotti finiti ma più che altro dei semilavorati che vengono utilizzati in ambito di protezione e sicurezza. Questi elementi trovano il loro impiego in oggetti altamente performanti in campo militare e sportivo. La progettazione della loro struttura è strettamente legata alla tipologia di sollecitazione/urto che deve fronteggiare.

### PECULIARITÀ



**Leggerezza**



**Assorbimento urti**



**Resistenza ad usura**

### AUXETICITÀ



**Materiale**  
nei casi studio in cui l'esigenza principale è la resistenza all'usura o la traspirabilità/waterproof

### TECNOLOGIA



**Espansione**



**Tessitura**



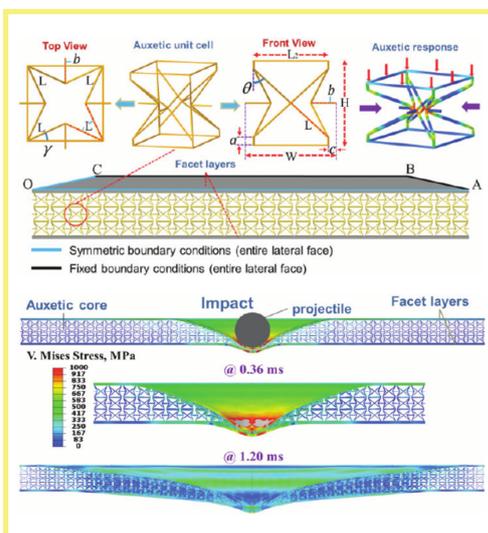
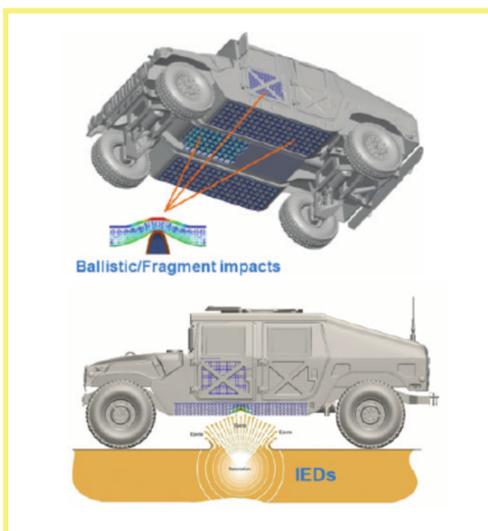
**Assemblaggio**

## Sicurezza

# PROTEZIONE PER VEICOLI BLINDATI

M.I.Khan, M.Umair, Y.Nawab  
anno 2021

[https://www.researchgate.net/publication/334469262\\_IUCr\\_](https://www.researchgate.net/publication/334469262_IUCr_)



Il personale e i veicoli militari durante le operazioni, sono esposti a pericoli balistici ed esplosivi. I sistemi di armature leggere vengono utilizzati in situazioni in cui sono presenti limitazioni di peso, ad esempio con elicotteri, motovedette e rifugi trasportabili.

Il materiale ideale in un sistema di armature deve assorbire l'energia localmente ed essere in grado di distribuirla, in modo rapido ed efficiente.

Per migliorare le caratteristiche di sicurezza dei mezzi militari blindati sono stati creati dei pannelli protettivi in materiale auxetico, che vengono applicati sul pianale inferiore e sulle scocche laterali dell'abitacolo.

Si tratta di pannelli sandwich formati da due layers esterni in metallo, ed un nucleo auxetico formato da centinaia di celle, progettate e modellate con elementi a trave, disposte su tre piani. I layers es-

dall'alto: i.60. applicazione di pannelli auxetici per migliorare la resistenza agli urti dei veicoli blindati  
i.61. schema rappresentativo del comportamento di una cella unitaria e di un pannello auxetico

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

terni evitano che i proiettili o le schegge penetrino e danneggino il nucleo auxetico, mentre quest'ultimo risolve la funzione di assorbire la forza d'urto deformando la sua struttura. Le celle sono prodotte tramite tecnologia additiva che consente di realizzare strutture in diverse forme e scale dimensionali, andando incontro però ad elevati costi di produzione.

#### **TECNOLOGIA**

Le tecnologie di protezione per i veicoli blindati sono state sviluppate in conformità con i requisiti delle forze armate per i sistemi di protezione attiva con una riduzione della massa totale, allo scopo di evitare di installare pesanti piastre di armatura.

Nei sistemi dei computer dell'area tecnica sono presenti tutte le specifiche dei veicoli in circolazione, dove per ogni veicolo è disponibile un programma di taglio laser su materiali balistici speciali. Le sospensioni, la trasmissione, i semiassi, i braccetti e lo sterzo, vengono rimpiazzati con dei kit a seconda del livello di protezione.

#### **PECULIARITA'**

- grande assorbimento degli urti
- resistenza al fuoco
- termo isolante
- forma libera: nessuna limitazione di dimensione e forma

#### **MATERIALI**

- pannelli sandwich formati da 2 livelli esterni in metallo e un nucleo auxetico composto da centinaia di celle



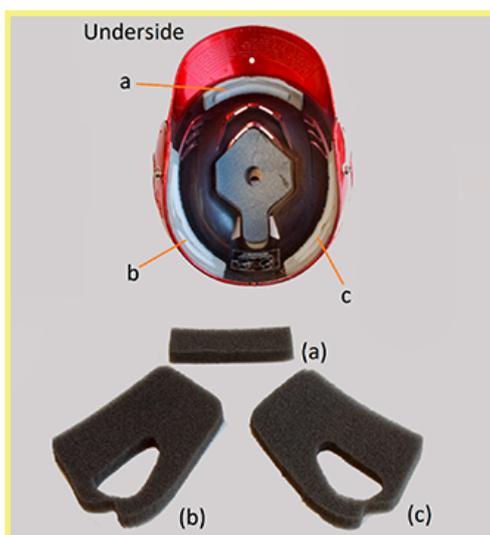
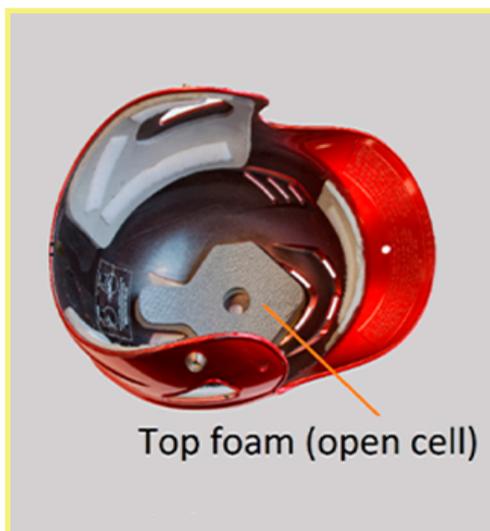
i.62. scudo antiproiettile - BulletSafe

## Sicurezza

### **DPI NELLO SPORT**

L.Foster, P.Peketi, T.Senior e T.Allen  
anno 2018

<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/3/354/htm>



I DPI (dispositivi di protezione individuale) vengono impiegati per ridurre al minimo il rischio di infortuni, in cui può incorrere una persona durante la pratica dello sport. In particolare analizzando il caso dei caschi da baseball, si sta prendendo in considerazione l'idea di utilizzare schiume auxetiche per migliorare le caratteristiche di assorbimento degli urti e protezione dell'atleta.

Per valutare la prestazione di questi dispositivi sovente si simula un impatto, dove viene misurata la capacità di limitare l'accelerazione o la forza lineare di picco. Per attenuare l'accelerazione lineare, i materiali del casco sono di solito viscoelastici, come le schiume a base di plastica, sostituendole però con schiume auxetiche a cellula aperta si è riscontrato un netto miglioramento nella capacità di ridurre la forza d'urto, che viene trasmessa alla persona.

dall'alto: **i.63.** inserto superiore in schiuma EVA a celle aperte

**i.64.** inserti in schiuma EVA a celle chiuse, con marcatori che mostrano il loro posizionamento

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

Infatti, la schiuma convenzionale nei test di impatto laterale sembrava reagire nello stesso modo ai test di impatto frontale, mentre la schiuma auxetica nei test di impatto laterale ha registrato indici di gravità immensamente inferiori. Questo studio è limitato ad un modello di casco specifico, per replicare questi risultati per una gamma di caschi nei vari sport sono necessari ulteriori esperimenti.

#### **TECNOLOGIA**

Rispetto alla sua controparte convenzionale, la schiuma di poliuretano auxetico a cellule aperte è fabbricata con un processo di compressione e trattamento termico. La schiuma di poliuretano, durante il processo di conversione, è stata compressa al 70% della sua dimensione originale lungo ciascuna dimensione.

