

/Materiali

"materiali che 'ricordano' le configurazioni e possono conformarsi ad esse quando viene dato uno stimolo specifico"

Intelligenti

- immediacy
- selectivity
- transiency
- self-actuation
- directness



TIPO 1

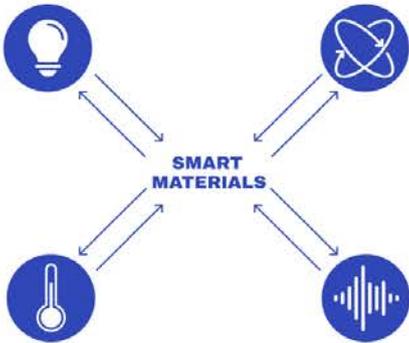
Materiale che cambia una delle sue proprietà in risposta a un cambiamento delle condizioni del suo ambiente, senza controllo esterno.

Materiale o dispositivo che trasforma l'energia da una forma all'altra per raggiungere uno stato finale desiderato.

TIPO 2

/Ambienti

di reazione

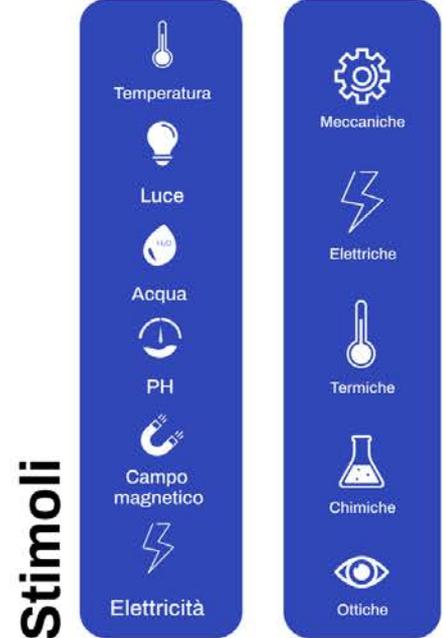


dei materiali

/classificazione

STATO	solido, liquido, gas
STRUTTURA	amorfo, cristallino
ORIGINE	naturale, sintetico
COMPOSIZIONE	organico, inorganico, lega
TRATTAMENTO	colato, indurito, laminato
PROPRIETA	emissività, conducibilità
AMBIENTE	corroivo, sott'acqua
APPLICAZIONE	adesivo, vernice, carburante

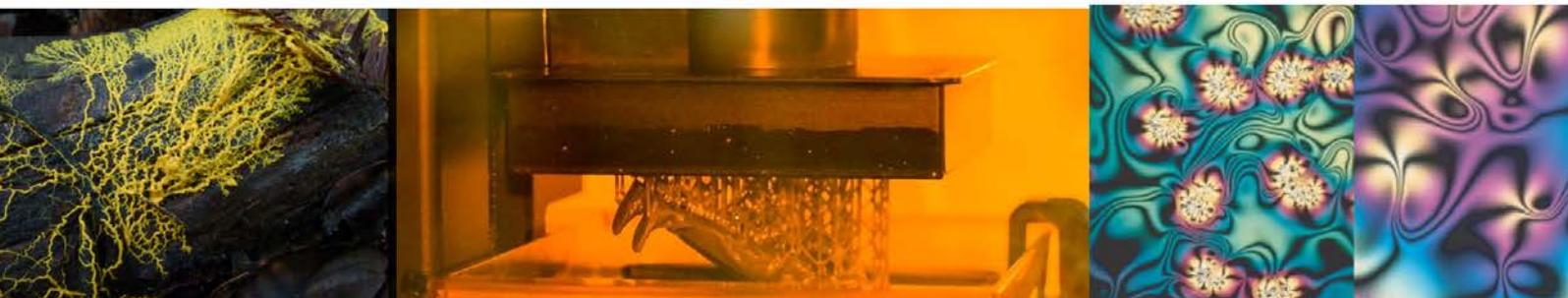
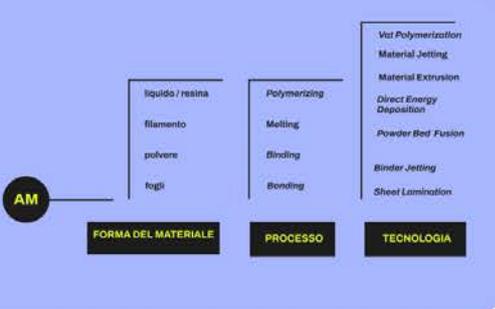
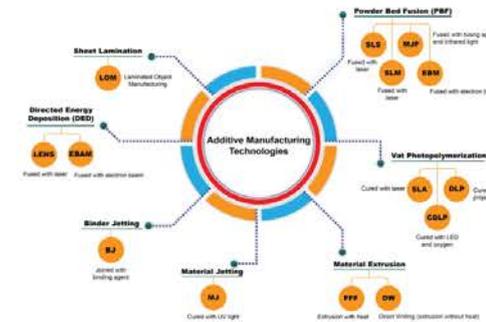
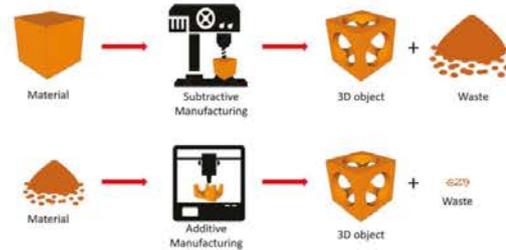
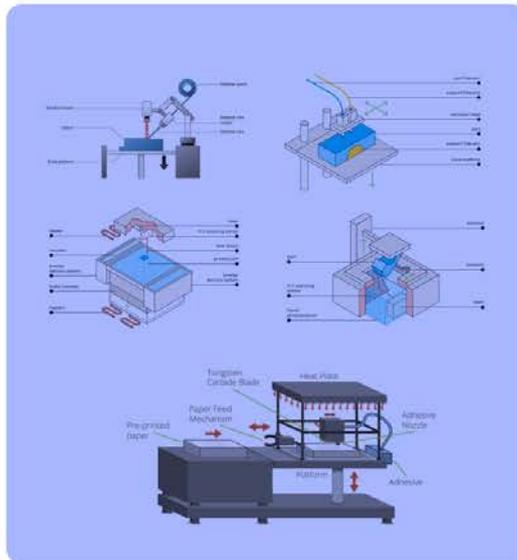
Proprieta



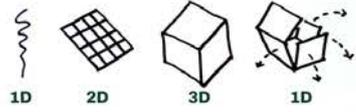
Manifattura

Additiva
"process of joining materials to make parts (3.9.1) from 3D model data, usually layer (3.3.7) upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies" (ISO/ASTM 52900:2021)

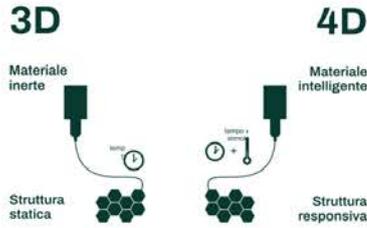
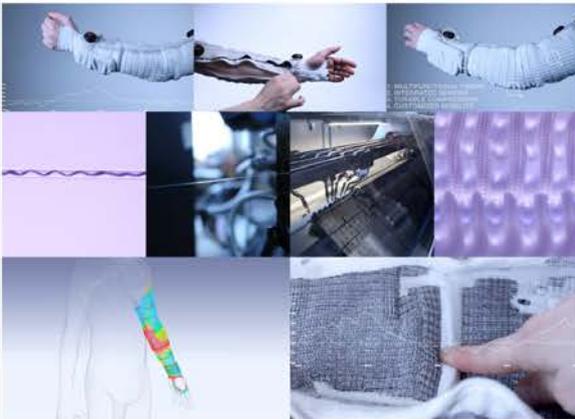
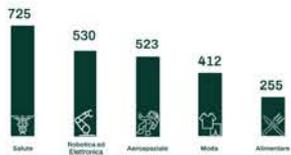
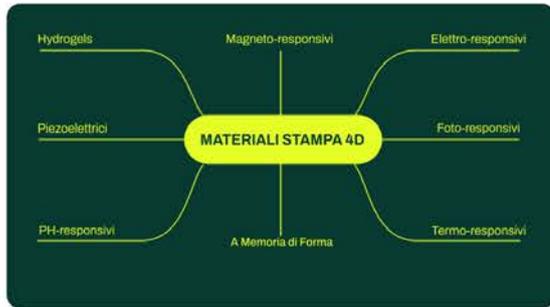
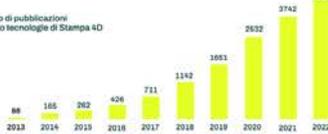
Processo di unione di materiali per creare parti (3.9.1) a partire da dati di modelli 3D, di solito strato (3.3.7) su strato, a differenza delle metodologie di produzione sottrattive e formative.



"Possiamo definire forme e distribuzioni molto specifiche dei materiali viventi ibridi e dei prodotti biosintetizzati, siano essi colori o agenti terapeutici, all'interno delle forme stampate. Ci sono applicazioni pratiche entusiasmanti con questo approccio, dal momento che i progettisti sono ora in grado di controllare e modellare la crescita dei sistemi viventi attraverso un algoritmo computazionale. Il design 'vivificante' e lo spazio oggetto."



Numero di pubblicazioni riguardo tecnologie di Stampa 4D



TECNOLOGIE AM

FDM, SLA, SLS, DED, InkJet

MATERIALI INTELLIGENTI

Memoria di forma, elettro-responsivi, termo-responsivi, ecc

STIMOLI

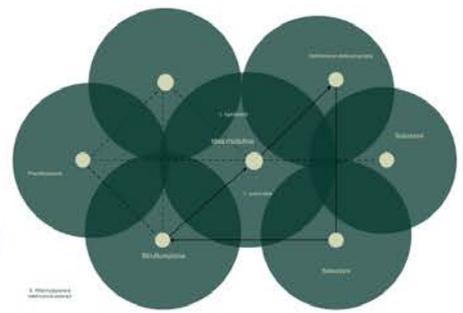
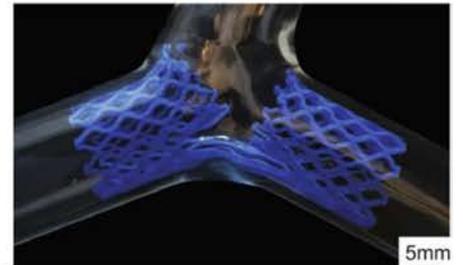
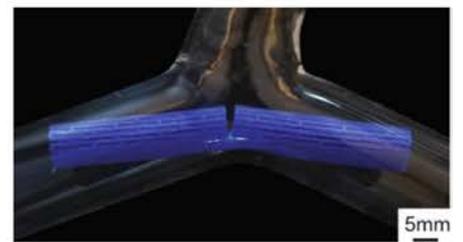
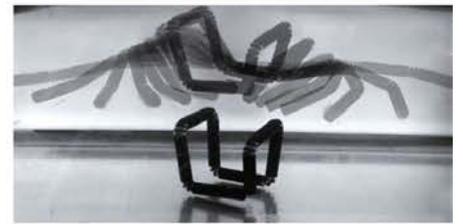
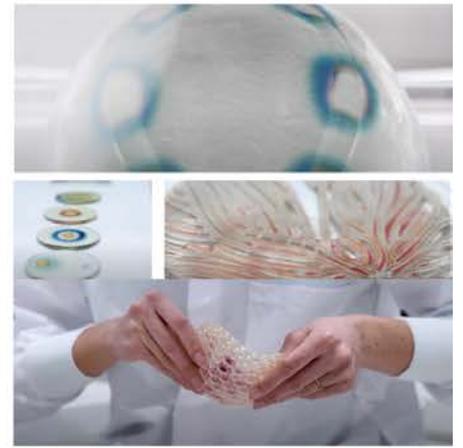
Fisici, Chimici, Biologici

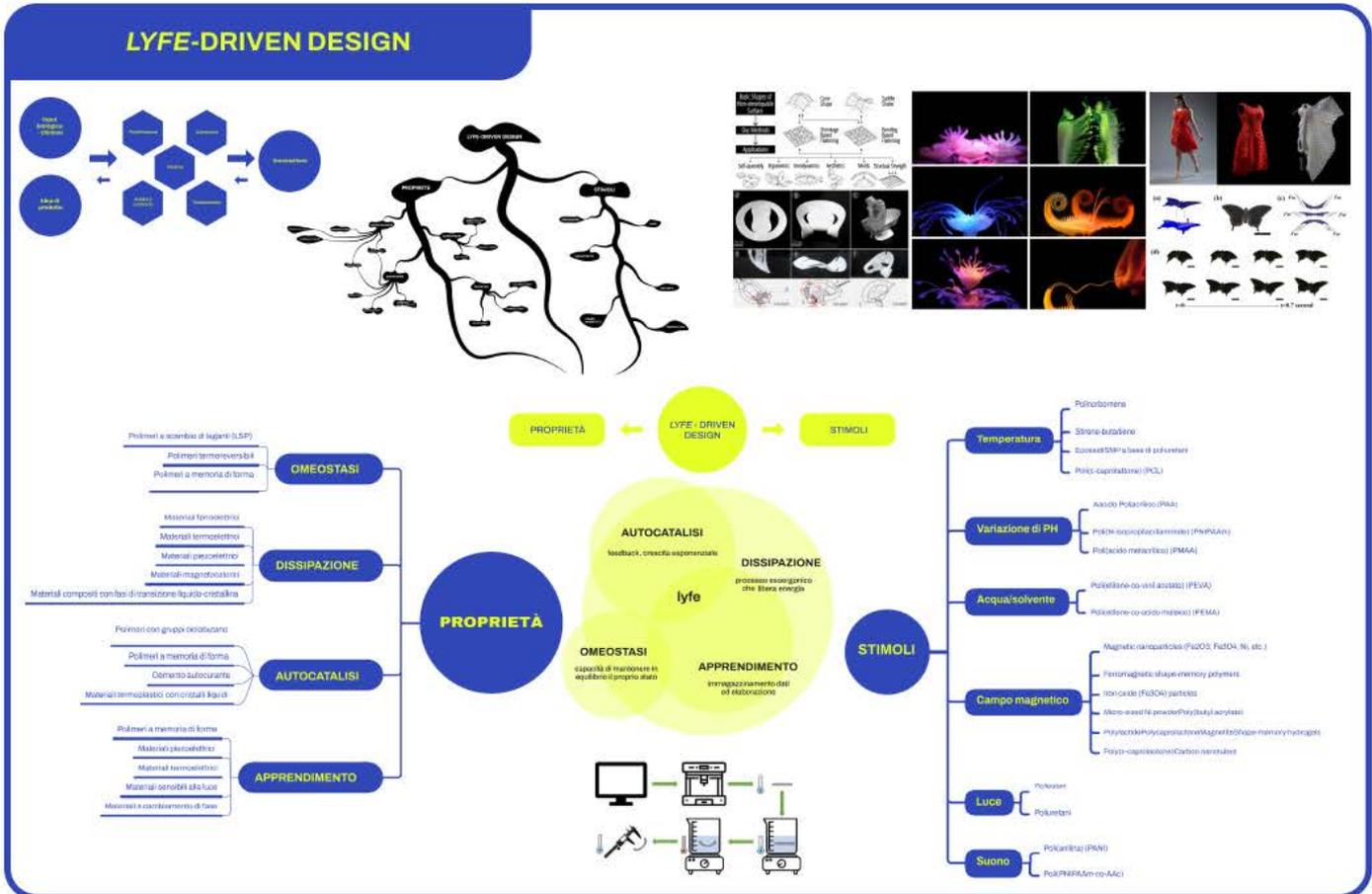
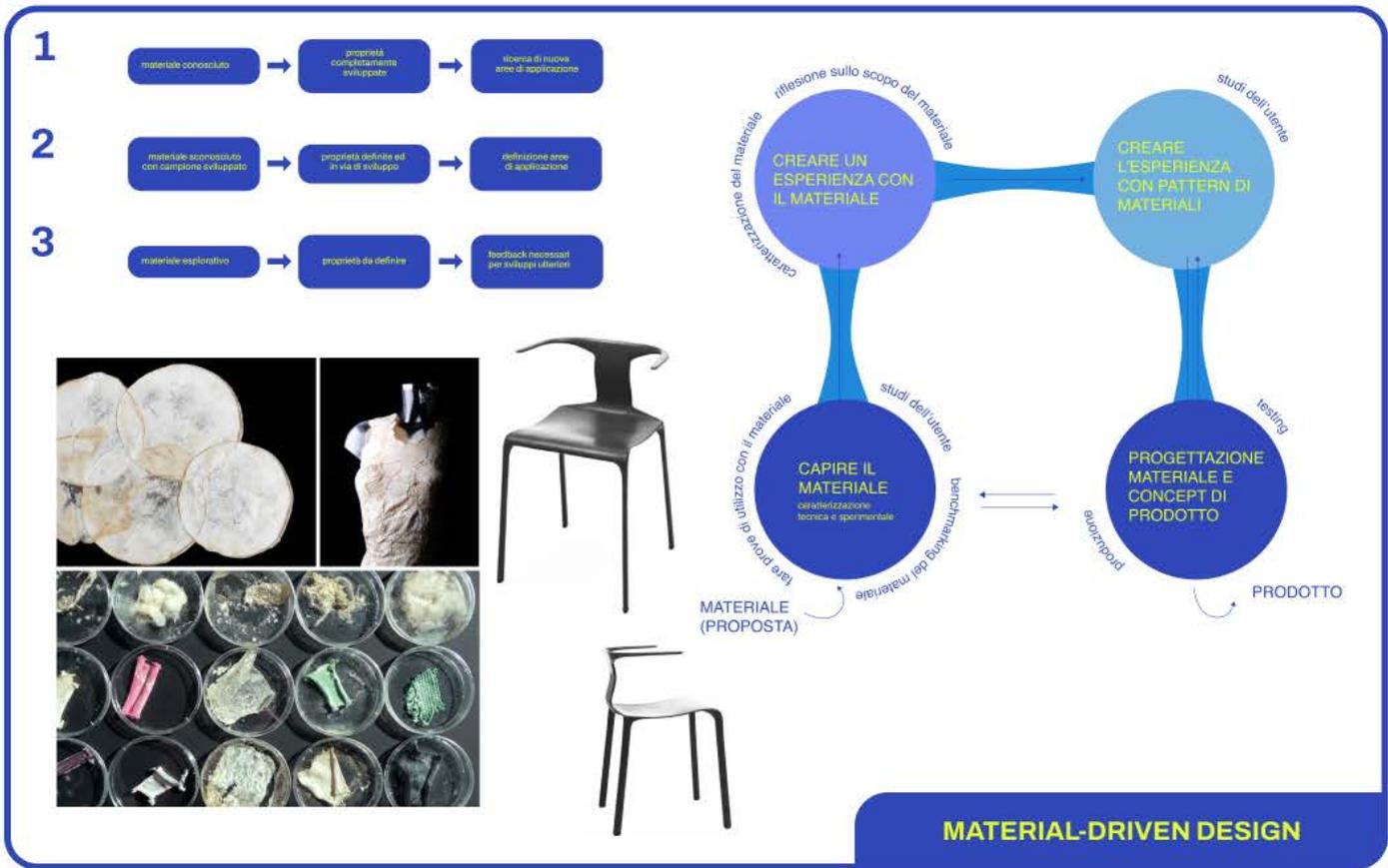
INTERAZIONE

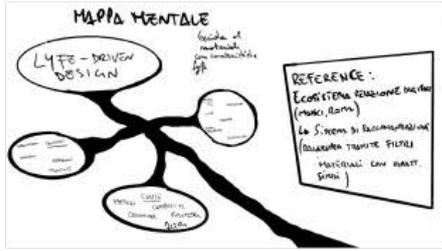
MODELLAZIONE MATEMATICA

Previsione delle variazioni strutturali

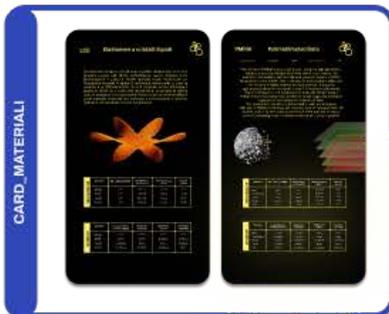
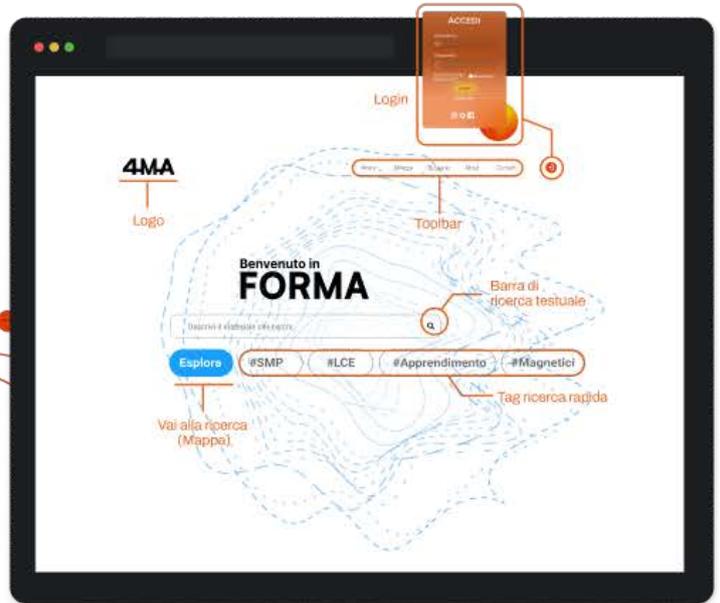
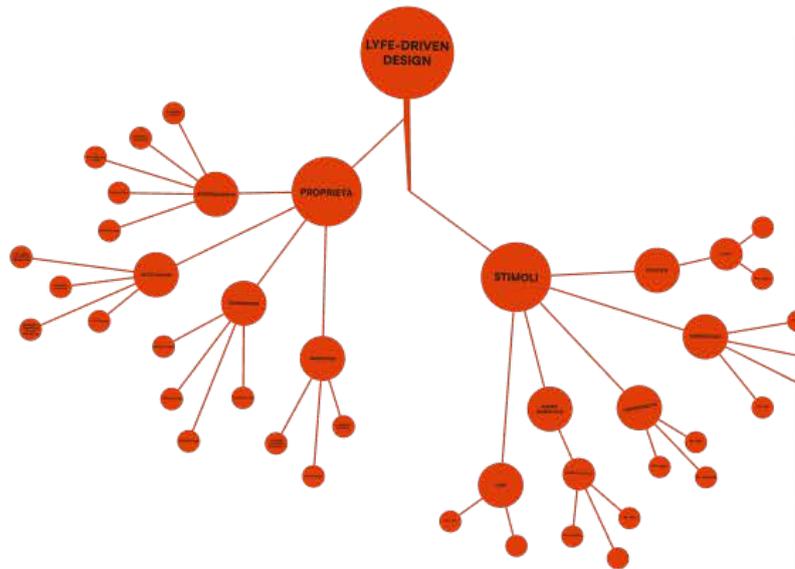
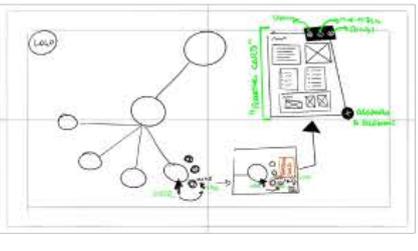
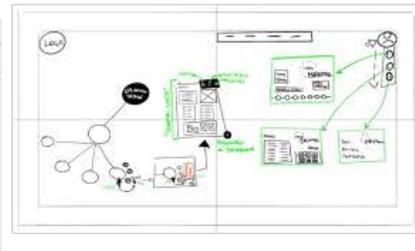
Stimolo	Materiali	Strutture	Applicazioni
Temperatura	Materiali a memoria di forma (SMA, SMC)	Strutture a memoria di forma	Robotica morbida, attuatori
Luce	Materiali fotosensibili (PDMS, PEGDA)	Strutture a memoria di forma	Robotica morbida, attuatori
Acqua	Materiali idrosensibili (PAA, PAAm)	Strutture a memoria di forma	Robotica morbida, attuatori
PH	Materiali pH-sensibili (PAA, PAAm)	Strutture a memoria di forma	Robotica morbida, attuatori
Campanelli magnetici	Materiali magnetici (Fe, Ni)	Strutture a memoria di forma	Robotica morbida, attuatori
Struttura	Materiali a memoria di forma	Strutture a memoria di forma	Robotica morbida, attuatori







DATABASE = Tabelle
Cerca - contenuti che ritorni - record (fonti)
OGNI RECORD AVRA' UN ID UNICO a cui vengono assegnate le caratteristiche
FILTRI = CONTROLLARE LE INFORMAZIONI SECONDO UN PRINCIPIO DI CARATTERISTICA -> ESEMPLO: LE INFORMAZIONI 'X' CONTIENE VARIABILE 'Y' = ESERCIZIO [AVANTI]



Cos'è 4MA?

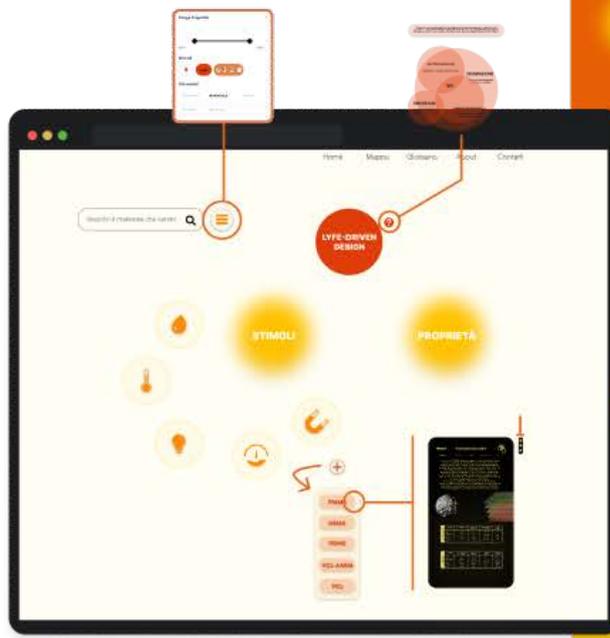
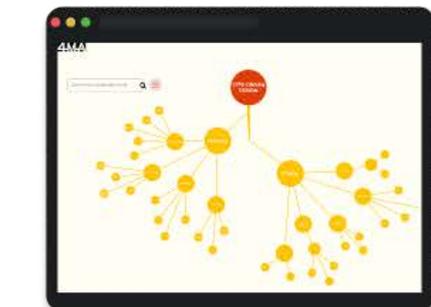
Forma è un tool che guida il progettista alla scelta del materiale intelligente giusto per il suo progetto intelligente.

Naviga attraverso stimoli e proprietà dei smart materials maggiormente impiegati nella manifattura additiva ma non solo, impara a sfruttarne caratteristiche e metodi di lavorazione per il risultato che vuoi.

Come si usa?

Vai alla mappa e inizia il tuo personale percorso di ricerca. Fatti guidare dal materiale stesso, sarà lui a farti trovare o non tu a cercarlo.

Ogni materiale avrà dei tag che permetteranno di essere collegati l'un l'altro in base alle loro caratteristiche, ci saranno casi studio e ricerche scientifiche a farti da supporto e da esempio.





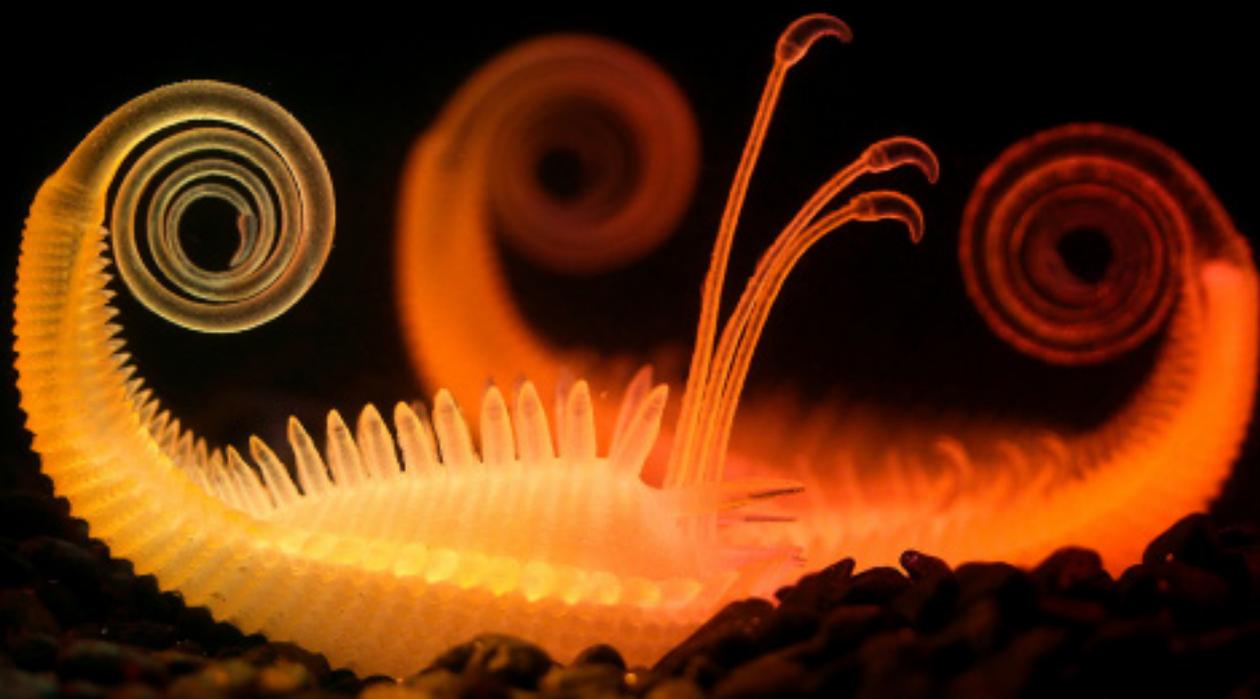
Scuola di Ateneo
Architettura e Design "Eduardo Vittoria"
Università di Camerino

DESIGN PER LA MANIFATTURA ADDITIVA:

La stampa 4D di smart materials

Tesi di laurea magistrale in Design per
l'Innovazione Digitale - anno accademico 2021/22

Candidato: *Andrea Cusimano*





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO
SCUOLA DI ARCHITETTURA E DESIGN “E. VITTORIA”

CORSO DI LAUREA IN

Design per l'Innovazione Digitale

TITOLO DELLA TESI

Design per la Manifattura Additiva:
la stampa quadridimensionale di smart materials

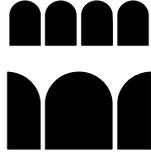
Laureando/a
Nome... Andrea Cusimano

Firma... *Andrea Cusimano*

Relatore
Nome... Daniele Rossi

Firma.....

ANNO ACCADEMICO... 2021/2022



S A A D

Scuola di Ateneo

Architettura e Design "Eduardo Vittoria"

Università di Camerino

DESIGN PER LA MANIFATTURA ADDITIVA:

La stampa 4D di smart materials

Tesi di laurea magistrale in Design per l'Innovazione Digitale
Anno Accademico 2021/22

Andrea Cusimano

Relatore Daniele Rossi

Correlatore Davide Paciotti

INDICE

23

Abstract

9

Introduzione

12

Keywords

I materiali intelligenti

16
19
23
25
29
33

.1 / Definizione di materiali intelligenti
.2 / Origine e sviluppo
.3 / Classificazione dei materiali intelligenti
.4 / Tecnologie di produzione
.5 / Utilizzi ed opportunità
FOCUS: Materiali come forme di "vita"

La Manifattura Additiva

40
41
43
48
55
56

.1 / Definizione di Manifattura Additiva
.2 / Origine e sviluppo
.3 / Materiali e Tecnologie
.4 / Utilizzi ed opportunità
.5 / Differenze con le tecniche di produzione di massa

Materiali intelligenti per la Manifattura Additiva

60
61
63
63
67
71

.1 / Classificazione di materiali intelligenti per AM
.2 / HLM - Hybrid Living Materials
.3 / Tecniche di produzione additiva: **La Stampa 4D**
.4.1 / La quarta dimensione nella produzione additiva
.4.2 / Origine e sviluppo
.4.3 / Literature review e stato dell'arte

Progettare per la Stampa 4D

90
93
97

.1 / Il ruolo del design
.2 / L'approccio biomimetico alla progettazione
.3 / Definizione di tool strategici

IV

V

.1 / Progettare l'adattività e la responsività	102
.2 / Material-driven design	105
.3 / Casi studio	108
.4 / Ipotesi di sviluppo: Lyfe-Driven Design	112
.4.1 / Classificazione di materiali con caratteristiche <i>Lyfe</i>	113
.4.2 / Stampa 4D di materiali <i>Lyfe</i>	116
.4.3 / Conclusioni dallo scenario di ricerca	121

Progettare con l'intelligenza dei materiali: Lyfe-Driven Design

VI

.1 / Sintesi della ricerca e fruizione dei contenuti	126
.2 / Casi studio	127
.3 / Concept	131
.4 / Card Materials	134
.5 / Homepage	143
.6 / Mappa	143
.7 / Interazione e user experience	147

Fruizione dello scenario di ricerca: 4MA - FORMA

Fonti citate

153

Ringraziamenti

158

ABSTRACT

Lo studio affrontato in questa tesi si propone di esplorare il ruolo dei materiali nel design, analizzando le loro caratteristiche, le loro applicazioni e le loro sfide future. Attraverso una revisione della letteratura e una serie di casi studio, si intende mostrare come i materiali siano elementi chiave nella definizione dell'identità, della funzionalità e della sostenibilità dei prodotti.

Si è cercato di concentrare una serie di riflessioni e studi affrontati nel tema dei materiali che è una componente fondamentale del design. In particolare, durante l'ultimo anno del personale percorso accademico, sono state intraprese delle indagini a favore di una maggiore maturazione della conoscenza del materiale e delle tecnologie utilizzate, e in via di sviluppo, per sfruttarne le potenzialità.

Attraverso una panoramica di casi studio e fonti scientifiche, la ricerca ha avuto come obiettivo quello di fornire una classificazione attenta e schematica dei materiali intelligenti usati in manifattura additiva, secondo una distinzione fondamentale in Proprietà e Stimoli. Una volta messe a sistema la grande mole di informazioni ottenuta e schematizzata, si è proposta una mappatura che comprendesse non solo i materiali ma anche le lavorazioni e degli esempi di casi studio ad essi collegati.

INTRODUZIONE

Lo studio affrontato in questa tesi si propone di esplorare il ruolo dei materiali nel design, analizzando le loro caratteristiche, le loro applicazioni e le loro sfide future. Attraverso una revisione della letteratura e una serie di casi studio, si intende mostrare come i materiali siano elementi chiave nella definizione dell'identità, della funzionalità e della sostenibilità dei prodotti.

Il primo capitolo introduce il tema della tesi, illustrando il contesto storico e culturale in cui si inserisce la ricerca sui materiali nel design. Si evidenziano le principali tendenze e le sfide che il settore deve affrontare per rispondere alle esigenze di un mondo in continua evoluzione. Si presenta inoltre la metodologia adottata per lo sviluppo della tesi, basata su un approccio basato su una **ricerca sistemistica delle varie tipologie di smart materials e delle proprietà a loro collegate**.

Il secondo capitolo si focalizza sulla manifattura additiva, ovvero quel processo di produzione che consente di realizzare oggetti tridimensionali a partire da un modello digitale. **Si descrivono le principali tecniche e tecnologie di manifattura additiva, le loro caratteristiche e i loro ambiti di utilizzo**. Si illustrano anche alcuni casi studio di prodotti realizzati con la manifattura additiva, mettendo in evidenza i benefici e le sfide che essa offre.

Il terzo capitolo approfondisce il concetto di **materiali intelligenti applicati alla Manifattura Additiva, ovvero quel processo che verrà definito come Produzione Additiva Quadridimensionale**; portando l'analisi di diversi casi studio ed un'approfondita revisione della letteratura, si analizzano le diverse tipologie di materiali intelligenti, le loro potenzialità e i loro limiti nella produzione additiva. Si esaminano anche alcuni esempi di applicazione dei materiali intelligenti nel design, evidenziando i vantaggi e le criticità che essi comportano.

Il quarto capitolo presenta i risultati della ricerca condotta sul campo, attraverso la raccolta e l'analisi di dati provenienti da fonti primarie e secondarie. **Si propone una classificazione dei materiali intelligenti usati in manifattura additiva, secondo una distinzione fondamentale in proprietà e stimoli.** Si offre anche una mappatura che comprende non solo i materiali ma anche le lavorazioni e gli esempi di casi studio ad essi collegati.

Il quinto capitolo discute le principali considerazioni emerse dalla ricerca, evidenziando i punti di forza e di debolezza dei materiali intelligenti nel design. Si propongono anche alcune prospettive future per il settore, suggerendo possibili linee di sviluppo e di innovazione, delineando una **proposta di approccio progettuale guidato dall'osservazione del comportamento dei materiali e trattandoli similmente a sistemi biologici.**

Il sesto capitolo conclude la tesi, riassumendo gli obiettivi raggiunti, le difficoltà incontrate e le implicazioni della ricerca. Si forniscono anche alcune indicazioni per eventuali approfondimenti o ricerche future sul tema, portando un caso di studio di **database-guida come tool di aiuto alla progettazione guidata dall'intelligenza dei materiali.**

KEYWORDS

- **Stampa 4D**
- **Materiali intelligenti**
- **Tecniche di fabbricazione additiva**
- **Stampa multimateriale**
- **Progettazione per la fabbricazione additiva**
- **Caratterizzazione dei materiali**
- **Proprietà**
- **Stimoli**
- **Sistemi biologici**

I Materiali Intelligenti

1.1 / Definizioni di materiale intelligente

Prima della Rivoluzione Industriale, la relazione tra design e materiali era piuttosto semplice. I materiali venivano selezionati in base alla loro utilità e disponibilità o alle loro caratteristiche estetiche e decorative. Di solito, le fondamenta e i muri erano realizzati in pietra locale, mentre i marmi di alta qualità venivano utilizzati come sottili rivestimenti per coprire la costruzione grezza. Le scelte di progettazione e costruzione determinavano l'uso del materiale, e fino al XIX secolo, l'utilizzo dei materiali nel design era considerato subordinato alle esigenze funzionali e formali. Inoltre, i materiali non erano standardizzati, il che costringeva i costruttori e i designer a fare affidamento su una conoscenza esterna delle proprietà e delle prestazioni dei materiali, la conoscenza dei materiali era acquisita attraverso l'esperienza e l'osservazione. A partire dal XIX secolo, il design ha subito un cambiamento radicale nell'uso dei materiali. Con l'introduzione dell'acciaio, i designer hanno iniziato a utilizzare i materiali non solo per soddisfare le esigenze funzionali, ma anche per creare nuove forme di design. La produzione industriale del vetro e lo sviluppo dei sistemi ambientali hanno permesso la creazione dello "stile internazionale", in cui la trasparenza diventava un elemento di design che poteva essere utilizzato in qualsiasi contesto climatico. Inoltre, la diffusione dei sistemi a parete a tendina ha permesso di separare il materiale della facciata dalla struttura dell'edificio, permettendo di creare facciate puramente formali. Grazie alle tecnologie CAD/CAM, materiali come l'alluminio e il titanio possono essere utilizzati facilmente per creare una vasta gamma di facciate e forme di design. I materiali sono diventati la parte più visibile e riconoscibile della rappresentazione di un edificio, sia internamente che esternamente.

Le opportunità delineate dall'intelligenza nei materiali dipendono indiscutibilmente dalla loro struttura molecolare, che si adatta e risponde a stimoli come un sistema biologico, per questo il ruolo del design deve partire innanzitutto dalla comprensione strutturale del materiale. Ad esempio, i materiali solidi possono essere composti in vari modi, dando luogo a importanti categorie di solidi cristallini, solidi amorfi e solidi policristallini. I solidi cristallini hanno un'organizzazione ordinata e ripetitiva di atomi e molecole unite tra loro da diversi tipi di forze di legame chimico.

Questi schemi formano strutture di reticolo regolari, di cui esistono molti tipi diversi con corrispondenti strutture di materiale. I solidi amorfi hanno una struttura casuale, con poca o nessuna ordine, e hanno anche poca forma intrinseca. I solidi policristallini sono composti da grandi numeri di piccoli cristalli o grani che sono essi stessi regolari, ma questi cristalli o grani non sono disposti in alcun ordine. La composizione precisa di queste diverse strutture interne e le forze di legame tra di esse determinano in gran parte le proprietà meccaniche, elettriche, chimiche e altre proprietà del materiale solido che sono così importanti nelle applicazioni di design. Ad esempio, il colore di un materiale dipende sia da fattori esterni (ad esempio, le lunghezze d'onda della luce incidente) che dalle caratteristiche di assorbimento interne del materiale, che a loro volta dipendono dall'organizzazione specifica delle strutture atomiche che compongono il materiale. Per questo motivo, i designer di oggi considerano i materiali come una tavolozza di progettazione dalla quale possono selezionare e applicare le superfici in modo compositivo e visivo. Per molti secoli, era necessario accettare e lavorare con le caratteristiche di un materiale standard come il legno o la pietra, progettando per adattarsi alle limitazioni del materiale. Tuttavia, nel corso del XX secolo, è stato possibile iniziare a scegliere o progettare le proprietà di un materiale ad alte prestazioni per soddisfare un bisogno specificamente definito. I materiali intelligenti consentono una maggiore precisione, poiché le loro proprietà sono modificabili e quindi reattive ai bisogni temporanei.

Abbiamo usato liberamente il termine "materiali intelligenti" senza definirlo precisamente. Tuttavia, creare una definizione precisa è sorprendentemente difficile. Il termine è già di ampia diffusione, ma non c'è un accordo generale su ciò che effettivamente significa. Una rapida revisione della letteratura indica che termini come "intelligente" e "intelligente" sono usati quasi in modo intercambiabile da molti in relazione a materiali e sistemi, mentre altri tracciano nette distinzioni su quali qualità o capacità sono implicite. La NASA definisce i materiali intelligenti come "materiali che ricordano le configurazioni e possono conformarsi ad esse quando viene dato uno stimolo specifico", una definizione che indica chiaramente come la NASA intende investigare ed applicarli. Una definizione più ampia proviene dall'Enciclopedia di tecnologia chimica: "i materiali e le strutture intelligenti sono oggetti che rilevano eventi ambientali, elaborano queste informazioni sensoriali e poi agiscono sull'ambiente". Anche se queste due definizioni sembrano riferirsi allo stesso tipo di comportamento, sono agli antipodi. La prima definizione si riferisce ai materiali come sostanze, e come tali, penseremmo a elementi, leghe o anche composti, ma tutti sarebbero identificabili e quantificabili dalla loro struttura molecolare. La seconda definizione si riferisce ai materiali come una serie di azioni.¹

Sia che si tratti di una molecola, di un materiale, di un composito, di un assemblaggio o di un sistema, i "materiali intelligenti" mostreranno i seguenti **comportamenti**:

- **Immediacy** - rispondono in tempo reale.
- **Transiency** - rispondono a più di uno stato ambientale.
- **Self-actuation** - l'intelligenza è interna e non esterna al "materiale".
- **Selectivity** - la loro risposta è discreta e prevedibile.
- **Directness** - la risposta è locale all'evento "attivante".



Un esempio di materiale intelligente comunemente diffuso è quello utilizzato nel progetto "Active Shoes" di Nike che utilizza il materiale "Nike React" (una schiuma ottenuta dalla combinazione di TPE ed EVA) per le soles delle scarpe da corsa. Il materiale reagisce alle diverse superfici stradali e alle condizioni meteorologiche per garantire una maggiore aderenza e comfort ai corridori.

1. Smart Materials and New Technologies: For the architecture and design professions, D. Mitchell Asplinger, Daniel L. Scheckel, Harvard University, 2005

Esistono diversi materiali che presentano caratteristiche di adattività e responsività, raggruppati per classi, di seguito verrà fornita una breve panoramica su quelli che sono i maggiori esempi di *smart materials* utilizzati nell'industria.

I metalli puri, tra cui il rame, sono caratterizzati da legami metallici e strutture reticolari regolari, e in particolare quelli con organizzazioni cubiche a facce centrate risultano abbastanza duttili poiché esposti a forze esterne causano lo scivolamento tra i piani con direzioni preferite. Ferro e nichel sono metalli di transizione che presentano sia legami metallici che covalenti e risultano meno duttili di altri metalli. La comprensione delle dislocazioni e dei fenomeni correlati risulta estremamente importante per valutare il comportamento delle sostanze metalliche.

Le ceramiche presentano forti legami ionici e covalenti e, poiché privi di elettroni liberi, hanno strutture cristalline elettricamente neutre, risultando inadatte a condurre la corrente. Seppur presenti, i movimenti delle dislocazioni nelle ceramiche risultano di minore entità. In generale, le ceramiche risultano dure e fragili e tendono a rompersi lungo piani di clivaggio specifici. Per questo motivo, vengono utilizzate come materiali refrattari grazie alla loro elevata resistenza al calore. Il vetro, invece, consiste in una struttura amorfa non cristallina e legami covalenti.

I polimeri sono sostanze costituite da strutture molecolari a catena lunga collegate tra loro tramite legami covalenti. I termoplastici semplici sono polimeri in cui le catene non sono connesse direttamente ma solo attraverso deboli legami di van der Waals. Questo li rende abbastanza morbidi e duttili, in quanto le forze esterne permettono alle catene di scorrere facilmente l'una sull'altra. Possono essere fusi e riciclati. Al contrario, i termoindurenti contengono induritori che causano la reticolazione o l'interconnessione delle catene lunghe, rendendoli di solito duri e resistenti, ma incapaci di fondere. I polimeri a catena piegata hanno una disposizione periodica delle catene che li rende semicristallini e densi, chimicamente resistenti e altamente resistenti al calore. Gli elastomeri sono polimeri ampiamente amorfi ma leggermente reticolati, combinando proprietà di termoplastici e termoindurenti.

I compositi sono materiali ad alte prestazioni che combinano due o più materiali primari. Sono destinati a funzioni specifiche come la resistenza o la rigidità, la riflettanza o la riduzione della conducibilità termica. Solitamente comprendono materiali di rinforzo, resine o materiali matrice e nuclei interni. Possono essere progettati in diverse forme e direzioni degli sforzi per applicazioni specifiche; inoltre, i materiali incorporati possono essere usati per funzioni diverse dalla resistenza. Ad esempio, i cavi a fibra ottica vengono incorporati in diversi materiali per il rilevamento di tensione o crepe nel materiale primario. I film colorati ad alta prestazione con radiazione con molteplici qualità riflettenti sono un esempio di laminati multistrato di diversi tipi di film.



1.2 / Caratteristiche e proprietà

Abbiamo identificato cinque caratteristiche "concettuali": immediatezza, transitorietà, auto-attivazione, selettività e immediatezza - che differenziano questi materiali dai materiali più tradizionali, ma abbiamo bisogno di ulteriori informazioni riguardo alle caratteristiche "fisiche" di questi materiali e delle tecnologie.

Cambiamento delle proprietà

I materiali intelligenti che cambiano proprietà sono probabilmente tra quelli più diffusi. Questi materiali cambiano le loro proprietà - come chimiche, termiche, meccaniche, magnetiche, ottiche o elettriche - in base alle condizioni ambientali o all'energia diretta.

Scambio di energia

Questi materiali convertono un'energia in ingresso in un'altra forma di energia per produrre un'energia in uscita, seguendo la prima legge della termodinamica. Anche se l'efficienza di conversione dell'energia è di solito inferiore rispetto alle tecnologie convenzionali, il potenziale di utilizzo dell'energia è molto più alto. Molti di questi materiali, come i piezoelettrici, i piroelettrici e i fotovoltaici, sono ottimi sensori ambientali grazie alla loro relazione diretta tra energia in ingresso ed energia in uscita.

Reversibilità/direzionalità

Molti dei materiali delle due classi precedenti possono invertire la loro forma di energia in ingresso e in uscita e hanno comportamenti bidirezionali. Ad esempio, alcuni materiali piezoelettrici possono produrre una corrente quando vengono deformati o deformarsi con una corrente applicata. Questi materiali bidirezionali possono essere sfruttati per ottenere ulteriori benefici rispetto ai soli input ed output di energia e/o proprietà. Alcuni materiali a cambiamento di fase possono essere utilizzati per stabilizzare o rilasciare energia nell'ambiente, a seconda della direzione del cambiamento di fase. Le leghe a memoria di forma possono produrre uscite multiple o commutabili, sostituendo componenti composti da molte parti.

Queste caratteristiche possono essere sfruttate per ottimizzare una proprietà del materiale per meglio adattarsi alle condizioni di input o per ottimizzare alcuni comportamenti per mantenere in equilibrio le condizioni di stato nell'ambiente.

Si può quindi fare una distinzione, in base al comportamento assunto ed alle caratteristiche intrinseche, dei materiali intelligenti più in uso, come riportato di seguito:

TIPO 1

Materiale che cambia una delle sue proprietà in risposta a un cambiamento delle condizioni del suo ambiente, senza controllo esterno.

Materiale o dispositivo che trasforma l'energia da una forma all'altra per raggiungere uno stato finale desiderato.

TIPO 2

I materiali sono spesso distinti dalle loro proprietà, alcune delle quali sono intrinseche e alcune estrinseche. Una proprietà intrinseca è determinata dalla struttura molecolare - essenzialmente la composizione chimica - del materiale. Come tale, la definizione di un materiale specifico definisce anche tutte le sue proprietà intrinseche. Ad esempio, la resistenza è correlata alle forze interatomiche all'interno della molecola in congiunzione con le forze intermolecolari che formano la struttura del materiale: maggiore sono le forze, maggiore è la resistenza e la durezza del materiale. Queste stesse forze correlano direttamente con i punti di fusione e di ebollizione della sostanza. Un materiale come il diamante, con forti forze interatomiche e intermolecolari, non solo è uno dei materiali più duri esistenti, ma ha anche un punto di fusione straordinariamente alto. Oltre alla resistenza, comunemente riconosciute come intrinseche sono le proprietà meccaniche di un materiale, tra cui il modulo elastico e la tenacità, le sue proprietà fisiche, tra cui la conducibilità, il calore specifico e la densità, e le sue proprietà chimiche, tra cui la reattività, il valore e la solubilità. Le proprietà estrinseche sono quelle definite dalla macrostruttura del materiale e come tali non possono essere determinate direttamente dalla sola composizione. Le proprietà ottiche di un materiale - riflettività, trasmissività, assorbività - sono spesso estrinseche così come molte proprietà acustiche (semplicemente lucidando la superficie di un metallo si otterrà un sostanziale cambiamento nella sua riflettività).

Diverse proprietà estrinseche dipendono anche dalle caratteristiche dei campi energetici del loro ambiente. Il colore di un materiale non è una proprietà del materiale in sé, poiché dipende completamente dalla distribuzione spettrale della luce incidente. I cambiamenti di proprietà possono quindi essere prodotti sia da una modifica della composizione del materiale che da una modifica della microstruttura del materiale. Entrambe le modifiche sono avviate da un'input energetico. Le modifiche alle proprietà possono essere prodotte sia da una modifica della composizione del materiale che da una modifica della microstruttura del materiale. Entrambe le modifiche sono avviate da un'input di energia al materiale. L'input di energia può essere di molte forme, delle quali le più comuni per i materiali intelligenti includono quelle elettriche, chimiche, termiche, meccaniche e radiative. Sebbene la maggior parte dei materiali subisca modifiche simili alle proprietà con un input di energia - ad esempio l'arrotolamento a caldo dell'acciaio cambia la sua microstruttura e quindi le sue proprietà - le modifiche ai materiali intelligenti sono anche reversibili: quando l'input di energia viene rimosso, il materiale ritorna alle sue proprietà originali. Tutte le proprietà dei materiali, sia intrinseche che estrinseche, intelligenti o "stupide", rientrano in una o più delle cinque categorie. Le categorie - meccanica, termica, elettrica, chimica e ottica - sono indicative degli stimoli energetici a cui ogni materiale deve rispondere. Tutti gli stimoli energetici sono il risultato di una "differenza": una differenza di temperatura produce calore, una differenza di pressione produce lavoro meccanico. Le proprietà sono ciò che media quella differenza. Come tale, noteremo che le proprietà generalmente hanno unità che riflettono la natura della differenza.



Proprietà Meccaniche

Le proprietà meccaniche di un materiale rappresentano il suo comportamento in risposta all'applicazione di una forza, che può essere generata da diversi tipi di carico. Queste proprietà influenzano la capacità del materiale di resistere alla deformazione o alla rottura, e ne determinano il risultato e la misura, in base alla tipologia di forza applicata. L'origine di queste proprietà è dovuta alla natura dei legami interatomici, alla disposizione degli atomi, alla loro organizzazione su scala maggiore, alla presenza di meccanismi di dislocazione e alle caratteristiche fisiche come la dimensione dei grani e i confini. Altri fattori che influenzano queste proprietà includono la composizione chimica del materiale, la lega utilizzata e le successive lavorazioni subite, come la ricottura, la tempra o l'indurimento nei metalli. Le proprietà meccaniche vengono descritte attraverso misure specifiche, come la resistenza, la deformazione e la rigidità, che a loro volta determinano il modulo di elasticità e gli eventuali livelli di stress di rottura e moduli elastici, in base allo stato di stress del materiale. Altre proprietà meccaniche importanti includono la duttilità o fragilità del materiale, la malleabilità, la tenacità, la durezza, i limiti di fatica e il creep, fra altre.

Proprietà Elettriche

Le proprietà elettriche di un materiale sono rappresentate dalla sua conducibilità e resistività. La conducibilità, ovvero la capacità di un materiale di condurre corrente elettrica, è un'importante proprietà che viene utilizzata per classificare i materiali in base alla loro conduttività, suddividendoli in conduttori, semiconduttori e non conduttori (isolanti o dielettrici). Al contrario, la resistività è l'inverso della conducibilità, e viene utilizzata per valutare la capacità di un materiale di resistere al flusso di corrente elettrica. I materiali con molti elettroni liberi, come quelli legati metallicamente, sono efficienti conduttori poiché gli elettroni stessi diventano i portatori di carica. La conducibilità di un materiale, in genere, aumenta man mano che la temperatura diminuisce. Inoltre, per alcune particolari tipologie di materiali, la conducibilità può aumentare man mano che la temperatura aumenta, un fenomeno inverso rispetto a quanto accade in genere. Questo fenomeno è noto come resistenza negativa.



Le proprietà magnetiche sono legate alle proprietà elettriche, e trovano applicazione in una vasta gamma di dispositivi elettronici, come i dischi per computer, i motori e i generatori. I materiali magnetici sono classificati in base al loro comportamento rispetto a un campo magnetico, e possono essere ferromagnetici, antiferromagnetici, ferrimagnetici, diamagnetici o paramagnetici.

Proprietà Termiche



Le proprietà termiche più importanti di un materiale per la sua applicazione sono la conducibilità termica, la capacità termica e la diffusività termica. La conducibilità termica dei metalli è dovuta ai movimenti degli elettroni liberi, mentre nei materiali dielettrici, privi di elettroni liberi, avviene attraverso i movimenti vibranti degli atomi. La capacità termica misura quantità di calore necessario per alzare la temperatura di un materiale di una determinata quantità. L'espansione termica rappresenta la variazione di dimensioni di un materiale in conseguenza alle variazioni di temperatura.

Proprietà Chimiche



Le proprietà chimiche di un materiale includono la reattività, la valenza e la solubilità. La reattività evidenzia la capacità di un materiale di reagire chimicamente con altri materiali per produrre un cambiamento chimico, mentre la solubilità rappresenta la capacità di un materiale di essere sciolto e il solvente è un altro materiale liquido che ha la capacità di dissolvere una sostanza. Infine, la valenza si riferisce alla capacità di un elemento di combinarsi con un altro per formare molecole.

Proprietà Ottiche



Le proprietà ottiche di un materiale, invece, dipendono da fattori intrinseci ed estrinseci e consistono nella riflettività, trasmissività e assorbività. Quando la luce colpisce un materiale, può essere rimandata tramite riflessione o trasmissione. In alcuni casi, la luce può essere convertita in energia termica. Questi fenomeni dipendono da diversi fattori, come la natura del campo elettronico del materiale sulla sua superficie.

1.3 / Ambienti di reazione

La maggior parte dei materiali intelligenti lavora effettivamente a livello microscopico e gli effetti specifici nella struttura del materiale non sono quindi visibili all'occhio umano. Tuttavia, i comportamenti prodotti da questi meccanismi sono spesso a scala meso/macroscopica. Mentre il meccanismo fisico - come il materiale funziona - dipende interamente dalla composizione del materiale; gli effetti fenomenologici - i risultati prodotti dall'azione del materiale - sono determinati da molte cose indipendenti dalla composizione del materiale, tra cui quantità, costruzione dell'assemblaggio, posizione e ambiente. Di conseguenza, effetti molto simili possono spesso essere prodotti da materiali apparentemente diversi.

Una volta che quindi sono stati divisi in due macrogruppi in base alla caratteristica intrinseca nel suo comportamento, è opportuno, ai fini di una maggiore comprensione della ricerca, una classificazione dei materiali intelligenti che riguardi gli ambienti (*environment*) in cui queste caratteristiche agiscono o a cui rispondono.

AMBIENTE LUMINOSO

Trasparenza e cambio di colore

I materiali intelligenti che cambiano proprietà sono probabilmente tra quelli più diffusi. Questi materiali cambiano le loro proprietà - come chimiche, termiche, meccaniche, magnetiche, ottiche o elettriche - in base alle condizioni ambientali o all'energia diretta.

Emissione luminosa

I mezzi convenzionali per produrre luce sono inefficienti perché si basano sulla resistenza di un filo o di un gas, mentre i materiali intelligenti utilizzano meccanismi diversi per produrre luce in modo più efficiente e controllabile. Questi materiali possono produrre luce di qualsiasi colore, dimensione, intensità o forma, e possono essere attivati in risposta alle condizioni ambientali o conservare e riemettere la luce in un momento successivo.

AMBIENTE TERMICO

Trasferimento di calore

Il riscaldamento o il raffreddamento di uno spazio interno in modo convenzionale implica la diluizione dell'aria esistente con aria ad una determinata temperatura, tuttavia ciò è considerato inefficiente. Un metodo più efficiente per lo scambio di calore può essere ottenuto attraverso un motore termico che cicla tra due serbatoi di temperatura diversa, il quale può essere creato attraverso una giunzione in un semiconduttore (termoelettrico) e utilizzato sia per il riscaldamento che per il raffreddamento.

