ABSTRACT TESI: L'argomento oggetto di studio, tratta di una recentissimo filone di ricerca nel campo dei nuovi materiali: i metamateriali (*metamaterials*), materiali non disponibili in natura, le cui proprietà non dipendono solo dalla composizione chimica, ma principalmente dalla composizione realizzativa della propria struttura, acquisendo quindi la peculiarità di rispondere in maniera preprogrammata ed esotica, ad una specifica sollecitazione. In particolare sono stati approfonditi i metamateriali meccanici (*mechanical metamaterials*), che a differenza dei metamateriali elettromagnetici, sono caratterizzati da proprietà e fenomeni meccanici definiti dall'architettura della loro trama dispositiva che permette un movimento direzionale controllato tramite funzionalità meccaniche.
Il carattere di originalità della ricerca si installa in relazione alle enormi possibilità di trasferimento tecnologico, dalla ricerca di base, di nuovi materiali, sia al contrario come il design possa guidare la realizzazione di nuovi materiali (*material design driven*) attraverso la progettazione di nuove prestazioni esperienziali di prodotti. La ricerca parte dall'analisi di un brevetto di compliant mechanism: un meccanismo flessibile costituito da una cerniera con una doppia trave concentrica con spessori differenti, per arrivare alla proposta di applicazione sperimentale di una montatura di occhiali.

ABSTRACT THESIS: The topic presented in this study concerns the field of new materials: the *metamaterials*, materials not available in nature, whose properties depend on the composition of their structure, rather than their chemical composition. Thus, they acquire the peculiarity of responding in a pre-programmed and exotic manner, to a specific solicitation. In particular, *Mechanical Metamaterials* have been examined: unlike electromagnetic metamaterials, they are characterized by mechanical properties and phenomena defined by the architecture of their internal patterns. That allows a directional movement controlled by mechanical functions.
The originality of the research is defined by the enormous possibilities of technology transfer, either from basic research in new materials, or about how design can lead the creation of new materials (*material design driven*) through the design of new performed products. The research starts from the analysis of a patent of compliant mechanism: a flexible mechanism consisting of a hinge with a double concentric beam with different thicknesses, to arrive at the proposed experimental application of an eyeglass frame.

Dottorato di Ricerca
Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura

DOTTORANDO
Cecilia Lalatta Costerbosa

Metamateriali: tra materia e microstruttura
Nuovi paradigmi per il Design

Sapienza Università di Roma | Sapienza University of Rome | ciclo cycle XXXI | nov. 2015 - oct. 2018
Scuola di Dottorato in Ingegneria Civile e Architettura | Doctoral School in Civil Engineering and Architecture
Dipartimento di 'Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura' | 'Planning, Design, Technology of Architecture' Department

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Dottorato di Ricerca PIANIFICAZIONE, DESIGN, TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA
PhD PLANNING, DESIGN, TECHNOLOGY OF ARCHITECTURE
Coordinatore | Director
Prof. Fabrizio Tucci

Curriculum DESIGN DEL PRODOTTO
Curriculum PRODUCT DESIGN
Coordinatore Curriculum | Curriculum Chair
Prof. Lorenzo Imbesi

Metamateriali: tra materia e microstruttura

Nuovi paradigmi per il Design

Dottorando | PhD Candidate Cecilia Lalatta Costerbosa
Supervisore | Supervisor Prof.ssa Cecilia Cecchini
Consulente interno | Internal advisor Prof.ssa Sabrina Lucibello
Consulente esterno | Esternal advisor Prof. Nicola Pio Belfiore
Università Roma Tre

Ciclo | Cycle XXXI
Novembre 2015 - Ottobre 2018

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

DOTTORATO DI RICERCA
Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura

COORDINATORE
Prof. Fabrizio Tucci

CURRICULUM
Design del Prodotto

COORDINATORE CURRICULUM
Prof. Lorenzo Imbesi

Metamateriali: tra materia e microstruttura

Nuovi paradigmi per il Design

DOTTORANDO
Cecilia Lalatta Costerbosa

SUPERVISORE
Prof.ssa Cecilia Cecchini

CONSULENTE INTERNO
Prof.ssa Sabrina Lucibello

CONSULENTE ESTERNO
Prof. Nicola Pio Belfiore, Università Roma Tre

CICLO XXXI
Novembre 2015 - Ottobre 2018

INDICE

Introduzione

PARTE I RICERCA ON DESK
p. 2 Introduzione
CAPITOLO 1 IL PROGETTO DI RICERCA - QUADRO LOGICO
p. 14 1 Premessa
p. 15 1.1 Domande della ricerca
p. 17 1.2 Obiettivo della ricerca
p. 17 1.3 Temi e settori
p. 17 1.4 Problema Scientifico
p. 18 1.5 Destinatari
p. 19 1.6 Fasi e Metodi
p. 20 1.7 Risultati
p. 21 1.8 Taglio della ricerca
CAPITOLO 2 IL PROGETTO DI RICERCA - QUADRO TEORICO
p. 25 2.1 Posizionamento nello scenario globale, sociale e di filiera
p. 30 2.2 Posizionamento nello scenario disciplinare
p.32 *Best Practices*
CAPITOLO 3 I METAMATERIALI
p. 43 3.1 Cenni Storici
p. 43 Etimologia
p. 43 Veselago e la prima intuizione
p. 43 Dagli anni duemila ad oggi
p. 45 3.2 Posizionamento nel panorama materico
p. 48 Materiali con indice di rifrazione negativo
p. 50 Confronto tra Smart Materials e Metamaterials
p. 51 3.3 Definizione
CAPITOLO 4 I METAMATERIALI MECCANICI
p. 57 4.1 Premessa
p. 58 4.2 Definizione
p. 59 Modelli matematici di riferimento
p. 63 4.4 Classificazione
p. 63 Sistema di classificazione delle fonti
p. 64 Best Practices
p. 108 Mechanical Metamaterials e Compliant Mechanisms
p. 111 4.5 Tavola Periodica
CAPITOLO 5 TECNICHE DI RIRODUZIONE DEI METAMATERIALI
p. 119 5.1 Material Design
p. 120 5.2 Strumenti, tecniche e metodologie di riproduzione dei metamateriali
p. 120 Best Practices
p. 124 5.3 Programmabilità e scalabilità dei Metamateriali Meccanici

PARTE II RICERCA ON FIELD
p. 131 Introduzione
CAPITOLO 6 METAMATERIALI MECCANICI NEL DESIGN DI PRODOTTO
p. 135 6.1 Premessa
p. 135 6.2 Stato dell'arte
p. 135 Case Studies
CAPITOLO 7 SPERIMENTAZIONE METAPROGETTUALE
p. 147 7.1 Premessa
p. 150 7.2 Oggetto della sperimentazione: la montatura di occhiali
p. 154 7.3 Eyewear nel Design del Prodotto
p. 135 Premessa
p. 155 Criterio di studio e selezione dei casi studio
p. 158 Case Studies
p. 194 7.4 Progettazione
p. 194 Premessa
p. 195 Selezione del metamateriale meccanico
p. 203 7.5 Metodologia
p. 203 Definizione della morfologia dell'oggetto
p. 204 Parte Funzionale-Cinematica
p. 206 Parte Costruttiva
p. 212 Design
p. 217 7.6 Metaprogetto
p. 218 Studi
p. 226 Proposte Metaprogettuali
p. 242 Esiti

PARTE III CONCLUSIONI
CAPITOLO 8 CONCLUSIONI
p. 249 9.1 Risultati attesi e ottenuti
p. 252 9.2 Risposte alle domande inziali
p. 254 9.3 Prospettive Future

p. 257 BIBLIOGRAFIA
References

p. 265 RINGRAZIAMENTI
Heartfelt Thanks

Introduzione

Questo elaborato pone l'accento su una particolare categoria di materiali, di recentissima scoperta ed approfondimento: i metamateriali (*metamaterials)*.
Si tratta di materiali non presenti in natura, le cui proprietà derivano dalla composizione strutturale della materia, più che dalla sua composizione chimica (Pendy, 2000; Kshetrimayum, 2004)[1].
L'obiettivo del lavoro è metterne in evidenza il potenziale applicativo nell'ambito del *product design*. Per capirne la natura, la funzionalità ed il valore trasferibile nel *product design*, vengono prese in esame in questa sede: la definizione, l'origine, la terminologia legata alla materia trattata, le proprietà fondamentali dei mechanical metamaterials, i concetti e le procedure legati agli aspetti della progettazione e della riproduzione, le applicazioni di base, la modellazione e la simulazione del comportamento dei metamateriali meccanici, e la declinazione pratica nella realizzazione di prodotto.
È dimostrato che l'origine dell'interesse per i metamateriali, può essere facilmente compresa, posizionando i metamateriali nel più generale contesto dei materiali elettromagnetici artificiali, ma sarà oggetto di questo studio, approfondire una specifica categoria di metamateriali, i cosiddetti metamateriali meccanici (*mechanical metamaterials*) (Walser, 2001)[2].
Oltre a distinguersi dai materiali tradizionali, essi si differenziano anche dai metamateriali elettromagnetici: le loro stesse proprietà, considerate "esotiche", non derivano da proprietà elettromagnetiche (Bertoldi, 2017; Ion, 2016)[3]. I metamateriali meccanici, infatti, presentano peculiarità dipendenti esclusivamente da fenomeni meccanici, definiti dall'architettura della loro natura materica (Zadpoor, 2016; Spadaccini, 2015)[4].
Come designer, l'interesse nell'indagare questo argomento è duplice: innanzitutto la volontà dialettica di capire il significato ed il valore dei metamateriali meccanici nel panorama progettuale e nella pratica di design. Interesse che, nello specifico, si rivolge al rapporto scalare tra il *material design* ed il *product design*, e agli scenari nel contesto del design del prodotto che tali dinamiche attivano.

1- Pendry, J. B. (2000). Negative Refraction Makes a Perfect Lens, *Physical Review Letters*, 85, (3966); Kshetrimayum, R. S. (2004). A Brief Intro to Metamaterials *IEEE Potentials*, 23, (44–46). Doi:10.1109/mp.2005.1368916

2- Walser, R.M. (2001). Electromagnetic metamaterials, in *Proc. SPIE 4467 Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics*, 1, San Diego, CA, , pp. 1–15.

3- Bertoldi K., Vitelli V., Christensen J., van Hecke, M. (2017) Flexible mechanical metamaterials. *Nature Reviews. 2 :17066* ;
Ion A., Frohnhofen, J., Wall, L., Robert Kovacs, Mirela Alistar, Jack Lindsay, Pedro Lopes, Hsiang-Ting Chen, P. Baudisch, (2016), Metamaterial Mechanisms, in *Proceedings of UIST'16*.

4- Zadpoor, A. (2016) Mechanical Meta-materials, *Mater. Horiz., 2016, 3, 371-381;*
Spadaccini, C. M., (2014)"Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials," *Science 344, 1373*.

In secondo luogo, l'intento retorico di questo lavoro, che punta l'attenzione sull'esperienza fruitiva di un prodotto metaprogettuale, in cui la genesi dell'artefatto è il risultato di un processo progettuale radicato a partire dall'architettura stessa del materiale di costituzione dello stesso artefatto. Per dirla con le parole di Chris Lefteri: *«There is undoubtedly a massive interest in materials within design at the moment. This is focused on all aspects of the lives of products, ranging from the originators and developers of the materials who are led by a new conscience in consumers, through to the designers who translate materials into new applications, and to the end users who are demanding more stringent information on the history and sources of materials. It follows that it's pretty obvious why there is a need to innovate – but from the designer's perspective, why is there this big attraction, and why is it so important to innovate in materials anyway?»*

«How is a designer to keep abreast the latest developments in material science and develop a working familarity to a whole generation of unfamiliar inventions?»[5]
Tratto dal report DAMADEI, testo ispirato da John Fernandez. [6]

5- Chris Lefteri Design. (n.d). Disponibile da http://www.chrislefteri.com/index.html
6- DEMADEI: Report. (n.d.). Disponibile da http://www.demadei.eu/

PARTE 1

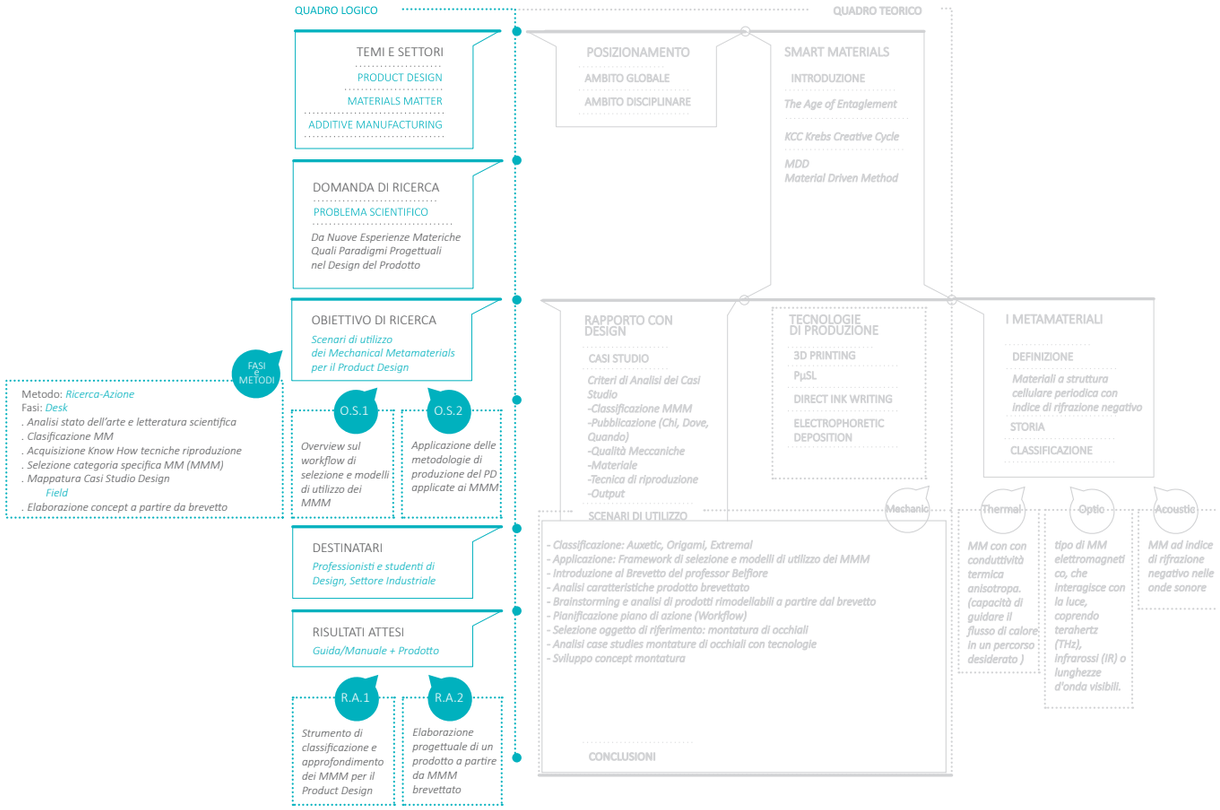
RICERCA ON DESK

ABSTRACT (INGLESE)
The first chapter is presented as a summary of the content system. The exhibition structure is divided into the following points: Research question, research objective, themes and sectors that are dealt with in the development of the state of the art and interdisciplinary psycho-nutrition and, therefore, the scientific problem that arises in this context and related recipients. We then proceed with the definition of the phases and of the applied methodology, specifying the scalar cut on which the whole research was based.

CAPITOLO 1

IL PROGETTO DI RICERCA
Quadro Logico

ABSTRACT
Il primo capitolo dell'elaborato si presenta come un quadro di sintesi dell'impianto dei contenuti. La struttura espositiva si articola sui seguenti punti: Domanda della ricerca, obiettivo della ricerca, temi e settori che vengono trattati in ambito di sviluppo dello stato dell'arte e della sperimentazione interdisciplinare, quindi il problema scientifico che si pone in questo contesto, e relativi destinatari. Si prosegue poi con la definizione delle fasi e della metodologia applicata, specificando il taglio di tipo scalare su cui si è basata l'intera ricerca.



1 Premessa

La prima sezione di questo volume delinea il sistema strutturale attraverso il quale si articola la proposta di ricerca, definendo i contenuti degli argomenti trattati, precisandone il problema scientifico, sulla base della domanda e degli obiettivi di ricerca e descrivendo le fasi dell'elaborato ed i risultati.

Oltre all'esposizione dell'argomento di tesi da un punto di vista conoscitivo e tecnico/applicativo, lo sforzo che l'impianto narrativo di questo documento tenta di compiere, vuole essere quello di offrire una visione dell'argomento di tesi contestualizzata in un più ampio scenario, che descriva il processo fenomenologico e trasversale messo in campo. Per questo motivo, l'approccio utilizzato è di tipo scalare: ogni sezione in cui l'elaborato è suddiviso, si sviluppa, a partire da un cappello introduttivo di inquadramento, fino a chiudersi con capitoli perimetrati, su aspetti squisitamente tecnici-specifici di progetto.

Da un punto di vista macro, la ricerca intende porre l'accento sulle nuove frontiere materiche e sugli scenari consequenziali che si stanno diffondendo in relazione ai più recenti avanzamenti tecnologici legati all'Additive Manufacturing, ed all'adozione di un approccio sempre più multidisciplinare in ambito accademico. Lo scopo vuole essere quello di mettere in evidenza il framework change che questo paradigma sta avviando nel settore del design.

In ambito micro, l'elaborato pone l'accento su di una categoria emergente di metamateriali: i metamateriali meccanici. In prima istanza, viene svolto un lavoro di selezione, studio ed approfondimento dei materiali presi in considerazione. In questo contesto, si riporta una esemplificativa pratica sperimentale a partire dal brevetto del professore Nicola Pio Belfiore, supervisore esterno di questo elaborato, professore di meccanica applicata alle macchine presso l'Università di ingegneria di Roma 3, depositario del brevetto dal quale ha preso avvio la parte di sperimentazione

della ricerca dottorale. Il materiale prodotto dal Professore si contestualizza nell'ambito dei compliant mechanism. Sarà quindi dedicato un capitolo di chiarimento circa il posizionamento dei mechanical metamaterials nel contesto dei compliant mechanisms e, da questo, si effettuerà la sperimentazione di progetto di una montatura di occhiali composta appunto su una struttura ispirata ai mechanical metamaterials.

1.1 Domande della ricerca

In funzione di quanto detto, le domande della ricerca sono esposte in funzione della scala dell'argomento trattato. Nello specifico, le domande rivolte al macro hanno essenzialmente valenza logico-ontologica e vertono sulla fenomenologia che ruota intorno alla declinazione dei metamateriali nell'ambito del design:

D1: Quali benefici porta, in termini di innovazione e nuovi scenari materici, il trasferimento del knowhow tra discipline scientifiche e creative?

D2: Quali cambiamenti subisce il processo metodologico e deontologico della creazione di un nuovo prodotto se il designer può partire dalla progettazione stessa della materia?
Le domande rivolte invece al micro, di carattere più specifico e tecnico, avvicinano la presente proposta di ricerca all'aspetto progettuale ponendo le basi per un approccio di tipo metaprogettuale, esse sono:

D3: Come si presentano e cosa sono, di fatto, i metamateriali meccanici?

D4: In che misura, e con quali strumenti, è possibile farne uso nella progettazione di prodotto?
Infine, con l'intento di mantenere un dialogo aperto tra le discipline coinvolte in questo settore, l'elaborato propone un'ultima domanda:

D5: E' possibile classificare i metamateriali meccanici all'interno della famiglia degli smart materials?
Nello specifico, per rispondere a questo domanda, è stato fondamentale il supporto della professoressa Marinella Ferrara, del Politecnico di Milano, che ha contribuito, attraverso una serie di interviste telefoniche, a chiarire una serie di passaggi chiave nella definizione di ciò che sono gli smart materials, i metamateriali e quali sono affinità e differenza tra queste due famiglie (cfr. cap. 3; 4)

1.2 Obiettivo della ricerca

Scopo del volume è definire i possibili scenari di utilizzo dei metamateriali nel Product Design. L'obiettivo generale è fornire un overview, con particolare attenzione alla sotto-categoria dei metamateriali meccanici; descriverne le peculiarità, le tecniche di produzione ed il potenziale trasferibile nel settore del design, allo scopo di offrire uno strumento utile alla conoscenza delle caratteristiche di questi materiali di frontiera.

1.3 Temi e Settori

I principali argomenti, che definiscono il confine del posizionamento nel quale questa ricerca indaga, sono:

- I materiali per il design
- Multidisciplinarietà in ambito progettuale
- Tecnologie di produzione dei Metamateriali

1.4 Problema scientifico

«In perhaps what might be the broadest definition, metamaterials are structures that allow us to engineer the interaction of fields with matter.»[7]
David Roger Smith, creatore di quello che, tradizionalmente è riconosciuto come il primo metamateriale - definito come il primo "left-handed (or negative index) metamaterial at microwave frequencies"- sintetizza con questa espressione, un concetto dalla fenomenologia, in realtà, ben più complessa. Per descriverla, scolasticamente, in maniera naive, si serve di una metafora che propone l'immagine di un prato dall'erba folta e alta, in un giorno di brezza. A seconda del vigore del vento, l'erba oscilla avanti e indietro, piegandosi nella direzione della folata.
Smith traduce poi questi elementi, rapportandoli al mondo della fisica: il vento, invisibile, è un gas costituito da molecole che esercita una forza, legata a fenomeni quali la pressione, o la

7. The Smith Group. Disponibile da http://people.ee.duke.edu/~drsmith/metamaterials.htm

velocità; un valore continuo e costante che esiste nella contiguità spaziale.
I fili d'erba, di conseguenza, sono gli elementi che ne subiscono la forza esercitata. Per sineddoche, il prato, viene interpretato come un'entità finita, composta dall'insieme dei fili d'erba. In questo sistema quindi, il vento rappresenta il campo, il prato il materiale, e il movimento dei singoli fili d'erba l'interazione tra i due.
Dalla metafora, enuncia infine tre elementi distintivi dell'universo metamaterico:
-il campo, inteso come elemento attivatore di una serie di reazioni
-il materiale,inteso come elemento composto da sub-unità, sensibili singolarmente alle reazioni attivate dal campo, ma complementari le une alle altre
-l'interazione, intesa come il principio di azione-reazione tra il campo e le sub-unità che compongono la materia.
Ognuno di questi elementi si presenta come un'entità regolabile secondo parametri. Ugualmente accade per le relazioni che intercorrono tra di loro.
Da questo quadro si prefigurano i tre insiemi che ramificano l'universo dei metamateriali e le relazioni ad essi interconnesse.
La proposta dottorale intende attingere da questo ecosistema, per portare alla luce il potenziale legato alla programmabilità delle prestazioni di questi materiali. L'intento è quello di proiettare, attraverso un'operazione di cambio di scala, l'effetto che tale trasferimento può apportare nel settore del Design di Prodotto.
Come si evince dallo stato dell'arte riportato, applicazioni note di metamateriali meccanici nel product design risultano essere ancora rare ed embrionali. Sinora, gli artefatti prodotti con metamateriali meccanici sembrano fermarsi a considerazioni limitate al solo aspetto della funzionalità, e restituiscono l'immagine di oggetti privi di qualsiasi progettualità sensoriale ed emotiva. Oltre a mettere in evidenza i benefici traibili a livello prestazionale, l'impegno che il presente elaborato prende in carico, è verificare il contributo in termini di estetica morfologica, di espressività sensoriale e di esperienza fruitiva, apportato dai metamateriali meccanici negli scenari di prodotto.

1.5 Destinatari

I principali consegnatari di questo lavoro sono i designers, o apprendisti designers ed i ricercatori distribuiti tra le discipline

del design, con particolare riferimento ai designer focalizzati sul design dei materali. In particolare, l'elaborato si rivolge ai progettisti che intendono approfondire, o già approfondiscono, le tematiche relative alla sperimentazione, o all'approfondimento sui materiali e sui campi di applicazione di questi nel design del prodotto. L'intenzione è quella di offrire ai progettisti uno strumento facilitatore e sintetico di supporto alla selezione di metamateriali; di farne comprendere e rendere autonoma la selezione; di riconoscerne le qualità intrinseche in termini prestazionali.
In seconda istanza, su una scala di sistema, i destinatari sono le industrie della filiera di produzione del prodotto, quali industrie di materiali e di ingegnerizzazione di prodotto, che possono potenziare, nella filiera, la produzione la distribuzione di questa categoria di materiali attualmente riproducibili in laboratorio e quindi su piccolo taglio.

1.6 Fasi e metodi

La ricerca è implementata in due momenti:

La Fase 1 - Ricerca **on Desk**, di tipo teorico, mirata all'approfondimento dello stato dell'arte. Inquadra il problema scientifico nel panorama globale e sociale.
In particolare, il primo blocco di questa fase esamina in scala macro il tema della ricerca. Il secondo blocco lo argomenta attraverso l'analisi della categoria specifica dei metamateriali ed il rapporto di questa con il product design.
I passaggi sono descritti per punti di seguito:

- Individuazione e ricostruzione del percorso storico, della scoperta ed evoluzione dei Metamateriali
- Definizione di Metamateriali (MM)
- Analisi stato dell'arte (SdA) e letteratura scientifica
- Classificazione dei MM sulla base dello SdA
- Confronto tra MM e Metamateriali Meccanici (MMM)
- Acquisizione Know How delle tecniche riproduzione

La Fase 2 - Ricerca **on Field**, si distingue dalla precedente "Desk" per l' approccio, che, in questa fase, è elettivamente sperimentale. A partire dalla classificazione, sulla base dei contributi scientifici, si intende strutturare in prima battuta, un organigramma, una sorta

di Tavola Periodica dei Metamateriali, con l'obiettivo di fornire un quadro dei metamateriali ad oggi fruibili, ordinandoli per output e definendone gli scenari di fruizione.
Si intende poi procedere ad una operazione di declinazione di questi rispetto all'ambito del Product Design, attraverso il criterio di scalabilità del processo progettuale e produttivo, definendo un metodo applicativo tramite lo sviluppo di un concept fisico.
Si riportano in sintesi i passaggi di questa fase:

- Elaborazione della Tavola Periodica dei Metamateriali
- Mappatura Casi Studio nel Product Design
- Elaborazione concept a partire da brevetto

Metodologicamente, la ricerca si basa su un approccio di ricerca-azione, in cui i contenuti, nella fase di ricerca desk, sono stati selezionati, verificati, distinti e riorganizzati, con lo scopo di individuare punti di congruenza con la dimensione del Product Design. Gli approfondimenti portati in luce con la fase desk, sono stati sintetizzati in uno strumento pratico di classificazione dei metamateriali, che si presenta sotto la forma di una sorta di tavola periodica dei metamateriali che, nello specifico, approfondisce la categoria dei metamateriali meccanici. A convalidare l'esattezza e l'applicabilità di tale strumento nell'ambito del Design, si propone quindi l'elaborazione sperimentale di un concept di prodotto che utilizza un particolare campione di metamateriale per la reinterpretazione di un prodotto in ambito *fashion eyewear*.

1.7 Risultati

In relazione agli obiettivi dichiarati, i risultati che la ricerca intende fissare sono:
R1: Fornire uno strumento cartaceo sinottico di classificazione dei metamateriali
(a): ricerca, analisi, e messa a confronto dei sistemi di classificazione già esistenti
(b): rielaborazione dei casi e restituzione di un modello che ha come target il designer di prodotto
R2: Fornire un modello metodologico per un approccio progettuale (metodologia/processo per la realizzazione di un prodotto a partire da un metamateriale meccanico)
(a): Individuare un metamateriale meccanico

(b): Individuare la scala di utilizzo del metamateriale meccanico, quindi il prodotto al quale applicarlo
(c):mettere a sistema i passaggi che mettono in atto l'operazione di trasferimento tecnologico dalla scala nano alla scala 1:1
R3: Creare un concept di prodotto che si avvale del modello metodologico esposto nel R2
(a): descrivere le caratteristiche del prodotto identificato
(b): Applicare la metodologia R2
(c): Verificare il risultato

1.8 Taglio della ricerca

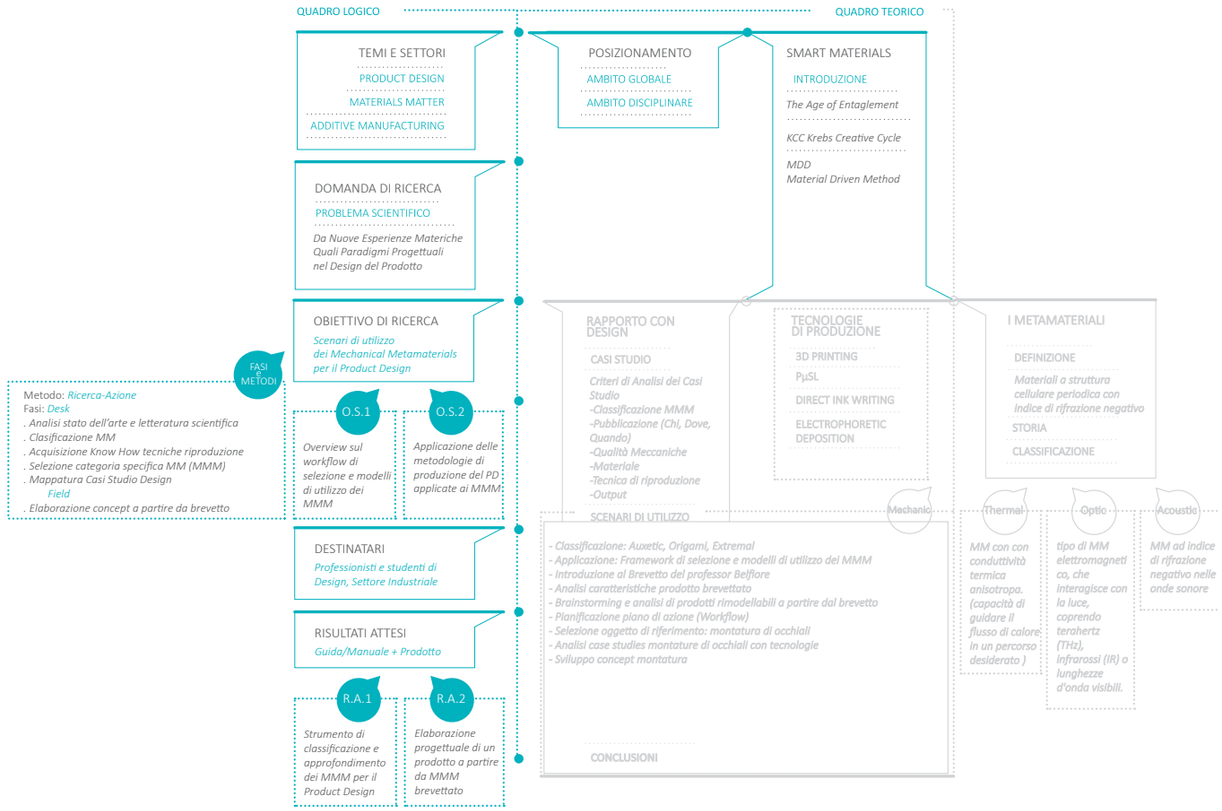
Il contenuto esposto nella proposta di dottorato si avvale di un contributo interdisciplinare. La ricerca prende le mosse dell'eredità di discipline scientifiche classiche, come fisica ed ingegneria meccanica, e tenta un operazione di declinazione di tali conoscenze, applicandole con le dovute considerazioni, al mondo della progettazione in scala 1:1, il Product Design. L'intento di questo elaborato è quindi quello di compiere un'operazione di trasferimento tecnologico dal settore dell'ingegneria dei nanomateriali al product design, offrendo un'overview completa sui potenziali campi di applicazione e scenari di utilizzo nel product design, non solo dei metamateriali meccanici di per sé ma anche di tutta la filiera che concerne le tecnologie ed i processi di riproduzione di questi.

ABSTRACT
What's the state of the art? What are the upcoming, futuristic and idealized expectations for metamaterials, their reproducibility and their insertion into the planning landscape? Especially to what implications, what new topics of discussion, operational approaches and conceptual challenges, are Product Designers expected to be predicted?
The theoretical outcomes of these questions were studied in this chapter, which wants to be founded on the tripartition into innovative materials / new production techniques and, precisely, and multidisciplinarity.
In the second paragraph two best practices (BP) are reported in the academic world, which aims offering an "unedited" design based on new methodological and productive paradigms, corroborating the practice of materials at the intersection of computer science, materials engineering , design and ecology, returning application experiments on several scales. Similarly, the present research can be interpretated as an addition to the educational landscape reported in the chapter, assuming the role of instrument for an in-depth study for a better knowledge and treatment of a category of materials that can be read as the result of entropy of the contemporary disciplinary scenario in practice of product design.

CAPITOLO 2

IL PROGETTO DI RICERCA
Quadro Teorico

ABSTRACT
A quale punto è lo stato dell'arte? Quali sono le aspettative prossime, futuribili e idealizzate per i metamateriali, la loro riproducibilità ed il loro inserimento nel panorama progettuale? Specialmente a quali implicazioni, a quali nuovi argomenti di discussione, approcci operativi e sfide concettuali, sono e saranno prevedibilmente esposti i Product Designers?
Gli outcomes teorici di queste domande sono stati oggetto di studio in questo capitolo, che, sulla tripartizione : materiali innovativi/nuove tecniche di produzione e, appunto, multidisciplinarietà, vuole fondarsi.
Nel secondo paragrafo si riportano quindi due best practices (BP) nel mondo accademico, che hanno l'obiettivo di offrire un design "inedito" basato su nuovi paradigmi metodologici e produttivi, corroborando la pratica dei materiali all'incrocio tra informatica, ingegneria dei materiali, design ed ecologia, restituendo esperimenti applicativi su più scale. Similmente, la ricerca in questa sede presentata, intende sommarsi al panorama didattico riportato nel capitolo, con il ruolo di strumento di approfondimento, conoscenza e trattamento di una categoria di materiali che può essere letto come la risultante dell'entropia dello scenario disciplinare contemporaneo nella pratica di design del prodotto.



2 Quadro Teorico

2.1 Posizionamento nello scenario globale, sociale e di filiera

«The significance of materials in the development of early civilizations is attested to by the way in which archaeology has divided technological progress into eras defined by materials endemic to them: the Stone Age, the Bronze Age and the Iron Age. Today's epoch may be described as the Materials Age, as a result of new developments in materials and technologies which have dramatically altered the way in which we make, build and live»[8].

Nel suo noto lavoro, *«The Material of Invention»*[9], Manzini (1986) sottolineava che i nuovi materiali erano caratterizzati soprattutto dalla loro funzionalità. Tuttavia, piuttosto che chiedere "che cosa è?", in riferimento a un materiale di nuova conoscenza, i progettisti dovrebbero chiedersi "che cosa fa?" L'ultima domanda riflette la comprensione che un materiale con le sue proprietà, potenziali applicazioni e prestazioni influenza gli utenti e dà luogo a esperienze utente uniche. Questa è riconosciuta come una delle strategie migliori per abbreviare i tempi di gestazione di un'innovazione dei materiali (Ashby & Johnson, 2009; Miodownik & Tempelman, 2014; Wilkes et al., 2015)[10].
Secondo Mike Ashby […]*what matters (in design) is the process of finding solutions that are meaningful to people*[...] . Ovvero: ciò che dovrebbe orientare il professionista nel suo sforzo creativo e di sintesi progettuale, dovrebbe essere la tensione verso un "qualcosa" che favorisca nuove esperienze e crei un impatto positivo nella società e nella vita quotidiana . Una visione condivisibilmente positivista, orientata al sociale che, tuttavia, al di là di ogni pur favorevole valutazione etico-filosofica, attrae il nostro interesse, in questa sede, per i modi in cui dovrebbe estrinsecarsi; particolarmente, per quanto concerne le ricadute positive su: ricerca sui materiali, multidisciplinarietà e tecniche di produzione.

8. Ashby, M. (1995), *Materials Selection in Mechanical Design*, Butterworth-Heinemann
9. Manzini, E. (1986), The Material of Invention, ed Arcadia
10. Ashby, M., Johnson, K. (2009), *Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design,* Butterworth-Heinemann;
Miodovnik, M., Tempelman, E., (2014), Light Touch Matters. The product is the interface, *Materials Matters VII;*
Wilkes, S. (2015), Design Tools for Interdisciplinary transaltion of material expereinces, *Journal of Materials & Design*

11. *ibidem*
12. Karana, E. (2015). Material Drivn Design (MOD): A method to design for material experiences. *International Journal of Design.*

Prosegue l'autore: «[...]*with respect to materials and design, it is the combination of elements of art and science that make it work*[...][11]». Arte e scienza. L'arte, pertanto, non più materializzata all'interno della scontata e ancestrale dipendenza con quanto naturalmente disponibile, in una logica residuale; tecnologicamente costretta alla necessità contingente, ma nell' ambizione prometeica di una creazione originale e mirata. Perché «[...]*advances in materials, enable advances in industrial design*[...]» e se non bastasse : «[...]*New developments in materials and processes are sources of inspiration for product designers, suggested novel, visual, tactile, sculptural and spatial solutions to product design*[...]»
La disponibilità di nuovi materiali, in estrema sintesi, favorisce, secondo Ashby, due sovrapponibili opportunità: quella di sopperire a nuove funzionalità e quella di contribuire in modo determinante alla caratterizzazione della personalità del prodotto. Ciononostante, per un coacervo di ragioni che sarà interessante approfondire, non assistiamo al martellante proliferare di proposte nell'uso di materiali che sarebbe lecito attendersi e scarseggiano le testimonianze di sostituzione definitiva nella pratica comune.
La conseguenza più eclatante che emana dalla contraddizione tra la progressione registrabile nello sviluppo di materiali innovativi e la intrinseca lentezza di recepimento degli stessi nelle fasi di implementazione industriale (Karana, 2015)[12] si manifesta nel paradosso di trovarsi nella disponibilità di "soluzioni in cerca di problema", avendo a disposizione materiali dalle caratteristiche tanto peculiari e potenzialmente interessanti, quanto inesplorate e in costante attesa di essere testate sul campo. Proprio a questo proposito, sempre Ashby, lamenta: «[...] *Technical designers have ready access to information of the sort they need – handbooks, selection software, advisory services and optimization codes for safe, economical design. Industrial designers express frustration [...] that they do not have equivalent support. In higher education the same discrepancy appears : the teaching of the science and technical application of materials is highly developed systematized, supported by numerous texts , software, journals and conferences: there is no similar abundance of support for the teaching of materials in industrial design. Bridging this gap in information and methods is not simple. [...]»* ma sarebbe, certamente, opportuno.
Il superamento della cesura tra il macrocosmo della ricerca scientifica e l'ambiente più specialistico dell'industrial design non è e non vuole essere argomento di questa ricerca: che una sperimentazione applicativa di nuovi materiali posti al servizio del genio creativo discenda da una singola, episodica iniziativa personale di scouting, o sia coordinata in un pur auspicabile flusso comunicativo collettivo, programmato e costante, diretto e bi-direzionale, con eventuale interposizione di enti facilitatori, poco potrà incidere sul merito reale delle scelte che porteranno a preferire l'uno o l'altro materiale (salvo intervenienze per finalità extra scientifiche o di opportunità varia ed eventuale) o condizionare le potenzialità di concepire nuovi usi per vecchi prodotti o nuovi prodotti per usi inesplorati. Sotto qualunque circostanza, comunque l'opportunità si sia generata, la "creazione" non potrà elevarsi senza una presa di consapevolezza concreta di ciò che si sta fisicamente trattando. Da questa premessa, di ineludibile "Pragmatismo Materiale", la dottrina contemporanea trova un inquadramento metodologico applicativo nel "*Method to Design for Material Experiences*" elaborato da Elvin Karana (2015)[13]: il *Material Driven Design* (MDD) prende, infatti, le mosse da un esame obiettivo qualificante dei (nuovi) materiali «[...]*not only for "what it is", but also for "what it does" ; "what it expresses to us" , "what it elicts from us"; and "what it makes us do"*[...]».
In questo senso, il Designer si pone in un ruolo-guida nella ricerca dell'applicazione appropriata che sappia sintetizzare nel "Prodotto", attraverso la conoscenza, gli sviluppi degli scienziati dei materiali e le istanze della industria. Nonostante queste eccitanti premesse, sconsolatamente,«[...]*Nevertheless, how to design for experiences with and for a particular material at hand, remains poorly understood at date* [...]»
E' alla luce di questa constatazione che prende le mosse la metodologia MDD sviluppata al fine di agevolare il processo di riversamento dai laboratori scientifici agli studi di Industrial Design.
Nel paragrafo di posizionamento nello scenario disciplinare, sarà data ampia illustrazione del metodo "MDD" che, in questa premessa, vale sommariamente descrivere come ripartito in quattro fasi sequenziali, ordinate, ma by-passabili: da un momento di approccio, presa di contatto e comprensione, fino alla concezione del prodotto, passando per un momento più meditativo di "visione creativa" e, successivamente, per una schematizzazione dei dati dell'esperienza.
Un metodo che, si vedrà, può trovare applicazione anche nel settore più rivoluzionario e inesplorato dell'attualità scientifica,

13. *ibidem*

come quello dei metamateriali.
I metamateriali (MM) sono materiali nanocompositi di ultima frontiera; strutture ingegnerizzate in grado di comportarsi al di là della propria natura, le cui speciali proprietà derivano dalla struttura stessa, più che dalla composizione materica. Possono «[...] *incorporate internal mechanisms capable of reconfiguring their spatial architecture and, in this way, to enable tunable functionality* [...]»[14] . L'aspetto sicuramente più interessante, a parere dei maggior investigatori del settore, quali Amir Zadpooor (cfr. cap. 8.5), Courentin Coulais, Postdoc della AMOLF University (cfr. cap 12), è la scalabilità delle proprietà - e quindi della programmabilità delle prestazioni - di questi materiali. Una potenzialità che Zadpoor, Coulais, e molti altri nel mondo hanno attualmente posto sotto indagine e qui viene studiata.
Se, come si è visto, l'instaurazione di una linea di comunicazione primaria tra ricercatori e designer è ancora in gran parte da costruire, non meno importante e sensato appare porsi l'obiettivo di allargare il livello di condivisione, coinvolgendo ogni altro possibile fruitore in una rete che possa contribuire a impostare un circolo virtuoso di costruttiva multidisciplinarietà.
Tra le più interessanti e pertinenti proposte recentemente espresse in questa direzione dal mondo scientifico e universitario, cui si riserva attenta considerazione in questo lavoro, si pone l'esperienza di Carullo, Cecchini, Ferrara, Langella, Lucibello "*From Science to Design: the Design4Materials virtuous cycle*"[15] .
Muovendo dalle consolidate constatazioni sulla "staticità" del rapporto tra gli ambienti della ricerca e l'industria, il "*Design4Materials*" delinea una metodologia "circolare" di network of *design innovation* che, con specifico riferimento alle singole esperienze maturate nell'utilizzo dei materiali innovativi, intende trasformare i network locali dei vari poli universitari in un più esteso e interconnesso network nazionale, creando un rapporto sinergico tra le differenti metodologie applicative individuali. Gli outcomes di questa proposta e le tappe attraverso cui si sono realizzati, sono stati oggetto di studio in vista della perfetta aderenza della iniziativa alle aspettative di questa ricerca che , sulla tripartizione : materiali innovativi/nuove tecniche di produzione e, appunto, multidisciplinarietà, vuole fondarsi.

Per esprimerla con le parole del modernista George Nelson *«No design can exist in isolation. It is always related, sometimes in very complex ways, to an entire constellation of influencing situations and attitudes. What we call a good design is one which achieves integrity – that is, unity or wholeness – in balanced relation to its environment»*[16].

In coerenza a quanto ci ricorda A. Deserti, nel saggio "Mappe dell' *Advance Design*[17] sull'importanza dell' attività combinatoria tra *skill* e *tool*, questa ricerca si concentra sui mezzi e sulle tecniche di produzione; vale a dire, i *tools* attualmente disponibili, che meglio hanno dimostrato di adattarsi alla lavorazione delle produzioni in materiali "smart", non convenzionali e cosiddetti "metamateriali LHM, NRI, DNG" (cfr. cap. 3.2).

Il criterio di selezione per una classificazione dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche dei MM, prende in considerazione:
- Scalabilità del processo produttivo
- Fattibilità nella realizzazione in scala 1:1
- Industrial feasability
- Impattanza applicativa nel settore dell'Industrial Design

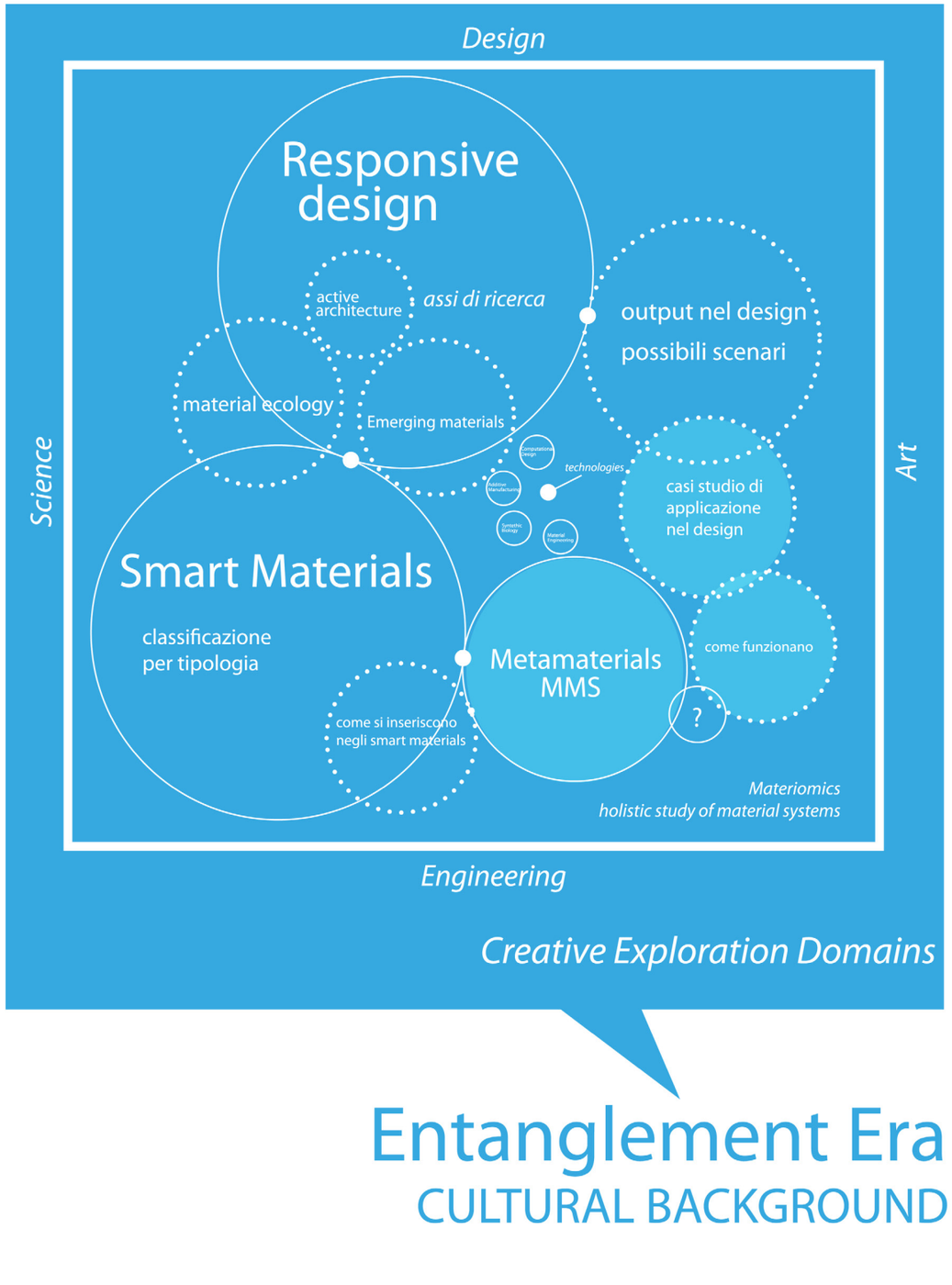
Altri criteri di classificazione sono poi riferiti alle comuni caratteristiche di "famiglie" di materiali" , sotto il punto di vista della risposta a condizionamenti di tipo termico, acustico, conduttivo, ecc.

Come riferisce Neri Oxman (*Meditated Matter Group)*[18] la nuova frontiera tecnica per una produzione *digitally manufactured* (ma anche *environmentally informed*) è il *3D printing* o, in termini più generici, ma meno esposti al rischio di soffrire di improvvisa obsolescenza, di fronte alla rapidità dello sviluppo di nuovi macchinari e sistemi, si impone la tecnologia dell' *additive manufacturing* (curiosamente, viene spontaneo commentare, l'opposto simmetrico della visione michelangiolesca che, nel pieno di un blocco marmo, leggeva la statua imprigionata all'interno, liberandola dalle scorie di lavorazione...) Si vedrà, nel testo, a quale punto è lo stato dell'arte; quali sono le aspettative prossime, futuribili e idealizzate di questo genere di produzioni e, specialmente a quali implicazioni, a quali nuovi argomenti di discussione, approcci operativi e sfide concettuali, sono e saranno prevedibilmente esposti i Product Designers.

14. Overvelde, J.T.,Weaver, J.C., Hoberman, C., Bertoldi, K.(2017), Rational design of reconfigurable prismatic architected materials, *Nature.*
15. Carullo,C. Cecchini,M. Ferrara,C. Langella,S. Lucibello,S. (2017). From Science to Design: the Design4Materials virtuous cycle, *The Design Journal, 20:sup1*, (S1794-S1806)
16. Nelson, G. (1957), *Problems of Design*, Whitney Publications
17. Deserti, A. (2010). Mappe dell'Advance Design. M. Celi (Eds.). AdvanceDesign: Visioni, percorsi e strumenti per predisporsi allinnovazione continua, 47-64.
18. https://mediatedmattergroup.com/

2.2 Posizionamento nello scenario disciplinare

Come accennato nel capitolo precedente, esiste un legame radicato tra ricerca, materia e product design, che ha conquistato una posizione dominante nella pratica accademica. L'interesse di questo paragrafo è approfondirne alcune, di già citate e non, e mettere in evidenza i processi e le metodologie che tale relazione ha prodotto in ambito disciplinare. In questo paragrafo si riportano quindi due best practices (BP) nel mondo accademico, che hanno l'obiettivo di offrire un design "inedito" basato su nuovi paradigmi metodologici e produttivi, corroborando la pratica dei materiali all'incrocio tra informatica, ingegneria dei materiali, design ed ecologia, restituendo esperimenti applicativi su più scale. Similmente, la ricerca in questa sede presentata, intende sommarsi al panorama didattico di seguito riportato, con il ruolo di strumento di approfondimento, conoscenza e trattamento di una categoria di materiali che può essere letto come la risultante dell'entropia dello scenario disciplinare contemporaneo nella pratica di design del prodotto.



19. ibidem
20. Karana, E., Barati B., Rognoli V. (2015). A Zeeuw van der Laan, Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences. Il Design, 9 (no. 2)

Best Practice 1 MDD Material Driven Method, di Elvin Karana

Elvin Karana è professore associato di Design Engineering alla DELFT University of Technology, Delft, Olanda ed è la fondatrice e direttrice del Materials Experience Lab. E' autrice di numerose pubblicazioni sul tema dei materiali e del design sin dalla carriera accademica; ha intrapreso la sua ricerca di dottorato presso la TU Delft, dove ha sviluppato uno strumento chiamato '*Meaning Driven Materials Selection Tool*'[19] (Karana, 2010) , per supportare i progettisti nelle loro attività di selezione dei materiali. Da allora, ha guidato una serie di progetti di ricerca incentrati sul design per esperienze materiali. Nel suo lavoro, ha dimostrato che la nozione di "esperienza con i materiali" è utilizzabile nel pensiero progettuale e applicabile sia alla pratica del design che alla ricerca di design.
Nell'articolo *Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences*, Karana, Bahareh Barati, Valentina Rognoli e Anouk Zeeuw van der Laan presentano un nuovo metodo per sviluppare il processo di progettazione e suggerire il materiale come punto di partenza. L'articolo descrive le fasi di questo metodo che gli autori chiamano appunto, *Material Driven Design* (MDD)[20].
MDD rappresenta il primo tentativo di facilitare i progetti in cui il "materiale" è il punto di partenza esplicito nel design processing e 'esperienza' è il risultato atteso. "«*'material' is the explicit point of departure in the design process and 'experience' is the expected outcome*».

2.1

Fig.2.1 Elvin Karana, TU Delft

In particolare, gli autori descrivono quattro fasi principali, partendo dall'esperienza visiva del materiale di progettazione di un prodotto.

I passaggi sono (confronta Fig 2.3):
«(1) Understanding The Material: Technical and Experiential Characterization;
(2) Creating Materials Experience Vision;
(3) Manifesting Materials Experience Patterns;
(4) Designing Material/Product Concepts».

Come si evince da questi passaggi, il *Product Concepts* è una risultante di un approccio che vede il prodotto finale come un'evoluzione morfologica di un concetto elaborato a partire dal significato del materiale.
Nella sezione della *Theoritical Foundation*, gli autori espongono quelli che definiscono i "presupposti" del metodo da essi sviluppato. Interesse di questo elaborato è riportare nello specifico i primi tre, in quanto riferimenti affini all'approccio che si è costruito, sviluppato e messo in atto nel lavoro in questa sede presentato:

- Sebbene l'esperienza del prodotto possa derivare da (o essere moderata da) un'ampia varietà di fonti, uno dei presupposti imprescindibili è la realtà fisica di un progetto, cioè il suo materiale. Pertanto, in qualsiasi progetto di progettazione (guidato dai materiali), si prevede che i materiali modifichino ed influenzino la complessiva *esperienza utente* , ed è per questo motivo che - secondo Karana- l'esperienza dei materiali è imprescindibile dalla progettazione.
- La progettazione con un materiale implica una conoscenza approfondita dello stesso, al fine di scoprire le sue qualità ed i vincoli unici rispetto ad altri materiali. Questo può essere ottenuto attraverso un "armeggiare con il materiale" - una sorta di processo esplorativo di creazione e valutazione - a partire dal primo incontro con il materiale, fino alla sua incarnazione finale nel prodotto alla fine del processo.
- La progettazione con un particolare materiale, richiede azioni da seguire che siano paragonabili a un processo di design del prodotto convenzionale: comprendere il dominio (cioè ricerca sul campo, benchmarking, analisi di mercato, ecc.), definendo requisiti e obiettivi di progettazione, creare concetti per selezionare e dettagliare uno dei concetti verso l'incarnazione del prodotto.

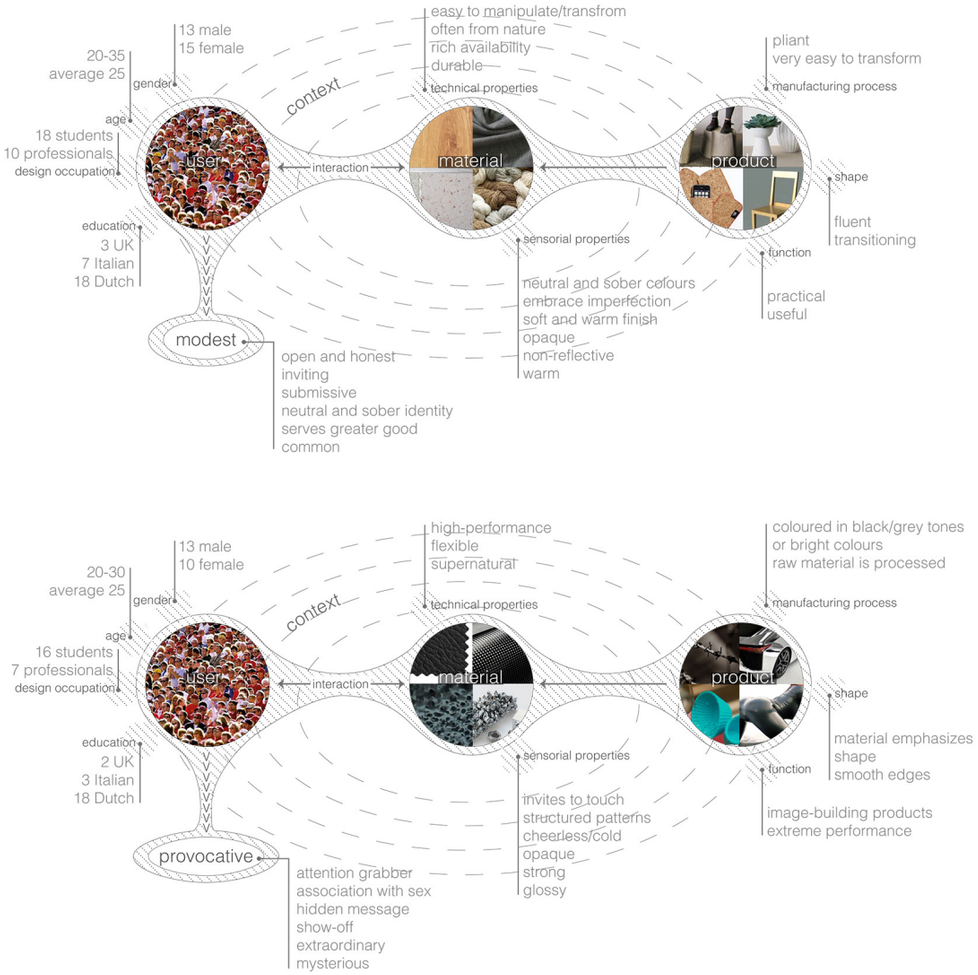


Fig 2.2 Visualizzazione dei modelli ‘modest’ (sopra) e ‘provocative’ (sotto) data sets per ‘materials experience patterns’ estratti dalla pubblicazione scientifica *The Meanings of Materials Model* (Karana, 2009)

2.2

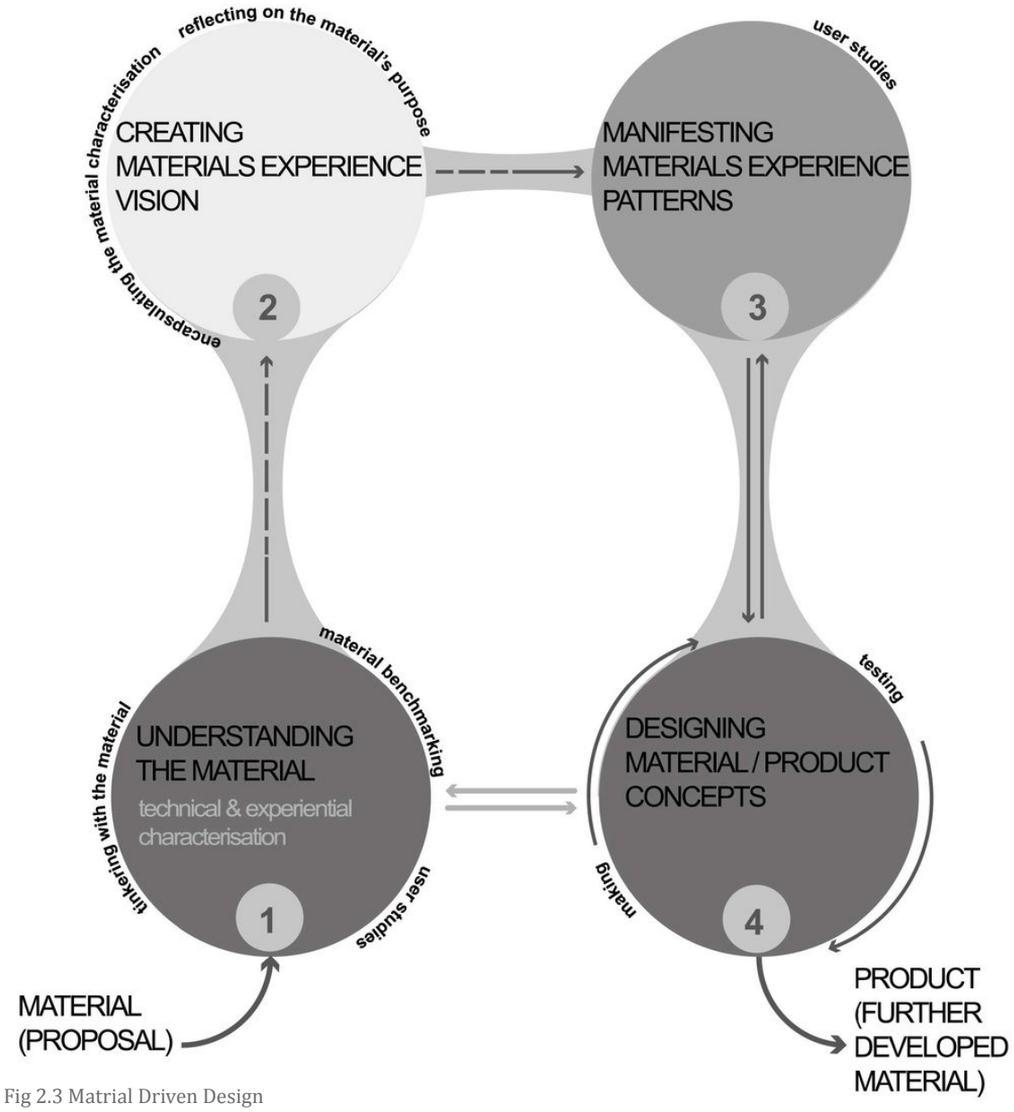
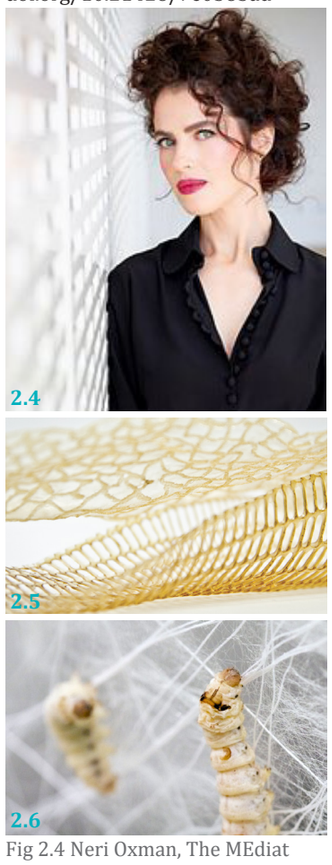


Fig 2.3 Matrial Driven Design (MDD) method;
Immagine estratta dalla pubblicazione *Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences* (Karana, E., 2015)

2.3

21. http://www.materialecology.com/
22. Oxman, N. (2018). Age of Entanglement. Journal of Design and Science. Disponibile da https://doi.org/10.21428/7e0583ad


2.4

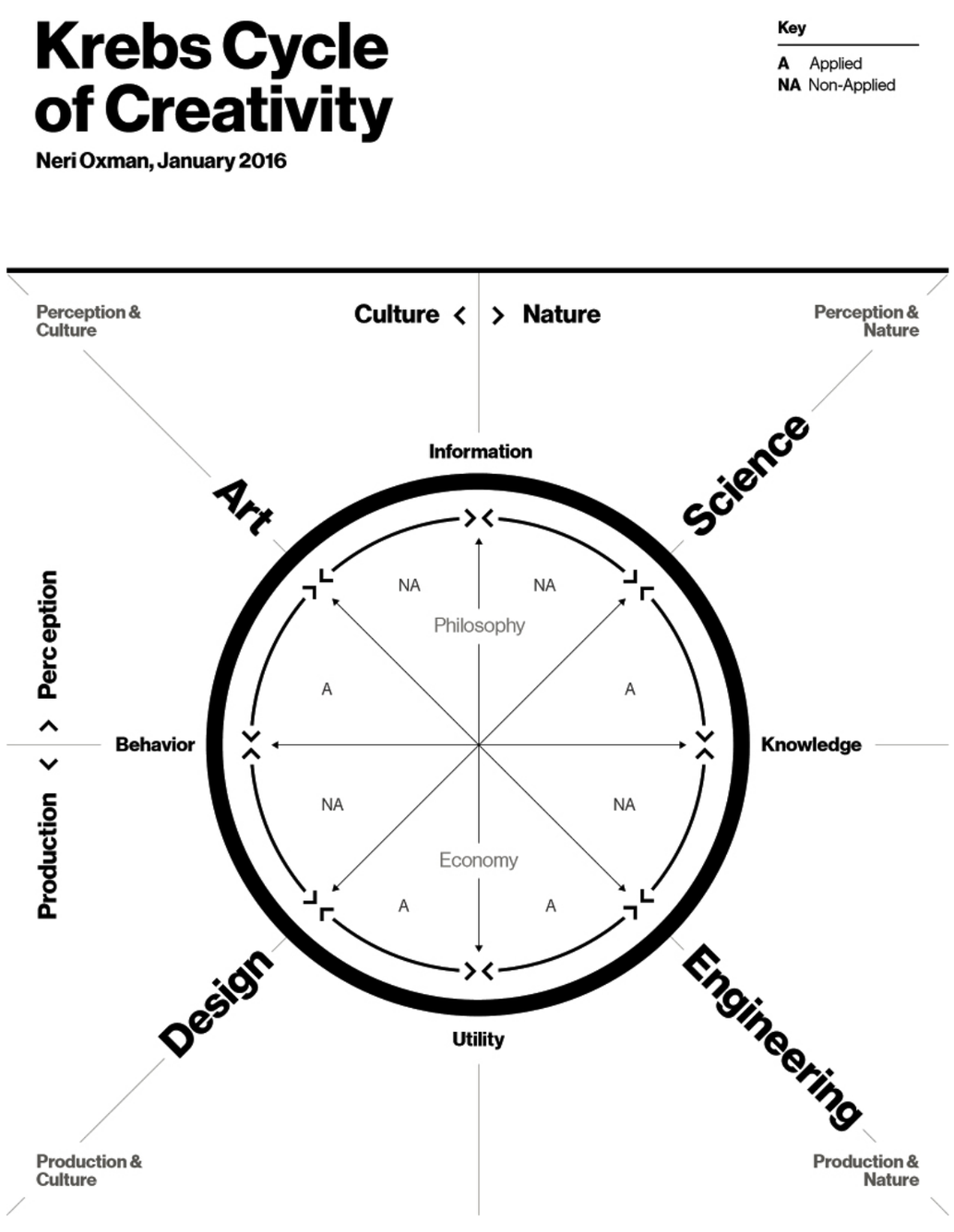
2.5

2.6

Fig 2.4 Neri Oxman, The MEdiat Matter, MIT
Fig 2.5 The Water-based Digital Fabrication Platform (2018)
Fig 2.6 The Silk Pavillion project (2013)
Fig 2.7 *Krebs Cycle of Creativity* (Oxman, 2016)

Best Practice 2: The Mediated Matter, di Neri Oxman

Neri Oxman, ricercatrice al Media Lab del MIT di Boston, ha fondato il Mediated Matter Group nel 2010. Il team incentra la ricerca sul *claim* «*nature-inspired design and design-inspired nature*»- Opera all'intersezione tra design computazionale, fabbricazione digitale, materiali e biologia sintetica e applica tale conoscenza per progettare trasversalmente dalla scala micro alla scala dell'edificio. In questa cornice, conia la definizione di *Material Ecology*[21] per descrivere la sua area di ricerca, pubblicando metodi per la generazione di relazioni verificate tra forma, materia, struttura e ambiente, attraverso scale e domini applicativi. L'aspetto interessante di questo approccio risiede anche nell'operazione di contestualizzazione della sua ricerca d'avanguardia, che proietta il suo lavoro ed i relativi risultati in quello che definisce *the Age of Entalglement* [22]: è la definizione di un'epoca, una nuova era, secondo la quale la conoscenza viene sbrigliata dai confini disciplinari, trovando, al contrario, la sua massima espressione nell'interdisciplinarietà. *The Age of Entalglement* viene raccontata attraverso una mappa concettuale composta da quattro domini della *creative exploration — Science; Engineering; Design and Art —* (Fig 2.7), nel tentativo di definire, in realtà, l'ipotesi contraria: la conoscenza non può astenersi da, o essere prodotta attraverso, confini disciplinari. Al contrario, deve essere totalmente «*entangled*» (letteralmente "impigliata", concettualmente "interlacciata"). «*The role of Science is to explain and predict the world around us; it 'converts' information into knowledge. The role of Engineering is to apply scientific knowledge to the development of solutions for empirical problems; it 'converts' knowledge into utility. The role of Design is to produce embodiments of solutions that maximize function and augment human experience; it 'converts' utility into behavior. The role of Art is to question human behavior and create awareness of the world around us; it 'converts' behavior into new perceptions of information*» All'intersezione di queste relazioni descrive quindi il ruolo dei materiali.
In figura 2.6, l'immagine del progetto Silk Panillion dove La Oxman explora la relazione tra la produzione di prodotto digitale e quella biologica riportata in scala architetturale.