I risultati dei test di compressione hanno dimostrato che la schiuma convertita è auxetica, con un rapporto di Poisson di  $-0,08$ . I test di impatto sono stati eseguiti con uno strumento di caduta ad alta velocità basato sulla capacità dei campioni di attenuare l'accelerazione di impatto.

#### **PECULIARITA'**

- leggerezza
- resistenza
- grande assorbimento degli urti
- adattamento alla conformazione fisica

#### **MATERIALI**

- caschi generici:
- schiume a base di plastica
- casco oggetto del caso studio:
- schiume auxetiche a cellula aperta



i.65. schiuma EVA a celle chiuse

## Sicurezza

### **KEVLAR**

Stephanie Kwolek

anno 1965

<https://www.dupont.it/kevlar/what-is-kevlar.html>



Nel 1965 Stephanie Kwolek, una ricercatrice della DuPont (azienda chimica fondata nel 1802 a Wilmington, Delaware), inventa una fibra para-aramidica: il Kevlar. Le caratteristiche principali di questa fibra sono la resistenza al calore, la leggerezza (20% maggiore di altre fibre) e la grande resistenza meccanica alla trazione che, grazie alla sua struttura chimica composta da diversi legami intercatena reticolati con legami di idrogeno, conferisce una resistenza alla trazione 10 volte maggiore rispetto all'acciaio a parità di peso. Il Kevlar è realizzato per condensazione in soluzione a partire dai monomeri 1,4-fenilendiammina (para-fenilendiammina) e cloruro di tereftaloile, dove come sottoprodotto di reazione si ottiene acido cloridrico. Uno degli utilizzi più noti del Kevlar è nel campo della sicurezza e protezione, tra questi quello più significativo è il giubbotto antiproiettile.

dall'alto: i.66. Kevlar tessuto fibra aramidica

i.67. guanti in tessuto Kevlar con impugnatura a punti in PVC su entrambi i lati

### 3. TIPOLOGIE DI STRUTTURE AUXETICHE NEI VARI AMBITI

Quando un proiettile colpisce il giubbotto in kevlar, grazie alle fibre che sono così strettamente filate da essere impossibile separarle, il colpo viene assorbito e ne viene dissipata l'energia. Però il kevlar è inefficace contro corpi perforanti come coltelli o proiettili speciali, per proteggere da questi tipi di attacchi, al tessuto sono aggiunte lastre metalliche in lega leggera.

#### **TECNOLOGIA**

Il Kevlar è un polimero, con unità ripetitive che sono collegate tra loro per creare una molecola più grande. Queste catene si allineano parallelamente l'una all'altra, mostrando quello che è noto come comportamento nematico. Spesso viene composto con altri materiali, per ottenere tessuti con proprietà migliorate, come gli indumenti resistenti al fuoco. Esistono molti tipi diversi di Kevlar, ma quelli principali sono:

A) Kevlar 29, adottato nella produzione di protezioni per veicoli militari leggeri. B) Kevlar 49, che viene utilizzato per scafi di barche e nell'industria aerospaziale

#### **PECULIARITA'**

- grande assorbimento degli urti
- leggerezza
- resistenza al calore
- resistenza alla trazione 10 volte più rispetto all'acciaio

#### **MATERIALI**

- Kevlar: monomeri 1,4-fenilendiammina (para-fenilendiammina) e cloruro di tereftaloile



i.68. giubbotto antiproiettile in Kevlar  
- BulletSafe

## SITOGRAFIA (CAPITOLO 3)

[s.18] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/747/1/012008/pdf>

[s.19] <https://www.nature.com/articles/natrevmats201778>

[s.20] <https://stamparein3d.it/tu-delft-presenta-un-impianto-dellanca-stampato-in-3d-con-degli-innovativi-bio-metamateriali-ibridi-18451-2/>

[s.21] <https://www.imperialatletica.it/notizie/materiali-innovativi-e-tecnologie-smart-nelle-discipline-sportive/>

[s.22] <https://lucagargiulo.com/2019/12/12/test-vittoria-corsa-g2/>

[s.23] <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/3430524.3444636>

[s.24] <https://patents.google.com/patent/US20110155137>

[s.25] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8285110/>

[s.26] <https://medcraveonline.com/JTEFT/auxetic-textile-materials---a-review.html>

[s.27] [http://tesi.cab.unipd.it/43877/1/Tesi\\_zecchetto\\_auxetici.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/43877/1/Tesi_zecchetto_auxetici.pdf)

[s.28] <http://it.scienceaq.com/nanotecnologia/1002099063.html>

[s.29] <https://www.dupont.it/kevlar/what-is-kevlar.html>

[s.30] <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ta/d0ta02590a>

[s.31] <https://www.prezzisalute.com/Sport/Gore-Tex.html>

[s.32] [https://torino.corriere.it/piemonte/21\\_novembre\\_07/dal-cuore-tumori-interventi-record-nuove-frontiere-medicina-torinese-3b1a8156-3fe1-11ec-a86a-9c702b71a66e.shtml](https://torino.corriere.it/piemonte/21_novembre_07/dal-cuore-tumori-interventi-record-nuove-frontiere-medicina-torinese-3b1a8156-3fe1-11ec-a86a-9c702b71a66e.shtml)

[s.33] <https://engineering.exeter.ac.uk/research/etg/research/auxetics/>

[s.34] <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/innovativi/grafene-produzione-applicazioni-prezzo-materiale-241>

[s.35] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2019.00086/full>

[s.36] <https://www.futurity.org/auxetic-materials-tool-1210592-2/>

## SITOGRAFIA IMMAGINI (CAPITOLO 3)

[i.24] <https://mtb-vco.com/159343-dainese-presenta-la-gamma-di-protezioni-trail-skins-ispirata-alle-forme-auxetiche/>

[i.25] <https://www.dainese.com/it/it/journal.html?id=auxetics-for-perfect-peddaling>

[i.26] <https://www.pianetamountainbike.it/e-bike/63907-abbigliamento/61306-dainese-trail-skins-protezioni>

[i.27] <https://www.runningshoesguru.com/2016/08/nike-free-rn-motion-flyknit-review/>

[i.28] <https://weartesters.com/unveiled-today-nike-free-rn-motion-flyknit/>

[i.29] <https://www.runningshoesguru.com/2016/08/nike-free-rn-motion-flyknit-review/>

[i.30] <https://www.vittoria.com/it/it/storie/tech/costruzione-pneumatici-tubeless>

[i.31] <https://www.mundobici.co/blog/llantas-de-vittoria-corsa/>

[i.32] <https://www.vittoria.com/it/it/storie/tech/costruzione-pneumatici-tubeless>

[i.33] <https://parametrichouse.com/neofit-roller/>

[i.34] <https://parametrichouse.com/neofit-roller/>

[i.35] <https://parametrichouse.com/neofit-roller/>

[i.36] <https://www.giannonesport.com/wp/gore-tex-cose-e-come-manuten-erlo/>

[i.37] <https://www.innovationintextiles.com/goretex-introduces-epe-membrane/>

[i.38] <https://sustonmagazine.com/2022/03/31/gores-journey-of-responsible-performance/>

[i.39] <https://www.hybriddesignlab.org/home/project/auxetic-neckbrace/>

[i.40] <https://www.hybriddesignlab.org/home/project/auxetic-neckbrace/>

- [i.41] <https://www.hybriddesignlab.org/home/project/auxetic-neckbrace/>
- [i.42] <https://www.theguardian.com/business/2014/aug/24/medical-implants-drive-3d-printer-growth>
- [i.43] <https://todaysmedicaldevelopments.com/news/medical-device-design-additive-manufacturing-eos-hipbone-implant-production-91715/>
- [i.44] <https://www.stampa3dstore.com/ossa-stampate-in-3dcome-cambia-la-chirurgia-ortopedica/>
- [i.45] <https://intercenter.regione.emilia-romagna.it/notizie/2019/giugno/201-cstent-vascolari-periferici201d-pubblicato-il-primo-accordo-quadro>
- [i.46] <http://www.vhlab.umn.edu/atlas/device-tutorial/stents/index.shtml>
- [i.47] <https://guide.medicaexpo.com/it/come-scegliere-uno-stent/>
- [i.48] <https://www.area-arch.it/hanabi/>
- [i.49] <https://www.area-arch.it/hanabi/>
- [i.50] <https://www.area-arch.it/hanabi/>
- [i.51] <https://www.cs.cmu.edu/~kmcrane/Projects/AuxeticDesign/paper.pdf>
- [i.52] <https://www.cs.cmu.edu/~kmcrane/Projects/AuxeticDesign/paper.pdf>
- [i.53] <https://www.cs.cmu.edu/~kmcrane/Projects/AuxeticDesign/paper.pdf>
- [i.54] <https://www.cs.cmu.edu/~kmcrane/Projects/DeployableAuxetics/paper.pdf>
- [i.55] <https://www.cs.cmu.edu/~kmcrane/Projects/DeployableAuxetics/paper.pdf>
- [i.56] <https://www.cs.cmu.edu/~kmcrane/Projects/DeployableAuxetics/paper.pdf>
- [i.57] <http://www.amiraabdelrahman.com/portfolio/heat-actuated-auxetic-facades/>
- [i.58] <http://www.amiraabdelrahman.com/portfolio/heat-actuated-auxetic-facades/>
- [i.59] <http://www.amiraabdelrahman.com/portfolio/heat-actuated-auxetic-facades/>

