



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CAMERINO**

**SCUOLA DI ARCHITETTURA E DESIGN “E. VITTORIA”**

**CORSO DI LAUREA IN**

**Design per l’Innovazione Digitale**

**TITOLO DELLA TESI**

**Sviluppo di un dispositivo soft robotico ad attuazione  
pneumatica per la riabilitazione del polso.**

*Laureando/a*

**Nome.** *Cristina Ceccarelli*

*Relatore*

**Nome.** *Davide Paciotti*

**Firma.** *Cristina Ceccarelli*

**Firma.** *Davide Paciotti*

*Se presente eventuale Correlatore indicarne nominativo/i*

*Pierluigi Antonini*

**ANNO ACCADEMICO**

**2023 - 2024**



**Università degli Studi di Camerino**  
**Scuola di Architettura e Design “E.Vittoria”**  
**Corso di Laurea Magistrale in Design per l’Innovazione Digitale**

Tesi di Laurea

**Sviluppo di un dispositivo soft robotico**  
**ad attuazione pneumatica**  
**per la riabilitazione del polso.**

Relatore  
Prof. Davide Paciotti

Laureanda  
Cristina Ceccarelli

Correlatore  
Prof. Pierluigi Antonini

Anno Accademico 2023 - 2024

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>6</b>
<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>01. La riabilitazione</b>	<b>12</b>
01.1 La riabilitazione	13
01.1.1 La riabilitazione in ambiente ospedaliero	14
01.1.2 La riabilitazione in ambiente domiciliare	14
01.1.3 La riabilitazione in ambiente residenziale e semiresidenziale	15
01.2 La riabilitazione in ambiente domestico	16
01.3 La riabilitazione robot-assistita	20
01.4 La riabilitazione dell'arto superiore	24
01.5 La riabilitazione del polso	26
01.6 Fattori di riabilitazione	28
01.6.1 Movimentazioni	28
01.6.2 Frequenza	29
01.6.3 Fasi di terapia	29
01.6.4 Tipologie di deficit	29
<b>02. Robotica per la riabilitazione</b>	<b>30</b>
02.1 Esoscheletri	31
02.1.1 EksoNR	32
02.1.2 Lokomat	33
02.2 Realtà virtuale per robot indossabili	34
02.3 Robot riabilitativi per il polso	36
<b>03. Design di dispositivi medicali custom - made</b>	<b>44</b>
03.1 Stato dell'arte	47
03.1.1 Cortex	48
03.1.2 Mhox Design	50
03.1.3 Carpal Skin	52
03.1.4 Corsetti	53
03.1.5 ONEBra	54
03.1.6 WeDesign	54
<b>04. Soft Robotica</b>	<b>56</b>
04.1 Definizione	57
04.2 Classificazione a seconda delle applicazioni	60
04.2.1 Robot bio-ispirati e di locomozione	60
04.2.2 Robot manipolatori	62
04.2.3 Pinze morbide	64
04.2.4 Robot medicali ed indossabili	66
04.3 Progettazione e produzione dei soft robots	68
04.3.1 Materiali	68
04.3.2 Attuatori	69
04.3.3 Sensori	72
04.3.4 Elettronica	73
04.3.5 Alimentatori	73
04.3.6 Produzione	74
04.4 Design, modellazione e controllo dei soft robots	75
04.4.1 Design	75
04.4.2 Modellazione e simulazione	76
04.5 Soft Robotic Toolkit	78
<b>05. Attuatori Pneumatici</b>	<b>82</b>

05.1 Pneu - Nets	83
05.2 Brevetto Soft Robotics Pneumatic Actuators	84
05.2.1 Materiali adottati	86
05.2.2 Aumento della rigidità con raggi UV	87
05.2.3 Spessore delle pareti che racchiudono i canali	88
05.2.4 Aggiunta di un livello protettivo	88
05.3 Avanzamenti rispetto al brevetto	90
05.4 Esempi di attuatori pneumatici	96
05.4.1 DARPA Inflatable Robot Arm	96
05.4.2 Anti-Roach, Otherlab	98
05.4.3 Soft Robot, DARPA	99
05.5 Fluid Elastomers Actuators (FEAs)	100
05.6 Architettura dei soft robots	101
<b>06. Ortesi pneumatiche</b>	<b>102</b>
06.1 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica	103
06.2 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica per la riabilitazione della mano	104
06.2.1 Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training	104
06.2.2 A Pneumatic Glove and Immersive Virtual Reality Environment for Hand Rehabilitative Training after Stroke	108
06.2.3 A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Hand Impaired Patients	110
06.2.4 Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation	112
06.3 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica per la riabilitazione delle gambe	114
06.3.1 MotorSkins—a bio-inspired design approach towards an interactive soft-robotic exosuit	114
06.4 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica per la riabilitazione del polso	120
06.4.1 Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation	120
06.4.2 A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators	128
<b>07. Materiali a memoria di forma</b>	<b>132</b>
07.1 Considerazioni sui materiali a memoria di forma	133
<b>08. Concept progettuale</b>	<b>136</b>
08.1 Concept formale	137
08.2 Tabella e analisi dei requisiti	142
08.3 Algoritmo dell'interazione sistema-utente	146
08.4 Schizzi progettuali	148
08.5 Storytelling dell'interazione	154
<b>09. Reverse Engineering</b>	<b>160</b>
<b>10. Selezione dei componenti</b>	<b>168</b>
<b>11. Selezione dei materiali</b>	<b>178</b>
<b>12. Progettazione dell'ortesi pneumatica</b>	<b>182</b>
12.1 Parti che compongono l'ortesi pneumatica	183
12.2 Tutore	182
12.2.1 Metodologia standardizzata	185
12.2.2 Metodologia custom - made	186
12.3 Attuatori	192
12.3.1 Definizione dell'attuatore pneumatico	193
12.3.2 Parametri degli attuatori	194

12.3.2 Parametri degli attuatori	194
12.3.3 Progettazione dell'attuatore	198
12.2.4 Progettazione del Soft Robot	222
12.4 Case elettronico	228
12.5 Presentazione del sistema	234
12.6 Applicazione di riferimento	236
<b>13. Comunicazione ed identità del progetto</b>	<b>238</b>
13.1 Naming e logo	239
<b>14. Metodi di fabbricazione digitale</b>	<b>240</b>
14.1 Silicene nelle applicazioni industriali	241
14.2 Metodi produttivi del silicene	244
14.3 Stampa 3D	248
14.4 Stampa 4D	254
14.5 Pure Silicene Technology, Silicene 40A Resin, Formlabs	256
14.6 Rapid Liquid Printing, MIT	258
14.7 RLP per attuatori pneumatici in silicene	270
<b>15. Conclusioni</b>	<b>284</b>
<b>16. Fonti</b>	<b>286</b>
16.1 Bibliografia	287
16.2 Sitografia	287



*Ab*

Abstract

L'elaborato, analizzando nella prima fase i vantaggi della robotica riabilitativa e l'evoluzione della soft robotica in ambito medicale, si propone di presentare la progettazione di un dispositivo soft robotico dedicato alla gestione autonoma in ambito domestico della riabilitazione del polso da parte dell'utente.

Il dispositivo in silicone, per funzionare

specificatamente secondo le modalità descritte all'interno della tesi, viene sottoposto ad un'attuazione robotica di tipo pneumatico, che causandone la deformazione induce le movimentazioni di rieducazione dell'articolazione danneggiata.

Si ipotizza, inoltre, la produzione custom made con la tecnologia Rapid Liquid Printing.

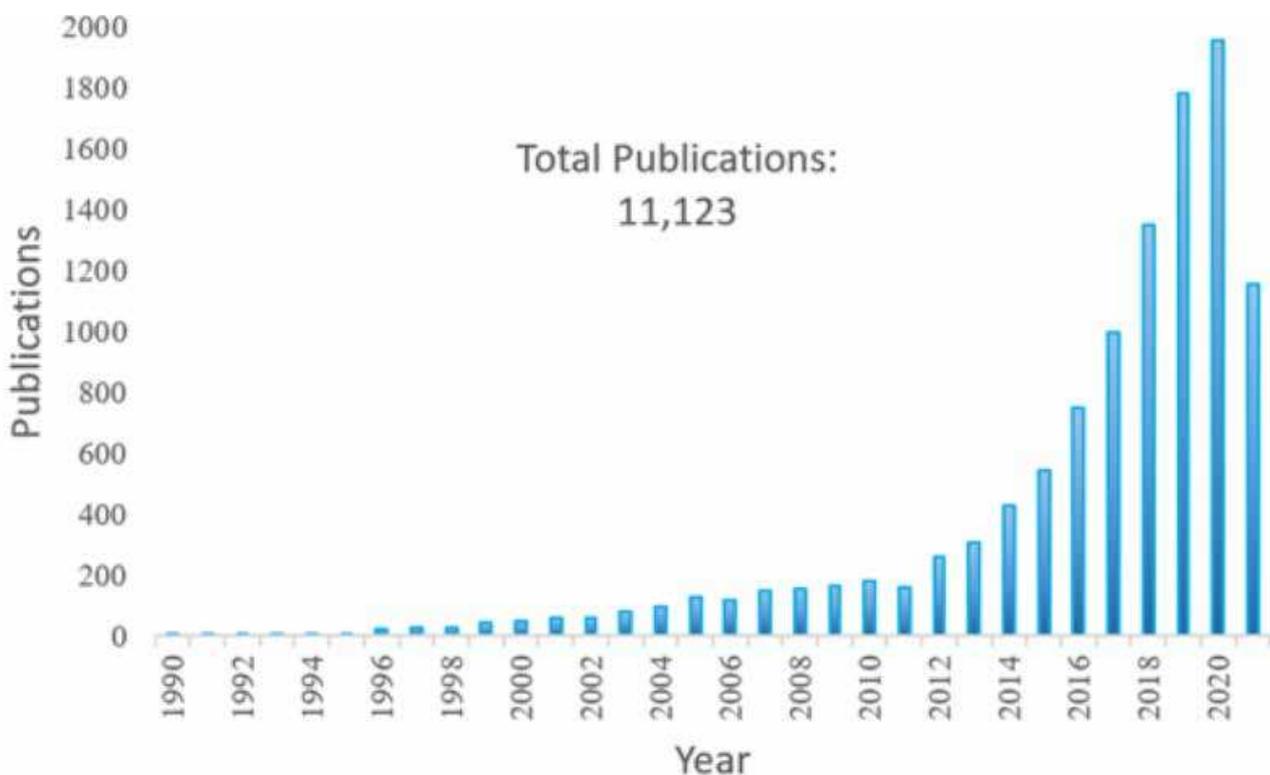
*In*

Introduzione

Il primo utilizzo dei robot moderni avvenne all'interno delle industrie grazie all'impiego del robot progettati in prima istanza per portare a termine mansioni di tipo "pesante" e rimpiazzare i lavoratori nei loro posti di lavoro, soprattutto nei contesti di maggiore pericolosità per questi ultimi. I robot furono pensati per realizzare compiti di alta ripetibilità velocemente ed in maniera precisa ed efficiente. Ciononostante, questi inizialmente furono destinati ad operare in congruenza con notevoli limitazioni, dovute alle loro dimensioni e pesi considerevoli, i quali potevano potenzialmente risultare pericolosi durante l'interazione con gli umani.

La necessità di permettere ai robot di interagire con il mondo, gli oggetti e gli umani attorno a loro in un nuovo modo ha stimolato la ricerca e l'innovazione alla sperimentazione e alla progettazione in numerosi campi d'applicazione e compiti nei quali le persone, l'adattabilità e l'interazione sicura sono le caratteristiche fondative.

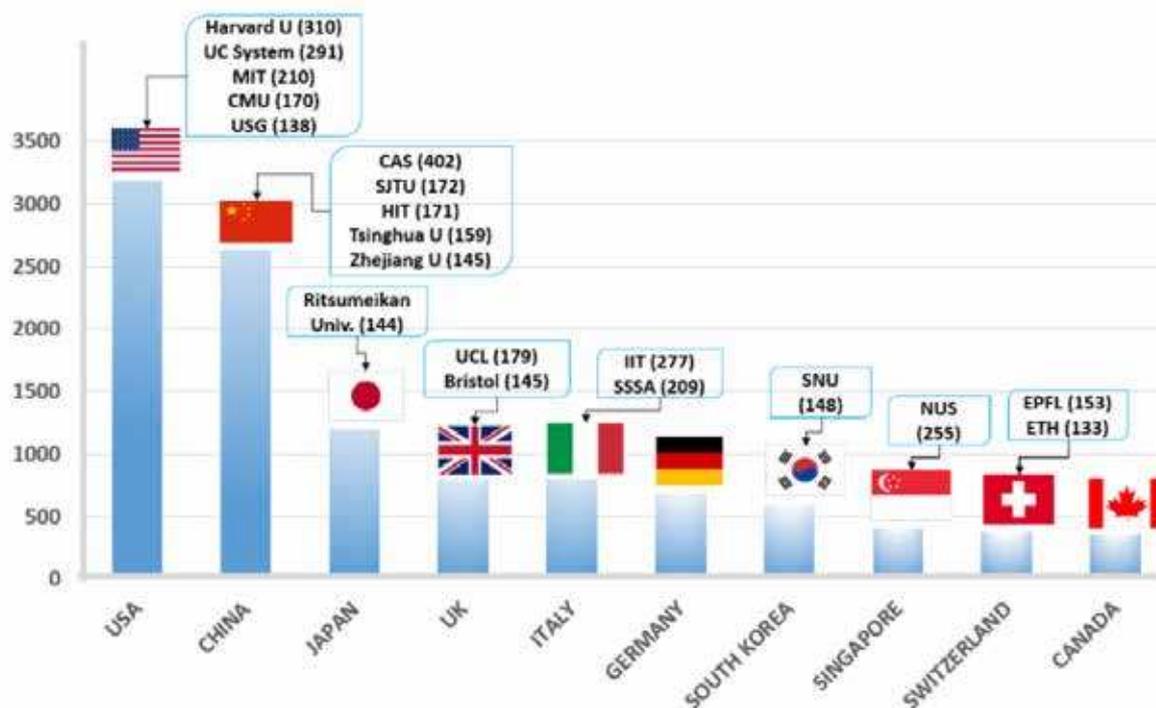
I robot morbidi (soft robots) vengono chiamati così perché sono principalmente composti da materiali flessibili ed elastici capaci di adattarsi facilmente alle caratteristiche ambientali del contesto in cui operano. Queste caratteristiche gli permettono di muoversi in ambienti privi di strutture di protezione e di essere meno pericolosi per le persone che li utilizzano. Questa è anche la motivazione per cui questi robot sono stati particolarmente interessanti nella medicina per sviluppare dispositivi che possano interagire direttamente con i pazienti. Chiaramente, il processo che portò i soft robots alla loro attuale notorietà fu graduale, ed i primi prototipi risalgono agli ultimi anni 90 e ai primi 2000. Tuttavia, fu nel 2008 che i termini "soft robots" e "soft robotics" iniziarono ad essere utilizzati in maniera più frequente, e dal 2012 ci fu un significativo incremento di pubblicazioni relative a questi termini: l'incremento di sperimentazione e ricerca è dovuto conseguentemente allo sviluppo tecnologico e dei materiali potenzialmente interessati.



Fonte: Web of Science; numero di articoli relativi a "soft robotics" o "soft robots" negli anni dal 1990 al 2020

Come è possibile osservare dalla prossima immagine, questo campo di ricerca fu considerato di notevole importanza dalle principali economie mondiali, e vengono quindi

indicati i 10 paesi che producono insieme più del 90% di pubblicazioni riguardo la soft robotica. Viene inoltre indicato il nome di ciascun principale centro di ricerca per ciascun paese.



Fonte: Web of Science; diagramma dei primi dieci paesi per pubblicazioni riguardo la soft robotics ed i nomi dei rispettivi centri di ricerca più importanti

Dopo un primo sguardo al tema trattato in questo elaborato ed all'importanza che questo ha assunto negli anni, grazie all'evoluzione tecnologica ed allo studio sui materiali, si anticipa la scelta dello scenario di riferimento, che coincide con l'ambiente medicale e tutto quell'insieme di oggetti ed artefatti che contribuiscono al supporto dei pazienti o degli utenti con necessità di tipo terapeutico.

Come verrà analizzato nei prossimi capitoli, uno dei principali applicativi della soft robotica è stato ed è ancora oggi proprio quello della progettazione biomedica, e pertanto si individua il contesto di obiettivi fissato per il

2030 dall'Agenda ONU.

L'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile è un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità sottoscritto nel settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri dell'ONU. Essa ingloba 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile – Sustainable Development Goals, SDGs – in un grande programma d'azione per un totale di 169 'target' o traguardi. L'avvio ufficiale degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile ha coinciso con l'inizio del 2016, guidando il mondo sulla strada da percorrere nell'arco dei prossimi anni: i Paesi, infatti, si impegnano a raggiungerli entro il 2030.

# OBIETTIVI PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE



Fonte: Agenzia per la coesione territoriale; obiettivi di sviluppo sostenibile Agenda ONU 2030

In questo elaborato, viene preso in esame in particolare il Goal 3, “Good Health and Well-Being”, che si occupa di garantire una vita sana e promuovere il benessere di tutti i cittadini a tutte le età e per ciascuna attività. L’obiettivo si costituisce di molteplici sottogruppi, ognuno dei quali mira a risolvere specifici problemi

legati al benessere e alla salute dei diversi target e di tutti i cittadini, sia secondo l’obiettivo di garantire a tutti i cittadini la libera espressione della propria personalità, sia secondo quello di garantire i migliori strumenti tecnologicamente possibili per supportarli nel raggiungimento delle migliori condizioni di vita possibili.



**Ensure healthy  
lives and promote  
well-being for  
all at all ages**

*01*

La riabilitazione

## 01.1 La riabilitazione

Il macro-scenario di riferimento si individua nell'ambito della riabilitazione come attività di rieducazione del corpo a seguito di un evento dannoso, come una lesione, un intervento chirurgico, complicazioni del movimento dovute a problemi di salute ed altre motivazioni.

La riabilitazione, insieme alla prevenzione e alla cura, costituisce un pilastro del sistema sanitario per il completamento delle attività volte a tutelare la salute dei cittadini di uno Stato. La riabilitazione è un processo nel corso del quale si porta una persona con disabilità a raggiungere il miglior livello di autonomia possibile sul piano fisico, funzionale, sociale, intellettuale e relazionale, con la minor restrizione delle sue scelte operative, pur nei limiti della sua menomazione.

Quando si parla di riabilitazione si può fare una distinzione tra:

- **attività sanitarie di riabilitazione:** che comprendono gli interventi valutativi, diagnostici, terapeutici e le altre procedure finalizzate a su-

perare, contenere o minimizzare la disabilità e la limitazione delle attività (muoversi, camminare, parlare, vestirsi, mangiare, comunicare, lavorare, etc.);

- **attività di riabilitazione sociale:** le azioni e gli interventi finalizzati a garantire al disabile la massima partecipazione possibile alla vita sociale, al fine di contenere la condizione di handicap.

Secondo quanto previsto dalle Linee guida del 1998 e dal Piano di Indirizzo per la Riabilitazione del 2011, l'attività riabilitativa può essere erogata in:

- **regime di ricovero**, ordinario o diurno (day hospital);

- **regime di assistenza specialistica ambulatoriale/day service** presso ambulatori di medicina fisica e riabilitazione;

- **ambito dell'assistenza territoriale domiciliare**, ambulatoriale, semiresidenziale o residenziale.



Fonte: Hurley Medical Center; sostegno alla riabilitazione della locomozione degli arti inferiori

### 01.1.2 La riabilitazione in ambiente ospedaliero

Il ricovero ordinario riabilitativo è finalizzato ad assicurare un intervento terapeutico riabilitativo ai soggetti che, presentando patologie/problemi acuti di varia gravità, possono avere bisogno di accedere immediatamente a terapie e/o specifici accertamenti nell'arco delle 24 ore.

Nell'ambito degli interventi ospedalieri di riabilitazione si debbono individuare almeno due livelli di intensità assistenziale:

- **attività ospedaliera di riabilitazione intensiva** (identificata in Italia dal cod. 56), che si caratterizza per interventi di recupero di disabilità importanti, modificabili, che richiedono una sorveglianza medico-infermieristica h24. Gli interventi devono essere di norma di tre ore giornaliere, 6 giorni su 7, e comunque di almeno 18 ore settimanali, salvo casi particolari;

- **attività ospedaliera di riabilitazione estensiva**, che si caratterizza per interventi a pazienti con disabilità, con potenzialità di recupero funzionale, che non possono giovare o sostenere un trattamento riabilitativo intensivo ma che richiedono di essere ospedalizzati in quanto presentano una condizione di instabilità clinica e richiedono una sorveglianza medico-infermieristica h24. Gli interventi devono essere di norma di 1 ora giornaliera, 6 giorni su 7, e comunque di almeno 6 ore settimanali, salvo casi particolari.

- **day-hospital riabilitativo**: questo tipo di intervento è destinato a persone che si trovano in condizioni cliniche molto simili a quelle che giustificano la presa in carico intensiva in regime di ricovero ordinario, con l'unica sostanziale differenza che questi pazienti non hanno bisogno di sorveglianza medica e infermieristica h24. Frequentemente, i pazienti hanno bisogno di interventi di riabilitazione intensiva multi-professionali e afferenti ad aree specialistiche diverse, distribuiti nell'arco della giornata.

Possono usufruire dell'attività di riabilitazione ambulatoriale due tipologie di pazienti:

- **casi complessi**: persone affette da menomazioni e/o disabilità importanti, spesso multiple, che richiedono una presa in carico globale nel lungo termine che preveda molteplici programmi terapeutici eseguiti da almeno tre tipologie di professionisti della riabilitazione. Le attività riabilitative vengono erogate sotto forma di prestazioni ambulatoriali complesse e coordinate, con una durata complessiva del trattamento riabilitativo di almeno 90 minuti per accesso;

- **casi non complessi**: persone affette da menomazioni e/o disabilità che hanno bisogno di una sola tipologia di prestazioni riabilitative erogate o direttamente dal medico specialista in riabilitazione o da un'unica tipologia di professionista della riabilitazione.

### 01.1.3 La riabilitazione in ambiente domiciliare

L'intervento domiciliare è destinato ai pazienti che risultano intrasportabili per motivi clinici: si tratta di pazienti che non possono usufruire di un trattamento ambulatoriale perché il trasporto renderebbe inefficace l'intervento stesso o sarebbe rischioso dal punto di vista sanitario.

La valutazione dei bisogni riabilitativi è effettuata dalla UVM territoriale utilizzando tutte le

informazioni già disponibili (ad esempio: lettera di dimissione, cartella clinica, relazione del MMG, progetto riabilitativo di un medico specialista in riabilitazione, relazioni di altri specialisti, notizie socioassistenziali, ecc.) anche attraverso l'uso dello strumento di valutazione multidimensionale adottato dalla Regione.

### 01.1.3 Strutture di riabilitazione residenziale e semiresidenziale

Le attività di riabilitazione svolte nelle strutture residenziali e semiresidenziali si rivolgono a pazienti in condizione clinica stabilizzata che presentano condizioni di disabilità conseguenti a patologie invalidanti e che hanno necessità di un'adeguata tutela assistenziale nelle 24 ore (regime residenziale) o per tempi minori (regime semiresidenziale).

Le strutture possono erogare trattamenti di riabilitazione intensiva o estensiva, solitamente di breve durata, oppure trattamenti socioriabilitativi di lunga durata, destinati al recupero o al mantenimento delle abilità funzionali residue per le persone con disabilità fisiche, psichiche o sensoriali croniche o comunque stabilizzate, congiuntamente a prestazioni assistenziali e

tutelari di diversa intensità. L'accesso ai trattamenti socioriabilitativi deve essere preceduto dalla valutazione multidimensionale dei bisogni riabilitativi e assistenziali del paziente, effettuata da parte dell'UVM mediante l'uso dello strumento di valutazione adottato dalla Regione, e autorizzato dall'Azienda sanitaria di residenza. Il programma riabilitativo sarà prevalentemente orientato al miglioramento, al mantenimento o al recupero delle attività fondamentali della vita quotidiana e al miglioramento delle funzioni sensoriali, motorie, cognitive, neurologiche e psichiche, attraverso interventi psico-educativi, socioeducativi e di supporto alle autonomie e alle attività della vita quotidiana, svolti anche in laboratori o centri occupazionali.



Fonte: Harvard Health

## 01.2 La riabilitazione in ambito domestico

Lo stato dell'arte sulla riabilitazione in ambito domestico e self-made con la guida di prodotti che visualizzano e monitorano i movimenti dei pazienti fa riferimento ad un'ampia gamma di prodotti pensati per seguire in maniera silenziosa le attività motorie degli utenti.

Infatti, tali prodotti non sono pensati solo al fine

di seguire la corretta terapia riabilitativa dei pazienti, ma le tecnologie robotiche e sensoristiche possono essere applicate allo stesso modo anche a tutte quelle attività che riguardano la ginnastica dolce, l'allenamento cognitivo e propriocettivo e l'allenamento in casa anche nel caso di attività più dinamiche e movimentate.



*Fonte: ATI Physical Therapy*

La tecnologia nello sport ha negli ultimi anni avuto infatti una grandissima espansione ed è stata utilizzata per molteplici fini, come quelli di sicurezza, prevenzione, monitoraggio e cura, ma anche spesso dedicata al miglioramento delle performance degli sportivi: in particolar modo, la tecnologia nelle attività di movimento di ciascun genere può essere implementata per gestire i big data dei grandi match sportivi, per agire sul miglioramento delle prestazioni

dei materiali delle strumentazioni e delle attrezzature e per monitorare e controllare l'attività sportiva.

Tali implementazioni non riguardano tuttavia unicamente i grandi sportivi e non sono dedicate esclusivamente ad un utilizzo agonistico, ma piuttosto sono utili oggi soprattutto per tutta quella gamma di utenti che eseguono attività di movimento in ambienti domestici o autonomamente.

Uno dei principali prodotti attualmente in uso che si dedica all'osservazione, al monitoraggio e alla guida dell'attività sportiva è Mirror, uno strumento smart tramite il quale l'utente può seguire delle istruzioni sull'attività sportiva e sui suoi movimenti.

Nonostante non sia mirato per la riabilitazione, Mirror è un ottimo esempio di come può avvenire la relazione tra utente e monitoraggio dei

movimenti: questo prodotto è infatti uno specchio intelligente che indica all'utente i movimenti da compiere e, oltre a offrire un'ampia gamma di lezioni di varie discipline sportive, osservando per tutta la durata della sessione di allenamento lo sportivo, è in grado di monitorare diversi parametri, come lo sforzo, le calorie bruciate, i movimenti corretti e scorretti e tutti i risultati dell'attività.



*Fonte: Mirror*

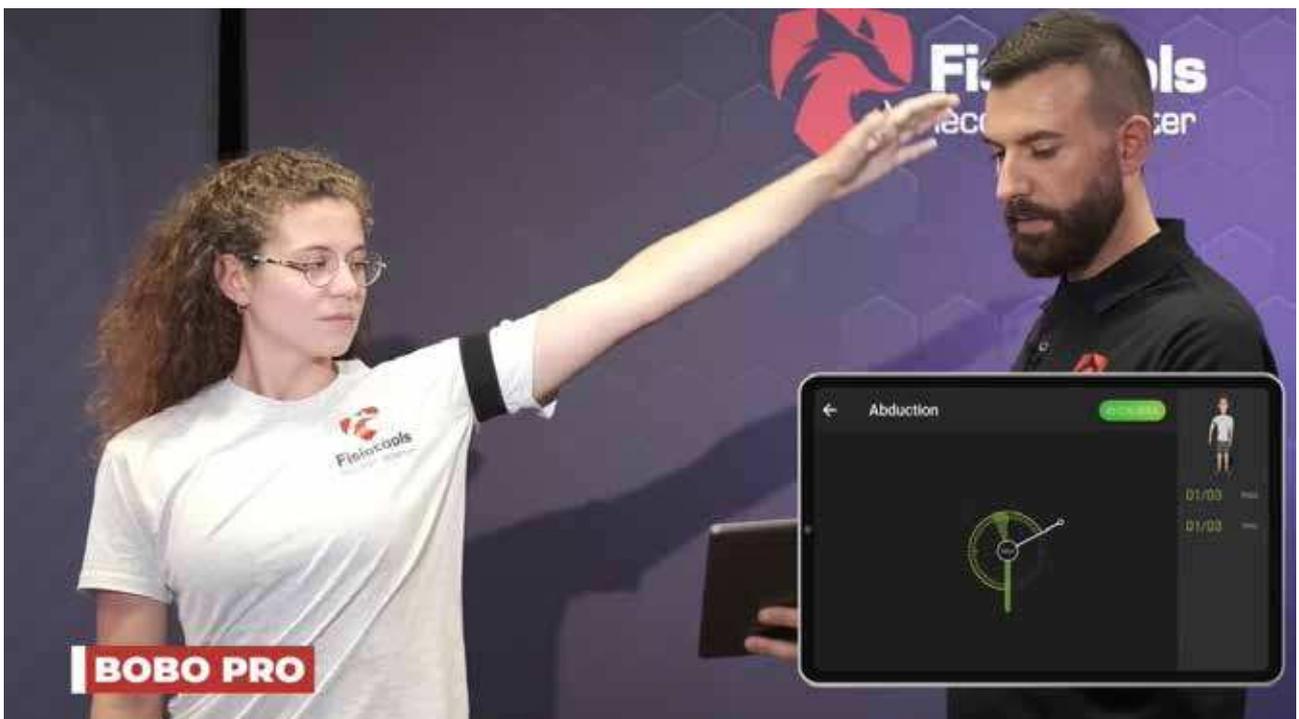
Similmente a quanto accade in questo esempio, sono presenti prodotti che sfruttano le tecnologie di osservazione e di sensoristica per monitorare non solo l'andamento sportivo, ma anche le terapie riabilitative o di potenziamento della muscolatura, della propriocezione o della parte cognitiva. L'azienda Fisiotools, ad esempio, offre una vasta gamma di articoli innovativi per la riabilitazione come, ad esempio, il Bobo Pro 2.0, una pedana per la propriocezione degli

arti inferiori che, entrando in relazione con uno schermo utilizzato dal paziente durante la sessione, lo guida e lo monitora negli esercizi da compiere.

In questo modo, il prodotto mira a digitalizzare la fase di recupero per perseguire diversi obiettivi: innanzitutto è possibile tracciare i risultati molto più velocemente rispetto ai tradizionali metodi ed è possibile farlo anche autonomamente e in casa, inoltre è possibile personaliz-



Fonte: Bobo Pro 2.0



Fonte: Bobo Pro

zare le terapie e i protocolli da seguire a seconda delle necessità di ciascun utente, e soprattutto, sfruttando la componente ludica visibile sullo

schermo, la motivazione nel compiere gli esercizi viene rafforzata e tutto il processo di cura viene reso più divertente e leggero.



*Fonte: Bobo Pro 2.0*

La pedana propriocettiva è infatti dotata di un sensore inerziale che monitora tutti i movimenti e gli utenti possono scegliere di procedere con le sessioni giocando a dei videogame in cui il classico joystick viene ora sostituito da tale pedana: è proprio il movimento degli arti da riabilitare che determina lo stato di avanzamento del gioco, che rende il processo più user friendly e che garantisce anche maggiore velocità di recupero proprio perchè più leggero.

Lo stesso principio viene utilizzato in un altro prodotto della stessa azienda: utilizzando lo stesso sensore inerziale posizionato sulla pedana propriocettiva, e posizionandolo in una fa-

scia indossabile su un arto, è possibile svolgere attività di riabilitazione come nell'esempio qui riportato. In questo caso, l'applicazione mostra al paziente i movimenti da fare ed egli ha quindi come obiettivo quello di rimanere sempre all'interno di limiti spaziali segnalati visivamente dal gioco. L'obiettivo è quindi quello di guidare l'utente durante tutto l'allenamento, potendo tracciare i risultati delle sessioni di allenamento, della sua precisione nel seguire le indicazioni spaziali fornite dal gioco, nel suo tempo di risposta e nella sua capacità di mantenere le posizioni richieste.

## 01.3 La riabilitazione robot-assistita

La robotica funzionale riabilitativa è sempre più diffusa ed apprezzata nel campo della riabilitazione neuromotoria volta al recupero di disabilità generatesi a seguito di patologie neurologiche come cerebrolesioni, lesioni midollari, ictus, sclerosi multipla, Parkinson e tutte le patologie ortopediche dovute a gravi traumi del sistema nervoso centrale.

Gli studi e l'esperienza confermano che la riabilitazione robotica si rivela più efficace di quella tradizionale. La robotica funzionale riabilitativa è la disciplina che consente il recupero di handicap acquisiti in seguito a traumi del sistema nervoso centrale.

Elemento fondamentale della riabilitazione robotica è la presenza di terapisti in grado di gestire perfettamente i sistemi robotici e di modularli in base alle esigenze dei pazienti. Vero punto di forza della robotica funzionale riabilitativa, infatti, è la capacità di variare i parametri che rendono il percorso di riabilitazione adatto al paziente. Va sottolineato, quindi, quanto sia indispensabile il connubio tra macchinari altamente efficienti e operatori preparati.

Un servizio riabilitativo completo prevede, in alcuni casi, anche altre attività di rieducazione neuropsicologica logopedica. Perciò, è richiesta la collaborazione dell'operatore di robotica funzionale riabilitativa con professionisti quali ortopedici, logopedisti e podologi.

L'efficacia della robotica funzionale riabilitativa è dimostrata da prove cliniche su soggetti affetti da lesioni del sistema nervoso centrale causate, per esempio, da ictus. Questi pazienti mostrano un grande potenziale di recupero in seguito a una riabilitazione ripetitiva, come quella prevista dall'utilizzo del robot. Ripetitività, frequenza e intensità sono infatti gli elementi che maggiormente favoriscono il recupero funzionale. Questo tipo di movimenti stimolano l'attuazione di sequenze neuromotorie corrette, che vengono assimilate dall'individuo in forma automatica. La robotica si mostra più efficace della terapia tradizionale soprattutto nel recupero di alcuni movimenti, come quelli di abdu-

zione della spalla e flessione dell'avambraccio, il cui percorso di recupero appare più rapido ed efficace.

Il trattamento di robotica funzionale riabilitativa è preceduto dalla visita fisiatrica durante la quale viene stilato il progetto di riabilitazione e ne vengono condivisi modalità e obiettivi col paziente. A ciò segue la definizione del programma con gli altri operatori componenti del team e vengono individuate le modalità rieducative più indicate. I trattamenti di robotica funzionale riabilitativa richiedono generalmente tempo e molta costanza, ma proprio grazie all'intensità e ripetitività delle azioni indotte e richieste, si possono ottenere ottimi risultati, spesso permanenti.

I trattamenti di robotica funzionale riabilitativa possono essere divisi in tipologie, a seconda del distretto corporeo che interessano.

Questi sono:

- sistema robotico per la rieducazione del cammino;
- sistema robotico per la rieducazione dell'arto superiore;
- rieducazione propriocettiva su pedana computerizzata;
- tappeti per rieducazione propriocettiva dinamica.

I sistemi robotici impiegati nella riabilitazione del paziente possono quindi essere macchinari dedicati alla riabilitazione, all'interno dei quali il paziente può svolgere l'allenamento specifico per la propria disabilità, oppure robot indossabili, quindi esoscheletri e protesi intelligenti che supportano il paziente nello svolgere il movimento.

Nella riabilitazione, uno dei principali fattori determinanti dei fenomeni di riorganizzazione cerebrale e di recupero motorio è rappresentato dall'elevata ripetitività del gesto e di intensità di esercizio. In riabilitazione, tali parametri vengono comunemente ricondotti al numero di ripetizioni durante una seduta riabilitativa o al tempo dedicato alla pratica motoria (intensità). Studi su modelli animali hanno definito che



*Fonte: Exoskeletons For Neuromuscular Patients*

sono necessarie diverse centinaia di ripetizioni del medesimo gesto per indurre fenomeni di plasticità neuronale e in parallelo, osservazioni condotte nella pratica clinica hanno evidenziato come, durante una comune sessione riabilitativa, il numero di ripetizioni di movimenti dell'arto superiore raggiunga solo poche decine di unità. Tuttavia, i tentativi di evidenziare una relazione tra dose e benefici funzionali mediante studi clinici incentrati sulla riabilitazione tradizionale, hanno avuto risultati poco conclusivi. Contrariamente, l'utilizzo di dispositivi tecnologici, come i robot per la riabilitazione dell'arto superiore, ha permesso di evidenziare con maggior chiarezza l'importanza dell'intensità nella pratica riabilitativa.

Hsieh et al. hanno infatti dimostrato che un protocollo di rieducazione robot-assistita ad alta intensità produce migliori risultati sul recupero motorio rispetto ad un protocollo a minor intensità. Numerosi studi hanno riportato come durante una seduta di rieducazione tecnologica, il paziente sia in grado di eseguire circa 700-800 ripetizioni di movimenti dell'arto superiore,

che rappresentano circa il doppio di quelli raggiungibili durante una sessione di riabilitazione convenzionale intensiva di pari durata.

La grande differenza tra le ripetizioni necessarie e quelle effettuate in pratica clinica, può essere spiegata dal fatto che gli esercizi per l'arto superiore sono spesso complessi, richiedono movimenti combinati di diverse componenti corporee, adattamento della mano all'oggetto, capacità di afferrare e manipolazione. Un trattamento intensivo costituito da centinaia di ripetizioni con queste caratteristiche è difficile da sostenere non solo fisicamente, ma anche mentalmente per l'elevata ripetitività del compito richiesto.

L'utilizzo di dispositivi robotici può quindi permettere di implementare le ripetizioni che è possibile effettuare durante il trattamento, incrementando l'intensità della pratica, senza provocare eccessiva faticabilità o frustrazione nel paziente. Il vantaggio della terapia robotica risiede anche nella possibilità di aumentare l'interattività del trattamento e il coinvolgimento del paziente mediante l'utilizzo di scenari di

realtà virtuale e giochi.

La partecipazione attiva del paziente, inoltre, nel corso delle sedute di robotica, tende ad aumentare progressivamente. Il coinvolgimento cognitivo durante la riabilitazione è un aspetto spesso trascurato, ma è parte di un continuum che va dall'ideazione del gesto motorio fino alla finalizzazione del movimento.

Il dominio cognitivo, in particolare le funzioni esecutive con task di allerta ed attenzione, può essere coinvolto dal training robotico con feedback visivo ed utilizzo di giochi. Ne consegue quindi che i robot che includono un feedback visivo o un'associazione con un videogame vadano considerati come un addestramento al dual-task motorio e cognitivo.

Questa integrazione tra le funzioni cognitive e motorie contribuisce al recupero motorio in quanto il sistema cognitivo svolge un ruolo importante nell'adattamento, richiamo ed apprendimento motorio tramite la formazione di una

memoria motoria a lungo termine, che sottende modificazioni nella connessione neuronale del sistema cerebello-talamo-corticale.

Un ulteriore elemento fondamentale dei dispositivi robot-assistiti, in particolare degli esoscheletri, che li rende particolarmente appetibili in ambito riabilitativo, è la possibilità di fornire un supporto gravitazionale per migliorare la qualità del movimento durante movimenti di raggiungimento (reaching).

Il supporto prossimale dell'arto superiore sembra infatti essere in grado di spezzare l'accoppiamento sinergico abduzione di spalla e flessione di gomito, caratteristico del soggetto emiplegico con menomazione moderata o severa, favorendone l'estensione attiva del gomito. Il paziente supportato è in grado di estendere maggiormente il gomito durante il movimento attivo, aumentando quindi il range di movimento del gomito, la fluidità e la velocità del movimento in un ambiente in 3D.



*Fonte: DIEGO, Tyromotion*



## 01.4 La riabilitazione dell'arto superiore

La riabilitazione della mano e dell'arto superiore è un ramo specialistico della fisioterapia e della terapia occupazionale, nato dall'esigenza di adeguarsi alle sempre più sofisticate tecniche chirurgiche ed alle richieste di maggior qualità dei risultati e di ripresa funzionale sia da parte del medico che del paziente.

È necessario un fisioterapista specializzato nella riabilitazione dell'arto e della mano poiché sono organi complessi e delicati. Ogni volta che qualcosa come un trauma, una immobilizzazione o una patologia altera il preciso equilibrio dell'arto, questo risponde con reazioni particolari che lo differenziano da qualsiasi altro distretto corporeo, rendendo necessario un intervento specialistico. Bisogna contattare e recarsi da un fisioterapista ogni qualvolta è indispensabile restituire alla mano o all'arto la sua funzionalità e "l'armonia dei suoi strumenti".

- In seguito ad un periodo di immobilizzazione in gesso o dopo un intervento chirurgico più o meno importante. Talvolta anche dopo un'operazione semplice e banale possono verificarsi effetti spiacevoli come una mano gonfia o una cicatrice aderente, che si possono risolvere con gli accorgimenti giusti e in tempi brevi.

- In presenza di patologie infiammatorie o degenerative (artrosi, artrite reumatoide...) per mantenere il più a lungo possibile la funzionalità della mano ed imparare dal terapeuta gli atteggiamenti corretti per salvaguardare le strutture malate.

- Prima di alcuni interventi chirurgici (transfer tendinei, innesti, tenolisi, artrolisi...) per preparare la mano e i suoi tessuti all'intervento, riducendo così i successivi tempi di recupero.

La perdita di funzionalità della mano, ad esempio, può essere causata da diversi fattori: traumi più o meno complessi, sindromi dolorose o infiammatorie da sovraccarico, patologie degenerative, lesioni a nervi o tendini. Il terapeuta della mano può intervenire sia in ambito conservativo che post-chirurgico o post-traumatico.

Nel corso degli ultimi anni, l'implementazione nella pratica riabilitativa di dispositivi robot-as-

sistiti per la rieducazione dell'arto superiore si è progressivamente consolidata. Tale tecnologia si è proposta come strumento in grado di erogare una pratica intensa e ripetitiva di gesti motori funzionali o meno dell'arto superiore, in un ambiente terapeutico motivante e sfidante per il paziente.

La maggior parte dei dispositivi robotici attualmente in uso permette di sfruttare diverse modalità di azione che si basano sull'approccio assistito in base alle necessità del singolo paziente (assist-as-needed), che si divide in:

- training passivo mediante il quale il dispositivo applica una forza per promuovere l'esecuzione del corretto movimento, tramite l'utilizzo di attuatori;

- un training assistito all'interno del quale il paziente effettua l'esercizio con il supporto del dispositivo durante l'intero esercizio;

- training attivo-assistito in cui il paziente effettua il movimento e l'assistenza viene offerta solo nel momento in cui il soggetto non è in grado di completare la performance richiesta o all'inizio del movimento;

- training attivo con la macchina non imprime forza o correzioni al soggetto, che deve volontariamente effettuare il compito richiesto, mentre il dispositivo viene utilizzato solo a scopo di misurazione della performance eseguita o di supporto gravitazionale.

Uno studio ha enfatizzato come il dispositivo robotico MIT-Manus, ad esempio, sia in grado di indurre adattamenti all'imposizione di un campo di forza (force field adaptation) simili nei soggetti sani e nei pazienti con esiti di ictus cerebrale, anche se questi ultimi necessitano di maggiore pratica. Tale intuizione ha dato luogo ad ulteriori speculazioni finalizzate a valutare se fosse possibile ottenere effetti positivi sul recupero motorio, applicando nuovi campi di forza all'arto paretico. In particolare, l'ipotesi maggiormente verificata sino ad ora, è che aumentando gli errori durante l'esecuzione di movimenti di reaching, si sviluppa un effetto tardivo (after-effect) al termine del trattamento,

che corrisponde ad una traiettoria di movimento più fluida e simile al normale. Tali benefici sono stati testati in uno studio clinico in pazienti con esiti di ictus cerebrale in fase cronica a supporto dell'applicabilità in clinica di tale approccio robotico così poco diffuso e testato fino ad ora principalmente il paziente con sclerosi multipla.

Riguardo alle modalità di trattamento robotico, non è ancora chiaro se sia più efficace un approccio basato sulla ripetizione di singoli movimenti, volto a migliorare selettivamente la menomazione di vari segmenti corporei o un allenamento più globale e funzionale con coinvolgimento dell'intero arto superiore.

Ad oggi, la scomposizione del trattamento in singoli moduli di apprendimento sembra avere maggiori benefici utilizzando dispositivi ad end-effector, mentre con un esoscheletro non è stata provata la superiorità di un protocollo che

coinvolga movimenti globali dell'arto superiore rispetto a movimenti selettivi.

Tuttavia, altre ipotesi di utilizzo sono in fase di studio, come ad esempio quella recentemente testata nello studio pilota SMARTS2, ove il paziente, in epoca precoce dopo ictus cerebrale, viene esposto ad un trattamento immersivo non funzionale ed orientato a migliorare la qualità di movimenti ampi e in 3D, mediante supporto gravitazionale dell'arto paretico e utilizzo di realtà virtuale immersiva.

Infine, un'ulteriore modalità di utilizzo di taluni dispositivi robot-assistiti, come il MIT-Manus, l'Armeo Spring o l'Armeo Power, è data dalla possibilità di utilizzare tali strumenti per una valutazione oggettiva e standardizzata della menomazione e funzionalità dell'arto superiore, con possibilità di intercettare aspetti del recupero motorio non evidenziabili con le valutazioni cliniche comunemente in uso.



*Fonte: Armeo Power*

## 01.5 La riabilitazione del polso

La riabilitazione del polso è un'attività necessaria per tutti quei pazienti che necessitano di recuperare la normale mobilità a seguito di problematiche di varia natura, come ad esempio a seguito di fratture o lesioni provocate da incidenti.

Tradizionalmente, la riabilitazione, e quindi il recupero, che avviene secondo graduali movimenti del polso e della mano, secondo tutti gli

angoli e le direzioni di movimento possibili, viene fatta in centri specializzati in cui il paziente è prontamente seguito dai medici o dai fisioterapisti che gli illustrano l'utilizzo di macchinari specifici.

Le fratture del polso, ovvero delle estremità distali del radio e più raramente dell'ulna, rappresentano circa il 17% delle fratture totali trattate in pronto soccorso (Kulej M., et al., 2008).



L'età più colpita è quella intorno ai 60 anni con una maggiore incidenza nel sesso femminile (60%), mentre fino ai 30 anni l'incidenza è maggiore nel sesso maschile come conseguenza di incidenti sportivi, stradali o traumi da caduta (Anwar F., et al., 2009); tra i 30 e i 50 anni i due sessi si equivalgono fino ad essere 7 volte superiori nelle donne dopo i 60 anni, complice l'osteoporosi post-menopausale e la frequenza delle cadute.

Le fratture del polso possono inoltre essere di vario tipo, e generalmente vengono classificate come fratture extra-articolari, articolari e articolari complete, e l'obiettivo del trattamento di una frattura del polso è il ripristino della corretta anatomia per ottimizzare la fisiologia articolare post-traumatica.

Il raggiungimento del miglior risultato funzionale possibile è la priorità di ogni tipo di intervento, sia esso conservativo, chirurgico o riabilitativo.

La funzionalità del polso e della mano è essenziale per la vita quotidiana ed è necessaria una particolare cura per evitare di compromettere l'integrità di queste strutture: oltre all'ampiezza del movimento (AROM e PROM) e alla forza, al fine di un recupero completo è imprescindibile porre attenzione al ripristino delle sensibilità tattili, alla propiocezione e agli esercizi di abilità.

Il polso e la mano sono costituiti da una serie di articolazioni che lavorano insieme per la massima mobilità e duttilità funzionale e la sola immobilità può determinare rigidità articolare, contratture, e perdita dell'effetto tenodesico.

Alcuni studi ormai datati (Vidal, Allieu, 1972; Nelson, Manske, 1993) hanno calcolato che dopo una frattura del polso solo il 22% dei casi ritorna alla normale escursione articolare e, nonostante questo, i pazienti avvertono ugualmente un deficit di performance. Questo avviene poiché le articolazioni mediocarpiche si

adattano rapidamente alla nuova situazione con movimenti di compenso.

Ecco, quindi, la necessità di un intervento riabilitativo mirato precoce, qualsiasi sia il tipo di trattamento ortopedico: la riabilitazione non deve assolutamente essere mirata a sfruttare i meccanismi di compenso, ma deve porre la propria attenzione principalmente all'articolazione radio-carpica, al fine di evitare le aderenze che si formano nei postumi del trauma. Inoltre, è necessario porre attenzione alle articolazioni prossimali o distali che possono sviluppare rigidità, a partire dalla scapolo-omerale fino alle interfalangee distali.

Il trattamento riabilitativo è ovviamente diversificato e personalizzato in base all'età e alla tipologia del paziente, al tipo di lesione ed anche al tipo di trattamento ortopedico, ma si può affermare che la riabilitazione mira sempre al miglioramento della mobilità, al rafforzamento delle articolazioni per prevenire altre lesioni future, e spesso viene prevista anche una fase di stretching per favorire l'allungamento muscolare e agire quindi sulla flessibilità del polso.

Come è stato precedentemente detto, la riabilitazione viene sempre svolta secondo le guide di esperti che, grazie all'utilizzo dei macchinari e al completamento di specifici esercizi di mobilità, riescono ad accompagnare il paziente nella fase di recupero.

Lo stato dell'arte su tali macchinari è ampio ed il loro utilizzo è ormai consolidato nell'utilizzo all'interno dei centri.

Anche l'utilizzo dei robot riabilitativi ultimamente è in espansione e questi sono dei macchinari più intelligenti dei classici che, essendo afferrabili dai pazienti, guidano la movimentazione del polso secondo tutti gli angoli e le direzioni possibili fungendo sia da aiuto nella prima fase di riabilitazione, sia da resistenza per favorire il rafforzamento nella fase più avanzata e finale della terapia.

## 01.6 Fattori di riabilitazione

Come è emerso dalla ricerca, e come è stato anche confermato dal centro fisioterapico Medisport Center di Perugia, nel caso della necessità di riabilitare il polso a seguito di una problema-

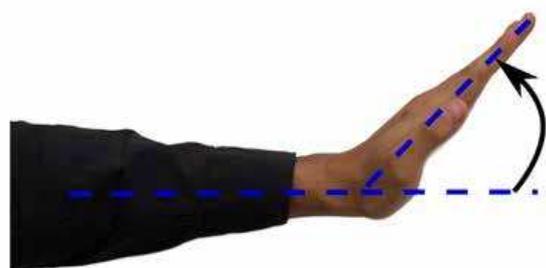
tica, ci sono alcuni fattori di particolare importanza da considerare e da sottolineare nella fase di ricerca preliminare a quella di progettazione presentata in questo elaborato.

### 01.6.1 Movimentazioni

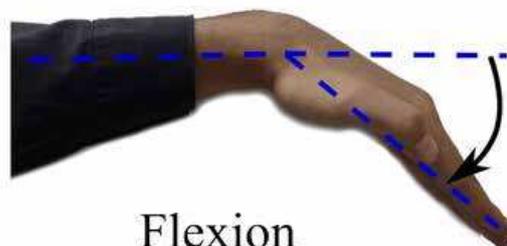
Il primo fattore da considerare, chiaramente, è lo studio e l'analisi delle movimentazioni del polso, le quali sono schematizzate nell'immagine che segue, presentata dall'articolo "Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-aligning Wrist rehabilitation robot" pubblicato in occasione della sesta edizione della

IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics.

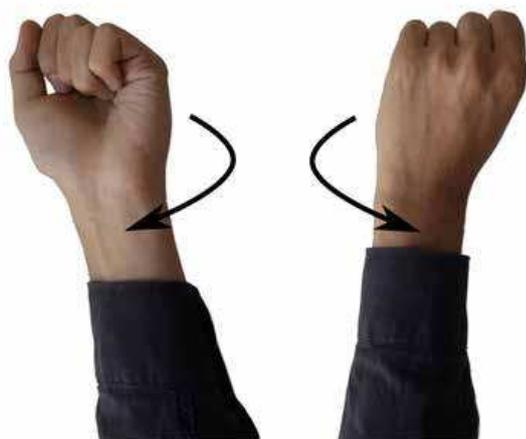
Le movimentazioni possibili sono tre in entrambi i sensi, ovvero complessivamente sei: flessione ed estensione, adduzione ed abduzione e supinazione e pronazione.



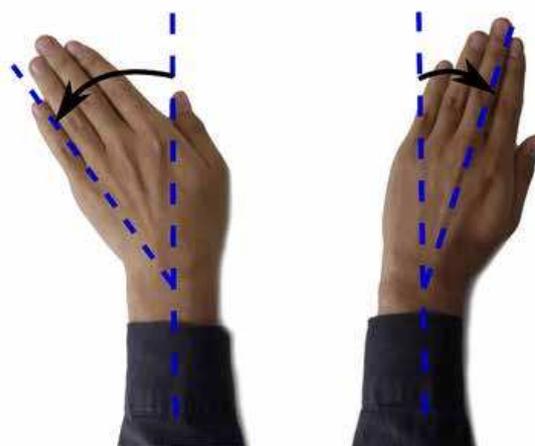
Extension



Flexion



Supination Pronation



Abduction Adduction

Fonte: *Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-aligning Wrist rehabilitation robot*, 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, movimentazioni del polso

## 01.6.2 Frequenza

Il secondo fattore da considerare per una riabilitazione di successo è la frequenza con cui gli esercizi di riabilitazione vengono svolti: come viene spesso ripetuto negli articoli accademici, come è stato fatto presente anche dal centro medico intervistato e come viene descritto dal libro “Wrist Flexion: What’s Normal, What’s Not and Exercises to Improve It.” di Erica Hersh, ciò che rende una terapia riabilitativa di successo, oltre che la qualità dei movimenti, è la loro frequenza.

## 01.6.3 Fasi di terapia

Di grande importanza è anche l’analisi delle diverse fasi principali della terapia di riabilitazione, la quale si compone di tre principali momenti: immobilizzazione, supporto e resistenza. La prima fase di immobilizzazione è utilizzata soprattutto nei casi di deficit articolare da trauma, che comprende cause come le fratture e le microfratture, gli slogamenti ecc. In questo primo momento è necessario mantenere il polso fermo durante tutti i momenti della giornata, e di solito questa operazione viene fatta grazie all’utilizzo di fasciature, tutori o gessi.

La seconda fase è quella di ausilio, la quale presenta l’utilizzo di una strumentazione di supporto per compiere con poca difficoltà le mo-

Gli esercizi di riabilitazione, per avere un vero e proprio beneficio sulla tempistica di cura del paziente, devono essere svolti con grande frequenza, che si collega ai concetti di grande intensità ed elevata ripetibilità del gesto. Come è stato anticipato nel paragrafo riguardante la riabilitazione robot-assistita, è proprio la possibilità di ripetere il movimento molte più volte rispetto a come sarebbe possibile senza, che rende i robot di particolare ausilio funzionale.

vimentazioni descritte in precedenza. In questa fase è importante che il paziente continui a tenere a riposo il polso, ma che permetta il recupero motorio in maniera facilitata.

La terza ed ultima fase consiste nell’integrazione di un fattore di resistenza alle movimentazioni riabilite per permettere al paziente il totale recupero della forza e per rinforzare al massimo le articolazioni compromesse per prevenire eventuali futuri danneggiamenti. Una volta danneggiata, infatti, l’articolazione ha bisogno di essere rinforzata e solitamente, in mancanza di robot riabilitativi, queste operazioni vengono svolte grazie all’utilizzo di elastici per lo sport o di piccoli pesi.

## 01.6.4 Tipologie di deficit

È infine importante sottolineare che, nonostante siano presenti molteplici cause possibili alla base del danneggiamento dell’articolazione, in ciascun caso in terapia vengono utilizzati i medesimi esercizi. Le cause possono essere

diverse, come ictus, problemi neuromuscolari, fratture ossee ed artriti, e ciò che può cambiare in terapia sono le tempistiche, ma vengono sempre compiuti gli esercizi di movimentazione descritti.

02

Robotica per la  
riabilitazione

Dopo aver analizzato le caratteristiche della terapia riabilitativa, viene ora in questo capitolo presentata l'evoluzione della categoria dei robot individuata come dispositivi indossabili e robot medicali.

In questa categoria di dispositivi è possibile parlare di: dispositivi tattili, esoscheletri e inoltre anche applicazioni in realtà virtuale. La maggior parte dei casi studio nello stato dell'arte riguarda dispositivi dedicati alla guarigione della mano, del polso e talvolta degli arti inferiori per quanto riguarda la locomozione poiché

queste sono le zone maggiormente interessate e per le quali è possibile sviluppare prodotti indossabili. È inoltre importante sottolineare che vengono qui analizzati dispositivi per la riabilitazione post traumatica e che l'applicazione in realtà virtuale mira a sottolineare l'importanza del design e della progettazione anche virtuale in sinergia con l'utilizzo di tali dispositivi. Tuttavia, vengono considerati soltanto i prodotti indossabili, omettendo tutte le soluzioni unicamente virtuali.

## 02.1 Esoscheletri

Lo sviluppo storico degli esoscheletri di riabilitazione ha previsto la progettazione di due principali tipi di dispositivi: il primo consiste in una struttura di collegamento a barre, mentre il secondo è un guanto attuato con dei tendini. Queste modalità di riabilitazione presentano analogie (attuatori e sensori) ma design di tipi molto differenti, in particolare, il secondo caso risulta molto più comodo e facile da indossare da parte dei pazienti.

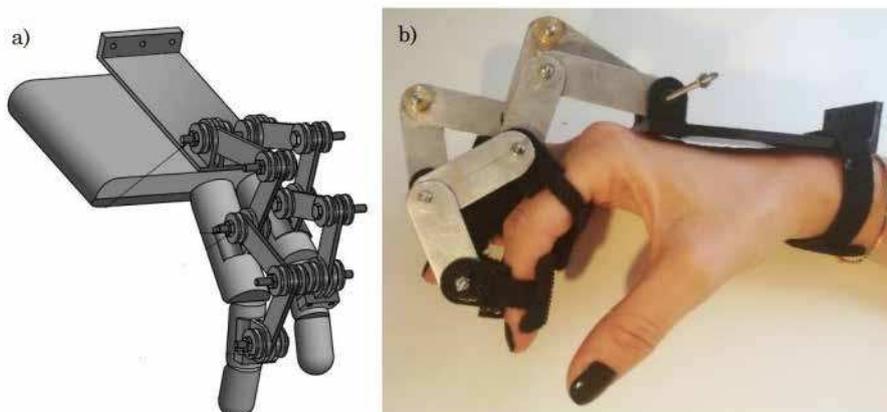
Spesso, nei dispositivi di riabilitazione vengono inoltre utilizzati dei sensori di elettromiografia superficiale: questi si occupano di misurare l'attività mioelettrica, la risposta del muscolo e l'attività elettrica in risposta a una stimolazione del nervo muscolare della zona interessata.

I segnali elettrici sono i responsabili delle con-

trazioni dei nostri muscoli e sono quelli che permettono il movimento del nostro corpo (aprire e chiudere la mano, ruotare il braccio e muovere le dita).

Tuttavia, tra gli esempi di esoscheletri è possibile notare come spesso siano strutture rigide e di largo ingombro per un utilizzo comodo da parte dell'utente: la presenza di link rigidi e di giunture tra le parti per permettere il movimento li rende sicuramente funzionali in ambiente clinico ma poco adeguati agli ambienti domestici ed alla riabilitazione anche autonoma.

Questi sistemi prevedono un grande numero di componenti rigide, e pertanto risultano essere anche molto costosi ed è difficoltosa la produzione customizzata nell'ottica della specifica esigenza.



Fonte: *Soft robotics: application, design and control*, Silvia Terrile; esempio di esoscheletro rigido per la riabilitazione del dito

### 02.1.1 EksoNR

Lo stato dell'arte riguardante i robot rigidi assistivi alla riabilitazione vanta molteplici casi di sperimentazioni e dispositivi presenti sul mercato, ed i più studiati e celebri sono sicuramente gli esoscheletri rigidi.

Uno degli esempi più famosi è EksoNR, un esoscheletro robotizzato prodotto dall'azienda Ekso Bionics ed utilizzato nella riabilitazione

post ictus che si è rivelato efficace nel migliorare i tempi di ripresa e la capacità di camminare in pazienti non deambulanti.

Il dispositivo è dotato di EksoView, un controller touchscreen che consente ai terapeuti di adattare in modo intuitivo l'assistenza e che fornisce un feedback in tempo reale, in modo da eseguire misure di efficacia durante l'uso.



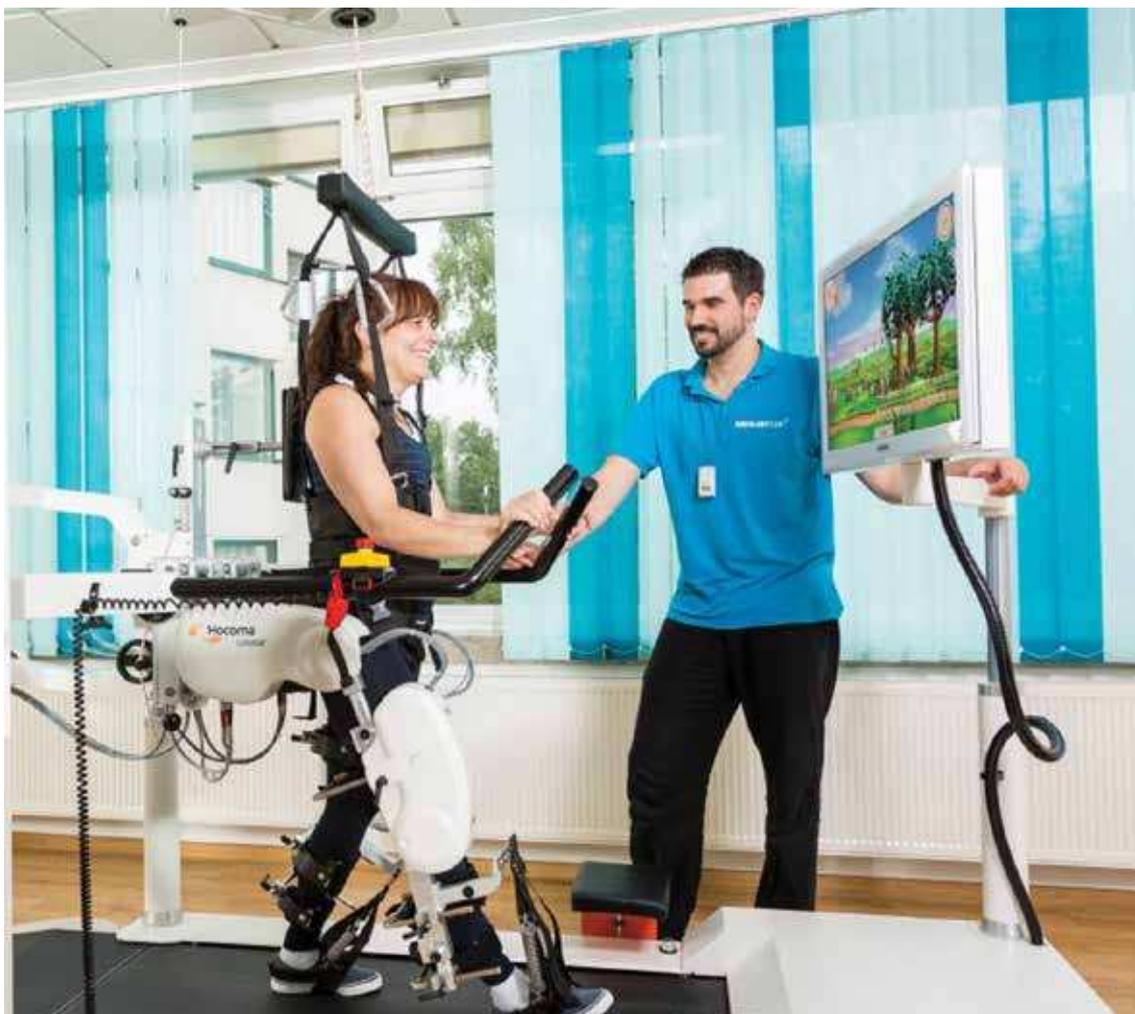
*Fonte: EksoNR*

## 02.1.2 Lokomat

Tra gli esempi di dispositivi di riabilitazione dell'andatura, di particolare importanza è anche il Lokomat di Hocoma, sviluppato nel 2016, che sospende l'utente utilizzando un'imbracatura aerea e che grazie ad un design modulare, può essere aggiornato o modificato secondo le

necessità previste dalla terapia, che viene quindi personalizzata su misura del paziente.

I casi studio analizzati in queste fasi di ricerca evidenziano tuttavia molteplici scomodità, ricollegabili al loro peso, al loro volume, alla impossibilità di customizzare i dispositivi per esi-



Fonte:Lokomat

genze specifiche, all'elevato costo e soprattutto al fatto di non poter essere utilizzati comodamente negli ambienti domestici, ma unicamente sotto supervisione del medico specializzato. Il design e l'innovazione in generale hanno tuttavia apportato molteplici vantaggi, individuabili nei campi seguenti:

- trattamento parametrico del dispositivo per

quanto riguarda la customizzazione su misura del paziente

- la soft robotica come tecnica robotica innovativa in grado di rivoluzionare la comune accezione dei robot rigidi

Di seguito vengono pertanto analizzati questi aspetti.

## 02.2 Realtà virtuale per robots indossabili

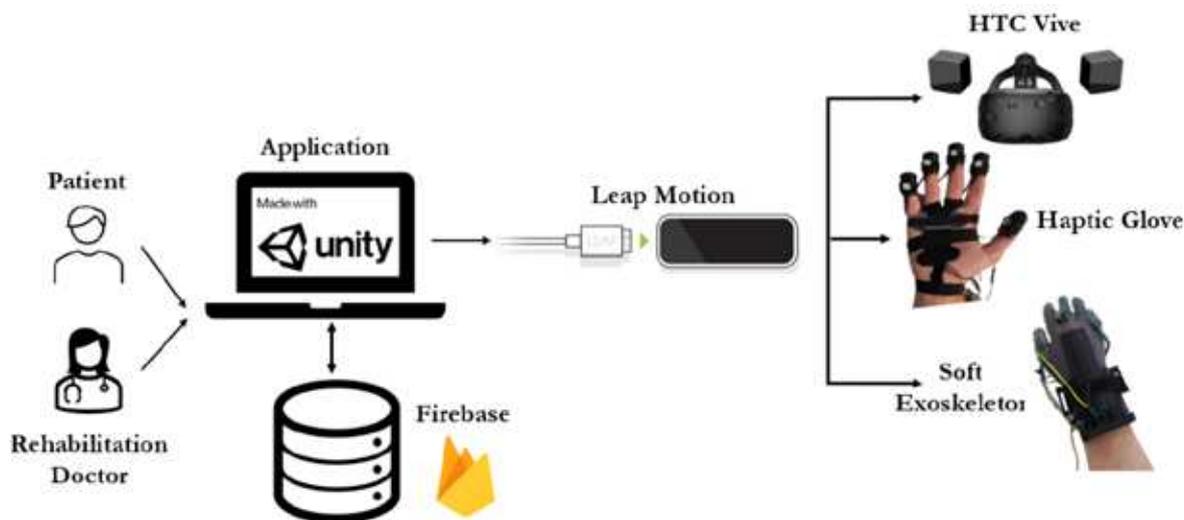
La realtà virtuale nella riabilitazione per la mano è stata utilizzata le prime volte negli anni 2000 ed uno dei primi esempi, illustrato nell'articolo "Virtual reality-based post-stroke hand rehabilitation" (R. Boian, A. Sharma, C. Han, A. Merians, G. Burdea, S. Adamovich, M. Recce, M. Tremaine, H. Poizner) riguarda un guanto che monitora i movimenti della mano, delle dita e la presa di queste ultime grazie all'utilizzo di un Xbox che guidava il paziente in 4 esercizi. L'esempio mirava a lavorare su aspetti di riabilitazione differenti: sulle menomazioni delle possibilità di movimento delle dita, sulla velocità di movimento, sul frazionamento e sulla forza.

Successivamente, con il lavoro presentato in "AR – REHAB: An augmented reality framework for poststroke-patient rehabilitation" (A. Akamri, J. Cha, A. El Saddik) si è introdot-

ta la realtà aumentata per realizzare esercizi di riabilitazione. Il sistema in questo caso risulta più complesso rispetto al precedente poiché è stato sviluppato un database di riferimento per i profili dei pazienti, permettendo la riabilitazione anche quando i medici non fossero presenti con i pazienti fisicamente.

Lo stato dell'arte degli studi iniziali, tuttavia, è molto ampio e gli articoli evidenziati costituiscono solo un punto di partenza per conoscerne le origini.

L'utilizzo della realtà virtuale è illustrato in questo elaborato come un naturale complemento ai prototipi di riabilitazione, e come è stato già accennato, permette un'esperienza molto più immersiva ed aiuta il paziente, anche e soprattutto in ambiente domestico, a gestire le proprie sessioni di terapia in maniera molto più leggera e divertente.



*Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; esempio di progettazione dell'esperienza in realtà virtuale*



*Fonte: Float robot, Rehab Technologies Lab di IIT e NEAR Lab, Politecnico di Milano*

## 02.3 Robot riabilitativi per il polso

I robot riabilitativi presenti sul mercato presentano caratteristiche simili, e viene qui proposto uno schema riassuntivo delle movimentazioni che questi permettono di fare, che sono quindi l'estensione quando la mano viene sollevata verso l'alto, la flessione quando viene mossa verso il basso, la supinazione e la pronazione che rappresentano i movimenti del polso secondo l'asse di rotazione, e l'abduzione e l'adduzione che rappresentano i movimenti della mano sul piano rispettivamente a destra e sinistra.

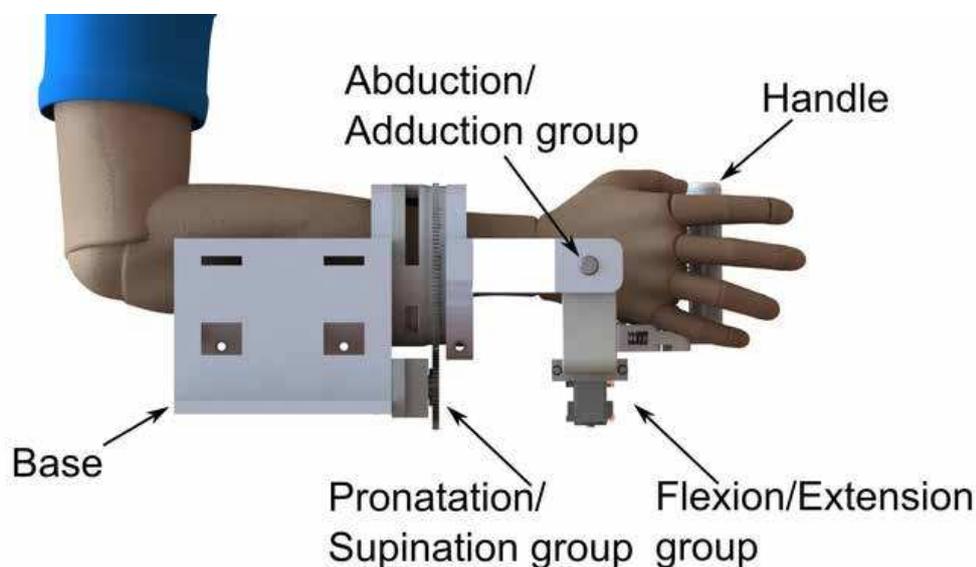
I robot riabilitativi permettono quindi di compiere tali movimentazioni e si presentano generalmente nei modi seguenti.

Tali robot riabilitativi sono dotati di alcuni elementi che permettono la sicura movimentazione del polso, in particolare sono dotati di una struttura esterna all'interno della quale inserire l'avambraccio che consente all'arto superiore di rimanere in posizione ferma durante tutta la

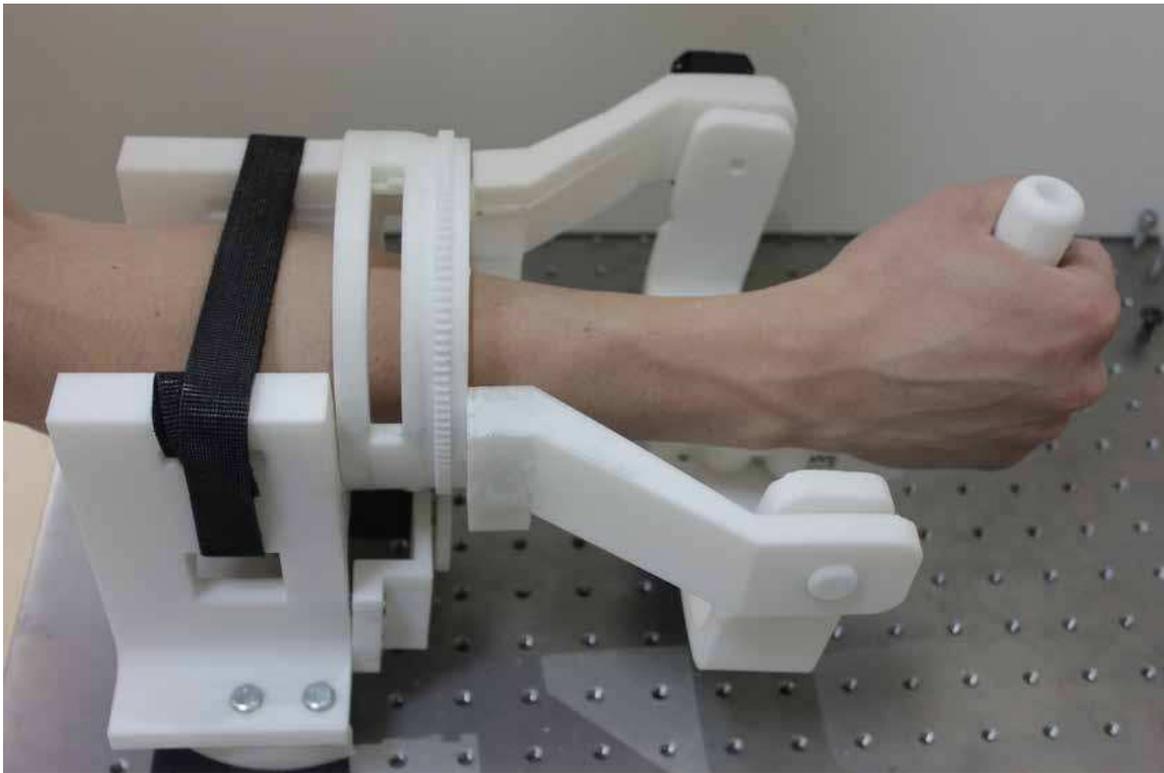
durata della sessione.

Inoltre, l'elemento successivo è un elemento di presa da afferrare con la mano interessata in maniera tale da avere anche questa ben ferma sull'appoggio.

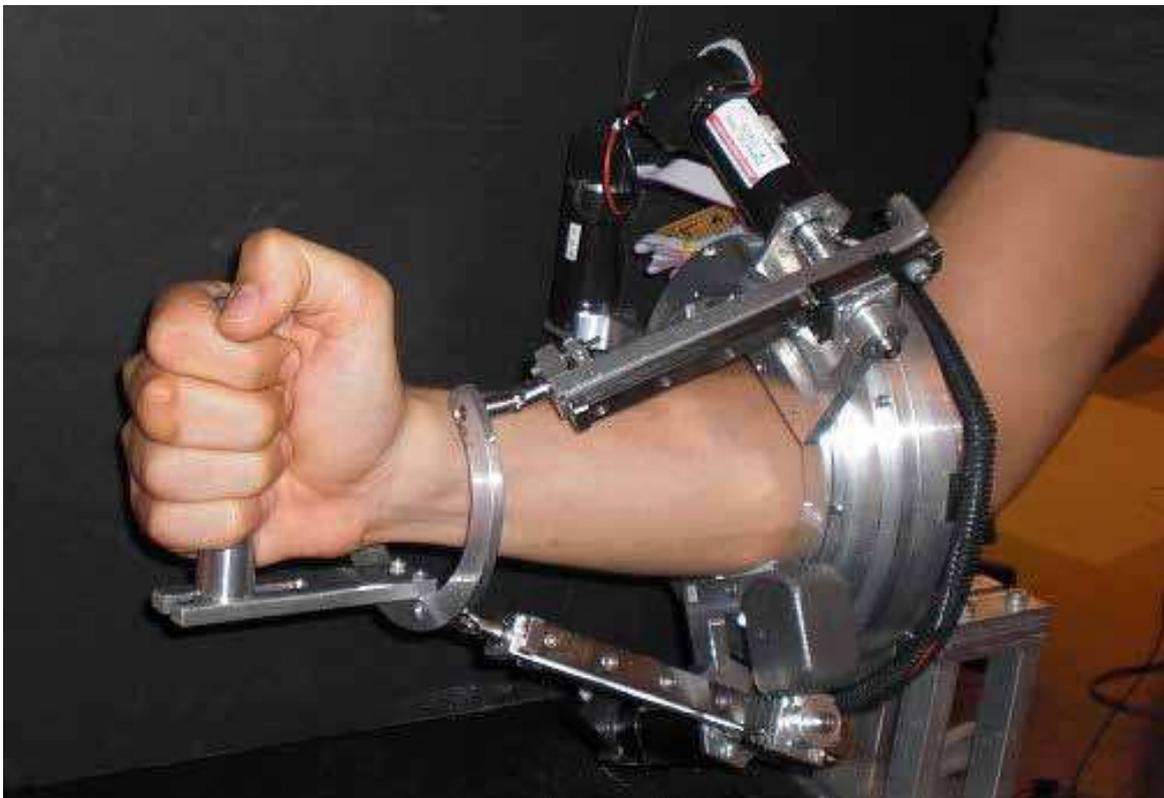
Come viene esplicito nell'immagine di riferimento, oltre alla base di appoggio dell'avambraccio e alla presa per la mano, sono presenti degli elementi che permettono i movimenti del polso precedentemente illustrati, ovvero il gruppo gli elementi che si dedicano alla pronazione e alla supinazione, il gruppo di elementi dedicati all'abduzione all'adduzione ed infine il gruppo di elementi per la flessione e l'estensione: è importante notare che per tutti i movimenti ciò che si sposta in maniera robotizzata è la presa sulla quale giace la mano del paziente, e non la base, che invece è sempre ferma per non andare ad interessare altri gruppi muscolari e di articolazioni di gomito e spalla.



*Fonte: Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-aligning Wrist rehabilitation robot, 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, elementi robotici*



*Fonte: Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-aligning Wrist rehabilitation robot, 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, prototipo di robot riabilitativo*



*Fonte: Adaptive Control of a Serial-in-Parallel Robotic Rehabilitation Device, 2013 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*

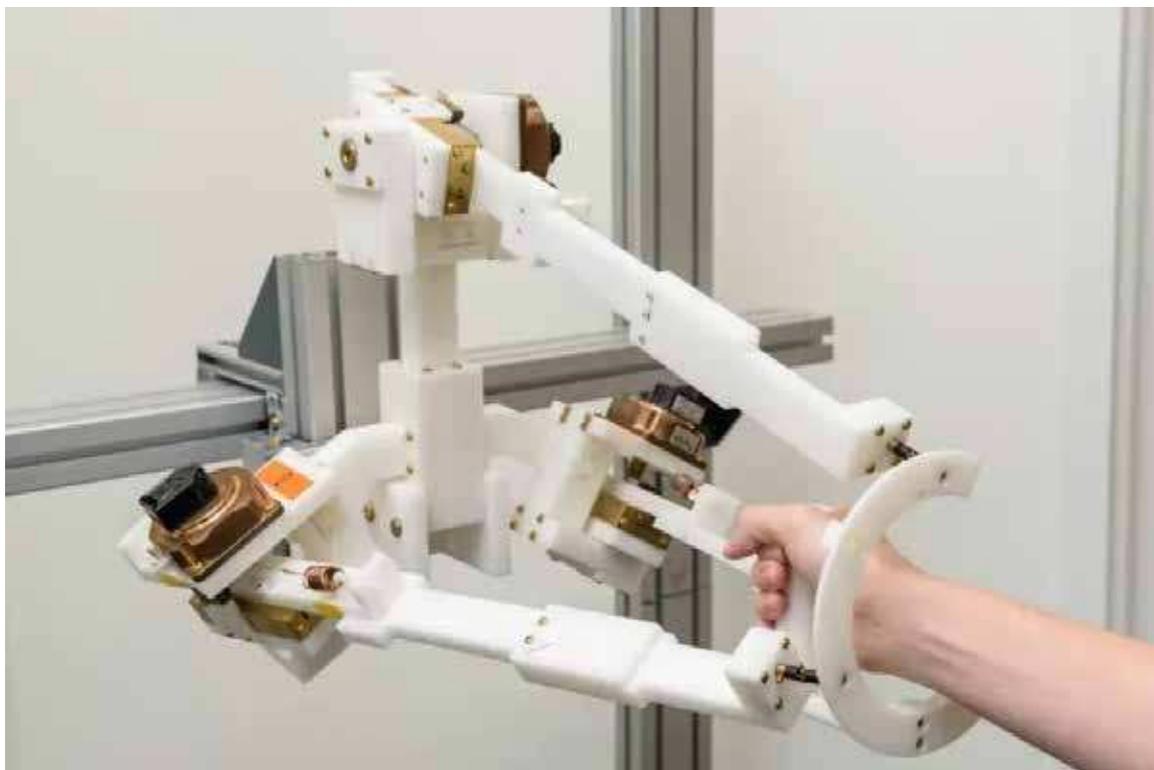
Simile a questi robot riabilitativi è inoltre l'esempio dello studio dell'Università di Delaware che ha analizzato la riabilitazione a seguito di ictus nei pazienti, mettendo in relazione alla riabilitazione della mano anche l'attività cerebrale.

I medici di solito valutano le prestazioni motorie di un paziente colpito da ictus con una serie di semplici test, come ad esempio la capacità del paziente di prendere una penna e di rimetterla sul banco, ma tuttavia questi indicatori non sono abbastanza sensibili per rilevare la riorganizzazione neurale a breve termine, ovvero il ricablaggio e il recupero del cervello.

Il Dott. Sergi, responsabile di tale studio, sta usando la risonanza magnetica funzionale, una tecnica di imaging cerebrale non invasiva, per vedere come il cervello dei pazienti risponde agli esercizi che eseguono con un robot controllato dal polso e compatibile con la risonanza magnetica.

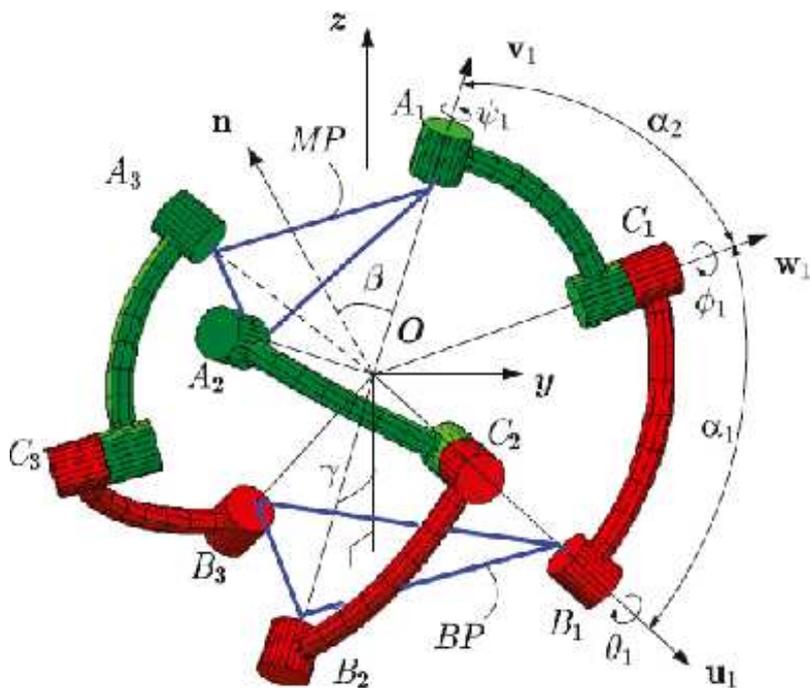
Il programma di riabilitazione motoria è ripetitivo: l'uso del robot controllato dal polso è simile all'uso di un joystick per videogiochi, con

la differenza che il robot interagisce fisicamente con il soggetto, applicando forze per assistere o sfidare il giocatore durante il videogioco. Utilizzando la risonanza magnetica funzionale, il dott. Sergi misura l'attività cerebrale dei partecipanti allo studio mentre eseguono gli esercizi, nonché poco prima e dopo. Cercando la riorganizzazione neurale, soprattutto nella via cortico-talamica-cerebellare del cervello, viene fatta un'analisi avanzata basata sull'apprendimento automatico che può anche rivelare altre aree cerebrali coinvolte nell'apprendimento motorio. Il dott. Fabrizio Sergi, confrontando poi i risultati della risonanza magnetica con i miglioramenti motori visibili a occhio nudo quando i pazienti eseguono gli esercizi, è in grado, grazie a questo macchinario, di utilizzare queste informazioni per prevedere i successivi miglioramenti della funzione motoria. Questa tecnologia può essere messa alla prova anche rispetto ad altri metodi per verificare il recupero motorio, tra cui l'imaging del tensore di diffusione per misurare l'integrità delle fibre corticospinali, nonché le dimensioni e la localizzazione delle lesioni.