2.7

Bibliografia e sitografia del capitolo

Bibliografia

Nelson, G. (1957), *Problems of Design*, Whitney Publications
Ashby, M. (1995), *Materials Selection in Mechanical Design*, Butterworth-Heinemann
Manzini, E. (1986), The Material of Invention, ed Arcadia
Ashby, M., Johnson, K. (2009), *Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design,* Butterworth-Heinemann;
Deserti, A. (2010). Mappe dell'Advance Design. M. Celi (Eds.). AdvanceDesign: Visioni, percorsi e strumenti per predisporsi allinnovazione continua, 47-64.
Miodovnik, M., Tempelman, E., (2014), Light Touch Matters. The product is the interface, *Materials Matters VII;*
Wilkes, S. (2015), Design Tools for Interdisciplinary transaltion of material expereinces, *Journal of Materials & Design*
Karana, E. (2015). Material Drivn Design (MOD): A method to design for material experiences. *International Journal of Design.*
Overvelde, J.T.,Weaver, J.C., Hoberman, C., Bertoldi, K.(2017), Rational design of reconfigurable prismatic architected materials, *Nature.*
Carullo,C. Cecchini,M. Ferrara,C. Langella,S. Lucibello,S. (2017). From Science to Design: the Design4Materials virtuous cycle, *The Design Journal, 20:sup1*, (S1794-S1806) Doi: 10.1080/14606925.2017.1352699

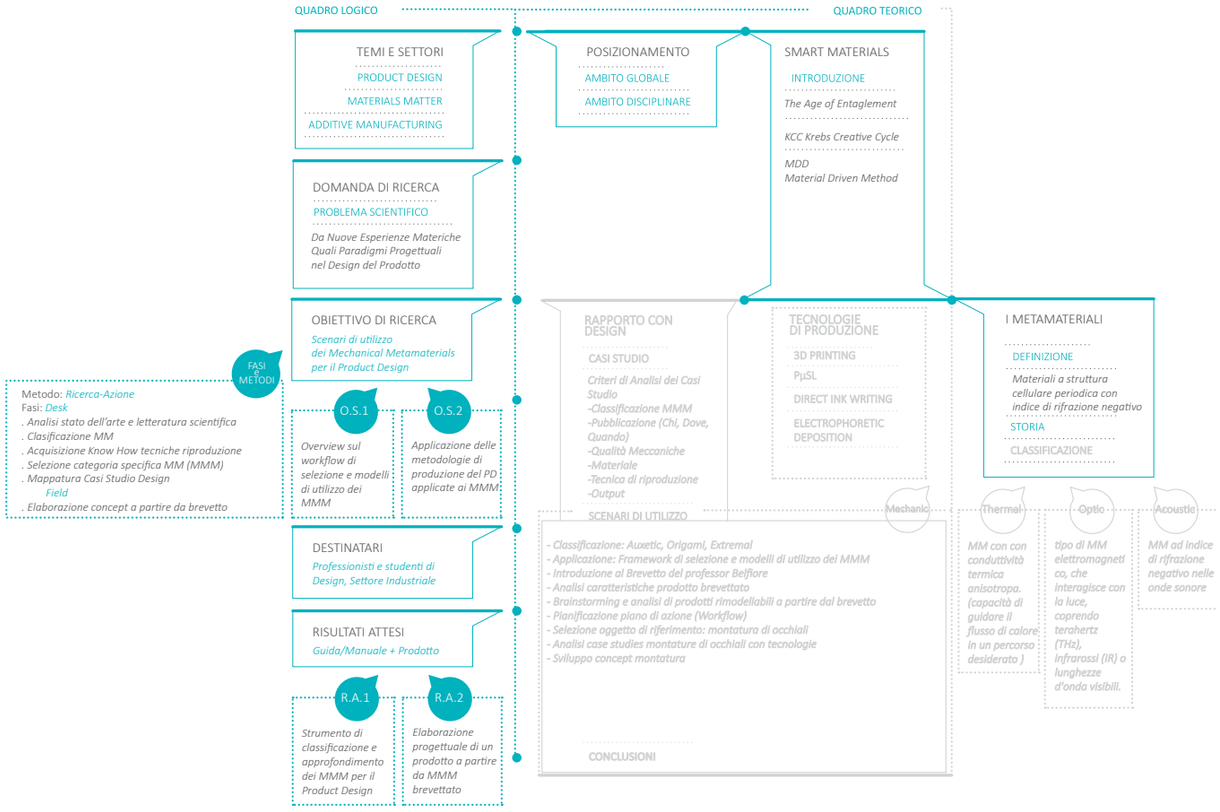
Sitografia

https://mediatedmattergroup.com/
http://www.materialecology.com/

CAPITOLO 3 I METAMATERIALI

ABSTRACT
Metamaterials are identified as macroscopic composites having a three-dimensional human-made cellular architecture designed to produce an optimized combination, not available in nature, of two or more responses to a specific excitation. The aim of the chapter is to understand the meaning of this definition, reconstructing the historical path, from the first theoretical formulations to the applicability in a practical sense that can be found today. Then we proceed with the analysis of the so-called negative refractive index materials and related properties and explains why the importance of this concept in comparison with the material world so far considered. finally, with a scalar approach, a comparison between metamaterials and smart materials is made.

ABSTRACT
I metamateriali sono identificati come compositi macroscopici aventi un'architettura cellulare tridimensionale creata dall'uomo, progettata per produrre una combinazione ottimizzata, non disponibile in natura, di due o più risposte a un'eccitazione specifica. Obiettivo del capitolo è capire il significato di questa definizione, ricostruendo il percorso storico, dalle prime formulazioni teoriche all'applicabilità in senso pratico che è possibile riscontrare ad oggi. In seguito si procede con l'analisi dei cosiddetti materiali ad indice di rifrazione negativo e relative proprietà e si spiega il perché dell'importanza di questo concetto nel confronto con il mondo materico sinora considerato. Infine , con approccio scalare, si effettua un confronto tra i metamateriali e gli smart materials.



3 I metamateriali

3.1 Cenni storici

Etimologia

Il termine metamateriale è composto dal prefisso *meta-*, che deriva dal greco e significa "oltre", tautologicamente tradotto, "la materia della materia" o "la materia che va oltre la materia" . O, ancora, "ciò che si pone oltre la materia". Nella definizione di metamateriale, s'intende esprimere, nel contenuto di una sola parola, il processo che porta alla costruzione di una tipologia di materiali strutturati su un preciso ordine progettuale.

Veselago e la prima intuizione

Il fisico sovietico Victor Veselago, con la sua pubblicazione *The Electrodynamics Of Substances With Simultaneously Negative Values Of ε And μ* del 1968 [23] (tradotto dal russo all'inglese nel 1968), teorizza per primo il concetto di permettività negativa. Con il suo lavoro, afferma categoricamente che, fino a quel momento, non era stato mai rappresentato in alcun modo una droma isotropica della materia che presentasse contemporaneamente valori negativi sia per la costante dielettrica che per la permeabilità magnetica (Veselago et al., 1968). Il fisico britannico Allan Boardman, descrive il talento del pioniere con le seguenti parole: *«it can be truly acknowledged that he guided the world along the track of negative refraction and that his work has proved to be remarkably prescient»*[24].

Fig 3.1 Victor Veselago, fisico russo che per primo ha teorizzato i materiali con permettività e permeabilità negativa https://en.wikipedia.org/wiki/Victor_Veselago

Dagli anni duemila ad oggi

Nonostante sia attribuita a Veselago la paternità di questa nuova categoria della materia, è solo con l'avvento degli anni 2000 che

23. Veselago, V. G. (1968) The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ, *Sov. Phys. Usp.* 10 509–514
24. Boardman, A. (2010). Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago, IOP Publishing Ltd.

Fig 3.2 Sir John Pendry, vincitore del Nanoscience Prize
Photo: Per Henning/NTNU
https://www.flickr.com/photos/92416586@N05/15206938652

Fig 3.3 David R. Smith, Duke University, con il cloak device.
Photo: Duke University Photography
https://www.eurekalert.org/multimedia/pub/11663.php?from=128733,

si completano i primi esperimenti tangibili che ne dimostrano effettivamente la veridicità. Già nel 1999 il fisico inglese John Pendry (nominato in seguito Cavaliere della Corte della Regina per i meriti conseguiti nel campo della fisica) inaugura, a partire dalla teoria di Veselago, l'era dei metamateriali, riproducendo in sede sperimentale presso i laboratori del proprio dipartimento, i primi due materiali con indice di rifrazione negativo[25]. Sarà però D.R. smith, due anni più tardi, nel 2001 che otterrà di riprodurre, in un solo materiale, entrambe gli indici negativi, confermando quindi sperimentalmente la teoria di Veselago. Smith e i suoi colleghi della UCSD hanno poi verificato l'esistenza di un primo metamateriale *left handed* (o indice negativo) alle frequenze delle microonde nel 2000[26].

Fino a questo momento, non era mai stato riportato sperimentalmente di alcun materiale o composto naturale con un indice di rifrazione negativo. Nel 2001, il professore David R. Smith e colleghi hanno eseguito un secondo esperimento, confermando una delle congetture chiave di Veselago: l "inversione" della legge di Snell[27,28]

Questi due documenti - il primo pubblicato su *Physical Review Letters* e il secondo su *Science* - hanno generato un enorme interesse in tutta la comunità scientifica sulla possibilità che i metamateriali estendano e aumentino le proprietà dei materiali convenzionali. Entrambi i documenti sono stati oggetto di citazione per quasi 2000 pubblicazioni ciascuno.

Smith parla del concetto di metamateriale come un fenomeno espansivo, che prende forma nel 1999 da Rodger Walser, il quale suggerisce che materiali compositi costruiti con una determinata accuratezza, avrebbero potuto ottenere proprietà fisiche ben oltre i componenti costitutivi. L'idea non era senza precedenti: le fibre composte - miscele di carbonio o fibra di vetro e polimeri - esistevano già da decenni ed erano ampiamente utilizzate per creare strutture resistenti ma leggere.

Tuttavia, Walser e molti altri si erano convinti che ci fosse molto di più dietro a questo concetto che non era stato sfruttato appieno, specialmente in aree al di fuori dell'ingegneria strutturale[29]. Infatti, mentre la comunità dei metamateriali cresceva e progrediva velocemente nella sua ricerca, si veniva consolidando una grande quantità di nuovi paradigmi fisici e si introducevano approcci di tipo ingegneristico . Tali innovazioni si sono rivelate invasive al punto da ripercuotersi su paradigmi scientifici consolidati. In effetti, l'avvento dei metamateriali ha stimolato un riesame dei concetti sottostanti, ad esempio, nel campo dell'ottica, come, praticamente in ogni altro settore, via, via coinvolto. Come lo stesso Smith sostiene, ad oggi, l'esperienza sperimentale svolta sui metamateriali impone sempre maggiori ripensamenti e nuovi approcci in molte discipline scientifiche e ingegneristiche.

Nel periodo tra il 2014 e il 2016, una serie di pubblicazioni provenienti dalle maggiori realtà accademiche internazionali, quali: Harvard, Tu Delft, Hasso Plattner University, Leiden University, Duke University, per citarne alcune, metteva in evidenza una deriva alternativa, sino a quel momento non esplorata: Nella definizione di metamateriale si è verificato un "glitch"; una deformazione. Infatti, a dispetto della complessità gerarchica in cui si organizza la struttura dei metamateriali, i metamateriali stessi non erano mai stati presi in considerazione come veri e propri sistemi, bensì come semplici materiali dalla natura "artificiale" e complessa. Lo studio sulla loro programmabilità e sulla gestione delle proprietà derivanti a scala reale, hanno aperto nuovi paradigmi interpretativi, tali per cui i metamateriali sono stati presi in considerazione come veri e propri meccanismi (a. Ion, 2016)[30]. Laboratori di ricerca dal respiro internazionale e multidisciplinare, derivanti dalle università sopra citate, adottando tecnologie mainstream provenienti dall'additive manufacturing, hanno spostando l'ago della ricerca, prima incentrata sulla possibilità di generare artificialmente materiali dalle proprietà insolite, alla funzione prestazionale derivata dalle relazioni tra le proprietà meccaniche intrinseche di tali materiali e verso la scalabilità di queste sino a tradurli come veri e propri sistemi-oggetti.

3.2 Posizionamento nel panorama materico

Il termine è stato utilizzato per la prima volta da Rodger M Walser nel 2001, che ne ha dato la seguente definizione: «i metamateriali sono identificati come compositi macroscopici aventi un'architettura cellulare tridimensionale creata dall'uomo, progettata per produrre una combinazione ottimizzata, non disponibile in natura, di due o più risposte a un'eccitazione specifica» (Walser, 2001; Gangwar, 2014)[31].

Nella pubblicazione "*Metamaterials: Theory, Design and Applications*, Smith, specifica che i metamateriali sono compositi

25. Pendry, J.B. (2000). Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Physical Review Letters, (pp. 85, 3966-3969)
26. Smith, D. R., Padilla, W., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., and Schultz, S. (2000) A composite medium with simultaneous negative permittivity and permeability Phys. Rev. Lett. 84, 4184–4187
27. https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Snell
28. Cui T., Smith D., Liu R., (2010) Metamaterials : theory, design, and applications, *Springer* pp: 367
29. Walser, R. M. (2001) Electromagnetic metamaterials, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 4467
30. Ion, A., Frohnhofen, J., Wall, L., Kovacs, R., Alistar, M., Lindsay, J., Lopes, P., Chen, H. T., Baudisch P. (2916) Mechanical Metamaterials, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, ACM, 529-539
31. Gangwar K, Paras RPS, Gangwar (2014) Metamaterials: characteristics, process and applications. *Advance in Electronic and Electric Engineering* 4(1): 97-106.

31. *ibidem.*

macroscopici di strutture periodiche o non periodiche, la cui peculiarità è dovuta sia all'architettura cellulare, che alla composizione chimica. Più specificamente, argomenta che, se il metamateriale è considerato come un media efficace - una sorta di materiale di transizione - vi è l'ulteriore requisito che la dimensione cellulare sia inferiore o uguale alla lunghezza d'onda . Nei metamateriali, l'inclusione di piccole disomogeneità può produrre, a livello macroscopico, effetti inaspettati in termini di comportamento del materiale. Pertanto, incorporare integrazioni artificialmente fabbricate in un mezzo ospite -un media specifico - fornirà al progettista un'ampia collezione di parametri indipendenti, tra cui le proprietà dei materiali ospiti e le proprietà relative alla dimensione, alla forma e alle composizioni chimiche dei materiali ad esso integrati[31]. Tutti questi parametri di progettazione possono giocare un ruolo chiave nell'ottenere il risultato atteso.
Ricercatori, fisici ed ingegneri dei materiali, sono oggi in grado di realizzare dei sistemi che consentono di prevedere il comportamento delle radiazioni elettromagnetiche, arrivando a manipolare e pre-programmare, il comportamento dei materiali in funzione delle onde.

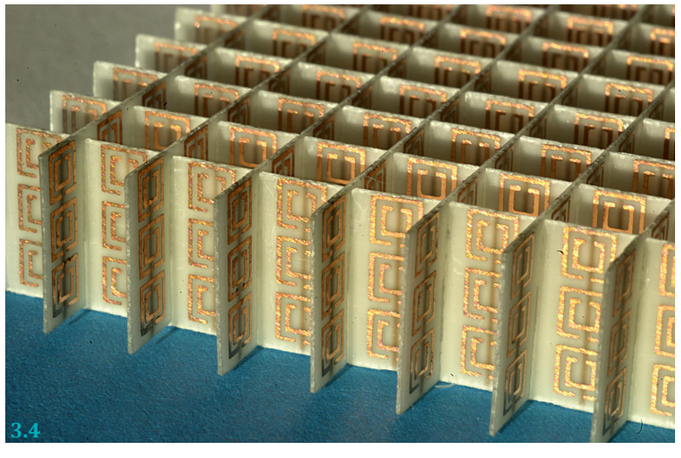


Fig 3.4 Immagine del primo metamateriale sviluppato da D.R. Smith, che presenta permettività elettrica e permeabilità magnetica negative

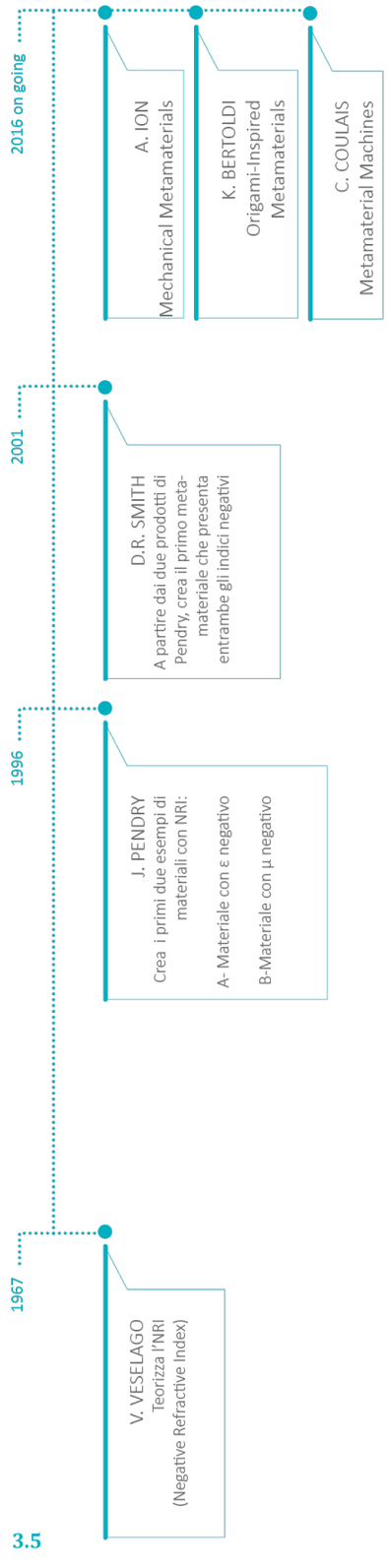


Fig 3.5 Schema raffigurante il percorso storico e cronologico dei metamateriali

3.5

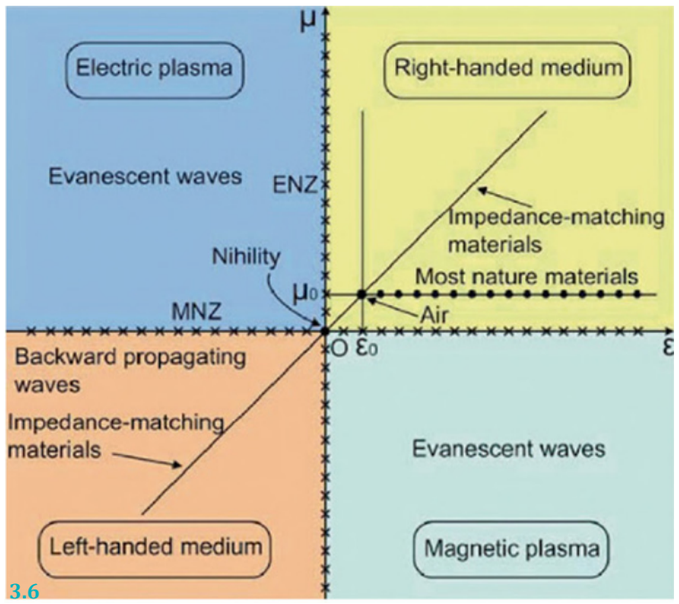
Materiali con indice di rifrazione negativo

In genere, le proprietà dei materiali sono determinate dalle caratteristiche del campo elettrico e del campo magnetico, quindi rispettivamente della permettività elettrica (ε) e della permeabilità (μ) magnetica. Il più sottile materiale in natura è considerato il *free space* (ciò che in ingegneria si definisce come "L'attenuazione di spazio libero") o semplicemente l'aria, la cui permettività si esprime come ε0 e la permeabilità come μ0. La permettività e permeabilità relative di un materiale sono definite come:

$$\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0 \quad \text{e} \quad \mu_r = \mu/\mu_0$$

rispettivamente, che definiscono un altro importante parametro, cruciale nella comprensione del funzionamento dei metamateriali: l'indice di rifrazione (refractive index), la cui formula si presenta come: $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$

(Smith et al. 2009).
In natura, infatti, la maggior parte dei materiali ha permeabilità μ0 e permettività maggiore di ε0.



3.6

Fig 3.6 Schema che suddivide le proprietà dei materiali isotropici nel dominio ε-μ.
(Smith, 2009)

In Fig 3.6, si riporta la schematizzazione di un sistema di classificazione dei materiali in funzione delle proprietà dei materiali isotropici nel dominio ε-μ. Come confermato da quanto esposto sinora, i metamateriali si posizionano nel quadrante in basso a sinistra, dei cosiddetti Left Hand Material (LHM), in cui entrambe gli indici di permeabilità e permettività sono negativi. (Smith et al. 2009)
Come lo stesso Smith sostiene nella pubblicazione *Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity*[32] , le proprietà dei materiali coinvolti determinano le caratteristiche del campo elettromagnetico. Queste proprietà, a loro volta, definiscono i parametri macroscopici di permittività ε e permeabilità μ degli stessi materiali. Lo schema riportato in figura Fig. 3.7 da Gurwinder Singh et al. (2015) , che parte dalla distinzione fatta da Smith in funzione dei valori degli indici dei due parametri ε e μ, propone uno schema di sintesi della classificazione in quattro macro sezioni, rivolto specificamente ai metamateriali:

1)quadrante Alto-Destra: DPS - *Double positive materials*
I materiali che hanno sia la permittività che la permeabilità maggiore di zero (ε> 0, μ> 0) sono chiamati come materiali a doppio positivo (DPS). I media più ricorrenti (ad esempio dielettrici) rientrano in questa designazione.

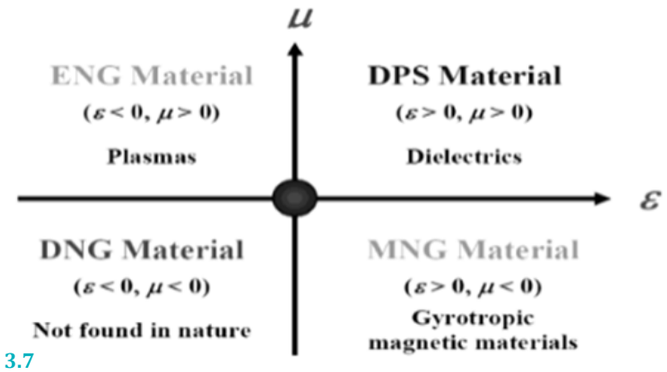
2)quadrante Alto-Sinistra: ENG - *Epsilon Negative Materials*
Se un materiale ha una permittività inferiore a zero e una permeabilità maggiore di zero (ε <0, μ> 0) è chiamato materiale epsilon negativo (ENG). In certi regimi di frequenza, molti plasmi presentano queste caratteristiche.

3)quadrante Basso-destra: MNG - *Mu Negative Materials*
Se un materiale ha una permittività maggiore di zero e una permeabilità inferiore a zero (ε> 0, μ <0) è chiamato materiale mu negativo (MNG). In alcuni regimi di frequenza, alcuni materiali tropici giroscopici presentano queste caratteristiche (ad esempio, materiali riferibili al campo dell'ottica, quali lenti)

4)quadrante Basso-sinistra: DNG - *Double Negative Materials*
Se un materiale ha permittività e permeabilità inferiori a zero (ε <0, μ <0) è definito come materiale doppio negativo (DNG). Questa classe di materiali può essere prodotta solo

32. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C.Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, (2000) Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Phys. Rev. Lett., 84*, pp. 4184–4187

artificialmente.



3.7

Per concludere quindi, questo capitolo di introduzione ai metamateriali, si intende mettere in evidenza, a partire dalle peculiarità esposte, il superamento della conoscenza tradizionale, afferente al mondo naturale dei materiali e dei loro comportamenti, in funzione di un'apertura ad un panorama inesplorato del mondo materico artificiale e delle esperienze progettuali ad esso integrabili, con speciale riguardo alla risultante consequenziale ed applicativa nella dimensione del design del prodotto. Per dirlo usando le parole dello stesso David R. Smith: *«Metamaterial opens a door to realize all possible material properties by designing different cellular architectures and using different substrate materials.»*

Confronto tra Smart Materials e Metamateriali

La letteratura sul tema degli smart o intelligent materials è vasta e si è accumulata nell'ultimo decennio per includere designazioni tanto diverse quanto i contesti disciplinari in cui hanno avuto origine (Gordon 1976, Addington e Schodek 2005, McQuaid e Beesley 2005; Braddock Clarke e OMahoney 2007; Ritter 2007). Tuttavia, esistono due paradigmi prevalenti che possono essere usati per classificare la maggior parte di tali designazioni (Rogers 1993). Secondo Oxman, la prima definizione si basa su un paradigma tecnologico e riguarda l'integrazione di attuatori, sensori e controlli incorporati all'interno di un materiale, o componente strutturale.

Fig 3.7 Sistema di classificazione dei metamateriali in quattro macro sezioni, elaborato da Singh, G. et al (2015)

Una tale definizione specifica gli elementi che comprendono il materiale ma evita di affrontare completamente la sua utilità e i mezzi con cui è stata fabbricata e assemblata (Oxman, 2010). La seconda definizione è basata su un paradigma scientifico e tenta di collegarsi prevalentemente alla microstruttura del materiale come un sistema in grado di informare la sua funzionalità (Oxman, 2010). I metamateriali si inseriscono nella seconda definizione, ma come essi anche molte tipologie di smart materials. Nel corso dell'avanzamento della ricerca dottorale è stato quindi stimolante mettere a confronto smart materials e metamateriali, specie nell'accezione della seconda definizione espressa da Oxman, e capire in quale misura questi ultimi possano integrarsi nel panorama materico contemporaneo. Cruciale, in questa fase, il contributo di Marinella Ferrara, professore associato presso la scuola di Design del Politecnico di Milano e fondatrice del MADEC (centro di ricerca del Material Design Culture nel PoliMi)[33], che si è resa disponibile per un confronto diretto sull'argomento. Secondo la visione della Dottoressa Ferrara, la differenza sostanziale tra smart materials e metamateriali consiste nella distinzione tra una manipolazione del processo a livello chimico e fisico -tipica degli smart materials- con una manipolazione legata alla geometria ed alla forma, distintiva invece dei metamateriali. Definisce i metamateriali come dei materiali che hanno delle caratteristiche eccezionali, derivanti dalla loro architettura e morfologia, ma che non subiscono la deformazione di un processo chimico. Per la definizione scientifica di smart material, quindi, i metamateriali non possono considerarsi parte di questa famiglia, in quanto distinti proprio nel processo di formazione del materiale. Considerando però il termine smart material in senso lato, prende in considerazione l'opportunità di affiancare la definizione di metamateriali ai "sistemi materici" : super-materiali, che possono essere intelligenti e connessi, che sono la risultante della somma di più materiali stratificati ed integrati tra di loro. Interessante quindi fare alcune considerazione sul concetto di omogeinizzazione superficiale dei metamateriali .

3.3 Definizione

Per utilizzare le parole di uno dei pionieri di questo settore, Sir John Pendry, i metamateriali sono materiali sintetici progettati per fornire proprietà che "potrebbero non essere disponibili

34. http://www.madec.polimi.it/

nell'ambito naturale che conosciamo" (Pendry et al.).

Questi materiali solitamente guadagnano le loro proprietà dalla struttura piuttosto che dalla composizione. La peculiarità essenziale dei metamateriali risiede nelle loro proprietà insolite che si manifestano grazie al design unico ed intrinseco della loro struttura. In Wikipedia (che, al di la del rigore scientifico e dell'eterogeneità dei contenuti, rappresenta senz'altro un modo molto immediato per verificare la "popolarità" degli argomenti trattati) viene fornita una descrizione dei metamateriali come un materiale creato artificialmente con proprietà elettromagnetiche peculiari che lo differenziano dagli altri materiali. Le sue caratteristiche macroscopiche non dipendono solo dalla sua struttura molecolare, ma anche dalla sua geometria realizzativa.

Bibliografia e sitografia del capitolo

Bibliografia

Veselago, V. G. (1968) The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ, *Sov. Phys. Usp.* 10 509–514

Boardman, A. (2010). Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago, IOP Publishing Ltd.

Pendry, J.B. (2000). Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Physical Review Letters, (pp. 85, 3966-3969)

Smith, D. R., Padilla, W., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., and Schultz, S. (2000) A composite medium with simultaneous negative permittivity and permeability Phys. Rev. Lett. 84, 4184–4187

Cui T., Smith D., Liu R., (2010)Metamaterials : theory, design, and applications, *Springer* pp: 367

Walser, R. M. (2001) Electromagnetic metamaterials, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 4467

Ion, A., Frohnhofen, J., Wall, L., Kovacs, R., Alistar, M., Lindsay, J., Lopes, P., Chen, H. T., Baudisch P. (2916) Mechanical Metamaterials, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology,* ACM, 529-539

Gangwar K, Paras RPS, Gangwar (2014) Metamaterials: characteristics, process and applications. *Advance in Electronic and Electric Engineering* 4(1): 97-106.

D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C.Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, (2000) Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, *Phys. Rev. Lett., 84*, pp. 4184–4187

Sitografia

https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Snell

http://www.madec.polimi.it/

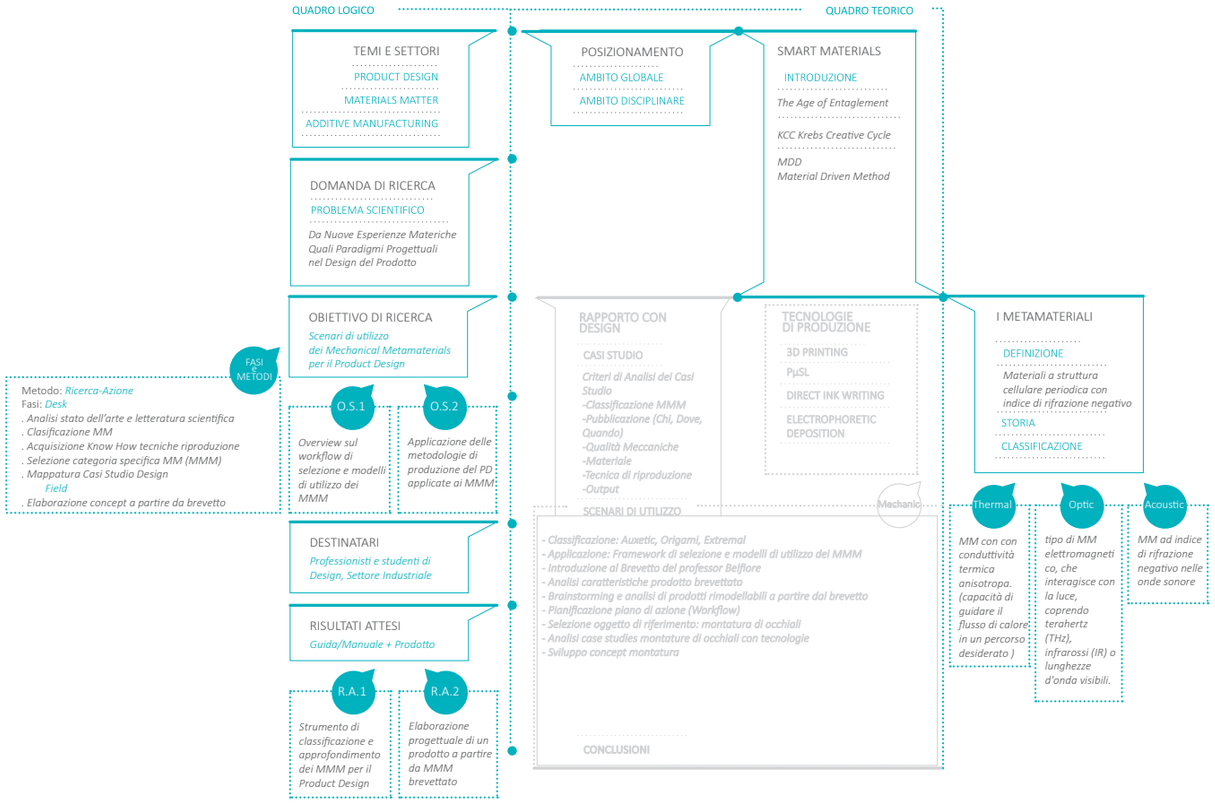
CAPITOLO 4 I METAMATERIALI MECCANICI

ABSTRACT
Mechanical metamaterials are distinguished from electromagnetic metamaterials due to the unusual set of mechanical properties deriving from the geometric design of micro / nano-architectures, intrinsic to the structural composition of the materials themselves. In fact, in general, the mechanical properties of a material are governed by the chemical composition and the spatial arrangement of the constituent elements, on several scales; Mechanical metamaterials are closely related to four elastic constants:
Young's form (E);
cutting module (G);
mass module (K);
Poisson ratio (t).
The chapter will be analyzed and explained from a mathematical point of view, in comparison with smart materials and a Periodic Table of Mechanical Metamaterials will be provided starting from three classification systems (Zadpoor, Bertoldi and Yu).

ABSTRACT
I metamateriali meccanici si distinguono dai metamateriali elettromagnetici per l'insieme insolito di proprietà meccaniche derivanti dalla progettazione geometrica di micro / nano-architetture, intrinseche alla composizione strutturale dei materiali stessi. Generalmente, infatti, le proprietà meccaniche di un materiale sono governate dalla composizione chimica e dalla disposizione spaziale degli elementi costitutivi, su più scale; I metamateriali meccanici sono strettamente correlati a quattro costanti elastiche:

- modulo di Young (E);
- modulo di taglio (G);
- modulo di massa (K);
- rapporto di Poisson (t).

Nel capitolo saranno approfonditi e spiegati dal punto di vista matematico, nel confronto con gli smart materials e sarà infine fornita una Tavola Periodica dei Metamateriali Meccanici a partire da tre sistemi di classificazione (Zadpoor, Bertoldi e Yu).



4 Premessa

I metamateriali sono stati inizialmente utilizzati nel contesto dell'ottica e dell'elettromagnetismo.
Questo è il motivo per cui il termine metamateriale è talvolta ancora recepito come un termine specifico elettivamente riferibile ai metamateriali ottici ed elettromagnetici. Il concetto di "metamateriali meccanici" è emerso solo negli ultimi anni ed è relativamente meno esplorato. Classi specifiche di metamateriali meccanici erano comunque già note da alcuni decenni. Ad esempio, il concetto di materiali ausiliari (materiali con un rapporto di Poisson negativo) è noto agli scienziati da alcuni decenni e sono stati osservati, costruiti, testati e restituiti esempi specifici di tali materiali, che saranno riportati in seguito. Molte altre classi di metamateriali con un insieme insolito di proprietà meccaniche sono state recentemente identificate attraverso uno studio sistematico della possibile gamma di proprietà meccaniche che potrebbero essere ottenute attraverso la progettazione geometrica di micro / nano-architetture. Le particolarità di questa famiglia di metamateriali sembrano aver aperto una varietà di panorami nel mondo materico con la conseguenza che stanno cominciando a contaminarsi ed influenzarsi ambiti progettuali che attingono dall'universo materiale, prospettando nuovi paradigmi progettuali anche nel mondo del product design, specie grazie all'approfondimento ed al miglioramento delle tecniche di riproduzione legate all'additive manufacturing (Zadpoor 2016)[35].
Prima di procedere con previsioni più o meno azzardabili o velleitarie all'interno di tali possibili scenari, questa ricerca intende approfondire le tematiche proposte da una specifica categoria di metamateriali, che più si prestano, per stato dell'arte, ad un'analisi nell'ottica di un trasferimento tecnologico nell'ambito del design. Ci riferiemo pertanto ai metamateriali meccanici.

Come espresso nel capitolo "Obiettivi della ricerca" (cfr. cap.1 paragrafo 1.2) , l'intento di questo lavoro è quello di definire un sistema di classificazione che restituisca una visione organizzata e

35. Zadpoor, A. A. (2016) Mechanical Metamaterials, *Material Horizons*, 3, 371-381

36. Hamid, C., Hosseinzadeh R., Hosseinzadeh, H., (2018) Metamaterials in Medicine : A New Era for Future Orthopedics, *OPROJ*, volume4-issue2, pag 1
37. Gibson JL, Ashby FM (2001) Cellular solids: structure and properties. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
38. *ibidem*

scientifica dei metamateriali meccanici e delle Future predictions nell'utilizzo di questi, con la specifica intenzione di ipotizzare le possibili declinazioni ed i possibili scenari nel settore del product design.
In seguito, si propone un sistema di classificazioni basato su una rielaborazione di sistemi di classificazione tratti dalle fonti attualmente più quotate sull'argomento.
I sistemi di classificazione individuati sono tre; ciascuno di essi è stato pubblicato da team di ricerca i cui asset ed obiettivi -nonché output e risultati attesi-, afferiscono ad ambiti a volte anche molto distanti tra loro, ma legati alla dimensione del design del prodotto. Tutte le pubblicazioni citate, inoltre, si collocano in un periodo di tempo che va dal 2014 al 2018.

4.2 Definizione

Le proprietà meccaniche di un materiale sono governate dalla composizione chimica e dalla disposizione spaziale degli elementi costitutivi su più scale. Questo essenzialmente limita le proprietà del materiale l'una rispetto all'altra quando si selezionano materiali per applicazioni specifiche. Ad esempio, la forza e la densità sono intrinsecamente collegate, quindi, in generale, più denso è il materiale, più la sua massa è compatta e rigida[36]. Le proprietà dei materiali possono essere controllate tramite complessi artifici assemblativi e/o operando una riorganizzazione strutturale a più scale; come evidenziato dai materiali cellulari presenti in natura, ad esempio come il nido d'ape, l'osso trabecolare, il parenchima vegetale e le spugne. È principalmente l'architettura della struttura del materiale a livello micro e nanometrico, non la composizione chimica, a governare le proprietà meccaniche dei metamateriali[37].
Lorna Gibson, professoressa emerita nelle discipline di *Mechanical Behavior of Materials* presso il MIT di Boston sostiene che progettando architetture altamente ordinate in solidi cellulari, gli ingegneri sono portati a creare i cosiddetti metamateriali meccanici. Partendo, infatti, dalla capacità di separare le proprietà tramite il controllo micro e nano-architettonico si dà accesso alla raccolta di tutte queste proprietà, tra le quali anche, alcune volte in maniera del tutto fuori dal comune, alcune proprietà opposte del materiale. Tipicamente, infatti, le proprietà dei materiali sono considerate assolute e il metamateriale creato è trattato come una struttura funzionale (Gibson JL et al., 2001)[38].

Tali proprietà si riassumono in: Ultra-leggerezza (*ultra-lightweight*), basso modulo di elasticità (*low-module of elasticity*), rigidità e durezza elevate (*high stiffness, high strength*), rapporto di Poisson negativo e la rigidità negativa (*negative stiffness*). Di fatto, secondo la Gibson, questo approccio - scegliere un'unica proprietà ed ingegnerizzare tale proprietà del materiale tramite l'architettura-, può essere descritto come inverse design engineering[39].
I metamateriali meccanici sono strettamente correlati a quattro costanti elastiche:

- modulo di Young (E);
- modulo di taglio (G);
- modulo di massa (K);
- rapporto di Poisson (t).

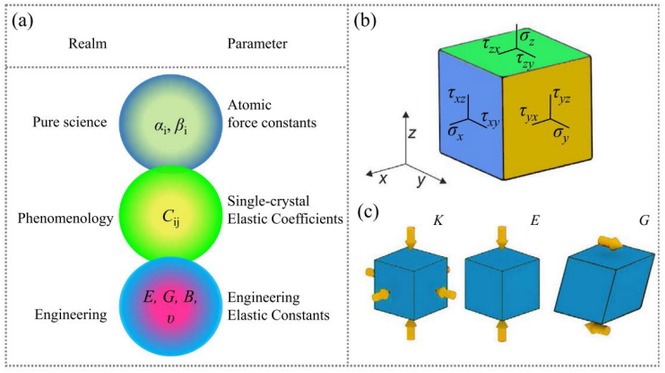
I primi tre nella lista misurano la rigidità, la durezza e la comprimibilità di un materiale strutturale. Il rapporto di Poisson, ovvero la costante elastica per materiali isotropici, offre una metrica fondamentale per confrontare le prestazioni strutturali di qualsiasi materiale reale, sia esso omogeneo o meno, quando deformato elasticamente. Il rapporto di Poisson può essere definito come la quantità relativa che un dato materiale registra nella contrazione trasversalmente quando viene stirato assialmente[40](in svariati casi è possibile che gli autori preferiscano usare i termini "tecnico", "pratico" o "bulk" invece di "ingegneria" e "costanti" anziché "coefficienti").
In scala 1:1, un materiale metamaterico assume l'effetto di un monoblocco omogeneo e continuo, che presenta però, in termini di prestazioni, proprietà programmata in funzione della microstruttura del materiale stesso.

Modelli matematici di riferimento

Il modulo elastico e il rapporto di Poisson derivano dalla legge di Hooke. Si prenda in considerazione un corpo elastico elementare con lati paralleli agli assi delle coordinate (fig.4.1;b). Per ogni coppia di lati paralleli di un elemento cubico, si segnala con un solo simbolo, la componente normale dello sforzo σ, e con altri due simboli, le due componenti dello sforzo di taglio, τ. In caso di sforzo normale, σy, il pedice y indica che lo sforzo agisce su un piano normale all'asse y. Due lettere di pedice sono usate invece

39. Tale metodologia rappresenta, in qualche misura, un'innovazione non solo in termini di processo, bensì di revisione dell'intera filiera progettuale, che vede l'espediente materico come l'elemento centrale di un sistema progettuale che può abbracciare numerosi campi applicativi, tra cui sicuramente il product design.
40. Ledbetter H, Reed RP. Elastic properties of metals and alloys, I. Iron, nickel, and iron-nickel alloys (1973) *J Phys Chem*, 2:531–618

per indicare lo sforzo di taglio (sforzo tangenziale), per esempio il τyx. La prima lettera, y, indica la direzione normale rispetto al piano considerato. La seconda lettera, x, indica la direzione della componente dello sforzo. Quando si tratta di deformazione di un corpo elastico, ci si riferisce alle componenti della deformazione, che sono: l'aumento della lunghezza dell'elemento, le unità di allungamento εx, εy, εz e la distorsione dell'angolo tra i due elementi, e l'unità di taglio sotto sforzo γ_{XY}, γ_{XZ} e γ_{YZ}[41].



4.1 (a);(b);(c)

Fig 4.1;
(a) Interconnettività schematica dei parametri elastici dei solidi. alfa e beta e b possono essere presi per rappresentare estensioni (o contrazioni) e piegature di legami di valenza tra atomi nei solidi; pedice i denota i vari gruppi di vicini atomici. Il Cij rappresenta i coefficienti di rigidezza elastica che correlano le tensioni alle tensioni; sia la sollecitazione che la deformazione sono specificate rispetto ad un insieme di assi denotati dagli indici i e j e solitamente scelti per coincidere con gli assi cristallografici. E, G, B e v denotano il modulo di Young, il modulo di taglio, il modulo di massa e il rapporto di Poisson, parametri che si manifestano naturalmente nella caratterizzazione, rispettivamente, carico uniassiale, carico di taglio, carico idrostatico e deformazione trasversale sotto carico uniassiale.
(b) Schema di un corpo elastico elementare con lati paralleli agli assi coordinati. I componenti dello stress normale e di taglio sono indicati.
(c) Schemi di esperimenti che misurano il modulo di massa K (a sinistra), il modulo di Young E (medio) e il modulo di taglio G (a destra).
Fig 4.2 Dalla legge di Hook alla definizione del modulo di Young)

In generale, la legge di Hooke si riferisce alla relazione lineare tra le componenti dello sforzo e le componenti della deformazione sotto uno sforzo relativamente piccolo, (fig 4.2), dove E è il modulo di elasticità - Modulo di Young. In altre parole, il modulo di Young è definito come il rapporto tra sollecitazione uniassiale (trazione o compressione) e deformazione, misurata lungo lo stesso asse:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} \qquad 4.2$$

Nella maggior parte dei sistemi elastici noti, la rigidità generale si riferisce al rapporto tra la forza generalizzata e lo spostamento generalizzato, come la costante di molla, k. Il modulo è una proprietà di continuum indipendente dalla geometria e dalla dimensione del materiale. Un solido tridimensionale visto come un continuum nel contesto della teoria dell'elasticità, come nell'equazione riportata in figura 4.3, prova lo stress come forza per area e sforzo come spostamento per lunghezza. Un oggetto elastico resiste a una determinata deformazione esercitando una forza di ripristino quando viene premuto.
Una rigidezza positiva si verifica quando la deformazione è nella stessa direzione della forza applicata, corrispondente a una forza di ripristino che riporta il corpo deformabile nella sua posizione neutra. Ogni volta che vediamo il mondo come siamo condizionati a vederlo, vediamo una rigidità positiva, ma nei metamateriali è implicata una rigidità negativa. La rigidità negativa è possibile nei metamateriali meccanici, la quale sostiene la deformazione imposta. Quando materiali diversi resistono alla distorsione sotto un carico meccanico, si verificano variazioni importanti di volume. In questa circostanza, può quindi essere introdotto il rapporto di Poisson, per confrontare le prestazioni dei materiali tesi elasticamente, individuando le prestazioni anche tra limiti numerici stretti. Nel fare ciò, questa estensione dell'elemento nella direzione x è normalmente accompagnata da componenti di deformazione laterale (contrazioni), dove ν è una costante chiamata rapporto di Poisson. Il rapporto di Poisson è definito come il negativo del rapporto tra deformazione trasversale e deformazione longitudinale nel caso di sollecitazione uniassiale (fig4.3).

$$\varepsilon_y = -\nu\frac{\sigma_x}{E} \qquad \varepsilon_z = -\nu\frac{\sigma_x}{E} \qquad 4.3$$

La maggior parte dei solidi si contrae lateralmente quando è teso assialmente. Il rapporto di Poisson è tradizionalmente positivo e generalmente varia da 0,25 a 0,33 nei materiali convenzionali[42,43]. Come sostenuto da Xianglong Yu, autrice del terzo riferimento per il sistema di classificazione dei metamateriali, i limiti numerici stanno cambiando rapidamente quando emergono nuovi esperimenti, metodi computazionali e percorsi per la sintesi dei materiali. Nonostante siano confermate le regole matematiche che governano il comportamenti dei metamateriali, è comunque indubbia la necessità di cambiare la nostra comprensione delle caratteristiche meccaniche dei materiali moderni.

Quando si sovrappongono i componenti di deformazione prodotti dalle tre tensioni, la relazione tra allungamento e sollecitazione è definita da due costanti fisiche E e ν (fig 4.4),

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_{z+}\,\sigma_y));\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_{x+}\,\sigma_y));\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_{x+}\,\sigma_y)) \qquad 4.4$$

Fig 4.3 equazioni dello sforzo assiale, ottenuti dal rapporto tra sforzo e modulo di Young, moltiplicati per il negativo del coefficienti di Poisson
Fig 4.4 E e v introdotte nelle coponenti di deformazione

41. Yu, X., Zhou, J., Liang, H., et al. (2018) Mechanical metamaterials with stifness, rigidity and compressibility: a brief review, *Progess in Materials Science*, vol 94, pagg 114-173

42. Wang Y, Lakes R. (2004) Extreme stiffness systems due to negative stiffness elements. *Am J Phys*;72:40–50

43. Jong M, Chen W, Angsten T, Jain A, Notestine R, Gamst A, et al.(2015) Charting the complete elastic properties of inorganic crystalline compounds. *Sci Data*;2:150009

44. Milton GW, Cherkaev AV. (1995)Which elasticity tensors are realizable? *J Eng Mater Technol*;117:483–93.

4.5 $\sigma_z = \sigma, \quad \sigma_y = -\sigma, \quad \sigma_x = 0, \quad \tau = 1/2(\sigma_z - \sigma_y) = \sigma$

Similmente, la relazione tra taglio sotto sforzo γ e lo sforzo di taglio, τ, può essere definita anche dalle costanti E e ν. Nel caso particolare della condizione di taglio puro (Fig. 4.5), si utilizza un' altra dicitura espressa come segue (Fig. 4.6):

4.6
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Dove la costante G, è chiamata modulo di elasticità di taglio, o modulo di rigidità. Il modulo di taglio e il modulo di Young sono quindi utilizzati, rispettivamente, per proprietà assiale e di torsione. Nei metamateriali meccanici, il modulo di taglio può avvicinarsi allo zero rispetto al modulo di massa, che non è il caso dei normali materiali solidi. Questo comportamento è simile al quello dei liquidi, che risultano incomprimibile, ma che fluiscono facilmente.
Infine, la relazione tra il volume espanso e e la somma degli sforzi perpendicolari θ si esprime come (Fig. 4.7):

4.7
$$e = \frac{3(1-2\nu)p}{E}$$

Nel quale si individua il modulo di massa (bulk modulus) K. Come tale, la comprimibilità di un solido, essendo l'inverso del modulo di massa, può essere data dai derivati:

$$K = -\frac{1}{V}\frac{dV}{dp}$$

dove V è il volume.

Queste costanti di elasticità sono positive e definite. Tuttavia, se abbiamo solo due materiali, uno sufficientemente morbido e l'altro sufficientemente rigido, cioè uno con un modulo elastico estremamente grande e l'altro con un modulo elastico estremamente piccolo, è possibile produrre una famiglia di microstrutture sufficientemente diverse da ottenere le proprietà elastiche che desideriamo[44].

Fig. 4.5 Equazione della condizione di taglio puro
Fig 4.6 Modulo di elasticità di taglio o modulo di rigidità G
Fig 4.7 Bulk Modulus, modulo di massa

Per riassumere, le più importanti proprietà del metamateriale
(i) rigidità;
(ii) durezza;
(iii) comprimibilità;
possono essere derivate da quattro costanti elastiche:
(a) modulo di Young E;
(b) modulo di taglio G;
(c) modulo di massa K;
(d) rapporto di Poisson v.

Nello specifico:
- Il modulo di taglio, G, si riferisce generalmente a un cambiamento di forma a volume costante. In gas o liquidi ideali, G = 0.
- Il modulo di massa, K, si riferisce al cambiamento di volume di un cubo, mantenendo la forma.
- Numerosi studi precedenti, hanno dimostrato che il modulo di Young, E, di una piastra metallica con fori è indipendente dal rapporto di Poisson del metallo, in particolare per il composito poroso.

Esistono due combinazioni di diagrammi di base delle proprietà[41, 42]:
il diagramma di densità del modulo (Eq), chiamato grafico Ashby
la mappa del modulo di shear-bulk (K-G), il primo quadrante del quale è chiamato la mappa di Milton

45. Milton GW. (2002)*The theory of composites.* New York: Cambridge University Press;
46. Ashby MF. (2011) *Materials selection in mechanical design.* 4th ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann;
47. E. Karana (2010, Feb), How do Materials Obtain Their Meanings? In: METU Journal of the Faculty of Architecture, 27(2), 271-285, 275.

4.3 Classificazione

«Meanings of materials are what we think about materials, what kind of values we attribute after the initial sensorial input in a particular context»[47].
Elvin Karana

Sistema di classificazione delle fonti

I tre sistemi riportati verranno in questa sede nominati con il nome del ricercatore proprietario della pubblicazione, contenente le relative dichiarazioni circa il sistema di classificazione elaborato.

48. http://www.zadpoor.com/home/cv.

- Il primo sistema di classificazione riportato è il metodo "Zadpoor" . pubblicato da Amir Zadpoor nell' aprile del 2016 per la royal society of chemistry, è rintracciabile al seguente DOI: 10.1039/C6MH00065G, Mater. Horiz., 2016, 3, 371-381
- Il secondo modello di riferimento è il sistema di classificazione proposto invece da Katia Bertoldi, con la compartecipazione di Vincenzo Vitelli, Johan Christensen, e Martin van Hecke, esposto nel documento Flexible mechanical metamaterials, pubblicato sulla rivista Nature Reviews Materials, 2 (17066), pp. 1-11 nel 2017
- Il terzo riferimento è tratto dalla pubblicazione di un articolo di review nella rivista Progress in Materials Science 94 (2018) 114–173, ad opera di Yu XL, Zhou J, Liang HY, Jiang ZY, Wu LL dal titolo: Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review

Best Practices

Introduzione ed informazioni relative all'autore:
Amir Zadpoor è professore associato e presidente di Biomateriali e Biomeccanica dei tessuti presso il Dipartimento di ingegneria biomeccanica dell'Università di Tecnologia di Delft. Ha conseguito il dottorato (cum laude) presso la stessa università, ed è attualmente interessato alla produzione additiva di biomateriali, meta-materiali, mecanobiologia e rigenerazione tissutale. il professore Zadpoor ha ricevuto numerosi premi internazionali e nazionali, tra cui una sovvenzione ERC, una sovvenzione Veni e l'Early Career Award del Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials. È stato anche membro dei comitati editoriali di riviste internazionali, dei gruppi di revisione delle agenzie di finanziamento e in qualità di membro delle commissioni di premiazione[48].

Classificazione Zadpoor
Secondo Zadpoor, le proprietà meccaniche dei materiali naturali abbracciano una gamma specifica e limitata. L'esempio che primariamente riporta per descrivere le peculiarità di questi materiali è il rapporto di Poisson. Il rapporto di Poisson tra i materiali più ingegnerizzati e naturali finora noti è positivo (con alcune eccezioni). Prosegue sostenendo che le proprietà meccaniche e fisiche della maggior parte dei materiali naturali siano collegate tra loro. Ad esempio, il modulo elastico e la densità (e quindi la porosità) di specifiche classi di materiali, tra cui la maggior parte dei materiali cellulari, sono correlati tra loro attraverso una legge di potenza.
Questi vincoli, asserisce, limitano lo spazio di progettazione e le applicazioni pratiche dei materiali naturali. È quindi desiderabile sviluppare materiali che possano esibire un insieme arbitrariamente scelto di proprietà meccaniche e fisiche. I metamateriali meccanici, nella sua ottica, aspirano a fare proprio questo. I metamateriali sono spesso costituiti da microarchitetture progettate appositamente, che danno origine all'insieme desiderato di proprietà meccaniche. Poiché le proprietà meccaniche dei metamateriali dipendono dalla loro struttura a micro / nano-scala, la progettazione di metamateriali riduce il progetto razionale della struttura micro / nanoscala che dà origine alle proprietà meccaniche desiderate. Secondo la sua interpretazione, nello spettro di materiali naturali puri che possiedono proprietà meccaniche intrinseche, a strutture su larga scala caratterizzate da proprietà strutturali altamente specifiche del design, i metamateriali sono da qualche parte nel mezzo. La sua pratica descrive che, eseguendo uno zoom per osservare il loro comportamento su micro / nanoscala, i metamateriali si comportano più come strutture. Tuttavia, il comportamento omogeneo complessivo dei metamateriali assomiglia a quello dei materiali. Le proprietà omogeneizzate della macro-scala sono, altamente dipendenti dalla struttura micro / nanoscala che potrebbe essere progettata in modo tale che i metamateriali risultanti mostrino una gamma insolita, rara o senza precedenti di proprietà fisiche e meccaniche.
Come più volte riferito, , l'utilizzo prioritario prevalente dei metamateriali si è manifestato nel contesto dell'ottica e dell'elettromagnetismo e, per questo motivo si è venuta consolidando la convinzione che il termine fosse da relegarsi a quello specifico ambito applicativo. Solo negli ultimi anni Il concetto è emerso trovando collocazione nel relativamente meno esplorato settore della meccanica (Zadpoor 2016). Le prestazioni di questi materiali sono fondamentalmente controllate dalla geometria a più scale di lunghezza piuttosto che dalla sola composizione chimica (Spadaccini et al. 2015). Classi specifiche di metamateriali

meccanici erano già note da alcuni decenni. Ad esempio, il concetto di materiali auxetici (materiali con un rapporto di Poisson negativo) è noto agli scienziati da alcuni decenni e sono stati osservati, costruiti, testati e riportati esempi specifici di tali materiali. Molte altre classi di metamateriali con un insieme insolito di proprietà meccaniche sono state recentemente identificate attraverso uno studio sistematico della possibile gamma di proprietà meccaniche che potrebbero essere ottenute attraverso la progettazione geometrica di micro / nano-architetture. Nel suo articolo articolo, Zadpoor si concentra in particolare sui metamateriali con una gamma di proprietà meccaniche elastiche rare o senza precedenti, comprendente il comportamento elastico lineare descritto dal tensore dell'elasticità e il comportamento non lineare osservato in grandi 'intervalli di deformazione. In seguito, esplora le diverse categorie di metamateriali meccanici tra cui materiali (A) *extremal*, (B) materiali negativi (cioè materiali con moduli negativi, visti precedentemente sotto la dicitura di DNG) e alcune classi emergenti di metamateriali (C), inclusi i metamateriali attivi / programmabili basati sull'antica arte giapponese di piegare la carta (gli *Origami*). Zadpoor conclude suggerendo alcune possibili indicazioni per la ricerca futura.

(A)Extremal metamaterials

I materiali extremal sono stati introdotti da Milton e Cherkaev nel 1995[49] e sono definiti come materiali che sono estremamente rigidi in determinate modalità di deformazione, mentre sono estremamente conformi in altri modi. Gli autovalori del tensore di elasticità determinano il comportamento di materiali extremal sotto qualsiasi data modalità di deformazione e sono o molto grandi (cioè tendono all'infinito) o sono molto piccoli (cioè si avvicinano lo zero). Un autovalore molto piccolo, indica che il materiale è molto conforme, quando sottoposto a deformazione nella direzione (cioè autovettore) corrispondente a quel particolare autovalore. I materiali extremal possono quindi essere classificati in base al numero di autovalori molto piccoli del tensore di elasticità. Se un metamateriale extremal ha solo un autovalore molto piccolo, è chiamato *unimode*. Se ha due, tre, quattro o cinque autovalori molto piccoli, si chiama rispettivamente *bimode, trimode, quadramode o pentamode*. Milton e Cherkaev hanno dimostrato che combinazioni specifiche di due fasi - una molto conforme (in gergo inglese *compliant*) e l'altra molto rigida - potrebbero essere utilizzate per fabbricare materiali extremal. I materiali extremal potrebbero quindi essere combinati per fabbricare materiali con qualsiasi tensore di elasticità posto che soddisfi i consueti criteri di ammissibilità della termodinamica (cioè materiali con tensori di elasticità positivi definiti). Risultato a suo avviso degno di nota, perché, oltre ai materiali compositi che possono unire materiali molto rigidi e molto resistenti, si potrebbero usare tecniche di stampa 3D per ottenere qualsiasi materiale con tensioni di elasticità definite positive semplicemente combinando lo spazio vuoto (cioè un materiale molto *compliant*) con un materiale stampato in 3D rigido (ad es. metalli e leghe metalliche). Due categorie specifiche di materiali *extremal*, vale a dire metamateriali *pentamode* e materiali *dilational*, hanno ricevuto particolare attenzione in letteratura e sono discusse dal professore di seguito.

(B) Pentamode metamaterials

I metamateriali pentamode, hanno cinque autovalori molto piccoli, il che significa che sono molto conformi (*compliant*) in cinque delle sei direzioni principali. Questo si traduce in un modulo di massa molto grande, B, rispetto al loro modulo di taglio, G., disporre di valori molto grandi del modulo di massa significa che il volume dei metamateriali *pentamode* non cambia in seguito alla deformazione; che equivale a dire che il rapporto di Poisson dei metamateriali è 0,5. Se si avessero dei valori molto piccoli del modulo di taglio, il metamateriale pentamodale, idealmente, fluttuerebbe in aria; essendo questo un comportamento che è simile ai corpi fluidi, rinomina questa categoria di metamateriali con il nome di meta-fluidi (*meta-fluids*).

Un progetto specifico di metamateriali pentamode fu proposto dagli stessi Milton e Cherkaev nel 1995[50].
In esso, i fasci con uno specifico tipo di sezione trasversale variabile, vale a dire due travi coniche attaccate alle loro basi, erano disposti in una struttura a traliccio di tipo diamante.
Questo tipo di struttura reticolare *pentamode* non è stato realizzato fino al 2012, quando Wegener e collaboratori[51], hanno utilizzato tecniche di stampa 3D per fabbricare e testare approssimazioni dei metamateriali pentamode dai polimeri. Zadpoor dichiara quindi che, i metamateriali stampati in 3D a scala micro o macro sono

48. Milton, G. W., Cherkaev, A. V., (1995)Which elasticity tensors are realizable?, *J. Eng. Mater. Technol.*, 117, 483–493

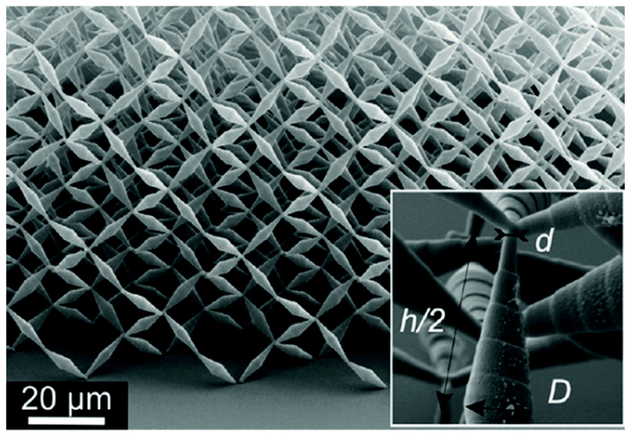
50. *ibidem*
51. M. Kadic, T. Bückmann, N. Stenger, M. Thiel and M. Wegener (2012) On the practicability of pentamode mechanical metamaterials, *Appl. Phys. Lett.*, 100, 191901

52. *ibidem*

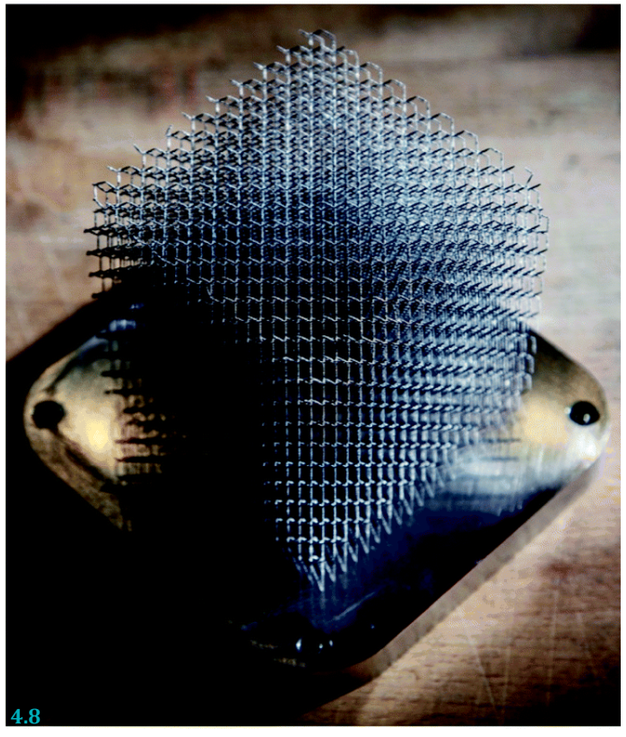
tutte approssimazioni dei metamateriali in penta-modalità ideali, poiché l'apice del cono ha un diametro finito nelle realizzazioni reali di metamateriali pentamode rispetto al diametro zero nell'ideale pentamode[52].