[i.60] [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-design-of-a-single-unit-cell-and-of-an-auxetic-sandwich-panel-Only-a-quadrant\\_fig2\\_285618123](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-design-of-a-single-unit-cell-and-of-an-auxetic-sandwich-panel-Only-a-quadrant_fig2_285618123)

[i.61] [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-design-of-a-single-unit-cell-and-of-an-auxetic-sandwich-panel-Only-a-quadrant\\_fig2\\_285618123](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-design-of-a-single-unit-cell-and-of-an-auxetic-sandwich-panel-Only-a-quadrant_fig2_285618123)

[i.62] <https://www.quora.com/Are-shields-in-anyway-effective-against-bullets-If-so-why-arent-modern-shields-included-as-part-of-the-soldiers-equipment>

[i.63] <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/3/354/htm>

[i.64] <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/3/354/htm>

[i.65] <https://amiciteam.com/crashworthiness-assessment-of-auxetic-foam/>

[i.66] <https://riuscomposites.com/kevlar/86-kevlar-tessuto-fibra-aramidica-170-gm-10m.html>

[i.67] <https://safetysourcellc.com/safety-supplies/hand-protection/cut-resistant-gloves/pip-08-k300PD-kut-gard-seamless-knit-kevlar-glove-with-PVC-dot-grip-medium-weight/>

[i.68] <https://www.pngall.com/it/vest-png>



# **4. LETTURA CRITICA**

## 4. LETTURA CRITICA

La nostra analisi sui casi studio ha preso in esame molteplici aspetti di questi esempi di applicazione dei materiali auxetici.

Abbiamo messo in evidenza le principali **peculiarità**, le **tecnologie** e i **materiali** (intesi come materie prime) con cui vengono realizzati i prodotti/prototipi, ed infine da cosa deriva la loro **auxeticità**.

Il confronto di tutte queste informazioni ci ha portato a suddividere i vari casi, oltre che per il loro ambito d'applicazione, anche per queste caratteristiche; in questo modo si è potuto realizzare anche una statistica con i vari dati.

Dalle tavole e i grafici a seguire possiamo capire quindi **come si sviluppano i materiali auxetici** nel mondo del design e dei prodotti di consumo.