*Fonte: University of Delaware, Dott. Fabrizio Sergi*

Un'ulteriore tipologia di robot riabilitativi sono i cosiddetti manipolatori sferici paralleli, macchinari che possono fornire tre gradi di libertà di rotazione intorno al centro virtuale della sua piattaforma. Seguendo lo schema riportato, si nota che ogni gamba del manipolatore ha due collegamenti sferici e tutti gli assi articolari di questi collegamenti si intersecano in un punto



Fonte: *Spherical robot wrist control with compensation of compliance errors, European Control Conference*

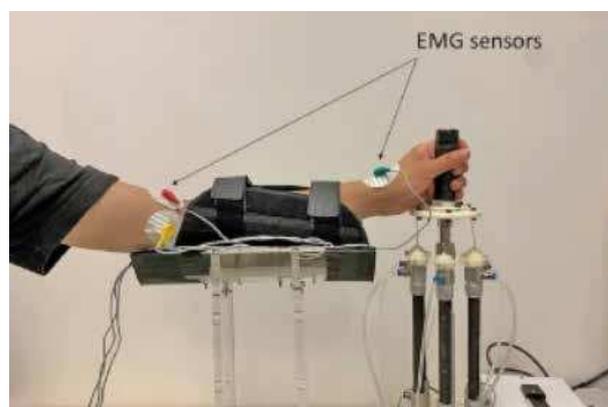
In base alle diverse strutture meccaniche, dallo stato dell'arte si evince che i robot per la riabilitazione del polso possono essere suddivisi in robot per la riabilitazione con terminale e robot per la riabilitazione con esoscheletro.

Tra quelli con terminale è presente un'ulteriore tipologia di robot per la riabilitazione, ovvero robot paralleli morbidi basati su muscoli artificiali pneumatici, che consentono anche in questo caso i classici movimenti secondo i gradi di libertà consentiti. Anche qui infatti, l'avambraccio viene appoggiato in maniera sicura su una base e la mano afferra una presa collegata ai muscoli pneumatici che gonfiandosi e sgonfiandosi ruotano la presa nello spazio. Oltre alla movimentazione, è possibile collegare al braccio dei sensori mioelettrici che monitorano

comune.

Posizionando la mano sul punto d'appoggio posto superiormente alle gambe di rotazione, è possibile in questo caso muovere e ruotare il polso secondo tutti i gradi di libertà consentiti, sia come aiuto alla riabilitazione, sia come resistenza, nel caso in cui questa venga programmata per il robot.

i movimenti e i risultati della riabilitazione durante la durata della sessione.



Fonte: *Design and testing of a soft parallel robot based on pneumatic artificial muscles for wrist rehabilitation*

Tra i robot ad esoscheletro, Aramis è un dispositivo robo-meccatronico concepito per la riabilitazione motoria ed il recupero funzionale degli arti superiori di pazienti con esiti di gravi cerebrolesioni.

Aramis è composto da due esoscheletri simmetrici aventi ciascuno 5 gradi di libertà attivi e 2 gradi di libertà passivi per permettere una precisa regolazione sui diversi pazienti. Il paziente è seduto su una sedia regolabile che è posta al centro tra i due esoscheletri che indossa e la catena cinematica di ciascun esoscheletro è stata riprodotta partendo dai movimenti naturali del braccio umano. Ogni esoscheletro è master e slave dell'altro e può registrare il movimento dell'arto sano e replicarlo sull'arto plegico.

Il programma riabilitativo viene stabilito dal riabilitatore ed il sistema permette di personalizzare le sedute o di utilizzare programmi e sedute riabilitative precaricate. I pazienti, indossati gli esoscheletri in un tempo massimo di 5 minuti, inizia la seduta in totale sicurezza con minima

supervisione del terapeuta.

Le modalità di funzionamento di Aramis prevedono:

- la possibilità di registrare il movimento tridimensionale nello spazio con l'arto sano e replicarlo in asincrono sull'arto plegico;
- la possibilità di registrare il movimento tridimensionale nello spazio con l'arto sano e replicarlo in sincrono su entrambi gli esoscheletri;
- la possibilità di intervento del robot in modalità attiva-assistita qualora il paziente non riuscisse a completare il movimento della sua precedente registrazione.

In quest'ultima modalità può essere estrapolato un indice relativo all'attività svolta dal paziente e all'attività svolta dal robot. Infine, nella modalità attiva-assistita è possibile selezionare una percentuale di completamento del movimento registrato dal paziente in modo da incrementarlo in maniera graduale per incentivare il paziente nella riuscita dell'esercizio.



*Fonte: Aramis*

Per i progetti più avanzati viene inoltre ultimamente interpellata anche la realtà virtuale, come nel caso di VRRS (Virtual Reality Rehabilitation System), che è un dispositivo medicale realizzato da Khymeia basato sul sistema di teleriabilitazione.

L'estrema facilità di utilizzo, l'elevata capacità di personalizzazione, la completa reportistica automatica, la funzione teleriabilitazione, sono alcuni tra i principi guida dello sviluppo continuo del sistema, che è concepito come un "HUB centrale" al quale è possibile connettere tramite USB una serie di dispositivi periferici specialistici, completamente sincronizzati ed

integrati con il sistema.

VRRS, con il sistema di acquisizione cinematica magnetica, è utilizzato come routine clinica per la riabilitazione di un ampio spettro di patologie tramite i numerosi moduli riabilitativi contenente una vasta libreria di esercizi clinicamente validati per il recupero neurologico (motorio, cognitivo, logopedico, posturografico, mano, dita e polso, capo cervicale, realtà virtuale immersiva, terapia occupazionale, sinergie muscolari) e ortopedico (caviglia, ginocchio, bacino, anca, mano, dita, polso, gomito, spalla, schiena, capo cervicale).

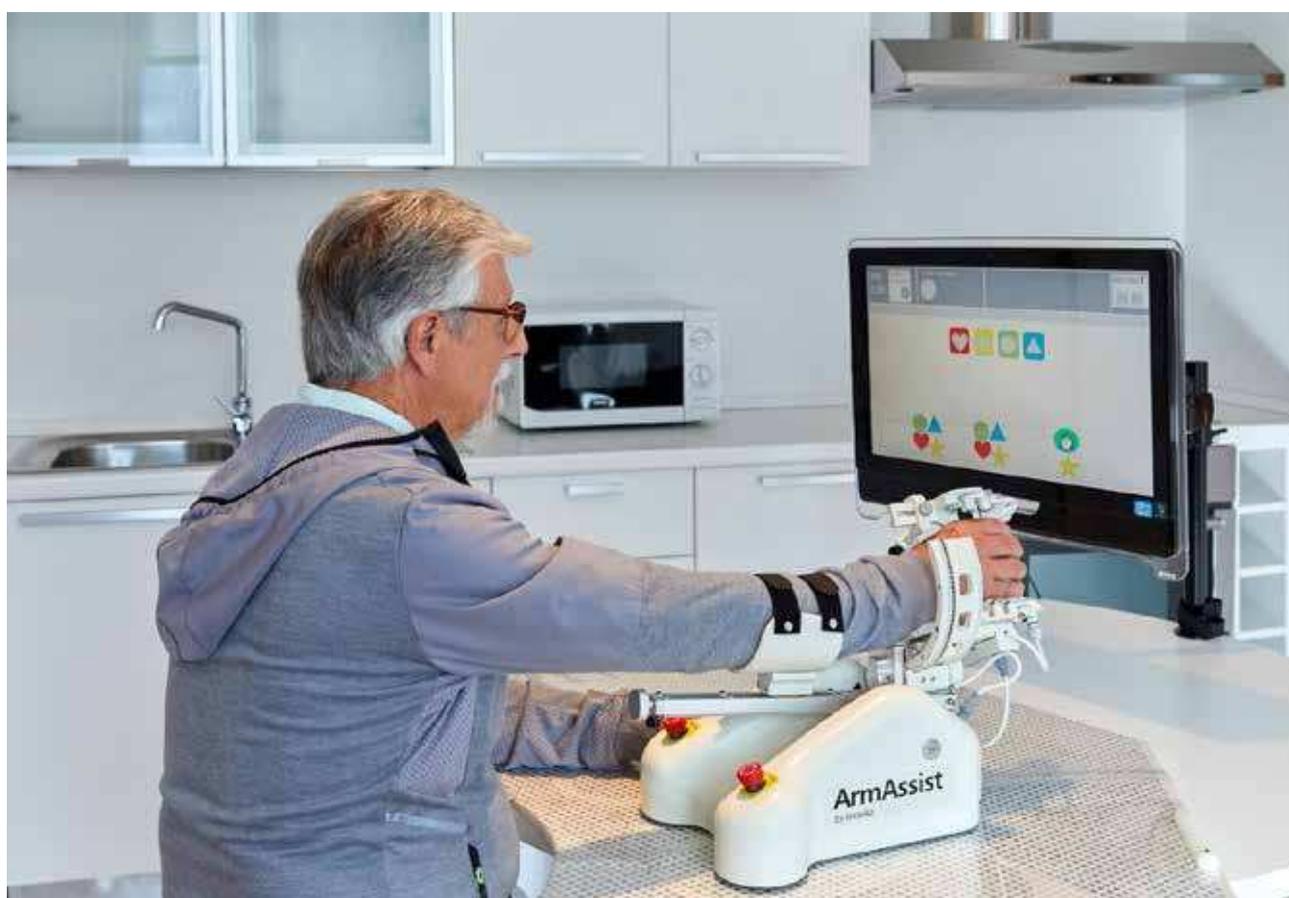


Fonte: VRRS (Virtual Reality Rehabilitation System), Khymeia

Tra i prodotti che integrano il processo di riabilitazione con il fattore del gioco, di rilevante importanza è l'ArmAssist di TecNALIA che, essendo un dispositivo completo per la riabilitazione sia del polso che della mano, e potendo fare riabilitazione attiva e passiva, integra grazie a dei sensori il gioco per rendere il processo di guarigione più divertente per i pazienti ed incentivarli quindi all'utilizzo dei prodotti. Similmente ai robot ad esoscheletri, ArmAssist permette al paziente di posizionare la mano all'interno di un guanto di riabilitazione e l'a-

vambraccio su una base che può muoversi su di un piano: in questo modo, seppure la riabilitazione sia mirata su mano e polso, il paziente è in grado di consolidare anche il movimento del gomito e della spalla indirettamente.

Il robot è collegato ad un'applicazione visibile su schermo che mostra al paziente dei giochi: gli obiettivi possono essere raggiunti muovendo correttamente le articolazioni e questo escamotage rende più divertente la terapia e permette ai pazienti di divertirsi guarendo.



*Fonte: ArmAssist, TecNALIA*



# 03

Design di dispositivi  
medicali custom-made

In questa sezione viene analizzato il ruolo del design e del designer nell'apportare l'innovazione funzionalmente intesa allo sviluppo di dispositivi medicali (soprattutto di tipo ortopedico).

In particolare, la rapida evoluzione progettuale e produttiva scaturita dall'opportunità di applicare gli strumenti del design parametrico e fabbricazione digitale alla produzione di artefatti medicali per la riabilitazione ortopedica, insieme alla convergenza tra discipline mediche, biologiche e ingegneristiche, evidenzia come il design, che confina tra sapere e contesti accademici, professionali e produttivi, abbia la capacità di risolvere le difficoltà ergonomiche, estetiche e terapeutiche, migliorando l'esperienza del paziente nel periodo in cui è soggetto a trattamento terapeutico.

Particolare attenzione viene in questa sede data infatti allo sviluppo di dispositivi ortopedici e di riabilitazione delle movimentazioni dell'utente come ausili, ortesi e tutori, personalizzati e ottimizzati tramite gli strumenti e le metodologie di modellazione generativa secondo parametri e tecnologie di manifattura digitale.

I principali testi di riferimento per la comprensione di tale aspetto sono "Design e Scienza" della Prof.ssa Carla Langella dell'Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli ed il contributo di Gabriele Pontillo che con la sua tesi di dottorato presentata presso la stessa sede ha saputo garantire uno sguardo completo e approfondito su tale tematica.

La letteratura scientifica di riferimento evidenzia come le grandi opportunità offerte dalla sinergia di diverse competenze specialistiche appartenenti ai settori della medicina, dell'ingegneria e del design, finalizzate a una migliore rispondenza dei prodotti alle esigenze del corpo umano, in termini di ergonomia, proprietà meccaniche, estetica, biocompatibilità ed efficacia terapeutica, siano correlate, ad esempio con la progettazione di tutori e sostegni di ausilio, all'espansione della cosiddetta medicina personalizzata.

Questa trova un valido riscontro nello sviluppo dei sistemi di prototipazione rapida (che ormai può essere intesa anche come produzione ra-

pida), di tipo parametrico, mediante i quali si configura la possibilità di ottenere un alto grado di personalizzazione dei dispositivi medici in funzione di modelli anatomici tridimensionali. L'esperienza clinica spesso comporta la necessità di affrontare le difficoltà specifiche del paziente, relative all'accettazione di dispositivi terapeutici ortopedici, come ortesi, protesi e tutori, sia dal punto di vista psicologico, sia estetico. L'attività di ricerca condotta evidenzia in merito come la collaborazione tra medicina e design sia particolarmente significativa, poiché il design è in grado di sviluppare soluzioni progettuali che migliorino considerevolmente la compliance, ovvero l'accettazione di un paziente del trattamento raccomandato. Aspetti come l'ergonomia, il comfort, l'accettabilità, l'indossabilità e la leggerezza sono solo alcuni dei benefici che è possibile ottenere attraverso l'utilizzo di tecnologie di produzione additiva e l'impiego di materiali biomedicali, che offrono la possibilità di realizzare in tempi ridotti, tutori e ortesi personalizzati, sulla base delle specifiche esigenze terapeutiche e fruibili dei pazienti. Ciononostante, l'analisi dello stato dell'arte evidenzia come spesso sia problematico per il personale medico riuscire a svolgere, in maniera complementare, le attività di progettazione e modellazione tridimensionale del dispositivo terapeutico: in tal senso, potrebbe considerarsi risolutiva la possibilità di identificare dei comandi fissi (ovvero dei parametri di progettazione) che il personale medico possa eseguire in maniera sistemica, acquisendo competenze parziali di modellazione 3D sufficienti per la gestione di specifici strumenti di disegno.

In questa prospettiva, risulta rilevante il confronto tra l'approccio della modellazione diretta con quello della modellazione parametrica: mentre il primo è un metodo di modellazione altamente flessibile che permette di comporre e modificare con notevole libertà le geometrie in modo diretto, di competenza specificatamente del progettista, il secondo è un metodo che attraverso la composizione di un sistema algoritmico complesso, e tramite valori numerici, e quindi parametri, riesce a generare il prodotto desiderato, mutabile in base ai valori di input,

o income.

La convergenza tra i due approcci consente di perseguire notevoli miglioramenti nel processo di acquisizione, modellazione e stampa 3D, in quanto permette al personale medico, non tecnico del settore, di fruire di un iter unico e flessibile, in grado di adattarsi alle specifiche esigenze del singolo paziente e del trauma su cui intervenire. A questo processo si aggiunge la possibilità di rilevare parti anatomiche, più o meno complesse, attraverso l'utilizzo delle immagini DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), che consentono, tramite software certificati e specializzati, di ricostruire in maniera del tutto realistica l'anatomia lesionata interessata.

L'analisi dello stato dell'arte di riferimento evidenzia come il settore biomedicale, a livello internazionale, prediliga sempre più l'utilizzo di tecnologie additive per la stampa tridimensionale di oggetti prodotti in materiale polimerico, resinoso, metallico, ceramico, siliconico o misto, in base alle specifiche esigenze di utilizzo. Tale tecnologia produttiva è alla base dell'attuale rivoluzione tra designer e azienda, in quanto favorisce la velocità di comunicazione e verifica del progetto, nonché il dinamismo e la riduzione delle distanze fisiche, nella fase di validazione dei prototipi.

Rispetto all'utilizzo di queste tecnologie nell'ambito della produzione di ausili biomedicali, è evidente come la possibilità di accedere a file open source e tecnologie e materiali low cost permetta a chiunque potenzialmente di accedere a supporti idonei, tali da poter garantire una corretta e rapida guarigione di patologie di natura fisica, in qualunque parte del mondo.

In questo quadro, conformemente alle strategie inserite nell'interno dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile delineate dall'Organizzazione delle nazioni unite, questo progetto di propone di sviluppare un prototipo di esempio che miri a dimostrare come l'ottimizzazione del processo di cura passa per l'individuazione di una relazione tra utente e dispositivo terapeutico che si lega ad esigenze estetiche e soprattutto funzionali.

Ad implementare il rapporto tra biomedicale e

design, anche rispetto alle potenzialità offerte dalla stampa 3D, è l'applicazione della capacità di calcolo al processo progettuale, che in questo caso viene identificata con il termine di Design Computazionale.

L'approccio generativo implementa la creatività del designer, cui viene in questo caso affiancata una visione informatica del design, in quale è in grado quindi di gestire con più semplicità i parametri già descritti nella risoluzione di un problema, partendo dalle condizioni di partenza e inserendo i limiti e vincoli progettuali: il calcolo viene utilizzato per trovare le possibili soluzioni che soddisfano tali requisiti, vincoli ed obiettivi.

Per questo motivo, nell'era digitale, il design si avvale sempre più di procedimenti matematici che utilizzano algoritmi in diverse fasi del processo produttivo, dall'ideazione del prodotto alla sua realizzazione, dando luogo a questa nuova accezione di design definito parametrico o computazionale. Gli strumenti del design parametrico consentono di includere nel progetto di ausili ortopedici parametri ottenuti dalle indagini diagnostiche eseguite sui pazienti, superando i limiti costituiti dall'errore umano nella concretizzazione della soluzione progettata e ottimizzando i tempi di generazione e verifica strutturale della stessa.

Tali innovazioni di processo progettuale, inserite nel più ampio scenario dell'IoT (Internet of Things) e della produzione digitale, influiscono sui paesaggi produttivi e commerciali: i luoghi di sviluppo e produzione dei nuovi dispositivi biomedicali parametrici personalizzati diventano ibridi, in parte fisici, in parte piattaforme in cui gli utenti possono immettere informazioni legate a esigenze, dimensioni, richieste. La fabbrica non è più soltanto un luogo fisico e circoscritto, ma diviene una dimensione diffusa e aperta, non più solo il contesto in cui vengono prodotti oggetti dell'universo artificiale, ma dimensione in cui si manifestano i flussi informativi che generano e crescono gli oggetti come entità intermedie tra natura e artificio.

In merito si specifica come la programmazione informatica, in una simile attività progettuale, sia lo strumento che permette la personalizza-

zione e il controllo parametrico dell'artefatto finale, con un approccio però non del tutto intuitivo a causa delle conoscenze informatiche specialistiche richieste. Al contrario, molti software parametrici associativi consentono un utilizzo più guidato, tramite interfacce intuitive, il cui elemento fondamentale è l'algoritmo, in quanto descrizione del procedimento logico, che consente di rapportarsi alla modellazione generativa in modo intuitivo e versatile, ma con la possibilità di personalizzare il proprio lavoro solo in base alle modalità permesse dal programma in questione.

Per poter offrire nuove e interessanti opportunità di sperimentazione, è necessario porre alla base del processo progettuale la collaborazione e la condivisione di saperi propri di differenti competenze tecnico-scientifiche. Tale convergenza, insieme all'innovazione tecnologica e digitale e a innovativi processi e metodologie, favorisce l'individuazione di soluzioni a problemi progettuali complessi, che incentivano la creatività.

Sulla base di quanto discusso in precedenza, è possibile affermare che è grazie anche all'integrazione tra progettazione parametrica, stampa 3D e tecnologie per la cattura di immagini che il designer è riuscito a introdursi nell'ambito della medicina ortopedica, trovando ampio spazio nella realizzazione di dispositivi sia fisici sia digitali, che aiutano tanto nella pianificazione degli interventi chirurgici quanto nella realizzazione di artefatti utili ai pazienti.

Ortesi e tutori, realizzati attraverso il processo delineato offrono notevoli benefici, tra cui la riduzione delle distorsioni nel processo di guarigione, grazie alla perfetta adesione della superficie sulla parte anatomica sottoposta a trattamento terapeutico, nonché benefici igienici, grazie alla realizzazione di strutture altamente traspiranti e leggere. Inoltre, l'impiego di materiali biomedicali, adatti per la produzione additiva, permette la realizzazione di tutori e ortesi in tempi ridotti, senza dimenticare l'attenzione alla sostenibilità e alla biocompatibilità. La determinazione di tali benefici, congiuntamente alla rilevanza costituita dalla compliance, ha portato all'individuazione di alcuni prodotti medicali che costituiscono parte dello stato dell'arte analizzato nel percorso di ricerca.

Tra le varie esperienze individuate, tra ambito accademico e professionale, si evidenzia come, seppur con più o meno evidenti variazioni, la forma finale dell'artefatto sembri richiamare un certo stile, che riduce approccio, tecnica e materiale, a una questione unicamente estetica. È solo grazie allo studio approfondito dei punti di forza e di debolezza che caratterizzano i singoli progetti che è possibile individuare i tratti distintivi di un metodo progettuale che oggi, proprio per l'efficacia del processo progettuale, rappresenta il tentativo di risolvere i problemi legati alla compliance, e dunque all'accettazione psicologica, nonché all'indossabilità, alla leggerezza, alla customizzazione, all'ergonomia, alla traspirabilità ecc.

### **03.1 Stato dell'arte dei dispositivi medicali custom-made**

Tra gli esempi più importanti, se ne citano alcuni di grande riferimento per uno sguardo completo sullo stato dell'arte:

- Cortex per l'immobilizzazione della mano
- Mhox Design per la progettazione di ortesi

generative

- Carpal Skin
- Corsetti con disegno parametrico
- Reggiseni custom-made
- Orttesi gioiello

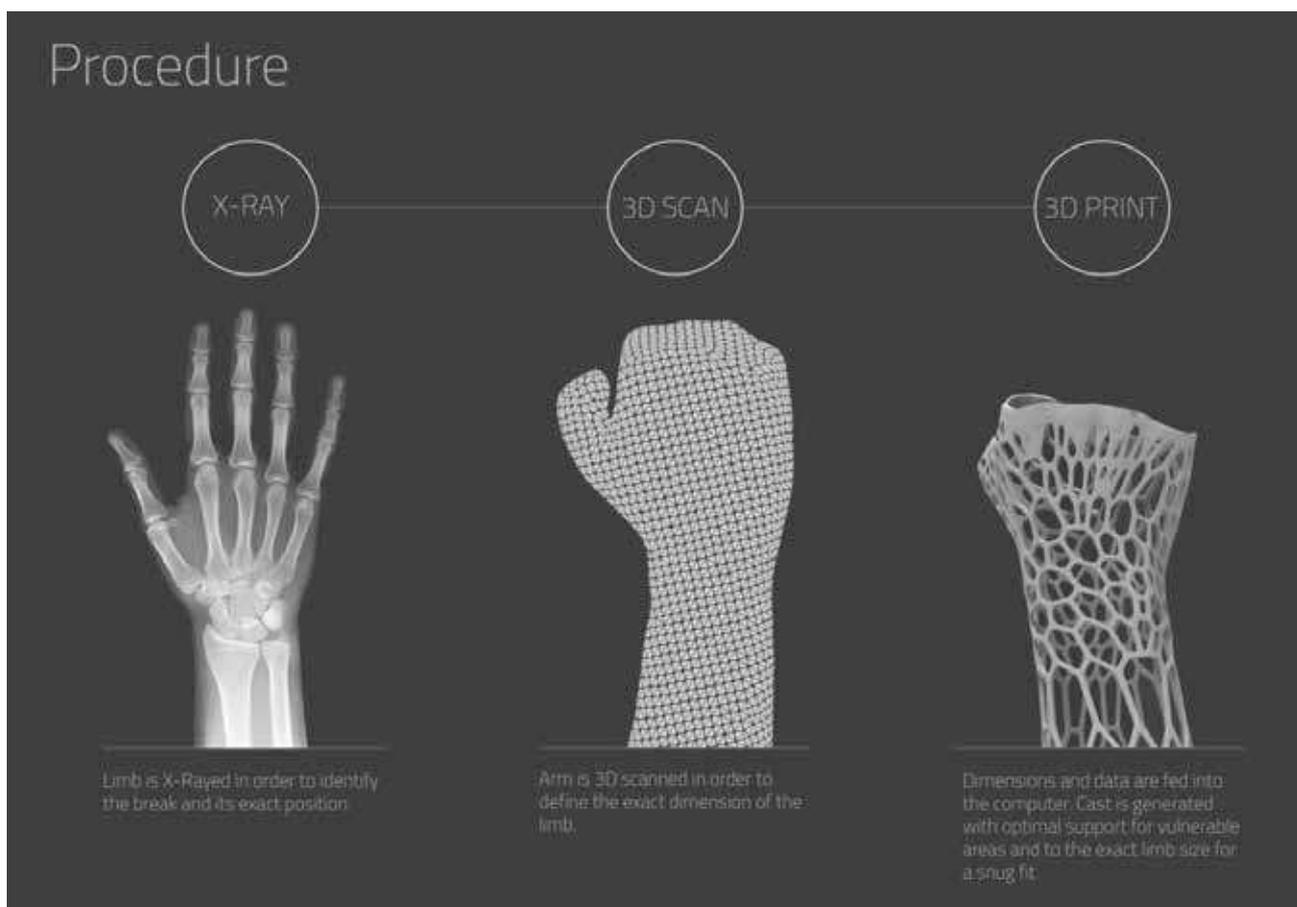
### 03.1.1 Cortex

Il tutore per immobilizzazione ortopedica CORTEX, progettato da Jake Evill, è una tipologia di ortesi ortopedica disegnata digitalmente in maniera customizzata sulla base dell'anatomia del paziente e stampata 3D grazie alla tecnica FDM.

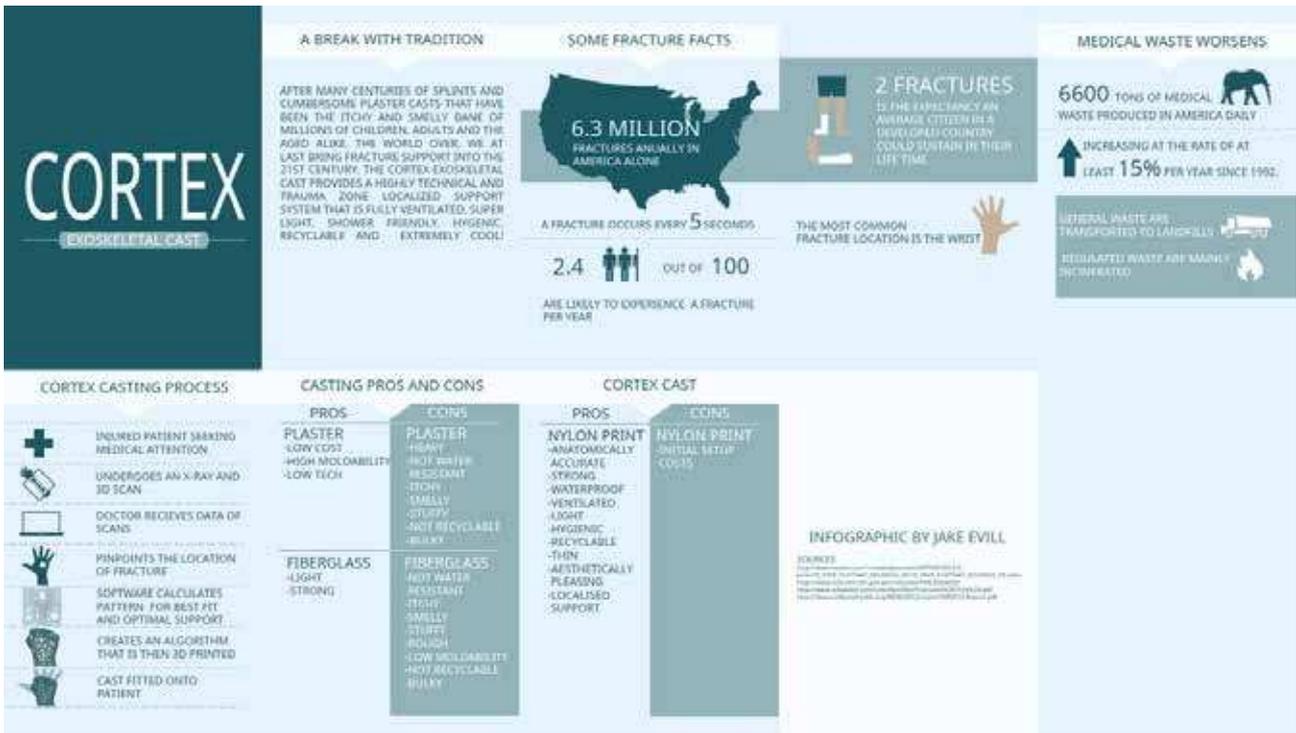
A seguito dell'acquisizione dei dati anatomici, ovvero delle immagini DICOM, il tutore viene disegnato direttamente sull'anatomia presa in esame seguendo il disegno di una maglia parametrica che permette la vestibilità ma soprattutto la lavabilità dell'arto ancora immobilizzato. La tecnologia di produzione rapida gioca in questo caso un ruolo fondamentale in quanto

permette una produzione molto veloce (di circa qualche ora) dell'artefatto progettato su misura per il paziente: tale metodo punta a rivoluzionare la progettazione e la produzione di oggetti con tali caratteristiche permettendo la messa in opera di un prodotto medicalmente molto accurato in tempi molto brevi.

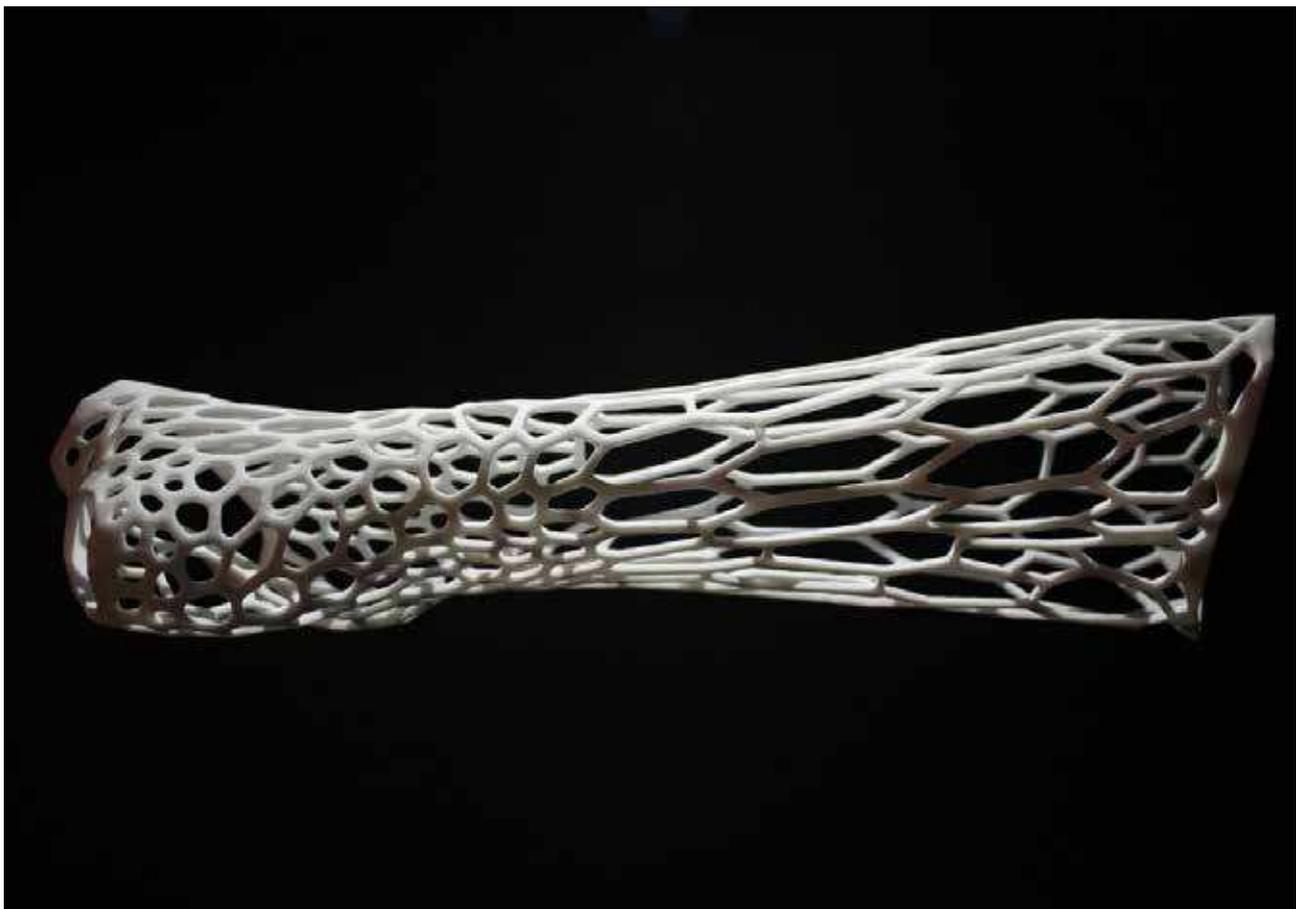
Le parti stampate vengono indossate dall'utente subito dopo la loro produzione e vengono fissate sul braccio tramite un sistema a incastri: la loro trama forata consente di avere un tutore molto più leggero di quelli classici in gesso e diversamente da questi ultimi consente una miglior igiene durante il periodo di guarigione.



Fonte: Cortex



Fonte: Cortex



Fonte: Cortex

### 03.1.2 Mhox Design

Il caso della progettazione di ortesi generative del 2014 da parte della collaborazione tra il Gruppo CRP e Mhox Design è uno dei più importanti in quanto è tra i primi ad aver dimostrato la fattibilità e la vantaggiosità di tale approccio progettuale.

In questo caso, lo studio portato avanti dai due gruppi di professionisti, mira a sviluppare la progettazione e la produzione di ortesi generative dedicate all'immobilizzazione, alla riabilitazione degli arti e quindi all'ortopedia.

Grazie alla tecnologia di sinterizzazione laser selettiva (SLS), che prevede un alto grado di precisione e la possibilità di utilizzo di materiali specifici, i prodotti indicati sono delle tipologie di ortesi del tutto adattati all'anatomia del pa-

ziente in quanto ricavati dalla scansione della stessa in ambiente digitale.

Il progetto di ricerca vede la collaborazione tra il Gruppo CRP e Mhox Design: studio di design generativo che sviluppa estensioni corporee, oggetti che integrano il corpo umano per mutarne le potenzialità in ambito estetico, sportivo, medicale, e seguendo quindi l'iter progettuale in tre fasi (scansione dell'anatomia, disegno digitale customizzato e stampa 3D), il Gruppo CRP è stato il responsabile della tecnologia di stampa e di ricerca dei materiali, mentre il Gruppo Mhox Design si è occupato di prevedere il sistema di scansione e modellazione tridimensionale.

***“I benefici che si possono ottenere dall'utilizzo della fabbricazione additiva unita ai materiali Winform sono da considerarsi molto importanti, soprattutto in termini di performance e anche di vestibilità, dal momento che l'ortesi viene realizzata a seconda delle necessità anatomiche del paziente. Tuttavia non parliamo solo di prestazioni di alto livello, ma anche di un elevato fattore estetico. Il dispositivo ortopedico acquisisce una forte componente estetica che può essere accompagnata da una totale customizzazione da parte del paziente.”***

Franco Cevolini, direttore tecnico del Gruppo CRP

La prima fase di realizzazione dell'ortesi prevede la scansione dell'arto del paziente (effettuata in ambulatorio) tramite sensori infrarossi o il metodo a luce strutturata. L'output è poi rielaborato tramite un software finalizzato ad adattare il modello 3d virtuale del dispositivo all'anatomia del paziente ed a rielaborarne la forma per ottenere delle performance specifiche e personalizzate (lo stesso software gestisce anche i sensori di scansione).

È quindi possibile creare ortesi con diversi equilibri di rigidità e flessibilità, che consentano alcuni movimenti e ne impediscano altri.

***“Da sette taglie per sette milioni di persone a sette milioni di taglie per altrettante persone”.***

I progetti di questa collaborazione sono quindi un'ortesi riabilitativa per la mano ed una per la gamba.

Utilizzando in entrambi i casi il materiale Winform GT, materiale a base poliammidica cari-

cato con fibre di vetro, caratterizzato da elevata flessibilità (resistenza agli urti e di allungamento a rottura), resistenza meccanica e impermeabilità, l'ortesi per la mano è stata pensata per immobilizzare la stessa e riabilitarla a seguito di un'operazione chirurgica, limitando qualsiasi possibile movimento.

La foratura superficiale, variabile in dimensione e distribuzione, favorisce la ventilazione della mano e permette comodamente di lavarla; per non parlare del notevole valore estetico che viene così conferito ad un oggetto che generalmente rimane “visivamente asettico”.

L'ortesi per gamba è stata invece pensata per pazienti con deficit dei muscoli peronei con conseguente compromissione del passo. Grazie alla scansione 3D, il dispositivo può avvolgere sia la gamba che il piede, integrando altresì un plantare. Uno snodo speciale (molla di Codivilla, solitamente presente nei tutori realizzati in

carbonio), centrato sulla caviglia, che sfrutta la flessibilità del materiale fornisce un supporto

attivo che controlli la ciclicità del passo. (immagini sia della mano che della gamba)



*Fonte: Mhox Design*



*Fonte: Mhox Design*

### 03.1.3 *Carpal Skin*

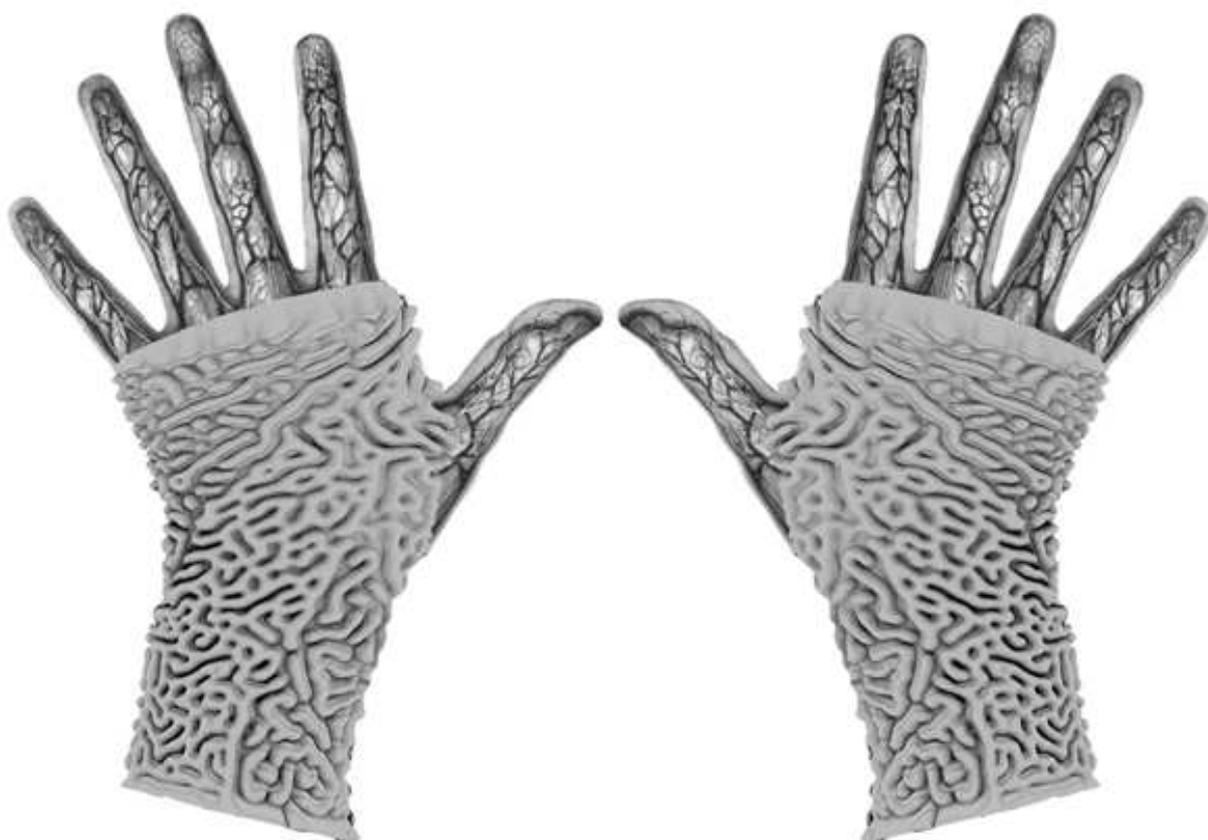
Il progetto Carpal Skin proposto dalla celebre designer Neri Oxman nel 2009 ed esposto al Museum of Science di Boston, nato dalla fusione della tradizione artigianale con l'era digitale, è un prodotto di quello che viene definito "artigianato tecnologico"; continuando sotto una nuova veste la prassi artigianale di realizzazione di ortesi su misura e specifiche per il paziente.

Si tratta di un guanto di pelle artificiale, che ha

lo scopo di prevenire la comparsa del tunnel carpale nel polso. Zone morbide e rigide si alternano per distribuire le pressioni nel migliore dei modi ed adattarsi alla fisiologia del paziente e non schiacciare i nervi del polso. La texture del guanto deriva dal mondo animale, imitando i loro sistemi di gestione della elasticità dei tessuti e simulando la variazione di rigidità e spessori in questi ultimi.



*Fonte: Carpal Skin*



*Fonte: Carpal Skin*

### *03.1.4 Corsetti*

Un ulteriore esempio di ottimo utilizzo delle conoscenze tecniche sulle tecnologie e sulla progettazione secondo parametri per dispositivi medici è il caso del Dott. Hans-Rudolf Weiss che, grazie alle sue competenze nel settore, ha saputo progettare corsetti correttivi customizzati per la scoliosi dei suoi pazienti e prodotti mediante tecnologia CAD/CAM.

Anche in questo caso i corsetti presentano forme diverse a seconda dei pazienti poiché vengono disegnati e prodotti tenendo conto delle loro specifiche conformazioni anatomiche; inoltre, come è stato possibile apprezzare anche nei casi studio precedenti, un parametro sempre presente è quello responsabile della leggerezza e traspirabilità dell'artefatto.



### 03.1.5 ONEBra

Nell'ambito di accettazione da parte dell'utente del periodo post-operatorio, ma soprattutto della convivenza con la propria anatomia a seguito degli interventi medici, uno dei casi più interessanti che evidenzia anche e soprattutto l'apporto del design a livello culturale, è quello della startup ONEBra.

Lo studio mira a produrre coppe di reggiseni customizzate per le donne che, avendo subito un intervento al seno, come ad esempio una mastectomia, ed avendone quindi una forma asimmetrica, necessitano di sostegni specifici e

che possano aderire correttamente alla propria anatomia e che possano avere un impatto dal punto di vista estetico.

Le utenti possono eseguire autonomamente la scansione 3D del proprio seno grazie all'applicazione appositamente sviluppata e ONEBra elabora autonomamente la modellazione della coppa personalizzata. Questa viene quindi stampata in TPU e con alcune parti in FDM ed inserita infine all'interno di un reggiseno pre-sculto.



Fonte: ONEBra

### 03.1.6 We Design

Nell'ottica dell'apporto da parte del design allo sviluppo di dispositivi medici di più facile accettazione da parte dell'utente, viene qui riportato un ulteriore esempio che riguarda la produzione artigianale di ortesi gioiello.

Nonostante questo caso si poni all'interno del mercato artigianale, molto diverso rispetto alla mass customization, è comunque un esempio di grande valore poiché qui la customizzazione è elevatissima e i dispositivi presi in esame

sono prodotti ortopedici resi molto più leggeri ed esteticamente apprezzabili, simili appunto a dei gioielli.

I prodotti messi in produzione da We Design (fondata dall'argentiere Wouter Engelshoven) nascono dal connubio tra il mondo dell'argenteria e quello della medicina ortopedica specializzata nelle patologie croniche della mano.

Il risultato è stato uno sconvolgimento stesso del concetto di ortesi: da oggetto da nasconde-

re, in quanto simbolo della propria infermità, è ora messo in evidenza come ornamento, grazie la riduzione all'osso delle superfici e l'utilizzo di un metallo prezioso.

Forme serpeggianti, già presenti nelle ortesi tradizionali con funzione di snodi, sono state sfruttate come ornamento. Oltre al fattore estetico, anelli e bracciali sono studiati appositamente per evitare l'instabilità delle articolazioni permettendo così di mantenere una posizione naturale e funzionale di tutte le articolazioni

coinvolte.

I materiali, quali l'argento, sono stati scelti per il fatto di essere ipoallergenici, durevoli, igienici, belli e duttili, e quindi facilmente lavorabili in spirali e linee continue che avvolgono le articolazioni. Oro e argento, oltre il fatto di garantire longevità all'ortesi, hanno abbastanza malleabilità e robustezza per permettere tutte le correzioni necessarie a causa delle mutevoli condizioni delle articolazioni.



*Fonte: We Design*

04

Soft  
Robotica

## 04.1 Definizione

In questo capitolo, viene analizzato il termine ed il concetto di “soft robot”, la sua evoluzione ed il suo stato dell’arte.

La definizione di soft robot è ancora difficile da dare in maniera completa ed esaustiva, poiché è ancora sottoposta a un continuo aggiornamento dovuto alle tecnologie, ai materiali, alle tipologie di attuazione, e così via: tuttavia è possibile definirne le principali caratteristiche.

Di seguito vengono comparate le caratteristiche, le capacità, i procedimenti di realizzazione e le applicazioni principali di 4 differenti tipolo-

gie di robot: Hard Robots (robot rigidi), Adaptable Robots (robot adattivi) Mixed Soft Robots e Soft Robots. L’adattabilità e l’interazione sicura aumentano dai rigidi ai morbidi, mentre la precisione e la velocità diminuiscono. La progettazione, la modellazione ed il controllo risultano inoltre semplici nel caso dei robot rigidi semplicemente perché la loro storia è molto più antica ed i problemi comuni sono già ben conosciuti. Per le potenziali applicazioni, vengono citate solo quelle di maggior rilevanza o sperimentazione attuale.

	Hard Robots	Adaptable Robots	Mixed Soft Robots	Soft Robots
<b>Characteristics</b>				
DOF, n	$n \leq 6$	$n \geq 12$	$n = \infty$	$n = \infty$
Materials [Pa]	$E = 10^{10} - 10^{11}$	$E = 10^8 - 10^{11}$	$E = 10^4 - 10^{10}$	$E = 10^4 - 10^8$
Flexibility	No	Limited	Infinite	Infinite
Stretchability	No	No	Limited	Near Infinite
<b>Capabilities</b>				
Precision	●●●●●●	●●●●●○	●○○○○○	●○○○○○
Speed	●●●●●●	●●●●●○	●○○○○○	●○○○○○
Loading Capacity	●●●●●●	●●●●●○	●○○○○○	●○○○○○
Adaptability	●○○○○○	●●●●●○	●●●●●●	●●●●●●
Safe interaction	●○○○○○	●●●●●○	●●●●●●	●●●●●●
<b>Realization</b>				
Manufacturing	Traditional Machining	Traditional machining and 3D prototyping	Prototyping 3D and 4D	Prototyping 3D and 4D
Design	Easy	From simple to complex	Complex	Complex
Modeling	Easy	From simple to complex	Complex	Complex
Control	Easy	From simple to complex	Complex	Complex
Cost	High	Medium - High	Medium - Low	Low
<b>Applications</b>	Industrials	Manipulation	Medical - Manipulation	Medical

Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; comparazione tra le tipologie di robots

Una delle prime definizioni che è possibile consultare è procurata da D. Trivedi, C.D. Rahn, W.M. Kier e I.D. Walker con l’articolo “Soft robotics: biological inspiration, state of the art and future research” (2008), i quali descrivono i soft robots come quei dispositivi capaci di avere “deformazioni distribuite con un numero di gradi di libertà teoricamente infinito”.

Dovutamente allo sviluppo di tipo bio-ispirato di molti prototipi, un’altra definizione è proposta da C. Majidi con “Soft robotics: a perspective – current trends and prospects for the future” e D. Rus e M.T. Tolley con “Design, fabrication and control of soft robots”, qui il termine “soft”

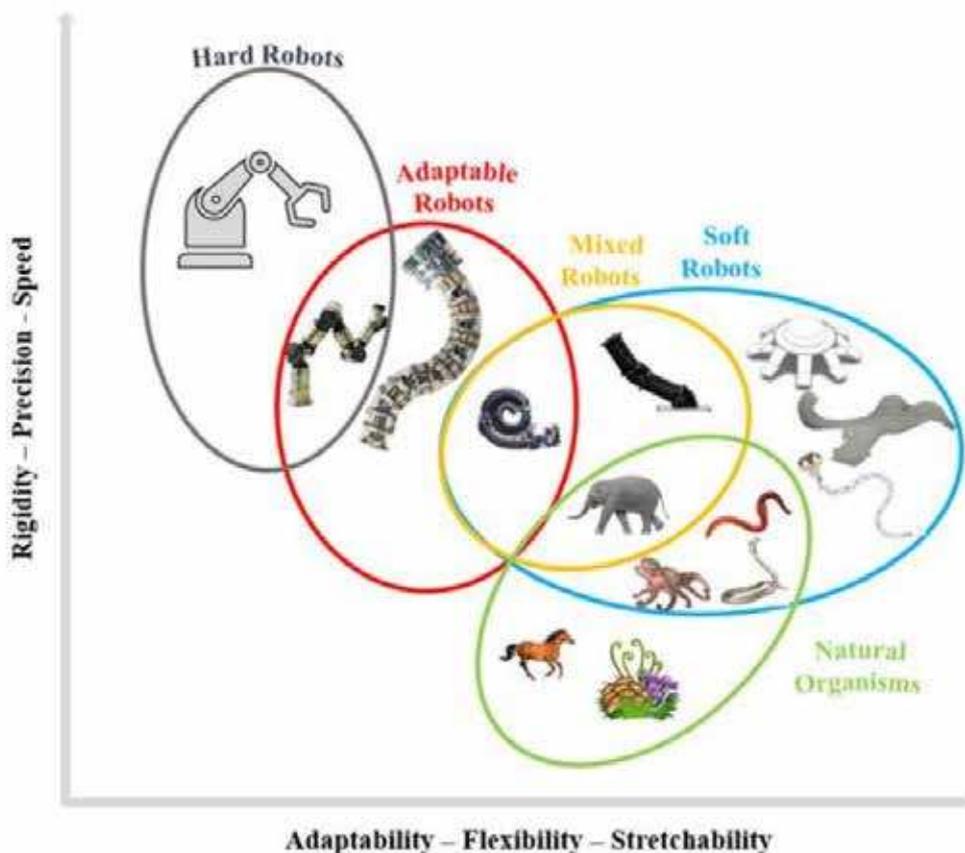
si riferisce al corpo del robot e divide i materiali in morbidi e rigidi secondo la definizione del modulo di Young: questa è la definizione più semplice da applicare, tuttavia esclude numerosi altri fattori risultando limitata.

Successivamente, grazie al lavoro di K. Chubb, D. Berry e T. Burke chiamato “Towards an ontology for soft robots: what is soft?”, è stata presentata una definizione di materiale morbido considerando la deformazione tra l’oggetto e l’ambiente in cui questo viene proposto. Pertanto, in questo caso il contesto è parte integrante della definizione: secondo gli autori, un oggetto può essere soft in termini di deformazione, ma

rigido per altri oggetti con i quali viene in contatto ed interagisce.

Quest'ultima definizione risulta piuttosto interessante poiché molti robot che sono definiti come morbidi posseggono in realtà parti rigide, sia nella loro zona di attuazione sia nella struttura interna. Molti studi mirano attualmente a

rendere soft anche la componentistica elettronica, ma nonostante elementi rigidi, oggi tali robot possono essere considerati soft dato che sono in grado di adattarsi e deformarsi nell'ambiente e interagire in modalità sicura con gli utenti.



Fonte: *Soft robotics: application, design and control*, Silvia Terrile; comparazione tra le tipologie di robots

Un robot pertanto viene definito come “Mixed Soft” quando presenta una struttura rigida ed un corpo morbido, mentre un robot viene definito come “Adaptable” se è un robot rigido o semi-rigido che può adattarsi molto bene all'ambiente in cui si trova grazie alla configurazione dei suoi gradi di libertà. Come è possibile evin-

cere dalla figura, i robot misti sono solitamente a metà tra i morbidi e gli adattivi. Inoltre, grazie alle tecnologie di manifattura additiva, è stato possibile sperimentare molto, ed in maniera più breve, l'integrazione tra materiali rigidi e morbidi all'interno delle stesse strutture.



## 04.2 Classificazione a seconda delle applicazioni

La classificazione dei robot morbidi dipende dalla definizione di soft robot data, ma essendo questo un ambito in continua evoluzione, come detto, è importante ricordare che molti prototipi e sperimentazioni non hanno specifiche appli-

cazioni ma sono semplicemente delle prove di ricerca finalizzate a testare il funzionamento ed il comportamento di alcuni materiali ed attuatori. Per questi motivi di solito, i robot vengono classificati secondo quattro gruppi principali.

### 04.2.1 Robot bio-ispirati e di locomozione

Il primo gruppo che è possibile identificare è quello dei robot ispirati a comportamenti naturali e propri di alcune categorie e specie di animali. Questo è probabilmente il gruppo più importante in quanto lo studio della natura ha diretto tutta la prima evoluzione di questa nuova branca della robotica. Lo studio dell'incredibile abilità degli animali di trarre vantaggio dalle loro strutture morbide ha catturato l'attenzione dei ricercatori e si è tentato di riprodurre artificialmente molteplici tipologie di movi-

mentazioni, come quella dei lombrichi e bruchi, tentacoli, stelle marine e meduse.

Grazie a tali studi, è stato possibile sviluppare la locomozione rotatoria con GoQBot, la locomozione peristaltica con Meshworm, la locomozione sottomarina con PoseiDRONE ed altre tipologie ancora.

Moltissimi dei principali e più grandi invertebrati possono essere trovati negli ambienti marini o sottoterra, e per questo spesso i loro nomi e le loro forme fanno riferimento a ciò.

**POSEIDRONE**

PoseiDRONE is the first underwater robot made for as much as 80% of soft materials. The robot is composed of three units: a crawler, a swimmer and several manipulators. These units are merged into a single, continuous body of elastomeric material. The set of skills of the PoseiDRONE provide the robot with a set of simple and alternative strategies to deal with the often forbidding scenarios which commercial underwater robots are faced with in the many fields of offshore engineering.

The interested reader is referred to the following articles:

- PoseiDRONE: design of a soft-bodied ROV with crawling, swimming and manipulative ability (2011), *IEEE*, C. Casati, M. Ghergo, S. D'Alagni, L. Laschi, *ICRA*
- Questions: What's the Paradigm: toward the New Paradigm of Soft Unmanned Underwater Vehicles (2013), *IEEE*, C. Casati, F. Arino, A. and Laschi, *IEEE*
- An adaptive program solution to maneuver and manipulation (2011), *IEEE*, M. Ghergo, M. Lavi, G. Mazzoni, R. Hutter, B. Laschi, *IEEE*
- How to build a soft robot (2013), *IEEE*, C. Casati

**PoseiDRONE** Team

- Andrea Arino
- andrea.arino@univipi.it
- Marcello Casati
- marcello.casati@univipi.it
- Matteo Ghergo
- matteo.ghergo@univipi.it
- Fabrizio Ghergo
- fabrizio.ghergo@univipi.it
- Cecilia Laschi
- cecilia.laschi@univipi.it
- Laura Picoli
- picoli.laura@univipi.it

**FONDAZIONE LIVORNO**

**THE ROBOTICS INSTITUTE**

Scuola Superiore Sant'Anna

**PoseiDRONE**  
a soft unmanned underwater vehicle with swimming, crawling and manipulation capabilities

Research Center on Sea Technologies and Marine Robotics, the Robotics Institute, Livorno, 54130, Viale della Fregata, 6, Scoglio della Regina

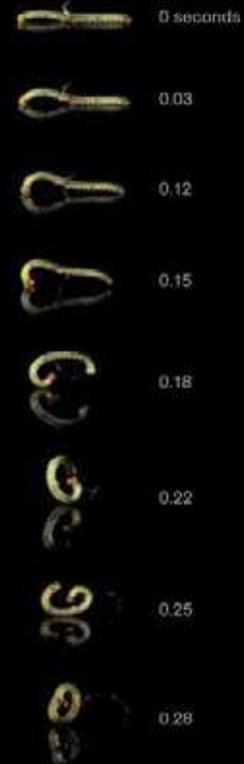
Fonte: Fondazione Livorno, PoseiDRONE

## Rolling Robo-Worm

Stop, drop, and roll. Firefighters teach this to kids, but for some species of caterpillars it's a defense reflex. Confronted by a predator, the larvae spring into the air, assume a spiral shape, and hit the ground at top speed to wheel away from danger. The motion is thought to be one of the fastest wheeling behaviors in nature.

Hoping the technique will enable next-generation robots to go places that conventional crawling ones can't, researchers at Tufts University have built a soft-bodied robot that replicates the spiraling actions of larval *Pleuroptya ruralis*, a species from the U.K. Made of silicone rubber, the robot's four-inch-long body (below) is undergirded by metal coils that contract into a circle when electrified, propelling the contraption forward at nearly eight inches a second.

As in nature, the ballistic rolling motion can send the body in unpredictable directions. But, says lead researcher Hui-Ti Lin, the robot's ability to crawl or roll, depending on terrain, could one day have practical applications in environmental monitoring, building inspection, or even disaster search and rescue. —Bruce Falconer

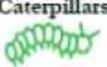


*In less than half a second, this caterpillar-inspired robot springs into a spiral—a defensive move in nature.*



Watch the robot spring to life in a video on the iPad.

PHOTOS: CARY WOLINSKY AND YARI WOLINSKY

Bio-Inspired - Locomotion							
Environment	Bio-inspiration	Prototypes	Movement	Material	Actuation	Sensor	Application
Underground Soil	Worms 	Meshworm [5]	Rotary Locomotion	Soft braided mesh-tube	NiTi wire	Sliding Resistors	-
		Magworm [72]	Crawling Locomotion	Silicone rubber and rigid magnets	Magnetic	-	Pipeline clearing, inspection
		Earthworm [73]	Bidirectional crawling	Silicone	Pneumatic	Pressure	-
	Caterpillars 	GoQBot [23]	Peristaltic Locomotion	2 types of silicone rubber	SMA coils	-	-
		Caterpillar [74]	Bidirectional slipping motion	LCE	LCE (light)	Force	-
	Snake 	Snake [75]	Traveling-Wave Locomotion	TPE	Pneumatic	Pressure	Pipeline inspection
		Kirigami snake [76]	Lateral Undulation	Lattice	Pneumatic	-	-
		Laschi et al [18]	Elongation, shortening and bending	Silicone	Tendons and SMA springs	-	-
	Octopus 	Octopus gripper [77]	Bending and gripping	Silicone	Pneumatic	Pressure	Gripping
		PoseiDRONE [24]	Crawling, swimming and manipulation	Rubber-like materials	Motor	-	Marine operations
[78]		Locomotion	Silicone	Pneumatic	-	-	
Underwater	Starfish 	[79]	Locomotion	PVC + PDMS	SMA wires	-	-
		[22]	Locomotion	Silicone	SMA springs	-	-
		KryptoJelly [80]	Jellyfish movement	Silicone	SMA wires	Laser	Underwater exploration
	Jellyfish 	[81]	Jellyfish movement	Hydrogel	Hydrogel	-	Marine environment monitoring
		[82]	Jellyfish movement	Silicone +DEA	DEA	Force	-
Fish 	[83]	Swimming	Silicone	Hydrogel	Force	-	
	[84]	Swimming	Silicone	SMA wires	-	-	

Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; robot bio-ispirati

### 04.2.2 Robot manipolatori

Il secondo gruppo che può essere identificato riguarda robot continui i quali sono stati a loro volta pensati in senso bio-ispirato da tentacoli ed altre strutture, ma che costituiscono un gruppo separato dal precedente nello stato dell'arte.

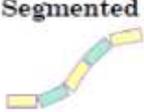
Una delle principali differenze rispetto al gruppo precedente è che questi robot spesso hanno funzioni specifiche che riguardano la capacità di afferrare oggetti, ispezionare posti inaccessibili o interagire con gli utenti. In questo senso,

la bio-ispirazione riguarda il desiderio di ricreare il movimento delle loro controparti esistenti in natura.

Non tutti i prototipi presenti in questa categoria sono considerabili morbidi, ma hanno tutti una elevata capacità di adattarsi all'ambiente in cui operano grazie all'elevato numero di DOF (gradi di libertà). Alcuni celebri esempi sono l'Octarm, un braccio dotato di muscoli pneu-

matici artificiali capaci di afferrare oggetti di grandi dimensioni come ad esempio i coni spartitraffico, il robot Air-Doctor e il Bionic Handling Assistant.

Tutti questi prodotti mirano a sviluppare la capacità di adattabilità e grazie ai nuovi materiali e attuatori usati, è stato possibile sperimentare questa tipologia per applicazioni medicali come gli endoscopi.

		Manipulators				
Body	Prototypes	Segments	Material	Actuation	Sensor	Application
<b>Segmented</b> 	[85]	4	Silicone	Tendon and Pneumatic	Force	-
	[86]	3 + 1 (gripper)	Rubber + Fiber	Pneumatic	Pressure	Delicate Grasping in Shallow Water
	[87]	2	Elastomer	Motor	Electromagnetic pose	Minimally Invasive Surgery
	[32]	4	Silicone	SMA coils	Hall	Underwater and space applications
	[88]	3	Silicone	Pneumatic	-	-
	[89]	2	Silicone	Pneumatic	F/T	Minimally Invasive Surgery
	[90]	5	Silicone + Ground coffee	Pneumatic (jamming)	-	-
<b>Continuum</b> 	[91]	1	Elastomer + magnetizable microparticles	Magnetic	-	Medical applications
	[92]	1	Silicone	Tendon-driven	-	-
	[93]	1	Silicone	Tendon-driven + Pneumatic	-	Medical applications
	[94]	1	Silicone + ferromagnetic elastomer	Tendon- and magnetic-driven	-	High-Precision Manipulation
	[95]	1	NiTi + McKibben	Pneumatic	Electromagnetic	Surgical applications
	[96]	1	Elastomer	Twisted and coil	-	-
	[97]	1	Elastomer	Pneumatic	Force	Endoscopy

Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; robot manipolatori

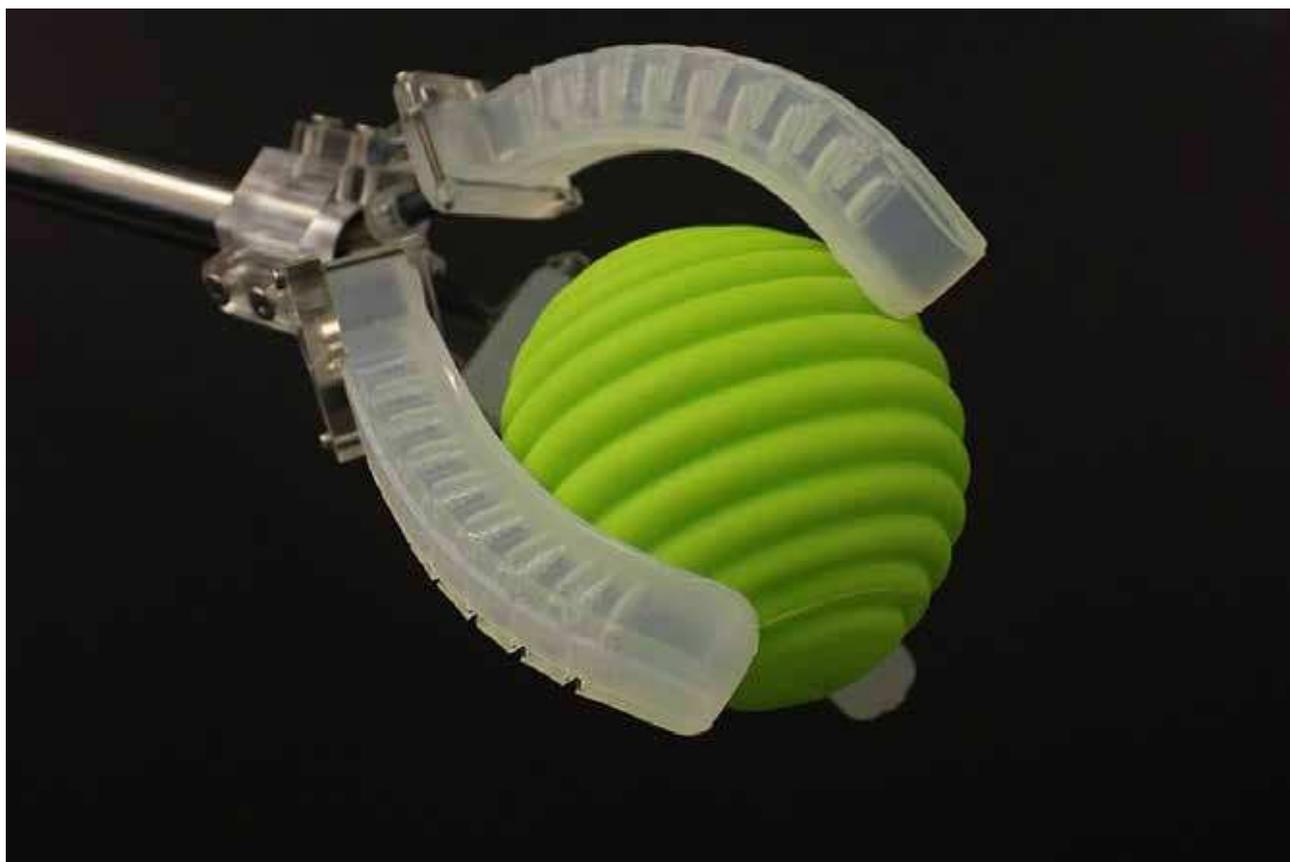
### 04.2.3 Pinze morbide

Il terzo gruppo riguarda la categoria intera delle pinze morbide, la quale gode del più avanzato sviluppo e pertanto molteplici prototipi sono già utilizzati all'interno dell'industria. La necessità di pinze in grado di evitare il danneggiamento degli oggetti che afferrano è un problema notevole nell'industria dell'alimentazione e dell'agricoltura, ad esempio, e pertanto la sperimentazione a riguardo è stata notevole.

Le tecnologie che permettono a queste pinze di adattarsi alle diverse geometrie degli oggetti sono varie: la soluzione più semplice è quella di creare dita come strutture passive formate da molti collegamenti, attuate da cavi e motori esterni. In questo caso, la pinza non è neces-

sariamente soft dato che l'adattabilità dipende non dal materiale ma dalla continuità delle dita. Un'altra possibilità è quella di utilizzare strutture passive, generate anch'esse da motori esterni, fatte da materiali morbidi che si deformano quando interagiscono con gli oggetti, come accade in MultiChoice Gripper.

Un'altra famiglia di pinze morbide utilizzate a livello industriale riguarda quelle con attuazione pneumatica. In questo caso, le dita sono camere d'aria disegnate in maniera tale che quando gonfie, possono adattarsi agli oggetti. Le dita sono solitamente proposte in materiali come il silicone, che garantisce elevata flessibilità ed adattabilità.



*Fonte: Soft robotics: Soft gripper, Robohub*

Grippers									
Gripping	Type	Prototypes	Structure	Material	Actuation	Sensor	Properties	Applications	
By Actuation 	Passive Structure	[98]	2 fingers	Silicone	-	-	-	-	
		[99]	2 fingers	Elastomer	Motor	Force	F = 530 g	-	
		[100]	2 fingers	IPCs	Tendon-driven	-	-	-	
	FEA	[101]	2 fingers	Rubber + fibers	Pneumatic	Force	W = 45 g	-	
		[102]	5 fingers	Silicone	PneuFlex	-	W = 178 g F = 2 N	-	
		[103]	Monolithic	ABS + rubber	DC motor + pneumatic	Pressure, force	W = 1 kg F = 12 N	Grasping of delicate objects	
	EAPs	[104]	3 fingers	PVC + PI + DEA	DEA	-	W = 7.5 g F = 65.6 g	-	
		[105]	4 fingers	ICL	IPMC	-	-	Space applications	
		[42]	Monolithic	Polymeric	DEA	-	F = 0.7 g	-	
	SMA	[106]	Monolithic	-	SMA spring	-	F = 4 N	Minimally invasive surgery	
		[107]	5 fingers	Silicone	SMA wires	Flexure	W = 282 g F = 412 g	-	
		[108]	3 fingers	PDMS	SMA wires	-	-	-	
	By controlled stiffness 	Jamming	[41]	Monolithic	Latex + ground coffee	Pneumatic	-	-	Pick-and-place
			[109]	4 fingers	Rubber + rice	Tendons	-	-	Precision grasp
[110]			Monolithic	Latex + water + glass beads	Pneumatic	-	W = 5N	Deep water operations	
ER/MR fluids		[111]	2 fingers	Polyurethane	MR	Force	S = 460 ms	Pick-and-place of vegetables	
		[112]	2 fingers	HNBR	MR	-	S = 200 mm/s F = 50 N	Pick-and-place	
		[113]	5 fingers	RTV	MR	-	S = 0.2 s F = 0.1 N	-	
SMPs		[114]	5 fingers	Multimaterial	SMP	-	-	-	
		[115]	3 fingers	Polymer	SMA + SMP	-	F = 5.8 N	Grasping objects with deformable shapes	
		[116]	2 fingers	PEU	SMP	-	F = 58 g	-	
		By controlled Adhesion 	Electro adhesion	[39]	Two fingers	Elastomers	DEA	Self-sensing	W = 1.5 g / S = 100 ms F = 82 g
[40]	Monolithic			DEA	EA	Self-sensing	-	Handling of objects including fabrics, bowls, and lenses	
[117]	8 fingers			Polyimide	Motor + Electrostatic adhesive	Force + torque	F = 3.5 N	Satellite servicing	
Gecko adhesion	[118]		Monolithic	Elastomer	gecko adhesive	-	S = 2,5 ms	Assemble silicon microplatelets of planar geometry	
	[119]		Monolithic	Elastomer	gecko adhesive	-	F = 0.41 N	Pick-and-place complex and fragile non-planar or planar parts.	
	[120]		2 fingers	Elastomer	FEA + gecko adhesive	FTIR	W = 48.7 g / F = 50 N	High-load applications	

Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; pinze morbide

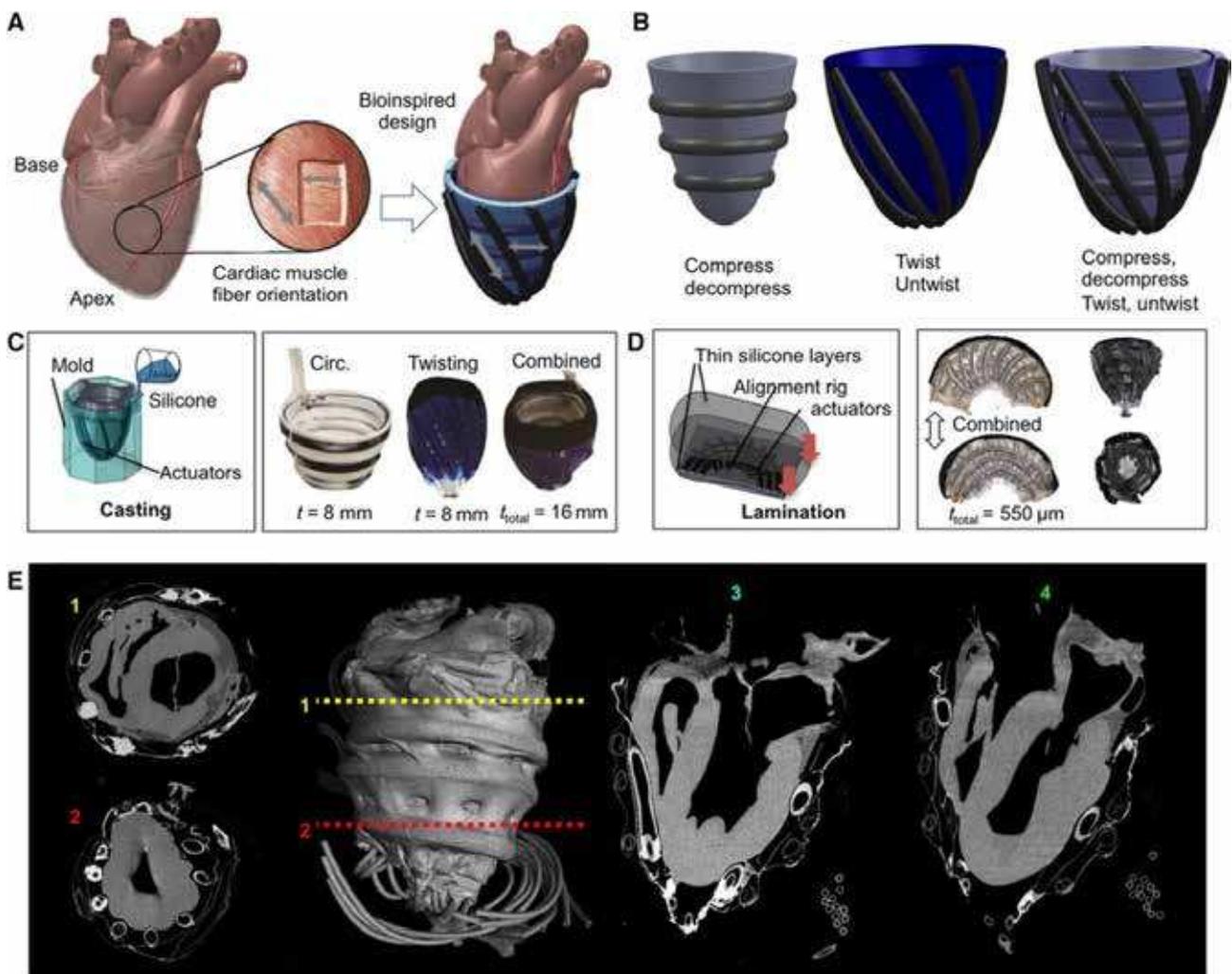
## 04.2.4 Robot medicali ed indossabili

L'ultimo gruppo riguarda i robot indossabili e di assistenza all'ambito medicale.

È possibile pensare a questo gruppo in senso separato dagli altri poiché in questo caso gli oggetti sono progettati specificatamente per interagire con gli utenti. Se i robot bio-ispirati sono stati quelli che inizialmente hanno guidato ed ispirato la ricerca, i robot medicali sono quelli destinati a guidarla nel prossimo futuro.

L'interesse nei dispositivi robotici che possono operare, diagnosticare, amministrare l'utilizzo dei farmaci, guidare la riabilitazione, che possono essere utilizzati come protesi, organi artificiali e organi di simulazione è enorme e so-

stenuto largamente dalla ricerca dell'industria. Le possibilità per il momento sembrano essere senza fine e anche se ancora è necessario molto lavoro prima di poterli impiegare negli ospedali e nei centri salute, alcuni prototipi sono già stati utilizzati per la chirurgia minimamente invasiva. In particolare, i soft robot permettono lo sviluppo di endoscopi migliori poiché sono intrinsecamente più sicuri e possono ridurre la possibilità di danneggiare tessuti e organi. Inoltre, hanno più alta manovrabilità rispetto alle soluzioni tradizionali e rappresentano quindi una branca promettente e di grande interesse.



Fonte: Soft robotic sleeve supports heart function, Science

Medical & Wearable						
Function	Prototypes	Body part	Material	Actuation	Sensor	Application
Exoskeleton 	RELab tenoexo [121]	Hand	Steel strip + 3D printed parts	DC motors	EMG	Grasping assistance in everyday activities
	[122]	Wrist	Mix of soft and rigid material	Motor	IMU & Force	Rehabilitation
	[123]	Knee	Fabric	Pneumatic	-	Planetary Exploration
Prosthetic 	[124]	Hand	Elastomer	Pneumatic	Optoelectronic strain sensors	-
	[125]	Finger	TPU	Servo motor	Force	-
Endoscope 	STIFF-FLOP [126]	Abdomen	Silicone	Pneumatic	-	Minimally Invasive Surgery
	MINIR II [127]	Intracranial	Silicone	SMA springs	RTD	Neurosurgery
	NeoGuide [128]	Abdomen	Elastomer	Electromechanical	Position	Colonoscopy
Artificial organs 	Artificial Heart [49]	Heart	PAM + soft matrix	Pneumatic	Pressure	Support heart functions
	Tongue [129]	Tongue	EcoFlex + PDMS	Pneumatic	Pressure	Simulation
	SoGut [130]	Stomach	Ecoflexpneum	Pneumatic	Pressure	Gastric simulation
Drug 	[131]	Body	Permanent magnet	Magnetic	-	Capsule endoscopy
	[132]	Body	Permanent magnet	Magnetic	-	Drug delivery
Haptic 	HapWRAP [56]	Arm	Polyethylene	Pneumatic	-	Force feedback
	[57]	Hand	Silicone	Pneumatic	-	Tactile feedback
	FlyJacket [58]	Bust	PLA + foam	Motors	Force, pressure, IMU	Sensation of Flying Like a Drone

Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; robot medicali ed indossabili

## 04.3 Progettazione e produzione dei soft robots

A seguito della definizione dei termini e delle categorie principali, è necessario, per fornire una più ampia indicazione, individuare anche le caratteristiche di progettazione e produzione dei robot morbidi. I componenti che solitamente compongono la struttura robotica, quindi, vengono qui presentati separatamente e sono:

### 04.3.1 Materiali

Per quanto riguarda i materiali, sono molteplici le fonti che li mettono a confronto e che ne sperimentano l'utilizzo; in particolare, i materiali primari interessati sono soft polimeri ed elastomeri come ad esempio il silicone.

Come è stato apprezzato nella fase di definizione di soft robot, il modulo di Young di un materiale viene utilizzato per comparare diversi elastomeri e per confrontarli con materiali di tipo rigido. Alcuni dei siliconi più comuni sono il polisilossiano Ecoflex, poliuretani soft, poliacrilati ed elastomeri copolimeri a blocchi.

Nonostante questi materiali siano per loro natura isolanti, è possibile conferirgli la capacità di condurre elettricamente o termicamente energia aggiungendo delle nanoparticelle di materiali conduttivi. Inoltre, aggiungendo stratificazioni di materiale, è possibile costruire materiali responsivi a stimoli esterni.

Gli elastomeri sono i materiali di base per i muscoli artificiali pneumatici (PAM).

Oltre ai materiali strutturali, è importante considerare anche i fluidi che giocano un ruolo essen-

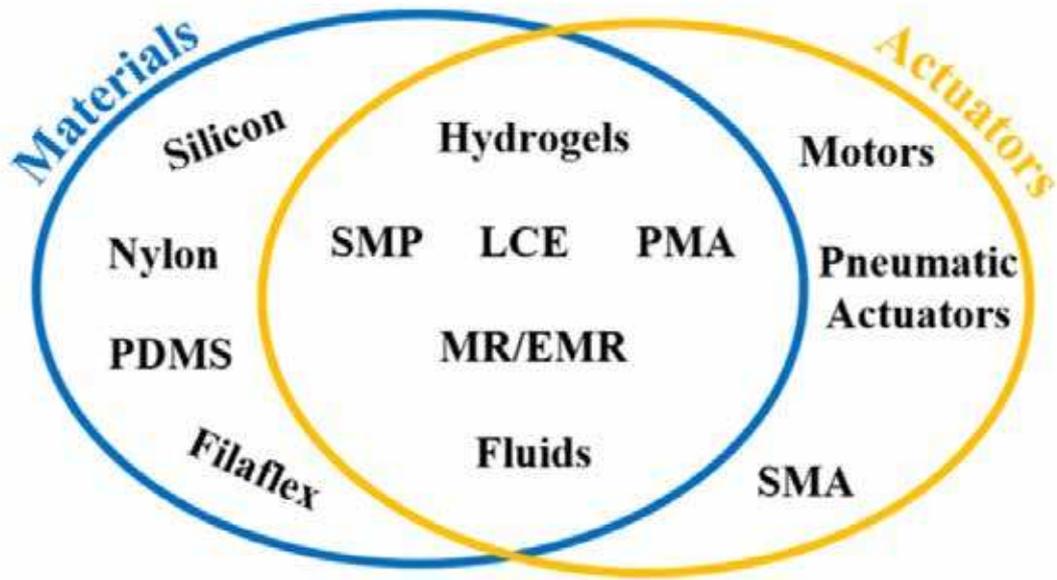
ziali nella soft robotica dato che possono essere considerati come materiali costituenti la struttura finale, come ad esempio l'aria compressa, l'acqua e soluzioni elettrolitiche acquose.

Infine, è possibile considerare la prototipazione 3D ed il nuovo concetto di 4D come aspetto principale di produzione per gli scopi individuati.

Un'altra tipologia di materiale comunemente molto utilizzato nella soft robotica sono gli idrogel, ovvero materiali semi-solidi, i quali possono avere anche proprietà di tipo magnetico.

Di particolare rilevanza sono poi tutti quei materiali che possono essere impiegati nella manifattura additiva, come il FilaFlex, il NinjaFlex, l'EAA, il Nylon ed il silicone, come precedentemente accennato.

Negli ultimi anni una grande fetta di ricerca si è inoltre specializzata nello studio di materiali e polimeri biodegradabili soprattutto per le loro potenzialità di applicazione in ambito medicale, quando ad esempio questi necessitano di essere dissolti una volta concluso il loro lavoro, o negli ambiti di crisi ambientale, permettendo ai robot di essere meno inquinanti.



Fonte: *Soft robotics: application, design and control*, Silvia Terrile; materiali ed attuatori

### 04.3.2 Attuatori

Le tipologie di attuatori utilizzati nella soft robotica variano dai più tradizionali, come ad esempio motori o attuatori pneumatici, fino ad arrivare a polimeri intelligenti. Come è stato già accennato, non c'è sempre ed in ogni caso una chiara differenza tra l'attuatore ed il corpo del robot, in quanto spesso la sua struttura, ad esempio composta da muscoli pneumatici artificiali, è allo stesso tempo anche la componente di attuazione.

Tra gli attuatori vengono inclusi motori, leghe a memoria di forma, polimeri a memoria di forma, magneti, pneumatici, elastomeri idraulici e molti altri.