Le proprietà specifiche che rendono i metamateriali pentamode interessanti per diverse applicazioni, nell'ottica del professore, potrebbero essere ad esempio, portare alla definizione di artefatti utilizzati per indirizzare le onde elastodinamiche in direzioni specifiche in modo da ottenere l'equivalente del cloaking ottico per le onde acustiche. In pratica, generare una famiglia di prodotti in grado di schermare, o meglio ancora, "rendere invisibili" le onde acustiche a sollecitazioni sonore. Il fatto che il modulo elastico e la densità di massa (o porosità) dei metamateriali pentamode possano essere modificati indipendentemente l'uno dall'altro li rende utili per estendere lo spazio progettuale durante la progettazione di scaffold di ingegneria tissutale porosa in cui la dimensione e la porosità dei pori hanno conseguenze in termini di attaccamento cellulare, nutrizione / ossigenazione cellulare e velocità di rigenerazione dei tessuti. Inoltre, combinando i metamateriali in modo penta all'interno della stessa struttura a reticolo, si potrebbero realizzare strutture a reticolo con qualsiasi tensore di elasticità definita positiva. Questo rende i metamateriali pentamode un quadro generale all'interno del quale possono essere progettati e (additivamente) prodotti metamateriali. Ciò è particolarmente utile per la realizzazione di materiali con distribuzione complessa di proprietà meccaniche. La distribuzione complessa delle proprietà meccaniche può essere espressa, ad esempio, dall'applicazione degli algoritmi di ottimizzazione della topologia (cfr. cap. 5.2.1). È importante rendersi conto che la struttura pentamode proposta da Milton e Cherkaev non è l'unico tipo di metamateriale pentamode. Un esempio completamente diverso di materiali in modalità penta è un gel che può essere facilmente deformato in qualsiasi direzione, ma resiste fortemente ai cambiamenti di volume sotto la pressione idrostatica. Altri esempi includono materiali granulari (Zadpoor 2016).

a)



b)



4.8

Fig. 4.8 Penatmode metamaterial. Le immagini riportano un progetto specifico di metamateriali penta-mode proposto da Milton e Cherkaev è stato realizzato per la prima volta nel 2012 (a) e il primo metamateriale metallico penta-mode basato sullo stesso disegno e prodotto presso il Laboratorio additivo di produzione di TU Delft utilizzando la fusione laser selettiva (Medical Delta © de Beeldredacteur) (b).

(C) Dilational e altri metamateriali auxetici

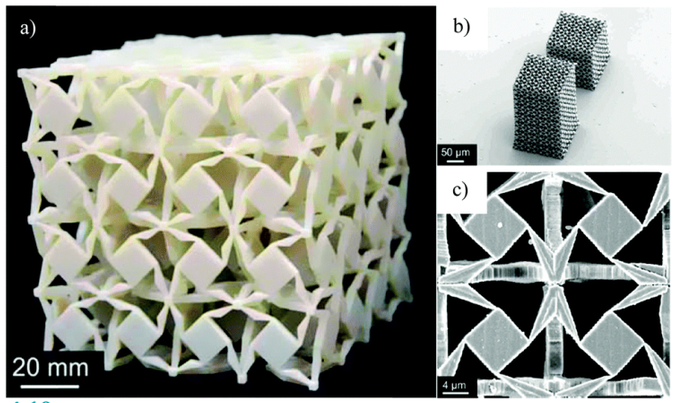
La relazione tra il modulo di massa, il rapporto B, il modulo di taglio, G e il rapporto di Poisson ', ν, dei materiali isotropici può essere scritto come segue:

$$\frac{B}{G} = \frac{\nu+1}{3(\frac{1}{2}-\nu)}$$

4.9

Sia B che G sono spesso considerati positivi per garantire che il materiale sia termodinamicamente stabile, il che equivale a dire che il tensore dell'elasticità deve essere definito positivamente (vedere la sezione precedente). Perché B e G siano positivi, il rapporto di Poisson deve variare tra -1 e 0.5. Abbiamo visto il caso di ν = 0.5 nella sezione precedente sui metadati in penta-mode in cui il modulo di massa è estremamente alto e il modulo di taglio è estremamente basso. L'opposto di questa condizione si verifica quando prendiamo l'altro estremo dei valori del rapporto di Poisson, cioè ν = -1. In questo caso, il modulo di massa è estremamente piccolo rispetto al modulo di taglio e il materiale extremal è chiamato un materiale dilatativo. È importante notare che i materiali dilatativi sono fondamentalmente un caso specifico di materiali estremali unimode. Intuitivamente, la forma dei materiali dilatati rimane la stessa indipendentemente dalla quantità di deformazione che subiscono. È solo la loro dimensione che cambia. In altre parole, i materiali dilatatori sono semplicemente ridimensionati a causa della deformazione. Sulla base di quanto sopra, i metamateriali in modalità penta e dilatati possono essere visti come l'opposto l'uno dell'altro. Varie strutture sono proposte per la creazione di meta-materiali dilatatori. Milton ha recentemente esaminato strutture dilatative e ha offerto alcuni nuovi esempi di metamateriali dilatativi. I precedenti progetti di materiali dilatativi erano basati su superfici di scorrimento, mentre i modelli successivi usavano varie altre costruzioni di cui uno è presentato in Fig. 4.10. Cabras e Brun hanno elencato un numero di materiali comprimibili la cui forma è difficile da cambiare tra cui alcune strutture molecolari e schiume rientranti.

Fig. 4.9 Formula per metamateriale elastico dilativo



53. G. N. Greaves, A. Greer, R. Lakes and T. Rouxel, (2011)Poisson's ratio and modern materials, *Nat. Mater.*, , 10, 823–837

4.10

I materiali con rapporto di Poisson negativo sono più ampi dei soli materiali di dilatazione. In effetti, qualsiasi materiale con un rapporto Poisson negativo è chiamato materiale auxetico. Il termine 'auxetico' deriva dalla parola greca 'auxeis' che significa 'aumentare e crescere'. Secondo Cabras e Brun, questo termine fu usato per la prima volta da Evans per descrivere materiali che si espandono nella direzione perpendicolare alla direzione di carico della trazione. I materiali ausiliari sono forse i meta-materiali più studiati.Recentemente è stato pubblicato un eccellente documento di revisione che copre i diversi aspetti dei materiali ausiliari e le loro proprietà[53]. I materiali ausiliari in generale e i materiali di dilatazione in particolare hanno migliorato la resistenza ai danni, come risultato della loro capacità di distribuire lo stress su una parte più ampia del materiale. Cabras e Brun hanno riassunto le proprietà utili dei materiali ausiliari, ed hanno approfondito le aree in cui sono applicati tali materiali, tra cui un "efficiente filtro a membrana con permeabilità variabile, elementi di fissaggio, materiali a memoria di forma e smorzatori acustici".

(D) Negative metamaterials

I metamateriali negativi sono metamateriali con moduli negativi come il modulo di massa negativo o il modulo elastico negativo. L'esibizione di moduli negativi è un livello completamente nuovo di anomalia nel comportamento meccanico dei metamateriali rispetto a quello che abbiamo visto fino ad ora. Questo perché finora abbiamo ipotizzato che il tensore dell'elasticità debba essere

Fig.4.10 Un metamateriale elastico dilatativo (dilational) tridimensionale realizzato a scale macroscopiche (a) e microscopiche (b e c) utilizzando varie tecniche di produzione additiva

definito positivo, il che significa che, sia il modulo di massa, che il modulo di taglio dovrebbero essere positivi. Questa condizione è stata considerata la condizione necessaria ad un tensore di elasticità per essere termodinamicamente ammissibile, per molti anni, dalla maggior parte dei ricercatori che studiano la meccanica del continuo. L'argomento termodinamico alla base di questa condizione è che la compressibilità negativa o rigidità negativa si traduce in materiali instabili. Materiali con comprimibilità negativa o rigidità negativa sono stati tuttavia osservati in varie condizioni sperimentali. Tali materiali potrebbero avere molte applicazioni, se la loro stabilità può essere garantita. Lakes e Wojciechowski[54] hanno sostenuto che anche se un materiale non vincolato con moduli negativi potrebbe non essere stabile, un materiale vincolato con moduli negativi può essere molto stabile. Hanno sostenuto che il tensore dell'elasticità dei materiali vincolati non ha bisogno di essere definito positivamente per essere stabile, poiché i requisiti per la stabilità e l'unicità della soluzione sono forti ellittiche nel caso di materiali vincolati. Una forte ellitticità impone le seguenti condizioni meno rigide per la stabilità:

4.11 $-\infty < E < \infty$ oppure $-4G/3 < K < \infty$

Hanno inoltre sostenuto che non ci sono argomenti convincenti dal punto di vista della termodinamica per l'effetto che sono necessarie ulteriori restrizioni sui confini dei moduli ammissibili per garantire la stabilità di un materiale vincolato. Per altri ricercatori i moduli negativi come la compressibilità negativa sono possibili anche per i materiali non vincolati.
Le proprietà negative dei materiali includono l'espansione termica negativa, che è stata identificata in molti ossidi e solidi cellulari; non sono discussi qui, perché , come detto, questo elaborato si concentra principalmente sul comportamento meccanico puro dei metamateriali.

(E) Comprimibilità negativa

La definizione più generale di compressibilità si distingue tra tre tipi di compressibilità, ovvero la compressibilità di linea, di area e di volume. Le compressibilità di linea, area e volume sono, rispettivamente, definite come la variazione della lunghezza, dell'area e del volume di un materiale sotto pressione idrostatica. Comprimibilità negativa significa sostanzialmente che un materiale si espande in risposta alla pressione idrostatica. A seconda del numero di dimensioni lungo le quali si verifica l'espansione, il materiale può avere una compressibilità di lunghezza, area o volume negativa. Gli argomenti termodinamici menzionati sopra per quanto riguarda la compressibilità negativa si riferiscono principalmente alla compressibilità del volume. La compressibilità di lunghezza e area può essere ammissibile anche nel contesto convenzionale delle restrizioni termodinamiche. Sono stati identificati cristalli con comprimibilità di linee e aree negative, compresa la recente scoperta della compressibilità lineare negativa nel metanolo monoidrato, che è un cristallo molecolare relativamente semplice e mostra una compressibilità lineare negativa insieme ad un'espansione termica negativa ed anisotropa. Oltre ai cristalli, numerosi altri sistemi presentano una compressibilità negativa che potrebbe essere suddivisa in quattro categorie principali.
Nella prima categoria di questi materiali, la geometria delle strutture cellulari è la causa della comprimibilità negativa. Ad esempio, i nidi a sagoma esagonale mostrano una comprimibilità lineare negativa in 2D, mentre le strutture reticolari costituite da un dodecaedro esagonale allungato sono geometrie 3D che mostrano il rapporto di Poisson negativo e la compressibilità negativa. Le strutture a fascio tetragonale mostrano anche una comprimibilità lineare negativa.
La seconda categoria di metamateriali con compressibilità negativa deve questa proprietà alla combinazione di due materiali con differenti proprietà meccaniche. Un esempio di tale materiale ingegnerizzato è stato presentato da Gatt e Grima. Gli stessi ricercatori hanno proposto una struttura a traliccio composta da più materiali. La struttura proposta mostra una comprimibilità lineare negativa e, in alcuni casi, anche comprimibilità negativa dell'area e volumetrica. La comprimibilità negativa della terza categoria di tali materiali è causata da vincoli specifici. Infine, i materiali sfusi che potenzialmente potrebbero presentare compressibilità negativa hanno recentemente ricevuto attenzione. Particolari tipi di funzioni potenziali (bi-stabili) potrebbero causare una comprimibilità negativa in tali materiali. Il punto importante di quest'ultima categoria di materiali è che la comprimibilità negativa è una proprietà del materiale sfuso e non

Fig. 4.11 range entro i quali può essere garantita la stabilità dei materiali con moduli negativi

54. Lakes R. , Wojciechowski,K. (2008) Negative compressibility, negative Poisson's ratio, and stability, *Phys. Status Solidi B*, 245, 545–551

del modo in cui è organizzata la geometria del materiale. La ricerca su questo tipo di materiale è stata finora ampiamente teorica. Gli studi che riportano una comprimibilità volumetrica negativa sono relativamente rari. La maggior parte dei casi di compressibilità volumetrica negativa sopra menzionata è riportata in studi teorici o computazionali. In uno studio interessante in cui è stata osservata chiaramente la comprimibilità volumetrica negativa, le schiume a celle aperte sono state sottoposte a pressione idrostatica (figura 3). Oltre la deformazione ≈20%, i campioni si sono espansi all'aumentare della pressione idrostatica, mostrando chiaramente compressibilità volumetrica negativa.

(F) Negative stiffness - Rigidità Negativa

I materiali con rigidità positiva si deformano nella direzione della forza applicata e formano una forza di ripristino che tenta di ricostituire la forma originale del materiale deformato, resistendo così alla deformazione.
I materiali con rigidezza negativa si deformano in una direzione opposta alla direzione della forza applicata e formano una forza di supporto alla alterazione, aiutando così la deformazione. I materiali a rigidità negativa pertanto subiscono deformazioni maggiori rispetto ai materiali a rigidezza positiva, se sottoposti a condizioni di carico comparabili. Questa è la ragione per cui i materiali con rigidità negativa sono considerati instabili, a meno che non siano vincolati.
I materiali con rigidità negativa possono, tuttavia, essere combinati con - o incorporati all'interno di - materiali di rigidità positivi o essere altrimenti vincolati per la stabilizzazione. In numerosi studi, Lakes e collaboratori hanno dimostrato che combinazioni di materiali con rigidità positiva e negativa offrono proprietà straordinarie come coefficienti di smorzamento estremamente elevati.
Forse il sistema più semplice che potrebbe mostrare rigidità negativa è un raggio planare deformato sotto compressione. Una forza applicata lateralmente potrebbe ridurre la deflessione laterale della trave deformata e persino ripristinare la forma originale non deformata del raggio. Aumentando ulteriormente la forza laterale, il raggio si fletterà nella direzione opposta.
Esistono esattamente tre stati in cui il mantenimento della posizione dei raggi non richiede alcuna forza laterale: entrambi gli stati di instabilità del raggio in due direzioni possibili e la posizione originale, rettilinea, del raggio.
Esiste tuttavia una differenza fondamentale tra gli stati di instabilità del raggio da un lato e la posizione originale del raggio dall'altro. Le prime due posizioni sono gli equilibri stabili del sistema, il che significa che lievi perturbazioni attorno a queste posizioni creano forze che ripristinano l'equilibrio.
La posizione originale è instabile, il che significa che una leggera perturbazione farà sì che il sistema si allontani sempre più da questo equilibrio. Se la forza laterale viene sostituita da un vincolo, si può vedere che il raggio si aggancia immediatamente a una nuova forma, una volta rimosso il vincolo.
Questo comportamento “a scatto” è il segno distintivo dei sistemi di rigidità negativi. Il comportamento sopra descritto può essere spiegato in termini di energia potenziale del raggio deviato. Se l'energia potenziale del fascio deflesso viene tracciata in funzione della forza laterale applicata, mostra tre punti estremi corrispondenti ai tre stati sopra menzionati del raggio deformato. La prima, derivata della funzione potenziale rispetto allo spostamento laterale, è zero in tutti questi punti estremi. La seconda, derivata della funzione potenziale rispetto allo spostamento, che equivale alla rigidità del sistema, è tuttavia diversa per i punti di equilibrio stabili e non stabili del sistema. Mentre la seconda derivata è positiva per entrambi gli stati di flessione del raggio, è negativa per la posizione originale non allacciata. Le posizioni instabili del raggio, quindi, corrispondono ai minimi locali della funzione potenziale, mentre la posizione originale non deformata corrisponde al massimo locale della funzione potenziale.
In letteratura, oltre a sistemi noti per presentare rigidità negativa derivante da stati deformati, è stata riportata l’identificazione di materialI con intrinseca rigidità negativa. Molti dei materiali che presentano rigidità negativa sono associati ad alcuni tipi di bi-stabile (con due stati stabili) e comportamenti snap-through . Per esempio, i materiali che subiscono trasformazioni in fase di cambiamento del volume come il titanato di bario o materiali ferroelastici come il diossido di vanadio potrebbero mostrare il comportamento negativo della rigidità principalmente a causa della loro capacità di accumulo di energia. Inoltre, nuovi tipi di comportamento negativo alla rigidezza, ad es. "*Instabilità discontinua*", continuano a essere scoperti in sistemi che comprendono elementi deformati. Una delle applicazioni più importanti dei materiali con rigidità negativa

consiste nel raggiungere livelli elevati sia di smorzamento che di alta rigidità allo stesso tempo. I materiali tecnici comunemente utilizzati con elevata rigidità di solito non hanno elevati rapporti di smorzamento, mentre i materiali ingegnerizzati con alti rapporti di smorzamento sono generalmente conformi. Pertanto, è molto difficile ottenere entrambe le proprietà contemporaneamente.
Una soluzione interessante sarebbe quella di realizzare compositi utilizzando entrambi i tipi di materiali per ottenere, in una certa misura, entrambe le proprietà. Ad esempio, i materiali polimerici con un elevato rapporto di smorzamento possono essere rinforzati con inclusioni rigide che aumentano la rigidità del composito. il problema è individuare e riuscire a condizionare la desiderata distribuzione e omogeneità delle diverse caratteristiche all'interno dello stesso materiale.
La soluzione proposta da Lakes e collaboratori era di incorporare materiali di rigidità negativi come inclusioni in una matrice di rigidità positiva. Pur essendo i materiali di rigidità negativi sono, di per sè, instabili, la loro inclusione in una matrice di rigidezza positiva ne garantisce la stabilità. E' stato infatti dimostrato che la presenza di una matrice sufficientemente rigida potrebbe stabilizzare un composito contenente inclusioni di rigidità negative. D'altro canto, il composito risultante mostra un coefficiente di smorzamento molto elevato e valori di rigidità che superano di gran lunga quelli dei materiali costituenti. Materiali che hanno contemporaneamente alti coefficienti di smorzamento ed elevata rigidità si presterebbero ad essere utilizzati per un gran numero di applicazioni; tra esse, elettivamente, l'isolamento dalle vibrazioni. Un'altra applicazione in qualche modo correlata è l'uso di meta-materiali per applicazioni di trasformazione acustica come il cloaking acustico di cui si è riferito anche nel contesto dei metamateriali in modalità penta.
Quando i valori assoluti dei materiali di rigidezza positiva e negativa si avvicinano allo stesso valore, la rigidezza equivalente del sistema combinato si avvicina all'infinito che in pratica significa valori di rigidezza estremamente elevati. Tuttavia, la costruzione in serie di materiali di rigidezza negativi e positivi è instabile e deve essere stabilizzata per applicazioni pratiche. Kochmann e Milton hanno recentemente presentato alcuni limiti matematicamente rigorosi per i moduli elastici dei materiali compositi che incorporano componenti di rigidità negativa. Quei confini devono essere rispettati per assicurarsi che i materiali compositi siano stabili. Molte altre applicazioni di materiali con rigidità negativa potrebbero essere trovate in letteratura, compresi i sistemi di protezione dalle vibrazioni dei veicoli, la protezione sismica delle strutture e l'isolamento dalle vibrazioni nei trasporti su rotaia

(G) Ultra property meta-materiali

Il materiale ideale per ogni applicazione strutturale dovrebbe possedere contemporaneamente due o più delle seguenti proprietà: elevata rigidità, elevata resistenza, elevata tenacità e bassa densità di massa. A causa della loro natura conflittuale, è difficile o impossibile ritrovare combinate alcune delle proprietà sopra menzionate nella maggior parte dei materiali ingegneristici oggi disponibili. Ad esempio, è noto che esiste un conflitto tra forza e forza. Esistono, tuttavia, materiali biologici come la madreperla, che possono raggiungere contemporaneamente elevata rigidità, elevata resistenza e elevata tenacità. Questo, si è scoperto, grazie a una particolare microstruttura gerarchica e "sfalsata". E' dunque ispirandosi alla natura, che molti ricercatori stanno recentemente cercando di sviluppare metamateriali con architetture razionalmente progettate che diano origine a meta-materiali ultra-rigidi, ultra-resistenti, ultra-resistenti e ultra-leggeri. I grafici di Ashby (figura 4.12) sono strumenti utili che potrebbero essere utilizzati per confrontare le proprietà di materiali diversi tra loro e per scegliere / progettare il materiale giusto per ogni applicazione specifica. Ad esempio, il modulo elastico dei materiali potrebbe essere tracciato rispetto alla densità di massa o alla forza che potrebbe essere tracciata rispetto alla tenacità. I grafici di Ashby consentono un facile confronto tra diversi (categorie di) materiali e per mettere in prospettiva le proprietà dei metamateriali delle proprietà ultra.
Meza et al. ha recentemente dimostrato che è possibile produrre metamateriali ultra-resistenti e ultra leggeri realizzati in ceramica utilizzando litografia a due foto, deposizione di strati atomici e incisione al plasma di ossigeno su scala nanometrica. Nonostante siano costituiti da un materiale fragile, ad esempio l'allumina, i nano-reticoli hanno evidenziato una deformazione recuperabile anche quando compressi oltre il 50% di deformazione.
Jang et al. ha riportato valori di resistenza molto elevati fino a 1,75 GPa in uno studio correlato che utilizzava meta-materiali

progettati razionalmente per ottenere valori ultra alti di proprietà meccaniche. L'integrità dei meta-materiali è stata preservata anche dopo aver subito più cicli di caricamento. Infine, Zheng et al. hanno individuato materiali meta segnalati con "una rigidità quasi costante per unità di densità di massa" (Fig. 4.12). La rigidità della maggior parte dei materiali diminuisce rapidamente quando la densità di massa si avvicina ai valori più piccoli. I micro-reticoli presentati nello studio da Zhang et al. mostravano una rigidità quasi costante per unità di densità di massa anche quando la densità di massa era ridotta di tre ordini di grandezza (Figura 4.12). Questa è una straordinaria combinazione di alta rigidità e bassa densità che è stata raramente è stata osservata altrove.

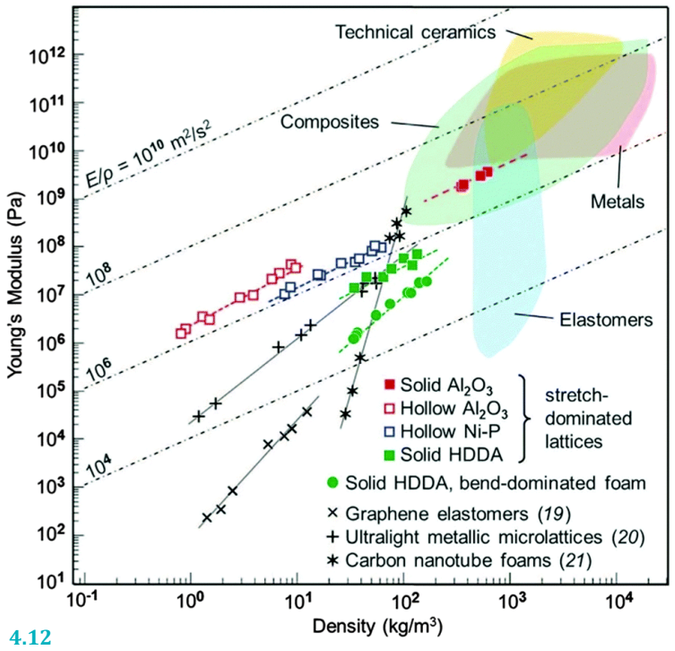


Fig. 4.12 Diagramma di Ashby: utilizzati per confrontare le proprietà di materiali diversi tra loro e per scegliere / progettare il materiale giusto per ogni applicazione specifica. Nell'immagine sono messi a confronto diversi disegni di materiali ultra-rigidi ultra-rigidi basati su vari tipi di celle unità ripetitive.

4.12

I diagrammi di Ashby vengono utilizzati per confrontare le proprietà meccaniche dei materiali in base a disegni e materiali diversi tra loro e con altre categorie di materiali.

Aree emergenti

Come anticipato, Zadpoor propone infine, una overview sulle applicazioni possibili. Le sezioni precedenti coprivano le varie categorie di metamateriali meccanici con una chiara attenzione al loro comportamento elastico in generale e al tensore di elasticità in particolare. Questa sezione presenta una serie di paradigmi emergenti nella progettazione, produzione e analisi di materiali meccanici che hanno ricevuto molta attenzione di recente.

(H) Metamateriali attivi, adattivi e programmabili.

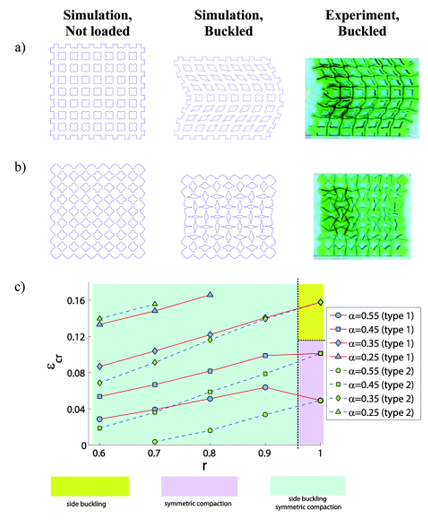
Tra le tematiche relative ai metamateriali attivi, adattativi e programmabili, tre sono le più ricorrenti: l'uso di materiali morbidi : le, grandi deformazioni e l' instabilità. Vari progetti di metamateriali meccanici sono stati proposti usando combinazioni smart delle tre caratteristiche sopra menzionate, con geometrie progettate razionalmente che potrebbero, ad esempio, sfruttare l'instabilità di materiali morbidi nell'intervallo di deformazione non lineare, in modo da ottenere proprietà senza precedenti o raramente viste, assieme ad altre speciali funzionalità.

Estendere la gamma di deformazioni considerando il grande intervallo di deformazione è una caratteristica distinta di questo tipo di studio. Questa è una necessità e un'opportunità, ogni qual volta siano utilizzati materiali morbidi per la progettazione e la produzione di meta materiali meccanici. La prima domanda naturale da porsi, è: "quale tipo di proprietà materiale può essere realizzata nell'intervallo di deformazione non lineare?" .

I concetti di Metamateriale meccanico attivo e M. programmabile, sono emersi principalmente dalla ricerca sui regimi di instabilità di materiali morbidi e provvisti di pattern. Livelli estremi di programmabilità basati su blocchi che potrebbero eseguire operazioni matematiche come la differenziazione spaziale, l'integrazione e la convoluzione sono stati raggiunti nei materiali elettromagnetici. Sebbene uno stesso livello di programmabilità debba ancora essere dimostrato per i metamateriali meccanici, l' ambizione di poter disporre di metamateriali attivi e programmabili si è estesa anche alla comunità dei materiali meccanici. Taluni solidi cellulari realizzati con materiali morbidi e confinati lateralmente mostrano un certo livello di programmabilità nel loro comportamento meccanico, nonché multi-stabilità e "isteresi

55. Janbaz, S., Weinans,H., Zadpoor, A. A. (2016)Geometry-based control of instability patterns in cellular soft matter, *RSC Adv*.,6, 20431–20436

gigante".
La prescrizione e il controllo delle modalità di instabilità dei metamateriali è la strategia più utilizzata per raggiungere tali obiettivi. I solidi molli cellulari bidimensionali e tridimensionali sono spesso usati per regolare il comportamento di instabilità dei materiali (figura 4.13)[55], poiché la geometria dei pori e le loro dimensioni potrebbero essere utilizzate non solo per modificare le soglie di instabilità ma anche per regolare l'instabilità di tipi e modelli , a volte completamente indipendenti dalle proprietà meccaniche del materiale sfuso da cui sono realizzati. Vari modelli di instabilità e il modo in cui si rompono le simmetrie applicabili, portano a proprietà meccaniche e funzionalità distinte. Se si potessero, per esempio, controllare i modi di instabilità di un metamateriale (multi-stabile) o almeno prescriverli attraverso il progetto razionale della struttura cellulare, si potrebbe conseguentemente controllare la funzionalità del meta-materiale e contemporaneamente attivare specifiche modalità di instabilità, quando necessario. E' questa l'idea principale alla base della progettazione di metamateriali attivi / adattivi, spesso integrata con altri espedienti, come l'applicazione di giroscopi accoppiati su un reticolo o mediante impiego dellle cosiddette "modalità morbide", che funzionano come possibili componenti per smart soft attuatori.



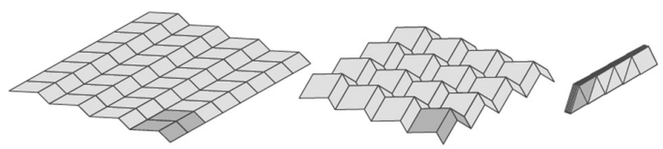
4.13

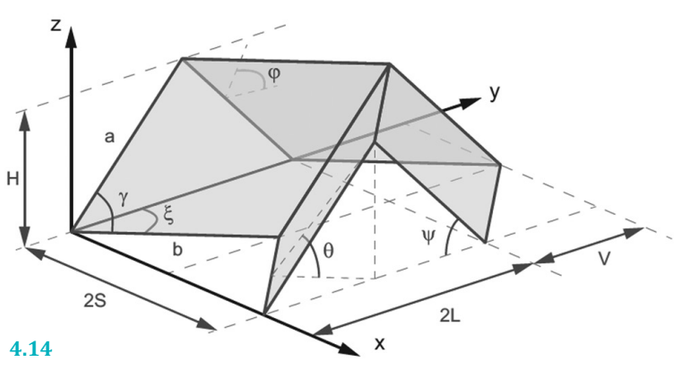
Fig. 4.13 Alcune progettazioni di materiali morbidi cellulari mostrano soglie e modelli di instabilità che potrebbero essere completamente controllati dalla geometria, indipendentemente dalle proprietà meccaniche dei materiali sfusi da cui sono costituiti.
In questo disegno specifico, i modelli di instabilità possono essere il buckling laterale (a) o la compattazione (b) a seconda della forma dei pori. Una mappa di instabilità potrebbe essere utilizzata per mettere in relazione vari parametri geometrici con i modelli di instabilità (c)

(I) Metamateriali basati su origami

L'antica arte giapponese della piegatura della carta, l'universalmente noto (e sottovalutato) origami è recentemente emersa come un nuovo, inaspettato, paradigma di progettazione e produzione che potrebbe sorprendentemente essere utilizzato in modo innovativo e proficuo per diverse applicazioni. Tra queste, a titolo di esempio non esaustivo, robot auto-pieganti, stent medicali, strutture attive e dispiegabili e metamateriali meccanici. In questi casi, il concetto di "carta" viene esteso per includere vari tipi di materiali inizialmente piani che possono essere piegati o attivati per auto-piegarsi in una forma desiderata (tridimensionale). A seconda del disegno, della piega e dei modelli di piegatura, la struttura tridimensionale piegata risultante avrà diverse geometrie, proprietà meccaniche e funzionalità. Una sottocategoria di strutture origami, chiamate origami rigido, sta a sua volta ricevendo una grande attenzione. Negli origami rigidi, le linee di piegatura possono essere considerate giunture cinematiche. Pertanto, il processo di piegare una particolare "carta" alla forma origami desiderata si riduce a un processo cinematico, con una serie di vincoli. Si presume che le diverse parti della carta unite dai giunti cinematici rimangano indeformate a causa delle pieghe applicate. L'origami puro parte sempre da un foglio di carta quadrato e presuppone una realizzazione senza tagli e senza l' uso di collanti. Tuttavia, molte applicazioni pratiche del concetto di origami superano questi vincoli. Un altro concetto di lavorazione strettamente correlato, chiamato kirigami consente, appunto, di operare tagli nella carta.
L'origami *Miura-ori* è forse il tipo di struttura origami più studiato (Fig. 4.14). I metamateriali meccanici creati sulla base di (alcune varianti di) origami piegati di tipo *Miura* sono stati utilizzati per mostrare rapporti di Poisson negativi (nel piano). Talune varianti dell'origami Miura-ori sono state poi anche utilizzate per lo sviluppo di materiali meccanici riprogrammabili. Un altro studio ha dimostrato che è possibile sfruttare modelli specifici di tubi origami Miura-ori per ottenere metamateriali meccanici rigidi e riconfigurabili. Sono state realizzate strutture di tipo origami che hanno dimostrato di possedere anche talune caratteristiche proprie dei metamateriali meccanici, come la bi- stabilità e la multi-stabilità. Complessivamente, la combinazione delle caratteristiche delle strutture di origami, quali: peso ridotto,

flessibilità di progettazione e possibilità di produzione alternative, con le proprietà anomale mostrate dai meta-materiali meccanici, si sta manifestando come una promettente area di ricerca, che potrebbe presto proporre nuove categorie di meta-materiali e nuove funzionalità mai prima d'ora riscontrate in altri tipi di metamateriali meccanici.





4.14

Fig. 4.14 Il design geometrico delle strutture origami Miura-ori. Diversi parametri geometrici determinano la forma delle pieghe

Le aree emergenti discusse nella sezione precedente costituiscono una stimolante proposta per una tabella di marcia verso le direzioni future della ricerca sui metamateriali meccanici per molti anni a venire. E' opinione concorde che l'estensione dello studio del comportamento meccanico dei metamateriali meccanici alla gamma non lineare delle deformazioni e ai materiali morbidi sarà oggetto di sempre maggiore attenzione nei prossimi anni a venire. Sembra esserci, infatti, un consenso generale nella comunità sulla constatazione che molte opportunità progettuali offerte dai metamateriali non lineari morbidi siano ancora da scoprire e potrebbero costituire fruttuoso motivo di studio per i ricercatori. I progressi della stampa 3D e delle tecniche di produzione additiva hanno anche fornito occasioni di ricerca che potrebbero essere esplorate nei prossimi anni. Molti dei progetti di meta-materiali discussi nelle sezioni precedenti sono infatti stati studiati solo teoricamente o computazionalmente. Si prevede che la diffusa disponibilità di macchine e servizi di stampa 3D avanzata e di produzione additiva potrà consentire ai ricercatori di trasformare in produzioni tangibili i concetti teorici precedentemente proposti e di osservare sperimentalmente il comportamento meccanico dei meta-materiali risultanti. Di particolare importanza sono le tecniche di stampa 3D multi-materiale che potrebbero avviare nuovi paradigmi nella progettazione di meta-materiali meccanici. Ad esempio, la distribuzione spaziale di materiali con differenti proprietà meccaniche potrebbe essere combinata con microarchitettura architettonica razionalmente progettata durante la ideazione di metamateriali meccanici. La stampa 3D di materiali morbidi è un'altra area emergente che potrebbe ulteriormente arricchire le possibilità di progettazione e produzione di metamateriali attivi, adattabili e programmabili. Oltre alla stampa 3D, altri paradigmi di progettazione e produzione come origami e kirigami devono essere ulteriormente esplorati. Un certo numero di design molto innovativi di meta-materiali meccanici basati su questi concetti sono già stati proposti e si prevede che ulteriori concetti nuovi deriveranno da ulteriori ricerche in quelle direzioni. Un altro aspetto che non ha ricevuto molta attenzione è il comportamento a fatica dei metamateriali meccanici. La stragrande maggioranza degli studi precedenti si è concentrata sui tipi statici, quasi statici o specifici di comportamenti dinamici dei metamateriali meccanici. Tuttavia, l'uso effettivo di metamateriali meccanici per applicazioni strutturali richiede uno studio approfondito del loro comportamento sottoposto a fatica, che viene proposto come una possibile via per la ricerca futura. Nel complesso, secondo Zadpoor, il futuro dovrebbe riservare anni entusiasmanti per la ricerca sui metamateriali meccanic,i data la sempre più diffusa disponibilità di tecniche di progettazione avanzate, come l'ottimizzazione della topologia e le sempre maggiori possibilità, offerte da una vasta gamma di tecniche di produzione additiva in rapida evoluzione.

Sintesi della classificazione proposta da Zadpoor
Come opera di sintesi dei contenuti sinora espressi in merito al sistema di classificazione proposto da Amir Zadpoor, si riporta un'elaborazione grafica di sintesi (Fig 4.15). Da questa si evince che Zadpoor compie un'operazione di classificazione basata sulle proprietà ricavate e le proprietà/leggi intrinseche che governano il materiale. Si tratta quindi di un approccio di tipo *induttivo*.

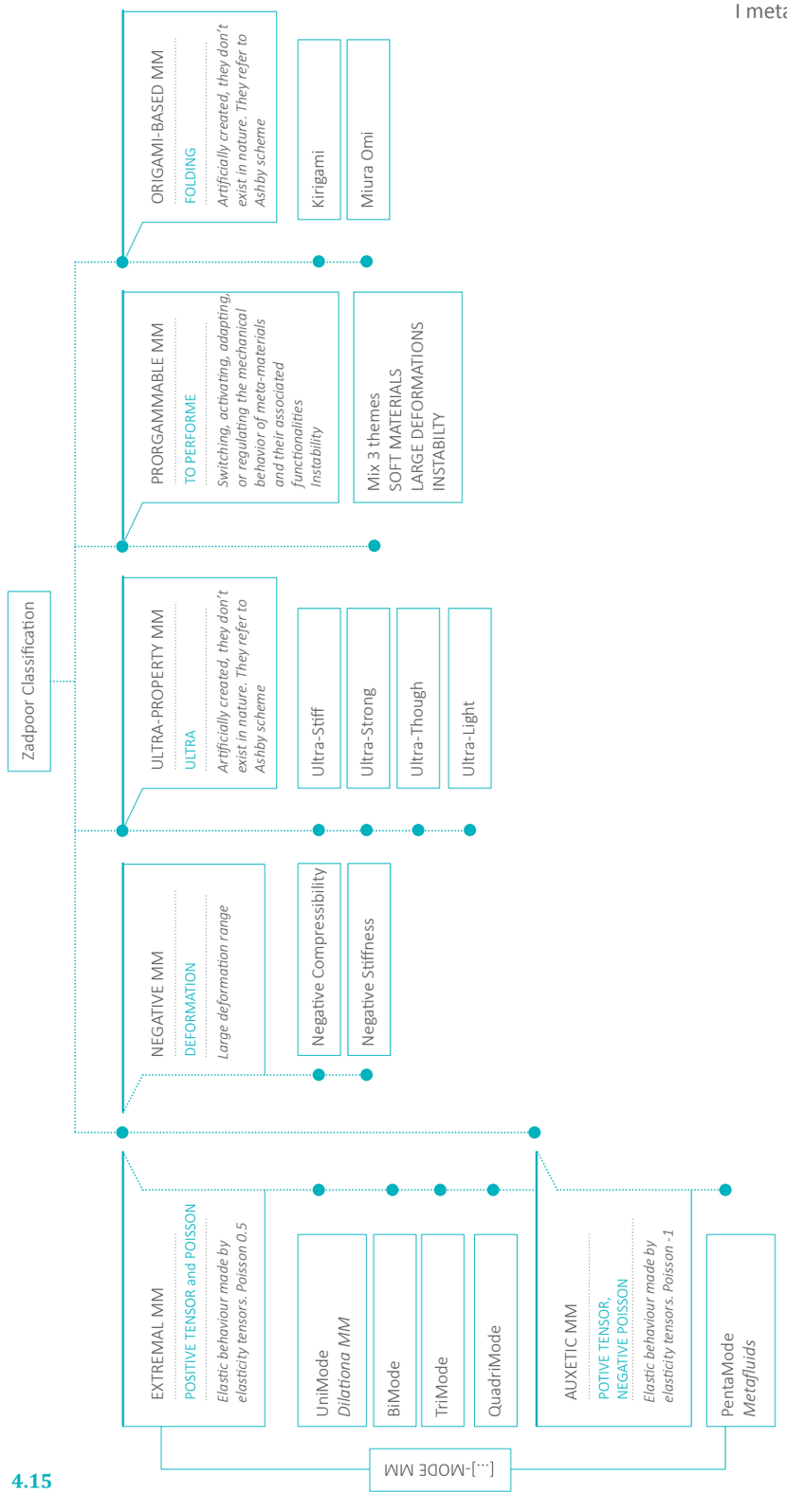


Fig. 4.15 Sintesi schematica della classificazione proposta da Zadpoor

Secondo sistema di classificazione: Bertoldi

Introduzione ed informazioni relative all'autrice:
Prima di procedere con il sistema di classificazione elaborato da Katia Bertoldi, è doverosa una breve introduzione alla figura professionale della autrice ed agli ambiti in cui la stessa opera.
La ricerca di Katia Bertoldi prevede l'uso della meccanica del continuo e della matematica applicata per modellare il comportamento meccanico di nuovi materiali su piccola scala, come nano-compositi e compositi biologici. Lo scopo del suo gruppo è stabilire relazioni tra la struttura interna di un materiale e le sue proprietà meccaniche. La maggiore comprensione della scoperta esistente e potenziale di nuovi materiali, in particolare quelli con proprietà migliorate e persino 'regolabili', trovano un uso diretto in molti campi critici, tra cui acustica, ottica ed elettronica.
Le sue principali aree di interesse includono: analisi della meccanica continua del comportamento dei materiali moderni; stabilità e instabilità; propagazione delle onde; modellizzazione costitutiva di polimeri; meccanica computazionale; meccanica della frattura; matematica applicata; e il comportamento meccanico dei materiali biologici.
Prima della sua nomina ad Harvard, Bertoldi è stato Assistant Professor presso l'Università di Twente nei Paesi Bassi. Ha conseguito un dottorato di ricerca in Meccanica dei materiali e delle strutture dell'Università di Trento in Italia; un master internazionale in ingegneria strutturale presso la Chalmers University of Technology di Goteborg, in Svezia; e una Laurea in ingegneria civile presso l'Università di Trento[56].

«Design is a kind of feedback between the artist and the environment between the designer and some posed problem»[57].
Ron Resch

Classificazione Bertoldi

I metamateriali sono materiali attentamente strutturati, spesso costituiti da elementi costitutivi disposti periodicamente - che esibiscono proprietà e funzionalità che differiscono e sorpassano quelli dei loro materiali costitutivi, piuttosto che semplicemente combinarli. Negli ultimi due decenni, sono stati individuati metamateriali in grado di manipolare campi ottici, acustici e termici e che hanno proprietà molto insolite, come ad esempio metamateriali ad indice di rifrazione negativo.
Ciò ha portato a nuove applicazioni, uno degli esempi più conosciuti sono le lenti perfette[58] e l'*invisibility cloack*[59].
I metamateriali meccanici costituiscono un ramo più recente della ricerca sui metamateriali che sfrutta il movimento, le deformazioni, gli stress e l'energia meccanica. Sebbene prendano in prestito idee di design da materiali meta basati sulle onde, offrono anche nuove sfide e opportunità. Ad esempio, sia i metamateriali a base di onda che quelli meccanici possono utilizzare la geometria per ottenere parametri di materiale zero o negativi, ma nel contesto dei metamateriali meccanici, diversi progetti recenti hanno anche sfruttato il morphing di forme, la protezione topologica, le instabilità e le risposte non lineari per ottenere funzionalità avanzate.
I materiali *auxetici*, cioè i materiali che si espandono o si contraggono in tutte le direzioni quando viene applicata una forza, sono un primo esempio di materiali meta-meccanici e illustrano bene come la struttura intrinseca controlli il comportamento dei metamateriali meccanici.
Gli elementi costitutivi dei metamateriali meccanici - i meta-atomi - si deformano, ruotano, si piegano e si spezzano in risposta a forze meccaniche e sono progettati in modo tale che i blocchi di costruzione adiacenti possano agire insieme per ottenere un comportamento collettivo desiderato. Una pietra angolare per la progettazione di entrambi i meta-atomi e metamateriali sono gli elementi snelli.

Poiché le rigidità alla flessione di questi gli elementi si adattano alla terza potenza del loro spessore, si possono progettare e realizzare con valori di rigidezza molto forti, utilizzando varie tecniche di produzione additiva.
Queste eterogeneità sono alla base delle differenze qualitative tra le proprietà globali dei metamateriali e quelle dei loro materiali costitutivi. Pertanto, è possibile utilizzare architetture progettate con cura per ottenere una combinazione di coefficienti elastici lineari che non sia vietata dalla termodinamica.
Spesso tali eterogeneità sono utilizzate per approssimare gli elementi cardini, portando a strutture quasi liberamente incernierate con modalità e meccanismi floppy.

56. https://www.seas.harvard.edu/directory/bertoldi
57. Ron resch Paper and Stick film" https://vimeo.com/36122966
58. Pendry, J. B. (2000) Negative refraction makes a perfect lens. *Phys. Rev. Lett.* 85, 3966–3969
59. https://www.youtube.com/watch?v=gjfYohXoiz0

Come presentato nel paper di Bertoldi, Un'ampia varietà di design di meta materiale sfruttano questo principio, in particolare origami, kirigami e materiali che cambiano la loro forma. Elementi snelli consentono deformazioni di grandi dimensioni, che portano a non linearità geometriche e sono inclini a instabilità elastiche, come l'instabilità e la rottura. Le non-linearità e le instabilità sono alla base di numerose funzionalità metamateriali avanzate, come la multistabilità e la programmabilità. Infine, fasi topologiche sono state recentemente create in strutture meccaniche opportunamente progettate. Le proprietà di questi metamateriali sono protette dalla topologia, ovvero sono resistenti contro le deformazioni del materiale.

Metamateriali elastici lineari.
I materiali isotropici sono descritti da due coefficienti elastici, come il rapporto di Poisson e il modulo di Young, mentre per i materiali anitropici, il tensore di elasticità può contenere fino a 21 coefficienti indipendenti, fornendo un ampio spazio target per la progettazione meccanica dei metamateriali.
Questo accade perchè stress (σ_i) e sforzo (e_{kl}) sono tensori simmetrici 3x3, messi in relazione attraverso il tensore elastico (C_{ijk}) “rank-four”

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}e_{kl} \qquad \textbf{4.15}$$

Nel 1995, Milton e Cherkaev hanno dimostrato che è possibile progettare architetture costituite da materiali elastici ordinari e vuoto per creare metamateriali con qualsiasi forma di "C" che non sia vietata dalla termodinamica (consulta Zadpoor. cfr. cap. 4 best practices)
I materiali ausiliari sono un esempio di metamateriali con Cijkl insolito. Materiali extremal, che resistono solo a un tipo di deformazione e materiali pentamode - un particolare tipo di materiale extremal - costituiscono un altro esempio. I materiali pentamode sono definiti come aventi cinque dei sei autovalori del tensore di elasticità nella notazione Mandel uguale a zero.
il materiale pentamode è una struttura in cui il rapporto tra il modulo elastico bulk-to-shear diverge; come un fluido, tale materiale non resiste al taglio e resiste solo alle deformazioni volumetriche. I progressi nella produzione additiva hanno

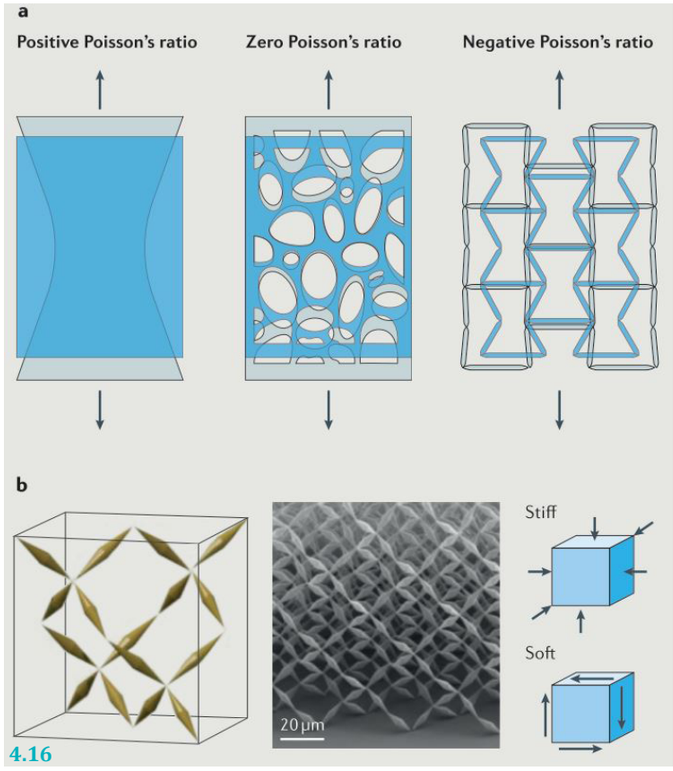
Fig. 4.15 Rapporto tra stress e sforzo in funzione del tensore elastico

permesso la creazione di materiali 3D estremi, che sono stati utilizzati per produrre il cosiddetto mantello dell’invisibilità '(RIF 13). Attraverso la stratificazione di diversi materiali estremi, è possibile creare metamateriali con qualsiasi Cijkl desiderato.
Eterogeneità.
La ragione fondamentale per cui i materiali architettonici portano a nuove proprietà è la risultante eterogeneità degli sforzi e delle deformazioni, che causa la rottura dell'ipotesi affine, la quale, a sua volta, congettura che le deformazioni sono uniformi, come in un campione di gomma omogeneo.
Ad esempio, per metamateriali auxetici ed extremal, la maggior parte delle deformazioni sono localizzate alle cerniere, in modo tale che la risposta globale del materiale sia completamente diversa dal comportamento locale dei suoi componenti. Tali differenze qualitative tra i componenti e il collettivo sono cruciali per un'ampia varietà di media eterogenei strutturati, come schiume, materiali fibrosi granulari e reti a molla casuale. Ad esempio, le reti di molle lineari collegate in modo lasco hanno una risposta elastica molto più piccola di quella prevista da un argomento dimensionale che stima il modulo elastico dalla costante elastica e dalla lunghezza caratteristica. In particolare, la risposta elastica si annulla a un valore critico ma limitato della connettività, per cui la rete è fortemente non affine. Questa dipendenza delle proprietà elastiche alla rinfusa sulla geometria della rete consente la progettazione di geometrie che risultano in proprietà elastiche specifiche. Imitando la geometria degli imballaggi di particelle inceppati, è possibile ottenere reti con un rapporto modulo di perdita da taglio a massa, mentre
la potatura a molla mirata è stata utilizzata per realizzare reti di molle casuali ausiliarie con un rapporto di modulo di taglio shear-to-bulk divergente. In tutti i casi, sottili cambiamenti nella geometria delle reti disordinate portano a deformazioni qualitativamente differenti e proprietà elastiche, che illustrano che la relazione tra l'architettura e le proprietà collettive è ricca e complessa.

Materiali Auxetici
L'applicazione di un allungamento uniassiale provoca solitamente una contrazione laterale (ad esempio, un elastico allungato diventa più sottile nella direzione trasversale); quindi, in questo caso, il rapporto tra deformazione trasversale e assiale, che si

definisce come rapporto di Poisson, ν, è positivo. Per materiali sfusi incomprimibili, come la gomma, ν è circa ½, ma se un foglio sottile di gomma viene modellato con una disposizione casuale di fori, il valore effettivo di ν si avvicina a zero: anche se i singoli filamenti di gomma diventano più sottili, l'insieme complessivo di materiale gommoso e vuoti, non diminuisce il suo spessore. Questo è il modo in cui i solidi cellulari casuali (random cellular solids), come il sughero, raggiungono rapporti Poisson quasi nulli, il che rende il sughero un materiale pratico per sigillare le bottiglie di vino, poiché il tappo non si espande lateralmente quando viene inserito nella bottiglia mediante forze di compressione. È anche possibile progettare modelli, come il modello esagonale invertito (inverted Hexagon pattern), che risultano in metamateriali auxetici, cioè materiali con un rapporto di Poisson negativo, anche se il materiale costituente, la gomma, ha un rapporto di Poisson positivo. Le conclusioni che Bertoldi offre, attraverso gli esempi riportati e quelli sperimentali rappresentati nelle figure indicate, sostengono la teoria per cui determinate architetture, progettate in modo appropriato, possono spingere le proprietà dei metamateriali oltre quelle dei loro costituenti.

Metamateriali "Extremal"
Si tratta di metamateriali progettati per resistere a una particolare modalità di deformazione e sono detti metamateriali estremi. I reticoli a perno snodato ed i reticoli a nido d'ape invertito sono esempi di materiali extremal 2D (visualizzazione sul piano). Il pannello b della figura mostra la cella unitaria teorica e la realizzazione sperimentale di un metamateriale estremale 3D che resiste alla compressione isotropica ma è molto morbido contro il taglio; nel limite di punte di piccole dimensioni, che si avvicinano all'estremità delle cerniere ideali, il rapporto tra il modulo da taglio a massa si avvicina a zero e la risposta del materiale diventa simile a quella di un fluido.

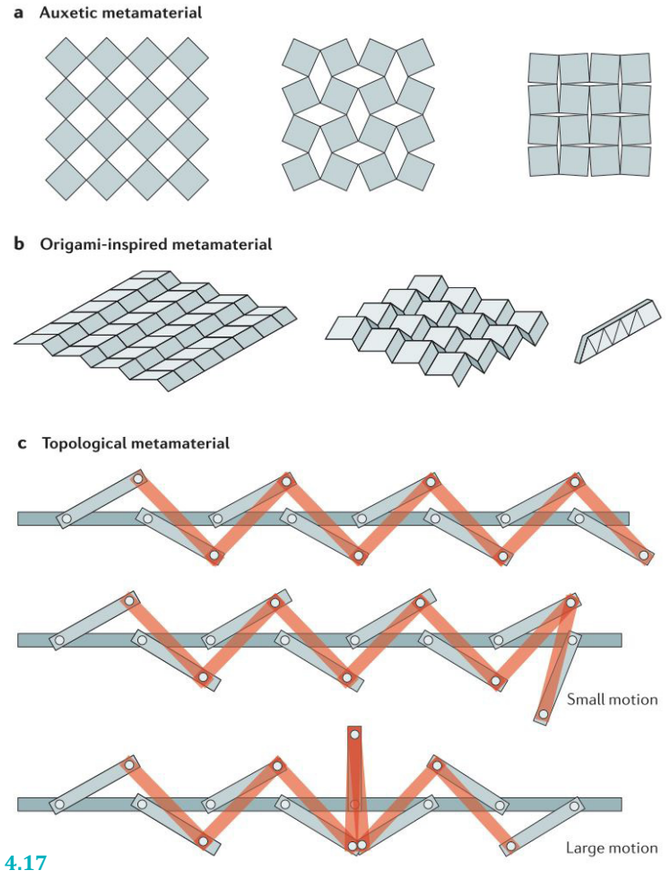


4.16

Fig 4.16 **a**. materiali auxetici con indici differenti di Poisson;Nel primo caso, abbiamo un materiale con indice di Poisson positivo; nel secondo, vicino allo zero; nel terzo, negativo.
b. materiali extremal, nello specifico, un *pentamode material* (metafluido) in cui l'inidice di Poisson è di 0.5

Metamateriali basati su meccanismi
I meccanismi sono raccolte di elementi rigidi collegati da cerniere flessibili, caratterizzate da un design geometrico, che consente un movimento a energia zero. La designabilità di movimenti arbitrariamente complessi mediante un'attenta scelta della geometria degli elementi collegati, rende i meccanismi elemento cruciale per una vasta gamma di strutture ingegneristiche (come leve, pulegge, leveraggi e ingranaggi), nonché un obiettivo popolare per l'arte che trasforma la forma. Ugualmente, i meccanismi sono alla base di un'ampia gamma di metamateriali meccanici. Ad esempio, una serie di quadrati collegati tra loro tramite i vertici, formano una struttura auxetica, in quanto sono in grado di

sostenere un movimento a incastro libero (free-hinging motion) che fa sì che la struttura si contragga o espanda in modo uniforme. (Figura di seguito)



4.17

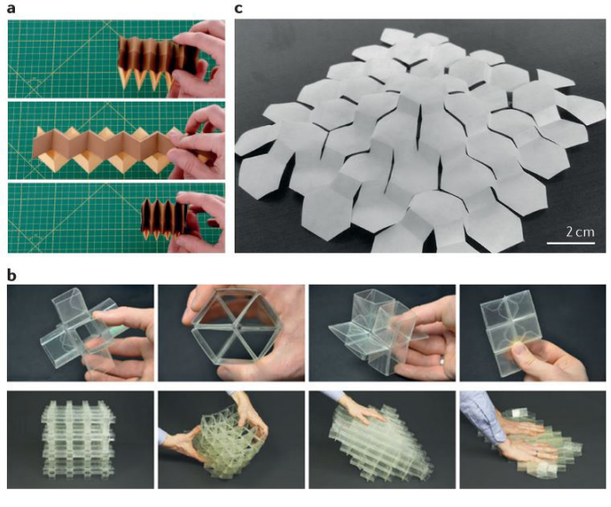
Fig 4.17
. a | Una collezione di quadrati collegati alle loro punte può subire una trasformazione della forma che cambia il volume; quindi, costituisce un meccanismo auxetico
. b | Lastre rigide collegate da cerniere flessibili sono la base dei metamateriali di origami. Il modello Miura-ori qui mostrato è un meccanismo origami rigido pieghevole con un solo grado di libertà
. c | Le barre rigide collegate in modo flessibile formano un meccanismo topologicamente polarizzato. Un piccolo movimento della prima barra a destra rimane localizzato vicino al bordo destro, mentre un movimento più ampio avvia un muro di dominio che si propaga a sinistra. Al contrario, la barra più a sinistra non può essere spostata; quindi, la propagazione a destra non è possibile]

Questa tipologia di design della materia, ha ispirato una gamma estesa di metamateriali che Bertoldi classifica come “Soft Metamaterials” (morbidi). Di seguito si riportano alcuni dei casi al momento studiati dal team di Harvard, con relative peculiarità e

dimostrazioni di possibili applicazioni:

- Lastre collegate da cerniere flessibili formano origami metamateriali. La cosiddetta struttura Miura-ori, originariamente progettata per ottenere pannelli solari apribili per applicazioni nello spazio, costituisce il punto di partenza per una gamma di metamateriali con potenzialmente ancora maggiore grado di complessità e programmabilità.
- Meccanismo asimmetrico costituito da barre collegate che consentono movimenti propagatori dal bordo destro al bordo sinistro, ma non viceversa; questo è un primo esempio di un metamateriale meccanico topologico

Metamateriali basati su origami.
Metamateriali basati su origami. I modelli e le forme esteticamente piacevoli abilitati dagli origami (dalle parole giapponesi "ori", che significa "piegare" e "kami", che significa "carta") e kirigami (da "kiru", "tagliare", e 'kami', "Carta") sono stati a lungo ammirati e le geometrie ispirate agli origami sono state utilizzate per ottenere strutture dispiegabili, stent medici flessibili e dispositivi elettronici flessibili. L’ Origami fornisce inoltre una potente piattaforma per la progettazione di metamateriali basati su meccanismi, a partire da fogli 2D con modelli di pieghe predefiniti, come la struttura Miura-ori e le sue varianti, twist di base quadrata e rivestimenti a pieghe.



4.18

Fig 4.18
Immagini di metamateriali ispirati ad origami riprodotto sotto concessione del National Academy of Sciences e Macmillan Publishers Limited da Bertoldi ed il suo team di ricerca. L'immagine a) rappresenta un origami ad un solo movimento flessibile attraverso il quale può essere deformato e risulta molto rigido alla deformazione. b) un origami modulare, un metamateriale meccanico altamente flessibile con una microstruttura cubica, può essere piegato in orizzontale. c) combinazione di origami e kirigami, utilizza cioè tagli e pieghe, utile perla costruzione di volumi 3D.

Questi "meta-fogli" possono servire come metamateriali ausiliari o essere facilmente modificati per piegarsi in forme arbitrarie. Poiché i meccanismi basati su origami spesso presentano più movimenti di piegatura discreti, con un solo grado di libertà continuo, consentono la progettazione di metamateriali "multiformi". Inoltre, lo studio degli equilibri tra tra le energie investite nei movimenti di flessione e le cerniere, consente la progettazione di materiali multi-stabili e programmabili. Infine, i metamateriali cellulari completamente 3D possono essere progettati sommando, uno sopra l'altro, strati piegati , assemblandoli in tubi, oppure traendo ispirazione dalla *snapology*, una tecnica di origami modulare.

Kirigami

I metamateriali ispirati ai Kirigami giapponesi, sono realizzati producendo dei tagli in fogli sottili di un materiale[60]. Ciò consente il controllo delle proprietà elastiche del materiale e il raggiungimento di deformazioni e cambi di forma anche molto estesi. Il principio di progettazione del kirigami è stato sfruttato per trasformare lastre di grafene a uno spessore atomico in strutture resilienti e mobili per ingegnerizzare l'elasticità in nanocompositi rigidi (quasi rigidi) senza compromettere la loro conduttanza elettrica e progettare batterie agli ioni di litio estensibili e reticoli di diffrazione con periodicità sintonizzabile. Inoltre, i fogli con motivo kirigami mostrano deformazioni fuori piano, che forniscono un percorso per formare complesse mesostrutture 3D[61].
Infine, combinando origami e kirigami, lo spazio di progettazione può essere notevolmente ampliato e le superfici complesse possono essere realizzate.
E' possibile osserva un esempio di kirigami nel panel c) nella Fig 4.18.

Metamateriali basati su soft-mechanisms.

Il design geometrico dei meccanismi può anche essere utilizzato per creare metamateriali basati su meccanismi morbidi che hanno parti snelle e flessibili come cerniere, collegando elementi più rigidi che possono facilmente ruotare. Le deformazioni a bassa energia di questi metamateriali nascondono da vicino il movimento libero del meccanismo sottostante. Le forze esterne eccitano facilmente questi modi morbidi, che generalmente hanno una struttura spaziale specifica, molto diversa dalle deformazioni lisce dei normali supporti elastici. Ciò consente la progettazione di metamateriali morbidi sottoposti a spostamento di forma programmabile, che vanno dai materiali ausiliari 2D e 3D alle sfere di morphing delle dimensioni che possono essere utilizzate come sistemi di incapsulamento reversibili.
Inoltre, utilizzando tecniche combinatorie per connettere celle di unità diverse, è stato recentemente dimostrato che metamateriali meccanici aperiodici che mostrano precisamente cambiamenti di forma pre-programmabili possono essere progettati razionalmente. In tutti questi esempi, come detto, le cerniere sono travi sottili; come discusso nella prossima sezione, questo può essere sfruttato per produrre fenomeni di instabilità collettiva non lineari sotto compressione.

Metamateriali basati su instabilità.

I materiali altamente porosi costituiti da reti di fasci sono onnipresenti in natura e in strutture e dispositivi sintetici. La loro funzionalità dipende sia dal meccanismo di deformazione dei legamenti, e sulla loro geometria microscopica. Nei materiali porosi elastoplastici disordinati, l'instabilità dei legamenti a forma di raggio provoca deformazioni irreversibili sotto forma di bande di collassamento che forniscono un efficiente meccanismo di assorbimento dell'energia. In metamateriali composti da serie regolari di fasci elastici, l'instabilità può innescare trasformazioni importanti, omogenee e reversibili del modello. L'esempio più semplice di un metamateriale di questo tipo è basato su una serie quadrata di fori circolari incorporati in un foglio elastomerico, che può essere visto come una matrice di domini rigidi collegati da raggi. Quando la struttura viene compressa uniassialmente, l'instabilità dei legamenti a forma di raggio provoca un'improvvisa trasformazione dei fori in uno schema periodico di ellissi alternate e reciprocamente ortogonali (Fig 4.19).
Pertanto, questo metamateriale, combina le proprietà di trasformazione della forma del meccanismo sottostante dei quadrati incernierati con la funzionalità meccanica degli elementi del fascio che collegano questi elementi quadrati. Per i materiali elastici, la riorganizzazione geometrica innescata dall'instabilità è sia reversibile che ripetibile. Inoltre, si verifica su una gamma ristretta di carichi applicati, il che rende promettente la creazione di materiali con proprietà che possono cambiare in modo improvviso ma controllato. Questa instabilità parallela e cooperativa, che porta a una prevedibile trasformazione tra diverse microstrutture,

60. http://www.origami-instructions.com/kirigami.html
61. Xu, L. et al. (2016) Kirigami nanocomposites as wide-angle diffraction gratings. *ACS Nano* 10, 6156–6162.
Rafsanjani, A. & Bertoldi, K. (2017) Buckling-induced kirigami. *Phys. Rev. Lett. 118*, 084301.
Lamoureux, A. et al. (2015) Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking. *Nat. Commun. 6*, 8092.
Eidini, M. & Paulino, G. H. (2015) Unraveling metamaterial properties in zigzag-base folded sheets. *Sci. Adv. 1*, e1500224.
Sussman, D. et al. Algorithmic lattice kirigami: a route to pluripotent materials. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 112,

è strumentale per la progettazione di materiali con proprietà sintonizzabili, inclusi sistemi con un rapporto Poisson negativo regolabile e un rapporto di rigonfiamento negativo efficace, fononico e interruttori fotonici e display a colori, e sistemi con chiralità commutabile. Rompendo la simmetria del modello indeformato, cioè sostituendo i fori circolari con i fori ellittici, la nitida trasformazione della deformazione si estingue, portando a una non linearità sintonizzabile della legge costitutiva efficace, che è stata sfruttata per controllare il comportamento di instabilità dei metabear (che sono fasci fatti di un meta materiale meccanico). In tutti questi esempi, le strutture recuperano la loro forma iniziale quando vengono scaricate.

Instabilità Snapping-based

I raggi elastici possono anche incastrarsi tra due diverse configurazioni stabili, mantenendo la loro forma deformata dopo lo scarico. Poiché i fasci elastici bistabili possono bloccare la maggior parte dell'energia fornita al sistema durante il caricamento, sono stati recentemente utilizzati per creare metamateriali che intrappolano energia completamente elastica e riutilizzabile. Inoltre, la capacità dei fasci bistabili di rilasciare energia elastica immagazzinata è stata sfruttata per superare gli effetti dissipativi e dispersivi per consentire la propagazione di segnali meccanici di maggior ampiezza in sistemi morbidi costituiti da materiali dissipativi. Infine, mentre la maggior parte delle

I metamateriali basati su ty funzionano solo sotto carichi compressivi; un metamateriale meccanico composto da una disposizione periodica di unità di aggancio (costituito da due travi curve parallele che sono bloccate centralmente) subisce una grande estensione sotto tensione causata da instabilità sequenziali a scatto. Il materiale mostra anche un cambio di modello, da una forma ondulata a una configurazione a diamante

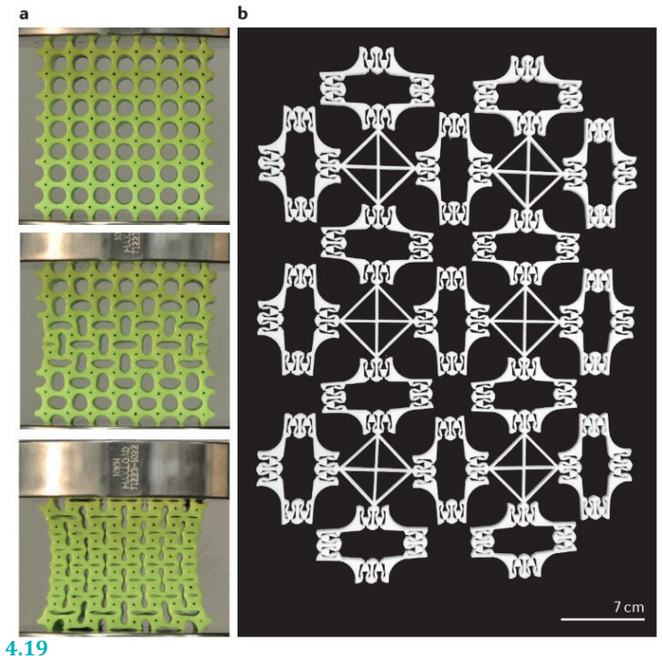


Fig. 4.19
(a)Una lastra di gomma modellata con fori circolari subisce una trasformazione reversibile del modello quando viene compressa a causa di un cedimento collettivo basato su una instabilità.
(b) Un metamateriale riconfigurabile, contenente unità di cerniere complesse che forniscono più gradi cinematici di libertà e multistabilità
(entrambi i due panel sono pubblicati con autorizzazione da K. Bertoldi.)