## AUXETICITA'



### Geometria



Scarpa Nike Free



Trail Skin  
Dainese



Neo Fit Roll



Just-In-Time  
Implants



Auxetic  
Neckbrace



Stent vascolari



Lampada  
Hanabi



Heat-Actuated  
auxetic facades



Deployable  
Dome



### Materiale



Pneumatici  
Vittoria



Giacca Salewa  
Gore-Tex



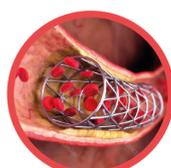
Neo Fit Roll



Kevlar



Lampada  
Hanabi



Stent vascolari



DPI per lo sport



Protezione blindati

## TECNOLOGIA



### Assemblaggio



Giacca Salewa  
Gore-Tex



Neo Fit Roll



DPL per lo sport



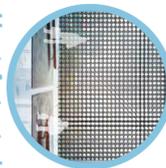
Protezione blindati



### Giunti e cerniere



Deployable Dome



Heat-Actuated  
auxetic facades



### Espanso



Neo Fit Roll



DPL per lo sport



Protezione blindati



### Pneumatici Vittoria Mescola



### Stampa 3D



Just-In-Time Implants



Auxetic Neckbrace



### Stampaggio



Scarpa Nike Free



Trail Skin Dainese



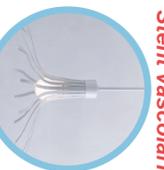
### Tessitura



Kevlar



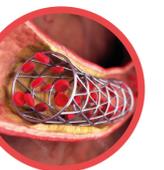
### Taglio



Stent vascolari



Heat-Actuated  
auxetic facades



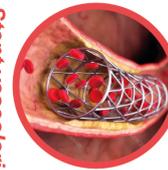
Deployable Dome



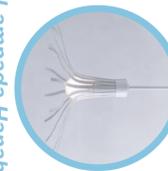
Scarpa con tacco



### Piegatura



Stent vascolari



Lampada Hanabi

## PECULIARITA'



Leggerezza



Auxetic Neckbrace



Scarpa con tacco



Trail Skin Dainese



Scarpa Nike Free

DPI per lo sport



Assorbimento urti



Kevlar



DPI per lo sport



Trail Skin Dainese



Protezione blindati



Resistenza ad usura



Kevlar



DPI per lo sport



Neo Fit Roll



Protezione blindati

Pneumatici Vittoria



Flessibilità



Auxetic Neckbrace



Scarpa Nike Free



Trail Skin Dainese



Memoria di forma



Lampada Hanabi



Stent vascolari



Design



Auxetic Neckbrace



Scarpa con tacco



Realizzabile su misura



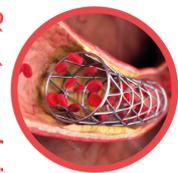
Just-in-Time Implants



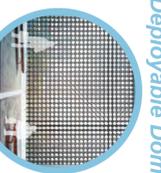
Mutabilità di forma



Lampada Hanabi



Stent vascolari



Heat-Actuated auxetic facades

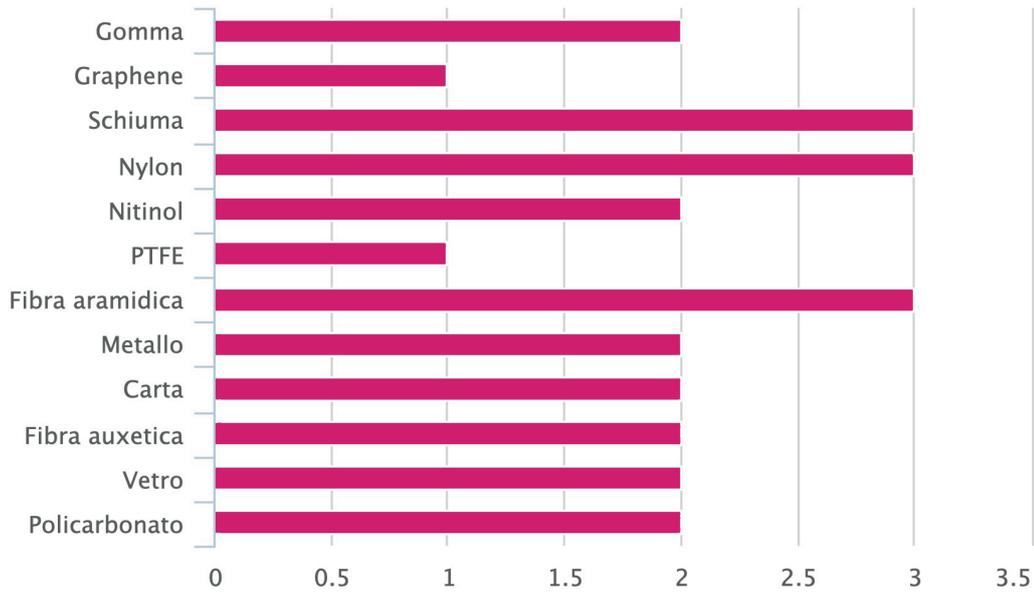


Deployable Dome

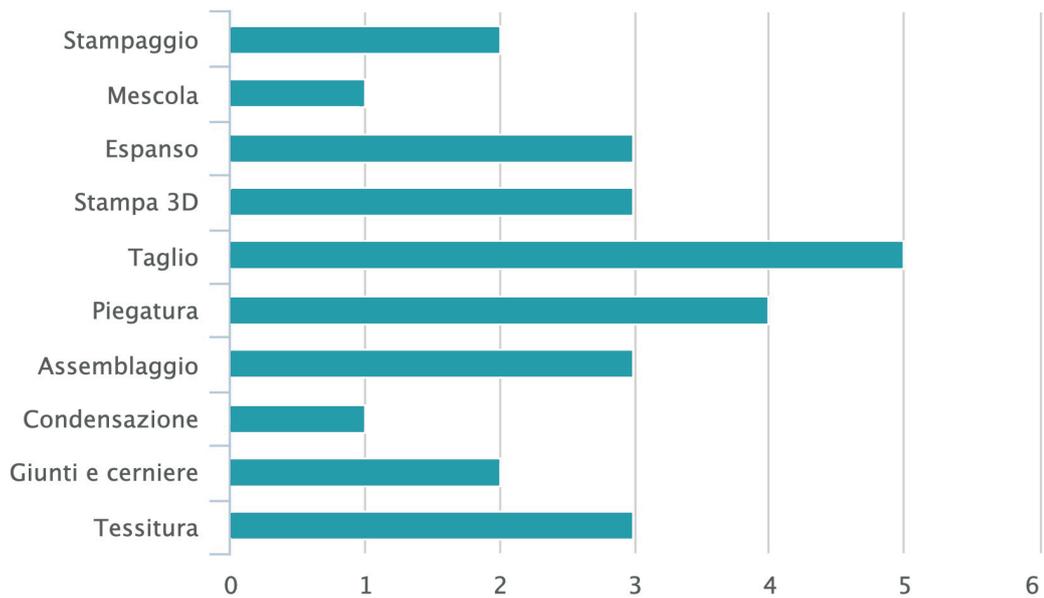
Neo Fit Roll



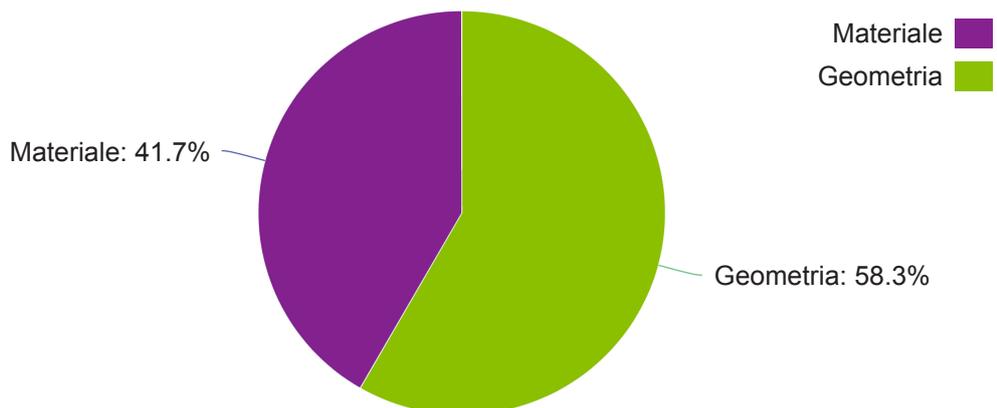
**Istogramma riassuntivo delle tipologie di materiali per la creazione di strutture auxetiche**



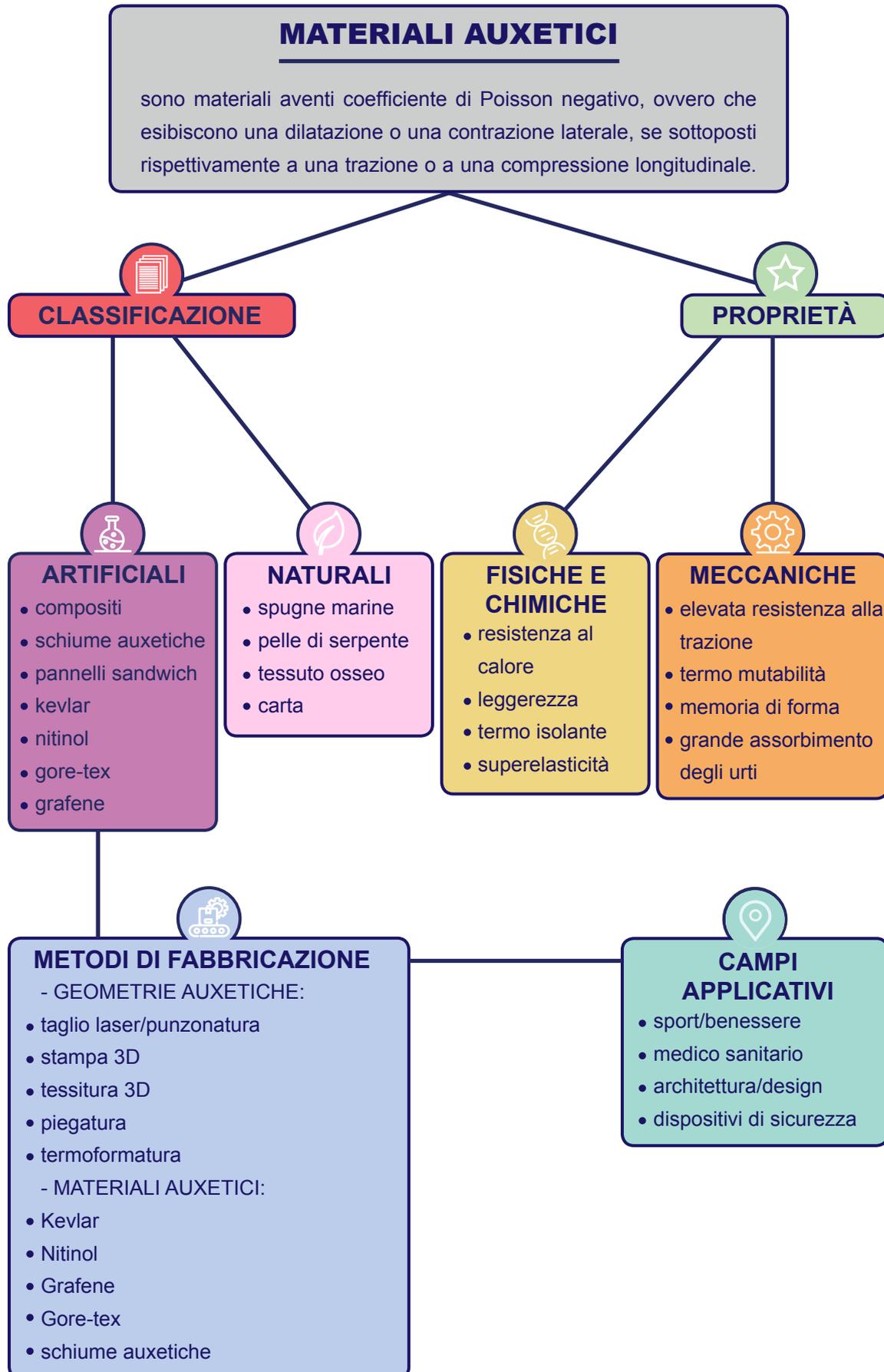
**Istogramma riassuntivo delle tipologie di lavorazioni per la creazione di strutture auxetiche**



**Percentuale della derivazione auxetica**



\* gli istogrammi e l'areogramma fanno riferimento ai casi studio precedenti



**I materiali auxetici** (intesi anche come strutture auxetiche) **si possono classificare in due macro-categorie:**

materiali le cui proprietà auxetiche sono intrinseche nel reticolo molecolare;

materiali che vanno a comporre strutture con geometrie che ne conferiscono l'auxeticità.

Della prima categoria fanno parte i materiali auxetici che si trovano in natura (es. pelle dei serpenti, spugne marine) la cui auxeticità viene data dal reticolo molecolare e dalla sua ripetizione.

Stesso concetto vale per i materiali "artificiali" creati appositamente per avere proprietà specifiche, tra questi vi troviamo Kevlar, Nitinol, Goretex, Grafene.

Spesso si tratta di materiali composti ed assemblati opportunamente, oppure di materiali che hanno subito un particolare trattamento per ottenere proprietà auxetiche.

Nell'analisi dei casi studio è emerso che vi sono diverse tecnologie con cui si possono ottenere dei materiali auxetici.

Ovviamente queste variano in funzione alle principali esigenze che il materiale deve soddisfare e alla materia di cui è composto.

I campi applicativi di questi materiali ad oggi sono principalmente quattro: sport e benessere, medico sanitari, architettura e design, dispositivi di sicurezza.

Tra le caratteristiche per cui vengono più impiegati vi sono:

assorbimento degli urti e sollecitazioni, la memoria di forma, la capacità di adattarsi a forme diverse. Ma assumono altre svariate proprietà sia fisiche che meccaniche in base al loro campo di applicazione. Le geometrie auxetiche si prestano anche ad un utilizzo estetico, con la ripetizione delle celle che vanno a comporre dei pattern, ampliando così i campi di applicazione alla moda e al design.

Le tecnologie più frequenti sono: la stampa 3D, la piegatura, il taglio, la tessitura e l'espansione di schiume. Le materie più utilizzate per ricavare materiali auxetici sono svariate, si passa dai metalli, alla carta, leghe, schiume, nylon, fibre. In realtà è difficile categorizzare i materiali auxetici.

**Fondamentalmente ogni materiale può diventare auxetico, dato che questa proprietà viene conferita unicamente dalla struttura del reticolo.**

Che si tratti di reticoli molecolari della grandezza di pochi micron o di strutture di padiglioni espositivi, è la geometria di come sono disposti a determinarne l'auxeticità. Quindi, si può dedurre che con uno studio accurato i materiali auxetipossano estendersi a tutti gli ambiti applicativi, potendo sfruttare innumerevoli tecnologie e materiali per la loro produzione mantenendo come unico comune denominatore la geometria della struttura.