Tra i prototipi e le sperimentazioni presenti dei robot morbidi e continui, la tipologia di attuatore più ampiamente utilizzata è rappresentata dai motori, generalmente collegati a sistemi di serie di tendini. Questa tipologia di attuazione è la

più semplice da usare poiché è ben conosciuta ed è facilmente controllabile; non è la migliore, tuttavia, in quanto dato che i motori sono componenti rigidi e solitamente di dimensioni abbastanza grandi, risultano non essere comodi per robot morbidi. La loro rigidità non è infatti compatibile con la flessibilità e la leggerezza richiesta da un corpo morbido.

Altre tipologie di attuazione consistono nell'utilizzo di tendini e leghe a memoria di forma (shape memory alloy – SMA). Questa operazione si basa su due principali caratteristiche: la trasformazione del materiale a livello della struttura cristallina si basa sulla temperatura a cui si trova e sulla sua capacità di memorizzare una configurazione geometrica. A temperatura ambiente, queste leghe si trovano nella loro fase martensitica e sono facilmente deformabili. A mano a mano che la temperatura aumenta, que-

ste passano alla fase austenitica, in cui il materiale torna alla forma che aveva memorizzato. Nonostante ci siano molte tipologie di SMA, la più celebre ed utilizzata è il Nitinol, composto prevalentemente da nichel e titanio. Questo genere di materiale presenta notevoli vantaggi e qualità, come la leggerezza, l'ottimo rapporto di peso e performance, l'economicità, la resistenza alla corrosione, la biocompatibilità, l'assenza di comportamenti magnetici, e pertanto si pensa sia ottimale per prototipi di tipo medicale. Tuttavia, il controllo del materiale è abbastanza complesso (dovutamente alla sua sensibilità al calore), la deformazione è solitamente limitata, così come la velocità di operazione, e sono necessarie correnti elevate per arrivare alle temperature alle quali si verifica la fase di cambiamento.

Un'altra tipologia di attuatore simile all'ultimo analizzato consiste nelle SMP, ovvero shape memory polymers, polimeri a memoria di forma. Questo materiale è in grado di tornare a una forma memorizzata quando attivato in una delle seguenti modalità: mediante calore, mediante reazione chimica o mediante l'utilizzo della luce. Questa capacità non è una proprietà intrinseca del materiale, ma è il risultato di una funzionalizzazione del polimero.

In questo caso, i vantaggi riguardano la leggerezza, il basso costo, il buon rapporto tra performance e peso, la possibilità di stamparlo mediante prototipazione 3D ed una deformazione significativamente maggiore rispetto a quella degli SMA. Questi materiali sono anche biocompatibili e talvolta biodegradabili. Gli svantaggi principali riguardano tuttavia anche in questo caso il controllo difficile e la bassa velocità di azione.

L'ultima tipologia di attuatori capaci di cambiare la loro forma sono gli idrogel: sono composti da catene di polimeri idrolitici combinati in una struttura a rete e da acqua. I più grandi vantaggi riguardano l'estensibilità, la trasparenza e la biocompatibilità e proprio per queste motivazioni sono di grande interesse per le applicazioni in campo medico, soprattutto per quanto riguarda la fornitura dei farmaci.

Altri attuatori convenzionalmente utilizzati

sono gli attuatori pneumatici ed idraulici. I più famosi attuatori di questo genere sono i muscoli pneumatici artificiali (PAM) i quali si contraggono quando soggetti a pressione e sono quelli utilizzati nei prototipi di dispositivi per la riabilitazione e nei dispositivi di manipolazione di oggetti. Nella maggioranza dei casi, gli attuatori pneumatici sono realizzati su misura attraverso stampi canalizzati in cui vengono polimerizzati diversi elastomeri: questa tecnica permette di realizzare i cosiddetti attuatori elastomerici fluidi (FEA) i quali hanno il principale vantaggio di garantire la possibilità di dare ogni volta una forma diversa e specifica all'attuatore, favorendo una direzione di espansione piuttosto che un'altra. I prototipi e le sperimentazioni su ciò sono molteplici e varie e riguardano robot che possono crescere nel tempo o forme di tipo bio-ispirato.

Un'altra famiglia di attuatori è composta dai polimeri elettroattivi (EAP), che sono composti da due elettrodi ed un elastomero interposto tra di loro. Applicando un voltaggio (generalmente relativamente alto), la forza elettrostatica attrattiva tra gli elettrodi induce ad un cambiamento nella dimensione e nella forma dell'elastomero. Questi sono molto flessibili, con alta capacità di configurazione e risultano essere molto compatti. Lo svantaggio principale consiste nel requisito di poter avere un alto voltaggio applicabile, rendendoli molto scomodi per molteplici applicazioni.

L'ultima grande famiglia di attuatori riguarda gli attuatori elettro-reologici ed i magneto-reologici (ERM ed MRM) i quali sono composti da elastomeri contenenti particelle polarizzabili o ferromagnetiche. Queste particelle possono essere attivate utilizzando un campo elettrico o magnetico e si deformano conseguentemente, estendendosi e contraendosi. I vantaggi principali sono la semplicità di controllo, la possibilità di utilizzare molti materiali (dato che il campo magnetico può penetrare molti materiali) e la velocità di attivazione comparata ad altre tipologie di attuatori; tuttavia, bisogna tenere a mente che è necessario instaurare una forza di tipo magnetico, il che richiede energia e limita i campi di applicazione.

Actuator	Types	Material	Advantages	Disadvantages	Cost	Applications
Motors	-	Metals	Control and design	Weight Rigidity	Low	Continuous robots Exoskeletons and prosthetics
SMA	-	Alloys	Lightweight Power / Weight Easy actuation Biocompatibility	Control Low speed High currents	Medium	Continuous robots Medical applications
SMP	-	P	Lightweight Power / Weight Biocompatibility Biodegradability	Control Low speed Limited strength	Medium	Medical robots (endoscopes, prostheses)
FEA	PAM FFA	E	Lightweight, Flexible Speed	High power Compressor	Low	Manipulators Rehabilitation
EAP	DEA IPMC	E	Weight/Power	High voltage	Low	Bio-inspired robots Grippers
ERM/MRM	ER MR	F y E + particles	Simple control Numerous materials Response speed	External magnetic coils	Medium	Grippers Bio-inspired robots
Hydrogels	-	P + water	Stretchability, Transparency, Biocompatibility	Control Low speed Limited strength	High	Drug supply
Photosensitive	Visible light or IR	E, F o gels + nanoparticles	Simple control Biological Materials	High intensity Limited deformation	Medium	Biomedical devices

Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; attuatori e materiali

### 04.3.3 Sensori

I sensori sono una componente essenziale per controllare il robot (classicamente inteso) ma soprattutto per ottenere dei feedback sulle deformazioni e sui comportamenti, e ciò li rende di enorme importanza anche nella gestione e realizzazione dei soft robot.

Dovutamente al potenziale infinito di gradi di libertà, la modellazione del robot è complessa e predire correttamente in maniera preventiva come il robot potrà comportarsi, soprattutto in termini di posizione e forma sotto l'azione di forze è abbastanza complesso. I sensori sono infatti strumenti per ottenere informazioni sull'ambiente in cui si opera e conoscere lo stato di deformazione del robot; ci sono tuttavia due principali problemi con i sensori per i soft robots: il primo riguarda chiaramente la correlazione tra il numero di sensori ed il numero di DOF (gradi di libertà), mentre il secondo riguarda il requisito di flessibilità ed estendibilità della struttura. Per questi motivi, pertanto, i sensori nella soft robotica non vengono utilizzati come accade in maniera tradizionale nella robotica rigida.

Tra i sensori più utilizzati, vengono individuati quelli resistivi e piezoresistivi. Come per gli attuatori visti precedentemente, anche i sensori basano il loro principio operativo sulla variazione del materiale sottoposto ad una forza applicata. I sensori resistivi, in generale, hanno una struttura fatta da materiali flessibili, come elastomeri, i quali, aventi microcanali, permet-

tono l'introduzione di un liquido conduttivo. I sensori piezoresistivi utilizzano elastomeri con aggiunta di nanoparticelle: la produzione è relativamente semplice, così come il loro utilizzo, ma le loro performances sono limitate.

I sensori capacitivi traggono invece vantaggio dall'abilità di alcuni materiali di variare le loro capacità in maniera direttamente proporzionale alla loro deformazione. Questa operazione è solitamente lineare, la loro risposta è veloce e sono abbastanza sensibili; tuttavia, necessitano di operare in un ambiente pulito (la misurazione è incorretta in presenza di polvere o altre sostanze) e non godono di ricarica elettrostatica.

I sensori ottici misurano poi la variazione della luce causata dalla deformazione del corpo, sono altamente deformabili e non vengono affetti da alcuna interferenza, contrariamente ai capacitivi ed inoltre, necessitano di poca ricarica. Le fibre ottiche sono le più utilizzate per quanto riguarda questa tipologia di sensore.

I sensori magnetici individuano la variazione da misurare in un campo magnetico e non sono adatti in tutte le situazioni poiché non lavorano sotto interferenze o in presenza di altri oggetti ferromagnetici; tuttavia, hanno molteplici vantaggi come il basso costo, la compattezza e la semplicità di utilizzo.

Attualmente, moltissime tipologie di sensori stanno venendo studiate e sviluppate e lo stato dell'arte richiede pertanto un costante aggiornamento.

### *04.3.4 Elettronica*

L'elettronica facente parte dei soft robot necessita di adattarsi alla loro forma, ed essere flessibile ed estendibile è la caratteristica più desiderata per questa tipologia di componente. Per raggiungere questo obiettivo, è possibile perseguire due strade: la prima via riguarda la produzione di film di metallo ultrafini modellati in un sistema a rete o a maglie su di un substrato elastomerico, mentre la seconda riguarda la possibilità di disperdere particelle conduttive in una matrice elastomerica.

Entrambe le due tecniche descritte sono ancora

molto limitate in termini di disponibilità ed efficienza, anche se risultano esserci numerosi materiali promettenti in questo campo di ricerca, come ad esempio il grafene, che grazie alle sue caratteristiche fisiche e chimiche e la possibilità di utilizzarlo in varie applicazioni, consente la sperimentazione di pannelli touch, nanogeneratori, attuatori e biosensori.

La soft elettronica sarà parte fondamentale di molti sviluppi per i dispositivi medici, soprattutto per quanto riguarda il monitoraggio dei pazienti e la diagnosi delle malattie.

### *04.3.5 Alimentatori*

Come già detto nelle sezioni dei sensori e degli attuatori, anche i moduli di alimentazione dovrebbero basarsi sul principio dell'elettronica flessibile ed estendibile. Un generatore soft di energia è stato descritto da alcuni ricercatori come un "dispositivo che genera energia dalla deformazione dei materiali in una struttura particolare".

Questa considerazione è abbastanza importante poiché, assieme agli attuatori, questa categoria rappresenta la più grande restrizione in termini di capacità potenziali dei robot (dovuta o all'impossibilità di ricarica con una batteria o dovuta alla limitazione spaziale).

Qualche esempio e prototipo è già presente in letteratura, anche se ancora questo campo non può essere considerato bene sviluppato o dotato di soluzioni particolarmente funzionali;

tuttavia, i campi di ricerca stanno riguardando attualmente componenti come nanogeneratori flessibili, batterie flessibili, supercapacitori e persino batteria alcaline flessibili. Molti di questi sistemi inoltre sono flessibili ma non estendibili, e ciò non gli consente di funzionare come sarebbe auspicabile nella robotica soft.

Un altro aspetto importante da considerare è il rapporto tra peso e potenza di questi dispositivi poiché molto robot e soft robot richiedono molta energia per poter svolgere correttamente le funzioni per cui sono stati progettati: in questi casi la miglior soluzione è quella di utilizzare una tipologia di trasmissione senza fili, come ad esempio i generatori piezoelettrici, in grado di trasformare i movimenti ripetitivi del robot in energia.

### 04.3.6 Produzione

Nell'ambito della produzione e della manifattura della soft robotica, le nuove tecnologie risultano essere tra le migliori nella soluzione di problemi legati alle geometrie e configurazioni complesse del soft robot, poiché le tradizionali tecnologie sottrattive non possono essere ben applicate ai materiali spesso utilizzati in questa branca.

La maggior parte dei prototipi sono stati prodotti tramite l'utilizzo della manifattura additiva (AM) in tre modi diversi: passivo, totale e ibrido.

Si intende la modalità passiva quando la manifattura additiva è utilizzata solo per la produzione degli stampi, totale quando il robot è tutto prodotto con tali tecnologie e ibrida quando il robot è prodotto utilizzando differenti tecnologie che non sono tutte AM, come accade ad esempio nel caso della shape deposition modeling (SDM).

La tecnologia AM, per definizione, è "il processo di unire materiali per produrre oggetti tridimensionali partendo da dei dati, generalmente in maniera additiva e stratificata, diversamente da metodologie di manifatture sottrattive, come

le lavorazioni tradizionali", definizione data da H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolorius nell'articolo "Additive Manufacturing methods and modelling approaches: a critical review".

I vantaggi principali che riguardano l'utilizzo di tali concetti come metodi produttivi risiedono sostanzialmente nella libertà di poter produrre forme di qualsiasi genere, comprese geometrie complesse, senza la necessità di numerosi step di lavorazione, l'utilizzo della minima quantità di materiale richiesto, basso costo e maggior velocità di produzione.

La tecnica più utilizzata è la stampa 3D, utile soprattutto per la produzione di stampi in cui viene poi colato il silicone che costituisce il corpo del robot: questa tecnica permette ai prototipi di essere fatti in maniera molto veloce ma soprattutto molto economica.

Molte tecniche AM sono utilizzate inoltre per produrre direttamente un soft robot, e la tabella di seguito illustra i principali vantaggi e svantaggi delle estrusioni di materiale, come l'FDM, Fused Deposition Modeling, utilizzate per stampare protesi o attuatori pneumatici. La fotopolimerizzazione include poi molte tecni-

Technology	Operation Principle	Typologies	Advantages	Disadvantages
Material extrusion	Controlled deposition of a continuous filament of material	FDM	- Variety of materials - Flexibility in design - Reduced costs	- Low surface quality - Low mechanical resistance
		DIW		
Light Curing (VAT)	Polymerization of a photosensitive resin	SLA	- Smooth finish - Accuracy	- Not multi-material, - More expensive polymers - Post-processing
		DLP		
		CLIP		
		2PP		
Material injection (MJ o MJM)	Photopolymers activated by a UV lamp		- Precision and finish - Multimaterial	- Limited materials
Powder Bed Fusion (PBF)	Sintering a powder	SLS	- Dense and strong parts - Low waste - No need for support	- More expensive process - Rough finish
Shape Deposition Modeling (SDM)	A sequence of additive and subtractive operations		- Complex geometries - Multimaterial	- Many steps - Complicated material bonding

Fonte: *Soft robotics: application, design and control*, Silvia Terrile; principali tecnologie di produzione

che, come la stereolitografia (SLA) il Digital Light Processing (DLP) ed altre.

Inoltre, un concetto relativamente recente e molto importante riguarda il passo oltre la

stampa 3D, ovvero quella 4D. Questo concetto si applica a tutti gli oggetti stampati in 3D capaci di modificare la propria struttura nel tempo sotto lo stimolo di forze esterne, come la pressione, la temperatura, il vento, l'acqua e la luce.

## 04.4 Design, modellazione e controllo dei soft robots

In questa sezione si analizzano le soluzioni esistenti per il design, la modellazione, la simula-

zione ed il controllo dei soft robot, considerando le problematiche di ciascun'area.

### 04.4.1 Design

Il design e la progettazione di robot morbidi è un aspetto cruciale poiché da questo dipende la capacità del robot di funzionare e deformarsi come desiderato; uno degli aspetti principali da considerare è, per esempio, la rigidità conferita al robot attraverso un corretto design negli attuatori pneumatici.

La rigidità è un aspetto di centrale importanza quando si parla di robot morbidi poiché fornisce a questi ultimi la possibilità di trasformarsi e gioca un ruolo fondamentale nella capacità di controllare il robot in maniera precisa. Tuttavia, nonostante molti tentativi pubblicati e descritti nello stato dell'arte, non sono ancora presenti delle guide teoriche per predire con certezza i risultati in termini di rigidità.

La rigidità inoltre non è l'unico problema nell'ottenere prototipi di forme complesse i cui comportamenti meccanici possano essere ben predetti: l'ottimizzazione mediante algoritmi potrebbe essere essenziale per automatizzare il processo di progettazione e design. Dividendo i movimenti del robot in sequenze di movimenti base, queste informazioni e lo studio delle stesse potrebbero essere utilizzate per formulare un problema inverso risolvibile tramite un algoritmo matematico. Questo algoritmo avrebbe bisogno di tre tipologie di informazioni: l'espressione della disposizione delle forze nel tempo, la geometria, materiale e tipologia di attuazione

del robot e i possibili vincoli riguardo la massa, le dimensioni e la produzione. Tutte queste informazioni dovrebbero essere quindi processate per realizzare l'analisi e quindi la progettazione e l'ottimizzazione.

Questi metodi algoritmici sono essenziali quando i soft robot sono realizzati con materiali che possono cambiare significativamente il proprio comportamento cambiando di pochi millimetri lo spessore delle loro strutture.

Durante il processo di progettazione, è necessario considerare anche i sensori e le componenti elettroniche per evitare limitazioni di movimento, tenere sotto controllo il peso e la rigidità di alcune parti. Infatti, in molti casi di soft robot bio-ispirati, le componenti elettroniche sono posizionate esternamente per non aggiungere peso ai prototipi, e per questo stesso motivo risulta abbastanza complesso realizzare prototipi autonomi di soft robot a caso del peso soprattutto della parte di alimentazione. Tutti questi aspetti rappresentano un limite per il design, ma la ricerca e l'innovazione si stanno evolvendo anche per rendere questi vincoli di minor peso nella progettazione.

Per i problemi sopra menzionati, è stato sviluppato "The Soft Robotics Toolkit" come risorsa destinata ai ricercatori e ai designer per progettare robot morbidi, come verrà più ampiamente discusso successivamente.

## 04.4.2 Modellazione e simulazione

A seguito della progettazione, lo step successivo consiste solitamente nella fase di modellazione e simulazione, due fasi non separate tra di loro ma che coesistono in un sistema di trial-and-error. In molti casi, infatti, il design deve essere cambiato più volte dopo la modellazione e la simulazione e quindi precedentemente alla realizzazione fisica. L'obiettivo principale di questa fase è permettere la miglior gestione di prototipazione controllo e rappresenta quindi la previsione delle movimentazioni del robot a seguito di differenti condizioni. Nonostante questi step non siano sempre obbligatori, nella maggior parte dei casi rappresentano la chiave per l'ottimizzazione del controllo del prototipo, anche e soprattutto sotto termini di tempistiche e costi.

Esistono diversi modi di approcciarsi alla fase di modellazione.

Il primo approccio consiste nella tecnica basata sul modello: viene sviluppato un modello che mira a rappresentare il robot accettando diverse assunzioni e presentando diversi livelli di approssimazione. Alcuni modelli, sulla base della loro complessità, richiedono costi computazionali maggiori di altri e quindi richiedono analisi cinematiche (modelli geometrici) e dinamiche (modelli meccanici).

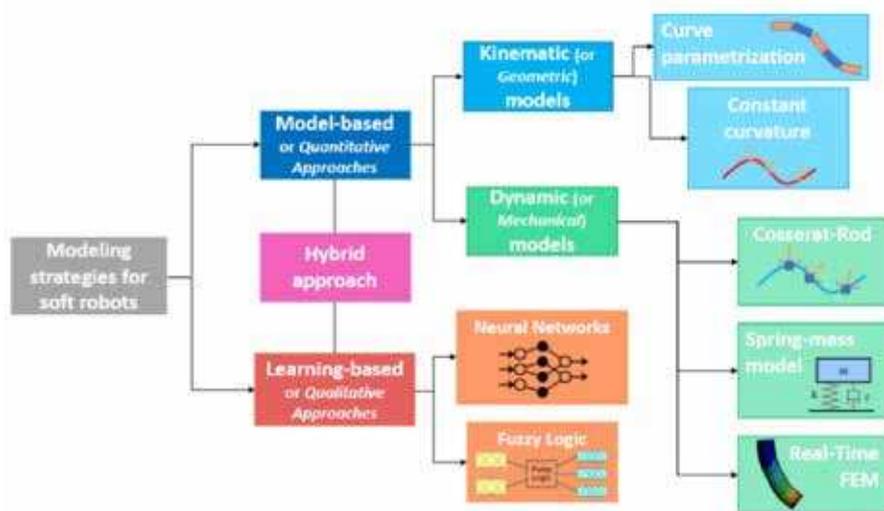
La prima tipologia di modello rappresenta la tipologia della geometria, soprattutto per quanto riguarda l'analisi delle curvature, e le forze applicate in questo caso non sono considerate per semplificare il problema. Questo genere di modello è stato anche chiamato in origine "backbone curves" da G.S. Chirikjian e J.W. Burdick nell'articolo "A modal approach to hyper-redundant manipulator kinematics", ed è conosciuto per l'approccio alla curvatura non

costante e realizza la parametrizzazione delle curve. Questo primo modo di modellare è stato poi rimpiazzato dal modello PPC (Piecewise Constant Curvatures) presentato da M.W. Hannan e I.D. Walker nell'articolo "Novel kinematics for continuum robots", con l'assunzione per cui il robot può essere rappresentato da curve con variabili poco costanti: calcolando il modello cinematico grazie a una matrice, la curvatura risulta da tre trasformazioni discrete nel piano.

Anche se questi approcci si sono rivelati buone opzioni in molti casi, non sono del tutto realistici poiché non considerano la gravità, le forze non-conservative e altre proprietà dei materiali. Non vengono considerati nemmeno il peso del robot e i carichi esterni e poiché queste variabili non possono essere trascurate, viene utilizzato anche il modello dinamico, che mira ad aggiungere le proprietà fisiche alle caratteristiche geometriche.

Una delle teorie più importanti per i modelli meccanici consiste nel considerare il robot come composto da infinite parti rigide infinitesimali che possano essere assunte come aventi materiale incompressibile e elasticità lineare. Questo è probabilmente il metodo più realistico poiché è possibile riprodurre la maggior parte dei principi di attuazione che vengono applicati al modello geometrico.

Tuttavia, tra gli approcci dinamici, in larga parte viene utilizzato soprattutto il metodo degli elementi finiti (FEM) nonostante non possa adattarsi al calcolo real-time, e nonostante abbia un costo abbastanza elevato. Questo approccio consente di avere valutazioni di modellazione molto accurate soprattutto nel caso di geometrie molto complesse.



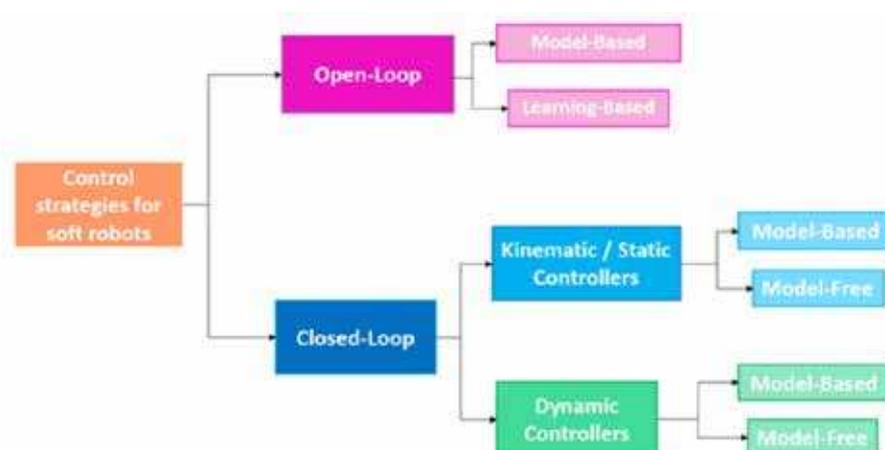
Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; strategie di modellazione

## 04.4.2 Controllo

Le informazioni ottenute dalle simulazioni sono infine utilizzate per controllare il robot; le tecniche tradizionali non sono molto utili nel caso dei robot morbidi a causa delle possibili infinite deformazioni che il robot può avere, dovute come già accennato al teorico infinito numero di DOF (gradi di libertà) che corrispondono ai possibili stati e configurazioni spaziali che il sistema può raggiungere. L'algoritmo di controllo, inoltre, deve considerare anche le possibili

interazioni del robot con l'ambiente e la modalità con cui la sua forma e la sua geometria possono cambiare.

Le metodologie di controllo sono principalmente due: una basata sul modello e una model-free (chiamata anche learning-based), ed ognuna delle due può essere a sua volta statica o dinamica. Inoltre, è importante distinguere anche tra loop aperto e loop chiuso, come può essere apprezzato secondo lo schema seguente.



Fonte: Soft robotics: application, design and control, Silvia Terrile; strategie di controllo

## 04.5 Soft Robotics Toolkit

Il Soft Robotic Toolkit viene qui presentato in quanto è uno strumento di progettazione di dispositivi robotici morbidi molto utile: è una piattaforma ed un insieme di risorse ad accesso libero sviluppata da alcuni studenti di robotica presso la Harvard University che mira a supportare la progettazione, la fabbricazione, la modellazione, la caratterizzazione ed il controllo di soft robot.

Il sito Soft Robotics Toolkit aiuta i ricercatori e chiunque si cimenti in questo ambito a progettare, anche avendo poche nozioni riguardo la soft robotica, un dispositivo dedicato a una specifica funzione.

Le sfide attuali della robotica morbida includono la necessità di nuove classi di dispositivi morbidi, nuovi strumenti di simulazione e analisi e nuovi metodi di rilevamento e attuazione. Il superamento di queste sfide richiede lo sviluppo di strumenti di progettazione standard condivisi per facilitare il trasferimento delle conoscenze. Sebbene gli articoli di ricerca rappresentino un utile mezzo per condividere co-

noscenze scientifiche, sono limitati da vincoli di spazio che impediscono la pubblicazione di esperimenti non riusciti. Per questi motivi, gli articoli di ricerca da soli non sono sempre sufficienti.

Di recente, è cresciuto l'interesse per l'adozione di un approccio "open notebook" alla pratica scientifica e allo sviluppo tecnologico. Progetti come OpenWetWare e UsefulChem consentono ai ricercatori di integrare le loro ricerche condividendo pubblicamente i loro protocolli sperimentali, dati grezzi e gli esperimenti non riusciti. Contemporaneamente, nella comunità della robotica si sta sviluppando un movimento per rendere sistemi open source, con piattaforme hardware e software comuni che sono altamente modulari. Piattaforme come il Robotic Operating System (ROS), il microcontroller Arduino,<sup>9</sup> il progetto OpenHand,<sup>10</sup> e il sensore di pressione Takktile<sup>11</sup> vengono utilizzate dai ricercatori per sviluppare nuovi progetti di robot a un ritmo molto più accelerato rispetto a un decennio fa.



*Fonte: Soft robotics toolkit, Harvard University*

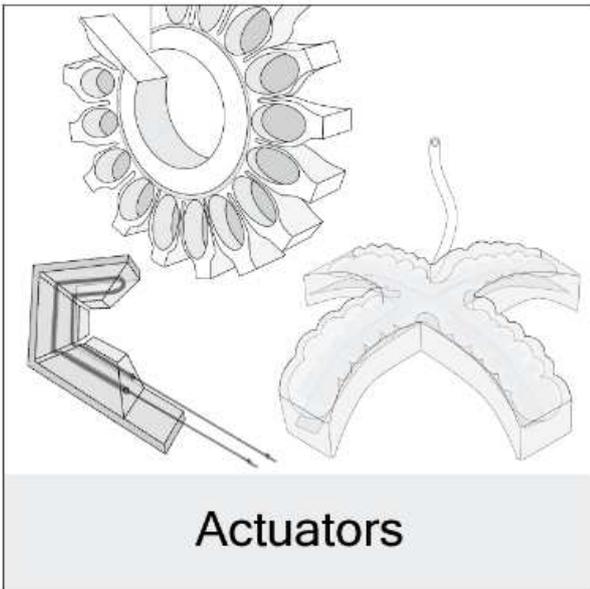
La natura della robotica morbida la rende ideale per lo sviluppo di strumenti di progettazione condivisi. Ad esempio, l'hardware necessario per il funzionamento dei dispositivi soft fluidici (tra cui la fonte di pressione, il regolatore, le valvole e il microcontrollore) è in gran parte intercambiabile tra un sistema e l'altro, senza alcuna personalizzazione. Pertanto, una piattaforma di controllo hardware comune potrebbe supportare una serie di applicazioni, tra cui quelle chirurgiche, indossabili, di locomozione e manipolazione. Il comportamento dei dispositivi robotici morbidi è determinato dalla morfologia degli attuatori e dei sensori, tipicamente realizzati con elastomeri a basso costo fusi in stampi. Questi stampi possono essere prodotti in modo conveniente grazie alla disponibilità di tecnologie di prototipazione rapida, come le stampanti 3D e il taglio laser. Dato l'accesso diffuso a queste tecnologie di prototipazione, una banca dati condivisa di file di progettazione, codice sorgente e protocolli di fabbricazione potrebbe garantire uno sviluppo rapido di dispositivi robotici morbidi personalizzati.

Questa proposta di raccolta di risorse hardware e virtuali virtuali permetterebbe alla comunità tecnica di concentrarsi sullo sviluppo di applicazioni innovative piuttosto che dedicare risorse al debugging dell'infrastruttura di base dei sistemi robotici morbidi.

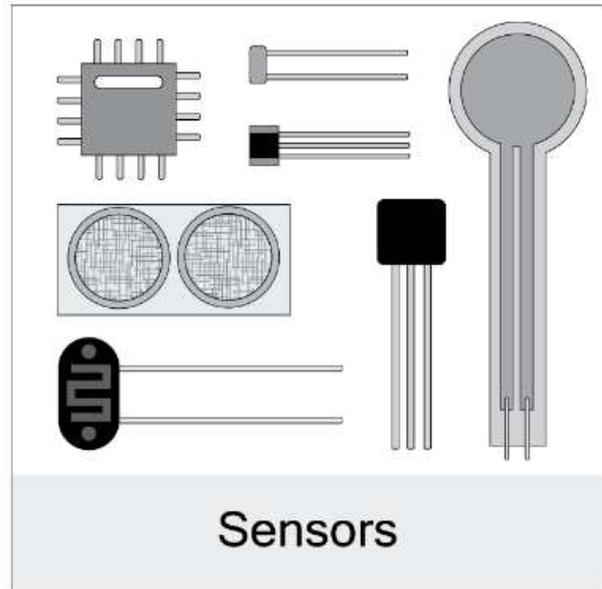
La piattaforma è stata sviluppata, come accennato, da studenti di robotica dell'università di

Harvard, con l'obiettivo di garantire l'accessibilità dei risultati dei test e dei dati raccolti dai ricercatori sui dispositivi robotici morbidi, permettendo l'accesso a file CAD scaricabili, protocolli multimediali, tutorial e script per la modellazione ed il controllo dei dispositivi stessi. La documentazione online mira ad essere una risorsa completa per la comunità e per la ricerca, dedicata anche e soprattutto ad amatoriali con poche o nulle nozioni sulla soft robotica; rendendo disponibili le tecnologie di produzione e le tecniche di progettazione, la piattaforma si concentra sui 4 step fondamentali per la messa a punto di un dispositivo robotico: progettazione, fabbricazione, modellazione e caratterizzazione e controllo.

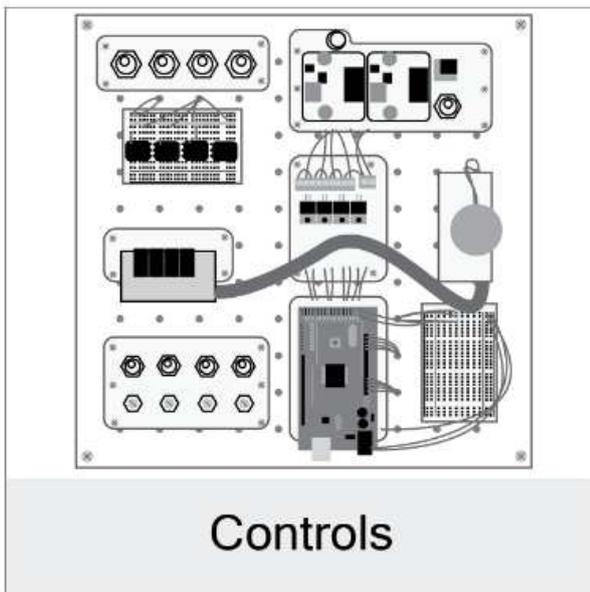
La progettazione è la sezione in cui viene descritta la configurazione di un componente e la possibilità di modifica del design per variare le sue prestazioni, la fabbricazione è la sezione in cui vengono descritte le informazioni necessarie per costruire il componente (con la disponibilità di file adatti a stampanti 3D, macchine CNC, frese ecc), la sezione di modellazione e caratterizzazione mira a garantire una previsione delle prestazioni (come ad esempio tramite analisi FEM) ed infine il controllo è la parte in cui viene messa a punto la sezione hardware (intercambiabile tra sistemi differenti), in cui ogni scheda è composta da un microcontrollore, una fonte di pressione e sensori di pressione.



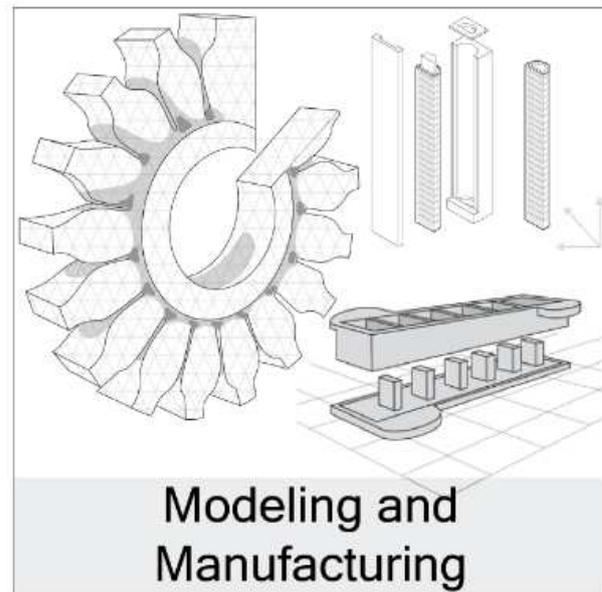
An actuator is a component of a machine that is responsible for moving or controlling a mechanism or system. An actuator requires a control signal and a source of energy.



A sensor is a device that detects and responds to some type of input from the physical environment. The specific input could be light, heat, motion, moisture, pressure, or any one of a great number of other factors.



Controls are the devices or mechanisms installed or instituted to guide or regulate the activities or operation of an apparatus, machine, or system.



Modeling and manufacturing are tools used for the fabrication and characterization of soft components using software and novel approaches to the molding process.

*Fonte: Soft robotics toolkit, Harvard University*



05

Attuatori  
pneumatici

## 05.1 Pneu-Nets

Come è stato accennato, spesso nelle applicazioni medicali, per lo sviluppo di soft robot con funzioni specifiche di riabilitazione che vengono a contatto e interagiscono per tutta la loro funzionalità con l'utente interessato, vengono utilizzati gli attuatori pneumatici, che vengono qui quindi approfonditi e ne vengono studiate le caratteristiche.

Gli attuatori elastomerici alimentati pneumaticamente sono di particolare interesse per la robotica morbida poiché possono essere leggeri, potenzialmente di un costo modesto, con possibilità diverse di fabbricazione e in grado di fornire una movimentazione non lineare con semplici input. Gli attuatori pneumatici possono inoltre garantire elevate variazioni di volume.

Gli attuatori pneumatici, ovvero quelli funzionanti tramite la pressurizzazione dell'aria, sono costituiti per funzionare da un network chiamato Pneu-Net nel quale piccoli canali in materiali elastomerici sono modellati per permettere movimenti sofisticati con controlli semplici.

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse varianti della tecnologia degli attuatori soft, aventi origine in particolar modo dalla biomimesi di alcune strutture di animali presenti in natura.

L'imitazione e l'ispirazione proveniente dalla natura non riguarda solamente l'attuazione pneumatica chiaramente, ma ci sono moltissimi esempi in natura di strutture composte da materiali morbidi che garantiscono la mimesi nella soft robotica. I muscoli idrostatici come, ad esempio, le proboscidi degli elefanti, le lingue delle lucertole e i tentacoli dei polpi sono solo alcune delle strutture che possono, grazie alle loro caratteristiche soft, estendersi, ruotarsi, flettersi e compiere altre movimentazioni particolari.

La mimesi di queste strutture complesse è ne-

cessaria ed estremamente pratica per l'evoluzione dei soft robots e comprenderne la morfologia e la funzionalità è fondamentale per comprendere le modalità di risoluzione di alcuni problemi che la natura ha già elegantemente risolto prima del contributo umano.

Gli Pneu-Nets inglobati in un corpo elastico possono essere modellati e disposti in maniera tale da cambiare sia la forma che le proprietà meccaniche dell'attuatore attraverso la pressione (idraulica o pneumatica) ed una volta pressurizzati, questi si espandono come palloni, premendo l'uno sull'altro e permettendo quindi la deformazione dell'intera struttura.

Come viene esplicito in maniera dettagliata nell'articolo "Programmable Morphing Hydrogels for Soft Actuators and Robots: From Structure Design to Active Functions" dell'anno 2022, per poter controllare una deformazione possono essere impiegate diverse modalità di progettazione, come quindi l'utilizzo di più materiali con differenze di rigidità tra di loro o l'utilizzo di geometrie prodotte in maniera mono materica ma con caratteristiche di forma particolari.

In ogni caso, tre sono i requisiti fondamentali per creare deformazioni controllabili di una geometria:

1- Gradiente struttura: è importante che le strutture siano eterogenee in termini di gradienti di spessore e densità

2- Modalità di deformazione e relativi meccanismi: è importante che si conosca il principio di attuazione messo in atto in maniera tale da poter simulare e prevedere come una data geometria risponderà a un dato stimolo

3- Diversificare le deformazioni: è importante ricordare che ogni combinazione di forma e principio di attuazione da origine a una deformazione differente dalle altre

## 05.2 Brevetto Soft Robotics Pneumatic Actuators

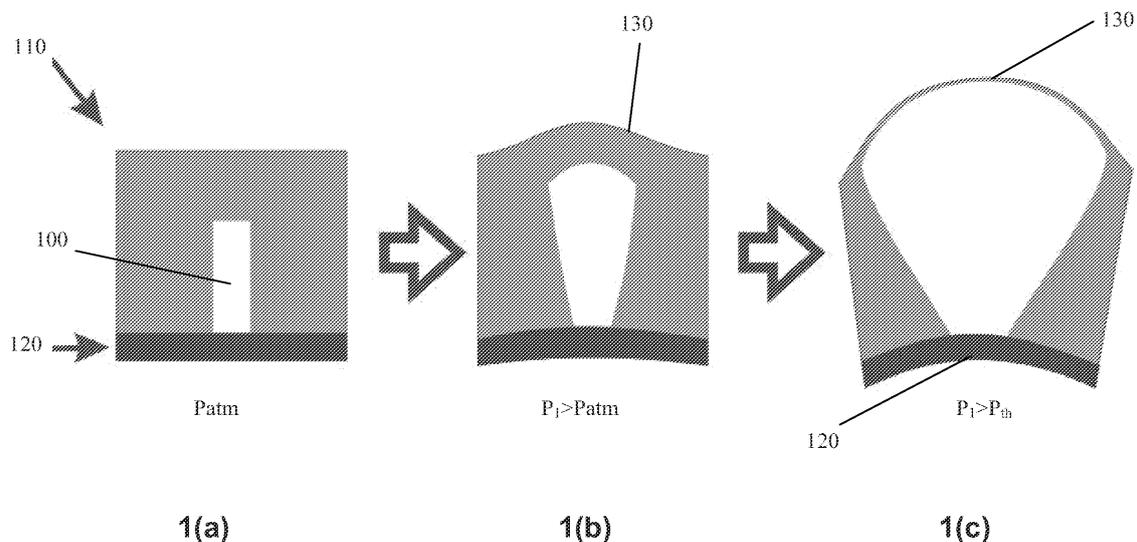
Il brevetto di riferimento per la progettazione degli attuatori pneumatici per robot morbidi è stato depositato nel 2014 da parte di alcuni inventori americani, e ne descrive quindi il funzionamento, la risposta alla pressione e la geometria.

In particolare, attraverso lo studio di tale documento è possibile apprendere che, quando la pressione interna ai canali è uguale alla pressione esterna (pressione atmosferica), l'attuatore rimane immobile e non subisce deformazioni. Quando la pressione impressa all'interno dei canali supera i valori di quella atmosferica, si ottiene l'ingrossamento del network con con-

seguente allungamento e assottigliamento della parete meno rigida del sistema, ovvero la parte superiore dell'attuatore. In questo modo si verifica quindi la flessione dell'attuatore attorno al livello meno elastico, ovvero quello della base, e tale movimento ha origine quando la pressione interna supera quella esterna.

In una prima fase le deformazioni ottenute hanno un andamento lineare, ma superato il valore critico della pressione (dato principalmente dal materiale utilizzato e dalla forma che ha l'attuatore), la deformazione assume un carattere non lineare, come illustrato nella figura del brevetto.

FIGURE 1



Fonte: Brevetto US 2014/0109560A1

Per permettere che la pressione nei canali interconnessi tra di loro non si limiti ad un semplice irrigidimento, è necessario comporre l'attuatore con due diversi livelli: il primo si espande sotto l'azione della pressione, mentre il secondo ri-

mane invariato, garantendo un limite all'espansione del primo livello.

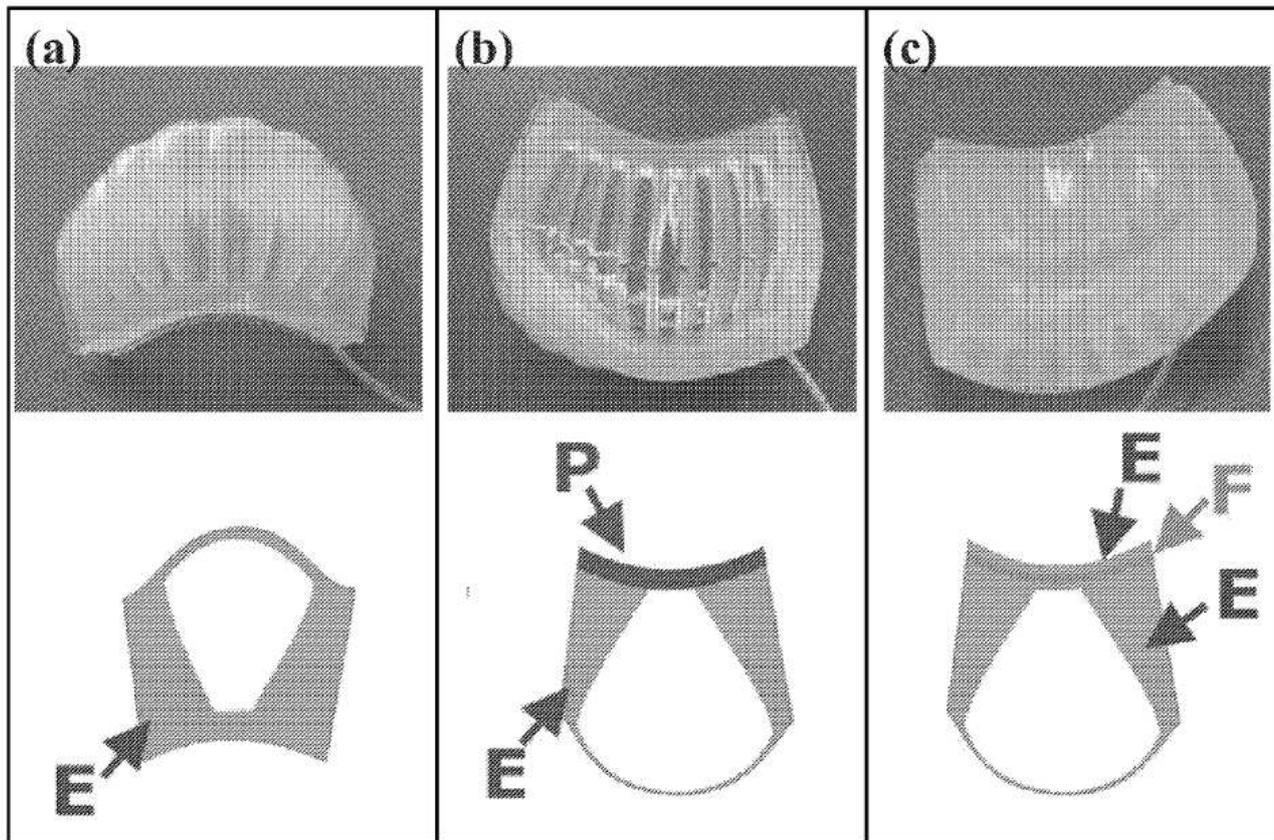
Grazie a questa conformazione, l'attuatore ruota attorno all'asse centrale del livello più rigido a seguito dell'espansione dei canali verso il lato

opposto e la differente risposta si può ottenere attraverso due strategie:

- Adozione di due materiali aventi comporta-

menti elastici differenti

- Utilizzando differenze tipologie di spessore di un solo materiale nella stessa geometria



Fonte: Brevetto US 2014/0109560A1

In linea di massima, il livello espandibile dovrebbe presentare uno spessore inferiore ai 2mm, mentre il livello destinato a curvarsi dovrà essere superiore a quest'ultima misura, in relazione all'elasticità del primo livello.

La risposta finale dell'attuatore può essere sem-

pre considerata dipendente da due fattori: il modulo elastico dei materiali (o del materiale) che lo costituiscono e la rigidità data dalla forma (ovvero la differenza di spessore tra i livelli e le pareti che racchiudono gli Pneu-Nets).

## 05.2.1 Materiali adottati

I materiali adottati nel brevetto sono stati selezionati in base alla loro facile reperibilità sul mercato, alla loro economicità, alla facilità d'incollaggio (ovvero la possibilità di ottenere una struttura formata da più livelli) e di lavorazione con metodi artigianali (colata in stampo). Il primo materiale utilizzato è l'Ecoflex 00-30, ovvero una gomma siliconica "extra soft" prodotta e commercializzata dall'azienda Smooth – On. Questo materiale è particolarmente indi-

cato per impieghi di tipo medico o cosmetico a causa della sua atossicità e facilità di lavorazione sia per colaggio che modellazione.

Il materiale, incolore, presenta una Shore Hardness Scale 00 di 30 ed un allungamento a rottura del 900%.

Di seguito viene riportata la tabella Shore Hardness Scale che illustra le rigidità e i possibili impieghi dei differenti valori.



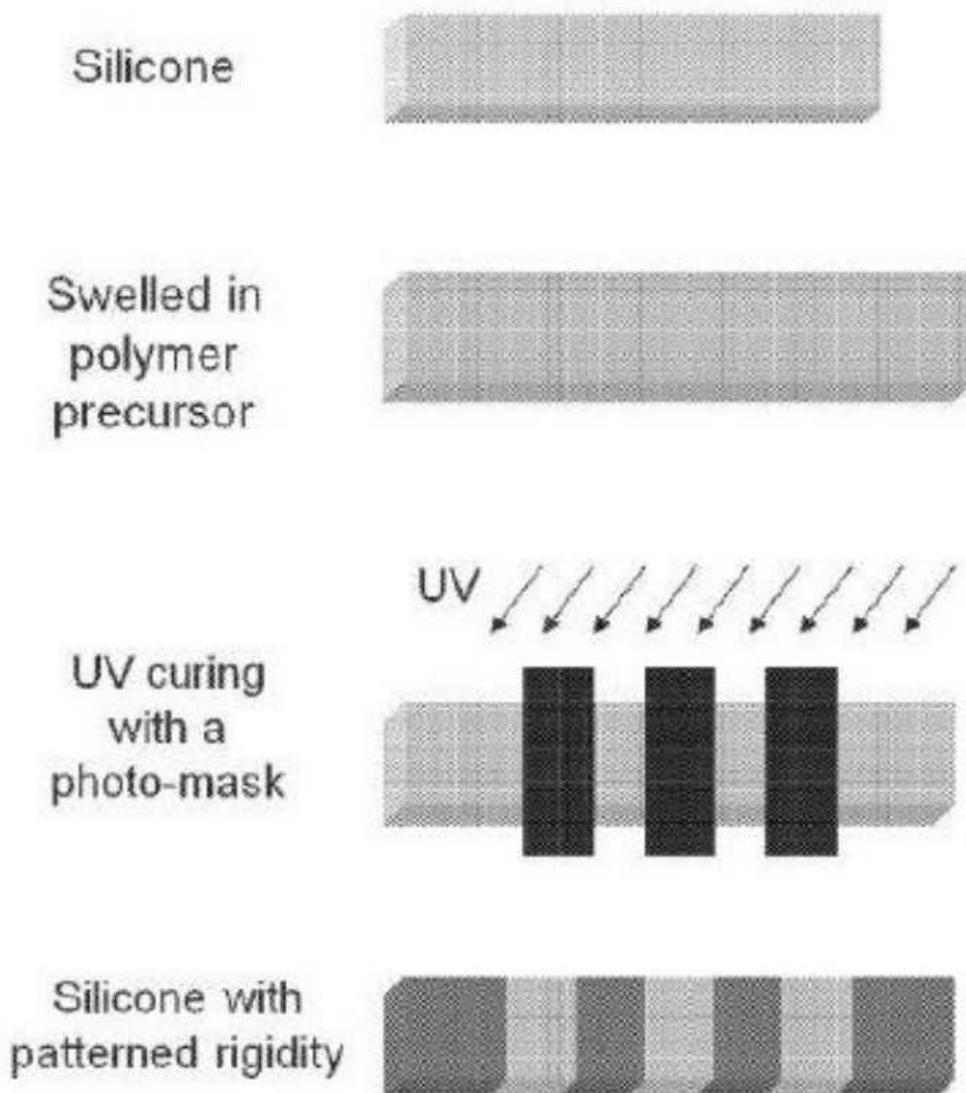
Un altro materiale molto utilizzato per gli impieghi di tipo medicale è il PDMS, Dow Corning Sylgar 184 prodotto dall'azienda Sylgard. Questa è una gomma siliconica, anch'essa incolore, avente valore nella Shore Hardness Scale di 50 e presenta un allungamento a rottura del 150%.

È poi possibile impiegare per diverse applicazioni numerose altre tipologie di materiali, come quelli destinati al livello espandibile, come latex, gomme poliuretatiche, siliconi e gomme vulcanizzate, e materiali destinati al livello rigido, come la carta, il kevlar, tessuti di cotone, nylon, fibre di carbonio e fibre di vetro.

### 05.2.2 Aumento della rigidità con raggi UV

Un ulteriore possibile metodo per aumentare la rigidità del materiale utilizzando un solo materiale è creare il livello di contenimento senza aumentarne gli spessori ma cambiando le proprietà elastiche tramite un procedimento chimico. I disegni del brevetto descrivono come questo metodo potrebbe essere impiegato per ottenere nuove e più complesse possibilità di movimento da parte degli attuatori, e per ottenere ciò, l'elastomero di riferimento viene

previamente immerso in una soluzione a base di un polimero precursore (polymer precursor solution). In questa maniera, il silicone assorbe la soluzione, gonfiandosi come una spugna, e mettendosi in condizione di cambiare le proprie proprietà elastiche se sottoposto ai raggi UV. Grazie al possibile utilizzo di una maschera, è possibile coprire le aree che non si desidera far indurire.



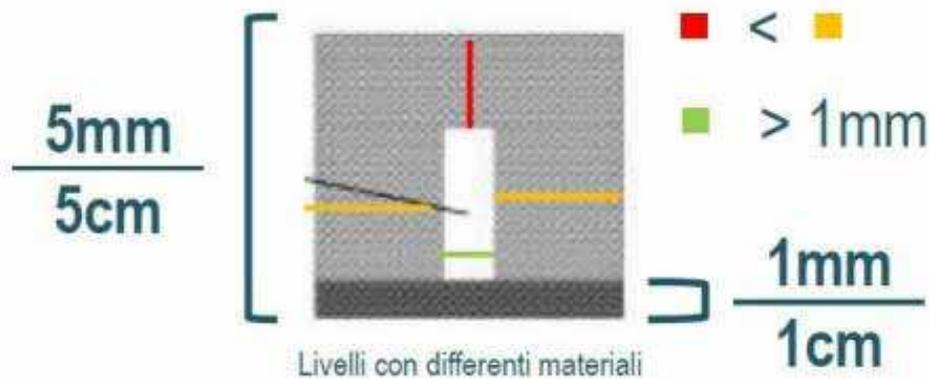
Fonte: Brevetto US 2014/0109560A1

### 05.2.3 Spessore delle pareti che racchiudono i canali

Per quanto riguarda poi gli spessori ottenibili, è importante premettere quanto questi dipendano dalla tecnica di fabbricazione utilizzata per produrre l'attuatore. Le modalità descritte nel brevetto sono la soft litografia, in grado di ottenere spessori delle pareti inferiori a 1mm, e il colag-

gio del materiale all'interno di uno stampo, che permette di ottenere uno spessore di circa 1mm. Questo è il valore generalmente di riferimento ed un materiale come l'Ecoflex, ad esempio, inizia ad espandersi (con spessore di 1mm) già a pressioni inferiori ai 34,5 kPa.

spessore minimo ottenibile è di **1mm**



Un muro di 1cm inizia ad espandersi con pressioni inferiori a 34,5 kPa

Fonte: Brevetto US 2014/0109560A1

### 05.2.4 Aggiunta di un livello protettivo

Il brevetto contempla poi anche la possibilità di aggiungere un terzo livello senza compromettere l'efficienza motoria del dispositivo: come altro sistema pneumatico, il rischio di forare e compromettere del tutto la funzione dell'attuatore è contemplabile; pertanto, può risultare utile aggiungere un livello protettivo al di sopra dello strato che ospita i canali pressurizzabili. Questa seconda pelle, tuttavia, deve neces-

sariamente essere ancora più elastica rispetto agli altri materiali, ovvero il materiale di cui è composta deve avere un modulo elastico inferiore a tutti gli altri presenti, per non influire nel funzionamento. Nel brevetto viene citato il materiale Ecoflex-0010, o qualsiasi altra gomma siliconica avente una Shore Hardness inferiore a 10 nella scala di riferimento.



## 05.3 Avanzamenti rispetto al brevetto

Studiando lo stato dell'arte, si comprende che per diverso tempo la sperimentazione ha prodotto sistemi con una tipologia di gonfiaggio abbastanza lenta, mentre con l'articolo del 2014 "Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly" prodotto da alcuni ricercatori dell'Università di Harvard, è stato introdotto un modo per permetterne un gonfiaggio molto più veloce.

Come è stato detto, i soft robot possono funzionare mediante diverse tipologie di attuazione e per ogni tipologia di attuazione possono avere una movimentazione veloce o lenta. Gli Pneu-Net utilizzano un'attuazione chiaramente non rigida, come da accordo secondo la definizione di Soft Robot, che permette il cambiamento della traiettoria di movimento a seconda delle forze esterne impresse, in questo caso le pressioni degli attuatori.

Tendenzialmente, la grande variazione di volume limita le prestazioni degli attuatori morbidi, i quali possono essere azionati secondo tre modalità:

- Richiedendo il trasferimento di grandi volumi di gas per l'azionamento
- Generando una variazione di volume dell'attuatore significativa, il che comporta che l'attuatore sia circondato da ampio spazio vuoto per poter funzionare
- Imponendo elevate sollecitazioni al materiale di cui è composta la rete pneumatica, limitandogli la durata in termini di tempo

La velocità angolare di flessione di una struttura azionata da uno pneumatico dipende inoltre dai seguenti fattori:

- La velocità di gonfiaggio
- La geometria dei canali interni e delle pareti esterne
- Le proprietà della struttura (come i materiali ed i metodi di fabbricazione)

Per l'azionamento, è particolarmente vantaggioso utilizzare la pressurizzazione dell'aria perché:

- Consente un rapido gonfiaggio della struttura

pneumatica (in quanto l'aria presenta una bassa viscosità e può essere quindi rapidamente spostata)

- È facilmente controllabile e misurabile (tramite regolatori e sensori)
- È universalmente disponibile (grazie alla diffusione di compressori o di serbatoi di gas compresso)
- È leggera
- Può essere scartata dopo l'utilizzo, sfiatando nell'atmosfera

Nell'articolo sopra citato è presentata la sperimentazione di una diversa forma possibile per lo sviluppo del network pneumatico di attuazione, testata grazie ad analisi FEM e con l'utilizzo di elastomeri a base di silicone.

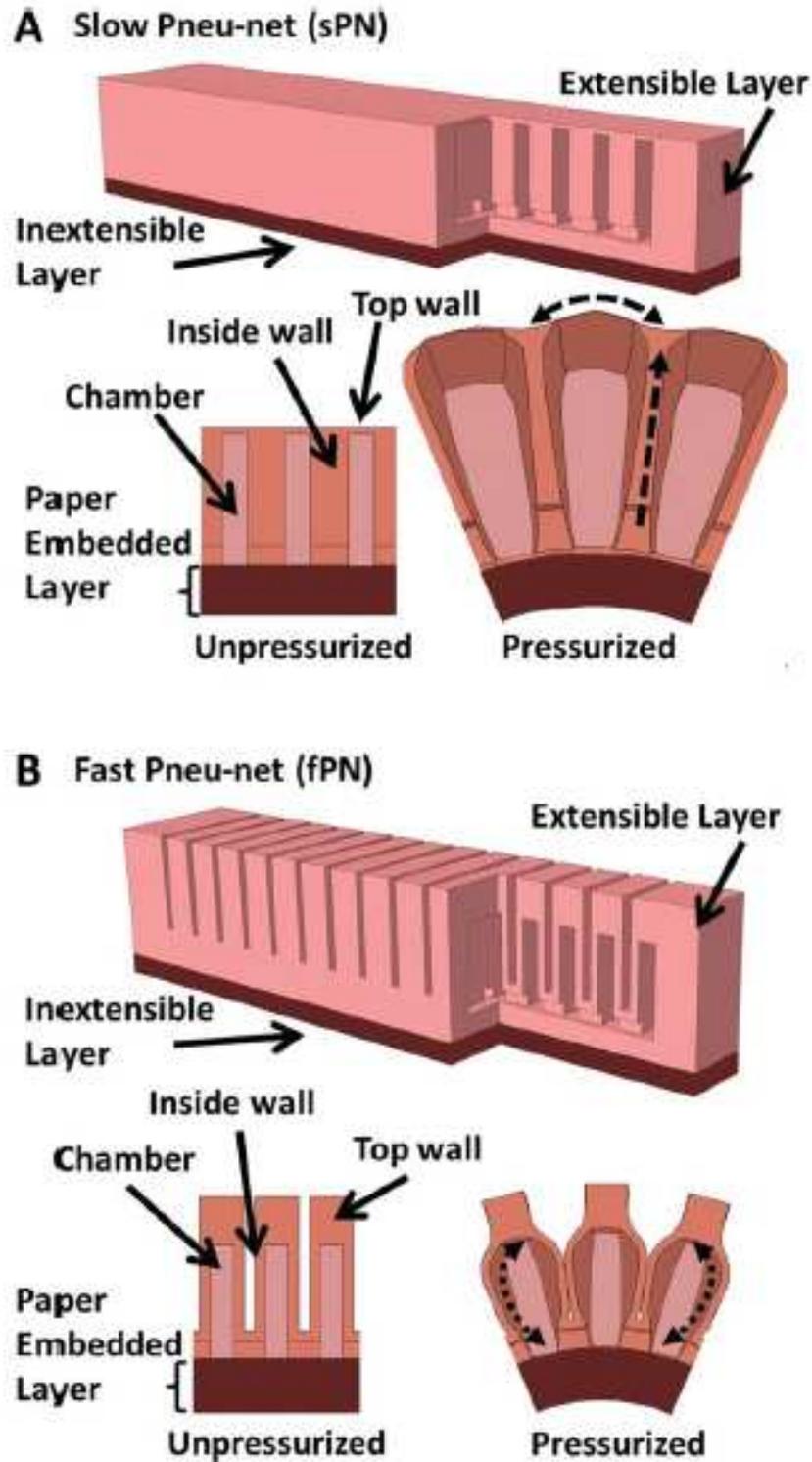
Tenendo presente la descrizione fornita dal brevetto degli attuatori pneumatici precedentemente analizzata, si ricorda che tali sistemi consistono, in generale, in uno strato superiore estensibile ed in uno strato inferiore inestensibile ma flessibile. Questa struttura viene nell'articolo chiamata sPN (Slow-Pneu-Net) ed è una struttura semplice e standardizzata che contiene camere collegate da un singolo canale che, quando viene pressurizzato, espande preferenzialmente la parte superiore, allungando le pareti interne delle camere.

Questo cambiamento di forma si traduce in una flessione dell'intero attuatore e la variazione massima del volume del canale all'interno delle reti pneumatiche definisce la quantità totale di aria compressa che deve essere trasportata al suo interno per ottenere una flessione completa. Per ridurre le variazioni di volume necessarie per l'azionamento completo, e quindi per aumentare la velocità di attuazione, è stato progettato un nuovo attuatore, chiamato fPN (Fast-Pneu-Net).

Anche questo attuatore è costituito da uno strato superiore estensibile e da uno strato inferiore inestensibile ma flessibile, ma a differenza del sPN, lo strato estensibile contiene degli spazi vuoti tra le pareti interne di ciascuna camera.

Le dimensioni delle camere sono progettate in modo che le due pareti interne siano più sottili: un aumento della pressione interna espande in modo preferenziale le pareti interne e riduce al minimo la tensione che si verifica sulle altre pa-

reti esterne. Inoltre, la stretta vicinanza di due camere fa sì che le pareti interne in espansione si spingano l'una contro l'altra provocando un allungamento dello strato estensibile con variazioni minime.



Fonte: *Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly*

Per studiare l'impatto che le diverse dimensioni hanno sul piegamento della fPN, nello studio viene indicata la caratterizzazione della pressione richiesta per piegare la struttura secondo un diverso numero di camere, altezze delle stesse e spessori delle pareti.

Genericamente, se ne deduce che un maggior numero di camere per una data lunghezza e pareti interne più sottili permettono una maggiore flessione a pressioni più basse. La misura in cui queste tendenze possono essere sfruttate tuttavia è limitata sia dalle proprietà dei materiali, sia dalla tipologia di fabbricazione delle reti pneumatiche.

La risoluzione della stampante 3D utilizzata per gli stampi determina in questo caso il numero di camere e lo spessore delle pareti che si possono fabbricare. Tuttavia, è anche importante notare come a un certo punto si raggiunga un plateau per cui aumentare ulteriormente l'altezza e la larghezza delle camere aumenterebbe unicamente le dimensioni dell'attuatore senza

La rigidità del materiale determina il quantitativo di pressione richiesto per la flessione dell'attuatore. Nel caso dell'Ecoflex 30 (Shore Hardness 00: 30) già con una pressione di 8kPa si ottiene la totale curvatura del tentacolo, con un volume interno d'aria immessa pari a 7,5 cm<sup>3</sup>. Si hanno infatti grandi variazioni

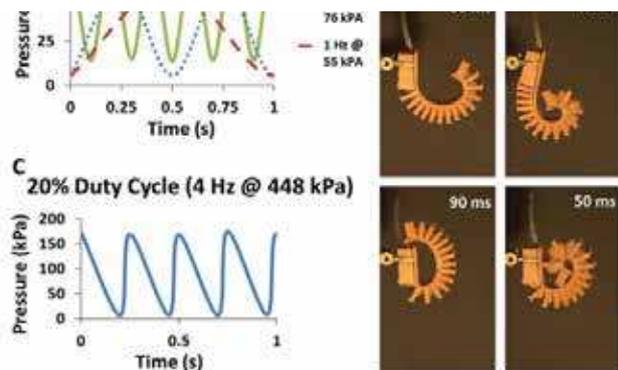
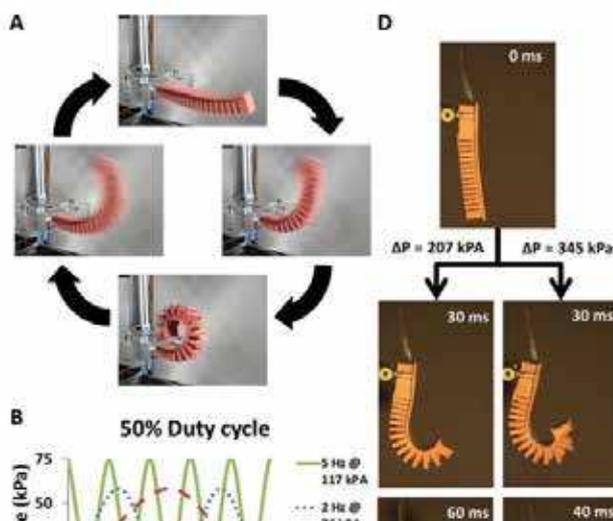
augmentarne le prestazioni.

Per quantificare la quantità di aria trasportata durante l'azionamento, nello studio sono state misurate le curve di isteresi pressione-volume (PV) per una trave di prova fPN.

La rigidità del materiale determina come è stato già definito la quantità di pressione necessaria affinché l'attuatore si curvi: a parità di pressione, un materiale estremamente flessibile tende a deformarsi maggiormente rispetto a un materiale più rigido.

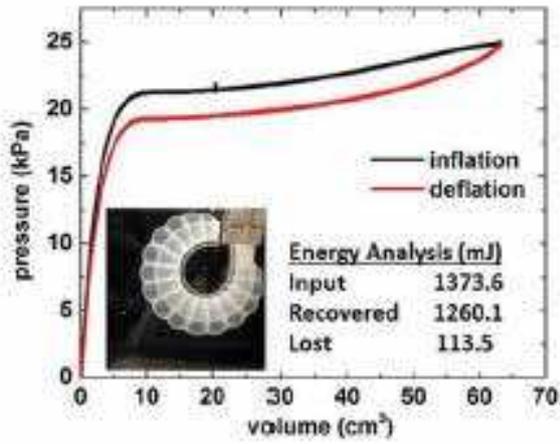
Cambiando i materiali utilizzati e le relative combinazioni tra il materiale adottato tra livello superiore e inferiore con le loro rispettive differenze di rigidità, è possibile variare il comportamento dell'attuatore una volta pressurizzato. Nei documenti forniti dal gruppo di ricerca di Harvard Whitesides Research Group (Soft Robotic Toolkit) sono stati adottati due diverse combinazioni di materiali: Ecoflex 30 con livello inferiore in PDM e Elastosil irrigidito dalla carta.

del volume dei setti per piccoli incrementi di pressione. Confrontando i risultati con quelli ottenuti in riferimento a un materiale più rigido come l'Elastosil (Shore Hardness A: 28), si nota la differenza di pressione necessaria per la completa flessione del tentacolo: 60 kPa. Anche il volume d'aria immessa cambia, qui però si

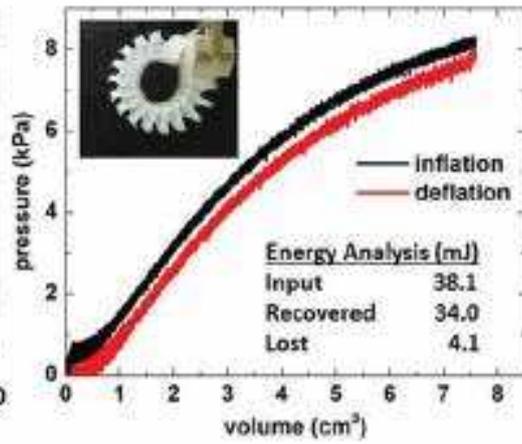


Fonte: *Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly*

### A sPN Actuator



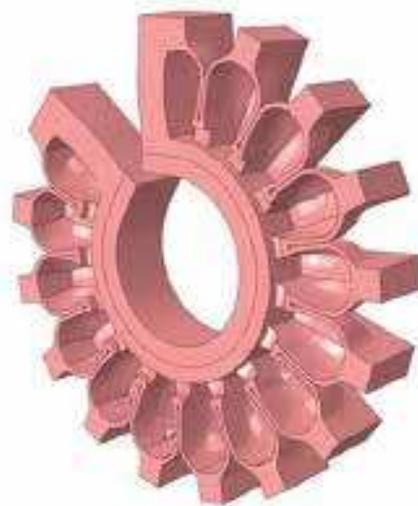
### B fPN Actuator



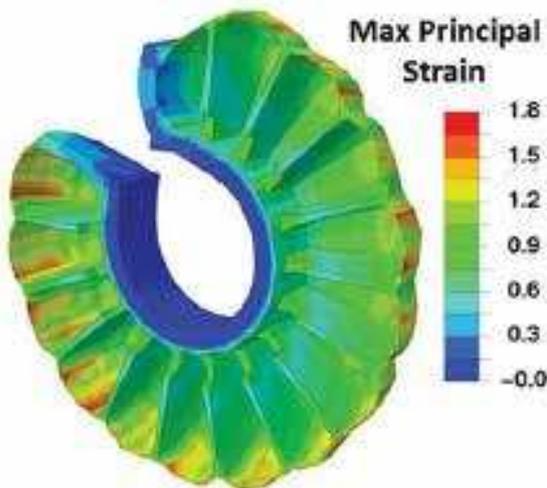
### C sPN Actuator



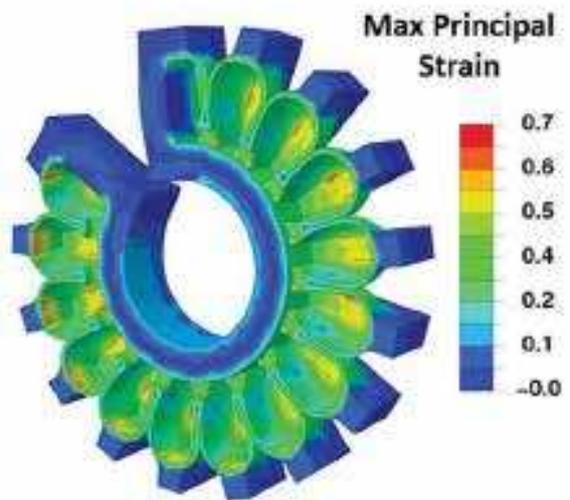
### D fPN Actuator



### E sPN Strain



### F fPN Strain



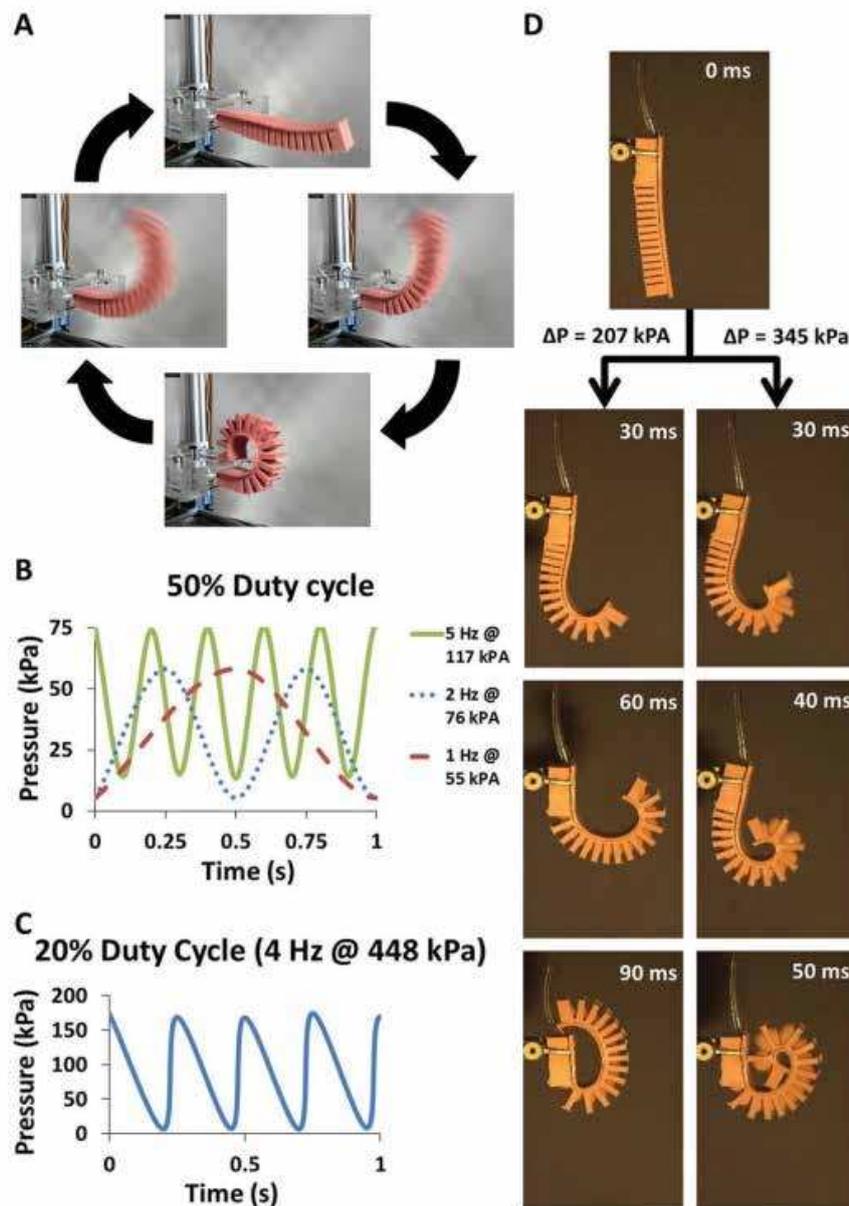
Fonte: *Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly*

ha un andamento inverso, infatti l'utilizzo di un materiale più rigido necessita l'immissione di un volume d'aria minore: 5 cm<sup>3</sup> (piccoli incrementi di volume per grandi variazioni di pressione).

Anche senza cambiare il materiale, il comportamento dell'attuatore può essere modificato mediante l'adozione di una forma differente. Ad esempio, è possibile ottenere un corpo più rigido aumentando gli spessori delle pareti dei setti.

Gli esiti di questi test, effettuati sia empiricamente che mediante l'analisi FEM, descrivono

il diverso comportamento dell'attuatore modificando sia lo spessore delle pareti dei setti che l'altezza di quest'ultimi. Modificando tali valori si hanno dei cambiamenti sulle pressioni necessarie che nella forza espressa dall'attuatore in flessione, ma la traiettoria seguita del suo movimento non ne viene per niente influenzata. Adottando degli spessori minori delle pareti si ottiene un incremento della forza di output, mentre diminuisce la pressione necessaria per la movimentazione del tentacolo. Lo stesso effetto riguardante la forza di output è ottenibile aumentando l'altezza dei setti.



Fonte: *Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly*

Parametri morfologici su cui intervenire per il controllo dell'attuatore:

- Altezza dei setti (aumentando l'altezza dei setti diminuisce la richiesta di pressione e aumenta la forza esercitata dall'attuatore);
- Numero dei setti (aumentando il numero dei

setti diminuisce la pressione richiesta);

- Aumentando lo spessore delle pareti si richiede una pressione d'esercizio maggiore;
- Larghezza dei setti;
- Dimensione dei canali.

## 05.4 Esempi di attuatori pneumatici

Quando si parla di soft robotica con attuazione pneumatica è importante fare riferimento ad uno stato dell'arte in continua espansione che riguarda molteplici campi di applicazione. In

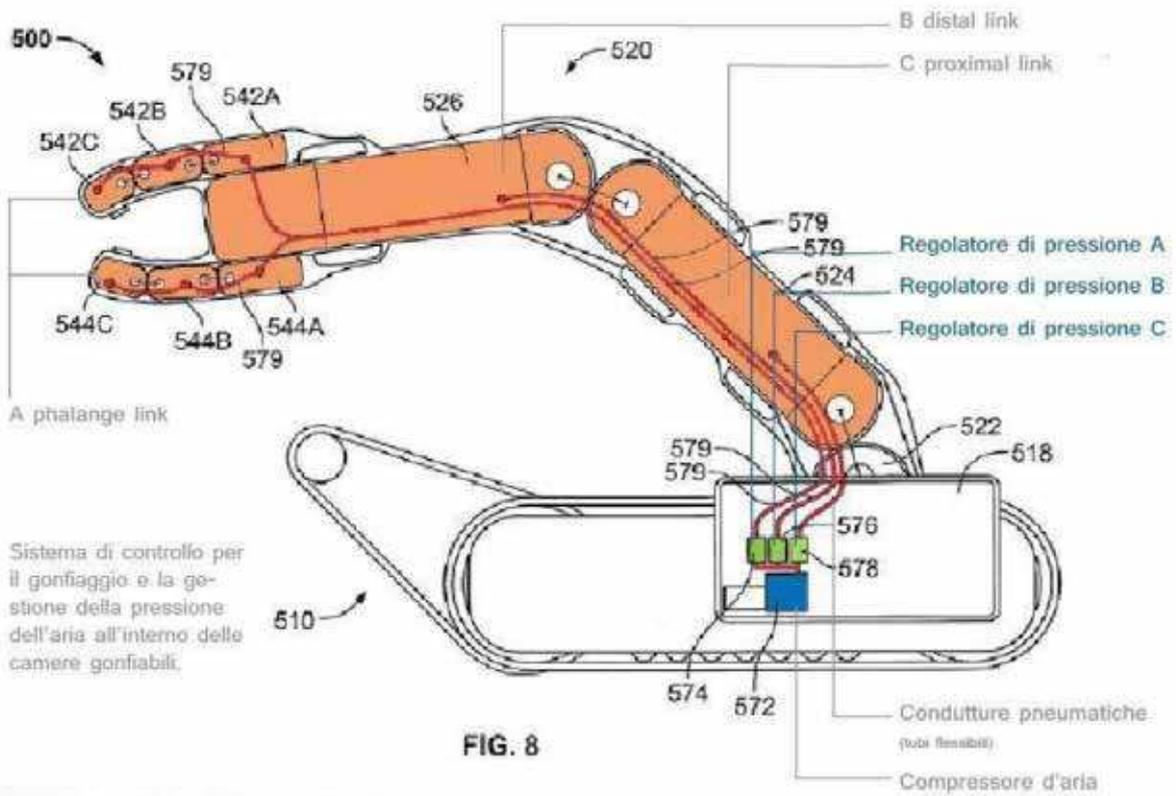
questa sezione vengono analizzati alcuni esempi di prodotti con attuazione pneumatica di tipo non medicale.

### 05.4.1 DARPA Inflatable Robot Arm

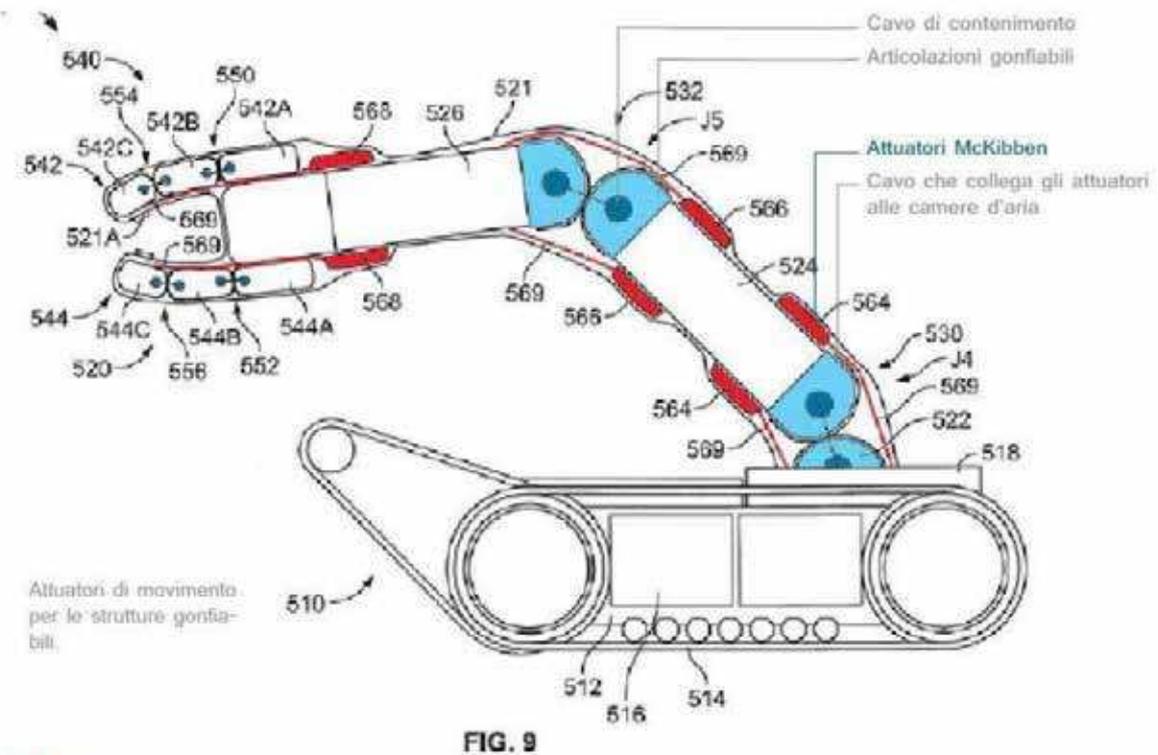
Uno degli esempi più celebri dello stato dell'arte è la DARPA Inflatable Robot Arm, ovvero un prototipo realizzato a scopi militari che tra i primi ha aperto nuovi orizzonti in quella che sembrerebbe ad un primo sguardo l'evoluzione futura della robotica.

I robot gonfiabili presentano diversi vantaggi: un ottimo rapporto forza/peso, la possibilità di essere compattati e quindi di occupare un piccolo spazio quando non sono utilizzati e il basso costo della tecnologia. Questo braccio gonfiabile, movimentato da un supporto cingolato, è stato pensato per disinnescare gli ordigni esplosivi, in quanto la possibilità di regolare la pressione all'interno delle camere gonfiabili (attuatori) lo rendono idoneo a svolgere compiti delicati. Si sta pensando di adottare queste tecnologie per le esplorazioni su Marte, in quanto l'assenza di ingranaggi scavalcherebbe il problema della polvere; inoltre, il robot occuperebbe uno spazio ridotto durante il viaggio. Il robot presenta degli snodi anch'essi gonfiabile ed an-

che gli attuatori funzionano per via pneumatica (attuatori McKibben). Questi attuatori lineari non sono altro che dei muscoli pneumatici artificiali che si contraggono e si distendono grazie alla pressione del fluido presente al suo interno. Il fluido che viene utilizzato per la generazione della forza può essere sia liquido sia gas. La logica di funzionamento segue quella dei muscoli biologici: i movimenti sono permessi dal lavoro di due attuatori antagonisti, in quanto mentre uno si estende l'altro si contrae. Vi è un compressore unico per tutti i pneumatici, ma la loro pressione viene separatamente gestita tramite i rispettivi regolatori di pressione (ogni "area" viene ha il suo dispositivo che la regola). Questo permette di controllare il gonfiaggio camera per camera in maniera del tutto indipendente. I processori che costituiscono il sistema di controllo del robot possono essere incorporati nella macchina o situati esternamente. In questo caso le istruzioni vengono trasmesse e ricevute via etere (wireless).



Fonte: DARPA Inflatable Robot Arm



Fonte: DARPA Inflatable Robot Arm

### 05.4.2 *Anti-Roach, Otherlab*

Un ulteriore esempio è l'Anti-Roach di Otherlab, finanziato anch'esso dalla DARPA, il quale presenta, come elementi strutturali, camere pneumatiche in tessuto capaci di esercitare grandi forze nonostante il loro peso ridotto. Attraverso la manipolazione delle forme di

queste “membra-palloncini” è possibile progettare il movimento del robot. In questo caso sono stati utilizzati degli attuatori a soffiato. Questi sono costituiti da un tessuto dove sono state cucite una serie di tasche gonfiabili. Con la loro estensione e contrazione si ha il movimento.