Assorbimento di calore

In alternativa, il calore può essere trasformato in energia interna attraverso il cambiamento della struttura molecolare o microstrutturale dei materiali. Invece di rimuovere calore da uno spazio (trasferimento di calore), possiamo convertirlo in energia interna. L'energia termica può essere assorbita e le oscillazioni inerziali possono essere smorzate attraverso cambiamenti delle proprietà dei materiali (materiali a cambiamento di fase, gel polimerici, termotropici).



AMBIENTE ACUSTICO

Assorbimento del suono



Per molti anni ci si è basati esclusivamente sulle superfici architettoniche per assorbire il suono, un'attività spesso difficile in quanto l'assorbimento è direttamente proporzionale all'area superficiale. Il metodo principale era basato sulla frizione, che in sostanza riduceva l'energia elastica del suono. I materiali a scambio di energia permettono uno scambio di energia elastica molto più efficiente e controllabile. L'energia elastica può essere convertita in energia elettrica, riducendo così l'ampiezza delle vibrazioni acustiche (piezoelettrico).

AMBIENTE CINETICO

Produzione di energia



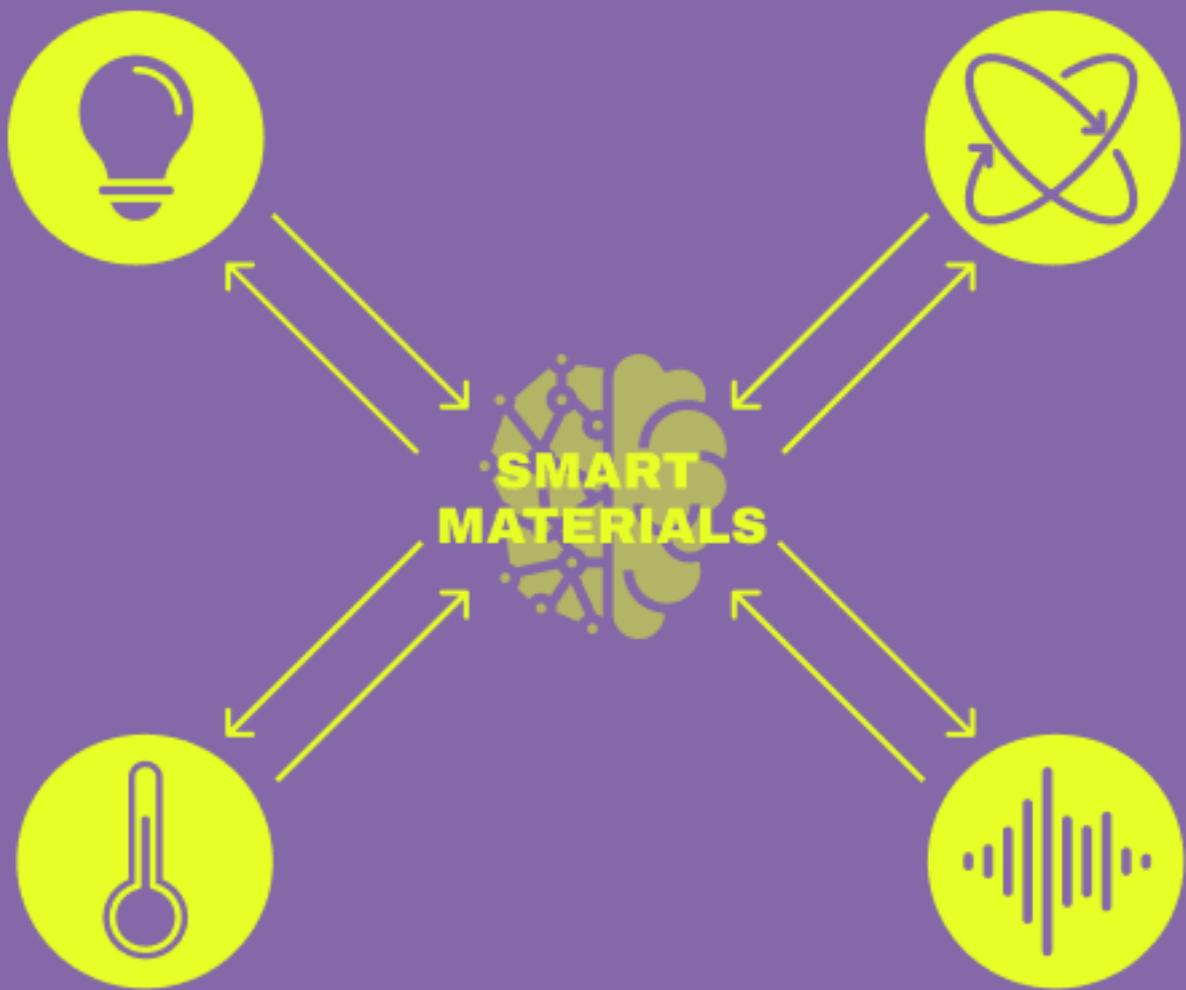
I materiali che scambiano energia possono essere considerati produttori di energia in quanto producono qualche forma di energia in uscita, ma possiamo distinguere questa categoria in base allo scopo di quella energia. Se l'energia in uscita è destinata ad una funzione diversa, come la rilevazione, non consideriamo il materiale come un materiale intelligente produttore di energia (l'emissione di luce è un'eccezione). I materiali che producono direttamente energia utile sono considerati "generatori" e possono generare energia in molte forme, tra cui elettricità (fotovoltaico e termofotovoltaico), pompa di calore o motore (termoelettrico) ed energia elastica (piezoelettrica).

Assorbimento di energia

I materiali che assorbono energia hanno l'obiettivo di dissipare o contrastare l'energia in ingresso. Le vibrazioni possono essere convertite in elettricità (piezoelettrica) o smorzate dall'assorbimento prodotto da un cambio di proprietà del materiale (magnetoreologico, elettroreologico, leghe a memoria di forma). La flessione delle colonne può essere contrastata da uno sforzo applicato (piezoelettrico) e altri tipi di deformazioni possono essere contrastati da sforzi selettivamente applicati (elettrostrittivo, magnetostrittivo, leghe a memoria di forma).

Cambiamento di forma

I materiali intelligenti che cambiano forma differiscono dagli altri materiali nel loro grado di reversibilità e nella magnitudine del cambiamento di forma. Mentre tutti i materiali subiscono qualche forma di cambiamento di forma in risposta all'energia in ingresso, i materiali intelligenti che cambiano forma possono cambiare forma di un fattore molto più grande rispetto agli altri, come nel caso dei gel polimerici intelligenti. Questi materiali si muovono da una posizione all'altra, piegandosi o dirigendosi (leghe a memoria di forma, elettrostrittive, piezoelettriche).



1.4 / Classificazione dei materiali

La scienza dei materiali adotta un approccio di classificazione basato sulla comprensione della struttura interna dei materiali, partendo dalle forze di legame tra gli atomi che determinano molte delle proprietà e delle differenze comportamentali dei materiali. Queste forze producono diversi modelli di aggregazione tra gli atomi che formano diverse strutture molecolari e cristalline, le quali possono essere ulteriormente differenziate in base alle loro strutture molecolari e spaziali. Questo tipo di classificazione dei materiali rappresenta un metodo di grande utilità per varie ragioni: offre la possibilità di descrivere le ragioni specifiche a livello qualitativo o proprietario dei materiali, come ad esempio la durezza o la conducibilità elettrica, la comprensione di queste proprietà a livello atomico e molecolare consente di percepire i materiali in modo scientifico, osservando i loro attributi e comportamenti e non limitandosi a considerarli semplici oggetti di contemplazione.

Ciò fornisce un solido punto di partenza per lo sviluppo di un metodo di progettazione che utilizza le proprietà dei nuovi materiali, in grado di presentare diverse qualità ed opportunità.

STATO	solido, liquido, gas
STRUTTURA	amorfo, cristallino
ORIGINE	naturale, sintetico
COMPOSIZIONE	organico, inorganico, lega
TRATTAMENTO	colato, indurito, laminato
PROPRIETÀ	emissività, conducibilità
AMBIENTE	corrosivo, sott'acqua
APPLICAZIONE	adesivo, vernice, carburante

Adattato da: The Mechanical Engineer's Handbook, John Wiley, 1996

Dal punto di vista ingegneristico, sono utilizzate delle classificazioni volte a distinguere le caratteristiche fondamentali degli oltre 300.000 materiali disponibili. A differenza della classificazione gerarchica propria della scienza dei materiali, la classificazione dell'ingegneria è di tipo mappale, consentendo all'ingegnere di combinare le proprietà e gli attributi dei materiali per meglio risolvere il problema specifico. I materiali nell'ambito dell'ingegneria sono scelti sulla base delle loro caratteristiche funzionali, comportamentali e di resistenza. I criteri fisici per l'uso vengono stabiliti prima della selezione o della creazione (ingegnerizzazione) del materiale, in modo da assicurare la migliore adattabilità o il compromesso più accettabile per i criteri specifici. Se la classificazione della scienza dei materiali descrive la composizione di un materiale, la classificazione dell'ingegneria spiega cosa un materiale può fare. L'attenzione dell'ingegnere è sempre rivolta all'aspetto pratico, considerando la destinazione d'uso del materiale, e molte categorie di classificazione sono pragmatiche, come ad esempio la valutazione dell'ambiente di applicazione, ovvero se il materiale può resistere a corrosione o immersione in acqua salata. Altre categorie di classificazione possono includere il costo, la disponibilità, o la riciclabilità, che sono considerati altrettanto importanti delle categorie di base come stato e composizione.

Sebbene l'obiettivo finale in tutte le applicazioni ingegneristiche sia l'ottimizzazione di una proprietà del materiale per una situazione specifica, indipendentemente dal tipo di materiale, i criteri aggiuntivi riducono rapidamente le scelte apparentemente infinite. Molti settori hanno sviluppato i propri sistemi di classificazione per aiutare a ridurre la scelta dei materiali a quelli appropriati per i loro specifici usi. Ad esempio, l'American Iron and Steel Institute, che si occupa solo di materiali ferrosi, ha adottato un sistema di numerazione chiaro che comprende la composizione della lega, il contenuto di carbonio e il metodo di lavorazione. L'American Welding Association è ancora più specifica, categorizzando i materiali degli elettrodi per resistenza alla trazione, tecnica di saldatura e posizione. Indipendentemente dalla fonte del sistema di classificazione, ciascuno evidenzia chiaramente le proprietà che sostengono il comportamento utile del materiale (Addington, Schodek, 2005).

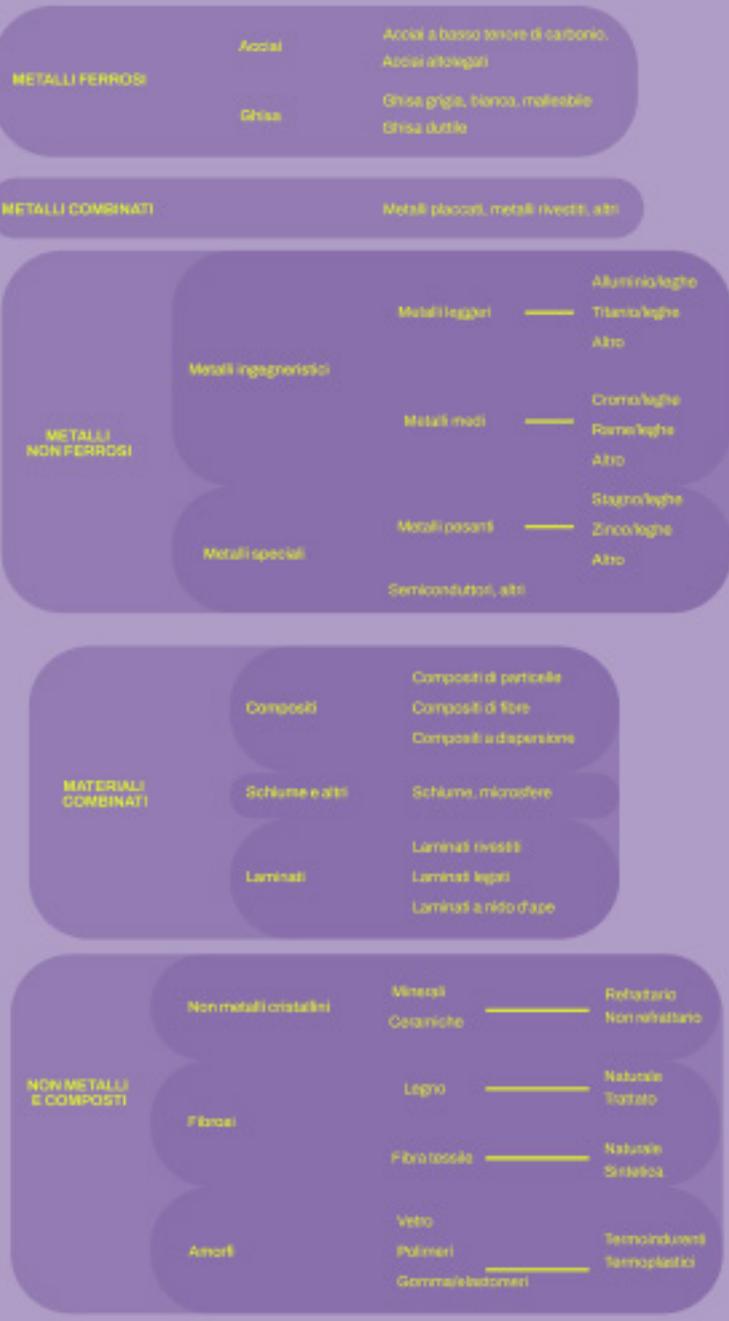
Il focus sulla valutazione del comportamento dei materiali è una metodologia di classificazione adottata nell'ingegneria che pone l'accento sullo studio delle proprietà funzionali, prestazionali e di resistenza dei materiali, piuttosto che sulla loro composizione. Rispetto alla classificazione basata sulla composizione dei materiali tipica della scienza dei materiali, questa modalità di approccio appare meno propensa a condurre direttamente allo sviluppo di nuovi materiali. Tuttavia, l'orientamento degli sforzi verso l'ottimizzazione di una proprietà specifica, piuttosto che del materiale stesso, costituisce una strategia efficace per la ricerca di soluzioni innovative nel campo dei materiali. In questo contesto, i comportamenti desiderati, definiti in base alle specifiche proprietà dei materiali, rappresentano una ben definita e razionale meta da perseguire mediante lo studio dei materiali. Tali comportamenti non presentano preferenze per materiali o tecnologie specifici e si prestano, pertanto, all'esperimentazione e alla ricerca di soluzioni innovative. Gli studi sul comportamento dei materiali rappresentano in tal modo un'importante attività di ricerca, finalizzata alla scoperta di nuove applicazioni, all'ottimizzazione delle performance dei materiali esistenti o alla ricerca di soluzioni migliori per problemi specifici. Inoltre, l'attenzione posta sui comportamenti dei materiali rappresenta una via di accesso privilegiata per l'individuazione di nuove proprietà dei materiali attualmente poco conosciute o ancora inesplorate.

Negli anni si sono sviluppati diversi approcci di classificazione dei materiali utilizzati in architettura, che tendono a essere più nominativi e raramente basati esclusivamente sui requisiti di performance come avviene invece nell'ingegneria. I codici e gli standard edilizi architettonici spesso indicano esplicitamente o implicitamente i materiali accettabili, lasciando all'architetto solo la scelta tra i marchi. Queste esigenze vengono codificate in modi diversi, ad esempio in America, tramite l'uso del sistema di classificazione standardizzato del Construction Specifications Institute, noto come indice CSI. Questo sistema organizza i materiali in ampie classi generiche e per componente o sistema, ponendo l'accento sull'applicazione e sull'uso comune piuttosto che sui comportamenti e le proprietà fondamentali. Le proprietà e le prestazioni dei materiali sono presumibilmente soddisfacenti se il materiale scelto rientra negli utilizzi normativi definiti dalla pratica. Anche le tecnologie utilizzate negli edifici vengono raggruppate in sistemi operativi e costruttivi, differenziandosi dal metodo di categorizzazione ingegneristico. Questo sistema tende a rimuovere la responsabilità decisionale dall'architetto e si focalizza sulla specifica e la standardizzazione, fornendo informazione piuttosto che conoscenza.\

Il sistema di classificazione utilizzato nel settore della costruzione non ha lo scopo di promuovere l'innovazione nei materiali, ma piuttosto di fornire linee guida per la comunicazione tra professionisti del settore. Dopo aver completato la progettazione preliminare dell'edificio, gli architetti devono creare documenti di costruzione che definiscono ogni elemento dell'edificio e specificano i materiali o i componenti che devono essere utilizzati, questi documenti sono inoltre vincolanti per gli appaltatori e i professionisti della costruzione coinvolti; le specifiche dei materiali e dei prodotti sono spesso scritte in questo formato per semplificare il processo di specificazione per gli architetti, ma questo sistema porta spesso all'esclusione di materiali e tecnologie nuovi e insoliti. (Addington, Schodek, 2005).

Appare chiaro che un sistema basato sulle specifiche può essere limitante per l'innovazione e la ricerca di soluzioni più avanzate nel campo dei materiali. Trattare i materiali intelligenti come artefatti in un sistema di classificazione è problematico perché il loro comportamento attivo può renderli potenzialmente applicabili come tecnologia. Inoltre, molte nuove tecnologie sono senza precedenti nell'applicazione e non hanno quindi un riferimento in descrizioni convenzionali. Il testo propone un approccio di classificazione a più livelli basato sul comportamento fisico e sul comportamento fenomenologico, con quest'ultimo che è raramente documentato nel campo dell'architettura. Il testo discute anche come i materiali intelligenti possano essere utilizzati per creare dispositivi, assemblaggi e ambienti sempre più complessi, intrinsecamente multimodali o che forniscono risposte più complesse rispetto a quelle possibili con singoli materiali. Fin qui si è proposto un sistema di classificazione basato sulla sovrapposizione di funzione/sistema per stabilire una relazione sequenziale tra materiali, tecnologie e ambienti.

CLASSIFICAZIONE INGEGNERISTICA DEI MATERIALI



materiali
tradizionali

materiali ad alta
performance

risposte fisse a stimoli
esterni (le proprietà dei
materiali rimangono
costanti sotto normali
condizioni)

smart materials
Tipo 1 - cambiamento
di proprietà
Tipo 2 - scambio di
energie

Tipo 1 - risposte mutevoli
intrinseche al materiali a
specifici stimoli esterni o interni
Tipo 2 - le risposte possono
essere controllate
computazionalmente e
migliorate

Dispositivi e
sistemi intelligenti

Embedded smart
materials nei sistemi o nei
dispositivi, con risposte
mutevoli intrinseche e con
relativi miglioramenti
computazionali a stimoli
multimi interni o esterni
oppure gestiti da controlli
esterni

Ambienti
intelligenti

Variazioni di risposta
combinata intrinseche e
cognitivamente guidate
dell'intero ambiente
composto da dispositivi
e sistemi intelligenti per
utilizzare condizioni e
stimoli interni o esterni

Indipendentemente dal sistema di classificazione utilizzato, i designer devono essere esposti ai determinanti essenziali del comportamento dei materiali. La conoscenza della struttura atomica e molecolare è cruciale per comprendere le proprietà intrinseche di qualsiasi materiale, in particolare dei materiali intelligenti. Ecco perché la necessità di un maggiore livello di classificazione per comprendere al meglio i comportamenti derivati dalle caratteristiche dei materiali, utilizzando un approccio leggermente più chimico e fisico e meno ingegneristico.

_Cambiamento di fase

È possibile osservare che molti materiali presentano diversi stati fisici - gas, liquido o solido - che vengono comunemente definiti fasi. Una variazione di temperatura o pressione può causare la transizione di un materiale da uno stato all'altro, la quale è identificata come una "trasformazione di fase". In vista del fatto che tali processi comportano l'assorbimento, la conservazione o il rilascio di una grande quantità di energia sotto forma di calore latente (Addington, Schlodek, 2005), è da rilevare che una trasformazione di fase può avvenire da solido a liquido, da liquido a gas e viceversa, ad una temperatura precisa. In relazione alla composizione del materiale, è possibile prevedere il luogo in cui viene assorbita o rilasciata energia. In questo contesto, i materiali a cambiamento di fase sfruttano deliberatamente le azioni di assorbimento/rilascio. Sebbene la maggior parte dei materiali subisca cambiamenti di fase, alcuni composti particolari - come i sali idrati inorganici - assorbono e rilasciano una grande quantità di calore. Grazie alla possibilità di progettare materiali a cambiamento di fase in grado di assorbire o rilasciare energia a temperature prevedibili, si è indagato il loro impiego in campo architettonico, come mezzo per affrontare l'ambiente termico in edifici. Tra le prime applicazioni dei materiali a cambiamento di fase si annovera lo sviluppo del cosiddetto "wallboard a cambiamento di fase", che utilizza diversi materiali incorporati, come i sali idrati, le paraffine e gli acidi grassi.

_Conduttori intelligenti

Esistono diversi materiali conduttori utili in diverse applicazioni di progettazione, poiché la conduzione elettrica è essenziale per il funzionamento dei dispositivi elettronici. Oltre a metalli che sono naturalmente conduttori, molti prodotti tradizionali, come il vetro o i polimeri, possono diventare conduttori attraverso l'aggiunta di materiali conduttivi o processi elettroattivi. Alcuni polimeri presentano anche comportamenti semiconduttori e sono in grado di emettere luce. Sono state proposte numerose applicazioni per i polimeri conduttivi, che includono la produzione di muscoli artificiali elettrici, utilizzando film di polipirrolo e polianilina, che vengono sottoposti a corrente per far avvenire il trasferimento di ioni. La flessione di questi film può essere utilizzata per creare forze e azioni meccaniche. Altri materiali conduttori specializzati comprendono i fotoconduttori, i fotoresistori, i piroconduttori e i magnetoconduttori. Essi trovano applicazioni come sensori di diversi tipi in vari dispositivi, tra cui sensori di movimento e rilevatori termici.

_LCT - Tecnologie di Cristalli Liquidi

I display a cristalli liquidi hanno raggiunto una diffusione senza precedenti nella moderna società tecnologica, trovando impiego in numerosi prodotti che vanno dal settore dell'elettronica di consumo a quello dell'automotive e avionico. L'essenza della tecnologia dei cristalli liquidi risiede nella loro natura di fase intermedia tra i solidi cristallini e i liquidi isotropi, caratterizzati da proprietà anisotrope sensibili ai campi elettrici. Tale particolare conformazione li rende ideali per essere impiegati nei dispositivi di visualizzazione ottica, come i display. In particolare, i display a cristalli liquidi si basano sull'utilizzo di due fogli di materiale polarizzante tra i quali viene posto uno strato di soluzione di cristalli liquidi. L'applicazione di una corrente elettrica alla soluzione induce l'orientamento degli stessi, impedisce alla luce di attraversarli e, quindi, consente loro di funzionare come una sorta di tenda che regola il passaggio di luce. Tale funzionamento molto sofisticato costituisce solo uno degli esempi di come l'utilizzo dei cristalli liquidi si configuri come un'area di grande interesse e ricerca attiva nell'ambito delle tecnologie per il display e la visualizzazione ottica.



Progressivo cambio di fase di film a cristalli liquidi (tipici utilizzati negli LCD).

I materiali sono circondati da campi energetici, che influenzano il loro stato energetico. Quando il livello di energia di un dato materiale coincide con quello del suo ambiente circostante, si verifica uno stato di equilibrio, e non si verifica alcuno scambio di energia. Tuttavia, se il materiale è in uno stato energetico differente, viene creato un potenziale che spinge alla ripartizione di energia. Questo scambio di energia coinvolge i livelli energetici atomici del materiale: l'energia assorbita dal fotone, ad esempio, eleva gli atomi ad un livello energetico superiore, ma l'incapacità di mantenere questo stato obbliga gli atomi a rilasciare energia incorporata. I materiali intelligenti di scambio energetico recuperano questa energia interna in forma utilizzabile sfruttando materiali semiconduttori. Tuttavia, quando l'energia viene aggiunta o immessa nei materiali, il livello energetico aumenta e, per la maggior parte dei materiali, questa energia si manifesta sotto forma di calore. L'energia di scambio in questi materiali può essere invertita, e questo è tipico dei materiali bidirezionali. Tuttavia, l'efficienza dello scambio di energia di radiazione influenza negativamente l'irreversibilità termodinamica.

„Materiali Luminescenti, Fluorescenti, Fosforescenti

La luminescenza si riferisce all'emissione di luce causata dall'energia incidente, che può derivare da una varietà di fonti di eccitazione come reazioni elettriche o chimiche. L'emissione di luce può essere immediata, in tal caso è chiamata fluorescenza, o può essere ritardata, in tal caso è chiamata fosforescenza. La fluorescenza può essere potenziata quando il materiale è esposto alla luce ultravioletta. Al contrario, la fosforescenza può durare per un periodo più lungo dopo la rimozione della fonte di eccitazione perché gli elettroni diventano momentaneamente intrappolati a causa delle caratteristiche del materiale. Questo fenomeno si chiama afterglow. I materiali luminescenti sono solitamente solidi che contengono piccole impurità e la natura della luce emessa, la sua velocità e durata dipendono dal tipo di impurità presente. Diverse tipologie di materiali emettitori di luce possono essere progettate variando le inclusioni di impurità per ottenere materiali con proprietà specifiche, compreso il colore della luce emessa. La qualità dei materiali con lunga durata dell'effetto di afterglow, come ad esempio il solfato di stronzio, è particolarmente ricercata.

La *fotoluminescenza* è una forma di luminescenza generata dall'interazione tra un'energia esterna incidente e un materiale, il quale emette luce a un'energia inferiore. Per la fotoluminescenza si attua un processo di eccitazione elettronica attraverso l'assorbimento di fotoni. A seguito del principio di conservazione dell'energia, la lunghezza d'onda della luce emessa è maggiore (e pertanto "più rossa") rispetto alla luce incidente e richiede una minore quantità di energia. Alcuni tipi di fosfori, quando esposti alla luce ultravioletta, mostrano un'intensa capacità di fotoluminescenza.

_Materiali Elettroluminescenti

I materiali elettroluminescenti sono sostanze che emettono luce quando vengono eccitati da una tensione applicata o da un campo elettrico. In tali materiali, l'energia richiesta per tale eccitazione viene fornita dalla tensione applicata. L'elettroluminescenza può verificarsi in due modi: la prima condizione avviene quando gli elettroni attraversano il fosforo e colpiscono le impurità sparse in esso, mentre la seconda si verifica nei semiconduttori come risultato del movimento degli elettroni e delle lacune. Le applicazioni includono retroilluminazione degli orologi, pannelli di dimensioni variabili alimentati a batteria o a tensione domestica. La loro struttura può essere semplice, come una base polimerica su cui viene applicata uniformemente una sostanza fosforica, oppure complessa, come un nastro elettrico che circonda un pannello polimerico. L'assenza di parti mobili e delicate, la bassa consumazione di energia, la scarsa generazione di calore e la possibilità di utilizzare una varietà di substrati come il vetro, la ceramica e la plastica, rendono le lampade elettroluminescenti una scelta popolare in varie applicazioni.

_Semiconduttori e Termoelettrici

I semiconduttori sono materiali noti a molti poiché hanno permesso lo sviluppo di dispositivi microelettronici ad alta potenza. Il fenomeno fondamentale alla base di un semiconduttore costituisce anche la base per altre tecnologie come transistor e, in particolare, l'effetto fotovoltaico associato all'energia solare. Tuttavia, molte persone non hanno comprensione di cosa sia effettivamente un semiconduttore e cosa faccia. In questo contesto, ci limiteremo a dare alcune caratteristiche salienti di questi materiali piuttosto complessi. I materiali semiconduttori di base come il silicio non sono ottimi conduttori né ottimi isolanti. Solo con l'aggiunta di piccole impurità chiamate dopanti, è possibile conferire al materiale molte proprietà elettriche interessanti, controllando in modo preciso i movimenti degli elettroni. Sfruttando le proprietà risultanti, un semiconduttore può svolgere le stesse funzioni di circuiti elettronici complessi. Il silicio è il materiale semiconduttore più diffuso, ma esistono anche altri tipi di materiali. Questi materiali mostrano proprietà interessanti a seconda delle variazioni di temperatura attorno ad essi. Contrariamente ai metalli, che vedono la loro resistenza aumentare all'aumentare della temperatura, la conduzione dei materiali semiconduttori aumenta proporzionalmente alla temperatura. Questa proprietà è dovuta alla struttura a bande di elettroni del materiale, in cui esiste un vuoto tra le bande attraverso il quale gli elettroni termicamente eccitati possono attraversare in determinate condizioni.

Molti dispositivi ampiamente utilizzati hanno la loro base fondamentale nella tecnologia dei semiconduttori, è importante notare che il fenomeno di base è legato al comportamento del semiconduttore. In un dispositivo fotovoltaico invece di esserci una tensione applicata come descritto sopra, c'è un'energia incidente (tipicamente solare) che agisce sulla giunzione e fornisce l'ingresso di energia esterna. Questa energia incidente provoca un cambiamento nei livelli degli elettroni che a loro volta causano la movimento degli elettroni adiacenti a causa delle forze elettrostatiche. Questo movimento di elettroni produce una corrente. Fototransistori sono simili perché convertono l'energia radiante dalla luce in una corrente. I LED (diodi emettitori di luce) comuni si basano essenzialmente sul converso degli effetti fotovoltaici. Un LED è un semiconduttore che fa luce quando passa una corrente attraverso di esso. È fondamentalmente il contrario di una cella fotovoltaica. I transistor sono simili in quanto si basano su tecnologie a semiconduttore. Fondamentalmente, un transistor può essere utilizzato come dispositivo di amplificazione del segnale o come dispositivo di commutazione.

Materiali Piezoelettrici

L'effetto piezoelettrico, costituisce la base di prodotti molto diversi tra loro quali alcuni tipi di microfoni, altoparlanti, accendini per griglie a carbone, sci per ridurre le vibrazioni, pulsanti di campanelli e un numero infinito di sensori di posizione e piccoli attuatori attraverso l'uso di un materiale piezoelettrico. In tale materiale, una forza meccanica applicata produce una deformazione che, a sua volta, genera una tensione elettrica, oppure l'applicazione di una tensione causa una deformazione meccanica che può essere impiegata per produrre una forza. Tale fenomeno generale prende il nome di effetto piezoelettrico.

Il fenomeno si basa su una conversione reversibile dell'energia tra forme elettriche e meccaniche, che avviene naturalmente in materiali permanentemente polarizzati con parti delle molecole caricate positivamente ed altre negativamente. Molti cristalli come il quarzo, ma anche molte nuove ceramiche e polimeri sviluppati, presentano tale proprietà, che è simile a quella dei magneti dove si ha una polarizzazione magnetica permanente, afferente invece al campo elettrico. Nei materiali piezoelettrici, ogni cellula o molecola rappresenta un dipolo con cariche positive e negative sulle due estremità. Tramite l'applicazione di una forza meccanica, si può determinare una deformazione che cambia l'orientamento dei dipoli, alterando così lo stato neutro della superficie. Invece, applicare una tensione determina l'allineamento delle molecole polarizzate con il campo elettrico, sviluppando una deformazione.

Esistono anche dispositivi basati sulla tecnologia piezoelettrica che fungono da piccoli attuatori o sensori di posizione. Questi dispositivi sono in grado di trasformare un segnale elettrico in un movimento meccanico preciso e controllato o viceversa. Ad esempio, i microfoni piezoelettrici rilevano le variazioni di pressione sonora e le convertono in segnali elettrici. Gli altoparlanti piezoelettrici fanno il processo inverso: ricevono un segnale elettrico e lo trasformano in vibrazioni sonore. Altri esempi sono gli sci anti-vibrazione che usano dei materiali piezoelettrici per assorbire le oscillazioni indesiderate o i dispositivi medici che usano gli ultrasuoni generati da elementi piezoelettrici per diagnosticare o trattare alcune patologie.

A Memoria di forma

L'effetto memoria di forma è un fenomeno che consente a determinati materiali di mantenere una forma preimpostata e quindi di recuperarla dopo essere state deformate meccanicamente. Questo effetto dipende da una trasformazione di fase che è dipendente dalla temperatura e reversibile. Nei metalli e nelle leghe come ad esempio la lega nichel-titanio, così come altre, può essere modellata in due forme di prodotto finale, a seconda della struttura cristallina: stati austenitici e martensitici. Il primo è forte e duro, mentre il secondo è morbido e duttile. L'effetto memoria di forma è il risultato della necessità per una struttura reticolare cristallina di adattarsi allo stato di energia minima per una data temperatura. Una struttura reticolare cristallina può assumere molte configurazioni nella fase martensitica, mentre solo un'orientazione è possibile nello stato austenitico. Quando la struttura martensitica ritorna ad austenite durante il riscaldamento, genera una forza elevata. Le leghe a memoria di forma sono utilizzate come attuatori, in dispositivi come montature per occhiali o attuatori per laptop, e in applicazioni mediche, come stent che possono essere impiantati in forma compressa e poi espandersi alla giusta dimensione e forma quando riscaldati dal corpo. Un fenomeno simile, chiamato superelasticità, può anche verificarsi, dove l'applicazione di uno stress a una lega a memoria di forma deformata induce una trasformazione di fase che si manifesta come alte deformazioni, che sono reversibili quando lo stress applicato viene rimosso. Non solo le leghe sono in grado di manifestare effetti di memoria di forma, infatti è stato investito un grande sforzo nella ricerca e nello sviluppo dei nuovi materiali, nel rendere i polimeri in grado di presentare gli stessi effetti delle leghe, ottenendo un notevole successo. La versatilità dei polimeri, in grado di essere facilmente lavorati in numerosi modi, rende le applicazioni di questi materiali estremamente ampie. Tra le applicazioni mediche troviamo l'utilizzo di fibre polimeriche a memoria di forma per creare nodi auto-leganti utilizzati in interventi chirurgici sulle vene. Le fibre, che vengono plasmate inizialmente, sono avvolte intorno alla vena e, grazie alla temperatura del corpo, si stringono legandosi fra di loro, riprendendo così la forma iniziale memorizzata.

I materiali a memoria di forma presentano una famiglia di proprietà e caratteristiche molto interessanti per i fini della ricerca progettuale, per questo verranno approfonditi maggiormente più avanti (Capitolo X).

FOCUS: Materiali come forme di “vita”

da Defining Lyfe in the Universe: From Three Privileged Functions to Four Pillars

We seek to reframe the definition of life in a more expansive way while recognizing the need to signify the specific kind of life that earthly forms represent. Thus, we have come up with a new term—lyfe. Henceforth, we will refer to life (as we know it) and lyfe (as it could be, in the most general sense).

The two designations are distinguished as follows:

- **Life** represents life as we know it; it uses the specific disequilibria and classes of components of earthly life. Life is an autocatalytic network of organometallic chemicals in aqueous solution that records and processes information about its environment in molecular form and achieves dynamical order by dissipating any subset of the following disequilibria: redox gradients, chemiosmotic gradients, visible/thermal photons, etc.

- **Lyfe** represents any hypothetical phenomenon in the universe that fulfills the fundamental processes of the living state, regardless of the disequilibria or components that it harnesses or uses. Lyfe is any hypothetical phenomenon that maintains a low-entropy state via dissipation and disequilibria conversions, utilizes autocatalytic networks to achieve nonlinear growth and proliferation, employs homeostatic regulatory mechanisms to maintain stability and mitigate external perturbations, and acquires and processes functional information about its environment.

The concept of “life as we don’t know it” is not new. However, traditional definitions of life struggle to clearly delineate boundaries between “life as we know it” and “life as we don’t know it.” Furthermore, many traditional definitions are equally fuzzy with regard to when “life as we don’t know it” becomes sufficiently far from “life as we know it” that it should no longer be considered life. For instance, according to NASA’s definition of life (Section 1), should a self-sustaining chemical system that is found evolving in a non-Darwinian fashion be considered “life as we don’t know it” or not alive at all? To remedy this, we have developed our criteria for lyfe based on four fundamental processes. We agree with the general sentiment of [26] that “life is a verb, not a noun,” a remark based on the view that life operates by dissipating planetary redox gradients, shuttling electrons and transducing that disequilibrium into other dynamic configurations [27]. While the dissipation of free energy is certainly the first necessary aspect of life, we contend that it must be accompanied by three other processes—autocatalysis, homeostasis, and learning—to form a sufficient description of the living state.

Cerchiamo di ridefinire la definizione di vita in modo più ampio, riconoscendo al contempo la necessità di indicare il tipo specifico di vita rappresentato dalle forme terrestri. Pertanto, abbiamo coniato un nuovo termine: “lyfe”. Da qui in avanti, ci riferiremo alla vita (come la conosciamo) come “life” e alla lyfe (come potrebbe essere, nel senso più generale).

I due termini sono distinti come segue:

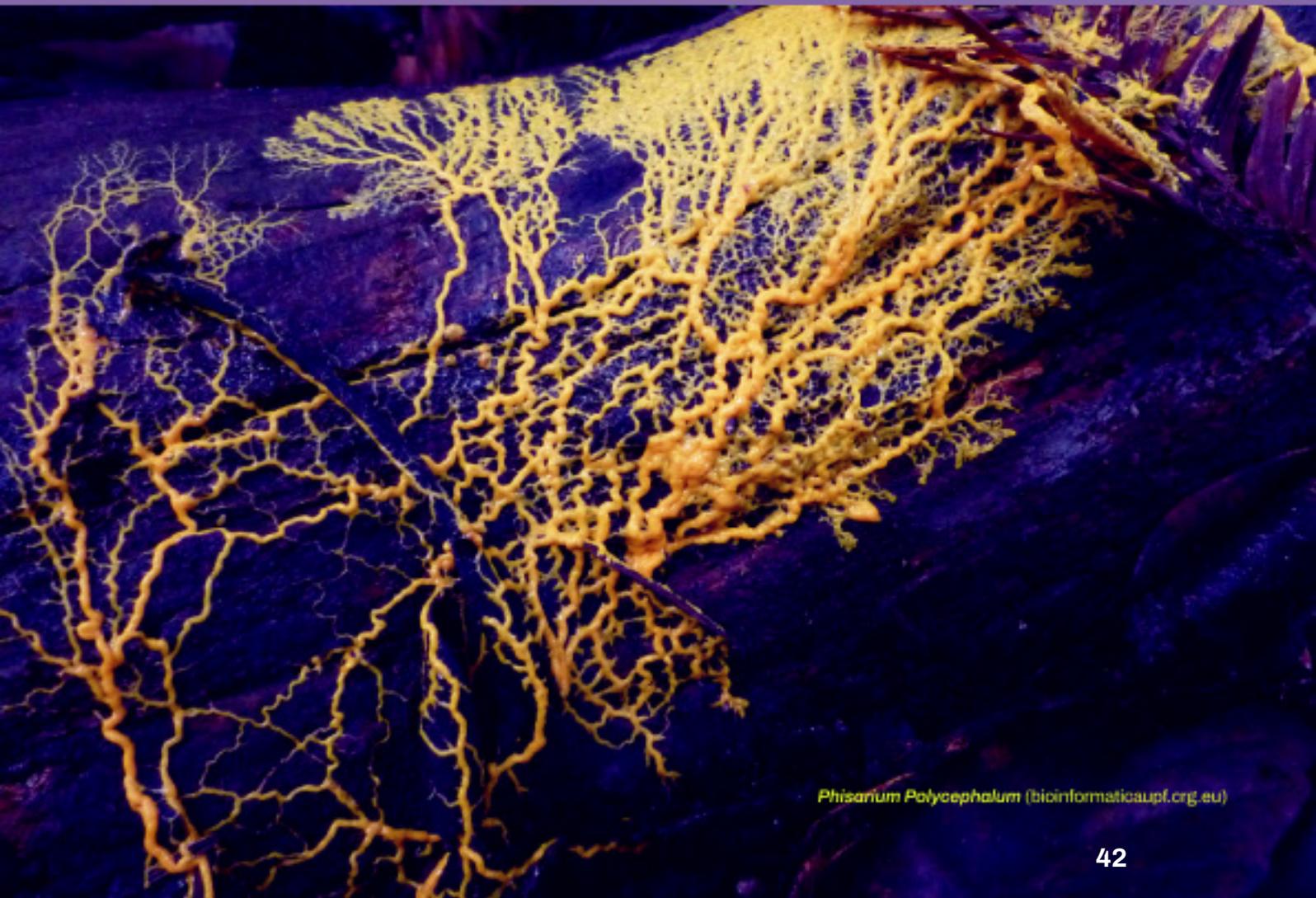
- **Life** rappresenta la vita come la conosciamo; utilizza i disequilibri specifici e le classi di componenti della vita terrestre. La vita è una rete autocatalitica di sostanze chimiche organometalliche in soluzione acquosa che registra e elabora informazioni sull’ambiente in forma molecolare e raggiunge un ordine dinamico dissipando qualsiasi sottoinsieme dei seguenti disequilibri: gradienti redox, gradienti chemiosmotici, fotoni visibili/termici, ecc.

- **Lyfe** rappresenta qualsiasi fenomeno ipotetico nell’universo che soddisfa i processi fondamentali dello stato vitale, indipendentemente dai disequilibri o dai componenti che sfrutta o utilizza. Lyfe è qualsiasi fenomeno ipotetico che mantiene uno stato a bassa entropia attraverso la dissoluzione e le conversioni di disequilibri, utilizza reti autocatalitiche per raggiungere la crescita non lineare e la proliferazione, impiega meccanismi regolatori omeostatici per mantenere la stabilità e mitigare le perturbazioni esterne e acquisisce ed elabora informazioni funzionali sull’ambiente.

Il concetto di “vita come non la conosciamo” non è nuovo. Tuttavia, le definizioni tradizionali di vita faticano a delineare chiaramente i confini tra “vita come la conosciamo” e “vita come non la conosciamo”. Inoltre, molte definizioni tradizionali sono altrettanto vaghe per quanto riguarda il momento in cui “vita come non la conosciamo” diventa sufficientemente lontana da “vita come la conosciamo” da non essere più considerata vita. Ad esempio, secondo la definizione di vita della NASA, un sistema chimico autosufficiente che si evolve in modo non darwiniano dovrebbe essere considerato “vita come non la conosciamo” o non vivo affatto? Per rimediare a questo problema, abbiamo sviluppato i nostri criteri per lyfe basati su quattro processi fondamentali. Concordiamo con il sentimento generale del [26] che “la vita è un verbo, non un sostantivo”, un’osservazione basata sulla visione che la vita opera dissipando gradienti redox planetari, trasportando elettroni e trasducendo quel disequilibrio in altre configurazioni dinamiche [27]. Mentre la dissipazione di energia libera è certamente il primo aspetto necessario della vita, sosteniamo che debba essere accompagnata da altri tre processi: autocatalisi, omeostasi e apprendimento, per formare una descrizione sufficiente dello stato vivente.

Secondo gli autori, mentre la vita terrestre è un particolare fenomeno fisico-chimico che si manifesta in presenza di acqua liquida, basato su molecole organiche a base di carbonio e che mantiene il proprio ordine interno attraverso la dissipazione di energia, potrebbero esistere molte forme di vita, o "vyta", dotate di caratteristiche molto diverse. La definizione di "vyta" quindi, si basa su quattro caratteristiche fondamentali, ovvero la dissipazione, l'autocatalisi, l'omeostasi e l'apprendimento.

Utilizzando i quattro pilastri della Iyfe come framework, possiamo comprendere meglio i materiali intelligenti e metterli in contesto con i vari fenomeni dell'universo. Questo approccio ci aiuta anche a distinguere le caratteristiche principali che differenziano i materiali intelligenti da quelli non intelligenti. Analizzando gli esempi sopra elencati, possiamo vedere come la combinazione dei diversi pilastri possa generare tipologie di materiali intelligenti diverse, ognuna con le sue proprietà e caratteristiche uniche. Infine, questa struttura ci offre uno strumento prezioso per esplorare la natura dei materiali intelligenti e il loro ruolo nell'universo più ampio.



Phisarium Polycephalum (biointformaticaupf.org.eu)

Apprendimento



La proprietà di apprendimento nei materiali si riferisce alla loro capacità di modificare la propria struttura e funzione in risposta a stimoli esterni, acquisendo e memorizzando informazioni. Un esempio di materiale con proprietà di apprendimento è il polimero elettroattivo, che può essere programmato per assumere diverse forme in risposta a un campo elettrico e memorizzarle anche dopo la rimozione del campo. Gli smart materials che hanno la proprietà di apprendimento sono materiali in grado di modificare il loro comportamento in risposta a stimoli esterni, migliorando le loro prestazioni grazie all'esperienza acquisita.

Autocatalisi



L'autocatalisi è la proprietà chimica che permette a una sostanza di catalizzare la propria formazione, accelerando il processo di produzione. Questa capacità è presente in molti processi naturali, come la replicazione del DNA e l'attivazione di enzimi, ma viene anche utilizzata nella sintesi di materiali avanzati come polimeri e nanomateriali. L'autocatalisi è tipica di molecole organiche e sistemi chimici con la capacità di replicarsi a livello molecolare, ma alcuni materiali intelligenti sfruttano i principi di auto-riparazione e auto-riproduzione, come i materiali auto-riparanti polimerici, che si riparano autonomamente da danni superficiali senza bisogno di intervento umano.

Omeostasi



In fisica dei materiali, l'omeostasi si riferisce alla capacità di un materiale di mantenere il proprio stato di equilibrio, nonostante le variazioni esterne delle condizioni ambientali o dell'applicazione delle forze. Questo equilibrio è mantenuto attraverso una serie di processi di auto-regolazione e adattamento che il materiale attiva per mantenere le sue proprietà in un determinato intervallo. In generale, l'omeostasi dei materiali si riferisce alla loro capacità di auto-regolazione e di mantenere le loro proprietà in un intervallo di valori ottimali, al fine di garantire la loro funzionalità e durata nel tempo.

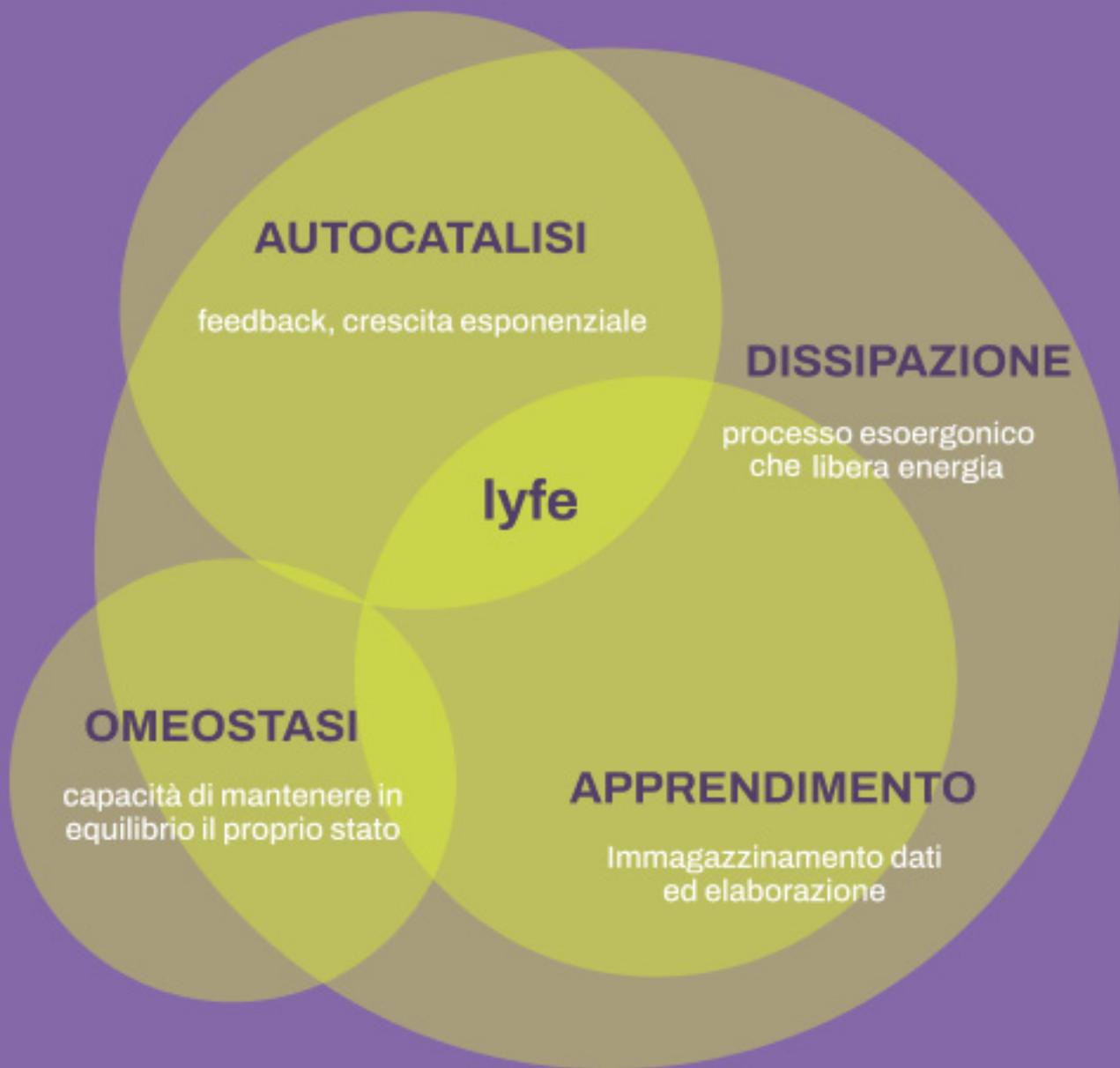
Ad esempio, alcuni materiali come i cristalli termoelettrici possono auto-regolarsi in modo da mantenere costante la loro capacità di convertire il calore in energia elettrica. Altri materiali come le proteine possono mantenere la loro struttura tridimensionale attraverso un meccanismo di ripiegamento e correzione degli errori, in modo da garantire la loro funzionalità.

Dissipazione



In fisica dei materiali, l'omeostasi si riferisce alla capacità di un materiale di mantenere il proprio stato di equilibrio, nonostante le variazioni esterne delle condizioni ambientali o dell'applicazione delle forze. Questo equilibrio è mantenuto attraverso una serie di processi di auto-regolazione e adattamento che il materiale attiva per mantenere le sue proprietà in un determinato intervallo. In generale, l'omeostasi dei materiali si riferisce alla loro capacità di auto-regolazione e di mantenere le loro proprietà in un intervallo di valori ottimali, al fine di garantire la loro funzionalità e durata nel tempo.

Ad esempio, alcuni materiali come i cristalli termoelettrici possono auto-regolarsi in modo da mantenere costante la loro capacità di convertire il calore in energia elettrica. Altri materiali come le proteine possono mantenere la loro struttura tridimensionale attraverso un meccanismo di ripiegamento e correzione degli errori, in modo da garantire la loro funzionalità.



La Manifattura Additiva: nozioni base



2.1 / Definizione di Manifattura Additiva

"process of joining materials to make parts (3.9.1) from 3D model data, usually layer (3.3.7) upon layer, as opposed to subtractive manufacturing and formative manufacturing methodologies" (ISO/ASTM 52900:2021)

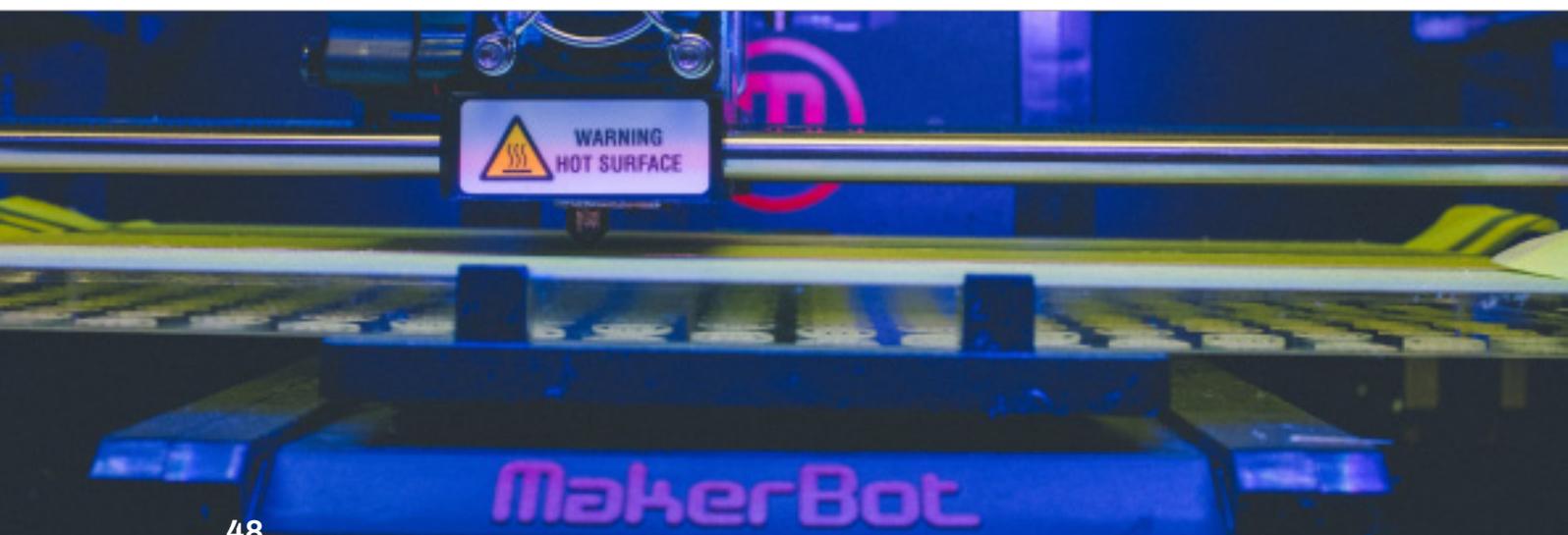
Processo di unione di materiali per creare parti (3.9.1) a partire da dati di modelli 3D, di solito strato (3.3.7) su strato, a differenza delle metodologie di produzione sottrattive e formative.

La manifattura additiva è una tecnologia di produzione che utilizza software di progettazione assistita da computer (CAD) o scanner di oggetti 3D per dirigere l'hardware nella deposizione sequenziale di materiale, strato su strato, in forme geometriche precise, creando oggetti tridimensionali a partire da un modello digitale in formato CAD. Questo tipo di tecnologia è stato sviluppato negli anni '80, ma solo recentemente la sua diffusione è aumentata notevolmente grazie ai progressi nella progettazione assistita dal computer (CAD) e alla riduzione dei costi delle macchine per la stampa 3D.

La produzione additiva ha rivoluzionato la tradizionale produzione, permettendo la creazione di oggetti complessi senza la necessità di stampi o attrezzature speciali. Inoltre, offre la possibilità di ridurre i tempi di produzione, personalizzare i prodotti in base alle esigenze specifiche dei clienti e creare geometrie complesse che sarebbero difficili o impossibili da realizzare con le tecnologie tradizionali. Ciò ha aperto nuove opportunità in diversi settori, tra cui l'aerospaziale, l'automobilistico, il medico, l'odontoiatrico, l'architettura, il design e la gioielleria.

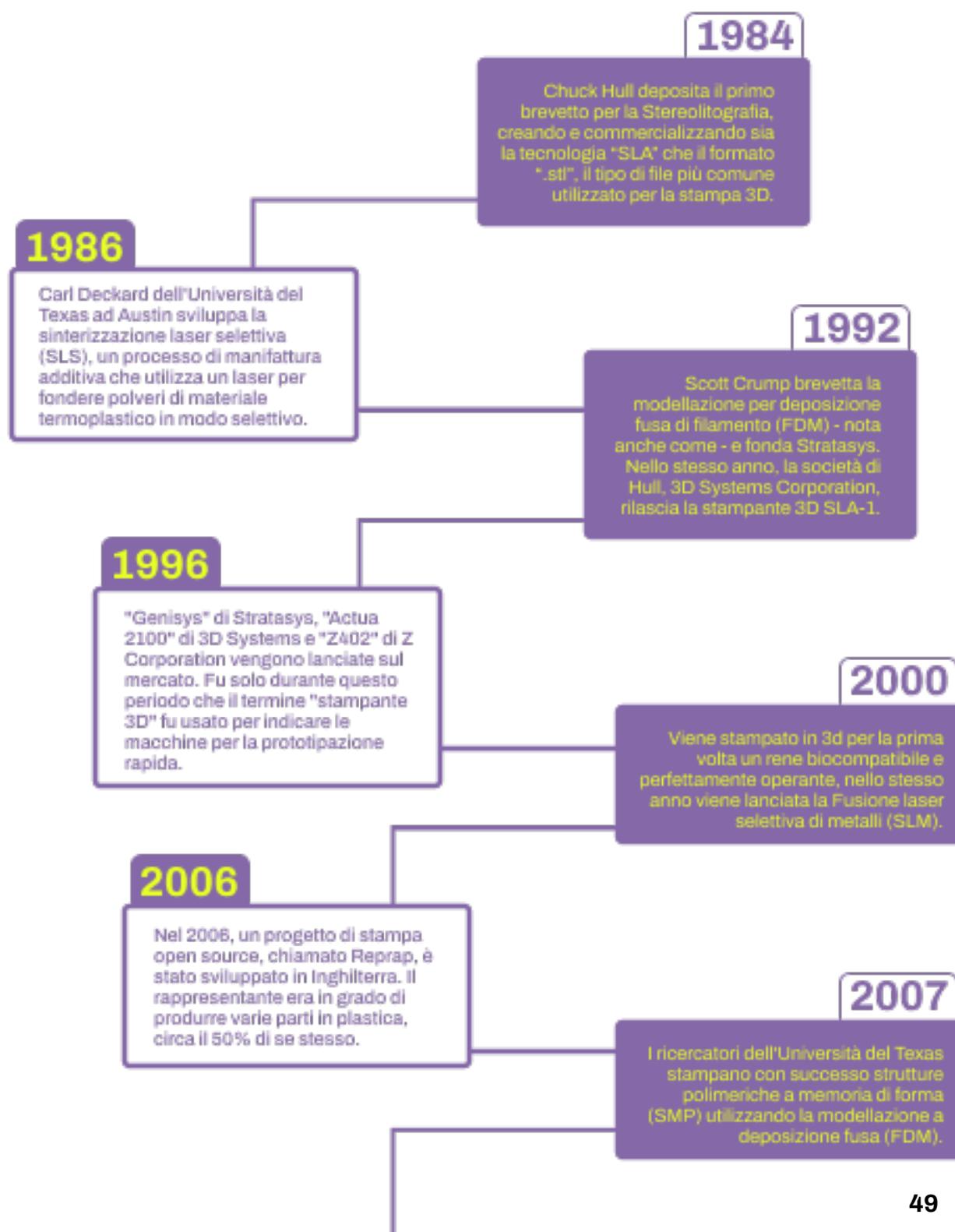
La produzione additiva differisce dalla produzione tradizionale, in cui spesso è necessario rimuovere il materiale tramite fresatura, lavorazione, intaglio, sagomatura o altri mezzi. Questo processo ha il potenziale per rivoluzionare la produzione di oggetti, consentendo la realizzazione di prototipi e pezzi unici in modo rapido ed economico, eliminando i costi legati alla realizzazione di attrezzature e stampi tradizionali.