4.19

Metamateriali topologici

I metamateriali meccanici topologici mostrano proprietà topologicamente protette. Le proprietà dei metamateriali non topologici sono sensibili alle modifiche sia casuali che sistematiche nella loro micro struttura.

Al contrario, le proprietà topologicamente protette non sono influenzate da deformazioni della geometria sottostante.. Pertanto, i metamateriali topologici sembrano presentarsi alla Bertoldi come materiali con funzionalità robuste. Il concetto di protezione topologica è un segno distintivo della fisica moderna della materia condensata e ha un ruolo cruciale nei sistemi di Hall quantistici e isolanti topologici elettronici. Come le loro controparti nell'elettronica e nella fotonica, i sistemi meccanici topologici possono avere stati classici (come moti liberi, stati portanti o vibrazioni), la cui esistenza è direttamente collegata alla presenza di un indice topologico. Gli indici topologici sono in genere quantità con valori interi che non possono essere modificati

da continue deformazioni della struttura sottostante. Un semplice esempio è il genere di una superficie, che indica il numero di fori nella superficie; dal punto di vista della topologia, una ciambella e una tazza di tè sono equivalenti, perché le due forme possono essere deformate senza difficoltà l'una nell'altra senza introdurre tagli. Nei metamateriali topologici, gli indici topologici non caratterizzano le strutture stesse, ma piuttosto le loro eccitazioni, come ad esempio le onde elastiche.

I metamateriali topologici più semplici sono meccanismi che mostrano una particolare rottura della simmetria di inversione. Un esempio è una struttura composta da una catena di rotori rigidi collegati da travi rigide. Per comprendere le proprietà di questo collegamento (e di molte altre strutture meccaniche), è utile vederle come reti composte da siti NS (come masse puntuali) collegate da obbligazioni di forza centrali Nb (come molle o travi rigide). In d dimensioni, il numero di gradi di libertà è dato da dNS, e il numero totale di vincoli è semplicemente Nb. Il numero di modi a energia nm nm, che sono deformazioni morbide che nell'ordine più basso non hanno energia, viene quindi dato dal criterio di Maxwell:

dNS - Nb = nm - nSS,

dove nSS denota il numero di vincoli ridondanti o, equivalentemente, il numero di stati di auto-stress, che sono tensioni o compressioni applicate ai legami che non determinano forze nette sui nodi.

La rottura della simmetria sinistra-destra della cella unitaria può indurre la polarizzazione topologica. In parole povere, poiché un materiale polarizzato elettricamente può ospitare cariche localizzate a confini opposti, un materiale topologicamente polarizzato può avere zero modi o stati di auto stress ai suoi bordi. Ad esempio, in una catena topologica composta da barre rigide e molle, l'orientamento e la lunghezza delle barre determina l'estensione delle molle. Supponendo che le molle non siano né tese né compresse, esiste una deformazione a energia netta che soddisfa l'equilibrio dell'equazione del vincolo linearizzato, dove è lo spostamento orizzontale dell'ennesimo nodo che collega barre e molle adiacenti, e *a* e *b* sono parametri strutturali caratteristici della geometria della cella unitaria.[...]

In questo esempio, non ci sono vincoli ridondanti.

In assenza di limiti (ad esempio, su un anello chiuso), questo sistema ha tanti gradi di libertà (gli angoli dei rotori) come vincoli (il numero di raggi) e nessuna modalità zero. Tuttavia, per una catena finita (ottenuta tagliando l'anello), manca un vincolo e appare una modalità di energia zero nel sistema; non esiste una forza di ripristino lineare che arresti questo movimento.

Il criterio di Maxwell non prescrive dove si trovi questa modalità zero, ma un calcolo più dettagliato, usando la matrice dinamica, rivela che la modalità di autovalutazione a energia zero è localizzata sul bordo verso il quale si orientano i rotori

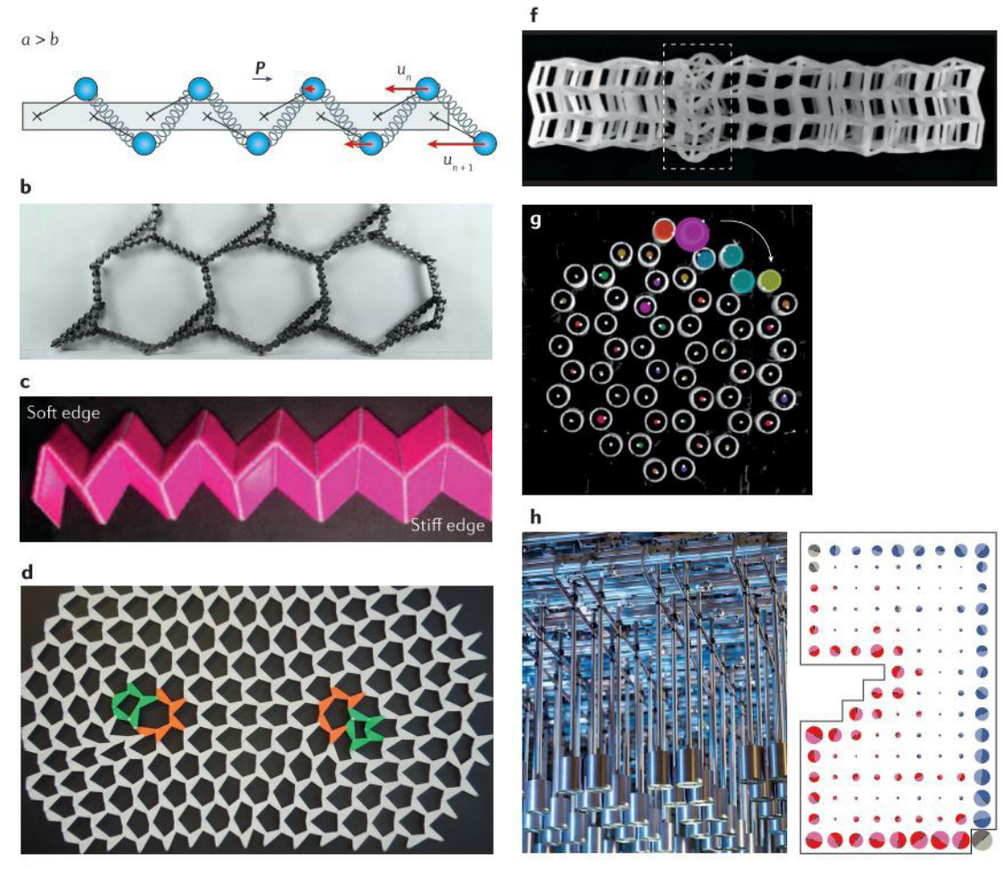
Questa modalità zero richiede un sistema con bordi, ma la sua posizione riflette la rottura della simmetria di inversione della cella unitaria, che è una proprietà bulk collegata a un indice topologico nello spettro vibrazionale. Bertoldi riporta quindi che, curiosamente, queste modalità di energia zero localizzate possono essere spostate ovunque nel sistema sfruttando le pareti del dominio non lineare che riconfigurano la struttura senza allungare nessuno dei raggi. Le deformazioni omogenee della rete lasciano invariato il lato sinistro dell'equazione; questo significa che dopo una deformazione così liscia, la differenza tra il numero di modalità zero e gli stati di auto-stress rimane invariata, anche se nm e nSS cambiano. La condizione dNS- Nb = 0 può essere vista come una condizione di neutralità della carica, con i ruoli di carica positiva e negativa giocati dalle modalità zero e stati di auto stress. Il punto cruciale è che l'esistenza della modalità zero è protetta topologicamente, cioè persiste per una vasta gamma di deformazioni strutturali lisce, come piccole variazioni nella lunghezza del raggio.

Nel seguito, focalizziamo la nostra attenzione su strutture meccaniche periodiche che sono "a carica neutra" ma polarizzate meccanicamente, in modo che le modalità di bordo possano apparire al confine del campione come cariche in un mezzo polarizzato elettricamente.

Questa polarizzazione meccanica è definita in termini di invarianti topologici della struttura di massa. Proprio come la legge di Gauss produce la carica elettrica netta racchiusa in una regione dal flusso della polarizzazione elettrica attraverso il suo confine, la differenza tra il numero di modalità zero topologiche (le modalità che si presentano senza aggiungere o rimuovere legami ovunque nella struttura) meno il numero di stati topologici di auto-stress in una porzione arbitraria di un reticolo isostatico è dato dal flusso della polarizzazione topologica attraverso il suo confine. Pertanto, le pareti di dominio tra regioni di polarizzazione diversa possono localizzare zero modalità o stati di auto-stress all'interno

di un materiale e ai suoi bordi. Questi principi sono stati usati per creare metamateriali topologici stabili con bordi protetti e stati bulk, per sviluppare origami topologici che si piegano più facilmente da un lato, per chiarire come le dislocazioni possono localizzare modalità zero topologiche e stati di auto stress per produrre metamateriali trasformabili che può commutare la loro polarizzazione topologica, generare metamateriali meccanici non reciproci analoghi ai diodi acustici e dimostrare il controllo topologico dell'inarcamento attraverso stati di auto-stress nei materiali cellulari 3D. L'ultimo esempio mostra che gli stati di auto-stress sono legati alla propensione della struttura a rispondere localmente alla messa a fuoco dello stress con guasti meccanici, allo stesso modo in cui le modalità zero possono essere messe in moto se attivate dall'esterno.
in figura 4.20 sono riportati una serie di esempi di Metamateriali topologici:
Prototipi di metamateriali meccanici topologici. a | Una catena topologica composta da barre rigide e materiale
molle. A seconda dei parametri del sistema, a e b, una modalità floppy è localizzata a destra o sul lato sinistro della catena. La polarizzazione topologica P è indicata così come gli spostamenti une un + 1 (frecce rosse).
b | Ingranaggio montato su maglie solide, collegato attraverso giunti e disposto in un reticolo per formare un metamateriale topologico innestato
c | Origami topologici
d | Modalità zero localizzata e corrispondente stato di auto-stress localizzato sulla destra
e | Dettaglio di un metamateriale che può cambiare la sua polarizzazione topologica
f | Stato topologico di auto-stress localizzato su una parete di dominio; sotto compressione, lo stress si concentra portando a un buckling selettivo
g | Metamateriale giroscopico che supporta gli stati del bordo chirale topologicamente protetti - i falsi colori rappresentano la fase di un'istantanea di un'onda di bordo chirale
h | Un sistema di accoppiamenti adeguati pendoli (a sinistra) fornisce un analogo meccanico dell'effetto Hall di spin quantico e ospita guide d'onda acustiche topologicamente protette sul suo bordo (a destra); i cerchi blu e rossi rappresentano la polarizzazione delle onde di bordo chirali

Il pannello c è adattato da Bertoldi con il permesso di American Physical Society, Macmillan Publishers Limited. e ETH Zürich



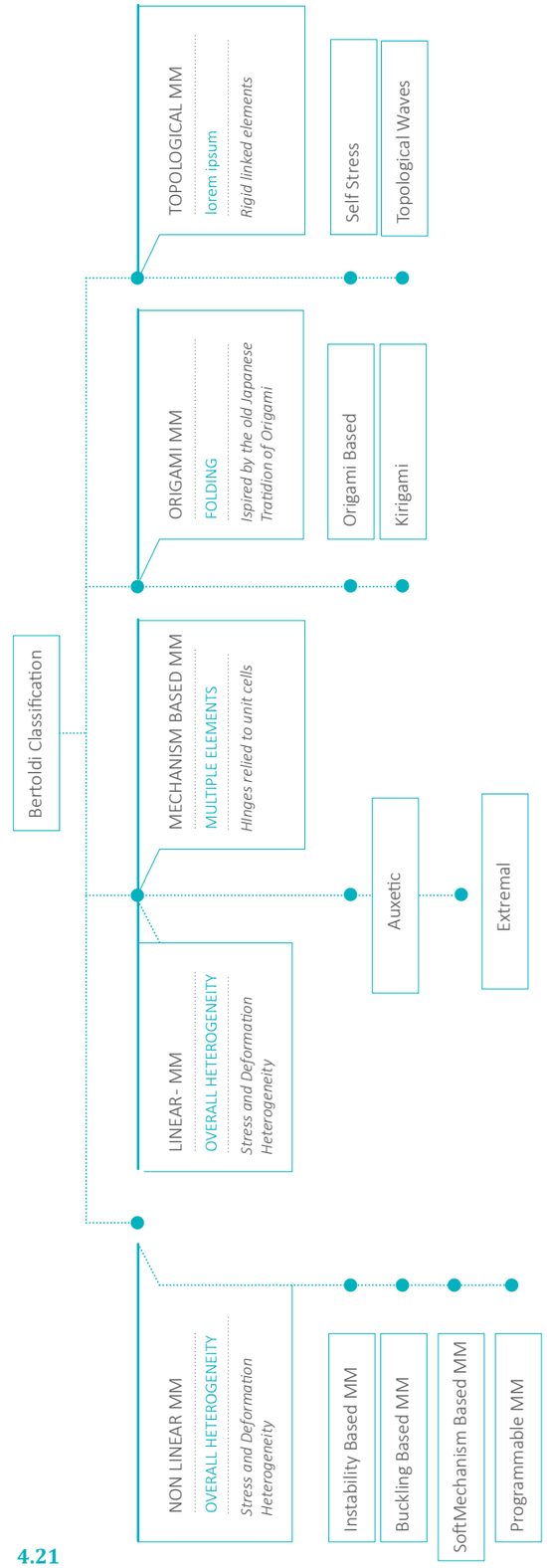
4.20

Fig. 4.20
Insieme di esempi ricavati da Bertoldi per meamateriali meccanici topologici

Sintesi della classificazione proposta da Bertoldi

Il criterio di classificazione applicato da Bertoldi nella pubblicazione, si configura a partire dal material design (cfr. cap. 5.1), quindi applica un suddivisione per riproducibilità del metamateriale. A seconda della tecnologia utilizzata per riprodurre un certo metamateriale, distingue per categorie.

Di seguito, uno schema riassuntivo del sistema di classificazione da lei proposto.



4.21

Fig. 4.21
Sintesi schematica della classificazione proposta da Bertoldi

Introduzione ed informazioni relative all'autrice
Yu è una ricercatrice in Mechanical/material, con un'esperienza radicata nei temi relativi a: metal processing, oxidation , green tribology, surface science e metamaterials. La sua ricerca si sta Attualmente concentrando sul tema dei mechanical metamaterials. E' ricercatrice presso la School of Materials Science and Engineering Tsinghua University, China

Classificazione Yu

Il documento riporta in prima battuta una serie di considerazioni generali sui metamateriali ed i metamateriali meccanici. Il ricercatore sostiene, infatti, che i metamateriali meccanici si riferiscono a un gruppo di strutture artificiali con alcune proprietà meccaniche insolite, derivanti dalla geometria delle loro subunità piuttosto che dalla composizione del materiale afferma che appartengono alla famiglia dei metamateriali Anche secondo la sua testimonianza, il concetto di metamateriale si è diffuso a partire dall'elettromagnetismo e dall'acustica, per estendersi alla meccanica. Sebbene le strutture composte non siano completamente nuove nel campo della meccanica, i metodi per la progettazione tridimensionale di queste microstrutture ingegnerizzate stanno appena emergendo, in particolare per quanto riguarda le proprietà macroscopiche anomale.
Come anche per i due precedenti riferimenti, l'autore dichiara che, tipicamente, questi metamateriali meccanici presentano una varietà di proprietà meccaniche significativamente migliorate, come rapporti di Poisson zero o negativi, modulo di taglio di fuga, rigidità negativa, compressibilità negativa, comportamento singolarmente non lineare e microstrutture topologiche personalizzate, che li distinguono dai materiali naturali convenzionali. Yu prevede che queste qualità forniscano supporto meccanico e diverse funzioni protettive in una varietà di potenziali applicazioni industriali, biomediche e di bioingegneria, come gli scaffold di ingegneria dei tessuti. Tuttavia, la comprensione e l'identificazione delle caratteristiche chiave di questi vari metamateriali meccanici - egli enuncia - è un prerequisito per la loro realizzazione attraverso i principi di progettazione e l'ingegneria strutturale. L'autore procede quindi con una classificazione strutturale che descrive i tipi di metamateriali meccanici.
La Fig. 4.21 fornisce un diagramma schematico, ma dettagliato, dei metamateriali meccanici secondo l'interpretazione di Yu. L'ordine è stabilito seguendo le costanti elastiche di base, secondo la tesi sostenuta per cui le varie strutture dei metamateriali meccanici sono spesso discusse in termini di modulo effettivo e rapporto di Poisson. Il ragionamento effettuato, si fonda sulla correlazione che intercorre tra le tre costanti elastiche, cioè il modulo di Young, il modulo di taglio, il modulo di massa e un parametro adimensionale, ed il rapporto di Poisson, ed associa a ciascuna delle tre costanti, una delle proprietà del materiale elastico. Rispettivamente: la durezza, la rigidità e la comprimibilità di un materiale.
Secondo questo punto di vista, i metamateriali meccanici possono essere divisi in tre gruppi generali in base alle loro costanti elastiche, anziché basarsi su una composizione di leghe metalliche, ceramiche o polimeri, come invece accade nella suddivisione proposta da Zadpoor, nella sezione Ultra-property metamaterials (cfr. cap 4 prgf G), in cui fa riferimento ad una suddivisione basata sulle qualità materiche proposte dal diagramma di Ashby .

Sintesi della classificazione proposta da Yu
Il criterio di suddivisione applicato da Yu fa riferimento ai coefficienti relativi rispettivamente a Modulo elastico, modulo di taglio e coefficiente di Poisson. Di fatto questo genere di classificazione si basa prettamente sulle caratteristiche matematiche e fisiche del metamateriale, deducendo di conseguenza le configurazioni,

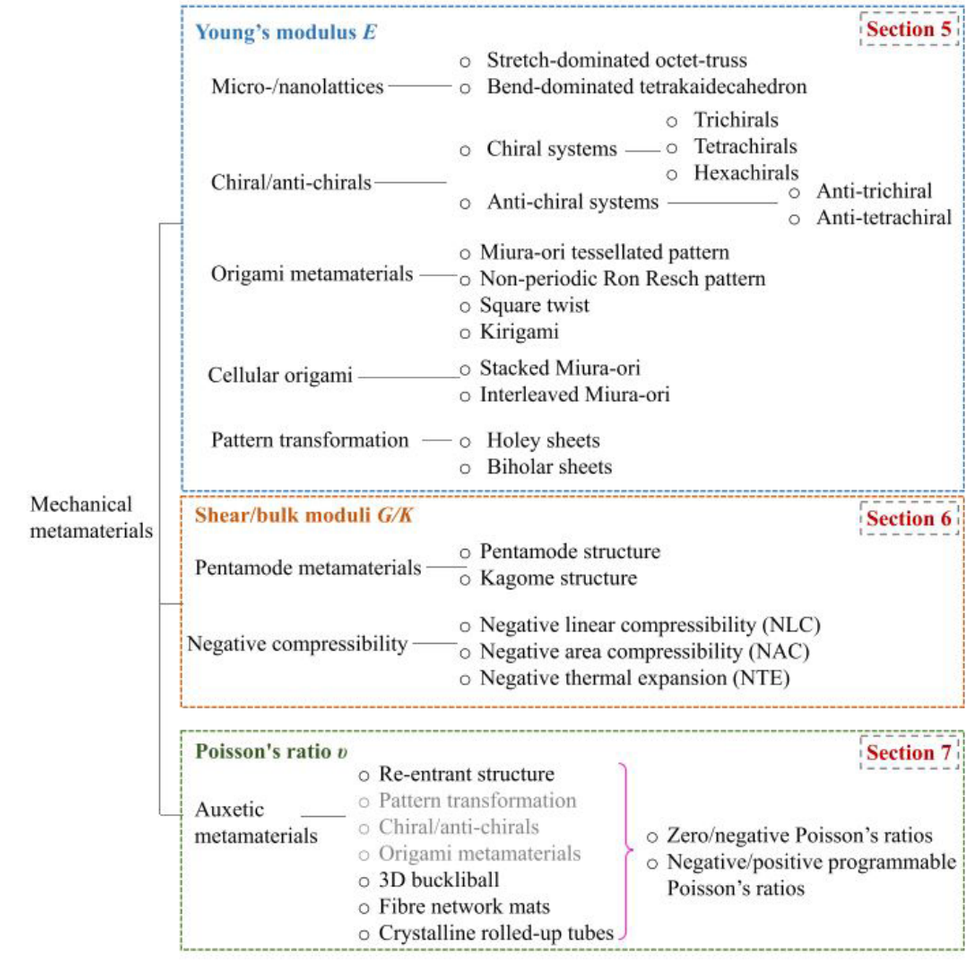
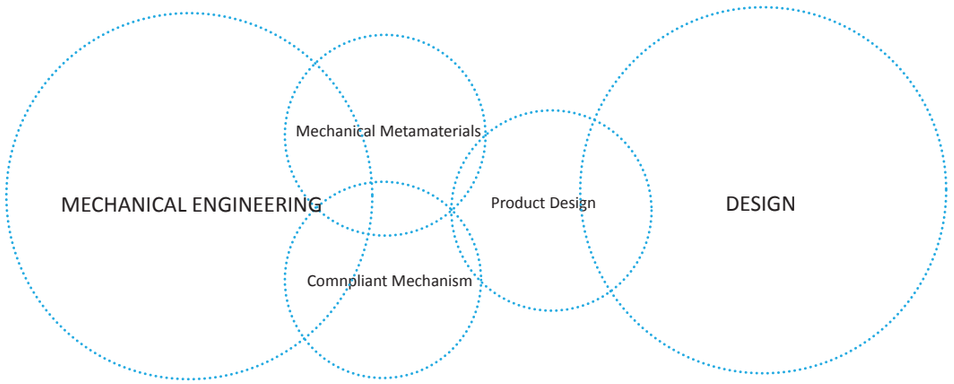


Fig. 4.22
Sintesi schematica della classificazione proposta da Yu

Fig 4.23 Schematizzazione delle intersezioni presupposte, tra gli ambiti disciplinari dell'ingegneria meccanica e del design del prodotto. L'indagine ha lo scopo di mettere in evidenza i legami tra: (i) *compliant mechanism* e *mechanical metamaterial* e (ii) questi due sottoinsieme ed il *product design*

Mechanical Metamaterials e Compliant Mechanisms

In generale, i meccanismi sono dispositivi meccanici che vengono utilizzati per trasmettere o convertire movimenti o forze da un luogo a un altro. Esistono diversi tipi di meccanismi che impiegano diversi metodi per trasmettere queste forze o movimenti. Gli esempi includono ingranaggi, camme, leve, cricchetti, ecc[62].
Come la stessa nomenclatura suggerisce, e come messo in luce sinora, i metamateriali meccanici sono riconducibili alle dinamiche afferenti la dimensione della meccanica.
Tuttavia, l'universo fisico che regola i comportamenti meccanici dei materiali è estremamente vasto. Alexandra Ion ed il suo team (cfr. rif. capitolo 6.2), nella pubblicazione *Mechanical metamaterials*, scrive:*«Our work builds on deformable struts that transfer forces. Similar mechanical structures have been examined in the context of compliant mechanisms, i.e., monolithic structures that transfer motion, force and energy without traditional hinges, but using flexure hinges (thin regions that are bendable and allow for rotation)»*, mettendo in luce una tipologia particolare di meccanismi, che meglio si adatta a descrivere i fenomeni e l'ecosistema risultante, legato ai comportamenti messi in atto dai metamateriali meccanici da loro sperimentati. Si tratta dei compliant mechanism. Per affinità di interesse, questa ricerca riporta le principali informazioni relative a tale categoria, con l'obiettivo di contestualizzare e verificare la validità della metodologia applicativa in questa sede presentata e le relazioni tra mechanical metamaterials, compliant mechanism e progettazione di prodotto (Fig 4.23). (cfr. cap. 7.3).



Compliant mechanisms[63]
I compliant mechanism sono diversi da tutti gli altri meccanismi, per un aspetto fondamentale: si presume che i meccanismi tipici siano rigidi o che usino parti rigide collegate a giunti mobili[64].
Come suggerisce il nome, i compliant mechanism (in italiano "meccanismi conformi") non sono rigidi, ma flessibili, il che è una ragione significativa della loro utilità come meccanismi fruibili.
Come per i meccanismi rigidi, anche i compliant mechanism trasferiscono o trasformano il movimento, la forza o l'energia. Diversamente dai meccanismi rigidi però i compliant ottengono buona parte della loro mobilità dalla deflessione di elementi flessibili piuttosto che da giunti mobili. Possono essere descritte come strutture monolitiche che trasferiscono movimento, forza ed energia senza cardini tradizionali, ma utilizzando cerniere flessibili (regioni sottili che sono pieghevoli e consentono la rotazione). Da notare che se l'intero device fosse rigido, non potrebbe essere considerato un meccanismo, ma sarebbe semplicemente una struttura.

Compliant mechanism, quali i vantaggi rispetto a meccanismi tradizionali:

- Meno parti

Poiché i meccanismi conformi sono in genere monolitici e non comportano l'accoppiamento di più parti, la necessità di parti viene drasticamente ridotta. Nei compliant, l'intero assieme costituisce il device, mentre i meccanismi tradizionali sono genericamente interessati da un assemblaggio delle parti. Pertanto, è possibile ottenere virtualmente gli stessi movimenti possibili con meccanismi rigidi ma con una riduzione drastica del numero di elementi coinvolti

- Risparmio sui costi materiali e di produzione

Meccanismi conformi possono essere realizzati mediante tecniche di stampaggio a iniezione e di solito vengono fuori come un unico pezzo. Recenti avanzamenti legati alle tecnologie dell'additive manufacturing hanno incrementato la possibilità di produrre in monoblocco questa tipologia di meccanismi. Questa riduzione delle parti riduce i costi attribuiti al materiale e al tempo utilizzati

62. fonti tratte dal portale Creative mechanism, di Tony Rogers (2014) https://www.creativemechanisms.com/blog/compliant-mechanisms.-part-1
63. Lobontiu, M., Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges
64. Howell, L., L., (2001), Compliant Mechanisms, John Wiley & Sons

per fabbricare e assemblare le parti. (Zadpoor, 2014, Ion, 2016 et al.)

- Eliminazione di attrito

Il fatto che i meccanismi conformi facciano uso di una parte, contro due o tre parti sfregandosi l'una contro l'altra significa che c'è una grande riduzione dell'attrito. Ciò si traduce in una minore usura del meccanismo e una minore necessità di lubrificazione. Nei casi in cui il meccanismo è difficile da raggiungere e quindi difficile da riparare, questa caratteristica è inestimabile, in quanto la necessità di manutenzione sarà molto bassa.

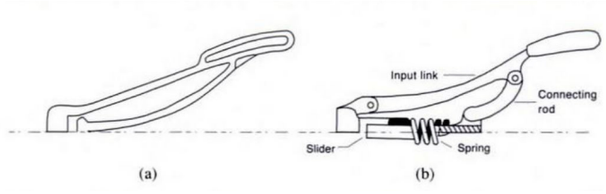
- Più precisione, meno errori

Imaginando di definire un obiettivo, si tracci un percorso a punti: è noto che, di più passaggi si dispone, più opportunità esiste di aumentare i gradi di complessità del sistema. Lo stesso principio, applicato ai meccanismi conformi, indica che la riduzione delle parti equivale a ridurre la complessità, e di conseguenza l'inefficienza e l'imprecisione, del device.
Nella figura 4.24, è riportato un esempio tratto dal testo Compliant Mechanism (Howell, L.L., 2001;2013)[65] che mette in evidenza la distinzione tra un compliant mechanism e un normale meccanismo: come si evince a colpo d'occhio, la differenza sostanziale tra le due tipologie di meccanismo risiede nel numero e nella qualità materica di elementi assemblati.

65. L. L. Howell, S. P. Magleby, B. M. Olsen (2013) Handbook of Compliant Mechanisms,*Technology & Engineering*

Fig 4.24 (a) Compliant mechanism, (b) Traditional mechanism
Fig 4.25 *Compliers*, esempio di prodotto di compliant pliers, una pinza da pesca, per rimuovere gli ami. Oggetto in produzione dagli anni 90

4.25



4.24

A partire da questa considerazione quindi, è possibile sostenere che i compliant mechanism, nella misura in cui si comportano come meccanismi a tutti gli effetti, pur presentandosi sotto la forma di un monoblocco, si distinguono come una sorta di unità continua ed omogenea con determinate caratteristiche programmate. In confronto con la definizione di metamateriale meccanico riportata nel capitolo dedicato (cfr. cap. 8), è possibile dedurre le affinità caratteriali tra metamateriali meccanici e compliant mechanism. Ciò che differisce è la scala alla quale sono presi in considerazione: i compliant mechanism, infatti, sono progettati in scala 1:1 mentre i mechanical metamaterials sono trattati genericamente a scala nano e micro metrica

4.4 Tavola Periodica

Come si evince dai riferimenti riportati nel corso del capitolo, esistono svariate interpretazioni in merito alla definizione di alcune tipologie di metamateriali meccanici, che determinano sistemi di classificazione organizzati in maniera differente l'uno dall'altro. In questo capitolo si fa un'operazione di selezione di tali fonti e si presenta una rielaborazione sotto la forma di un'illustrazione grafica a schema (Fig 4.26).

La Tavola si presenta organizzata a blocchi, ogni blocco è rappresentato da una sigla che distingue una specifica categoria o sottocategoria di metamateriale. I blocchi a sfondo bianco (Y, SB, P) costituiscono il nodo centrale per la distribuzione delle macro categorie, illustrate dalle iniziali maiuscole con sfondo verdeacqua(in legenda esposte ai punti 4,5,6).
Si è, infatti, deciso di strutturare la tavola partendo dal terzo riferimento, Yu, che utilizza il criterio di suddivisione per leggi che governano i comportamenti dei metamateriali. Analizzando quindi le macro categorie, la ripartizione si evidenzia tra Origami-based, che infatti dipendono principalmente dai valori del modulo di young, ed i metamateriali Extremali e Auxetici, che appartengono, come visto con Zadpoor e Bertoldi, alla stessa famiglia degli *-Mode* Metamaterials (*unimode, bimode, trimode, quadrimode* e *pentamode* MM), ma differiscono per il coefficiente di Poisson (a Poisson negativo corrisponde metamateriale auxetico, come ad esempio i *pentamode*).

Osservando quindi la sezione sulla destra della tavola, si intersecano invece i contenuti dei primi due sistemi di classificazione riportati (Zadpoor e Bertoldi) che sono incentrati sulle caratteristiche "architettoniche" dei metamateriali.
E' possibile riunire sotto un unico gruppo (n7) i *Negative metamaterials* esposti da Zadpoor e i *Non Linear* di Bertoldi, in quanto esprimono entrambe il concetto di Double Negative (cfr. cap. 3.2) e ugualmente, ma per opposizione i *Linear* (n8). Il riquadro di intersezione generato dai punti 7 e 8 definisce a sua volta due sotto categorie: i *Mechanism-based* (n 9) ed i *Programmable Metamaterials* (n 10). Infine, sull'estremo opposto agli *Origami,* si riportano due sotto categorie a sé stanti: Gli *Ultra* (*ultra-stiff, ultra-Strong, ltra-Though, ultra-Light*), ed i *Topological*, che si basano su un sistema di efficientamento dello spazio (cfr. cap 5.2).

4.26

Fig 4.26 Tavola Periodica elaborata sulle tre classificazioni riportate e sull'analisi dei *compliant mechanism*

Bibliografia e sitografia del capitolo

Bibliografia

Zadpoor, A. A. (2016) Mechanical Metamaterials, *Material Horizons*, 3, 371-381
Hamid, C., Hosseinzadeh R., Hosseinzadeh, H., (2018) Metamaterials in Medicine : A New Era for Future Orthopedics, *OPROJ*, volume4-issue2, pag 1
Gibson JL, Ashby FM (2001) Cellular solids: structure and properties. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
Ledbetter H, Reed RP. Elastic properties of metals and alloys, I. Iron, nickel, and iron-nickel alloys (1973) *J Phys Chem*, 2:531–618
Yu, X., Zhou, J., Liang, H., et al. (2018) Mechanical metamaterials with stifness, rigidity and compressibility: a brief review, *Progess in Materials Science*, vol 94, pagg 114-173
Wang Y, Lakes R. (2004)Extreme stiffness systems due to negative stiffness elements. *Am J Phys*;72:40–50
Jong M, Chen W, Angsten T, Jain A, Notestine R, Gamst A, et al.(2015) Charting the complete elastic properties of inorganic crystalline compounds. *Sci Data*;2:150009
Milton GW, Cherkaev AV. (1995)Which elasticity tensors are realizable? *J Eng Mater Technol*;117:483–93.
Milton GW. (2002)*The theory of composites*. New York: Cambridge University Press;
Ashby MF. (2011) *Materials selection in mechanical design*. 4th ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann;
E. Karana (2010, Feb), How do Materials Obtain Their Meanings? In: METU Journal of the Faculty of Architecture, 27(2), 271-285, 275.
Milton, G. W., Cherkaev, A. V., (1995)Which elasticity tensors are realizable?, *J. Eng. Mater. Technol*., 117, 483–493
M. Kadic, T. Bückmann, N. Stenger, M. Thiel and M. Wegener (2012) On the practicability of pentamode mechanical metamaterials, *Appl. Phys. Lett*., 100, 191901
G. N. Greaves, A. Greer, R. Lakes and T. Rouxel, (2011)Poisson's ratio and modern materials, *Nat. Mater.*, , 10, 823–837
Lakes R. , Wojciechowski,K. (2008) Negative compressibility, negative Poisson's ratio, and stability, *Phys. Status Solidi B*, 245, 545–551
Janbaz, S., Weinans,H., Zadpoor, A. A. (2016)Geometry-based control of instability patterns in cellular soft matter, *RSC Adv*.,6, 20431–20436
Ron resch Paper and Stick film" https://vimeo.com/36122966
Pendry, J. B. (2000) Negative refraction makes a perfect lens.
Phys. Rev. Lett. 85, 3966–3969
Xu, L. et al. (2016) Kirigami nanocomposites as wide-angle diffraction gratings. *ACS Nano* 10, 6156–6162.
Rafsanjani, A. & Bertoldi, K. (2017) Buckling-induced kirigami. *Phys. Rev. Lett. 118*, 084301.
Lamoureux, A. et al. (2015) Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking. *Nat. Commun. 6*, 8092.
Eidini, M. & Paulino, G. H. (2015) Unraveling metamaterial properties in zigzag-base folded sheets. *Sci. Adv. 1*, e1500224.
Sussman, D. et al. Algorithmic lattice kirigami: a route to pluripotent materials. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 112,
Lobontiu, M., Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges
Howell, L., L., (2001), Compliant Mechanisms, John Wiley & Sons

Sitografia

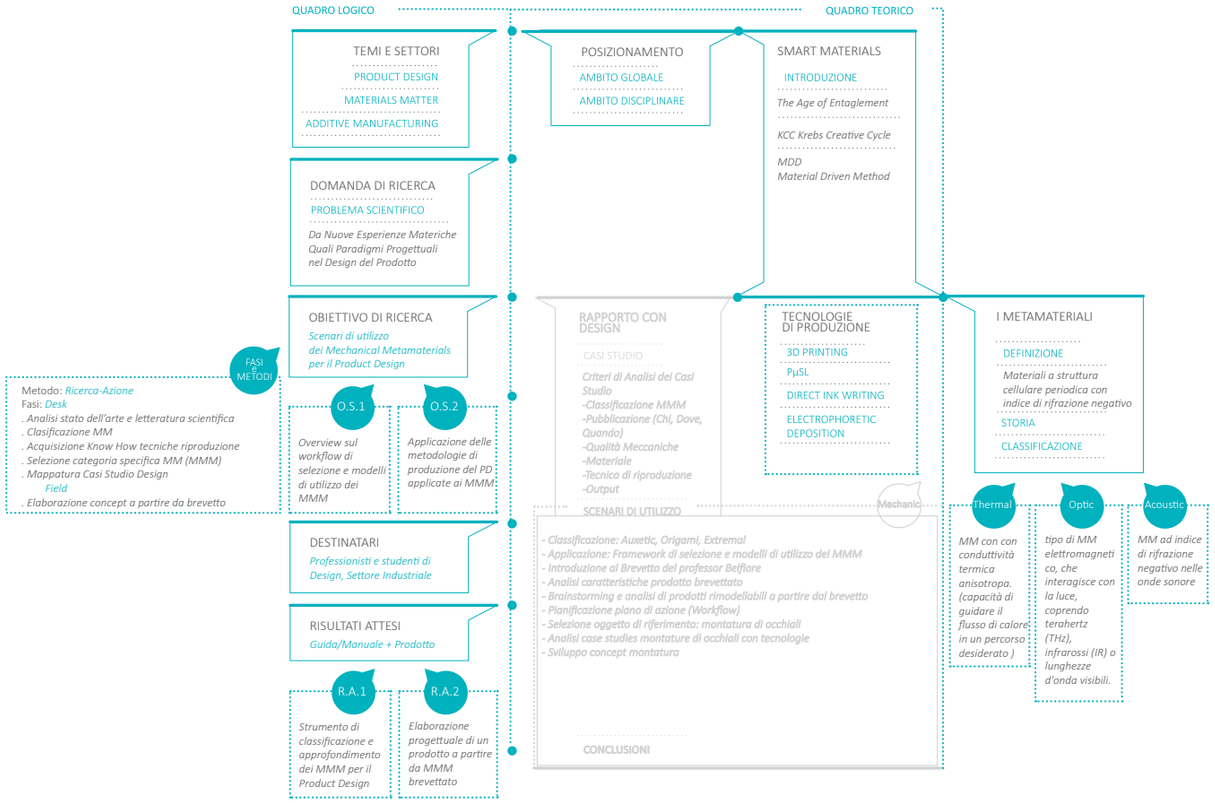
http://www.zadpoor.com/home/cv.
https://www.seas.harvard.edu/directory/bertoldi
https://www.youtube.com/watch?v=gjfYohXoiz0
http://www.origami-instructions.com/kirigami.html
https://www.creativemechanisms.com/blog/compliant-mechanisms.-part-1

ABSTRACT
The massive complexity of mechanical metamaterials geometry requires reproduction techniques that can govern this issue (Spadaccini, 2016). All the mechanical metamaterial reproduction techniques refer to the SFF (Solid Freeform Fabrication) technology, which returns three-dimensional structures, based on a layer-by-layer approach starting from CAD (Computer-Aided Design) models and uses the Additive Manufacturing (AM) (Franchin, 2013).
Chapter 5 gives an overview of the aforementioned technologies, with emphasis on the scalability of the production process and the consequences that can result in mechanical terms on the metamaterials made with these techniques.

CAPITOLO 5

TECNICHE DI RIPRODUZIONE DEI METAMATERIALI

ABSTRACT
La geometria particolarmente articolata delle strutture che compongono i metamateriali meccanici richiede tecniche di riproduzione in grado di governarne la complessità (Spadaccini, 2016). Tutte le tecniche di riproduzione dei metamateriali meccanici fanno riferimento alla tecnologia SFF (*Solid Freeform Fabrication*), che restituisce strutture tridimensionali, basate su un approccio *layer-by-layer* a partire da modelli CAD (*Computer-Aided Design*) e si avvale della metodologia dell'*Additive Manufacturing* (AM) (Franchin,2013).
Il capitolo 5 offre una panoramica sulle suddette tecnologie, ponendo l'accento sul tema della scalabilità del processo produttivi e delle conseguenze che può comportare in termini meccanici ai metamateriali realizzati con queste tecniche.



5 Material Design

Per completare il quadro riassuntivo sui metamateriali meccanici, è opportuno enunciare quali siano le modalità di riproduzione delle tipologie di metamateriali meccanici sinora riprodotti. In riferimento a quanto esposto sinora, la strutturalità dei metamateriali meccanici è progettabile (*tunability*)[66] ed, in quanto tale, intrinsecamente dipendente dalla tecnica di riproduzione.
L'avvento dell'additive manufacturing ha prodotto una grande spinta nello sviluppo dei metamateriali (Zadpoor, 2016; Spadaccini, 2015; Bertoldi, 2016). In questo capitolo, s'intende spiegarne le motivazioni, l'importanza, gli *output* e altre tipologie di strumenti e tecnologie coinvolte nella produzione di metamateriali meccanici.

Con la definizione *Material Design*, Christopher Spadaccini[67], ingegnere dei materiali per il Lawrence Livermore National Laboratory negli USA, enumera e descrive i metodi, gli strumenti e le tecnologie di riproduzione dei metamateriali meccanici. Nello specifico, si tratta di un approccio a due momenti: una prima fase, di tipo analitico e previsionale, si concentra sull'analisi delle caratteristiche del materiale che si intende riprodurre nonché il suo volume totale, nell'ottica di ottimizzare tale volume all'essenziale. Nella seconda fase, invece, descrive gli strumenti che permettono la realizzazione di un metamateriale meccanico, avendo come scala di riferimento il nanometro. Spiega, infine, le circostanze secondo le quali prediligere uno strumento piuttosto che un altro ed il livello di avanzamento tecnologico per ciascuno di essi. In questo capitolo, quindi, si riportano tali riferimenti, con l'obiettivo di offrire una panoramica in termini scalari del ventaglio di tecnologie oggi fruibili per la creazione di metamateriali meccanici. In particolare, si evidenzia la scala di riproduzione e la scalabilità del processo, dove possibile.

66. Lapine, M., Powell, D.,Gorkunov, M., Shadrivov, I., Marqués, R., Kivshar, Y., (2009) Structural tunability in metamaterials Appl. *Phys. Lett. 95*, 084105;
Hwang, D., Bartlet, D. (2018) Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami, *Structures Scientific REPORTS* 8:3378

67. Il Dr. Spadaccini, formatosi al MIT di Boston, è direttore del Center for Engineered Materials, Manufacturing and Optimization presso La Lawrence Livemore National Laboratory (LLNL). Attualmente è *Principal Investigator* per progetti relativi a *advanced materials* e *additive manufacturing*. È anche fondatore e direttore di un nuovo centro additivo per la produzione, lo sviluppo dei processi e l'architettura dei materiali. Il lavoro si concentra sullo sviluppo di processi additivi di prossima generazione che siano in grado di operare alla scala micro e nano e di creare componenti con miscele di materiali che vanno dai polimeri, ai metalli sino alla ceramica. Lo sviluppo di questi processi coinvolge anche la sintesi e la scienza dei materiali di materie prime come fotopolimeri e nanoparticelle. Queste funzionalità sono utilizzate per fabbricare materiali microarchitettonici

con proprietà di progettazione uniche, come l'espansione termica negativa. Il Dr. Spadaccini è anche docente part-time presso l'Università statale di San Jose nel dipartimento di ingegneria biomedica, chimica e dei materiali, dove insegna corsi di perfezionamento in fenomeni di trasporto avanzato. (https://people.llnl.gov/spadaccini2)

68. Spadaccini, C. (2014) Mechanical Metamaterials : Design, Fabrication , and Performance, *Science* 344(6190):1373-1377; Ion, A. (2016) Metamaterials Mechanism, *UIST* 2016; Chen, D., & Zheng, X. (2018) Multi-material Additive Manufacturing of Metamaterials with Giant, Tailorable Negative Poisson's Ratios

69. OTTIMIZZAZIONE TOPOLOGICA Seminario Strumenti e Metodi di Progettazione Prof. F. Campana (documento .pdf)

70. https://webinar.smartcae.com/introduzione-all-ottimizzazione-topologica/

5.2 Strumenti, tecniche e metodologie di riproduzione dei metamateriali

Il paragrafo si occupa di riportare le principali tecniche di riproduzione dei metamateriali,con particolare focus sui metamateriali meccanici.

Best Practices

*Topology Optimization Algorithms (*TOA*)*

L'ottimizzazione Topologica, nel settore dei metamateriali, si è dimostrata essere una risorsa efficace per la progettazione della distribuzione delle subunità di cui un metamateriale si compone (Spadaccini, 2014; Ion 2016, Chen, 2018)[68]. Si tratta di una tecnica matematica utilizzata in ingegneria meccanica che, partendo da un volume assegnato, sintetizza la forma di un componente meccanico con l'obiettivo di trovare il layout ottimale di quella struttura all'interno di una regione di partenza determinata. Ottimizzazione topologica significa definizione delle connessioni pieno/vuoto che formano la struttura; l'ottimizzazione topologica ricerca la distribuzione ottimale del materiale in uno spazio di progetto vincolato (Campana F.)[69].

I vincoli possono essere:

- geometrici/funzionali
- condizioni di resistenza
- condizioni di rigidezza
- condizioni sulle frequenze proprie

Attraverso questo metodo è possibile ottenere forme innovative delle componenti, che garantiscono prestazioni desiderate in termini di rigidezza statica e frequenze di risonanza, ma con il minor peso possibile e rispettando vincoli di producibilità[70].

Spadaccini descrive nella pubblicazione: *Mechanical Metamaterials: Design, Fabrication, and Performance* una spiegazione molto putuale e dettagliata circa la topology optimization applicata ai mechanical metamaterials. Sostiene che la *Topology Optimization* (Ottimizzazione topologica) è un metodo di progettazione inversa guidato dalla computazione. L'implementazione svolta nelle sue ricerche mira ad , utilizzare quello che definiscono "un risolutore di elementi finiti" come motore fisico di base, e un "algoritmo di ottimizzazione", soggetto a una (i) funzione obiettivo ed a (ii) vincoli per l'evoluzione del progetto.

Riporta poi come esempio un metamateriale di espansione termica negativa, per descrivere il processo progettuale in un'implementazione tipica. Tale processo inizia con una cella unitaria con tre fasi, distribuite casualmente in tutto lo spazio: un materiale costituente ad espansione termica elevata, un materiale costituente di espansione termica relativamente più bassa e lo spazio vuoto (*Freespace*, cfr. cap. 3.2). Una "funzione obiettivo", come ad esempio un'espansione termica target specifica per la cella unitaria, viene definita insieme ai vincoli quantitativi, quali rigidità e limiti di frazione del volume.

Inizialmente, il risolutore di elementi finiti calcola le proprietà del materiale per la distribuzione casuale delle fasi. Queste proprietà saranno probabilmente lontane dall'obiettivo e potrebbero anche violare i vincoli. A questo punto, l'algoritmo di ottimizzazione, che in questo caso è un metodo basato su gradiente, ridistribuisce le tre fasi di una piccola quantità e il risolutore di elementi finiti calcola nuovamente le proprietà. Le nuove proprietà vengono quindi valutate rispetto al target e i valori precedentemente calcolati e l'algoritmo di ottimizzazione ridistribuisce nuovamente il materiale in base a queste informazioni nel tentativo di avvicinarsi all'obiettivo.

Questo processo iterativo viene ripetuto finché non converge in un progetto che riduce al minimo la funzione obiettivo e soddisfa tutti i vincoli.

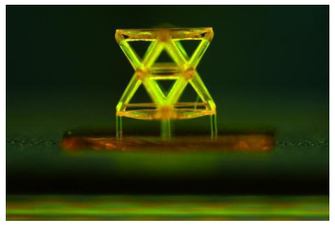
Tecniche di riproduzione dei metamateriali meccanici

La geometria particolarmente articolata delle strutture che compongono i metamateriali meccanici richiede tecniche di riproduzione in grado di governarne la complessità (Spadaccini, 2016)[71]. Tutte le tecniche di riproduzione dei metamateriali meccanici fanno riferimento alla tecnologia SFF (*Solid Freeform Fabrication*), che restituisce strutture tridimensionali, basate su un approccio *layer-by-layer* a partire da modelli CAD (*Computer-Aided Design*) e si avvale della metodologia dell'*Additive Manufacturing* (AM) (Franchin,2013)[72]. Come evidenzia Spadaccini: *«These tools are capable of generating the designed structures which are highly three-dimensional micro- and nanoscale architectures with multiple consituent materials in the same structure»*.

In questo capitolo dunque si elencano e si descrivono le tecnologie e gli strumenti che rendono possibile la realizzazione di

71. C. Spadaccini, (2016), Frontiers of Engineering: *Reports on Leading-Edge Engineering from the 2015 Symposium*

72. Franchin, G. (2013). *Additive Manufacturing of Ceramics Printing Beyond the Binder*



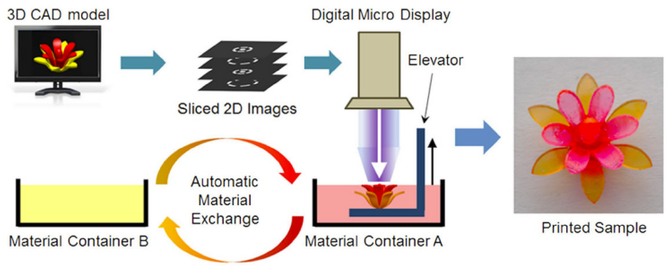
Questa immagine al microscopio mostra una singola unità nel nuovo metamateriale super leggero, ad alta rigidità e alta resistenza sviluppato dai ricercatori del Lawrence Livermore National Laboratory e del MIT. La cellula a traliccio ottetto dominata dallo stiramento è stata realizzata con la tecnica EPD (cfr. paragrafo Electrophoretic Deposition, pag. 119) Immagine tratta da: https://www.designnews.com/content/lawrence-livermore-mit-3d-print-new-super-light-super-strong-materials

73. https://mydmand.wordpress.com/2016/10/22/dmand-develops-multi-material-4d-printing-with-tailorable-shape-memory-polymers/
74. ibidem.

metamateriali meccanici, dalla scala nanometrica alla scala reale. Nello specifico, per ogni tecnologia, si evidenziano le caratteristiche peculiari che determinano la tipologia di metamateriale riproducibile.

PμSL

Projection (micro)stereolithography[73]: utilizza uno *spatial light modulator* - un display a cristalli liquidi su silicone (LCoS) o un device digitale di microspecchi (DMD) - come una maschera fotonica digitale dinamicamente riconfigurabile, per fabbricare materiale a tre dimensione in stile layer-by-layer.

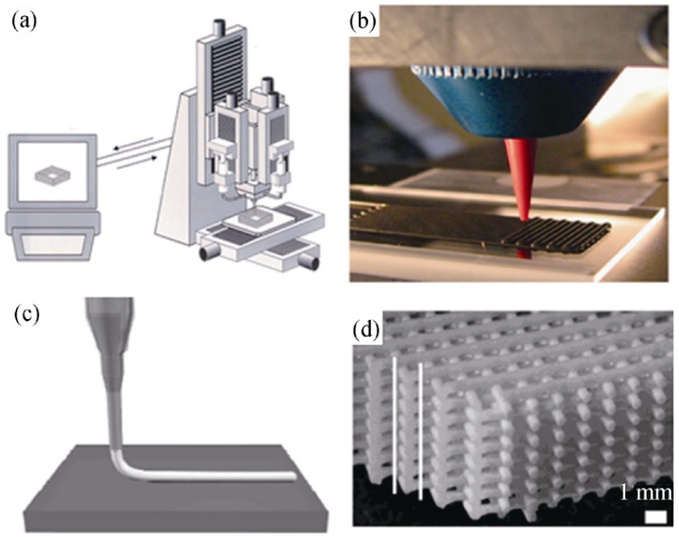


5.1

Fig. 5.1
Processo di riproduzione tramite Projection (micro)stereolithography
Immagine tratta dal link in nota 73

Direct Ink Writing o Robocasting

Il *direct ink writing* (DIW) definito anche come *Robocasting*, è un processo basato sulla metodologia di stampa per estrusione.
DIW segue un processo di stampa *layer-by-layer* in cui appositi inchiostri molto concentrati sono depositati in layout planari e 3D, con dimensioni laterali (minimo ~ 400 nm) che sono a almeno un ordine di grandezza inferiore a quelli raggiunti con metodi di stampa convenzionali basati sull'estrusione (Spadaccini, 2016)[74].
Di primaria importanza per questo approccio è la creazione di inchiostri trattati al punto da renderli fini abbastanza per essere estrusi mediante una deposizione ad ugelli micrometrici[75], con conseguente rapida solidificazione, eliminando la possibilità di modificarsi dalla forma depositata.



5.2

Electrophoretic Deposition photolitography

Un terzo metodo di fabbricazione, che consente la deposizione di una gamma di materiali differenti, è la deposizione elettroforetica (EPD), un processo di fabbricazione *bottom-up*, che utilizza campi elettrici per depositare nanoparticelle caricate da una soluzione su un substrato (Besra, 2007)[76]. L'EPD può essere utilizzato con una vasta gamma di nanoparticelle, tra cui ossidi, metalli, polimeri e semiconduttori. Una volta che le particelle sono state depositate, il green body (un elemento combustibile ottenuto durante il processo di *firing* della componente ceramica) può essere essiccato e / o sinterizzato per far aderire le particelle insieme in una struttura fissa. Una nanostruttura schematica e fabbricata è mostrata in Figura 5.3.
L'EPD è stato tradizionalmente utilizzato per applicazioni di rivestimento, come il deposito di materiali ceramici su utensili in metallo. E' stata ampliata la tecnologia per consentire la modellazione di strutture multimateriali a mesoscala con sistemi di micron scala. Le nostre modifiche comprendono l'iniezione automatizzata del campione durante la deposizione per adattare la

Fig. 5.2
Tecnica di riproduzion eDIW (Direct Ink Writing (iimagine tratta dal link in nota 75

75. http://www.jim.org.cn/article/2015/1000-324X-30-11-1139.html
76. Besra L, Liu M. (2007). A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in Materials Science* 52(1):1– 61
77. https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Ceramics/old-info/EPD

composizione del materiale, l'uso di elettrodi dinamici per variare in modo controllabile il profilo del campo elettrico sul piano di deposizione e le geometrie del modello e la modellazione del processo approfondita per prevedere i parametri di deposizione necessari per ottenere un struttura di imballaggio specifica[78].

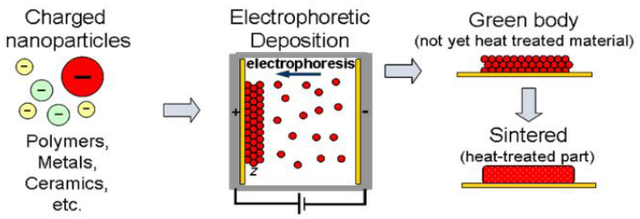


Fig. 5.3
Processo di riproduzione EPD (Electrophoretic Deposition). Illustrazione del processo tratta dalla pubblicazione alla nota 68.

5.3 Programmabilità e scalabilità dei Metamateriali Meccanici

L'importanza della scalabilità del processo produttivo e relative conseguenze.
«Bigger is different'—the unusual physics of mechanical metamaterials exposed» è il titolo della pubblicazione della *Amolf University* per la testata online *Phys.Org*[79]

Per primi, i ricercatori della AMOLF stanno approfondendo studi sulla scalabilità delle prestazioni dei metamateriali meccanici. Ciò che è emerso sinora è stato da loro stesso definito come *«Striking Scale Effects»*. Come dice il Postdoc Coulais: *«In standard materials such as a rubber band, we understand what happens when you add more material[...]If you make the rubber band twice as long, then it is twice as easy to stretch. That is basic mechanics. But mechanical metamaterials are different. The exact opposite can happen. For example, we discovered that a long metamaterial can actually be stiffer than a short one.[...]Until now, the research into metamaterials was focused on relatively small systems in which aspects such as programmability are easily investigated. However, we suspected that different effects would occur in larger systems»* sostiene Coulais. *«We have now studied that extensively»*[80].
Si evince dunque che il potenziale relativo alla scalabilità del materiale è un *topic* aperto che lascia intuire esperienze materiche inaspettate, che sembrano addirittura ribaltare la tradizionale comprensione del comportamento dei materiali. La questione aperta che questo avanzamento lascia, riguarda l'innovazione applicativa che i metamateriali meccanici possono apportare.
L'importanza della scalabilità ha degli effetti non solo sulle ripercussioni prestazionali che un prodotto può acquisire, a seconda della scala alla quale viene riprodotto, ma si evince anche una velocizzazione nella produzione di ciascuno di questi: abbiamo visto come le tecnologie attualmente dedicate alla costruzione di metamateriali meccanici più diffuse siano quelle dell'*additive manufacturing* (cfr cap 5.2), che si prestano alla customizzazione di default, che offrono l'opportunità di smarcare le difficoltà progettuali legate ai sottosquadra, che permettono a livello di database di non archiviare grandi quantita di dati e di evitare quindi l'utilizzo di magazzini, per non contare la definizione a livello scalare, dell'elenco sopra indicato. Se si considerano quindi questi strumenti come elegibili per i metamateriali, si può ipotizzare un'omologazione degli strumenti e delle tencologie di produzione di prodotti a matrice metamaterica che porta a una velocizzazione dei processi di produzione di prodotto.

78. A. R. Thryft, (2014), Report: Metamaterials Will Partly Depend on Additive Manufacturing, *Design Hardware & Software section, Design News*, https://www.designnews.com/design-hardware-software/report-metamaterials-will-partly-depend-on-additivemanufacturing/123101573832544
79. https://phys.org/news/2017-09-bigger-differentthe-unusual-physics-mechanical.html
80. Florijn, B., Coulais, C., (2014) Programmable Mechanical Metamaterials, *Physical Review Letters*

Bibliografia e sitografia del capitolo

Bibliografia

Lapine, M., Powell, D.,Gorkunov, M., Shadrivov, I., Marqués, R., Kivshar, Y., (2009) Structural tunability in metamaterials Appl. *Phys. Lett. 95*, 084105;
Hwang, D., Bartlet, D. (2018) Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami, *Structures Scientific REPORTS* 8:3378
Spadaccini, C. (2014) Mechanical Metamaterials : Design, Fabrication , and Performance, *Science* 344(6190):1373-1377;
Ion, A. (2016) Metamaterials Mechanism, *UIST* 2016;
Chen, D., & Zheng, X. (2018) Multi-material Additive Manufacturing of Metamaterials with Giant, Tailorable Negative Poisson's Ratios
C. Spadaccini, (2016), Frontiers of Engineering: *Reports on Leading-Edge Engineering from the 2015 Symposium*
Franchin, G. (2013). *Additive Manufacturing of Ceramics Printing Beyond the Binder*
Besra L, Liu M. (2007). A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). *Progress in Materials Science* 52(1):1– 61

Sitografia

https://people.llnl.gov/spadaccini2
https://webinar.smartcae.com/introduzione-all-ottimizzazione-topologica/
https://mydmand.wordpress.com/2016/10/22/dmand-develops-multi-material-4d-printing-with-tailorable-shape-memory-polymers/
http://www.jim.org.cn/article/2015/1000-324X-30-11-1139.html
https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Ceramics/old-info/EPD

PARTE 1

RICERCA ON FIELD

Introduzione

L'operazione di traslazione dei contenuti dal settore ingegneristico al design, è alla base del processo di ricerca elaborato in questo volume. I capitoli sinora affrontati sono da considerarsi come materiale di supporto alla comprensione, -sia del funzionamento che del significato-, dei metamateriali e dei metamateriali meccanici. Nel corso della ricerca dottorale, questi acquisiscono il ruolo di elementi di raccordo tra ingegneria dei materiali e design di prodotto, sottolineando il valore della multidisciplinarietà discussa dai riferimenti richiamati a inizio volume (cfr. cap 2-3) (Antonelli, 2005; Karana,2015; Oxman, 2010; Ashby, 2005, Ferrara, 2017). Prima di procedere con i capitoli inerenti l'analisi sui casi studio e sulla proposta progettuale, si riportano i punti sinora argomentati ed, a seguire, si evidenziano alcuni aspetti non ancora portati alla luce, ma cruciali per la comprensione del passaggio dall'ambito ingegneristico a quello di design.
Di seguito, per punti, quanto affrontato sinora:

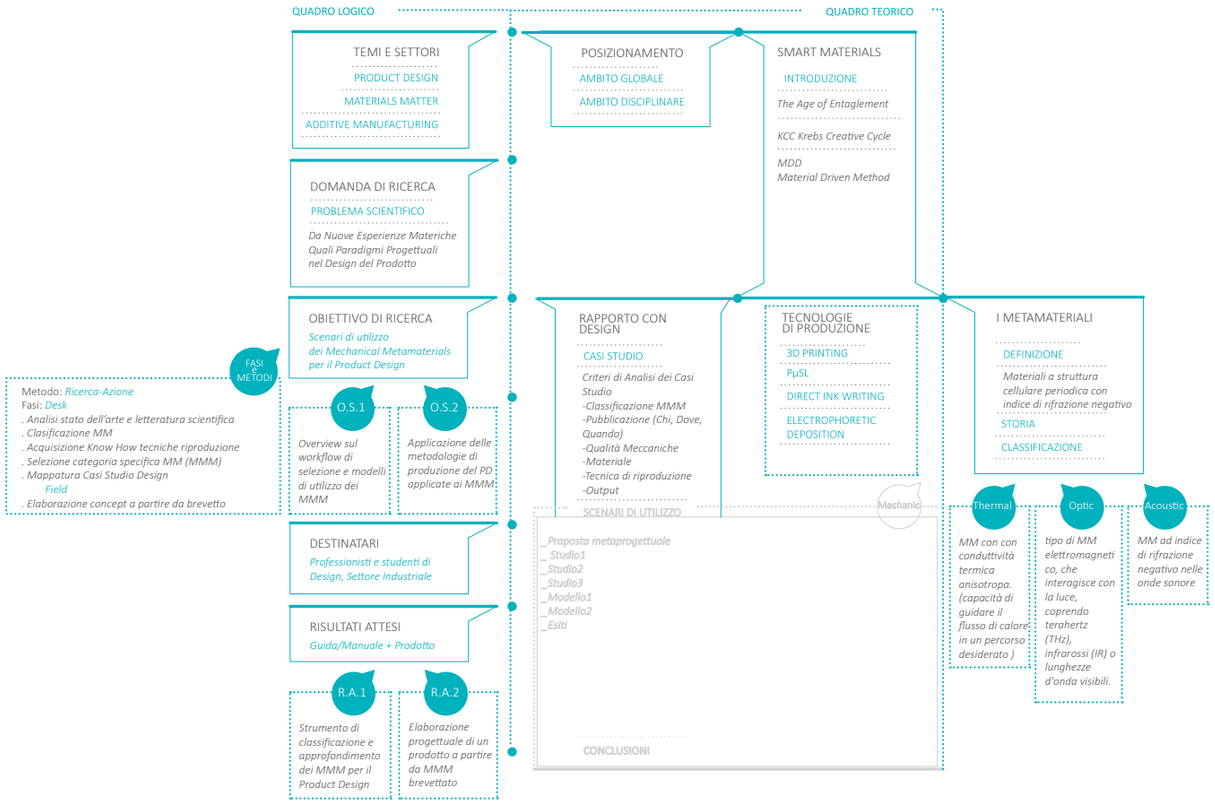
- Il percorso storico; dalla teorizzazione dei metamateriali alla produzione in scala nanometrica/micrometrica
- La definizione ed il posizionamento; come si contestualizzano i metamateriali nel panorama globale dei materiali esistenti
- La selezione di una categoria specifica; I metamateriali meccanici e loro caratteristica
- La classificazione dei metamateriali meccanici: sono stati selezionati i sistemi di classificazione più citati, esposti e messi a confronto, restituendo un sistema complessivo sotto la forma di una schema illustrativo graficamente organizzato come una "tavola periodica" dei metamateriali meccanici
- Le tecniche di riproduzione; strumenti, metodi e processi per la riproduzione dei metamateriali meccanici ed elettromagnetici

CAPITOLO 6

METAMATERIALI MECCANICI NEL DESIGN DEL PRODOTTO

ABSTRACT
Il settore dei metamateriali meccanici, come già affrontato nei capitoli relativi ai cenni storici (cfr. cap. 3) è ancora emergente ed è tuttora in atto un'operazione di studio delle metodologie di sviluppo e dei comportamenti di tali materiali. Alcuni ricercatori proveniente dalle discipline del Design, sostenuti da team multidisciplinari composti da ingegneri dei materiali, fisici e chimici, propone le prime sperimentazioni pratico-applicative dei metamateriali meccanici.

ABSTRACT
The mechanical metamaterial sector, as already dealt with in the chapters related to historical outlines (see chapter 3) is still emerging and a study of the methodologies of development and behavior of these materials is still underway. Some researchers coming from the disciplines of Design, supported by multidisciplinary teams composed of materials engineers, physicists and chemists, propose the first practical-applicative experiments of mechanical metamaterials.



6 Premessa

Le sperimentazioni con i metamateriali rintracciabili ad oggi allo stato dell'arte, interessano principalmente prodotti in scala micro e nanometrica e si concentrano perlopiù sullo studio prestazionale del metamateriale, più che sulle possibili applicazioni e output in campi di applicativi fuori dal contesto dell'ingegneria dei materiali. Esistono però alcuni casi di declinazione di utilizzo di metamateriali meccanici per il product design, che si stanziano in un arco di tempo piuttosto limitato e recente (dal 2014 circa ad oggi) Del resto, come affrontato nel capitolo relativo ai cenni storici (cfr. cap. 3), si tratta di un settore di avanguardia, nel quale ancora è in atto un'operazione di studio delle metodologie di sviluppo e dei comportamenti di tali materiali. Alcuni ricercatori proveniente dalle discipline del Design, sostenuti da team multidisciplinari composti da ingegneri dei materiali, fisici e chimici, propone le prime sperimentazioni pratico-applicative dei metamateriali meccanici. E' cura di questo capitolo riportarli ed analizzarli, con l'obiettivo di mettere in evidenza le metodologie sviluppate per dimostrare il potenziale attuativo dei metamateriali meccanici nel design del prodotto.

6.2 Stato dell'arte e Case Studies

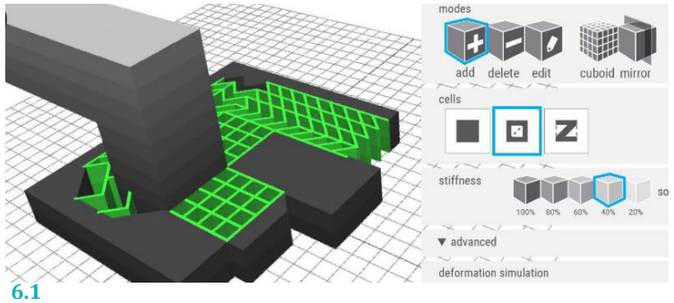
I *case studies* di seguito riportati, sono tra gli esempi più validi ed importanti attualmente rintracciabili e si stanziano in un arco di tempo relativamente limitato: tutti i casi studio si distribuiscono a partire dal 2014 sino ad agosto 2018. I riferimenti sono tratti dalle pubblicazioni del team di ricerca di Alexandra Ion, PhD della Hasso Plattner Institute (Postdam, Germania)[81].