*Fonte: Anti-Roach, Otherlab*

### 05.4.3 Soft Robot

Forse nato per gemmazioni dalle ricerche condotte dalla DARPA, questo soft robot inaugura una strada alternativa agli esempi precedentemente illustrati. Si tratta di una ulteriore semplificazione delle tecnologie (senza però diminuirne l'efficacia) derivante dall'osservazione degli invertebrati (seppie e vermi) e dei loro sistemi di locomozione. Il robot avanza per flottazione: gli attuatori si muovono ad onda. Non vi sono

“bolle” d'aria separate, ma un corpo unitario al cui interno sono presenti dei canali dove l'aria va in pressione. Queste condutture si gonfiano e sgonfiano in maniera sequenziale. I movimenti del robot sono controllati regolando la pressione all'interno dei “tentacoli-attuatori”. L'architettura di un soft robot comprende tutti i componenti tradizionali di un sistema robotico (controllo, percezione e attuazione).



Fonte: Soft Robot, DARPA

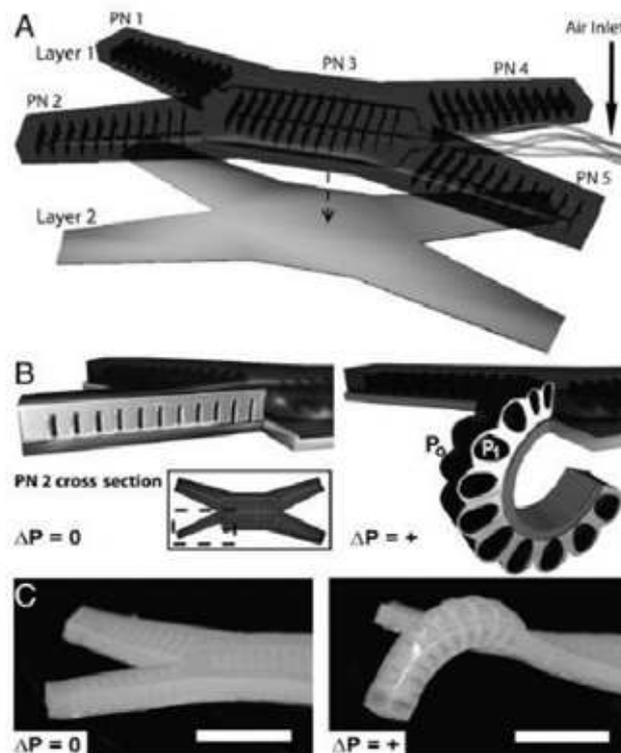
## 05.5 Fluidic Elastomers Actuators (FEAs)

Gli attuatori pneumatici sono degli elementi in elastomero che funzionano attraverso un'energia meccanica diretta, somministrata attraverso l'adozione di un fluido pressurizzato. I loro pregi stanno nella loro economicità, facilità di fabbricazione e la capacità di effettuare dei movimenti complessi uniti all'enorme capacità di adattamento del robot stesso, dovuti alla natura del materiale utilizzato (gomme, materiali morbidi e quindi non pericolosi nel caso il robot dovesse interagire con un essere vivente o qualcosa di fragile).

Sotto la denominazione di Fluidic Elastomers Actuators (FEAs) vi rientrano quegli attuatori formati da un foglio, più o meno spesso, di materiale sintetico elastomero (in genere un silicone) capace di deformarsi sotto l'azione di una pressione idraulica o pneumatica. Il movimento è dato dall'espansione delle camere racchiuse all'interno dell'elastomero, le loro dimensioni e disposizione consentono di conferire un'ampia gamma di movimenti all'attuatore, limitati soltanto dalla resistenza meccanica del materiale.

Questo foglio è generalmente ottenuto mediante il colaggio del materiale in uno stampo, da qui la sua facilità di realizzazione. La natura soft di tali attuatori li rende adatti per la costruzione di elementi robotici che attuano condividendo lo spazio con le persone.

Tradizionalmente la robotica si concretizza in strutture rigide, concepite per svolgere efficientemente solo un limitato numero di compiti specifici con conseguenti limiti all'adattabilità. Inoltre, le loro parti costituenti che si possono riassumere in aste e giunti rigidi, risultano non sicure quando si ha a che fare con una loro interazione con gli esseri umani, rendendo così necessaria una netta separazione tra le aree dedicate al lavoro delle macchine e a quelle dove operano le persone (sicurezza e adattabilità). I possibili campi di applicazione della tecnologia comprendono: muscoli artificiali, robots a scopi medicali, robots bio-ispirati, attuatori per l'afferraggio, interazioni tra uomo e macchina nelle tecnologie volte all'assistenza.



## 05.6 Architettura dei soft robots

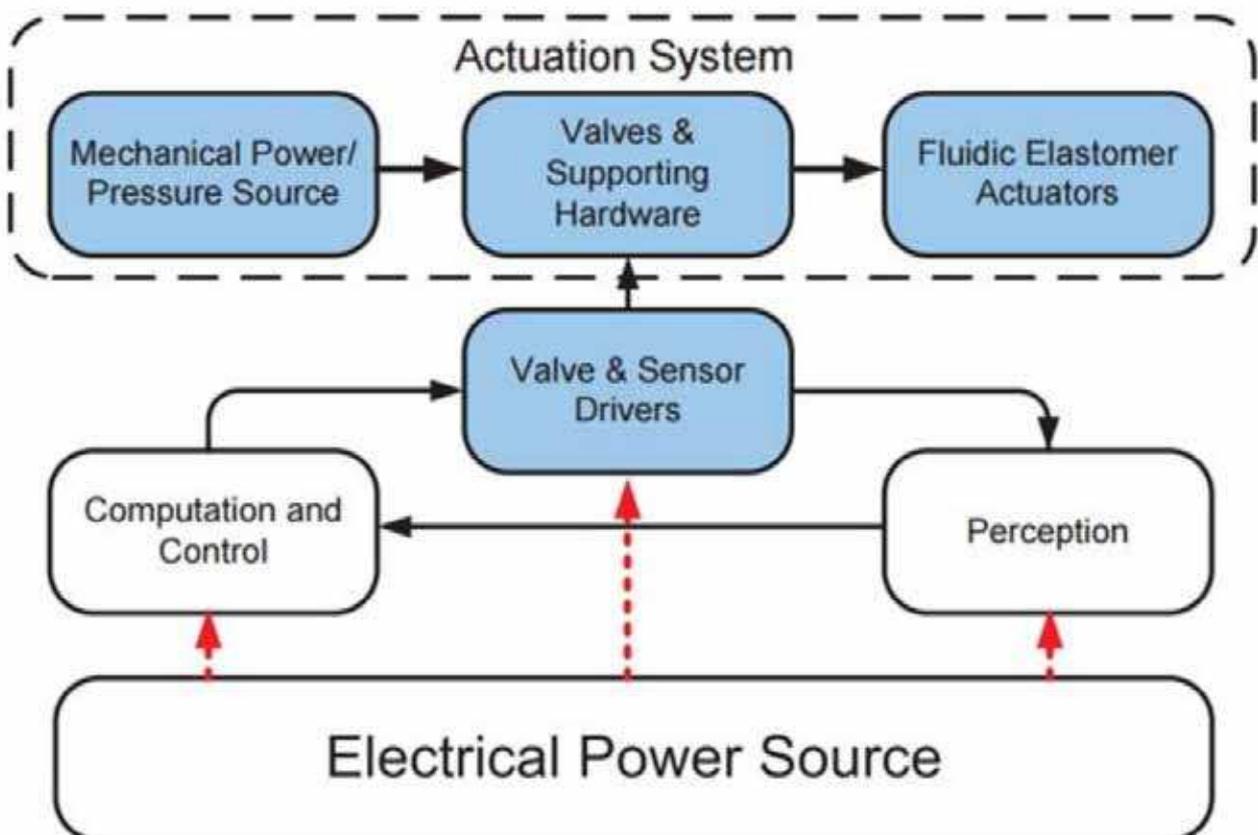
I componenti esterni che concorrono al funzionamento dei soft actuators sono:

- Una fonte di pressione portatile;
- Valvole per il controllo del singolo attuatore (queste valvole possono essere progettate appositamente per lo scopo o già presenti sul mercato);
- Sensori distribuiti lungo l'attuatore in maniera da poter inviare un feedback al computer che ne controlla i movimenti

Si può constatare che al di fuori dei sistemi propriamente dedicati all'attuazione, tutti gli elementi e gli apparati che concorrono al controllo del movimento (sub-systems) sono gli stessi di un robot convenzionale. L'architettura dei FEAs si divide in tre componenti principali:

- Il sistema di attuazione, ossia la componente hardware destinata al movimento (fonte di pressione, valvole e l'attuatore in elastomero vero e proprio;
- Il sistema di percezione, capace di interpretare gli output delle valvole e dei sensori;
- Una fonte d'energia elettrica che alimenta i due precedenti sistemi.

La sostanziale differenza dei robot pneumatici rispetto ai sistemi tradizionali sta nel fatto che il movimento degli attuatori utilizza una fonte d'energia diversa da quella elettrica che alimenta i restanti apparati; infatti, l'attuatore è direttamente alimentato dall'energia meccanica fornita dalla pressione del fluido, ovviamente tenuta sotto controllo dalle valvole.



06

Ortesi  
pneumatiche

## 06.1 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica

Come è stato accennato, la robotica morbida sta sempre di più portando innovazioni ed avanzamenti al campo dell'ingegneria biomedica e della progettazione di dispositivi dedicati alla salute umana, e qui vengono quindi riportati esempi e studi di alcuni di tali dispositivi.

L'attuazione pneumatica in particolar modo risulta particolarmente vantaggiosa ai fini della progettazione di dispositivi che interagiscono con i pazienti in modalità sicura, e rappresenta un'ottima modalità in sostituzione alla robotica

rigida per molti motivi.

Lo stato dell'arte della robotica morbida con attuazione pneumatica di dispositivi medici vanta molti esempi di progettazione di guanti per la gestione e la rieducazione dei movimenti della mano, di esoscheletri per il supporto alla locomozione degli arti inferiore ed altre tipologie di esempi.

Vengono quindi di seguito riportati alcuni esempi interessanti di progettazioni di ortesi pneumatiche.

## 06.2 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica per la riabilitazione della mano

### 06.2.1 Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training

Panagiotis Polygerinos, Member, IEEE, Kevin C. Galloway, Emily Savage, Maxwell Herman, Kathleen O'Donnell and Conor J. Walsh

Tra gli articoli più interessanti sulla progettazione degli attuatori, viene qui riportato l'esempio di uno studio di progettazione di un guanto robotico morbido e portatile per persone con patologie della presa: questo dispositivo sfrutta la tecnologia del materiale morbido per distribuire in modo sicuro le forze sulla lunghezza

del dito e fornire una flessione attiva ed un'estensione passiva.

Gli attuatori del guanto sono costituiti da vesciche elastomeriche stampate con rinforzi in fibra anisotropa che producono specifiche traiettorie di flessione, torsione ed estensione in seguito alla pressurizzazione dell'aria.

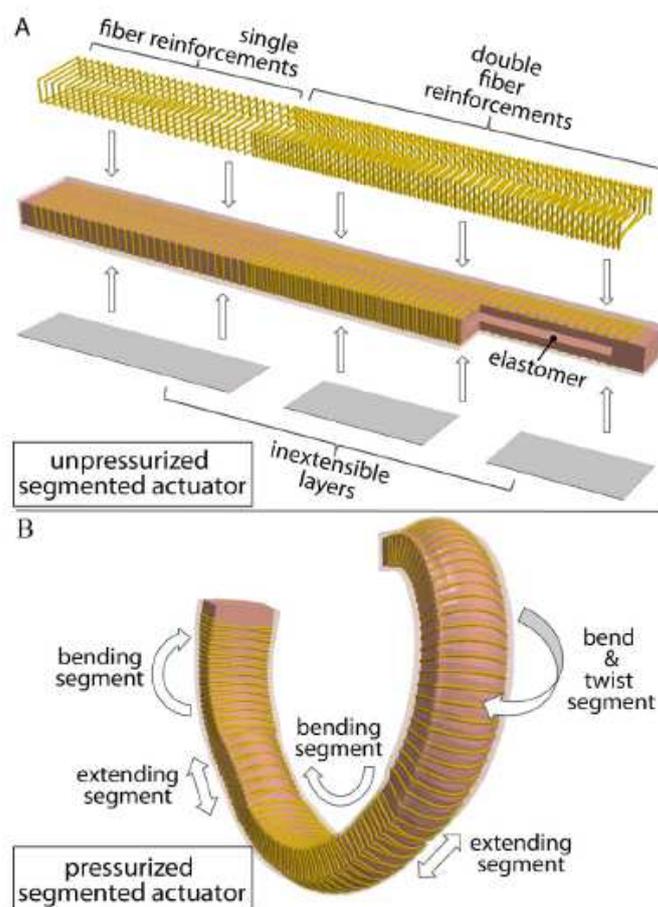


Figure. 3. Illustration of a generic soft segmented fiber-reinforced actuator in: A. exploded view showing fiber reinforcements, elastomer material, and inextensible layers, and B. pressurized view showing a combination of motions.

Fonte: *Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training*

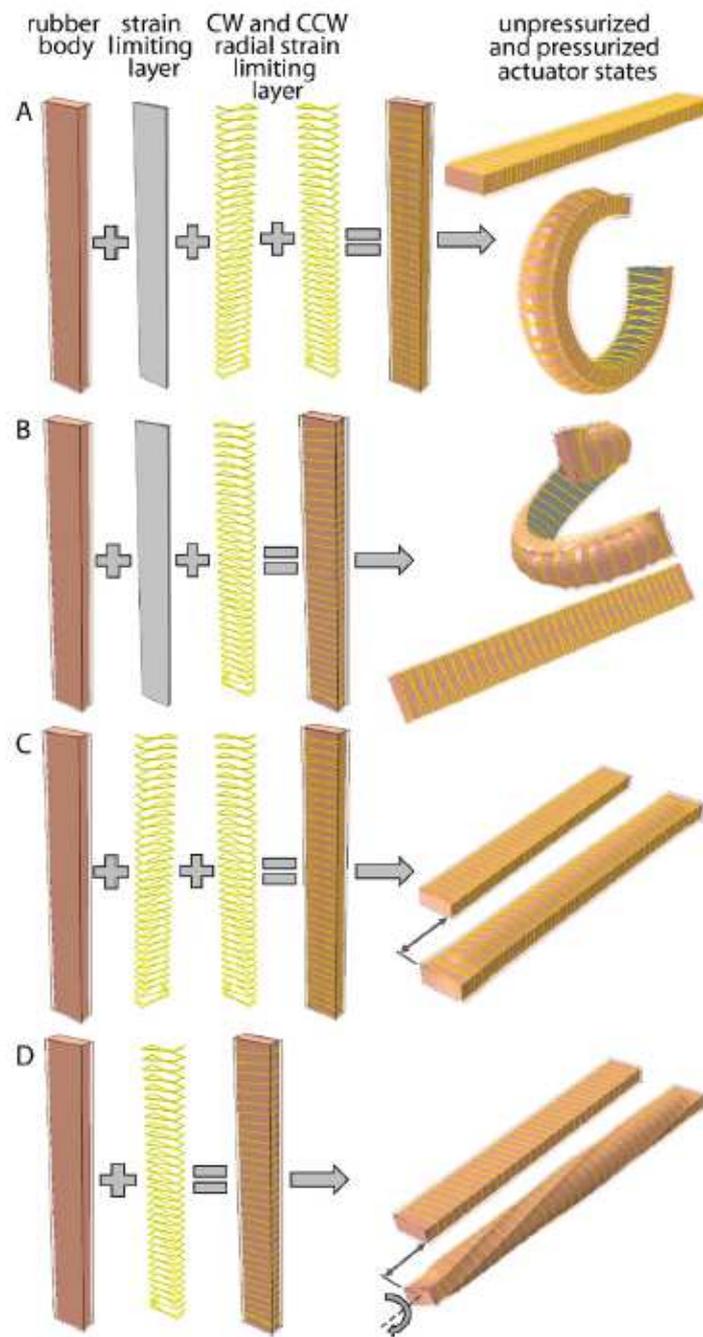


Figure. 2. Combination of fiber-reinforced actuator components and their unpressurized and pressurized behaviors. A. Soft fiber-reinforced bending actuator. B. Soft fiber-reinforced bend-twist actuator. C. Soft fiber-reinforced extending actuator. D. Soft fiber-reinforced extend-twist-actuator.

Fonte: *Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training*

La figura illustra quattro classi di movimenti programmabili utilizzando i rinforzi in fibra. Nell'esempio dell'attuatore di flessione, uno strato di limitazione vincola una faccia della rete pneumatica dall'allungamento e una disposizione simmetrica di fili di fibra elicoidale limita il rigonfiamento radiale. Al momento della pressurizzazione, la parete dell'attuatore con lo strato a deformazione limitata può essere approssimata come inestensibile, mentre tutte le porzioni dell'attuatore non limitate possono crescere nel senso della lunghezza. Questa deformazione asimmetrica lungo la lunghezza dell'attuatore fa sì che esso si pieghi o si incurvi nella direzione dello strato limitante la deformazione.

Questi progetti con fibre di rinforzo consentono anche movimenti più complessi, e pertanto vengono definiti attuatori morbidi multisegmento. I rinforzi di fibra, come è possibile vedere

dall'immagine, vengono utilizzati per creare segmenti che si piegano, si estendono e si piegano-torcono, e per quanto riguarda la riabilitazione della mano, questi attuatori offrono un metodo semplice per supportare in modo sicuro l'intera gamma di movimenti: sono necessari solo due tipi di attuatori morbidi multisegmento per supportare e permettere la chiusura completa della mano.

Il primo tipo di attuatore comprende segmenti di flessione ed estensione per permettere la chiusura delle quattro dita verso la superficie palmare. Il secondo tipo di attuatore supporta l'ampiezza di movimento di opposizione del pollice; quindi, l'attuatore si piega al di sopra dell'articolazione interfalangea e metacarpo-falangea, si estende tra i segmenti e si piega/torce lungo un altro segmento (intorno all'articolazione carpometacarpale).

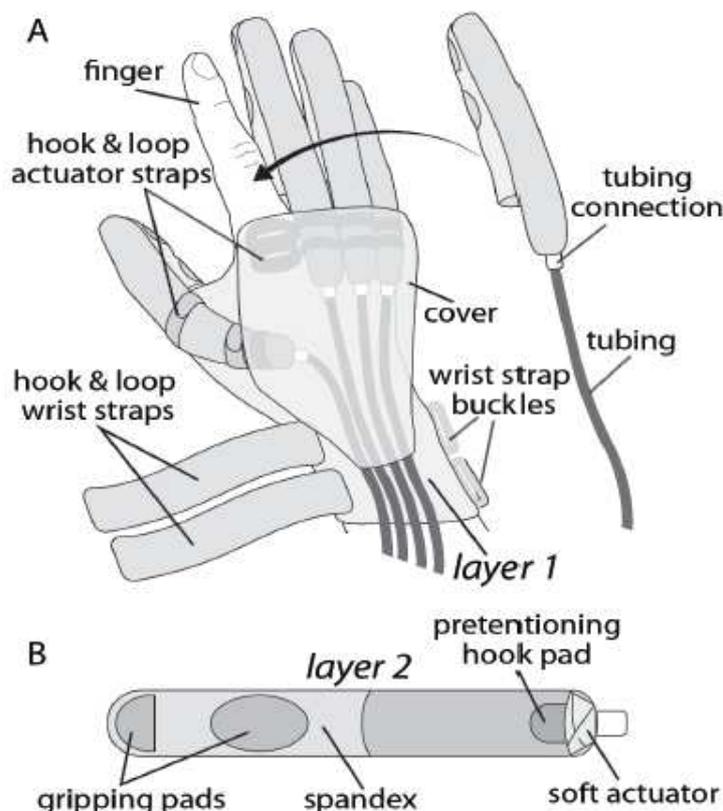


Figure. 5. Schematic of the soft robotic glove outlining the two textile layers that couple the soft actuators to the user's hand.

Fonte: *Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training*



Figure 9. Range of motion of the soft robotic glove. A. Pretention of the fabric sleeves surrounding the fiber-reinforced actuators offers full hand extension. B-F. Executing the Kapandji test [21] with the soft robotic glove for thumb range of motion. G. Finger flexion with index finger straight. H. Index finger flexion.

Fonte: *Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training*

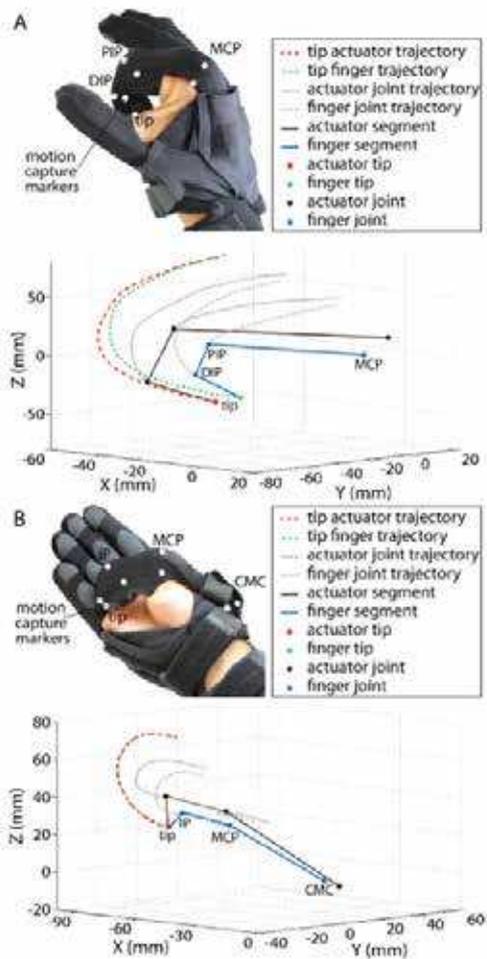


Figure 7. Motion capture and comparison of joint location and trajectories between the soft segmented actuators and the A. biological index finger, B. biological thumb finger. The results demonstrate that the actuators' segments conform around the fingers and recreate their natural trajectories.

Fonte: *Soft Robotic Glove for Hand Rehabilitation and Task Specific Training*

## *06.2.2 A Pneumatic Glove and Immersive Virtual Reality Environment for Hand Rehabilitative Training after Stroke*

*Lauri Connelly, Yicheng Jia, Maria L. Toro, Mary Ellen Stoykov, Robert V. Kenyon, Member IEEE, and Derek G. Kamper, Member, IEEE*

Tra gli esempi di dispositivi per la riabilitazione della mano, di particolare interesse è anche l'esempio dell'articolo "A Pneumatic Glove and Immersive Virtual Reality Environment for Hand Rehabilitative Training after Stroke" in cui viene presentata la progettazione di un guanto con attuazione pneumatica, chiamato PneuGlove, dedicato alla riabilitazione della mano per pazienti che hanno subito un trauma (come ad esempio un incidente, una frattura ecc...)

Questo guanto è stato progettato per fornire un'assistenza indipendente per l'estensione di ogni dito, pur consentendo il movimento completo del braccio, e può essere utilizzato per allenare i movimenti di presa e rilascio con oggetti reali o con oggetti virtuali in realtà virtuale. Due gruppi di sopravvissuti all'ictus, con 7 soggetti per gruppo, hanno completato per lo studio un protocollo riabilitativo di 6 settimane, consistente in tre sessioni settimanali di un'ora. Uno dei due gruppi ha indossato per la riabilitazione il guanto PneuGlove, mentre l'altro gruppo ha completato gli allenamenti senza il dispositivo.

I risultati dello studio hanno dimostrato che il gruppo che utilizzava il guanto PneuGlove ha mostrato un miglioramento medio maggiore per ciascuna delle misurazioni delle prestazioni della mano.

Il guanto è stato utilizzato anche insieme ad un sistema wireless, lo Shadow Monitor, che misura la cinematica articolare utilizzando dei sensori di curvatura (Flexpoint Sensors, Dra-

per, UT) ed in sinergia alla realtà virtuale immersiva.

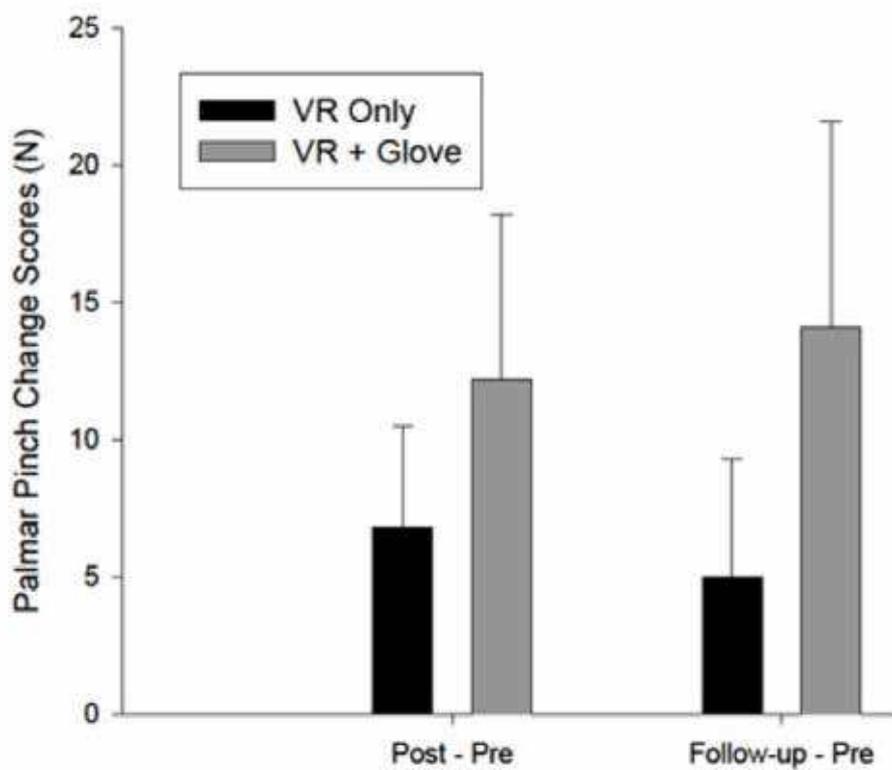
Il dispositivo è costituito da una camera d'aria fabbricata su misura del paziente sul lato palmare del guanto e da un supporto in lycra sul lato dorsale. Una cerniera cucita nella lycra facilita la calzatura e la rimozione del guanto e sul lato dorsale sono cucite delle tasche in poliestere in corrispondenza delle articolazioni per il posizionamento dei sensori di flessione.

La camera d'aria personalizzata è realizzata in poliuretano ed ha una serie di 5 canali indipendenti, uno per ogni dito: la pressione dell'aria all'interno di un canale crea una forza di estensione che spinge il dito ed ogni canale è isolato dagli altri e quindi attuato indipendentemente. Ogni canale è collegato, tramite valvole d'aria e tubi flessibili, a una servovalvola elettropneumatica che fornisce una pressione d'aria linearmente proporzionale a una tensione di comando, ed un programma software scritto in Visual Basic controlla il guanto attraverso un computer.

Come accennato, il guanto è stato poi utilizzato assieme a un sistema configurato per la realtà virtuale in cui i pazienti potessero svolgere esercizi riabilitativi che stimolavano in modo giocoso e ludico la movimentazione della mano grazie all'utilizzo di visori. Grazie al collegamento con i sensori, i pazienti erano in grado di vedere le proprie movimentazioni in realtà immersiva, la quale ha garantito inoltre un miglioramento generale netto, come è possibile vedere dai grafici seguenti.



Fonte: A Pneumatic Glove and Immersive Virtual Reality Environment for Hand Rehabilitative Training after Stroke



Fonte: A Pneumatic Glove and Immersive Virtual Reality Environment for Hand Rehabilitative Training after Stroke

### *06.2.3 A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Hand Impaired Patients*

*Hong Kai Yap, Student Member, IEEE, Phone May Khin, Tze Hui Koh, Yi Sun, Xinquan Liang, Jeong Hoon Lim, and Chen-Hua Yeow, Member, IEEE*

Un ulteriore esempio per lo sviluppo di dispositivi di supporto alla riabilitazione della mano è fornito dall'articolo "A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Hand Impaired Patients", il quale presenta la progettazione di un guanto prodotto completamente in tessuto, pensato per assistere i pazienti reduci da ictus nello svolgimento delle attività della vita quotidiana.

Lo studio, partendo da un'analisi del problema e delle statistiche di riferimento sugli ictus e sul loro danneggiamento nei confronti dei pazienti, si inserisce nel discorso sull'avanzamento rispetto allo sviluppo di robot rigidi a causa delle loro limitazioni, come il peso, le dimensioni, l'ingombro, i vincoli sui gradi di libertà, la difficoltà di utilizzo per la terapia domiciliare, ed individua la necessità di esoscheletri leggeri ed indossabili che vadano bene sia per la terapia in clinica che per quella a casa. È evidente come gli esoscheletri di questo tipo si traducano naturalmente nell'accezione di robot morbidi e di ortesi ad attuazione pneumatica, ed in questo studio, oltre al dispositivo di riabilitazione in sé, viene anche presentata una Graphic User Interface sviluppata in sinergia con lo stesso, che possa permettere la selezione degli esercizi di riabilitazione e la modalità di controllo.

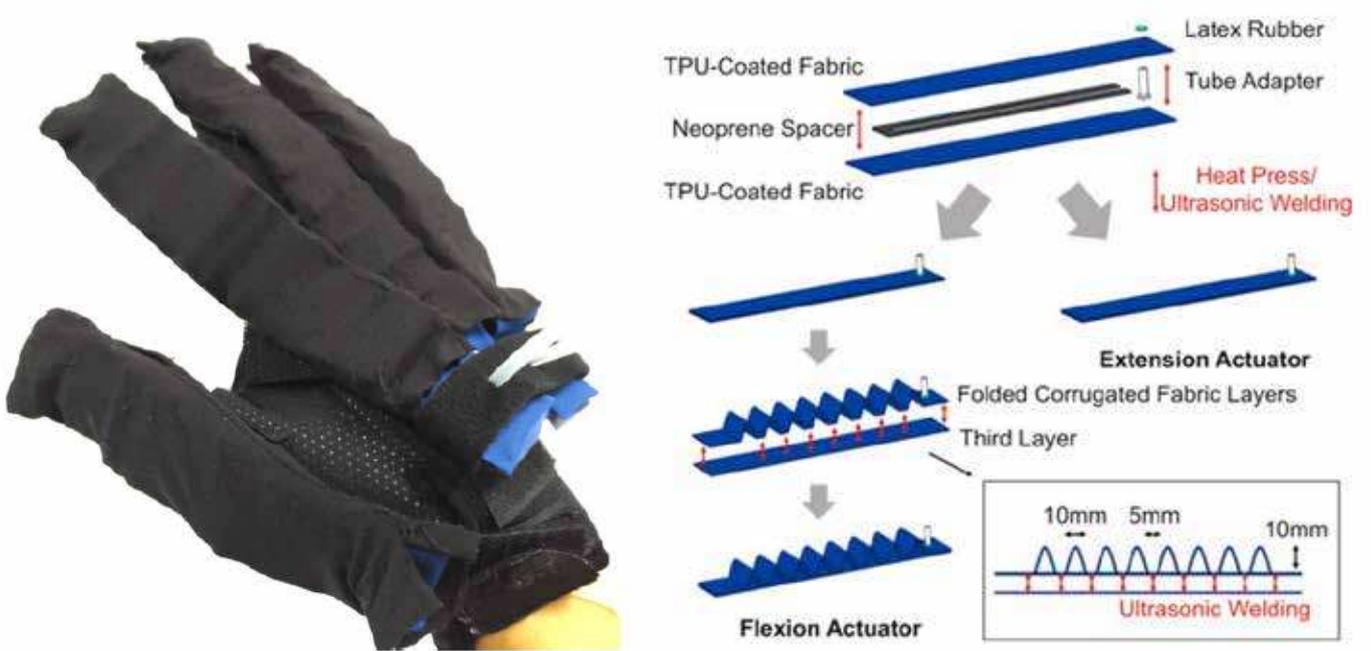
Il guanto in questo caso fornisce sia la flessione sia l'estensione attiva delle dita per l'assistenza

alla mano grazie agli attuatori incorporati basati su tessuto, fabbricati mediante termopressa e saldatura a ultrasuoni di materiali termoplastici flessibili. Rispetto agli attuatori basati su elastomeri sviluppati in altri casi, questi sono in grado di raggiungere un raggio di curvatura più piccolo e di generare una forza e una coppia sufficienti per assistere la mano.

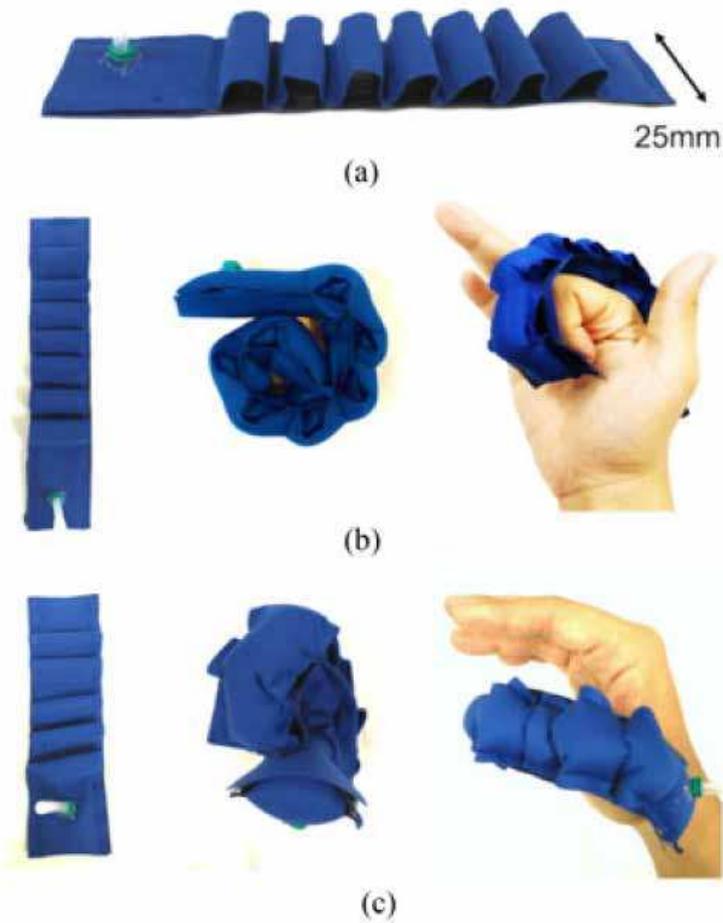
Durante questo studio, le sperimentazioni sono state condotte su cinque partecipanti con menomazione ad una delle due mani, e sono state analizzate le misurazioni dei parametri della presa e della movimentazione della mano.

La progettazione mira a sviluppare gli attuatori in tessuto poiché ritiene la produzione in elastomeri troppo complessa e la loro modellazione di grande difficoltà.

Il guanto è composto, come detto, da dei canali in cui viene immessa l'aria pressurizzata che ne attua il movimento, e questi sono disposti a coppie: due per ogni dito. In questo modo ogni dito può essere movimentato e riabilitato indipendentemente dagli altri e la coppia di ciascun dito è composta da un attuatore sul dorso, responsabile della flessione, ed un attuatore sul palmo, responsabile dell'estensione. Il sistema di controllo da tavolo, inoltre, permette la gestione di ciascuna coppia attuativa singolarmente e mira a studiare la riabilitazione anche in ambiente domiciliare.



Fonte: *A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Hand Impaired Patients*



Fonte: *A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Hand Impaired Patients*

### *06.2.4 Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation* *Imago Rehab, The Wyss Institute, Harvard University*

Tra gli esempi di prodotti dedicati alla riabilitazione robot-assistita della mano, di enorme importanza e prestigio è il guanto sviluppato dalla startup Imago Rehab del The Wyss Institute all'Harvard University commercializzato nel 2021 per la riabilitazione a seguito di problemi di tipo neurologico.

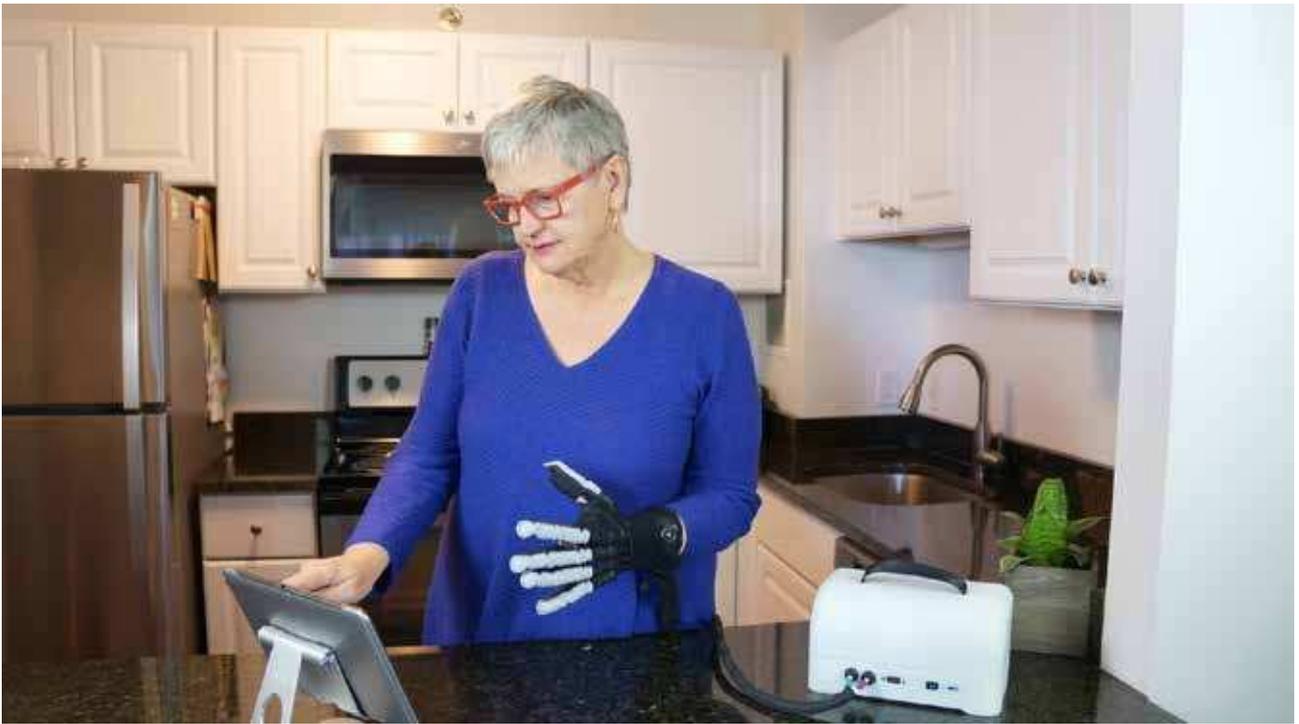
La soluzione proposta da questo caso studio è un guanto robotico morbido che permette la terapia in ambiente domiciliare per rieducare le funzioni della mano nei pazienti che hanno subito danneggiamenti e che necessitano di svolgere gli appositi esercizi. Il guanto è dotato di camere d'aria gonfiabili che gentilmente flettono e piegano le dita, permettendo lo stretching e la ripetitività degli esercizi mirati a ridare le funzioni perse.

La bassa pressione ed i materiali morbidi rendono il dispositivo sicuro e desiderabile per un utilizzo ripetuto, ed il carattere di forma minimalista nella robotica morbida consente agli utenti di svolgere le proprie attività quotidiane senza il disagio o la frustrazione mentre indossano il guanto nel suo stato non alimentato, per poi passare agevolmente all'assistenza elettrica per iniziare la routine terapeutica attiva.

Il sistema di controllo del guanto è portatile e leggero e può essere posizionato su un tavolo o fissato a una sedia a rotelle. Il feedback raccolto dai sensori nel guanto può inoltre essere inviato al terapeuta che può modificare il programma di riabilitazione e valutare i progressi in tempo reale senza che il paziente debba necessariamente visitare lo studio.



*Fonte: Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation*



*Fonte: Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation*



*Fonte: Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation*

## 06.3 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica per la riabilitazione delle gambe

### 06.3.1 *MotorSkins—a bio-inspired design approach towards an interactive soft-robotic exosuit*

*Facundo Gutierrez and Khashayar Razghandi*

Le sperimentazioni sui dispositivi di riabilitazione per la mano non sono gli unici di rilevanza individuati durante la ricerca, ma anche per la riabilitazione della zona inferiore del corpo sono stati presentati nel corso degli anni articoli ed analisi scientifiche.

Di particolare importanza risulta essere il caso studio del dispositivo Motorskin, ovvero la progettazione di un esoscheletro di supporto alla riabilitazione e alla movimentazione del ginocchio dedicato ai pazienti con mobilità ridotta degli arti inferiori.

L'approccio utilizzato per lo sviluppo dell'esoscheletro è bio-ispirato e gli autori, citando Janine Benyus, la teorica che ha sviluppato e definito il concetto di biomimesi negli ambiti di progettazione di tutte le tipologie, traggono i principi dei suoi insegnamenti e teorizzano a loro volta un approccio per il design e per i designers per porsi con i giusti strumenti nella progettazione di dispositivi di tale complessità. Partendo dalla comparazione tra esoscheletri rigidi e morbidi, e individuando come negli studi precedenti una generale vantaggiosità dell'ultima tipologia rispetto alla prima, gli autori fanno riferimento all'idro-attuazione passiva nelle piante ed utilizzano un'attuazione idraulica a ciclo chiuso nel loro sistema.

Il dispositivo MotorSkins utilizza il principio dell'attuazione passiva raccogliendo energia dalla camminata dell'utente ed utilizzandola nelle fasi successive l'andatura per sostenere ed aiutare la flessione del ginocchio. Il ciclo energetico presentato raccoglie, immagazzina e rilascia l'energia in un circuito chiuso e viene chiamato sistema EBEC (ciclo energetico basa-

to sugli eventi). In questa concezione, il sistema completo è composto da:

- L'utente
- L'ambiente
- Il sistema assistivo

Le fasi di questo circuito possono essere descritte come segue:

- Raccolta: in prima istanza, il sistema raccoglie l'energia potenziale dal peso corporeo durante l'appoggio del piede. L'utente investe energia per bilanciare il proprio corpo in avanti durante la fase di oscillazione e quando il tallone colpisce il pavimento, la forza generata dal peso dell'utente sul substrato può essere potenzialmente raccolta.

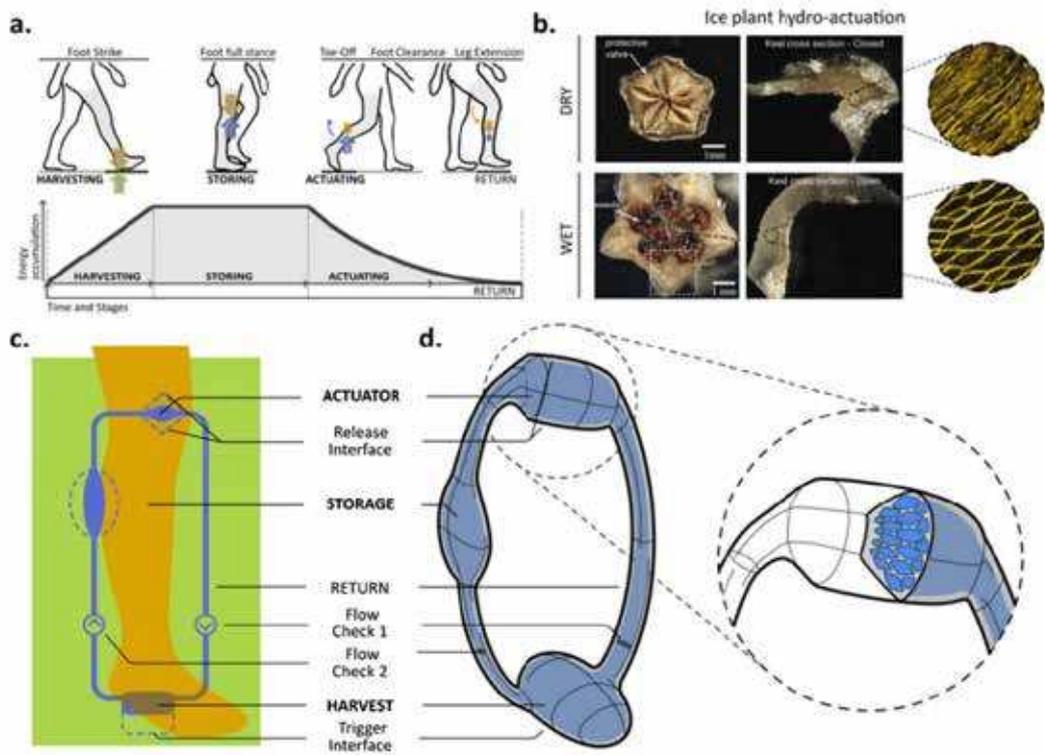
- Immagazzinamento: fase che avviene tra il carico e lo scarico del piede.

- Azionamento: avviene quando l'utente ha intenzione di compiere il passo successivo. Il dispositivo rilascia e traduce l'energia immagazzinata per flettere il ginocchio.

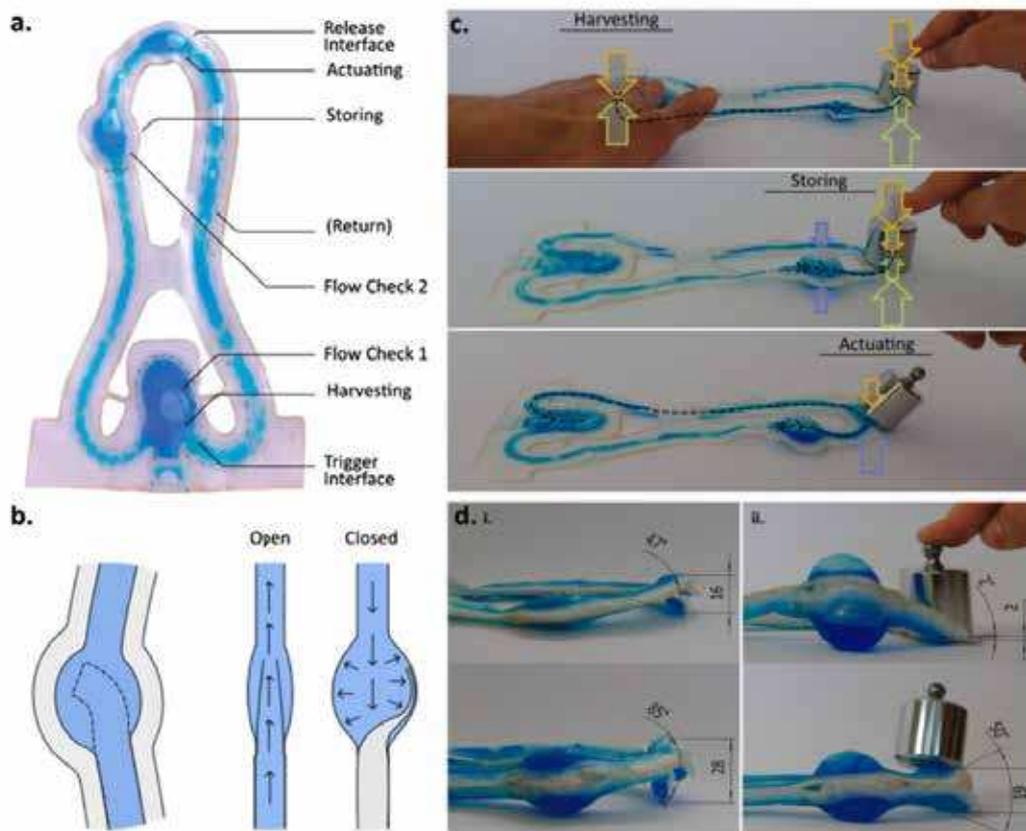
- Ritorno: mentre l'energia viene consumata durante l'azionamento, il peso della gamba sullo stadio di oscillazione è maggiore della forza di azionamento rimanere nel dispositivo e la gamba può estendersi liberamente, riavviando l'intero ciclo.

- Controllo: auto sincronizzazione delle istanze analizzate con le fasi di andatura.

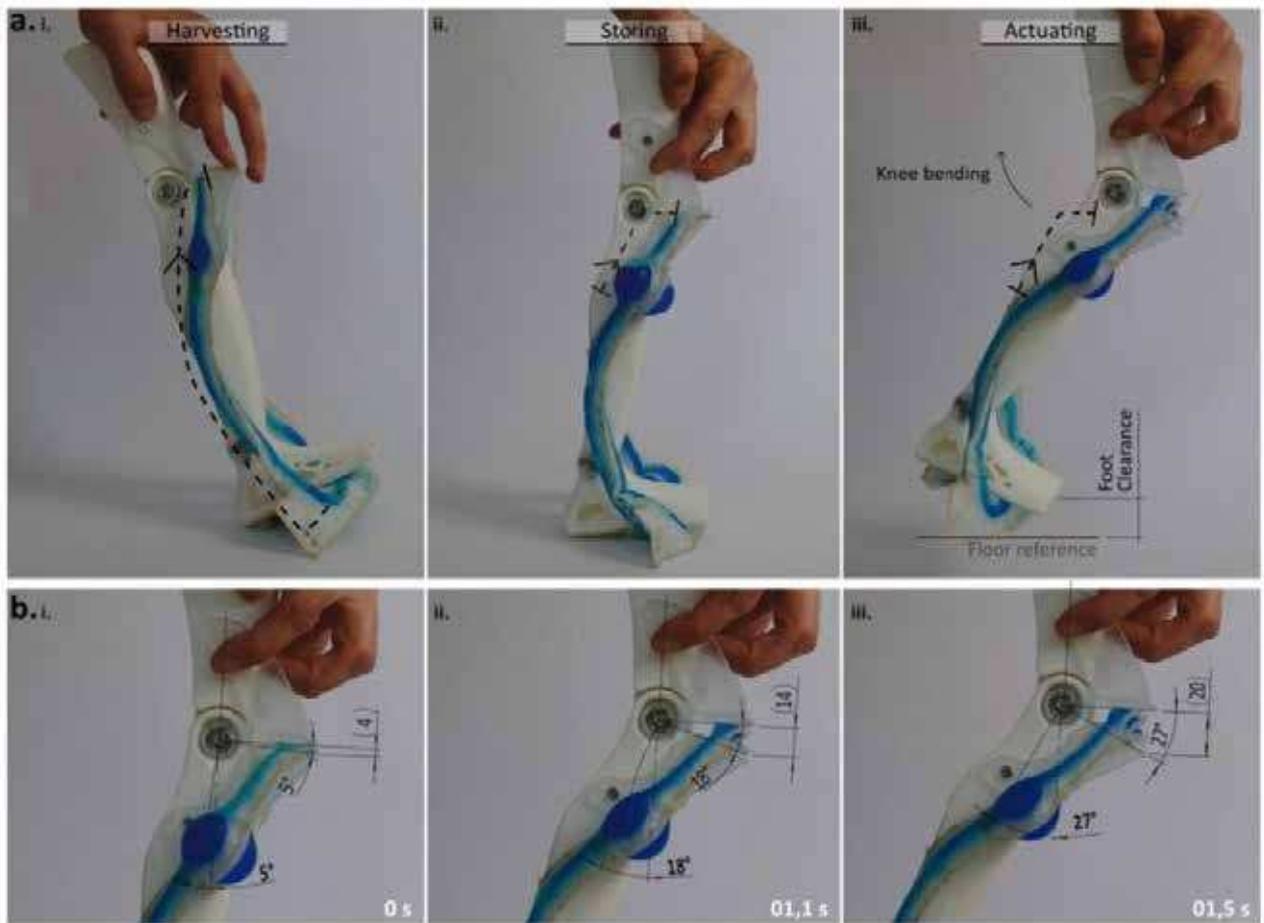
Questo è uno degli esempi più significativi sia per quanto riguarda la riuscita del dispositivo in termini di risultati, sia per quanto riguarda la comprensione del ruolo che il design ha nello sviluppo di tali dispositivi.



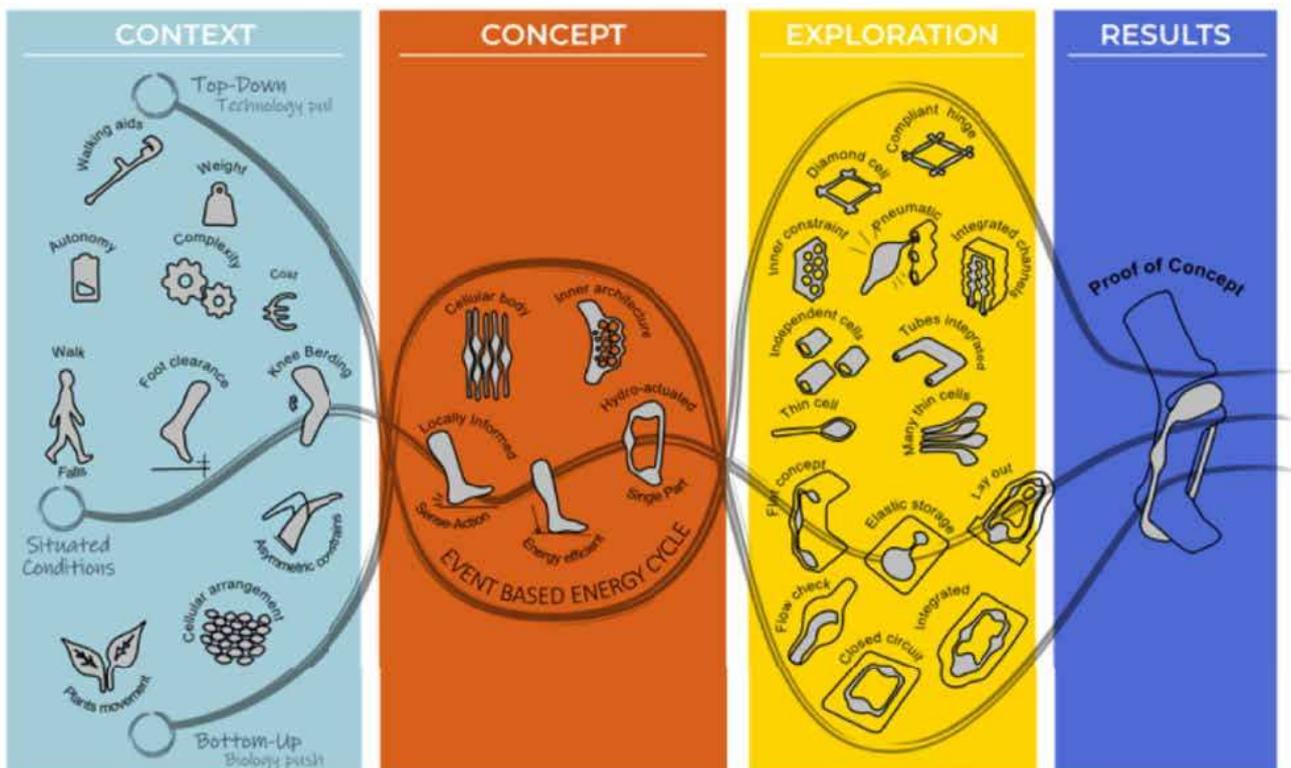
Fonte: MotorSkins, progettazione



Fonte: MotorSkins, prototipazione



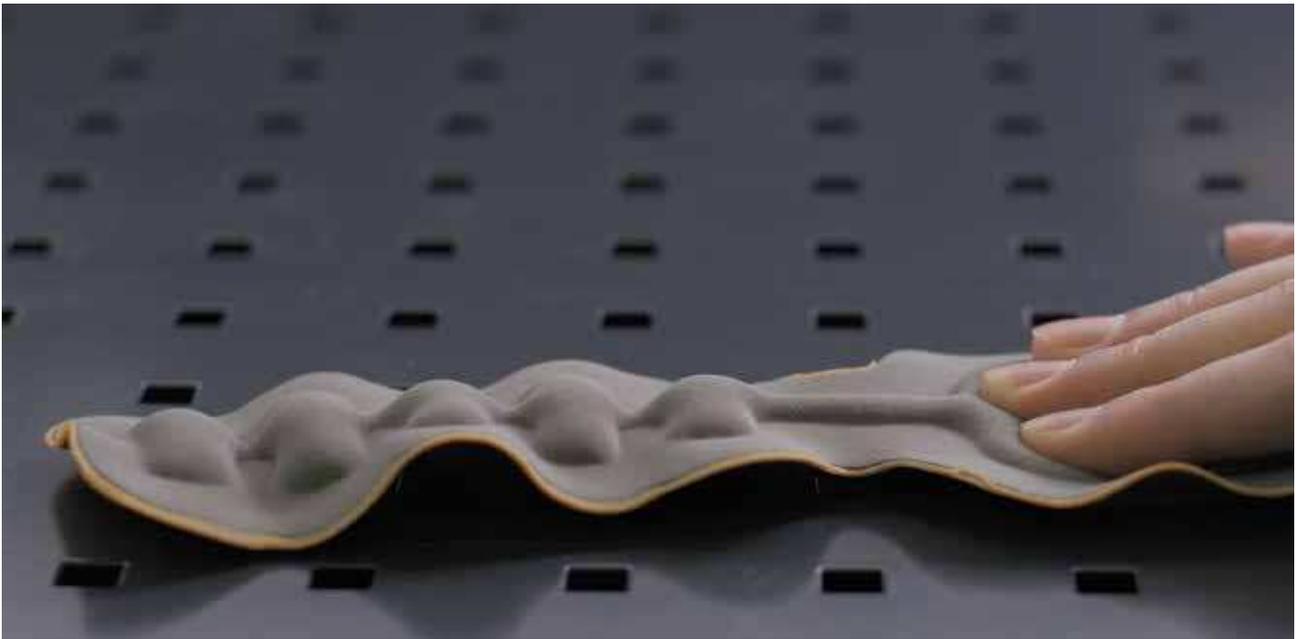
Fonte: MotorSkins, prototipazione



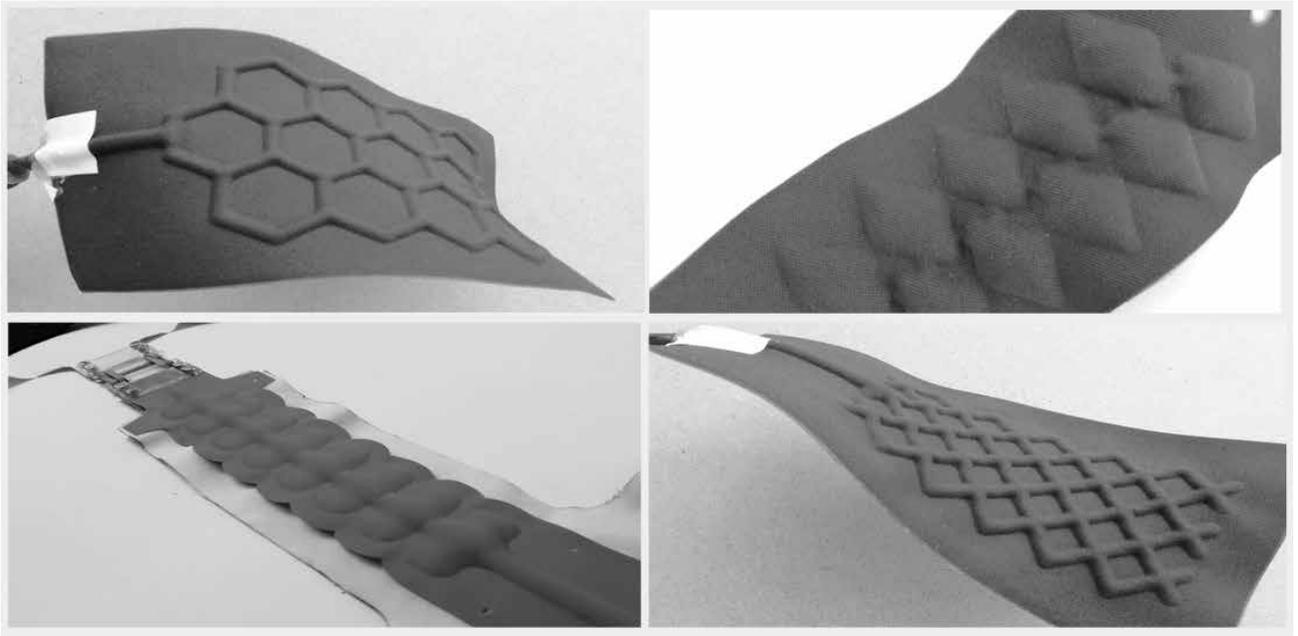
Fonte: MotorSkins, fasi di progettazione



*Fonte: MotorSkins*



*Fonte: MotorSkins, funzionamento*



*Fonte: MotorSkins, geometrie*

## 06.4 Progettazione di ortesi con attuazione pneumatica per la riabilitazione del polso

### 06.4.1 *Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

*Ria Jain, Kunal Kapur, Jiaqi Wang, Yin yu, Diarmid Flatley, and Lina Lim*

Tra gli esempi di sperimentazioni e studi per dispositivi di ausilio alla rieducazione del polso, viene qui citato un articolo del 2021 dal titolo “Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation” che mira ad analizzare la geometria degli attuatori pneumatici, anche in questa ricerca analizzati in precedenza, e ad utilizzarla per riabilitare il polso dei pazienti.

Nel tentativo di migliorare i dispositivi di riabilitazione, lo studio esplora a sua volta le applicazioni delle tecnologie robotiche morbide dedicate alle protesi e alla fisioterapia ed i vantaggi che l'utilizzo dei materiali morbidi può comportare.

Viene proposto un progetto concettuale di un prototipo di dispositivo robotico morbido per la terapia fisica di tendiniti ed artriti del polso, sindrome da tunnel carpale, fratture e distorsioni e compromissione delle capacità motorie dovute a ictus cronico.

Il dispositivo assiste i quattro movimenti comunemente eseguiti nella terapia del polso, flessione, estensione e rotazione dell'articolazione radioulnare (supinazione e pronazione), viste in precedenza, utilizzando attuatori pneumatici morbidi per guidare i movimenti. La fattibilità del progetto è stata valutata utilizzando una suite di strumenti di simulazione ed una prototipazione hardware. Le simulazioni sono state eseguite integrando Rhinoceros 3D, Grasshopper 3D, Firefly, un microcontrollore Arduino, biosensori, script Python e programmazione parametrica visiva, mentre la pressione ed i materiali sono stati simulati e testati in Simulia Abaqus e Autodesk Fusion 360. Diverse variazioni parametriche sono state provate e le previ-

sioni hanno confermato che la gomma siliconica a una pressione di 10 kPa è la scelta ottimale per il dispositivo.

Analizzando e studiando l'evoluzione dei robot rigidi, e facendo lo stesso per i robot morbidi, confrontando le due tipologie, lo studio riporta alcuni esempi di particolare importanza esplicativi del ruolo della robotica morbida per lo sviluppo di dispositivi di ausilio alla riabilitazione, come il guanto proposto dal Biodesign Lab della Harvard University, l'X-Limb e l'OCTARM VI della Clemson University, ed a seguito dell'overview sullo stato dell'arte, propone lo sviluppo di un dispositivo di riabilitazione per il polso attuato pneumaticamente.

Il dispositivo sviluppato può essere utile in diversi casi: vittime croniche di ictus, che spesso presentano un indebolimento della destrezza e delle capacità motorie delle mani e del polso, esercizi di terapia fisica per il miglioramento della sindrome da tunnel carpale, esercizi di miglioramento della terapia fisica sia prima che dopo interventi chirurgici, tendiniti e artriti del polso, distorsioni e fratture del polso. In tutti questi casi la terapia da seguire è la stessa ed è utile completare gradualmente gli esercizi di fisioterapia per recuperare la forza e la mobilità. Il dispositivo implementa quattro movimentazioni principali: flessione, estensione e rotazione (supinazione e pronazione) attraverso la pressurizzazione controllata dell'attuatore; l'attuazione pneumatica è stata scelta in quanto offriva all'utente il massimo comfort rispetto ad altre tipologie di attuazione.

Il dispositivo è dotato di un tutore sicuro che avvolge il polso e contiene un totale di quattro attuatori sul polso, includendo poi anche un

microcontrollore, un sensore di flessione per misurare l'angolo del polso, un sensore aptico, tubi pneumatici per il gonfiaggio ed altri componenti.

Affinché un dispositivo abbia successo, è necessario valutare le seguenti qualità:

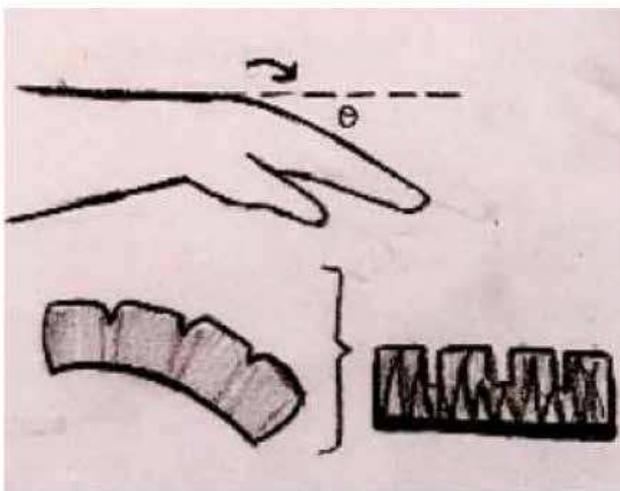
- Tecniche e proprietà di attuazione
- Prestazioni di attuazione
- Praticità del dispositivo

In questo lavoro, come accennato, queste aree sono valutate attraverso l'esplorazione del progetto utilizzando modelli di progettazione assistita da computer (CAD) e simulazioni del

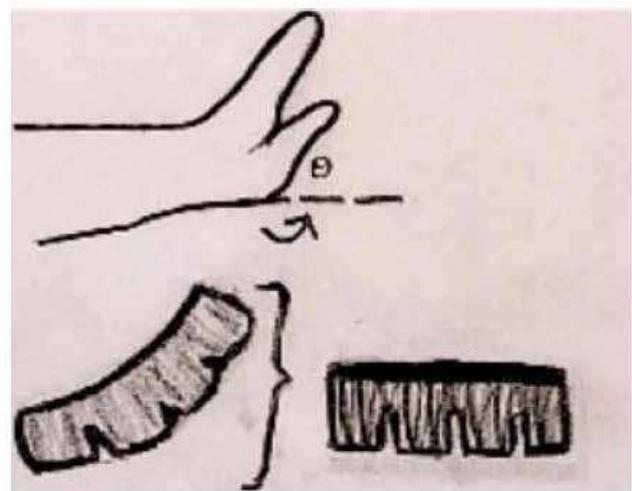
processo di attuazione utilizzando una serie di software di simulazione commerciali.

Per ottenere i quattro movimenti descritti sopra, il movimento dell'attuatore nella direzione d'interesse è stato in questo studio limitato in due modi: il primo è il controllo dell'espansione laterale, quindi quando l'attuatore viene gonfiato, è vincolato in modo tale da non espandersi in lunghezza.

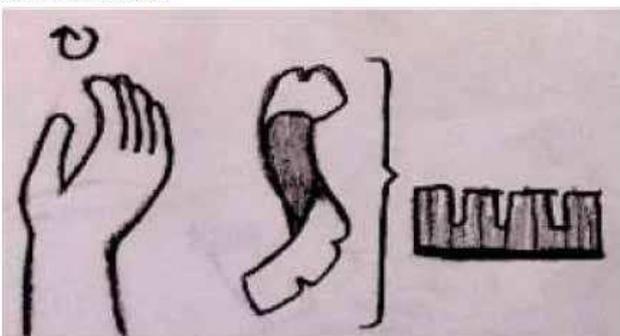
Questo è stato ottenuto utilizzando uno strato limitante di un materiale con modulo di Young più elevato, ovvero con l'impiego di un materiale più rigido.



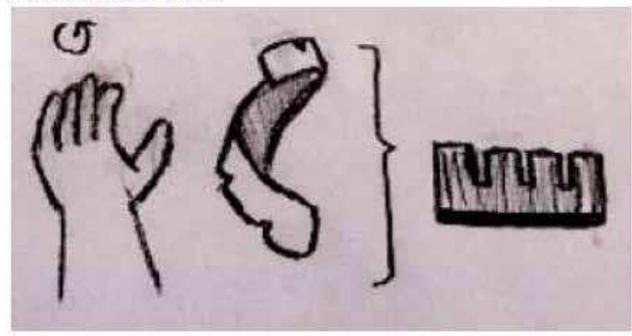
**FIG. 7. Flexion.** In order to get the wrist to flex, it is important to add a strain limiting layer to constrain lateral expansion and radial limits in both directions, so that the actuator bends.



**FIG. 8. Extension.** Similar to Figure 7, three constraining layers are used. Essentially, it is the same actuator, but by placing it on the bottom of the hand, the opposite motion is achieved.



**FIG. 9. Supination and pronation (right hand).** In addition to bending, the actuator must now twist, which means one less radial constraint is added (see Figure 8).



**FIG. 10. Supination and pronation (left hand).** Similar to Figure 9, we use the same layers. By placing the actuator below, the wrist rotates the opposite way.

Il secondo modo è il controllo dell'espansione radiale, che richiede due vincoli radiali simili,

uno in senso orario e l'altro in senso antiorario.

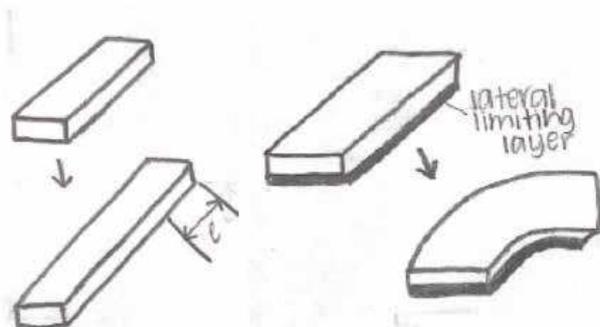


FIG. 5. When no lateral limiting layer is present, the actuator expands laterally. When the layer is added, the actuator bends instead, as desired, because it is no longer constrained to expand in length.

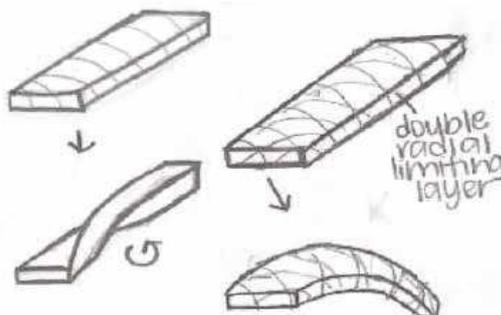


FIG. 6. When the radial limiting layer is added in one direction the actuator will twist when inflated. When it is constrained in both directions, the actuator bends.

Fonte: *Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

Gli attuatori proposti necessitano di un sistema di controllo a feedback per gestire, elaborare e regolare le azioni del dispositivo. Tramite i sen-

sori, è stato possibile in questo studio regolare il sistema grazie ad un microcontrollore, come nello schema riportato.

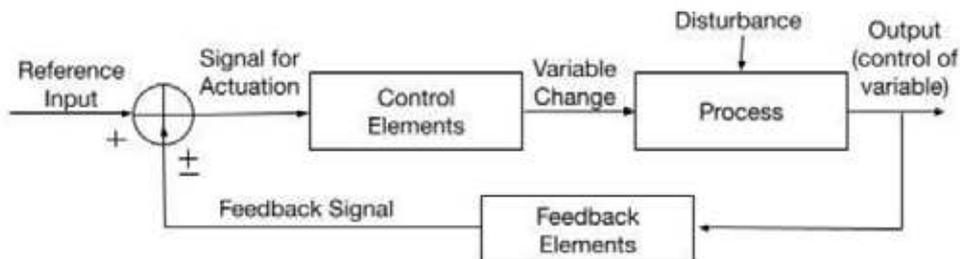


FIG. 11. A generic control system block diagram. Block diagram for the feedback control system for the proposed device prototype.

Fonte: *Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

Il modello del dispositivo è stato sviluppato prevedendo quattro caratteristiche fondamentali:

- 1- La possibilità di muovere il dispositivo nelle quattro direzioni sopra citate, grazie all'utilizzo di quattro attuatori distinti
- 2- Il controllo del dispositivo tramite l'utilizzo

di un sensore di flessione ed estensione per rilevare la posizione della mano

- 3- Il controllo della difficoltà dell'esercizio mediante la regolazione dell'aria: maggiore è la pressione fornita nell'attuatore, maggiore è l'assistenza fornita all'utente
- 4- La possibilità di riportare il polso in posizio-

ne normale dopo ogni ripetizione completata: leggendo il sensore di flessione, gli attuatori si sgonfiano automaticamente, ed i valori di soglia possono essere manipolati anche per livelli

secondari

Il dispositivo è stato realizzato utilizzando i seguenti materiali e componenti:

Component	Material or Product	Quantity
Silicone Elastomer (actuators)	ELASTOSIL® M 4601 A/B	160g
Microcontroller	Arduino Mega 2560 Rev 3	1
Toggle Switches	Nilight 90012E Heavy Duty Rocker Toggle	4
Potentiometers	Rotary Potentiometer - 10k Ohm, Linear	4
Air Pump	Gikfun Mini Air Diaphragm Pump EK1856	1
Valves	SMC VQ110U-5M valve	4
Pressure Sensors	Autex Pressure Sensor 100 Psi	4
Flex Sensor	3" Bidirectional Flexible Bend Sensor	1
Haptics Sensor	GHH Digital Touch Sensor	2
24V DC input jack	Chanzon DC Power Connector	1
24V to 12V converter	Clena DC/DC Voltage Converter Regulator 24V to 12V	1
24V to 5V converter	DKPLNT 50W DC-DC 12V 24V to 5V 10A Converter	1
10 K Ohm resistors	EDGELEC 10K ohm Resistor	4
Velcro (to hold actuators)	Strenco 2 Inch Adhesive Black Hook and Loop Tape - 5 Yards	1
Wrist Brace	Comfy Brace Night Wrist Sleep Support Brace	1

*Fonte: Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

Il sistema di controllo del dispositivo inizia con la lettura del sensore elaborata dal processore Arduino Mega che elabora l'input e controlla di conseguenza le elettrovalvole e le pompe dell'aria. Ad esempio, quando l'angolo di flessione del polso aumenta, le elettrovalvole si aprono e l'aria compressa viene pompata attraverso i tubi e le pompe d'aria: di conseguenza, l'attuttore si gonfia. Quando l'angolo di flessione non

supera una certa soglia, il controller ordina alla pompa dell'aria di aspirare l'aria dall'attuttore per sgonfiarlo. Il controllo avviene attraverso un circuito di feedback dove gli attuatori sono costantemente controllati in base alla lettura del sensore di flessione: il sistema è sviluppato su una scheda di controllo open-source sviluppata dal Soft Robotic Toolkit.

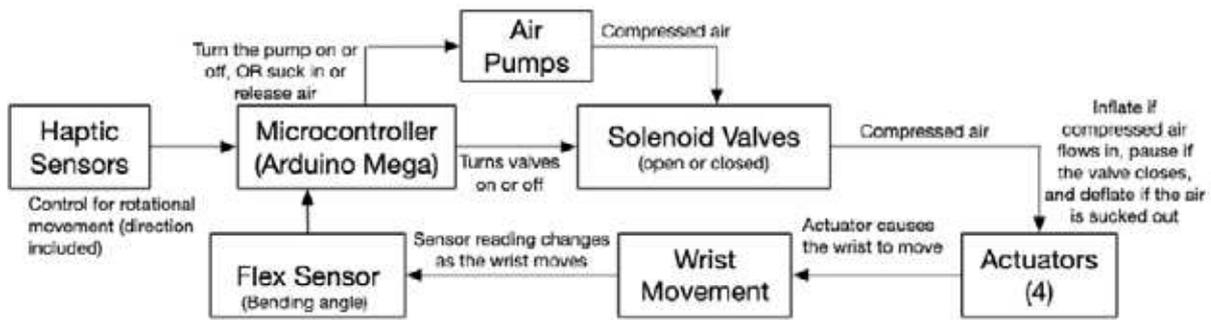


FIG. 14. Device control system block diagram. The control system block diagram, specific to our prototype.

Fonte: *Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

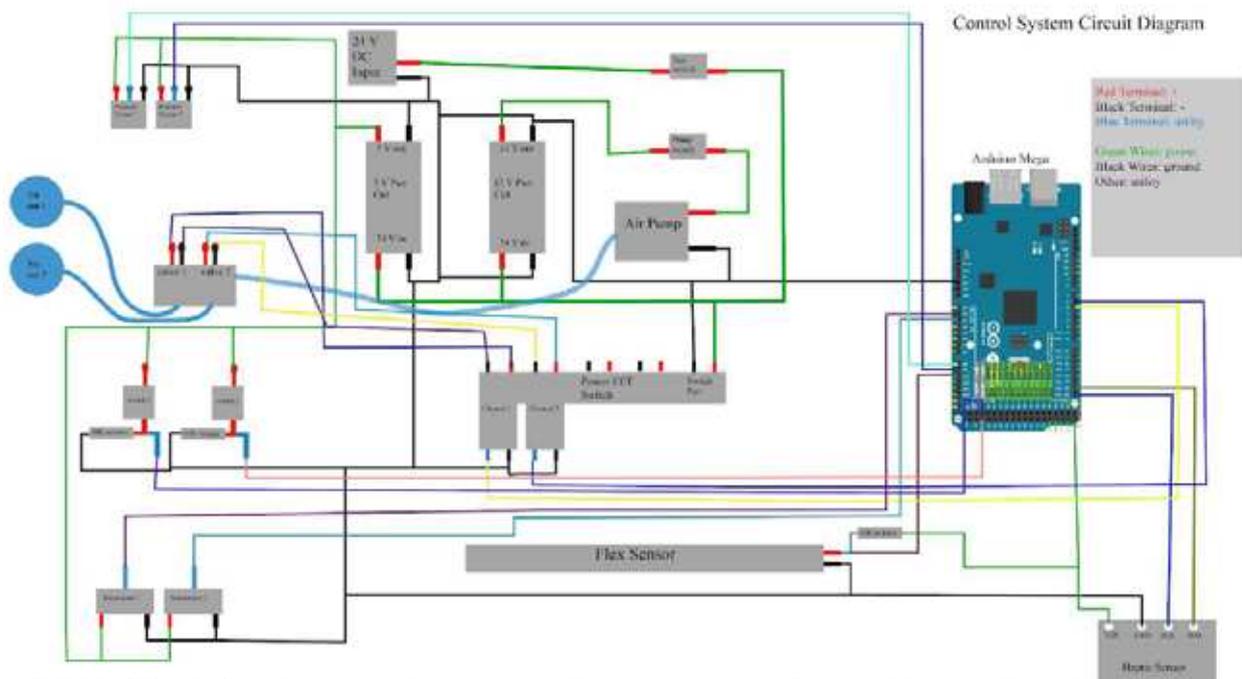


FIG. 15. Visual wiring diagram. The electrical wiring configuration of the control system. Two additional air outlets, valves, switches and potentiometers are omitted to ensure readability.

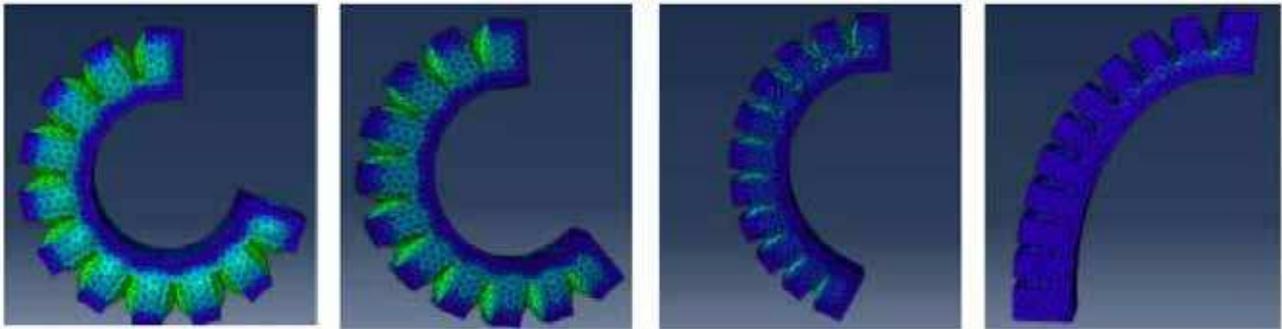
Fonte: *Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

Gli attuatori utilizzati in questo dispositivo sono una versione modificata dall'attuatore pneumatico fornito originariamente dal Soft Robotic Toolkit: le dimensioni sono state modificate per adattarsi meglio al dispositivo.

Grazie all'utilizzo di Simulia Abaqus di Dassault Systèmes è stata poi determinata tramite la simulazione la pressione necessaria per ogni attuatore, con i risultati di seguito riportati.

**TABLE 2. Simulia Abaqus actuator simulation results.** Simulation results, showing the relationship between actuator pressure and approximate bending angle.

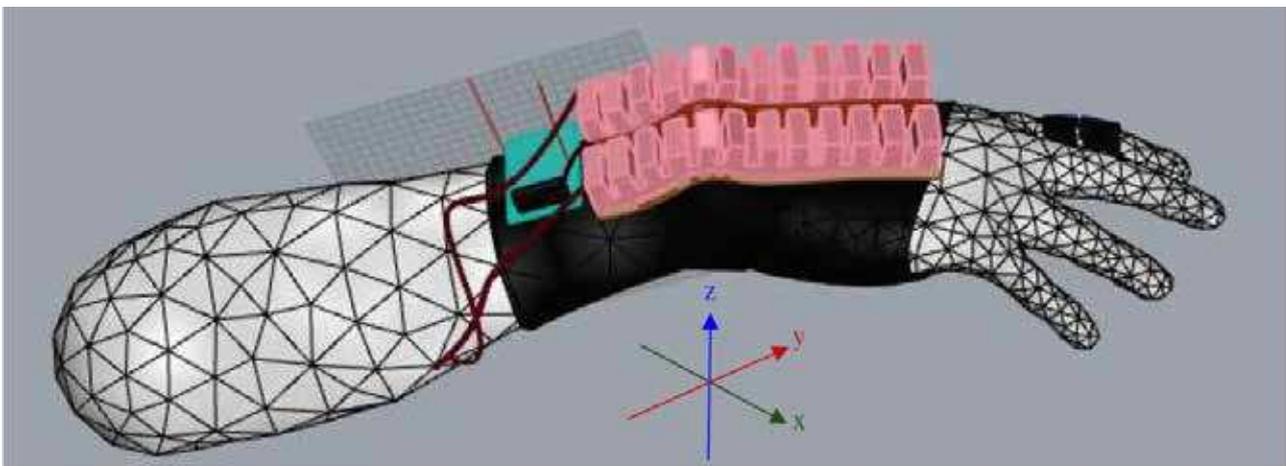
Pressure (kPa)	Actuator Bending
10 kPa	95.5°
25 kPa	156.6°
40 kPa	216.0°
55 kPa	251.8°



*Fonte: Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

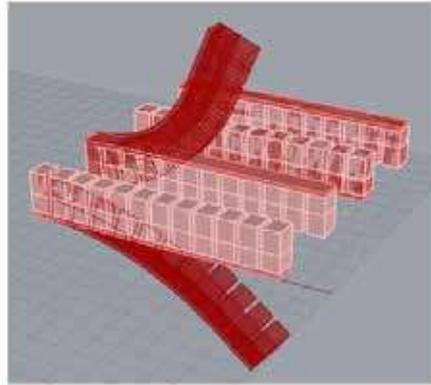
Per modellare il movimento degli attuatori è stato creato un modello con il software di modellazione CAD Rhinoceros 3D; in primo luogo, è stato costruito il modello completo, compren-

dente i componenti, e per simulare la flessione è stato utilizzato Grasshopper, all'interno del quale è stato creato un arco parametrico lungo il quale piegare le geometrie.