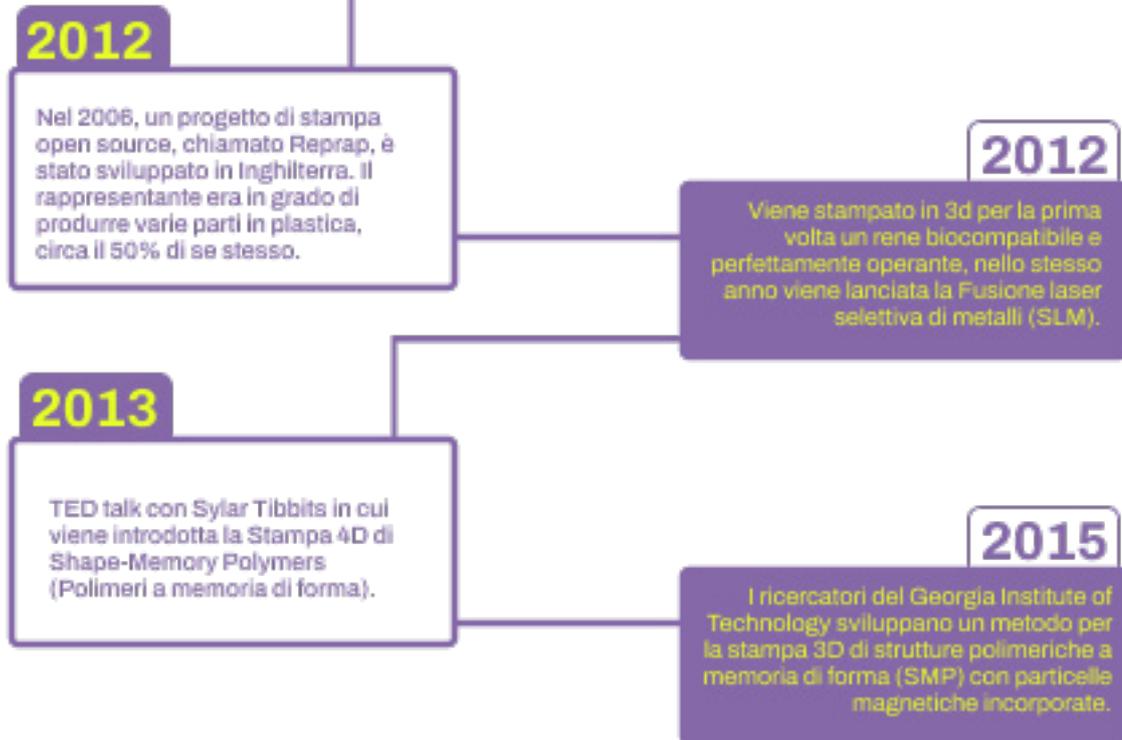
Infine, è importante sottolineare che i termini "stampa 3D" e "prototipazione rapida" sono spesso utilizzati in modo intercambiabile per discutere di produzione additiva, ma in realtà ogni processo è un sottoinsieme della produzione additiva.



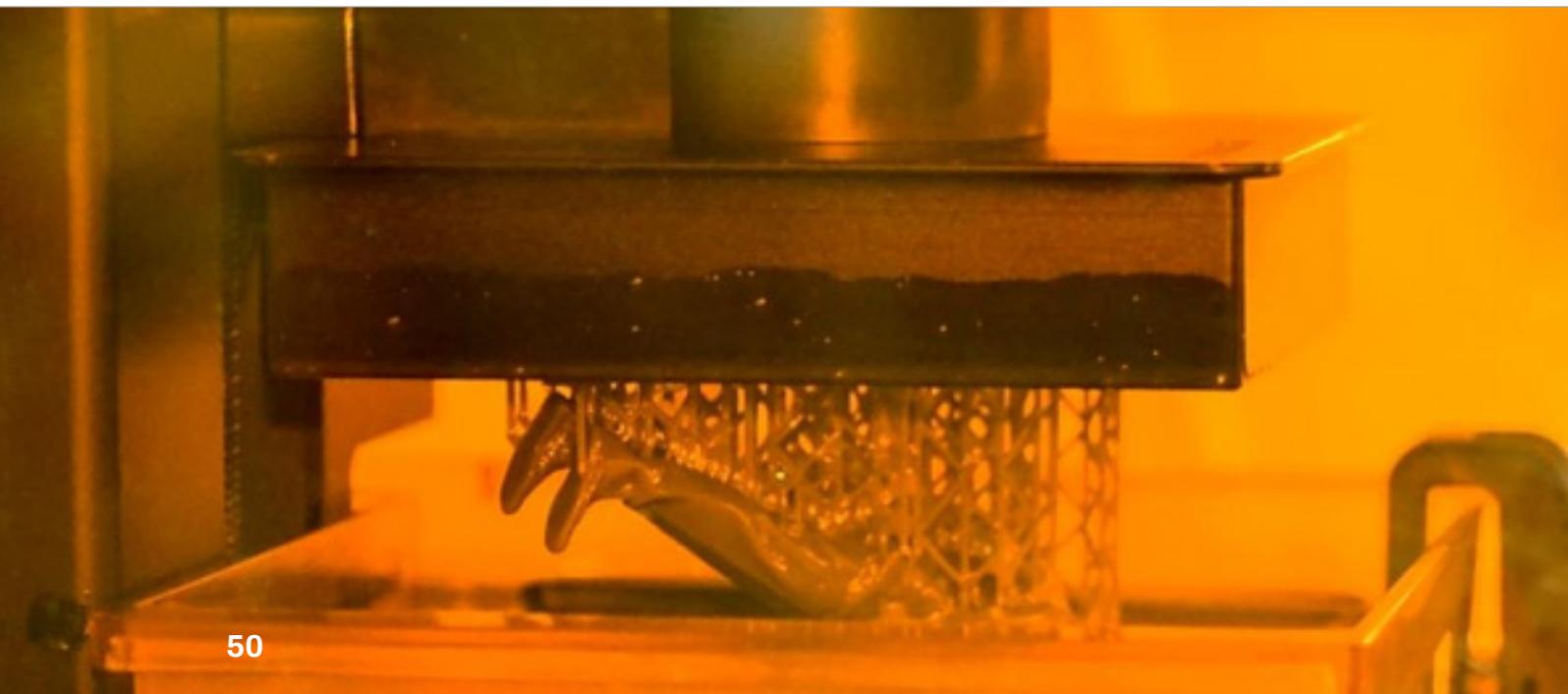
2.2 / Origine e sviluppo

La tecnologia di produzione additiva a strati è stata sviluppata in modo indipendente da diversi ricercatori e ingegneri in diverse parti del mondo, in maniera più o meno simultanea: infatti alle prime prove di oggetti "stampati" tridimensionalmente vengono associati molte fonti di origine, il primo brevetto però pubblicato è stato quello di Chuck Hull. La sua tecnologia è stata utilizzata per la prima volta nel 1986, con la creazione della stereolitografia. In questo paragrafo verrà offerta quindi una panoramica di quelli che sono stati gli eventi fondamentali dello sviluppo della Manifattura additiva, nonché della sua applicazioni in diversi settori di ricerca e dell'industria.





Processo di Fotopolimerizzazione a vasca.



2.3 / Materiali e tecnologie

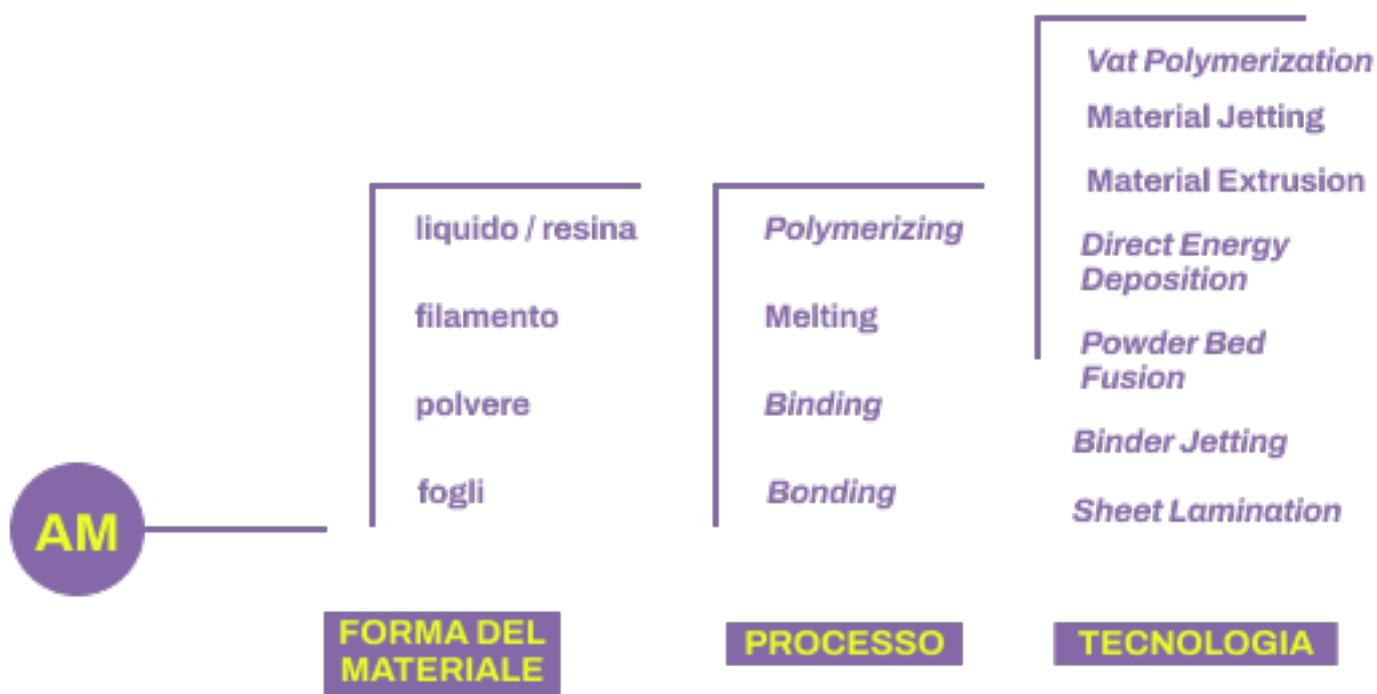
Un vasto assortimento di materiali, che spazia dagli alimenti come la pasta, alle leghe di titanio, viene utilizzato nella manifattura additiva, con lo sviluppo e la sperimentazione in corso che prevedono la ricerca continua di nuovi e innovativi materiali.

I polimeri rappresentano il materiale di stampa 3D più diffuso, principalmente a causa della disponibilità diffusa di stampanti 3D a base di polimeri. Nel frattempo, i materiali metallici stanno vivendo una crescita sostanziale, guidata dalle industrie automobilistiche, aerospaziali e della difesa. I metalli consentono la produzione di parti complesse e di alta qualità a un costo inferiore, soddisfacendo al contempo rigorosi requisiti di prestazioni e sicurezza. Anche i materiali compositi, che combinano due o più materiali diversi per migliorare le proprietà del materiale risultante, stanno registrando una crescente domanda nell'ambito della manifattura additiva. Inoltre, i materiali elastomerici, che sono morbidi, flessibili, resistenti e robusti, stanno registrando una crescita nei settori medico e industriale. (Kamara, Faggiani, 2021)

Sebbene l'alto costo dei materiali rappresenti una sfida per la manifattura additiva a livello di produzione su larga scala, si prevede che la crescita dei materiali per la manifattura additiva triplicherà nei prossimi cinque anni. (AMFG, 2020)

I materiali per la manifattura additiva sono disponibili in varie forme, tra cui polveri, filamenti, liquidi o fogli, e i materiali fusi sono stratificati per formare l'oggetto in stampa 3D. È possibile utilizzare anche materiali in foglio, e per i liquidi o le resine, i materiali solidificati formano l'oggetto desiderato. I diversi materiali utilizzati richiedono parametri di stampa 3D variabili durante il processo di costruzione, e le parti stampate con materiali e tecnologie diverse avranno proprietà diverse. Nella manifattura additiva, il cambiamento di materiale che avviene durante il processo di stratificazione determina le proprietà meccaniche finali, i cambiamenti nello stato solido e le capacità di progettazione. Dopo aver formulato il progetto ottimale iniziale, i progettisti dovrebbero considerare la variabilità delle proprietà delle parti che deriva dal materiale selezionato, dalla tecnologia di stampa 3D impiegata e dal processo utilizzato. Le decisioni sulla selezione del materiale e il processo di manifattura additiva dovrebbero tenere conto dell'applicazione, delle prestazioni, dell'estetica e della geometria dell'oggetto.

2.3 / Materiali e tecnologie



Sintesi dei fattori che determinano un processo di Manifattura Additiva.

Classificazione materiali

- **Polimeri**

Termoplastici come **PLA** e **ABS** sono alcuni dei materiali più comunemente utilizzati nei sistemi a filamento, ma i materiali ad alte prestazioni come **PEEK** e **PEKK** stanno guadagnando terreno anche qui. **Nylons** e **TPU** hanno trovato adozione nei processi di fusione letto di polvere. I materiali termoindurenti sono stati comuni nella polimerizzazione del tino ma stanno cominciando a diventare disponibili per l'estrusione e la sinterizzazione laser selettiva. I materiali polimerici sono solitamente forniti come filamento solido, pellet, resina liquida o polveri.

- **Metalli**

Sul lato dei metalli, i materiali più comunemente stampati in 3D includono **alluminio**, **titanio**, **acciaio inossidabile**, **Inconel** e **cromo-cobalto**. Il **rame** è stato storicamente difficile da stampare in 3D con sistemi laser, ma innovazioni come i laser a luce blu lo rendono possibile; metalli riflettenti come questo possono essere più facili da stampare utilizzando altri metodi come il binder jetting. Una lega adatta per un metodo di stampa 3D in metallo potrebbe non essere appropriata per tutti questi metodi.

- **Ceramica**

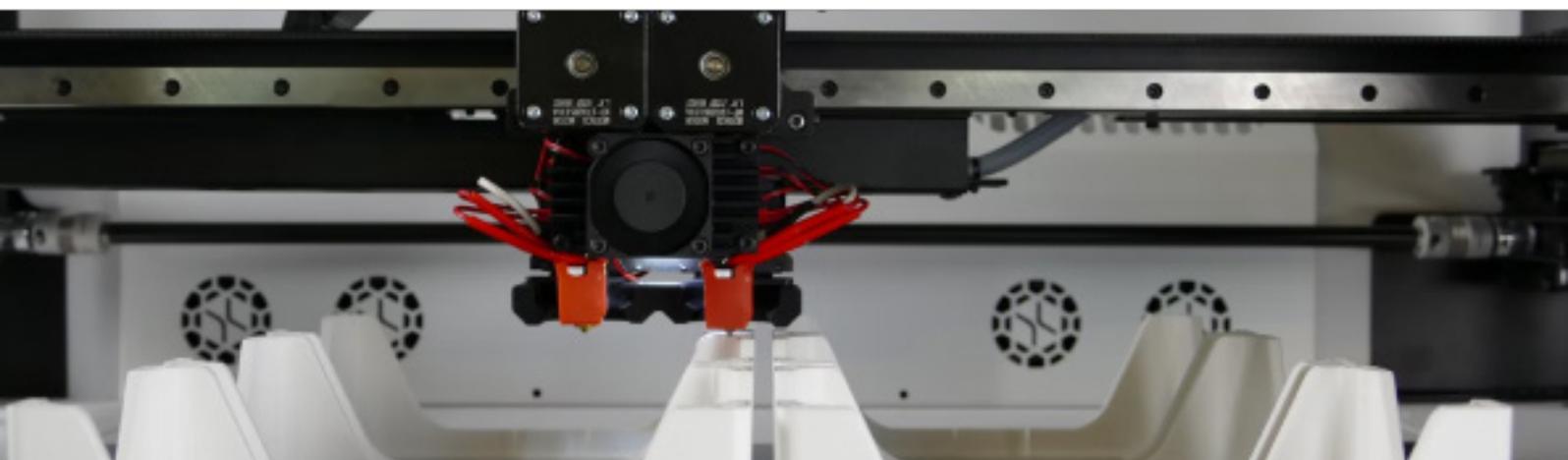
Le ceramiche hanno un basso assorbimento e sono difficili da stampare con sistemi laser. Tuttavia, sono state sviluppate soluzioni basate sull'estrusione, sul getto del materiale e sulla fotopolimerizzazione. In molti casi la fase di stampa 3D utilizza un impasto ceramico o una miscela di materiale per costruire una parte verde che può quindi essere sinterizzata, simile al processo per la deposizione di metalli legati descritto sopra.

- **Compositi**

I polimeri rinforzati con fibre di carbonio e vetro vengono utilizzati per tutto, dagli stampi a iniezione a breve termine agli strumenti di stratificazione compositi alle parti finali, offrendo un'opzione tra plastica pulita e metalli più costosi. Alcune stampanti 3D offrono la possibilità di posare il rinforzo in fibra continua simultaneo o intervallato dalla forma stampata 3D; altre utilizzano fogli di materiale di rinforzo fusi con strati di polimero. I compositi polimerici come questo possono essere resi abbastanza forti da essere in alcuni casi un'alternativa al metallo, spesso con un notevole risparmio di peso.

- **Materiali bio-compatibili**

La combinazione di produzione additiva e biomateriali è molto promettente, soprattutto per applicazioni cliniche specifiche per il paziente. Le sfide della tecnologia dell'AM con le edizioni relative dei materiali devono essere realizzate per rendere questo metodo fattibile per i più ampi bisogni clinici. Questo approccio sta già facendo un guadagno significativo verso numerosi dispositivi biomedicali commerciali. In questa recensione, vengono introdotti i principali metodi di produzione additiva, seguiti da AM di diversi materiali e infine applicazioni di AM in varie opzioni di trattamento



Polimeri

I polimeri sono i materiali più comuni utilizzati nella manifattura additiva, sia sintetici che derivati da materiali rinnovabili, essi infatti sono a basso costo, facili da produrre, versatili e resistenti all'acqua, rendendoli popolari per la manifattura additiva in una vasta gamma di prodotti e settori industriali.

I polimeri per la manifattura additiva rientrano in due categorie: termoplastici e termoindurenti.

_Termoplastici

I termoplastici sono polimeri che possono essere plasmati e modellati a temperature elevate, ma che si solidificano quando si raffreddano. Esistono due categorie di termoplastici: quelli amorfi e quelli cristallini. I termoplastici amorfi sono caratterizzati da proprietà di fusione che li rendono adatti ai processi di estrusione dei materiali. Questa categoria comprende la maggior parte delle plastiche trasparenti, come ABS, policarbonato, acrilico e PETG. I termoplastici semicristallini, invece, sono più indicati per la fusione e la saldatura che avviene nei processi di fusione a letto di polvere. Questo tipo di materiale è utilizzato per la maggior parte delle parti in plastica generale e include polietilene, polipropilene, nylon e fluoropolimeri.

_Termoindurenti

I polimeri termoindurenti sono diversi dai termoplastici in quanto non possono essere rimodellati dopo il raffreddamento e non subiscono fusione. Durante il processo di polimerizzazione, che avviene grazie all'esposizione alla luce, si forma una legatura chimica irreversibile che definisce la struttura del polimero. Questi polimeri, chiamati fotopolimeri, sono composti da monomeri o oligomeri con un fotoiniziatore e additivi per modulare le proprietà. La produzione additiva tramite polimerizzazione in vasca fa solidificare le resine fotopolimeriche liquide grazie alla luce ultravioletta. Questi materiali, come acrilici e ibridi acrilici, sono utilizzati anche nei processi AM come la stereolitografia (SLA), la digital light processing (DLP), la material jetting (PolyJet) e la continuous liquid interface production (CLIP). Per evitare la deformazione dell'oggetto solido, i fotopolimeri devono presentare una riduzione di volume minima.

Le resine standard utilizzate nella produzione AM garantiscono precisione nei dettagli e finitura superficiale levigata, anche se la scelta dei colori è limitata. Tali resine si distinguono per bassa riduzione di volume, alta resistenza chimica, rigidità e fragilità. I fotopolimeri liquidi sono oggetto di ricerca per sviluppare materiali con alta resistenza alle alte temperature, maggiore resistenza agli urti e maggiore elasticità.

_Compositi

Un composito polimerico è un materiale in cui la polimerizzazione è rinforzata da un altro tipo di materiale, tipicamente fibre di origine naturale o sintetica. I compositi ibridi rinforzati con fibre sono costituiti da polimeri combinati con due o più riempitivi (Rajak et al., 2019). Oltre ad additivi sintetici (carbonio, il vetro, il grafene e il Kevlar) vengono utilizzati per la fabbricazione di compositi, in Manifattura Additiva, anche materiali organici o biocompatibili, come la canapa, il lino e il cotone, vengono utilizzati per la fabbricazione di compositi tramite AM, ma anche i materiali sintetici come il carbonio, il vetro, il grafene e il Kevlar sono anch'essi ampiamente usati.

I compositi polimerici rinforzati con fibre presentano un'alta resistenza, una bassa densità, una notevole rigidità, una elevata resistenza alla flessione, una proprietà di smorzamento e resistenza alla corrosione, al fuoco, agli urti e all'usura. I compositi polimerici rinforzati con fibre naturali hanno un notevole potenziale per essere utilizzati in applicazioni più sostenibili grazie alla loro biodegradabilità e al loro basso costo.

Metalli

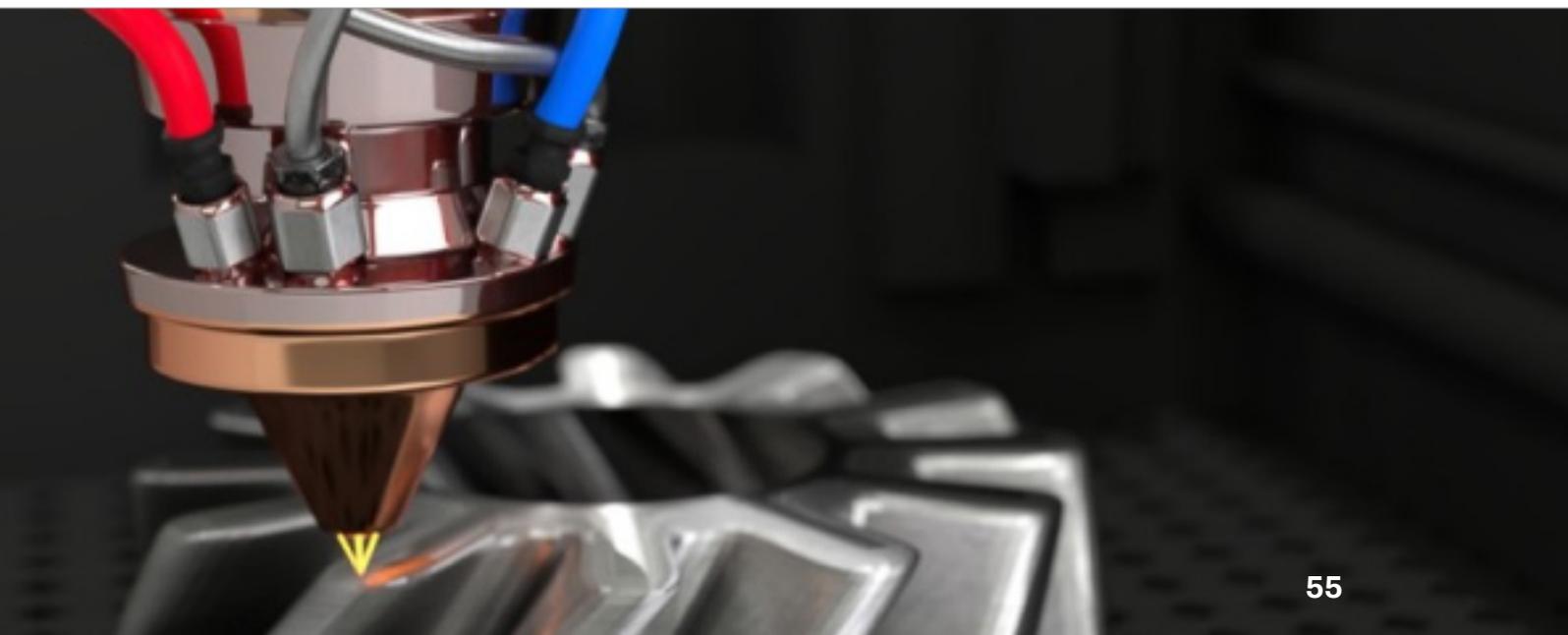
Esiste una vasta selezione di materiali metallici disponibili per la stampa 3D, generalmente sotto forma di polveri e filamenti. Tra i materiali in polvere più comunemente utilizzati troviamo l'alluminio, il rame, il cromo cobalto, le leghe di nichel, gli acciai inossidabili e le leghe di titanio. I filamenti utilizzati comprendono leghe di acciaio e inossidabili, titanio, tungsteno, molibdeno e alluminio. La gamma di metalli disponibili è in continua crescita poiché le applicazioni della stampa 3D ne sfruttano la disponibilità. La scelta dei metalli da utilizzare dipende dalla resistenza alla trazione (TS), dalla durezza (H) e dall'allungamento, tra gli altri fattori. Ci sono anche leghe di metalli che vengono utilizzate, come l'Inconel 718, una lega di nichel, cromo e ferro, e la lega di titanio Ti6Al4V. Ogni metallo ha caratteristiche diverse che li rendono adatti a diversi scopi e applicazioni in manifattura additiva.

Il processo di atomizzazione è utilizzato per produrre le polveri metalliche. In questo processo, il gas viene iniettato in uno stream di metallo fuso prima che esca da una bocchetta, creando molte goccioline che si solidificano prima di entrare in contatto con una superficie del contenitore. Le specifiche comuni per le polveri metalliche utilizzate nei processi di stampa 3D comprendono la dimensione delle particelle e la geometria sferica.

La stampa 3D dei metalli si basa principalmente sull'uso del laser per fondere il materiale e produrre strati di spessore compreso tra 10-50 μm (Metal AM, 2020). Come già menzionato, le proprietà meccaniche dipendono dal materiale, dal processo e dalla macchina utilizzati e la progettazione iniziale potrebbe necessitare di modifiche per adattarsi alle possibili variazioni della stampa 3D. Indipendentemente dal metallo utilizzato, le parti prodotte dalla stampa 3D richiedono un'ulteriore lavorazione per soddisfare le specifiche richieste o migliorare la qualità della superficie.

- Alluminio
- Acciaio inossidabile
- Titanio
- Inconel
- Rame
- Argento
- Oro
- Cobalto-cromo
- Ottone
- Magnesio

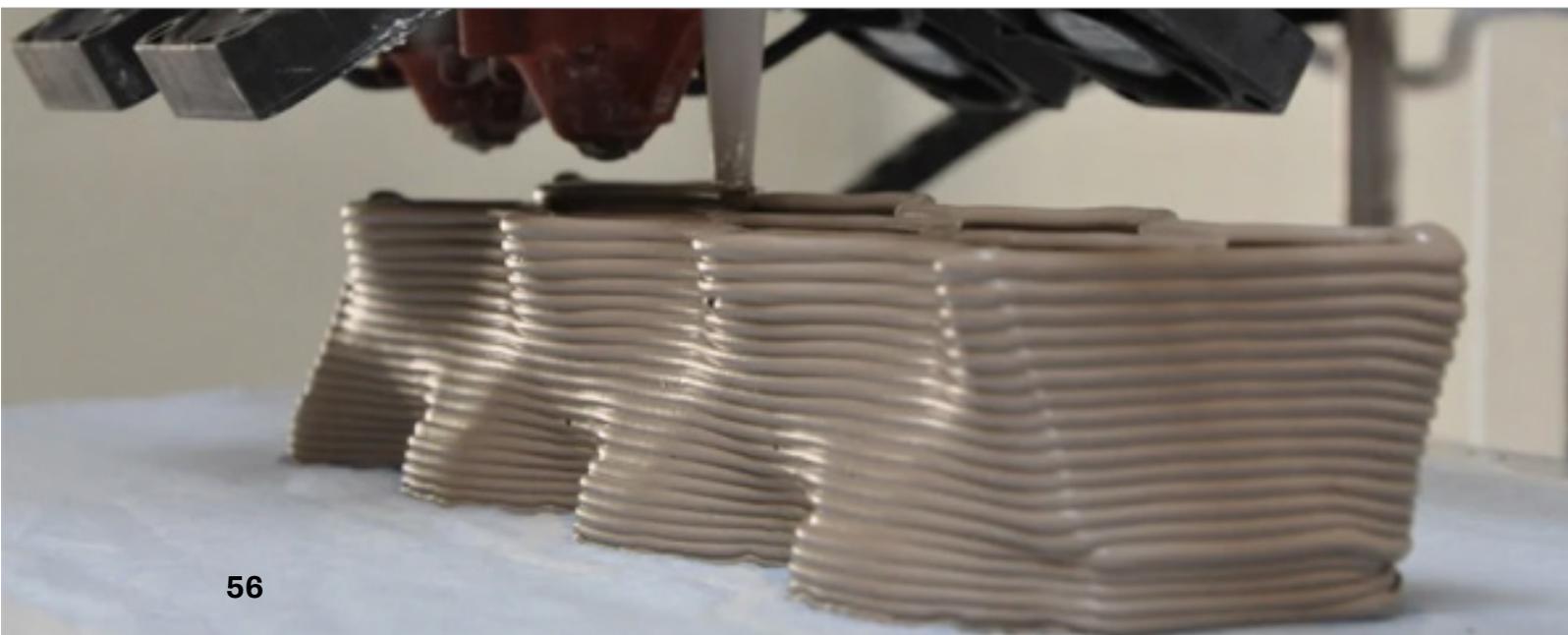
Processo LENS per la Manifattura Additiva dei metalli.



Ceramiche

Le ceramiche costituiscono uno dei materiali più recenti per l'AM. Possono essere ottenute in forma liquida, in polvere o solida e processate con vari sistemi AM. Come sospensione liquida o semiliquida, le particelle ceramiche fini si disperdono come materia prima da un sistema AM. I materiali ceramici in polvere contengono particelle di ceramica sciolte che vengono processate utilizzando uno dei numerosi sistemi di polverizzazione AM. In forma solida, i fogli di materiale ceramico vengono alimentati nei sistemi di stratificazione AM. Le ceramiche impiegate nei processi di stampa 3D possono creare forme altamente complesse con superfici lisce e lucenti. Grazie alla loro resistenza alla pressione e alle alte temperature, sono più durature rispetto a metalli e plastiche, senza rischiare di rompersi o deformarsi. Inoltre, le ceramiche non sono soggette alla corrosione come molti metalli e non subiscono usura come le plastiche. Sono disponibili in una vasta gamma di colori (Kamara, 2021).

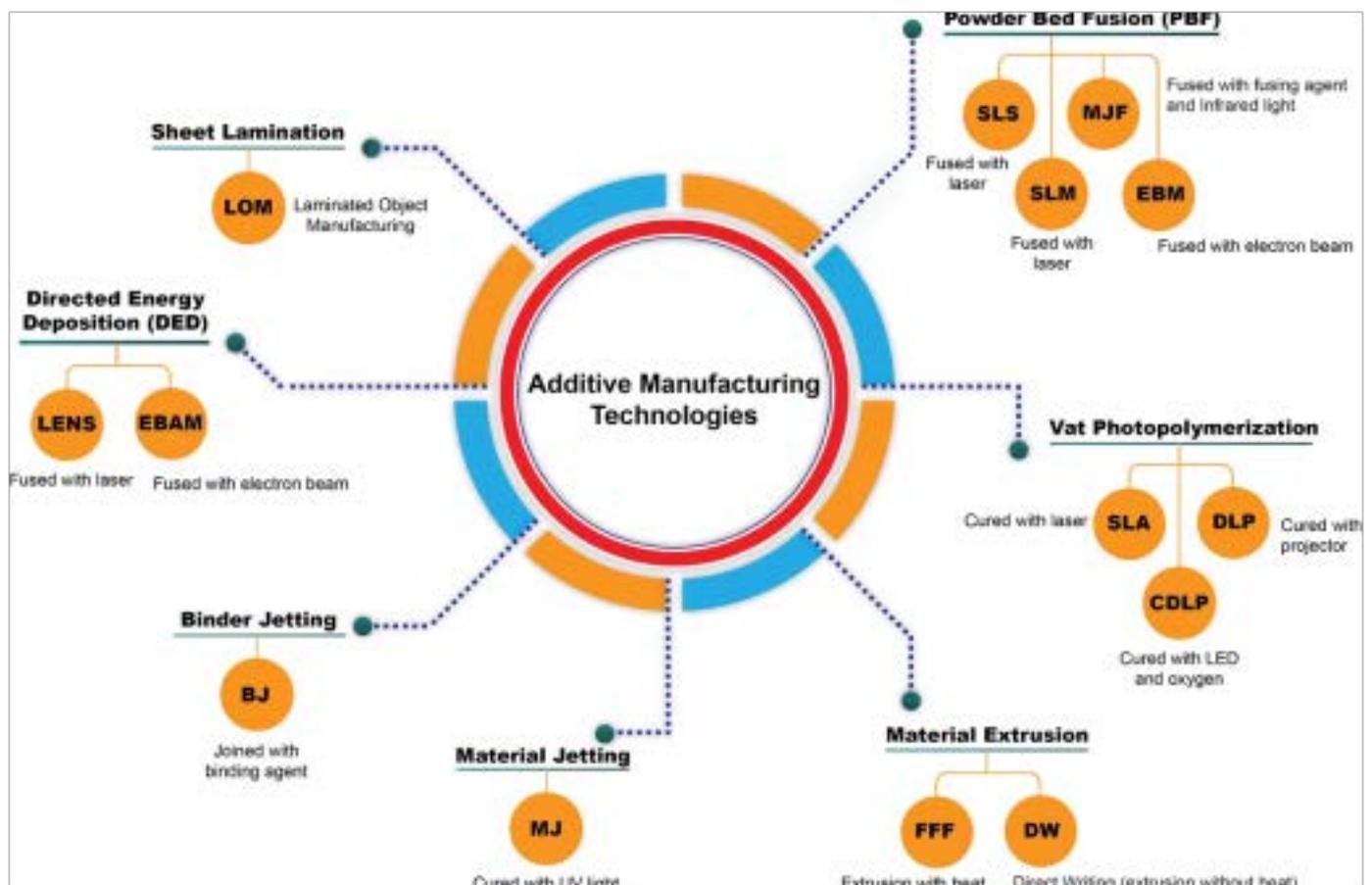
L'utilizzo di ceramiche in AM presenta alcune sfide. Il materiale richiede temperature elevate per essere processato e non è adatto alla smaltatura o alla cottura in forno. Poiché le ceramiche sono fragili, non sono idonee per la stampa di oggetti con parti chiuse o interconnesse e non sono ideali per la fase di assemblaggio dei pezzi. Inoltre, le ceramiche vengono spesso utilizzate in combinazione con polimeri e altri materiali, anche gusci di molluschi, per creare compositi con maggiore resistenza e minor fragilità.



2.4 Classificazione tecnologie

I processi di produzione additiva (AM) possono essere suddivisi in sette categorie ampiamente riconosciute: binder jetting, directed energy deposition, material extrusion, material jetting, powder bed fusion, sheet lamination e vat polymerization. Ci sono anche diverse variazioni all'interno degli stessi processi, soprattutto per quanto riguarda la Manifattura Additiva dei metalli. In particolare, il processo può essere diretto o indiretto. Nel processo diretto dei metalli, le parti o i componenti in metallo vengono prodotti direttamente dal sistema AM. Nel processo indiretto dei metalli, invece, l'AM viene utilizzato per creare una parte sacrificale, uno stampo o una parte grezza che deve essere successivamente sinterizzata o curata per raggiungere le proprietà desiderate.

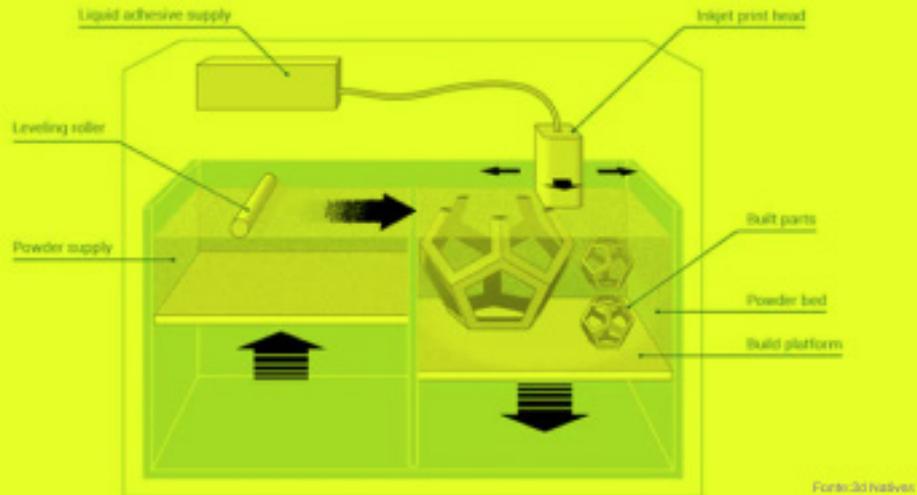
In base allo standard ISO/ASTM 529000:2015, i metodi di produzione additiva possono essere classificati in sette categorie diverse:



Tecnologie di Manifattura Additiva maggiormente in uso.

Binder Jetting

La tecnologia fu ideata per la prima volta all'interno di un progetto presso il Massachusetts Institute of Technology (MIT) nel 1993. In questo processo, uno strato di polvere viene distribuito su un piano di costruzione e un legante viene spruzzato selettivamente per legare insieme i granuli di polvere nella geometria desiderata. Una volta completata la stampa, i pezzi devono essere liberati dalla polvere in eccesso, non legata. Il processo di Binder Jetting può essere utilizzato con vari materiali, come metalli, ceramica, compositi e polimeri.



Deposizione Diretta di Energia

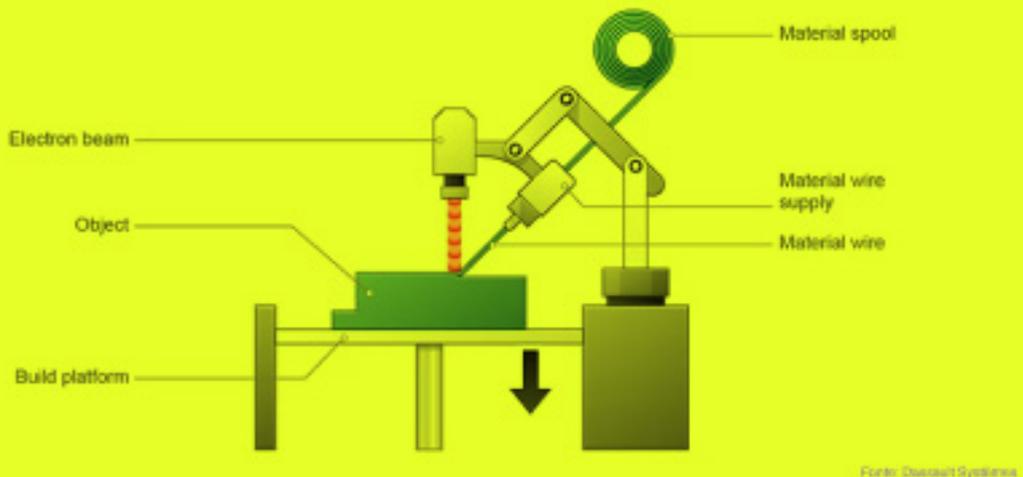
La Direct Energy Deposition (DED) è una tecnologia di produzione additiva che utilizza una fonte di energia, come un laser o un fascio di elettroni, che viene depositato direttamente sul substrato. A seconda della fonte di energia utilizzata si avrà un determinato tipo di produzione: DED-LENS, che utilizza un laser come fonte di energia, e DED-EBAM, che utilizza un fascio di elettroni. La DED-LENS offre una maggiore precisione, mentre la DED-EBAM offre una maggiore velocità di produzione.

LENS

Fonte di energia:
Laser

EBAM

Fonte di energia:
Fascio di elettroni

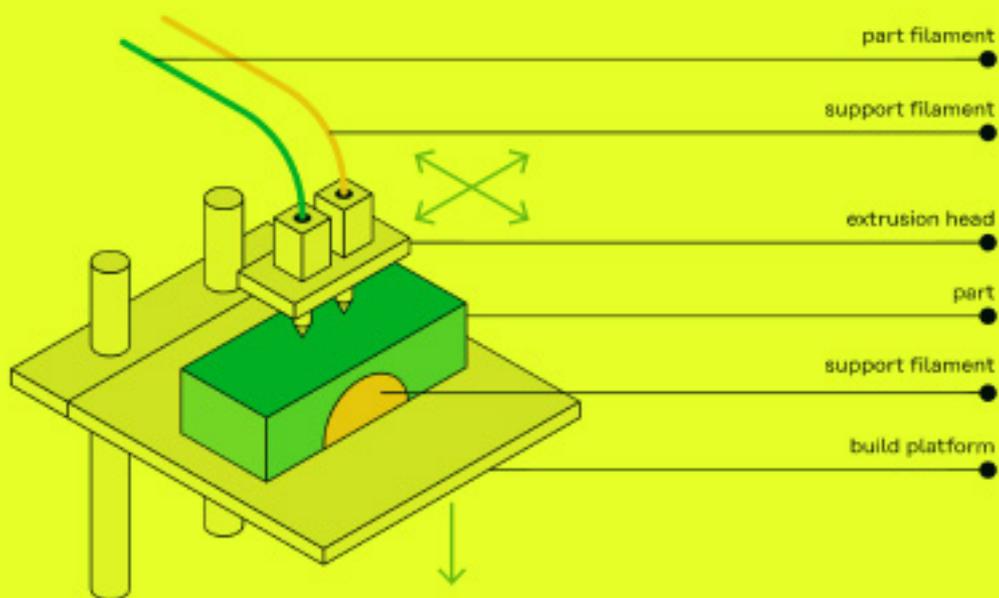


Estrusione di materiale

Tecnologia di produzione additiva che utilizza un filamento di materiale termoplastico fuso per creare oggetti tridimensionali, la più diffusa è sicuramente quella conosciuta come Fused Filament Fabrication (FFF) o Fused Deposition Modeling (FDM); ma in base alla temperatura necessaria o appropriata per l'estrusione: FFF/FDM per l'estrusione di polimeri termoplastici fusi e direct ink writing (DIW) per l'estrusione senza fusione (a freddo).

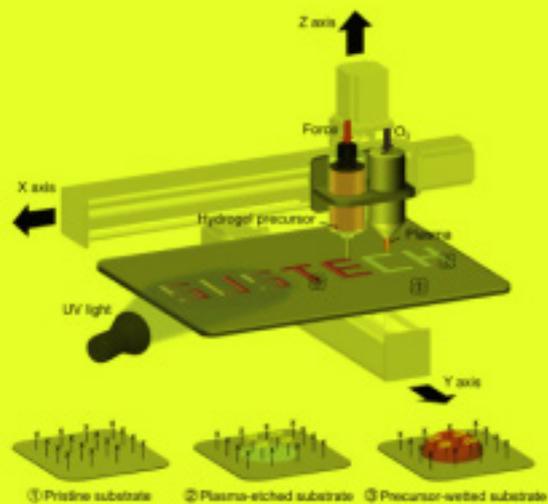
FFF/FDM

Il materiale viene fuso e estruso attraverso una testina di stampa riscaldata che deposita il materiale fuso su un piano di stampa che si solidifica rapidamente al contatto con l'aria ambiente.



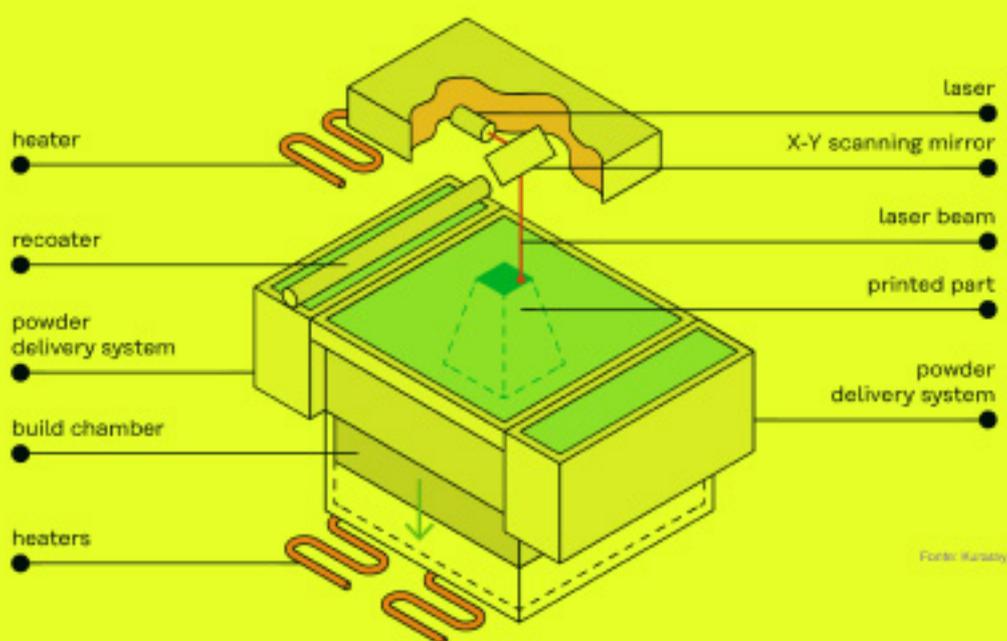
DIW

Nel DIW, il materiale non viene fuso, ma viene estruso sotto forma di inchiostro liquido utilizzando un sistema di stampa a getto d'inchiostro che viene poi solidificato tramite polimerizzazione.



Fusione a letto di polveri

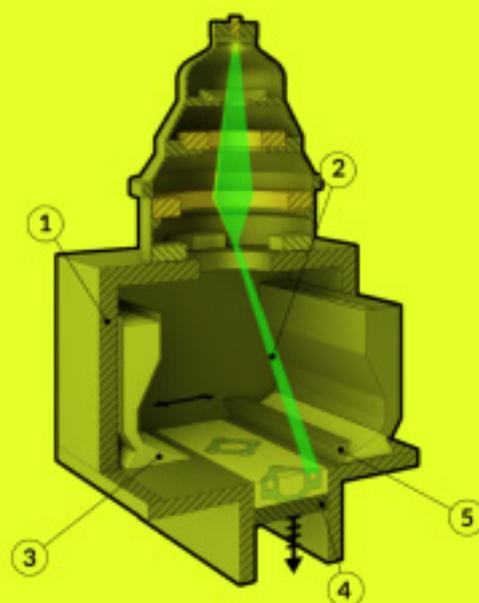
La Powder Bed Fusion (PBF) è una tecnologia di stampa 3D che utilizza polveri di materiali come materiale di base e utilizza un laser o un fascio di elettroni per fonderle strato dopo strato fino a creare la forma desiderata. Ci sono diverse tecniche di stampa a letto di polveri, tra cui Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Multi-Jet Fusion (MJF) ed Electron Beam Melting (EBM).



Fonte: Kuraray

EBM

Gli oggetti sono fabbricati in strati in una camera a vuoto [1]. Esso utilizza la fonte di energia di un fascio di elettroni [2] generato da un cannone a fascio elettronico per fondere la polvere metallica [3]. La polvere viene espulsa da una cartuccia e distribuita su una piattaforma di costruzione [4] utilizzando un rastrello [5], l'intero letto di polvere viene poi riscaldato a 700-900 C utilizzando il fascio di elettroni



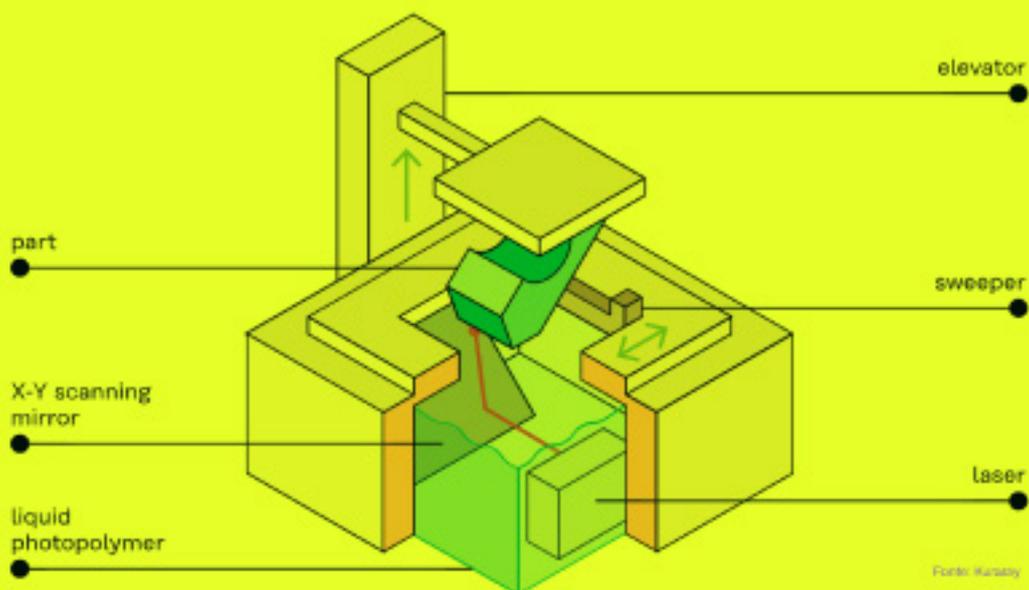
Fonte: Kuraray

Fotopolimerizzazione

La Fotopolimerizzazione è una tecnologia di manifattura additiva che utilizza una fonte di luce per solidificare un liquido fotosensibile (una resina) strato dopo strato, creando un oggetto solido. In generale, è adatta per la creazione di oggetti con una superficie liscia e dettagli precisi, ma può essere più costosa rispetto ad altre tecnologie di manifattura additiva.

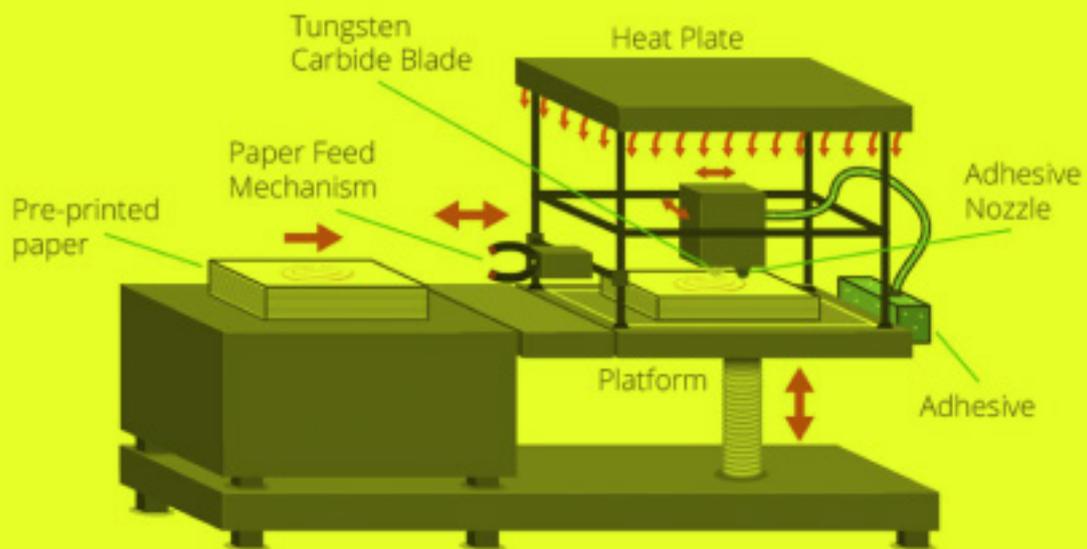
SLA

Tecnologia che utilizza un laser per indurre un singolo punto della resina fotosensibile, che si trova in un serbatoio (vat), creando uno strato solido, il serbatoio viene poi abbassato di una piccola quantità, e il processo viene ripetuto per creare il successivo strato.



Sheet lamination

La Sheet Lamination è una tecnologia di produzione additiva che utilizza fogli di materiale stratificati per costruire un oggetto tridimensionale. Invece di utilizzare polvere o filamenti, come in altre tecnologie di manifattura additiva, la Sheet Lamination si avvale di fogli di materiale sottile, come carta o metallo, che vengono impilati e incollati insieme per formare il prodotto finale; ad esempio, la laminazione di metallo utilizza fogli di metallo sottile che vengono saldati insieme mediante l'utilizzo di un laser o di una sorgente di calore simile. Le tecniche di Sheet Lamination presentano alcune limitazioni rispetto ad altre tecnologie di produzione additiva come la risoluzione dei dettagli, che può essere limitata dalla dimensione dei fogli utilizzati e dalle tolleranze di posizionamento.



Fonte: 3DIndustry

Materiali in uso per tecnologia

Processi di Material Extrusion:

- Termoplastici
- Compositi termoplastici
- Materiali biodegradabili
- Materiali alimentari

Binder Jetting:

- Sabbia
- Ceramica
- Metallo
- Polimeri
- Leghe metalliche

Powder Bed Fusion:

- Metalli
- Ceramica
- Polimeri

Vat Photopolymerization:

- Resine fotosensibili
- Acrilati
- Nanocompositi
- Ceramiche
- Materiali biocompatibili

Sheet Lamination:

- Carta
- Plastica
- Tessuti
- Alluminio
- Acciaio

Directed Energy Deposition:

- Metalli
- Leghe metalliche
- Polveri ceramiche
- Polveri compositi

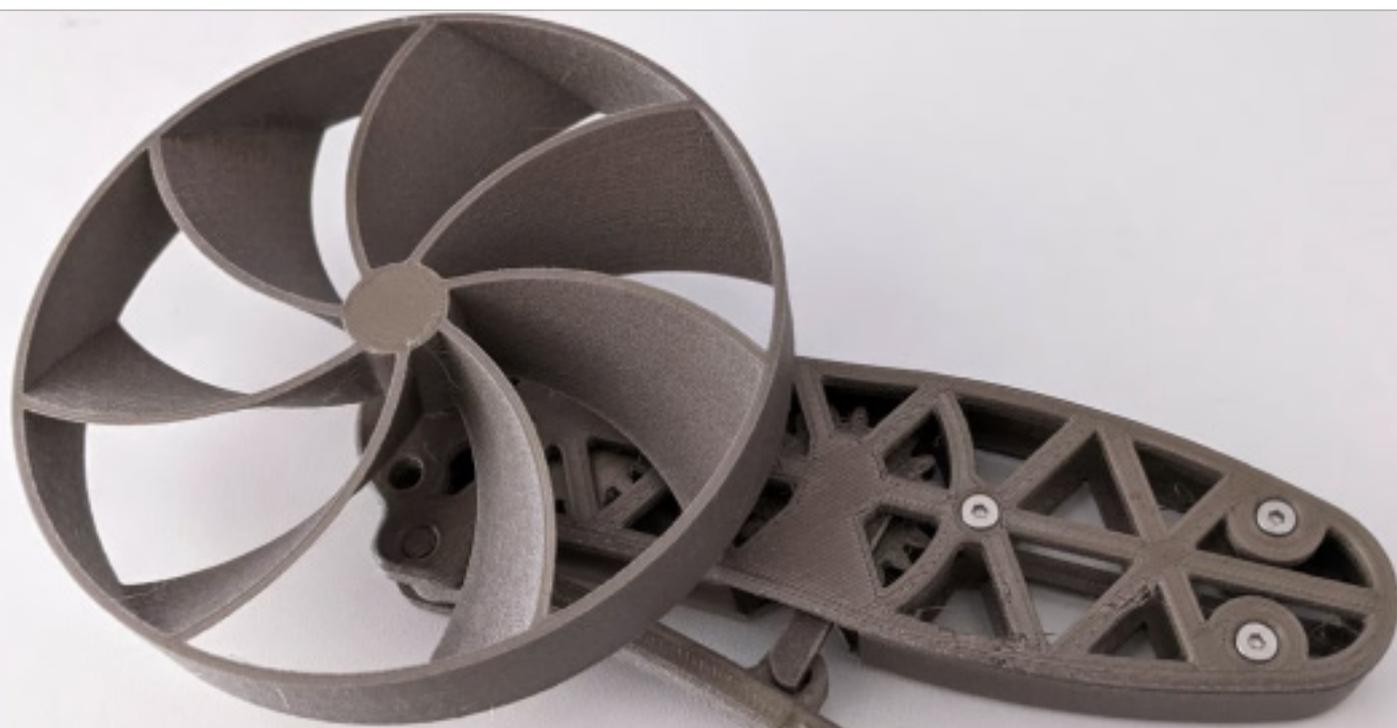


2.5 / Utilizzi ed opportunità

Il Computer-aided design (CAD), introdotto alla fine degli anni '50, ha permesso ai progettisti e ingegneri di utilizzare il software nei processi di produzione. L'output dai file CAD 2D richiedeva una programmazione estensiva delle macchine CNC per produrre parti finite dai disegni. Inizialmente, i disegni erano limitati a disegni bidimensionali (2D) fino all'introduzione di Pro/Engineer da parte di PTC alla fine degli anni '80, che supportava l'output di modelli tridimensionali (3D). L'output dal software CAD 3D richiedeva una programmazione minima per produrre la parte finale per l'elaborazione.