**5. NUOVI  
SCENARI PER  
STRUTTURE  
AUXETICHE**

## 5. NUOVI SCENARI PER STRUTTURE AUXETICHE

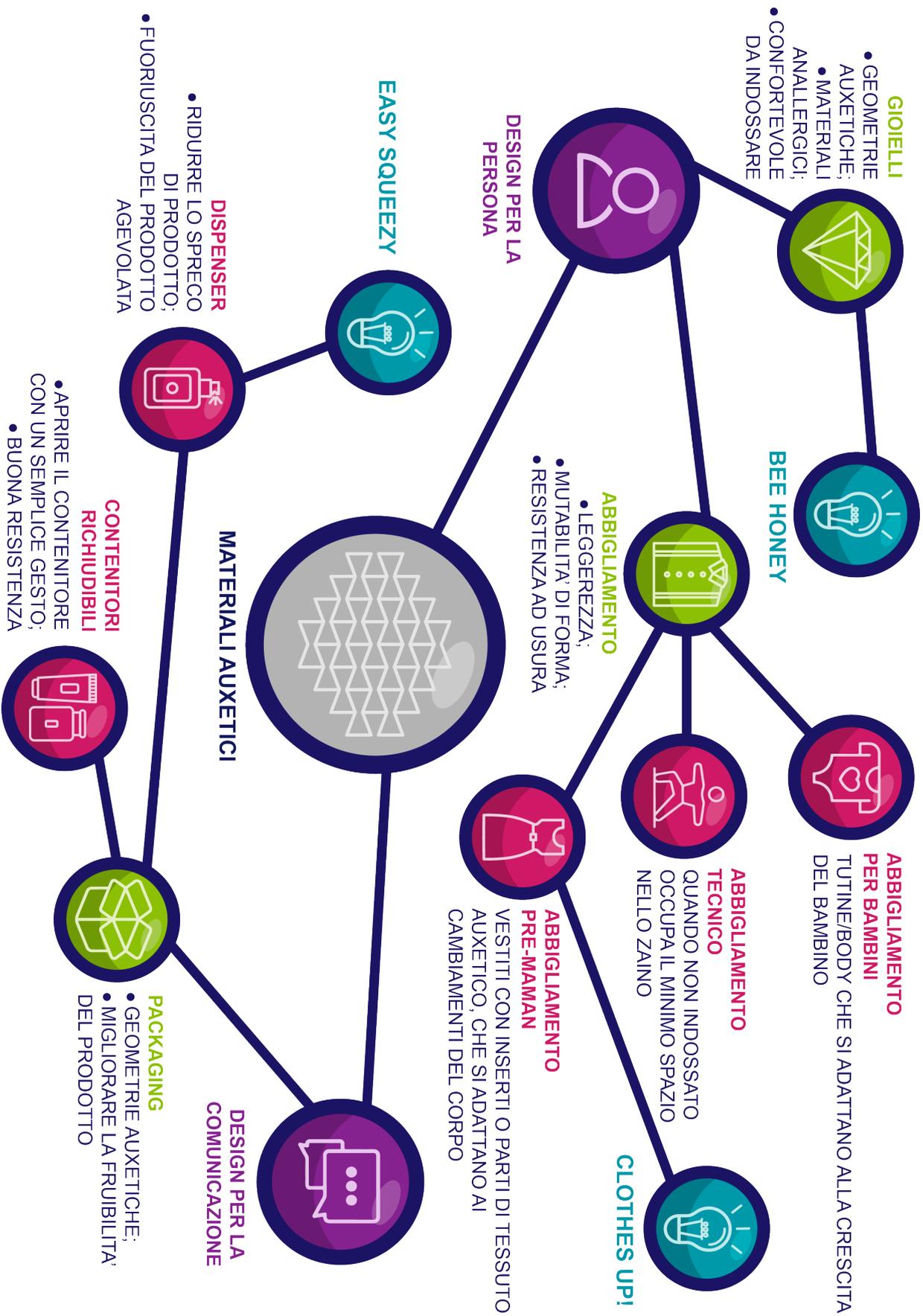
Lo studio di applicazione sui materiali auxetici ha fatto emergere che ci sono possibili nuovi scenari in cui possono trovare un nuovo sviluppo ed impiego. Noi abbiamo provato a focalizzarci su alcuni, arrivando a pensare delle proposte di progetto.

I due ambiti di applicazione che abbiamo approfondito sono:

1) **design per la persona**, in specifico la categoria dei gioielli e la categoria dell'abbigliamento;

2) **design per la comunicazione**, precisamente la categoria dei packaging.

5. NUOVI SCENARI PER STRUTTURE AUXETICHE



## 5.1 - Auxetic jewels

### Bee Honey

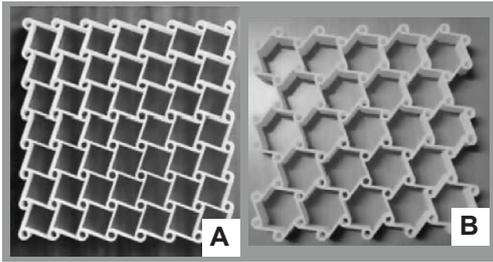


Dalla nostra analisi dei materiali auxetici e delle loro varie applicazioni, abbiamo riscontrato una carenza nel settore dei gioielli ed accessori, per questo motivo abbiamo realizzato **Bee Honey**, il quale consiste in un anello con una struttura honeycomb auxetica basata su **tipologia chirale, la quale tassellazione è costituita da nodi circolari connessi tramite legamenti**, con un meccanismo di de-

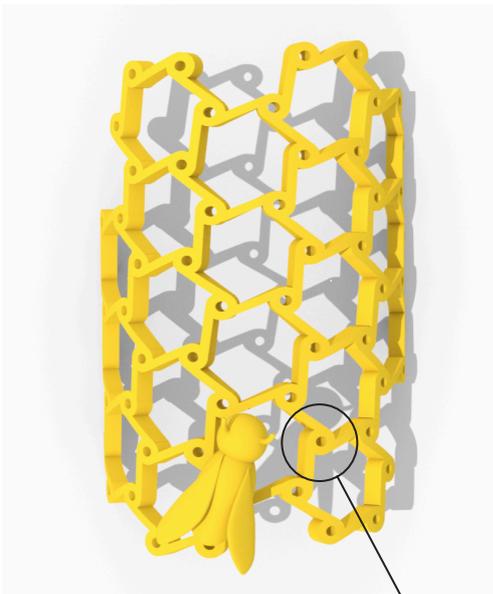
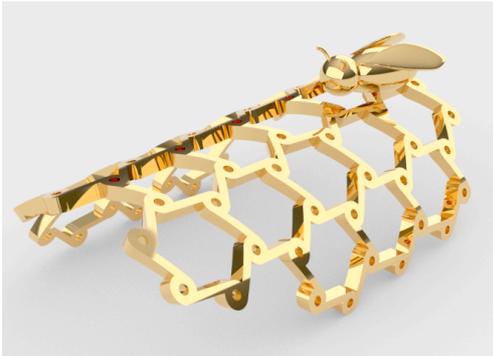
formazione caratterizzato da una rotazione del nodo ed una flessione del legamento.

Come accennato nel paragrafo "2.3 - *Forma e struttura*", **un oggetto geometrico è chirale se non è possibile sovrapporre l'immagine riflessa con l'oggetto originale tramite rotazioni e traslazioni**. Collegando i nodi dalla parte opposta rispetto ai legamenti di connessione si ottengono le geo-

5. NUOVI SCENARI PER STRUTTURE AUXETICHE

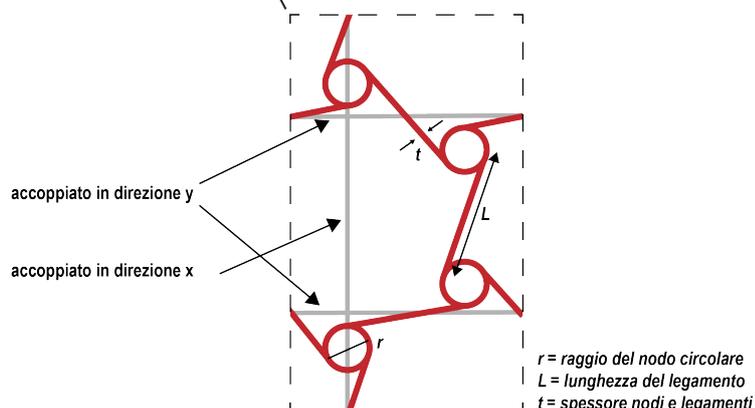
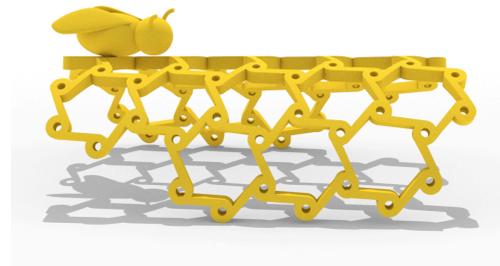


i.69. (A) geometria tetrachirale;  
(B) geometria trichirale.



metrie trichirale e tetrachirale, ovvero costituite da 3 e 4 legamenti (vedi *imm. i.69*). Definendo con  $r$  il raggio del nodo circolare,  $L$  la lunghezza del legamento,  $d$  la profondità,  $t$  lo spessore dei nodi e dei legamenti, possiamo indicare per le geometrie chirali 3 parametri adimensionali (vedi *imm. i.70*):  $\alpha = r/L$ ;  $\beta = r/t$ ;  $\gamma = r/d$ .