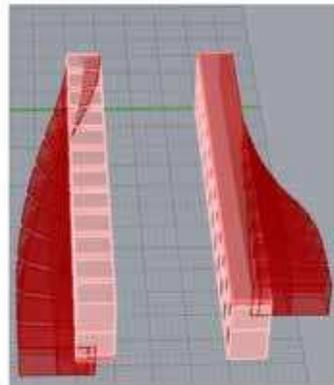


**FIG. 22. Full device CAD model from Rhinoceros 3D.** The model includes all the components from the initial sketch, including the two top actuators.

*Fonte: Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

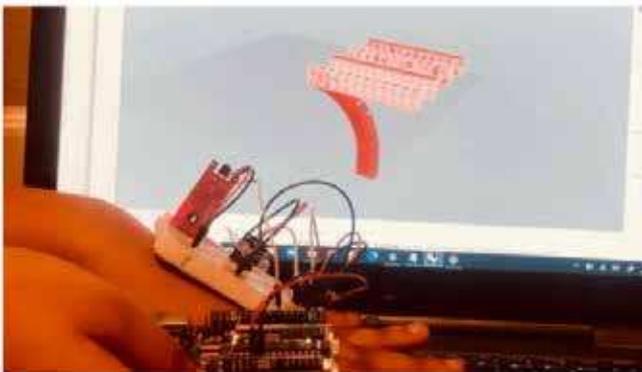


**FIG. 23. Flexion and extension.** Depicts the movement of the actuators when the tilt sensors detect angle change.

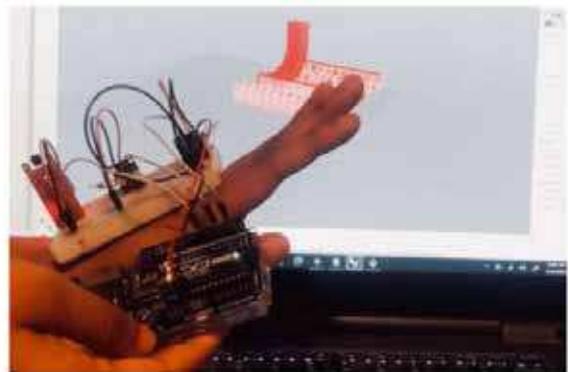


**FIG. 24. Rotation for both hands.** Depicts the movement when the . sensors are touched.

*Fonte: Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

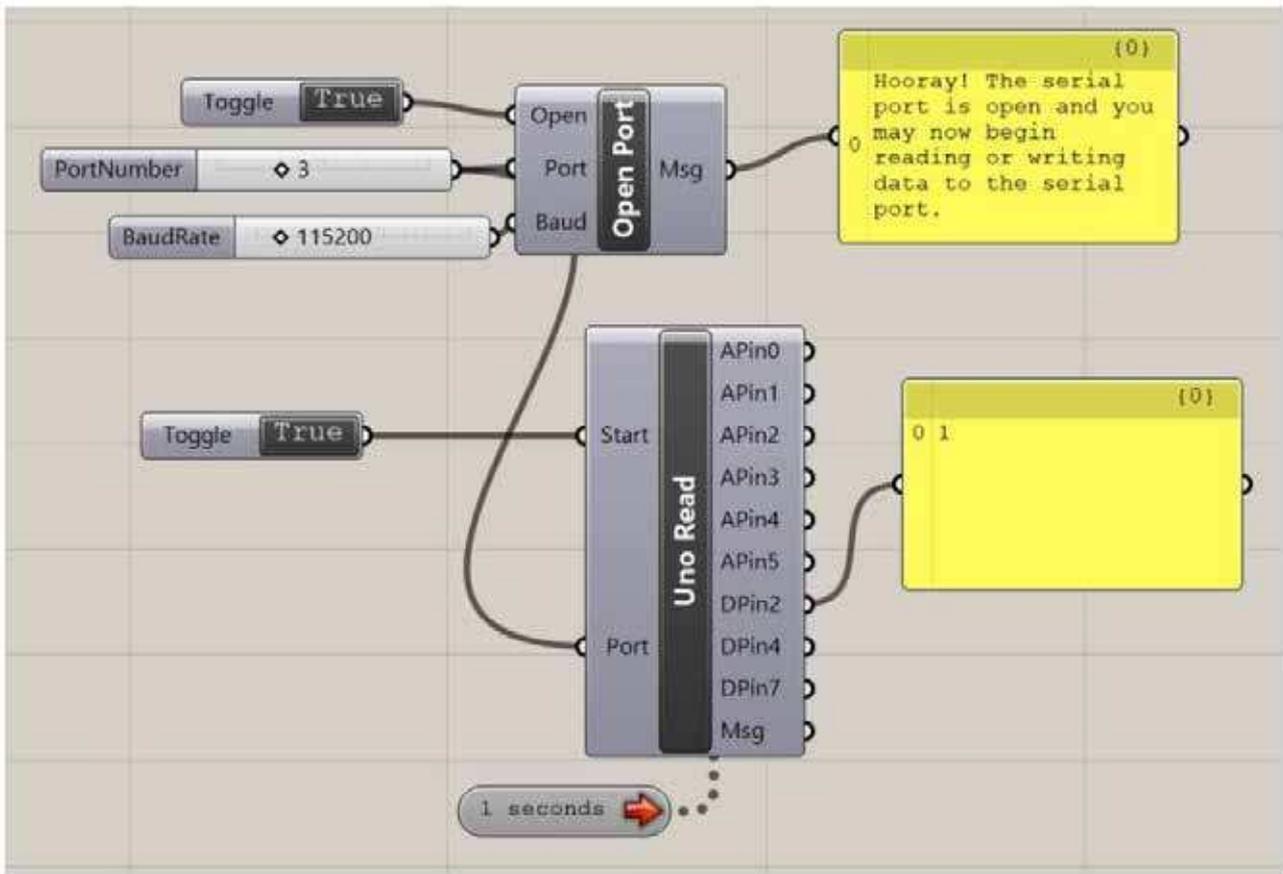


**FIG. 31. Flexion.** Because the sensor is tilted down, the flexion actuator is pressurized and bends down in Rhino.



**FIG. 32. Extension.** Because the sensor is tilted up, the extension actuator is pressurized in Rhino.

*Fonte: Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*



**FIG. 30. Grasshopper script.** Configuration of parametric scripting components to integrate Arduino.

*Fonte: Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

## 06.4.2 A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators

*Sicong Liu, Zhonggui Fang, Jianhui Liu, Kailuan Tang, Jianwen Luo, Juan Yi, Xinyao Hu4 and Zheng Wang*

Viene poi presentato un ulteriore studio interessante pubblicato nel 2021 riguardo dispositivi di soft robotica di riabilitazione specificatamente per il polso, chiamato “A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators” e prodotto da alcune figure di diverse università cinesi.

Lo studio mira ad inserirsi come risorsa nel campo dell’auto-riabilitazione per la rieducazione delle funzioni motorie in ambienti domiciliari ed autonomi grazie ad un’interazione uomo-macchina sicura offrendo nuove possibilità di sviluppo di dispositivi indossabili.

Analizzando anche in questo caso le caratteristiche vantaggiose della soft robotica in termini di flessibilità, costo e comfort, questo lavoro presenta un tutore per il polso robotizzato e sviluppato grazie all’integrazione di otto attuatori morbidi a forma di origami cuciti direttamente su di un tutore da polso disponibile in commercio.

Il movimento lineare degli attuatori è stato definito dal loro schema origami e le estensioni degli attuatori sono state vincolate dai tessuti del tutore, dando origine ai movimenti dell’articolazione del polso analizzati in precedenza nelle altre sezioni di ricerca.

I principali contributi di questo lavoro sono riassunti come segue:

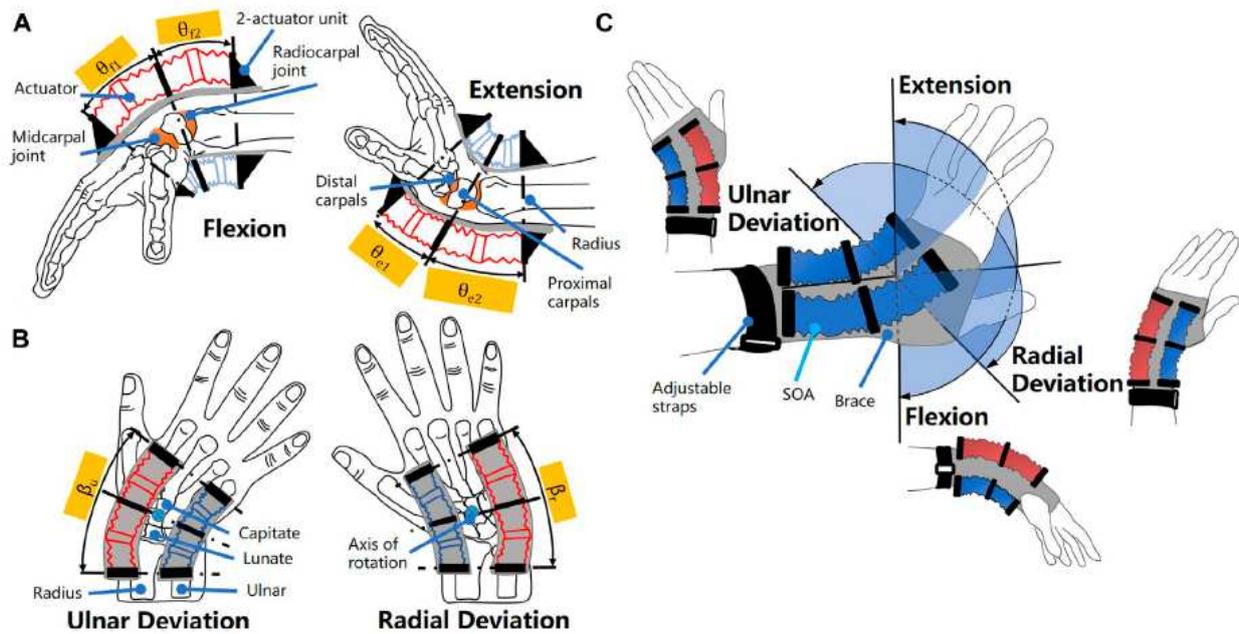
- 1- Proporre un approccio modulare di progettazione degli attuatori morbidi per la composizione di dispositivi robotici indossabili: ogni modulo dell’attuatore potrebbe essere identico, mentre il prodotto finale può essere personalizzato per adattarsi esclusivamente al singolo utente attraverso la composizione dei moduli
- 2- Proporre un approccio sinergico all’attuazione che utilizza la contrazione e l’estensione delle SOA (Soft Origami Actuators)
- 3- Sviluppare un dispositivo di attuazione del

polso robotico morbido che utilizza componenti morbidi e rigidi

Per ottenere un design compatto del dispositivo da polso indossabile, sono stati innanzitutto studiati e schematizzati i movimenti. Successivamente, gli attuatori morbidi sono stati fissati saldamente al tutore attorno al polso in una disposizione parallela ed è stato scelto l’approccio di attuazione sinergica per controllare gli attuatori in coppia, pertanto quelli sul lato dorsale si allungano mentre quelli sul lato palmare si contraggono durante la flessione e viceversa durante l’estensione.

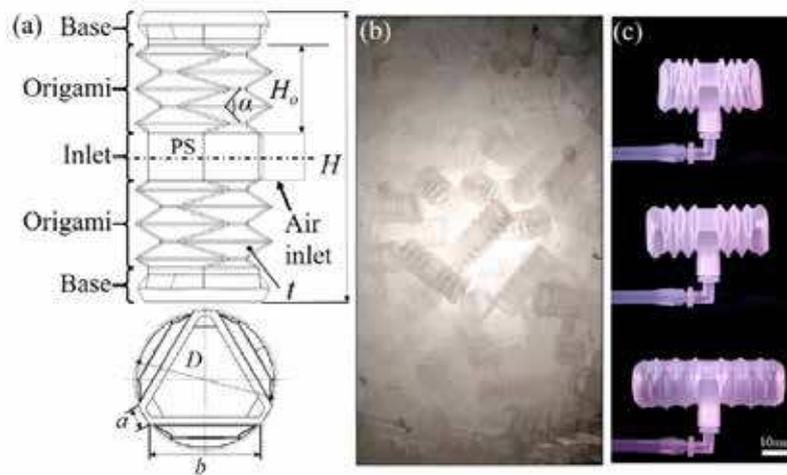
Per ottenere un dispositivo indossabile leggero e morbido, sono stati scelto gli attuatori pneumatici. L’attuatore origami morbido è composto da tre sezioni funzionali, ovvero la base, l’origami e l’ingresso. Le sezioni dell’origami generano l’allungamento assiale ed il movimento di contrazione quando pressurizzati e rispettivamente depressurizzati, e l’aria viene immessa nel centro dell’attuatore.

Il dispositivo è stato testato grazie a delle sperimentazioni ed è stato prototipato grazie all’approccio modulare che ha consentito di avere otto attuatori disposti in quattro unità identiche tra di loro e collegate ad un tutore commerciale. Il movimento della SOA è stato definito con un motivo origami dalle sfaccettature trapezoidali, realizzate in EVA mediante stampaggio a soffiaggio. Per trasmettere la forza degli attuatori al tutore, sono stati utilizzati ancoraggi rigidi per collegare le estremità degli attuatori. I test funzionali hanno dimostrato la potenzialità del tutore morbido da polso e nello studio si ipotizza come lavoro futuro un miglioramento significativo del design per ridurre il volume ed il peso e per permettere ai pazienti di utilizzare il prodotto durante l’esperienza dell’ambiente di vita quotidiano.



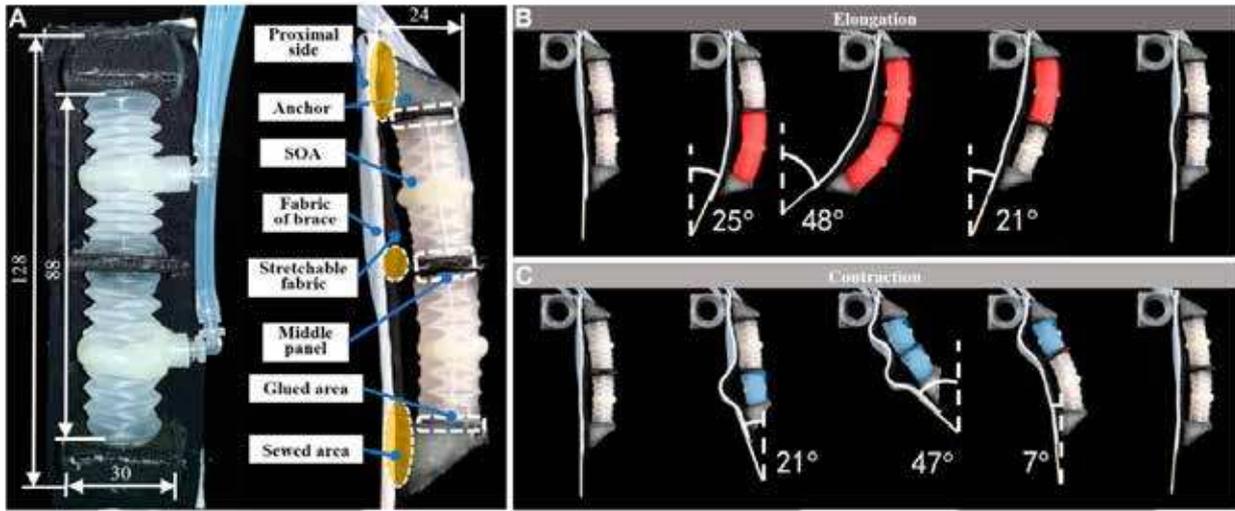
**FIGURE 1** | Concept of the SR wrist brace. The anatomy and arthrokinematics of the wrist in **(A)** flexion/extension and in **(B)** ulnar/radial deviation; **(C)** the definition of the 2-DoF wrist motions.

*Fonte: A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators*



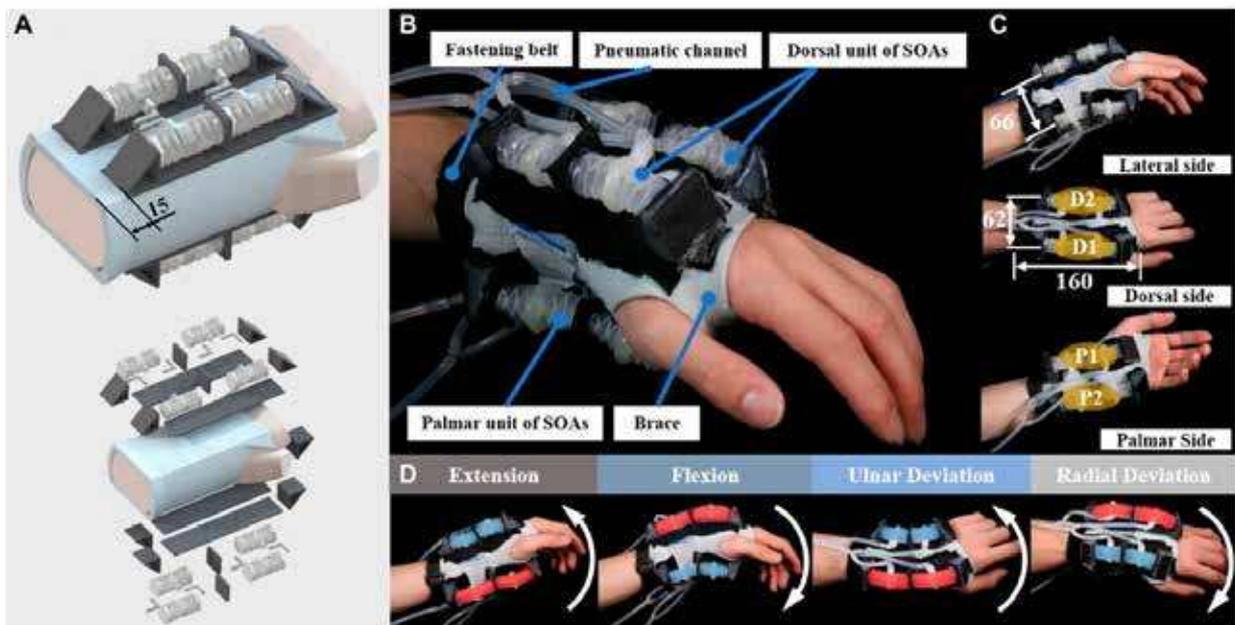
**FIGURE 2** | Design of soft origami actuator. **(A)** The definition of parameters; **(B)** a batch of 500 units were produced by a blow molding run; **(C)** the actuator contracts and elongates when depressurized and pressurized, respectively.

*Fonte: A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators*



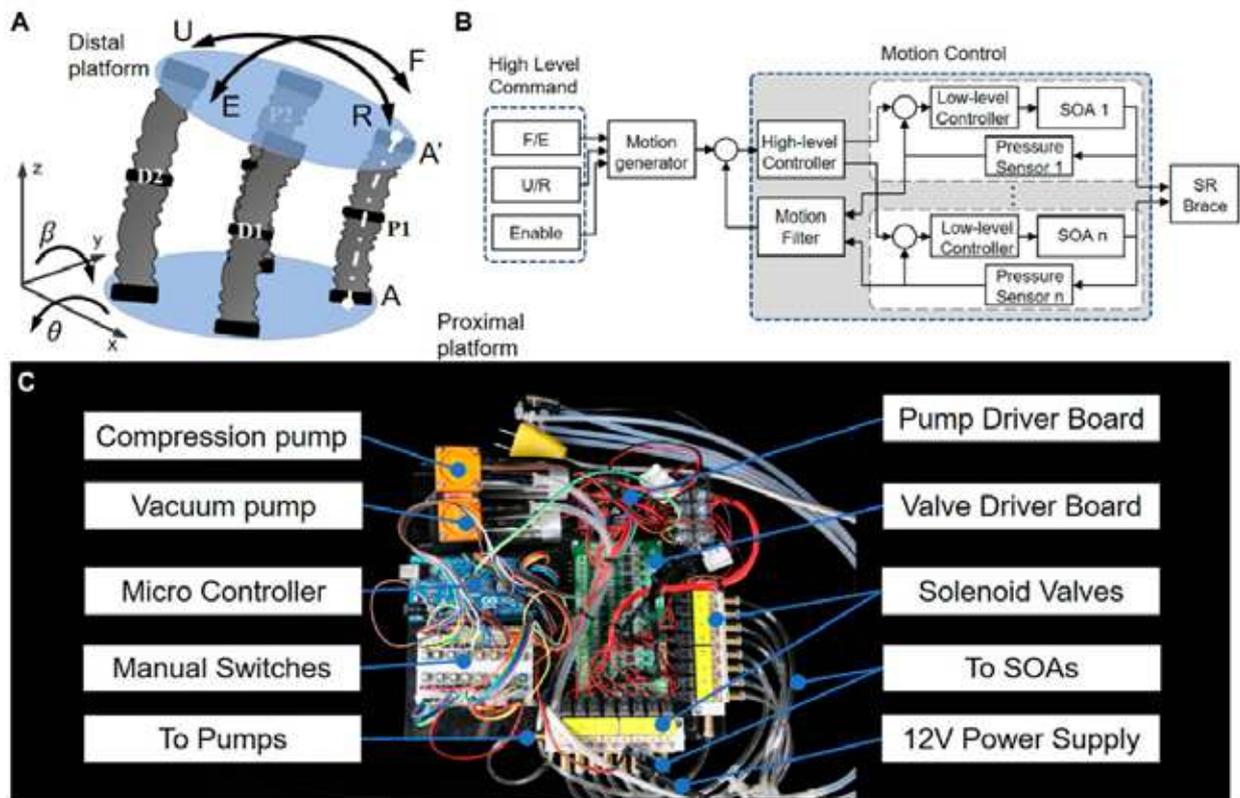
**FIGURE 3** | A 2-SOA unit, (A) the unit was made of soft materials; the axial deformations of SOAs were constrained by brace fabric; (B) when pressurized, the bending angle reached 48°; (C) when depressurized, the bending angle reached 47°.

*Fonte: A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators*



**FIGURE 4** | Design of SR brace and the prototype, (A) the soft robotic brace incorporates eight SOAs into four 2-SOA units at the palmar and distal side of the wrist; (B) the SR brace prototype worn on human wrist; (C) the dimensions of the brace; (D) the brace moved the human wrist in flexion, extension, ulnar, and radial deviation.

*Fonte: A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators*



**FIGURE 5** | The principle of actuation and control. **(A)** the brace can be considered as a parallel mechanism actuated by soft actuators; **(B)** a cascaded control strategy was used; **(C)** the dimensions of the actuation system are 24 cm\*23 cm\*6 cm and the weight is 1.76 kg.

Fonte: *A Compact Soft Robotic Wrist Brace With Origami Actuators*

07

Materiali a  
memoria di forma

## 07.1 Considerazione sui materiali a memoria di forma

Durante la fase concettuale e di ricerca, si è optato per l'utilizzo ipotetico dei materiali a memoria di forma (Shape Memory Alloys), che possono essere metalli o polimeri a memoria di forma, i quali presentano proprietà non newtoniane e che possono comportarsi diversamente "memorizzando" una geometria.

Attualmente si definiscono leghe a memoria di forma (Shape Memory Alloys, SMA) particolari materiali metallici che presentano proprietà esclusive, tra le quali se ne distinguono due: la capacità di ricordare una determinata forma geometrica macroscopica, impressa attraverso speciali trattamenti termomeccanici, fenomeno questo che prende il nome di Shape Memory Effect (SME); e la possibilità di subire deformazioni dell'ordine del 10%, recuperandole completamente durante la fase di scarico, senza evidenziare fenomeni di plasticizzazione, proprietà nota come superplasticità (Superelasticity: SE) o pseudoelasticità. Entrambe queste proprietà sono da attribuirsi ad una transizione di fase martensitica termoelastica, che può essere indotta o da una variazione di temperatura oppure da uno stato di sforzo agente sul materiale. Infatti, a seconda della temperatura e dello sforzo loro impresso, tali materiali possono presentare due diverse fasi cristallografiche, dette fase austenitica e fase martensitica: le trasformazioni dell'una nell'altra, e viceversa, al mutare della sollecitazione termomeccanica, sono responsabili delle proprietà particolari di questi materiali.

I materiali a memoria di forma sono una classe di materiali che hanno la capacità di ritornare alla loro forma originale dopo essere stati deformati quando vengono riscaldati oltre una certa temperatura, chiamata temperatura di transizione martensitica (TTR). Questo comportamento è chiamato effetto memoria di forma.

I materiali a memoria di forma funzionano generalmente nel seguente modo:

1. **Stato martensitico:** A temperature inferiori alla TTR, il materiale è in uno stato martensiti-

co, in cui la sua struttura cristallina è deformata. In questa fase, il materiale può essere facilmente deformato in una nuova forma.

2. **Deformazione:** Quando il materiale a memoria di forma viene deformato a una temperatura inferiore alla TTR, mantiene la forma nella quale è stato modellato.

3. **Riscaldamento:** Quando il materiale viene riscaldato oltre la TTR, ritorna alla sua forma originale, nota come fase austenitica. Questo avviene grazie a una trasformazione cristallina che riporta il materiale alla sua struttura cristallina originale.

4. **Raffreddamento:** Una volta che il materiale si è raffreddato nuovamente sotto la TTR, mantiene la sua forma austenitica fino a quando non viene nuovamente deformato o riscaldato sopra la TTR.

Questo processo di trasformazione di fase è reversibile e può essere ripetuto molte volte senza perdere le proprietà a memoria di forma del materiale.

L'attuazione termica è la più comune nelle applicazioni che prevedono i materiali a memoria di forma; i polimeri a memoria di forma possono cambiare le loro proprietà sia attraverso variazioni di temperatura che tramite l'applicazione di altre forme di stimolo, come il passaggio di corrente elettrica. Questo è possibile grazie alla loro capacità di subire una transizione di fase reversibile tra due stati strutturali, comunemente noti come stati di "forma" e "forma memorizzata".

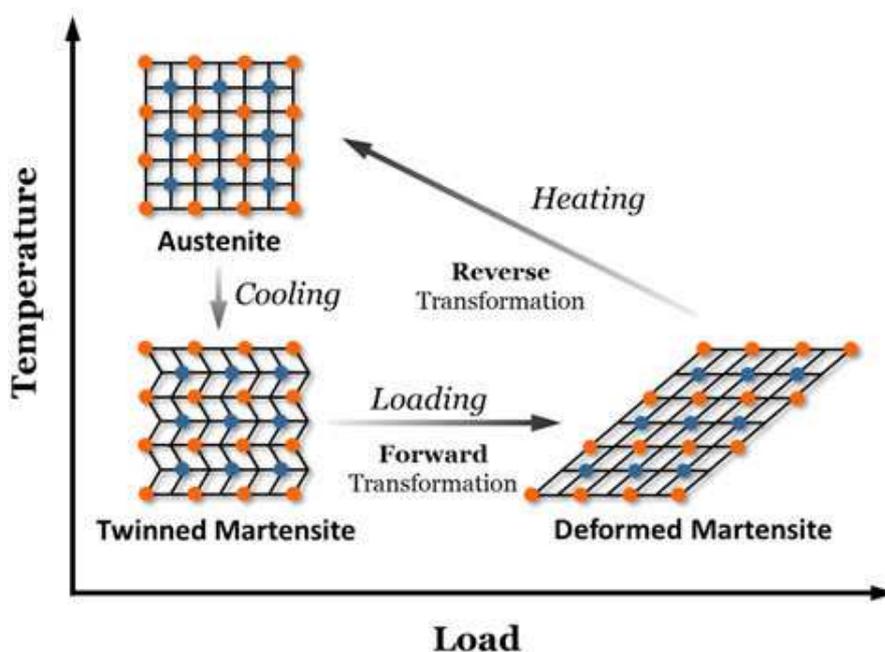
1. **Variazioni di temperatura:** Questo è il metodo più comune per attivare la memoria di forma nei polimeri. Quando il polimero viene riscaldato oltre una temperatura critica nota come temperatura di transizione di fase, la struttura molecolare del polimero cambia, consentendo al materiale di ritornare alla sua forma originale. Questo processo è reversibile, il che significa che il materiale può essere deformato nuovamente e riattivato con un'altra variazione di temperatura.

2. **Stimolazione elettrica:** Alcuni polimeri a memoria di forma sono stati progettati per rispondere all'applicazione di corrente elettrica. Questo può essere ottenuto incorporando materiali conduttivi nel polimero o utilizzando polimeri intrinsecamente conduttivi. Quando viene applicata una corrente elettrica, la resistenza elettrica del materiale può cambiare, causando una variazione di temperatura locale che attiva la memoria di forma.

L'utilizzo della stimolazione elettrica può offrire alcuni vantaggi rispetto alle variazioni di temperatura, come un controllo più preciso e localizzato sul processo di attivazione della memoria di forma. Tuttavia, richiede una progettazione e una manipolazione più complesse del materiale e può non essere appropriato per tutti i tipi di applicazioni.

In fase decisionale questi materiali vengono scartati per più motivazioni: l'attuazione di tipo termico non garantirebbe la sicurezza per l'utente poiché il dispositivo dovrà essere indossato da quest'ultimo, ed utilizzare alte temperature causerebbe senza dubbio danni, l'attuazione di tipo elettrico necessiterebbe di un elevato quantitativo di energia per essere messa in atto, superiore a quella sufficiente all'attuazione di tipo pneumatico, ed infine la produzione di geometrie complesse con tali materiali risulta essere un'ulteriore sfida.

Per queste motivazioni viene scartato l'utilizzo di questa tipologia di attuazione, assumendo l'attuazione pneumatica come molto più vantaggiosa e sicura agli scopi della progettazione.



Fonte: *Principle of shape memory alloy (SMA), Review of Biomimetic Underwater Robots Using Smart Actuators*



08

Concept  
progettuale

## 08.1 Concept formale

A seguito della ricerca, è possibile prendere atto e sottolineare alcuni aspetti, in particolar modo alcune necessità individuate che danno origine

al concept progettuale presentato in questo elaborato.

### *Il vantaggio della soft robotica riabilitativa*

Innanzitutto, gli studi e le fonti consultate mettono in grande risalto l'aumento di sperimentazione nel campo della soft robotica e le potenzialità che questo ambito di ricerca e sviluppo porta con sé, soprattutto per le finalità di sviluppo di dispositivi medicali. Le potenzialità che derivano dall'utilizzo di corpi morbidi anziché di corpi robotici rigidi sono le più interessanti da prendere in considerazione poiché la vantaggioosità dell'utilizzo della robotica in generale è stato un aspetto già sperimentato nel corso degli ultimi anni, ed essendo i risultati piuttosto chiari, la nuova frontiera è proprio quella di sfrut-

tare al massimo i vantaggi, sviluppando però robot riabilitativi più performanti, più leggeri e con una migliore interazione con l'utente.

Come è stato ampiamente discusso e dimostrato dalla ricerca svolta nella fase precedente, la soft robotica, grazie alle sue diverse tipologie di attuazione, permette lo sviluppo di dispositivi leggeri che si possano muovere anche secondo più gradi di libertà rispetto a quelli consentiti dalla robotica rigida, e questo risulta molto utile ai fini della riabilitazione, studiata secondo le sue caratteristiche principali.

### *Individuazione della zona da riabilitare*

La zona del corpo da riabilitare è individuata nel polso: situato nell'arto superiore, questo è il collegamento tra l'avambraccio e la mano dell'utente ed il suo corretto funzionamento è necessario per tutte le attività della vita quotidiana.

La consultazione dei dati sulla frequenza di danni al polso è sufficiente per descrivere l'utilità dello sviluppo di un dispositivo quanto più user-friendly che possa supportare la riabilitazione e la rieducazione delle movimentazioni studiate in fase di ricerca.

### *Requisiti per una buona riabilitazione del polso*

È importante in questa fase riassumere un'ulteriore volta i requisiti per una buona riabilitazione poiché questi sono i punti cardine e di origine della fase di progettazione.

Innanzitutto, oltre alle tipologie dei movimenti studiate, quindi flessione ed estensione, adduzione ed abduzione e supinazione e pronazione, è importante ricordare che le tipologie di ausilio alla movimentazione sono le stesse per una grandissima vastità di origini di deficit: questo dato consente la progettazione di un unico di-

spositivo per più finalità. Sia nel caso di frattura, che in quello di ictus, che in quello di deficit neuromuscolare, le movimentazioni da compiere sono le stesse, ciò che può cambiare è la frequenza con cui farle, la velocità con cui compierle e le tempistiche di ripresa, tutti parametri di tipo medico, scelti dal dottore o dal fisioterapista di riferimento, figura che deve essere in grado di calibrare l'utilizzo del dispositivo in maniera customizzata secondo le specifiche di ciascun paziente.

Un altro parametro di grande importanza, sempre deciso dal medico di riferimento, è la frequenza con cui le movimentazioni di riabilitazione devono essere svolte. In tutti i casi, in maniera poco variabile, la chiave per una riabilitazione efficiente e di successo è l'elevata ripetibilità dei movimenti: questo punto chiave è difficile da soddisfare con una riabilitazione di tipo "analogico" poiché richiede un grande investimento di tempo e di energia da parte dell'utente, il quale spesso si stanca dopo le prime poche sedute di fisioterapia. È proprio da questo punto che deriva l'estrema vantaggiosità

### ● *Immobilizzazione*

Il dispositivo deve essere in grado di immobilizzare durante la prima fase il polso dell'utente, mantenendolo fermo durante lo svolgimento di

### ● *Ausilio*

Il dispositivo deve essere in grado di far compiere le movimentazioni all'utente in due maniere di supporto:

- 1- supporto totale in background – durante lo svolgimento delle attività quotidiane semplici, il dispositivo deve compiere in maniera automatica le movimentazioni del polso per il paziente;
- 2- supporto parziale attivo – il dispositivo deve

### ● *Resistenza*

il dispositivo deve essere poi in grado, nell'ultima fase, di fornire una resistenza ai movimenti che l'utente deve compiere per rafforzare i suoi legamenti e prevenire quindi possibili fratture o problematiche future. In questo caso, il di-

della robotica di supporto attivo alla riabilitazione, soprattutto quella domiciliare: supportando l'utente nel compimento delle movimentazioni, soprattutto nella prima fase di ausilio, oltre che in quella di resistenza, è possibile utilizzare un robot in "background" che, mentre il paziente svolge attività quotidiane, come ad esempio guardare la televisione, leggere un giornale, ascoltare la musica ecc, possa supportarlo nel compimento delle sessioni di terapia.

Quindi, vengono analizzate le varie fasi di terapia.

tutte le attività quotidiane, proprio come viene fatto dal classico gesso nel caso delle fratture, o dai tutori in maniera più passiva.

anche essere in grado di fornire in una seconda fase un supporto parziale che aiuti il paziente a compiere le movimentazioni, anche grazie all'utilizzo di un app di riferimento che consenta il controllo del movimento e lo sviluppo della risposta cognitiva tramite la rappresentazione virtuale di giochi che stimolano il paziente al movimento e che sviluppano in lui la risposta ai primi stimoli.

spositivo si comporterà come un ostacolo per il paziente, grazie a sistemi di gioco e di obiettivi sempre proposti dalla stessa applicazione di riferimento.

### ***Parametri customizzabili***

Il dispositivo deve essere customizzabile sotto la supervisione del medico di riferimento secondo alcuni parametri:

1- forma del dispositivo – il prodotto deve essere producibile prendendo come riferimento le immagini digitali dell'anatomia del paziente, in maniera da poter produrre la forma più adeguata possibile per ciascun utente

2- parametri della riabilitazione – il medico di riferimento deve essere in grado di gestire le pressioni da immettere negli attuatori in tutte le

fasi della riabilitazione, sia in quella di immobilizzazione, che in quella di ausilio che in quella di resistenza: poiché il dispositivo è destinato a tutte le età, le pressioni utili alla riabilitazione del polso di un bambino sono sicuramente differenti da quelle utili ad un uomo adulto ad esempio. Inoltre, il medico deve essere in grado di gestire le tempistiche di riabilitazione e il percorso quindi da far compiere a ciascun paziente a seconda delle risposte.

### ***Dispositivo***

Il dispositivo deve presentarsi come una sorta di tutore alternativo in grado di compiere le movimentazioni descritte: la forma è quindi quella di un classico tutore su cui giacciono gli attuatori per ciascuna movimentazione, attuabili grazie ad un sistema pneumatico.

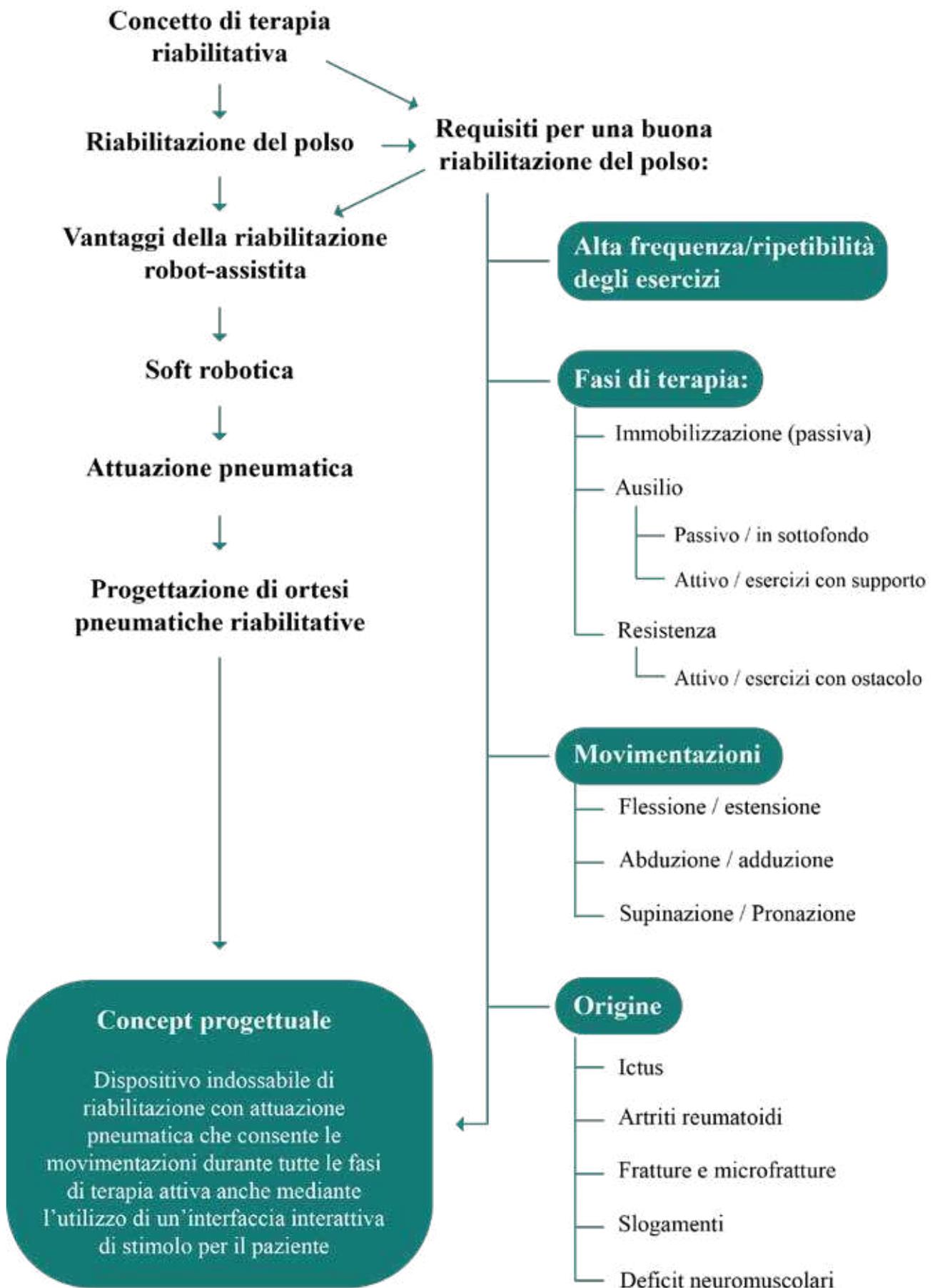
Il prodotto supporta quindi la riabilitazione domiciliare, e si presenta pertanto come una strumentazione “da tavolo” composta di un tutore indossabile ed un case elettronico contenente tutti i componenti utili al suo funzionamento.

### ***Attività e applicazione di riferimento***

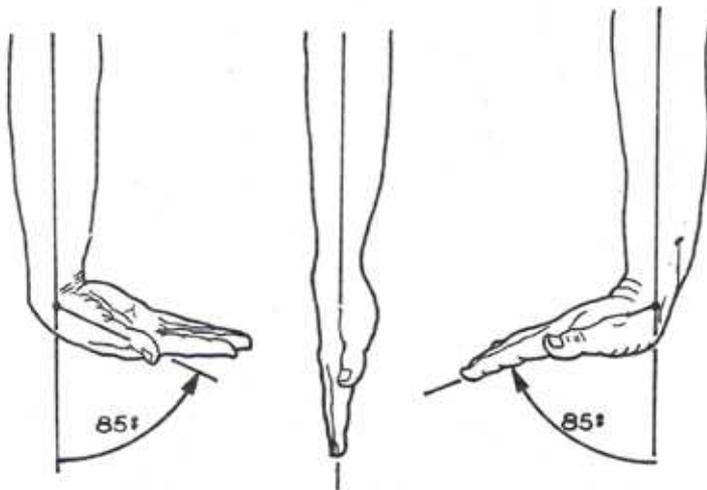
Il dispositivo è accompagnato dallo sviluppo di un'applicazione di riferimento che possa guidare il paziente nel compimento degli esercizi. Il case elettronico di contenimento hardware sarà dotato di uno schermo che possa rappresentare un sistema di giochi ad obiettivi che garantiscano quindi anche la sua risposta cognitiva secondo le regole degli allenamenti cognitivi e neuromuscolari. A seconda del gioco scelto dall'utente, proprio come accade nei casi studiati di realtà virtuale ed aumentata in sinergia

con i dispositivi di riabilitazione, il dispositivo stimola le movimentazioni da parte dell'utente e ne controlla il corretto svolgimento grazie a un sistema elettronico di controllo e monitoraggio.

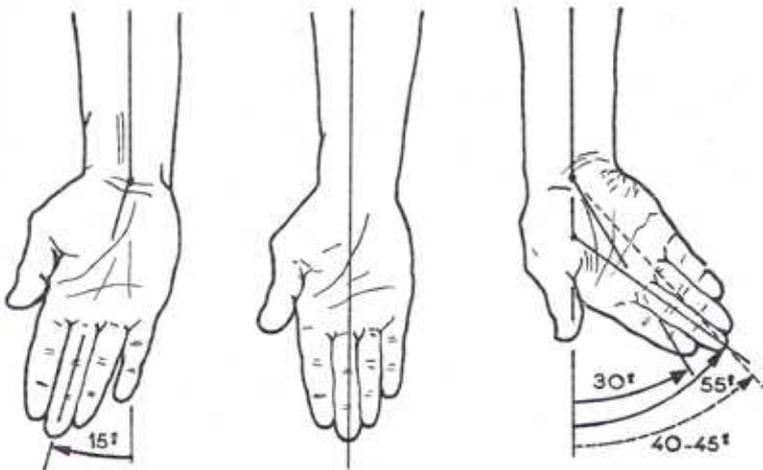
Il tutto è accompagnato anche da un'applicazione in grado di tenere conto dei progressi e dei parametri di riabilitazione dell'utente, in maniera tale da poterli poi comunicare e far revisionare dal medico di riferimento.



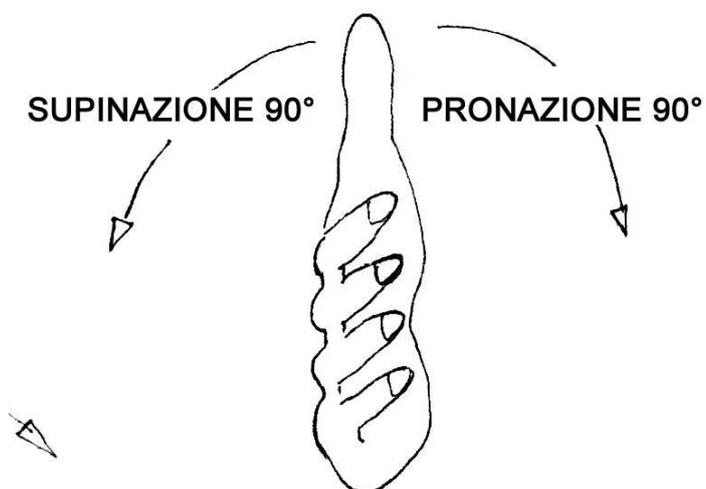
*Flessione ed estensione*



*Abduzione ed adduzione*



*Supinazione e pronazione*



## 08.2 Tabella e analisi dei requisiti del sistema

Viene di seguito presentata la tabella dei requisiti che il sistema ha per poter funzionare correttamente.

L'analisi attenta dei requisiti aiuta a comprendere l'interazione tra utente, sistema e ambiente esterno.

ID	NOME	DESCRIZIONE	PRIORITA'
R01	Attivazione	Il dispositivo si deve accendere tramite un tasto d'accensione	Alta
R02	Ricarica	Il dispositivo deve potersi ricaricare nei momenti in cui non viene utilizzato	Alta
R03	Autonomia	Il dispositivo deve rimanere attivo almeno per tutta la durata di una sessione di terapia riabilitativa	Alta
R04	Flessione ed estensione	Il dispositivo deve essere di ausilio e di resistenza alla riabilitazione dei movimenti di flessione ed estensione del polso	Alta
R05	Adduzione ed abduzione	Il dispositivo deve essere di ausilio e di resistenza alla riabilitazione dei movimenti di adduzione ed abduzione del polso	Alta
R06	Supinazione e pronazione	Il dispositivo deve essere di ausilio e di resistenza alla riabilitazione dei movimenti di supinazione e pronazione del polso	Alta
R07	Utilizzo domiciliare	Il dispositivo deve essere adatto all'utilizzo nell'ambiente della casa	Alta
R08	Comunicazione con l'applicazione	Il dispositivo deve essere in grado di comunicare con l'applicazione di riferimento	Alta

R09	Controllo delle movimentazioni e monitoraggio	Il dispositivo deve essere in grado di controllare le movimentazioni del polso per poterle rendere visualizzabili nell'applicazione di riferimento	Alta
R10	Spegnimento	Il dispositivo si deve poter spegnere tramite un tasto di spegnimento	Alta
R11	Indossabilità	Il dispositivo deve essere comodamente indossabile da parte dell'utente	Alta
R12	Lavabilità	Il dispositivo indossabile deve essere lavabile	Alta

### ***R01 - Attivazione***

Per poter essere utilizzato, il dispositivo deve essere necessariamente attivato da parte dell'utente nel momento in cui questo voglia svolgere l'attività di riabilitazione. Al momento dell'inizio della sessione di terapia, quindi, l'utente

può iniziare ad utilizzare il dispositivo tramite un apposito tasto di accensione, situato nel case elettronico a cui il tutore è collegato, contenente tutte le componenti hardware per il suo corretto funzionamento.

### ***R02 - Alimentazione***

Per permettere all'utente l'utilizzo più comodo possibile, il dispositivo deve potersi alimentare, o autonomamente durante i momenti di inattività, o mediante un alimentatore attaccato alla

presa della corrente: a ricaricarsi potrebbe essere quindi il case elettronico, separabile dal tutore indossabile, grazie all'utilizzo della presa di corrente.

### ***R03 - Autonomia***

Il dispositivo deve garantire un'autonomia d'utilizzo per almeno la durata di una sessione di riabilitazione, la quale dura solitamente meno di un'ora. Per garantire con sicurezza l'autono-

mia adeguata, si opta per l'utilizzo di una batteria ricaricabile che ne consente l'utilizzo per almeno un'ora di tempo senza spegnersi.

#### ***R04 - Flessione ed estensione***

Il dispositivo deve fornire sia il supporto (nella prima fase di terapia) che la resistenza (nella seconda fase di terapia) alla coppia di movimentazioni di flessione ed estensione. Queste

movimentazioni prevedono lo spostamento della mano in su ed in giù e pertanto è necessario prevedere un numero di attuatori sufficienti a compiere tali movimentazioni in sicurezza.

#### ***R05 - Adduzione ed abduzione***

Il dispositivo deve fornire sia il supporto (nella prima fase di terapia) che la resistenza (nella seconda fase di terapia) alla coppia di movimentazioni di adduzione ed abduzione. Queste movimentazioni prevedono lo spostamento del-

la mano che giace idealmente sul piano orizzontale e che si muove ruotando verso destra e verso sinistra. È necessario quindi prevedere degli attuatori che consentano questa movimentazione in sicurezza.

#### ***R06 - Supinazione e pronazione***

Il dispositivo deve fornire sia il supporto (nella prima fase di terapia) che la resistenza (nella seconda fase di terapia) alla coppia di movimentazioni di supinazione e pronazione. Queste movimentazioni prevedono la rotazione della

mano secondo l'asse orizzontale verso destra e verso sinistra, ed è pertanto necessario prevedere degli attuatori che consentano la movimentazione in sicurezza.

#### ***R07 - Utilizzo domiciliare***

Il dispositivo è destinato all'utilizzo nell'ambiente casalingo, oltre che in maniera potenziale chiaramente anche a quello nell'ambiente del centro fisioterapico. Per essere utilizzato a casa, il prodotto viene progettato come un insieme di due aree: il tutore indossabile da parte dell'utente, dispositivo attivo nella riabilitazione, ed

il case elettronico "da tavolo" contenente tutte le componenti hardware necessarie al suo funzionamento. Il dispositivo appare così una strumentazione comoda da utilizzare in casa durante lo svolgimento di alcune semplici attività in sottofondo.

#### ***R08 - Comunicazione con l'app***

Poiché il dispositivo viene utilizzato in sinergia con un'applicazione di riferimento, la quale aiuta a gestire il monitoraggio delle attività, è

necessario che il prodotto e l'applicazione comunichino tra di loro, ad esempio tramite un modulo bluetooth.

### ***R09 - Controllo delle movimentazioni e monitoraggio***

Il dispositivo deve essere dotato di un sistema di controllo e monitoraggio delle movimentazioni svolte dal paziente sia per essere consultate all'interno dell'applicazione di riferimento, sia per poter essere comunicate al medico che segue la terapia, sia per poter svolgere gli esercizi seguendo le proprie movimentazioni sullo schermo, come nel caso del gioco. Si ipotizza

di poter controllare le movimentazioni grazie all'utilizzo di sensori inerziali, uno posizionato sull'avambraccio e uno sul dorso (o palmo) della mano, i quali, lavorando insieme, riescono a comprendere il posizionamento della mano, e quindi del polso, nello spazio durante tutti i momenti.

### ***R10 - Spegnimento***

Il dispositivo, una volta che il suo utilizzo viene concluso, deve poter essere spento da parte dell'utente grazie ad un apposito tasto di spe-

gnimento, che può coincidere con quello di accensione.

### ***R11 - Indossabilità***

Il tutore azionabile pneumaticamente deve essere indossabile da parte dell'utente in maniera

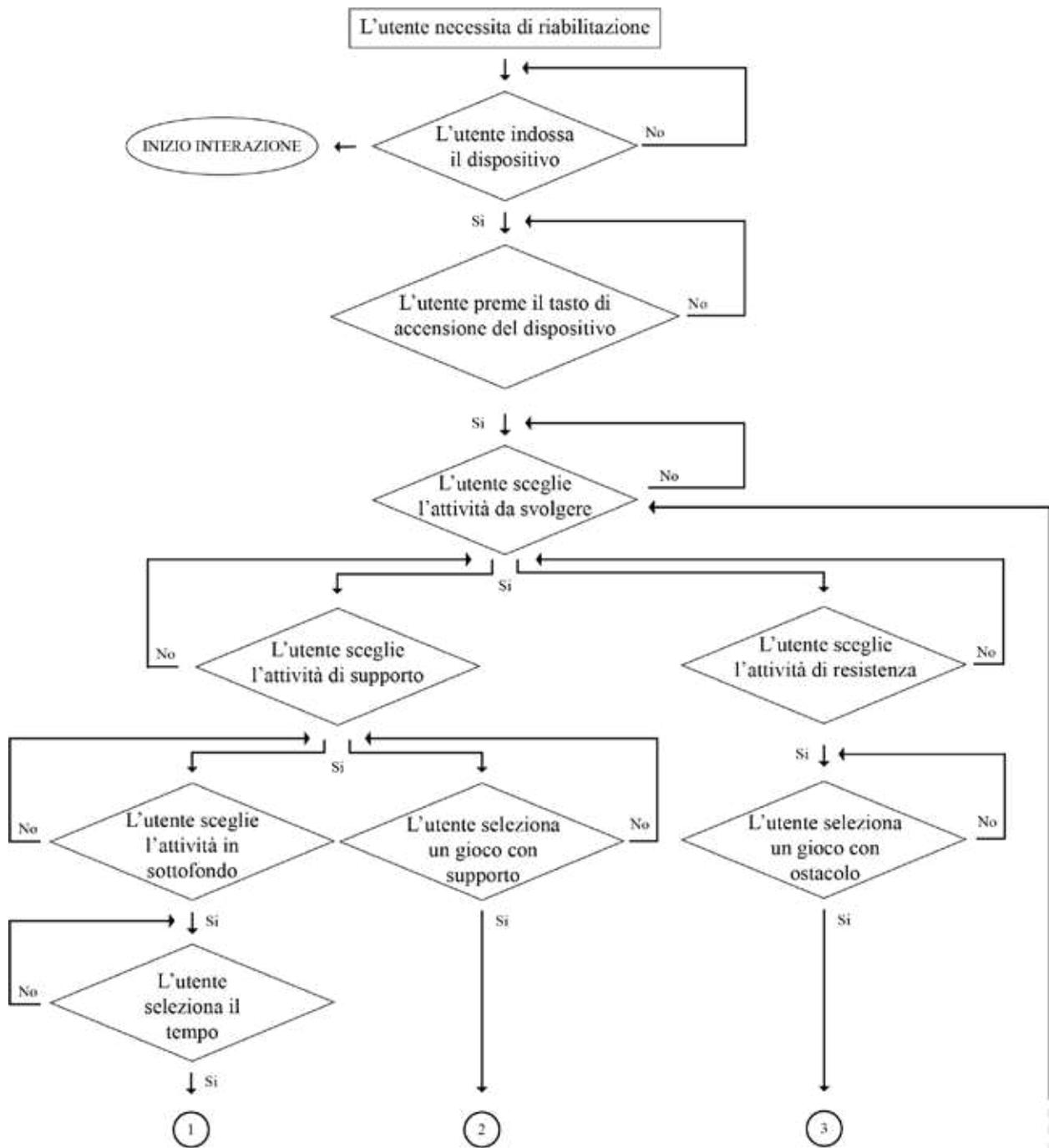
comoda e sicura, come accade per gli altri tutori in tessuto elastico in commercio.

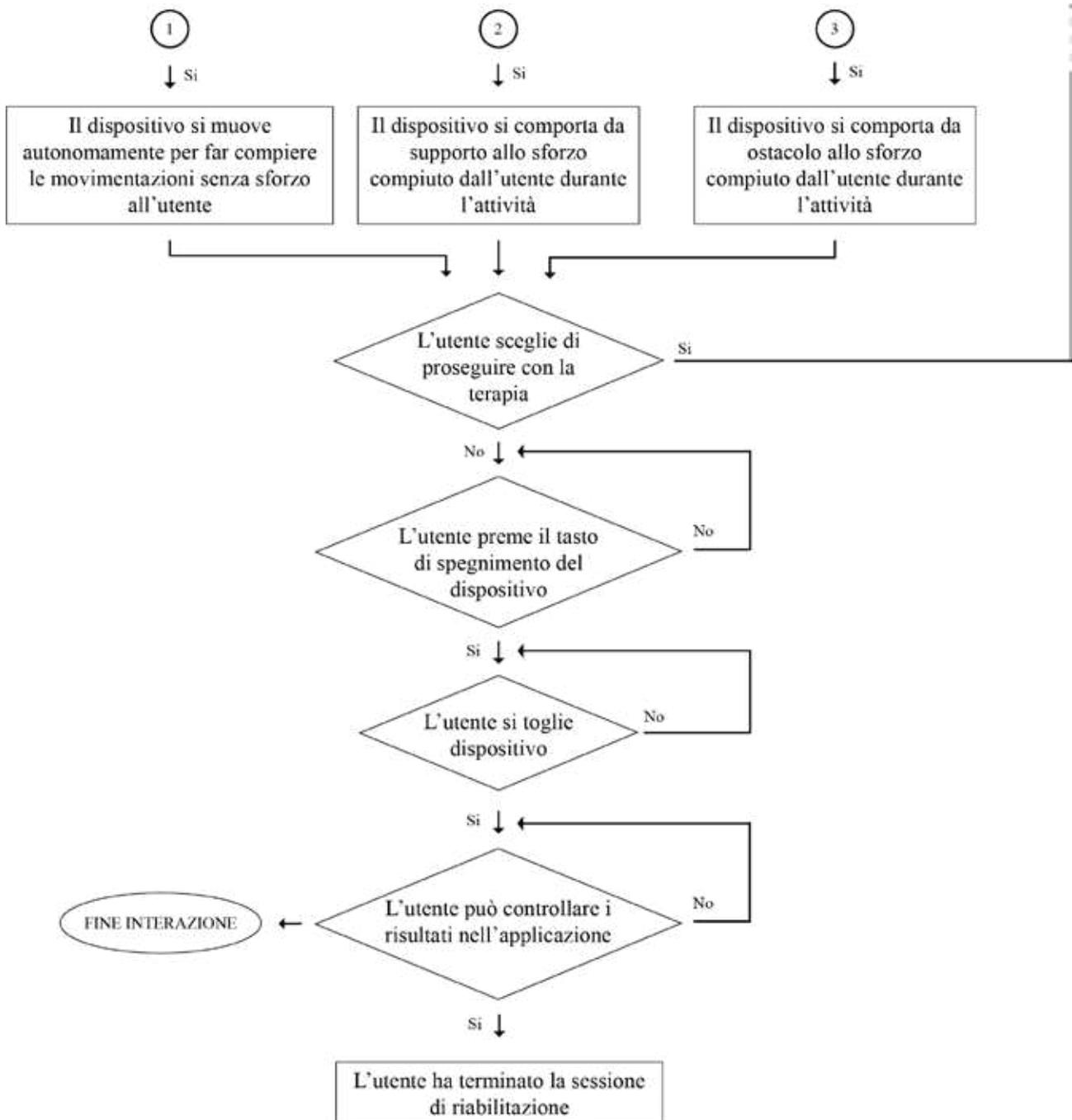
### ***R12 - Lavabilità***

Il tutore deve essere lavabile dopo l'utilizzo da parte dell'utente per garantire l'igiene personale; pertanto, si opta per la separazione della componente indossabile dal case elettronico, e

per l'utilizzo di materiali facilmente lavabili e che non si rovinano con l'utilizzo dell'acqua e del sapone.

### 08.3 Algoritmo dell'interazione sistema - utente



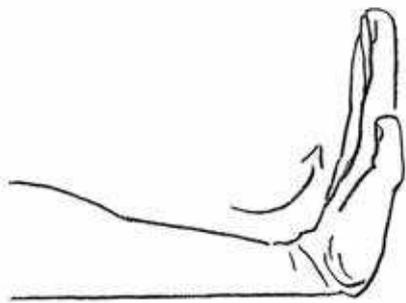
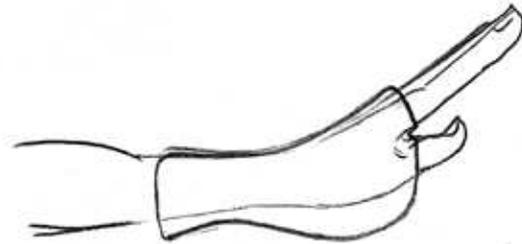


## 08.4 Schizzi progettuali

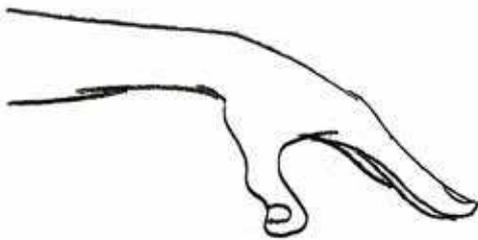
*Flessione*



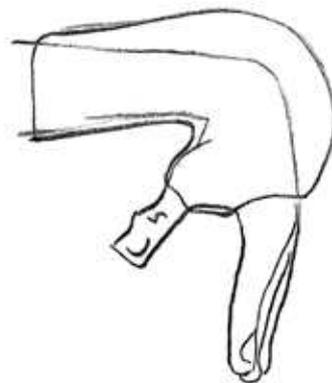
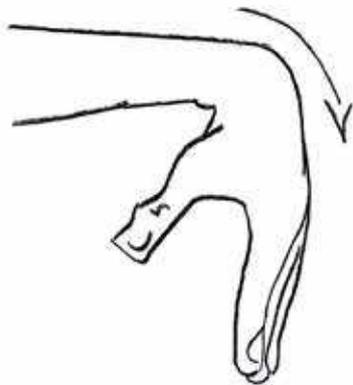
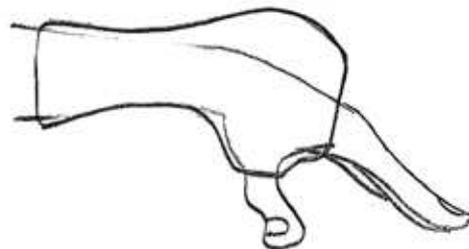
*Flessione con l'utilizzo del dispositivo*



*Estensione*



*Estensione con l'utilizzo del dispositivo*



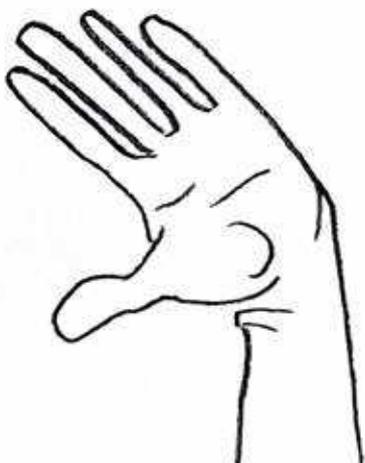
*Abduzione*



*Abduzione con l'utilizzo del dispositivo*



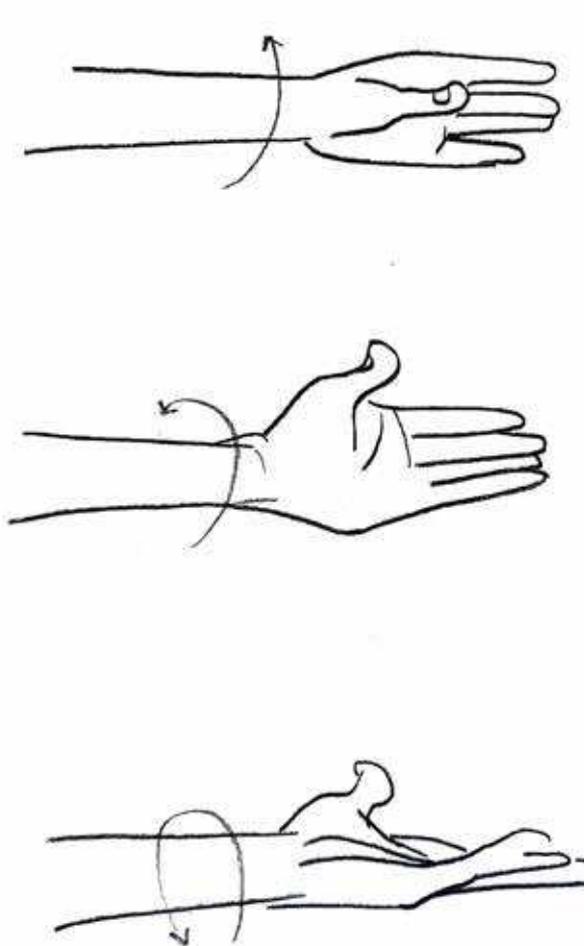
*Adduzione*



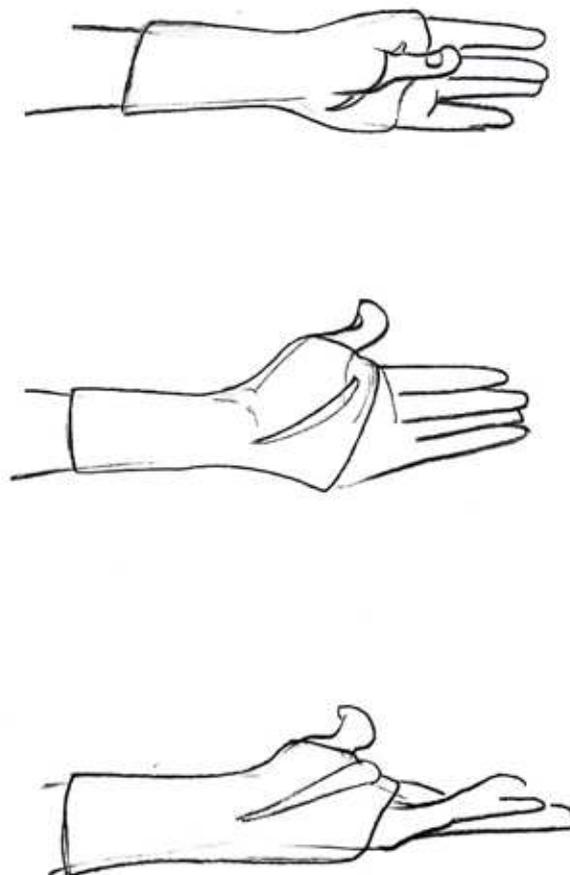
*Adduzione con l'utilizzo del dispositivo*



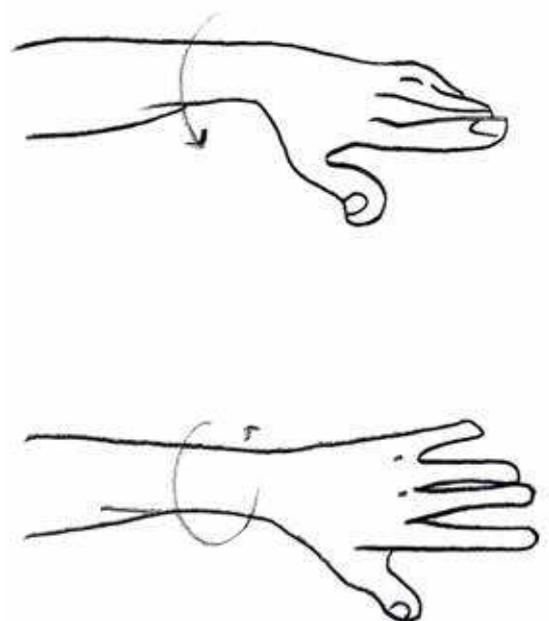
*Supinazione*



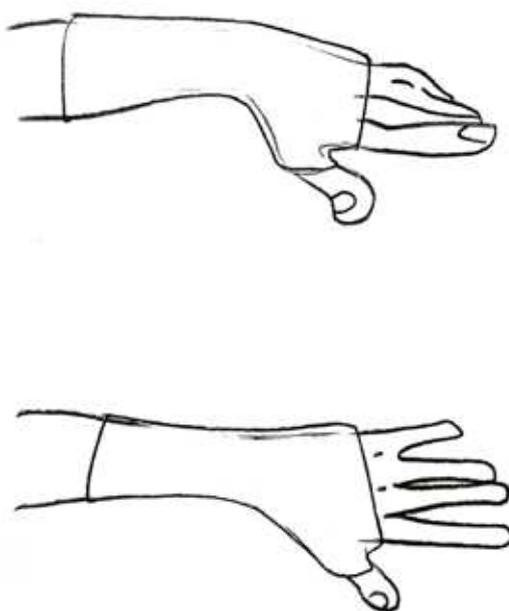
*Supinazione con l'utilizzo del dispositivo*



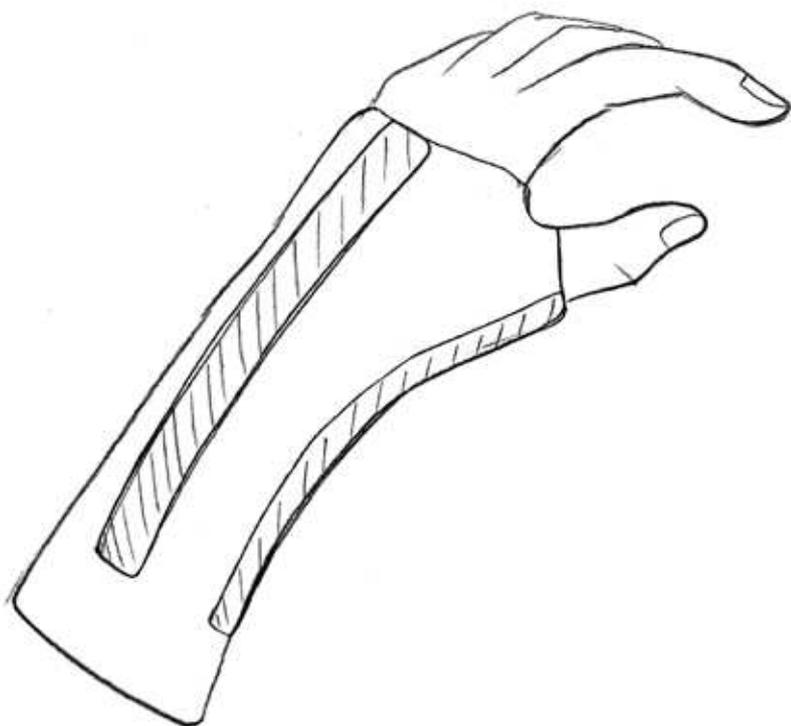
*Pronazione*



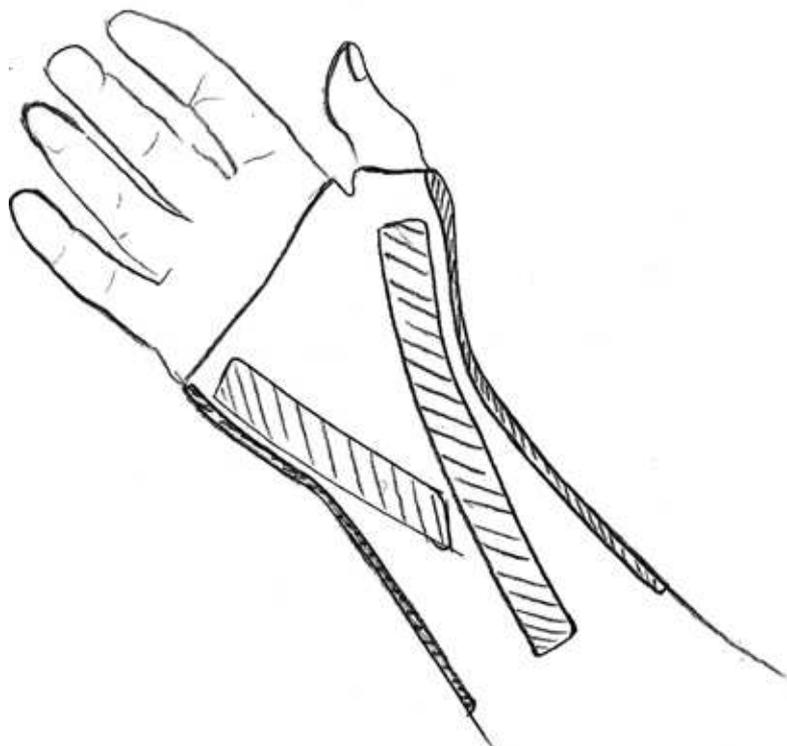
*Pronazione con l'utilizzo del dispositivo*



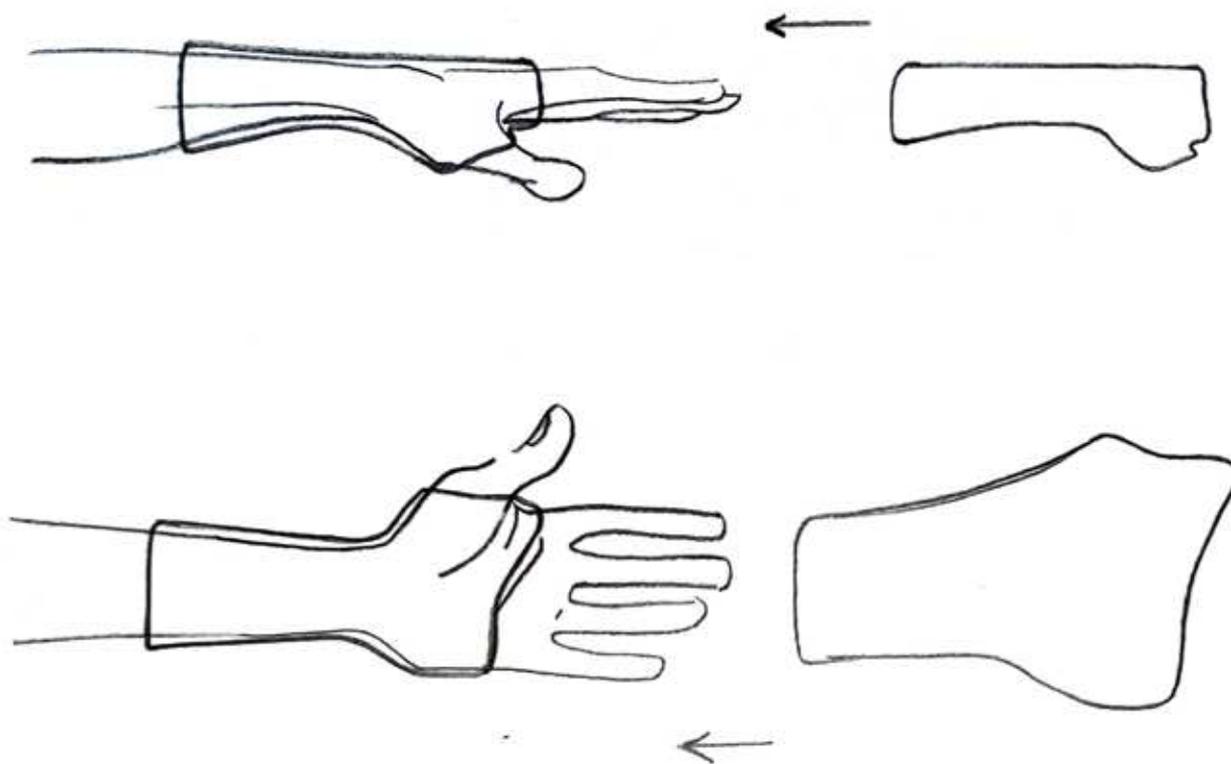
*Individuazione degli attuatori*



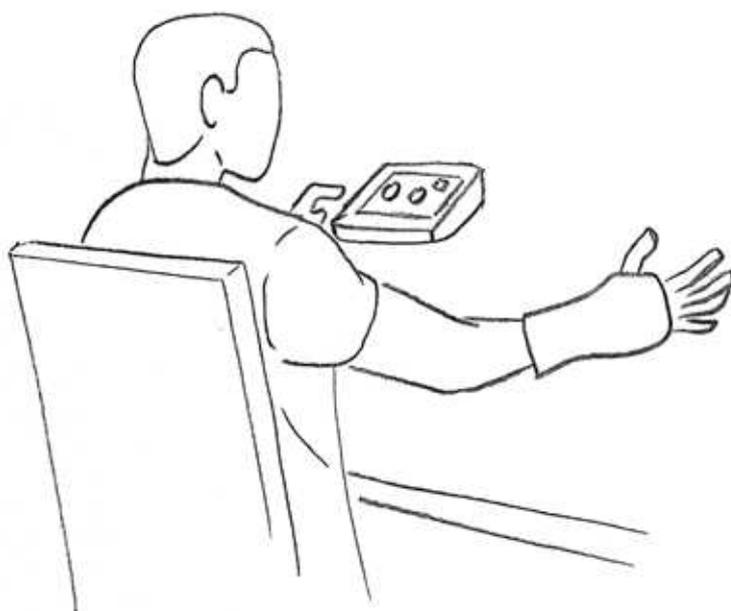
*Individuazione degli attuatori*



*Indossamento del dispositivo*



*Utilizzo del dispositivo in casa*



*Utilizzo dell'applicazione di riferimento*



## 08.5 Storytelling dell'interazione

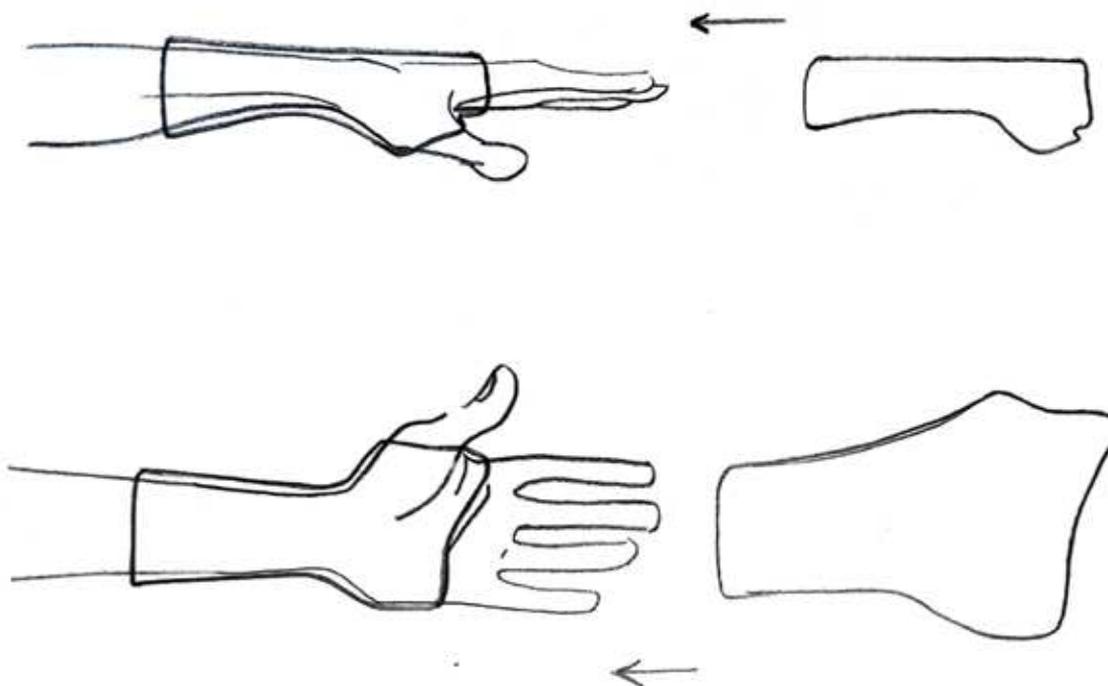
Di seguito viene presentato lo storytelling dell'interazione tra sistema, utente e ambiente esterno.

Lo storytelling è utile per capire, assieme all'algoritmo dell'interazione, la dinamica di utilizzo del sistema.

### *Indossamento*

L'utente, al momento dell'inizio della sessione di riabilitazione, indossa il dispositivo infilando

il tutore dalla mano e posizionandolo correttamente sul polso.



### *Accensione*

Dopo aver indossato correttamente il dispositivo, l'utente accende il sistema elettronico e lo connette all'applicazione di riferimento vi-

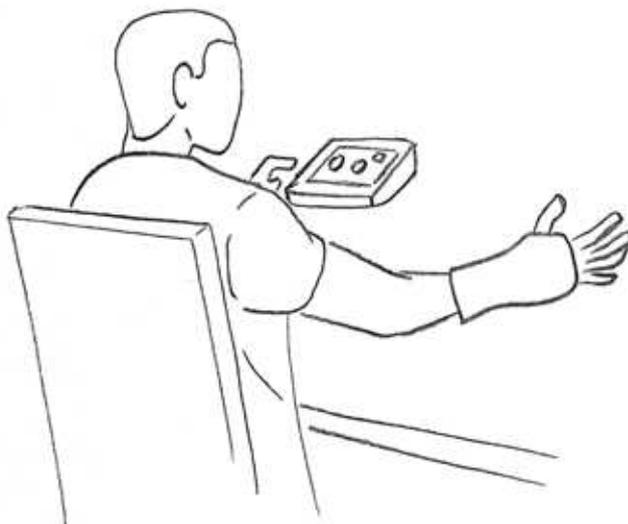
sualizzabile su qualsiasi dispositivo elettronico, come smartphone, pc o tablet.



## Selezione dell'attività

Grazie all'hardware di riferimento, l'utente è in grado di selezionare a seconda delle sue necessità e delle indicazioni del medico l'attività da svolgere, scegliendo quindi inizialmente tra le aree di supporto o di ostacolo, e successiva-

mente scegliendo, nel primo caso tra movimentazione in background e supporto parziale alle movimentazioni, e nel secondo caso tra i giochi disponibili che forniscono ostacolo alle movimentazioni.



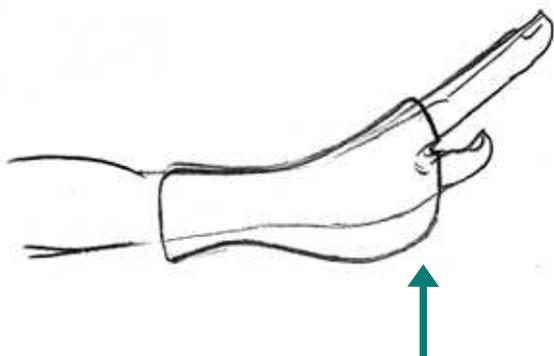
## Svolgimento dell'attività selezionata

A seconda dell'attività selezionata in precedenza, l'utente compie le movimentazioni di riabilitazione.

Nel primo caso, le movimentazioni sono interamente eseguite dal dispositivo e pertanto l'utente può svolgere attività quotidiane in contemporanea, come ad esempio guardare un

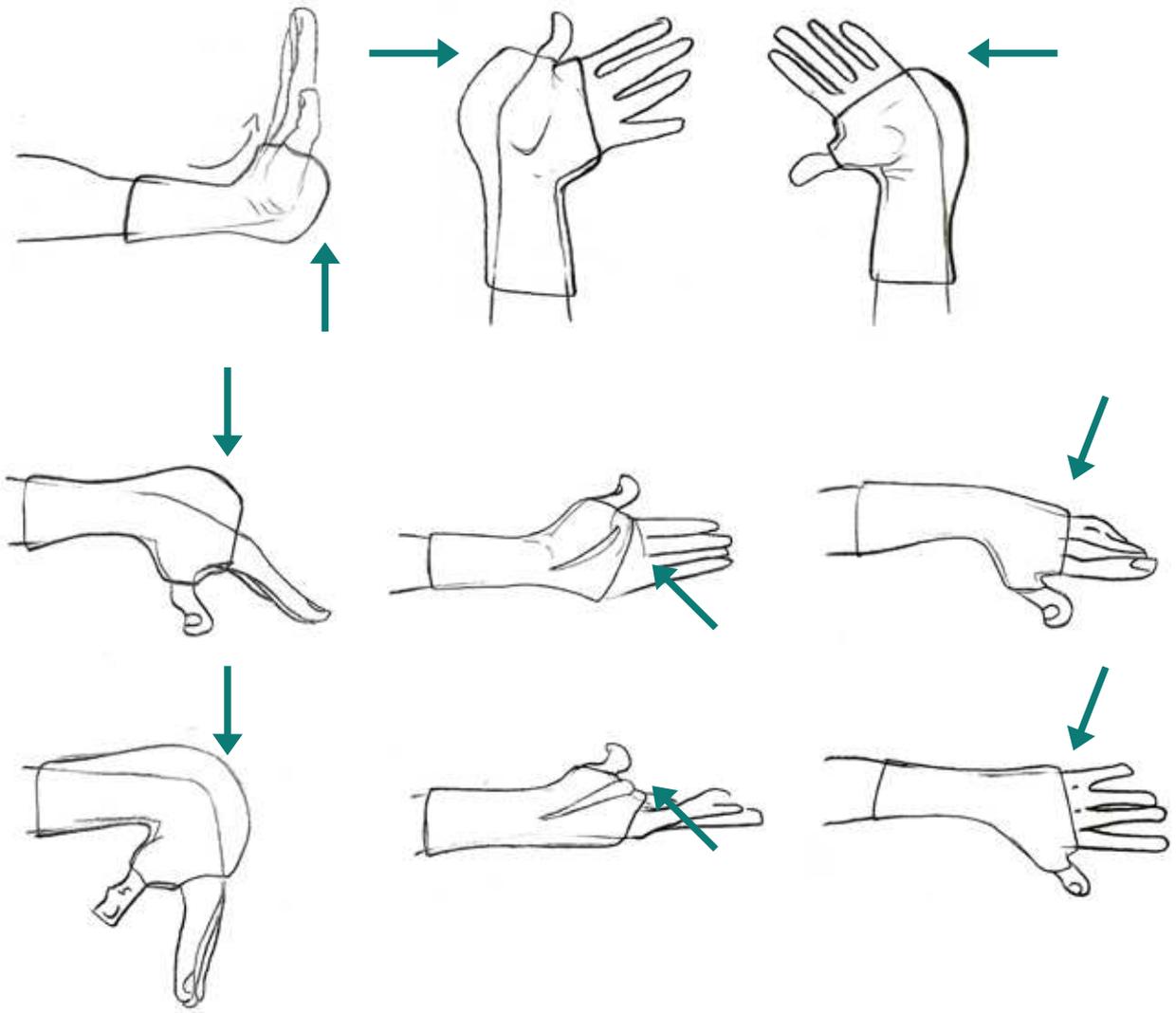
film, leggere un libro, ascoltare la musica ecc. Nel secondo caso, l'utente segue gli obiettivi del gioco grazie ad un supporto parziale fornito dal tutore, mentre nel terzo caso, l'utente cerca di raggiungere gli obiettivi proposti dal gioco con la difficoltà in più dell'ostacolo (sotto forma di resistenza fisica) fornito dal tutore.