La facilità e la velocità di transizione dal design alla parte fisica utilizzando il CAD 3D ha probabilmente portato all'iniziale enfasi sull'AM per la prototipazione rapida. Dal concetto iniziale all'approvazione del design finale nel processo di produzione, si poteva abbreviare significativamente il tempo. L'AM forniva un modo per fabbricare rapidamente parti per la verifica e l'approvazione del design, con poca attenzione su come l'AM potesse rivoluzionare il design stesso o aggiungere valore in tutto il processo di sviluppo del prodotto. Se visto come uno strumento a uso generale invece che come un fabbricatore di parti, la tecnologia AM può sfruttare pienamente l'AM nei processi esistenti e nuovi. Come illustrato nei progetti Heineken, questo processo di pensiero consente al progettista, al produttore, allo studente, all'ingegnere e ad altri di sviluppare soluzioni innovative utilizzando l'AM. Nel design tradizionale per la produzione (DFM), i professionisti della produzione si concentrano sulla facilità di producibilità del design e sulla convenienza economica piuttosto che sulla creazione di una soluzione ottimale per un determinato problema. Nell'AM, invece, si verifica l'inverso, con il focus del design sulla sviluppo della soluzione ottimale poiché ci sono poche barriere di produzione. Pertanto, per sfruttare l'AM, la soluzione ottimale dovrebbe essere il focus dello sforzo di design, sapendo che le capacità dell'AM possono affrontare la maggior parte dei problemi che sorgono nella produzione.

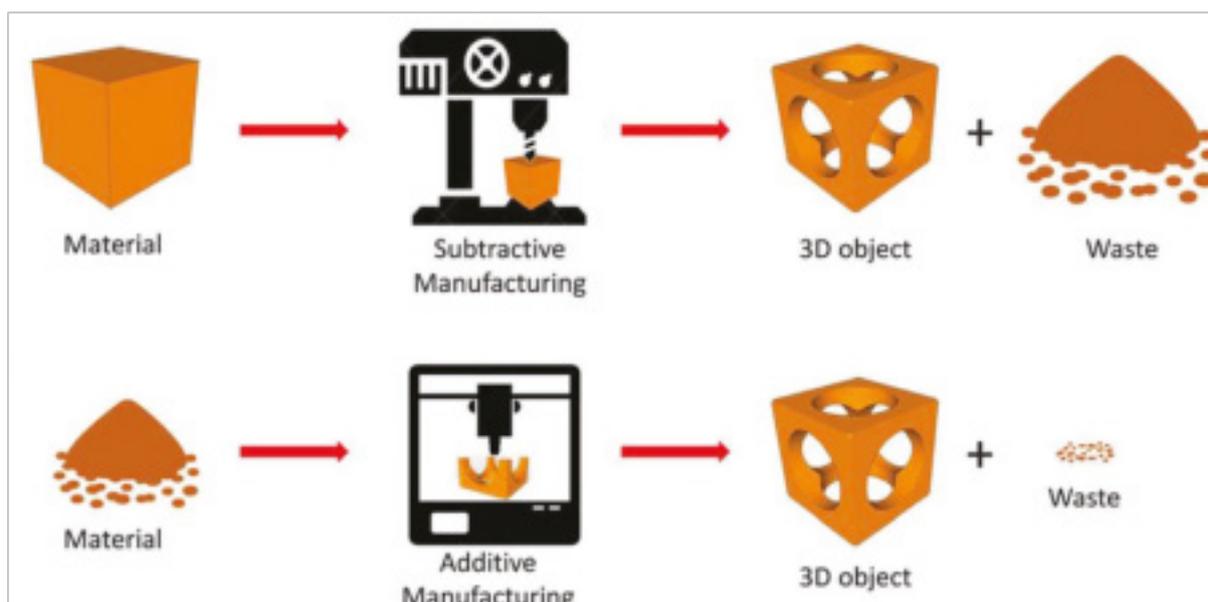
Ventilatore portatile opensource.



2.6 / Differenze con le tecniche di produzione di massa

Nella produzione di massa, gli oggetti sono realizzati attraverso processi di lavorazione, dove il materiale viene tagliato o plasmato (ad esempio tramite fresatura o tornitura), o tramite processi di stampaggio, in cui il materiale viene fuso e versato in uno stampo per ottenere la forma desiderata (ad esempio tramite pressofusione). Questi metodi richiedono macchine e attrezzature speciali e spesso richiedono la creazione di modelli o stampi. D'altra parte, nella manifattura additiva, gli oggetti sono creati depositando uno strato di materiale sopra l'altro per costruire l'oggetto finale. Ciò significa che non è necessario creare un modello o stampo per ogni prodotto, poiché l'oggetto può essere creato direttamente dal file CAD. La manifattura additiva consente maggiore flessibilità nella produzione di oggetti personalizzati e la possibilità di creare oggetti complessi che sarebbero difficili da produrre con altri metodi. Tuttavia, i tempi di produzione possono essere più lunghi rispetto alla produzione di grandi quantità e il costo di produzione unitario può essere più elevato per alcuni materiali e tecnologie. Le tecniche di produzione industriale di massa sono state sviluppate per produrre grandi quantità di prodotti in modo efficiente e a basso costo. Questi processi sono altamente automatizzati e utilizzano macchinari specializzati che possono lavorare in modo continuo senza interruzioni. A differenza della manifattura additiva, che produce un solo pezzo alla volta, la produzione di massa è in grado di produrre migliaia di pezzi nello stesso periodo di tempo.

La produzione di massa offre la possibilità di utilizzare materiali a basso costo e di lavorare con una vasta gamma di materiali, compresi i metalli, le materie plastiche e le materie prime di origine naturale. Ciò significa che i produttori possono selezionare il materiale più adatto per ogni prodotto, in base alle esigenze di design, funzionalità e costo. Infine, i costi della produzione di massa diminuiscono all'aumentare della quantità di prodotti prodotti, grazie alla possibilità di ottenere sconti sui materiali e sui servizi di trasporto e gestione delle forniture. Al contrario, la manifattura additiva tende ad avere costi unitari più elevati a causa del tempo richiesto per stampare ogni pezzo singolarmente e dei costi di gestione delle macchine e dei materiali. Tuttavia, la manifattura additiva offre la flessibilità di produrre pezzi personalizzati e complessi che non sarebbero possibili con la produzione di massa, e può ridurre i tempi di sviluppo dei prodotti. Inoltre, la manifattura additiva è in grado di produrre prototipi rapidamente, riducendo i tempi e i costi di sviluppo dei prodotti.



Differenza nella quantità di scarti prodotta tra Manifattura e sottrattiva.

Quando conviene usare la Manifattura Additiva?

L'implementazione dell'Additive Manufacturing (AM) all'interno di un'organizzazione richiede lo sviluppo di metriche o indicatori chiave di performance specifici, progettati per misurare i progressi e i risultati degli obiettivi dell'AM. Le metriche da utilizzare dipendono dalla visione e dalla strategia dell'azienda e possono includere i KPI di produzione già in uso. Dopo aver valutato l'AM come approccio di produzione e deciso di implementarlo, il passo successivo critico è lo sviluppo di una visione e di una strategia per l'AM come parte del modello di business. In questa fase, i leader devono preparare un piano di gestione del cambiamento per garantire il successo dell'implementazione. I lavoratori dell'organizzazione avranno bisogno di formazione per acquisire le competenze necessarie per l'AM e nuovi processi e flussi di lavoro dovranno essere definiti e implementati per affrontare l'integrazione di AM con le operazioni di produzione. Infine, durante l'implementazione, gli indicatori chiave di impatto dovrebbero essere monitorati per garantire la realizzazione della visione e della strategia dell'AM. Le tappe della tabella di marcia per l'attuazione dell'AM sono descritte in modo più approfondito nelle sezioni seguenti. (Kamara e Faggiani, 2020)

Per questo progetto..

Produzione con ciclo di lunga durata

Considera AM per..

Prototipazione rapida, prove di concept, prove funzionali, limited production

Potenzialità

Ridurre lo sviluppo del tempo di ciclo del prodotto

Riduzione del time to market

Tempi di inattività eccessivi dovuti a guasti della macchina

Produzione di pezzi di ricambio

Riduzione dei tempi di acquisizione delle parti per la riparazione dei macchinari, riducendo così i tempi di fermo macchina

Creazione costosa e che richiede tempo di maschere e dispositivi

Strumenti di stampa 3D per l'industria

Riduzione dei costi e dei tempi di attrezzaggio nei processi di produzione tradizionali

Costo eccessivo/mancanza di disponibilità dei pezzi di ricambio

Produzione di parti di ricambio, senza costi di attrezzaggio per la sostituzione di pezzi singoli

Produrre parti di ricambio in casa per risparmiare tempo e denaro

Parti in basso volume (conteggio su parti singole)

Richiesta di personalizzazione del cliente

Personalizzazione dei prodotti

Fornire una personalizzazione conveniente dei prodotti senza necessità di riattrezzamento e modifiche importanti della produzione

Elevata complessità dei componenti (troppo costosa o lunga)

Riprogettazione e produzione di parti esistenti per ridurre la complessità

Riprogettazione delle parti esistenti per ridurre la complessità e risparmiare tempo e denaro

Opportunità di innovare/creare nuovi prodotti

Progettare, testare e produrre prodotti nuovi e innovativi

Creare articoli attualmente non possibili con la produzione di massa, o personalizzare gli elementi

Implementare idee di startup aziendali

Produzione e personalizzazione di prodotti

Immaginare e implementare la creazione di prodotti e la consegna ai consumatori

Materiali intelligenti per M.A



I materiali intelligenti, come abbiamo precedentemente detto, costituiscono una classe di materiali che presentano la capacità di adattarsi alle variazioni del loro ambiente circostante, sia interno che esterno. Questi materiali sono in grado di modificare le loro caratteristiche, quali la forma, il volume, la rigidità e la conduttività, attraverso l'azione di fattori esterni come la luce, il calore, l'elettricità o la pressione, sono formati da un'ampia gamma di componenti e molecole che reagiscono in modo specifico alle sollecitazioni esterne.

I materiali intelligenti usati nella Manifattura Additiva possono cambiare le loro caratteristiche nel tempo, rendendoli sensibili agli stimoli esterni e presentando comportamenti come la memoria di forma, l'auto-assemblaggio, il cambio di colore e l'autorigenerazione. Solo alcuni materiali reattivi agli stimoli possono essere utilizzati per la Manifattura Additiva, a seconda della loro capacità di essere stampati singolarmente o richiedere altri materiali per ottenere cambiamenti temporali. Perciò, i materiali intelligenti utilizzati nella Manifattura Additiva devono essere sia sensibili agli stimoli che stampabili; la selezione dei materiali intelligenti, come per quelli inerti, per la Manifattura Additiva dipende dalle applicazioni e dal metodo di stampa utilizzato. (Bodaghia, Zolfagharianb, 2020)



3.1 / HLM- Hybrid Living Materials

Ricercatori del MIT e di altre istituzioni hanno sviluppato un metodo per stampare in 3D oggetti che possono controllare organismi viventi in modo prevedibile. Il sistema è chiamato "materiali ibridi viventi" (HLM) e incorpora cellule viventi sulla superficie degli oggetti stampati in 3D, mediante l'incorporazione precisa di vari prodotti chimici nel processo di stampa 3D. I prodotti chimici agiscono come segnali per attivare determinate risposte nei microrganismi ingegnerizzati biologicamente, che vengono spruzzati sulla superficie dell'oggetto stampato. Una volta aggiunti, i microrganismi mostrano colori o fluorescenza specifici in risposta ai segnali chimici. L'obiettivo è quello di creare uno strumento di progettazione robusto per la produzione di oggetti e dispositivi che incorporino elementi biologici viventi, in modo prevedibile e scalabile come altri processi di produzione industriale. Il team utilizza un processo multistadio per produrre i loro materiali ibridi viventi, incluso un rivestimento superficiale di idrogel infuso con batteri ingegnerizzati biologicamente. La tecnica potrebbe portare alla stampa 3D di strumenti biomedici che incorporano cellule viventi per produrre composti terapeutici, come analgesici o trattamenti topici. La ricerca è stata guidata dalla Professoressa Associata del MIT Media Lab Neri Oxman e pubblicata sulla rivista *Advanced Functional Materials*.

"We can define very specific shapes and distributions of the hybrid living materials and the biosynthesized products, whether they be colors or therapeutic agents, within the printed shapes. There are exciting practical applications with this approach, since designers are now able to control and pattern the growth of living systems through a computational algorithm. Combining computational design, additive manufacturing, and synthetic biology, the HLM platform points toward the far-reaching impact these technologies may have across seemingly disparate fields, 'enlivening' design and the object space."

"Possiamo definire forme e distribuzioni molto specifiche dei materiali viventi ibridi e dei prodotti biosintetizzati, siano essi colori o agenti terapeutici, all'interno delle forme stampate. Ci sono applicazioni pratiche entusiasmanti con questo approccio, dal momento che i progettisti sono ora in grado di controllare e modellare la crescita dei sistemi viventi attraverso un algoritmo computazionale. Combinando computazionale, produzione additiva e biologia sintetica, la piattaforma HLM punta verso l'impatto di vasta portata che queste tecnologie possono avere in campi apparentemente disparati, il design 'vivificante' e lo spazio oggetto."

Hybrid Living Materials by David L. Chandler, MIT Press, 2020



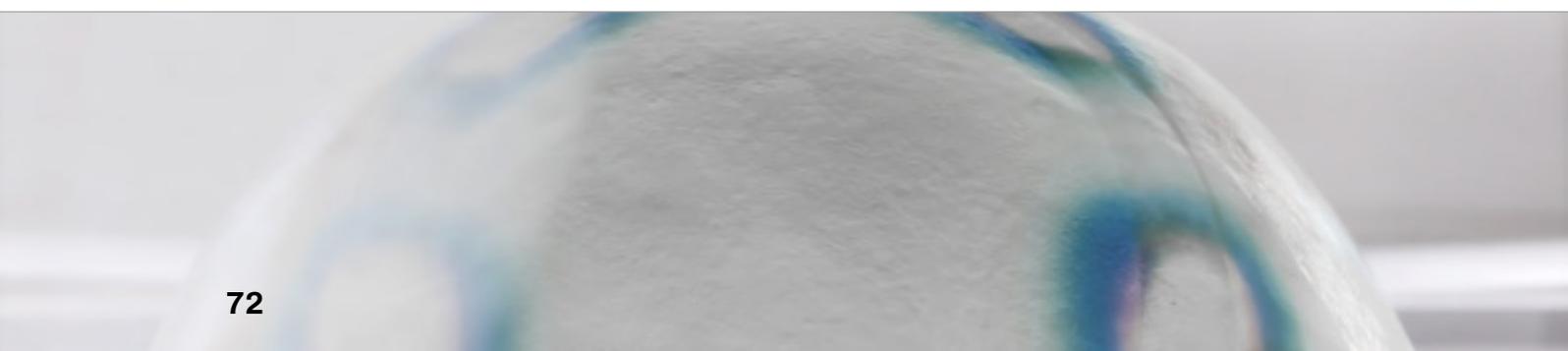
"In the future, the pigments included in the masks can be replaced with useful chemical substances for human augmentation such as vitamins, antibodies or antimicrobial drugs," Oxman says. "Imagine, for example, a wearable interface designed to guide ad-hoc antibiotic formation customized to fit the genetic makeup of its user. Or, consider smart packaging that can detect contamination, or environmentally responsive architectural skins that can respond and adapt — in real-time — to environmental cues."

"In futuro, i pigmenti inclusi nelle maschere possono essere sostituiti con sostanze chimiche utili per l'augmentazione umana come vitamine, anticorpi o farmaci antimicrobici", afferma Oxman. "Immaginate, ad esempio, un'interfaccia indossabile progettata per guidare la formazione di antibiotici ad hoc personalizzati per adattarsi al patrimonio genetico del suo utilizzatore. Oppure, considerate un packaging intelligente in grado di rilevare la contaminazione, o superfici architettoniche ambientalmente sensibili che possano rispondere e adattarsi - in tempo reale - a segnali ambientali".

Hybrid Living Materials by David L. Chandler, MIT Press, 2020

Il progetto mira a creare uno strumento di progettazione affidabile per produrre oggetti e dispositivi che incorporano elementi biologici viventi, in modo prevedibile e scalabile come altri processi industriali. Il team utilizza una stampante 3D a getto d'inchiostro multimateriale e ricette personalizzate per le combinazioni di resine e segnali chimici utilizzati per la stampa. Aggiungono poi un rivestimento di idrogel contenente batteri biologicamente ingegnerizzati sulla superficie dell'oggetto.

Il team ha sviluppato una piattaforma di stampa 3D multimateriale che consente di variare le proprietà del materiale dell'oggetto in modo preciso tra diverse parti della struttura. Ciò rende possibile la creazione di dispositivi biomedici che forniscono resistenza e supporto, ma sono anche morbidi e plasmabili per garantire comfort. Grazie a un software di modellizzazione, i ricercatori hanno prodotto un sistema di progettazione assistita al computer che offre una precisione comparabile ai sistemi CAD utilizzati per la stampa 3D tradizionale. La piattaforma di stampa 3D multimateriale può utilizzare da tre a sette resine diverse con proprietà diverse, in combinazione con l'ingegneria biologica sintetica, per creare oggetti con superfici biologiche programmate per rispondere a stimoli specifici.



3.2 / Tecniche di Produzione Additiva: La Stampa 4D

3.2.1/ Origini e sviluppo

Non esiste una vera e propria definizione di Stampa 4D (4DP), seppur dalle pubblicazioni scientifiche di riferimento si riesce ad inquadrare una sorta di definizione, la maggior parte di esse chiama in causa la variabile tempo come elemento caratterizzante di ogni processo di 4DP.

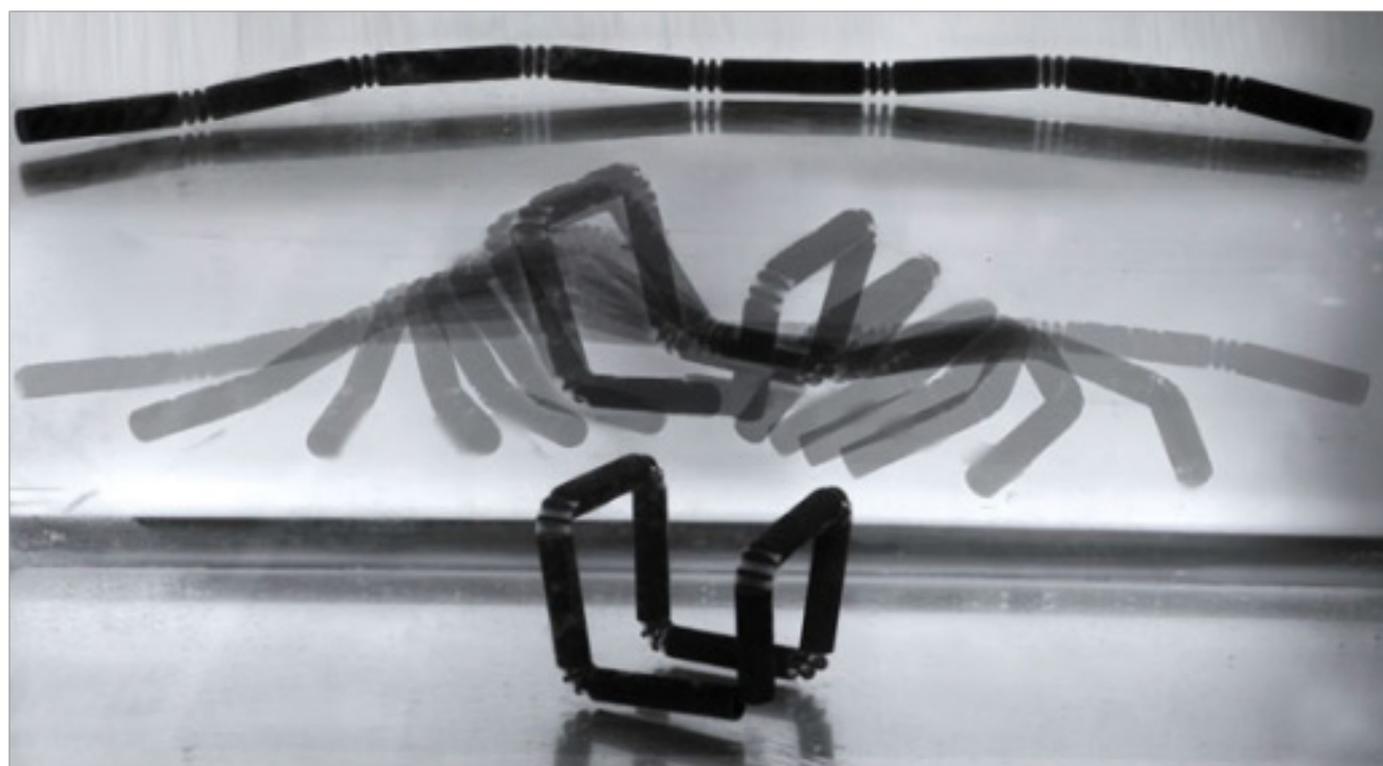
Skylar Tibbits, il direttore del Self-Assembly Lab presso il Massachusetts Institute of Technology (MIT), ha proposto il termine di "Stampa 4d" durante una conferenza TED. Tibbits ha ipotizzato e sviluppato un processo di stampa che ha la capacità di produrre oggetti che si auto-assemblano in risposta a stimoli esterni. Semplificando quindi, la stampa 4D rappresenta una tecnologia di stampa 3D che utilizza un materiale in grado di mutare forma o proprietà in modo programmato. A seguito della presentazione di Tibbits, la tecnologia della stampa 4D ha suscitato grande interesse sia nella comunità accademica che nell'industria. Numerosi progetti di ricerca hanno messo a punto tecniche e materiali per questa innovazione, spesso in collaborazione con aziende del settore. Tra le altre, la società statunitense Stratasys ha sviluppato una tecnologia basata sulla polimerizzazione a luce ultravioletta, che consente di creare oggetti che si auto-assemblano in risposta a stimoli termici. Anche altre aziende come Autodesk e Hewlett-Packard stanno investendo nella ricerca sulla stampa 4D.

3.2.2/ Definire la quarta dimensione in AM

La stampa 4D è un processo di stampa che consente di realizzare dispositivi o oggetti utilizzando uno o più materiali, che possono essere trasformati da una singola striscia 1D in una forma 3D pre-programmata, oppure da una superficie 2D in una forma 3D pre-programmata, e che sono in grado di mutare tra diverse dimensioni. Queste trasformazioni possono essere facilitate attraverso diversi metodi, tra cui il riscaldamento, la luce, l'espansione in un liquido o l'elettrochimica, e possono essere programmate per avere diverse sensibilità a, ad esempio, l'espansione in varie parti della geometria progettata. Queste tecniche offrono un'adattabilità e una risposta dinamica per strutture e sistemi di tutte le dimensioni, e promettono nuove possibilità per incorporare la programmabilità e la semplice presa di decisioni nei materiali non basati su dispositivi elettronici (Ahmed et al., 2021).

Il carattere quadridimensionale della stampa deriva dalla capacità dell'oggetto stampato in 3D di modificarne la sua morfologia (nonché la sua struttura chimica) in risposta ad uno stimolo esterno o interno; di conseguenza, il comportamento 4D combina funzionalità, geometria e materiale. Le strutture 3D realizzate con materiali intelligenti, basandosi sulle funzioni di questi materiali, possono evolvere nel tempo in modo predeterminato. Questo ha dato origine a un nuovo termine, cioè "stampa 4D". Si può quindi affermare che la stampa 4D, è una tecnologia di fabbricazione additiva che prevede la produzione di oggetti tridimensionali che possono autoassemblarsi, cambiare forma o funzione nel tempo in modo programmato considerando sempre che la variabile tempo è una caratteristica intrinseca nel comportamento del materiale.

Quest'innovativa tecnica di Manifattura Additiva si basa sul principio dell'autoassemblaggio molecolare, che è un processo naturale nel quale le molecole si uniscono in modo spontaneo per formare strutture complesse e funzionali, grazie a ciò è possibile creare materiali che imitano l'autoassemblaggio molecolare, producendo strutture complesse con proprietà dinamiche e funzionali, ingegneri e biologi collaborano per sviluppare materiali avanzati con proprietà uniche e innovative che permettono all'oggetto di svilupparsi in base a come programmato; queste proprietà dinamiche sono molto simili a quelle dei tessuti biologici, come ad esempio i muscoli e le ossa, e possono essere utilizzate per sviluppare dispositivi medici avanzati, quali protesi e impianti.



Prototipo in scala di tubo auto-assemblante in SMP. (Fonte: MIT Media Lab)

La stampa 4D è un processo intenzionale di evoluzione della forma, struttura e funzione delle strutture stampate in 3D, che mira a realizzare in modo efficace l'auto-assemblaggio, la deformazione e l'auto-riparazione come conseguenza attiva delle strutture del materiale programmato in risposta all'ambiente. Rappresenta quindi un'evoluzione del concetto di stampa 3D, in cui il design del prodotto viene incorporato in un materiale intelligente flessibile basato sulla stampa 3D. Questo consente alle microstrutture di essere deformate in base a una pista pre-progettata, attivata in specifiche condizioni di tempo. A differenza della stampa 3D, la stampa 4D può creare oggetti che cambiano colore, forma e volume in risposta a vari stimoli ambientali come l'acqua e la temperatura.

Questa trasformazione è facilitata da vari stimoli, come il riscaldamento, la luce o il gonfiaggio in un liquido, e dalla programmazione di diverse sensibilità al gonfiaggio in diverse parti dell'oggetto. La stampa 4D offre adattabilità e risposta dinamica per strutture e sistemi di tutte le dimensioni, offrendo nuove possibilità per l'incorporazione di programmabilità e decision making nei materiali non elettronici. Le potenziali applicazioni includono prodotti adattivi, abbigliamento o meccanismi in grado di rispondere alle richieste dell'utente e alle fluttuazioni ambientali. Il documento discute i fondamenti e le leggi che governano la stampa 4D, i materiali utilizzati, le applicazioni come la robotica morbida e le sfide che devono essere superate affinché la stampa 4D diventi una tecnologia di produzione di massa. La differenza principale tra la stampa 4D e la stampa 3D è la capacità dell'oggetto stampato di trasformarsi e adattarsi ai cambiamenti del suo ambiente. Un settore emergente come la stampa 4D incarna l'implementazione di una specifica visione del mondo per un futuro scientifico e/o tecnologico, costituendo il nucleo della creazione di percorsi di ricerca comunemente descritti come "grammatiche" o paradigmi, che si fondano su intuizioni primarie che hanno una rilevanza sostanziale.

3.2.3 / Differenze con la Manifattura Additiva tradizionale

La letteratura classifica la stampa 4D in quattro processi principali: stereolitografia, modellazione a deposizione fusa, stampa a polvere e testina a getto d'inchiostro, tutti basati su materiali flessibili con proprietà meccaniche e termiche specifiche. È importante che in futuro vengano sviluppate nuove tecniche di produzione per colmare le lacune dei metodi convenzionali. La Tabella 1 mostra l'evoluzione della stampa 4D rispetto a quella 3D. La stampa 3D produce un oggetto statico senza alcun elemento temporale, utilizzando una vasta gamma di materiali come metalli, polveri, polimeri termoplastici, resine UV indurenti, ecc. D'altra parte, la stampa 4D utilizza solo materiali che reagiscono al cambiamento di temperatura, umidità, pressione, ecc. nel tempo. (Javaid, Haleem, 2018)

Queste peculiarità *intelligenti* del materiale consentono la progettazione, il controllo e la modulazione delle proprietà su scala spaziale e temporale sia per il materiale che per l'organizzazione del prodotto finale. La stampa 3D è stata ampiamente utilizzata nella biomedicina, nella scienza dei polimeri, nella scienza spaziale e in altri campi in virtù della sua prototipazione rapida di prodotti 3D con forme complesse. Tuttavia, le microstrutture fabbricate con la stampa 3D sono statiche, la stampa 4D permette invece di produrre oggetti che possono cambiare forma o funzione in modo programmato nel tempo, è chiaro che il paradigma cambi radicalmente in quanto si permette di aprire una nuova strada che permetta al materiale di cui è fatto il prodotto, di svilupparsi durante il suo ciclo di vita. La stampa 4D richiede la progettazione di materiali intelligenti in grado di esibire proprietà specifiche che possono essere attivate con stimoli esterni e un processo di stampa in grado di trasformare questi materiali in oggetti che cambiano forma o funzione nel tempo. In sintesi, la stampa 4D è una forma avanzata di stampa 3D che consente la produzione di oggetti programmabili nel tempo grazie all'utilizzo di materiali intelligenti.

Caratteristica	3DP	4DP
Processo	Ripete livelli 2D strato su strato	Estensione dimensionale: Tempo inserito come variabile
Materiale	Termoplastici, ceramici, metalli, biomateriali, nanomateriali (inerti)	Smart materials, auto-assemblanti, ecc
Flessibilità	Nessuna (rigidezza caratterizzante)	Molta (flessibilità caratterizzante)
Programmabilità	Previsione proprietà inerti	Cambio di configurazione dinamico

3D

Sufficientemente matura
 Statica
 Inerti
 Processo additivo tradizionale
 Stampanti e software per progettazione a strati

Maturità tecnologie

Meccanica

Materiali

Produzione

Stampante/software

4D

Non matura
 Dinamica
 Intelligenti
 Processo additivo in funzione di stimoli
 Stampanti multimateriale e software per previsione della responsabilità

3D

Materiale
inerte

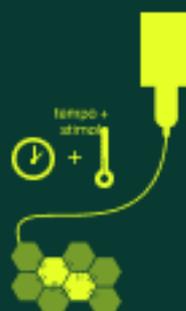
Struttura
statica



4D

Materiale
intelligente

Struttura
responsiva



Le tecniche moderne di stampa 3D utilizzano vari materiali o combinazioni di materiali per produrre geometrie complesse. Questi oggetti sono, come già detto, prodotti attraverso un metodo di strato su strato, che porta a variazioni nelle proprietà del materiale sfuso o nelle anisotropie dell'oggetto. Sebbene siano stati fatti alcuni tentativi per affrontare questi problemi, l'approccio più accessibile per progettare l'anisotropia consiste "nell'introdurre una non uniformità spaziale nella composizione dei materiali" (Oxman, Keating, & Tsai, 2011).

La differenza tra la stampa 3D e 4D è che mentre i manufatti stampati in 3D hanno tipicamente strutture statiche che non cambiano nel tempo, gli oggetti stampati in 4D hanno tipicamente matrici di materiali intelligenti che vengono stampati con strutture geometriche intelligenti calcolate matematicamente (parametriche) ed uno stimolo ambientale che detta il cambiamento desiderato.

La tecnologia di stampa 4D consente la produzione di prodotti in grado di modificare le loro caratteristiche e proprietà in funzione dei cambiamenti ambientali, come la temperatura, nel corso del tempo. Tra i vantaggi offerti dalla stampa 4D si evidenziano i seguenti (Javaid, Haleem, 2018):

- Possibilità di stampare prodotti intelligenti: grazie all'utilizzo di materiali intelligenti, la stampa 4D offre agli utenti la capacità di produrre una vasta gamma di prodotti con ampie applicazioni nell'ambito dell'ingegneria, della medicina, dell'odontoiatria e della scienza dei materiali.
- Adattabilità della forma del prodotto: la forma dei prodotti stampati in 3D può variare nel tempo a seconda di parametri come la temperatura e l'umidità, offrendo la possibilità di adattare il prodotto alle esigenze dell'utente.
- Innovazione: la tecnologia di stampa 4D rappresenta un'importante fonte di innovazione nella fase di progettazione e sviluppo dei prodotti. Inoltre, la tecnologia viene utilizzata con successo in ambito di ricerca.
- Auto-assemblaggio: la stampa 4D utilizza materiali intelligenti che tendono a produrre prodotti dotati di proprietà di auto-assemblaggio.

3.3 / Literature review

In questo paragrafo verranno riportate tutte le informazioni derivate dallo studio della letteratura in materia, nonché verranno riportati i casi studio citati e verrà, infine, stilato un resoconto sullo stato dell'arte della tecnologia; la presente ha infatti attratto l'attenzione di numerosi ricercatori e studiosi, i quali hanno investigato i materiali impiegati, i metodi di produzione, le potenziali applicazioni e le sfide tecniche connesse ad essa.

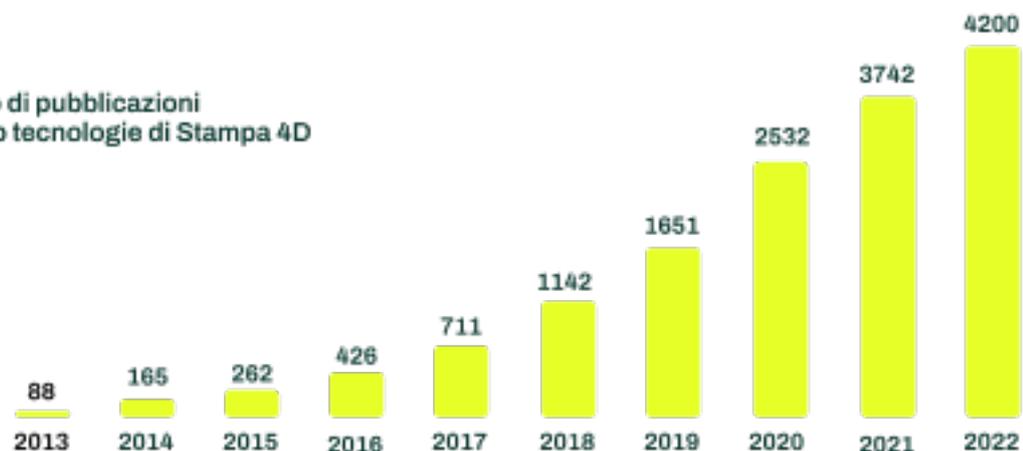
Una revisione della letteratura sullo stato attuale della tecnologia rivela l'esistenza di diverse modalità di produzione, tra cui la Modellazione a deposizione fusa (FDM), la Stereolitografia (SLA), la Sinterizzazione laser selettiva (SLS), il Processing a luce digitale (DLP) e la Scrittura diretta di inchiostro (DIW). Ciascuna di tali modalità presenta i propri vantaggi e limitazioni, quali la velocità di stampa, la risoluzione, la qualità delle superfici, le proprietà meccaniche e le opzioni dei materiali.

La maggior parte degli studi esaminati mette in evidenza che i materiali intelligenti, (quali i polimeri, i metalli, i tessuti e i materiali compositi) possono essere utilizzati per la fabbricazione additiva, tale processo verrà quindi analizzato in funzione alla risposta a stimoli specifici, quali il calore, la luce o l'umidità, e adattarsi ai mutamenti ambientali, come la deformazione o il piegamento.

L'utilizzo potenziale della tecnologia 4D riguarda diverse aree, tra cui la biomedicina, l'aerospaziale, la robotica e l'ingegneria civile, gli oggetti prodotti secondo questo principio possono trovare applicazione nella produzione di dispositivi medici, quali stent tracheali, scaffold per la riparazione di tessuti, protesi, dispositivi di somministrazione di farmaci, attuatori robotici e componenti per la costruzione di strutture ingegneristiche. Nonostante i numerosi vantaggi associati alla tecnologia 4D, alcune sfide tecniche e limitazioni devono essere superate, tra cui la scarsa qualità delle superfici, la ridotta velocità di stampa, la limitata gamma di materiali e le proprietà meccaniche dei materiali. Tuttavia, la ricerca continua a focalizzarsi sullo sviluppo di nuovi materiali e tecniche di produzione allo scopo di superare tali limiti e trarre il massimo vantaggio dalla tecnologia 4D.

Questa sezione presenta quindi una revisione completa della letteratura sulla stampa 4D, analizzando le recenti innovazioni e le opportunità future per questa tecnologia. Per la ricerca di fonti, sono state utilizzate diverse banche dati scientifiche, sviluppando la ricerca di fonti per parole chiave come "programmable materials", "smart materials" e "responsive materials" per cercare articoli pertinenti e avere una panoramica sulla diffusione dell'argomento, dimostrando un'ampia ricerca di fonti, utilizzando banche dati scientifiche e consultando le bibliografie degli articoli selezionati, per fornire una panoramica completa degli sviluppi recenti nella stampa 4D e delle opportunità future per questa tecnologia.

Numero di pubblicazioni riguardo tecnologie di Stampa 4D



Proprietà caratterizzanti della Stampa 4D

Per la ricerca delle fonti ed un'analisi corretta dello stato dell'arte, l'approccio utilizzato è stato un processo sistematico e rigoroso, che prevede la definizione della domanda di ricerca, la selezione delle fonti pertinenti, la valutazione critica dei documenti e la sintesi delle informazioni raccolte. Una volta raccolte le fonti, si è passato alla valutazione critica dei documenti, al fine di identificare quelli che sono pertinenti e affidabili per la ricerca in corso, con l'obiettivo di rispondere alla domanda di ricerca in modo sistematico e rigoroso.

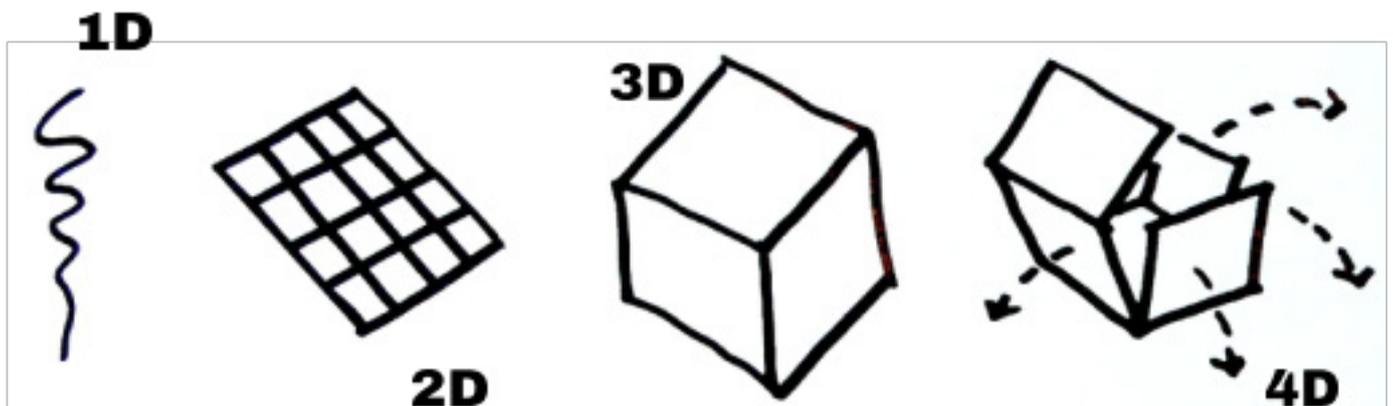
Dalla revisione della letteratura una delle prime cose che è emerse è che la **Manifattura Additiva di materiali responsivi** si basa principalmente su cinque fattori e tutti e cinque i fattori devono essere tenuti in considerazione durante il processo. Questi cinque fattori sono: il processo di AM, il materiale utilizzato per la produzione, gli stimoli, il meccanismo di interazione e la modellizzazione.

Il primo aspetto è il processo di AM utilizzato per la produzione, come abbiamo già visto, questo consente la produzione di materiale di stampa a partire dalle informazioni digitali fornite dal computer e ciò non richiede alcun attrezzo intermedio, quasi tutti i processi possono produrre una struttura responsiva (quadrimensionale) purché il materiale utilizzato per la produzione sia compatibile con la stampante.

Il prossimo elemento da considerare è il materiale utilizzato per la stampa, il quale deve essere in grado di reagire agli stimoli mentre viene stratificato strato dopo strato, il tipo di materiale intelligente utilizzato, naturalmente determina il tipo di stimoli a cui sarà responsivo, e la risposta del materiale intelligente agli stimoli determina la sua capacità di auto-trasformazione.

Il terzo aspetto o fattore è rappresentato dagli stimoli, che possono essere di natura fisica, chimica o biologica. Gli stimoli fisici includono luce, umidità, energia magnetica ed elettrica, temperatura, luce UV, ecc. Gli stimoli chimici includono sostanze chimiche, pH, ossidanti e riducenti. Gli stimoli biologici includono enzimi e glucosio. Quando viene introdotto uno stimolo, si producono cambiamenti fisici o chimici nella struttura del materiale, come il rilassamento dello stress, il movimento delle molecole, o i cambiamenti di fase, che portano alla deformazione della struttura.

Il quarto e il quinto fattore sono il meccanismo di interazione e la modellizzazione matematica. Quando viene applicato uno stimolo al materiale intelligente, non tutti i materiali sono in grado di subire la trasformazione richiesta. E' necessario fornire un meccanismo di interazione, come un carico meccanico o un meccanismo di manipolazione fisica, che pianifichi la sequenza di cambiamento di forma. Dopo aver fornito il meccanismo di interazione, è necessaria la modellizzazione matematica per stabilire la durata per cui lo stimolo agirà sul materiale intelligente.





F. Momeni e J. Ni (2020) hanno formulato tre leggi che governano il comportamento di cambiamento di forma di tutte le strutture stampate. Queste leggi forniscono una migliore comprensione della fisica alla base della capacità di cambiamento di forma delle strutture stampate:

Prima legge

La prima legge afferma che *"tutti i comportamenti di cambiamento di forma come la bobinatura, la curvatura, la torsione, la piegatura, ecc. delle strutture multi-materiali stampate sono dovuti all'espansione relativa tra i materiali attivi e passivi"*. (Ahmed et al., 2021)

Seconda legge

La seconda legge afferma che *"ci sono quattro fattori fisici alla base della capacità di cambiamento di forma di tutte le strutture multi-materiali stampate, ovvero la diffusione di massa, l'espansione termica, la trasformazione molecolare e la crescita organica"*. Tutti questi fattori portano all'espansione relativa tra i materiali attivi e passivi, il che comporta la deformazione della forma sotto uno stimolo. (Ahmed et al., 2021)

La struttura può cambiare massa e forma a causa di vari stimoli come acqua, ioni, campi elettrici, magnetici, luce e forza meccanica. L'espansione termica e la trasformazione molecolare possono causare anche deformazioni. La crescita organica, che aumenta il peso e la lunghezza degli organismi viventi nel tempo, può portare a un cambiamento di forma grazie all'espansione dei materiali attivi e passivi. Gli stimoli elettrici sono utilizzati per attivare maggiormente la crescita organica, ma anche il calore, l'acqua, il pH e la forza meccanica possono essere impiegati. La bio-stampa 4D utilizza la crescita organica per creare forme specifiche di cellule, tessuti, impalcature, stent, organi, ecc. che possono cambiare forma in modo predeterminato.

Terza legge

Gli autori affermano che *"il comportamento di deformazione nel tempo dipendente dalla forma della quasi totalità delle strutture stampate in 4D multi-materiale è governato da due "tipi" di costanti di tempo"*. Queste costanti possono essere uguali, grandi e possono scomparire rispetto ad altre a seconda dello stimolo e del materiale utilizzato per la stampa 4D. (Ahmed et al., 2021)

Infine, è stata derivata una formula matematica per la quarta dimensione, che può essere utilizzata per modellizzare le strutture 4D in futuro, incorporandola nel software e nell'hardware. In sintesi, la terza legge della stampa 4D fornisce una guida per comprendere il comportamento delle strutture stampate in 4D nel tempo, e la formula matematica derivata può essere utilizzata per migliorare la modellizzazione di queste strutture.

..Tecnologie per la Manifattura Additiva di materiali intelligenti

Il primo lavoro innovativo nella stampa 4D è stato fatto con la stampa SLS, dove è stata utilizzata una stampante Stratasys Connex e la luce UV. Questa tecnica può essere usata per stampare diversi materiali come cera, polimeri, metalli e ceramica.

La Stampa 4D, essendo un processo di manifattura additiva con materiali intelligenti, si basa sulle stesse tecnologie della manifattura additiva "classica", seppur con qualche variante o estensione del processo caratterizzato dal materiale in uso.

È possibile eseguire la stampa 4D dei materiali utilizzando varie tecniche di stampa 3D, suddivise in sette categorie: estrusione di materiale, fotopolimerizzazione a vasca, getto di legante, getto di materiale, fusione di letto di polvere, deposizione di energia diretta e laminazione di fogli. Tra queste, le quattro tecniche più comuni includono estrusione di materiale, fotopolimerizzazione a vasca, getto di materiale e metodi di fusione del letto di polvere. L'estrusione di materiale può essere suddivisa in due metodi, FDM e DIW, mentre la fotopolimerizzazione a vasca può essere suddivisa in SLA e DLP.

Metodo di produzione	Vantaggi	Limitazioni	Applicazioni
Fused Deposition Modeling (FDM)	Basso costo Alta risoluzione Veloce Facile	Parti complesse Parti fragili Struttura di supporto Superficie ruvida Materiale di scarto	Industria e moda Dispositivi biomedicali Aerospaziale "Drug-delivery" Dispositivi ottici
Stereolitografia (SLA)	Parti complesse Superficie liscia Alta risoluzione	Scarse proprietà Bassa velocità di stampa Struttura di supporto	Robotica morbida "Drug-delivery" Stent tracheali Scaffold biomedicali Ingegneria dei tessuti
Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS)	Produzione ottimizzata Veloce NO materiale di supporto	Materiali limitati Rischi per la salute Costo elevato	Industria e moda Dispositivi biomedicali "Drug-delivery" Aerospaziale
Digital light processing (DLP)	Veloce Alta risoluzione	Materiali limitati Costo elevato Scarse proprietà	"Drug-delivery" Ingegneria dei tessuti Dispositivi elettronici
Direct Ink Writing (DIW)	Basso costo Varie opzioni di materiali Bassi scarti di materiale	Bassa risoluzione Scarsa letteratura Mancanza di chiarezza sugli effetti dei parametri	Robotica Ingegneria dei tessuti Dispositivi elettronici Ingegneria biomedica

3.4 / Materiali in uso: uno stato dell'arte

Dato che ogni sistema di lavorazione esiste imprescindibilmente dopo il materiale che lavora, è per questo che per lavorare in un immaginario quadridimensionale nella Manifattura Additiva sia imprescindibile la presenza della componente responsiva agli stimoli nel materiale; per questo, per parlare di Stampa 4D si deve considerare come componente fondamentale ed imprescindibile una lavorazione che preveda l'utilizzo di materiali intelligenti. L'uso di materiali multifunzionali in combinazione con materiali conduttivi e responsivi apre la strada alla possibilità di auto-costruire strutture con architetture complesse, tracciare percorsi elettrici e creare strutture in grado di reagire agli stimoli ambientali in modo definito.

La maggior parte dei metodi di stampa 3D esistenti potrebbero non essere applicabili ai materiali intelligenti. Pertanto, lo sviluppo di nuovi materiali per la stampa 4D richiederà anche la modifica dei metodi di stampa 3D esistenti. La stampa 3D assistita da campo esterno fornisce un nuovo metodo per la fabbricazione di materiali ad alte prestazioni e sensibili agli stimoli. Un campo elettrico, ad esempio, può essere utilizzato per allineare materiali conduttivi, come grafite o metallo liquido, per stampare compositi funzionali (Yang, Kim, Kim e Kim, 2021), mentre un campo magnetico può essere utilizzato per assistere la stampa di compositi anisotropi per il controllo della deformazione (Rastogi e Kandasubramanian, 2019). Tecnologie di stampa 4D multi-materiale più sofisticate sono particolarmente desiderabili per la fabbricazione di strutture e dispositivi più complessi con proprietà di deformazione e altre proprietà funzionali.

In stampa 3D, grazie agli sviluppi recenti, siamo stati in grado di posizionare i materiali in modo più preciso e flessibile, il che ha contribuito notevolmente alla stampa 4D. I materiali utilizzati per la stampa 4D sono generalmente chiamati Materiali Intelligenti poiché hanno la capacità di cambiare le loro proprietà nel tempo [60]. Questi materiali possono rispondere allo stimolo esterno e possiedono comportamenti come auto-assemblaggio, auto-riparazione, memoria di forma e auto-capacità. La stampa 4D non solo utilizza materiali capaci di cambiare forma, ma produce anche cambiamenti di colore quando esposti a luce UV e visibile.



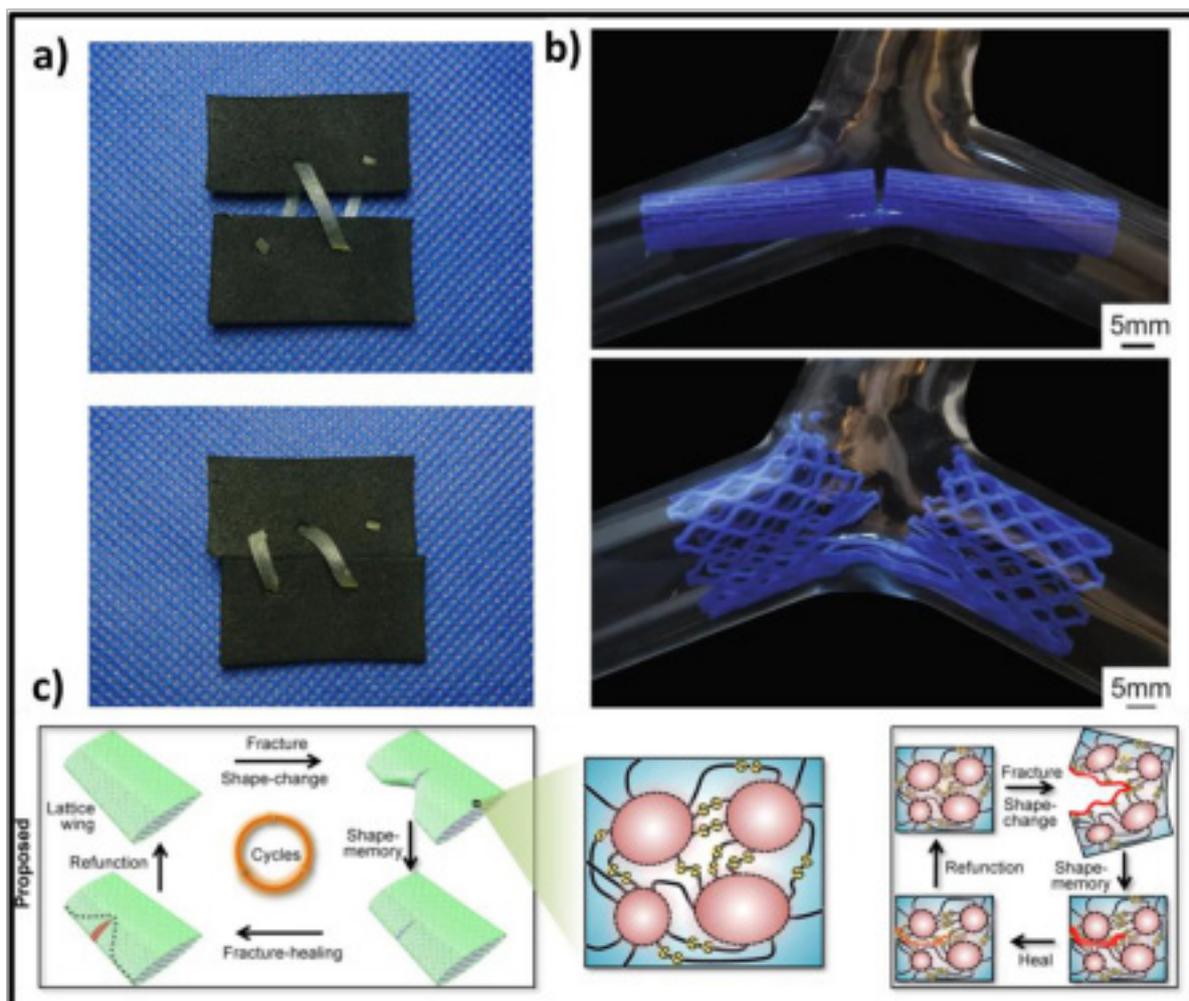
Classificazione dei materiali maggiormente utilizzati

Si fa riferimento alle proprietà delle classi di materiali prese in esame, le quali dipendono non solo dalla natura del materiale grezzo, ma anche dal processo di fabbricazione o dai parametri di stampa. Ad esempio, il diametro della bocchetta della stampante e la velocità di stampa possono influenzare le caratteristiche di stress e deformazione delle strutture stampate. I materiali a memoria di forma sono tra i più studiati ed utilizzati nella stampa 4D poiché possono modificare le loro proprietà nel tempo. Grazie ai recenti progressi nella stampa 3D, i materiali possono essere posizionati in modo più preciso e flessibile, contribuendo in modo significativo alla stampa 4D. Questi materiali sono in grado di auto-assemblarsi, auto-ripararsi e auto-adattarsi in risposta a stimoli esterni. La stampa 4D utilizza materiali in grado di modificare la loro forma e il loro colore quando vengono sottoposti a luce UV e visibile. Attualmente, i materiali più comunemente utilizzati per la stampa 4D sono SMP (Shape Memory Polimers - Polimeri a memoria di forma), LCE (Liquid Crystal Elastomers - Elastomeri a cristalli liquidi) e gli idrogel. Di seguito una tabella che illustra i materiali intelligenti utilizzati in Manifattura Additiva.

Polimeri a memoria di forma	Basso costo e densità Elevato recupero di deformazione Biodegradabilità Biocompatibilità Alta qualità del prodotto	Tendenza allo snervamento Temperature alte Risposta lenta Tossicità	Biomedicale Aerospaziale Automobilistica Tessili Industriale
Leghe a memoria di forma	Eccellenti conduttori Elevata resistenza e recupero Alta compatibilità	Duttilità limitata Fragilità Risposta lenta	Automobilistica Biomedicale Aerospaziale
Ceramiche a memoria di forma	Non tossico Elevata resistenza meccanica Biocompatibilità Resistenza a temperature elevate	Elevato punto di fusione Scarsa deformabilità Difficoltà di controllo	Biochimica Architettura Aerospaziale
Elastomeri a cristalli liquidi	Completamente reversibili Risposta rapida Proprietà ad alte prestazioni Bassa densità reticolare Struttura flessibile Ripetibilità	Stato dell'arte debole Limitata capacità di produzione Modalità di deformazione limitata Bassa risoluzione	Dispositivi biomedici Robotica morbida
IDROGEL	Biocompatibilità Trasparenza Elasticità Conducibilità ionica Ottima capacità di assorbire fluidi	Carenza di inchiostri Difficoltà nella viscosità Necessità idratazione Costoso Difficile da gestire e caricare Bassa resistenza meccanica Risposta lenta	Biomedico "Drug delivery" Ingegneria tissutale Scaffold anatomico Agricoltura Ingegneria dei tessuti Somministrazione di farmaci

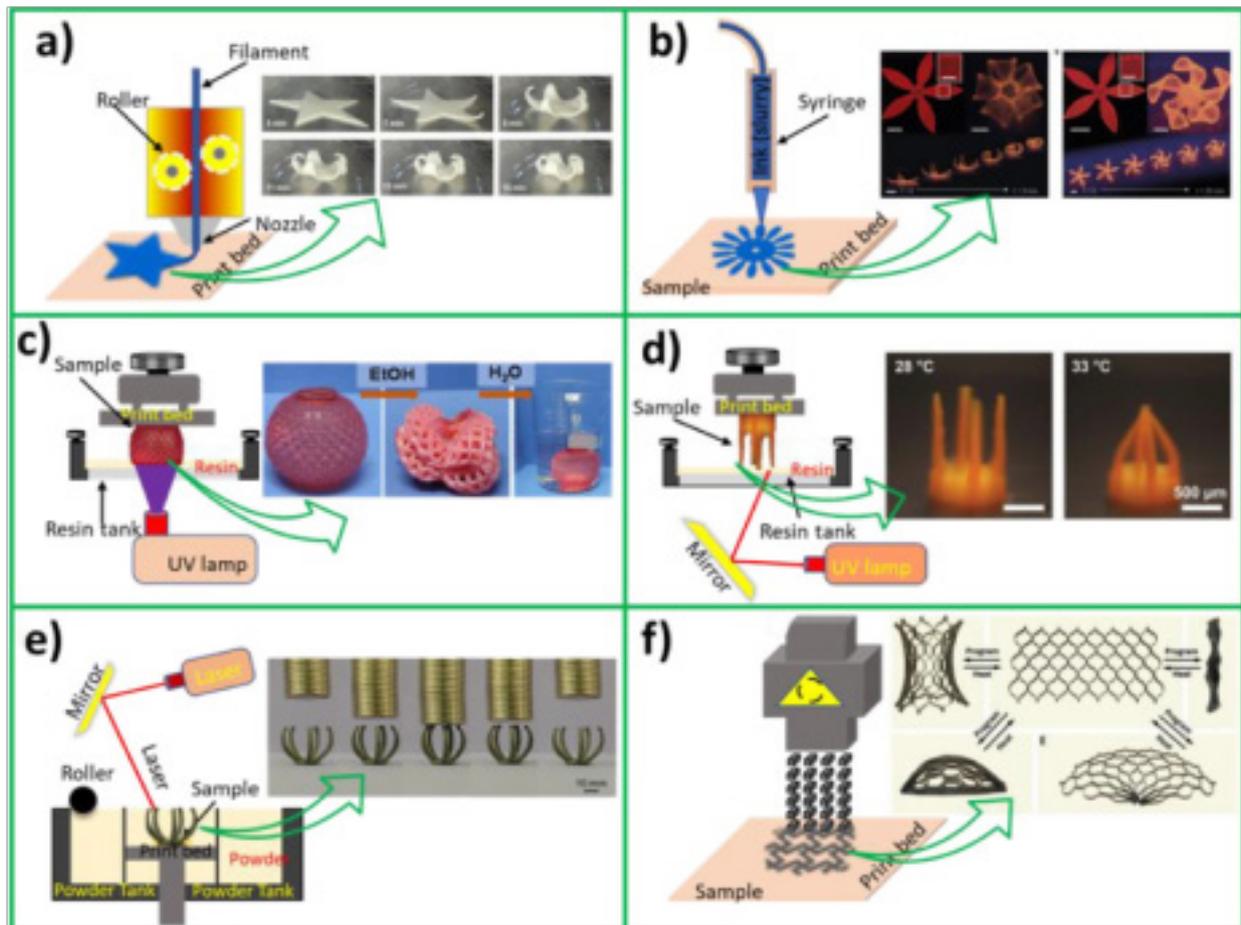
Solitamente, nei metamateriali adattivi, quando gli elementi stampati raggiungono uno stato di transizione, si verifica un cambiamento interno di fase. Di conseguenza, la geometria e la rigidità si modificano mentre la massa e lo stato chimico rimangono immutati. A differenza degli oggetti stampati in 3D convenzionali, quelli stampati in 4D hanno proprietà dinamiche che cambiano dopo il riscaldamento.