Processo
Per permettere agli utenti di progettare, fabbricare e testare metamateriale composti da meccanismi, il team ha sviluppato un editor computazionale basato sulla metodologia trial-and-error che descrivono come segue: *«Our editor is based on interaction*

81. http://alexandraion.com/

82. Ion, A., Metamaterial mechanism, 2016,*Proceedings of UIST '16*, Tokyo, Japan

techniques known from voxel editors. However, in addition our software also offers specific supports for creating mechanisms, such as tools for drawing hinge arrays, etc. In order to al- low users to validate their designs, the editor also allows them to apply forces and see how the object deforms in order to then refine their design directly inside the editor, before exporting to the 3D printer»[82]. Questo processo permette loro di creare, attraverso un'interfaccia *custom made*, una configurazione piana della distribuzione dei vincoli e dei punti di raccordo che definiscono i gradi di libertà del prodotto basato sul meccanismo (Fig 6.1).

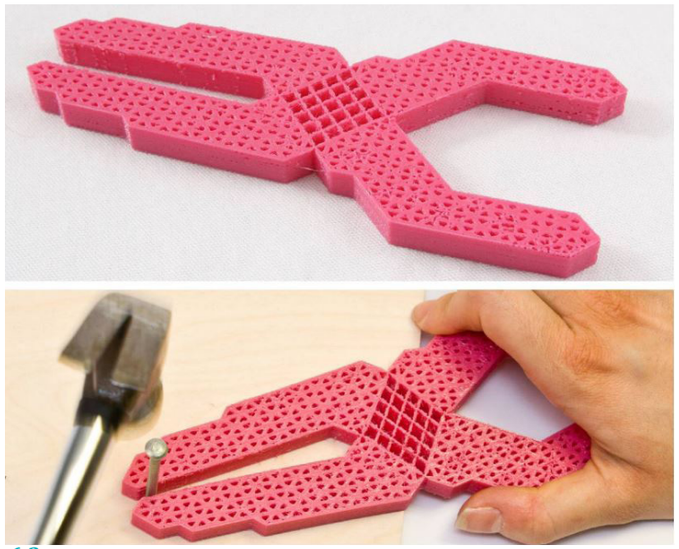


6.1

Fig 6.1
L'editor permette agli utenti di editare e simulare la deformazione del metamaterial mechanisms in maniera interattiva

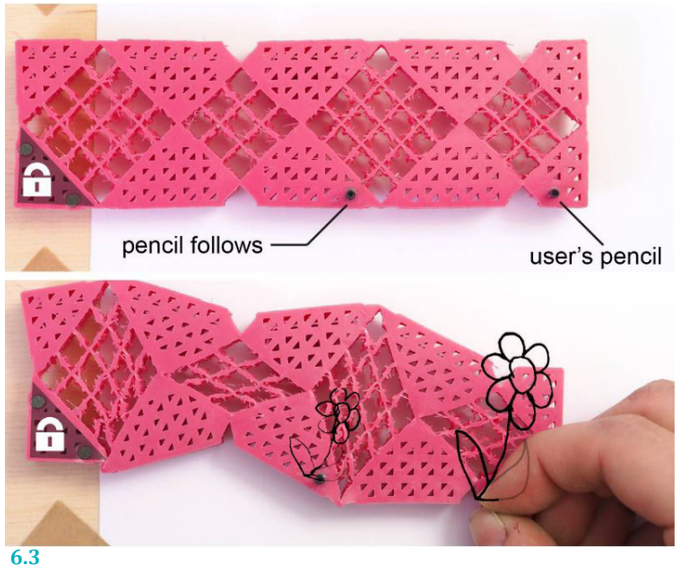
Gli oggetti
Tramite l'utilizzo dell'editor, Ion presenta quattro tipologie di oggetti, ognuno dei quali ha un meccanismo differente.
Essi sono:

Una pinza
La pinza è basata su un *single metamaterial four-bar. Four-bars* è un concept che si basa su elementi rigidi connessi da cerniere disposte in array che costruisce una struttura che scorre su quattro punti fermi; indica un metamateriale costituito da quattro elementi agganciati ai lati opposti della distribuzione delle cerniere. Gli elementi opposti si muovono parallelamente. Specificano: *«Note how the rigid member that is pushed to the left in Figure 9b rotates, while the top member moves in parallel with the rigid area underneath it. (b)»* in questo modo, applicando una forza alle maniglie dell'oggetto, fa in modo tale che le pinze si chiudano (nelle normali pinze avviene il contrario).



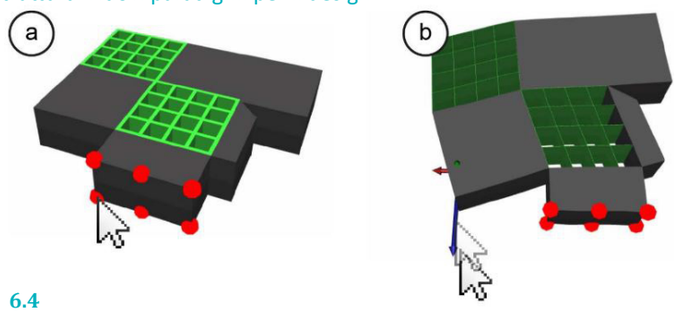
6.2

Mini pantografo
Riproducendo a catena la configurazione Four-bars si costruisce un pantografo: *«We chain multiple four-bars to create a scissors mechanism, which is a linkage that arranges links in a criss-cross pattern and is used»*. Il pantografo tiene due matite: mentre una matita è mossa dall'utente, l'altra si sposta di conseguenza, riproducendo lo stesso disegno



6.3

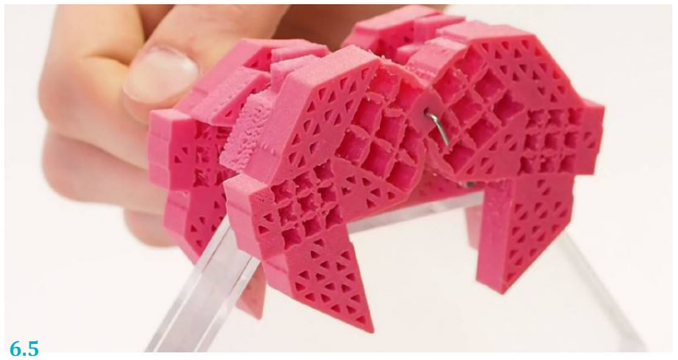
Fig 6.2
Prototipo di una pinza costruita con l'utilizzo dell'editor
Fig 6.3
Prototipo di un mini pantografo, anch'esso realizzato con l'editor. La particolarità di questo esempio risiede nella rappresentazione del processo scalare del movimento compiuto sui punti di grip del pattern disegnato.



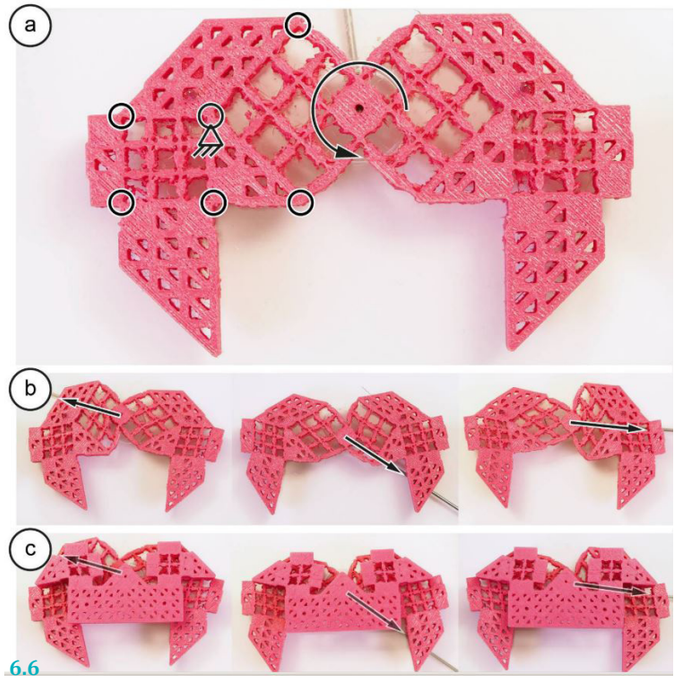
6.4

Modellino di Animalia di Theo Jansen

In questo caso studio, ragionano su cerniere ruotate per consentire la deformazione sul modulo di taglio per un effetto di scorrimento longitudinale: *«we obtain a rotated design by combining groups of 2 × 2 cells, each of which contains (only) a diagonal.»*

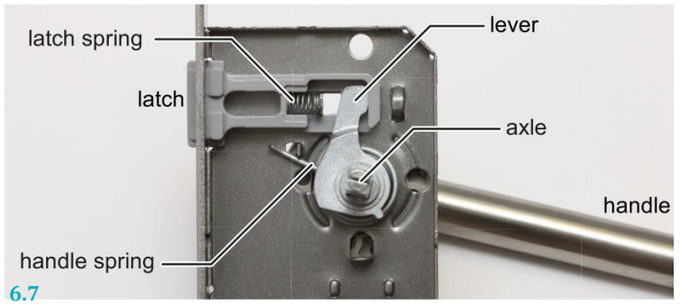


6.5



6.6

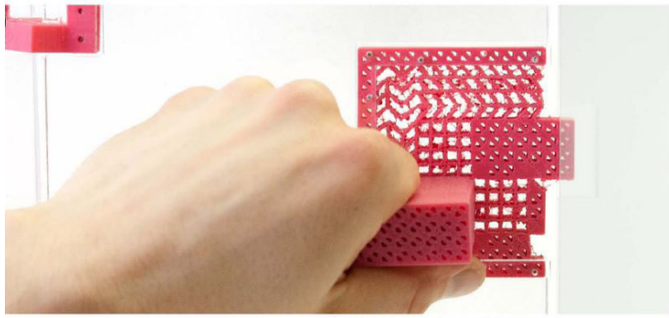
Fig 6.4
immagini dell'editor di Ion in cui si distinguono in rosso i punti di ancoraggio ed in verde i moduli composti da texture a griglia che rendono possibile la deformazione del monoblocco, fungendo da elementi elastici
Fig 6.5
Prototipo stampato con l'ausilio dell'editor, rappresenante un modello degli "Animalia" di Theo Jansen
Fig 6.6
(a) L'immagine evidenzia il punto in cui passa l'asse attorno al quale è prevista la rotazione del metamateriale. Son inoltre messi in evidenza i punti di ancoraggio attorno ai quali avvengono le deformazioni lungo il reticolo progettato con l'editor
(b) Esempi di deformazioni a seconda della direzione del verso della rotazione rispetto all'asse (nella vista frontale)
(c)Vista di dietro che metti in evidenza la staticità della struttura sulla quale sono fissati i punti di ancoraggio dell immagine (a) che, organizzati sul reticolo, si deformano.

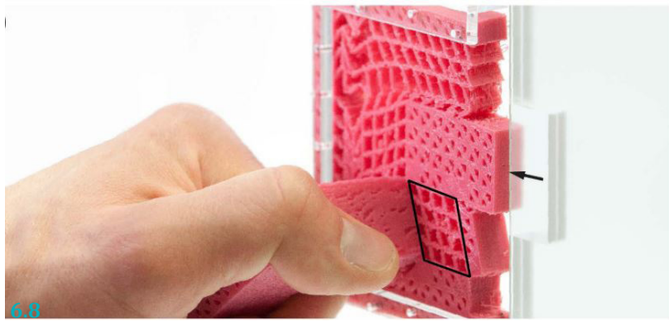


6.7

Maniglia

Come ultimo caso studio, si riporta un sistema composto da serratura e maniglia. L'oggetto si presenta come un monoblocco, dotato di un meccanismo che sostiuisce l'insieme degli elementi che compongono una maniglia tradizionale con un unico pezzo.





6.8

In tutti e quattro i casi, è possibile distinguere perciascuno quattro fattori distintivi:

- L'utilizzo di un sistema computazionale che definisce nel piano la distribuzione delle celle
- La distribuzione di vincoli dove si intende porre una cerniera
- L'utilizzo di tecniche additive manufacturing per la riproduzione degli oggetti
- il prodotto si presenta sotto la forma di un monoblocco monomaterico

Fig 6.7
Maniglia tradizionale (immagine tratta da Ion). Si compone di: Chiavistello (latch), Molla del chiavistello (latch spring), Molla della maniglia (handle spring), Leva (lever), Asse, (axle), Maniglia (handle). Al contrario, la maniglia in metamateriale è composta da un solo blocco monomaterico
Fig 6.8
Prototipo funzionante di una maniglia in metamateriali prodotto dal tema Ion

Un'osservazione che viene spontanea riguarda invece il design di questi oggetti: l'utilizzo dell'editor, trascura completamente l'aspetto espressivo e sensoriale dei prodotti presentati.
Dal punto di vista della funzionalità è possibile confermare l'ottimizzazione che il processo restituisce, ma non prende in considerazione il carattere morfologico del prodotto.
In conclusione, è possibile sostenere che gli esempi riportati, oltre ad essere testimonianza di un avvicinamento (di scala e di metodo) al mondo del design del prodotto, non è ancora in grado di offrire delle risposte che possano considerarsi competitivo sul piano estetico.

Bibliografia e sitografia del capitolo

Bibliografia

Ion, A., Metamaterial mechanism, 2016,*Proceedings of UIST '16*, Tokyo, Japan

Sitografia

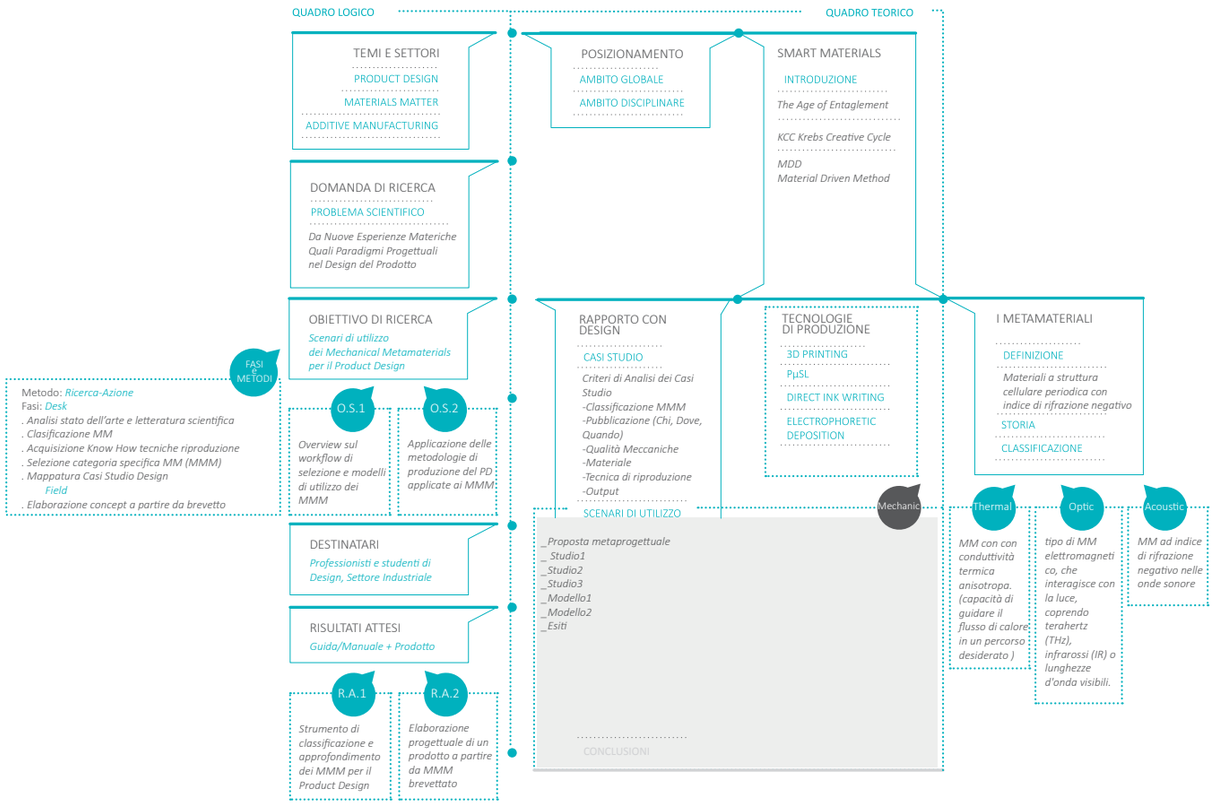
http://alexandraion.com/

ABSTRACT
The second part of the research is dedicated to a practical experimentation. Starting from a mechanical metamaterial, provided by professor Belfiore, mechanical engineer of the University of Roma 3, a meta-planning proposition is carried out. It provides the realization of three Studies and two Configuration Models. The object of study taken into account is am eyewear frame. The goal is to redesign its functionality, starting from the supplied mechanical metamaterial, analyzing its mechanical properties and declining them on the target object.
The experimentation was proposed as a visual documentation of the material produced and provides the development of an application methodology for the functional reinterpretation of products, starting from the use of mechanical metamaterials with specific properties declared.

CAPITOLO 7

SPERIMENTAZIONE METAPROGETTUALE

ABSTRACT
La seconda parte della ricerca dottorale è dedicata alla sperimentazione pratica ed applicativa. A partire da un metamateriale meccanico, fornito dal professore Belfiore, ingegnere meccanico dell'università di Roma 3, si effettua una proposizione metaprogettuale che vede la realizzazione di tre Studi e due Modelli di configurazione. L'oggetto di studio preso in considerazione è una montatura di occhiali. L'obiettivo è quello di riprogettare la funzionalità di suddetto oggetto-accessorio, ragionando a partire dal metamateriale meccanico fornito, analizzandone le proprietà meccaniche e declinandole sull'oggetto target.
La sperimentazione sarà proposta sotto la forma di una documentazione (anche visiva) del materiale prodotto e vede l'elaborazione di una metodologia applicativa per la reinterpretazione funzionale di prodotti ,a partire dall'utilizzo di metamateriali meccanici con proprietà specifiche dichiarate.



7.1 Premessa

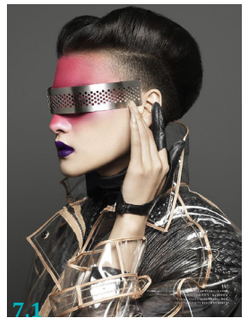
Per introdurre i contenuti del seguente capitolo, s'intende aprire riportando la questione che ha aperto la fase *Field* dell'elaborato: *Perchè la montatura di occhiale, come oggetto di studio per declinare l'utilizzo di un metamateriale meccanico in ambito di design del prodotto?*
La risposta si struttura su due fronti: il significato espressivo-sensoriale della montatura nel mondo del design ed il significato tecnico-funzionale, che trova risposte nel mondo ingegneristico.
Dai numerosi incontri di confronto con il professore Belfiore, così come emerso durante confronti con molti altri esperti dall'estrazione accademica più varia (citandone alcuni: il professore Davide Comoretto, chimico industriale dell'Università di Genova, a Emiliano Barchiesi, collega dottorando in Germania, matematico e fisico, a Marco Pelassa, ingegnere e fisico, docente presso l'università di Genova, e la lista potrebbe continuare) è sembrato emergere, un - quasi frustrante - limite nel riuscire a leggere i metamateriali come materiali dall'applicabilità semplice. La necessità, ironicamente paradossale, di ridimensionare la funzionalità di questa peculiare famiglia di materiali - che presenta caratteristiche eccezionali proprio perchè trattata in scala micro e nanometrica -, sulla declinazione di oggetti d'uso quotidiano.
Ed è quindi dalla presa di coscienza di questo *gap* disciplinare, che è stato interesse della ricerca, sforzarsi di trovare un oggetto di uso quotidiano, antropologicamente condizionato, funzionalmente indispensabile ma in cui è forte l'espressività artistica: gli occhiali sono un artefatto estremamente raffinato nel dettaglio tecnico e preciso nella calibratura dello strumento, che veste però anche i panni di un accessorio ornamentale e decorativo In termini di stato dell'arte, come si vedrà dai casi studio riportati è forte la ricerca sia dal punto di vista materico, che tecnologico, che artistico. Queste, in sintesi, le principali motivazioni che consolidano questo prodotto come oggetto di sperimentazione. L'obiettivo del lavoro consiste nel rielaborare la morfologia ed il ruolo fruitivo di un oggetto di utilizzo quotidiano, effettuando

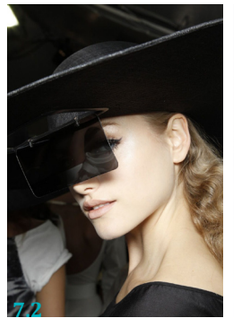
83. http://www.munart.org/index.php?p=18

un'operazione di trasferimento tecnologico/applicativo dal settore dell'ingegneria meccanica, attuata in scala nano-micrometrica, al design del prodotto, utilizzando la cerniera brevettata in scala 1:1, per poi riesaminare e rivalutare il significato estetico-funzionale acquisito dall'oggetto risultante dalla sperimentazione. Il design della montatura e la sua funzionalità come oggetto, si intersecano al significato di meccanismo e di materiale contemporaneamente. Per dirla alla Munari (dal Manifesto del Macchinismo, 1952) : *«[...] Gli artisti devono interessarsi delle macchine [...] devono cominciare a conoscere l'anatomia meccanica, il linguaggio della macchina, distrarle facendole funzionare in modo irregolare, creare opere d'arte con le stesse macchine, con i loro stessi mezzi ... La macchina deve diventare un'opera d'arte! Noi scopriremo l'arte delle macchine[...]»*[83]

«Salvo eccezioni, la gente usa occhiali «da sole» (occhiali più o meno scuri), per attenuare la presenza delle cose. Per sfuggire alla loro realtà. Gli occhiali da sole aggiungono, e tolgono, parecchio, alle cose. Tolgono loro i veri colori, aggiungono un foncé, una patina o velatura, alcunché di falso e in definitiva di irreale. Non a caso la diffusione universale di questi occhiali è simultanea all'introduzione della fotografia a colori: cielo, nuvole, fiori, visti con gli occhiali assomigliano a tale genere di fotografia, e svolgono una funzione analoga. Filtrare il mondo (o ciò che i sensi naturali ci danno del mondo), sottrarsi a un contatto diretto, che non ci attrae, anzi ci respinge. È noto che la gente non guarda più direttamente un panorama, un paesaggio; lo fotografa o lo cinematografa, per vederlo stampato o proiettato. Per vederlo, dico: non già per rivederlo. In mancanza di apparecchio fotografico o di «cinepresa», adoperiamo gli occhiali da sole. Ci dev'essere sempre, comunque, un diaframma fra i nostri sensi e la natura. Un diaframma, o meglio, una intermediazione «tecnica». Rifiuto dell'immediato naturale. Come altrettanti Hegel (del turismo), noi dell'immediato non vogliamo più sapere. Non che la natura ci spaventi (non l'abbiamo forse imbrigliata, non siamo forse capaci di sopprimerla, all'occorrenza?). Soltanto, ci disturba, nella sua nudità, o schiettezza. Suscita in noi una specie di pruderie. Le lenti degli occhiali, o degli obiettivi, sono un velo con cui esorcizziamo, grazie a Zeiss o a Minolta, una realtà impudica».
Guido Morselli, Diario, 1938/73 (postumo 1988)

Pagina a fianco:
Il collage di immagini a lato offre una visione d'insieme della varietà di intepretazione che la moda ed il design di prodotto ha offerto nel corso dei decenni, dagli anni 60 ad oggi. Designer e progettisti del calibro di Bruno Munari (Fig 7.7)e Alessandro Mendini (Fig. 7.11), sino a stilisti di moda quali Pierre Cardin (Figg. 7.4 e 7.12) e Hussein Chalayan (Figg.7.2, 7.3,7.9,7.10), a giovani designer emergenti (Figg. 7.1, 7.5, 7.6 e7.8), si sono interessati alla montature di occhiali come oggetto di sperimentazione ed approfondimento. Lo studio sui materiali, l'ergonima e lo *shape* dell'occhiale, così come il ruolo e la funzionalità, suscitano, nel settore, motivo di costante ricerca ed innovazione


7.1


7.2

7.3

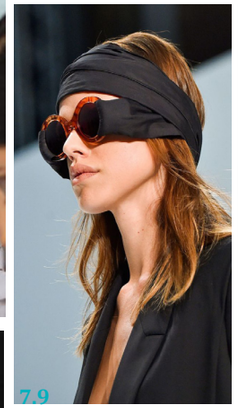
7.4

7.5

7.6

7.7

7.8


7.9

7.10

7.11

7.12

7.2 Oggetto della sperimentazione: la montatura di occhiali

Per montatura s'intende l'occhiale senza lenti. Le lenti sono elementi che si innestano successivamente ma le cui caratteristiche non dipendono dall'aspetto della montatura[84].
Nella lingua inglese si utilizzano due termini, mount per indicare montature a giorno, ovvero senza contorno e frame, più generico, per le montature tradizionali.
Descrizione delle parti che compongono la montatura (Fig. 7.13):

- **Frontale**: comprende i due cerchi, il ponte e i musetti.
- **Cerchi**: sono detti anche anelli o occhi, la loro funzione è quella di contenere le lenti nella corretta posizione.
- **Ponte**: è la parte del frontale che unisce i due cerchi, viene indicata anche con il nome " naso" perché generalmente sovrasta la sella nasale, può essere singolo oppure avere un doppio ponte situato generalmente al limite del cerchio superiore.
- **Naselli**: sono un prolungamento del ponte per consentire l'appoggio della montatura sul naso del portatore.
- **Musetti**: sono gli estremi del frontale che attraverso le cerniere e si collegano alle aste.

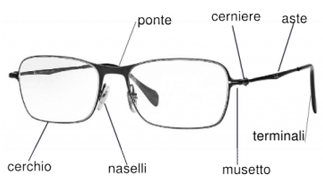
I parametri importanti che definiscono la dimensione della montatura sono il **calibro**, ovvero il diametro orizzontale del cerchio e il **ponte** che rappresenta la distanza che separa i due cerchi. Queste due misure sono riportate all'interno delle aste o all'interno del ponte.
Gli elementi che identificano le montature generalmente sono indicati nella parte interna delle aste, oltre alle due misure di calibro e ponte troviamo indicata la lunghezza delle stanghette, la ditta produttrice, la linea del design, il codice del modello e colore.

Caratteristiche della montatura
La montatura per essere funzionale deve avere determinate caratteristiche. Mantenere le lenti allineate agli occhi dell'utilizzatore in base ai criteri dell'ottica oftalmica, essere confortevolmente calzata (peso, pressione), soddisfare il portatore dal punto di vista estetico.
Gli appoggi della montatura sul viso devono essere saldi e confortevoli, i punti di contatto con la cute non devono essere fastidiosi ed è per questo motivo che i vari designer e costruttori devono trovare i giusti compromessi nella scelta del disegno e dei materiali per soddisfare le esigenze elencate.
L'utilizzo di materiali con basso peso specifico e un grado elevato di plasticità consentono di ottenere nei punti di contatto minor pressione e attrito e una migliore personalizzazione nell'adattamento della montatura al viso del portatore.
Il parametro principale da selezionare è la dimensione appropriata rispetto al viso dell'utilizzatore.

- Forma e dimensioni del ponte
- Assetto e lunghezza delle astine
- Angolo pantoscopico e di avvolgimento.

Classificazione dei tipi
Da alcuni anni per un aumento delle esigenze estetiche, avendo a disposizione tecnologie costruttive e selezione di materiali sempre maggiori, si è notevolmente ampliata la gamma di montature disponibili.
a) montature intere a cerchio chiuso ossia tutte le montature in plastica dove l'inserimento della lente viene fatto a pressione, generalmente a caldo.
b) montature intere a cerchio apribile, tutte le montature generalmente in metallo dove l'inserimento della lente avviene attraverso un punto di apertura diretto da una vite.
c) montature per mezzi occhiali, i classici occhiali da vicino dove la calzata bassa mantiene la visione per lontano fuori dalla lente.
d) montature a giorno, dette anche glasant dove i cerchi sono parzialmente o completamente assenti, in questo caso le lenti sono mantenute in loco da complessi sistemi di ancoraggio al ponte e ai musi. Le lenti sono quindi completamente esposte e forate in corrispondenza del ponte e del musetto, sistema di ancoraggio garantito da viti o perni, o speciali asole che si inseriscono sulla lente.
In queste montature è necessario utilizzare lenti costruite con materiali infrangibili ad alta densità ed elasticità che riducono le rotture non essendo protette dal contorno della montatura.
e)montature nylor con cerchio a metà generalmente nella parte superiore, inferiormente è ancorato un sottile filo di nylon che va a incastrarsi nell'apposito canale fresato nella lente da vista per mantenere la lente in loco.

84. Le informazioni relative a questo paragrafo sono tratte dalla seguente sorgente: https://www.glance24.com/it/news/24/la-montatura-degli-occhiali



7.13

Fig 7.13
Esempio di montatura tradizionale con descrizione degli elementi che la costruiscono

Tipi di materiale

Ogni materiale possiede delle qualità che sono indispensabili per ottenere un determinato risultato come la leggerezza, resistenza meccanica, stabilità dimensionale, possibilità di trattare la superficie, compatibilità con la cute.

Per la leggerezza un ruolo fondamentale è dato dal peso specifico del materiale, per la resistenza meccanica il materiale deve avere elevata resistenza alla flessione, elevata elasticità , resistenza agli urti e memoria di forma.

La stabilità dimensionale è direttamente proporzionale alla resistenza meccanica , l'occhiale deve presentare minime alterazioni dell'assetto iniziale durante il suo utilizzo.

La compatibilità con la cute è un elemento fondamentale, tra il materiale e i tessuti non si devono creare situazioni biologiche di conflitto. Troviamo molto più frequentemente allergie alle montature in metallo, in special modo componenti con nichel, per questo motivo la maggior parte dei produttori ha optato per leghe metalliche nichel free. Anche le colorazioni e verniciature superficiali devono garantire la biocompatibilità con i tessuti.

Alcuni tipi di sudorazione particolarmente acida possono corrodere sia la colorazione superficiale che il materiale stesso con conseguenti irritazioni alla cute.

I trattamenti superficiali sono utilizzati su tutti i tipi di montature per migliorarne l'estetica e cercare di preservare il materiale. Nelle montature di plastica troviamo laccature, verniciature e varie colorazioni. Nelle montature metalliche si eseguono placcature, laminature e trattamenti di galvanica.

- Materiali Polimerici

Per ottenere leggerezza, elasticità e indeformabilità i produttori si orientano sempre di più verso le termoplastiche, in particolare le resine cellulosiche.

Nitrato di cellulosa (celluloide), utilizzato per molti anni, abbandonato per l'eccessiva infiammabilità. Presenta inoltre perdita delle proprietà elastiche con l'invecchiamento.

Acetato di cellulosa (rhodoid), ha sostituito la celluloide per le sue caratteristiche positive, inoltre non è infiammabile, è considerato un materiale di pregio nelle montature in plastica. Le montature si ottengono dalle lastre mediante lavorazioni di fresatura comandate da pantografo.

Acetopropionato di cellulosa (propinato e acetobutirrato), materiale considerato di minor pregio, non per questo scadente poiché molti tipi di lavorazioni e design si ottengono solamente con questo tipo di materiale.

Per ottenere montature con questo materiale lo si riscalda fino alla temperatura poco superiore ai 200°(temperatura di fusione), successivamente viene iniettato nello stampo che riproduce la sagoma della montatura, infine si procede con la colorazione, generalmente ottenuta per immersione per farla rimanere in superficie senza alterarne la trasparenza.

L'optyl è un materiale lavorato per iniezione in stampi, è stato proposta nel 1964 ed è ancora largamente utilizzato, appartiene alla famiglia delle plastiche termoindurenti, è resistente, elastico e stabile ed è più leggero dell'acetato.

Materiali come nylon e policarbonato sono utilizzati specialmente come occhiali protettivi (sportivi e di protezione industriale) per le ottime proprietà di resistenza meccanica e stabilità.

- Materiali metallici

Per la lavorazione degli occhiali in metallo si parte da un filo trafilato a forma di "u" che viene successivamente piegato, saldato e lavorato fino ad ottenere la montatura finita. Le montature vengono successivamente sottoposte a trattamenti di rivestimento e colorazione di vario tipo.

Le principali leghe metalliche utilizzate sono :

Alpacca (rame-zinco-nichel), è una lega largamente utilizzata per gli occhiali che vengono rivestititi da materiali nobili quali oro, palladio, rodio ecc., attraverso processi di laminatura o placcatura.

Monel (rame-nichel-ferro). Possiede proprietà simili all'alpacca ed è utilizzato come suo sostituto nelle montature laminate.

Acciaio. Materiale che presenta caratteristiche di maggior resistenza e incorruttibilità (nella versione inox). Viene utilizzato con i suoi colori naturali presentando scarsa propensione per essere colorato.

Titanio. Materiale leggerissimo e inalterabile anche agli agenti atmosferici. Rimane la soluzione per tutti coloro che pur presentando forme di allergia ai metalli (specie nichel), non vogliono rinunciare all'occhiale in metallo. Si combina bene in lega con tutti i metalli nobili. Come difetto non è saldabile, quindi in caso di rotture la montatura non può essere riparata.

Alluminio. È un materiale utilizzato recentemente che per il basso peso specifico può sostituire il più costoso titanio. Si presta bene alle colorazioni galvaniche, presenta un'elevata malleabilità,

duttilità e resistenza alla corrosione

- Materiale ligneo

Quasi tutte le qualità di legni presenti possono essere sfruttate per montature: pino, ciliegio, abete, sino al bambù. Per il processo produttivo, si utilizza perlopiù in laminato e la curvatura viene trattata con tecnologie tradizionali quali la curvatura a vapore.

7.3 Eyewear nel Design del Prodotto

Premessa

In questa sezione si riportano ventidue casi studio di montature di occhiali; i riferimenti selezionati sono stati ingegnerizzati e distribuiti nella filiera produttiva del settore ottico e sono, per la maggior parte, acquistabili in e-commerce o nei negozi fisici. In particolare, i casi riportati sono stati selezionati partendo dall'idea di rintracciare montature che evidenziassero almeno una determinata peculiarità in termini costruttivi e meccanici, con particolare interesse nel focalizzare l'attenzione sul nodo tra frontalino e stecche, sede genericamente consueta di alloggio della cerniera. L'indagine è stata condotta principalmente servendosi dello strumento di ricerca online, via web.
L'inestimabile quantità di risorse offerte dal contenitore di internet, ha riportato moltissimi esempi e spunti validi, che hanno richiesto l'elaborazione di un sistema ben articolato e strutturato, per soddisfare l'intero ventaglio di variabili legate all'analisi ed alla suddivisione dei casi studio. Inizialmente, è stato fondamentale riconoscere che il concetto di cerniera può essere declinato in una vasta moltitudine di alternative, che possono essere distinte, ad esempio, tra proprietà meccaniche, prestazioni materiche o soluzioni inventive ed originali che fanno un mix delle due precedenti. Non sempre le alternative reperite offrono risultati apprezzabili esteticamente o funzionalmente, spesso l'analisi dei prodotti individuati, favorisce l'impressione che l'armonia tra la funzione e l'aspetto risenta di una castrazione su uno dei due fronti (da precisare che quasi tutti i modelli rintracciati sono oggetto di studio "teorico", in quanto non è stato possibile in questa sede "toccare con mano" gli stessi): ad esempio, alcune montature - coperte da brevetto nella soluzione della cerniera - presentano artifici tecnici estremamente raffinati, ma compromettono ineluttabilmente il design dell'oggetto; altri esempi riportati, invece, dichiarano con convinzione l'intenzione artistica della reinterpretazione dell'accessorio occhiale, pregiudicando la portabilità ed il senso dello strumento di per sé. Uno spartiacque determinante è rappresentato dall'analisi sulle tecniche di riproduzione delle montature riportate nei casi studio: a prescindere dalla matrice materica, le soluzioni tecnologie individuate sono molteplici e determinanti per le premesse espresse sinora. Come visto nei capitoli precedenti (cfr. cap. 5), interesse di questo studio, è sottolineare il valore delle tecnologie dell'additive manufacturing, nella misura in cui hanno di fatto aperto le porte alla progettabilità ed alla scalabilità dei metamateriali (meccanici). Saranno quindi messi in evidenza i casi studio che si avvalgono di questo apparato strumentale, e sarà approfondito l'aspetto industriale della riproducibilità di questa categoria di prodotti. L'analisi è stata fondamentale per la definizione dei concept proposti in questo volume, che tentano di posizionarsi nel segmento del quadro di studio che include l'additive manufacturing e che si inserisce nel mercato come un prodotto originale che mantiene un equilibrio tra aspetto e funzionalità.

Criteri di analisi dei casi studio

L'indagine effettuata mira a definire le caratteristiche peculiari di questi manufatti, le tecnologie di produzione, i vincoli progettuali dettati dalle soluzioni tecnologiche applicate come sostitutivi della cerniera, ed i caratteri estetici legati all'aspetto generale dell'oggetto. Nello specifico, i punti messi a sistema e portati in analisi in questa sede sono:

- *Materiali*

si analizza la tipologia di materiale scelto, **la classe o famiglia di afferenza, le caratteristiche tecniche del materiale**. Nello specifico si prendono in considerazione tre classi di materiali: Legno, Polimero, Lega metallica. Si cita, fuori schema, un concept in cuoio.

- *Shape*

Questa sezione discute **la morfologia della montatura e l'ergonomia dell'oggetto**.
Per definire la sagoma dell'oggetto, oltre ad una descrizione

narrativa, si propone una tabella di valori che mette in relazione i seguenti aspetti:
(i) spessore, utilizzando la coppia di parole chiave *Thick-Thin* e (ii) spigolosità, attraverso le parole chiave *sharped-rounded* (riferimenti riportati nello schema allegato).
Il range va da 0 a 5, dove con zero s'intende un valore neutro tra la coppia e cinque la tendenza massima verso uno dei due caratteri della coppia messa in relazione.

- *Tecnica di riproduzione*

In questa sezione si riporta **il percorso produttivo dell'oggetto**.
La suddivisione è prevista di tre opzioni:
Molding, per gli oggetti a stampo
Laser/taglio, per materiali ricavati da fogli (2D)
SLS per oggetti stampanti in 3D (comprende anche FMD)

- *Aspetto estetico*

Considerazione sulla qualità del prodotto in termini sensoriali ed emozionali: come si presenta alla vista e al tatto, quali le palette di colori selezionate e quali le rifiniture (presenza o assenza di varianti estetiche e messa a confronto delle eventuali varianti). Le diciture sono:
Tradizionale, per montature classiche
High Tech, per montatura minimale con soluzioni tecnologiche particolari
Pop, colorati, ironici
Sportivo, montatura pensata per lo sport

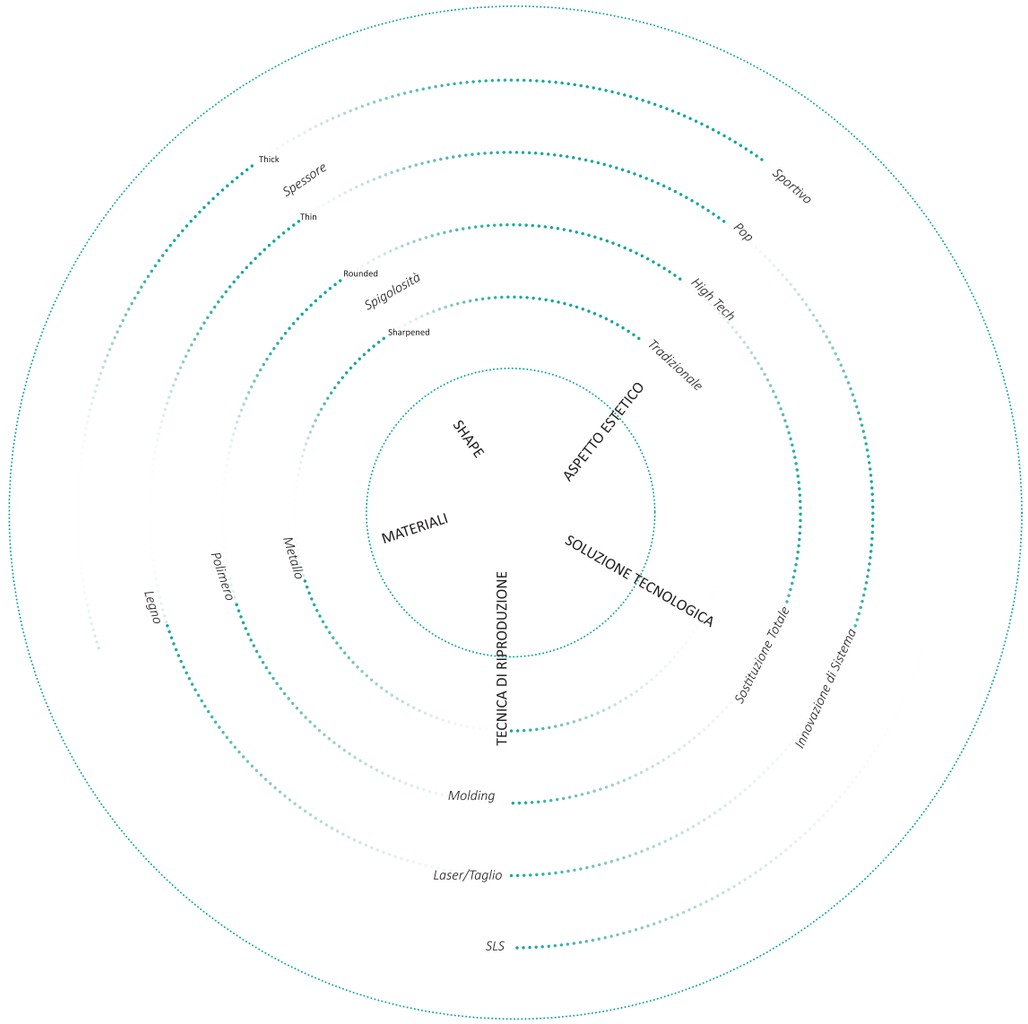
- *Soluzione tecnologica*

Descrizione della **soluzione applicata in sostituzione alla cerniera tradizionale**:
In questa sezione si valuta il grado di complessità Per questo punto, il criterio di selezione dei casi studio, si basa sull'analisi di uno specifico criterio: la presenza o meno di una cerniera come meccanismo di apertura e chiusura della montatura. Tale criterio offre dunque due parametri, definiti in questo contesto, come:

A - **sostituzione totale** - il sistema di apertura e chiusura delle stecche non è costituito da una cerniera

B - **innovazione di sistema** - reinterpretazione del concetto di cerniera o creazione di un sistema di vincoli alternativo alla cerniera

Fig 7.14
Sistema grafico di visualizzazione dei criteri messi individuati nella fase di analisi dei casi studio di montature



Case Studies

I casi studio riportati presentano particolarità in termini di costruzione delle cerniere. Lo scopo è mettere in evidenza le varianti di cerniere rintracciate online. I casi studio esposti si suddividono principalmente per tipologia di materiale (metallo, polimero e legno). Ogni caso si struttura con uno specchietto riassuntivo in cui si segnalano: Azienda rivenditrice (dove presente), Designer (nome del designer o dell'azienda che ha prodotto il concept), Anno di produzione (a quando risale l'ideale del prodotto, non l'anno di messa in vendita), Shape (s'intende, genericamente, le caratteristiche distintive dell'oggetto), Peso (dove disponibile la cifra, altrimenti classificato come "ultralight" per i super leggeri, normal weight per gli standard e bold per imassicci), Tecnica di riproduzione (tecnologia industriale), Materiale (se uno, si indica direttamente il nome, se più di uno viene segnalato con "mix"), descrizione della cerniera (si rifà alle diciture (a) e (b) del diagramma Fig 7.14) ed infine, Riferimenti (link online da cui sono state tratte le fonti e le immagini).
Tutti i casi presentati sono stati messi in produzione e sono attualmente acquistabili in e-commerce.

- *Keywords*

Le parole chiave utilizzate per la ricerca online dei casi studi selezionati sono: *hingless, free-hinge, no hinge glasses, eyewear free hinge design, hinge design eyewear, hinge-less frame, living hinge.*

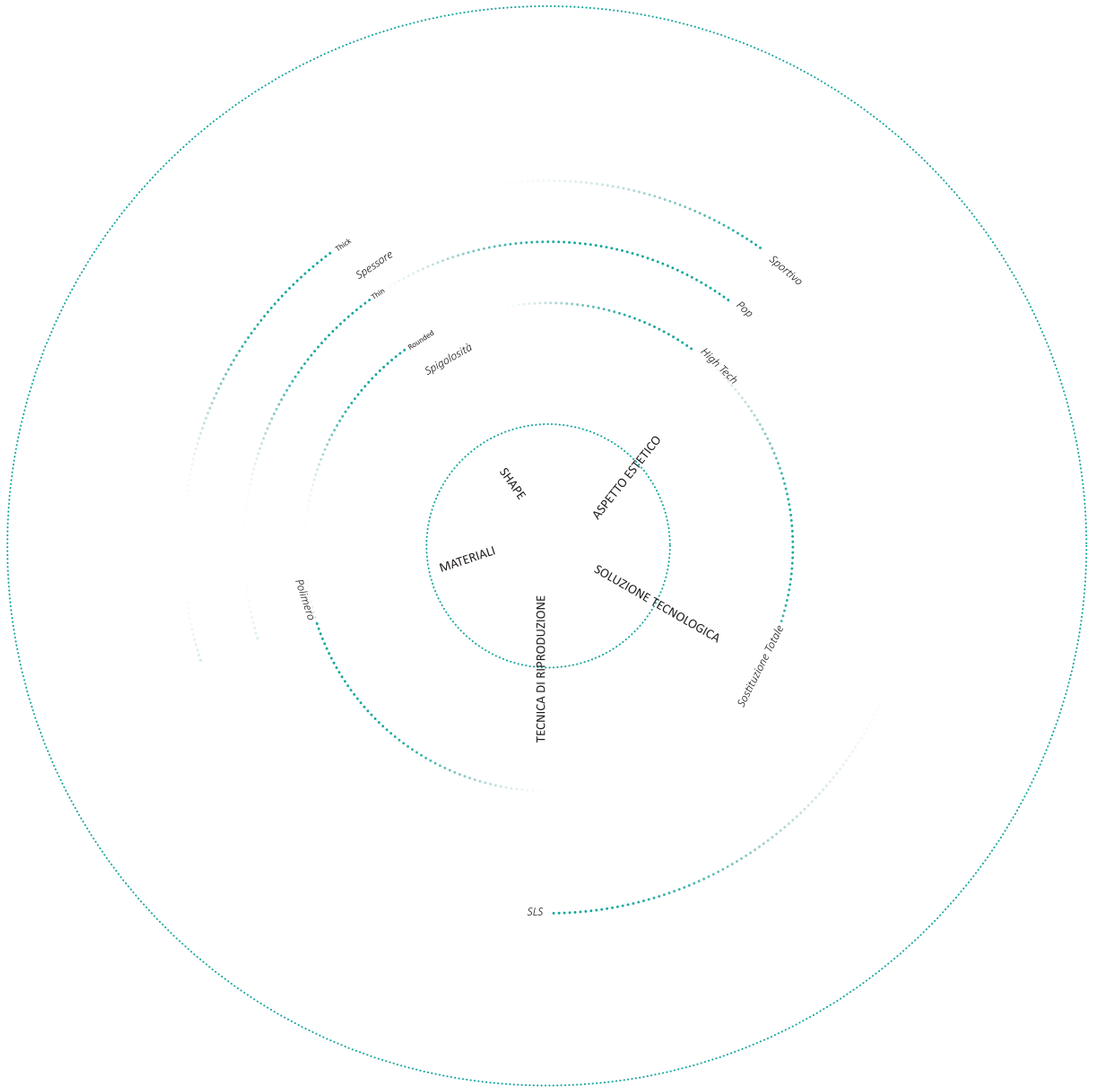
Caso Studio: Ron ARAD - PQ eyewear

Azienda: PQ Eyewear
Designer: Ron Arad
Anno di produzione: 2015 (sembrerebbero essere stati ritirati dal commercio)
Shape: Numero modelli prodotti: 33, suddivisi in due collezioni, “A-frame” e B Frame”
Peso: 180 grammi
Tecnica di Riproduzione: SLS
Materiale: Nylon
Descrizione della cerniera: tipologia (a) sostituzione totale.

Riferimenti:
http://www.italiansdoitbetter.it/vincitori/pq-by-ron-arad/;
http://accessorama-d.blogautore.repubblica.it/2015/03/02/ron-arad-disegna-occhiali-da-sole-3d/
https://it.3dsystems.com/blog/2015/06/sls-printed-shades-pq-eyewear-infuse-creativity-sunglasses-design-video
https://www.3ders.org/articles/20151031-introducing-d-frames-ron-arads-3d-printed-pq-eyewear-sunglasses.html

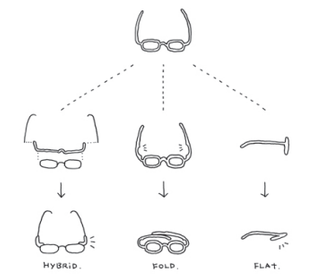
«People with personality want to wear glasses anyway. They are for people who like what they see and recognize what they like about it. Anyone that likes our glasses should enjoy them.»

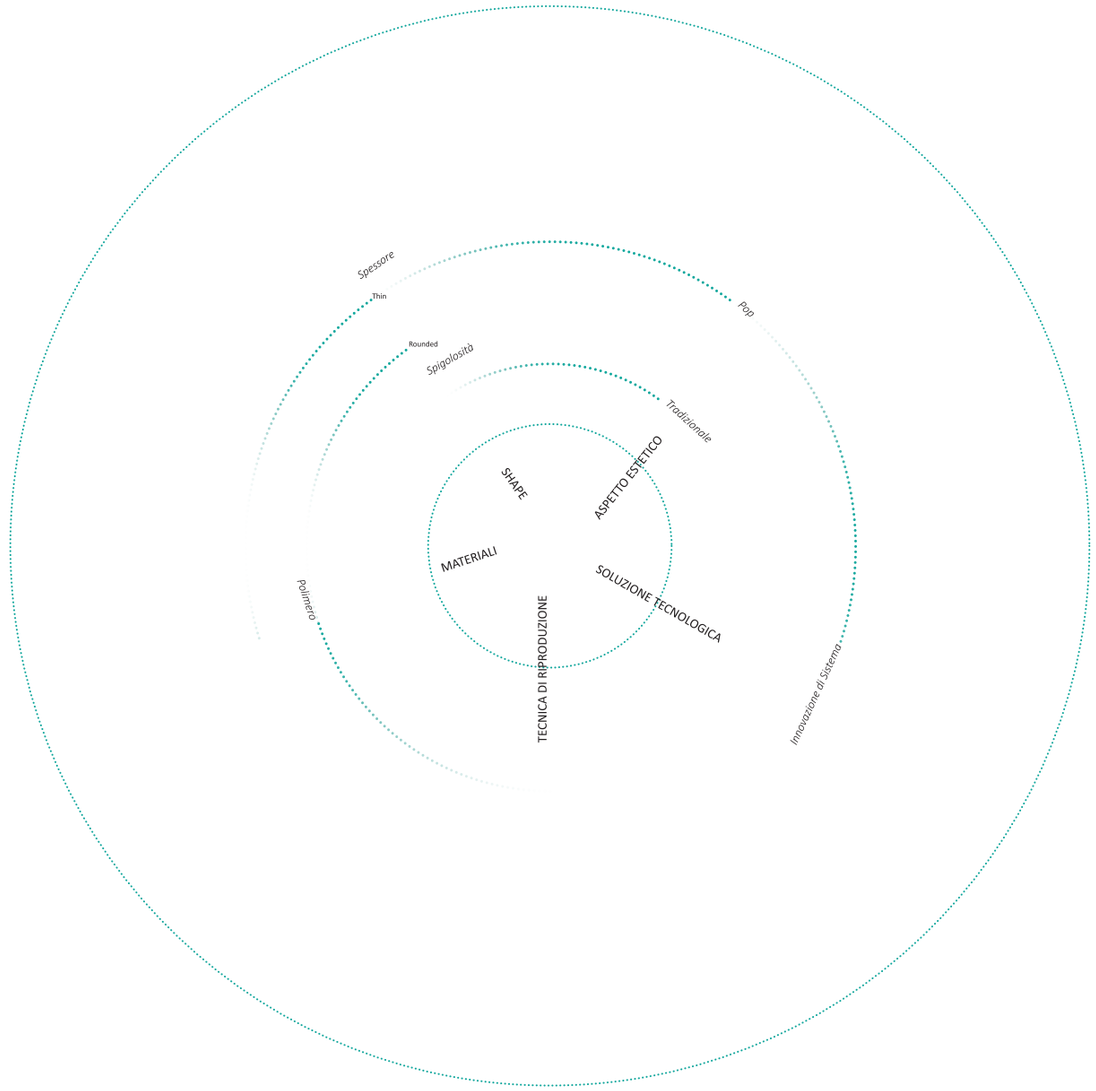
Ron Arad about PQ eyewear



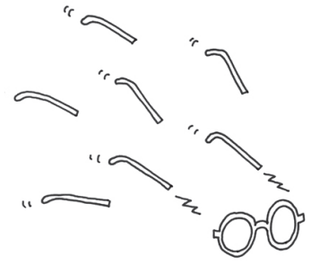
Caso studio: Nendo 1- zerogra-fold (A) + Zerogra -though (B)

Azienda: Megane-Ichiba
Designer: Nendo
Anno di produzione: 2015
Shape: freehinge
Numero modelli prodotti: 3 linee
Peso: ultralight
Tecnica di Riproduzione: laser
Materiale: Carved titanium
Descrizione della cerniera: assente
Riferimento:http://www.nendo.jp/en/works/zerogra-2/zerogra-fold/?

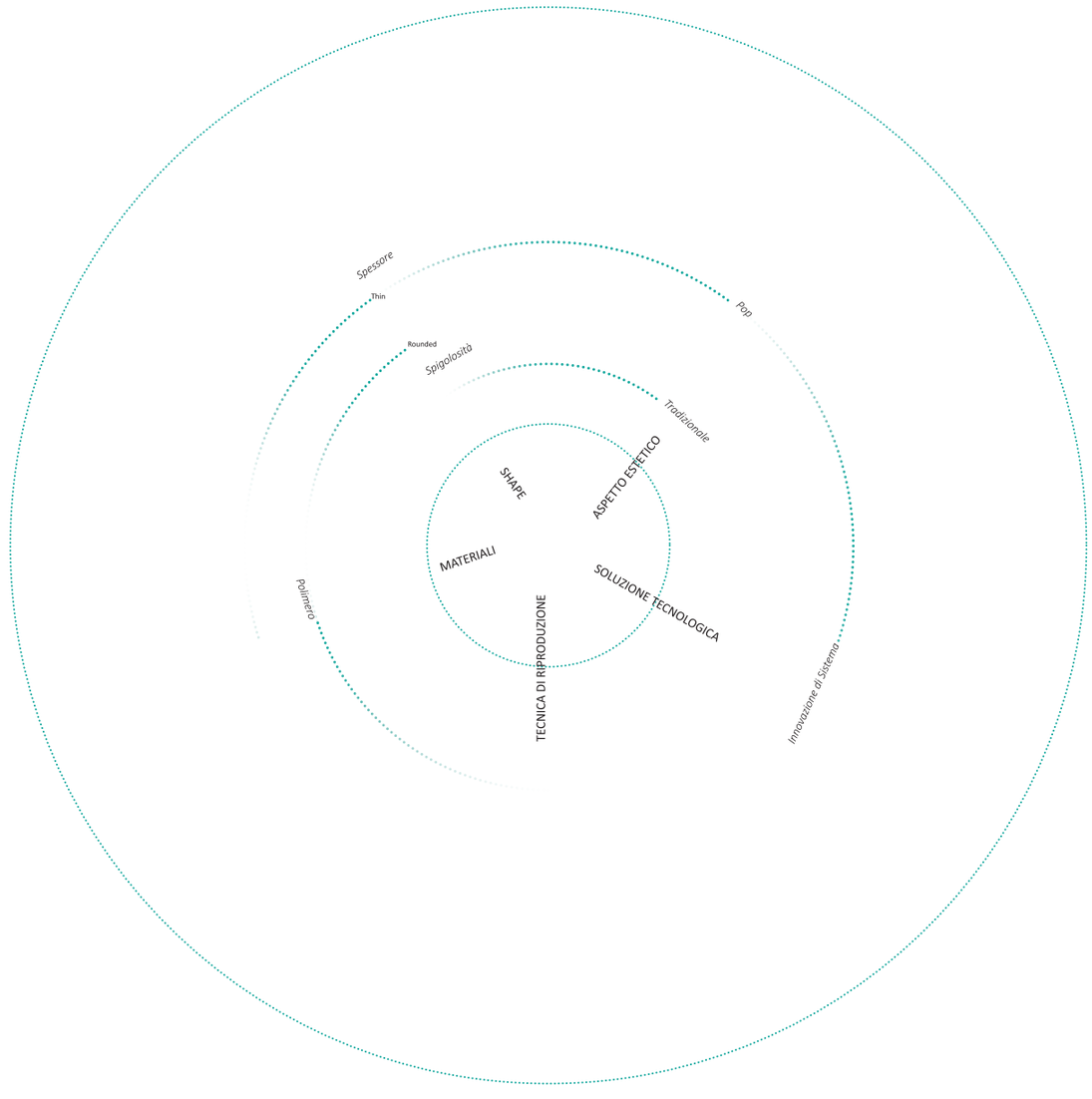




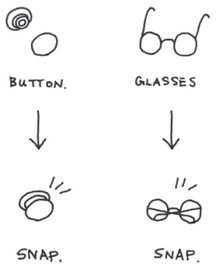
Caso studio: Nendo 2 - magne-hinge



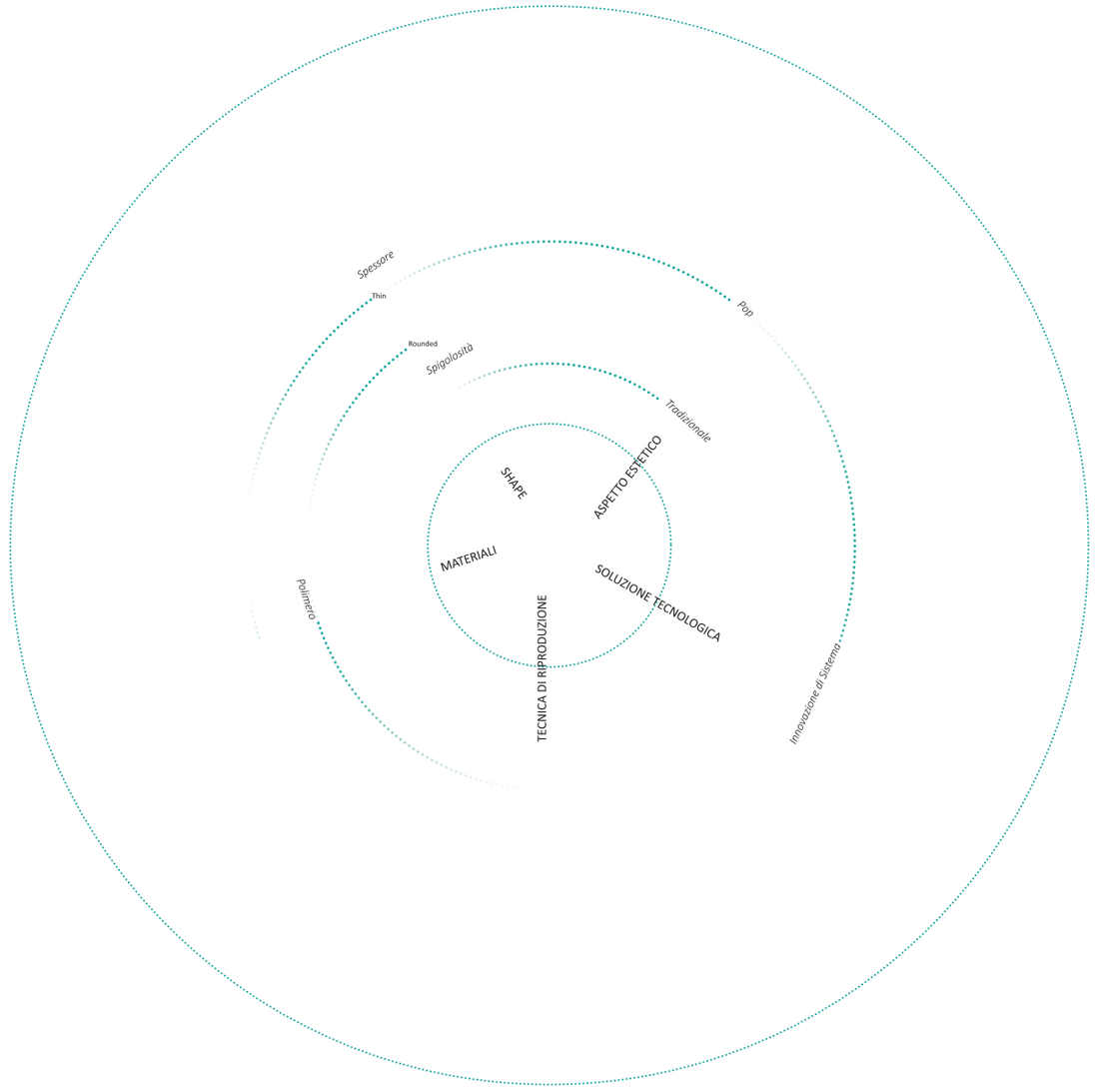
Azienda: Nendo
Designer: Nendo
Anno di produzione: 2014
Shape: freehinge, magnets
Numero modelli prodotti: 3 linee
Peso: ultralight
Tecnica di Riproduzione: laser
Materiale: Carved titanium
Descrizione della cerniera: assente
Riferimento:http://www.nendo.jp/en/works/magne-hinge-2/?egenre



Caso studio: Nendo 3 - Snap



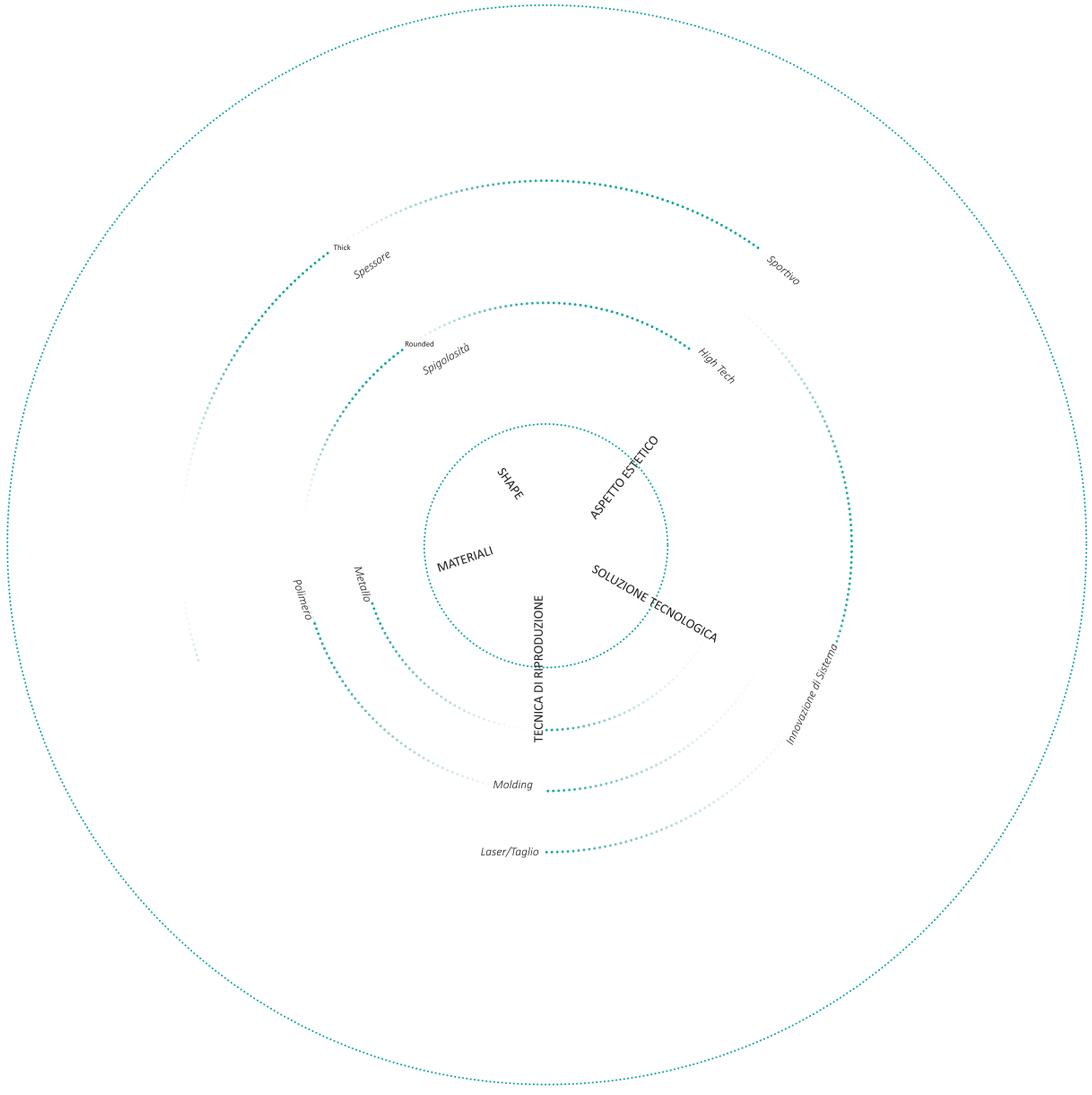
Azienda: Seibu dpt stores (distribuiti da)
Designer: NENDO
Anno di produzione: 2014
Shape: rounded, flessibile
Numero modelli prodotti: 1 in 8 colori
Peso: N/A
Tecnica di Riproduzione: N/A
Materiale: Light Polycarbonate resin
Descrizione della cerniera: tipologia (b)
Riferimento:https://www.designboom.com/design/snap-reading-computer-glasses-nendo-temple-nose-piece-06-18-2014/