### ● 1 - Riabilitazione autonoma senza sforzo da parte dell'utente (in sottofondo)



Il dispositivo fa compiere all'utente i movimenti d'interesse in totale autonomia, senza che quest'ultimo debba compiere sforzi. Questa attività può essere considerata come un'attività di sottofondo, da poter compiere mentre si fanno altre cose che non richiedono movimenti da parte della mano interessata, come precedentemente accennato.

La freccia indica la direzione ed il punto verso cui viene impressa la forza dall'attuatore pneumatico in ogni caso.

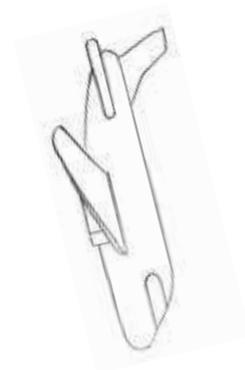
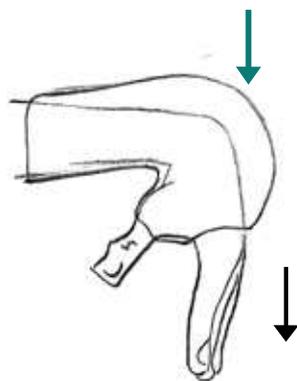
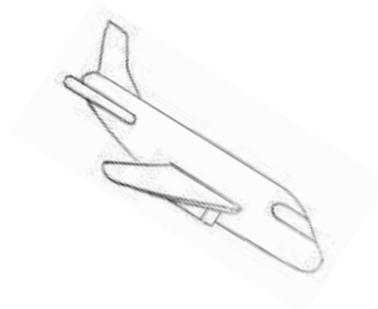
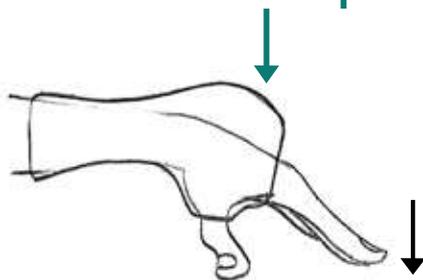
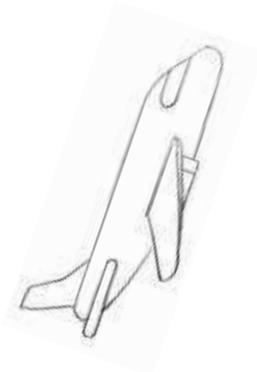
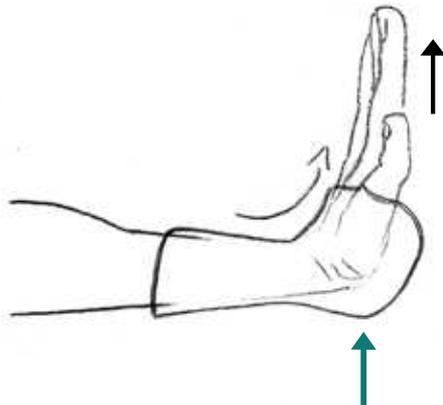
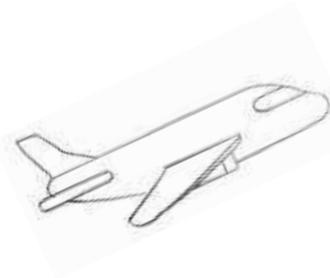
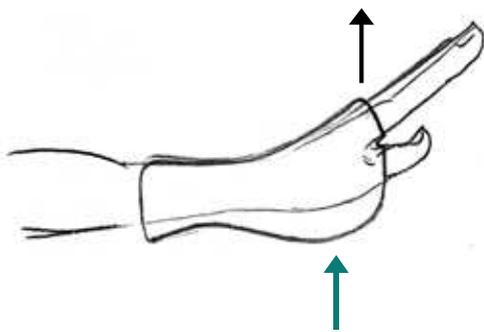


## ● 2 - Riabilitazione con ausilio e leggero sforzo da parte dell'utente (attiva)

Il dispositivo risulta essere un ausilio alla riabilitazione ed aiuta l'utente a compiere le movimentazioni d'interesse. In questo caso, l'utente sceglie un'attività da fare che lo stimola nel muovere il proprio polso, come ad esempio un gioco, qui rappresentato dalla presenza di un

aeroplano di esempio.

L'utente quindi compie un leggero sforzo e la forza da lui esercitata è nella stessa direzione rispetto a quella esercitata dal dispositivo: entrambi concorrono allo stesso movimento.

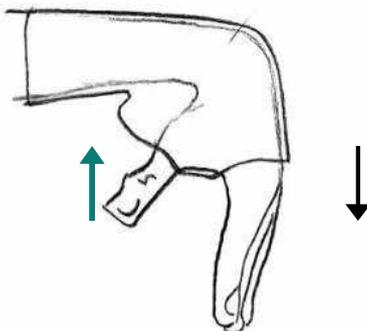
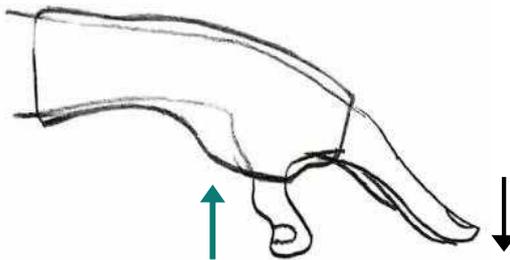
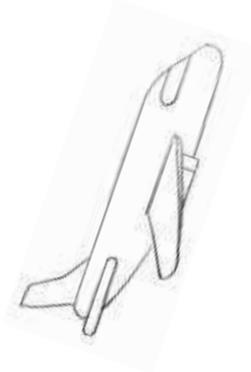
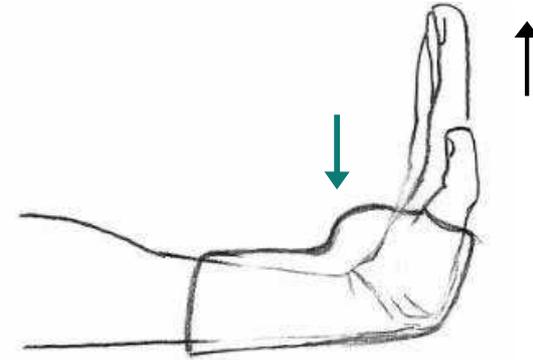
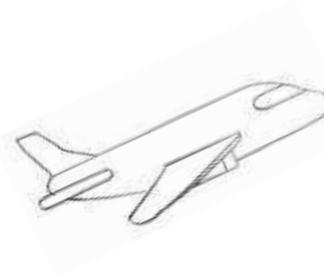
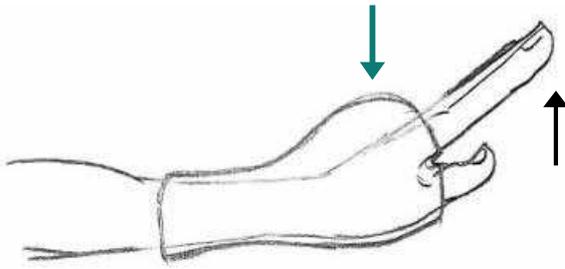


### ● 3 - Riabilitazione con ostacolo e consistente sforzo da parte dell'utente (attiva)

Il dispositivo risulta essere un ostacolo al compimento delle movimentazioni d'interesse, andando ad operare sulla resistenza dell'articolazione. In questo caso, l'utente sceglie un'attività da fare che lo stimola nel muovere il proprio polso, come ad esempio un gioco, qui rappresentato dalla presenza di un aeroplano di

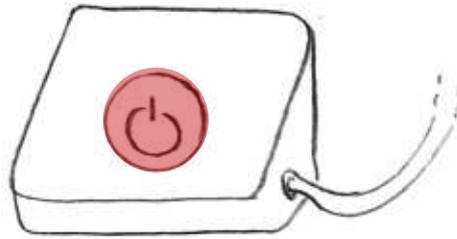
esempio.

L'utente quindi compie un consistente sforzo e la forza da lui esercitata è nella direzione opposta rispetto a quella esercitata dal dispositivo: l'utente e il dispositivo si muovono in sensi opposti.



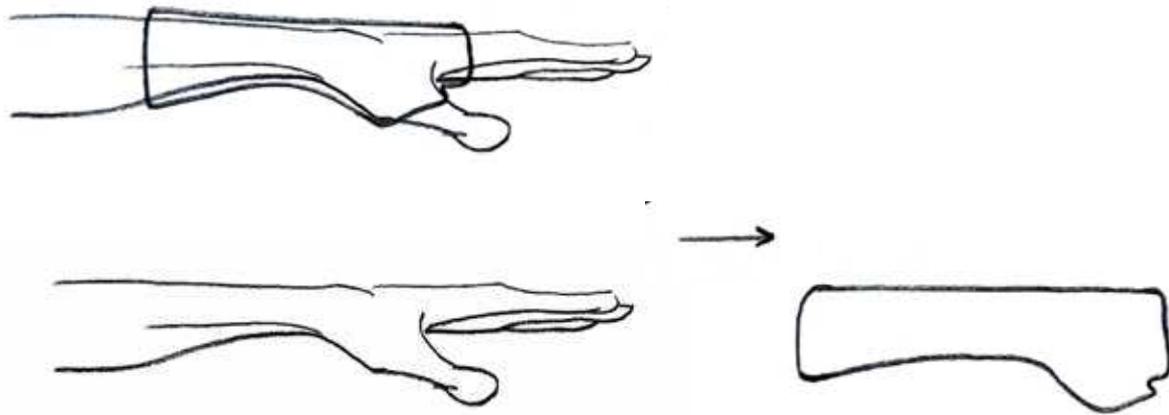
### ***Spegnimento del dispositivo***

Una volta conclusa la sessione di terapia selezionata, l'utente può spegnere il dispositivo.



### ***Svestizione***

L'utente può in ultima analisi togliersi il dispositivo sfilandolo via dalla mano e riponendolo al suo posto in casa.



### ***Controllo dei risultati***

L'utente può in qualsiasi momento accedere al proprio profilo di riferimento all'interno dell'applicazione e controllare i propri risultati ed i parametri di riabilitazione. Anche il medico o fisioterapista di riferimento può consultare le attività svolte grazie alla comunicazione dell'app, così da seguire il percorso di terapia domiciliare in maniera sicura e dettagliata.



09

Reverse  
engineering

Per comprendere meglio il funzionamento di un dispositivo che genera pressione pneumatica, viene preso come oggetto di riferimento lo sfigmomanometro, anche detto misuratore di pressione, che, sia nel caso manuale che automatico, è un dispositivo che ben riassume e condivide alcune delle caratteristiche dell'ortesi pneumatica che si intende progettare. Il processo di reverse engineering del misuratore di pressione automatico rappresenta un

### *Obiettivi del Reverse Engineering*

**1- Analisi dei componenti:** è innanzitutto importante esaminare attentamente i componenti interni del misuratore di pressione automatico, compresa la pompa, il manicotto, il sensore di pressione, il microprocessore e il display. Questa analisi consente la comprensione delle caratteristiche e le funzioni di ciascun componente, nonché le loro interazioni all'interno del sistema.

**2- Valutazione delle tecnologie utilizzate:** si procede esaminando le tecnologie e le metodologie impiegate nel misuratore di pressione automatico, inclusi sensori di pressione, algoritmi

passo fondamentale nell'obiettivo di progettare e sviluppare un dispositivo ad attuazione pneumatica per applicazioni mediche. Attraverso l'analisi dettagliata dei componenti interni, del funzionamento e dell'interazione con l'utente del misuratore di pressione automatico, è infatti possibile acquisire una comprensione approfondita delle migliori pratiche e delle tecnologie utilizzate nel settore.

di elaborazione dati e interfaccia utente. Questa valutazione aiuta a identificare le soluzioni più efficienti e affidabili per il dispositivo ad attuazione pneumatica medica.

**3- Studio dell'interazione con l'utente:** analizzare l'esperienza dell'utente con il misuratore di pressione automatico, comprese le modalità di avvio e arresto, il posizionamento del braccio e la visualizzazione dei risultati. Questa fase fornisce preziose informazioni su come migliorare l'usabilità e l'ergonomia del nostro dispositivo.



Fonte: Sfigmomanometro digitale con bracciale universale, Intermed

## *Benefici del Reverse Engineering:*

**1- Incremento dell'efficienza:** Comprendendo a fondo il funzionamento del misuratore di pressione automatico, si è in grado di identificare le aree di miglioramento e ottimizzare il design del dispositivo ad attuazione pneumatica medica per massimizzare l'efficienza operativa.

**2- Aumento della precisione:** Utilizzando le migliori pratiche e le tecnologie più avanzate identificate durante il reverse engineering, è possibile sviluppare un dispositivo ad attuazione pneumatica che fornisca misurazioni medi-

## *Descrizione del Misuratore di Pressione Automatico:*

Il misuratore di pressione automatico è un dispositivo medico innovativo progettato per fornire misurazioni accurate e affidabili della pressione arteriosa senza richiedere l'intervento diretto di un operatore medico. Questo strumento è fondamentale nel monitoraggio della salute cardiovascolare degli individui, consentendo una valutazione regolare e precisa della pressione sanguigna.

Il dispositivo è composto sempre da alcuni componenti fondamentali per il suo funzionamento, che costituiscono il circuito di generazione della pressione, controllo delle informazioni del sistema e comunicazione delle stesse all'utente. Questi componenti di solito sono schematizzati in questo modo: il compressore, l'elettrovalvola solenoide, il sensore di pressione ed il manicotto sono i componenti che solitamente gestiscono la generazione della pressione, il microprocessore è il componente che elabora le informazioni provenienti dai componenti input e le trasmette agli output, essendo il cuore dell'intero sistema, mentre il display, la tastiera e l'altoparlante sono i componenti relativi alla comunicazione delle informazioni e all'interfaccia del sistema dedicata all'utente.

**Compressore/pompa:** il compressore interno del misuratore di pressione automatico è responsabile della generazione della pressione. Quando il dispositivo viene avviato, il microprocessore comunica alla pompa di iniziare la fase di gonfiaggio.

che precise e affidabili, migliorando così la qualità dell'assistenza sanitaria.

**3- Miglioramento dell'esperienza utente:** Integrando le lezioni apprese dall'analisi dell'interazione con l'utente del misuratore di pressione automatico, è possibile progettare un'interfaccia intuitiva e user-friendly per il dispositivo, migliorando l'esperienza complessiva dell'utente e promuovendo l'aderenza al trattamento medico.

**Elettrovalvola solenoide:** la valvola è il componente direttamente collegato al compressore ed ha il ruolo di gestire l'ingresso dell'aria compressa all'interno del tubo che collega il manicotto. Questo componente è responsabile quindi anche dello sgonfiaggio mediante una valvola di scarico collegata.

**Sensore di pressione:** il sensore di pressione è il componente chiave che rileva e misura la pressione sanguigna all'interno del manicotto. Questo sensore converte le variazioni di pressione in segnali elettrici che vengono poi elaborati e visualizzati sul display del dispositivo.

**Manicotto:** il manicotto è una parte essenziale del misuratore di pressione automatico, poiché è collocato attorno al braccio dell'utente per rilevare la pressione arteriosa. Una volta gonfiato dalla pompa, il manicotto esercita una pressione controllata sul braccio, interrompendo temporaneamente il flusso sanguigno.

**Microprocessore:** il microprocessore interno gestisce l'intero processo di misurazione della pressione; quindi, riceve i segnali dal sensore di pressione, li elabora e calcola i valori della pressione arteriosa. Il microprocessore è il principale responsabile del controllo delle operazioni del misuratore di pressione automatico.

**Display, tastiera e altoparlante:** il display del misuratore di pressione automatico visualizza i risultati delle misurazioni in modo chiaro e leggibile per l'utente. L'altoparlante fornisce feedback sonoro durante il processo di misura-

zione e notifica l'utente quando la procedura è completa, e la tastiera è responsabile dell'interazione con l'utente; pertanto, rende possibile a

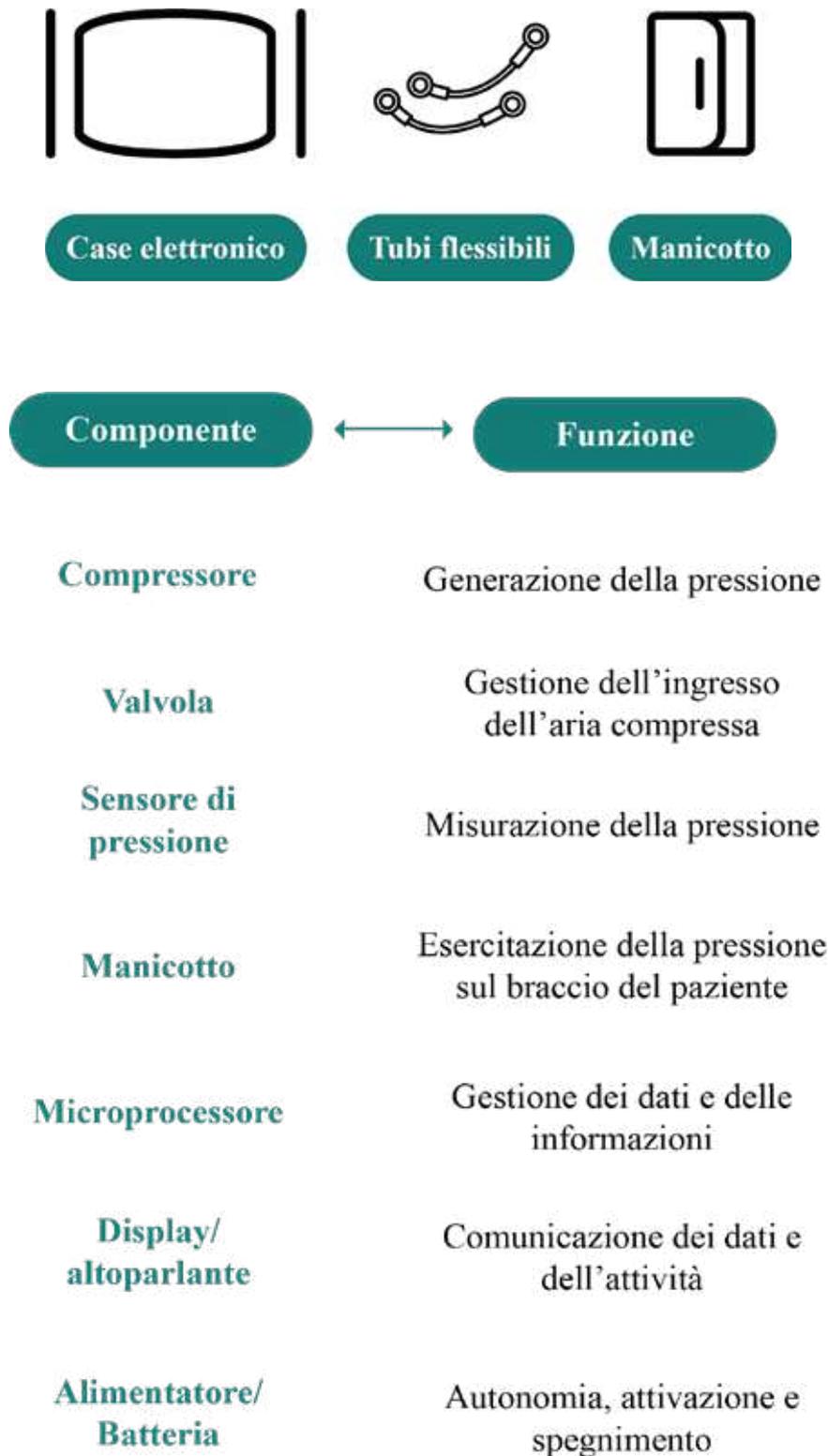
quest'ultimo la selezione di alcune funzioni in maniera manuale e chiara.



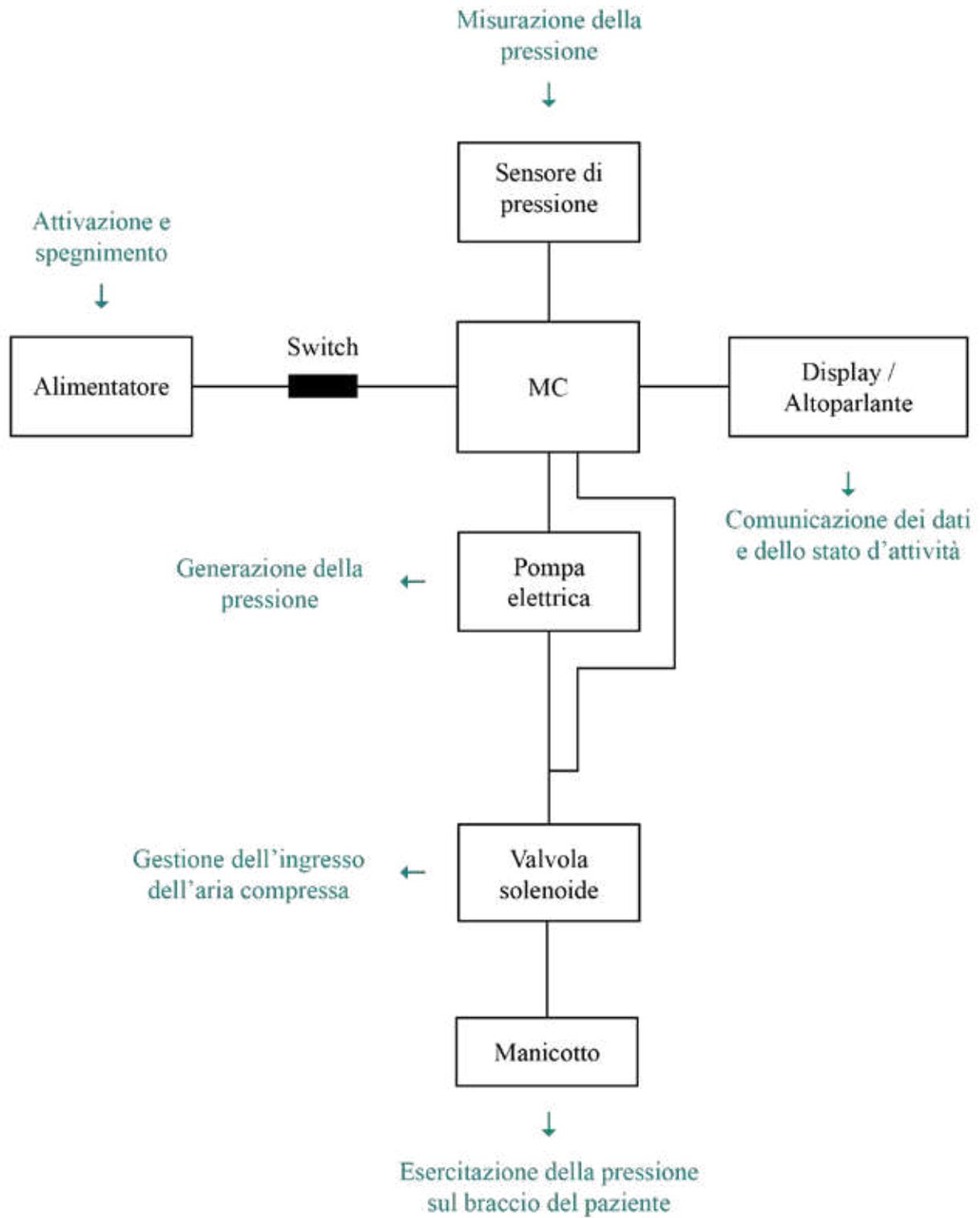
*Analisi dei componenti:*

Il misuratore di pressione è composto dai seguenti elementi: case elettronico, tubi flessibili e manicotto per la misurazione.

Di seguito vengono schematizzati i componenti elettronici e le funzioni che svolgono secondo uno schematico di visualizzazione.



*Schematico dei componenti:*



### Interazione con l'utente:

Il misuratore di pressione automatico è progettato per essere user-friendly e facile da utilizzare, consentendo agli utenti di monitorare la propria pressione arteriosa comodamente a casa o in altri ambienti. L'oggetto è studiato per essere "da tavolo", quindi può essere utilizzato in qualsiasi momento ed in qualsiasi luogo domestico da parte dell'utente, e può essere riposto all'interno di un apposito contenitore nei momenti in cui non viene utilizzato.

L'interazione con l'utente avviene secondo diverse fasi:

**1- Avvio e Arresto:** per avviare il processo di misurazione, l'utente avvia il dispositivo utilizzando il pulsante di accensione. Una volta terminata la misurazione, l'utente può arrestare il processo premendo il pulsante di arresto.

**2- Posizionamento del Braccio:** prima di avviare la misurazione, l'utente posiziona il braccio sul tavolo o su una superficie stabile, mantenendolo alla stessa altezza del cuore per risultati più accurati.

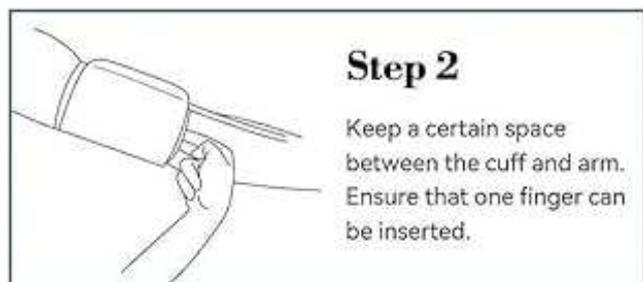
**3- Avviso di Misurazione:** durante la misura-

zione, l'utente può ricevere un feedback sonoro che indica l'avanzamento del processo. È importante mantenere il braccio immobile durante la procedura per evitare misurazioni errate.

**4- Visualizzazione dei Risultati:** una volta completata la misurazione, i risultati della pressione arteriosa vengono visualizzati sul display del misuratore. Questi risultati includono sia la pressione sistolica che quella diastolica, fornendo all'utente una valutazione completa della sua salute cardiovascolare.

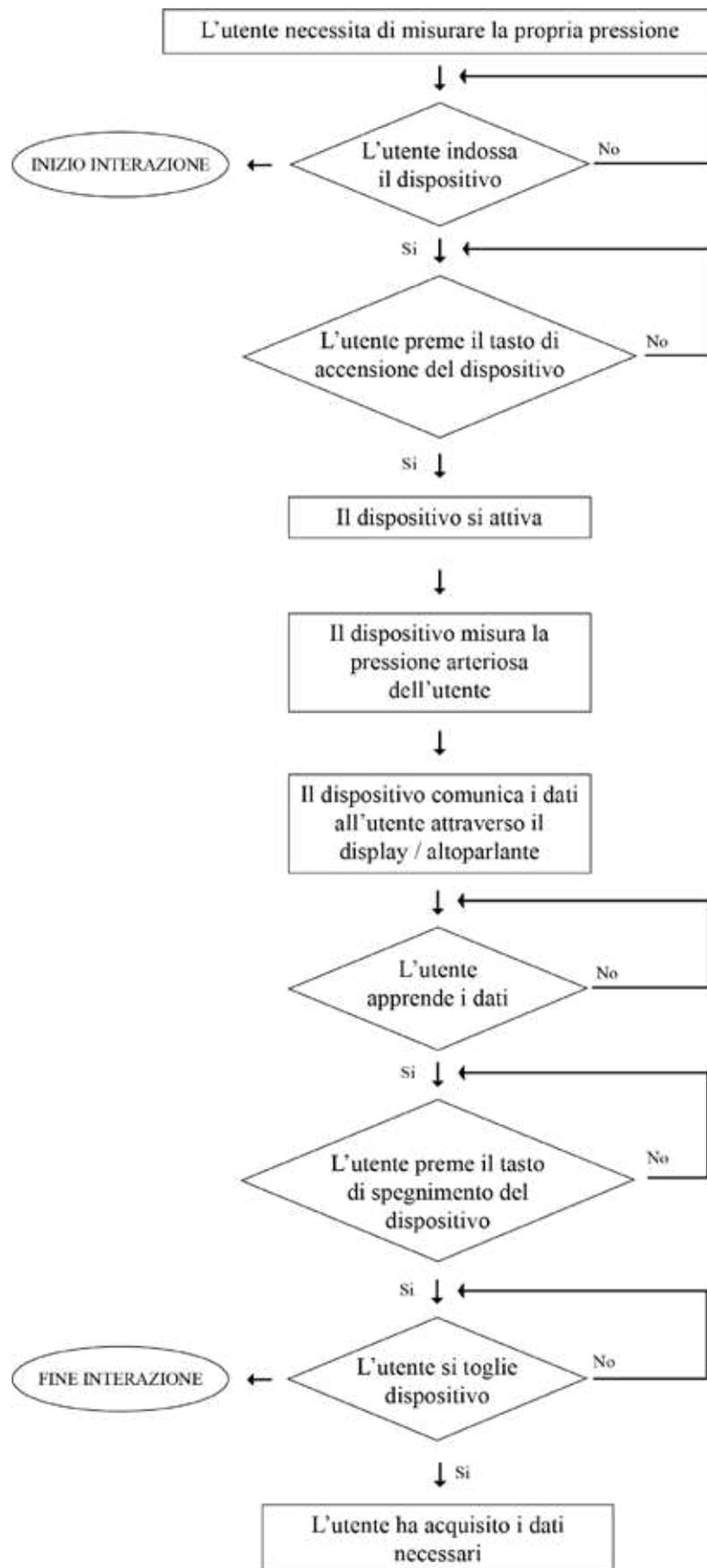
In conclusione, il misuratore di pressione automatico rappresenta un'importante risorsa per il monitoraggio della pressione arteriosa, offrendo una combinazione di precisione, facilità d'uso e praticità per gli utenti di tutte le età. Grazie alla sua tecnologia avanzata e alla sua progettazione intuitiva, questo dispositivo svolge un ruolo fondamentale nella promozione della salute e nel mantenimento del benessere cardiovascolare.

### Storytelling dell'interazione con l'utente:



Fonte: Step per la misurazione, Accumed

Algoritmo dell'interazione con l'utente:



*10*

Selezione dei  
componenti

Per il corretto funzionamento del dispositivo, sono necessari alcuni componenti che costituiscono l'insieme hardware del sistema. In particolar modo, il sistema è costituito da due sezioni: la zona indossabile dove giacciono

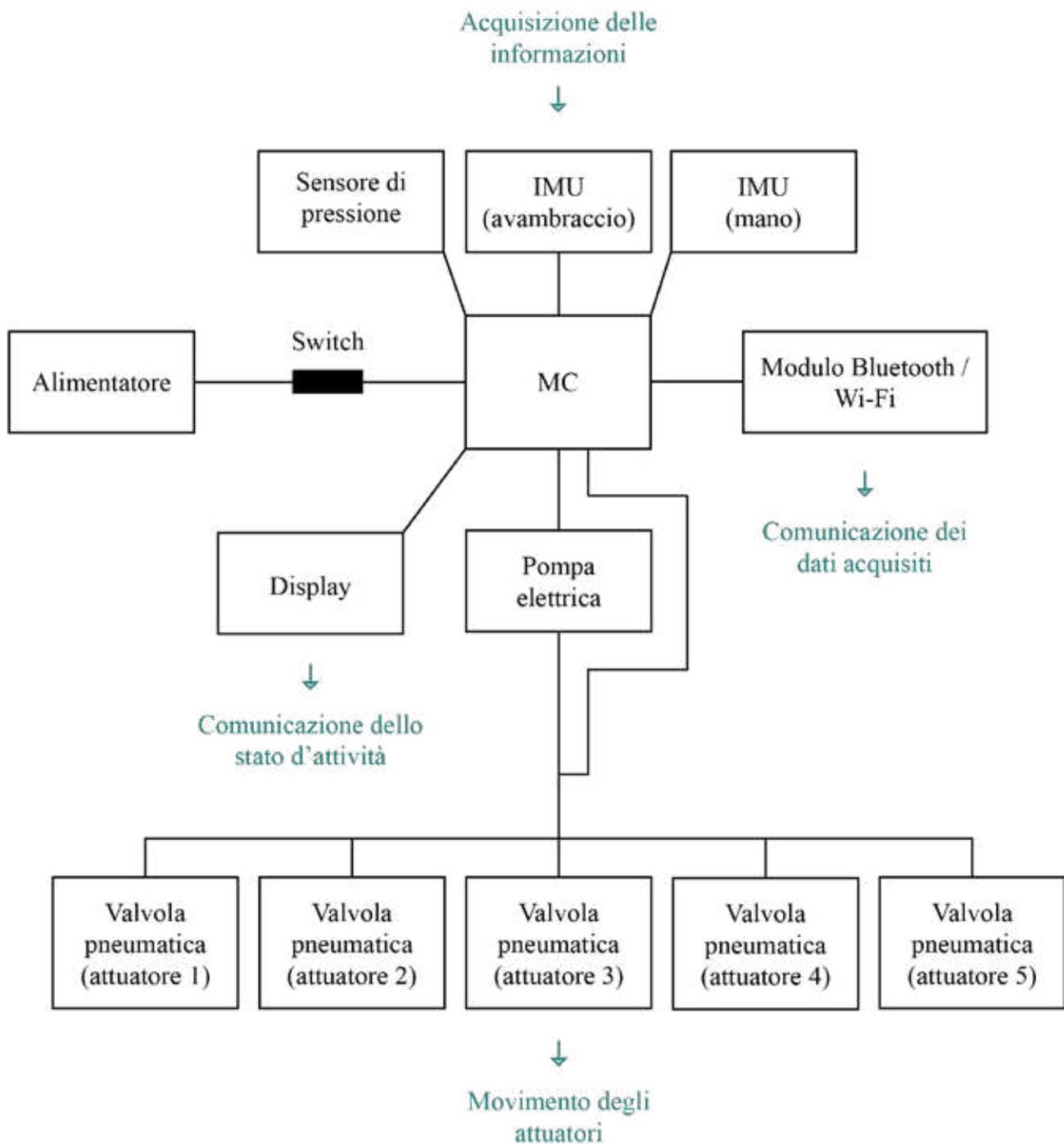
gli attuatori e la componente da tavolo che contiene le parti hardware, collegate tra di loro tramite tubi flessibili attraverso i quali passa l'aria pressurizzata per l'attuazione del movimento.



La zona hardware deve contenere quindi la componentistica necessaria alla realizzazione

dei requisiti di sistema visti precedentemente:





## *Alimentatore*

L'alimentatore, noto anche come alimentatore di energia o alimentatore di potenza, è un dispositivo elettronico essenziale utilizzato per fornire energia elettrica a dispositivi elettronici vari. Esso svolge un ruolo fondamentale nel garantire il funzionamento affidabile e sicuro di una vasta gamma di apparecchiature, dalle più piccole ai sistemi di alimentazione di grandi dimensioni.

Dal punto di vista tecnico, un alimentatore converte una forma di energia elettrica in un'altra forma di energia elettrica compatibile con le specifiche di funzionamento del dispositivo target. Questa conversione avviene attraverso l'uso di componenti elettronici quali trasformatori, raddrizzatori, condensatori e regolatori di tensione. L'alimentatore è progettato per accettare una sorgente di energia elettrica di ingresso, che può essere una tensione alternata (AC) dalla rete elettrica domestica o una tensione continua (DC) da una batteria o da un'altra fonte di alimentazione.

L'alimentatore è caratterizzato da diversi parametri fondamentali, tra cui la tensione di uscita, la corrente di uscita, l'efficienza energetica e la stabilità della tensione. La tensione di uscita è la tensione elettrica fornita dall'alimentatore al

dispositivo destinatario, mentre la corrente di uscita rappresenta la quantità di corrente elettrica fornita al dispositivo. L'efficienza energetica è un parametro cruciale che indica quanto efficientemente l'alimentatore converte l'energia elettrica di ingresso in energia elettrica utilizzabile dal dispositivo target. Infine, la stabilità della tensione si riferisce alla capacità dell'alimentatore di mantenere una tensione di uscita costante anche in presenza di variazioni della tensione di ingresso o dei carichi applicati.

Gli alimentatori sono disponibili in una varietà di forme e configurazioni, tra cui alimentatori lineari, alimentatori switching, alimentatori lineari regolati, alimentatori switching regolati e alimentatori ad alta frequenza.

In sintesi, l'alimentatore rappresenta un elemento cruciale nell'ecosistema dell'elettronica moderna, garantendo il funzionamento affidabile e sicuro di una vasta gamma di dispositivi elettronici attraverso la fornitura di energia elettrica adeguata e stabile. Nel caso presentato in questo elaborato, l'alimentatore è quel componente che garantisce l'accesso all'energia elettrica da parte del dispositivo, necessario al suo corretto funzionamento.



## *Sensore di pressione*

Il sensore di pressione è un dispositivo elettronico progettato per misurare la pressione esercitata su di esso e convertirla in un segnale elettrico proporzionale. Questo tipo di sensore è ampiamente utilizzato in una vasta gamma di settori, tra cui l'automotive, l'industria manifatturiera, l'aerospaziale, il biomedicale e molti altri, per monitorare e controllare la pressione in vari ambienti e applicazioni.

Dal punto di vista tecnico, il sensore di pressione sfrutta principi fisici come l'effetto piezoresistivo, l'effetto piezoelettrico o l'effetto capacitivo per misurare la pressione applicata su di esso. Ad esempio, nel caso dell'effetto piezoresistivo, il sensore utilizza materiali piezoresistivi che modificano la loro resistenza elettrica in risposta alla deformazione causata dalla pressione. Questa variazione di resistenza è quindi convertita in un segnale elettrico, di solito una tensione o una corrente, proporzionale alla pressione rilevata.

I sensori di pressione possono essere di diversi tipi, tra cui sensori di pressione assoluta, sensori di pressione relativa e sensori di pressione differenziale, a seconda dell'ambito di applicazione e dei requisiti specifici. I sensori di pressione assoluta misurano la pressione rispetto al vuoto

assoluto, mentre i sensori di pressione relativa misurano la differenza tra la pressione misurata e la pressione atmosferica locale ed i sensori di pressione differenziale misurano la differenza di pressione tra due punti distinti.

La selezione del sensore di pressione appropriato dipende dalle esigenze specifiche dell'applicazione, incluse la gamma di pressione da misurare, la precisione richiesta, la resistenza alle condizioni ambientali, le dimensioni fisiche e il costo. Alcuni sensori di pressione sono progettati per operare in condizioni ambientali estreme, come temperature elevate o basse, o in ambienti corrosivi, mentre altri sono più adatti per applicazioni ad alta precisione. Nel caso del dispositivo presentato in questo elaborato, viene selezionato il sensore di pressione relativa.

In conclusione, il sensore di pressione è un dispositivo fondamentale per misurare e monitorare la pressione in una vasta gamma di applicazioni e settori industriali. La sua capacità di convertire la pressione fisica in un segnale elettrico lo rende un componente essenziale per il controllo e la regolazione dei processi, nonché per la raccolta di dati critici per l'analisi e il monitoraggio delle prestazioni dei sistemi, come in questo caso.



## *IMU*

Un'IMU, acronimo di Inertial Measurement Unit, è un dispositivo elettronico utilizzato per misurare e registrare l'accelerazione lineare e l'accelerazione angolare di un oggetto in movimento, nonché l'orientamento rispetto a un sistema di riferimento inerziale. L'IMU è costituita da un insieme di sensori inerziali, tra cui accelerometri e giroscopi, che permettono di ottenere informazioni dettagliate sul movimento e l'orientamento di un oggetto nello spazio tridimensionale.

L'accelerometro è un sensore che misura l'accelerazione lineare lungo uno o più assi. Utilizza principi fisici come l'effetto piezoelettrico o l'effetto capacitivo per rilevare le variazioni di accelerazione. L'accelerometro fornisce informazioni sulla velocità di cambiamento della velocità dell'oggetto, consentendo di calcolare la sua posizione e traiettoria nel tempo.

Il giroscopio, invece, è un sensore che misura la velocità angolare o la velocità di rotazione attorno a uno o più assi. Utilizza principi fisici come il momento angolare o l'effetto Coriolis per rilevare le variazioni di velocità angolare. Il giroscopio fornisce informazioni sull'orientamento dell'oggetto nello spazio, consentendo di determinare la sua direzione e l'angolo di inclinazione rispetto a un sistema di riferimento inerziale.

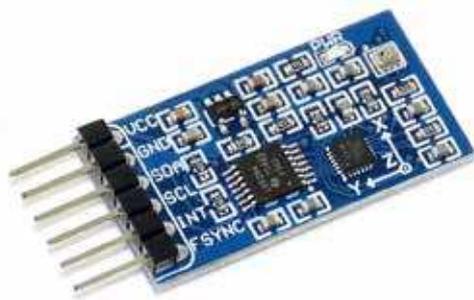
L'IMU integra i dati provenienti dagli accelerometri e dai giroscopi per calcolare in tempo reale l'accelerazione lineare, l'accelerazione angolare e l'orientamento dell'oggetto. Queste informazioni sono utilizzate in una vasta gamma di applicazioni, tra cui la navigazione inerziale, il controllo di volo, la robotica, la realtà virtuale e aumentata, e la misurazione dell'atti-

vità fisica umana.

La precisione e l'affidabilità dell'IMU dipendono dalla qualità dei sensori inerziali utilizzati, nonché dalla precisione degli algoritmi di fusione sensoriale impiegati per integrare e elaborare i dati provenienti dagli accelerometri e dai giroscopi. Gli sviluppi recenti nella tecnologia dei sensori e nell'elaborazione dei segnali hanno portato a miglioramenti significativi nelle prestazioni delle IMU, consentendo applicazioni sempre più avanzate e precise.

Nel caso del dispositivo presentato in questo elaborato, vengono utilizzati due componenti IMU, uno posto sull'avambraccio e l'altro posto sul lato dorsale dell'utente, alla fine dell'attuatore destinato alla flessione. Questa scelta deriva dalla necessità di dover calcolare il movimento del polso non secondo un sistema di riferimento assoluto, che potrebbe essere poco preciso e non veritiero, ma secondo il posizionamento dell'avambraccio: il polso infatti, muovendosi, causa il movimento conseguente della mano, sempre relativo al movimento dell'avambraccio, considerato come un vincolo in questo caso.

In conclusione, l'IMU rappresenta uno strumento fondamentale per la misurazione e il monitoraggio del movimento e dell'orientamento in una vasta gamma di contesti applicativi. Grazie alla sua capacità di fornire informazioni dettagliate sull'accelerazione e la velocità angolare di un oggetto, l'IMU è ampiamente utilizzata in settori come l'aviazione, la navigazione marittima, la robotica, l'automazione industriale e molte altre.



## *Microprocessore*

Il microprocessore è un'unità di elaborazione centrale (CPU) di un sistema informatico che esegue le istruzioni di programma e coordina le attività di elaborazione dei dati. È considerato il "cuore" del computer in quanto gestisce l'elaborazione dei dati, l'esecuzione dei programmi e il controllo delle operazioni dell'intero sistema.

Il microprocessore è composto da diverse unità funzionali, tra cui l'unità di controllo (CU), l'unità aritmetico-logica (ALU), la memoria cache e i registri interni. L'unità di controllo coordina l'esecuzione delle istruzioni, determinando l'ordine e il timing delle operazioni da eseguire. L'unità aritmetico-logica esegue le operazioni matematiche e logiche, come l'addizione, la sottrazione, la moltiplicazione e la divisione, sui dati in ingresso. La memoria cache è una memoria veloce utilizzata per memorizzare temporaneamente i dati e le istruzioni più frequentemente utilizzati, riducendo così il tempo di accesso alla memoria principale. I registri interni sono piccole memorie ad alta velocità utilizzate per immagazzinare temporaneamente dati e istruzioni durante l'elaborazione.

Il microprocessore opera seguendo un ciclo di istruzioni, noto come ciclo di fetch-decode-execute. In questo ciclo, l'unità di controllo recu-

pera un'istruzione dalla memoria principale, la decodifica per determinare l'operazione da eseguire e quindi esegue l'operazione utilizzando l'unità aritmetico-logica e altri componenti interni. Questo processo si ripete ciclicamente fino al completamento del programma.

Negli ultimi decenni, i microprocessori hanno subito un'evoluzione significativa, con continue innovazioni in termini di velocità, potenza di calcolo, efficienza energetica e integrazione di funzionalità avanzate come la virtualizzazione, la sicurezza hardware e l'intelligenza artificiale. Queste innovazioni hanno contribuito a rendere i microprocessori componenti chiave in una vasta gamma di dispositivi elettronici, inclusi computer personali, smartphone, tablet, dispositivi IoT e sistemi embedded.

In sintesi, il microprocessore rappresenta un elemento fondamentale nella progettazione e nell'implementazione di sistemi informatici e dispositivi elettronici, svolgendo un ruolo cruciale nell'esecuzione delle istruzioni di programma, nell'elaborazione dei dati e nel controllo delle operazioni del sistema. La sua evoluzione continua ha contribuito a promuovere l'innovazione e l'avanzamento tecnologico in molteplici settori.



## *Minicompressore*

Un minicompressore è un dispositivo elettrico o a motore progettato per comprimere aria o gas in piccole quantità. Rispetto ai compressori tradizionali, che sono di dimensioni più grandi e utilizzati per applicazioni industriali o commerciali su larga scala, i minicompressori sono più compatti e portatili, spesso utilizzati in applicazioni domestiche, hobbistiche o per piccoli lavori di manutenzione e gonfiaggio.

I minicompressori possono essere alimentati da diverse fonti di energia, tra cui elettricità, batterie ricaricabili o motori a combustione interna. Utilizzano un meccanismo di compressione, che può essere a pistoni, a palette, a membrana o a vite, per aumentare la pressione dell'aria o del gas all'interno di un serbatoio o di un contenitore.

Questi dispositivi sono dotati di diverse caratteristiche e specifiche tecniche, come la portata dell'aria compressa (misurata in litri al minuto o piedi cubi al minuto), la pressione massima di esercizio (misurata in bar o psi), il livello di rumore generato durante il funzionamento, e le

dimensioni fisiche del dispositivo.

I minicompressori sono utilizzati in una vasta gamma di applicazioni, tra cui il gonfiaggio di pneumatici, palloni, materassini e altri oggetti gonfiabili; la pulizia e la soffiatura di polvere, detriti o foglie; la verniciatura e la spruzzatura di vernici o finiture; e altre attività di manutenzione e lavori hobbistici.

La scelta del minicompressore appropriato dipende dalle esigenze specifiche dell'applicazione, incluse le dimensioni dell'oggetto da gonfiare o pulire, la pressione e la portata dell'aria richiesta, la mobilità e la portabilità del dispositivo, e il budget disponibile.

In conclusione, il minicompressore è un dispositivo versatile e pratico utilizzato per comprimere aria o gas in piccole quantità, ideale per applicazioni domestiche, hobbistiche o di piccola scala. Grazie alla loro portabilità e alle varie funzionalità offerte, i minicompressori sono strumenti utili in molteplici contesti, contribuendo a semplificare e migliorare una vasta gamma di attività e lavori di manutenzione.



## *Valvole pneumatiche*

Una valvola pneumatica è un dispositivo utilizzato per controllare il flusso di aria compressa in un sistema pneumatico. Queste valvole sono fondamentali nel campo dell'automazione industriale, dove vengono impiegate per attivare e disattivare cilindri pneumatici, motori pneumatici, attuatori e altri componenti pneumatici, consentendo il controllo preciso e la regolazione delle operazioni automatizzate.

Dal punto di vista tecnico, una valvola pneumatica è composta da diversi componenti principali, tra cui il corpo della valvola, che ospita gli elementi di controllo, come pistoni, diaframmi o spool, e le connessioni pneumatiche per il collegamento del sistema di alimentazione d'aria e dei dispositivi di output. All'interno del corpo della valvola sono presenti anche i passaggi dell'aria e le sedi di tenuta necessarie per il corretto funzionamento del dispositivo.

Le valvole pneumatiche possono essere di diversi tipi, in base al loro principio di funzionamento e alla configurazione interna. Alcuni esempi comuni includono le valvole a due vie, a tre vie, a quattro vie e a cinque vie, nonché le valvole direzionali, di blocco, di regolazione di pressione e di sequenza. Ogni tipo di valvola è progettato per svolgere una specifica funzione nel sistema pneumatico, come l'apertura e la chiusura del flusso d'aria, la regolazione della direzione del flusso, il blocco del flusso in determinate condizioni o la regolazione della

pressione dell'aria.

Le valvole pneumatiche possono essere attuate manualmente, mediante l'uso di leve, manopole o pulsanti, o automaticamente, attraverso l'uso di solenoidi, attuatori pneumatici o altri dispositivi di controllo. Questo consente un'ampia gamma di possibilità di controllo e automazione nei processi industriali.

In questo caso, viene selezionata la valvola pneumatica bidirezionale: nota anche come valvola a due vie, è progettata per controllare il flusso d'aria in due direzioni, generalmente denominate "via di alimentazione" e "via di scarico". Questo tipo di valvola consente al flusso d'aria di passare attraverso di essa in una sola delle due direzioni, a seconda della posizione della valvola. È comunemente utilizzata per controllare l'accesso di aria a un singolo attuatore o dispositivo pneumatico, e pertanto è necessario considerare il numero delle valvole uguale a quello degli attuatori pneumatici.

In sintesi, la valvola pneumatica è un componente essenziale nei sistemi pneumatici industriali, consentendo il controllo preciso e affidabile del flusso d'aria per l'automazione di processi e operazioni. Grazie alla loro versatilità, affidabilità e facilità d'uso, le valvole pneumatiche sono ampiamente impiegate in una vasta gamma di settori, contribuendo a migliorare l'efficienza e la produttività nei processi industriali e nelle applicazioni di automazione.



## *Display*

Il display è un dispositivo di visualizzazione elettronico utilizzato per visualizzare testo, immagini, grafici e altre informazioni visive in formato digitale. È un componente fondamentale in una vasta gamma di dispositivi elettronici, tra cui computer, smartphone, televisori, monitor, orologi digitali, strumenti di misura e molti altri.

Dal punto di vista tecnico, il display è composto da una matrice di piccoli elementi di visualizzazione, noti come pixel, organizzati in righe e colonne. Ogni pixel può essere attivato o disattivato indipendentemente dagli altri per creare testo e immagini complesse. I display moderni utilizzano una varietà di tecnologie per generare l'immagine, tra cui display a cristalli liquidi (LCD), display a diodi organici emissivi (OLED), display a retroilluminazione a LED, display al plasma e altri.

Tra le varie tipologie di display, i display a cristalli liquidi (LCD) sono i più diffusi e ben consolidati nel mercato. Questi display sfruttano le proprietà ottiche dei cristalli liquidi per modulare la luce e generare l'immagine desiderata. Gli LCD sono noti per la loro efficienza energetica, la capacità di visualizzare testo e immagini con elevata nitidezza e il costo relativamente contenuto.

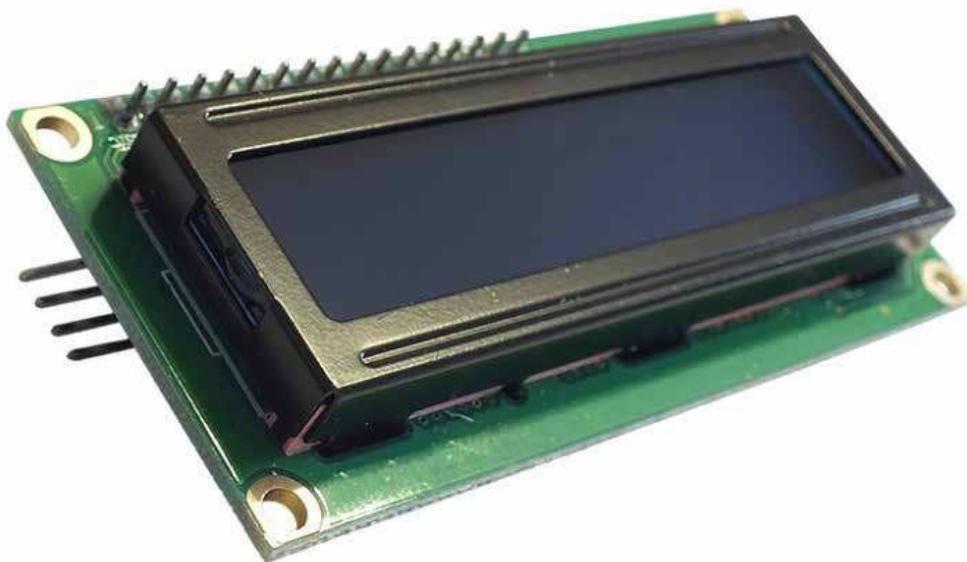
I display OLED, d'altra parte, sono caratteriz-

zati da una migliore qualità dell'immagine, colori più vivaci e neri più profondi rispetto agli LCD, grazie alla loro capacità di emettere luce propria. Tuttavia, sono generalmente più costosi e possono presentare problemi di durata nel tempo.

Indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, i display sono disponibili in una vasta gamma di dimensioni, risoluzioni, rapporti di aspetto e caratteristiche aggiuntive, come il touchscreen, la retroilluminazione regolabile, la capacità di visualizzazione a colori e molto altro ancora.

La scelta del display appropriato dipende dalle esigenze specifiche dell'applicazione, inclusi requisiti di visualizzazione, budget, dimensioni fisiche, consumo energetico e altre considerazioni tecniche. I display sono essenziali per consentire l'interazione visiva tra l'utente e il dispositivo e svolgono un ruolo cruciale nell'esperienza complessiva dell'utente con il prodotto elettronico.

In sintesi, il display è un componente chiave nei dispositivi elettronici moderni, fornendo un'interfaccia visiva per la visualizzazione di informazioni digitali. Grazie alla loro versatilità e alle varie tecnologie disponibili, i display contribuiscono a migliorare l'usabilità, la funzionalità e l'estetica di una vasta gamma di dispositivi elettronici.



# *11*

Selezione dei  
materiali

Per quanto riguarda la selezione dei materiali impiegati nella produzione del dispositivo, vengono analizzati i materiali principali sia per

la produzione del tutore indossabile, sia per la produzione del case di contenimento hardware per la componentistica elettronica.

## **Silicone**

Come materiale principale per la produzione del tutore e degli attuatori pneumatici viene selezionato il silicone prodotto dall'azienda Smooth On.

Il materiale è indicato nel brevetto trattante gli attuatori Soft Actuators ed anche in alcuni studi successivi. Si tratta di una gomma siliconica catalizzata al platino idonea ad essere utilizzata in dispositivi medici ed ortopedici poiché la sua sicurezza a contatto con la pelle è certificata SkinSafe.

È un materiale morbido, resistente ed estre-

mamente elastico (è disponibile con differenti gradi di elasticità), capace di deformarsi ed allungarsi più volte rispetto alle sue dimensioni originali, senza però strapparsi o presentare distorsioni una volta tornato alla sua forma di partenza.

Per le camere pneumatiche viene optato per uno spessore inferiore a quello utilizzato per la base più rigida e piena.

Il silicone selezionato è inoltre adatto al lavaggio con acqua e sapone.



Fonte: Smooth On, Silicone Ecoflex Superflex

## **ABS**

Per la produzione del case elettronico si opta per l'utilizzo dell'ABS.

Il materiale ABS (Acrilonitrile-butadiene-stirene) è un polimero termoplastico ampiamente utilizzato nell'industria per la produzione di alloggiamenti e custodie per dispositivi elettronici. Questo materiale ha guadagnato popolarità grazie alle sue numerose qualità vantaggiose che lo rendono una scelta ideale per l'ingegneria dei case elettronici. Uno dei principali vantaggi dell'ABS è la sua notevole resistenza e durabilità. Questo materiale è resistente agli urti e alle sollecitazioni meccaniche, il che lo rende ideale per proteggere i componenti interni dei dispositivi elettronici da danni causati da cadute, urti o manipolazioni. La sua resistenza all'abrasione lo rende anche adatto per l'uso in ambienti in cui potrebbe essere esposto a usura. L'ABS è altamente resistente alla corrosione chimica, il che lo rende adatto per l'uso in diverse applicazioni e ambienti. Questa resistenza lo rende adatto per dispositivi elettronici che potrebbero essere esposti a condizioni ambientali avverse o all'interazione con sostanze chimiche. Un altro

vantaggio significativo dell'ABS è la facilità di lavorazione. Questo materiale è ben adattabile al processo di stampaggio ad iniezione, che è uno dei metodi di produzione più comuni per alloggiamenti di dispositivi elettronici. La sua lavorabilità consente la realizzazione di alloggiamenti con forme complesse, dettagli fini e precisione dimensionale, contribuendo a soddisfare le esigenze specifiche di progettazione dei produttori. L'ABS è disponibile in una varietà di colori ed è facilmente verniciabile e stampabile, consentendo una personalizzazione estetica dei case elettronici per soddisfare le esigenze di branding o di design del prodotto. Infine, l'ABS offre una buona stabilità dimensionale, che è importante per garantire un montaggio accurato dei componenti interni nei case elettronici. In conclusione, l'ABS è un materiale versatile e affidabile ampiamente utilizzato per la produzione di alloggiamenti di dispositivi elettronici e che quindi viene in questa sede individuato come ottima soluzione ai fini della progettazione.



*Fonte: Tecaran, ABS*



*12*

Progettazione  
dell'ortesi pneumatica

## 12.1 Parti che compongono l'ortesi pneumatica

Dopo aver analizzato tutti i fattori che concorrono alla definizione del dispositivo inteso sia in termini di funzionamento, che di componentistica, che di formalità, è possibile procedere con la presentazione tridimensionale del dispositivo che ne definisce l'ipotesi formale.

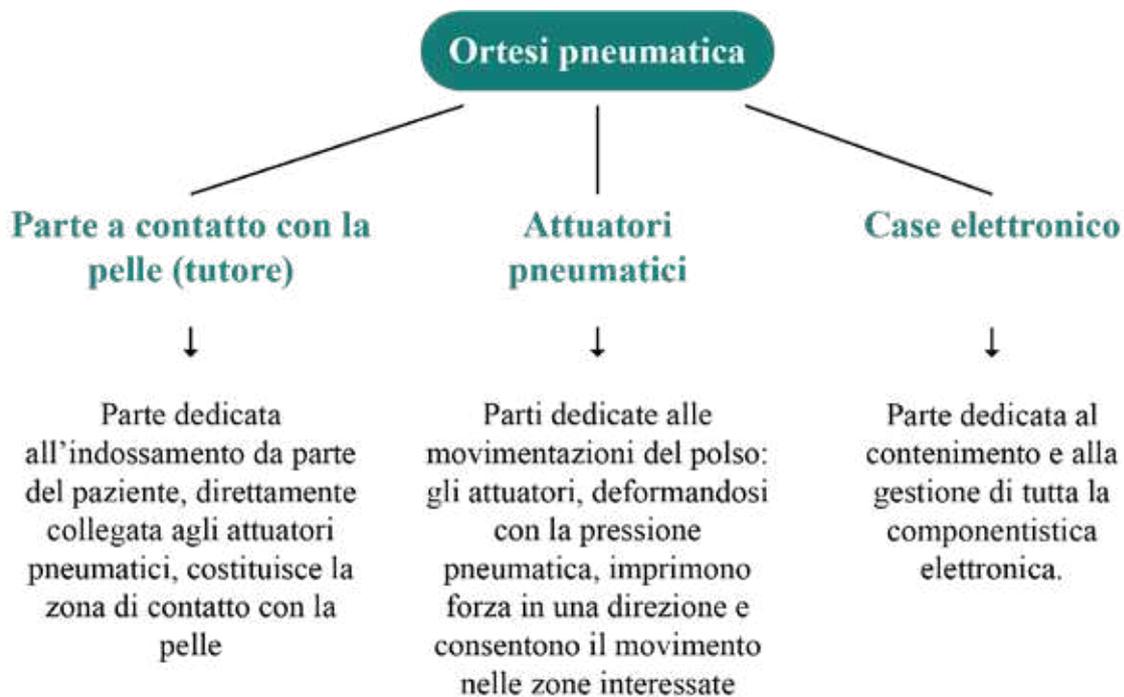
Prima di poter procedere con le ipotesi formali del dispositivo, vengono analizzati alcuni punti fondamentali per la comprensione dello stesso. Il dispositivo è composto da alcune parti, qui riassunte:

- Parte a contatto con la pelle del paziente, individuabile come una sorta di tutore indossabile in silicone

- Attuatori in cui viene immessa l'aria pressurizzata e che si deformano con conseguente movimento del polso del paziente

- Case elettronico da tavolo che contiene la componentistica elettronica

Pertanto, vengono presentate queste parti che compongono il sistema separatamente, per poi presentarlo nella sua interezza.



## 12.2 Tutore

Il tutore indossabile è fatto in silicone rivestito di tessuto antibatterico, sia per una questione di comfort che di igiene, ed è la parte del sistema responsabile dell'alloggio corretto degli attuatori e dell'indossabilità.

Questo viene infatti infilato sulla mano del paziente e non presenta aperture di alcun tipo poiché dato che il silicone è molto flessibile ed elastico, è facile per l'utente poterlo infilare e

sfilare normalmente come accade in tutti gli altri casi presenti ampiamente sul mercato dei tutori in tessuto.

Il tutore può essere inoltre prodotto in due modalità differenti:

- 1. Misure standardizzate**
- 2. Modalità custom-made**



### 12.2.1 Metodologia standardizzata

Nel primo caso, è possibile prevedere delle taglie standard per uomo e per donna, di tipo small, medium e large, così come già accade nel mercato presente oggi: questa scelta porta con sé alcuni vantaggi e svantaggi, che vengono quindi analizzati.

I vantaggi consistono principalmente nel permettere l'acquisto del dispositivo ad un costo più basso e con tempi più ridotti, grazie alla

facile selezione della propria taglia, grazie alla produzione potenzialmente in serie del dispositivo. Lo svantaggio principale è invece quello di non poter garantire la produzione di un dispositivo basato sulla specifica anatomia del paziente che garantisca maggior comfort allo stesso e che sia personalizzato anche in termini di posizionamento specifico degli attuatori.



Lato	Misura	Circonferenza polso (cm)
d/s	XS	14 – 15
d/s	S	15 – 16
d/s	M	16 – 17
d/s	L	17 – 18
d/s	XL	18 – 19
d/s	XXL	19 – 20

Fonte: Misure del polso, Sanitaria Il Giglio

#### Caratteristiche della metodologia standardizzata

- 1 Produzione su misure standard
- 2 Produzione in serie
- 3 Costo più basso rispetto alla metodologia custom - made
- 4 Tempi più ridotti rispetto alla metodologia custom - made
- 5 Mancanza di progettazione specifica per il paziente
- 6 Necessità di avere più prodotti rispetto a quelli che si vendono

## 12.2.2 Metodologia custom - made

Nel secondo caso invece, non è più possibile prevedere delle misure standardizzate, ma ogni dispositivo è prodotto a partire dalla scansione dell'anatomia del paziente, grazie alla quale viene poi generato il modello 3D di riferimento per la produzione custom made.

I vantaggi di questo metodo risiedono nel poter garantire il maggior comfort possibile al paziente e la più alta specificità di utilizzo (che risiede anche nel fatto di poter collocare successivamente gli attuatori secondo le indicazioni del medico), di non poco conto considerando che il dispositivo rientra nella categorizzazione

dei prodotti medicali destinati al benessere del paziente, e nel fatto che la produzione viene fatta on demand, eliminando il potenziale scarto di materiale ed il non utilizzo di prodotti già realizzati ed assemblati.

Gli svantaggi principali di questa metodologia risiedono invece nella considerazione dei tempi di produzione, più lunga chiaramente rispetto al metodo precedente in cui il dispositivo è già pronto per l'acquisto, e nella considerazione dei costi, maggiori poiché prevedono il disegno specifico sull'anatomia del paziente e la produzione singola.

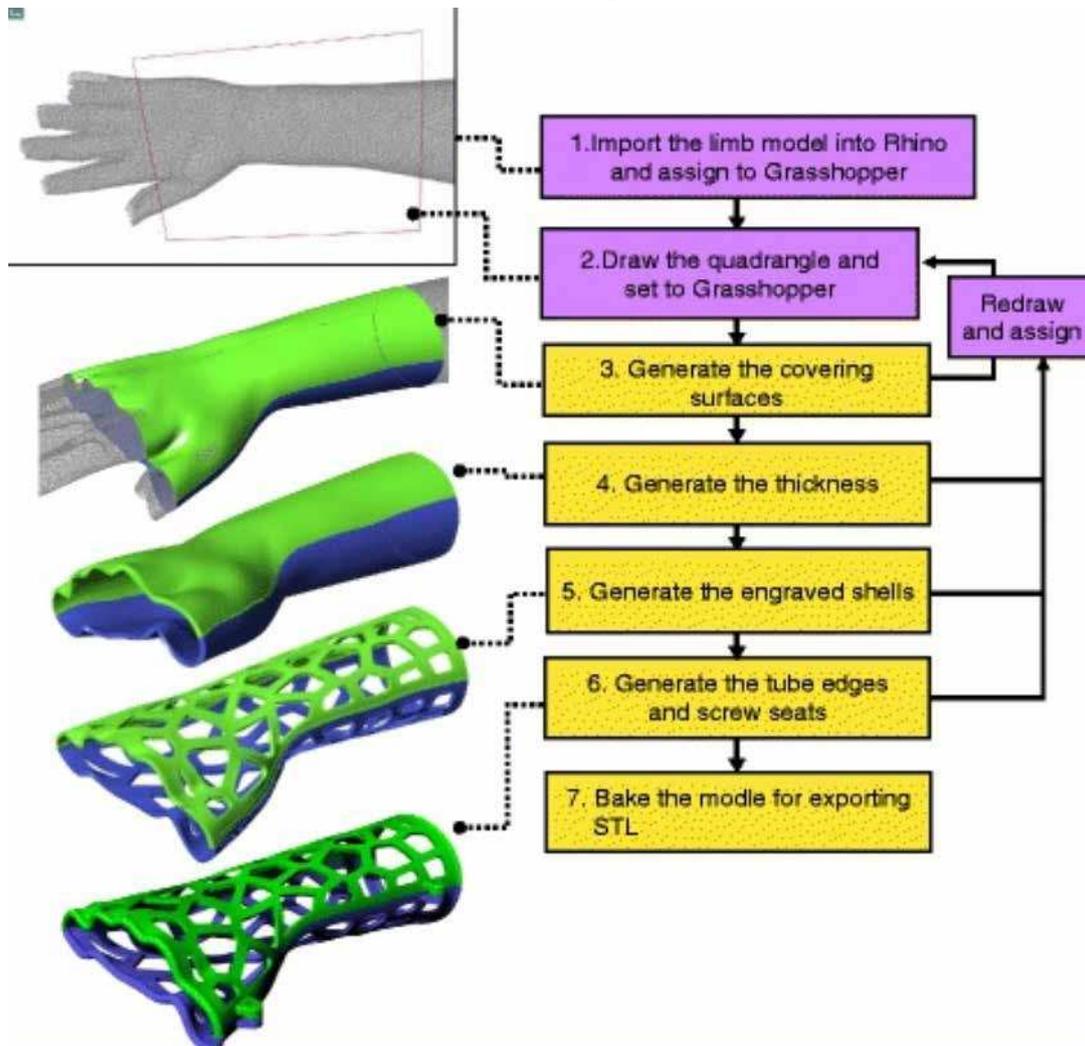
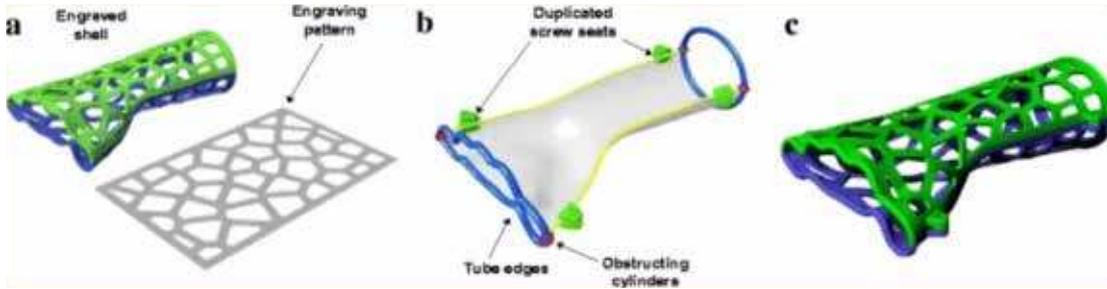
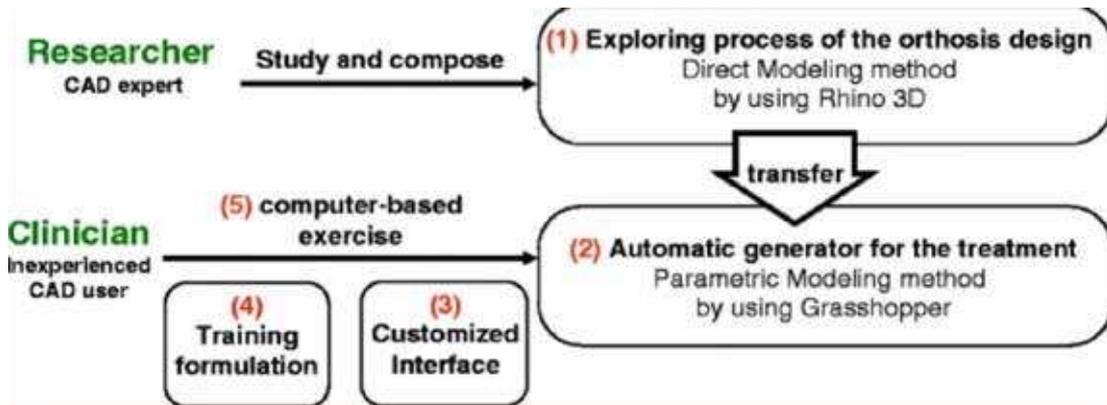
### Caratteristiche della metodologia custom - made

- 1 Produzione specifica per il paziente
- 2 Produzione on demand
- 3 Costo più alto rispetto alla metodologia standardizzata
- 4 Tempi più elevati rispetto alla metodologia standardizzata
- 5 Presenza di progettazione specifica per il paziente
- 6 Il numero di prodotti che si producono è uguale al numero di prodotti che si vendono

Per comprendere meglio il processo appena descritto, viene riportato lo studio "Feasibility study applying a parametric model as the design generator for 3D-printed orthosis for fracture immobilization" di Jianyou Li e Hiroya Tanaka, che descrive proprio il processo di modellazione parametrica custom made per un tutore da polso per l'immobilizzazione a segui-

to di frattura.

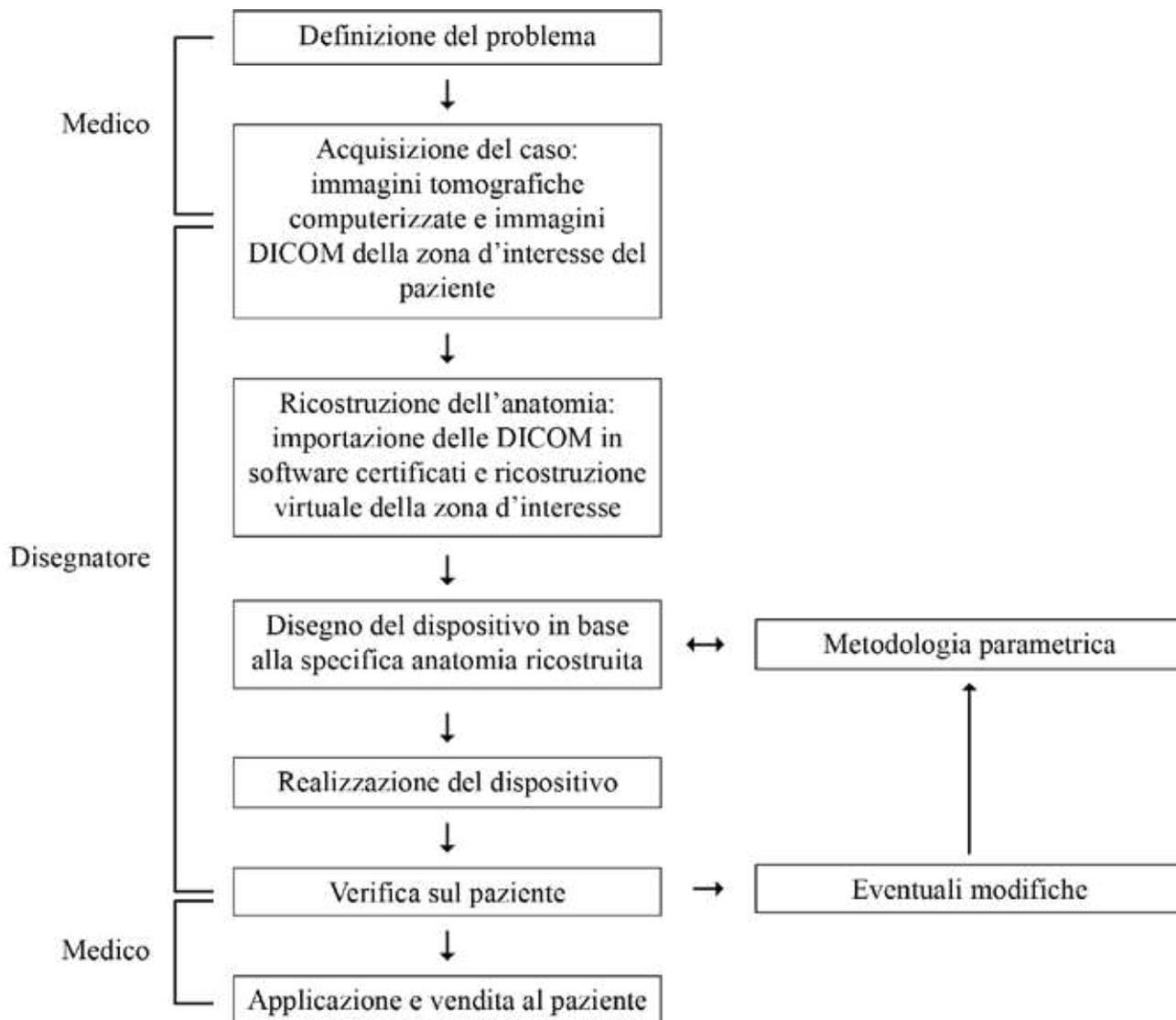
In questo caso, il tutore è prodotto in ABS, ovvero un materiale rigido, grazie alla stampa 3D, e viene indicato il processo di scelta anche della geometria di riferimento per una questione di estetica ed appetibilità del paziente, oltre che di leggerezza e traspirabilità.



Fonte: Progettazione parametrica custom made, Feasibility study applying a parametric model as the design generator for 3D-printed orthosis for fracture immobilization

Per riassumere il processo di produzione custom-made e per individuare gli attori che concorrono all'interno dello stesso, viene di segui-

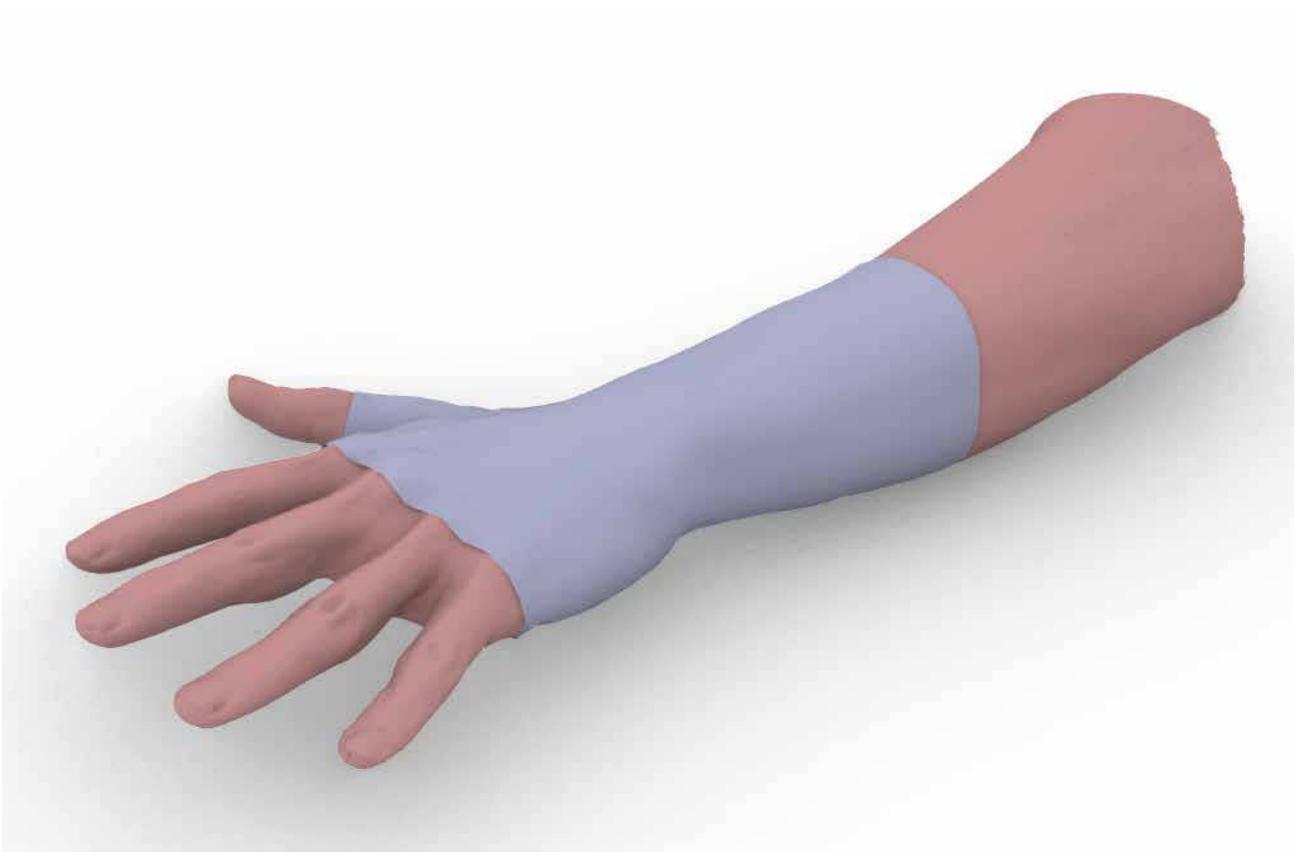
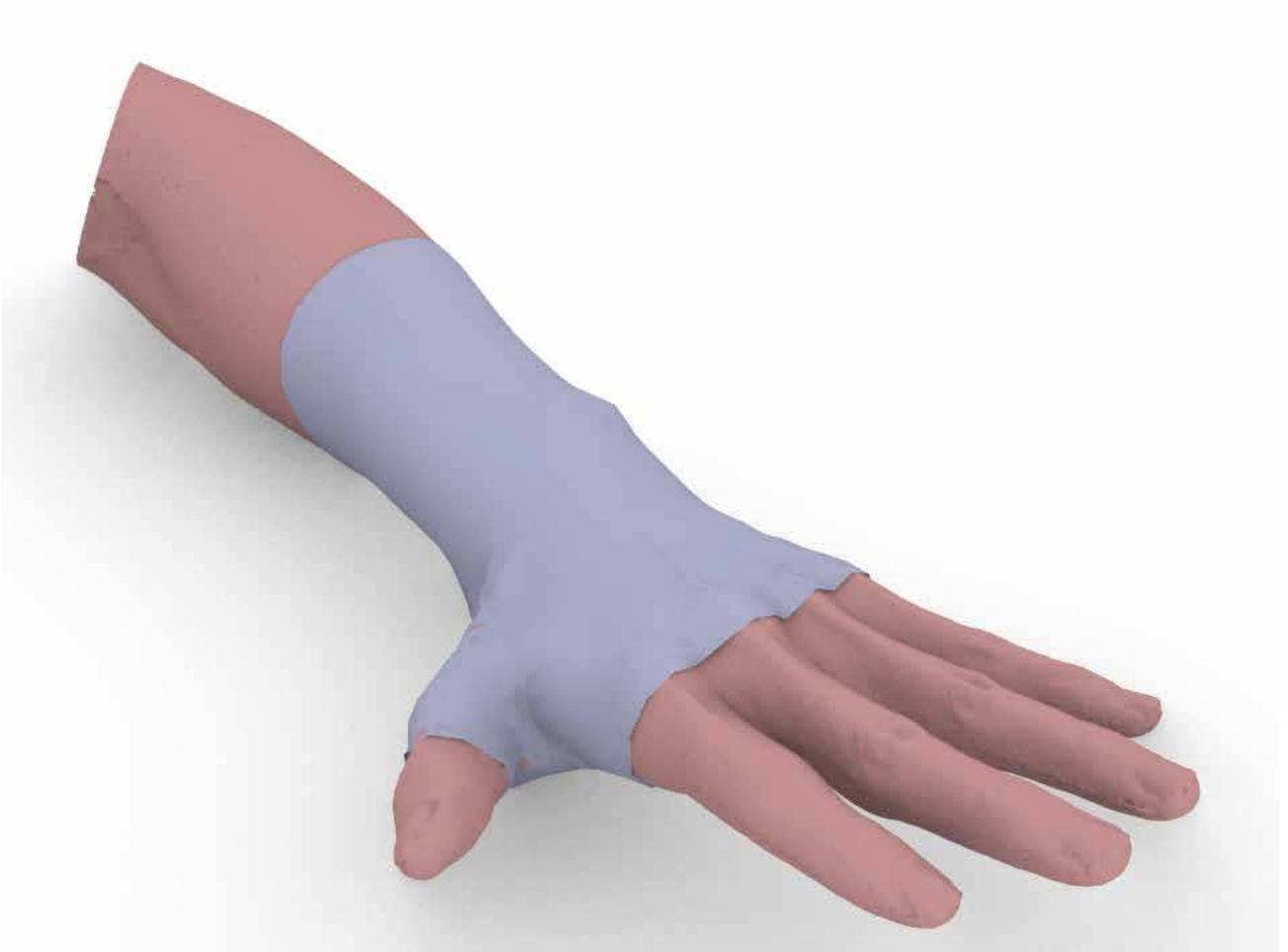
to riportato anche lo schema di processo che lo riassume.