Bodaghi et al. hanno simulato una molla stampata con filamenti polimerici e hanno previsto la sua capacità di adattarsi a specifiche temperature esterne. Si è osservato che dopo l'applicazione di calore esterno, la struttura stampata piatta poteva piegarsi in una forma cilindrica, aumentando le dimensioni del reticolo iniziale, inoltre la struttura poteva essere utilizzata come un punto di sutura passivo per unire due tessuti separati, come mostrato seguentemente.



Fonte: Zhang et al., 2020

La responsività dei materiali non dipende solamente dalla loro composizione, ma anche dalla progettazione adeguata che permette loro di reagire in modo appropriato alle influenze esterne. Ad esempio, la direzione di stampa dei cristalli liquidi elastomerici (LCE) può influenzare la piegatura del materiale e questo può essere controllato controllando il gradiente di densità del materiale durante la stampa o utilizzando ulteriori passaggi di pre-programmazione della forma specifica. Una delle proprietà più interessanti e meritevoli di studio di questi materiali è la capacità di rinnovare le connessioni tra i legami molecolari dopo il danneggiamento o la separazione meccanica. I polimeri auto-riparanti si lacerano lungo i gruppi intermolecolari più deboli, come quelli costituiti da disolfuro o idrogeno, che non reagiscono con l'ossigeno nell'atmosfera e formano una pellicola di ossido sulla superficie di contatto o su qualsiasi altra molecola tranne le stesse molecole del polimero. Se il materiale ha anche proprietà di memoria di forma e può ripristinare la sua forma iniziale dopo la deformazione, la griglia può riunire i pezzi separati esattamente lungo la superficie fratturata e creare una "saldatura a freddo" del polimero. Gli oligomeri di uretano-acrilato sono i principali componenti di questi materiali auto-riparanti. Tuttavia, la riparazione richiede diversi cicli o la generazione di calore fino a 80 °C e il raffreddamento fino alla temperatura ambiente, e questo processo può essere ripetuto per un massimo di 6 ore. La miglior guarigione che si può ottenere da questo approccio è del 90% dopo piccoli tagli o microfratture, ma non consente mai un ripristino completo. (Joharji et al., 2022)



_Classificazione degli stimoli

La differenza fondamentale tra la stampa 3D e 4D, come già detto nel paragrafo 3.3.3 è il tipo di materiali usati per creare gli oggetti. La trasformazione del materiale da statico a dinamico avviene grazie ad un attivatore esterno (stimolo), ne sono stati studiati diversi, al fine di regolare la funzione e il comportamento degli oggetti responsivi.

In base alle pubblicazioni analizzate, i più investigati sono: temperatura, luce, acqua, magnetismo, pH, elettricità.

Stimolo	Pro	Contro	Applicazioni
 <p>Temperatura</p>	<p>Manipolazione meccanica Facilità di utilizzo</p>	<p>Cellule danneggiate Risposta lenta Complicato</p>	<p>Biomedico "Drug delivery" Ingegneria tissutale</p>
 <p>Luce</p>	<p>Risposta rapida Focalizzazione precisa Manipolazione meccanica</p>	<p>Poteniale tossicità Ridotta variazione della forma Dissipazione di calore Complessità di utilizzo</p>	<p>Sensori ottici "Drug delivery"</p>
 <p>Acqua</p>	<p>Risposta rapida Sicurezza Risposta rapida Guida remota</p>	<p>Tempi di reazione lenti</p>	<p>"Drug delivery"</p>
 <p>PH</p>	<p>Varietà di comportamenti strutturali Migliorata risposta Biodegradabilità Biocompatibilità</p>	<p>Applicabilità limitata</p>	<p>"Drug delivery" Robot morbidi Packaging alimentare Rigenerazione midollo spinale Ingegneria tissutale</p>
 <p>Campo magnetico</p>	<p>Risposta rapida Sicurezza Risposta rapida Guida remota</p>	<p>Alta reattività Affinità di aggregazione Compatibilità con nanoparticelle in sistemi viventi Alta densità</p>	<p>"Drug delivery" Elementi di fissaggio</p>
 <p>Elettricità</p>	<p>Velocità Controllo remoto</p>	<p>Calore localizzato Rottura della membrana Danneggiamento cellulare</p>	<p>Somministrazione di farmaci Muscoli artificiali Ingegneria tissutale</p>

Temperatura



La temperatura risulta essere il fattore stimolante maggiormente adoperato nella stampa 4D di oggetti, per tale motivo sono stati condotti molteplici studi volti ad indagare il suo impiego. Tra i vantaggi riscontrati vi è la possibilità di controllare l'adattamento degli oggetti, di effettuare manipolazioni meccaniche e la sua facilità di utilizzo. Tuttavia, l'impiego della temperatura presenta anche alcuni limiti, come il potenziale danno alle cellule, la risposta lenta, la complessità nell'utilizzo e la deformazione della struttura.

Luce



La luce rappresenta un notevole stimolo presente nella letteratura che cattura l'interesse di molti ricercatori. Tra i pregi dell'utilizzo della luce come stimolo si possono annoverare la rapida attivazione, la precisa messa a fuoco, la biocompatibilità, la sostenibilità della fonte, il controllo remoto e wireless, la modifica del colore e la gestione delle proprietà meccaniche. Tuttavia, la luce può presentare anche degli svantaggi, quali la potenziale tossicità, la limitata trasformazione della forma, la generazione di calore e la complessità. Diversamente dalla temperatura, la luce non danneggia le cellule, pertanto risulta adatta per l'utilizzo in applicazioni di biomedicina e per la creazione di dispositivi ottici.

Acqua



L'acqua è stata impiegata come stimolo per attivare oggetti in diversi studi. I vantaggi includono la sua capacità di essere controllata, la praticità e la capacità di ridurre la temperatura. Tuttavia, ci sono anche svantaggi come una reazione lenta e difficoltà di controllo per materiali sensibili all'umidità. L'uso dell'acqua come stimolo è utile per regolare la somministrazione di farmaci.

PH



In chimica, "pH" significa "potenza di idrogeno" o "potenziale di idrogeno" ed è un ottimo stimolo per gli oggetti stampati, poiché può causare espansione, contrazione, o degradazione; inoltre, può attivare funzioni di torsione, contrazione ed espansione, migliorare le risposte, controllare il rilascio dei farmaci, favorire l'autoriparazione, cambiare colore, promuovere la biodegradazione e la biocompatibilità. La stampa di polimeri reattivi al pH è molto promettente per Trova applicazione nella somministrazione di farmaci, nella creazione di robot morbidi, per scopi medici, nell'industria alimentare, nella rigenerazione del midollo spinale, e nell'ingegneria tissutale.

Campo magnetico



I campi magnetici sono un'altra forma di stimolo utilizzata in vari studi con vantaggi come la risposta rapida, il basso rischio per la sicurezza, la guida remota e l'accelerazione della velocità degli oggetti stampati in 4D in movimento. Tuttavia, ci sono anche alcune limitazioni, come l'alta reattività e l'affinità di aggregazione dei materiali a risposta magnetica nelle applicazioni biomediche, le complicazioni con le nanoparticelle magnetiche nei sistemi viventi, la bassa temperatura di utilizzo e l'alta densità degli assorbenti magnetici tradizionali. In alcune situazioni, l'uso di campi magnetici può causare un aumento della temperatura durante l'esperimento.

Elettricità



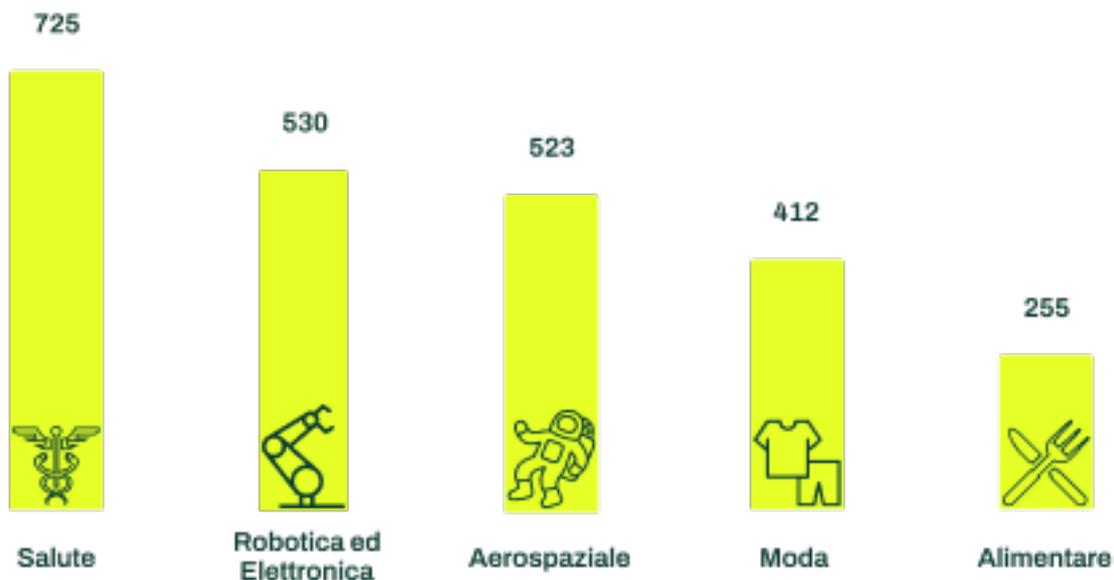
In diversi studi è stato indagato l'uso dei campi elettrici come stimolo, che presentano vantaggi come l'alta velocità e il controllo remoto. Tuttavia, ci sono anche dei rischi associati all'utilizzo di questo tipo di stimolo, come il riscaldamento localizzato, la rottura delle membrane o la morte delle cellule. L'elettrostimolazione viene impiegata per la somministrazione di farmaci, la creazione di muscoli artificiali e la rigenerazione dei tessuti.

_Casi studio per scenari di applicazione

La caratteristica più promettente della tecnologia di stampa 4D è la possibilità di produrre strutture stampate a un prezzo conveniente e con tempi di lavoro ridotti. Numerose ricerche hanno dimostrato il grande potenziale delle applicazioni della stampa 4D in diverse aree, tra cui la sanità, l'aerospaziale, l'elettronica, il cibo, le energie rinnovabili, la moda e il settore militare.

L'approccio adottato nella ricerca di casi studio mira ad indagare in una importante area di ricerca all'interno del campo della scienza dei materiali e dell'ingegneria, nonché del design. L'obiettivo principale di tale approccio è quello di sviluppare e produrre un'analisi critica su materiali intelligenti con proprietà funzionali avanzate attraverso l'utilizzo di tecniche di fabbricazione additiva che vengono manifestate nell'applicazione settoriale; tale ricerca di casi studio implica quindi l'analisi e la valutazione dei materiali intelligenti già esistenti e della loro adattabilità alla produzione additiva, nonché la progettazione di nuovi materiali intelligenti in grado di soddisfare le esigenze specifiche dell'applicazione.

Numero di pubblicazioni sulle applicazioni della Stampa 4D



Relaborazione da fonte: A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges | Faraz Hameed Aldawood, 2022



Salute

la stampa 4D fornisce una struttura dinamica e una risposta agli stimoli che è utile in moltissimi casi nel campo della salute: in ortopedia l'uso di materiali come PLA, SMP, SMA e idrogel, ha permesso, tra gli altri, a Wang et al. di sviluppare un prototipo di mano artificiale con cinque dita in materiale PLA che può eseguire funzioni specifiche.

Elettronica



La luce rappresenta un notevole stimolo presente nella letteratura che cattura l'interesse di molti ricercatori. Tra i pregi dell'utilizzo della luce come stimolo si possono annoverare la rapida attivazione, la precisa messa a fuoco, la biocompatibilità, la sostenibilità della fonte, il controllo remoto e wireless, la modifica del colore e la gestione delle proprietà meccaniche. Tuttavia, la luce può presentare anche degli svantaggi, quali la potenziale tossicità, la limitata trasformazione della forma, la generazione di calore e la complessità. Diversamente dalla temperatura, la luce non danneggia le cellule, pertanto risulta adatta per l'utilizzo in applicazioni di biomedicina e per la creazione di dispositivi ottici.

Aerospaziale



La tecnologia di stampa 4D può aiutare l'industria aerospaziale a risolvere le difficoltà legate alla complessità dei componenti e all'alto costo delle parti di ricambio. Gli studi sulla stampa 4D nel settore aerospaziale si sono concentrati sull'accelerazione dello sviluppo di aeroplani, ali e parti di ricambio per aeromobili, nonché innovativi tipi di tessuti responsivi per le tute spaziali EVA.

Moda



In chimica, "pH" significa "potenza di idrogeno" o "potenziale di idrogeno" ed è un ottimo stimolo per gli oggetti stampati, poiché può causare espansione, contrazione, o degradazione; inoltre, può attivare funzioni di torsione, contrazione ed espansione, migliorare le risposte, controllare il rilascio dei farmaci, favorire l'autoriparazione, cambiare colore, promuovere la biodegradazione e la biocompatibilità. La stampa di polimeri reattivi al pH è molto promettente per Trova applicazione nella somministrazione di farmaci, nella creazione di robot morbidi, per scopi medici, nell'industria alimentare, nella rigenerazione del midollo spinale, e nell'ingegneria tissutale.

Alimentare

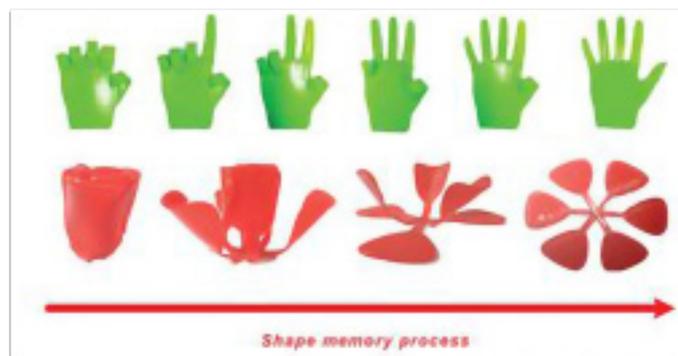


Sono stati condotti molti studi sull'utilizzo delle tecnologie di stampa 4D nel settore alimentare, con diversi metodi di produzione e materiali di stampa utilizzati, come cioccolato, formaggio, impasto, amido e patate. Un esempio di studio ha esaminato i cambiamenti di sapore in materiali stampati in 4D utilizzando una combinazione di isolato proteico di soia, carragenina k e aroma di vaniglia, dimostrando che questi materiali possono essere utili per la fabbricazione di stampa 4D. Un altro studio ha investigato il cambiamento di colore in un prodotto stampato in 4D usando polvere di curcuma e farina di sagù, con risultati dipendenti dal tempo. Infine, un altro studio ha esaminato l'alterazione della forma di impasto stampato in 4D utilizzando trigger di idratazione e disidratazione, ottenendo un materiale con una migliore struttura e un gusto più saporito rispetto alla pasta normale.



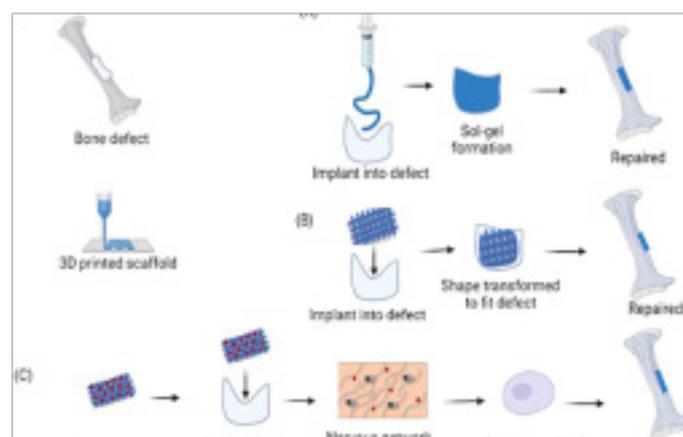
Salute

La stampa 4D fornisce una struttura dinamica e una risposta agli stimoli che è utile in moltissimi casi nel campo della salute: in ortopedia l'uso di materiali come PLA, SMP, SMA e idrogel, ha permesso, tra gli altri, a Wang et al. di sviluppare un prototipo di mano artificiale con cinque dita in materiale PLA che può eseguire funzioni specifiche (Figura 1). Attraverso l'analisi della relazione tra le proprietà di memoria di forma e i parametri di processo, è stato possibile programmare con successo la velocità e la forza di recupero della forma. È stata presentata una dimostrazione concettuale dell'ordine di ripresa della forma di dita artificiali in grado di sollevare pesi diversi grazie alla forza di recupero della forma. Questa strategia sfrutta appieno i vantaggi offerti dalla tecnologia di stampa 4D e rappresenta un arricchimento per l'approccio al controllo di attuatori e robot morbidi stampati in 4D. (Wang et al. 2019)



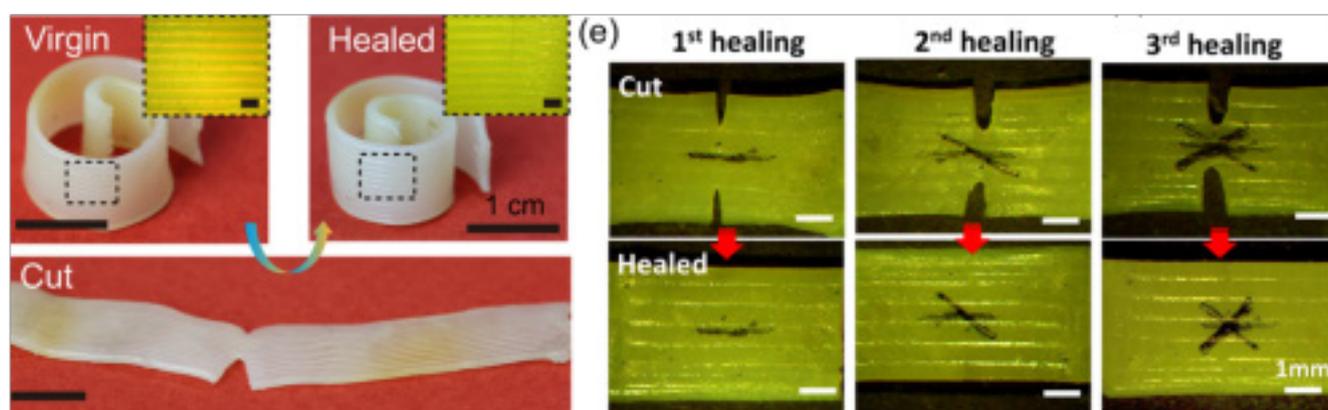
Four-dimensional bioprinting: Current developments and applications, Yuanjing Li, Ping Zhang, 2019

Le innovative strategie di stampa 4D presentano il potenziale per la fabbricazione di costrutti di tessuti multistrato complessi, fornendo numerosi vantaggi per l'ingegneria dei tessuti. Queste applicazioni mostrano un'ovvia superiorità nella riparazione personalizzata delle lesioni ossee, in particolare nei difetti ossei di dimensioni irregolari o minori. Le caratteristiche di auto-rimodellamento e maturazione funzionale delle strutture stampate in 4D aiuterebbero a fabbricare costruzioni gerarchiche biologiche complesse simili ai tessuti ossei nativi. Inoltre, diverse strategie di stampa 4D potrebbero essere utilizzate per sviluppare un sistema micro-vascolare e reti nervose all'interno dei costrutti ossei, che sono essenziali per i grandi sostituti ossei come in figura 2.



Relazione di fonte: Four-dimensional bioprinting: Current developments and applications in bone tissue engineering, Zhuqing Wan, Ping Zhang, 2019

Nell'ultimo decennio sono state condotte numerose ricerche per avanzare le tecniche di ingegneria tissutale. La stampa tridimensionale ha contribuito a migliorare questa disciplina, tuttavia, ci sono diverse sfide e limitazioni associate ad essa. Le avanzate capacità della tecnologia di stampa 4D possono contribuire a superare questi ostacoli. Queste caratteristiche includono, ma non sono limitate a, la capacità di posizionare gli impianti in luoghi inaccessibili e le procedure di chirurgia minimamente invasiva. Per avanzare lo sviluppo della fabbricazione di ingegneria tissutale utilizzando la stampa 4D, diversi ricercatori hanno investigato metodi di produzione come FDM, SLA e DLP; stimoli come temperatura, luce e magnetismo; e materiali come SMP, idrogel e SMA.



Fonte: 3D Printing of Highly Stretchable, Shape-Memory, and Self-Healing Elastomers toward Novel 4D Printing, Kuang et al., 2019

Il processo di SM-assisted SH (self-healing assistito da memoria di forma) rappresenta un metodo promettente per la guarigione di materiali elastomerici composti stampati in 4D. In particolare, il presente studio si concentra sulla guarigione di una *struttura a spirale archimedeica*, che utilizza un sistema di rigenerazione sviluppato su tre fasi temporali, viene applicata una condizione di riscaldamento del campione a 80°C per 20 minuti, seguita dal raffreddamento all'aria, ripetuta per ogni generazione di guarigione. (Kuang et al. 2018)

La capacità di guarigione di un materiale è di fondamentale importanza per le sue applicazioni nel campo biomedico, che deriva direttamente dal processo di riparazione di danni in modo efficiente e autonomo, senza la necessità di interventi manuali costosi e time-consuming.

L'efficacia di questo metodo è stata dimostrata anche nella guarigione di altre strutture stampate in 4D, come circuiti elettronici, sensori e attuatori. Pertanto, questo metodo rappresenta un passo importante verso lo sviluppo di materiali elastomerici composti con proprietà di guarigione avanzate e una vasta gamma di applicazioni industriali.

Carpal Skin è un prototipo di guanto protettivo per proteggere dalla sindrome del tunnel carpale, una condizione medica in cui il nervo mediano viene compresso al polso, portando a intorpidimento, atrofia muscolare e debolezza nella mano. Lo stiramento del polso notturno è il trattamento raccomandato per la maggior parte dei pazienti prima di sottoporsi alla chirurgia di rilascio del tunnel carpale. Carpal Skin è un processo per mappare il profilo del dolore di un paziente specifico - intensità e durata - e distribuire materiali duri e morbidi per adattarsi ai requisiti anatomici e fisiologici del paziente, limitando il movimento in modo personalizzato. Il processo di generazione della forma è ispirato ai modelli di rivestimento animale per il controllo della variazione di rigidità.

Il prototipo di Carpal Skin è stato realizzato utilizzando una Stratasys multijet, che può produrre oggetti con layer di materiali diversi. Il guanto è composto da due strati: uno strato interno che si adatta alla forma della mano del paziente e uno strato esterno che ha una struttura geometrica variabile. Lo strato interno è fatto di un materiale morbido e confortevole che riduce la pressione sul nervo mediano. Lo strato esterno è fatto di un materiale rigido e resistente che impedisce il piegamento eccessivo del polso. La struttura dello strato esterno è basata sul profilo del dolore del paziente, che viene rilevato tramite sensori posizionati sul guanto. Il guanto può quindi modificare la sua forma in base alle esigenze del paziente, fornendo un supporto personalizzato e dinamico. (Oxman, 2019).

Particolare delle texture multi-materiale (sx e dx), studio di allineamento con il sistema nervoso della mano (sopra), prototipo indossato (in basso)



"Carpal Skin", 2010-2012, Progettato da Neri Oxman in collaborazione con W. Craig Carter (MIT), prodotto da Stratasys. Foto: Nikay Siegal.

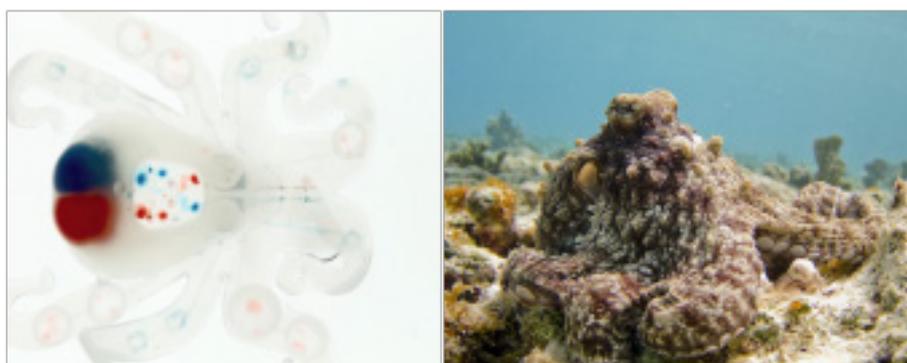
Robotica ed Elettronica



La stampa 4D ha migliorato la tecnologia dell'elettronica e della robotica, permettendo la produzione di componenti con proprietà uniche e funzionalità avanzate. I materiali più comuni utilizzati per la stampa 4D nell'elettronica sono i polimeri, come quelli a memoria di forma, che permettono ai circuiti elettronici stampati di allungarsi e contrarsi in risposta a stimoli esterni, come il calore. Nella robotica, invece, sono utilizzati materiali come i polimeri termoplastici e i compositi avanzati per la creazione di componenti rigidi e resistenti; le leghe a memoria di forma vengono utilizzate per la creazione di attuatori e muscoli artificiali robotici, in grado di riprodurre movimenti complessi e adattarsi a diversi ambienti, mentre gli idrogel a sono utilizzati per creare attuatori morbidi che reagiscono a stimoli come l'acqua o la temperatura.

Un esempio molto interessante è quello sviluppato dal Wyss Institute dell'Università di Harvard: l'Octobot rappresenta una nuova frontiera nel campo della robotica morbida, trovando ispirazione nella biologia dei polpi. La peculiarità di questo robot sta nella sua struttura priva di componenti rigidi, che permette di ottenere una flessibilità e una duttilità molto interessanti, l'inedito progetto di robotica morbida è alimentato da una reazione chimica e controllato con una logica microfluidica che dirige il flusso di carburante. Questo sistema funziona come una scheda elettronica, dirigendo autonomamente il carburante attraverso il robot.

La flessibilità dell'Octobot e il suo sistema di controllo innovativo aprono la strada a una nuova generazione di robot morbidi, in grado di adattarsi a contesti e situazioni diverse e di svolgere compiti altrimenti impossibili per i robot rigidi.



Essendo realizzato con LCE (Elastomeri a cristalli liquidi), è stato prodotto utilizzando il metodo di Direct-Ink Writing, che consente di creare robot morbidi e flessibili senza componenti rigidi. In particolare, l'Octobot è stato creato combinando la stampa di un elastomero liquido con la microfluidica, una tecnologia che consente di controllare e manipolare il flusso di fluidi su scala microscopica. Il robot è alimentato da una reazione chimica che avviene all'interno di un sacchetto di plastica che funge da serbatoio per il combustibile. La microfluidica controlla la distribuzione del combustibile ai vari segmenti del robot, permettendo di controllarne il movimento e la forma. Il risultato è un robot morbido e flessibile che può muoversi in modo autonomo senza l'ausilio di componenti rigidi.

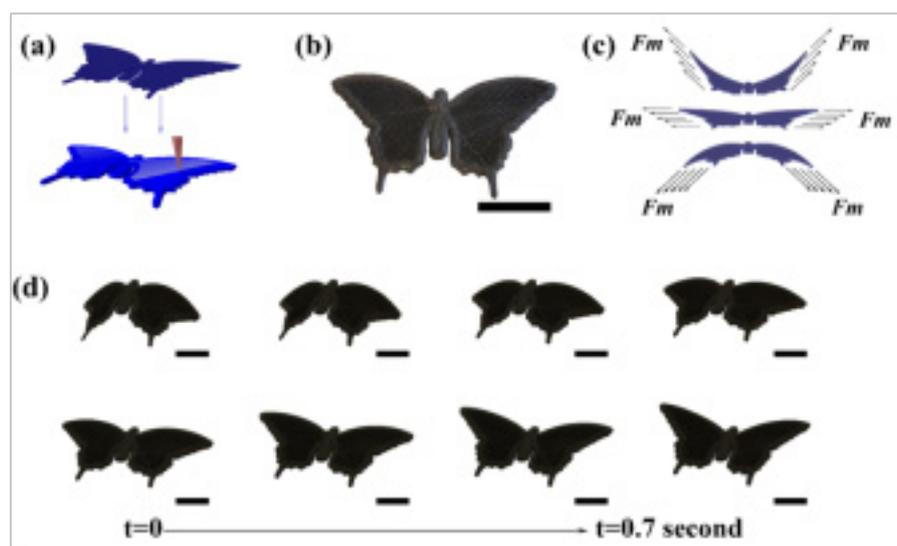




Aerospaziale

L'industria aerospaziale è caratterizzata da preoccupazioni legate alla complessità dei componenti e alle difficoltà di assemblaggio. Inoltre, il costo elevato delle parti di ricambio degli aeromobili e la possibile rottura della catena di approvvigionamento globale sono ulteriori punti di preoccupazione. La tecnologia di stampa 4D rappresenta una soluzione per queste difficoltà, in quanto permette di creare parti di assemblaggio inferiori e di risparmiare tempo. Alcuni ricercatori hanno dedicato attenzione allo sviluppo accelerato di applicazioni aerospaziali, quali aeroplani, ali e parti di ricambio per aeromobili.

Ad esempio, alcuni ricercatori hanno studiato le oscillazioni delle ali di una farfalla bionica sotto stimolazione magnetica, evidenziando che quando il campo magnetico era lontano, il processo di battito dell'ala diminuiva e la farfalla ritornava alla sua posizione originale. I ricercatori hanno proposto l'utilizzo di poliimidi a memoria di forma come materiale e valutato due approcci di produzione: DLP e stampaggio per estrusione. Il modello stampato in 4D ha dimostrato di possedere una buona resistenza meccanica e la capacità di riprendere la sua forma originale. (Aldawood, 2023)

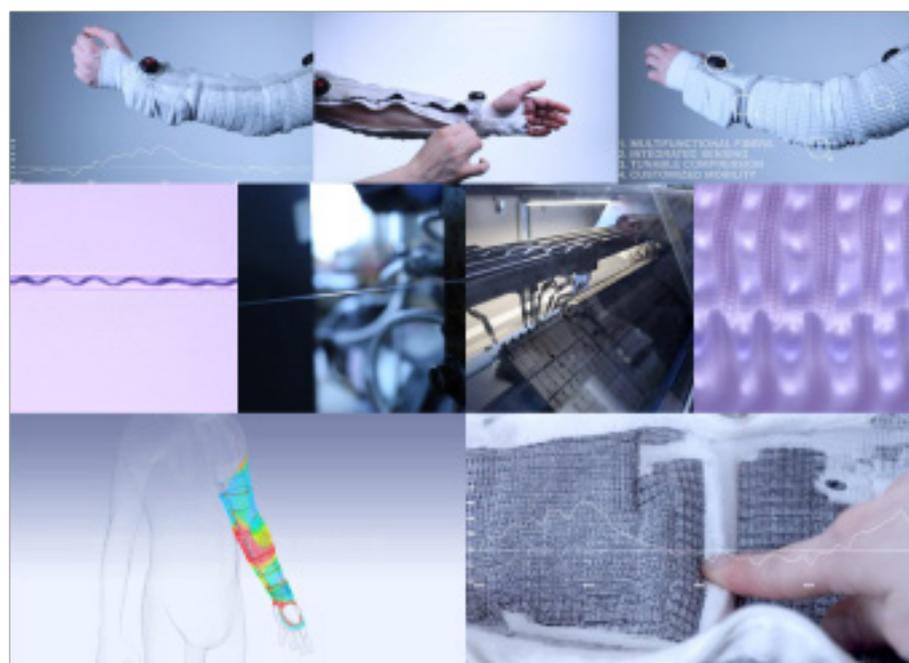


Ciclo di sviluppo delle oscillazioni in un moto stimolato magneticamente.

Fonte: Zhu et al. 2024

È stato sviluppato un inchiostro composito PDMS/Fe per la stampa 4D reversibile al fine di creare strutture magnetoresponsive con tempi di risposta rapidi sotto l'influenza di un campo magnetico esterno. L'inchiostro sfrutta la flessibilità del PDMS come componente di matrice e la presenza di particelle di Fe magneticamente morbido per consentire alle strutture 3D di acquisire o perdere immediatamente un'alta magnetizzazione. Tali strutture possono mostrare una proprietà di evoluzione strutturale stimolata magneticamente reversibile e sviluppare movimenti indotti magneticamente per applicazioni magnetomeccaniche. Inoltre, queste strutture possono indurre cambiamenti di proprietà correlati alla loro struttura, come dimostrato dal dispositivo fotonico a terahertz 3D-TPC con proprietà terahertz regolabili a distanza. Questo inchiostro composito rappresenta una nuova opportunità per la creazione di dispositivi funzionali tramite la stampa 4D stimolata magneticamente.

È stato sviluppato un inchiostro composito PDMS/Fe per la stampa 4D reversibile al fine di creare strutture magnetoresponsive con tempi di risposta rapidi sotto l'influenza di un campo magnetico esterno. L'inchiostro sfrutta la flessibilità del PDMS come componente di matrice e la presenza di particelle di Fe magneticamente morbido per consentire alle strutture 3D di acquisire o perdere immediatamente un'alta magnetizzazione. Tali strutture possono mostrare una proprietà di evoluzione strutturale stimolata magneticamente reversibile e sviluppare movimenti indotti magneticamente per applicazioni magnetomeccaniche. Inoltre, queste strutture possono indurre cambiamenti di proprietà correlati alla loro struttura, come dimostrato dal dispositivo fotonico a terahertz 3D-TPC con proprietà terahertz regolabili a distanza. Questo inchiostro composito rappresenta una nuova opportunità per la creazione di dispositivi funzionali tramite la stampa 4D stimolata magneticamente.



Fonte: MIT Media Lab

È stato sviluppato un inchiostro composito PDMS/Fe per la stampa 4D reversibile al fine di creare strutture magnetoresponsive con tempi di risposta rapidi sotto l'influenza di un campo magnetico esterno. L'inchiostro sfrutta la flessibilità del PDMS come componente di matrice e la presenza di particelle di Fe magneticamente morbido per consentire alle strutture 3D di acquisire o perdere immediatamente un'alta magnetizzazione. Tali strutture possono mostrare una proprietà di evoluzione strutturale stimolata magneticamente reversibile e sviluppare movimenti indotti magneticamente per applicazioni magnetomeccaniche. Inoltre, queste strutture possono indurre cambiamenti di proprietà correlati alla loro struttura, come dimostrato dal dispositivo fotonico a terahertz 3D-TPC con proprietà terahertz regolabili a distanza. Questo inchiostro composito rappresenta una nuova opportunità per la creazione di dispositivi funzionali tramite la stampa 4D stimolata magneticamente.

Moda



Un esempio di applicazione della stampa 4D nel campo dell'abbigliamento è il progetto Kinematics, un progetto che esplora le possibilità di creare tessuti intelligenti e interattivi con la Manifattura Additiva. Il progetto si basa sul concetto di tessuti programmabili, ovvero tessuti che possono cambiare forma, colore o funzione in base a stimoli esterni come la temperatura, l'umidità o la luce.

Uno dei prototipi realizzati con Kinematics è il vestito Bloom, un abito stampato in 3D che si apre e si chiude come un fiore in base alla temperatura ambientale. Il vestito è composto da una serie di petali stampati in 3D con un materiale termosensibile che si contrae quando viene riscaldato. I petali sono collegati a una rete di tubi flessibili che contengono acqua calda o fredda. Quando l'acqua calda scorre nei tubi, i petali si chiudono; quando l'acqua fredda scorre nei tubi, i petali si aprono. Il vestito è controllato da un microcontrollore Arduino che regola il flusso dell'acqua in base alla temperatura rilevata da un sensore. Il vestito Bloom dimostra come la stampa 4D possa creare abiti dinamici e adattivi che reagiscono all'ambiente e al corpo dell'indossatore. Questo tipo di abbigliamento potrebbe avere applicazioni nel campo della moda, del design e della salute.





Alimentare

La stampa 4D e la stampa alimentare sono due tecnologie innovative che potrebbero rivoluzionare il modo in cui mangiamo e cuciniamo. Un esempio di questa combinazione è il progetto del Tangible Media Group del MIT, che ha creato una pasta che cambia forma a seconda delle condizioni ambientali. Questa pasta è stata stampata in 3D con una base di gelatina e una striscia di cellulosa edibile, che si piega in modo diverso quando viene esposta al calore e all'acqua. In questo modo, la pasta può assumere forme diverse e sorprendenti quando viene bollita, come fiori, cavatappi o spirali.

PeUno dei vantaggi di questa pasta è che occupa meno spazio rispetto alla pasta tradizionale. I ricercatori hanno calcolato che il 67% dello spazio nei pacchetti di alcune paste è occupato dall'aria. Con la pasta piatta stampata in 3D, si potrebbe risparmiare molto spazio nell'imballaggio e nel trasporto.

Wang, Yao e altri studenti hanno collaborato con uno chef per rendere la pasta gustosa e commestibile. Hanno anche studiato le proprietà fisiche della pasta, come la temperatura, la malleabilità e l'assorbimento, e le hanno registrate in un database. Da questo database, hanno poi selezionato il prototipo ideale per la loro pasta trasformabile. Oltre alle forme, hanno anche sperimentato con il colore e la trasparenza della pasta. Hanno persino creato alcuni tipi di pasta completamente trasparenti.



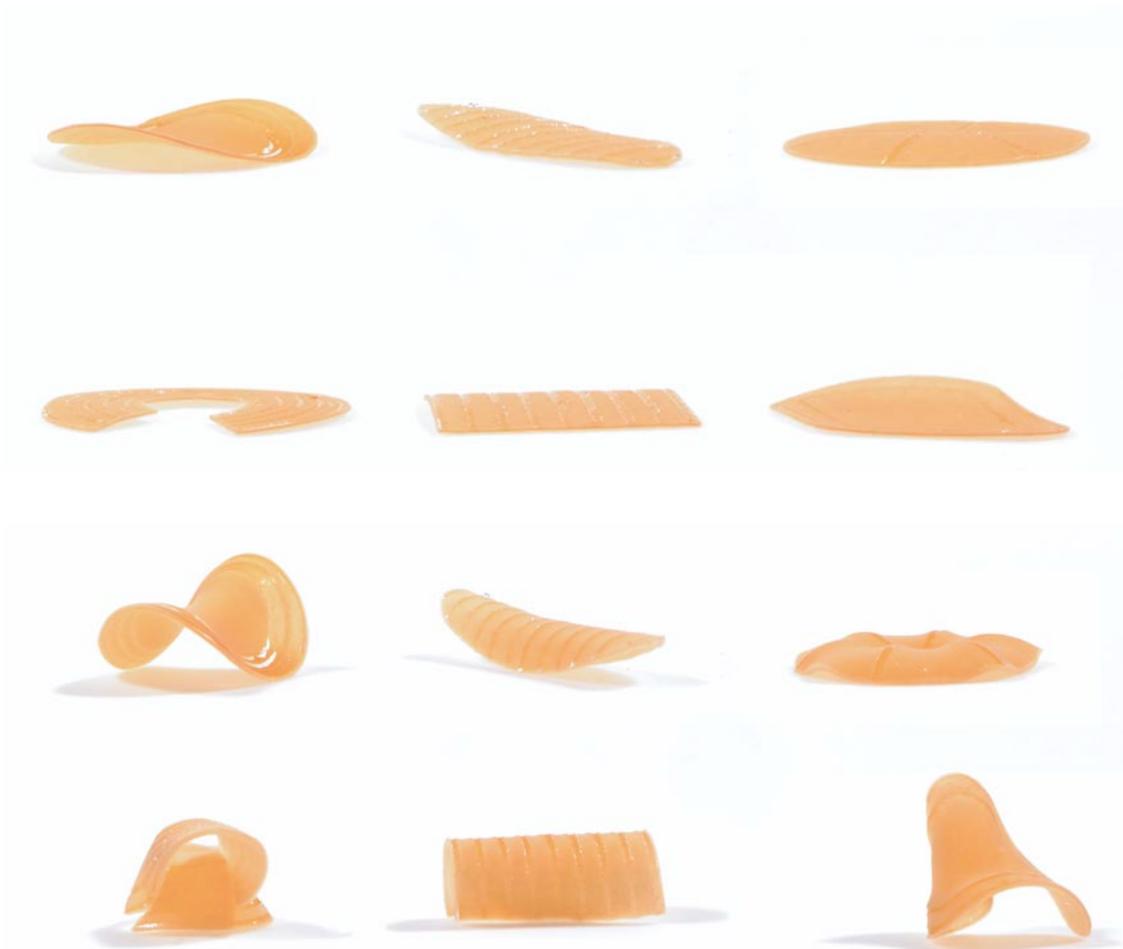


Alimentare

La stampa 4D e la stampa alimentare sono due tecnologie innovative che potrebbero rivoluzionare il modo in cui mangiamo e cuciniamo. Un esempio di questa combinazione è il progetto del Tangible Media Group del MIT, che ha creato una pasta che cambia forma a seconda delle condizioni ambientali. Questa pasta è stata stampata in 3D con una base di gelatina e una striscia di cellulosa edibile, che si piega in modo diverso quando viene esposta al calore e all'acqua. In questo modo, la pasta può assumere forme diverse e sorprendenti quando viene bollita, come fiori, cavatappi o spirali.

PeUno dei vantaggi di questa pasta è che occupa meno spazio rispetto alla pasta tradizionale. I ricercatori hanno calcolato che il 67% dello spazio nei pacchetti di alcune paste è occupato dall'aria. Con la pasta piatta stampata in 3D, si potrebbe risparmiare molto spazio nell'imballaggio e nel trasporto.

Wang, Yao e altri studenti hanno collaborato con uno chef per rendere la pasta gustosa e commestibile. Hanno anche studiato le proprietà fisiche della pasta, come la temperatura, la malleabilità e l'assorbimento, e le hanno registrate in un database. Da questo database, hanno poi selezionato il prototipo ideale per la loro pasta trasformabile. Oltre alle forme, hanno anche sperimentato con il colore e la trasparenza della pasta. Hanno persino creato alcuni tipi di pasta completamente trasparenti.



4.1 Il ruolo del design

Le professioni del design hanno un ruolo importante nel portare gli avanzamenti di altre professioni nel mondo reale, ma ciò comporta una grande responsabilità di considerare l'impatto sul mondo circostante. Questo significa che il design deve essere considerato in un contesto più ampio, oltre la sola produzione, l'architetto deve considerare l'impatto dell'edificio sull'ambiente circostante e su altri sistemi. Il design non è solo una questione di scelta tra vari materiali e tecnologie, ma anche di considerazione delle implicazioni sul mondo reale. (Tsai, 2013)

Il design svolge un ruolo fondamentale nella stampa 4D in quanto è l'elemento chiave per definire le proprietà del materiale e il comportamento dell'oggetto prodotto. Infatti, nella stampa 4D, il design non riguarda solo l'aspetto estetico dell'oggetto, ma anche la sua funzionalità e la sua capacità di reagire ai cambiamenti ambientali. Grazie alla flessibilità e alla programmabilità dei materiali utilizzati nella stampa 4D, i designer possono creare oggetti che cambiano forma, si auto-assemblano o si auto-riparano. In questo modo, il design può contribuire allo sviluppo di soluzioni innovative e all'avanguardia in vari settori, come l'architettura, la medicina e l'industria aerospaziale. Il design nella progettazione di manifattura additiva per materiali responsivi, è fondamentale poiché questa tecnologia permette di creare oggetti che possono cambiare forma, dimensione e funzione nel tempo, dunque, per sfruttare appieno il potenziale della tecnologia, è necessario che il design tenga conto delle proprietà dinamiche dei materiali e della capacità di rispondere a stimoli esterni come la temperatura, l'umidità o la luce.

Il design nella stampa 4D deve pertanto considerare sia la fase di progettazione che quella di produzione. In fase di progettazione, è importante che i designer identifichino i potenziali scenari in cui l'oggetto sarà utilizzato e definiscano le specifiche funzionali che l'oggetto dovrà soddisfare. Inoltre, dovranno considerare anche le proprietà dei materiali utilizzati, poiché questi possono influenzare la risposta dell'oggetto agli stimoli esterni. Nella fase di produzione, la figura del progettista è importante che sia calata all'interno di un team multidisciplinare, stando a stretto contatto con ingegneri per definire i parametri di stampa, come la temperatura e il tempo di esposizione alla luce, in modo da garantire che l'oggetto finito possa esprimere appieno le sue proprietà dinamiche ma anche con biologi e chimici per avere un apporto scientifico immediato a monte del processo di progettazione.

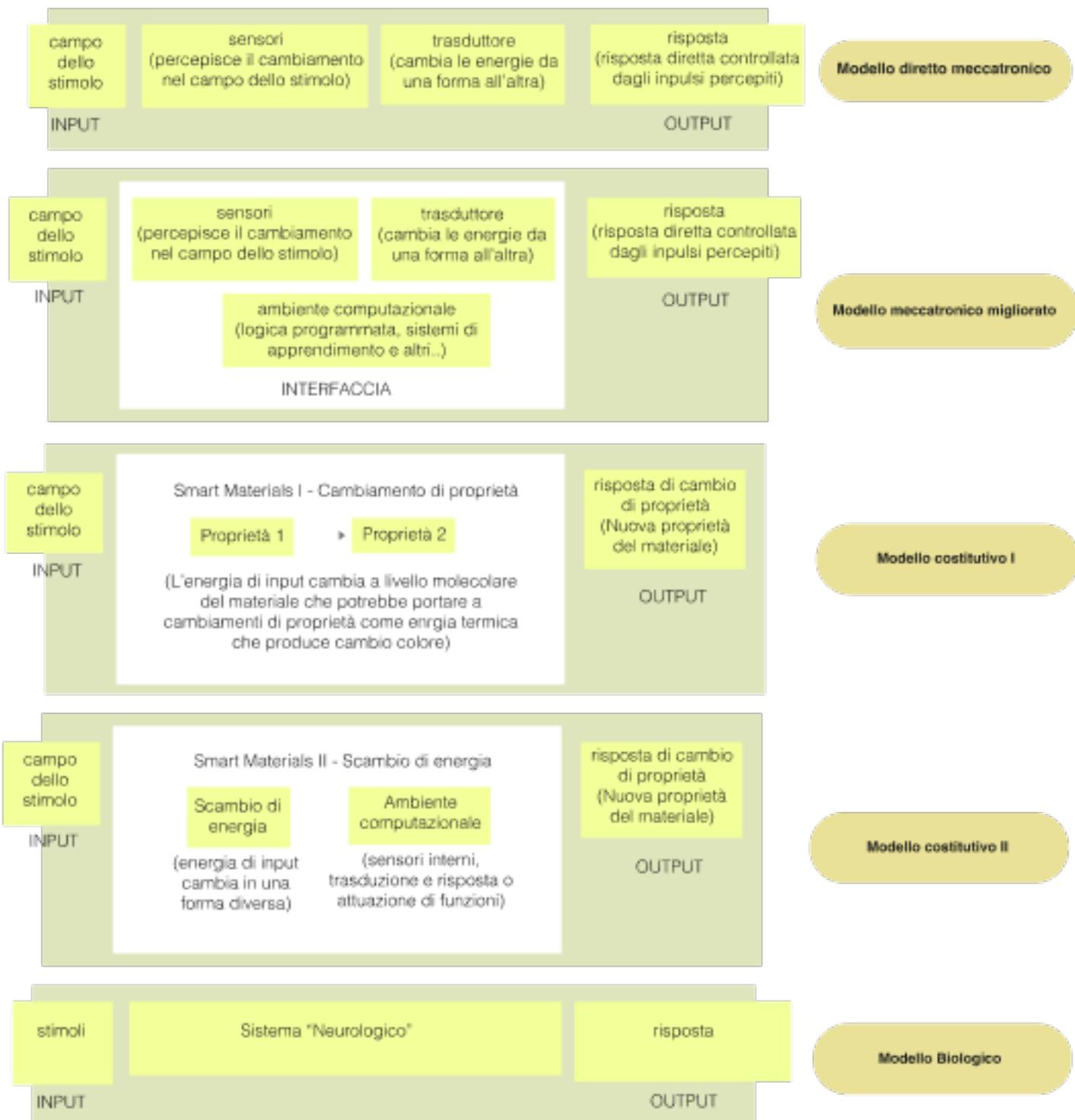
La definizione dei confini tra professioni, pratiche e aree di competenza è spesso vista come analogo alla definizione specifica del confine energetico. Tuttavia, questi confini non sono una caratterizzazione fondamentale del comportamento, ma piuttosto sono disegnati per motivi di comodità e organizzazione. La stratificazione gerarchica tra le professioni tende a essere più focalizzata verso il basso che verso l'alto, e gli architetti, ad esempio, potrebbero essere consapevoli dei molti prodotti utilizzati nella costruzione dell'edificio, ma relativamente inconsapevoli delle questioni regionali. (Addington, Schodek, 2005)

Il processo di progettazione per la Manifattura Additiva di materiali intelligenti coinvolge diverse fasi (Huang et al. 2021):

1. **Definizione requisiti funzionali:** la prima fase consiste nella definizione dei requisiti funzionali dell'oggetto da stampare, compresi i suoi comportamenti dinamici desiderati.
2. **Progettazione concettuale:** successivamente, si passa alla fase di progettazione concettuale, in cui vengono identificate le soluzioni di progettazione e le possibili configurazioni di materiali che potrebbero soddisfare i requisiti funzionali, si sviluppa l'idea di base per l'oggetto che si vuole creare. Questa fase può includere la ricerca di fonti di ispirazione, la generazione di idee e la creazione di schizzi o modelli.
3. **Progettazione dettagliata:** vengono creati i modelli digitali CAD dell'oggetto e vengono definiti i parametri di stampa, come la geometria, la densità del materiale e la distribuzione del materiale. In questa fase, è importante considerare le proprietà dei materiali utilizzati per la stampa 4D e le possibili deformazioni che possono verificarsi durante il processo di stampa e di attivazione dell'oggetto, i progettisti devono sempre tenere conto delle proprietà dinamiche del materiale utilizzato per la stampa 4D e definire i parametri di stampa per ottenere l'effetto desiderato.
4. **Produzione:** la quarta fase è la produzione dell'oggetto tramite tecniche di manifattura additiva compatibili. Na volta che il modello 3D è stato completato e verificato, viene avviata la produzione dell'oggetto. Durante la produzione, i progettisti devono controllare attentamente i parametri di stampa e assicurarsi che l'oggetto venga prodotto con le proprietà dinamiche desiderate. Una volta stampato, l'oggetto viene sottoposto a un processo di attivazione, che può essere termico, idraulico, magnetico o basato sulla luce, a seconda del tipo di materiale utilizzato.
5. **Valutazione e ottimizzazione:** vengono valutate le prestazioni dell'oggetto stampato rispetto ai requisiti funzionali definiti inizialmente e vengono apportate eventuali modifiche per migliorare le prestazioni dell'oggetto. Una volta che l'oggetto è stato prodotto, infatti, viene sottoposto a test per valutare le sue proprietà dinamiche e la sua capacità di rispondere agli stimoli esterni. Questo aiuta a valutare la qualità del prodotto e identificare eventuali miglioramenti da apportare alla progettazione.
6. **Iterazione:** il processo di progettazione può essere ripetuto più volte per apportare eventuali miglioramenti o modifiche all'oggetto. Questa fase può essere iterativa e può richiedere diverse versioni del modello 3D e della produzione dell'oggetto.

La stampa 4D di materiali intelligenti offre numerose possibilità innovative per il product design. Grazie all'utilizzo di materiali intelligenti programmabili, la stampa 4D consente la creazione di prodotti adattivi, a ciclo di vita lungo, funzionali e personalizzati; ciò è innanzitutto possibile grazie alla capacità dei materiali intelligenti di cambiare forma e proprietà a seguito di fattori esterni come, ad esempio, la temperatura, questa caratteristica consente la creazione di prodotti in grado di adattarsi alle esigenze dell'utente, migliorando l'esperienza d'uso. Un altro esempio è dato dai materiali con proprietà di auto-guarigione utilizzati nella stampa 4D possono aumentare la durata della vita dei prodotti, riducendo la necessità di riparazioni o sostituzioni che consente la progettazione di prodotti a ciclo di vita lungo, riducendo i costi di manutenzione e migliorando la sostenibilità del prodotto; possono essere programmati per rispondere a specifici stimoli ambientali, come la luce o il calore che porta alla progettazione di prodotti funzionali, in grado di eseguire specifiche funzioni, migliorando l'utilità del prodotto. Infine, la stampa 4d interviene anche sulla produzione di prodotti altamente personalizzati e personalizzabili, in grado di soddisfare le esigenze specifiche dell'utente, caratteristica che consente la progettazione di prodotti che migliorano l'esperienza d'uso e soddisfano le esigenze dell'utente, in un arco di tempo che può coprire l'intera vita d'uso del prodotto stesso.

In sintesi, la stampa 4D di materiali intelligenti offre numerose possibilità innovative per il lavoro progettuale, permettendo la creazione di prodotti adattivi, a ciclo di vita lungo, funzionali e personalizzati. Queste nuove tecniche di produzione potrebbero rivoluzionare il modo in cui i prodotti sono progettati e prodotti, aprendo nuovi scenari per l'innovazione e la creatività.



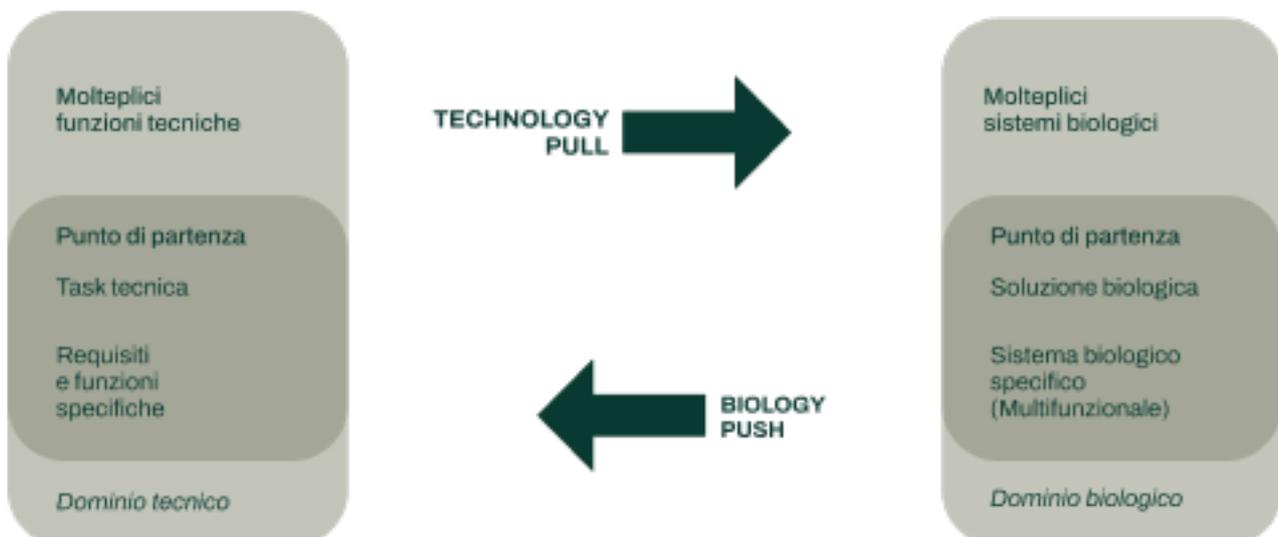
Fonte: A Practical Guide to Bio-inspired Design, Forzaneli, Lindemann, 2019

4.2 / Approccio biomimetico alla progettazione

Il campo dei metodi di progettazione bio-ispirata presenta una notevole varietà di tecniche, le quali sono state sviluppate per affrontare specifici scenari di progettazione bio-ispirata, ma che possono risultare meno idonei in altri contesti. Un esempio di tale circostanza è rappresentato dal modello di relazione causale, un metodo che consente di formulare una singola frase che rappresenti la relazione causale esistente tra un sistema biologico e uno tecnico bio-ispirato, al fine di facilitarne il rapido trasferimento di analogie dal dominio biologico a quello tecnico, tuttavia bisogna considerare che la sintesi di una soluzione biologica in una sola frase richiede una considerevole semplificazione, che potrebbe risultare insufficiente se si è condotto un progetto di ricerca finalizzato ad analizzare in dettaglio un sistema biologico e a dedurre spiegazioni complesse per le sue strategie.

La modellizzazione SBF è un metodo per astrarre i sistemi tecnici e biologici. Le funzioni dei sistemi sono modellate in dettagliati passaggi. Questo metodo è molto utile per raffigurare conoscenze dettagliate acquisite attraverso ricerche letterarie o attraverso studi o esperimenti effettuati su un sistema biologico o tecnico. Tuttavia, nei brevi workshop di ideazione risulta impraticabile. Per indicare la adattabilità dei metodi per determinati tipi di progettazione bio-ispirata, abbiamo sviluppato tre scenari. Essi differiscono per il grado di sforzo applicato per l'analisi del sistema tecnico e biologico. Il vostro progetto di progettazione bio-ispirata potrebbe essere proprio tra uno dei tre scenari, o potrebbe essere completamente diverso (Farzaneh, Lindeman, 2019).

La progettazione bio-ispirata può adottare due approcci principali: tecnologia push e biologia push. L'approccio tecnologia push parte da un compito tecnico predefinito, che richiede un insieme di requisiti e funzioni. I progettisti si attengono a queste condizioni e cercano analogie in diversi sistemi biologici per trasferire ai loro progetti. Al contrario, l'approccio biologia push parte da un sistema biologico predefinito e cerca di analizzarlo in dettaglio per sviluppare soluzioni tecniche multifunzionali. Sebbene entrambi gli approcci abbiano vantaggi e svantaggi, l'approccio di biologia push può essere più innovativo poiché consente di sviluppare soluzioni multifunzionali e applicazioni tecniche in diversi contesti. Tuttavia, i progettisti possono limitare la loro analisi a un solo sistema biologico, riducendo così la varietà di soluzioni che possono essere sviluppate. I progetti di design ispirati alla biologia non necessitano di seguire rigidamente né un approccio di spinta tecnologica né un approccio di spinta biologica. In pratica, sorgono numerose opportunità per passare da un approccio all'altro e questo può essere altamente vantaggioso. Come designer, è importante fare un passo indietro in modo consapevole e analizzare il processo di design.