Caso Studio: Starck Eyes

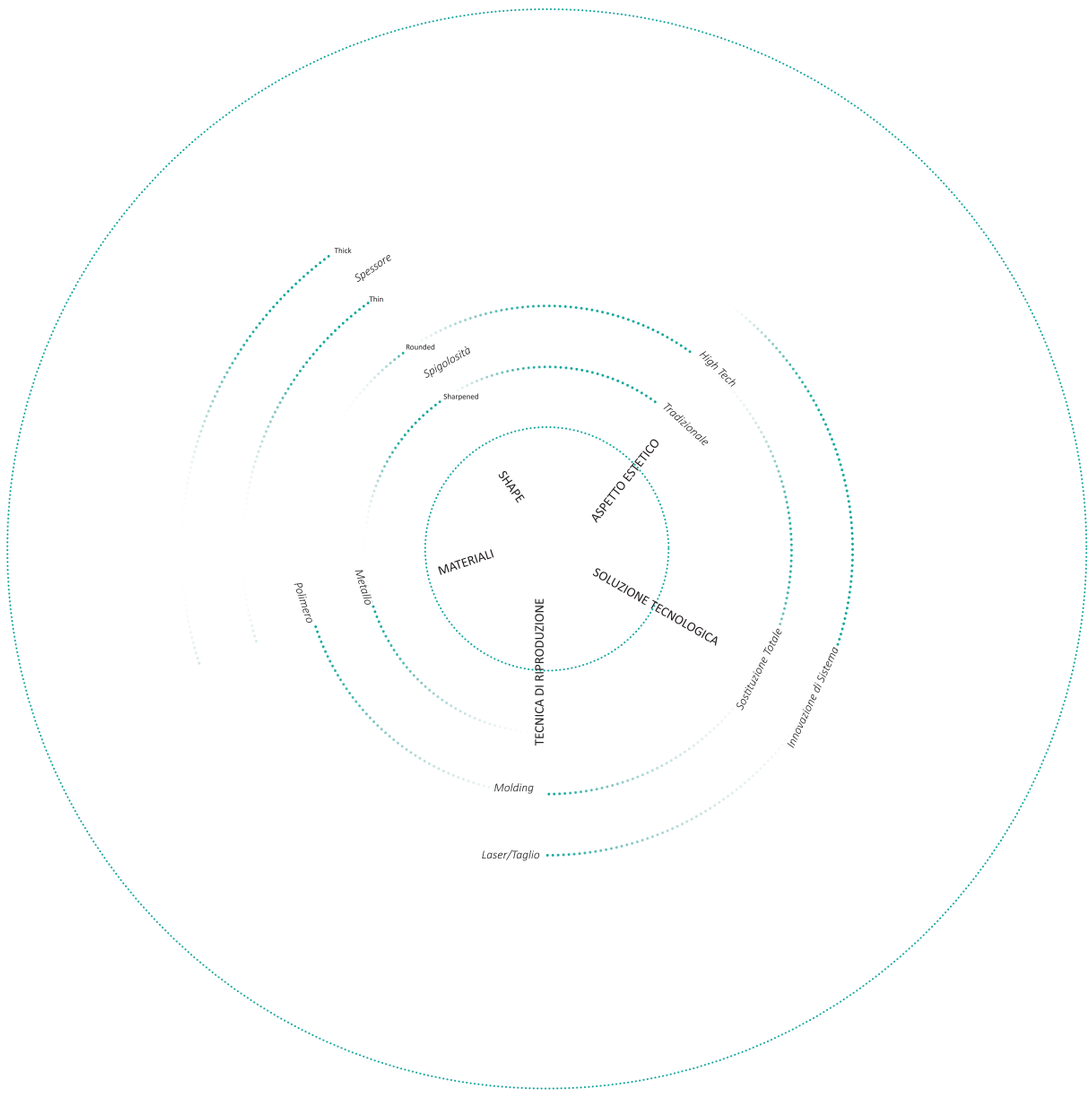
Azienda: Luxottica
Designer: Starck
Anno di produzione: 2017
Shape: alluminium, minimalist, SLS
Numero modelli prodotti: N/A
Peso: ultralight
Tecnica di Riproduzione: laser, SLS
Materiale: Nylon, Swedish surgical stainless steel
Descrizione della cerniera: nodo in nylon sul quale ruota la stecca in alluminio
Riferimento:
https://www.starck.com/starck-eyes-summer-collection-2016-luxottica-p3323

Starck Eyes è entrato nel portafoglio marchi del Gruppo in occasione dell'acquisizione di Alain Mikli nel 2013. La collezione di Starck Eyes celebra il minimalismo e l'innovazione attraverso un'esclusiva rivoluzione tecnologica: il brevettato Biolink®, una cerniera senza vite concepita sul modello della clavicola umana, che permette un movimento completo a 360° per una resistenza e un comfort maggiori. La biomeccanica al servizio della vista

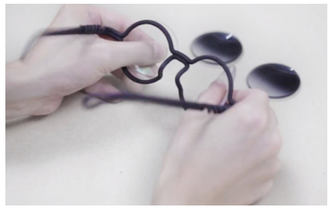


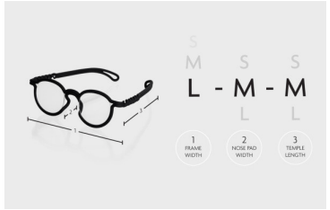
Caso studio: 999.9 (Four Nines) - alloy - special hinge

Azienda: 999.9 (4nines)
Designer: 999.9
Anno di produzione: 2018
Shape: componibile, customizzabile
Numero modelli prodotti: 4 linee
Peso: N/A
Tecnica di Riproduzione: N/A (si esclude SLS)
Materiale: Mix
Descrizione della cerniera: tipologia (a) + (b)
Riferimento: http://www.fournines.co.jp/en/concept/

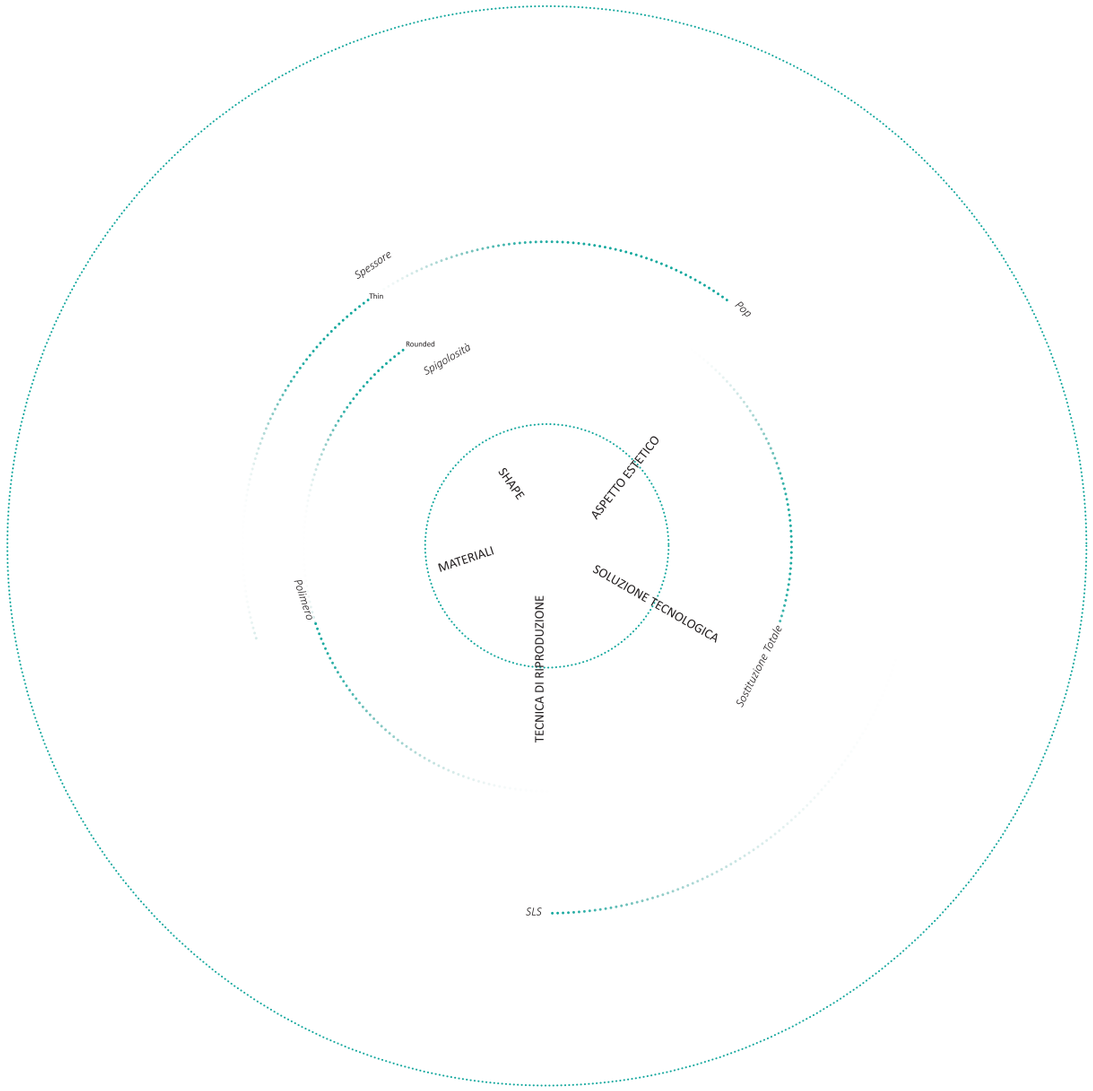


Caso Studio: MONO



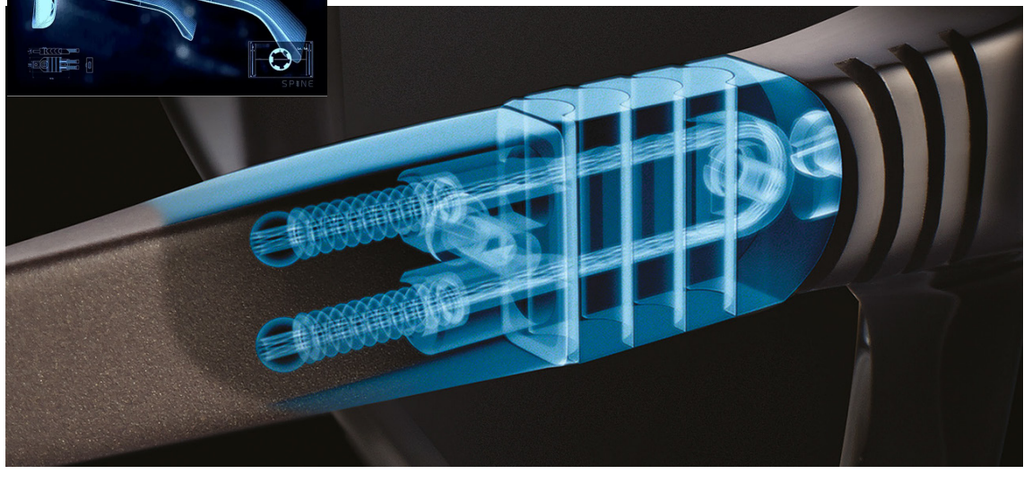


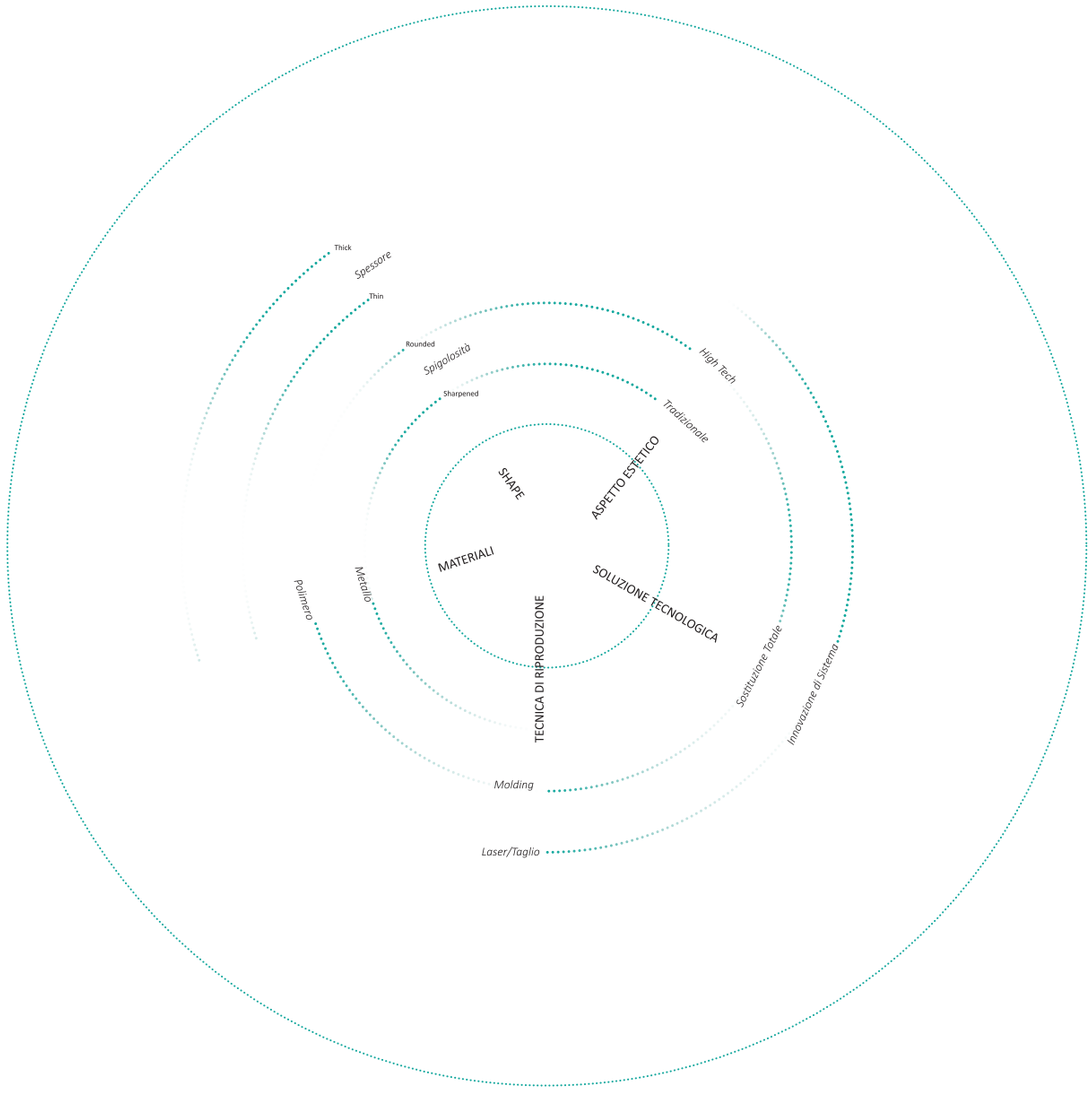
Azienda: Kickstarter
Designer: MONO
Anno di produzione: 2015
Shape: Pop, customizzabile
Numero modelli prodotti: 1
Peso: Ultralight
Tecnica di Riproduzione: SLS
Materiale: Nylon
Descrizione della cerniera: tipologia (b)
Riferimenti: https://www.indiegogo.com/projects/mono-an-eyewear-3d-printed-to-fit-your-face#/



Caso Studio: SPINE

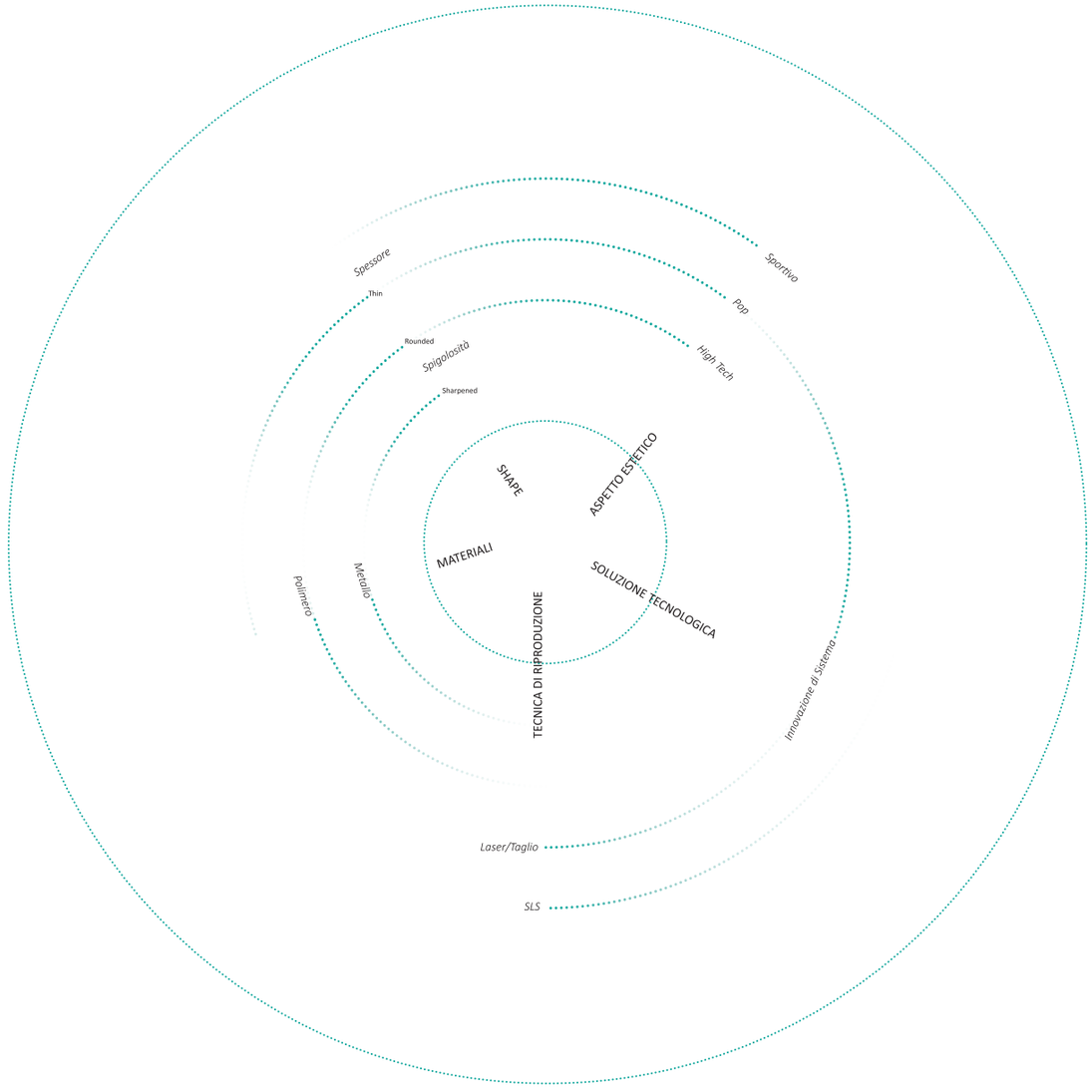
Azienda: REM Eyewear
Designer: SPINE
Anno di produzione: 2015
Shape: High Tech, metallico
Numero modelli prodotti: 2 linee
Peso: N/A
Tecnica di Riproduzione: N/A (si esclude SLS)
Materiale: Mix Polimero/metallo
Descrizione della cerniera: tipologia (b)
Riferimenti: https://gizmodo.com/a-clever-segmented-hinge-ensures-these-glasses-fit-anyo-1670622712
http://www.spineoptics.com/tech/
https://technogog.com/review/review-of-spine-optics-eyewear/





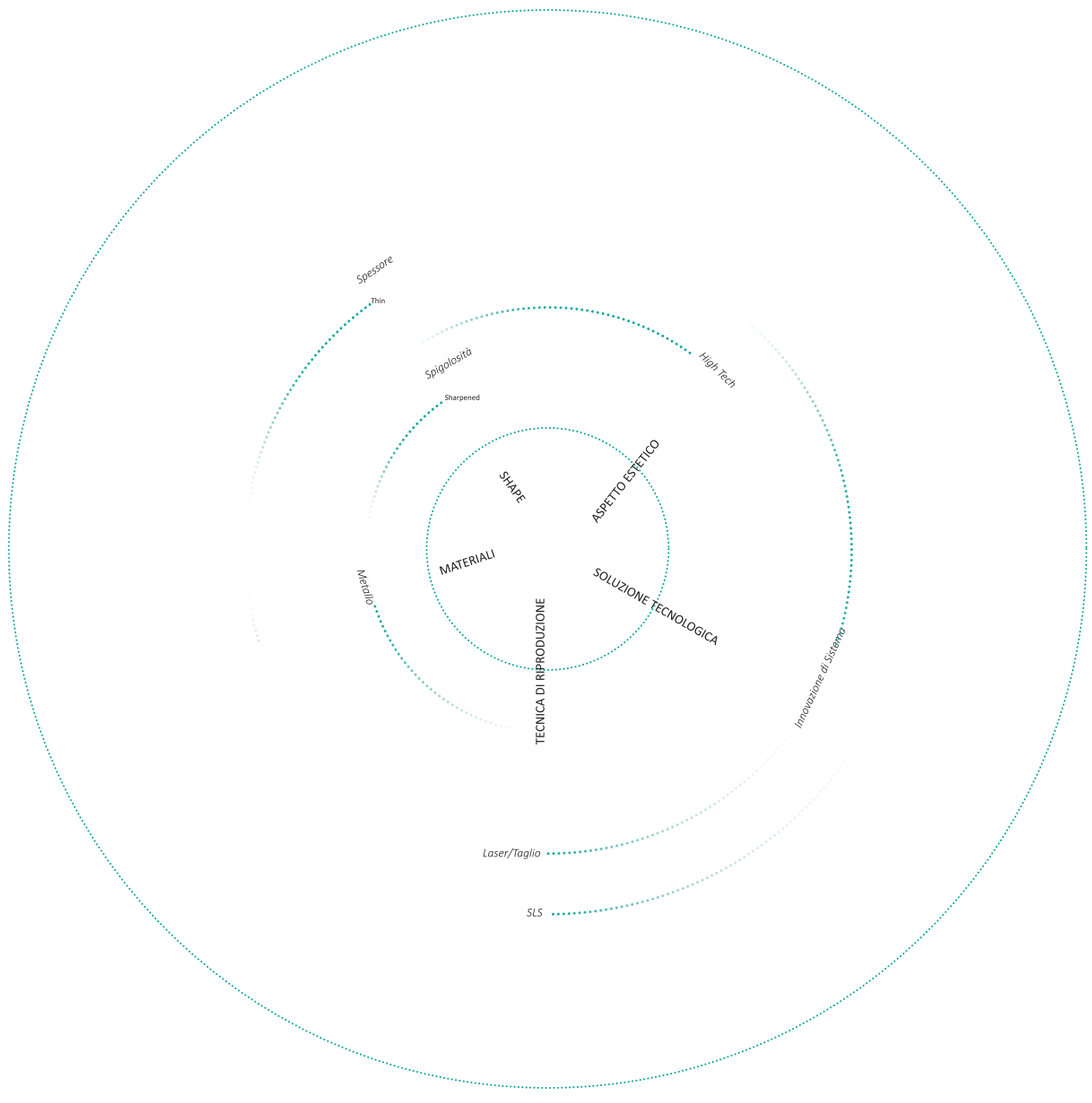
Caso studio: ic!Berlin

Azienda: ic! berlin
Designer: ic! berlin
Anno di produzione: 2018
Shape: Pop, ultralight, special hinge a click in alloy
Numero modelli prodotti: svariate serie
Peso: 19g
Tecnica di Riproduzione: Mix taglio laser/SLS
Materiale: Metallo, Nylon
Descrizione della cerniera: tipologia (b)
Riferimenti:
http://www.ic-berlin.de/the-hinge



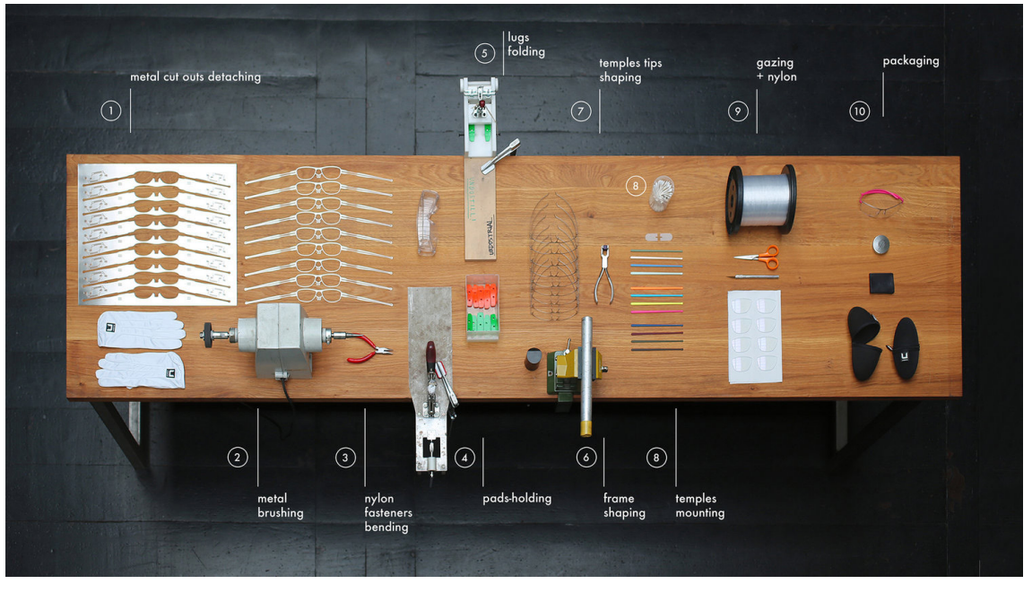
Caso studio: Hoet

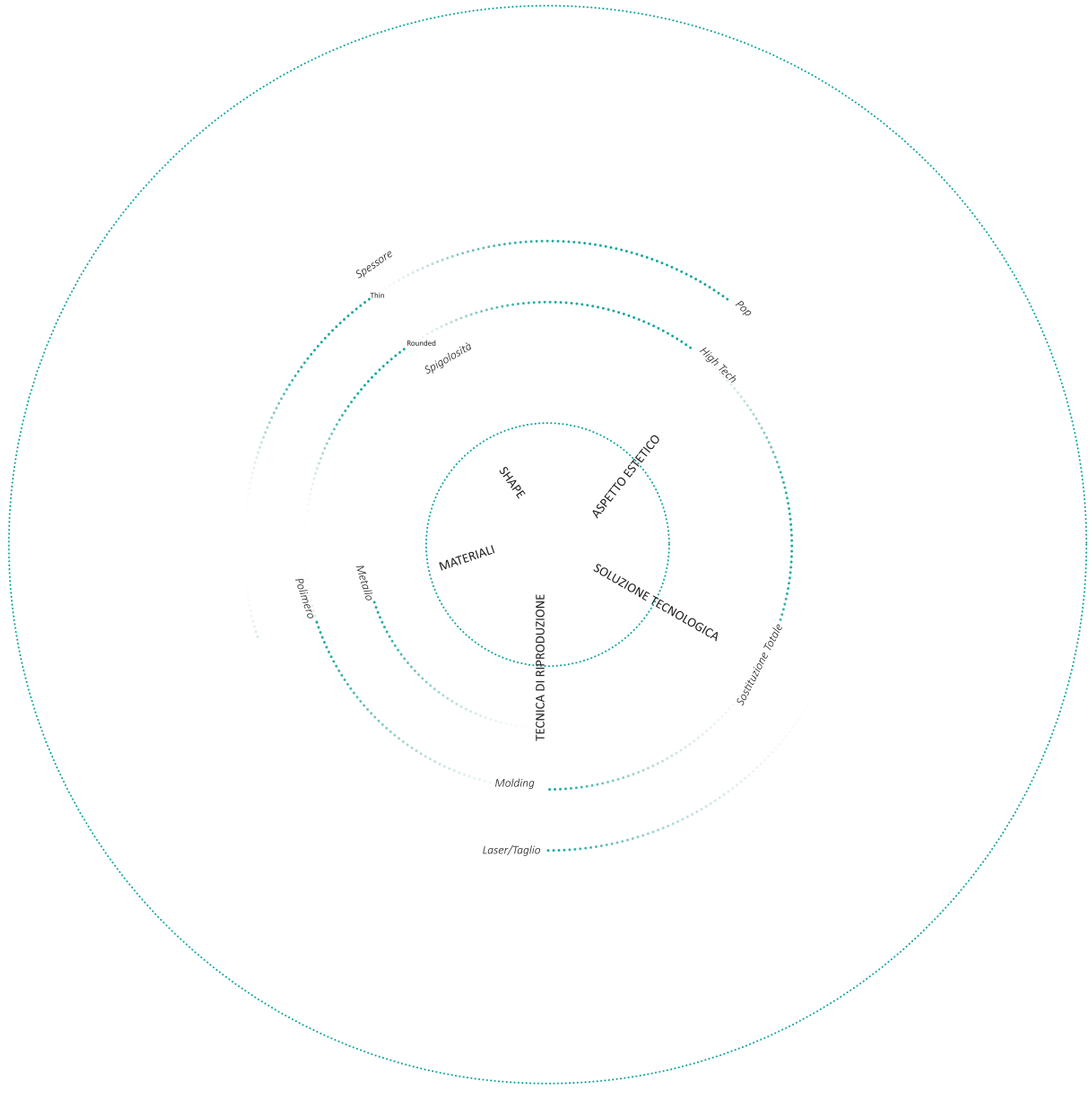
Azienda: Hoet
Designer:Hoet
Anno di produzione: N/A
Shape: Ultralight, customizable, HighTech, vertebrated hinge
Numero modelli prodotti: 2
Peso: N/A
Tecnica di Riproduzione: SLS metallo 3D printing alloy
Materiale: Metallo, titanium
Descrizione della cerniera: tipologia (a)
Riferimenti:https://hoet.be/en



Caso studio: Undostrial

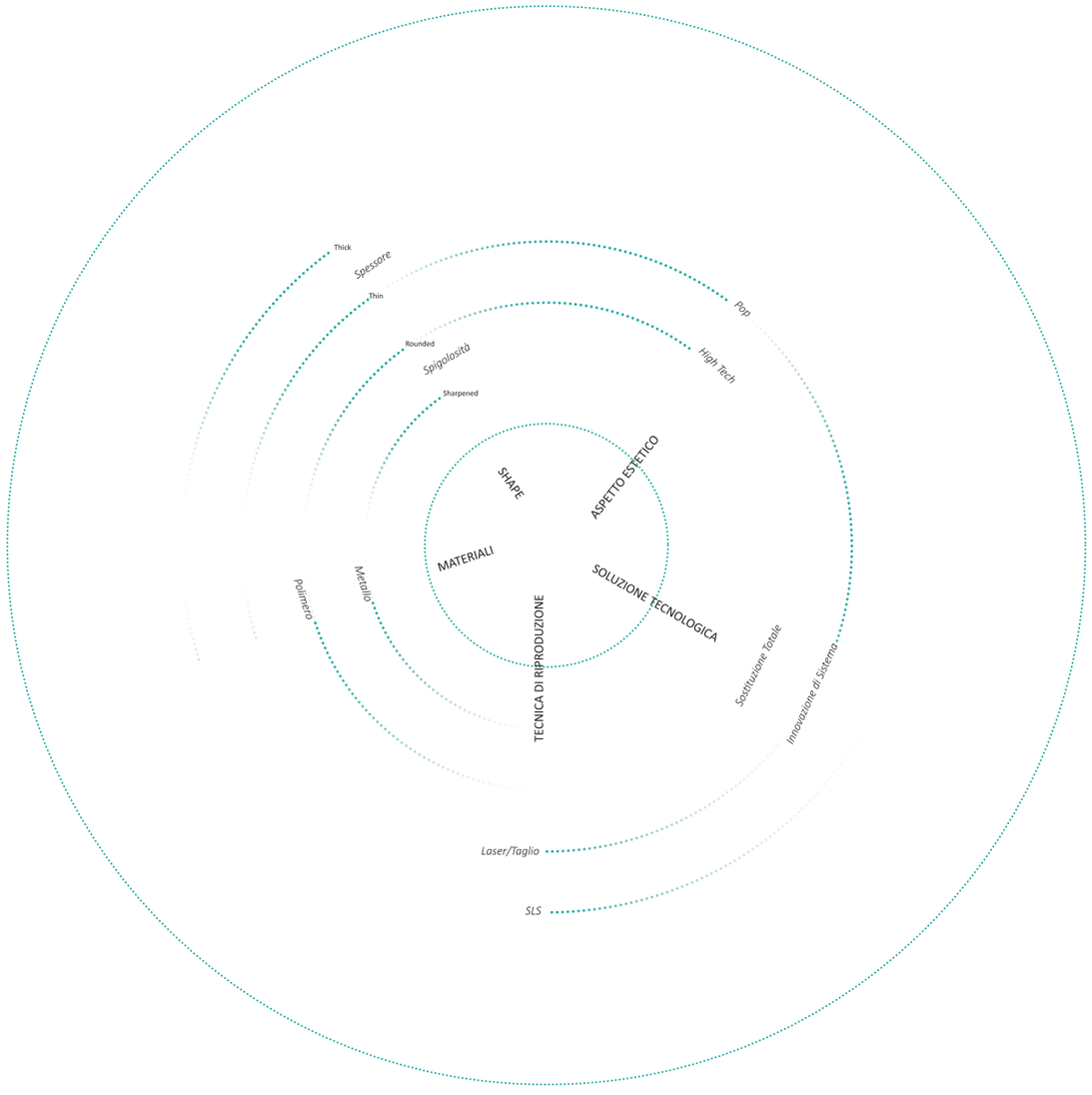
Designer: Karl
Anno di produzione: N/A
Shape: freehinge, stecche custom
Numero modelli prodotti: N/A
Peso: ultralight
Tecnica di Riproduzione: laser, moulding
Materiale: softgum ecofriendly plastic, Swedish surgical stainless steel
Descrizione della cerniera: assente
Riferimento: http://www.undostrial.com/



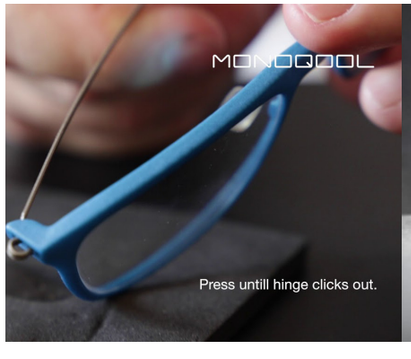


Caso studio: Gotti - metallo

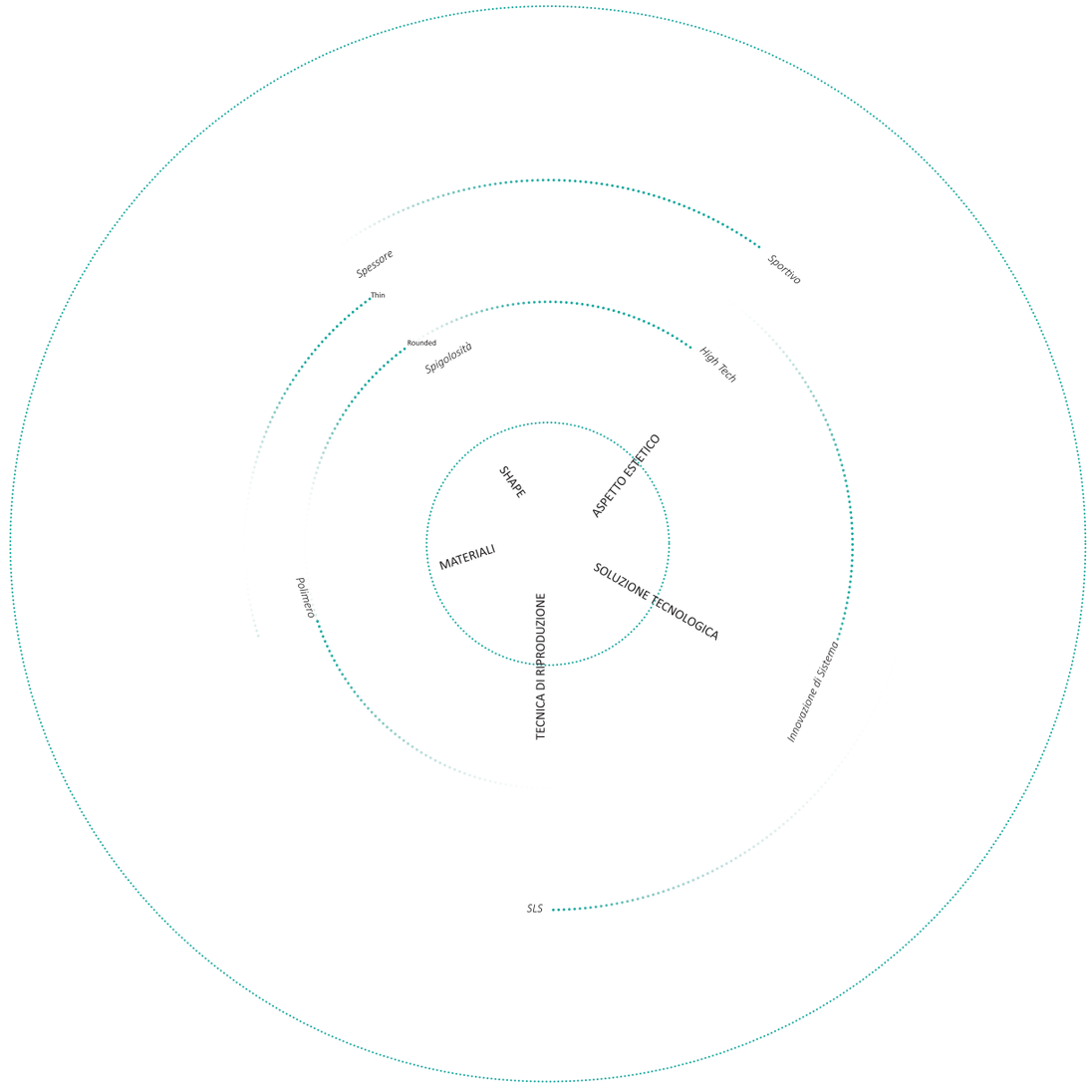
Designer: Gotti
Anno di produzione: 2017
Shape: alluminium, minimalist, SLS
Numero modelli prodotti: N/A
Peso: ultralight
Tecnica di Riproduzione: laser, SLS
Materiale: Nylon, Swedish surgical stainless steel
Descrizione della cerniera: nodo in nylon sul quale ruota la stecca in alluminio
Riferimento:
https://www.lunettes-originales.fr/actualites/gotti-dimension-collection-lunettes-3d-acier/



Caso studio; MonoQool - stampa 3D polimero no hinge

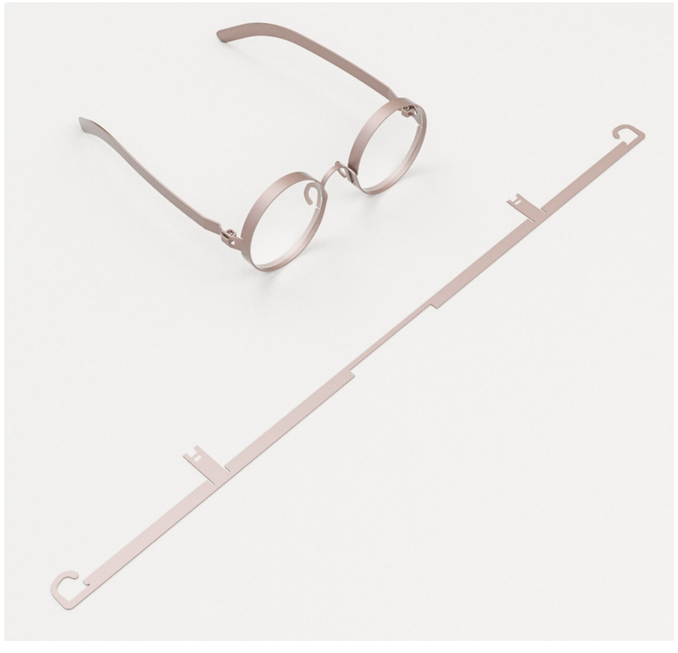


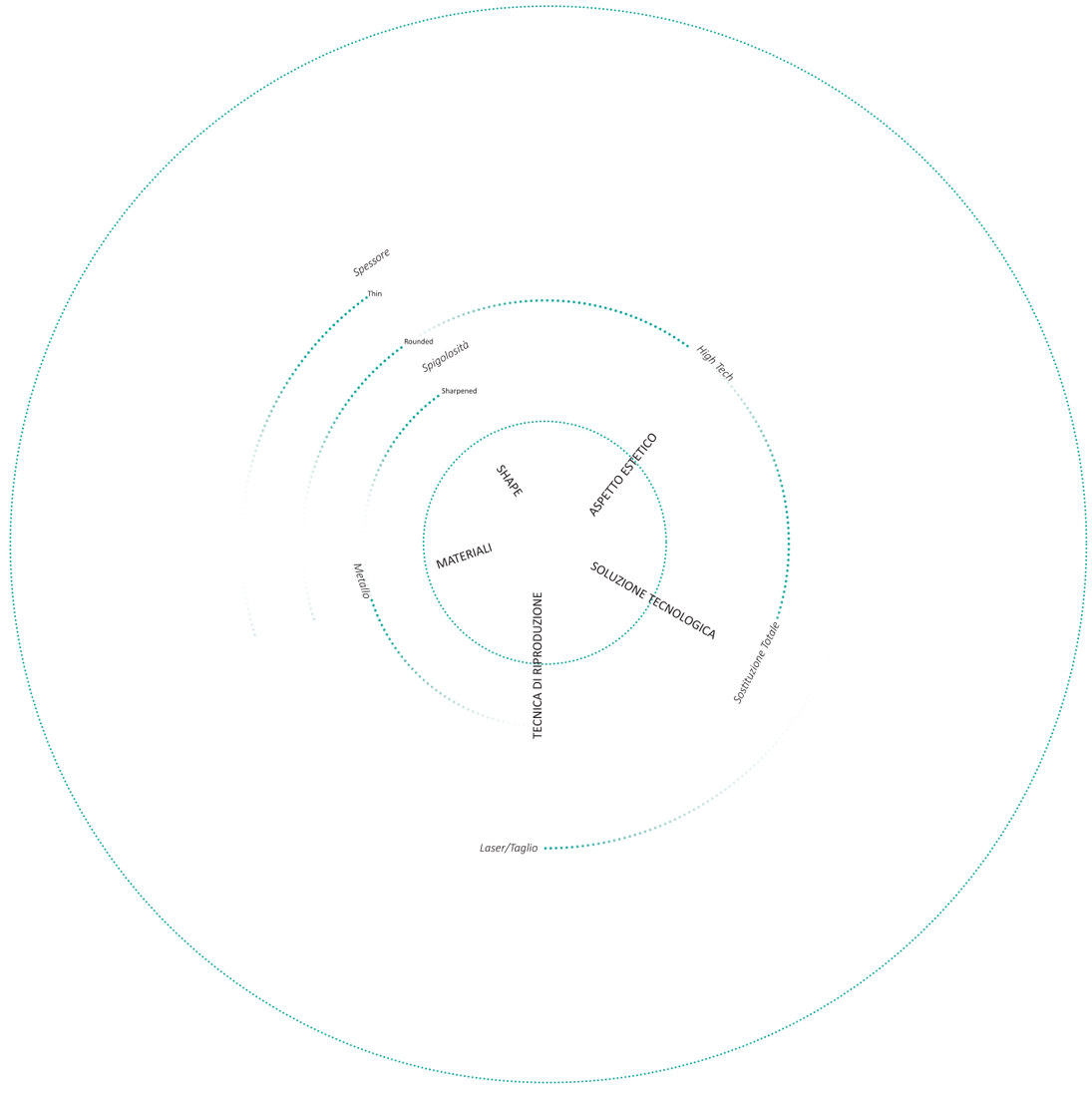
Designer: Monoqool
Anno di produzione: N/A
Shape: custom, 3D printed, no hinge
Numero modelli prodotti: 1
Peso: ultralight
Tecnica di Riproduzione: SLS
Materiale: polyammide
Descrizione della cerniera: incastro
Riferimento:https://monoqool.com/screwless-hinges/



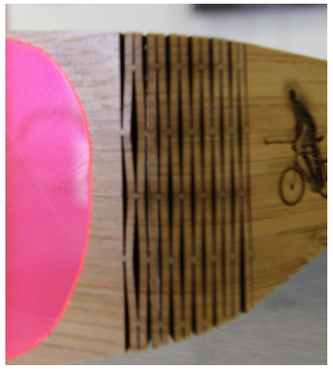
Caso studio: FRAME hinge patented by Mikyta

Azienda: Frame (Ana Relvão and Gerhardt Kellermann)
Designer: Mykita
Anno di produzione: 2017
Shape: alluminium, minimalist
Numero modelli prodotti: 1
Peso: ultralight
Tecnica di Riproduzione: laser, curved aluminium
Materiale: Nylon, Swedish surgical stainless steel
Descrizione della cerniera: nodo in nylon sul quale ruota la stecca in alluminio
Riferimento: https://minimalissimo.com/frame/

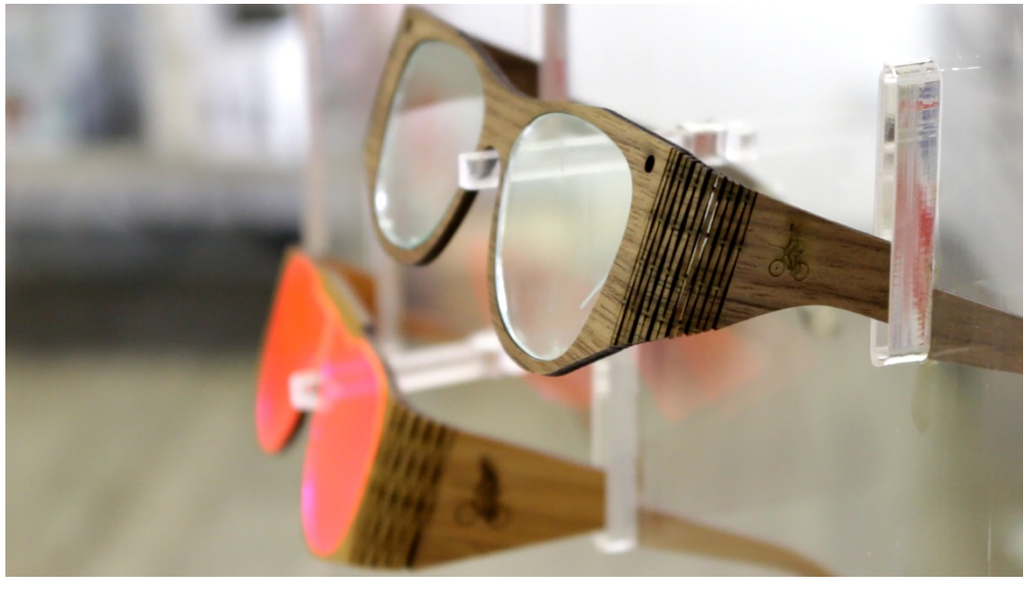


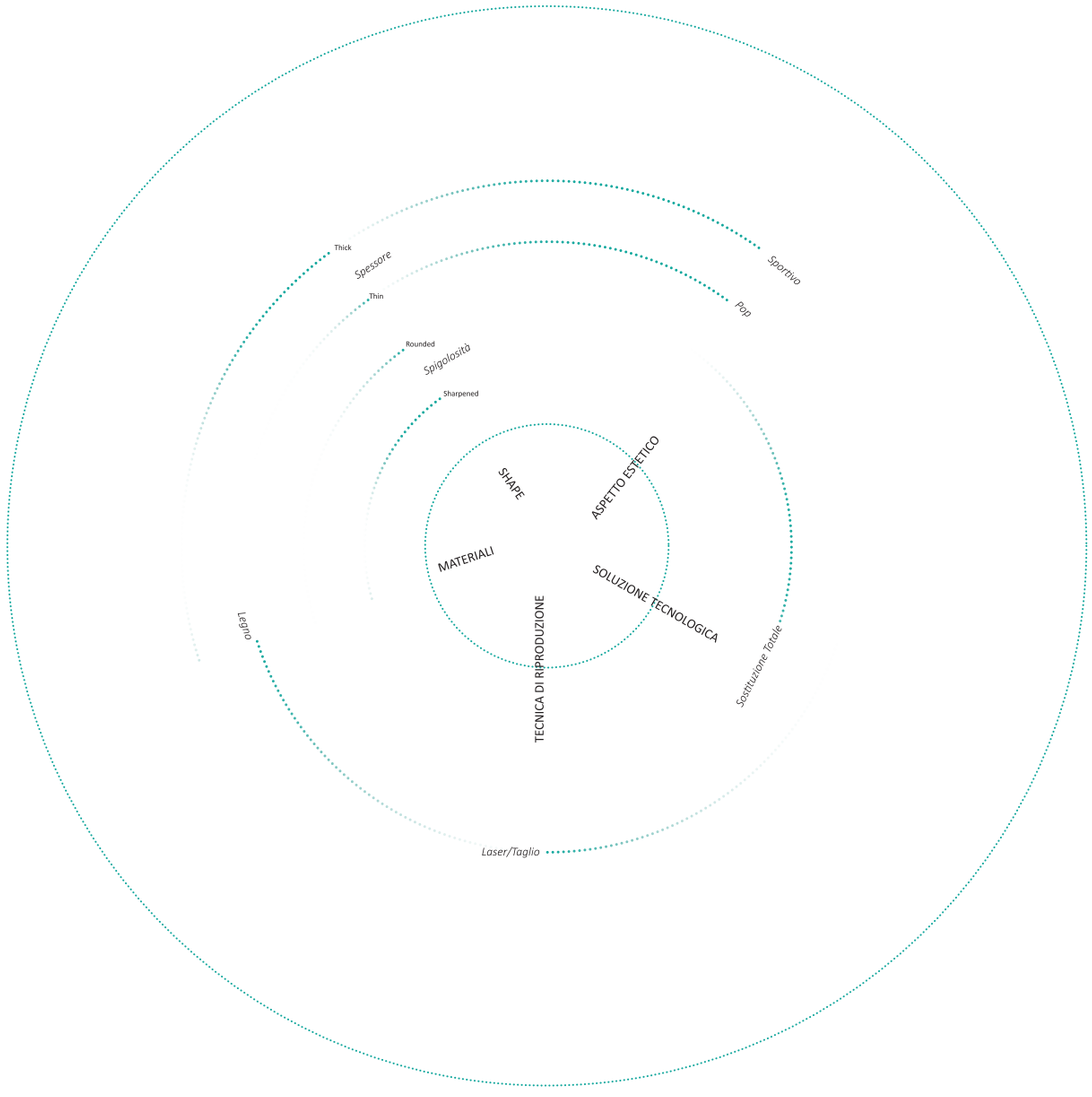


Caso studio: Trotec - Living Hinge



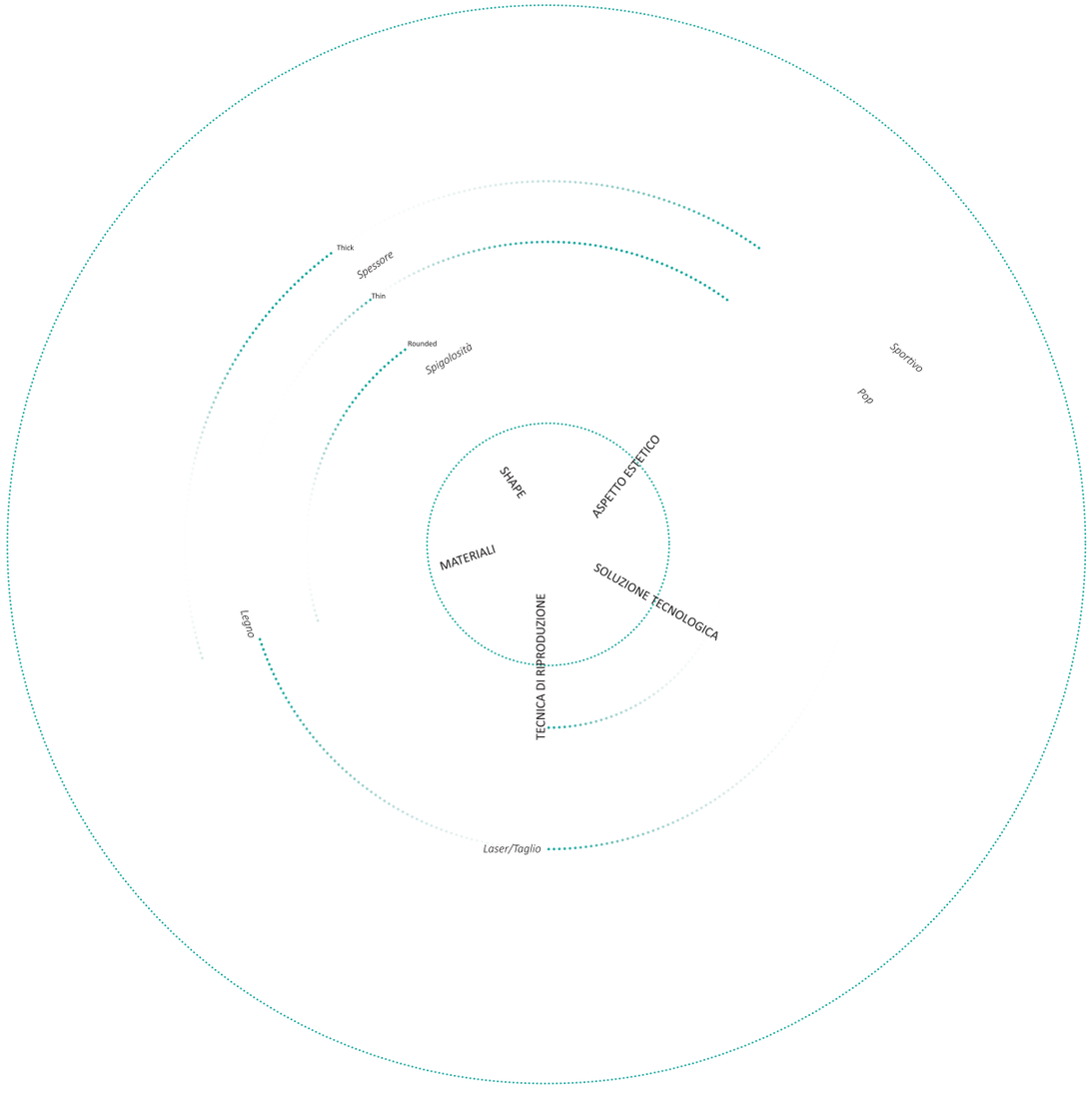
Azienda: Trotec Laser Canada
Designer: Trotec Wood Veneer
Anno di produzione: 2017
Shape: Customizzabile, Maker
Numero modelli prodotti: 1
Peso: N/A
Tecnica di Riproduzione: Laser cutting
Materiale: Wood
Descrizione della cerniera: tipologia (b)
Riferimenti:https://www.instructables.com/id/Wooden-Glasses-With-Hinge-and-Acrylic-Lenses/





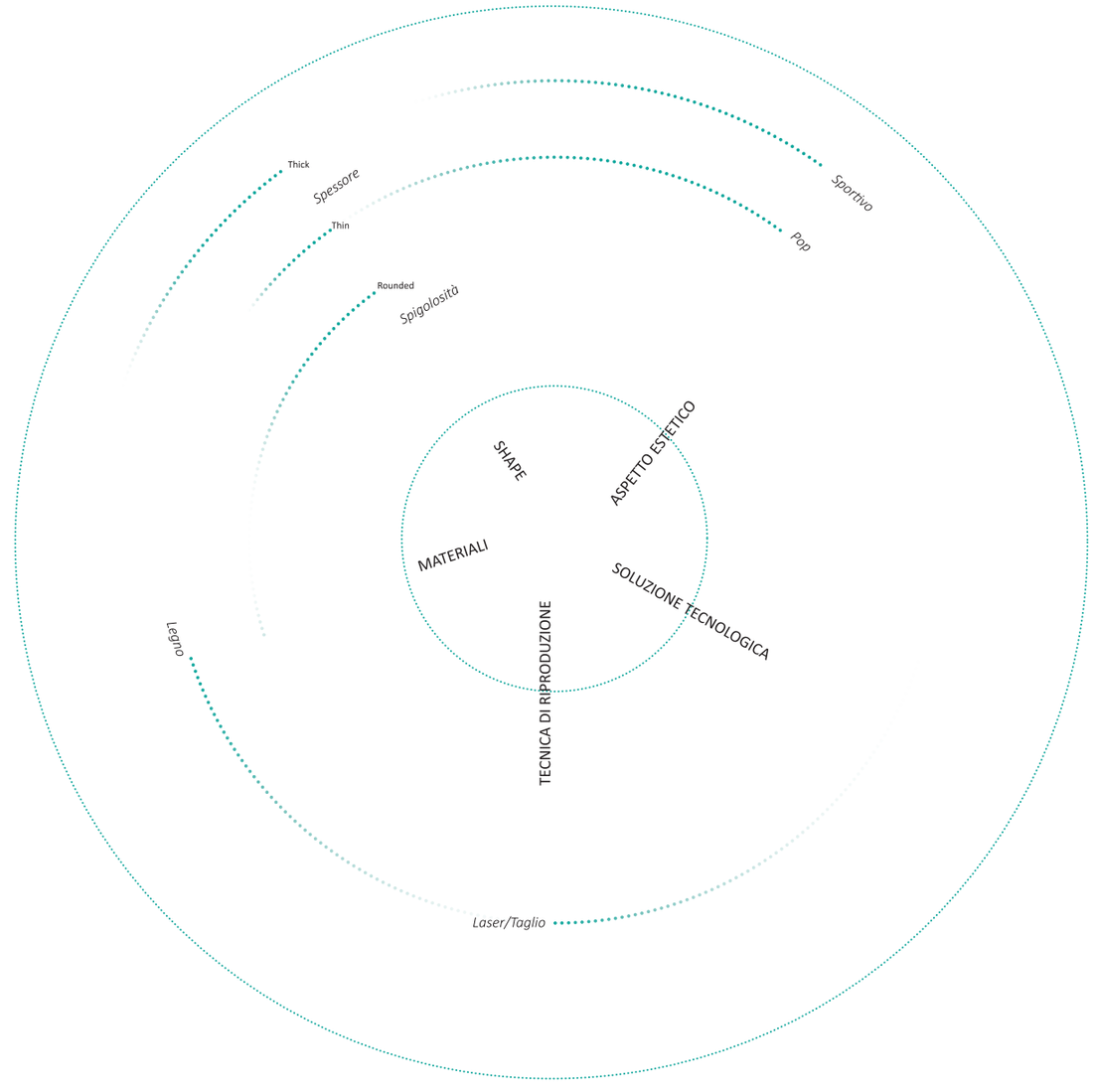
Caso studio: Karl - wood no hinge

Designer: Karl
Anno di produzione: N/A
Shape: monoblocco
Numero modelli prodotti: N/A
Peso: N/A
Tecnica di Riproduzione: wood carving/laser
Materiale: Wood
Descrizione della cerniera: assente
Riferimento:
http://www.framedbykarl.com/product/wolfgang/



Caso studio: Tarazi

Designer: Ezry Eyes
Anno di produzione: N/A
Shape: monoblocco
Numero modelli prodotti: N/A
Peso: N/A
Tecnica di Riproduzione: wood carving/laser
Materiale: Wood
Descrizione della cerniera: assente
Riferimento: http://www.tarazistudio.com/portfolio/ezri-eyes/?id=101



7.4 Progettazione

Premessa

Per colmare le lacune didattiche afferenti ai temi dell'ingegneria meccanica e della fisica dei materiali, è stato vitale il confronto e l'appoggio di numerose figure specializzate. La difficoltà maggiore, come designer, risiede nel fatto di non aver una conoscenza approfondita delle leggi matematiche e fisiche che governano la progettazione dei materiale, specie se studiati ad una scala inferiore a quella reale: come Karana, Oxman, Lefteri e i vari designer citati in corso d'opera, i progettisti di prodotto selezionano ed utilizzano i materiali principalmente attraverso gli attributi legati all'esperienza sensoriale, all'uso ed alla cultura teorica che hanno di questi, sviluppando "a posteriori" metodi e processi analitici, per conquistare una conoscenza tecnica ed intrinseca dei materiali usati per progettare artefatti.
Sulla scia di queste esperienze, il presente elaborato ha simili intenzioni.
Approfondire l'argomento dei metamateriali meccanici, infatti, ha condotto alla naturale esigenza di sperimentare, quasi giocando, indagando le relazioni tra metamateriali, progetto e scalabilità. Analizzare la relazione tra questi tre elementi, ha portato all'elaborazione di una metodologia, un approccio di lavoro, che può potenzialmente diventare uno strumento di supporto nella definizione di un oggetto di prodotto a partire dai vincoli progettuali dettati dalle caratteristiche del materiale utilizzato per la realizzazione del prodotto stesso.

Il processo sviluppato nella sede di tale sperimentazione, mette in atto una rilettura della montatura in chiave "metamaterica"; essa diventa uno strumento a più fasi, definibile per vincoli, dimensioni e gradi di libertà, come un meccanismo. Contemporaneamente ed in maniera opposta, questa tipologia di approccio definisce dei vincoli che diventano i caratteri peculiarizzanti di uno specifico stile e design dell'oggetto. La difficoltà di tale sperimentazione risiede proprio nell'equilibrio tra le due fasi. Oltre ovviamente a verificare la funzionalità della metodologia sviluppata e la generalizzazione della sua applicabilità a qualsiasi tipo di artefatto.

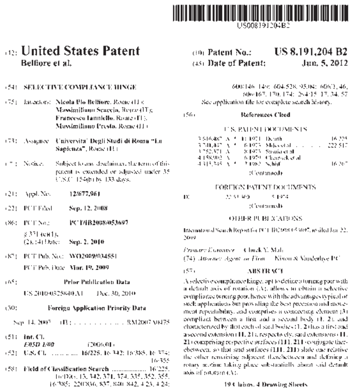
Progetto

Prima di procedere con l'applicazione della metodologia esposta successivamente nel capitolo, si introduce il materiale che è stato oggetto di selezione e studio in questa sperimentazioni e le motivazioni che hanno mosso tale scelta.

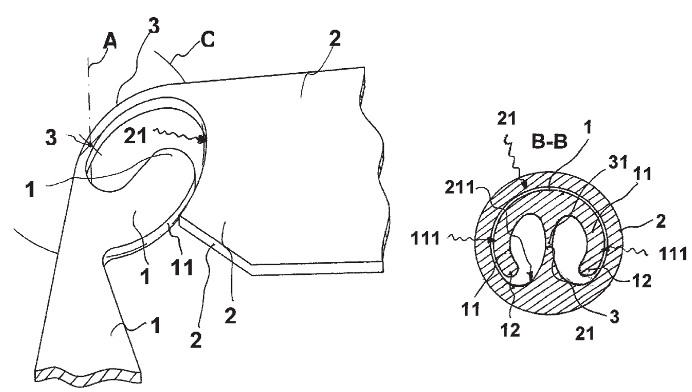
Selezione del metamateriale meccanico

In questa fase si è identificato il materiale di partenza sul quale si basano le sperimentazioni sul progetto delle montature. Nello specifico si fa riferimento a un particolare tipo di compliant mechanism: una cerniera a doppia trave concentrica. L'oggetto in questione è una cerniera costituita da una doppia trave concentrica con spessori differenti ed è un prodotto depositato con brevetto dal professore Belfiore (che è il supervisore tecnico dei contenuti relativi a tema ingegneristico-meccanico di questo elaborato e che ha messo a disposizione il suo materiale per la sezione sperimentale/applicativa della ricerca dottorale)[85]. Come meglio spiegato nel capitolo dedicato alla sperimentazione, tale materiale è stato implicato nella progettazione di una montatura di occhiali in ambito di design del prodotto.

85. International Publication Number: WO 2009/034551A1, International Patent Classification E05D 1/02, (20066.01); E05D 1/04 (2006/01)


United States Patent
Belfiore et al.
(10) Patent No.: US 8,191,204 B2
(45) Date of Patent: Jun. 5, 2012
(54) SELECTIVE COMPLIANCE HINGE

7.14



7.15

Fig 7.14
« A selective compliance hinge, apt to define a turning pair with a default axis of rotation (A), allows to obtain a selective compliance turning pair, hence with the advantage typical of such applications but providing the best precision and movement repeatability, and comprises a connecting element (3) compliant between a first and a second body (1, 2), and characterized by that each of said bodies (1, 2) has a first and a second extension (11,21), respectively, said extensions (11, 21) comprising respective surfaces (111, 211) conjugate therebetween, so that said surfaces (111, 211) slide one relative the other remaining adjacent therebetween and defining a rotary motion taking place substantially about said default axis of rotation (A).»

Fig 7.15
Immagine illustrativa del compliant mechanism oggetto del brevetto.

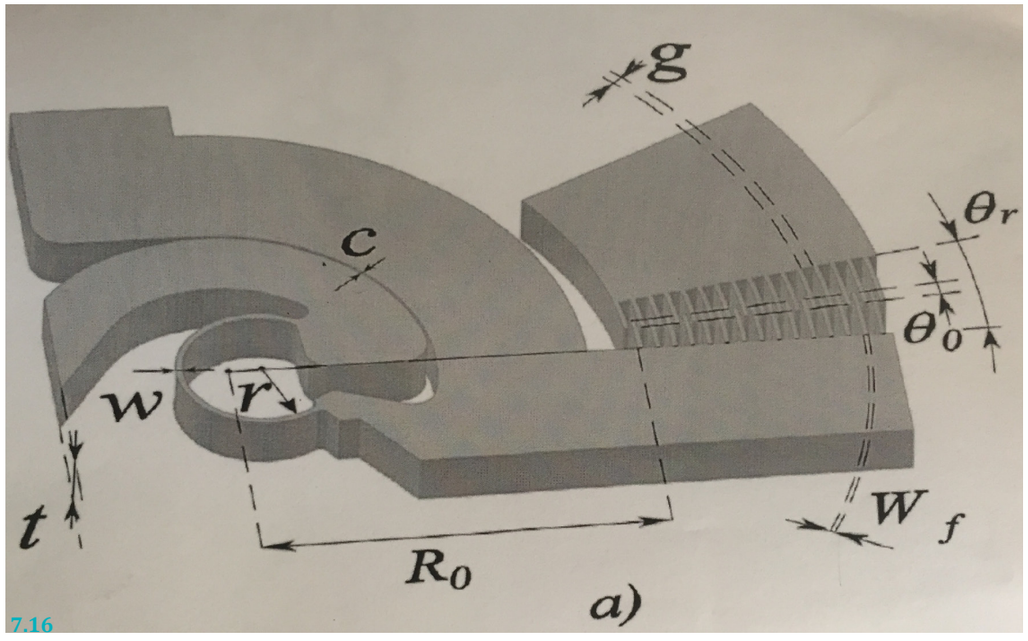
Fig 7.16
Immagine di una porzione di cerniera rielaborata dal professor Belfiore a partire dal brevetto.
In questa tipologia di compliant mechanism il movimento è reso possibile dalla compinazione tra i valori C, r, t e w che determinano la resistenza el'elasticità del comportamento del materiale prodotto in funzione del movimento dellle due travi concentriche.