Avendo definito bene i fattori di produzione, che ovviamente influenzano la fase di disegno, viene qui presentato il tutore disegnato in maniera parametrica all'interno del software Grasshopper di Rhinoceros 3D.

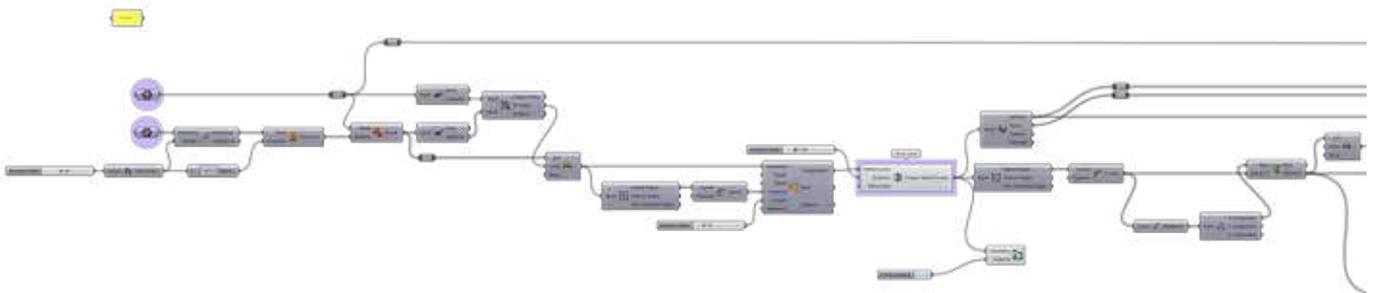
Dopo aver importato il modello tridimensionale del braccio e della mano del paziente preso in esame in maniera ipotetica, è stato possibile, grazie alla progettazione algoritmica, ricavare

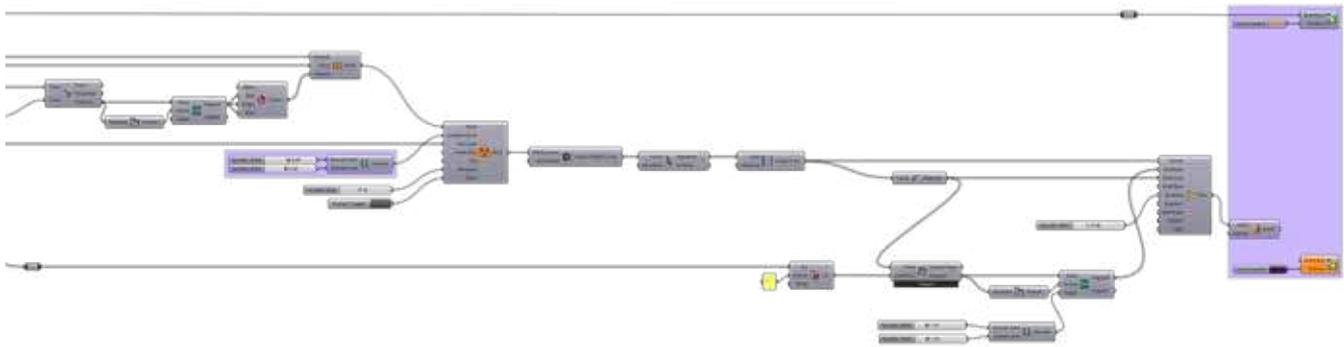
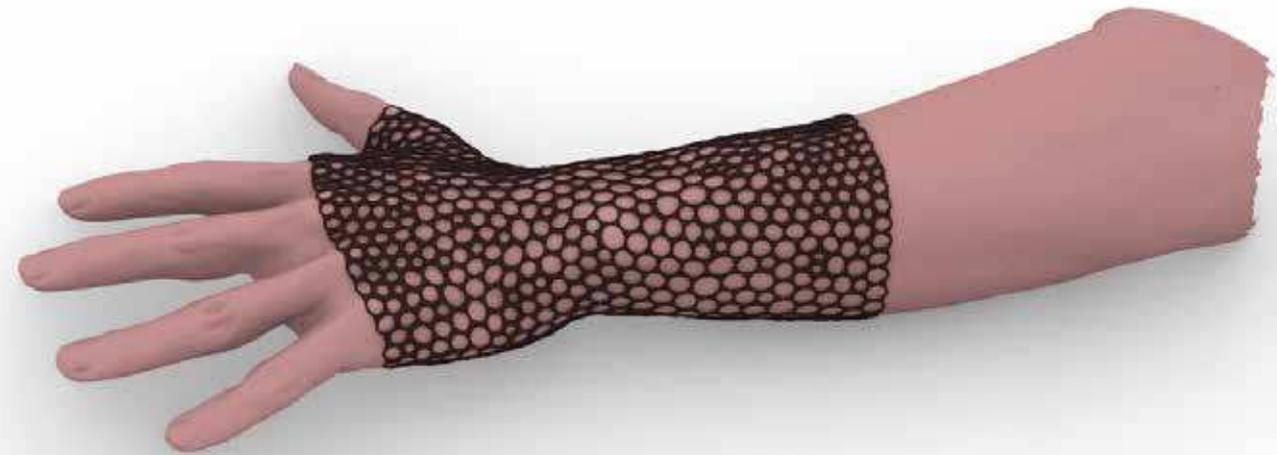
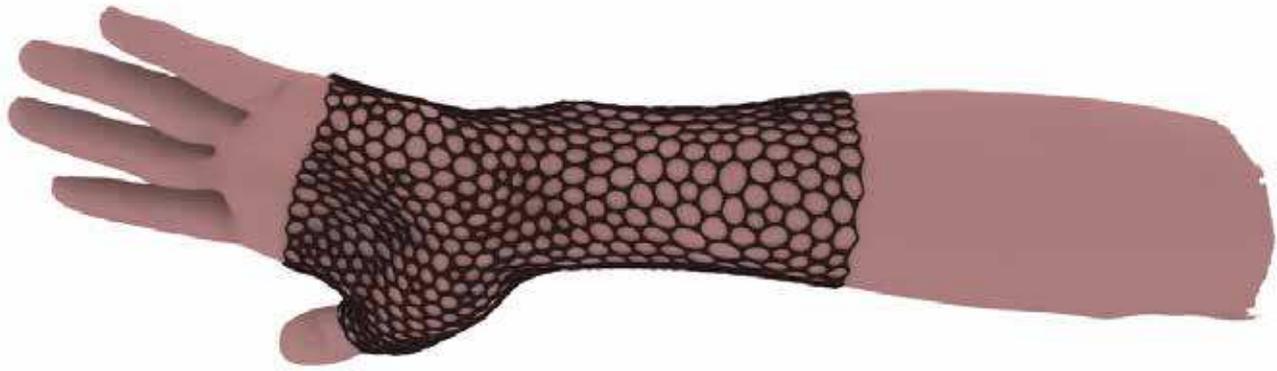
in maniera parametrica la geometria, sempre modificabile quindi sia in termini di lunghezza del tutore (quindi quanta pelle del paziente copre effettivamente), che di spessore (che ne influenza quindi anche la flessibilità e leggerezza), che di curvatura (che descrive quanto il tutore è specificatamente basato sull'anatomia del paziente).



Questa componente del sistema può essere inoltre alleggerita ulteriormente dandogli una trama forata, per permettere una maggiore traspirabilità, una maggiore comodità d'uso, leggerezza e

facilità nell'indossamento. Anche questa parte è stata sviluppata in maniera parametrica, come segue.





## 12.3 Attuatori

Avendo definito il tutore di appoggio, è possibile passare all'analisi degli attuatori: componenti elastici in silicone che gonfiandosi grazie all'aria pressurizzata, causano la loro deformazione ed il conseguente movimento del polso del paziente.

Anche in questo caso, è possibile definire il metodo di produzione come nel caso precedente:

**1- Misure standardizzate**

**2- Modalità custom-made**

I vantaggi e svantaggi sono pressochè gli stessi

in entrambi i casi e non vengono quindi ripetuti, con la considerazione aggiuntiva però che seppur gli attuatori abbiano parametri standard per il loro gonfiaggio e sgonfiaggio, la seconda modalità potrebbe conferire maggior specificità alla realizzazione in quanto anche i parametri dimensionali delle camere d'aria, degli spessori delle pareti e del quantitativo di pressione immessa potrebbero essere personalizzati a seconda dell'utente.

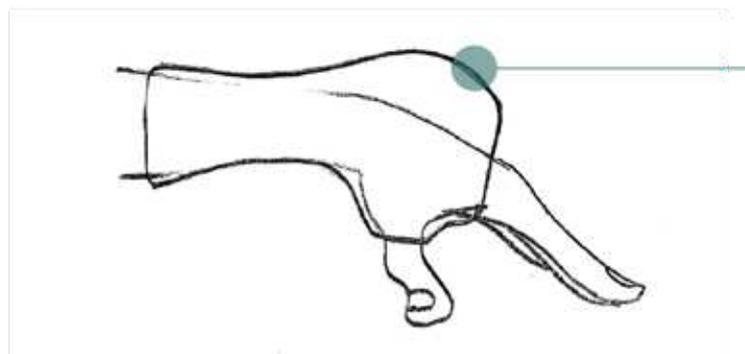
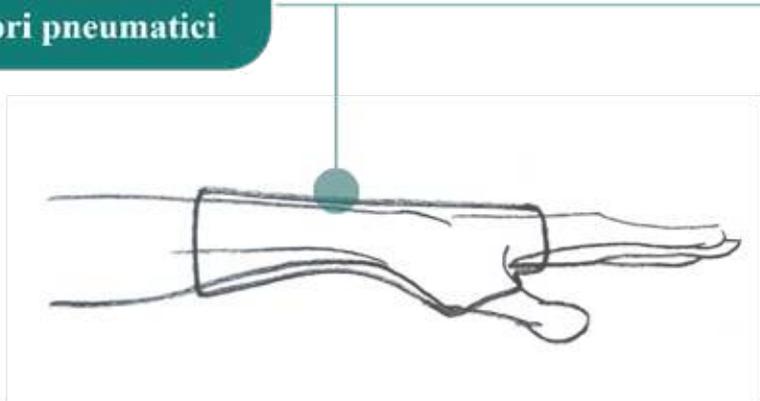


### 12.3.1 Definizione dell'attuatore pneumatico

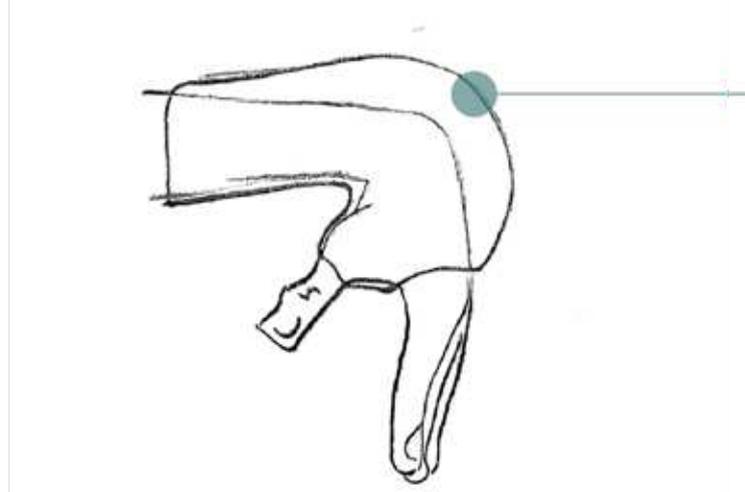
Per poter progettare la protesi pneumatica soft robotica di riabilitazione per il polso, è necessario comprendere il suo funzionamento fino in fondo e per farlo viene definito l'attuatore pneumatico.

Come è stato già visto nel concept progettuale, l'attuatore pneumatico è quel componente dell'ortesi che, attuandosi pneumaticamente, è sottoposto a una deformazione che causa conseguentemente il movimento del polso nella direzione voluta.

#### Ortesi indossabile con attuatori pneumatici



**L'attuatore, gonfiandosi, si deforma gradualmente**



**Causando il movimento del polso nella direzione interessata (in questo caso flessione)**

### 12.3.2 Parametri degli attuatori

Per poter progettare correttamente la protesi pneumatica e gli attuatori che la compongono, è necessario definire alcuni parametri come: il numero di attuatori necessario da avere nell'ortesi ed a cosa è dovuto, la definizione del punto di deformazione e l'individuazione delle zone

sottoposte al movimento, le parti che compongono l'attuatore, le dimensioni che questo può avere e la relativa forma.

Vengono quindi di seguito analizzati tali parametri nella fase di progettazione.

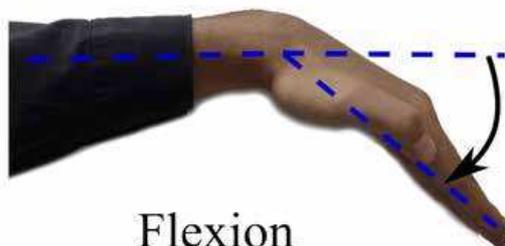
#### ***Punto di deformazione***

Come è stato visto nella fase di ricerca, il polso ha 6 possibilità di movimento, come viene ri-

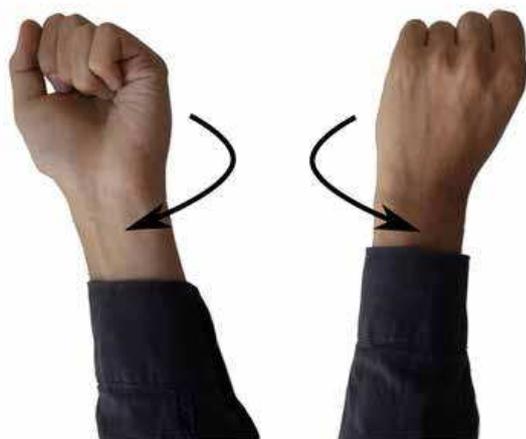
portato in figura: flessione, estensione, adduzione, abduzione, supinazione e pronazione.



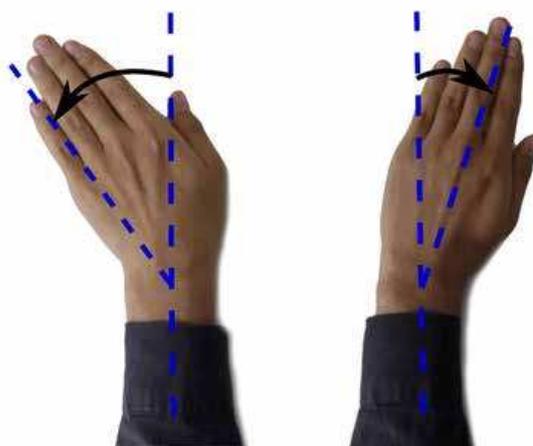
Extension



Flexion



Supination Pronation

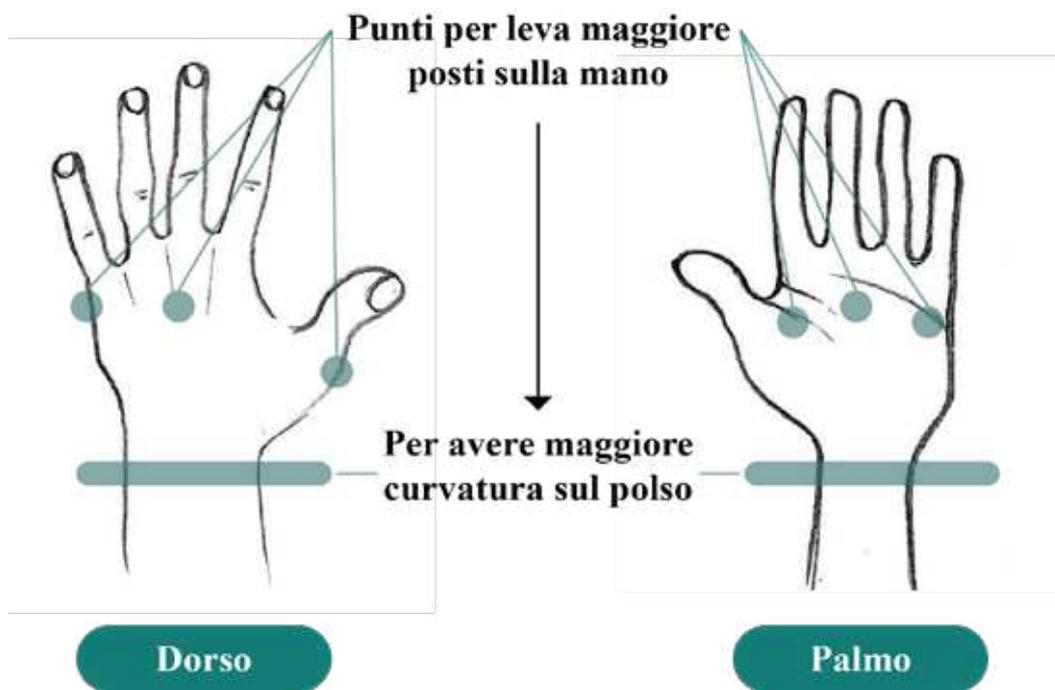
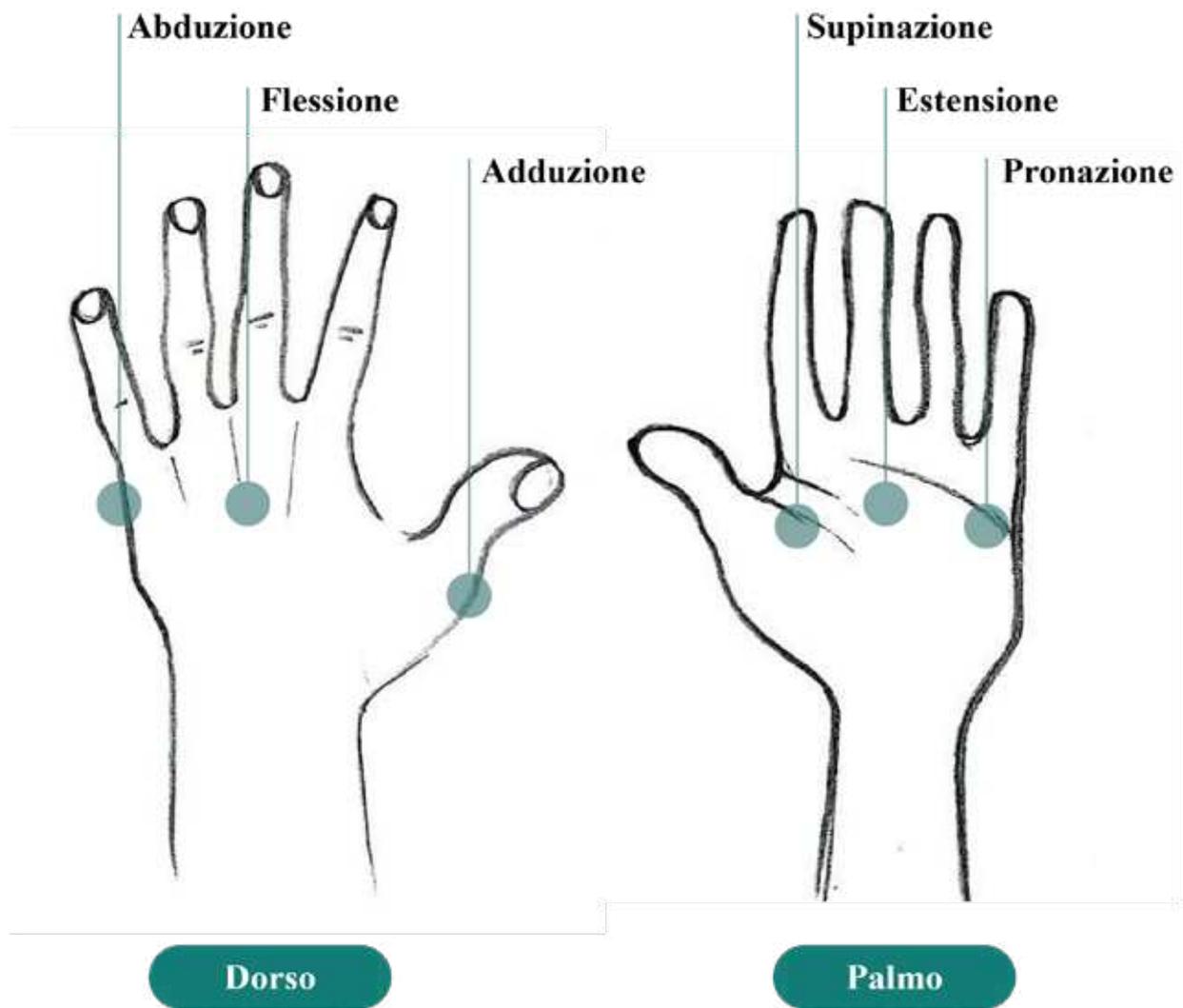


Abduction Adduction

*Fonte: Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-aligning Wrist rehabilitation robot, 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, movimentazioni del polso*

Per consentire la movimentazione da parte dell'ortesi pneumatica, è necessario che gli attuatori abbiano la deformazione massima nella

zona della mano che consente più leva, quindi nelle zone individuate di seguito.



## Numero degli attuatori

Il numero di attuatori è chiaramente direttamente proporzionale al numero di movimenti da far compiere all'utente, poiché ogni attuatore è responsabile, secondo la sua disposizione nello spazio, di uno di questi movimenti.

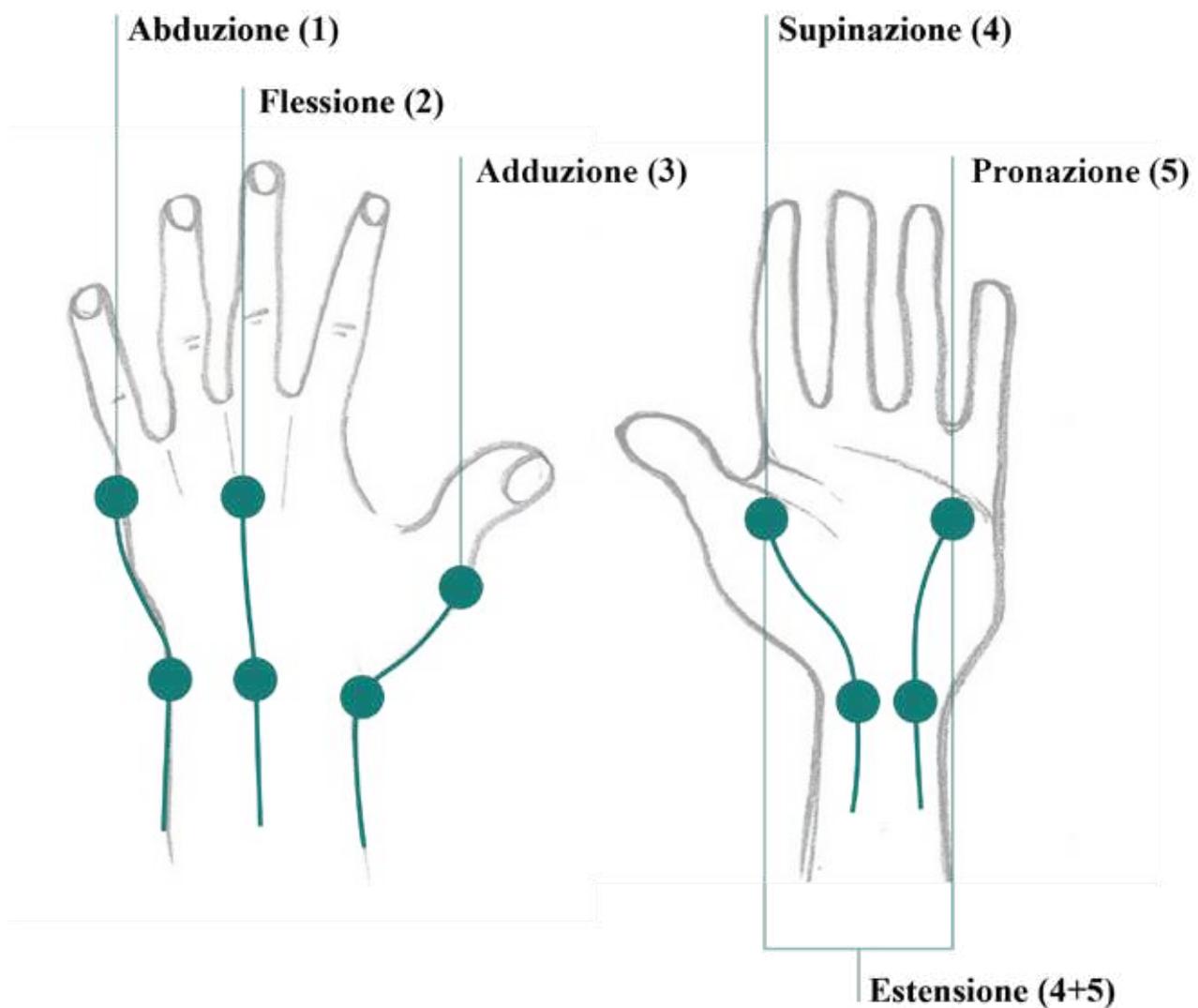
Per questo motivo è importante individuare il posizionamento degli attuatori sulla mano:

- Un attuatore sul dorso per permettere la flessione
- Due attuatori sui lati per permettere l'adduzione e l'abduzione,
- Due attuatori sul palmo per permettere la supinazione e la pronazione e l'estensione (quando entrambi gli attuatori si muovono insieme e con la stessa intensità)

-Un attuatore sul palmo per permettere l'estensione

Tuttavia, utilizzando entrambi gli attuatori sul palmo dedicati sia alla supinazione che alla pronazione attuandoli con la stessa intensità e nel medesimo tempo, è possibile utilizzarli per permettere l'estensione, eliminando la necessità del sesto attuatore.

Si ipotizza quindi che per 6 movimenti possano essere sufficienti 5 attuatori, considerando l'estensione come una conseguenza dell'utilizzo di due attuatori palmari in contemporanea.

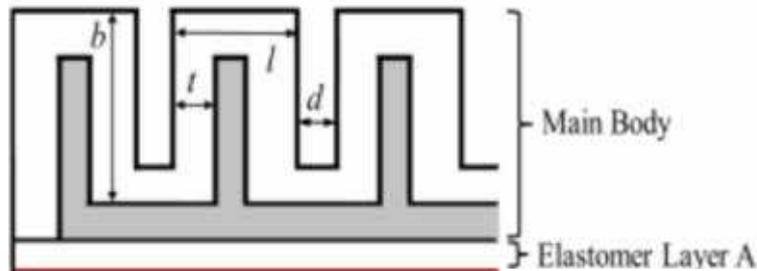


## Funzionamento e dimensionamento dell'attuatore

A proposito dei parametri dimensionali, inoltre, vengono qui riportate le misure degli attuatori brevettati e testati, sui quali molteplici fonti, come analizzato nella fase di ricerca, ne validano e confermano il funzionamento.

È importante ricordare che è possibile perseguire due vie per realizzare l'attuatore morbido:

utilizzando due o più materiali con proprietà di rigidità differenti o utilizzando un unico materiale giocando sugli spessori della geometria. In questo caso, si opta per la seconda strada, e vengono quindi indicati i parametri dimensionali utili.



$$b = 13 \text{ mm}$$

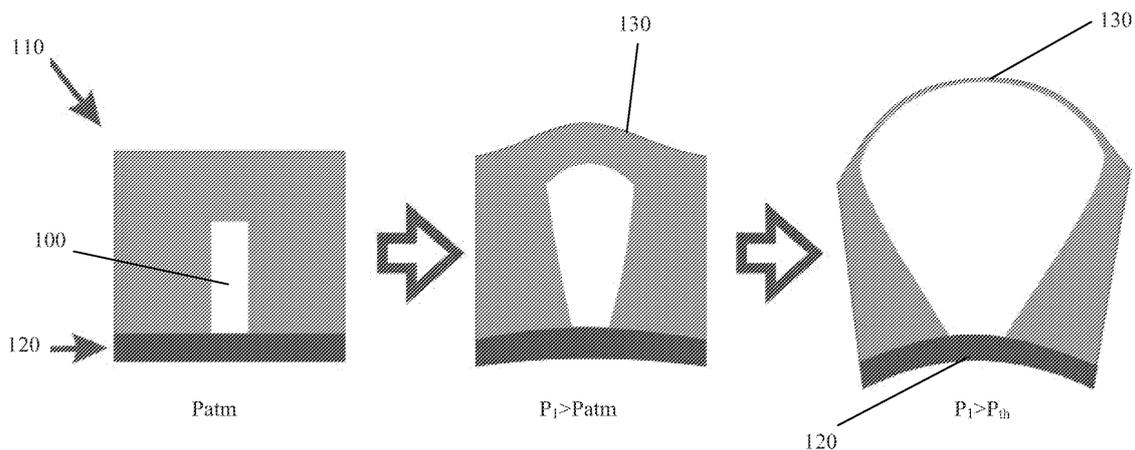
$$t = 1 \text{ mm}$$

$$l = 8 \text{ mm}$$

$$d = 2 \text{ mm}$$

La base può avere misure personalizzate in base a quanta rigidità si vuol conferire alla geometria, in questo caso l'altezza è di 2 mm.

Fonte: Parametri dimensionali attuatore brevettato, *Soft Robotic Toolkit*



Fonte: Funzionamento dell'attuatore brevettato, *flusso d'aria tra i canali, Brevetto Attuatore Pneumatico*

### 12.3.3 Progettazione dell'attuatore

Avendo definito i parametri necessari per la progettazione dell'attuatore pneumatico, che mirano a definirne la logica di funzionamento, il posizionamento ed il dimensionamento, viene qui presentata la progettazione della forma di tali attuatori, la quale, dovendo soddisfare le esigenze individuate nella definizione, deve

essere conforme anche all'indossabilità, all'utilizzo ed all'efficienza del sistema.

La progettazione dell'attuatore pneumatico tuttavia è stata già presentata dal relativo brevetto, e pertanto vengono ipotizzate due vie di progettazione di seguito elencate.



Le due vie di progettazione, come visto nello schema di riferimento, hanno caratteristiche differenti.

L'utilizzo dell'attuatore brevettato analizzato nella fase di ricerca comporta la garanzia del corretto funzionamento; ciò che spinge però a ipotizzare nuove forme geometriche è il fatto che l'attuatore funzionante, così come è, appare abbastanza ingombrante e non è stato progetta-

to specificatamente per gli scopi individuati in questo elaborato.

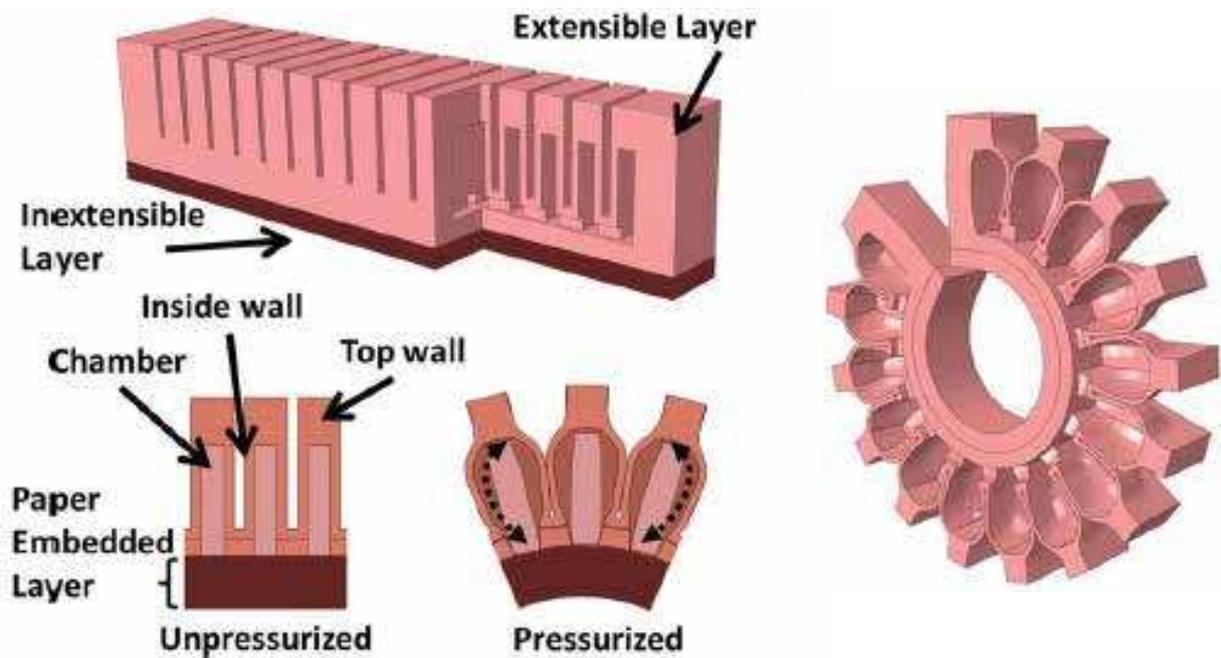
Adattandolo al tutore indossabile visto precedentemente, l'attuatore pneumatico brevettato è funzionale agli scopi, ma vengono tuttavia presentate anche nuove forme nell'ottica di proiettare la ricerca alla specificità degli scopi progettuali.

### Attuatore pneumatico brevettato adattato agli scopi specifici

Viene qui analizzato l'adattamento agli scopi individuati dell'attuatore pneumatico brevettato.

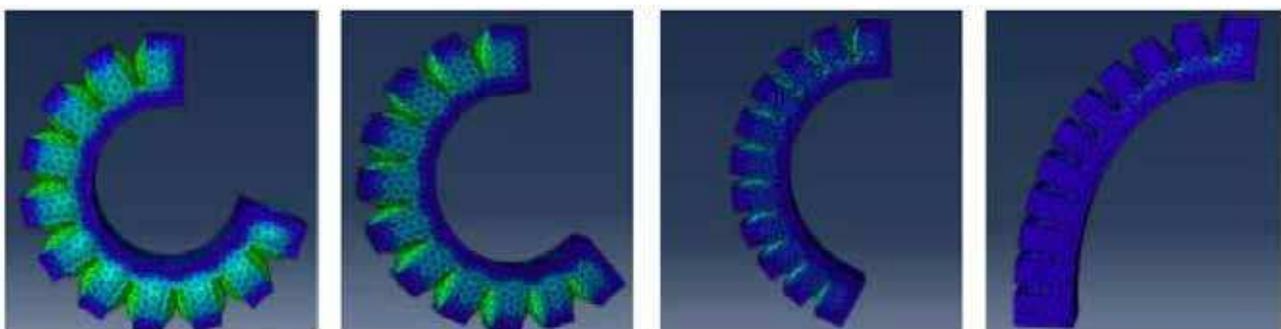
È importante specificare ancora una volta che questa forma geometrica viene utilizzata perché è già stata testata ed ottimizzata per il suo corretto funzionamento. Avendo analizzato la cur-

vatura che assume a seguito della pressurizzazione, si ipotizza che possa essere perfettamente funzionante anche alle necessità della riabilitazione del polso, e pertanto viene posizionato ed adattato alla forma di base precedentemente individuata.

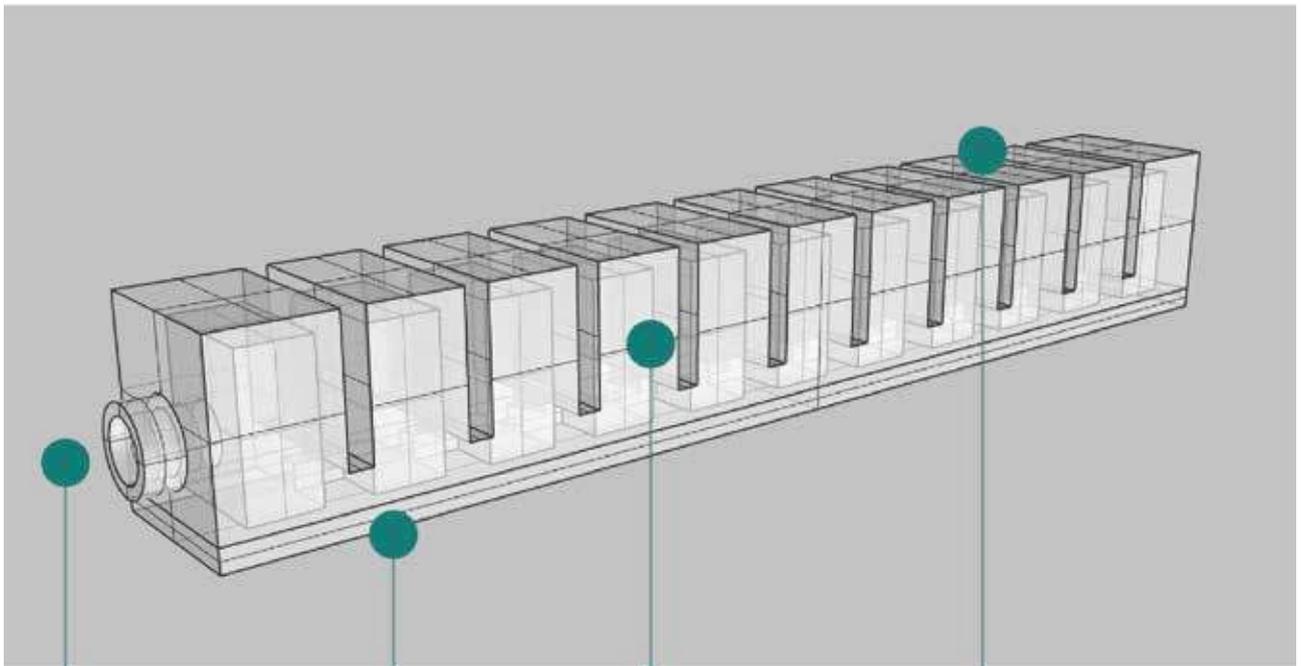


Fonte: *Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly*

Pressure (kPa)	Actuator Bending
10 kPa	95.5°
25 kPa	156.6°
40 kPa	216.0°
55 kPa	251.8°



Fonte: *Soft Robotics in Body Assistance: Intelligent Rehabilitation Device with Soft Continuum Actuation*

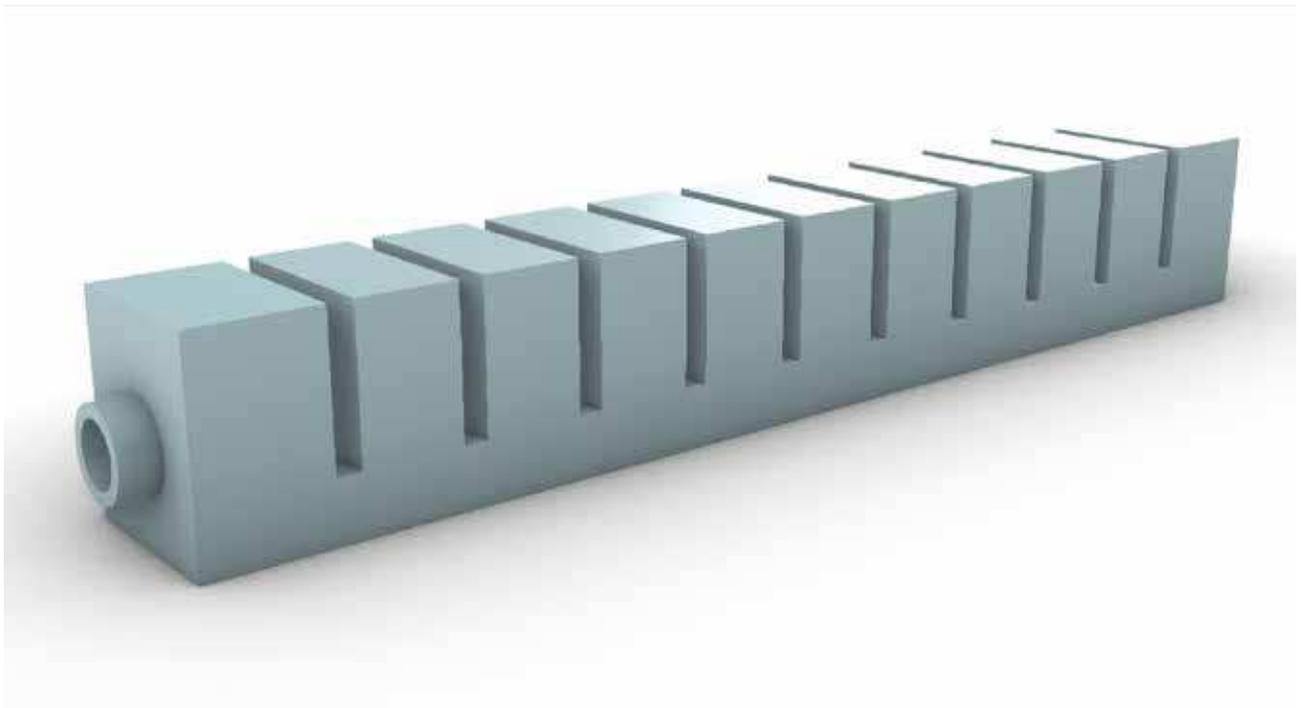


**Ingresso  
dell'aria  
pressurizzata**

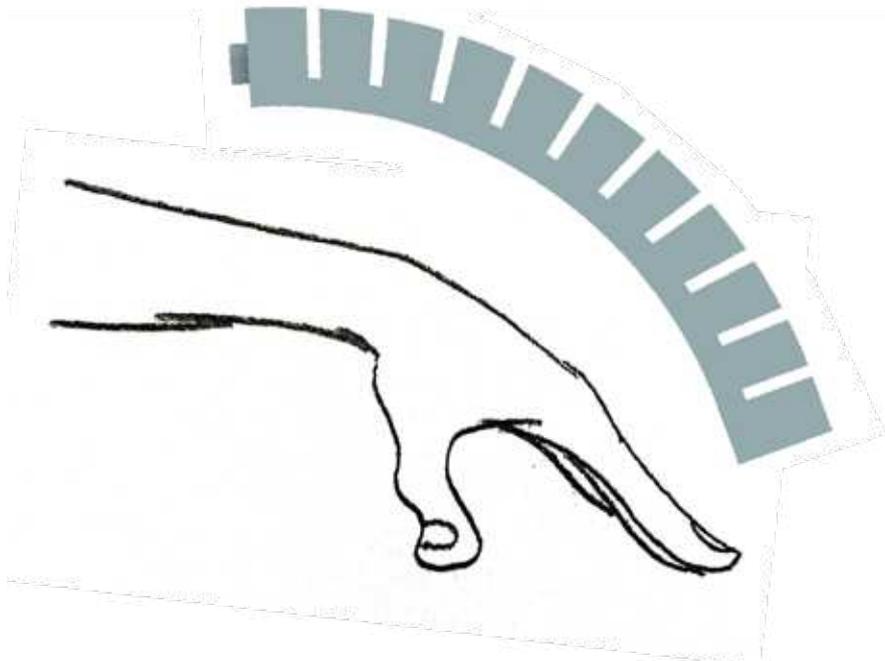
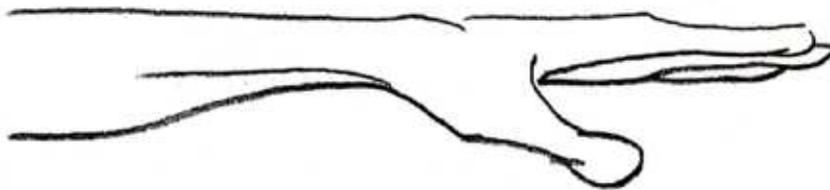
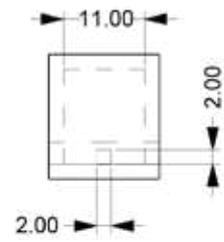
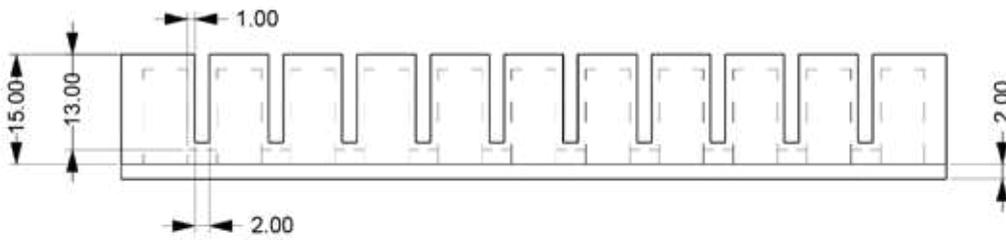
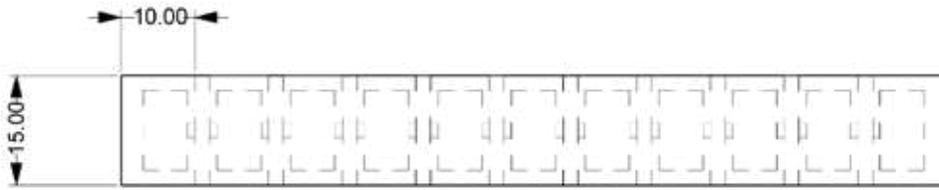
**Layer con  
spessore  
maggiore**

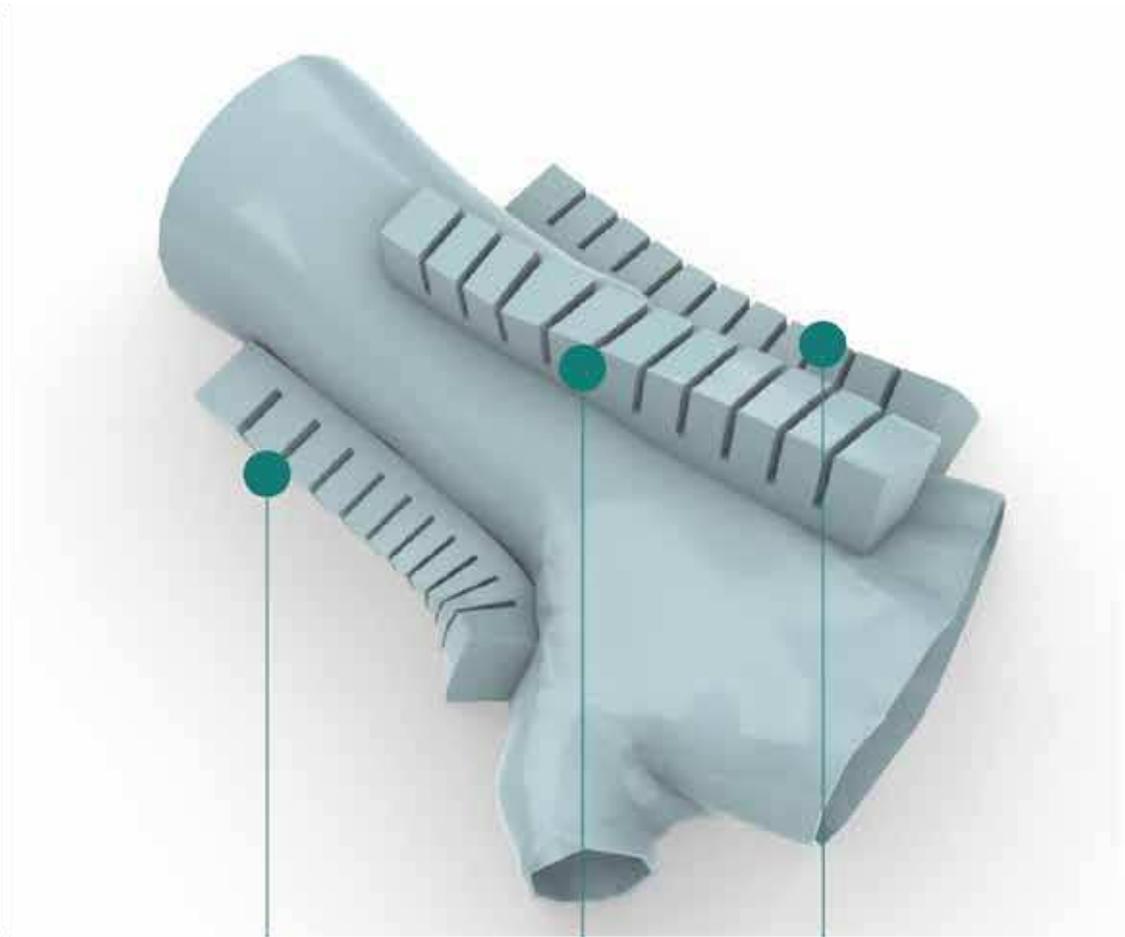
**Canali interni:  
camere d'aria**

**Spessore  
esterno**



Dimensioni espresse in mm.





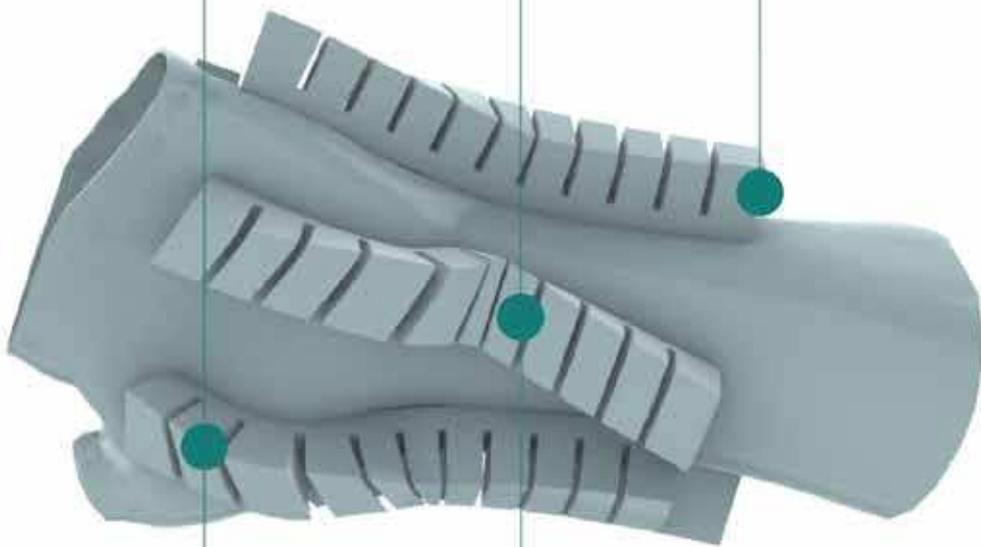
**Adduzione**

**Flessione**

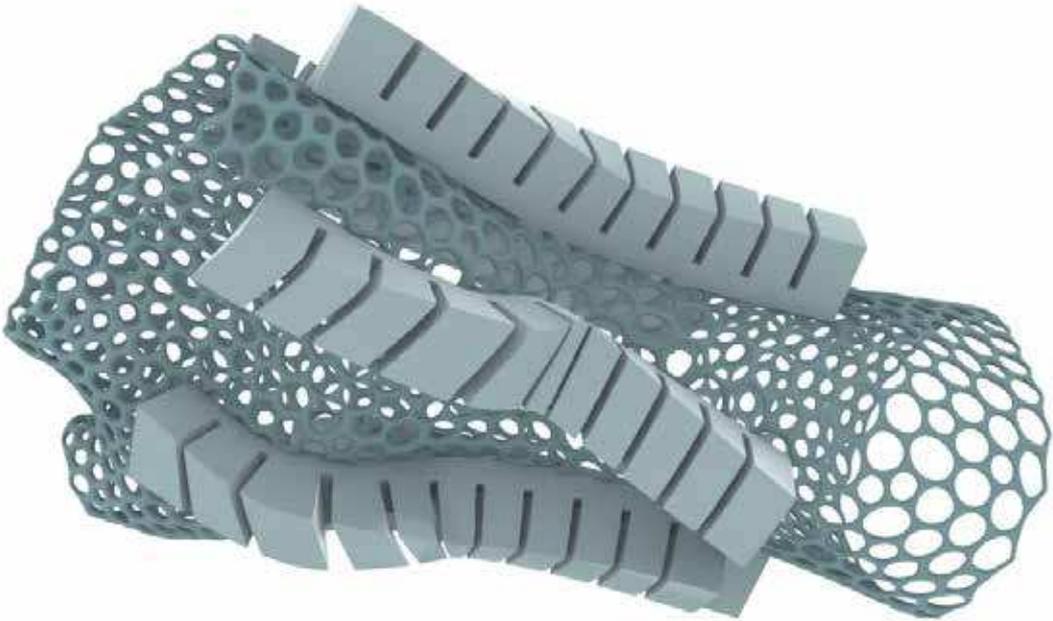
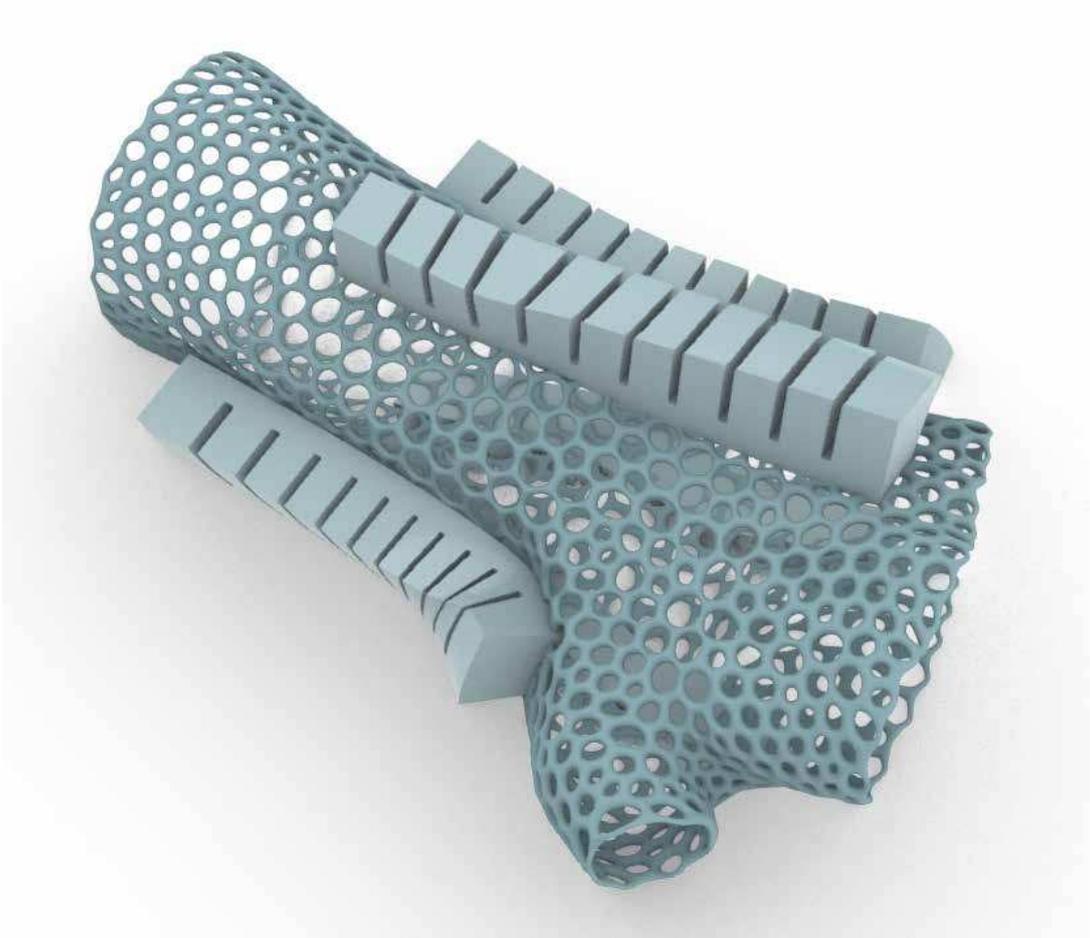
**Abduzione**

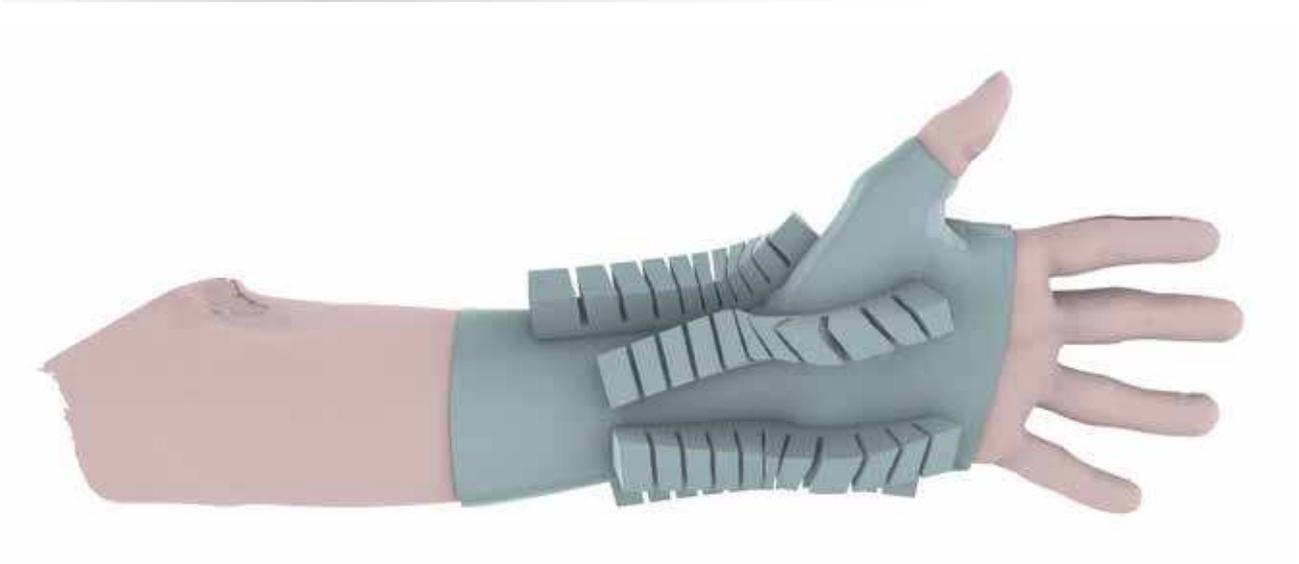
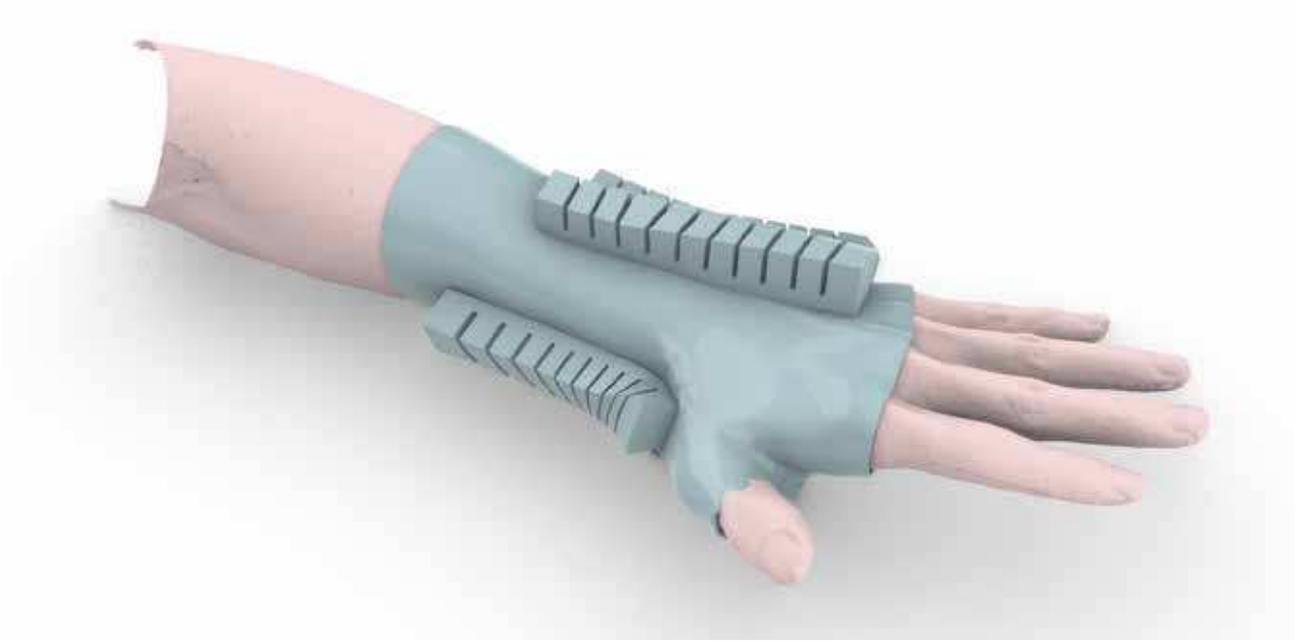
**Supinazione**

**Pronazione**



**Estensione**







## Nuove ipotesi formali

Dopo aver analizzato le caratteristiche dell'attuatore brevettato, a seguito delle considerazioni fatte, che ne riguardano l'ingombro e la mancanza di progettazione specifica ai fini individuati in questo elaborato, vengono qui proposte nuove ipotesi formali che mirano a proiettare la progettazione verso una strada

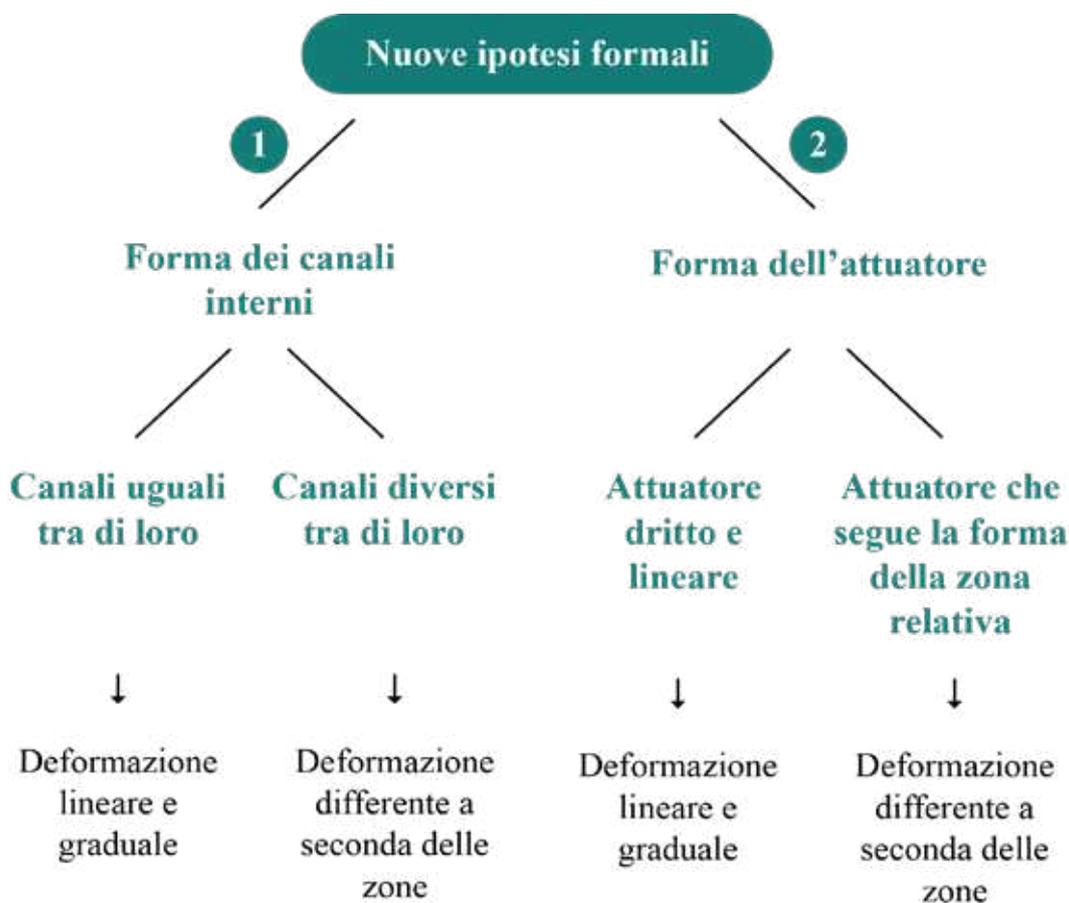
Per poter procedere con la progettazione, vengono inizialmente schematizzate le forme che compongono l'attuatore, e che quindi sono soggette a variazioni.

L'attuatore può seguire un andamento dritto e lineare, ma può avere anche la forma della zona in cui viene specificatamente posizionato.

maggiormente specifica.

Le ipotesi qui proposte tuttavia non sono state testate e non è stata fatta sperimentazione e prototipazione funzionale: ciò significa che non possono essere considerate pienamente funzionanti secondo gli obiettivi dichiarati durante questa ricerca.

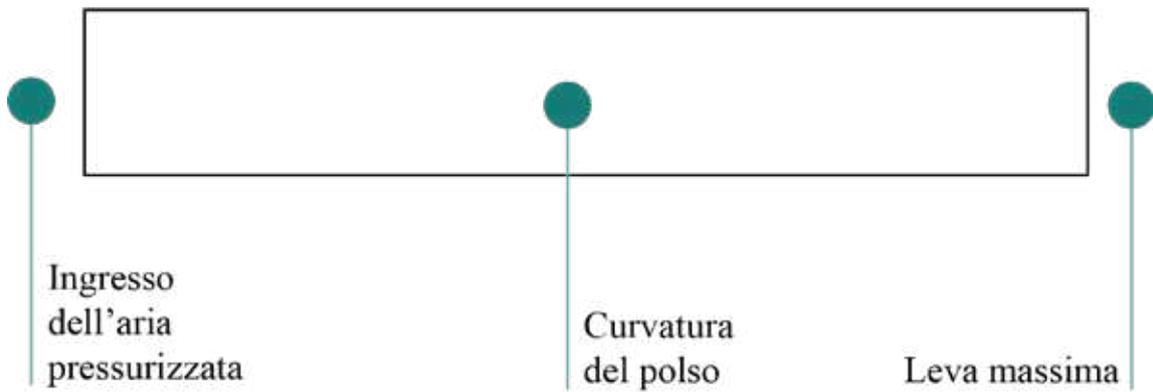
Inoltre, anche le camere d'aria possono avere forme sempre uguali, in maniera tale da garantire l'andamento studiato in precedenza, ma potrebbero anche essere differenti tra di loro per personalizzare la curvatura e le deformazioni. Vengono di seguito schematizzate le caratteristiche.



Si procede iniziato ad ipotizzare attuatori con canali interni uguali tra di loro e disposti in sen-

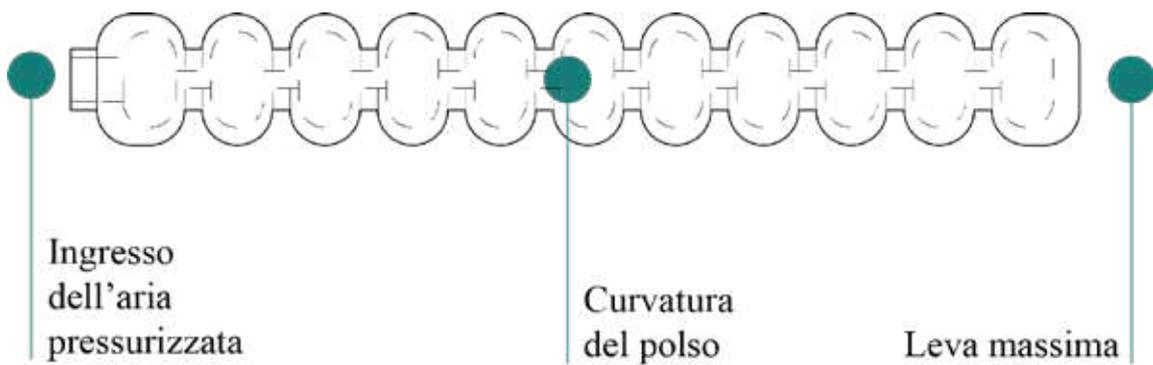
so lineare, per tentare di riproporre l'andamento dell'attuatore brevettato.

## Attuatore dritto e lineare con canali uguali tra di loro

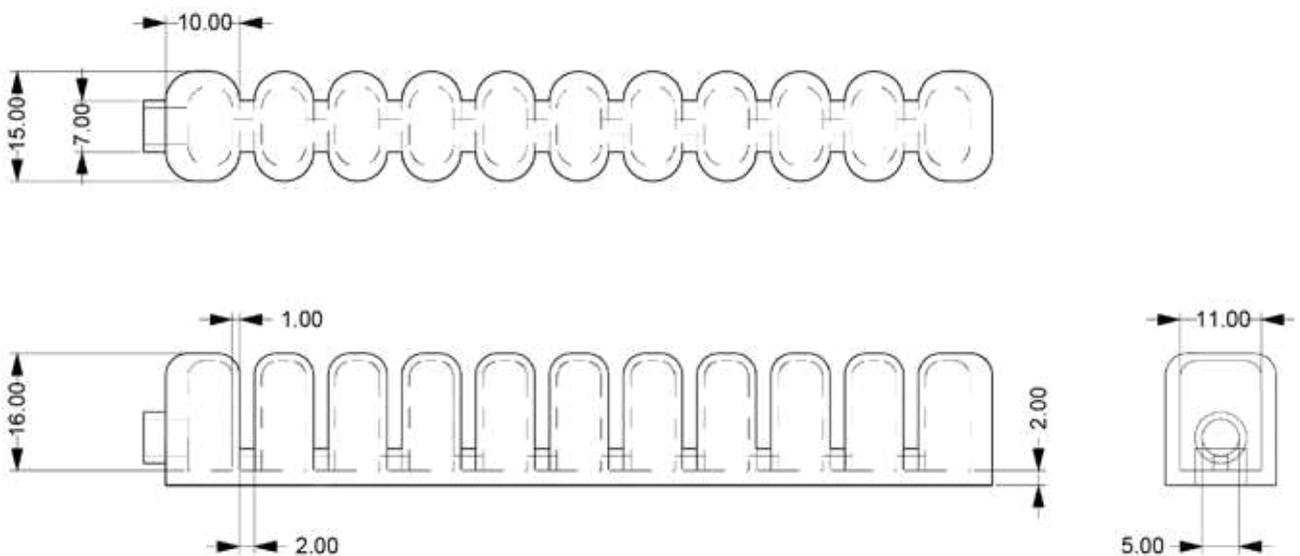


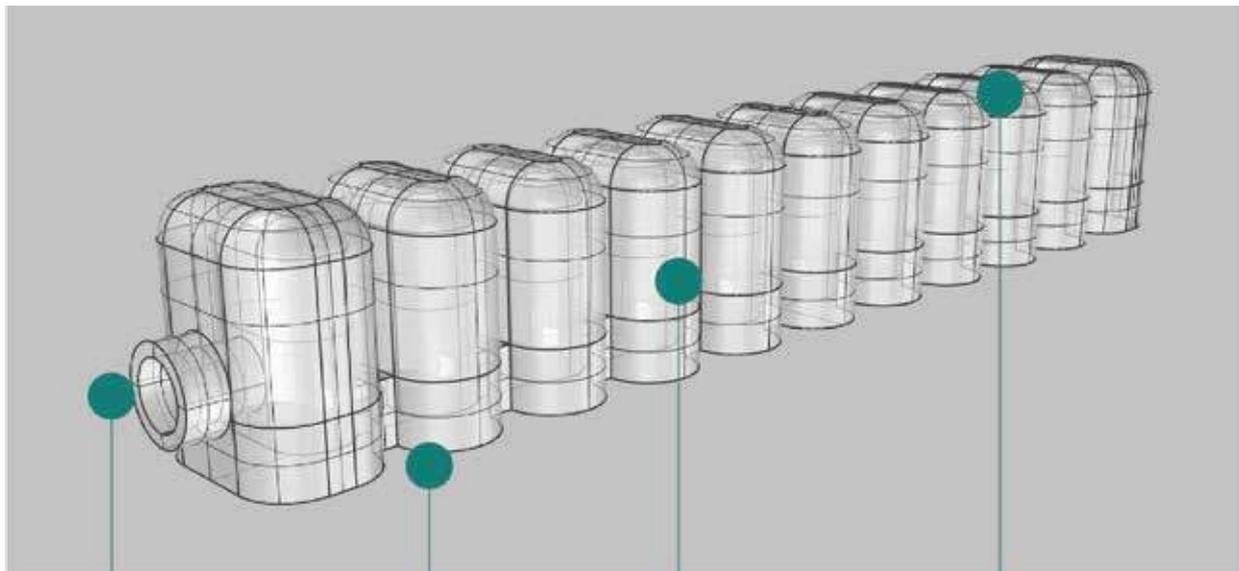
La prima forma alternativa dell'attuatore che viene presentata è la seguente e consiste nel tentativo di smussare ed arrotondare gli spigoli vivi dell'attuatore brevettato, mantenendo però

lo stesso quantitativo di area interna ed ipotizzando così un possibile analogo funzionamento al precedente.



Dimensioni espresse in mm.



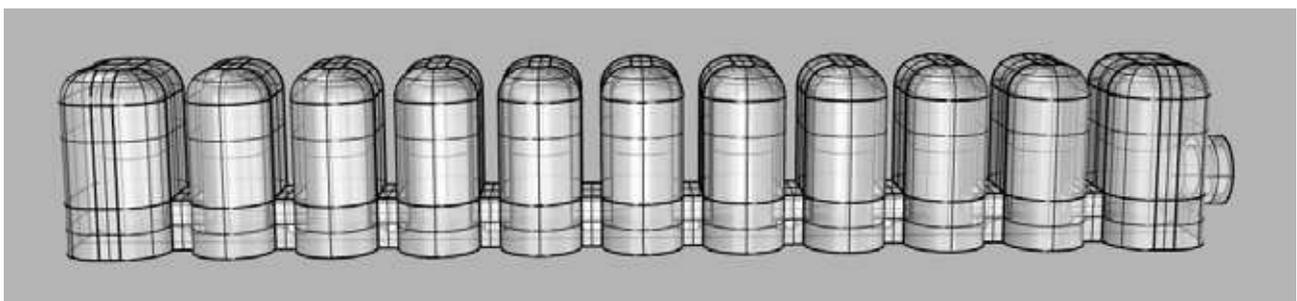
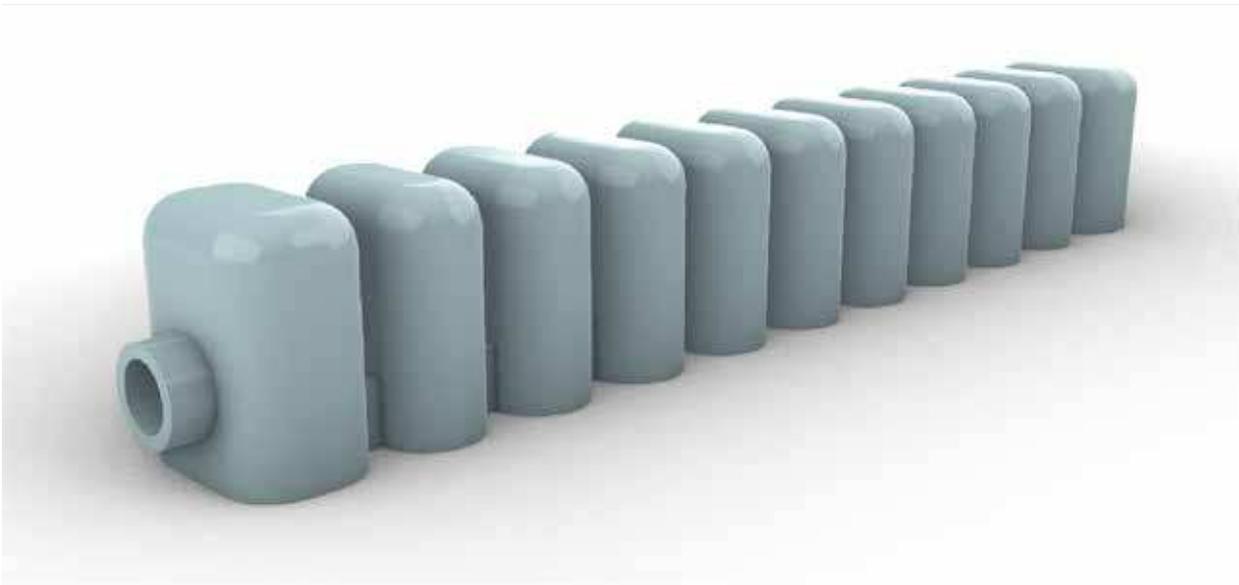


**Ingresso  
dell'aria  
pressurizzata**

**Layer con  
spessore  
maggiore**

**Canali interni:  
camere d'aria**

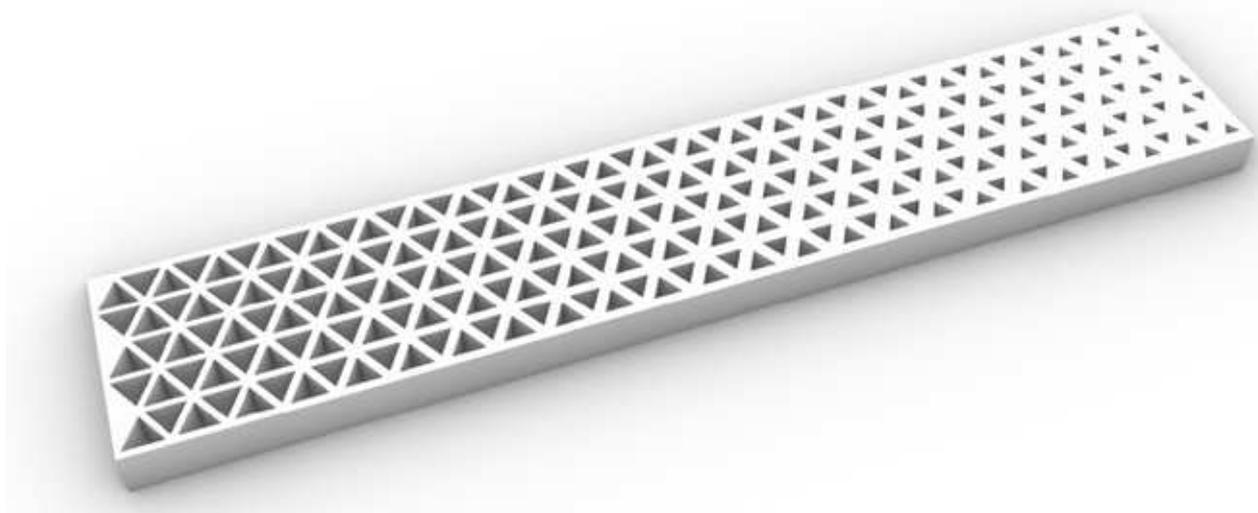
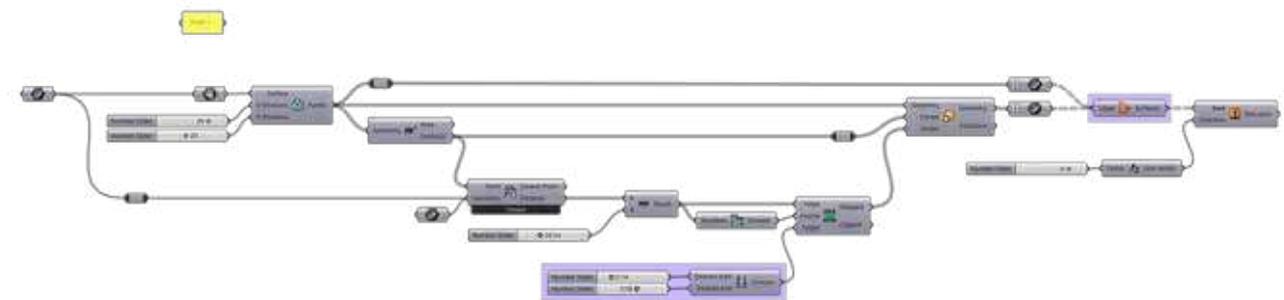
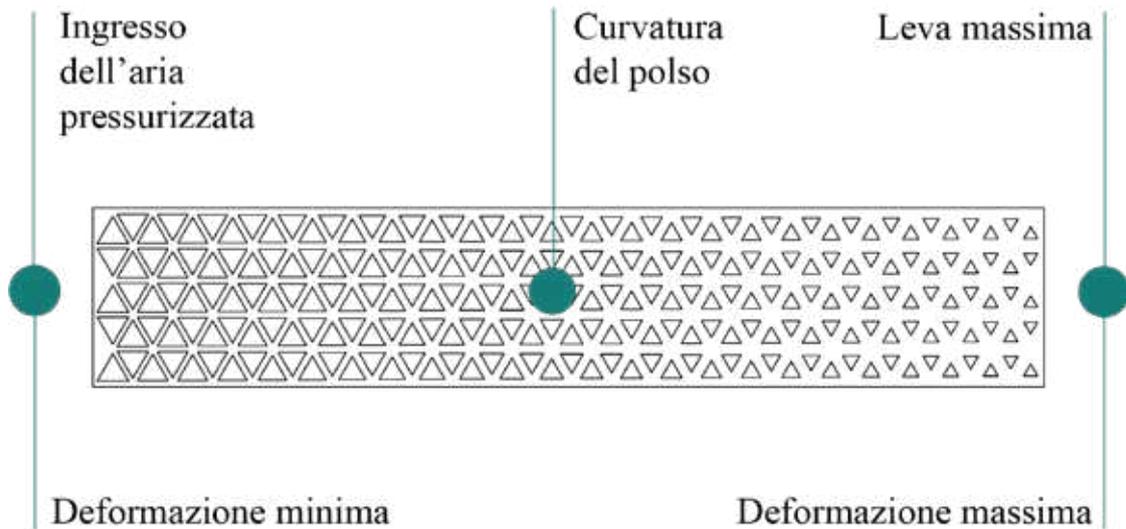
**Spessore  
esterno**



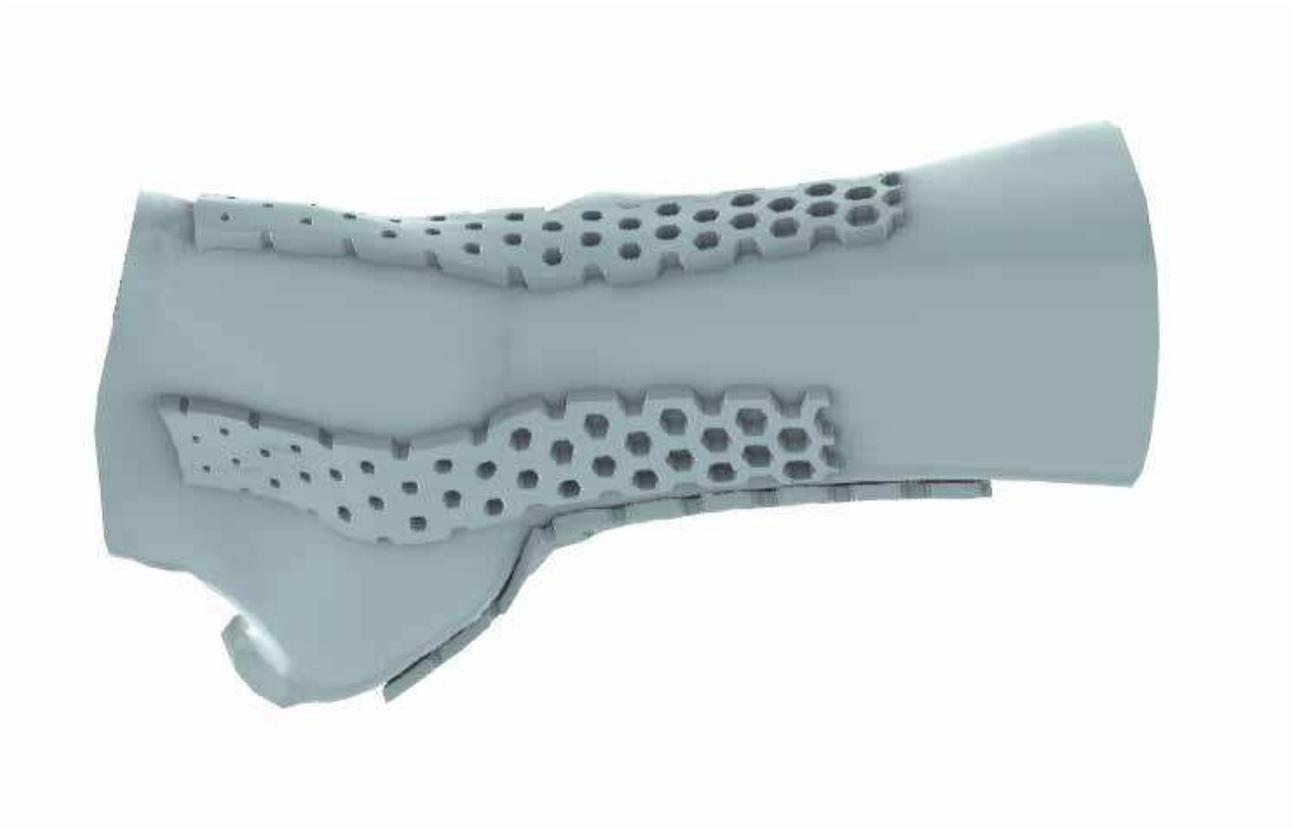
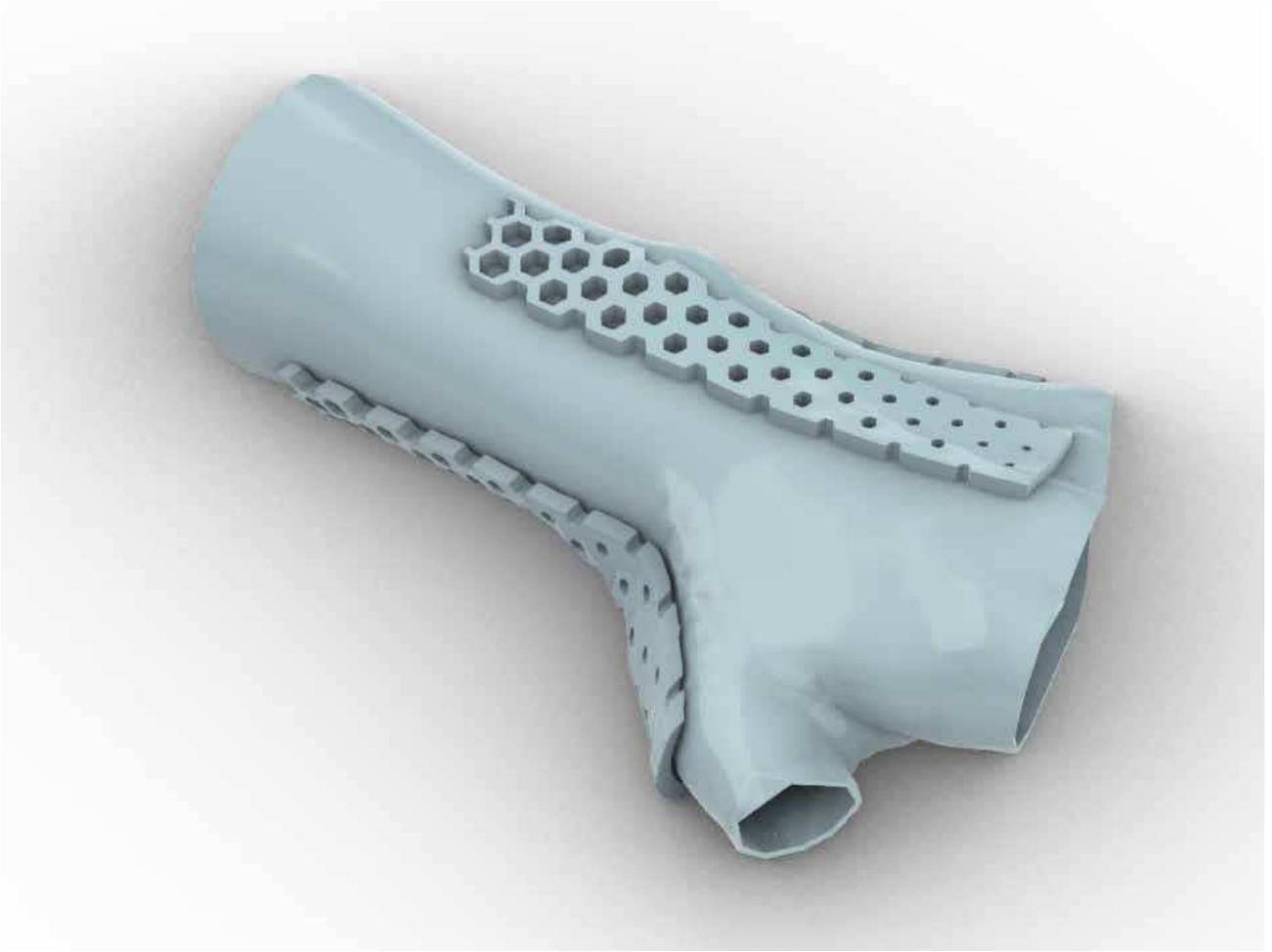
## Attuatore dritto e lineare con canali diversi tra di loro

Le forme successivamente presentate sono parametriche e ragionano secondo l'ottica degli attrattori nello spazio. La trama dell'attuatore chiaramente varia così come dovrebbe variare la sua deformazione, quindi laddove c'è più spazio vuoto, è ipotizzabile che l'attuatore si

gonfi di più poiché può essere immessa più aria pressurizzata, mentre laddove c'è meno spazio è ipotizzabile che passi meno aria pressurizzata. Viene sempre poi prevista una base di materiale spessa per indirizzare la deformazione verso un punto previsto.