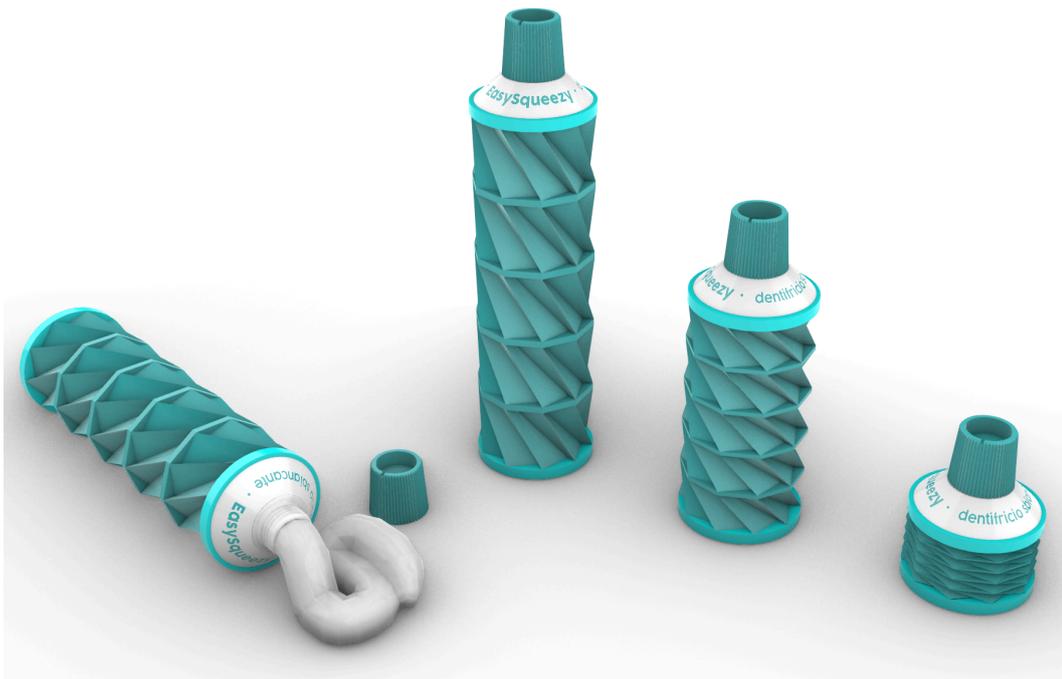
La classe di geometrie con 4 e 6 legamenti, presenta un Poisson negativo e praticamente indipendente da  $\alpha$ . Strutture chirali metalliche possono essere prodotte a partire da piastre solide: Bee Honey è realizzato in Nitinol, lega a memoria di forma, che conferisce all'anello superelasticità con una deformazione recuperata del 8,5%, ottima resistenza a corrosione, e buona biocompatibilità: capacità di essere metabolizzato senza nessun effetto dannoso, in modo da evitare possibili sfoghi da allergie.



i.70. illustrazione del comportamento auxetico della geometria chirale

## 5.2 - Origami packaging

# EasySqueezy

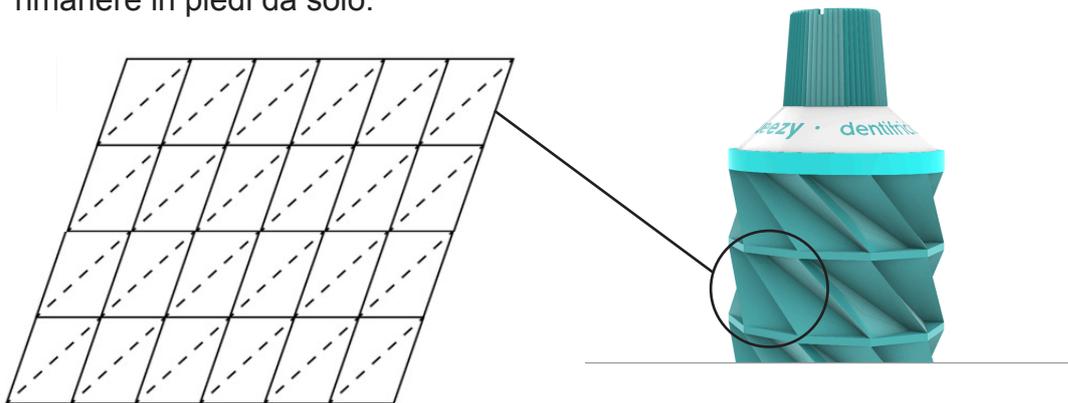


Analizzando il settore del packaging e prendendo spunto da un prodotto concreto come Origami Bottle, la bottiglia da 750ml che diventa tascabile quando non viene utilizzata, realizzata in polimeri termoplastici dalla startup bulgara DiFold; nasce **EasySqueezy**, un pratico dispenser per dentifricio, pensato per ridurre gli sprechi, **basato su il sistema di origami Kresling**: costituito da celle unitarie con chiralità opposta, che accoppia gradi di libertà longitudinali e rotazionali in onde elastiche, producendo una forma ondulata

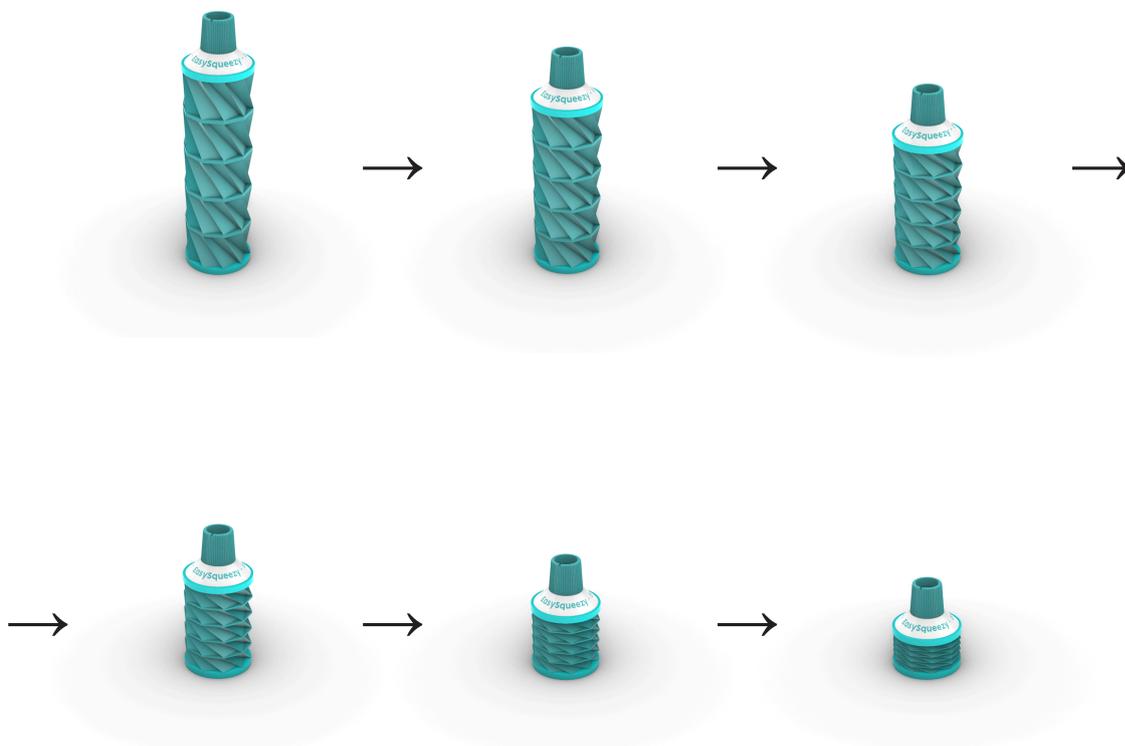
che ricorda la lanterna di Schwarz. La piega di Kresling è correlata sia alle pieghe Yoshimura che a quelle esagonali e può essere inquadrato come un caso speciale della piega Miura (metodo per piegare una superficie piana in un'area più piccola). **I motivi di cordonatura della piega di Kresling formano una tassellatura della superficie mediante parallelogrammi incisi lungo la loro diagonale più lunga.** I parallelogrammi sono disposti in file impilati uno sopra l'altro, ciascuno dei quali corrisponderà

5. NUOVI SCENARI PER STRUTTURE AUXETICHE

a un "livello" nella struttura assemblata. Il dispenser piegato può essere disimballato in un unico movimento tirando le sue estremità opposte, e allo stesso modo piegato spingendo insieme le due estremità, fino a far diventare il cilindro un "foglio" compatto; il fondo piatto consente al prodotto di rimanere in piedi da solo.



i.71. geometria sistema origami Kresling



### 5.3 - Auxetic clothes

## Clothes Up !



La recente esperienza personale ha messo in luce alcune problematiche riguardo l'abbigliamento per donne in gravidanza.