Usando il sistema di progettazione che si basa su analisi biologiche, i materiali intelligenti possono essere considerati sistemi tecnici in cui le variabili di input sono predefinite dai progettisti e possono essere utilizzate per regolare le variabili funzionali e relazionali.

Nel processo di analisi, le variabili di disturbo devono essere considerate, come ad esempio le influenze ambientali e le variazioni di temperatura che possono influire sulle proprietà del materiale. L'analisi delle variabili di output rilevanti può aiutare a regolare le variabili di input per ottenere le proprietà desiderate del materiale, oltre alle variabili di input predefinite, giocano un ruolo le variabili di disturbo. Le variabili di disturbo descrivono tutte le influenze note e sconosciute, come le differenze di temperatura tra inverno ed estate e tra notte e giorno causano l'allungamento e il restringimento dei componenti tecnici e strutturali (Farzaneh, Lindeman, 2019).

Ad esempio, l'uso di materiali intelligenti con proprietà di memoria di forma può essere regolato attraverso variabili di input come la temperatura o la pressione, per controllare il loro comportamento funzionale e relazionale. In questo modo, i materiali intelligenti possono essere progettati per adattarsi alle esigenze specifiche dell'applicazione.

La stampa 4D è una tecnologia di produzione che utilizza materiali intelligenti per creare oggetti che possono cambiare forma e funzione in risposta a stimoli esterni come la temperatura, la luce o l'umidità. La matrice biomimetica su cui si basa la stampa 4D si rifà alla capacità dei sistemi biologici di autoregolarsi, adattarsi e ripararsi autonomamente, capacità che sono fondamentali per la sopravvivenza e l'adattamento degli organismi viventi all'ambiente circostante.

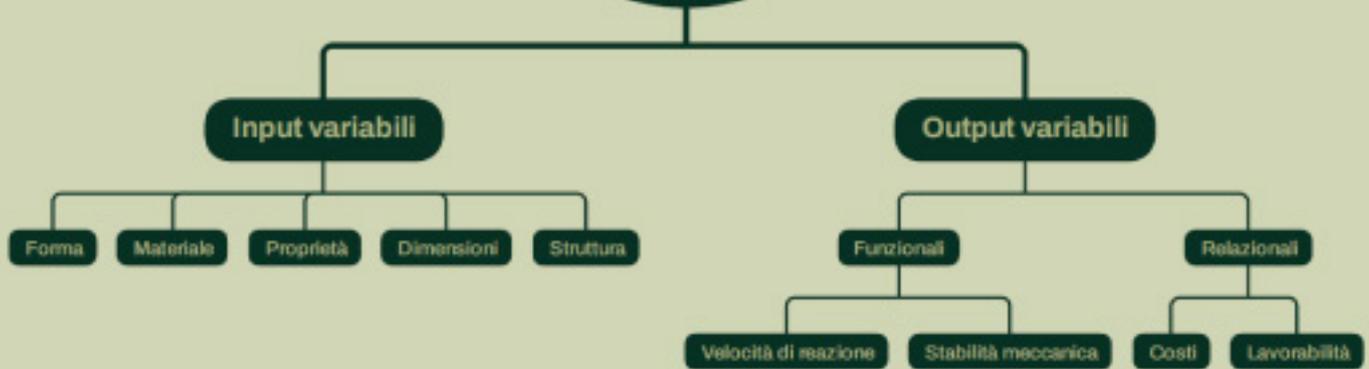
L'approccio biomimetico consente di creare materiali intelligenti in grado di auto-assemblarsi in strutture complesse e funzionali, proprio come avviene nei sistemi biologici, e di adattarsi al cambiamento delle condizioni esterne. Questi materiali intelligenti possono essere utilizzati nella stampa 4D per creare oggetti che possono cambiare la loro forma e funzione in modo simile a come lo fanno i sistemi biologici.

L'uso della matrice biomimetica nella stampa 4D consente di creare oggetti con una vasta gamma di applicazioni nel design, in cui la forma e la funzione di un oggetto possono essere modificate in modo autonomo in base alle necessità dell'utente o dell'ambiente circostante. Questo potrebbe avere impatto in diversi settori, come l'architettura, la moda, la medicina e l'ingegneria.

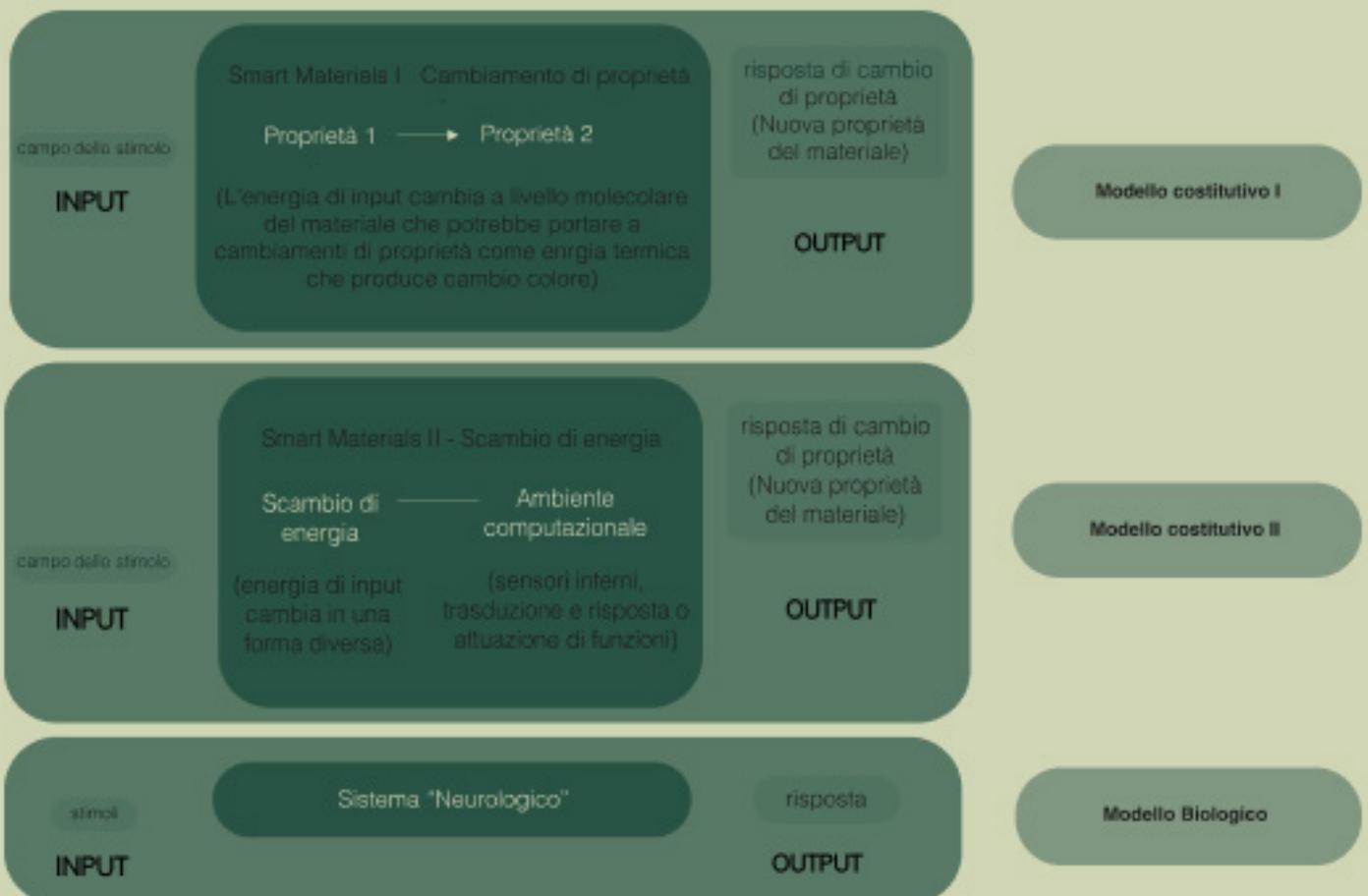
La capacità dei materiali intelligenti di autoregolarsi, autorigenerarsi e adattarsi all'ambiente circostante, concetti fondamentali per la sopravvivenza degli organismi viventi, questo è da considerarsi come fattore caratterizzante la tecnologia e senza dubbio la sua origine concettuale prende spunto da sistemi biologici in quanto, la Stampa 4D, permette di lavorare materiali che hanno caratteristiche affini a quelle dei sistemi biologici, e come già accennato, ai materiali che manifestano delle caratteristiche che seguono lo schema "lyfe"

La matrice biomimetica della stampa 4D rappresenta un esempio di come la natura possa essere utilizzata come fonte di ispirazione per creare tecnologie avanzate che migliorino la nostra vita quotidiana. Il design e l'architettura possono trarre vantaggio da questa tecnologia, utilizzando materiali intelligenti che possano adattarsi e reagire in modo autoregolato alle diverse condizioni ambientali, aprendo nuove prospettive per la costruzione di edifici e la creazione di oggetti altamente specializzati.

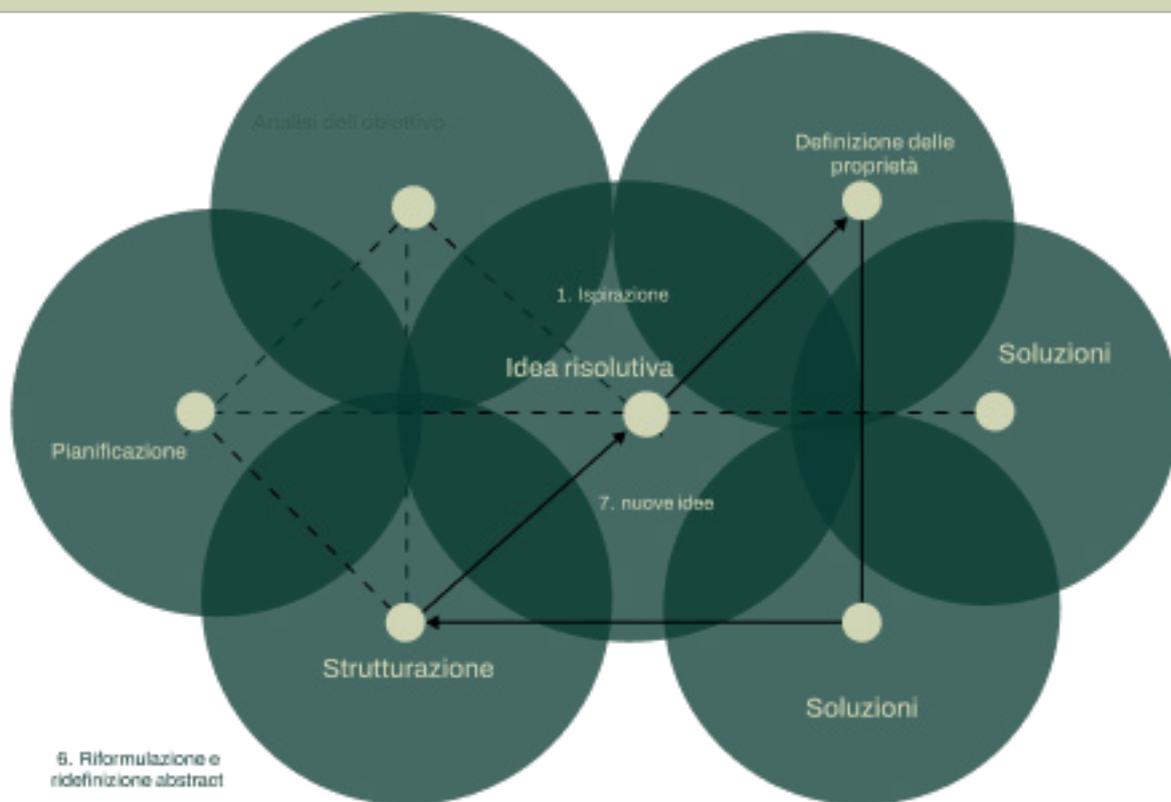
Variabili tecniche di sistema



Rielaborazione da fonte: A Practical Guide to Bio-inspired Design, Farzaneh, Undermann, 2019



Rielaborazione da fonte: A Practical Guide to Bio-inspired Design, Farzaneh, Undermann, 2019



Rielaborazione da fonte: A Practical Guide to Bio-Inspired Design, Farzaneh, Lindemann, 2019

In alternativa, è possibile seguire la procedura del Modello Procedurale di Monaco: in questo caso, il punto di partenza è l'osservazione di una soluzione biologica - l'assorbimento e il rilascio di fluidi dalle dita dei torrenti delle rane. I designer hanno l'idea di utilizzare una copia della struttura delle dita della rana come medicazione adesiva che applica farmaci alle ferite (1). Nel passo successivo, valutano le proprietà della capacità della struttura copiata di assorbire i fluidi: si stima la quantità di fluido che la struttura può assorbire (2). Successivamente, si scelgono due diversi materiali per costruire i prototipi (3) e si testa l'assorbimento dei fluidi dei prototipi (4). Tuttavia, in entrambi i casi, la quantità di fluido assorbito è inferiore alle aspettative. I designer decidono quindi di abbandonare entrambe le soluzioni (5). Per distaccarsi dalle soluzioni sviluppate, riformulano il compito della medicazione in termini funzionali astratti (6). Formulano anche la soluzione delle dita della rana in termini funzionali astratti prima di cercare nuove analogie per risolvere il compito (7). Ciò porta a un'analogia più astratta con le dita della rana: anziché copiare l'intera micro- e nanostruttura delle dita, i designer integrano una piccola sacca riempita di medicina nella medicazione adesiva. La superficie esagonale della sacca si adatta alle forme del corpo dei diversi utenti. I canali tra gli esagoni sono porosi in modo che il liquido venga lentamente emesso sulla ferita quando l'utente tocca la medicazione (Farzaneh, Lindeman, 2019).

Pur essendo stati condotti numerosi studi per esplorare la creazione di parti 4D mediante l'utilizzo di differenti metodologie di produzione, stimoli, materiali, comportamenti e forme programmabili, risulta evidente la mancanza di una comprensione dettagliata dei parametri di progettazione che necessita di ulteriori approfondimenti; ad esempio risulta necessario disporre di un modello matematico che permetta di prevedere il comportamento della struttura realizzata, l'introduzione di diversi parametri e la valutazione dei loro effetti sulla progettazione di stampa 4D risulterebbe quindi in grado di accelerare lo sviluppo del campo.

Secondo Chen et al., la maggior parte dei problemi inversi viene risolta attraverso il processo di tentativi ed errori. Pertanto, l'introduzione di un metodo sistematico e definito rappresenterebbe un fattore di potenziamento dell'efficacia del processo di progettazione e struttura della stampa 4D. Inoltre, Kantaredidy ha sottolineato l'importanza di linee guida di progettazione che collegano le forme fondamentali alle forme temporanee, le quali risultano ancora essenziali per consentire ai progettisti di costruire strutture avanzate basate su SMP. Inoltre, la mancanza di comprensione della formulazione di progettazione della tecnologia di stampa 4D rappresenta un ostacolo allo sviluppo di questa tecnologia. Nikkanen ha ulteriormente evidenziato che uno dei principali ostacoli nella stampa 4D è la mancanza di una comprensione

4.3 / Definizione di tool strategici

La progettazione per la stampa 4D presenta sfide complesse che richiedono una conoscenza avanzata di tecniche di progettazione, modellazione e materiali. Questa tecnologia consente la creazione di oggetti tridimensionali che possono essere programmabili e auto-assemblati, attraverso l'utilizzo di materiali intelligenti e l'impiego di processi di stampa avanzati. Le fasi del processo di progettazione per la stampa 4D comprendono la progettazione iniziale, la simulazione, la modellazione, la prototipazione e la produzione.

Di seguito vengono riportate le attività necessarie per progettare guidati dal comportamento, e dalle opportunità derivate, dei materiali intelligenti, usando lo stesso approccio per il design bio-ispirato di Farzaneh, Lindeman, 2019:

Pianificazione: La pianificazione di un progetto per la progettazione richiede una considerevole attenzione alla natura interdisciplinare della progettazione. In particolare, l'integrazione del lavoro di biologi ed ingegneri è essenziale e diversi punti di partenza per il progetto devono essere considerati. Inoltre, specifiche sfide associate alla manifattura additiva di materiali intelligenti devono essere prese in considerazione.

Astrazione: L'astrazione costituisce un elemento fondamentale del processo di progettazione per la manifattura additiva di materiali intelligenti. Il designer è chiamato a condurre l'astrazione in modo continuo lungo l'intero progetto, siano essi compiti tecnici o ricerche di ispirazione biologica, con l'obiettivo di astrarre sistemi tecnici e biologici per poterli comparare e formulare analogie utili per il trasferimento delle soluzioni innovative.

Ricerca: La ricerca, soprattutto quella relativa all'individuazione di fonti di ispirazione biologica, rappresenta un elemento di cruciale importanza nel processo di progettazione bio-ispirata per la manifattura additiva di materiali intelligenti. L'utilizzo di diversi metodi di ricerca è necessario per individuare fonti di ispirazione biologica rilevanti e applicabili al progetto.

Analisi e confronto: Un'accurata analisi e confronto dei sistemi tecnici e biologici costituisce una fase essenziale del processo di progettazione. Esempi di progetti bio-ispirati falliti a causa di soluzioni biologiche non applicabili in ambiente tecnico sono frequenti, pertanto, è fondamentale l'analisi attenta e il confronto dei sistemi tecnici e biologici per assicurare il successo dell'applicazione del design per la manifattura additiva di materiali intelligenti.

Trasferimento: Il trasferimento di analogie e tecnologie costituisce l'attività centrale del processo di progettazione per la manifattura additiva di materiali intelligenti. Una preparazione adeguata e il supporto sufficiente sono necessari per garantire il trasferimento efficace e il conseguente sviluppo di soluzioni tecniche innovative.

1

analisi

quale problema può risolvere il comportamento del materiale?

2

applicazione

tecnologie necessarie e modellazioni strutturali

3

valutazione

comparazione risultati

4

prototipazione

prove finali e produzione

Nel contesto della progettazione per la stampa 4D, diversi strumenti strategici possono essere impiegati dai professionisti del design per affrontare le sfide complesse che questa tecnologia comporta. In particolare, la creatività e il pensiero divergente possono rappresentare un elemento fondamentale per l'ideazione di soluzioni innovative e fuori dagli schemi. Grazie alla possibilità di creare oggetti tridimensionali che possono essere programmabili e auto-assemblati, la stampa 4D offre ampie prospettive di applicazione della creatività nella progettazione. Inoltre, l'uso di software specializzati per la simulazione e la modellazione risulta cruciale per disegnare oggetti tridimensionali in grado di rispondere in maniera appropriata a stimoli esterni. La progettazione per la stampa 4D richiede poi una comunicazione efficace e una collaborazione interdisciplinare tra i professionisti del design e gli esperti in ingegneria e biologia, in modo da garantire che il progetto sia fattibile e realizzabile. Infine, la capacità di rimanere costantemente aggiornati sulle nuove tendenze e tecnologie emergenti nel contesto della stampa 4D rappresenta un fattore cruciale per mantenere un vantaggio competitivo e per lo sviluppo di soluzioni tecniche innovative. Inoltre, la simulazione si configura come uno strumento centrale per valutare la funzionalità e l'efficacia dell'oggetto prima di procedere alla sua produzione. La progettazione per la stampa 4D richiede l'uso di materiali intelligenti e l'impiego di processi di stampa avanzati, che richiedono una conoscenza approfondita di tecniche di progettazione, modellazione e materiali. Un'adeguata pianificazione interdisciplinare, considerando le specifiche sfide associate alla manifattura additiva di materiali intelligenti, è fondamentale per il successo della progettazione. In tal senso, è importante anche l'astrazione continua, ovvero l'abilità di cogliere il nucleo comune di sistemi tecnici e biologici per estrarre analogie utilizzabili, la ricerca di ispirazioni biologiche rappresenta infatti un elemento cruciale della progettazione per la stampa 4D basata su materiali intelligenti. In particolare, l'utilizzo di diversi metodi di ricerca può aiutare a individuare fonti di ispirazione biologica rilevanti e applicabili al progetto. Un'accurata analisi e confronto dei sistemi tecnici e biologici costituiscono una fase essenziale della progettazione. L'analisi attenta e il confronto dei sistemi tecnici e biologici possono assicurare che le soluzioni innovative prodotte siano fattibili e realistiche. Infine, la flessibilità e la capacità di adattamento alle nuove tecnologie emergenti sono indispensabili nell'ambito della progettazione per la stampa 4D. Considerando che la tecnologia per la stampa 4D sta continuamente evolvendo e migliorando, è essenziale rimanere aggiornati sulle ultime tendenze e avanzamenti tecnologici per mantenere il vantaggio competitivo e l'innovazione progettuale. Questo delicato processo progettuale richiede quindi una combinazione di competenze tecniche, creatività e capacità di collaborazione interdisciplinare. Gli strumenti strategici elencati possono aiutare i professionisti del design a generare soluzioni innovative, funzionali e sostenibili, sfruttando appieno le opportunità offerte dalla stampa 4D basata su materiali intelligenti.

Attualmente, la maggior parte dei materiali utilizzati nella stampa 4D sono polimeri che hanno proprietà di memoria di forma, come l'acido polilattico (PLA) e il poliuretano termoplastico (TPU), tuttavia, negli ultimi anni sono state sviluppate nuove classi di materiali per la stampa 4D, tra cui materiali metallici e compositi che offrono proprietà meccaniche e termiche superiori rispetto ai polimeri. Ad esempio, un team di ricerca dell'Università di Harvard ha sviluppato un materiale composto da alluminio e poliuretano che può essere stampato in 3D e successivamente piegato in una forma predeterminata quando viene riscaldato a una temperatura specifica. Inoltre, ci sono anche nuovi materiali biologici per la stampa 4D, come il collagene e l'elastina, che possono essere utilizzati per creare tessuti e organi umani artificiali. Altre ricerche si stanno concentrando sulla stampa 4D utilizzando materiali attivati dalla luce, come idrogel fotoattivi, che possono essere attivati da specifici stimoli luminosi per cambiare forma.



5.1 / Progettare l'adattività e la responsività

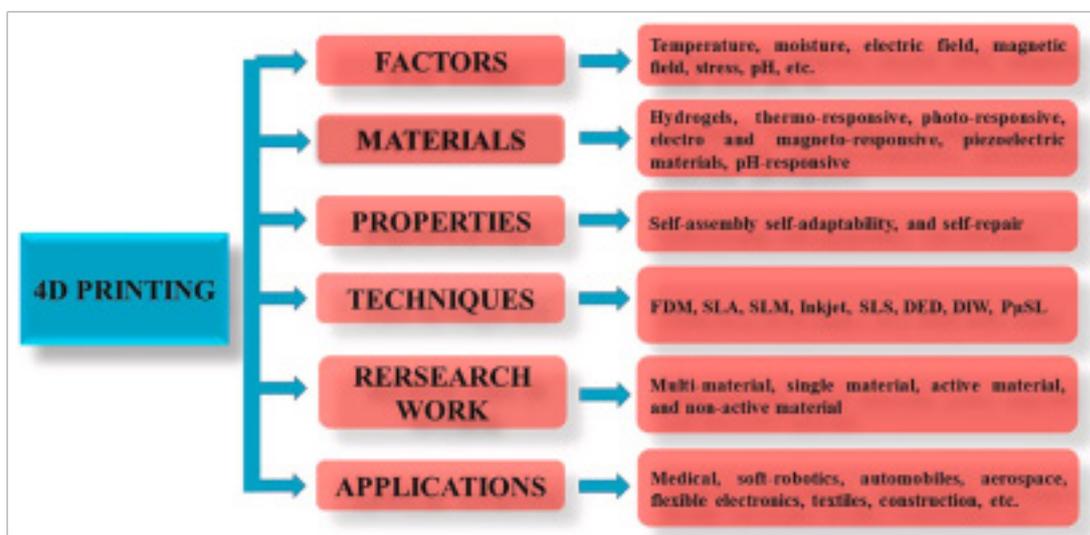
La stampa 4D di materiali intelligenti offre molte possibilità innovative per il product design, fornendo numerosi potenziali utilizzi in vari settori. Alcuni esempi specifici includono la progettazione di prodotti adattivi, la progettazione di prodotti a ciclo di vita lungo, la progettazione di prodotti funzionali e la progettazione di prodotti personalizzati. L'uso di materiali intelligenti nella stampa 4D consente ai prodotti di adattarsi a una varietà di stimoli esterni, come i cambiamenti di temperatura, che possono alterare la loro forma e proprietà, portando allo sviluppo di una progettazione di prodotti adattivi. Questo offre particolari vantaggi in settori come i dispositivi medici, dove i prodotti possono essere progettati per adattarsi alle specifiche esigenze del paziente. La progettazione di prodotti a ciclo di vita lungo è un'altra possibile applicazione, dove materiali intelligenti autosanificanti possono essere incorporati nel processo di stampa 4D, riducendo la necessità di riparazioni o sostituzioni. La progettazione di prodotti funzionali e personalizzati è facilitata dall'uso di materiali intelligenti nella stampa 4D, consentendo la creazione di prodotti con un elemento reattivo o interattivo. Gli esempi includono abbigliamento e tessuti, materiali da costruzione, prodotti per il benessere, prodotti per la sicurezza e prodotti per il tempo libero. Nel complesso, le potenziali applicazioni di materiali intelligenti nella stampa 4D sono ampie e hanno la capacità di rivoluzionare molte aree della progettazione, creando prodotti che sono reattivi, adattivi ed efficienti nel soddisfare le esigenze degli utenti. Lo sviluppo continuo e la ricerca su questa tecnologia porteranno a ulteriori possibilità di innovazione e crescita in molti settori industriali.

La responsività di un materiale si riferisce alla capacità del prodotto di rispondere a specifici stimoli ambientali, come la temperatura, la luce o la pressione, modificando le sue proprietà fisiche e chimiche. Ad esempio, i materiali termoresponsivi possono modificare il loro stato fisico in risposta a variazioni di temperatura, passando da uno stato solido a uno stato liquido o gassoso, permettendo la creazione di speciali dispositivi che sfruttano la temperatura come fattore discriminante. L'adattabilità di un materiale si riferisce, invece, alla capacità del prodotto di adattarsi alle esigenze dell'utente. Ad esempio, i materiali auto-rigeneranti possono riparare autonomamente eventuali danni subiti, prolungando la vita del prodotto e riducendo la necessità di interventi di manutenzione. La progettazione per la responsività e l'adattabilità di un materiale richiede una conoscenza approfondita dei principi fisici, chimici e biologici dei materiali intelligenti, nonché delle tecniche di progettazione e fabbricazione. Una corretta progettazione richiede infatti di considerare tutti gli aspetti legati alla funzionalità del prodotto e alla risposta del materiale alle varie condizioni ambientali. I materiali intelligenti possono essere utilizzati in molti settori industriali, dalla costruzione di edifici intelligenti, che cambiano forma e funzionalità in risposta alle condizioni ambientali, alla produzione di prodotti per la sicurezza, come caschi e abbigliamento protettivo, che si adattano alle situazioni di emergenza. In sintesi, la progettazione per la responsività e l'adattabilità di un materiale rappresenta una soluzione innovativa per creare prodotti altamente performanti ed efficienti, in grado di adattarsi alle esigenze dell'utente e di migliorare la qualità della vita. Tale approccio richiede una forte predisposizione all'innovazione e alla ricerca tecnologica, nonché una solida conoscenza delle proprietà dei materiali intelligenti e delle tecniche di progettazione per ottenere prodotti affidabili e di alta qualità.

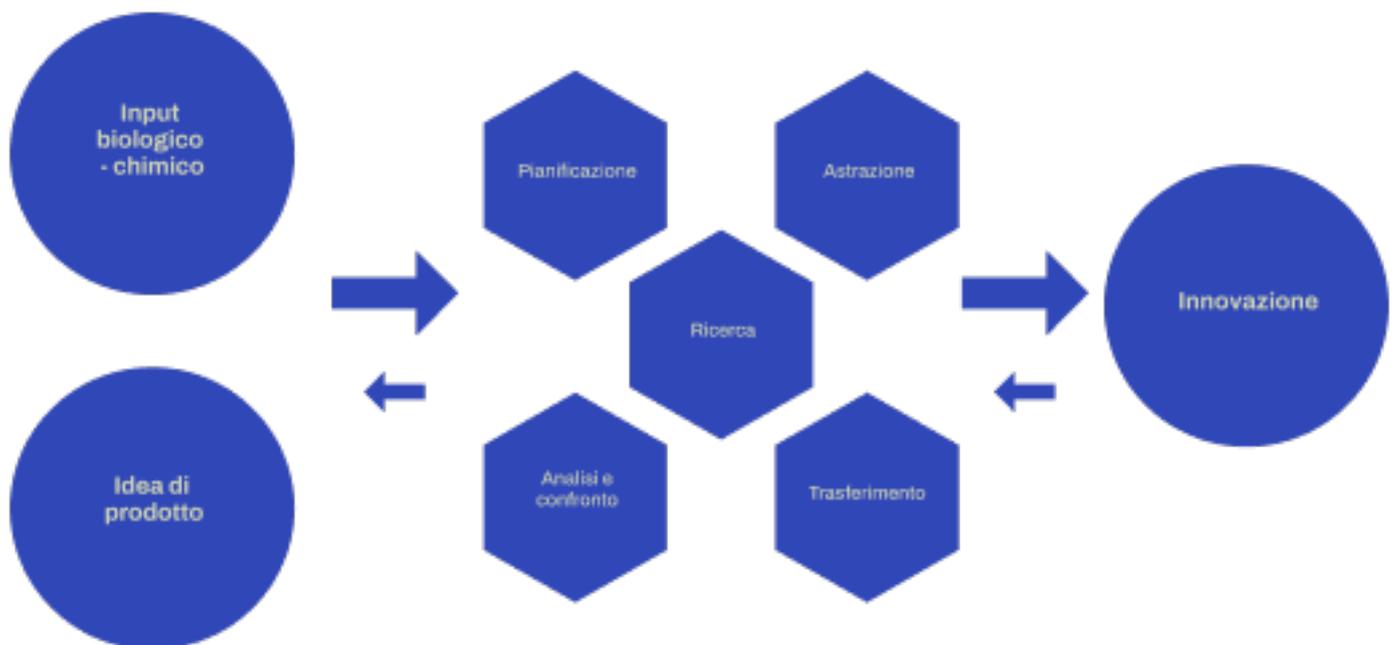
Nel contesto della progettazione per la stampa 4D, diversi strumenti strategici possono essere impiegati dai professionisti del design per affrontare le sfide complesse che questa tecnologia comporta. In particolare, la creatività e il pensiero divergente possono rappresentare un elemento fondamentale per l'ideazione di soluzioni innovative e fuori dagli schemi. Grazie alla possibilità di creare oggetti tridimensionali che possono essere programmabili e auto-assemblati, la stampa 4D offre ampie prospettive di applicazione della creatività nella progettazione. Inoltre, l'uso di software specializzati per la simulazione e la modellazione risulta cruciale per disegnare oggetti tridimensionali in grado di rispondere in maniera appropriata a stimoli esterni.

La progettazione per la stampa 4D richiede poi una comunicazione efficace e una collaborazione interdisciplinare tra i professionisti del design e gli esperti in ingegneria e biologia, in modo da garantire che il progetto sia fattibile e realizzabile. Infine, la capacità di rimanere costantemente aggiornati sulle nuove tendenze e tecnologie emergenti nel contesto della stampa 4D rappresenta un fattore cruciale per mantenere un vantaggio competitivo e per lo sviluppo di soluzioni tecniche innovative. Inoltre, la simulazione si configura come uno strumento centrale per valutare la funzionalità e l'efficacia dell'oggetto prima di procedere alla sua produzione: richiede l'uso di materiali intelligenti e l'impiego di processi di stampa avanzati, che richiedono una conoscenza approfondita di tecniche di progettazione, modellazione e materiali. Un'adeguata pianificazione interdisciplinare, considerando le specifiche sfide associate alla manifattura additiva di materiali intelligenti, è fondamentale per il successo della progettazione. In tal senso, è importante anche l'astrazione continua, ovvero l'abilità di cogliere il nucleo comune di sistemi tecnici e biologici per estrarre analogie utilizzabili, la ricerca di ispirazioni biologiche rappresenta infatti un elemento cruciale della progettazione per la stampa 4D basata su materiali intelligenti. In particolare, l'utilizzo di diversi metodi di ricerca può aiutare a individuare fonti di ispirazione biologica rilevanti e applicabili al progetto. Un'accurata analisi e confronto dei sistemi tecnici e biologici costituiscono una fase essenziale della progettazione. L'analisi attenta e il confronto dei sistemi tecnici e biologici possono assicurare che le soluzioni innovative prodotte siano fattibili e realistiche. Infine, la flessibilità e la capacità di adattamento alle nuove tecnologie emergenti sono indispensabili nell'ambito della progettazione per la stampa 4D. Considerando che la tecnologia per la stampa 4D sta continuamente evolvendo e migliorando, è essenziale rimanere aggiornati sulle ultime tendenze e avanzamenti tecnologici per mantenere il vantaggio competitivo e l'innovazione progettuale.

Questo delicato processo progettuale richiede quindi una combinazione di competenze tecniche, creatività e capacità di collaborazione interdisciplinare. Gli strumenti strategici elencati possono aiutare i professionisti del design a generare soluzioni innovative, funzionali e sostenibili, sfruttando appieno le opportunità offerte dalla stampa 4D basata su materiali intelligenti.



I materiali intelligenti devono possedere due abilità chiave: la sensibilità agli stimoli e la stampabilità e la selezione dei materiali per la stampa 4D dipende dalle applicazioni intese e dal metodo di stampa utilizzato. In particolare, i materiali selezionati devono essere in grado di rispondere ad uno specifico stimolo e di essere stampati in modo preciso per ottenere la forma desiderata. Gli SMP e gli idrogeli rappresentano i materiali più recenti utilizzati nella stampa 4D, principalmente sensibili allo stimolo del calore. Tuttavia, per creare strutture stampate 4D sensibili ad altri stimoli, come la luce, il campo elettrico e magnetico, è necessario focalizzarsi sulla creazione di compositi di SMP e idrogeli. Gli LC elastomeri (LCE) consentono un'attuazione reversibile della forma con proprietà meccaniche relativamente migliorate, grazie alla loro capacità di allineare molecole e cambiare forma in risposta ad uno specifico stimolo. I materiali magnetoattivi sono stati utilizzati con successo nella stampa 4D con attivazione veloce e a controllo remoto. Nonostante questi avanzamenti, i metodi di stampa 3D non sono sempre applicabili ai materiali intelligenti utilizzati nella stampa 4D. Lo sviluppo di nuovi materiali per la stampa 4D richiede la modifica dei metodi di stampa 3D esistenti. Tuttavia, la continua ricerca e sviluppo di nuovi materiali e tecniche di stampa avrà un impatto significativo sull'applicazione della stampa 4D in una vasta gamma di settori, dalla robotica alla medicina.



5.2 / Material-driven design

La progettazione di un prodotto richiede un approccio sistematico e prevede una serie di fasi ben definite. Tuttavia, questo metodo non tiene conto dell'esperienza legata all'utilizzo dei materiali, che invece è fondamentale per la progettazione di esperienze uniche ed efficaci. Per questo motivo, è stato sviluppato il Metodo di Progettazione Driven by Material (MDD), che si concentra sulla comprensione del materiale e del dominio, la creazione di obiettivi di progettazione e la concettualizzazione di un'esperienza per i materiali. Il MDD prevede l'analisi delle esperienze degli utenti, delle proprietà fisiche del materiale e la creazione di modelli per evocare l'esperienza desiderata. Questo metodo è stato applicato a diversi progetti, tra cui il design con compositi a base di fibre naturali, bio-plastiche, fondi di caffè, legno liquido e compositi computazionali.

Può essere utilizzato in tre scenari: la progettazione con un materiale conosciuto, sconosciuto o semi-sviluppato. In ogni caso, il metodo consente di definire nuove aree di applicazione e generare feedback per ulteriori sviluppi di materiali. L'approccio MDD è stato dimostrato essere efficace perché si concentra sulla progettazione di esperienze per i materiali, piuttosto che solo sugli aspetti ingegneristici e tecnici. Inoltre, è un approccio iterativo che permette di valutare l'esperienza dell'utente, i materiali disponibili e la fattibilità del design.

Costruito sulla base degli elementi della progettazione delle esperienze, le attività per creare i requisiti di progettazione e gli obiettivi e concettualizzarli per l'esperienza dei materiali sono raccolti nei seguenti passaggi principali in MDD (Karana et al. 2015):

- Comprendere la situazione attuale: come il materiale a nostra disposizione viene valutato dagli utenti previsti, come viene esperito a livello sensoriale, interpretativo, affettivo e performante, e come queste esperienze si rapportano alle proprietà fisiche (ingegneristiche) del materiale.
- Dopo aver analizzato e interpretato i risultati, che rivelano esperienze attuali positive e negative del materiale, il designer prevede le intenzioni di progettazione per una "nuova" esperienza dei materiali.
- Manifestando i modelli per evocare l'esperienza dei materiali prevista, il designer crea e materializza concetti che realizzano la transizione dall'intento di progettazione alla progettazione di materiali/prodotti.

In conformità con la metodologia di Wilberg per la ricerca sul design dell'interazione centrato sui materiali, l'organizzazione delle fasi dovrebbe consentire un pensiero di andata e ritorno tra i "dettagli", cioè gli studi sui materiali che si concentrano sulle proprietà e sulle caratteristiche del materiale, e la "totalità", cioè il modo in cui il materiale viene affrontato dal punto di vista dell'utente, e valutato all'interno di una composizione, così come all'interno di un intero situazionale. Di conseguenza, la creazione di senso, che comporta la riflessione sullo scopo del materiale all'interno di una totalità situazionale, è l'obiettivo costante lungo tutto questo processo (Karana et al. 2015).

Apprendendo dai materiali, esaminando i vantaggi e gli svantaggi delle fasi del processo di progettazione e attingendo, abbiamo sviluppato il Metodo di Progettazione Driven by Material (MDD) per facilitare i processi di progettazione in cui i materiali sono il driver principale. Immaginiamo tre scenari in cui i designer possono applicare il metodo MDD (Karana et al. 2015).

[Scenario 1]

Progettazione con un materiale relativamente conosciuto, accompagnato da un campione completamente sviluppato (ad esempio, quercia, titanio, polistirene, ecc.). Anche se il materiale è probabile che abbia alcuni significati consolidati in determinati contesti (ad esempio, tradizionale, accogliente, ad alta tecnologia, ecc.), il designer cerca nuove aree di applicazione per evocare nuovi significati e suscitare esperienze utente uniche.

[Scenario 2]

Design con un materiale relativamente sconosciuto, accompagnato da un campione completamente sviluppato (ad esempio, legno liquido, D3O, materiali termocromici, ecc.). Il materiale non è probabilmente legato a significati consolidati, il che consente al designer di definire aree di applicazione attraverso le quali possono essere introdotte esperienze utente uniche, identità per i materiali e nuovi significati.

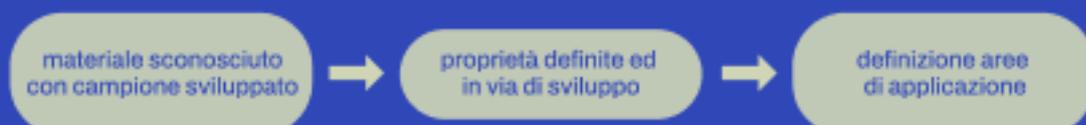
[Scenario 3]

Progettazione con una proposta di materiale con campioni semi-sviluppati o esplorativi (ad esempio, compositi di scarti alimentari, materiali viventi composti da cellule batteriche, tessuti stampati in 3D, OLED flessibili, ecc.). Poiché il materiale è semi-sviluppato (ovvero una proposta), le sue proprietà devono essere ulteriormente definite attraverso il processo di progettazione in relazione a una specifica area di applicazione, anche per generare feedback per ulteriori sviluppi di materiali (ad esempio, elasticità di un composito di scarti alimentari, durata di un tessuto stampato in 3D, ecc.). Inoltre, poiché il materiale è nuovo, è difficile da riconoscere e ha bisogno del designer per proporre applicazioni significative attraverso le quali verranno suscitate esperienze utente e significati unici.

1



2



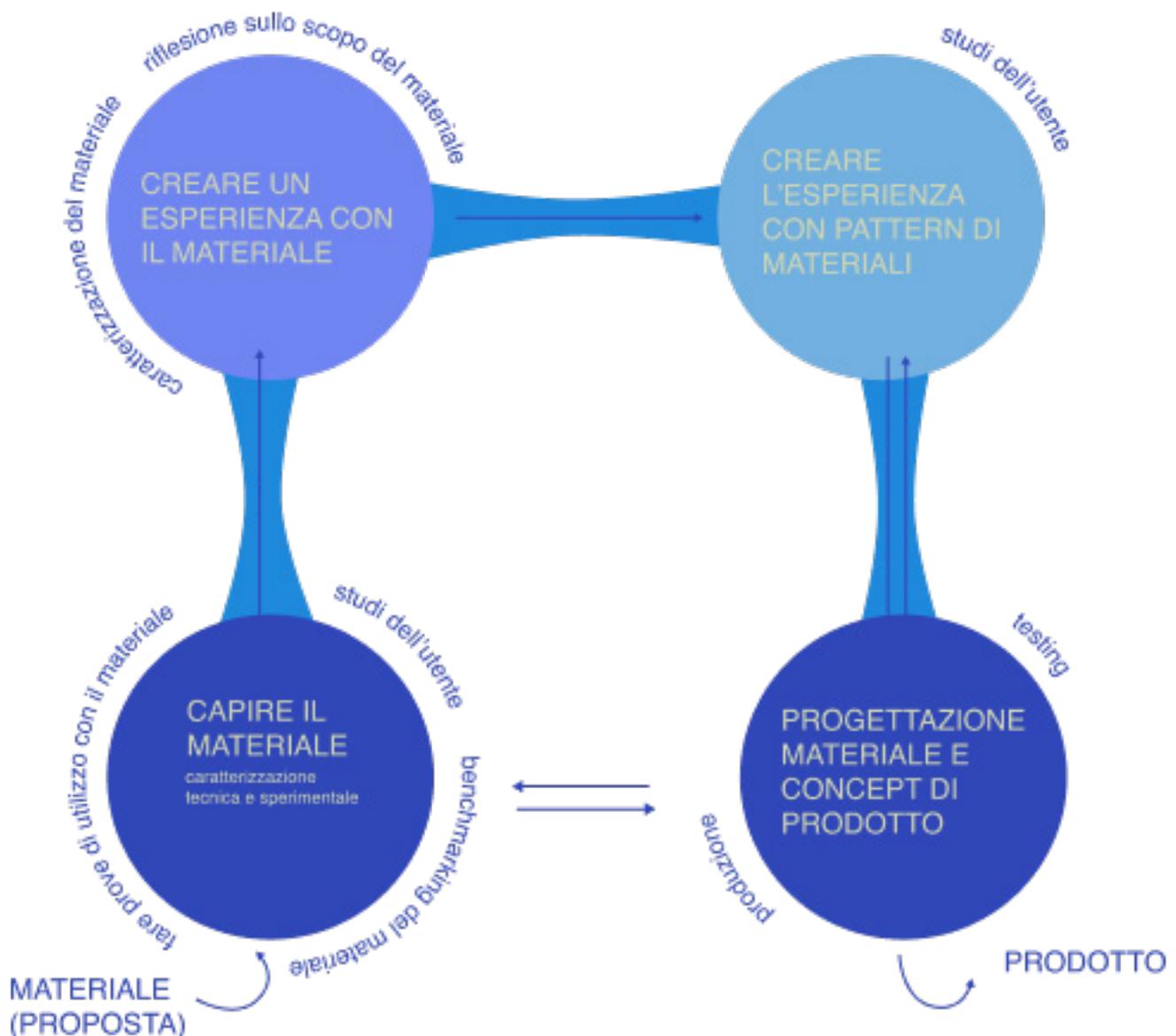
3



Lo schema illustra il Metodo MDD con quattro fasi principali presentate in modo sequenziale:

- Comprensione tecnica ed esperienziale del materiale
- Creazione di una visione esperienziale del materiale
- Manifestazione di pattern esperienziali del materiale
- Progettazione di Concetti di Materiale o Prodotto

Come raffigurato il processo MDD inizia con un materiale (o una proposta di materiale, in base ai tre scenari possibili precedentemente elencati) e termina con un prodotto e/o materiale ulteriormente sviluppato. Il metodo sottolinea il percorso di un designer dal tangibile all'astratto (cioè da un materiale a una visione esperienziale del materiale), e quindi dall'astratto al concreto, cioè da una visione esperienziale del materiale a materiali/prodotti fisicamente manifestati e ulteriormente sviluppati (Karana et al. 2015).



5.3 / Casi Studio

Il materiale è un medium. Comunica idee, credenze, approcci: ci spinge a pensare, sentire e agire in determinati modi; abilita e migliora funzionalità e utilità. L'esperienza dei materiali enfatizza questa funzione dei materiali, che è al tempo stesso tecnica ed esperienziale (Material Experience Lab).

In questo paragrafo vengono illustrati alcuni casi studio che utilizzano un approccio Material-Driven e che hanno una componente fondamentale nell'esperienza che il comportamento del materiale specifico riesce a fornire.

„Light Light di Alberto Meda per Alias, 1987

La sedia nasce dalla ricerca sperimentale sulla tecnologia dei compositi con l'intento di verificarne le possibilità d'utilizzo in oggetti d'uso domestico. I materiali compositi, un sandwich con il cuore in nido d'ape di Nomex (una speciale tipo di poliammide) e pelli di rivestimento in tessuto unidirezionali di carbonio, o Kevlar, sono generalmente utilizzati in ambito aerospaziale e dei veicoli da competizione per realizzare manufatti resistenti e leggeri. La sedia è l'occasione per mettere alla prova le prestazioni strutturali di questi materiali anisotropi, in una struttura che viene sollecitata direttamente dal peso dell'utente. L'obiettivo del progetto è quello di contenere al massimo il peso, per evidenziare le prestazioni strutturali. Per questo le sezioni della struttura sono 'tirate all'osso' ottenute 'per levare' con un approccio di natura scultorea. La comune idea di solidità e stabilità, creatasi nel tempo da una tradizione costruttiva basata sulla tecnologia del legno, del metallo e della plastica, si scontra con l'esilità della struttura di questa sedia. Il risultato formale non è condizionato da un linguaggio predeterminato ma dall'obiettivo di indagare il limite del possibile. In questo progetto, le problematiche costruttive e strutturali prescindono da vincoli di natura economica. La possibilità di disporre i tessuti nello stampo in modo controllato, distribuendo il materiale in funzione degli sforzi, richiede notevole manualità o l'uso di robot per automatizzare il taglio dei tessuti e la loro disposizione negli stampi. L'industrializzazione implica processi ampiamente artigianali malgrado si operi in ambito di 'tecnologie avanzate'. (Fonte: sito ufficiale Alberto Meda)



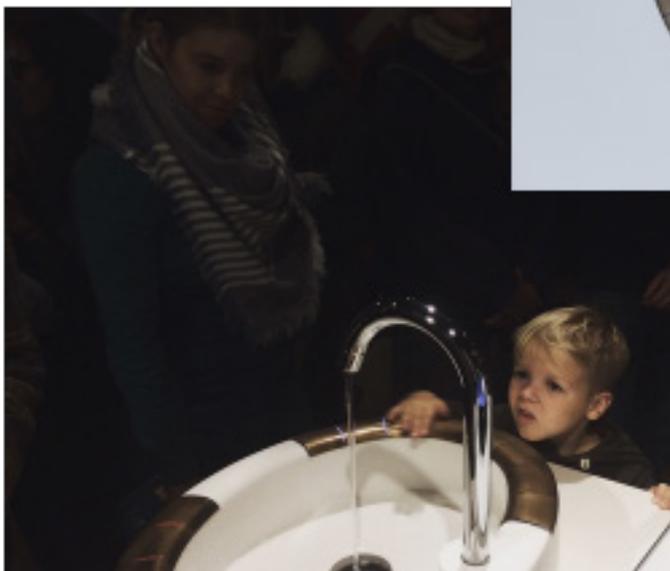
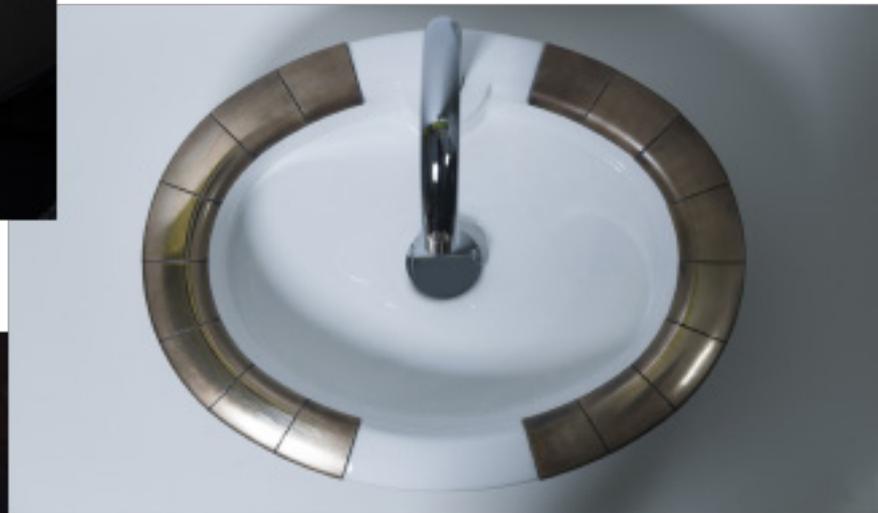
_Mushroom Packaging

Mushroom® Packaging ha creato MycoComposite™, una soluzione innovativa per l'incapsulamento che utilizza micelio e seme interno e spugnoso di canapa recuperato dai flussi di rifiuti della lavorazione della fibra di canapa. Questo materiale sostenibile è una valida alternativa alle schiume di plastica e viene personalizzato in soli sette giorni senza alcuna altra lavorazione. MycoComposite™ è biodegradabile e completamente decomponibile in 45 giorni, ritornando nutrienti al terreno, ed ha la proprietà idrofobica che lo rende resistente all'acqua. Questa proprietà lo rende versatile per applicazioni termiche e per spedizioni con sacchetti del ghiaccio soggetti a sciogliersi. L'adozione di Mushroom® Packaging come alternativa ai materiali in plastica non solo si traduce in una riduzione dell'inquinamento e delle emissioni di gas a effetto serra, ma può anche rafforzare la crescita delle piante come emendante attivo del suolo. Considerando l'elevato utilizzo di imballaggi in schiuma di plastica negli Stati Uniti (900.000 tonnellate metriche all'anno), l'utilizzo di materiali sostenibili diventa sempre più cruciale. Mushroom® Packaging è una soluzione ideale per l'economia circolare, in quanto si avvale del riciclo dei flussi di rifiuti per la produzione di prodotti di elevato valore. La produzione di Mushroom® Packaging contribuisce al sequestro del carbonio grazie all'utilizzo di canapa, che ha la capacità di sequestrare più carbonio per acro rispetto ad altri raccolti commerciali. Grazie all'uso del seme interno e spugnoso di canapa recuperato, Mushroom® Packaging dimostra che la produzione di nuovi materiali sostenibili può ridurre i rifiuti e mitigare il cambiamento climatico.



_Mizu // Concept e Design: Shen-Kao Cheng, Beatrice Chichiarelli, et al. 2015

Mizu è un lavandino che utilizza un'interazione unica, dove i gesti sono utilizzati per svelare la macchina tecnologica e sono metaforicamente collegati alle attività che il lavandino svolge. Ad esempio, per ottenere acqua calda, si deve strofinare rapidamente una porzione della vasca, come se si stessero scaldando le mani; per raffreddare l'acqua, si deve sfiorare delicatamente lo stesso lato come se si stesse sventolando un piatto caldo per raffreddarlo. Questi gesti sono possibili grazie ai sensori posti lungo la vasca del lavandino. La rivelazione della tecnologia dietro il lavandino serve come gateway per comprendere come i nostri prodotti quotidiani sono costruiti e come possiamo diventare consapevoli del loro impatto sul nostro ambiente. Inoltre, Mizu presenta anche alcune domande filosofiche su come ci stiamo rapportando alla complessità delle tecnologie che utilizziamo quotidianamente. Mizu mostra come le interazioni possono essere riprogettate per svelare la tecnologia dietro un prodotto e dare un nuovo significato alle attività quotidiane che diamo per scontate.



_MycTex di Aniela Hoitink

Il micelio costituisce un promettente materiale per il design degli imballaggi grazie alle sue notevoli proprietà, tra cui la capacità di espandersi e formare una struttura che ricorda la schiuma di polistirolo ma che allo stesso tempo è biodegradabile. Tuttavia, l'utilizzo di questo materiale si è finora limitato a strutture voluminose coltivate in stampi predefiniti. Recentemente, la designer Aniela Hoitink ha esplorato nuovi modi per utilizzare il micelio nella creazione di tessuti, sperimentando con l'incollaggio di forme a disco ottenute dalla coltivazione separata di singoli pezzi di materiale. Questa innovativa applicazione ha permesso di sfruttare appieno le potenzialità del micelio come materiale riconfigurabile e dinamico, eliminando la necessità di tagli e cuciture. La comprensione dei materiali e delle tecnologie come compositi e assemblaggi riconfigurabili, dinamici ed emergenti, che possono essere direttamente fabbricati, orchestrati e manipolati dai designer, rappresenta un significativo passo avanti nell'ambito delle capacità dei materiali. Questo approccio alla progettazione dei materiali apre nuovi scenari creativi e consente di sfruttare a pieno le caratteristiche uniche dei materiali, portando alla scoperta di nuovi modi di utilizzo e di nuove applicazioni.



5.4 / Ipotesi di sviluppo: Lyfe-driven design

Se i materiali intelligenti sono una categoria di materiali che manifestano comportamenti e proprietà che sono riconducibili alle stesse proprietà che si manifestano, in maniera più esplicita ed in maniera più o meno simultanea, nei sistemi biologici. Come già detto, questi sistemi presentano proprietà avanzate come la dissipazione, l'autocatalisi, l'omeostasi e l'apprendimento. Potremmo quindi trattare questi materiali che hanno la capacità di rispondere alle sollecitazioni ambientali, cambiare forma, adattarsi e perfino auto-ripararsi come trattiamo i sistemi biologici che manifestano capacità di cambiare forma e comportamento in base ai cambiamenti ambientali, potendo gestire e utilizzare, incanalare, a nostro favore, le proprietà che da questo si manifestano.

Attualmente, gli scienziati e i ricercatori stanno lavorando per sviluppare materiali intelligenti sempre più avanzati che presentino proprietà sempre più sofisticate. Ad esempio, stanno sviluppando materiali che possono apprendere da sollecitazioni esterne e che possono modificare il loro comportamento in base a queste informazioni. Questi materiali possono anche essere programmati per reagire a specifici stimoli, come la luce o il calore, e possono anche essere utilizzati per creare prodotti adattivi che possono cambiare forma in base alle esigenze dell'utente, la stampa 4D di materiali intelligenti rappresenta una delle frontiere più avanzate della tecnologia ed è più che adatta alla risoluzione di molte delle problematiche incontrate fino ad ora, e l'obiettivo è quello di sviluppare materiali che siano in grado di adattarsi e rispondere alle esigenze in modo sempre più sofisticato e preciso; questo potrebbe portare a nuove soluzioni per molti problemi di progettazione, e aprire la strada a nuove opportunità per la produzione industriale.

Il concetto di "lyfe" si fonda sull'individuazione di materiali intelligenti che possono sviluppare alcune delle proprietà dei tessuti biologici, come la capacità di autorigenerazione, di adattarsi all'ambiente circostante, di produrre energia e di imitare altre proprietà biologiche. La ricerca su questi materiali è ancora in fase di sviluppo, ma l'obiettivo finale è di integrare questi materiali in processi produttivi più sostenibili ed efficienti. Le possibili applicazioni dei materiali "lyfe" sono molteplici e riguardano diversi settori industriali, tra cui abbigliamento, edilizia, elettronica, automobili e medicina.



5.4.1 / Classificazione dei materiali con caratteristiche Lyfe

In questo contesto, l'utilizzo dei materiali "lyfe" nella manifattura additiva rappresenta una significativa innovazione tecnologica che introduce nuove potenzialità applicative in diversi settori industriali. I tessuti intelligenti rappresentano uno dei primi e più promettenti campi di applicazione, in grado di migliorare notevolmente il comfort dell'indossatore attraverso la creazione di tessuti più porosi e reattivi alla temperatura corporea o all'umidità.; la produzione di sensori ambientali che possono monitorare in tempo reale l'ambiente circostante e inviare dati ad altri dispositivi. Questi sensori possono essere creati utilizzando materiali "lyfe" in grado di reagire alle variazioni di temperatura o umidità, ampliando le potenzialità di questi dispositivi. Ed ancora, l'utilizzo dei materiali "lyfe" nella produzione di protesi personalizzate rappresenta un significativo passo avanti nel campo della medicina, le protesi realizzate con questi materiali rappresentano una soluzione su misura per i pazienti, migliorando notevolmente la loro qualità di vita. Nella produzione industriale, la creazione di stampi personalizzati utilizzando materiali "lyfe" consente di adattare i cicli produttivi alle esigenze specifiche dei prodotti, riducendo i tempi di produzione e migliorando l'efficienza energetica dei processi industriali. La creazione di pezzi architettonici personalizzati rappresenta una nuova frontiera nell'ambito dell'architettura e dell'edilizia sostenibile. L'utilizzo di materiali "lyfe" consente di creare elementi architettonici reattivi alle variazioni di temperatura o umidità, migliorando l'efficienza energetica degli edifici e garantendo un maggiore comfort all'interno degli spazi abitativi.

In conclusione, l'utilizzo dei materiali "lyfe" nella manifattura additiva rappresenta un'importante innovazione tecnologica in grado di ampliare le potenzialità applicative dell'industria manifatturiera in diversi settori. Le loro proprietà reattive ai cambiamenti ambientali consentono di creare prodotti su misura per le esigenze specifiche dei singoli utenti e di garantire un elevato livello di comfort e sostenibilità ambientale.

Per questo motivo si è manifestata ancora una volta di mettere a sistema questi materiali, in modo da avere una panoramica completa su tutte le opportunità che si presentano nel loro utilizzo nella produzione industriale, ma soprattutto (ed è in questo campo che questo studio si concentrerà quasi esclusivamente) nella produzione additiva.