Di seguito si riporta un'illustrazione della cerniera (Fig 7.16) e degli elementi che la definiscono:

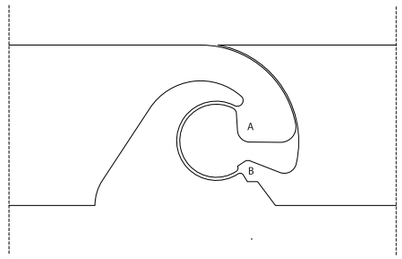
C - clearance: è la distanza minima tra le due travi
r - raggio: è il raggio della trave curvilinea interna
t - spessore: rappresenta l'altezza del device
w - spessore: della trave curvilinea interna

N.B.: Le informazioni restanti visibili nella Fig 7.16 non sono state prese in considerazione in quanto non costituiscono oggetto di interesse per la sperimentazione.

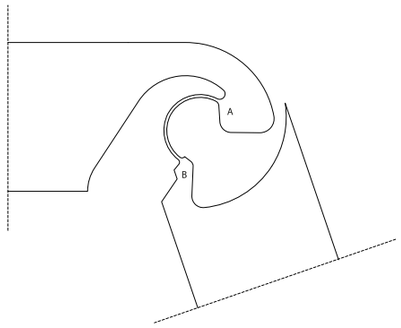
La peculirità di questo meccanismo risiede nella disposizione del baricentro dei pesi elastici della trave curva (C): esso, infatti, deve coincidere con il centro dei profili coniugati della coppia rotoidale (C_0). (A) si vincola con l'estremità opposta (A) e (B) con l'estremita opposta (B).



7.16



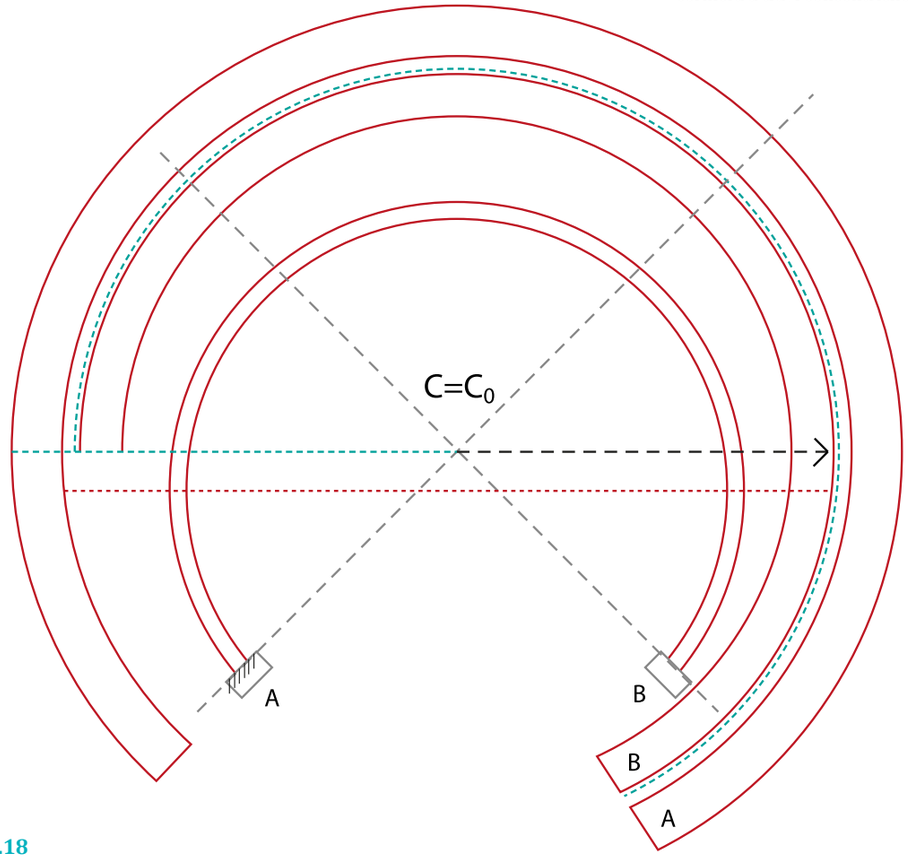
7.17(1) e (2)



Ai fini dello studio presentato in questa sede, è stata effettuata una rielaborazione del compliant mechanism brevettato dal professor Belfiore, in chiave di prodotto in scala 1:1 (Figg 7.17.1 e 7.17.2). L'oggetto è stato stampato in 3D con una Delta. Il materiale è PLA bianco. Si evidenziano i punti di vincolo tra A e B ed il meccanismo di apertura. Il meccanismo ruota di 44° intorno all'asse perpendicolare passante per il baricentro dei pesi elastici

Figg 7.17
Schematizzazione del compliant mechanism che, a partire dal brevetto delprofessore Belfiore, è stato utilizzato per la sperimentazione.
(1) in versione "chiuso", ovvero in posizione di "risposo", la trave interna non è sottoposta a sforzo. (2) in versione aperta, per cui la trave è messa sotto sforzo

Figg 7.18
è riportata una schemtaizzazione della cerniera a travi concentriche.



7.18

Come si è già detto nel capitolo 4, i *compliant mechanisms* possono essere considerati come una forma di metamateriali meccanici se considerati in scala 1:1 (cfr. cap. 4.4): gestire la complessità progettuale a scala nanometrica sarebbe stato estremamente complesso. Per questo motivo, la cerniera brevettata, ben si presta per la sperimentazioni qui presentata.

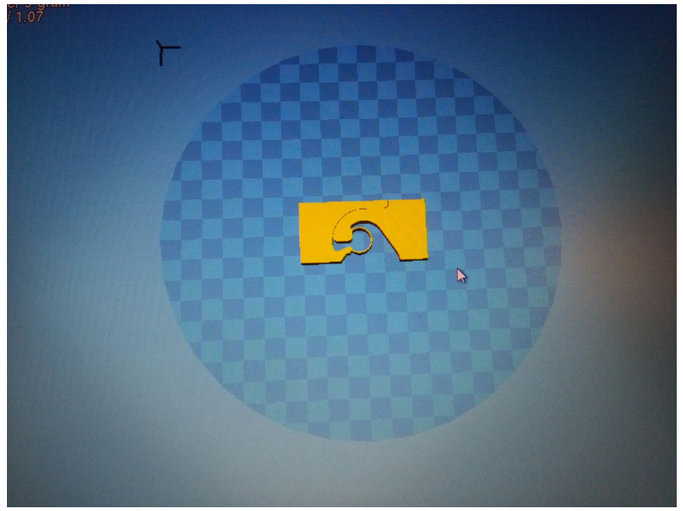
Per gli studi sulla cerniera e per le successive stampe i valori tra i rapporti di altezza del provino e spessori delle travi sono:

C - clearance: 0.5mm
r - raggio: 6mm
t - spessore: sono stati effettuati test di stampa su altezza differenti:
t1 4mm, t2 8mm, t3 16mm
w - spessore: sono stati effettuati test di stampa su spessori differenti w1 0.5mm, w2 2mm

Saranno discussi in seguito i rapporti tra questi valori e gli effetti sulle prestazioni della cerniera.

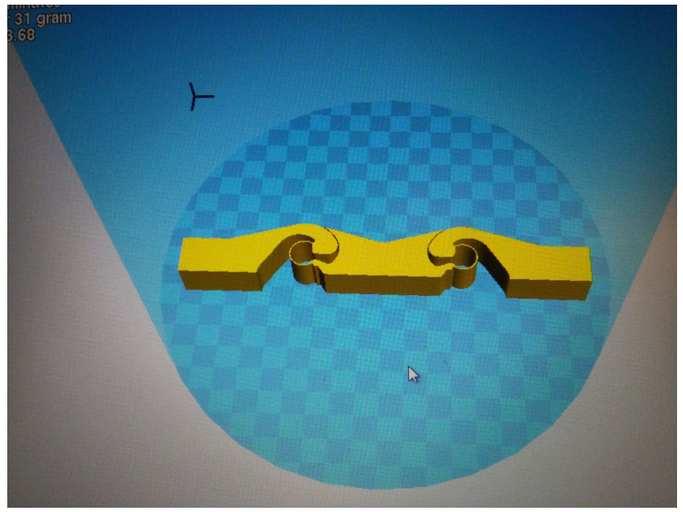
Riprogettazione delle cerniere con software di modellazione grafica

Dai disegni di brevetto, al materiale fornito dal professore Belfiore, si è proceduto con una rielaborazione grafica attraverso l'utilizzo di software di modellazione 3D, con l'obiettivo di usufruire delle tecniche di *additive manufacturing*, quali il 3D priniting, per verificare la funzionalità dei compliant mechanisms e la loro efficienza nel contesto progettuale della definizione di una montatura di occhiali a partire da metamateriali meccanici.
Nello specifico, per la modellazione 3D è stato utilizzato Rhinoceros v.6 con l'ausilio delplug in Grasshopper, per lo studio delcomportamento della trave interna del compliant mechanism; per la stampa 3D sono state utilizzate diverse macchine, le principali: Delta Wasp con piatto riscaldato e Makerbot.
Per la gestione degli .STL esportati da Rhinoceros, è stato utilizzato il software CURA.

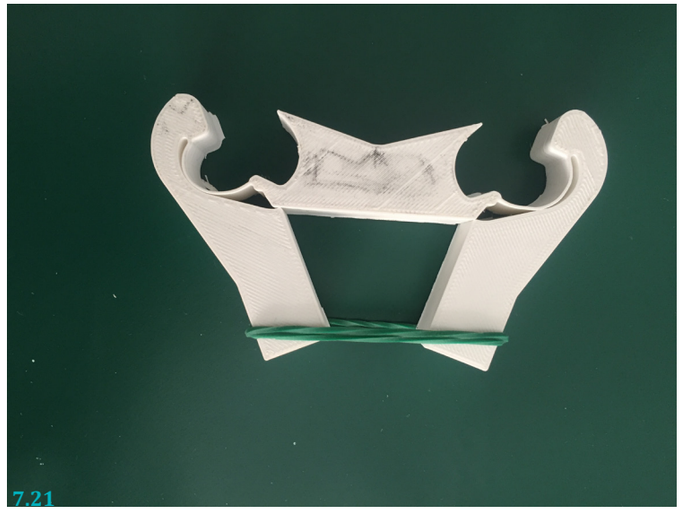


7.19

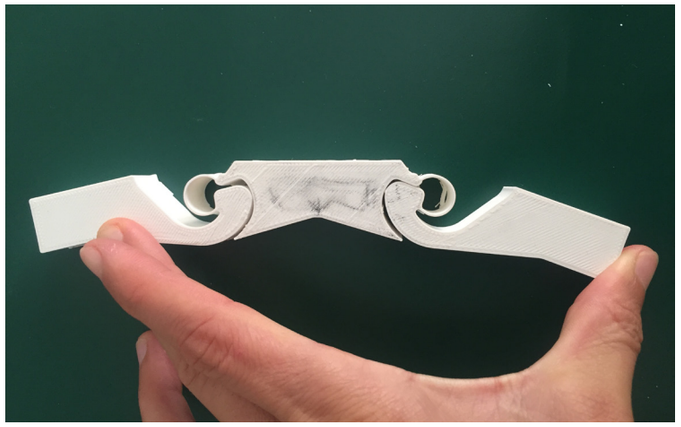
Figg 7.19(sequenza)
Dall'alto: studio delle mash del modello 3D su CURA. Immagini a seguire: Modello della cerniera stampato in 3D: materiale PLA. h lato corto 30mm

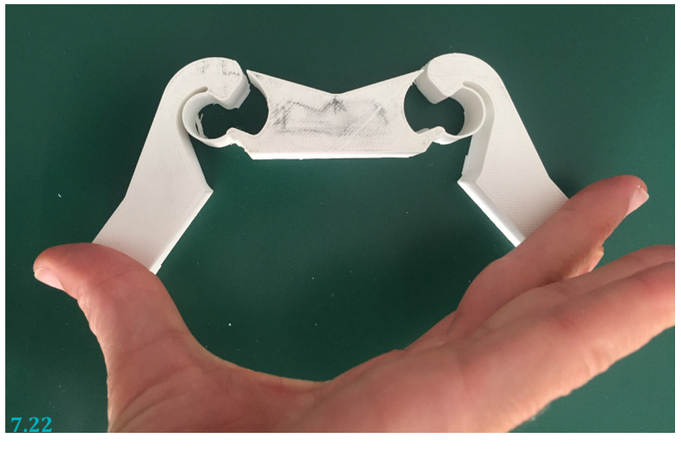


Figg 7.20(sequenza)
Modello a doppia cenriera specchiata
Dall'alto: studio delle mash del modello 3D su CURA. Immagini a seguire: processo di stampa 3D. La stampante è una Wasp Delta 20x20x40 con piatto riscaldato. Il materiale estruso è PLA (195° circa per la temperatura diestrusione)



Figg 7.21(sequenza)
Modello a doppia cenriera specchiata
Dall'alto: modello stampato in 3D, vista frontale a cerniere chiuse, vista dall'alto a cerniere chiuse e vista laterale a cerniere aperte. Confrontare con immagini successive per lo studio sul sistema di bloccaggio della posizione della cerniera in fase di apertura





Figg 7.22(sequenza)
Varie del modello a doppia cerniera specchiata, in trazione

7.5 Metodologia

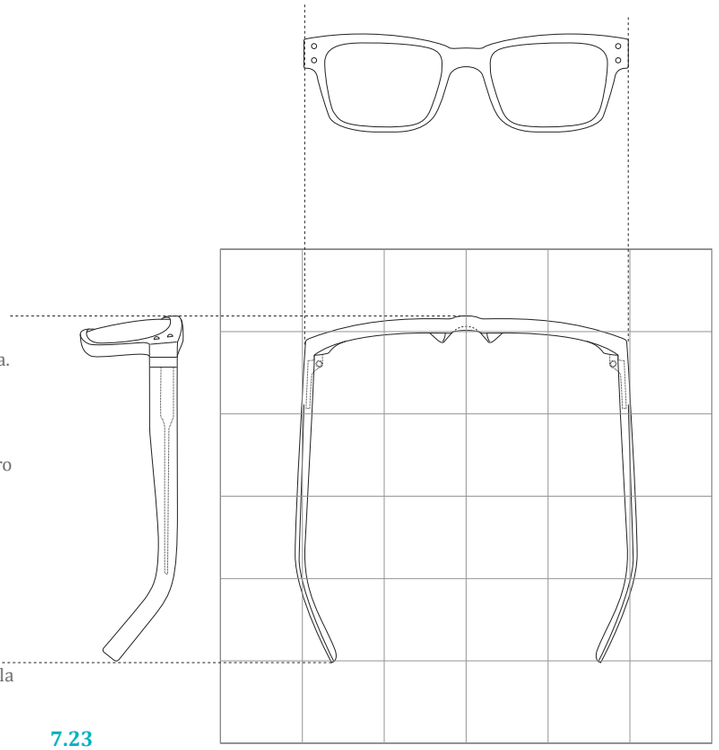
Definizione della morfologia dell'oggetto

Una volta acquisita dimestichezza col processo di individuazione, posizionamento e distribuzione delle cerniere, la sperimentazione procede con l'elaborazione di due configurazioni (Modello 1 e Modello 2), di una montatura di occhiali. L'interesse di questa sperimentazioni si focalizza sulle variabili determinate dalla **posizione delle cerniere** e dal loro **grado di inclinazione sul piano** e dal **grado di inclinazione dell'asse**.
Entrando nel merito del progetto, si riporta la metodologia sviluppata per generare oggetti ri-progettati in chiave metamaterica. Tale processo mira ad identificare i punti di possibile intervento sulla montatura (nodi) e definisce l'approccio con cui si sostituisce una tradizionale cerniera con un metamateriale meccanico. L'obiettivo è quello di generare un nuovo prodotto, riproducibile tramite tecniche di additive manufacturing, monoblocco, in grado di emulare il movimento del meccanismo definito dal sistema della cerniera tradizionale, direttamente attraverso la sua composizione materica. Il percorso di sviluppo della sperimentazioni si struttura su tre parti, ognuna delle quali presenta una serie di domande e propone un intervento analitico-funzionale:

PARTE FUNZIONALE-CINEMATICA:
Capire come si struttura l'oggetto

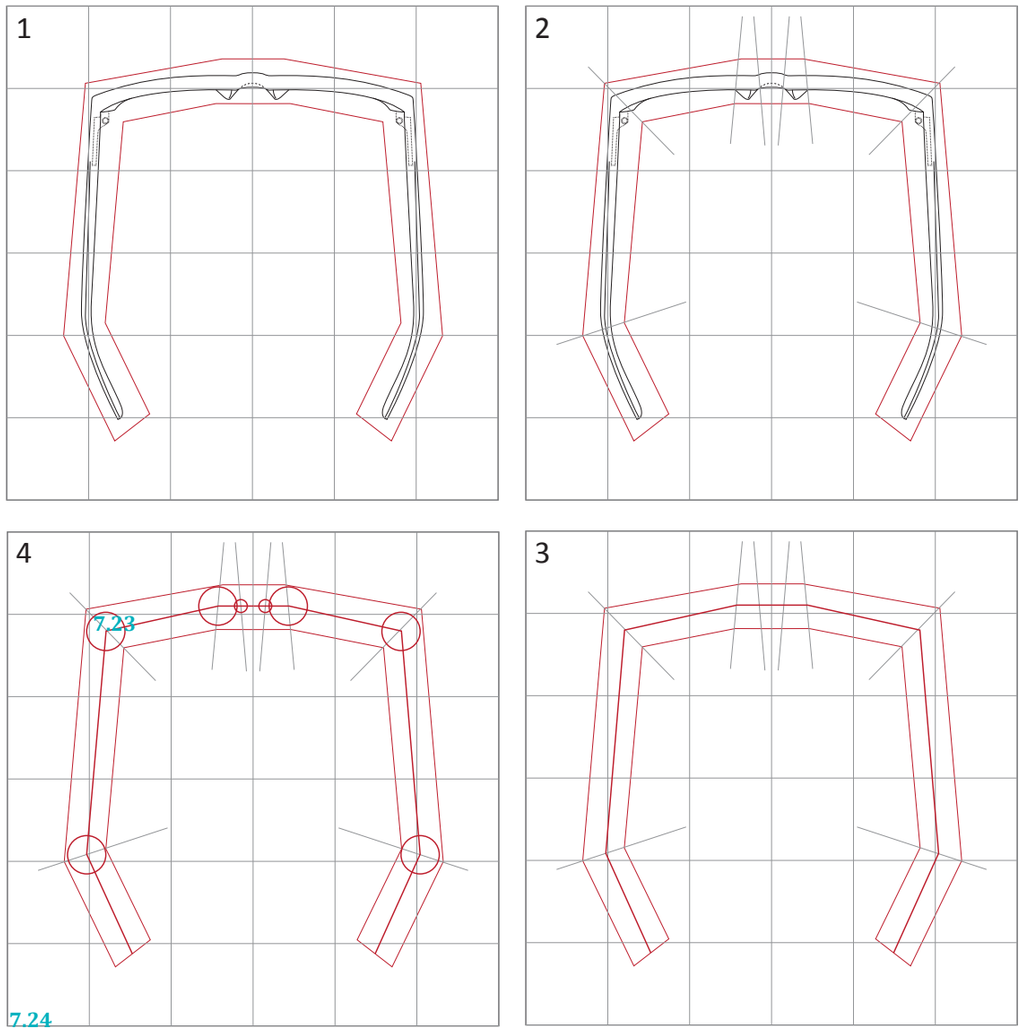
- Che vincoli presenta l'oggetto?
- Dove sono posizionate le cerniere tradizionali?

Progettare nel piano:
per individuare con più facilità le cerniere tradizionali, si proietta l'immagine nel piano, e la si studia in pianta, secondo una vista bidimensionale. Questo approccio permette di semplificare la complessità morfologica dell'oggetto, distinguendolo tra segmenti rigidi e nodi, per facilitare i passaggi successivi d'intervento. Lo scopo è quello di individuare, nel piano i punti in cui si fissano i nodi ed i segmenti che saranno vincolati da una rotazione attorno a tali nodi (Fig 7.23; 7.24)



7.23

Fig 7.23
Immagine della montatura in pianta con relative viste, laterale e frontale. L'oggetto, nella vista top, si posiziona su un piano organizzato su una griglia. La montatura è stata scelta come oggetto di sperimentazione
Fig 7.24
1- Ingombro di massima del perimetro dell'oggetto proiettato sul piano
2- Indicazione degli assi di intersezione, sul piano, dei punti di interesse per la disposizione di nodi
3- Insieme dei segmenti che sintetizzano l'oggetto e individuano i punti di interesse
4. disposizione dei centri dei nodi sulla costruzione dell'immagine di sintesi dell'oggetto

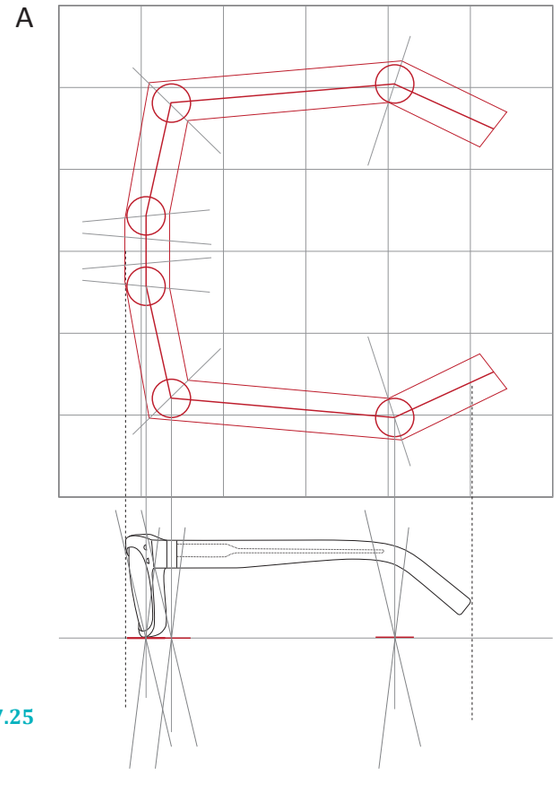


7.24

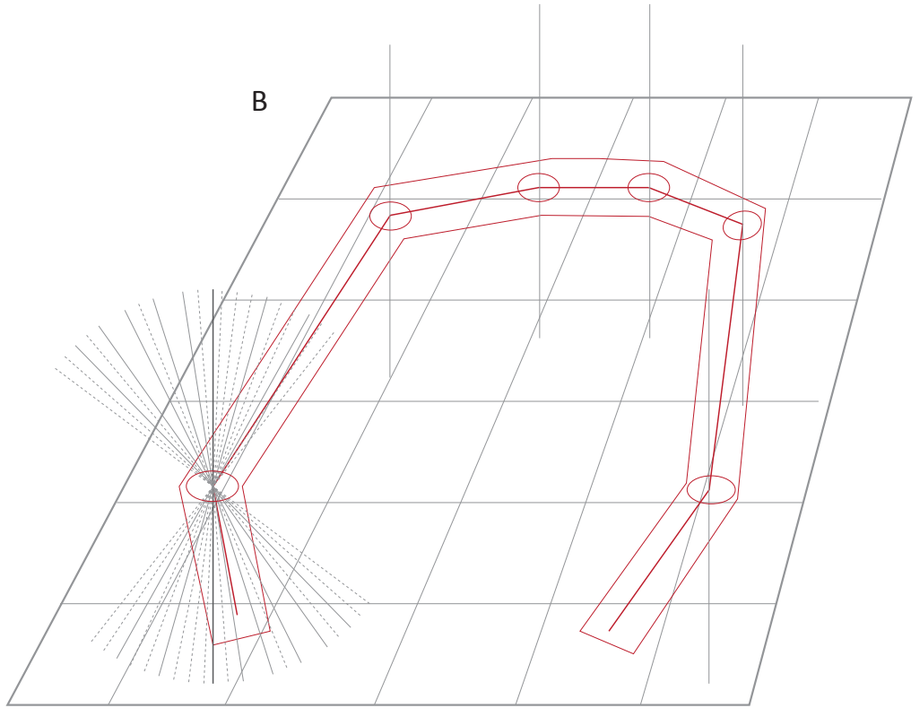
PARTE COSTRUTTIVA:
Progettazione dei nodi della struttura

- I nodi corrispondono alle cerniere?
- E' possibile aumentare/diminuire la quantità dei nodi?
- Che inclinazione voglio dare agli assi di rotazione passanti per i nodi?

Proiettare nello spazio:
In questa fase si fissano i nodi e si individuano gli assi passanti per questi (Fig 7.25). Si decide quindi l'angolo di inclinazione di questi: se sono perpendicolari ai nodi, i segmenti ruotano sullo stesso piano; se l'asse ha un grado diverso di inclinazione, i segmenti vincolati ai nodi "escono dal piano"

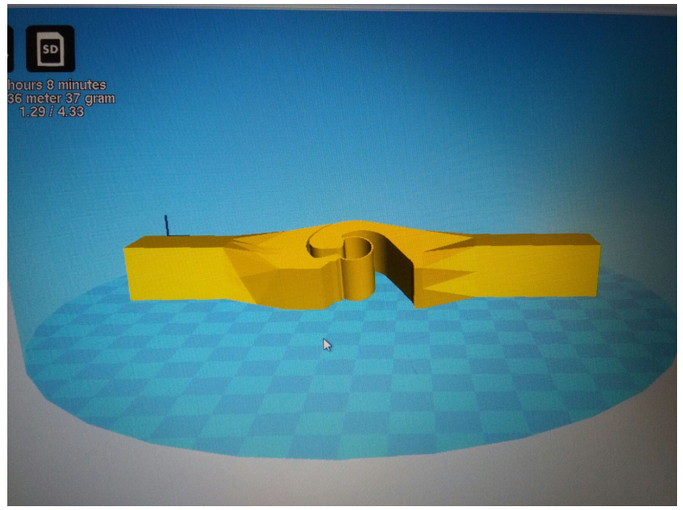


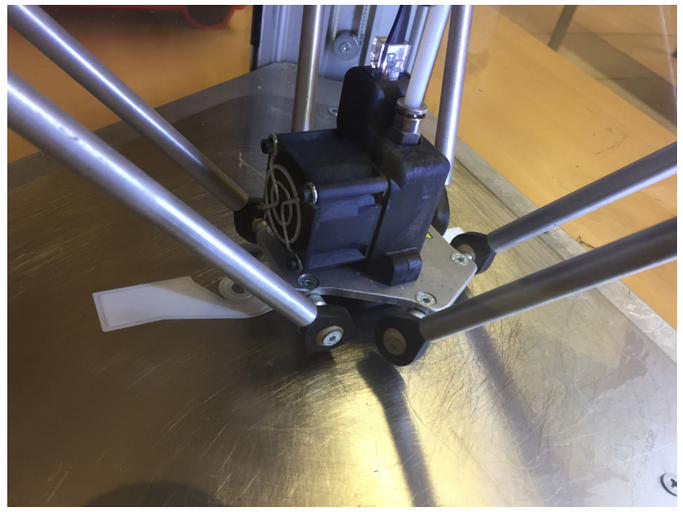
7.25



7.26

Fig 7.25
Proiezione in vista laterale dei nodi fissati nel piano e posizionamento degli assi. Nella rappresentazione, gli assi, evidenziati da linee inclinate grigie, hanno inclinazione casuale a titolo esemplificativo (A).
Fig 7.26
Vista prospettica del sistema proiettato sul piano e dell'insieme di assi con grado d'inclinazione diverso, passati per un nodo (B).





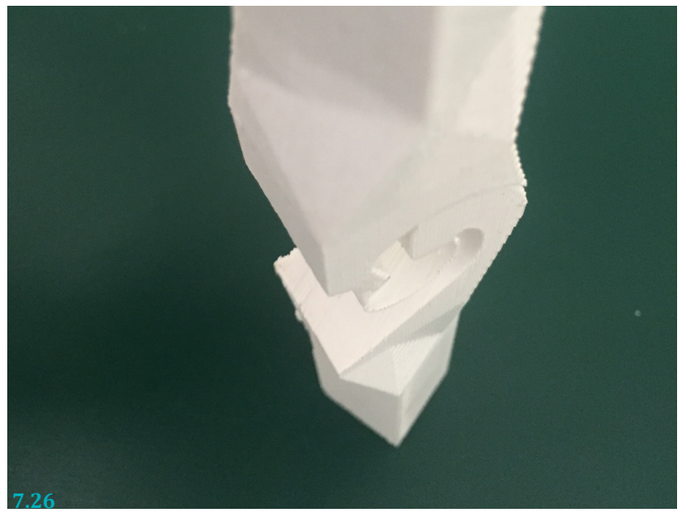
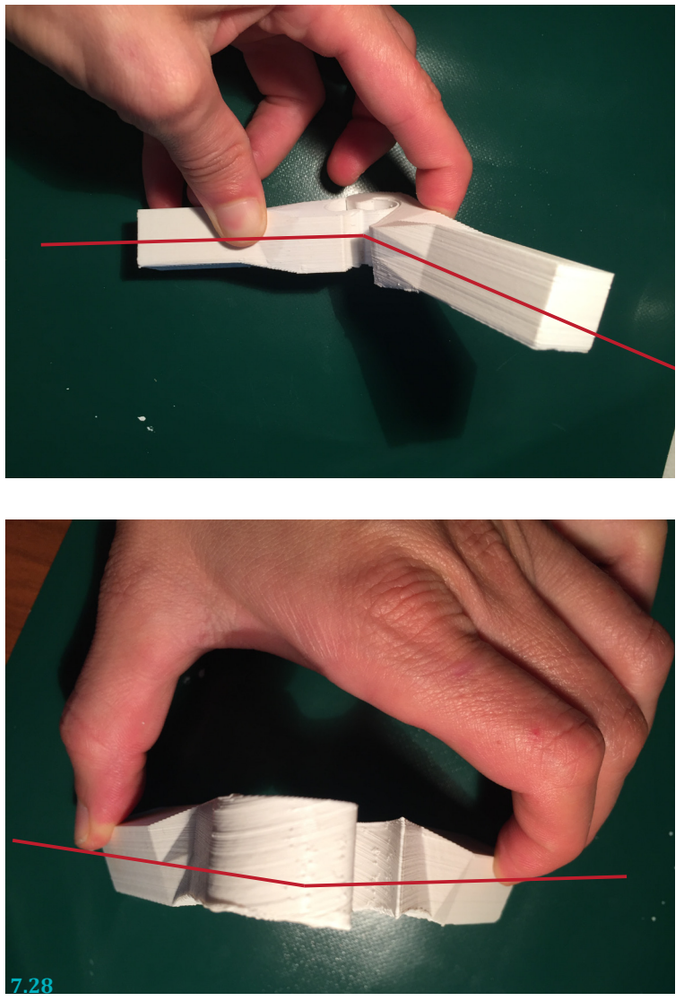


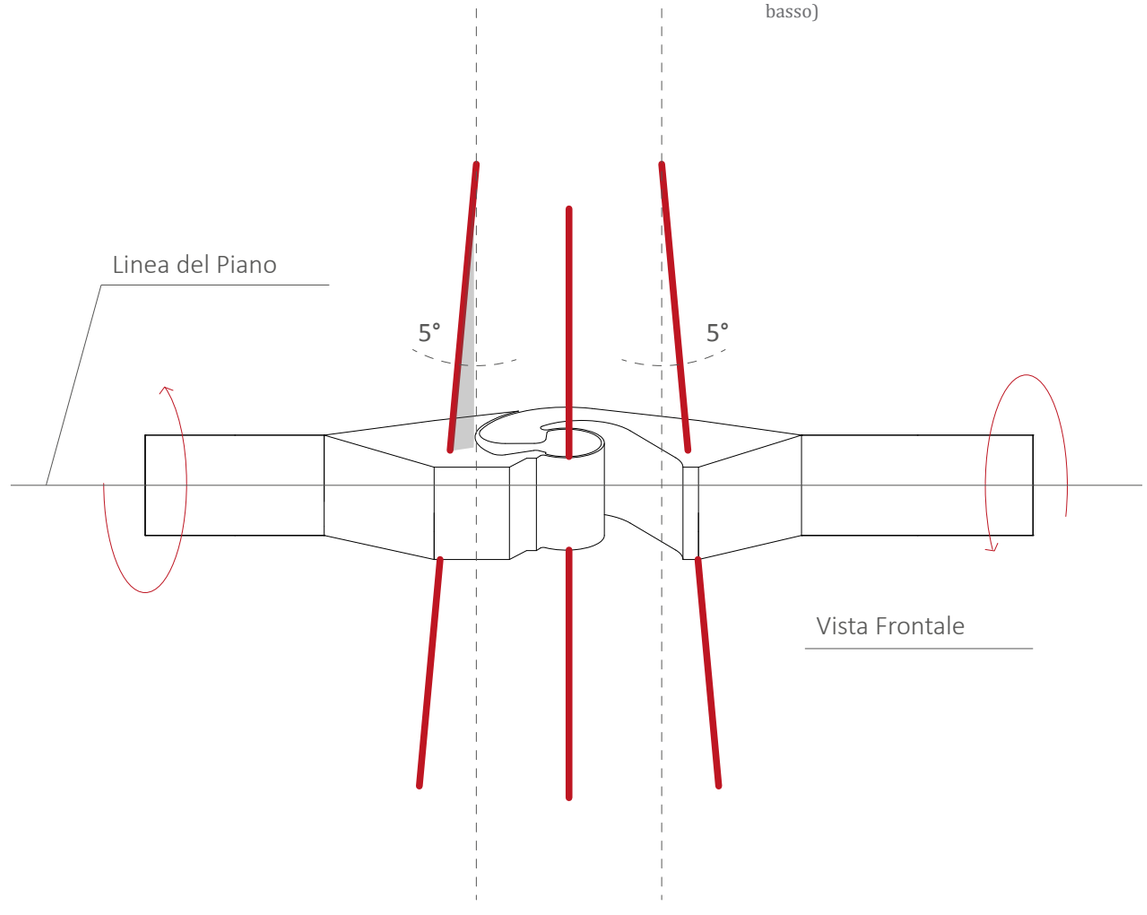
Fig 7.26
Preparazione del file 3D per la stampa. con il Software CURA.
Stampa 3D con WASP Delta, materiale PLA.
Elemento con cerniera intorsione stampato

Fig 7.27
Vista frontale del prototipo chiuso, vista dall'alto e vista frontale dell'elemento con cerniera in apertura. in posizione zero l’elemento è rettilineo, con cerniera aperta arriva fino a 90° di angolo



7.28

Fig 7.28
Cambio dell'asse di inclinazione dei due segmenti dovuto alla posizione inclinata della cerniera



7.29

Fig 7.29
Mentre i due estremi risultano paralleli al piano, l'elemento cerniera di raccordo ha un inclinazione di 5°. Quando si apre la cerniera, si ha una torsione dell'intero elemento: un estremo ruota sopra al piano, l'altro sotto (o sopra, a seconda che la cerniera si rivolta verso l'alto o il basso)

DESIGN

- Che tipologia di configurazione emerge seguendo i due precedenti passaggi?
- Quali e quante configurazioni si possono realizzare studiando l'oggetto attraverso il metodo?
- Che tipo di fruizione assume l'oggetto attraverso le configurazioni individuate?

Progettare la morfologia:
in questa fase si sviluppa il concept dell'oggetto, utilizzando software di modellazione 3D a partire dalla struttura definita nel piano: si studiano i movimenti dei segmenti nello spazio, si definisce il funzionamento della cerniera (eventuali sistemi di incastro), la scala o le scale alle quali inserire la cerniera, l'asse di ciascuna cerniera a seconda della funzione attribuita al rispettivo segmento. Durante questa fase è necessario stabilire:

- il materiale;
- il rapporto tra gli spessori delle travi della cerniera;
- la scala alla quale s'intende trattare le cerniere;
- la tecnica di riproduzione del materiale (necessario per rispettare gli sfridi minimi degli strumenti di stampa SLS e AM)

Di seguito si riportano i test effettuati per lo studio degli spessori del materiale e del rapporto tra trave interna ed esterna. I primi provini di test (Figg da 7.19 a 7.28) sono stati stampati con tecniche di *Additive Manufacturing* mediante l'utilizzo di una WASP Delta.

I filamenti utilizzati:

- Ninjaflex (arancione). Si tratta di un elastomero poliuretano termoplastico con temperatura di transizione vetrosa intorno ai 220 gradi. La temperatura alla quale è stato stampato per il provino è 225 gradi centigradi con piatto di stampa a 50 gradi centigradi e nozzle del filamento 0.4 con filamento da 1.75mm
- PLA (bianco). Polimero di acido polilattico è stato stampato a temperatura di 190 gradi con piatto di stampa preriscaldato a 60°. Filamento 1.75mm e nozzle 0.4

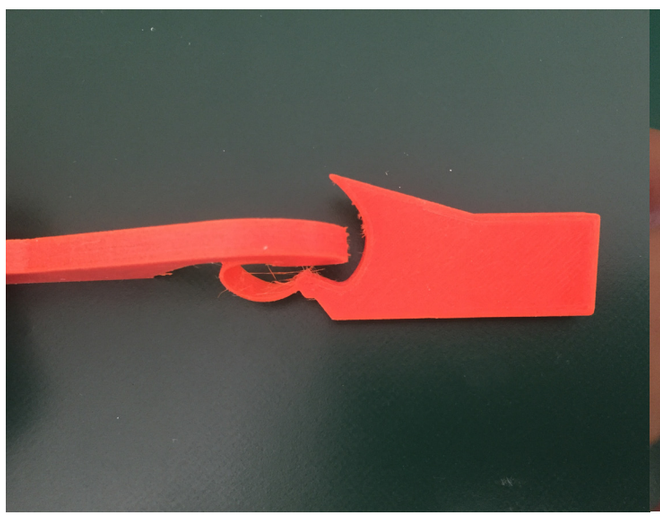
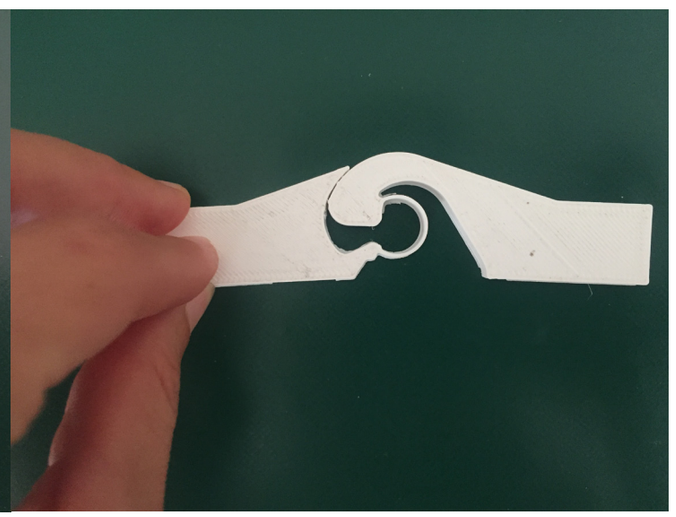
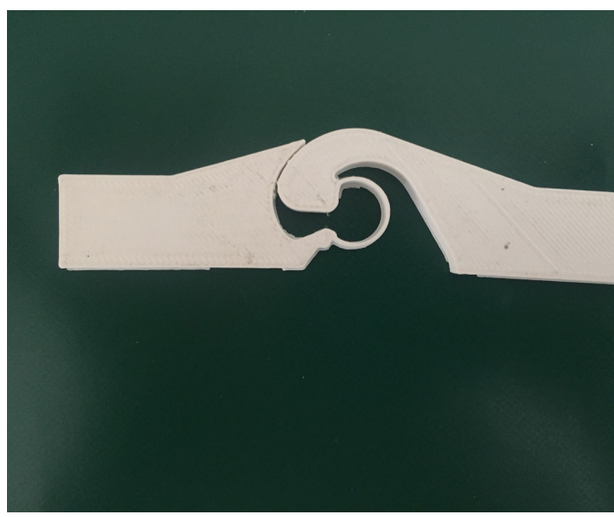
Valori secondo la cerniera brevettata. (N.B.: Si è scelto di mantenere gli stessi valori per testare i risultati prestazionali su due diversi materiali:

C - clearance: 0.5mm
r - raggio: 6mm
t - altezza: 4mm
w - spessore: 0.5mm

Come si evince dalla Fig 7.30 i due provini restituiscono comportamenti quasi opposti , sia a trazione che a riposo: il ninjaflex non è un materiale idoneo con ***t*** 4mm, mentre il PLA dimostra una resistenza a trazione e se rilasciato, tende a tornare nella sua posizione di riposo. Ugualmente, una w da 0.5mm per il ninjaflex dimostra che il provino non è in grado di mantere il suo asse di rotazione, ma subisce forze trasversali, quasi come fosse un oggetto "molle".
Il PLA invece, dimostra un comportamento accettabile anche a t e w superiori (vedere Fig 7.30 con rispettivamente ***t*** 8mm e ***t*** 16mm)

In conclusione, i test effettuati, riportano come materiale più idoneo il PLA.
Test creati con l'utilizzo della tecnologia SLS (con materiale Nylon), potranno fornire maggiori dettagli sul rapporto tra i valori e la selezione del materiale più adeguato. Dai casi studio emerge, infatti, come la tecnologia migliore per ottenere prestazioni ottimizzate per questo genere di artefatti. In questa sede si presenta il lato metaprogettuale dell'applicazione di un metamateriale meccanico a un oggetto di utilizzo quotidiano, per questo motivo non sono presentati prototipi prodotti in SLS.

7.30

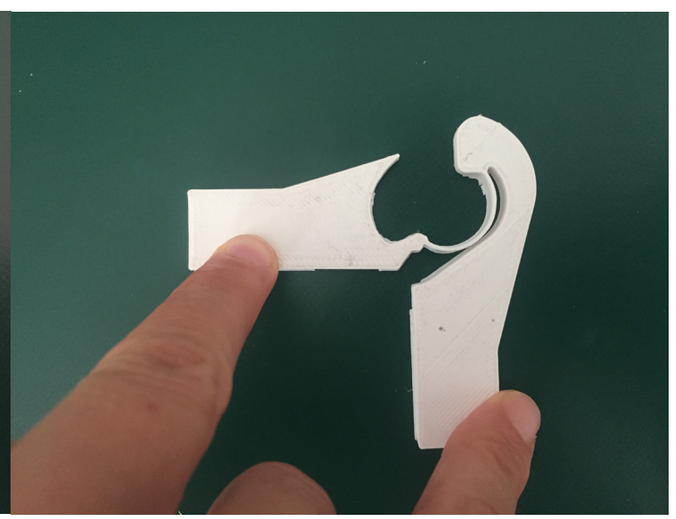


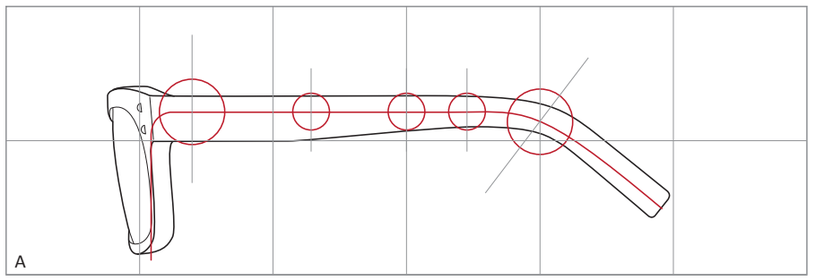
Fig 7.30
Provini stampati con materiali diversi,
messi a confronto:
in arancione il provino in Ninjaflex
in bianco il provino in PLA

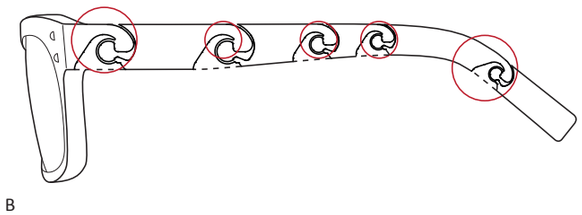
7.6 Metaprogetto

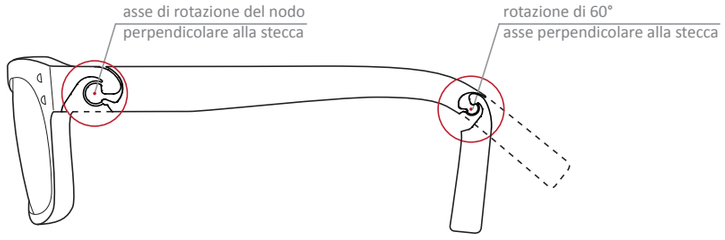
Di seguito, si procede con una sezione metaprogettuale in cui si effettuano degli studi su possibili configurazioni delle cerniere su specifiche parti della montatura, prese in considerazione individualmente:

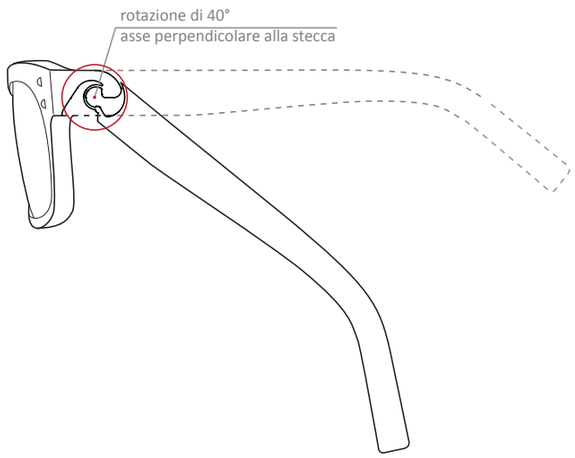
Studio 1: Cerniera sulla stecca
Studio 2: Cerniere sul nasello
Studio 3: Proiezione sul piano delle cerniere sulla stecca, perpendicolari al frontalino

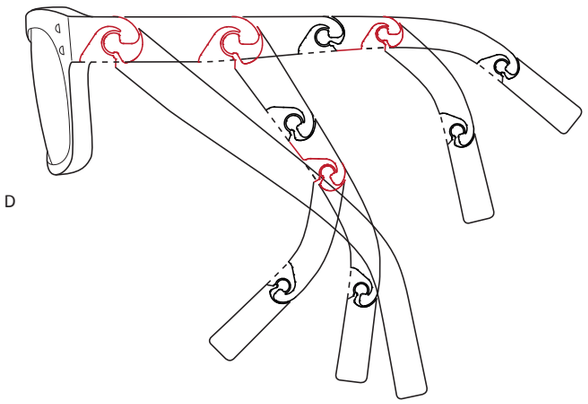
Studio 1 - Proiezione sul piano delle cerniere sulla stecca











A Individuo la linea di sintesi dell'oggetto e dispongo le aree di interesse in cui posizionare i nodi
B Scalo la cerniera a seconda della linea morfologica che voglio tenere
C.1 Stabilisco l'asse di rotazione
C.2 Esempio di rotazione a 40° con asse perpendicolare
D Configurazione di una stecca composta da più cerniere, ognuna delle quali ha asse di rotazione perpendicolare rispetto al piano (la stecca) e può ruotare fino a 90°

Fig 7.31
Viste laterali della montatura. proiettate su un piano ideale per l'individuazione e la distribuzione dei nodi in cui si installano le cerniere

Il caso D è di particolare interesse in quanto verifica l'importanza della scala e della scalabilità del processo esposto nei precedenti capitoli, ed è determinante per stabilire le caratteristiche delle prestazioni meccaniche del metamateriale meccanico: più si riduce la scala delle cerniere e si aumenta il numero delle cerniere lungo la stecca, più la stecca sarà flessibile ma resistente, in quanto costruita non più da un materiale omogeneo, ma sarà composto da una microstruttura pari alla somma delle cerniere. Nell'esempio riportato, lavorando a scala 1:1 il materiale non risulta omogeneo né al tatto né alla vista, ma scalando il processo a livello micro o nanometrico, restituirebbe l'aspetto di un materiale omogeneo . La stecca apparirebbe come un materiale omogeneo e continuo.

In Figura 7.32 si riporta un altro esempio di studio delle cerniere e di flessibilità di un segmento composto da cerniere: cinque cerniere appartengono al piano *x,y* (in figura sono vista in pianta), ognuna ha asse di rotazione perpendicolare al piano e ciascuna è ruotata rispetto all'asse di collegate l'una all'altra e ciascuna ruotata rispetto al proprio asse.

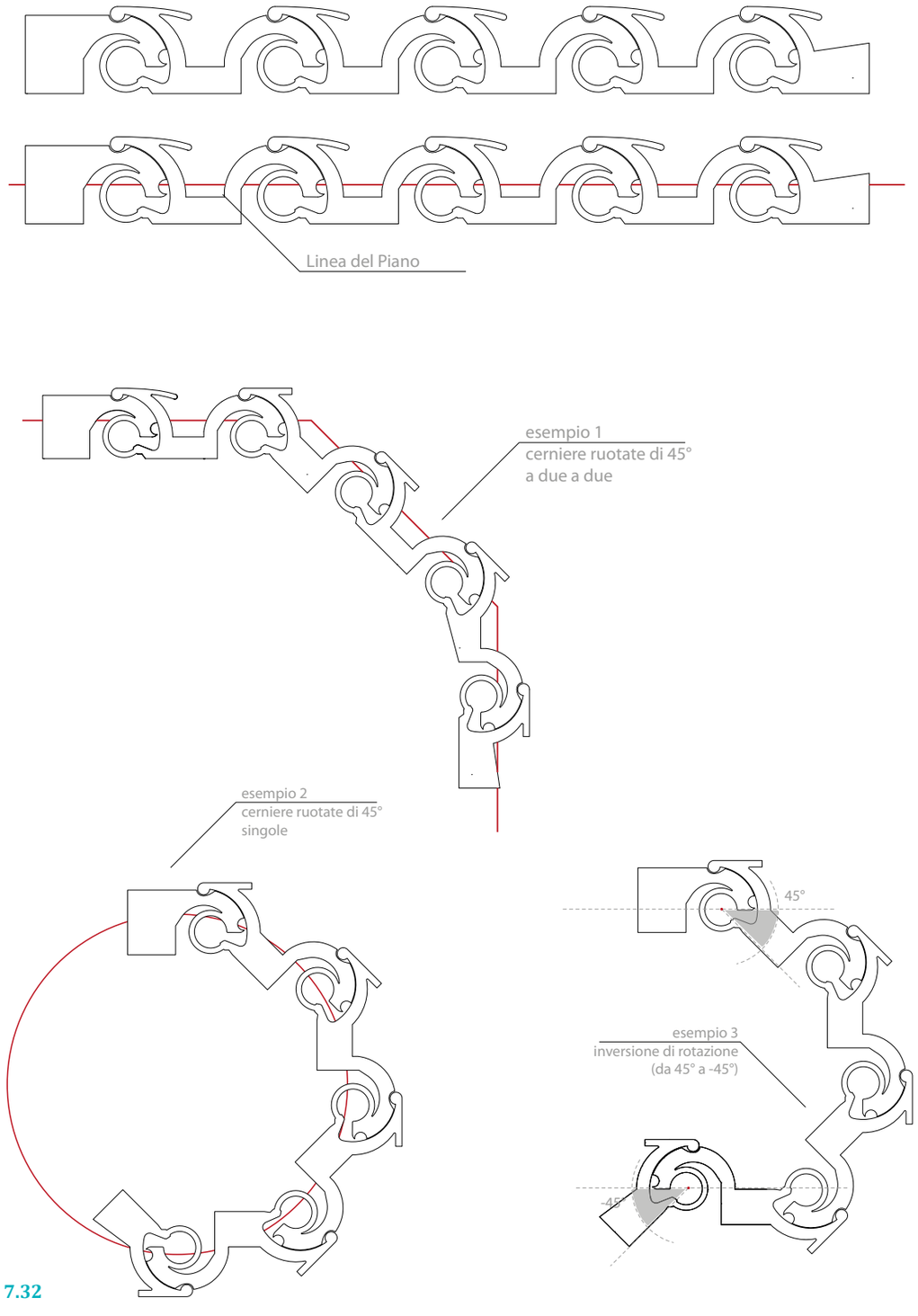


Fig 7.32
Esempio di spezzata composta da cinque cerniere.Varie configurazioni

Studio 2 - Proiezione sul piano delle cerniere sul nasello

Due cerniere specchiate con asse di simmetria al centro del nasello e asse di rotazione di 90° da posizione A (1 e 2) a posizione B (1 e 2) Fig. 7.33

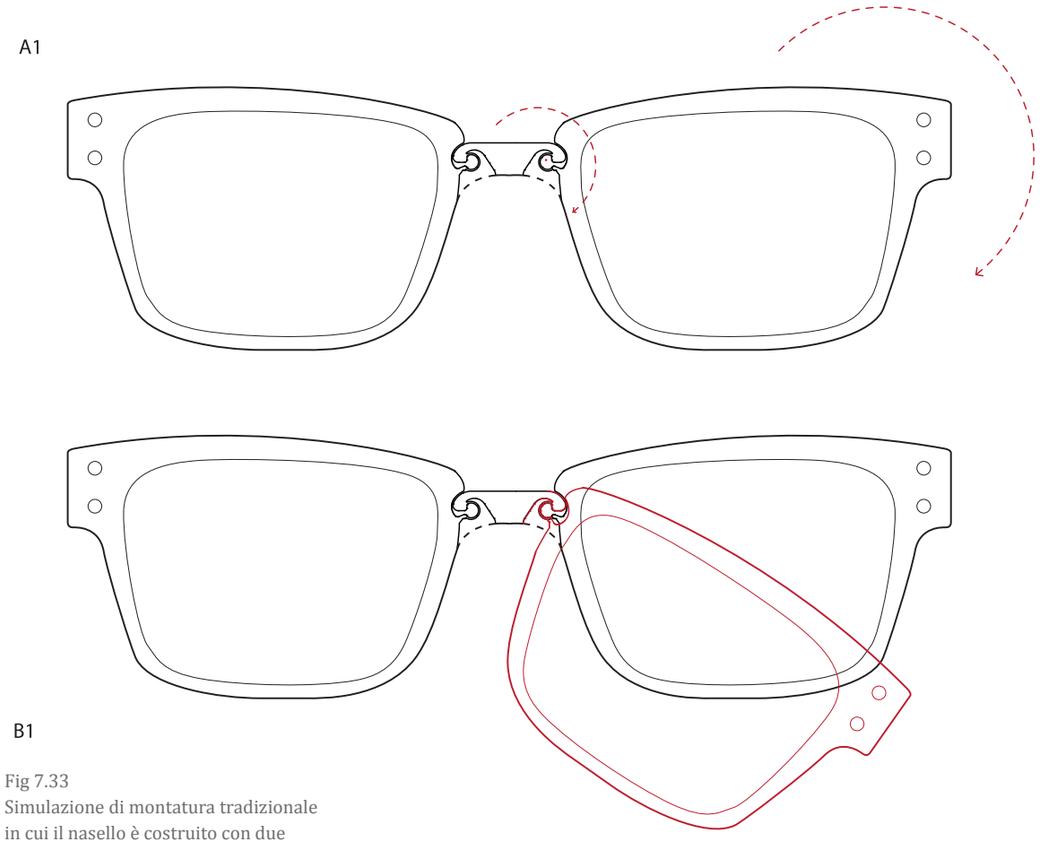
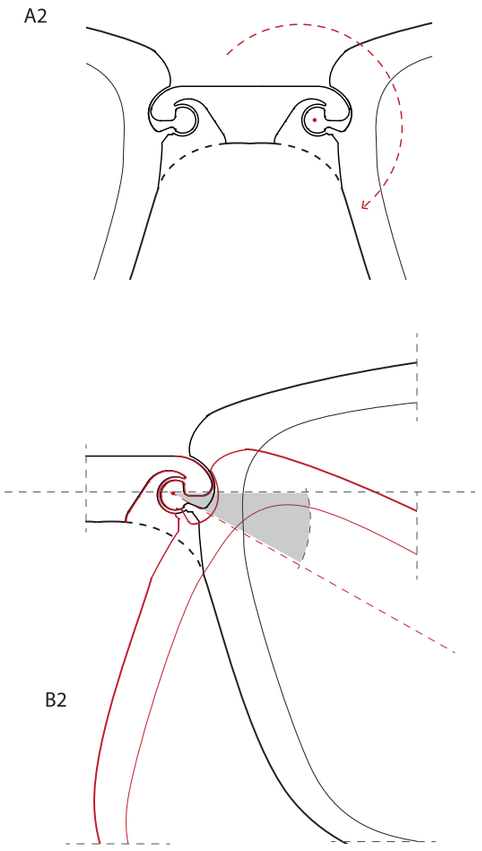


Fig 7.33
Simulazione di montatura tradizionale in cui il nasello è costruito con due cerniere *compliant*



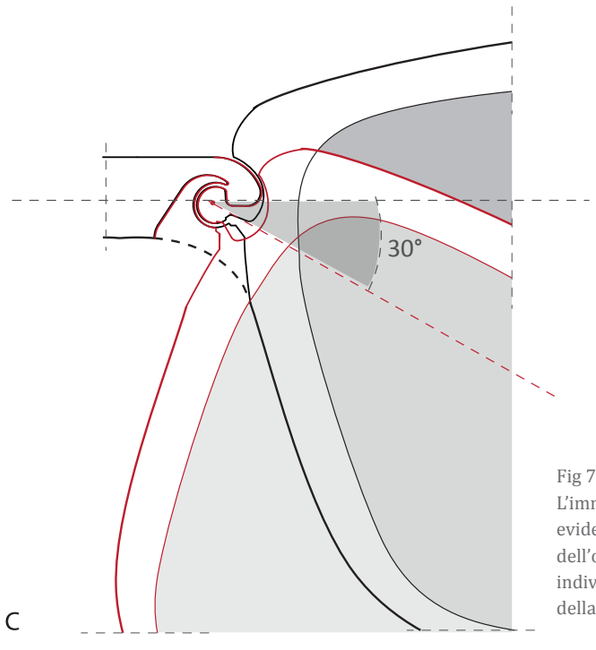
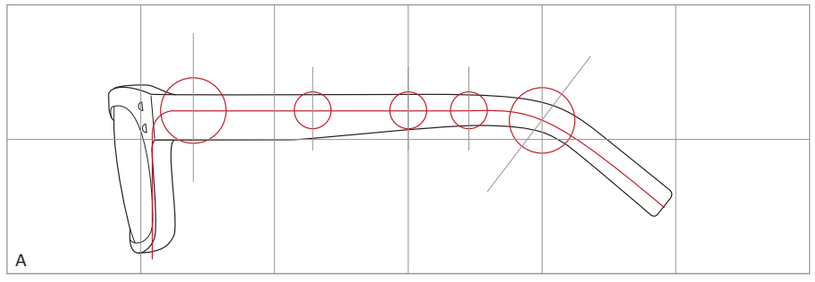


Fig 7.34
L'immagine (C) è uno zoom che evidenzia l'angolo di rotazione dell'occhiale rispetto al punto centrale individuato come asse della rotazione della cerniera: La rotazione è di 30°

Studio 3 - Proiezione sul piano delle cerniere sulla stecca, perpendicolari al frontalino

A partire dallo Studio 1 si propone una versione in cui la cerniera è specchiata sull'asse verticale e ruotata di 90 gradi, così da porre la stecca perpendicolare rispetto alla posizione consueta delle stecche della montatura di occhiali. Fig 16.7



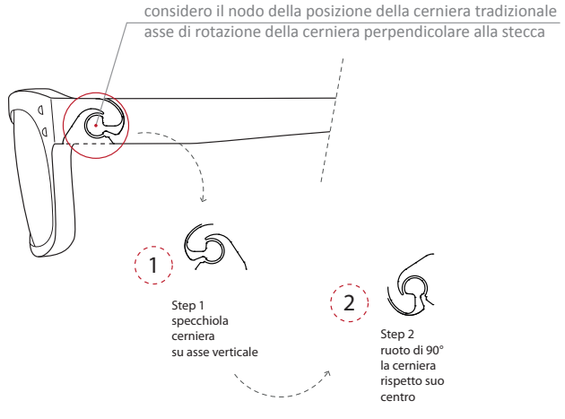
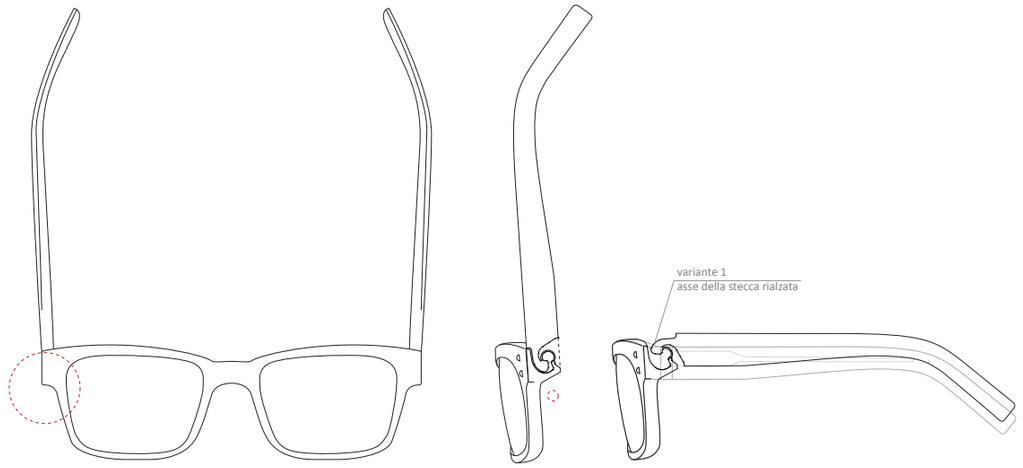


Fig 7.35
A si considera la proiezione nel piano della stecca come per lo studio 1
B.1 e B.2 mostrano l'operazione di ribaltamento e rotazione della cerniera

7.35



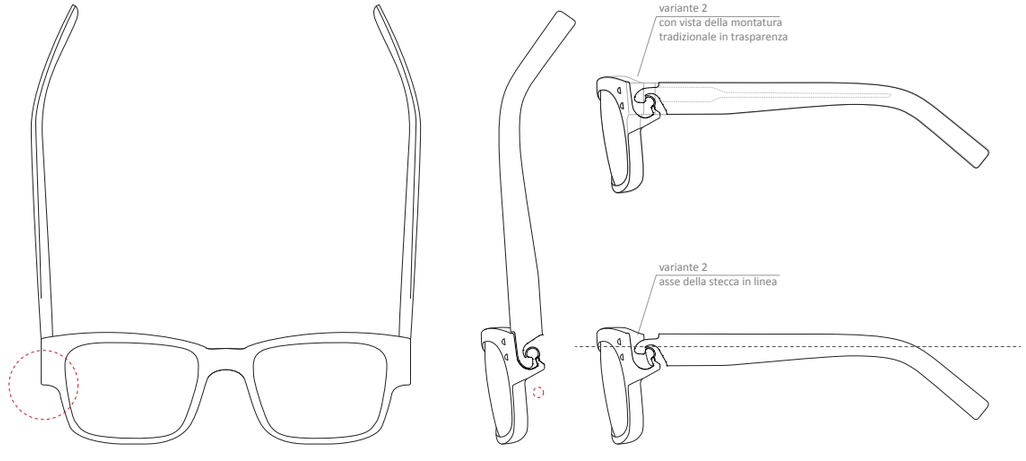


Fig 7.36
Risultante della montatura con la cerniera ribaltata e ruotata.
In questo esempio si mette in risalto la sproporzione che si ottiene in vista laterale quando simantiere la proporzione del frontalino
L'immagine sottostante, invece, riporta la correzione della montatura sulla vista frontale e riposizionamento traslato verso il basso della cerniera per ottenere l'allineamento della stecca sull'asse della montatura tradizionale

7.36

Proposte Metaprogettuali

In questo paragrafo si riportano due modelli di prototipo di montatura di occhiali.

Modello 1
La prima proposta ragiona sul concept di una montatura-accessorio: l'idea è creare un occhiale-collana.
Un oggetto che stia appeso al collo, ma che possa diventare un paio di occhiali con una semplice rotazione. Concettualmente il prodotto passa da una condizione di bidimensionalità (collana) a una di tridimensionalità (montatura, dove frontale e stecche sono perpendicolari). Il modello è un'elaborazione del terzo studio presentato precedentemente ed è stato stampato con una WASP con filamento in PLA trasparente.