Oltre ad esserci pochi prodotti in commercio, questi soffrono di un'obsolescenza repentina, dovuta ai grandi cambiamenti del corpo della donna. Proprio per questa esigenza abbiamo approfondito lo studio su tessuti auxetici in grado di essere estremamente elastici per adattarsi al corpo che lo indossa in tutte le fasi della gravidanza e nel successivo post parto e fino all'allattamento.

In questo modo si allunga la vita del prodotto oltre a mantenere il comfort di avere un vestito "su misura" mentre il fisico si trasforma. L'idea di "vestiti auxetici" per donne incinte è declinabile anche per l'abbigliamento dei neonati. Le esigenze sono pressochè le stesse, visto i repentini cambiamenti fisici. Un vestitino in tessuto auxetico, o con inserti in auxetico consentirebbe un suo utilizzo assai più prolungato nel tempo **Clothes UP!** (*grow up "crescere" + clothes "vestiti"*) è una maglia pre-mamam per metà realizzata

5. NUOVI SCENARI PER STRUTTURE AUXETICHE

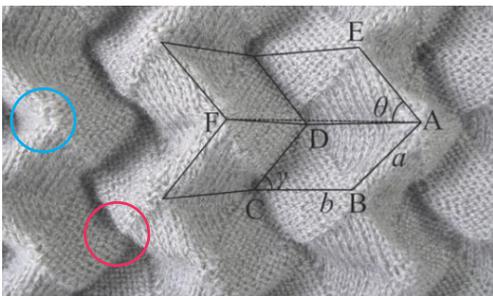
con la tessitura classica, mentre la parte della pancia è realizzata con il sistema origami Miura-Ori, dove le linee di piegatura formano una tassellatura della superficie mediante parallelogrammi. In una direzione, le pieghe giacciono lungo linee rette, con ciascun parallelogramma che forma il riflesso speculare del suo vicino; mentre nell'altra direzione le pieghe sono a zig-zag e ogni parallelogramma è la traslazione del suo vicino attraverso la piega.

La piega Miura-Ori è correlata alla **piega Kresling**, alla **piega Yoshimura** e alla piega esagonale, e può essere inquadrata come una generalizzazione di queste pieghe. **Per creare una struttura a pieghe origami nei tessuti a maglia sono necessari di per sé 3 gruppi di elementi leganti**, che possono rappresentare meccanicamente gli

elementi strutturali elastici con direzione di piegatura nonché gli elementi strutturali anelastici, stabilizzanti (ad esempio: **parallelogrammi, piega montagna e piega valle**).

La piega Miura-Ori mostra un'espansione incrociata auxetica e la sua cella unitaria è ugualmente soggetta a distorsione nel tessuto a maglia a causa degli angoli uguali delle pieghe montagna e delle pieghe valle.

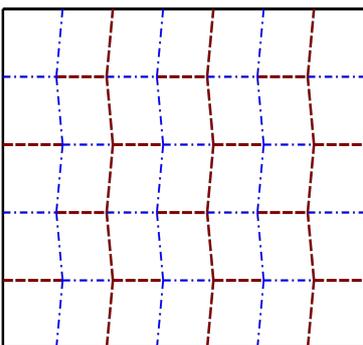
Pertanto grazie alla geometria di piegatura, la maglia mostra un **rapporto di Poisson negativo**. Le potenziali applicazioni dei tessuti a maglia auxetici pieghevoli sono versatili; la lavorazione con più fili dà la possibilità di combinare diversi materiali e integrare diverse funzionalità, offrendo una vasta gamma di possibilità estetiche per i progettisti.



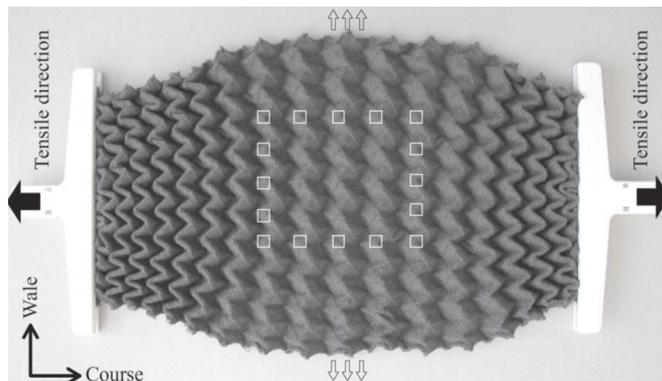
i.72. calcolo geometrico del sistema Miura-Ori  
● piega montagna ● piega valle



i.74. stato iniziale del sistema Miura-Ori



i.73. geometria sistema origami Miura-Ori



i.75. sistema origami Miura-Ori in estensione

## SITOGRAFIA IMMAGINI (CAPITOLO 5)

[i.69] [https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/98361/1/2014\\_12\\_Asa-ro.pdf](https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/98361/1/2014_12_Asa-ro.pdf)

[i.70] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353809-002814>

[i.71] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492820-32883X>

[i.72] <https://www.semanticscholar.org/paper/Negative-Poisson's-Ratio-Weft-knitted-Fabrics-Liu-Hu/90e5b8c7942f92d4e9419ff20f5aa0d58f74a42c>

[i.73] [https://www.researchgate.net/figure/Crease-pattern-for-the-Miura-ori-fold-based-on-8-9\\_fig4\\_264382939](https://www.researchgate.net/figure/Crease-pattern-for-the-Miura-ori-fold-based-on-8-9_fig4_264382939)

[i.74] <https://www.semanticscholar.org/paper/Negative-Poisson's-Ratio-Weft-knitted-Fabrics-Liu-Hu/90e5b8c7942f92d4e9419ff20f5aa0d58f74a42c>

[i.75] <https://www.semanticscholar.org/paper/Negative-Poisson's-Ratio-Weft-knitted-Fabrics-Liu-Hu/90e5b8c7942f92d4e9419ff20f5aa0d58f74a42c>

## 6. DISCUSSIONI E CONCLUSIONE

Nel corso del nostro studio abbiamo svolto un'analisi a 360° dei materiali auxetici, mostrando diversi aspetti e diverse teorie, dalla modellazione della microstruttura fino allo studio di fenomeni di transizione di fase e di memoria di forma.

Tutto ciò ha messo in luce molte delle caratteristiche derivanti da un coefficiente di Poisson negativo, quali: **mutabilità di forma; resistenza; assorbimento degli urti; libertà di forma; leggerezza; ed estetica.**

Queste caratteristiche fanno sì che i materiali auxetici vengano utilizzati in prodotti ad alte prestazioni dove i materiali comuni non garantirebbero elevati livelli di performance.

Tuttavia, nonostante i risultati ottenuti da molti grandi studiosi, ad oggi non esiste una teoria generale che descriva questi materiali.

In seguito ai nostri studi abbiamo riscontrato che le caratteristiche di questi materiali si aprono a diversi nuovi scenari, anche per prodotti di uso comune. Di contro però vi è la criticità che per realizzare questo tipo di materiali si utilizzano tecniche di lavorazione molto sofisticate, e spesso abbinate a materie prime costose.

In studi futuri, occorre quindi indirizzare la sperimentazione sulle tecniche di lavorazione per abbattere i costi; così facendo si potrebbe uscire dalla teoria matematica per passare ad un processo pratico, come la definizione e lo studio di processi di lavorazione innovativi, che porterebbero i materiali auxetici ad una distribuzione su larga scala.

Un punto di partenza potrebbe essere approfondire le tecniche degli origami, per realizzare strutture che si basino sul metodo della piegatura, che potrebbero rilevarsi molto funzionali.