Una volta appresi i vari metodi e approcci alla classificazione dei materiali, sia intelligenti che non, per le finalità della ricerca si è ritenuto opportuno che, data la natura della ricerca (volta all'individuazione ed alla valorizzazione dei materiali che avessero caratteristiche in comune con i sistemi biologici) la classificazione venisse guidata da due macro-temi guida che potessero classificare allo stesso tempo diverse classi di materiale senza perdere il focus.

Le categorie di classificazione scelte: Proprietà da un lato e Stimoli dall'altro, riescono quindi a definire con precisione i materiali e allo stesso tempo fornire una sorta di guida per la comprensione degli stessi.



Classificazione per Proprietà

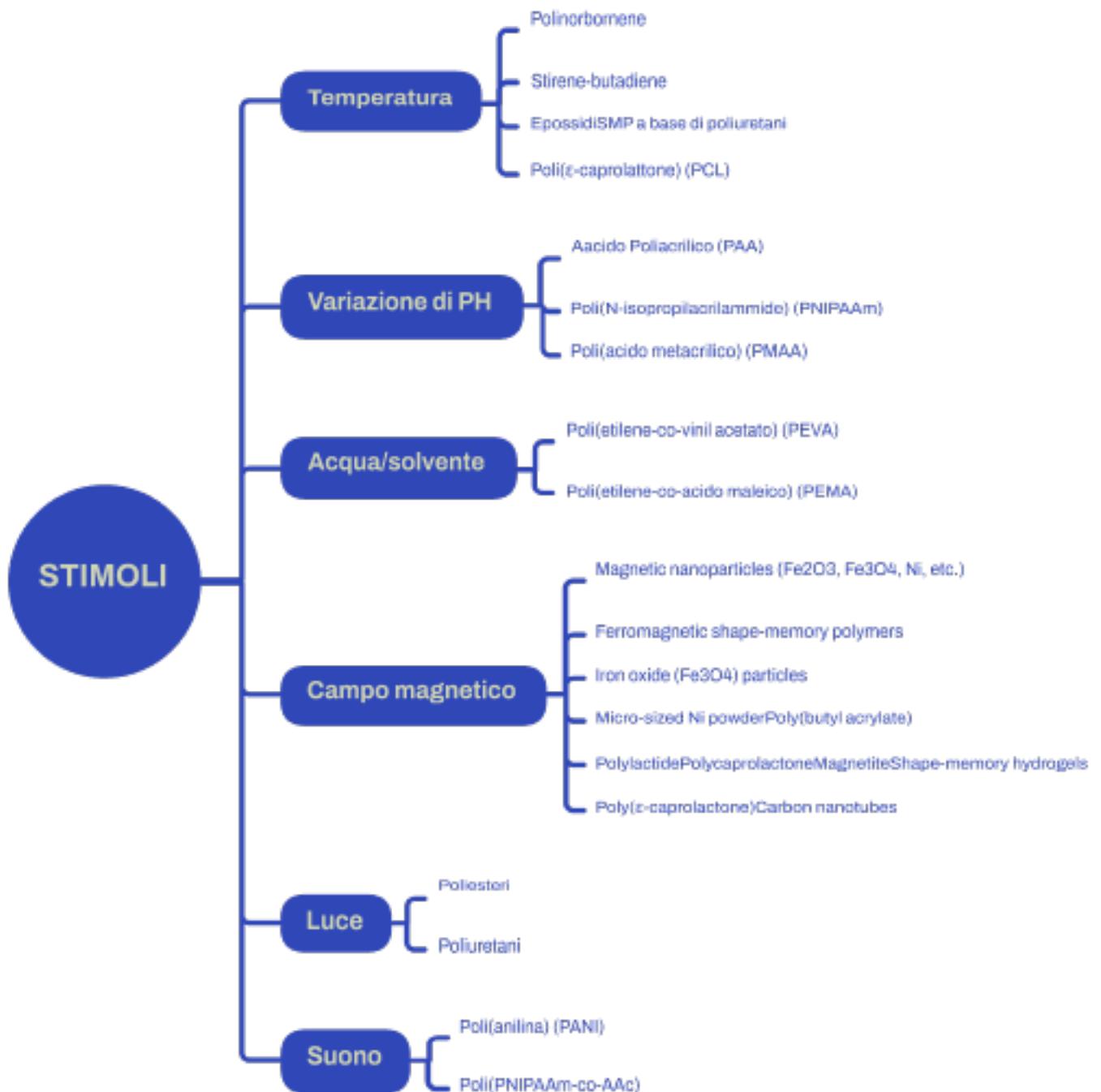
La classificazione dei materiali basata sulle loro proprietà ricopre un ruolo imprescindibile nella ricerca sui materiali intelligenti, poiché fornisce un approccio sistematico e organizzato per comprendere il loro comportamento e le possibili applicazioni. La suddivisione dei materiali intelligenti in categorie in base alle loro proprietà consente ai ricercatori di identificare le caratteristiche comuni che creano un approccio standardizzato per una migliore comprensione di questi materiali. Inoltre, tale approccio sistematico rende possibile la classificazione dei materiali in base al loro comportamento, semplificando la previsione delle loro prestazioni in diverse condizioni.

La classificazione delle proprietà consente inoltre di identificare il materiale ideale per determinate applicazioni, accelerando il processo di sviluppo e ricerca. Ad esempio, la classificazione dei materiali intelligenti in base alle loro conduttività termiche potrebbe portare allo sviluppo di materiali innovativi con proprietà migliorate: questo tipo di classificazione rappresenta un elemento critico per accedere alle loro potenzialità.

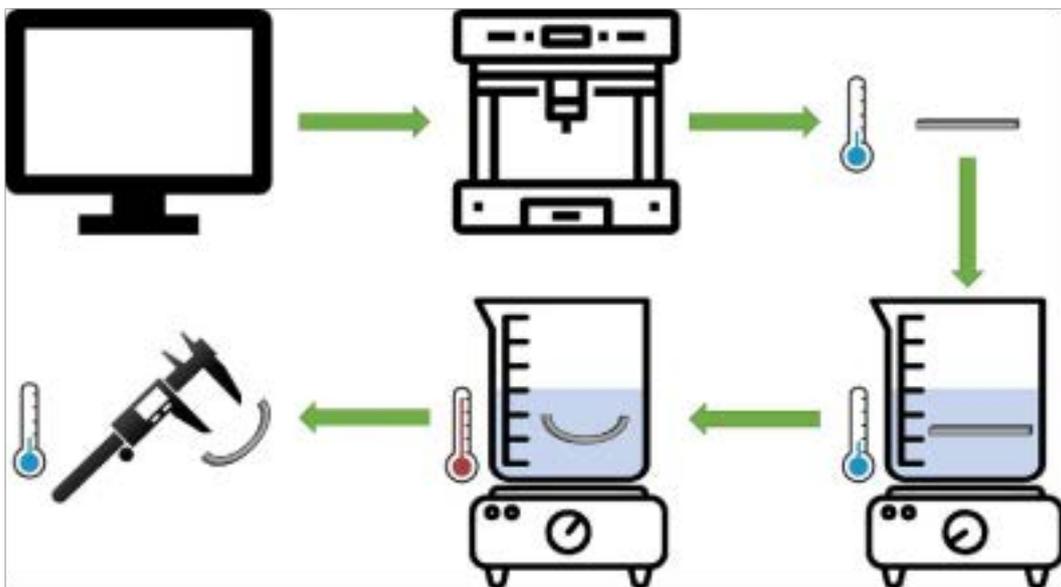
Classificazione per Stimoli

La capacità dei materiali intelligenti di modificare le loro proprietà fisiche o chimiche in risposta a stimoli esterni rappresenta una proprietà distintiva del loro comportamento. La classificazione per stimoli è una strategia fondamentale per individuare le potenziali applicazioni di questi materiali e consentire la progettazione di sistemi funzionali per ottimizzare le prestazioni desiderate. Le proprietà delle varie categorie di materiali intelligenti possono essere selezionate sulla base del loro comportamento rispetto a stimoli specifici, ad esempio, i materiali termoresponsivi sono usati per la somministrazione del farmaco e la bioingegneria tessutale, mentre i materiali piezoelettrici sono ideali per la rilevazione e l'attuazione nella robotica e l'aerospaziale.

La classificazione per stimoli consente ai ricercatori e ai progettisti di familiarizzare con le relazioni tra le proprietà del materiale e la risposta al stimolo, fornendo informazioni indispensabili per raggiungere le prestazioni desiderate. Tale classificazione rappresenta, pertanto, una strategia essenziale per lo sviluppo di materiali intelligenti che si adattino ai molteplici bisogni dell'industria.







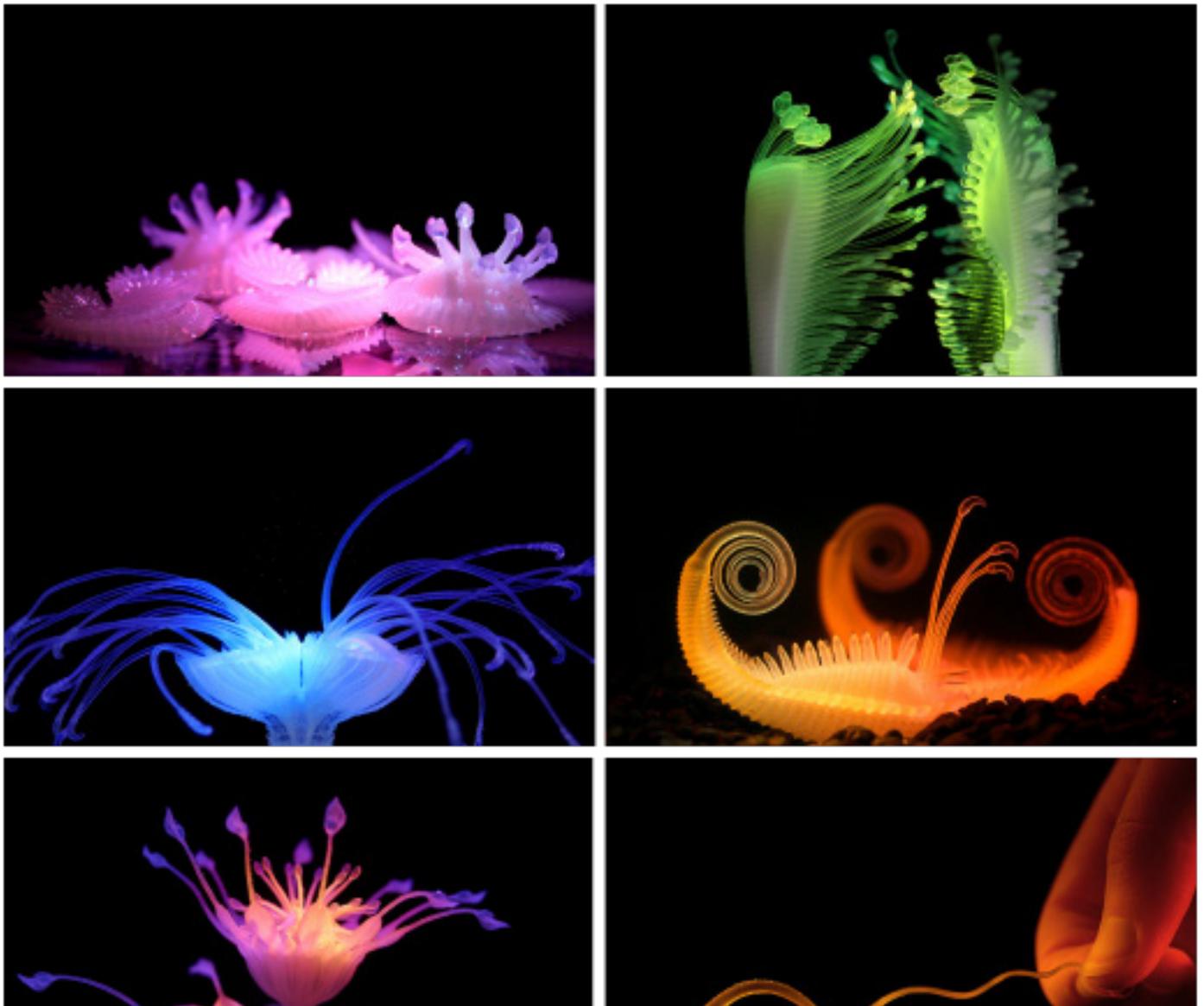
Il processo di fabbricazione e la configurazione sperimentale per gli attuatori stampati in 4D

5.4.3 / Casi studio

Hydrophytes, Nicole Hone, 2018

Gli Hydrophytes sono piante che vivono in acqua o in terreni molto umidi. Un esempio di 4D printing è il progetto Hydrophytes fatto da alcuni studenti in Nuova Zelanda. Gli studenti hanno creato oggetti che si piegavano e si muovevano come le piante quando l'acqua cambiava temperatura o pressione. Il progetto voleva mostrare come il 4DP potesse servire per fare cose utili e belle che si adattassero all'ambiente.

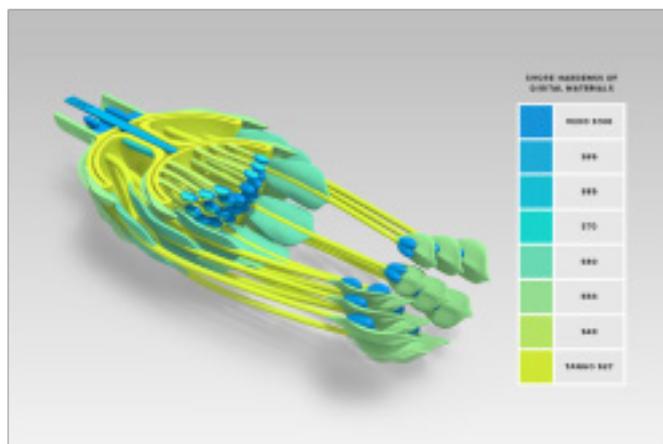
Gli Hydrophytes svolgono dagli obiettivi in linea con la loro struttura geometrica, e materica, ponendo un esempio di come la progettazione biomimetico non si debba limitare alla scelta del materiale di lavorazione, ma anzi debba essere un filo conduttore dall'inizio alla fine della vita del prodotto; gli hydrophytes infatti puliscono l'acqua, proteggono il terreno, danno cibo e riparo agli animali e prevengono le alluvioni, aiutando, possibilmente a risolvere alcuni problemi ambientali.



Il progetto Hydrophytes è stato ispirato dallo studio di libri e video di biologia e natura, nonché dalla fotografia di piante. Ogni Hydrophyte inizia con uno schizzo a matita per illustrare la sua forma e il meccanismo di movimento. Il concetto viene quindi modellato in 3D utilizzando una combinazione di software per creare la forma, la texture della superficie e le strutture interne. I design sono composti da diverse parti, la durezza di ognuna delle quali viene specificata in computer. La macchina Connex 3D stampa ogni modello come un oggetto omogeneo, in cui diverse miscele di resine a base di acrilico e altre resine gomme come la gomma termoplastica sono polimerizzate con la luce UV (Hone, 2018).

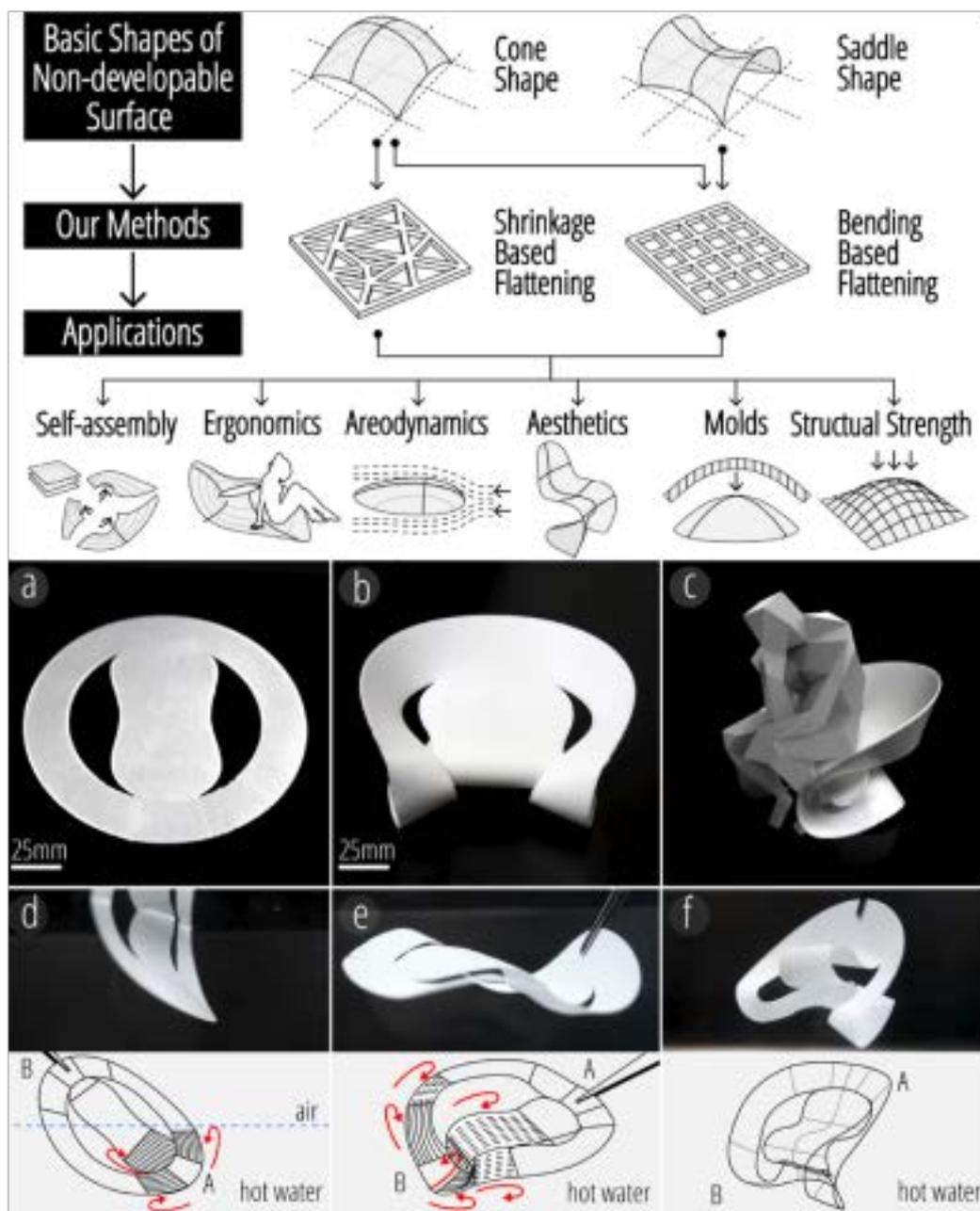
Il progetto è realizzato utilizzando la stampa multi-materiale, grazie alla tecnologia Polyjet di Stratasys, che, consente di stampare oggetti con una risoluzione di stampa molto elevata, offrendo un'ampia gamma di colori brillanti, texture e finiture, aumentando la capacità di creazione di oggetti utilizzando una miscela di resine acriliche (PMMA) e additivi per renderle a memoria di forma, polimerizzate tramite luce UV. In post-produzione lo stampato è stato poi pulito e i dettagli sono stati curati manualmente in modo da garantire la precisione dimensionale necessaria all'ottimizzazione delle funzioni degli oggetti.

L'applicazione di stampa multi-materiale 4D presentata da Hydrophytes illustra il concetto di oggetti generati dal computer (CGOs), simile al concetto degli effetti speciali digitali nel cinema. In entrambi i casi, il soggetto viene creato numericamente, ma la differenza è che i CGOs sono oggetti fisici che possono interagire in modo naturale con l'ambiente circostante.



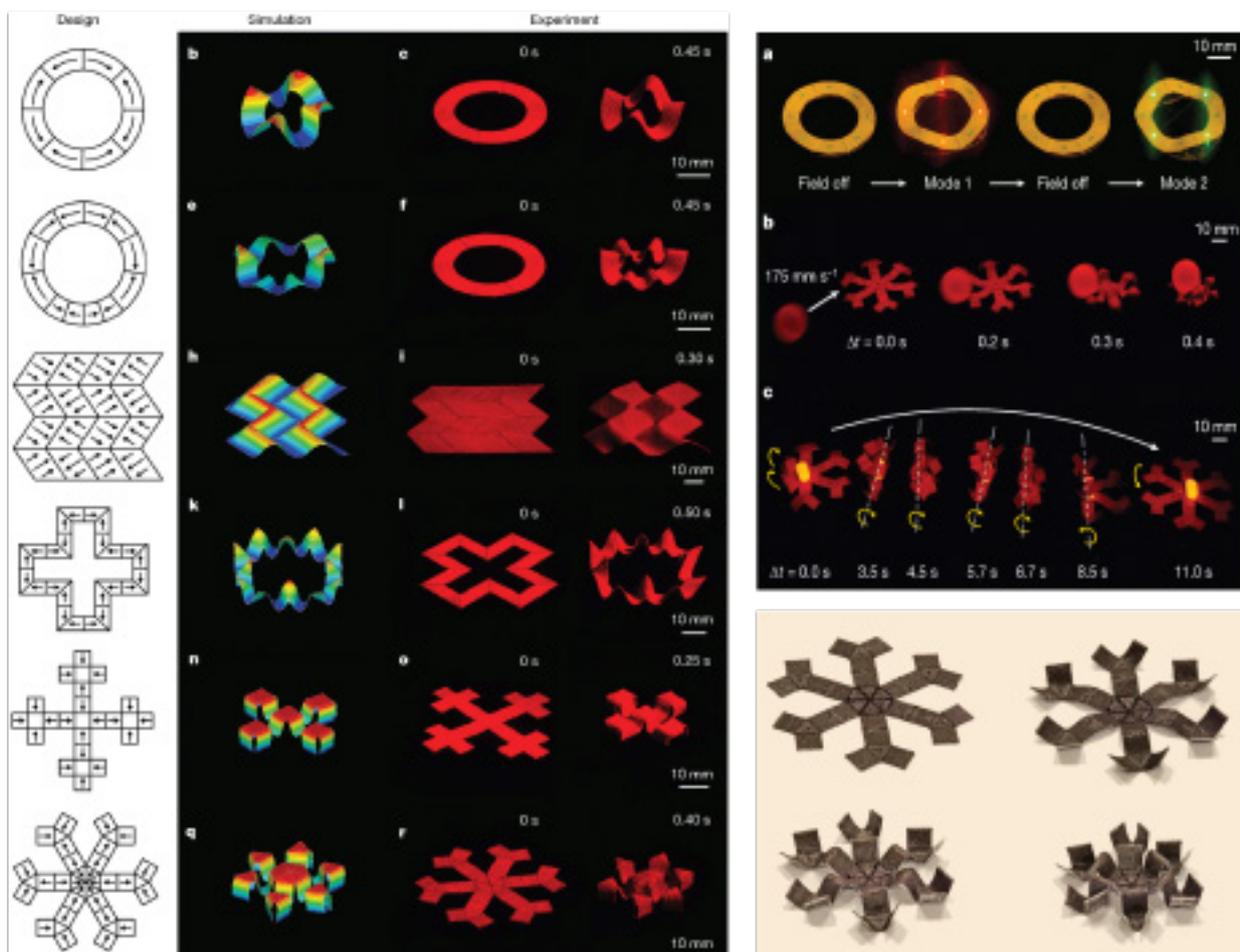
Self-Folding Chair, Byoungkwon An et al., 2017-2018

Byoungkwon An et al. descrivono un materiale termoplastico che cambia forma in base alla temperatura. Pezzi di arredamento auto-assemblanti possono ridurre i costi di spedizione e di packaging, e fornire maggiore comodità durante il trasporto. Con questo design di una sedia auto-piegante, questa tecnica potrebbe rivoluzionare il settore dell'arredamento e offrire nuove possibilità di personalizzazione e creatività. Una delle difficoltà maggiori è quella di prevedere il comportamento di un materiale auto-piegante in base alle variazioni del suo ambiente circostante o dei carichi applicati. La natura altamente dipendente dalle condizioni delle proprietà dei materiali termoplastici implica che il comportamento pieghevole degli oggetti realizzati con questi materiali potrebbe essere estremamente difficile da prevedere ed è influenzato da molteplici fattori rilevanti. Le limitazioni tecniche attuali implicano spesso che questi materiali non siano ancora adeguatamente sviluppati per la produzione in serie di prodotti commercializzabili.



Printing of ferromagnetic 4d structures, Yoonho Kim et al., 2019

Yoonho Kim et al. in un articolo pubblicato sulla rivista *Science*, hanno utilizzato un composito di elastomero con microparticelle ferromagnetiche e hanno applicato un campo magnetico alla bocchetta di erogazione durante la stampa per orientare le particelle e impartire una polarità magnetica ai filamenti stampati. Questo approccio permette di programmare domini ferromagnetici in materiali morbidi complessi stampati in 3D, che possono assumere forme diverse in base al campo magnetico esterno. Gli autori hanno dimostrato diverse applicazioni di questo metodo, come l'elettronica morbida riconfigurabile, un metamateriale meccanico che salta e un robot morbido che si arrampica, rotola, afferra oggetti in movimento veloce e trasporta una dose farmaceutica. Yoonho Kim et al. presentano un insieme di strutture planari bidimensionali che si trasformano rapidamente in forme complesse in 3D sotto l'azione di campi magnetici applicati di 200 mT a causa dei domini ferromagnetici programmabili.



6.2 / Casi studio

circulardesign.it di Alessio Franconi

Il design circolare è un approccio al design che mira a creare prodotti e sistemi che possono essere riutilizzati, riparati, rinnovati o riciclati. Il sito web <https://circulardesign.it> è una risorsa utile per designer e aziende interessate ad attuare il design circolare, poiché fornisce informazioni e strumenti per sostenere il passaggio verso modelli di business circolari, metodi di produzione sostenibili e design di prodotti circolari. La sezione "Design for X" del sito web, che si concentra sulla progettazione per l'economia circolare in varie fasi del ciclo di vita di un prodotto, tra cui riutilizzo, riparazione, rinnovamento e riciclaggio, è particolarmente rilevante per le aziende che desiderano adottare il design circolare. La pagina "Riutilizzo" fornisce una descrizione completa dell'importanza del riutilizzo di materiali e prodotti, poiché questo può ridurre drasticamente i rifiuti e le emissioni di carbonio. I casi di studio e gli esempi di soluzioni di design circolare presentati sul sito web forniscono informazioni su come le aziende possono ridisegnare i loro prodotti, servizi o modelli di business per renderli più circolari. Abbracciando i principi del design circolare, le aziende possono creare prodotti più sostenibili e contribuire ad un'economia più circolare e rigenerativa.

Circular Design

HOME DESIGN FOR X TOOL CONTRIBUTORS RESOURCES ▾ CONTRIBUTE CONTRIBUTE LOGIN/LOGOUT 🔍

An open-source collection of systemic design strategies to accelerate the circular economy

Design for repair

 **Get Inspired. Get started.** Browse through many design strategies to get inspired and begin your circular transition.

 **Circular overwhelming?** Find out how to improve your circular strategy and create virtuous product cycles.

 **Redesign your revenue opportunity.** In the circular economy, form follows business model. Play in advance!

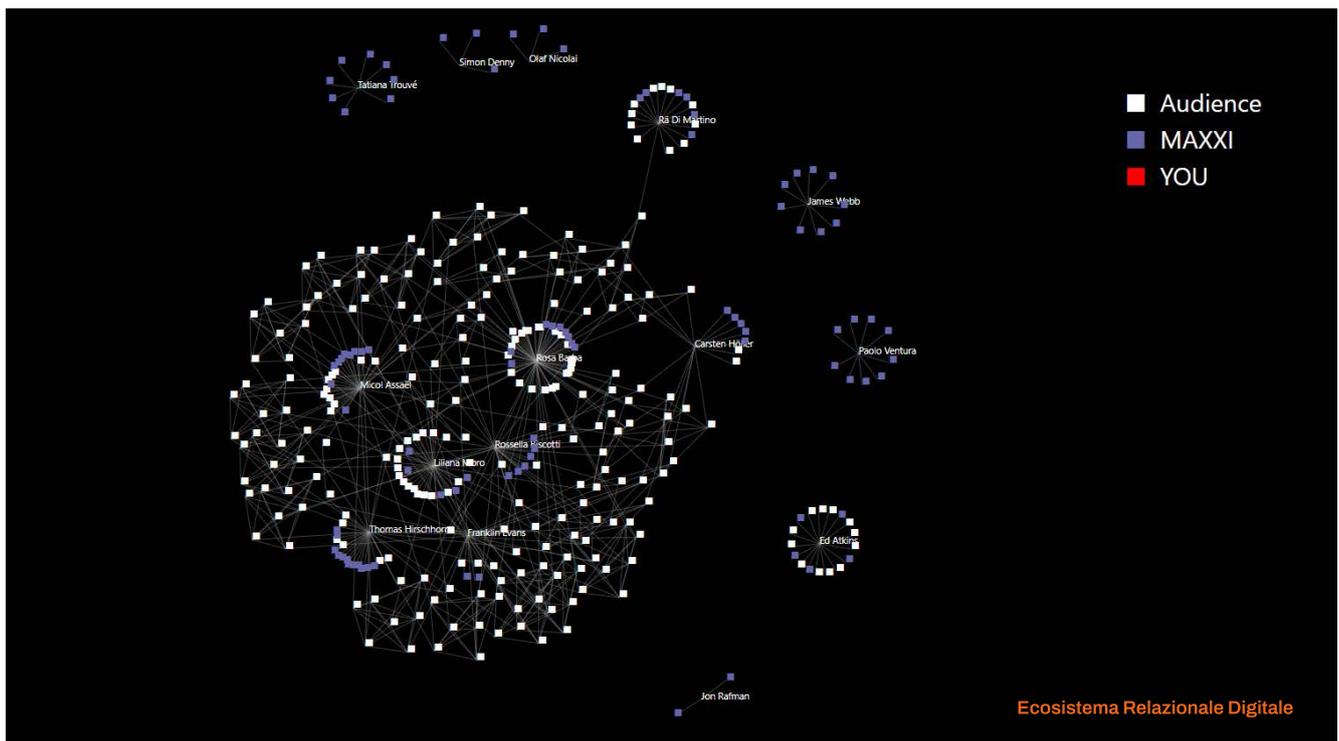
Explore how your company can become more circular

Help others to become circular by adding new design strategies

TOOL CONTRIBUTE

Ecosistema Relazione Digitale, MAXXI, Roma

"What a Wonderful World" è una mostra di 68 opere d'arte contemporanea della Collezione MAXXI incentrate sul tema della natura e dell'ambiente. La mostra riflette sulla bellezza della natura e l'impatto dell'attività umana sull'ambiente, incoraggiando i visitatori a esplorare diversi punti di vista sul nostro rapporto con il mondo naturale. Con diverse forme di media in esposizione, tra cui fotografia, video e installazioni, la mostra intende sensibilizzare i visitatori sull'urgenza di affrontare la crisi ecologica attuale. Il museo MAXXI offre un ecosistema digitale per espandere l'attività culturale in vari canali, attraverso un sistema di feedback relazionali viene creata una rete che raggruppa esperienze simili e permette ai visitatori di confrontarsi con il museo e le opere, nonché tra di loro.



MatWeb.com

MatWeb.com è un sito web che offre dati sui materiali per diverse sostanze. Questi dati possono aiutare chi lavora con i materiali a scegliere quelli giusti per i loro progetti. Il sito web ha molti dati sulla resistenza, l'elasticità, il calore e la reazione dei materiali a diverse sostanze. Questi dati possono essere utili per risparmiare tempo e denaro e per evitare errori. Tuttavia, il sito web non ha tutti i dati possibili e non considera altri aspetti importanti nella scelta dei materiali. Quindi, chi usa il sito web deve anche usare altre fonti e il proprio giudizio.

Material Category Search

Find a Material Category:

Select a Material Category:

- Carbon (866 matts)
- Ceramic (10064 matts)
- Fluid (7562 matts)
- Metal (17052 matts)
- Other Engineering Material (8053 matts)
- Polymer (97635 matts)
- Pure Element (507 matts)
- Wood and Natural Products (299 matts)

Selected Material Category:

none

FIND **RESET**

Instructions: This page allows you to quickly access all of the polymer/plastic, metals, ceramics, fluids, and other engineering materials in the MatWeb material property database. Just select the material category you would like to find from the tree. Click on the [+] icon to open subcategory branches in the tree. Then click the "Find" button next to its box. You can then follow the links to the most complete data sheets on the Web, with information on over 1000 available properties, including dielectric constant, Poisson's ratio, glass transition temperature, dissipation factor, and Vicat softening point.

Next:

- Visit MatWeb's [category-based search page](#) to limit your results to materials that meet specific property performance criteria.
- Test searches can be done from any page - use the Quick Search box in the top right of the page.
- Move [Search Strategies](#) on how to get information in MatWeb.
- Show [All Materials](#) - an efficient drill-down to data sheets. Registered users who are logged in omit a step in this drill-down process.

Ricerca per categoria di materiale

Property Search

Try these other methods of searching:

- Advanced Search - Allow searches on conditional property data, using multiple criteria.
- Polymer Film Search
- Lubricant Search

Choose a Material Category (Optional)

Choose up to 3 Material Properties

Set the range by entering the minimum and/or maximum values for each selected property

Submit the Query (Required)

Click on the "Find" button below to submit the query.

FIND **RESET**

Ricerca per Proprietà

Metal & Alloy Composition Search

Try these other methods of searching:

- Metal Alloy UNS Number - Select from the list of UNS numbers in MatWeb's database and find the matching data sheets.

Choose a Material Category (Optional)

Choose up to 3 Material Compositions (Optional)

Set the range by entering the minimum and/or maximum values for each selected property

Submit the Query (Required)

Click on the "Find" button below to submit the query.

FIND **RESET**

Ricerca per composizione metallica

OnlineMetals.com

Visit [OnlineMetals.com](#) for fast service on small quantity orders.

Manufacturer Search

Tell these manufacturers that you saw their materials in MatWeb!

Manufacturers A to D

SA Composites Core Materials (36 matts) **FIND**

Manufacturers E to L

Ep-Polymer Co. Ltd (209 matts) **FIND**

Manufacturers M to R

M Chemical Company, Inc. (15 matts) **FIND**

Manufacturers S to Z

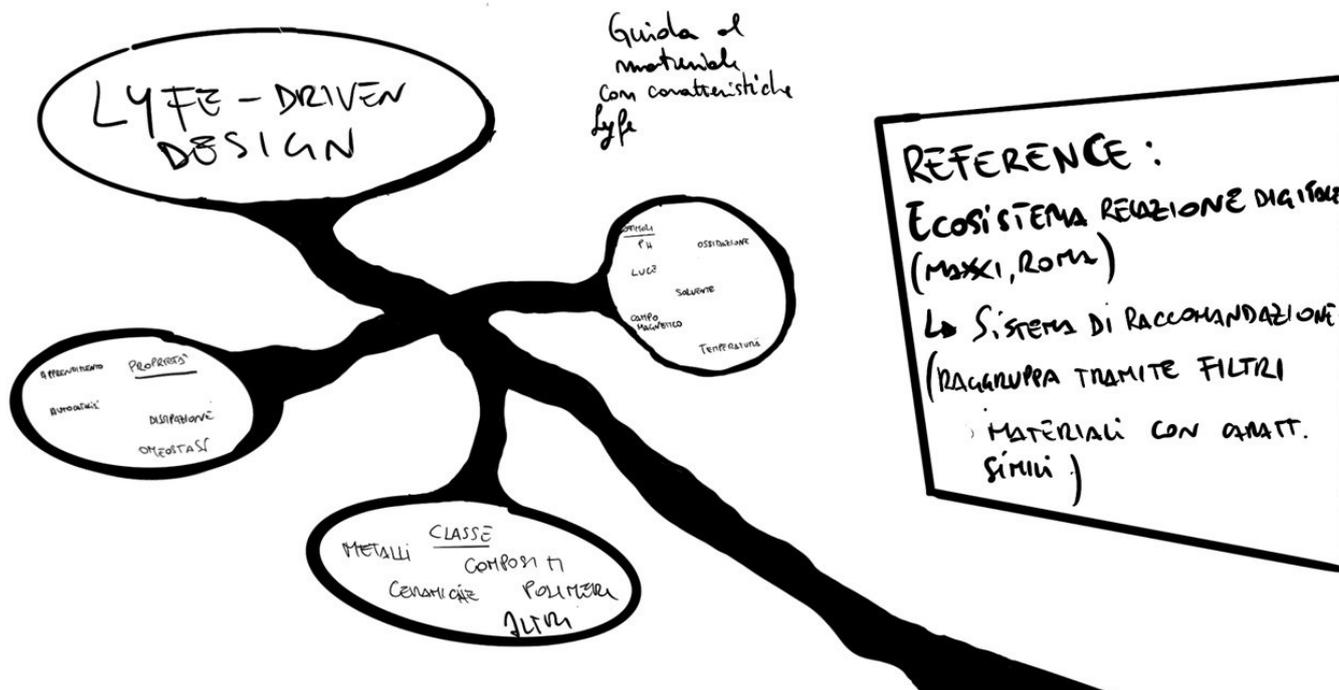
SADIC (4406 matts) **FIND**

Ricerca per Trade Name

Ricerca per Produttore

6.3 / Concept

MAPPA MENTALE



DATABASE = TABELLA

COLONNE = caratteristiche
RIGHE = record (materiali)

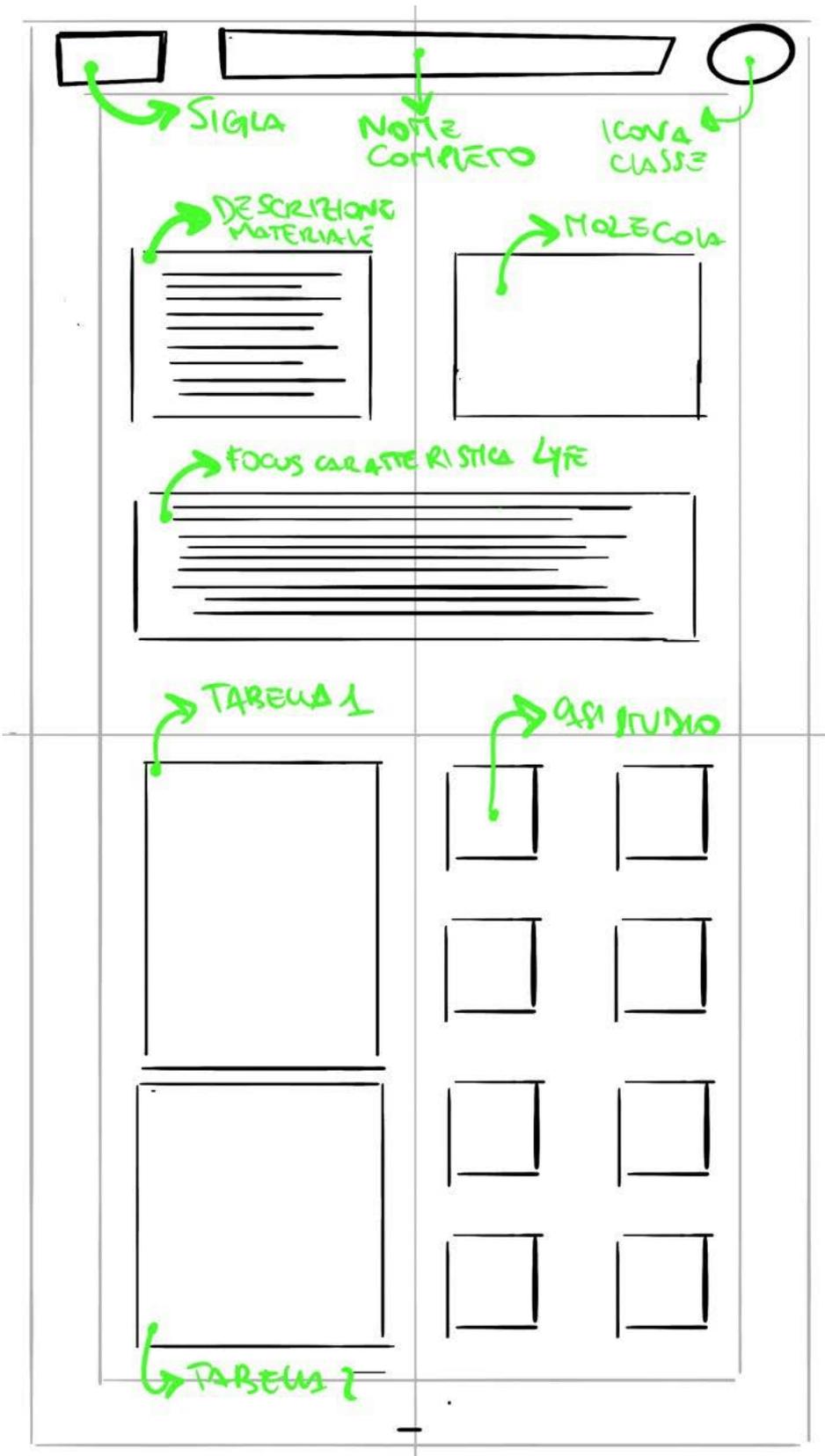
	CARATTERISTICHE			
MATERIALI				

OGNI RECORD AVRA'

UN ID UNICO a cui vengono assegnate
le caratteristiche

FILTRI = CONDIZIONE IF (come
se stesi impostando un principio delle
caratteristiche) → ESEMPIO: IF MATERIALI
"X" CONTIENE VARIABILE "Y" = VISUALIZZA

[QUERY]



6.4 / Card materials

Sigla

Icona

Nomenclatura completa

Descrizione

Immagine

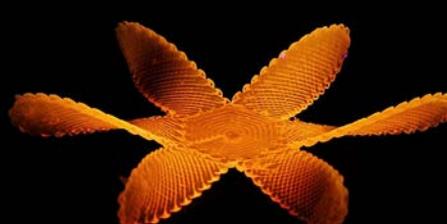
Tabella Proprietà Meccaniche

Tabella Proprietà Chimiche

LCE
Elastomeri a cristalli liquidi



Gli elastomeri a liquidi cristalli sono materiali sensibili alla forma che possono reagire agli stimoli dell'ambiente. Questi materiali sono biocompatibili e possono essere utilizzati come impalcature per l'ingegneria tissutale in grado di indirizzare attivamente la crescita cellulare e la differenziazione. Gli LCE mostrano anche interessanti proprietà strutturali e sono stati dimostrati di aumentare la rigidità quando sottoposti a compressione. Possono quindi essere impiegati come materiali strutturali che resistono a compressione e tensione ripetute in uno scenario di prova del prodotto.



MECCANICHE	Materiale	Res. a trazione (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Modulo di Young (MPa)	Durezza Shore A
	Vettilene	5-15	200-600	0.1-1.0	40-60
	Estere	10-30	200-500	1.0-10.0	40-80
	Uretano	5-15	300-800	1.0-5.0	40-90
	Acrilato	5-15	200-500	1.0-10.0	40-80

CHIMICHE	Materiale	Compatibilità con solventi organici	Resistenza all'acqua	Resistenza agli olii	Resistenza agli acidi
	Vettilene	Buona	Eccellente	Buona	Buona
	Estere	Buona	Buona	Eccellente	Eccellente
	Uretano	Eccellente	Buona	Buona	Eccellente
	Acrilato	Eccellente	Eccellente	Eccellente	Buona

LCE Elastomeri a cristalli liquidi



Gli elastomeri a liquidi cristalli sono materiali sensibili alla forma che possono reagire agli stimoli dell'ambiente. Questi materiali sono biocompatibili e possono essere utilizzati come impalcature per l'ingegneria tissutale in grado di indirizzare attivamente la crescita cellulare e la differenziazione. Gli LCE mostrano anche interessanti proprietà strutturali e sono stati dimostrati di aumentare la rigidità quando sottoposti a compressione. Possono quindi essere impiegati come materiali strutturali che resistono a compressione e tensione ripetute in uno scenario di prova del prodotto.



MECCANICHE	Materiale	Res. a trazione (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Modulo di Young (MPa)	Durezza Shore A
	Vettilene	5-15	200-600	0.1-1.0	40-80
	Estere	10-30	200-500	1.0-10.0	40-80
	Uretano	5-15	300-800	1.0-5.0	40-80
	Acrilato	5-15	200-500	1.0-10.0	40-80

CHIMICHE	Materiale	Compatibilità con solventi organici	Resistenza all'acqua	Resistenza agli olii	Resistenza agli acidi
	Vettilene	Buona	Eccellente	Buona	Buona
	Estere	Buona	Buona	Eccellente	Eccellente
	Uretano	Eccellente	Buona	Buona	Eccellente
	Acrilato	Eccellente	Eccellente	Eccellente	Buona

PMMA Polimetilmetacrilato

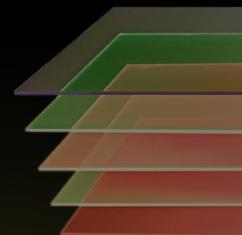
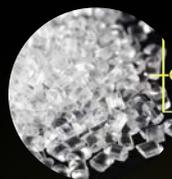


#termoplastico #trasparente #SMP #termoresponsivo #PH

Per rendere il PMMA reattivo agli stimoli, vengono utilizzati diversi additivi, a seconda del tipo di stimolo che si vuole indurre. Ad esempio, per renderlo reattivo alla luce, possono essere utilizzati fotopolimeri come il BMP, che si dissolvono sotto l'azione della luce.

Per rendere il PMMA reattivo alla temperatura, si possono aggiungere polimeri termoplastici come il N-Isopropilacrilammide, che si contraggono o si espandono in base alla temperatura. Il PMMA può anche essere reso reattivo ai campi magnetici attraverso l'aggiunta di nanoparticelle di ferrite di ferro.

Per la rilascio in risposta a determinati stimoli, viene spesso utilizzato il PMMA come base per la produzione di nanoparticelle. Gli additivi usati in questo caso possono includere polimeri di blocco, come il polietilenglicole, o additivi reattivi al pH, come la piridina.



MECCANICHE	Materiale	Res. a trazione (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Modulo di Young (MPa)	Durezza Shore D
	PMMA	6.5-8.5	2-6	2700-3300	80-95
	+ polietilenglicole	3.3-6.1	12-83	2200-2900	70-91
	+ piridina	6.3-6.5	2.9-4.7	3070-3150	97-99
	+ PNIPAA	2.0-2.0	+ PNIPAA	2020-4700	60-70
+ BMP	3.3-4.1	+ BMP	5700-6400	57-67	

CHIMICHE	Materiale	Compatibilità con solventi organici	Resistenza all'acqua	Resistenza agli olii	Resistenza agli acidi
	PMMA	Buona	Buona	Buona	Buona
	+ polietilenglicole	Eccellente	Buona	Buona	Buona
	+ piridina	Buona	Eccellente	Eccellente	Eccellente
	+ PNIPAA	Eccellente	Buona	Buona	Buona
+ BMP	Buona	Eccellente	Eccellente	Eccellente	

6.3 / Card stimoli

Titolo

Icona

Descrizione

Tabella materiali

Casi studio

STIMOLO: Campo magnetico



La biomeccanica studia come la forza e la flessibilità influenzano i movimenti del corpo negli esseri viventi. Queste proprietà sono molto diverse da quelle delle macchine convenzionali, che usano forme rigide e lineari o circolari. Un esempio sono gli elastomeri magnetici, che sono materiali morbidi con particelle magnetiche al loro interno. Questi materiali possono essere usati per creare organi artificiali, impianti e dispositivi per il rilascio di farmaci controllato dal campo magnetico.

Minerale magnetico	Dim. particella [nm]	Concentrazione [%]	Polimero
C/Co	25	13	HEMA
Fe ₃ O ₄	17	32	PMMA
Fe ₃ O ₄	261	15	VCL-AAEM
Fe	20	61	PIB-TEBA
Fe	20	10	PDMS



PMMA / Fe₃O₄



PDMS / Fe



(a) (b) (c)

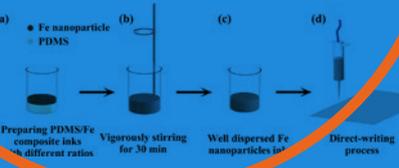


(d)



t=0 ————— t=0.7 second

(a) (b) (c) (d)



Preparing PDMS/Fe composite inks with different ratios
 Vigorously stirring for 30 min
 Well dispersed Fe nanoparticles in PDMS
 Direct-writing process

6.3 / Card casi studio

Fonte

Titolo

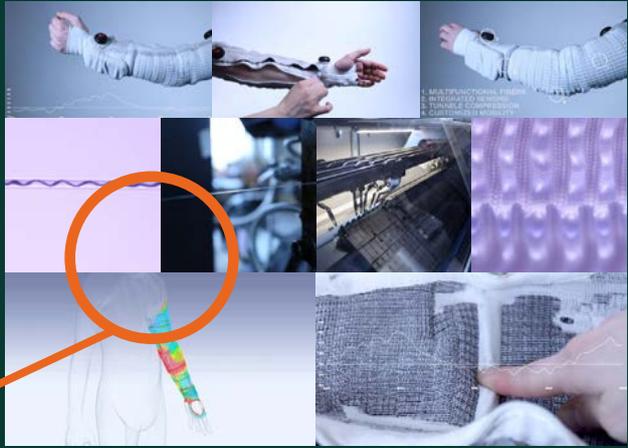
Gallery

Descrizione

Media

3D Knit BioSuit™

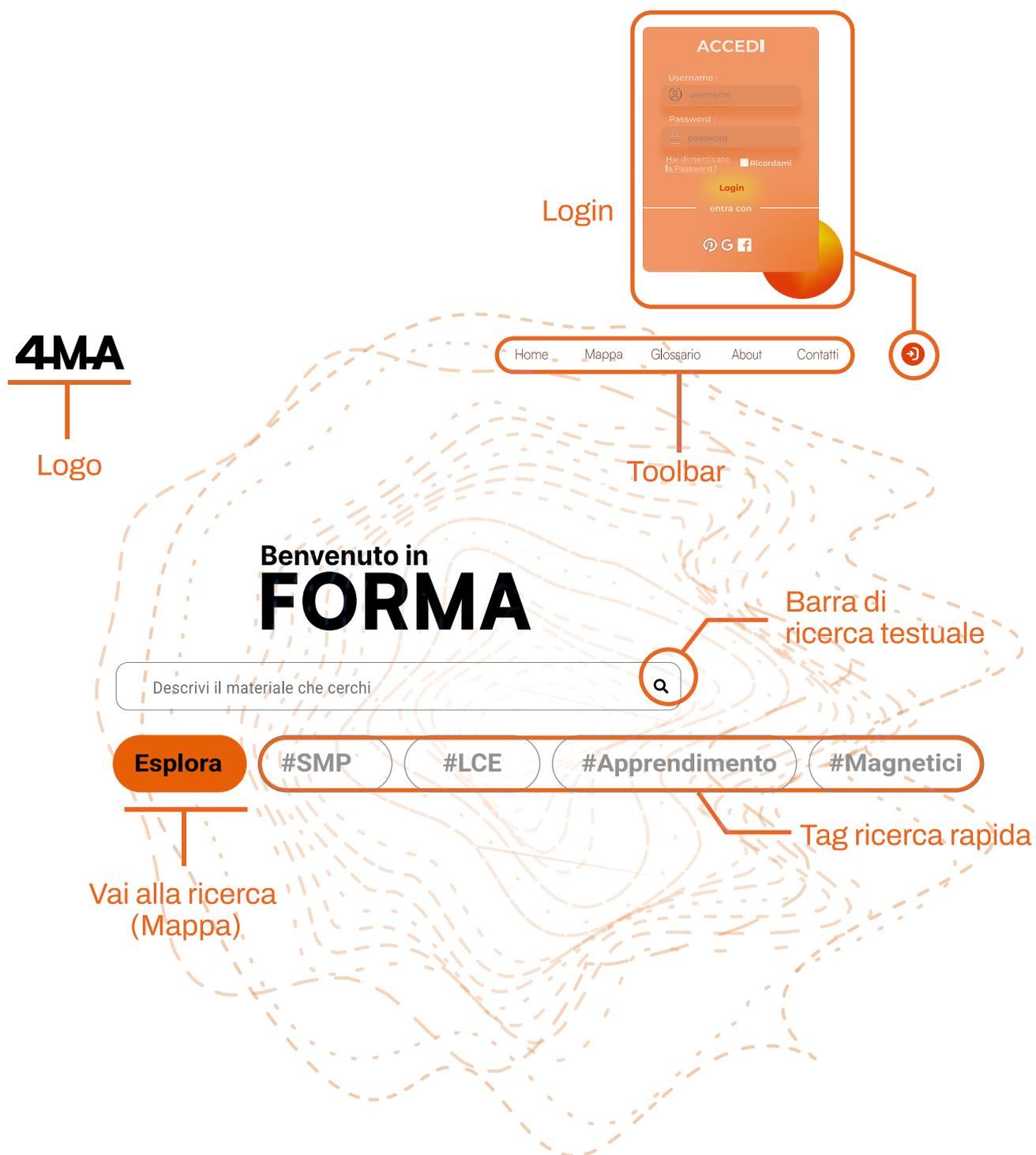
[MIT Media Lab](#)



Il 3D Knit BioSuit™ è un prototipo di manica compressiva per il MIT BioSuit™, mirato a rivoluzionare la tecnologia delle tute spaziali per l'attività extraveicolare (EVA). Utilizzando la contro pressione meccanica (MCP), il capo compressivo mira a fornire una pressione uniforme sulla pelle e la protezione degli astronauti utilizzando una tecnologia seconda pelle un ordine di grandezza meno ingombrante e più mobile. La manica della tuta comprende una maglieria 3D multi-strato per fornire pressione, termoregolazione e protezione parziale dalle radiazioni. Incorpora un sistema di monitoraggio in tempo reale, tecnologia indossabile e un'interfaccia grafica utente wireless.



6.5 / Homepage



Benvenuto in **FORMA**

Descrivi il materiale che cerchi



[Esplora](#)

[#SMP](#)

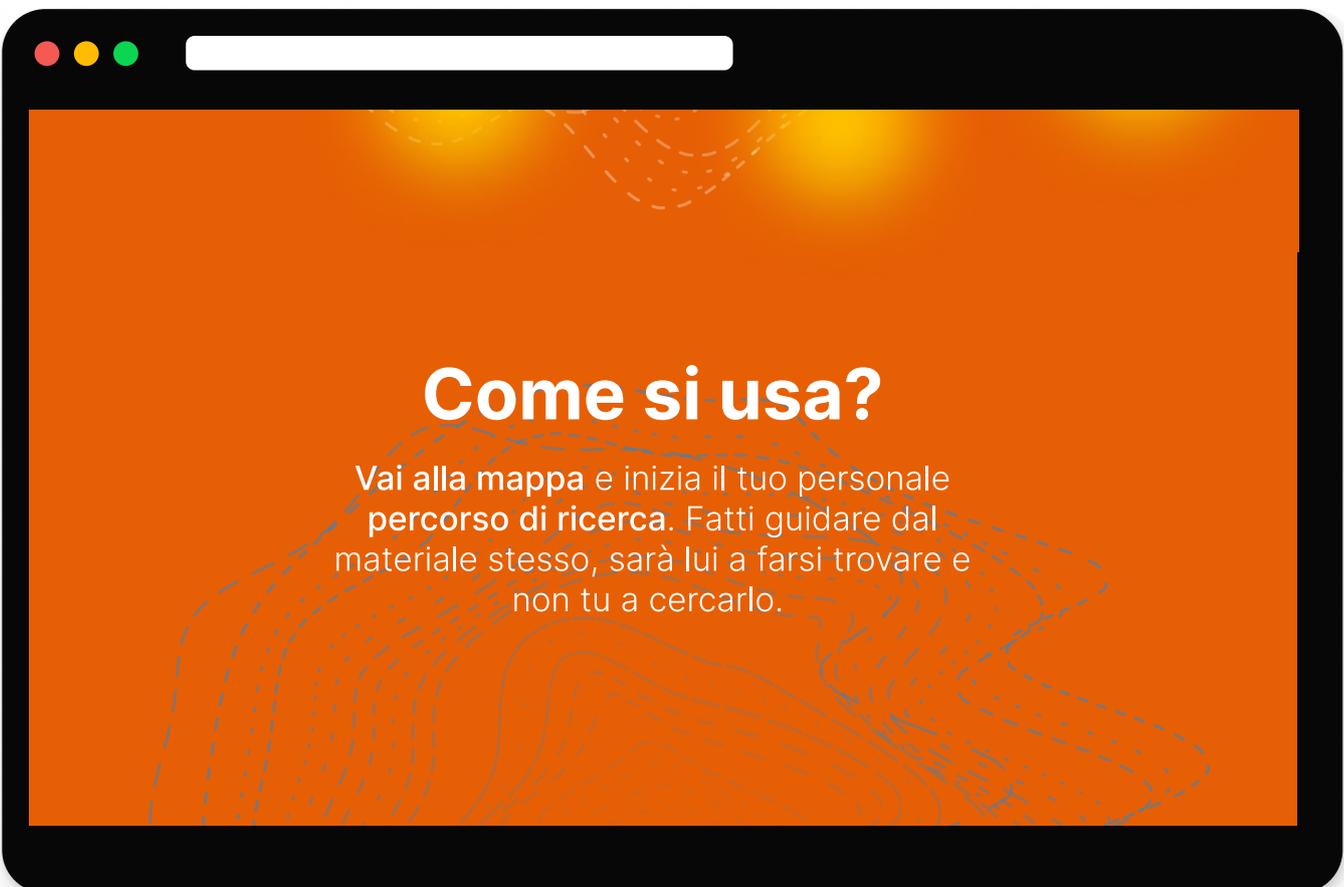
[#LCE](#)

[#Apprendimento](#)

[#Magnetici](#)

Cos'è FORMA?

Un tool che **guida** il progettista alla scelta del *materiale intelligente* giusto per il suo *progetto intelligente*.