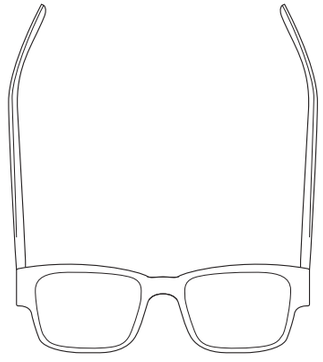
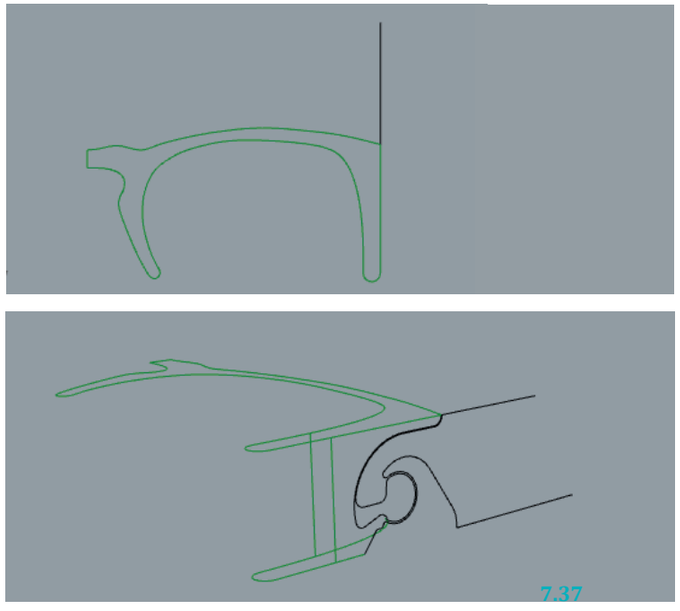
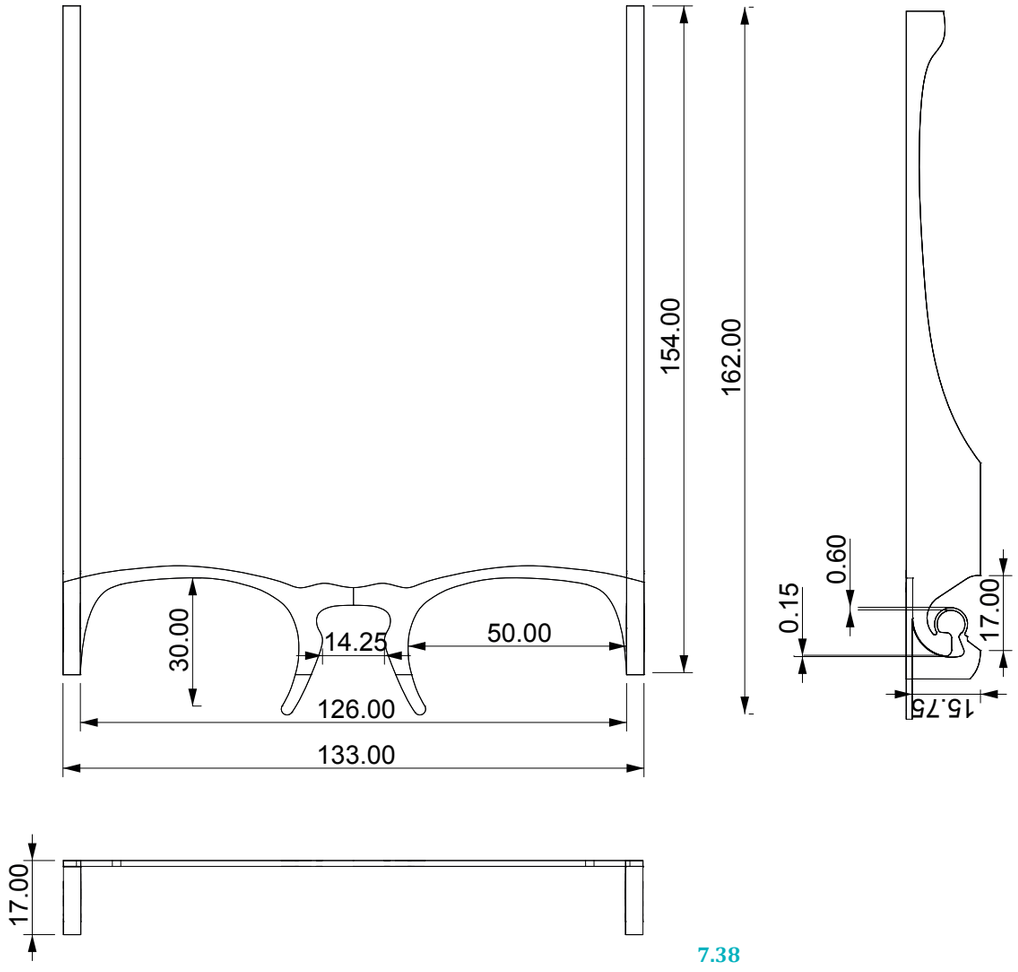


Fig 7.37
Dal disegno della vista della montatura con cerniera riflessa e ruotata, alla modellazione tridimensionale. In verde il frontalino della montatura, in nero la cerniera



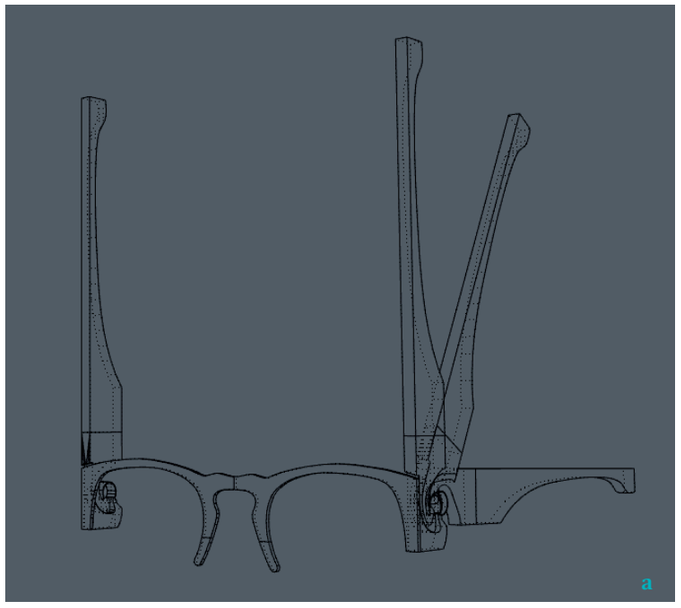
7.37

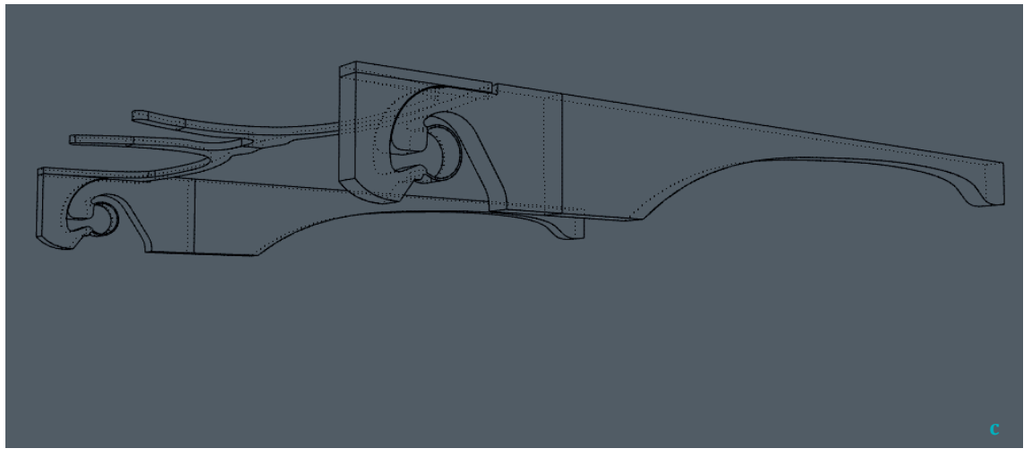
Fig 7.38
Quote della montatura
valori della cerniera:
C - clearance: 0.5mm
r - raggio: 4mm
t - altezza: 4mm
w - spessore: 0.15mm

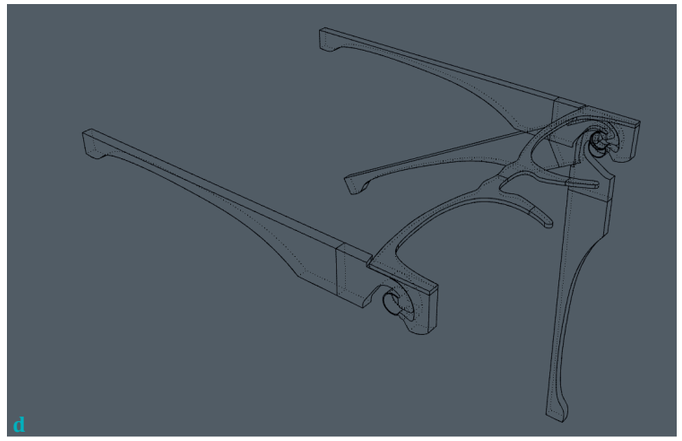


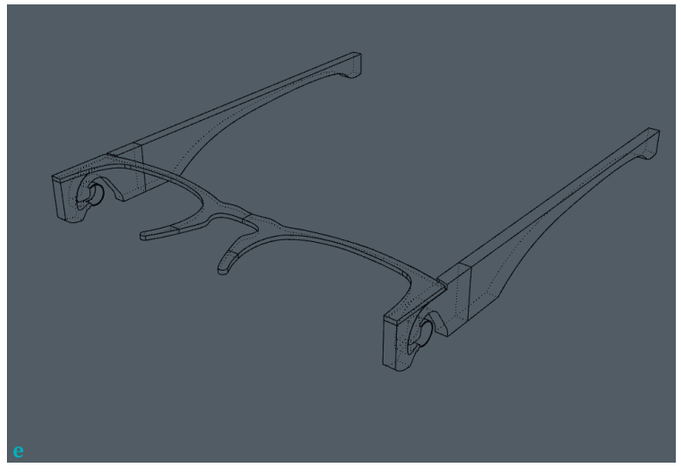
7.38

Figg 7.38 (a, b, c, d, e, f)









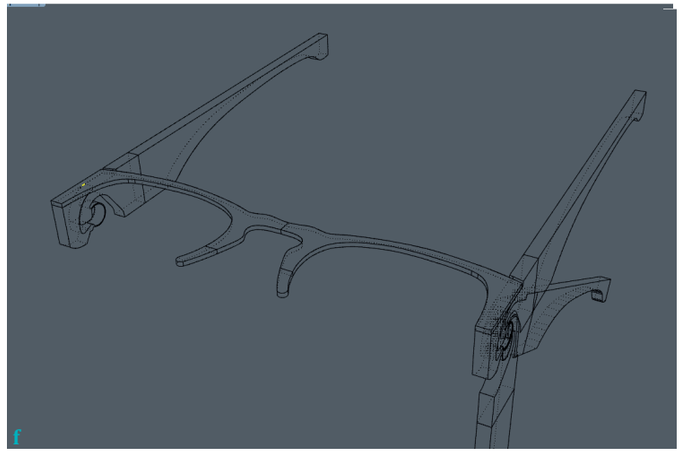
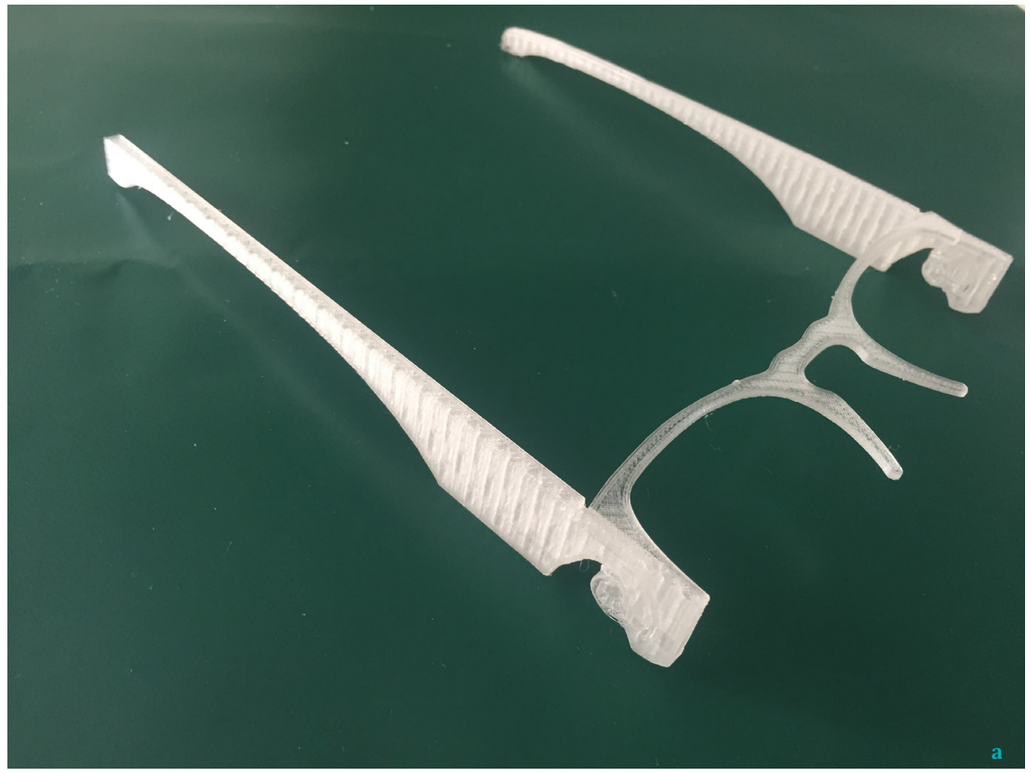
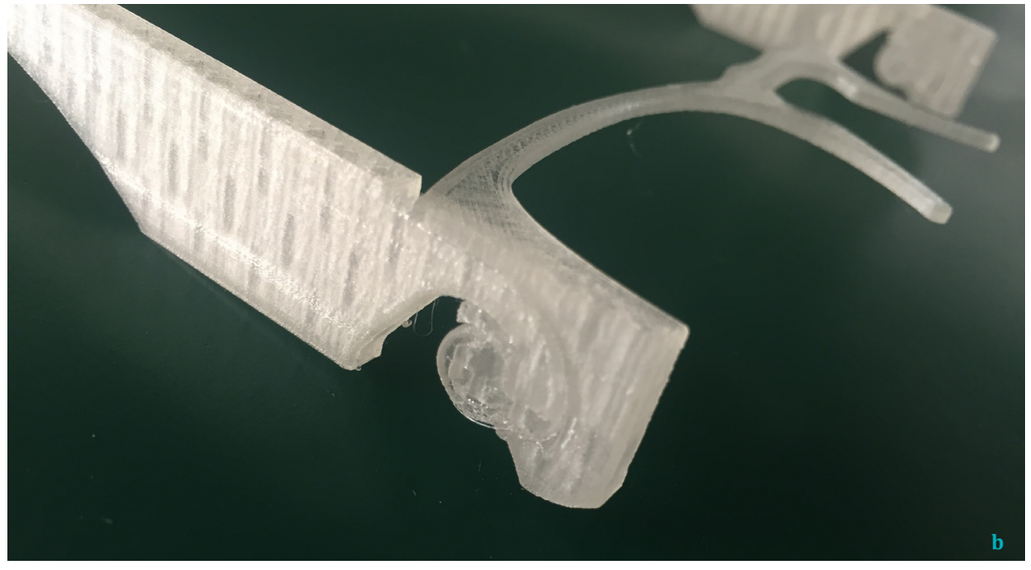
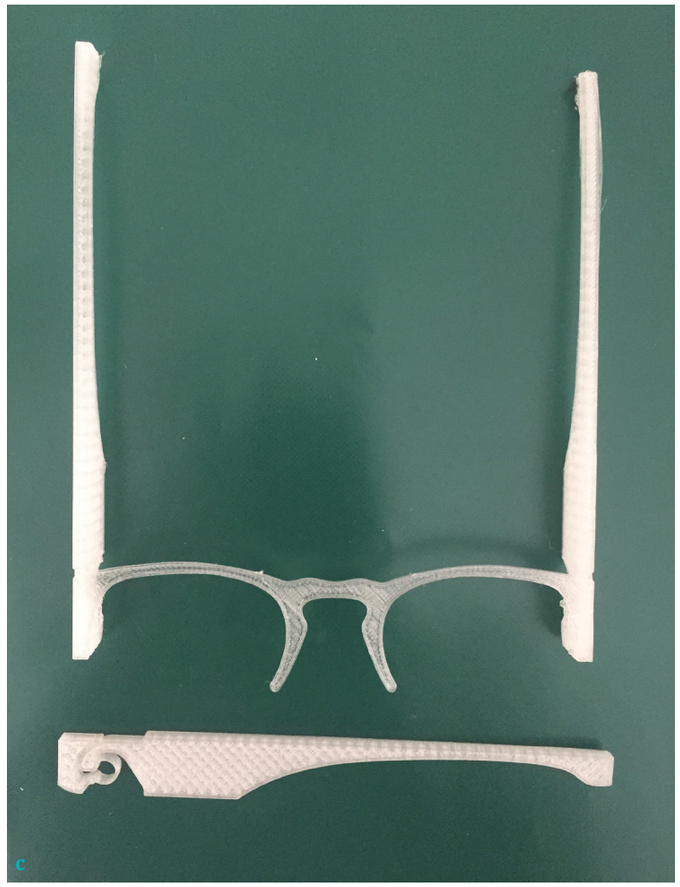
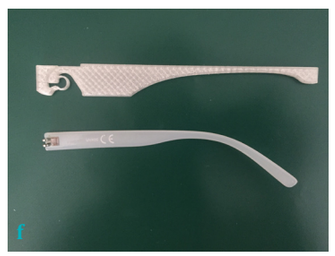


Fig 7.38
a- Modello 3D della montatura con cerniera con simulazione di movimento
b- Vista prospettica laterale con stecca perpendicolare e cerniera in tensione (aperta)
c- vista prospettica laterale con cerniera chiusa e stecca a battente
d,e,f- Viste prospettiche varie con simulazione del movimento della stecca.







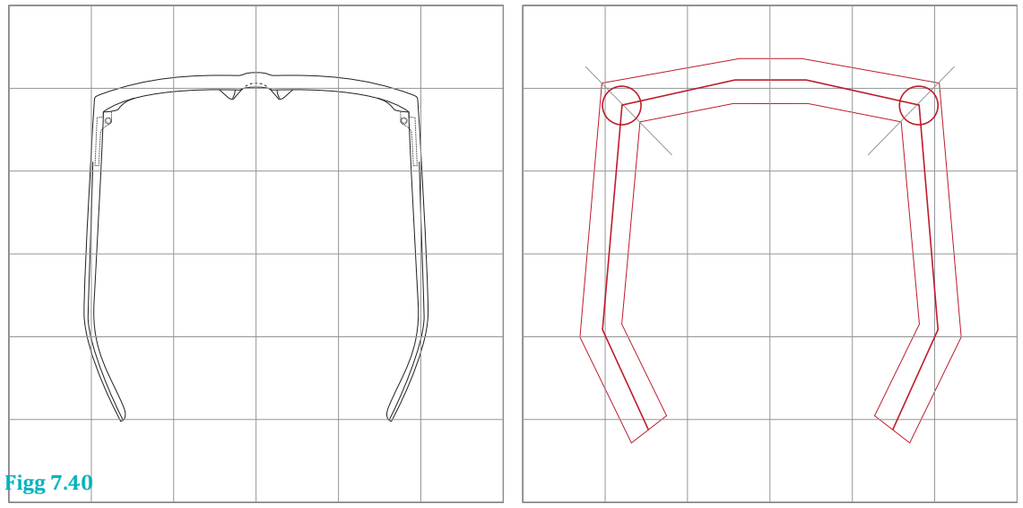


Figg 7.39 (a, b, c, d, e, f)

Fig 7.39
a- Modello 3D stampato in PLA trasparente della montatura con cerniera
b- Dettaglio del modello stampato in 3D sulla cerniera (scala 1:1)
c- Vista frontale della montatura e vista laterale dettaglio stecca
d- Dettaglio della cerniera e dell'aggancio alla montatura delfrontalino
c, f- Prototipo stampato in 3D messo a confronto con una montatura tradizionale in polimero stampato

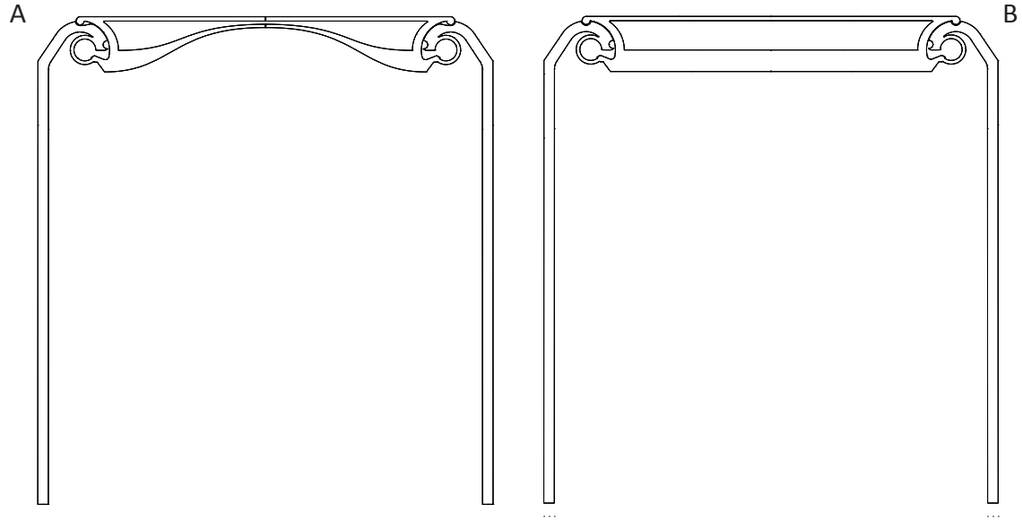
Proposte Metaprogettuali

Modello 2
La seconda proposta studia un meccanismo di chiusura ed apertura a scatto delle stecche. Per questa soluzione le cerniere sono posizionate parallelamente al piano in cui la montatura è vista dall'alto (Fig 7.40, 7.41). Per questa proposta, l'attenzione è stata posta maggiormente sul design della cerniera con il meccanismo di scatto ed il rapporto tra lo spessore della trave interna con quella esterna.



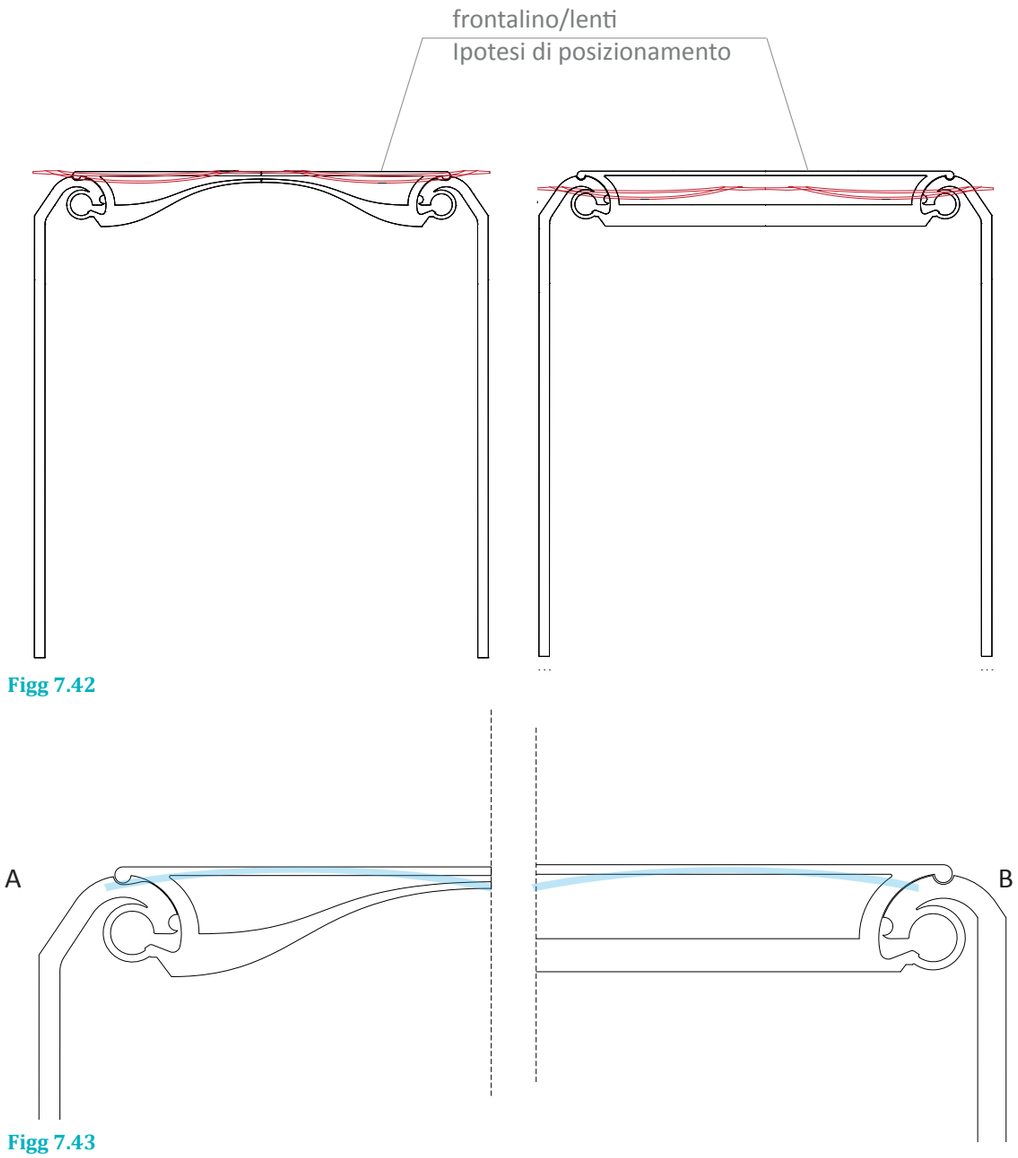
Figg 7.40

Fig 7.40
Individuazione delle cerniere per il Modello 2
Fig 7.41
Concept del Modello 2 visto in pianta. Versione (a) con linee rette, versione (b) con linea curva a convergere sul nasello



Figg 7.41

Figg 7.41
Concept del Modello 2 visto in pianta. Versione (a) con linee rette, versione (b) con linea curva a convergere sul nasello

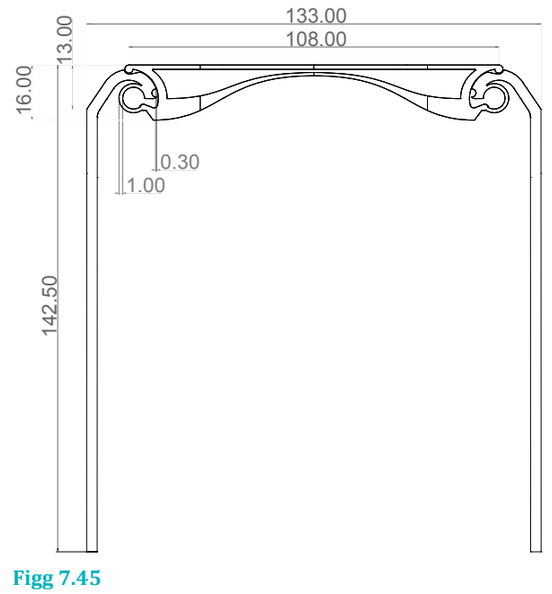


Figg 7.42

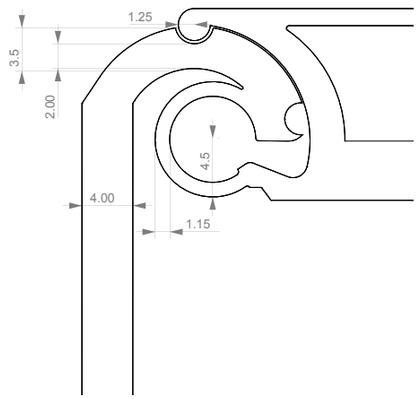
Figg 7.43

Figg 7.42
Ipotesi di posizionamento delle lenti all'interno delle rispettive montature.
Figg 7.43
(a), (b): Sezione del prototipo in disegno vettoriale: ipotesi di posizionamento della lente per (a) e (b)(in blu e azzurro la lente

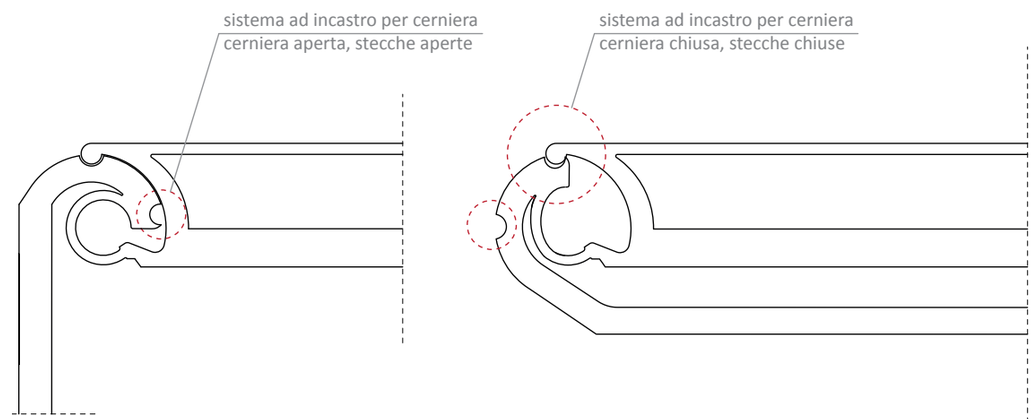
Fig 7.44
Quote generali del prototipo
Fig 7.45
Quote (a) e (b). Valori per la cerniera (b):
C - clearance: 0.10 mm
r - raggio: 4.5mm
t - altezza: 4mm
w - spessore: 1.15mm



Figg 7.45



Figg 7.46



Figg 7.45

Figg 7.46

Figg 7.45 e 7.46
Sezioni viste dall'alto del sistema di chiusura della cerniera.
Quando le stecche si richiudono disponendosi parallele al frontalino la cerniera si blocca in posizione di trazione

Figg 7.47 (a, b, c, d, e, f)

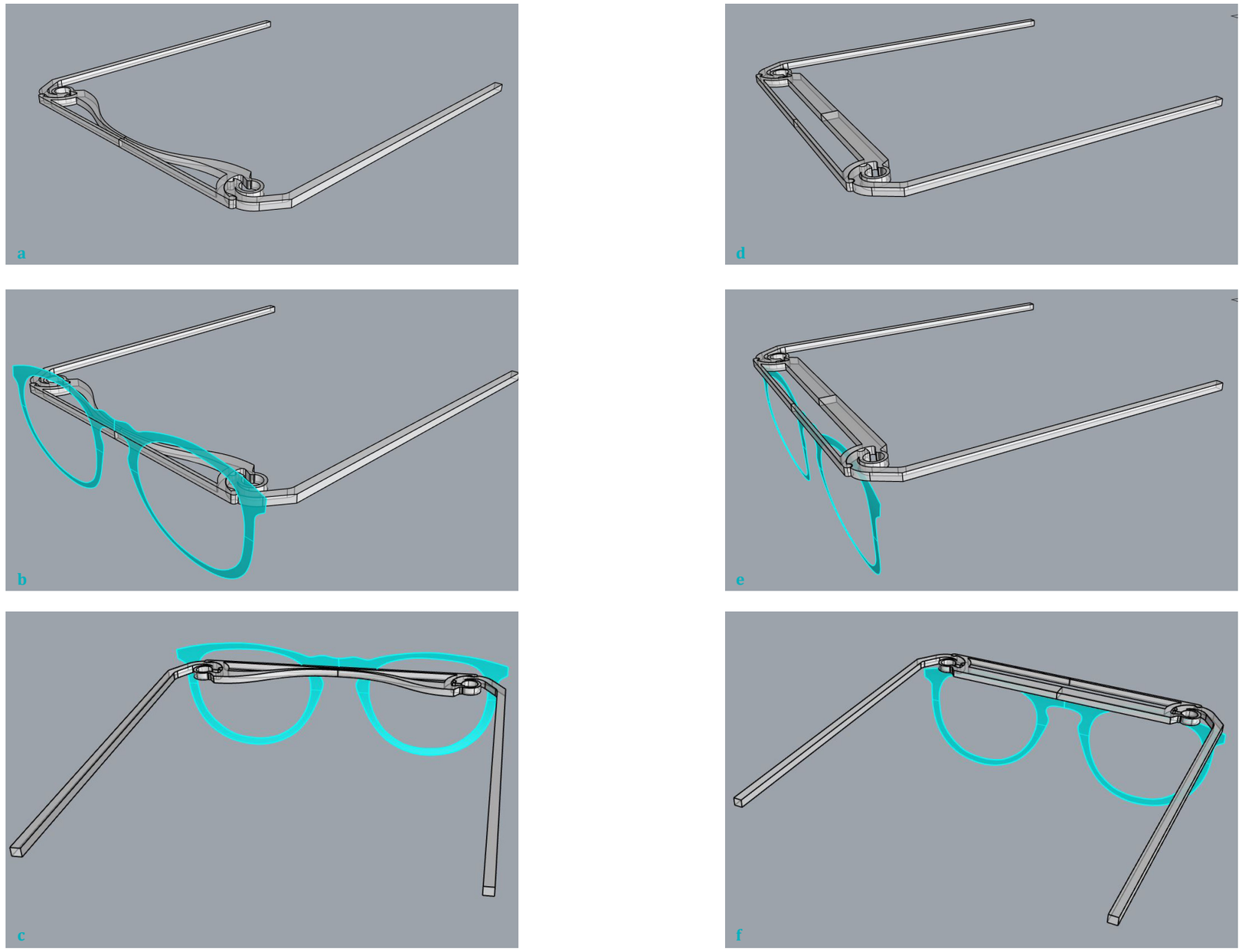
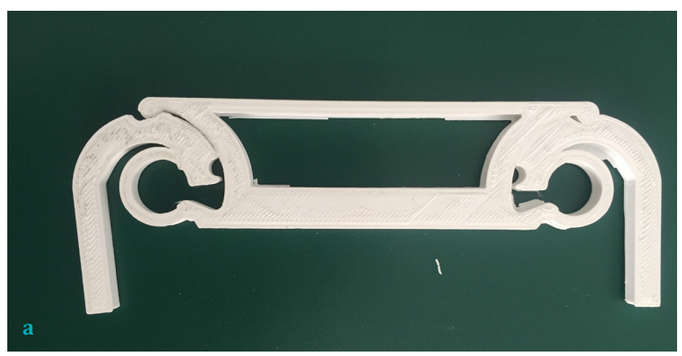
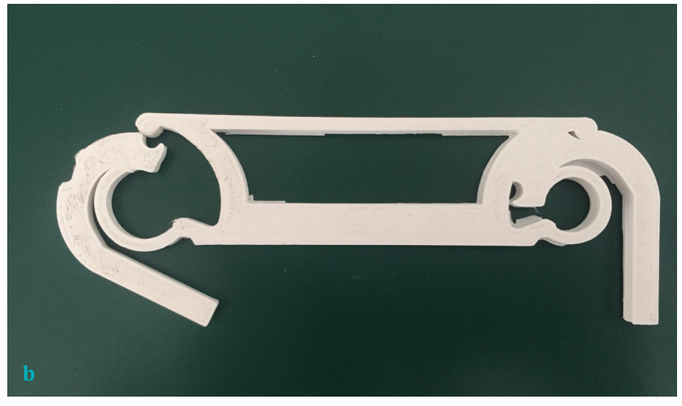


Fig 7.47
Immagini del modello 3D dei due concept(a) e (b) per il Modello 2

Figg 7.48 (a, b, c, d, e, f)





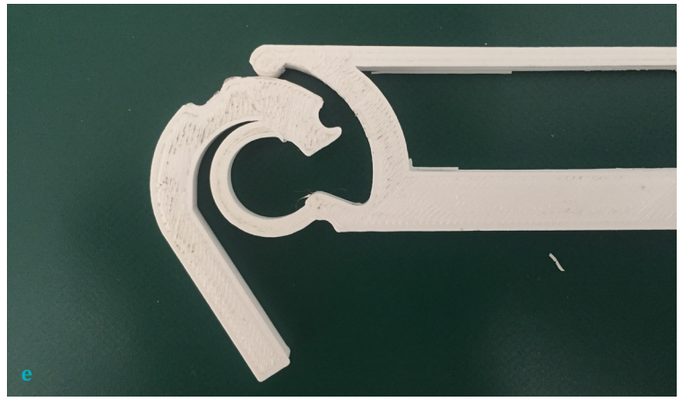
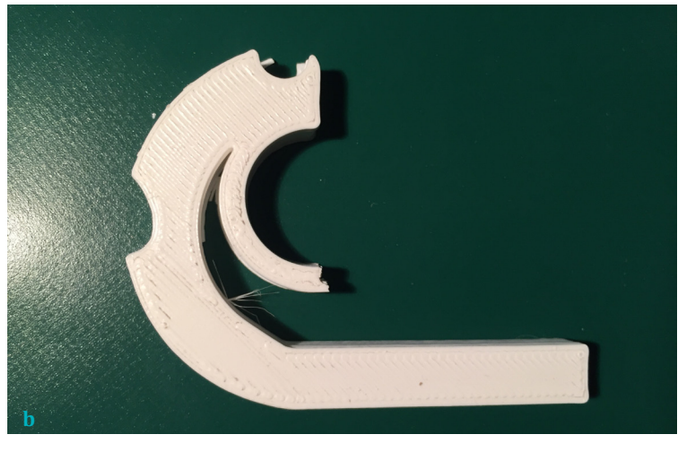


Fig 7.48
Modello 2 (a) stampato in 3D: simulazione dell'apertura della cerniera e sistema di fissaggio del meccanismo
a e b- simulazione apertura e chiusura
c- Esperimento di taglio laser CNC del Modello 2
Materiale: plexiglass da 2mm
Il provino risulta estremamente fragile e poco elastico
d, e, f- zoom e sequenza sistema a scatto della cerniera.

Figg 7.49 (a, b, c, d, e)



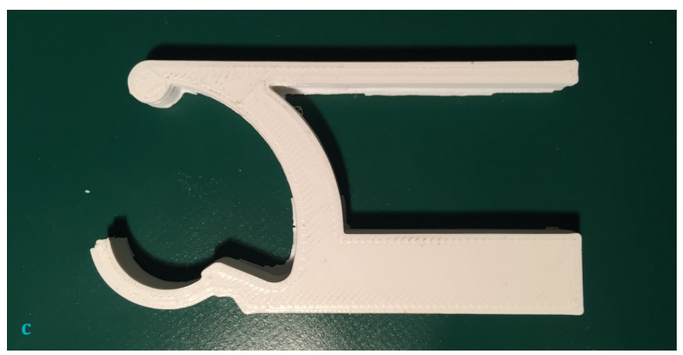


Fig 7.49
a- cerniera scalata in scala del 50%, ad eccezione del valore di w che è diminuito del 33%
Ingombri totali 20x10
b, c, d, e- Rottura della cerniera sotto trazione

Esiti

Esito della sperimentazione per il modello 1
Il passaggio dallo Studio 3 al Modello 1 ha permesso di verificare i rapporti tra la scala della cerniera e le proporzioni di una tradizionale montatura di occhiali. L'utilità di questo approccio metaprogettuale consiste nel affrontare passo per passo l'adattabilità della metodologia sviluppata e validarne il significato. Con questo esperimento quindi è dato affermare che è possibile riprodurre una montatura di occhiali 3D che sostituisce - alla cerniera tradizionale - una cerniera composta da un metamateriale meccanico nella sua dimensione in scala 1:1.

Esito della sperimentazione per il modello 2
Gli Studi 1 e 2 sono alla base del metaprogetto presentato nel Modello 2: il ragionamento, infatti, si fonda sulla visiona planare della montatura della disposizione della cerniera. In questa proposta si include inoltre un'analisi, con annessa proposta metaprogettuale, di sistema a scatto per serrare in posizione "aperta" la cerniera, quando si vuole tenere l'occhiale chiuso. Il sistema a scatto sfrutta l'elasticità del materiale e la sua morfologia. Questo vanatggio è dato dalla costruzione del prototipo in monoblocco monomaterico, il cui fulcro risiede nel nodo complanare alle stecche e perpendicolare al frontalino, su cui poggiano le cerniere.

Bibliografia e sitografia del capitolo

Bibliografia

International PublicationNumber: WO 2009/034551A1,International Patent ClassificationE05D 1/02, (20066.01); E05D1/04 (2006/01)

Sitografia

http://www.munart.org/index.php?p=18
https://www. glance24.com/it/news/24/lamontatura-degli-occhiali
http://www.italiansdoitbetter.it/vincitori/pq-by-ron-arad/;
http://accessorama-d.blogautore.repubblica.it/2015/03/02/ron-arad-disegna-occhiali-da-sole-3d/
https://it.3dsystems.com/blog/2015/06/sls-printed-shades-pqeyewear-infuse-creativity-sunglasses-design-video
https://www.3ders.org/articles/20151031-introducing-d-frames-ron-arads-3d-printed-pq-eyewear-sunglasses.html
http://www.nendo.jp/en/works/zerogra-2/zerografold/?/www.nendo.jp/en/works/magne-hinge-2/?egenre
www.designboom.com/design/snap-reading-computer-glasses-nendo-temple-nose-piece-06-18-2014/
https://www.starck.com/starck-eyes-summer-collection-2016-luxottica-p3323
http://www.fournines.co.jp/en/concept/
https://www.indiegogo.com/projects/mono-aneyewear-3d-printed-to-fit-your-face#/
https://gizmodo.com/a-clever-segmented-hingeensures-these-glasses-fit-anyo-1670622712
http://www.spineoptics.com/tech/
https://technogog.com/review/review-of-spine-optics-eyewear/
http://www.ic-berlin.de/the-hinge
https://hoet.be/en
http://www.undostrial.com/
https://www.lunettes-originales.fr/actualites/gotti-dimensioncollection-lunettes-3d-acier/
https://monoqool.com/screwless-hinges/
https://minimalissimo.com/frame/
https://www.instructables.com/id/Wooden-Glasses-With-Hinge-and-Acrylic-Lenses/
http://www.framedbykarl.com/product/wolfgang/
http://www.tarazistudio.com/portfolio/ezrieyes/?id=101

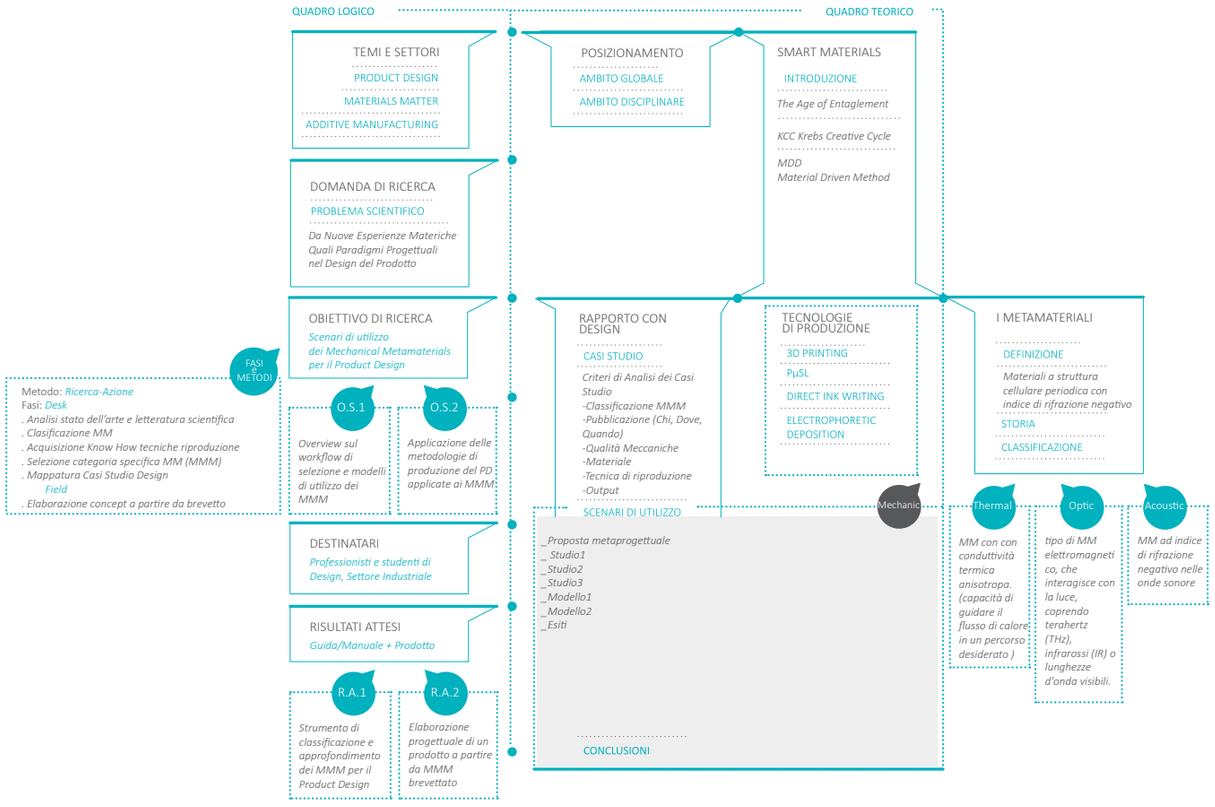
PARTE III

Conclusione

CAPITOLO 8 CONCLUSIONI

ABSTRACT
During the last twenty years, metamaterials have attracted considerable interest in the disciplines of physics, mathematics and materials engineering. However, they are still almost unknown in design and product design. The dissemination of the study of the aforementioned materials is due, in particular, to recent developments in the field of technologies related to production tools concerning additive manufacturing. Since this technology is unanimously considered an instrument of proven effectiveness also in design, the objective of the doctoral research was therefore to shed light on a category of avant-garde materials, through the 1: 1 scale design filter, investigating the nature, the modalities of reproduction, and the possible outputs in the product design. Starting from the expected results set out in the opening chapters, the objectives achieved are reported:
R1 has generated the definition of a Periodic Table of mechanical metamaterials
The R2 has returned the creation of a methodological model for the reconfiguration of a metamateric product.
The R3 has led to the definition of a concept of eyeglass frames that uses the methodological model presented in R2

ABSTRACT
Nel corso dell'ultimo ventennio, i metamateriali hanno riscosso discreto interesse nelle discipline della fisica, della matematica e dell'ingegneria dei materiali. Tuttavia essi sono ancora pressoché sconosciuti nel Design e nella progettazione di prodotto. La diffusione dello studio dei suddetti materiali è dovuta, specie, ai recenti sviluppi nel settore delle tecnologie relative agli strumenti di produzione concernenti l'*additive manufacturing*. Poiché questa tecnologia è unanimemente considerata uno strumento di comprovata efficacia anche nel design, l'obiettivo della ricerca dottorale è stato quindi quello di fare luce su una categoria di materiali d'avanguardia, attraverso il filtro della progettazione in scala 1:1, indagandone la natura, le modalità di riproduzione, ed i possibili output nel design di prodotto.
A partire dai risultati attesi enunciati nei capitoli di apertura si riportano gli obiettivi raggiunti:
L'R1 ha generato la definizione di una Tavola Periodica dei metamateriali meccanici
L'R2 ha restituito la creazione di un modello metodologico per la riconfigurazione di prodotto in chiave metamaterica.
L'R3 ha portato alla definizione di un concept di montatura di occhiale che si avvale del modello metodologico esposto nel R2



9 Risultati attesi e ottenuti

Il primo obiettivo che la ricerca dottorale si è posta, è stato fare luce su una categoria di materiali d'avanguardia - i metamateriali - ancora sconosciuti nell'ambito del design del prodotto. Ad essi, infatti, è stato riconosciuto discreto interesse nelle discipline della fisica, della matematica e dell'ingegneria dei materiali. La diffusione dello studio dei suddetti materiali è dovuta, specie, ai recenti sviluppi nel settore delle tecnologie relative agli strumenti di produzione concernenti l'*additive manufacturing*. Poiché questa tecnologia è unanimemente considerata uno strumento di comprovata efficacia anche nel design, l'intuizione di indagare la natura, le modalità di riproduzione, ed i possibili output di questi materiali per il prodotto, è stato consequenziale.
Riprendendo quindi i risultati attesi:

R1: Fornire uno strumento cartaceo sinottico di classificazione dei metamateriali;
(a): ricerca, analisi, e messa a confronto dei sistemi di classificazione già esistenti
(b): rielaborazione dei casi e restituzione di un modello che abbia come target il designer di prodotto

La Tavola Periodica è uno strumento creato a partire dallo studio delle fonti presenti allo stato dell'arte. I riferimenti, rintracciati online e offline, hanno fornito una vasta quantità di materiale. Per arrivare ad elaborare uno schema di sintesi della classificazione dei metamateriali, è stato necessario il supporto di esperti in matematica e fisica che aiutassero ad approfondire contenuti tecnici, al fine di fare chiarezza sulle proprietà che distinguono i metamateriali dagli altri materiali e, soprattutto, le varie sottocategorie di metamateriali tra loro.
La primaria distinzione che ha permesso di selezionare una categoria specifica, - quella dei metamateriali meccanici - è stata vagliare le differenze tra i metamateriali elettromagnetici ed i metamateriali meccanici; le prestazioni dei primi dipendono,

infatti, da fattori fisici estremamente complessi, e sono trattati esclusivamente in scala nano e micro metrica. I secondi, invece, sono trattabili anche in scala 1:1 e dipendono solamente da prestazioni di tipo meccanico. Questa scrematura ha permesso di ribilanciare la ricerca su temi più vicini alla scala con la quale si rapporta la pratica del design, riconducendo l'attenzione sull'argomento dei materiali per il design.
Seguendo il corso di questa prima diramazione, sono risultate coesistere diverse "scuole di pensiero", ognuna delle quali ha una propria visione relativa della classificazione dei metamateriali meccanici; in funzione dell'estrazione accademica e del focus di ricerca dei singoli riferimenti, scaturiscono incongruenze. Ad esempio, il Professor Amir Zadpoor della TU DELF, esperto di biomedica, classifica secondo un criterio divergente rispetto a Bertoldi, fisica di Harvard, interessata ai temi del packaging e degli smart devices. Per questo motivo si è proceduto individuando e mettendo a punto una metodologia di confronto delle fonti rintracciate.
Su questa base, si propone, quindi, la Tavola Periodica.

Poiché, fondamentalmente, l'intento è quello di fornire uno strumento utile a designer e progettisti, che realizzano artefatti in scala reale, l'obiettivo che la tavola si propone di raggiungere è quello di restituire non solo il valore tecnico dei metamateriali meccanici classificati, ma esporre anche il significato di ciascuno di essi in termini di *material experience*.

R2: Fornire un modello metodologico per un approccio progettuale (metodologia/processo per la realizzazione di un prodotto a partire da un metamateriale meccanico);

(a): Individuare un metamateriale meccanico
(b): Individuare la scala di utilizzo del metamateriale meccanico, quindi il prodotto al quale applicarlo
(c): Sistematizzare i passaggi che mettono in atto l'operazione di trasferimento tecnologico dalla scala nano alla scala 1:1

La metodologia sviluppata è stata verificata grazie al contributo del professore Nicola Pio Belfiore dell'università di Ingegneria meccanica di Roma 3. Il brevetto del materiale usato, da lui fornito, ha di base permesso di soddisfare tutti e tre i punti della *R2.*

Il primo step è stato verificare il comportamento di ogni materiale e classificarlo tra i metamateriali meccanici. Il compliant mechanism utilizzato è un materiale sviluppato in scala 1:1 ma che, se trattato in scala nanometrica e considerato come unità di base per la costruzione di una microarchitettura, genera di fatto un metamateriale meccanico.
Esaurito questo passaggio, si è stabilito di considerare l'elemento in scala 1:1. Questa scelta ha semplificato la progettazione, in quanto ha ridotto le variabili relative ai gradi di libertà: più cerniere, più gradi di libertà.
L'approccio applicato per sviluppare il metodo prende adito dal design: si è stabilito innanzitutto l'oggetto *target* da progettare. Quindi è stata effettuata un'analisi degli elementi caratterizzanti l'oggetto; la sistematizzazione degli step del metodo si struttura, a partire dal processo di scomposizione dell'oggetto selezionato.
L'oggetto viene sintetizzato in una linea spezzata che viene dapprima proiettata su un piano. Dal piano si definiscono i punti di interesse della spezzata; si tracciano poi gli assi passanti per i punti di interesse. Infine si procede con la ricostruzione dell'oggetto a partire dai nuovi punti individuati e se ne ri-modella la forma.

R3: Creare un concept di prodotto che si avvale del modello metodologico esposto nel R2;
(a): descrivere le caratteristiche del prodotto identificato
(b): Applicare la metodologia *R2*
(c): Verificare il risultato

Per verificare l'efficienza del metodo, la ricerca propone diversi studi dell'oggetto selezionato (la montatura di occhiali), giocando con le possibili configurazioni offerte dai vincoli individuati (punti di interesse, nodi). Nella sperimentazione sono infine proposte due configurazioni che sono state riprodotte con tecniche di *additive manufacturing*. Sono stati condotti test, sia reali che virtuali, sia sul comportamento del materiale che sulle variabili relative alle possibili configurazioni.
Anche se i risultati si fermano ad una fase metaprogettuale, sono sufficienti per verificare la funzionalità del metodo sviluppato.

9.2 Risposte alle domande iniziali

Delineati i risultati ottenuti, si verificano le domande iniziali.

D1: Quali benefici porta, in termini di innovazione e nuovi scenari materici, il trasferimento del know-how tra discipline scientifiche e creative?

L'approccio interdisciplinare della proposta dottorale ha dato adito alla costruzione di un team multidisciplinare che ha visto collaborare designer di prodotto, esperti di materiali, chimici, ingegneri meccanici, fisici e matematici, offrendo l'occasione di un confronto " a più scale" che ha restituito ad ogni membro del team costituito, una visione d'insieme.
Questo processo ha permesso, di fatto, un avanzamento nella ricerca condotta da ogni singolo membro. Nello specifico, per i designer, abituati a lavorare in scala 1:1, diventa sostanziale relazionarsi a progettisti che lavorano su scale inferiori e, viceversa, è per essi fondamentale rintracciare una visione globale del loro lavoro. Per quanto riguarda la realizzazione dei prototipi, non sarebbe stato possibile arrivare a un tale grado di accortezza nella gestione morfologica dell'oggetto se non vi fosse stato il contributo di esperti del settore. L'apparato teorico presentato in questa sede ha contribuito a mettere a punto questo processo di integrazione interdisciplinare del progetto.

D2: Quali cambiamenti subisce il processo metodologico e deontologico della creazione di un nuovo prodotto se il designer può partire dalla progettazione stessa della materia?

Si è potuto vedere come, attraverso le *best practices* riportate (cfr cap 2.2; 4.4.2), la relazione *designer-material experience*, ha condotto all'elaborazioni di nuovi approcci e metodi applicati nella sperimentazione progettuale. Essi hanno condotto a risultati innovativi in campo di prestazioni e user experience sul prodotto di design, migliorando o addirittura intervendo sull'usabilità degli stessi prodotti. La meta-experience proposta con la sperimentazione sulla montatura di occhiali, in questa sede presentata a carattere originale, è un tentativo di indagare, nei panni di progettista, l'essenza di un processo basato sul concetto di scalabilità e dimostra che è possibile riscrivere l'usabilità e l'estetica di un oggetto partendo appunto dalla costruzione della materia stessa di cui sarà composta e stabilendo in anticipo, attraverso la composizione di quella stessa materia, le prestazioni dell'oggetto fruito in scala 1:1

D3: Come si presentano e cosa sono, di fatto, i metamateriali meccanici?

Microstrutture. Unità architettoniche legate le une alle altre, le cui prestazioni sono progettate a partire dalla loro stessa organizzazione nello spazio. Quando queste microstrutture sono talmente piccole da avere una dimensione inferiore a quella delle onde, manifestano un comportamento opposto a quanto naturalmente atteso. Se si prende quindi in considerazione il materiale composto da queste micro unità strutturali, si verificano dei comportamenti inconsueti in termini di prestazioni. Proprio questo aspetto costituisce la domanda centrale alla quale l'elaborato ha provato a dare una risposta: Cosa succede se progetto un prodotto utilizzando materiali dalle prestazioni inattese?

D4: In che misura, e con quali strumenti, è possibile farne uso nella progettazione di prodotto?

Come più volte si è detto, i metamateriali meccanici sono ancora lontani dalla prospettiva di un'industrializzazione generalizzata; l'utilizzo collaudato come materiali per il design di prodotto risulta essere ancora remoto. E' invece certamente possibile affermare con certezza che i metamateriali possono essere utilizzati per sperimentare, in quanto le tecniche per riprodurli sono sufficientemente conosciute e diffuse.
Inoltre, l'affascinante processo architettonico con il quale è possibile progettare i metamateriali meccanici, offre un intrigante spunto per ragionare sulle esperienze fruitive che questi materiali potrebbero comportare in termini di experience design.

D5: E' possibile classificare i metamateriali meccanici all'interno della famiglia degli smart materials?

Se intesi nel loro significato esteso, gli smart materials, sono una famiglia in espansione ed evoluzione, dai confini estremamente labili: come per i mechanical metamaterials, anch'essi sono

soggetti agli avanzamenti tecnologici relativi agli strumenti per la creazione e la progettazione di nuovi materiali. Come però riportato dalle conversazioni con Marinella Ferrara le due famiglie sono nettamente distinte dalla natura stessa con la quale si presentano: gli smart materials si generano da una matrice chimica, mentre i mechanical metamaterials da una meccanica ed "architettonica".

9.3 Prospettive Future

Con il supporto della tavola periodica e del metodo sviluppato in questo lavoro, sarà ora possibile avventurarsi nella progettazione di oggetti che si avvalgono di metamateriali meccanici e ragionare su prestazioni ed esperienze materiche ancora poco indagate.

Un importante passo avanti che è possibile anticipare consiste nello sviluppare nuovi prototipi utilizzando tecniche di riproduzione SLS. Con questa tipologia di produzione, infatti, si ha un maggiore controllo della materia e quindi delle prestazioni attese

BIBLIOGRAFIA
References

References

Nelson, G. (1957), Problems of Design, Whitney Publications
Ashby, M. (1995), Materials Selection in Mechanical Design, Butterworth-Heinemann
Manzini, E. (1986), The Material of Invention, ed Arcadia
Ashby, M., Johnson, K. (2009), Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design, Butterworth-Heinemann;
Deserti, A. (2010). Mappe dell'Advance Design. M. Celi (Eds.). AdvanceDesign: Visioni, percorsi e strumenti per predisporsi allinnovazione continua, 47-64.
Miodovnik, M., Tempelman, E., (2014), Light Touch Matters. The product is the interface, Materials Matters VII;
Wilkes, S. (2015), Design Tools for Interdisciplinary transaltion of material expereinces, Journal of Materials & Design
Karana, E. (2015). Material Drivn Design (MOD): A method to design for material experiences. International Journal of Design.
Overvelde, J.T.,Weaver, J.C., Hoberman, C., Bertoldi, K.(2017), Rational design of reconfigurable prismatic architected materials, Nature.
Carullo,C. Cecchini,M. Ferrara,C. Langella,S. Lucibello,S. (2017). From Science to Design: the Design4Materials virtuous cycle, The Design Journal, 20:sup1, (S1794-S1806)
Veselago, V. G. (1968) The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ, Sov. Phys. Usp. 10 509–514
Boardman, A. (2010). Pioneers in metamaterials: John Pendry and Victor Veselago, IOP Publishing Ltd.
Pendry, J.B. (2000). Negative Refraction Makes a Perfect Lens, Physical Review Letters, (pp. 85, 3966-3969)
Smith, D. R., Padilla, W., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., and Schultz, S. (2000) A composite medium with simultaneous negative permittivity and permeability Phys. Rev. Lett. 84, 4184–4187
Cui T., Smith D., Liu R., (2010)Metamaterials : theory, design, and applications, Springer pp: 367
Walser, R. M. (2001) Electromagnetic metamaterials, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 4467
Ion, A., Frohnhofen, J., Wall, L., Kovacs, R., Alistar, M., Lindsay, J., Lopes, P., Chen, H. T., Baudisch P. (2916) Mechanical Metamaterials, Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, ACM, 529-539
Gangwar K, Paras RPS, Gangwar (2014) Metamaterials: characteristics, process and applications. Advance in Electronic and Electric Engineering 4(1): 97-106.
D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C.Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, (2000) Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity, Phys. Rev. Lett., 84, pp. 4184–4187
Zadpoor, A. A. (2016) Mechanical Metamaterials, Material Horizons, 3, 371-381
Hamid, C., Hosseinzadeh R., Hosseinzadeh, H., (2018) Metamaterials in Medicine : A New Era for Future Orthopedics, OPROJ, volume4-issue2, pag 1
Gibson JL, Ashby FM (2001) Cellular solids: structure and properties. Cambridge University Press, Cambridge,UK.

Ledbetter H, Reed RP. Elastic properties of metals and alloys, I. Iron, nickel, and iron-nickel alloys (1973) J Phys Chem, 2:531–618
Yu, X., Zhou, J., Liang, H., et al. (2018) Mechanical metamaterials with stifness, rigidity and compressibility: a brief review, Progess in Materials Science, vol 94, pagg 114-173
Wang Y, Lakes R. (2004)Extreme stiffness systems due to negative stiffness elements. Am J Phys;72:40–50
Jong M, Chen W, Angsten T, Jain A, Notestine R, Gamst A, et al.(2015) Charting the complete elastic properties of inorganic crystalline compounds. Sci Data;2:150009
Milton GW, Cherkaev AV. (1995)Which elasticity tensors are realizable? J Eng Mater Technol;117:483–93.
Milton GW. (2002)The theory of composites. New York: Cambridge University Press;
Ashby MF. (2011) Materials selection in mechanical design. 4th ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann;
E. Karana (2010, Feb), How do Materials Obtain Their Meanings? In: METU Journal of the Faculty of Architecture, 27(2), 271-285, 275.
Milton, G. W., Cherkaev, A. V., (1995)Which elasticity tensors are realizable?, J. Eng. Mater. Technol., 117, 483–493
M. Kadic, T. Bückmann, N. Stenger, M. Thiel and M. Wegener (2012) On the practicability of pentamode mechanical metamaterials, Appl. Phys. Lett., 100, 191901
G. N. Greaves, A. Greer, R. Lakes and T. Rouxel, (2011)Poisson's ratio and modern materials, Nat. Mater., , 10, 823–837
Lakes R. , Wojciechowski,K. (2008) Negative compressibility, negative Poisson's ratio, and stability, Phys. Status Solidi B, 245, 545–551
Janbaz, S., Weinans,H., Zadpoor, A. A. (2016)Geometry-based control of instability patterns in cellular soft matter, RSC Adv.,6, 20431–20436
Ron resch Paper and Stick film" https://vimeo.com/36122966
Pendry, J. B. (2000) Negative refraction makes a perfect lens. Phys. Rev. Lett. 85, 3966–3969
Xu, L. et al. (2016) Kirigami nanocomposites as wide-angle diffraction gratings. ACS Nano 10, 6156–6162.
Rafsanjani, A. & Bertoldi, K. (2017) Buckling-induced kirigami. Phys. Rev. Lett. 118, 084301.
Lamoureux, A. et al. (2015) Dynamic kirigami structures for integrated solar tracking. Nat. Commun. 6, 8092.
Eidini, M. & Paulino, G. H. (2015) Unraveling metamaterial properties in zigzag-base folded sheets. Sci. Adv. 1, e1500224.
Sussman, D. et al. Algorithmic lattice kirigami: a route to pluripotent materials. Proc. Natl Acad. Sci. USA 112,
Lobontiu, M., Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges
Howell, L., L., (2001), Compliant Mechanisms, John Wiley & Sons
Lapine, M., Powell, D.,Gorkunov, M., Shadrivov, I., Marqués, R., Kivshar, Y., (2009) Structural tunability in metamaterials Appl. Phys. Lett. 95, 084105;
Hwang, D., Bartlet, D. (2018) Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami, Structures Scientific REPORTS 8:3378
Spadaccini, C. (2014) Mechanical Metamaterials : Design, Fabrication , and Performance, Science 344(6190):1373-1377;
Ion, A. (2016) Metamaterials Mechanism, UIST 2016;
Chen, D., & Zheng, X. (2018) Multi-material Additive Manufacturing of Metamaterials with Giant, Tailorable Negative Poisson's Ratios
C. Spadaccini, (2016), Frontiers of Engineering: Reports on Leading-Edge Engineering from the 2015 Symposium
Franchin, G. (2013). Additive Manufacturing of Ceramics Printing Beyond the Binder
Besra L, Liu M. (2007). A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD). Progress in Materials Science 52(1):1– 61
Ion, A., Metamaterial mechanism, 2016,Proceedings of UIST '16, Tokyo, Japan
International PublicationNumber: WO 2009/034551A1,International Patent ClassificationE05D 1/02, (20066.01); E05D1/04 (2006/01)

Sitografia

http://www.munart.org/index.php?p=18
https://www. glance24.com/it/news/24/lamontatura-degli-occhiali
http://www.italiansdoitbetter.it/vincitori/pq-by-ron-arad/;
http://accessorama-d.blogautore.repubblica.it/2015/03/02/ron-arad-disegna-occhiali-da-sole-3d/
https://it.3dsystems.com/blog/2015/06/sls-printed-shades-pqeyewear-infuse-creativity-sunglasses-design-video
https://www.3ders.org/articles/20151031-introducing-d-frames-ron-arads-3d-printed-pq-eyewear-sunglasses.html
http://www.nendo.jp/en/works/zerogra-2/zerografold/?/www.nendo.jp/en/works/magne-hinge-2/?egenre
www.designboom.com/design/snap-reading-computer-glasses-nendo-temple-nose-piece-06-18-2014/
https://www.starck.com/starck-eyes-summer-collection-2016-luxottica-p3323
http://www.fournines.co.jp/en/concept/
https://www.indiegogo.com/projects/mono-aneyewear-3d-printed-to-fit-your-face#/
https://gizmodo.com/a-clever-segmented-hingeensures-these-glasses-fit-anyo-1670622712
http://www.spineoptics.com/tech/
https://technogog.com/review/review-of-spine-optics-eyewear/
http://www.ic-berlin.de/the-hinge
https://hoet.be/en
http://www.undostrial.com/
https://www.lunettes-originales.fr/actualites/gotti-dimensioncollection-lunettes-3d-acier/
https://monoqool.com/screwless-hinges/
https://minimalissimo.com/frame/
https://www.instructables.com/id/Wooden-Glasses-With-Hinge-and-Acrylic-Lenses/
http://www.framedbykarl.com/product/wolfgang/
http://www.tarazistudio.com/portfolio/ezrieyes/?id=101
https://mediatedmattergroup.com/
http://www.materialecology.com/
https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Snell
http://www.madec.polimi.it/
http://www.zadpoor.com/home/cv.
https://www.seas.harvard.edu/directory/bertoldi
https://www.youtube.com/watch?v=gjfYohXoiz0
http://www.origami-instructions.com/kirigami.html
https://www.creativemechanisms.com/blog/compliant-mechanisms.-part-1
https://people.llnl.gov/spadaccini2
https://webinar.smartcae.com/introduzione-all-ottimizzazione-topologica/
https://mydmand.wordpress.com/2016/10/22/dmand-develops-multi-material-4d-printing-with-tailorablesha-pe-memory-polymers/
http://www.jim.org.cn/article/2015/1000-324X-30-11-1139.html

https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Ceramics/old-info/EPD
http://alexandraion.com/