## BIBLIOGRAFIA (GENERALE)

- [1] “Molecular network design” K.Evans - Nature, 1991 - Vol. 353 n° 6340
- [2] AG Kolpakov, 1985 - Journal of Applied Mathematics and Mechanics - Vol. 49, n° 6.
- [3] “Foam structures with a negative Poisson’s ratio” R.S. Lakes - Science, 1987 - Vol. 235 n°4792
- [4] “Mémoire sur les surfaces élastiques” S.D.Poisson - 1814
- [5] “Examination of negative Poisson’s ratio materials” B.Howell, P.Prendergast, L.Hansen - Applied Acoustics, 1994 - Vol. 43, 2, p. 141-148
- [6] “Auxetic Materials: Functional Materials and structures from lateral thinking” K.Evans, A.Alderson - Advanced Materials, 2000
- [7] “Shape Memory Materials” K.Otsuka, C.M.Wayman - Cambridge University Press - 1999
- [8] “Shape memory and phase transition for auxetic materials” M.Ciarletta, M.Fabrizio, V.Tibullo - *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2012
- [9] “Paradoxical replacement tissue for medicine” A.Morel(Empa) - Nature communications, 2019
- [10] “A brief intro to metamaterials” R. S.Kshetrimayum - IEEE Potentials, 2004 - Vol. 23, p. 44–46.
- [11] “Composite materials with Poisson’s ratio close to (-1)” G.Milton - J. Mech. Phys. Solids, 1992 - Vol. 40, p. 1105-1137
- [12] “Negative refractive index in chiral metamaterials” S.Zhang, Y.S.Park, J.Li, X.Lu, W.Zhang, X.Zhang - Physical Review Letters 102, 2009
- [13] “Properties of a chiral honeycomb with a Poisson’s ratio (-1) D.Prall, R.S.Lakes - International Journal of Mechanical Sciences, 1996 - Vol.. 39, p. 305-314
- [14] “Shape memory behaviour in auxetic foams: mechanical properties” M.Bianchi, F.Scarpa, C.W.Smith - Acta Materials, 2010
- [15] “Origami based Mechanical Metamaterial”  
D.Krishnaraju, G.Konjevod, H.Hu, H.Jiang, Lv.Cheng - 2015

[16] "Design and evaluation of 3D-printed auxetic structures coated by CWPU/graphene as strain sensor" H.Y.Choi, E.J.Shin, S.H.Lee - Nature, 2022

[17] "Highly stretchable two-dimensional auxetic metamaterial sheets fabricated via direct-laser cutting" L.Mizzi, E.Salvati, A.Spaggiari, J.C.Tan, A.M.Korsunsky - Science direct, 2020 - Vol. 167

[18] "Impact properties of uniaxially thermoformed auxetic foams" Q.Zhang, F.Scarpa, D.Barton, Y.Zhu, Z.Q.Lang, H.X.Peng - Science direct, 2022 - Vol. 163

[19] "Expanding materials and applications: exploiting auxetic textiles" A.Alderson, K.Alderson - Technical Textiles International, 2005 - Vol. 777, p. 29-34

[20] "Folding Techniques for Designers: From sheet to form" P.Jackson - 2011

## SITOGRAFIA (GENERALE)

[s.1] <https://materiability.com/portfolio/auxetics/>

[s.2] <https://www.britannica.com/science/Poissons-ratio>

[s.3] <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/Poisson.html>

[s.4] [https://www.esa.int/gsp/ACT/projects/auxetic\\_materials/](https://www.esa.int/gsp/ACT/projects/auxetic_materials/)

[s.5] <https://webthesis.biblio.polito.it/15195/1/tesi.pdf>

[s.6] <https://1library.net/article/history-of-auxetic-materials-literature-review.q2kd3x2q>

[s.7] <https://www.worldwidewords.org/turnsofphrase/tp-aux1.htm>

[s.8] [https://www.leeds.ac.uk/news/article/4334/new\\_material\\_that\\_thickens\\_as\\_its\\_pulled](https://www.leeds.ac.uk/news/article/4334/new_material_that_thickens_as_its_pulled)

[s.9] <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/115125>

[s.10] [https://lgg.epfl.ch/research\\_auxetics.php](https://lgg.epfl.ch/research_auxetics.php)

- [s.11] <https://www.nature.com/articles/s41467-018-07587-y>
- [s.12] [https://issuu.com/lorenzomirante/docs/2015\\_12\\_mirante\\_b](https://issuu.com/lorenzomirante/docs/2015_12_mirante_b)
- [s.13] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706121001562>
- [s.14] <https://www.technosprings.com/materiali-a-memoria-di-forma/>
- [s.15] [http://elea.unisa.it/jspui/bitstream/10556/3023/1/tesi\\_di\\_dottorato\\_F\\_Pugliese.pdf](http://elea.unisa.it/jspui/bitstream/10556/3023/1/tesi_di_dottorato_F_Pugliese.pdf)
- [s.16] [https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/17181?1/Tesi\\_zecchetto\\_auxetici.pdf](https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/17181?1/Tesi_zecchetto_auxetici.pdf)
- [s.17] <http://amirshahrokhi.christopherconnock.com/2011/12/11/auxetic-origami-surface/>
- [s.18] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/747/1/012008/pdf>
- [s.19] <https://www.nature.com/articles/natrevmats201778>
- [s.20] <https://stamparein3d.it/tu-delft-presenta-un-impianto-dellanca-stampato-in-3d-con-degli-innovativi-bio-metamateriali-ibridi-18451-2/>
- [s.21] <https://www.imperialatletica.it/notizie/materiali-innovativi-e-tecnologie-smart-nelle-discipline-sportive/>
- [s.22] <https://lucagargiulo.com/2019/12/12/test-vittoria-corsa-g2/>
- [s.23] <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/3430524.3444636>
- [s.24] <https://patents.google.com/patent/US20110155137>
- [s.25] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8285110/>
- [s.26] <https://medcraveonline.com/JTEFT/auxetic-textile-materials---a-review.html>
- [s.27] [http://tesi.cab.unipd.it/43877/1/Tesi\\_zecchetto\\_auxetici.pdf](http://tesi.cab.unipd.it/43877/1/Tesi_zecchetto_auxetici.pdf)
- [s.28] <http://it.scienceaq.com/nanotecnologia/1002099063.html>
- [s.29] <https://www.dupont.it/kevlar/what-is-kevlar.html>

[s.30] <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ta/d0ta02590a>

[s.31] <https://www.prezzisalute.com/Sport/Gore-Tex.html>

[s.32] [https://torino.corriere.it/piemonte/21\\_novembre\\_07/dal-cuore-tumori-interventi-record-nuove-frontiere-medicina-torinese-3b1a8156-3fe1-11ec-a86a-9c702b71a66e.shtml](https://torino.corriere.it/piemonte/21_novembre_07/dal-cuore-tumori-interventi-record-nuove-frontiere-medicina-torinese-3b1a8156-3fe1-11ec-a86a-9c702b71a66e.shtml)

[s.33] <https://engineering.exeter.ac.uk/research/etg/research/auxetics/>

[s.34] <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/innovativi/grafene-produzione-applicazioni-prezzo-materiale-241>

[s.35] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2019.00086/full>

[s.36] <https://www.futurity.org/auxetic-materials-tool-1210592-2/>

# RINGRAZIAMENTI

## CHRISTIAN

***Ai miei genitori***, grazie per tutto il supporto, per tutte le possibilità che mi avete dato, per tutti i sacrifici che avete fatto.

**A mia moglie Alessia**, la persona più importante della mia vita, grazie per essere sempre al mio fianco.

**A mio figlio Emanuele**, che hai stravolto le nostre vite, grazie per tutte le emozioni che ci regali e per questo nuovo futuro insieme.

**Al mio amico Ivan**, grazie per avermi sempre spronato in questo percorso, e soprattutto per tutta la fiducia che hai riposto in me.

# RINGRAZIAMENTI

## FABIO

**A mia madre, Cristina,** la donna più forte che io conosca, che ha dovuto improvvisarsi anche come padre... grazie per l'amore, tutti i sacrifici ed il sostegno immenso per rendere la mia vita più leggera.

**A mio padre, Lorenzo,** che ci ha lasciati troppo presto... grazie per l'amore ed i ricordi di una vita bella e spensierata, i quali mi permettono di andare avanti nel mio percorso, nonostante le difficoltà.

**A mio fratello, Luca,** grazie per essere attento e protettivo come un padre, e complice come un fratello.

**A mia sorella, Francesca,** grazie per tutto l'affetto e per la tua determinazione, fonte per me d'ispirazione.

**A mia nonna, Omi,** grazie per l'aiuto con i compiti scolastici che mi hanno permesso di arrivare dove sono oggi.

**A Santina,** una persona speciale che mi rende felice... grazie per il tuo amore e per tutto quello che rappresenti per me.

**Al mio cane, Lockie,** che con la sua dolcezza ed innocenza ha portato allegria nella mia vita, ormai già da 9 anni.

**Alle mie nipoti, Sofia, Ginevra e Bianca,** per la loro spensieratezza che regala momenti di infinita gioia.

**Ai miei amici,** grazie per le chiacchiere leggere, i momenti sorridenti ed i validi consigli.