Ricerca tra materiali salvati in collezione

Cerca il tuo materiale

Oppure aggiungilo al nostro database



Informazioni

Interazione con database

Pages

[Home it work](#)
[Pricing](#)
[Blog](#)
[Demo](#)

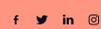
Service

[Shopify](#)
[WordPress](#)
[UI/UX Design](#)

Contact

(406) 555-0120
 mangcoding123@gmail.com
 2972 Westheimer Rd. Santa Ana, Illinois 65486

Social media



Ciao,
ANDREA CUSIMANO 

Ultime ricerche

#SMP

#LCE

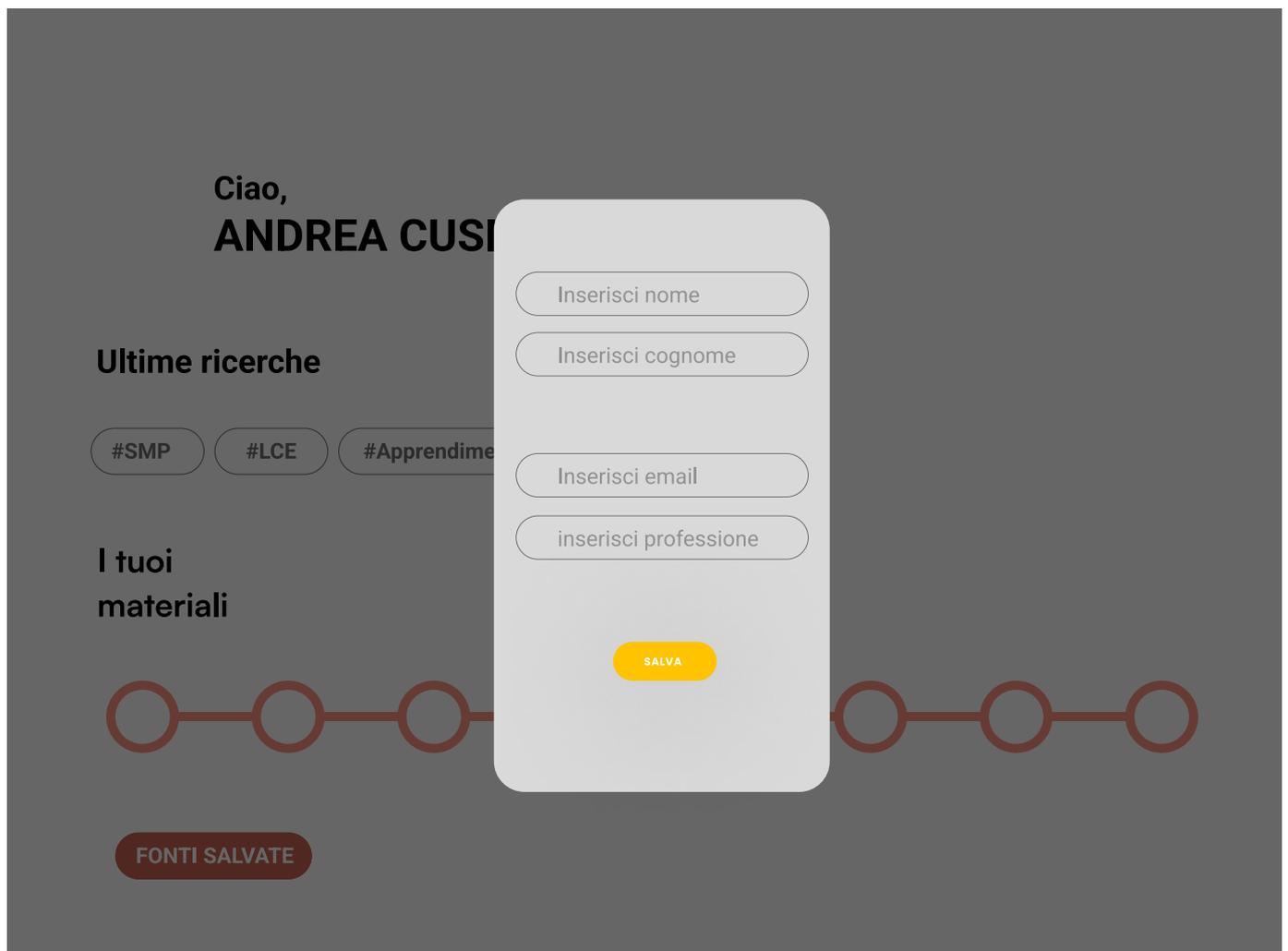
#Apprendimento

#Magnetici

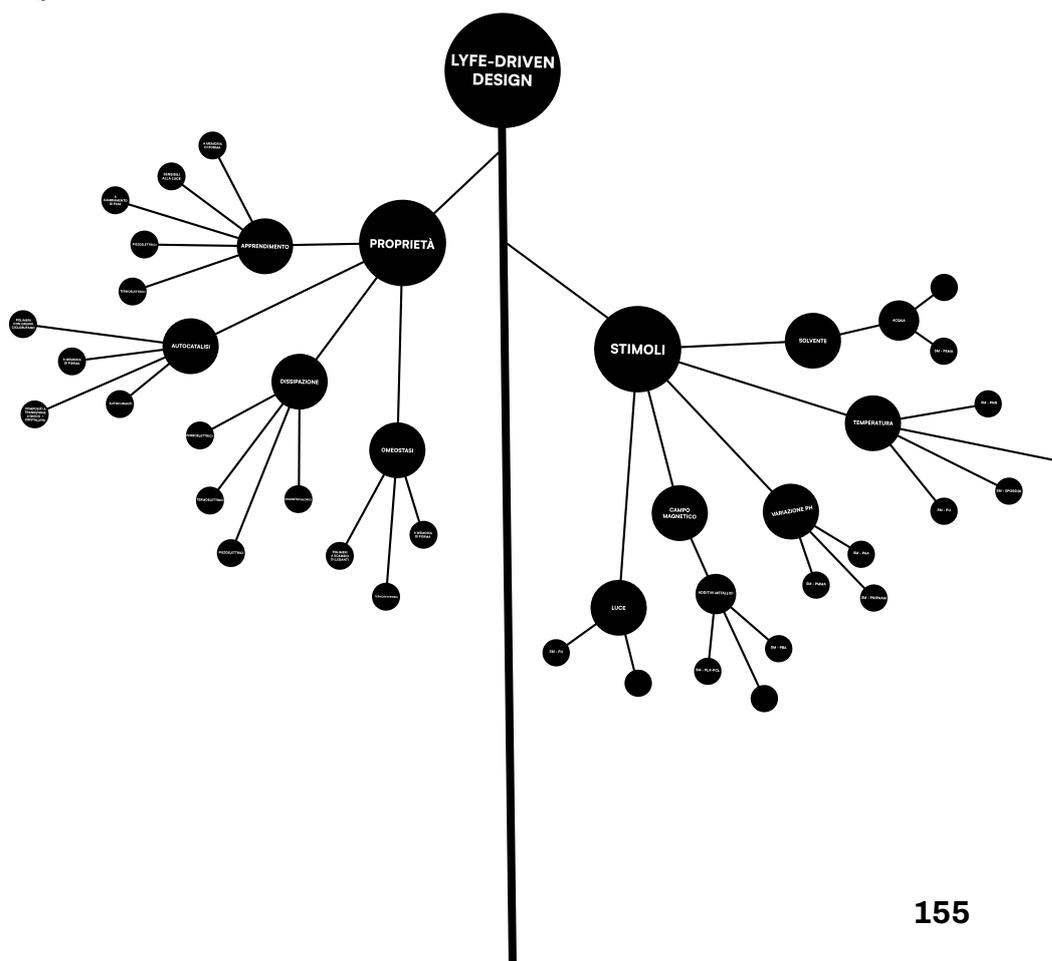
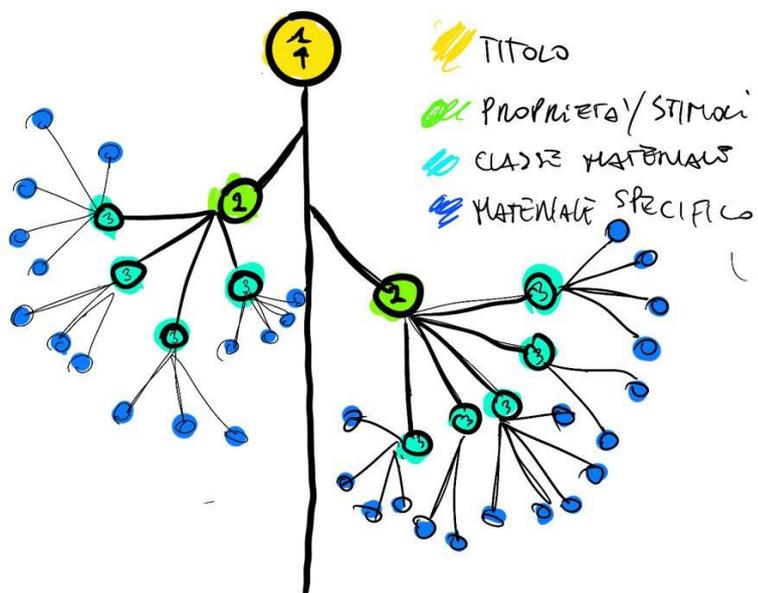
I tuoi materiali

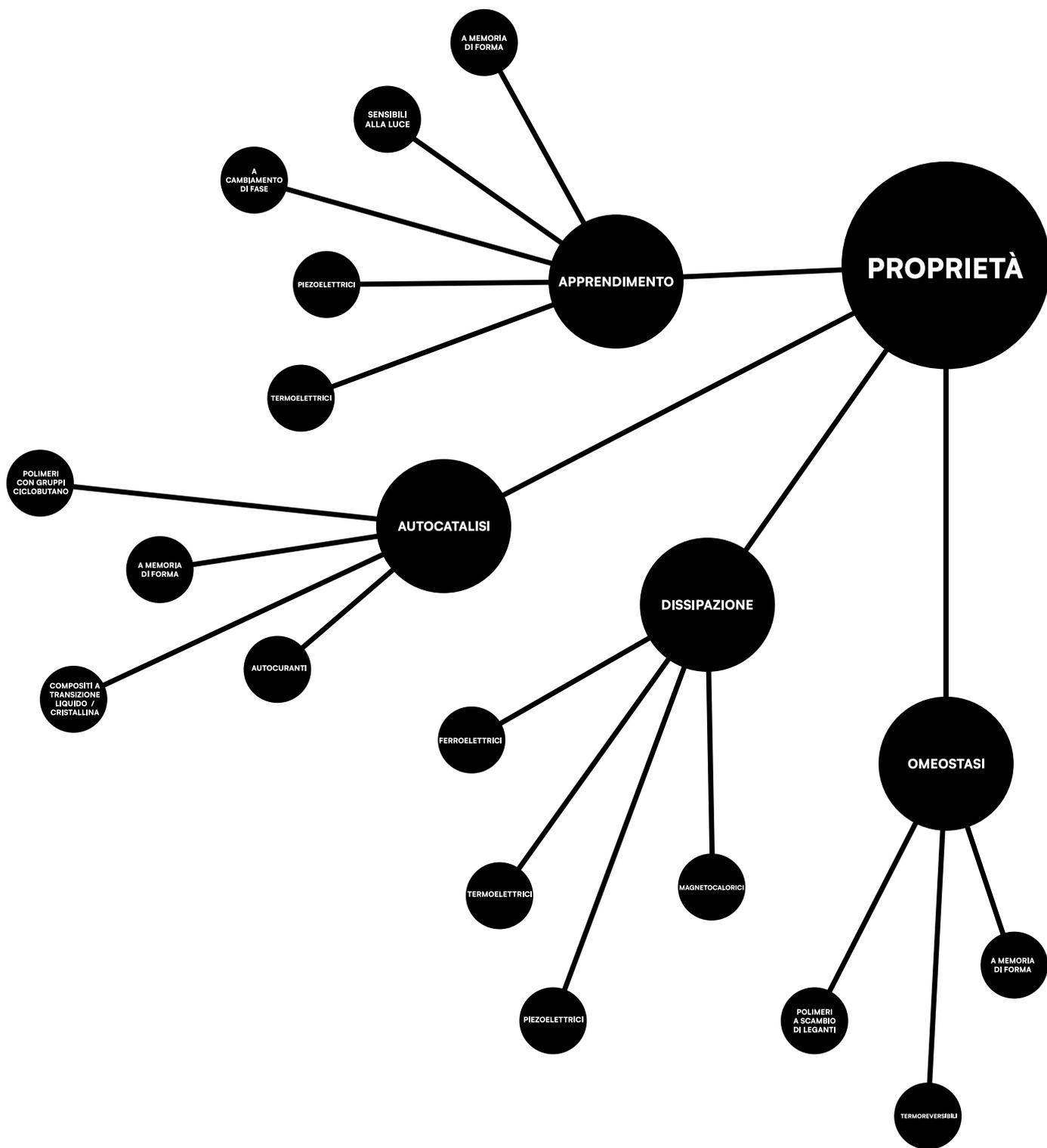


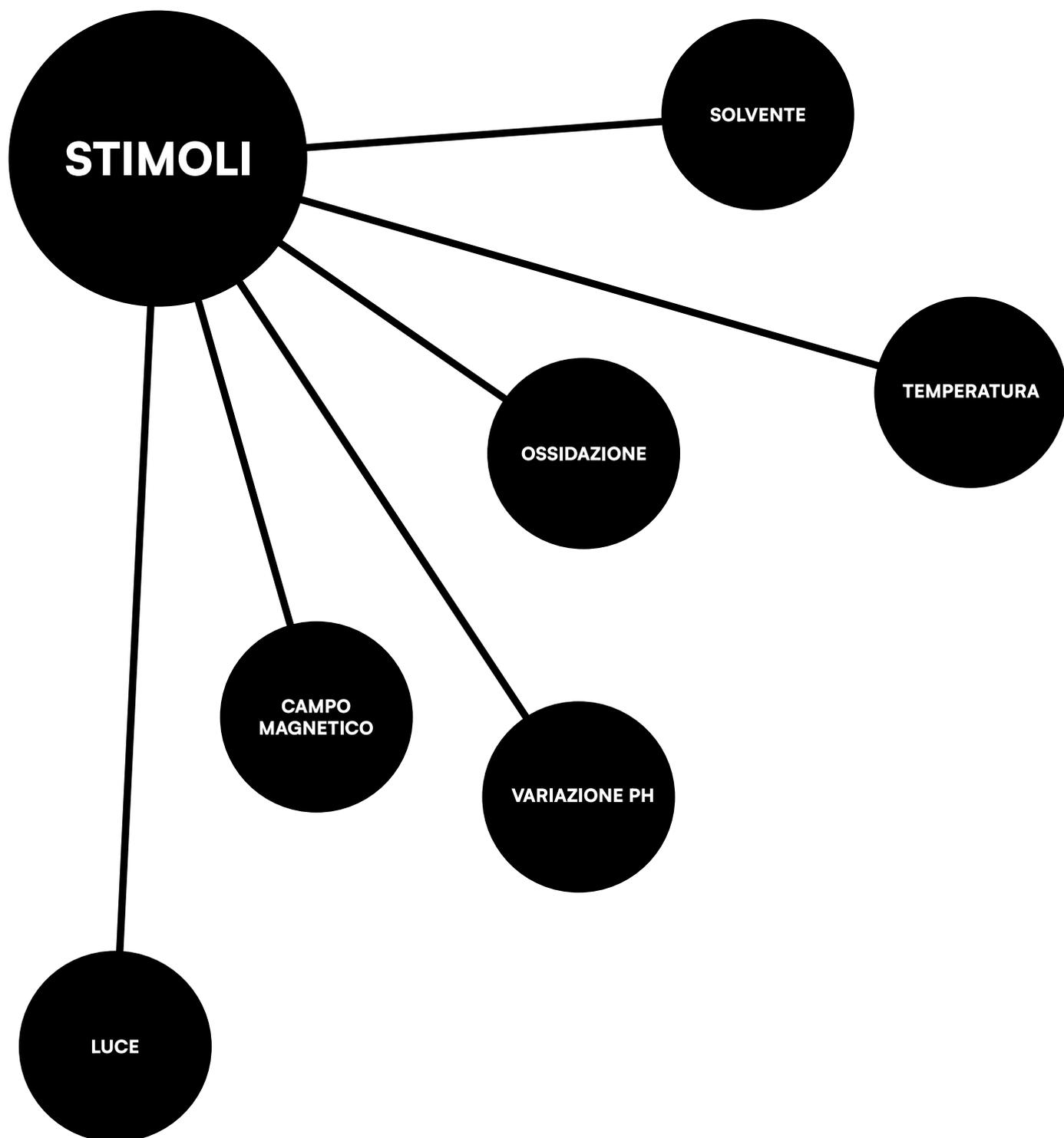
FONTI SALVATE



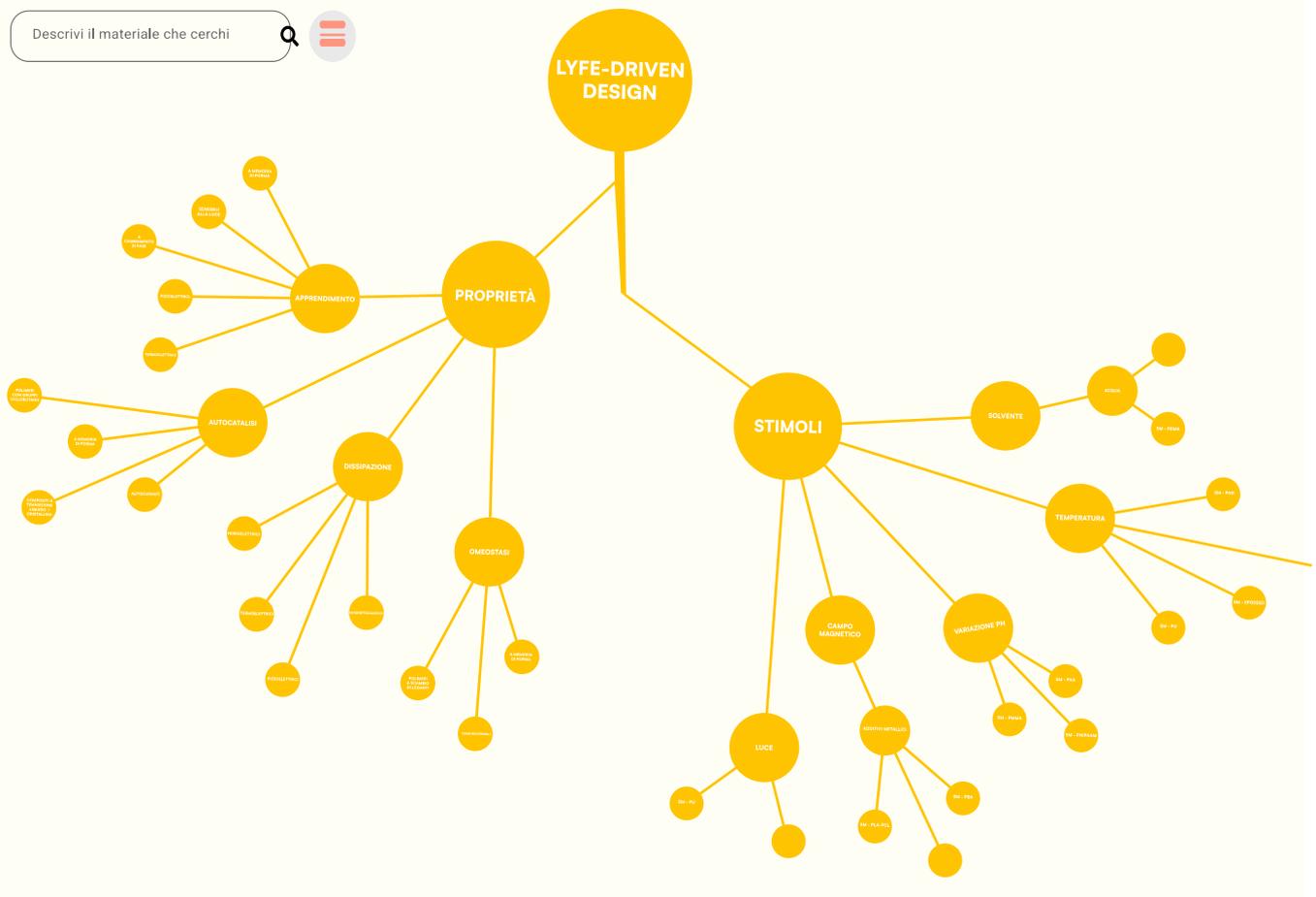
6.6 / Mappa



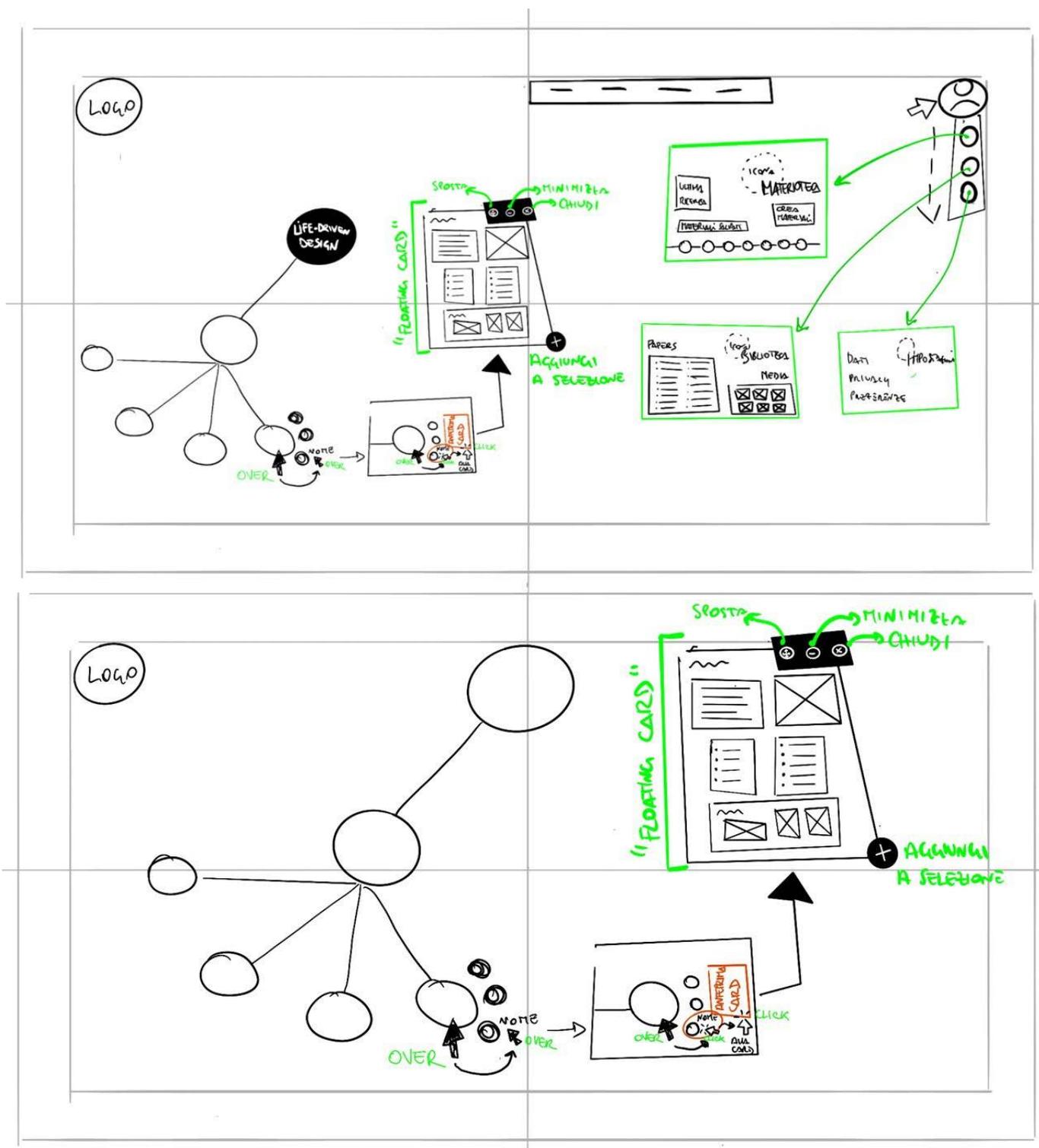


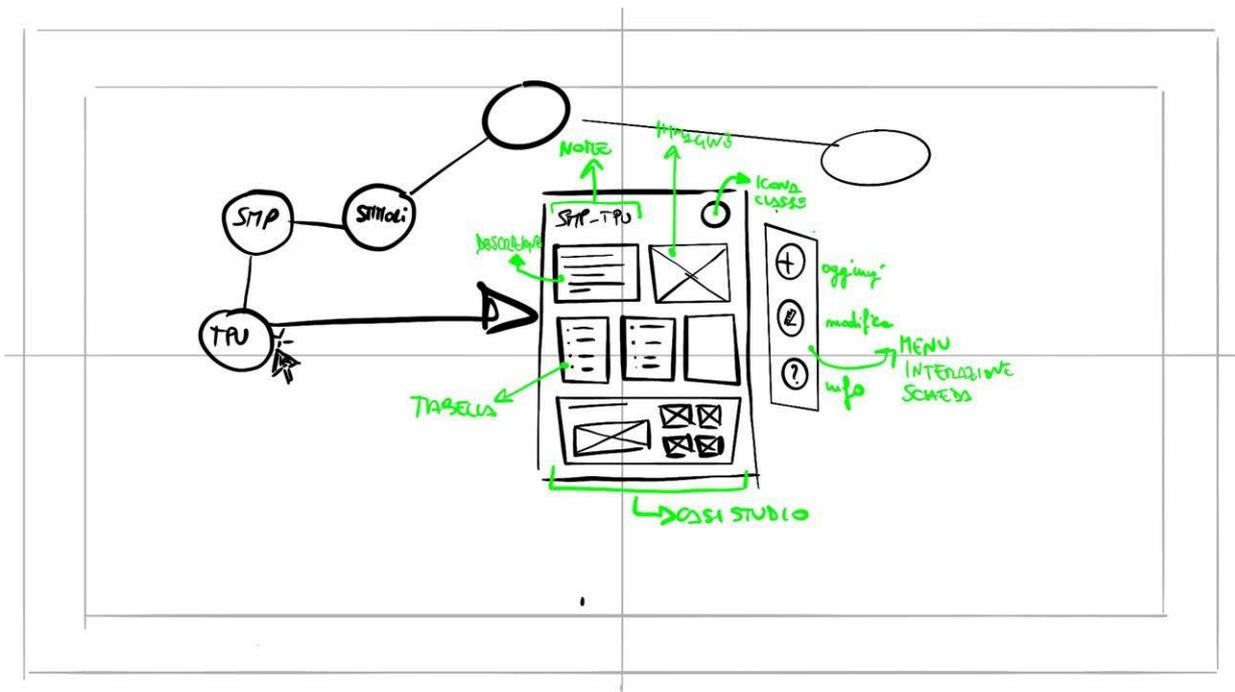
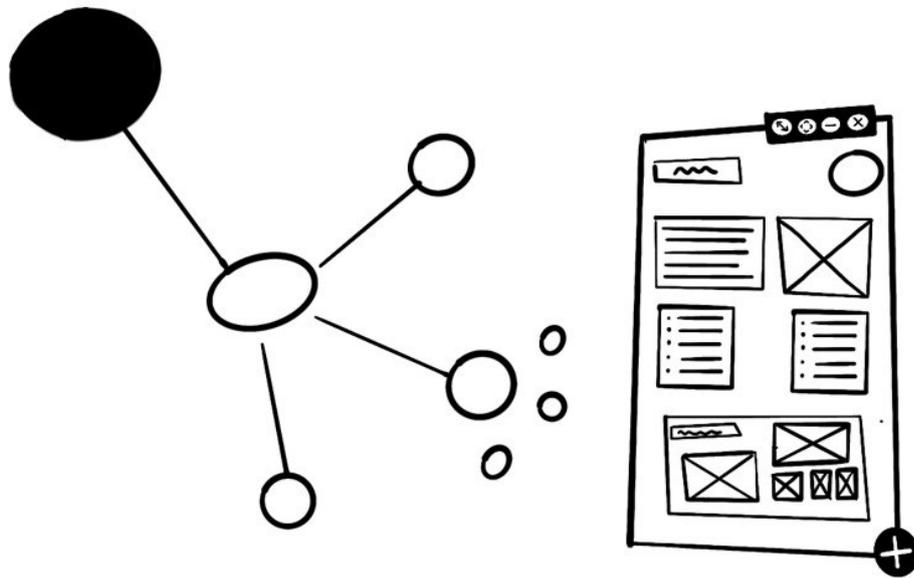


Descrivi il materiale che cerchi  



6.7 / Interazione e user experience





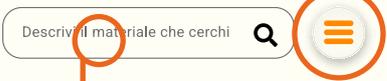


Filtri ricerca

Informazioni sugli utilizzi della libreria di dati: ricerca, personalizzazione e generazione di schede. Le schede sono generate automaticamente e non possono essere modificate. Le schede sono generate automaticamente e non possono essere modificate.



Home Mappa Glossario About Contatti



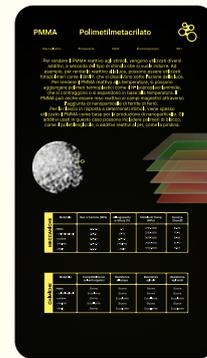
ricerca testuale



STIMOLI

PROPRIETÀ

Tab gestione scheda



Scheda

6.8 / Conclusioni dallo scenario di ricerca

I materiali intelligenti rappresentano una categoria di materiali caratterizzati da proprietà avanzate come la capacità di dissipazione, autocatalisi, omeostasi e apprendimento, che consentono loro di adattarsi e rispondere a sollecitazioni ambientali, cambiare forma, adattarsi e auto-ripararsi. Gli scienziati stanno attualmente lavorando per sviluppare materiali sempre più avanzati che presentino proprietà sempre più sofisticate, come la capacità di apprendere da sollecitazioni esterne e di modificare il loro comportamento in base a queste informazioni, così come di reagire a specifici stimoli e creare prodotti adattivi che possono cambiare forma in base alle esigenze dell'utente.

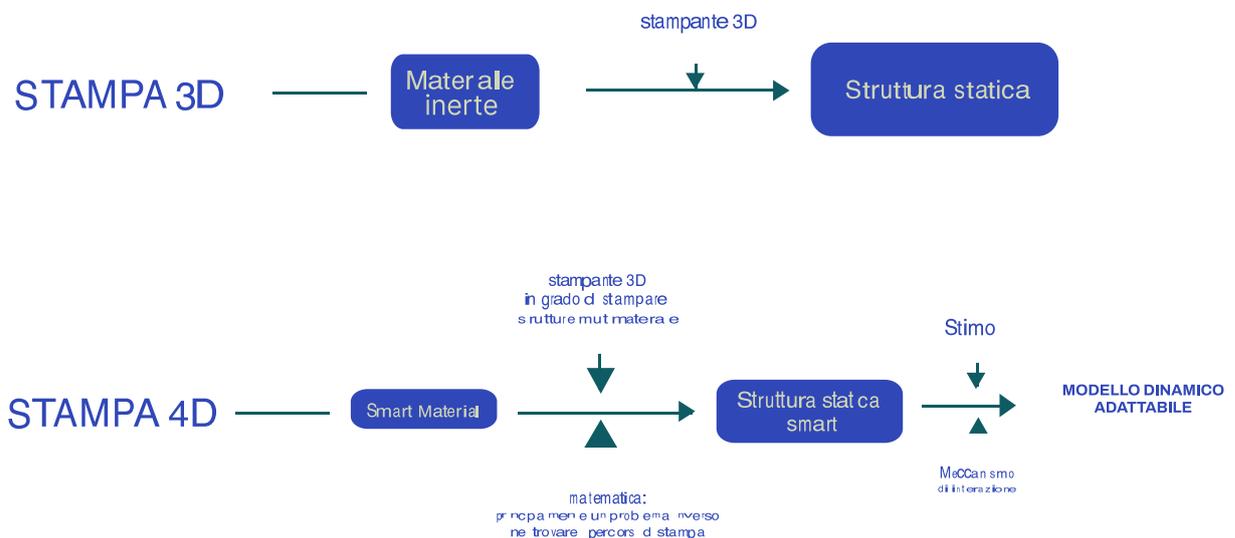
Nonostante la tecnologia della stampa 4D di materiali intelligenti rappresenti una delle frontiere più avanzate della tecnologia, la ricerca è ancora in corso per sviluppare materiali intelligenti che possiedano tutte le quattro caratteristiche menzionate (dissipazione, autocatalisi, omeostasi e apprendimento) e che possano essere stampati in 4D. Alcuni esempi di materiali intelligenti includono materiali a memoria di forma, gel intelligenti, polimeri termocettivi e materiali piezoelettrici.

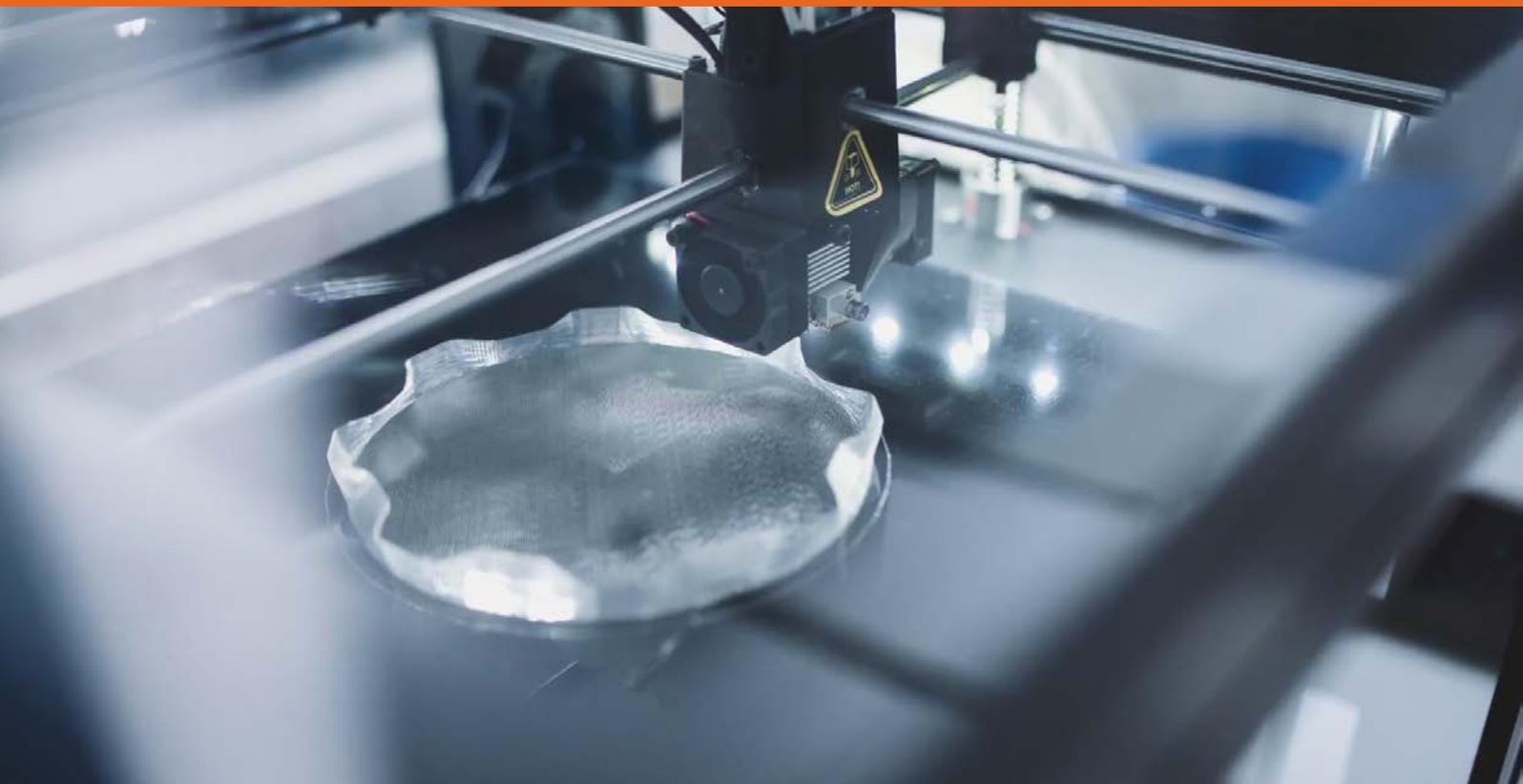
I materiali intelligenti trovano molteplici applicazioni nella vita quotidiana, come ad esempio nell'abbigliamento e nei tessuti intelligenti, negli edifici intelligenti, nei dispositivi medici, nei prodotti per il benessere, nella sicurezza e nel divertimento. Tuttavia, la ricerca e lo sviluppo in questo campo sono in continua evoluzione, creando molte altre opportunità per sviluppare nuovi materiali e prodotti intelligenti.

I prodotti intelligenti possono essere programmati per reagire a specifici stimoli, come la luce o il calore, e possono essere utilizzati per creare prodotti adattivi che possono cambiare forma in base alle esigenze dell'utente.

Riassumendo, alcuni esempi di prodotti intelligenti che sono stati riportati nello studio condotto, tra gli altri, includono:

- Abbigliamento e tessuti intelligenti: questi possono cambiare forma, texture e proprietà termiche in base alle condizioni ambientali, come ad esempio la temperatura o l'umidità. Possono essere utilizzati per creare vestiti che si adattano alle esigenze individuali dell'utente o per produrre tessuti auto-riparanti.
- Robot intelligenti: questi possono modificare la loro forma e funzione in risposta ai cambiamenti nell'ambiente, come la luce solare e la temperatura. Possono essere utilizzati per creare robot morbidi che si muovono o adattano in base a determinati stimoli.
- Dispositivi medici: questi possono cambiare forma o funzione per adattarsi alle esigenze individuali dei pazienti. Possono essere utilizzati per creare protesi personalizzate o per produrre materiali auto-riparanti per le applicazioni mediche.
- Prodotti per la sicurezza: possono modificare la loro forma per adattarsi alle situazioni di emergenza. Possono essere utilizzati per creare prodotti che migliorano la sicurezza degli utenti in situazioni pericolose.





I materiali intelligenti rappresentano un ambito di ricerca in continua evoluzione che offre molte opportunità per lo sviluppo di nuovi materiali e prodotti avanzati. La loro capacità di adattarsi ai cambiamenti ambientali e di interagire con gli utenti in modi sempre più sofisticati apre la strada a molte nuove applicazioni in diversi settori, dalla produzione industriale alla progettazione di prodotti. Data la natura altamente innovativa di questa tecnologia, la ricerca e lo sviluppo in questo campo sono in continua evoluzione, il che significa che ci sono molte altre opportunità per sviluppare nuovi materiali e prodotti intelligenti. Per raggiungere il successo nella creazione di prodotti e componenti con la tecnologia 4D printing, è necessario adottare un approccio metodologico innovativo e integrato. In questo contesto, il design thinking e la progettazione material driven svolgono un ruolo essenziale. Il design thinking rappresenta un approccio iterativo e collaborativo, che si concentra sull'individuazione delle reali esigenze degli utenti e sulla creazione di soluzioni funzionali e creative per soddisfarle. Nella stampa 4D, dove la complessità del processo richiede una visione integrata della progettazione e della produzione, questo approccio si dimostra particolarmente efficace. D'altra parte, la progettazione material driven si focalizza sulla scelta dei materiali adatti per una determinata applicazione, tenendo conto delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali stessi. Questa metodologia è fondamentale per la stampa 4D, in quanto i materiali utilizzati devono essere in grado di rispondere alle esigenze dell'applicazione e di trasformarsi o rispondere a stimoli esterni durante il processo di stampa; l'integrazione di design thinking e progettazione material driven permette di individuare le reali esigenze degli utenti e di sviluppare soluzioni funzionali e creative, utilizzando i materiali appropriati e considerando le proprietà dei materiali durante la stampa. Grazie a questo approccio innovativo e integrato, la tecnologia di stampa 4D offre un'opportunità unica per massimizzare il potenziale dell'innovazione del design dei prodotti.

- **A Practical Guide to Bio-inspired Design**, Helena Hashemi Farzaneh, Udo Lindemann, Springer, 2005
- **Shape Memory Polymers, Blends and Composites Advances and Applications**, Advanced Structured Materials, Volume 115, Jyotishkumar Parameswaranpillai, Suchart Siengchin, Jinu Jacob George, Seno Jose, Springer, 2020
- **Smart Materials in Additive Manufacturing, Volume 1: 4D Printing Principles and Fabrication**, Mahdi Bodaghi, Ali Zolfagharian, Elsevier, 2021
- **Smart Materials in Additive Manufacturing, Volume 2: 4D Printing Mechanics, Modeling, and Advanced Engineering Applications**, Mahdi Bodaghi, Ali Zolfagharian, Elsevier, 2021
- **Additive Manufacturing Materials and Technologies Series: 4D Printing Fundamentals and Applications**, Rupinder Singh, Elsevier, 2021
- **Smart Materials and New Technologies For the architecture and design professions**, D. Michelle Addington, Daniel L. Schodek, Harvard University, Elsevier, 2005
- **A Practical Guide to Bio-inspired Design**, Udo Lindemann, Helena Hashemi Farzaneh, 2005
- **Fundamentals of Additive Manufacturing for the Practitioner**, Sheku Kamara Kathy S. Faggiani, 2020
- **Menti parallele. Scoprire l'intelligenza dei materiali**, Laura Tripaldi, Effequ, 2020
- **4D Imaging to 4D Printing: Biomedical Applications**, Rupinder Singh, 2023
- **TransMaterial Next**, Blaine Brownell, Princeton Architectural Press, 2017
- **4D Printing of Hydrogels for Biomedical Applications**, Hyunwoo Yuk et al., Advanced Healthcare Materials, 2016.
- **Intelligent 4D Printing Materials and Their Applications**, Xiaoyu Li et al., Materials, 2018.
- **Smart and Self-Healing Polymers for 4D Printing** di Dan Li et al. Macromolecular Rapid Communications, 2019.
- **A Review of Shape Memory Polymers for 4D Printing** di Wei Liu et al., Materials Today, 2020.
- **4D Printing of Shape Memory Polymers for Smart Structures and Devices**, Ke Sun et al., Materials Science and Engineering: R: Reports, 2020.
- **4D printing of smart materials for self-adaptive structures**, Jianwei Ma et al.
- **Programmable 4D Printing of Shape-Memory Polymer Structures with Autonomous Motion**, Zhigang Suo et al.
- **Smart Material-Based 4D Printing for Autonomous Shape Recovery and Transformation**, Zongyin Yang, et al.
- **Advanced 4D Printing of Shape-Memory Polymer Structures with Autonomous Motion Capabilities**, Hao Wei et al.
- **"Intelligent 4D Printing Materials and Their Applications"** di Xiaoyu Li et al. pubblicato su "Materials" nel 2018
- **"A Review of Shape Memory Polymers for 4D Printing"** di Wei Liu et al. pubblicato su "Materials Today" nel 2020
- **"Smart and Self-Healing Polymers for 4D Printing"** di Dan Li et al. pubblicato su "Macromolecular Rapid Communications" nel 2019
- **4D Printing of Shape Memory Polymers for Smart Structures and Devices"** di Ke Sun et al. pubblicato su "Materials Science and Engineering: R: Reports" nel 2020
- **Wei, X., Zhang, Q., Huang, Y., & Gao, L. (2021). Recent advances in 4D printing: Materials, processes, and applications. Journal of Materials Science & Technology, 80, 61-72.**

- Sun, Y., Feng, J., Wu, J., Xie, Y. M., Chen, X., & Wang, X. (2021). Advances in 4D Printing with Multi-materials. *Additive Manufacturing*, 42, 101998.
- Liu, Y., & Ding, X. (2021). 4D printing: A review of recent advancements in materials, techniques, and applications. *Advanced Engineering Materials*, 23(8), 2100079.
- Shi, Z., Wang, X., & Zhang, Y. (2021). 4D printing: Materials, mechanisms, and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(2), 536-560.
- Chen, S., Liu, J., & Cai, X. (2021). 4D printing: A review of progress in fabrication of smart materials. *Progress in Polymer Science*, 113, 101342.
- Zhou, J., Wu, W., & Huang, J. (2021). Shape-morphing mechanisms and design strategies for 4D printing. *Advanced Materials Technologies*, 6(1), 2000677.
- Hao, Y., Cheng, P., & Zhang, Z. (2021). Recent progress in 4D printing for soft actuators and robots. *Smart Materials and Structures*, 30(2), 023001.
- Li, Z., Li, Y., & Tang, B. (2021). 4D printing with shape memory polymers: A review. *Materials & Design*, 198, 109344.
- Wang, S., Chen, D., & Zhang, Q. (2021). 4D printing of multifunctional materials: A review. *Composites Communications*, 26, 100783.
- Wu, J., Sun, Y., & Wang, X. (2021). 4D printing of hydrogels: Materials, techniques, and applications. *Bioactive Materials*, 6(5), 1312-1329.
- A Comprehensive Comparison of the Analytical and Numerical Prediction of the Thermal History and Solidification Microstructure of Inconel 718 Products Made by Laser Powder-Bed Fusion Patcharapit Promoppatum a, Shi-Chune Yao a,* , P. Chris Pistorius b, Anthony D. Rollett b, 2017
- 3D–4D Printed Objects: New Bioactive Material Opportunities, Céline A. Mandon, Loïc J. Blum and Christophe A. Marquette, 2017
- Defining Lyfe in the Universe: From Three Privileged, Functions to Four Pillars, Stuart Bartlett, Michael L. Wong, 2020
- Self-growing Adaptable Soft Robots, Barbara Mazzolai, Alessio Mondini, Emanuela Del Dottore, and Ali Sadeghi da Koshima, Hideko - Mechanically Responsive Materials for Soft Robotics, Wiley, 2019
- Innovation in Additive Manufacturing Using Polymers: A Survey on the Technological and Material Developments Mauricio A. Sarabia-Vallejos, Fernando E. Rodríguez-Umanzor, Carmen M. González-Henríquez, Juan Rodríguez-Hernández, 2022
- Advanced Materials for Soft Robotics Li Wen, Daniel Vogt, Zhenyun Shi, Qi Shen, Ziyu Ren, 2016
- 3D Bioprinting Strategies, Challenges and Opportunities to Model the Lung Tissue Microenvironment and Its Function, Mabel Barreiro Carpio, Mohammadhossein Dabaghi, Julia Ungureanu, Martin R. Kolb, Jeremy A. Hirota, Jose Manuel Moran-Mirabal, 2021
- 4D Printing: Towards Biomimetic Additive Manufacturing, Elizabeth Yinling Tsai, 2013
- Dual-method molding of 4D shape memory polyimide ink, Xiao Li a,b, Yangyang Yang c, Yaoming Zhang a, Tingmei Wang a, Zenghui Yang a, Qihua Wang a,b, Xinrui Zhang, 2020
- Design of Shape Memory Thermoplastic Material Systems for FDM-Type Additive Manufacturing Paulina A. Quiñonez, Leticia Ugarte-Sanchez, Diego Bermudez, Paulina Chinolla, Rhyann Dueck, Truman J. Cavender-Word, David A. Roberson, 2021

- Current developments in multifunctional smart materials for 3D/4D bioprinting, Nathan J. Castro, Christoph Meinert, Peter Levett, Dietmar W. Hutmacher, 2020
- The Design of 4D-Printed Hygromorphs: State-of-the-Art and Future Challenges
- Charles de Kergariou, Frédéric Demoly, Adam Perriman, Antoine Le Duigou, and Fabrizio Scarpa da *Advanced Functional Materials*, 2022
- Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials di Cheng Chen, Xi Wang, Yan Wang, Dandan Yang, Fangyi Yao, Wenxiong Zhang, Bo Wang, Galhenage Asha Sewvandi, Desuo Yang, Dengwei Hu, da *Advanced Functional Materials*, 2020
- A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges, Faisal Khaled Aldawood, 2023
- Song, K.H.; Highley, C.B.; Rouff, A.; Burdick, J.A. Complex 3D-Printed Microchannels within Cell-Degradable Hydrogels. *Adv. Funct. Mater.* 2018, 28, 1801331.
- Saadat, M. Challenges in the Assembly of Large Aerospace Components. In *Integrated Systems, Design and Technology 2010*;
- Sun, L.; Zuo, H. Multi-echelon inventory optimal model of civil aircraft spare parts. In *Proceedings of the 2010 Chinese Control and Decision Conference*, Xuzhou, China, 26–28 May 2010; pp. 824–828. [CrossRef]
- 299. Six Key Trends Impacting Global Supply Chains in 2022—KPMG Singapore, KPMG, 26 July 2022. Available online: <https://home.kpmg/sg/en/home/insights/2022/03/six-key-trends-impacting-global-supply-chains-in-2022.html>
- : Barati, B., & Karana, E. (2019). Affordances as materials potential: What design can do for materials development. *International Journal of Design*, 13(3), 105-123
- Current developments in multifunctional smart materials for 3D/4D bioprinting, Nathan J. Castro, Christoph Meinert, Peter Levett, Dietmar W. Hutmacher, 2020
- The Design of 4D-Printed Hygromorphs: State-of-the-Art and Future Challenges
- Charles de Kergariou, Frédéric Demoly, Adam Perriman, Antoine Le Duigou, and Fabrizio Scarpa da *Advanced Functional Materials*, 2022
- Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials di Cheng Chen, Xi Wang, Yan Wang, Dandan Yang, Fangyi Yao, Wenxiong Zhang, Bo Wang, Galhenage Asha Sewvandi, Desuo Yang, Dengwei Hu, da *Advanced Functional Materials*, 2020
- A Comprehensive Review of 4D Printing: State of the Arts, Opportunities, and Challenges, Faisal Khaled Aldawood, 2023
- Song, K.H.; Highley, C.B.; Rouff, A.; Burdick, J.A. Complex 3D-Printed Microchannels within Cell-Degradable Hydrogels. *Adv. Funct. Mater.* 2018, 28, 1801331.
- Saadat, M. Challenges in the Assembly of Large Aerospace Components. In *Integrated Systems, Design and Technology 2010*;
- Sun, L.; Zuo, H. Multi-echelon inventory optimal model of civil aircraft spare parts. In *Proceedings of the 2010 Chinese Control and Decision Conference*, Xuzhou, China, 26–28 May 2010; pp. 824–828. [CrossRef]
- 299. Six Key Trends Impacting Global Supply Chains in 2022—KPMG Singapore, KPMG, 26 July 2022. Available online: <https://home.kpmg/sg/en/home/insights/2022/03/six-key-trends-impacting-global-supply-chains-in-2022.html>
- : Barati, B., & Karana, E. (2019). Affordances as materials potential: What design can do for materials development. *International Journal of Design*, 13(3), 105-123

- **A Practical Guide to Bio-inspired Design**, Helena Hashemi Farzaneh, Udo Lindemann, Springer, 2005
- **Shape Memory Polymers, Blends and Composites Advances and Applications**, Advanced Structured Materials, Volume 115, Jyotishkumar Parameswaranpillai, Suchart Siengchin, Jinu Jacob George, Seno Jose, Springer, 2020
- **Smart Materials in Additive Manufacturing, Volume 1: 4D Printing Principles and Fabrication**, Mahdi Bodaghi, Ali Zolfagharian, Elsevier, 2021
- **Smart Materials in Additive Manufacturing, Volume 2: 4D Printing Mechanics, Modeling, and Advanced Engineering Applications**, Mahdi Bodaghi, Ali Zolfagharian, Elsevier, 2021
- **Additive Manufacturing Materials and Technologies Series: 4D Printing Fundamentals and Applications**, Rupinder Singh, Elsevier, 2021
- **Smart Materials and New Technologies For the architecture and design professions**, D. Michelle Addington, Daniel L. Schodek, Harvard University, Elsevier, 2005
- **A Practical Guide to Bio-inspired Design**, Udo Lindemann, Helena Hashemi Farzaneh, 2005
- **Fundamentals of Additive Manufacturing for the Practitioner**, Sheku Kamara Kathy S. Faggiani, 2020
- **Menti parallele. Scoprire l'intelligenza dei materiali**, Laura Tripaldi, Effequ, 2020
- **4D Imaging to 4D Printing: Biomedical Applications**, Rupinder Singh, 2023
- **TransMaterial Next**, Blaine Brownell, Princeton Architectural Press, 2017
- **4D Printing of Hydrogels for Biomedical Applications**, Hyunwoo Yuk et al., Advanced Healthcare Materials, 2016.
- **Intelligent 4D Printing Materials and Their Applications**, Xiaoyu Li et al., Materials, 2018.
- **Smart and Self-Healing Polymers for 4D Printing** di Dan Li et al. Macromolecular Rapid Communications, 2019.
- **A Review of Shape Memory Polymers for 4D Printing** di Wei Liu et al., Materials Today, 2020.
- **4D Printing of Shape Memory Polymers for Smart Structures and Devices**, Ke Sun et al., Materials Science and Engineering: R: Reports, 2020.
- **4D printing of smart materials for self-adaptive structures**, Jianwei Ma et al.
- **Programmable 4D Printing of Shape-Memory Polymer Structures with Autonomous Motion**, Zhigang Suo et al.
- **Smart Material-Based 4D Printing for Autonomous Shape Recovery and Transformation**, Zongyin Yang, et al.
- **Advanced 4D Printing of Shape-Memory Polymer Structures with Autonomous Motion Capabilities**, Hao Wei et al.
- **"Intelligent 4D Printing Materials and Their Applications"** di Xiaoyu Li et al. pubblicato su "Materials" nel 2018
- **"A Review of Shape Memory Polymers for 4D Printing"** di Wei Liu et al. pubblicato su "Materials Today" nel 2020
- **"Smart and Self-Healing Polymers for 4D Printing"** di Dan Li et al. pubblicato su "Macromolecular Rapid Communications" nel 2019
- **4D Printing of Shape Memory Polymers for Smart Structures and Devices"** di Ke Sun et al. pubblicato su "Materials Science and Engineering: R: Reports" nel 2020
- **Wei, X., Zhang, Q., Huang, Y., & Gao, L. (2021). Recent advances in 4D printing: Materials, processes, and applications. Journal of Materials Science & Technology, 80, 61-72.**

- 4D Printing of Complex Structures with a Fast Response Time to Magnetic Stimulus di Pengfei Zhu, Weiyi Yang, Rong Wang, et al., 2017
- Material Driven Design (MDD): A Method to Design for Material Experiences, Elvin Karana, Bahareh Barati, Valentina Rognoli, and Anouk Zeeuw van der Laan, 2015
- Sustainable Materials and Chemical Processes for Additive Manufacturing, Eva Sanchez-Rexach, Trevor G. Johnston, Coralie Jehanno, Haritz Sardon, and Alshakim Nelson, 2020
- Technological considerations for 4D printing: an overview, Eujin Pei, Giselle Hsiang Loh, 2020
- FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties, Valentina Mazzanti, Lorenzo Malagutti and Francesco Mollica, 2019
- Ntouanoglou, K.; Stavropoulos, P.; Mourtzis, D. 4D Printing Prospects for the Aerospace Industry: A critical review. *Procedia*
- *Manuf.* 2018, 18, 120–129.
- Sokolowski, W.; Tan, S.; Pryor, M. Light weight shape memory self-deployable structures for gossamer applications. In
- *Proceedings of the 45th AIAA/ASME Conference on Structures, Structural Dynamic and Materials*, Palm Springs, CA, USA,
- 19–22 April 2004; Volume 1660, pp. 1–10. [CrossRef]
- Sossou, G.; Demoly, F.; Belkebir, H.; Qi, H.J.; Gomes, S.; Montavon, G. Design for 4D printing: Modeling and computation of
- smart materials distributions. *Mater. Des.* 2019, 181, 108074. [CrossRef]
- Zhang, Y.; Wang, Q.; Yi, S.; Lin, Z.; Wang, C.; Chen, Z.; Jiang, L. 4D Printing of Magnetoactive Soft Materials for On-Demand
- Magnetic Actuation Transformation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, 13, 4174–4184
- Uddin, F. et al. (2016). Polymethyl methacrylate: A review of the potential for drug delivery applications. *Drug Development and Industrial Pharmacy* 42(11): 1727–1735.
- Brostow, W., Datashvili, T., & Khojah, M. (2011). PMMA in some biomedical applications, revisited. *Journal of materials science. Materials in medicine*, 22(3), 731–742.

Ringraziamenti

Un particolare *grazie* va:

Al mio relatore, il professor *Daniele Rossi* che mi ha accompagnato durante il percorso di tesi guidandomi verso quella che è stato progetto a completamento del mio percorso accademico, lo ringrazio soprattutto per il supporto e la disponibilità, nonché la fiducia, che mi ha offerto durante tutto il percorso accademico, dalla videocall di presentazione su Webex fino all'ultima revisione di tesi.

Al mio correlatore, il professor *Davide Paciotti*, che mi ha affiancato per il percorso di tesi e in particolare durante il periodo di tirocinio, dove è stato una guida e un supporto fondamentale per l'esperienza maturata e per la ricerca condotta, di cui si è sempre mostrato interessato e disponibile in ogni aspetto.

A i miei *genitori*, che mi sono sempre stati accanto e mi hanno supportato fino all'ultimo. Lenza i loro sacrifici e stimoli non sarei arrivato qui oggi, grazie infinitamente.

A mio *fratello* e mia *sorella*. Per avermi sempre fatto sentire a casa anche quando a casa tutti e tre (cinque) non eravamo.

A tutti i professori che mi hanno accompagnato e guidato in questa esperienza formativa, senza la loro esperienza e guida critica non sarei riuscito a portare a compimento i concept, i progetti e le idee proposte.

All'azienda e ad i ragazzi che ogni mattina mi accoglievano come in casa loro, che mi ha permesso di svolgere il tirocinio, la *Da.mi.*, che mi ha permesso di esplorare con mano (e guanti) il mondo industriale e messo a disposizione tutte le proprie conoscenze ed esperienze per la mia crescita accademica.

Ad Alessandro, Carlo, Davide, Piero, Pino, Vito e tutti gli altri che non entrano in questa pagina. Li ringrazio perché pur essendo distanti, sono sempre stato in caverna con loro.

A Giulia, che non so come avrei fatto senza di lei.

A Davide S., per avermi sopportato e supportato in tutti i progetti e all'Hackaton, grazie soprattutto per esserci spronati a vicenda (che le cose che abbiamo fatto, alla fine male non sono).

A Francesca e Francesca (e Francesco) per avermi sopportato e accolto in casa loro.

A Nicolas per esserci divertiti tanto, troppo; e a tutti i ragazzi del Papavero (e non) per aver remato tutti la stessa barca e ad esserci divertiti facendolo.