## Attuatore che segue la forma della zona relativa con canali diversi tra di loro

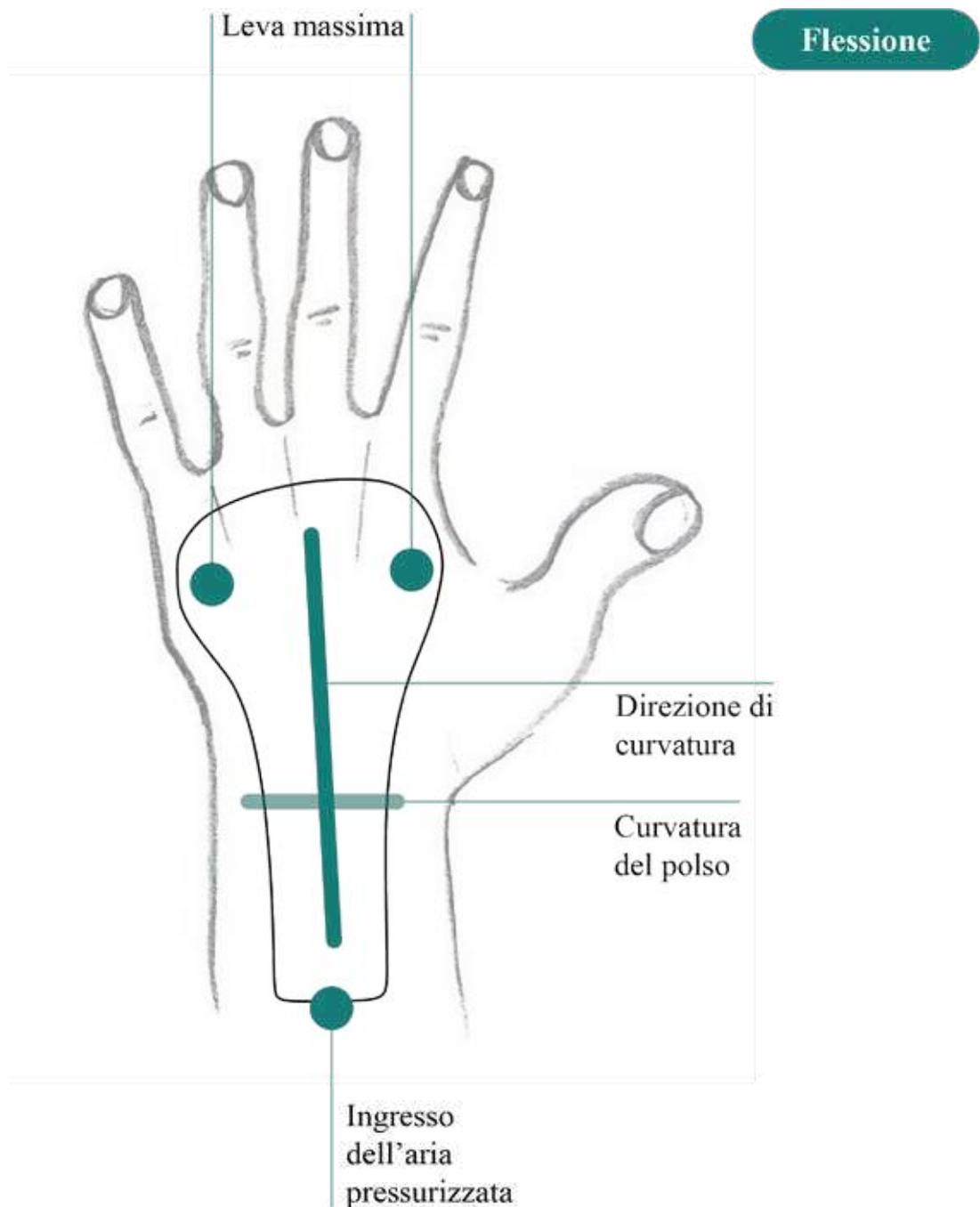
Viene analizzata anche l'ipotesi per cui l'attuatore possa seguire la forma della zona relativa: in questo caso, l'attuatore viene specificatamente progettato per adempiere a ciascun movimento.

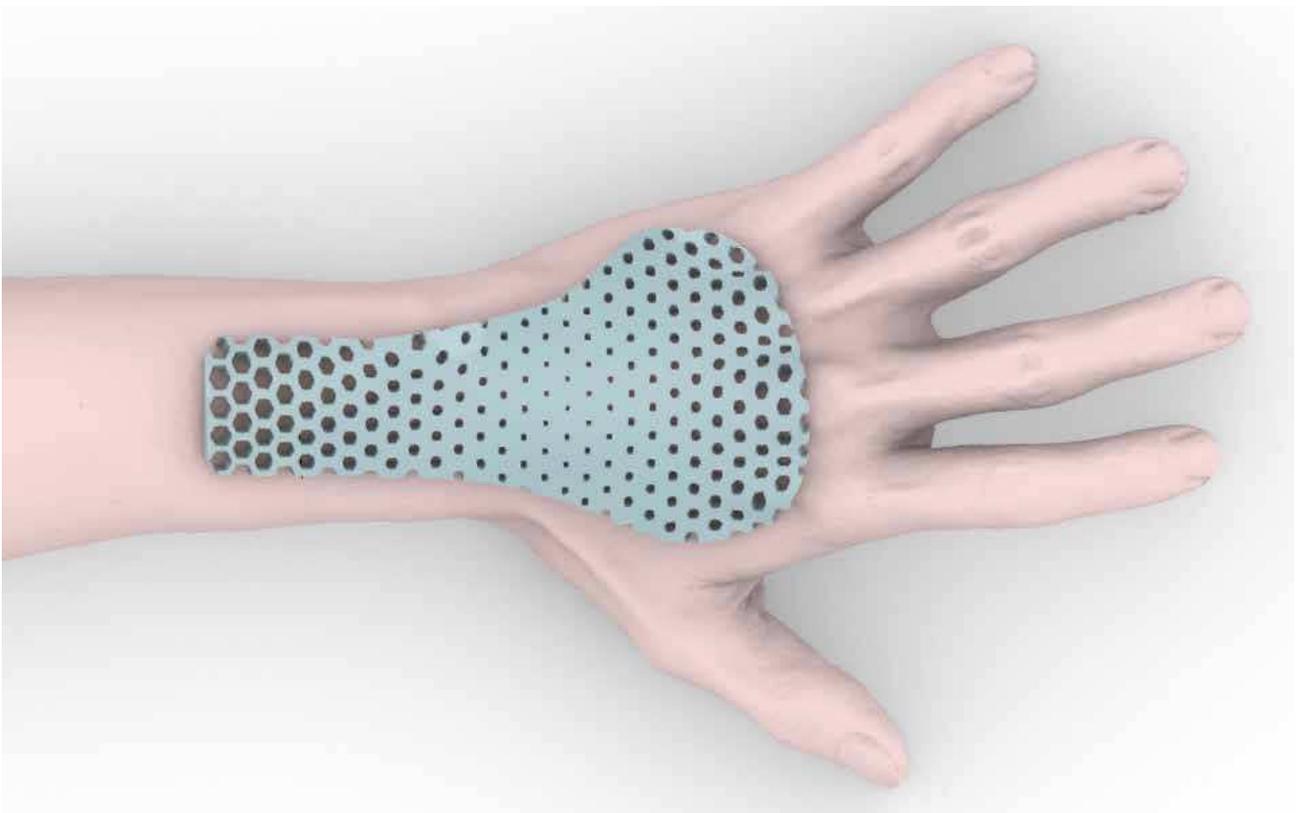
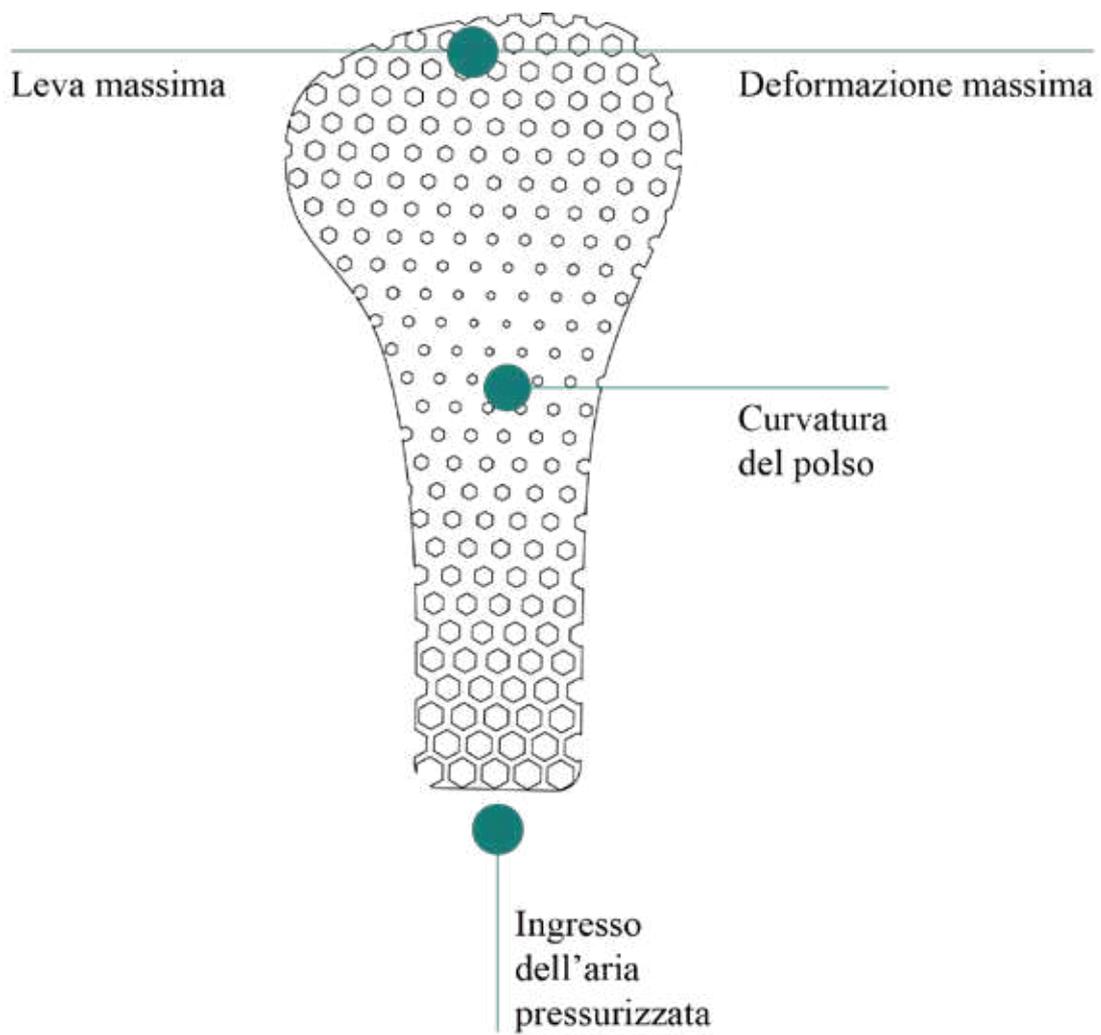
I canali, inoltre, vengono differenziati tra di loro a seconda delle zone, per garantire la deformazione nella modalità voluta.

Di seguito vengono analizzati gli attuatori de-

dicati a flessione, supinazione, pronazione ed estensione.

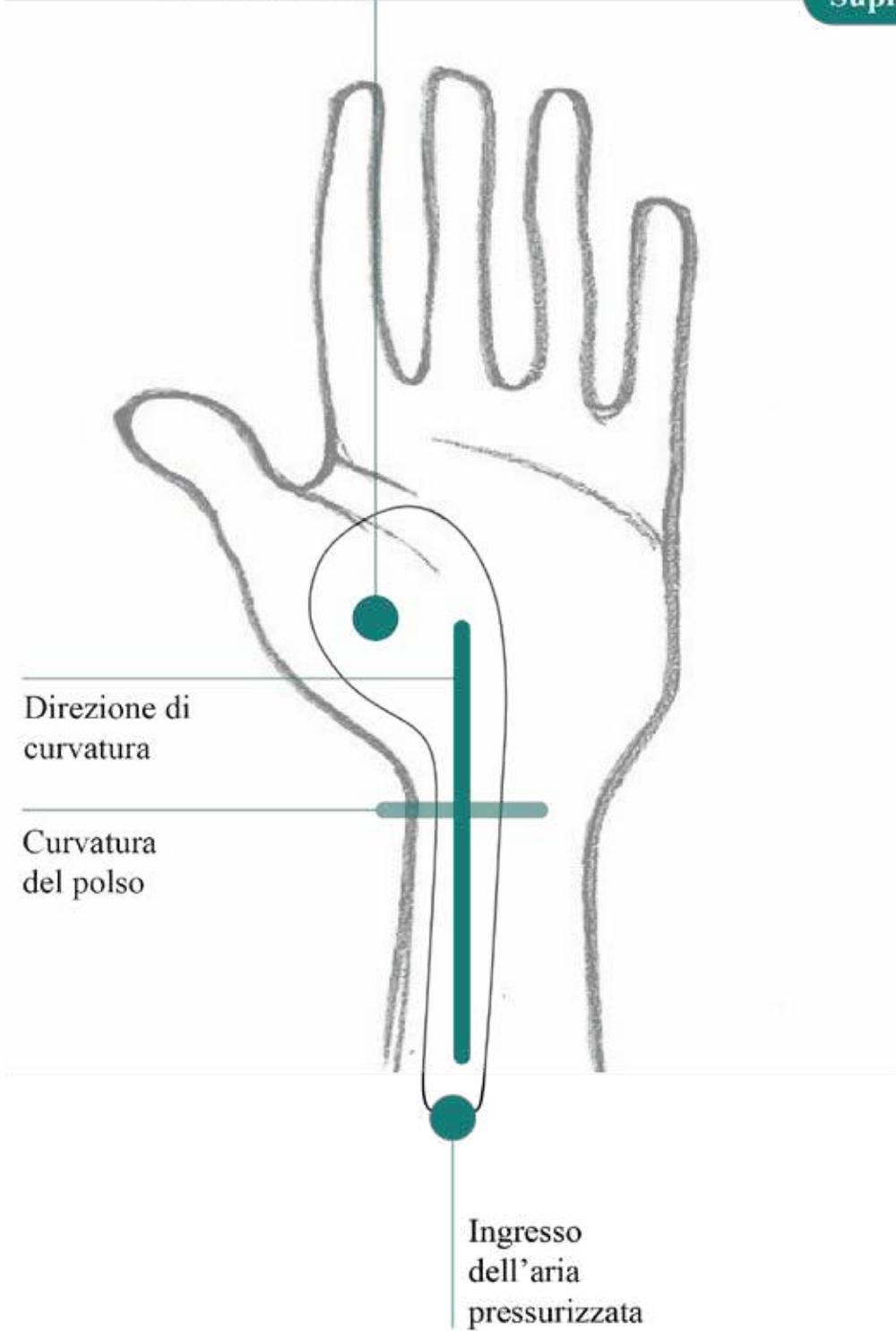
Gli attuatori dedicati all'adduzione ed all'abduzione vengono lasciati dritti per questioni di spazio: lo spazio presente sulla mano del paziente è limitato, e si assume che questi possano svolgere il loro compito così come sono stati pensati precedentemente.

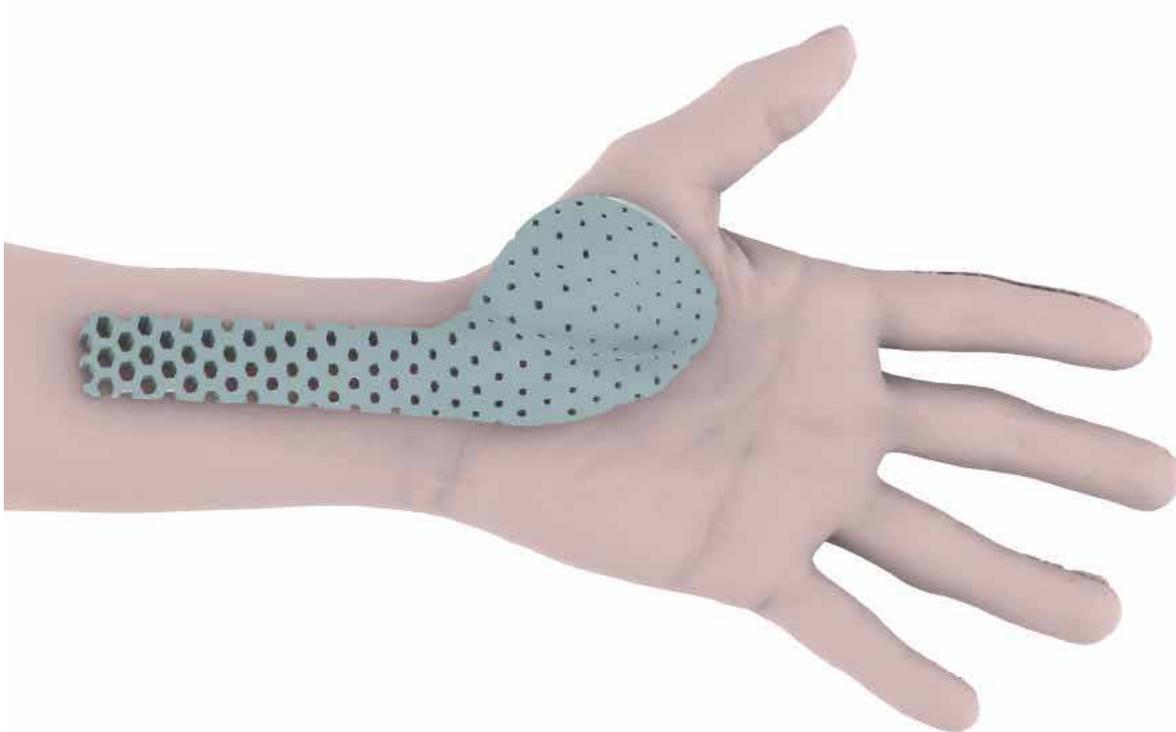
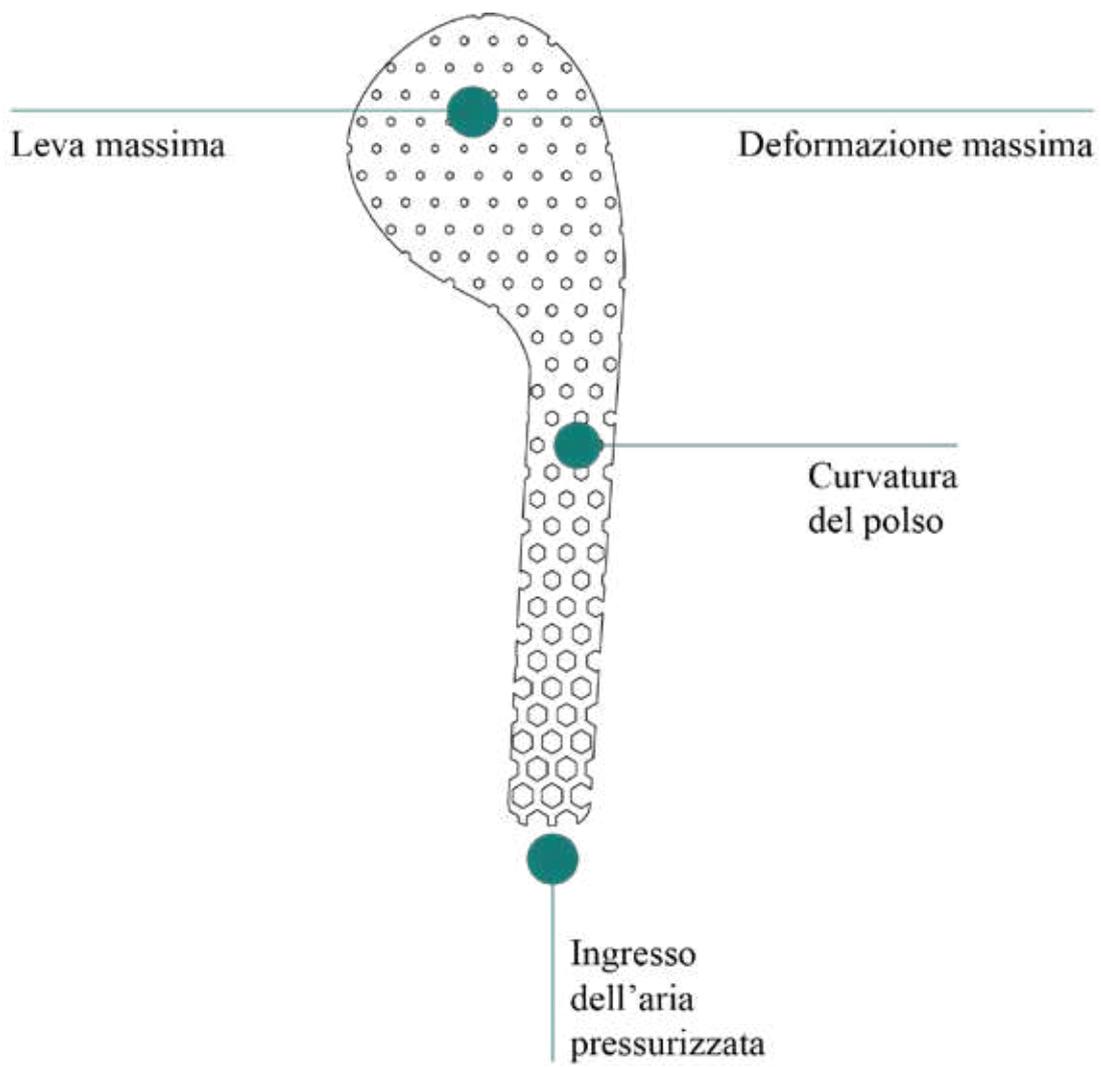


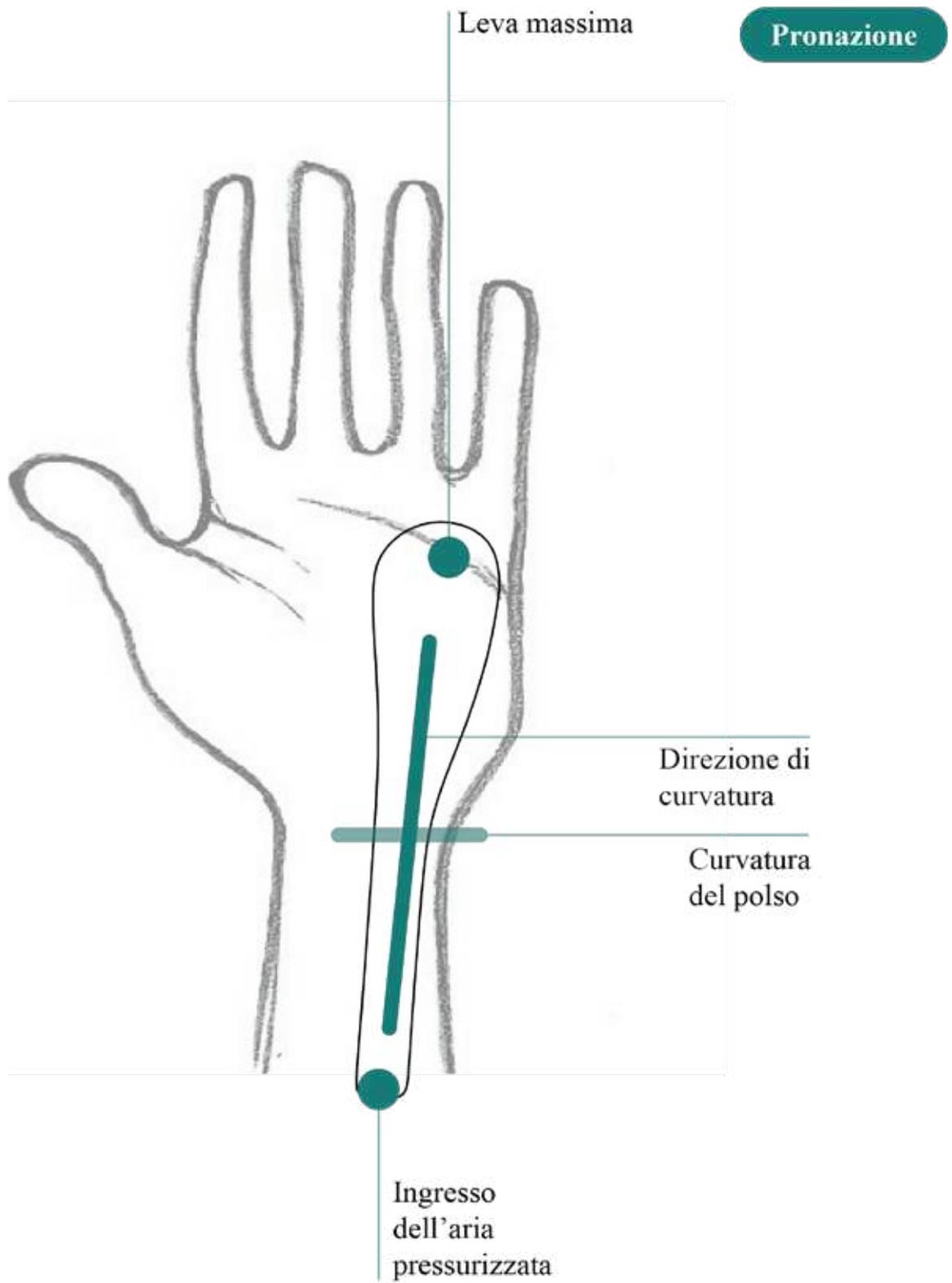


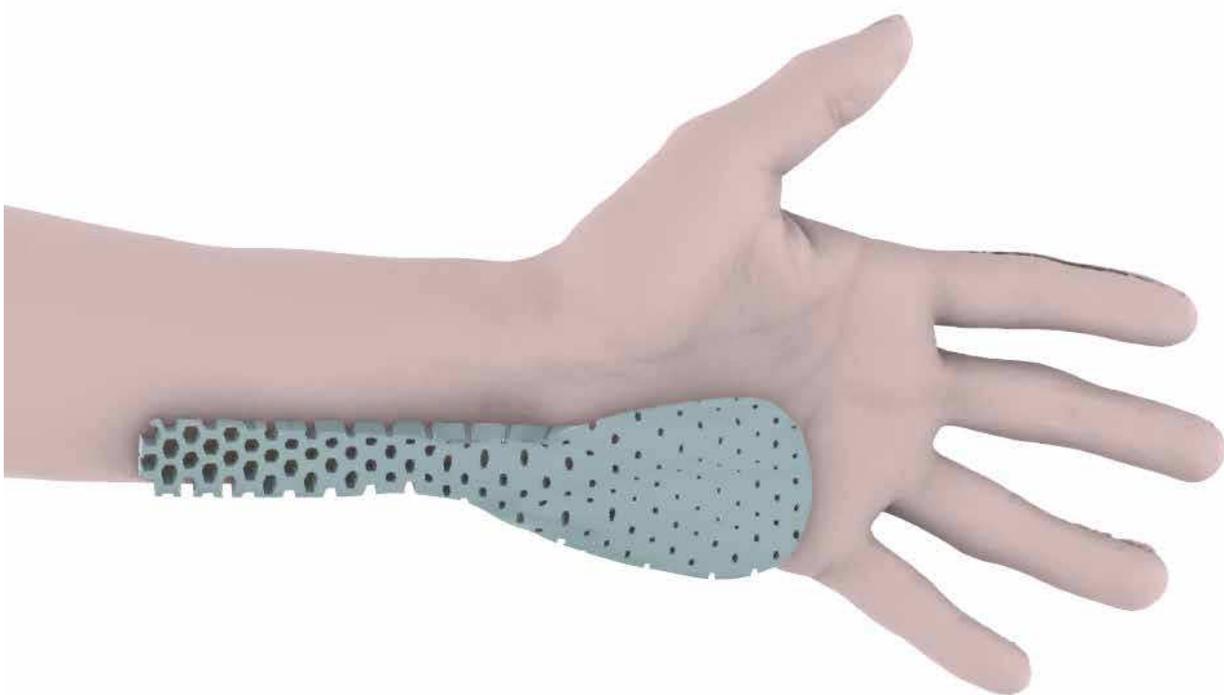
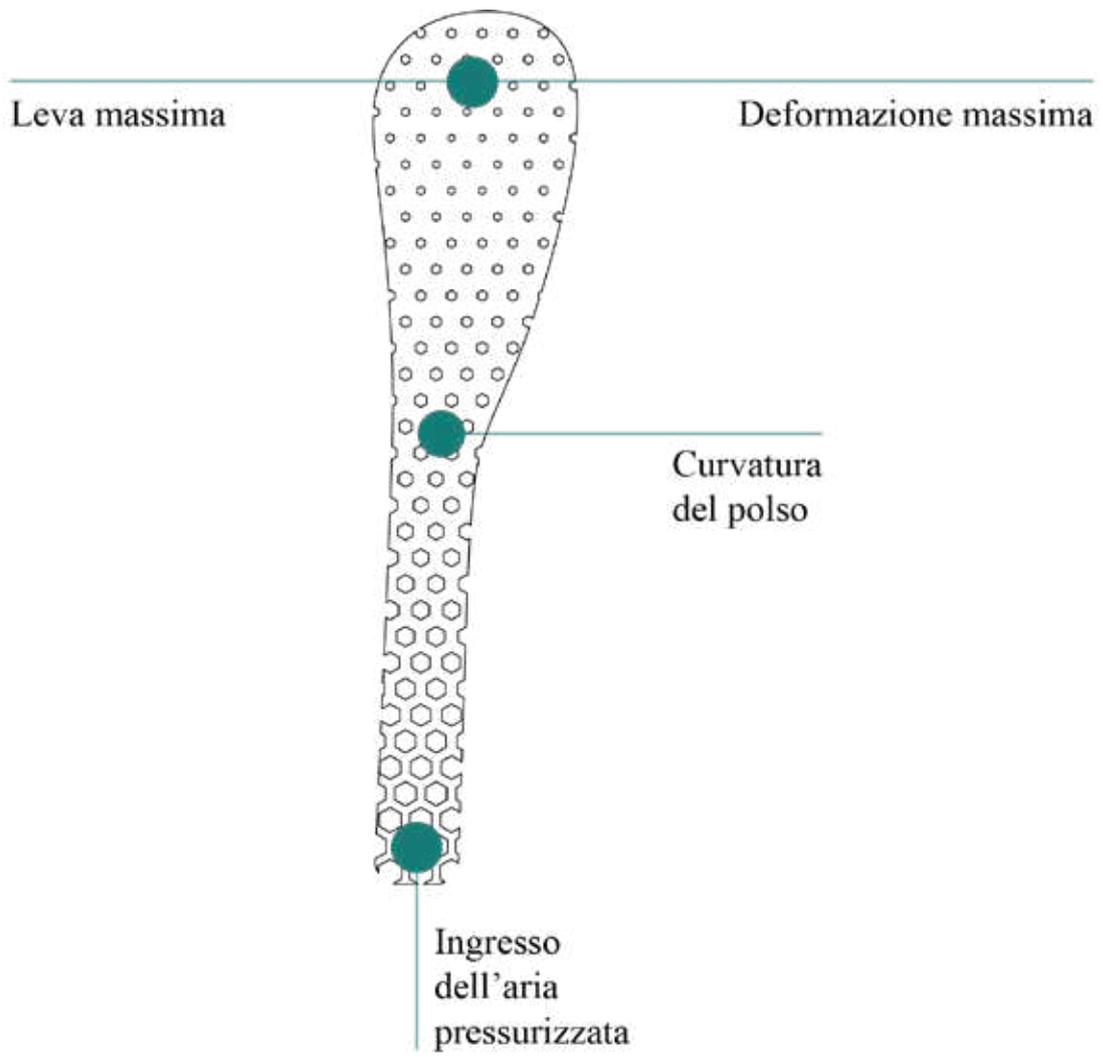
Leva massima

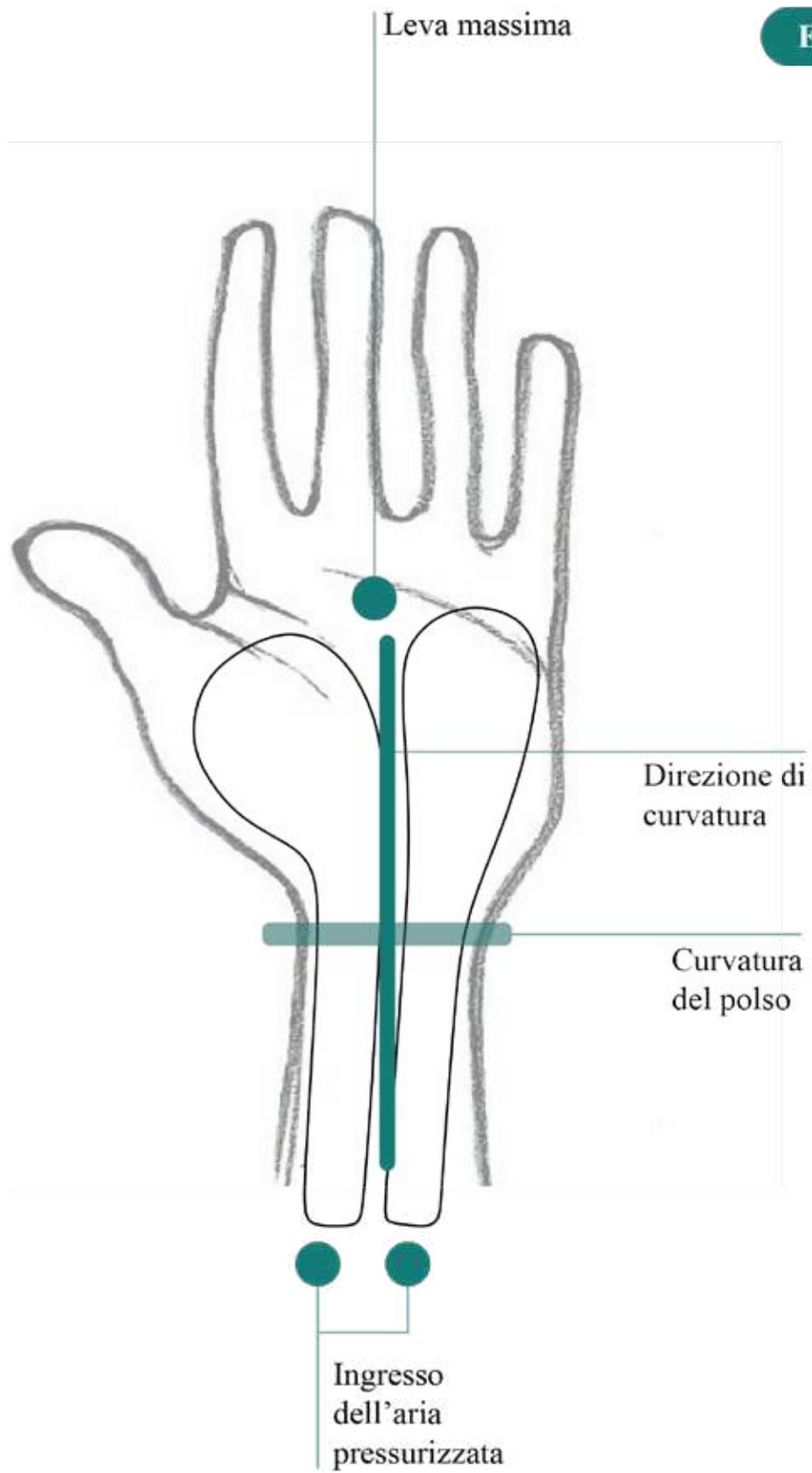
Supinazione

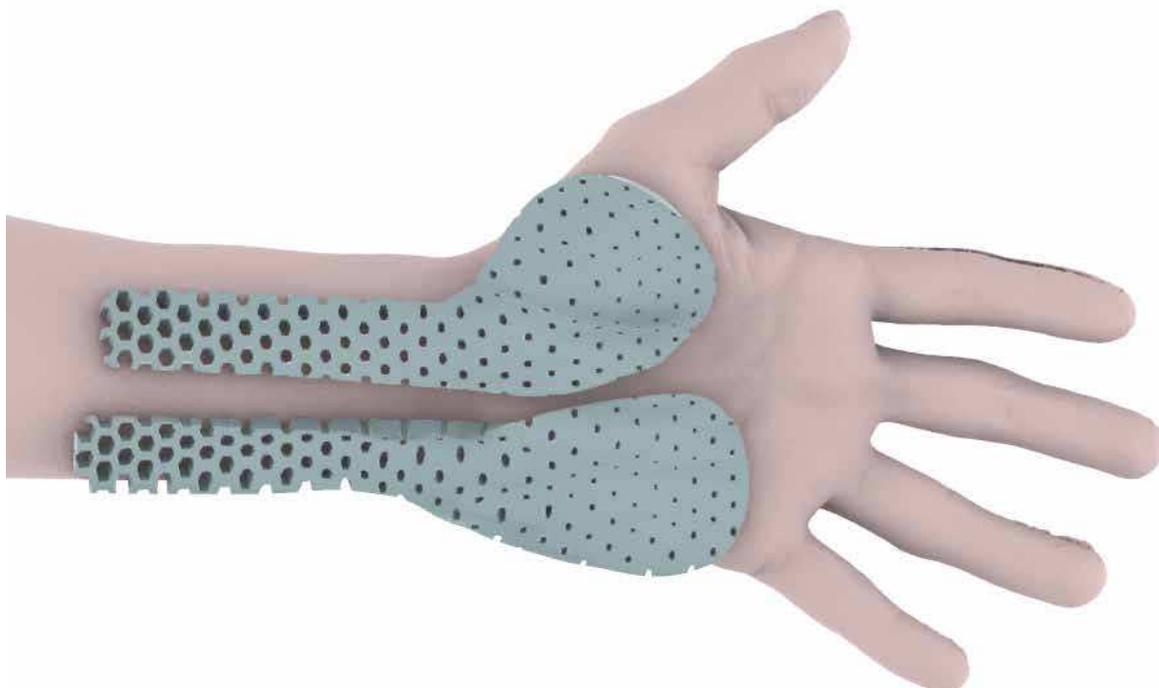
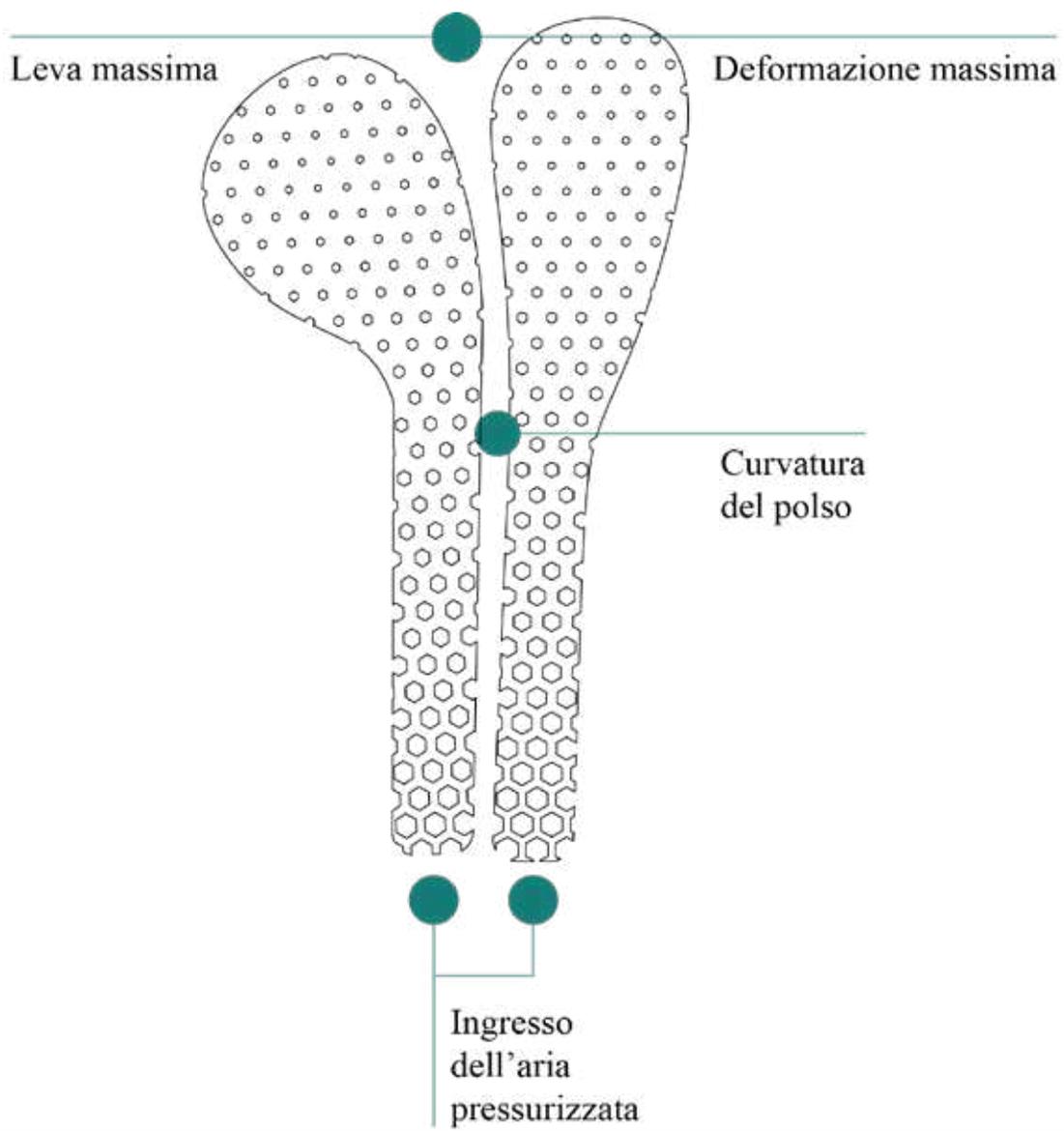




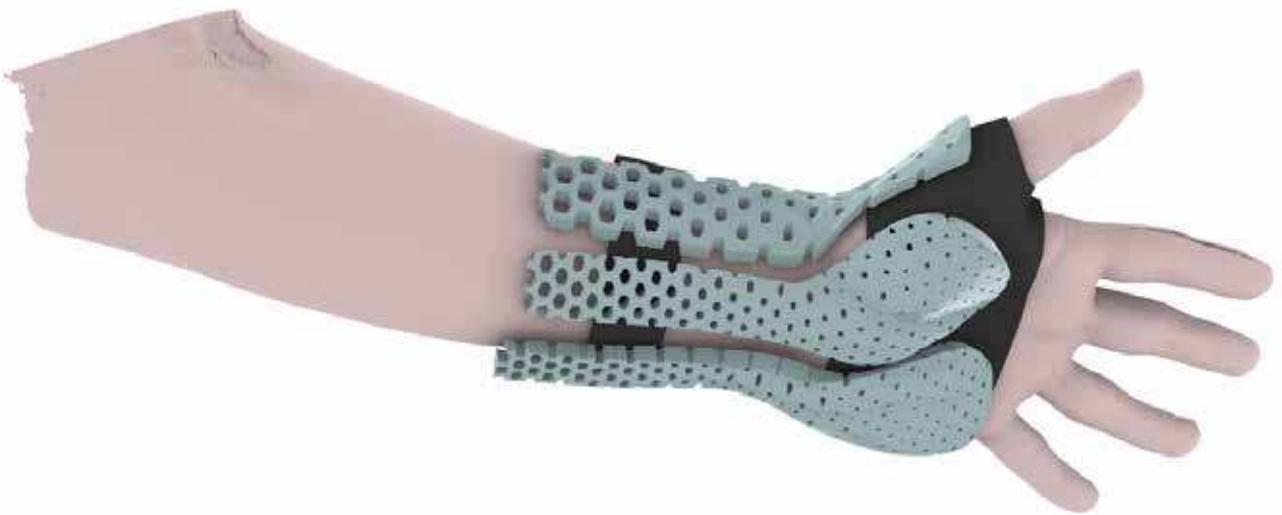










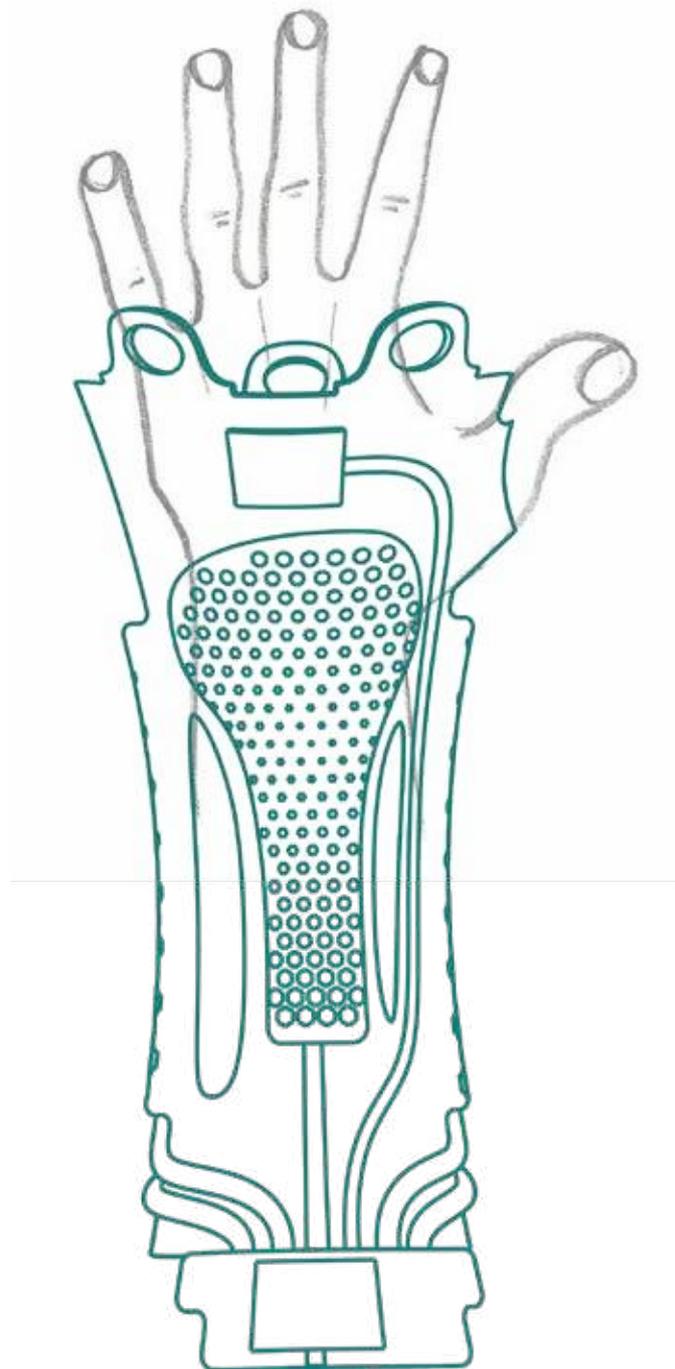


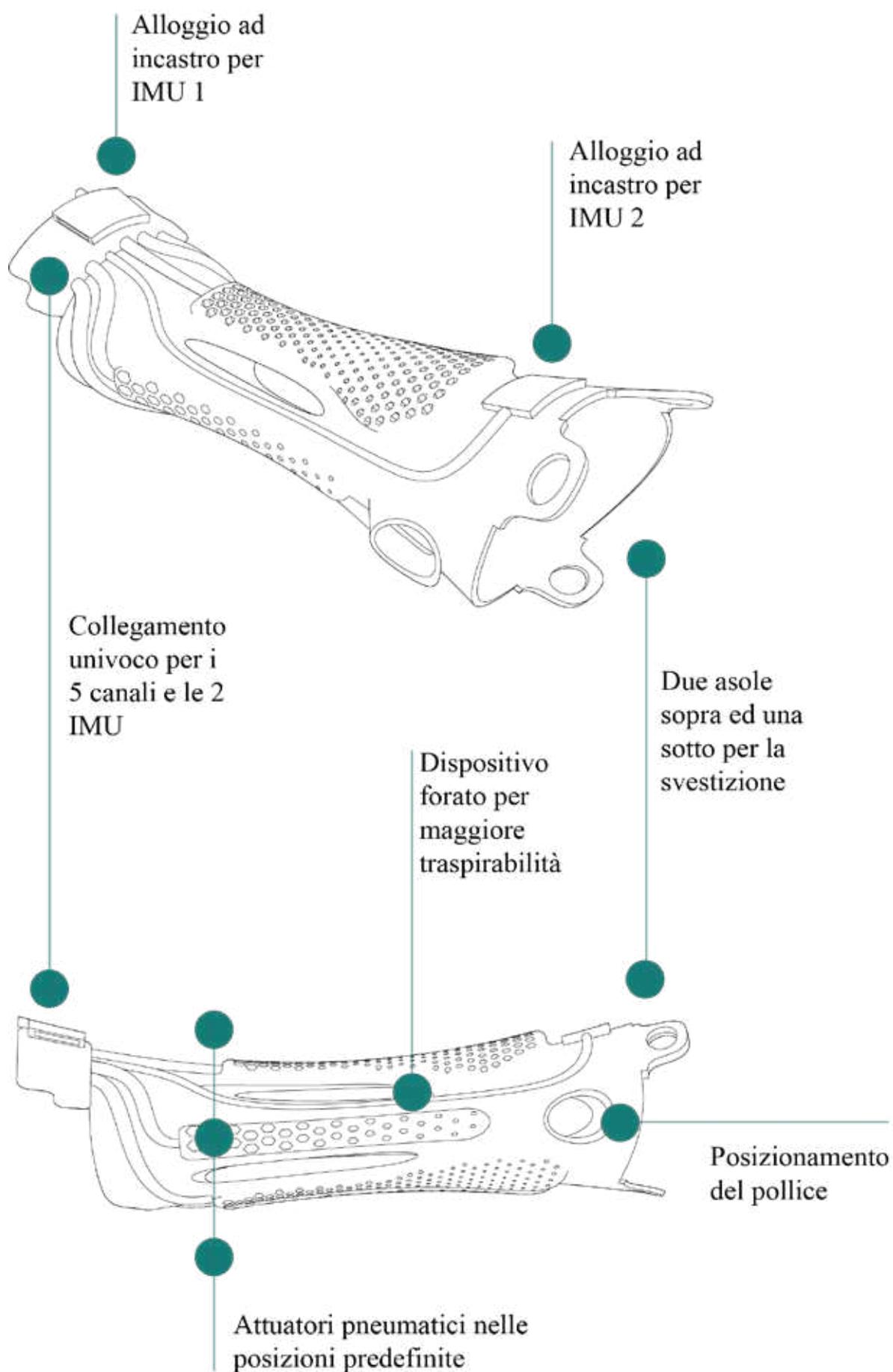
### 12.3.4 Progettazione del Soft Robot

Dopo aver analizzato le caratteristiche dell'attuatore brevettato ed aver avanzato nuove ipotesi formali sugli attuatori riprogettati e specifici, viene ora presentato il dispositivo soft robotico nella sua interezza, in maniera tale che rispetti i requisiti precedentemente dichiarati.

Il dispositivo deve infatti essere monomaterico, producibile in silicone medico, con la possibi-

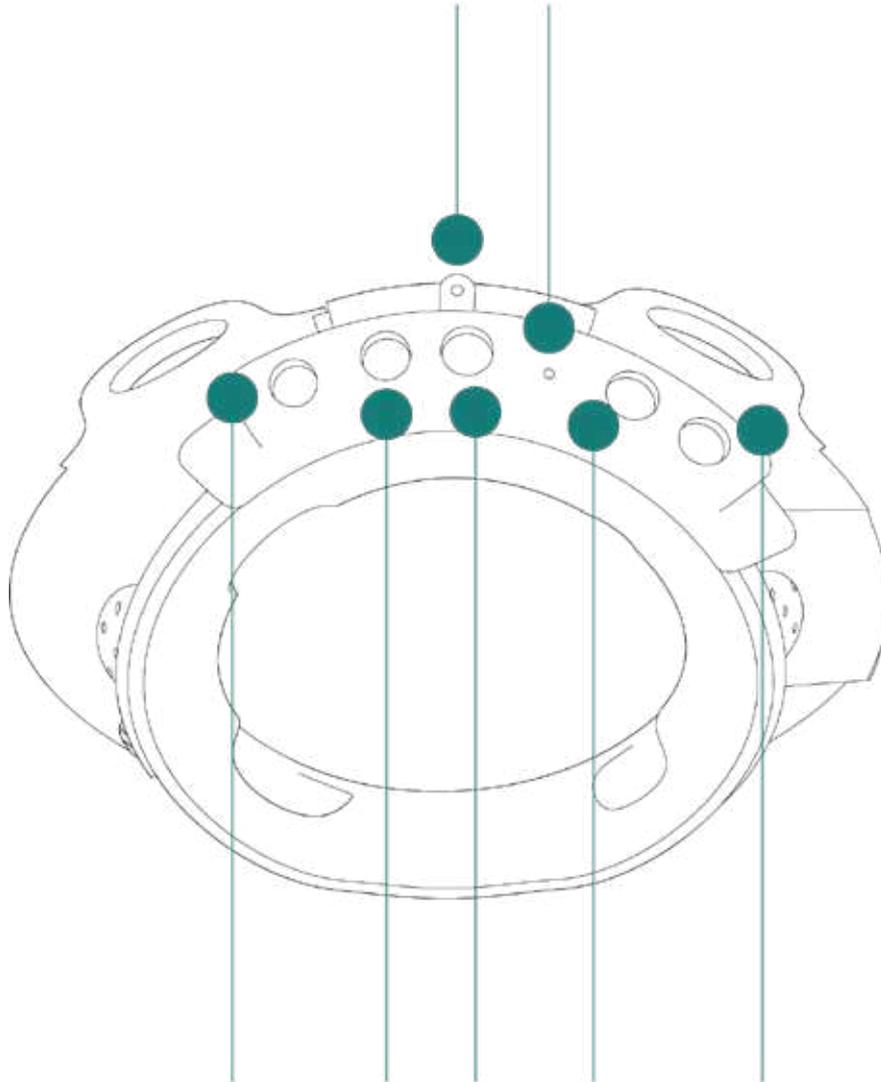
lità di progettazione custom made. Inoltre, ogni attuatore deve essere attuabile indipendentemente dagli altri mediante dei canali vuoti attraverso i quali poter far passare l'aria pressurizzata. Il prodotto deve essere inoltre dotato di alloggi per i componenti IMU, inseribili tramite incastro.





Dettaglio della zona di collegamento per i canali per l'aria e per i cavi per le IMU, posta in prossimità e sopra l'avambraccio dell'utente.

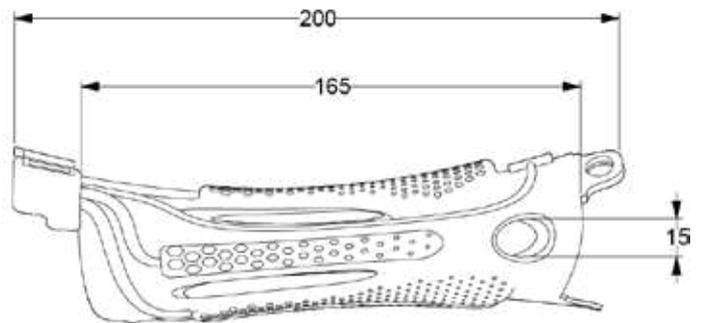
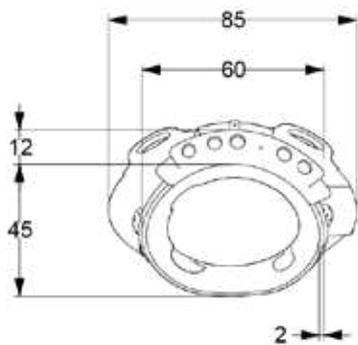
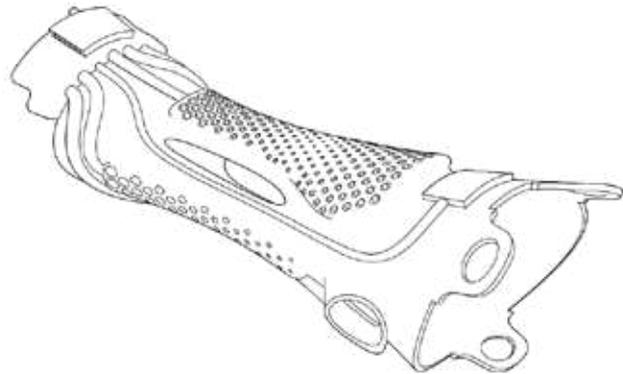
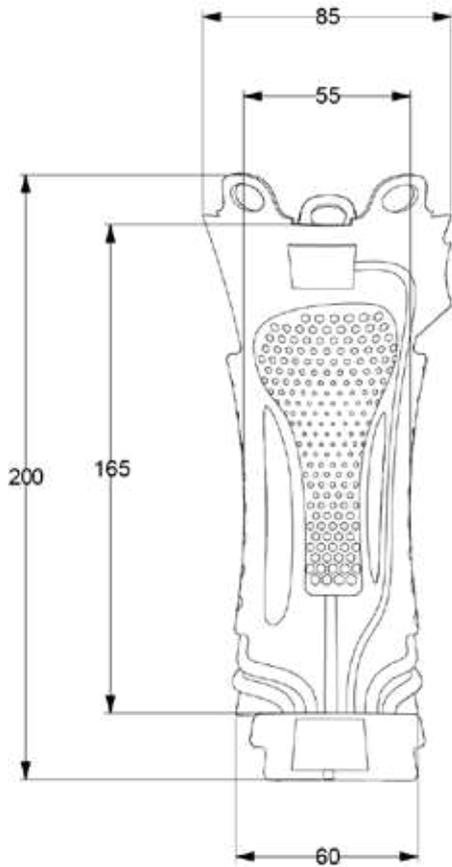
Posizionamento dei due pin metallici per il collegamento delle IMU 1 e 2

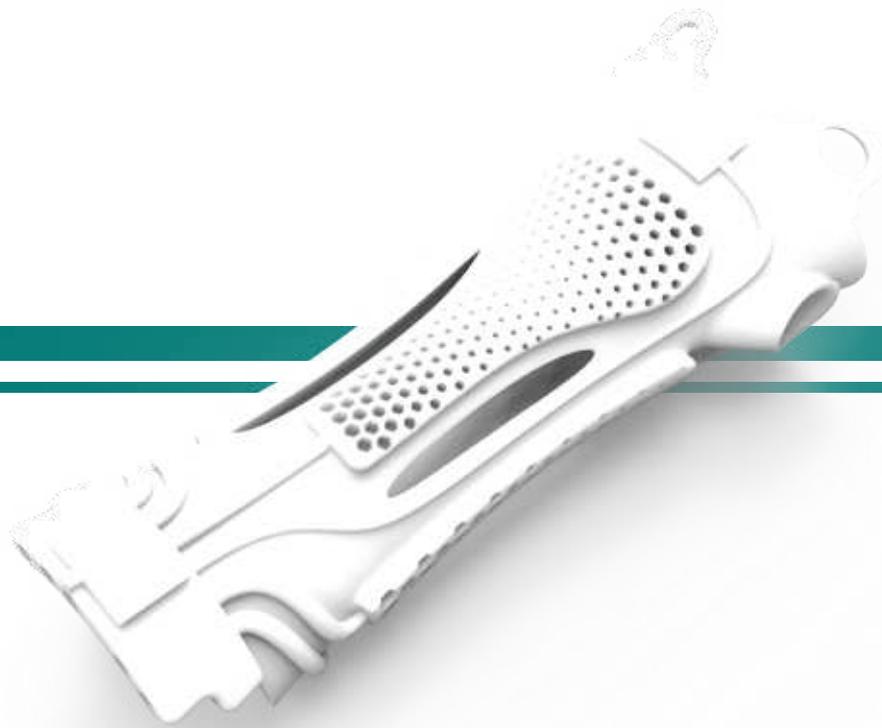
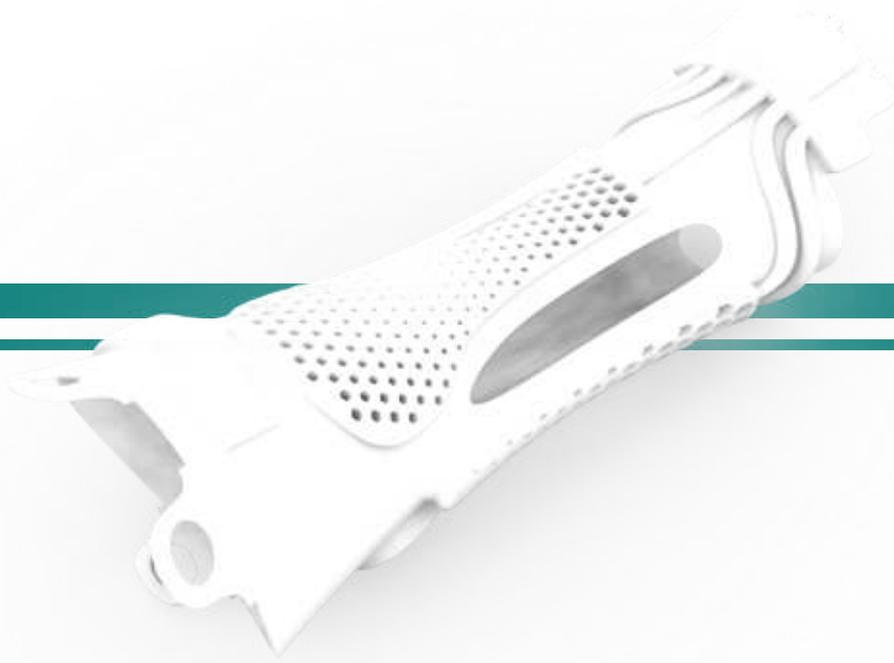


Canali di collegamento a incastro collegati indipendentemente con i 5 attuatori pneumatici, permettono il passaggio dell'aria pressurizzata dai tubi morbidi

Il dimensionamento di massima è proposto secondo alcune misure standard, ma può cambiare secondo la progettazione custom made, adattandosi alle specifiche anatomiche di ciascun paziente.

Dimensioni espresse in mm.





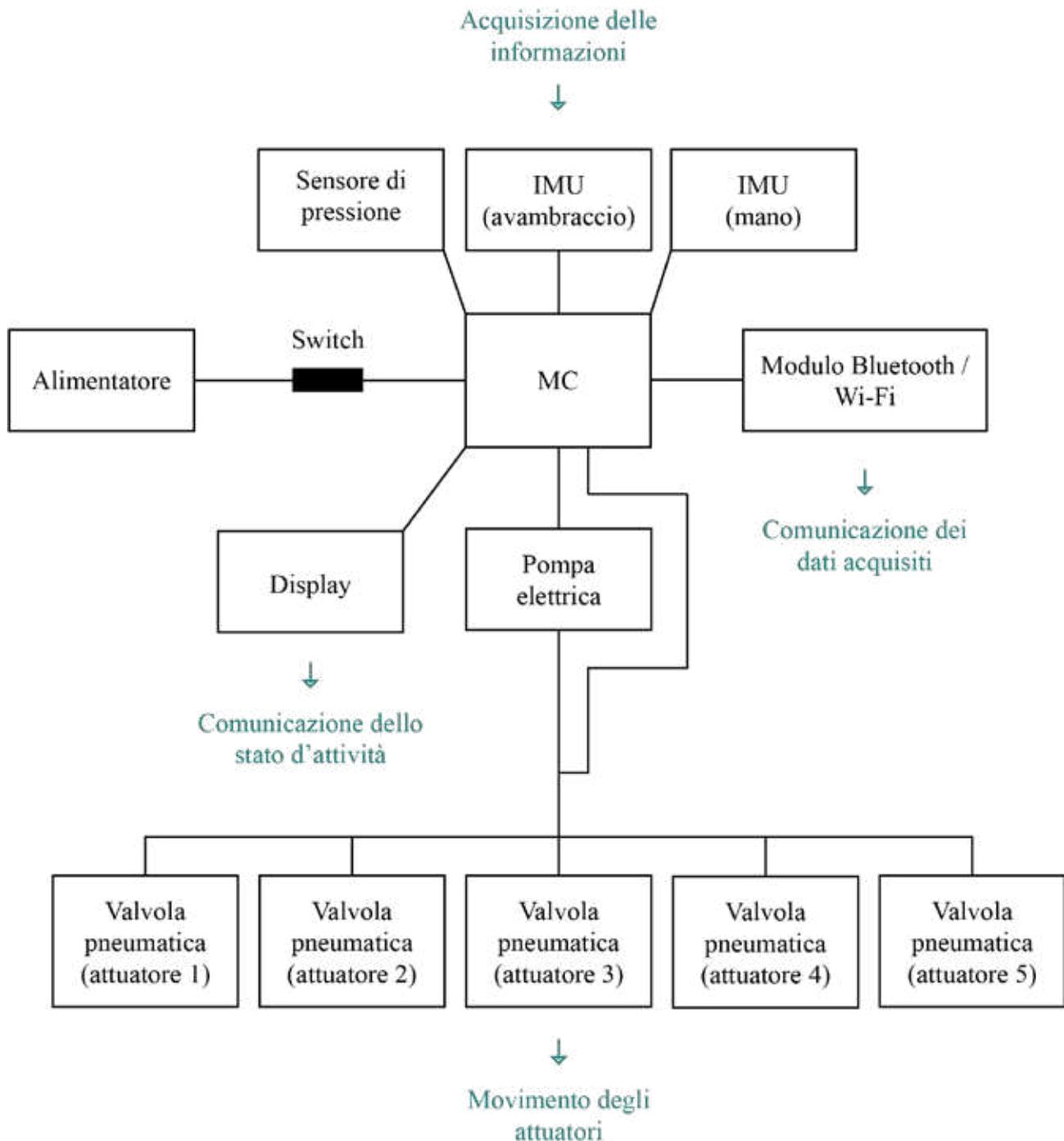


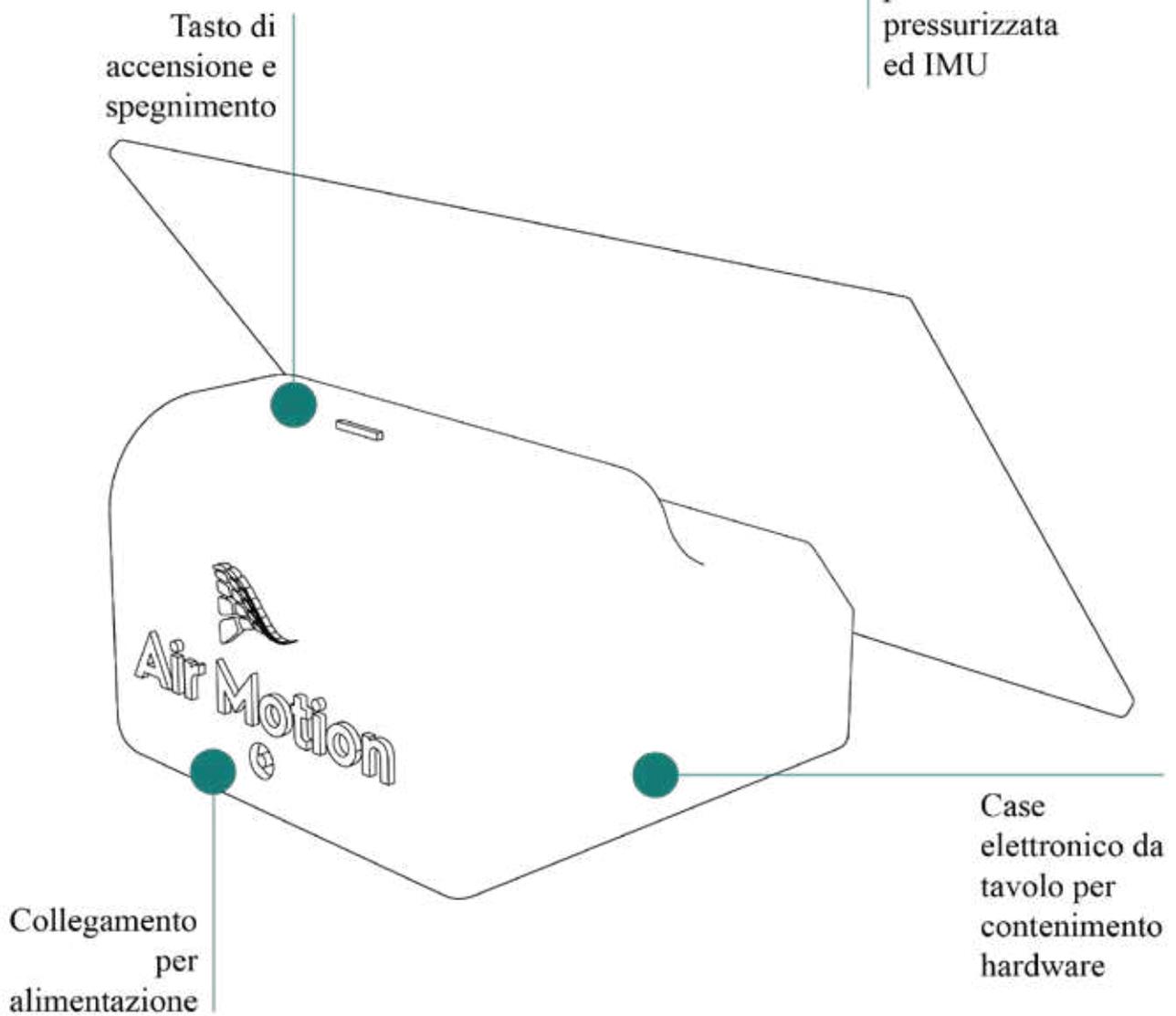
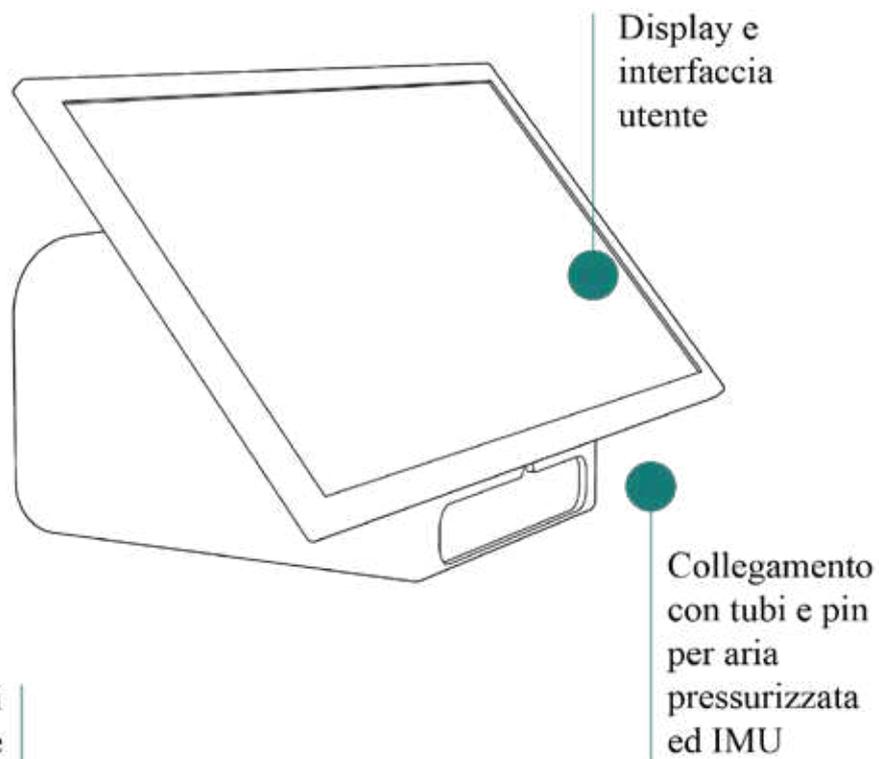
## 12.4 Case elettronico

L'ultima parte che compone il sistema progettato è il case elettronico da tavolo, responsabile del contenimento della componentistica hardware e parte che consente la corretta gestione e utilizzo del servizio.

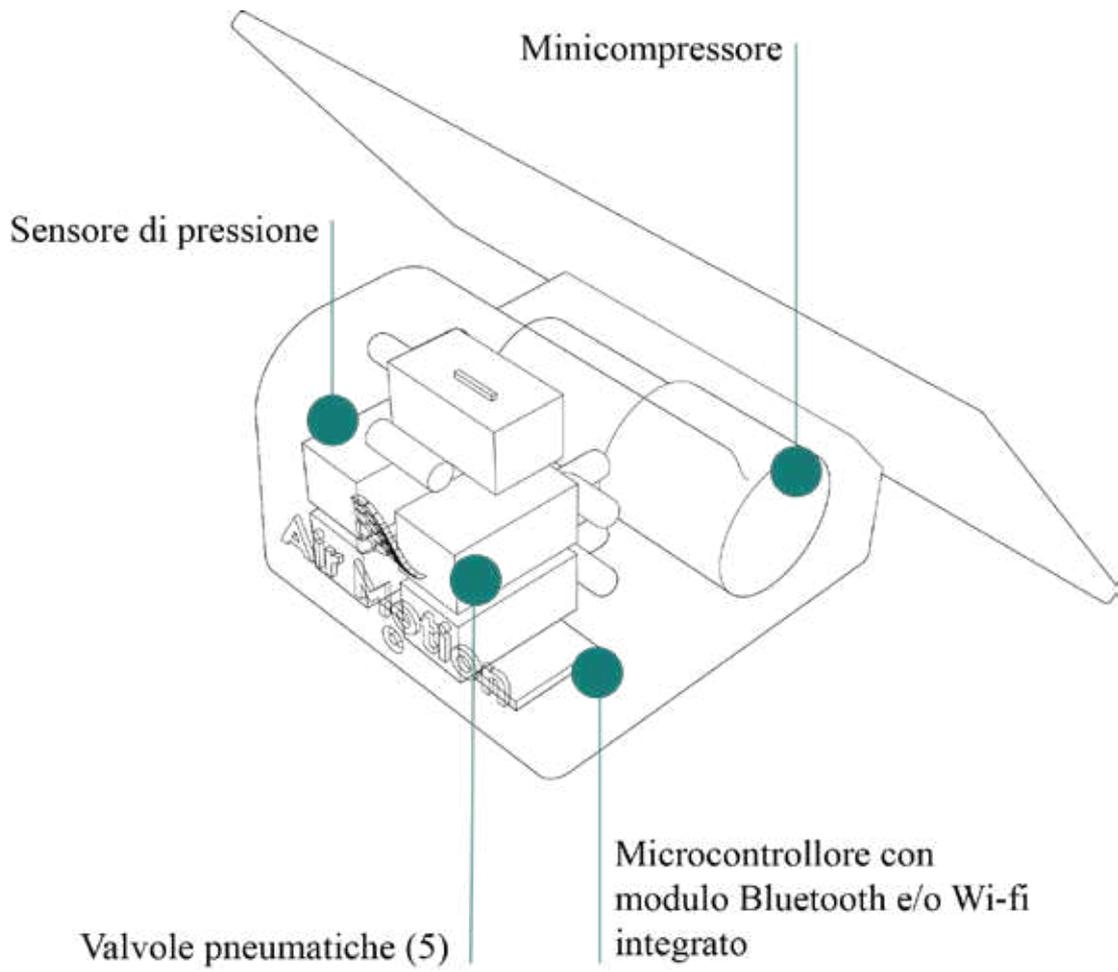
In particolare, il case elettronico deve avere

alcune caratteristiche: deve essere di modesta grandezza, deve essere comodamente utilizzabile, deve essere un'interfaccia intuitiva per l'utente e deve contenere i componenti selezionati. Lo schematico visto precedentemente viene qui riportato.

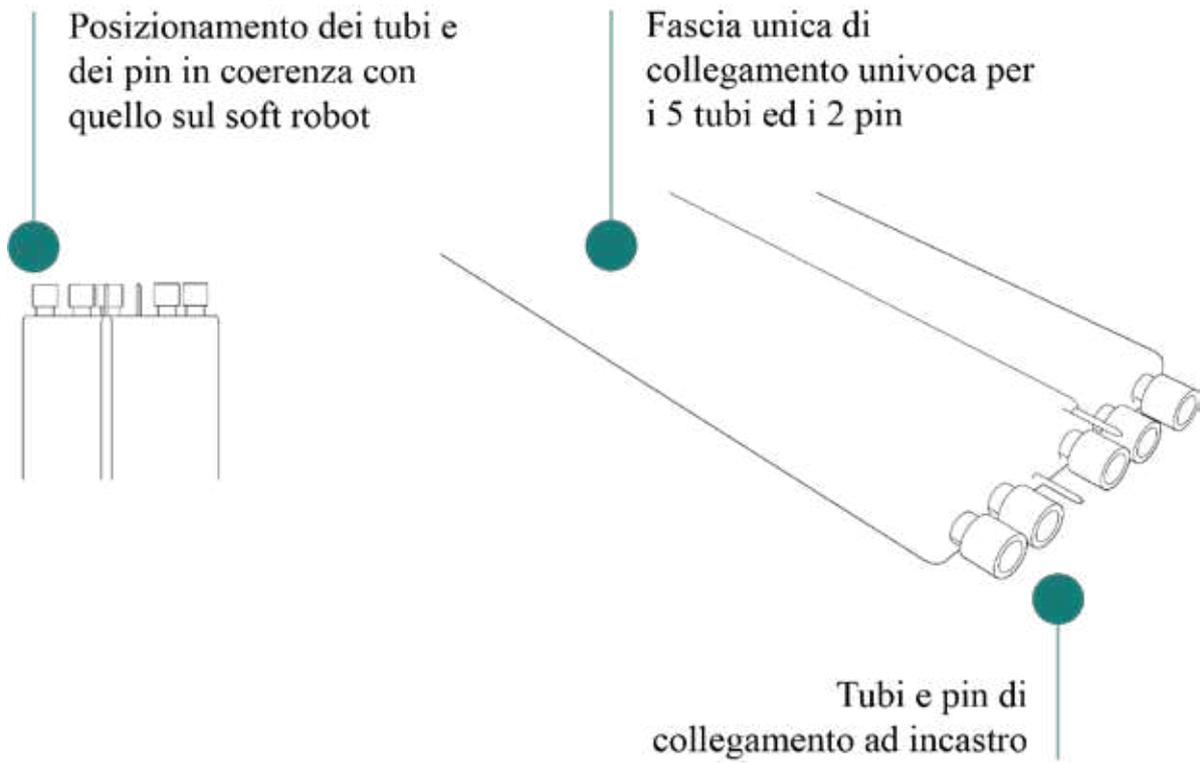




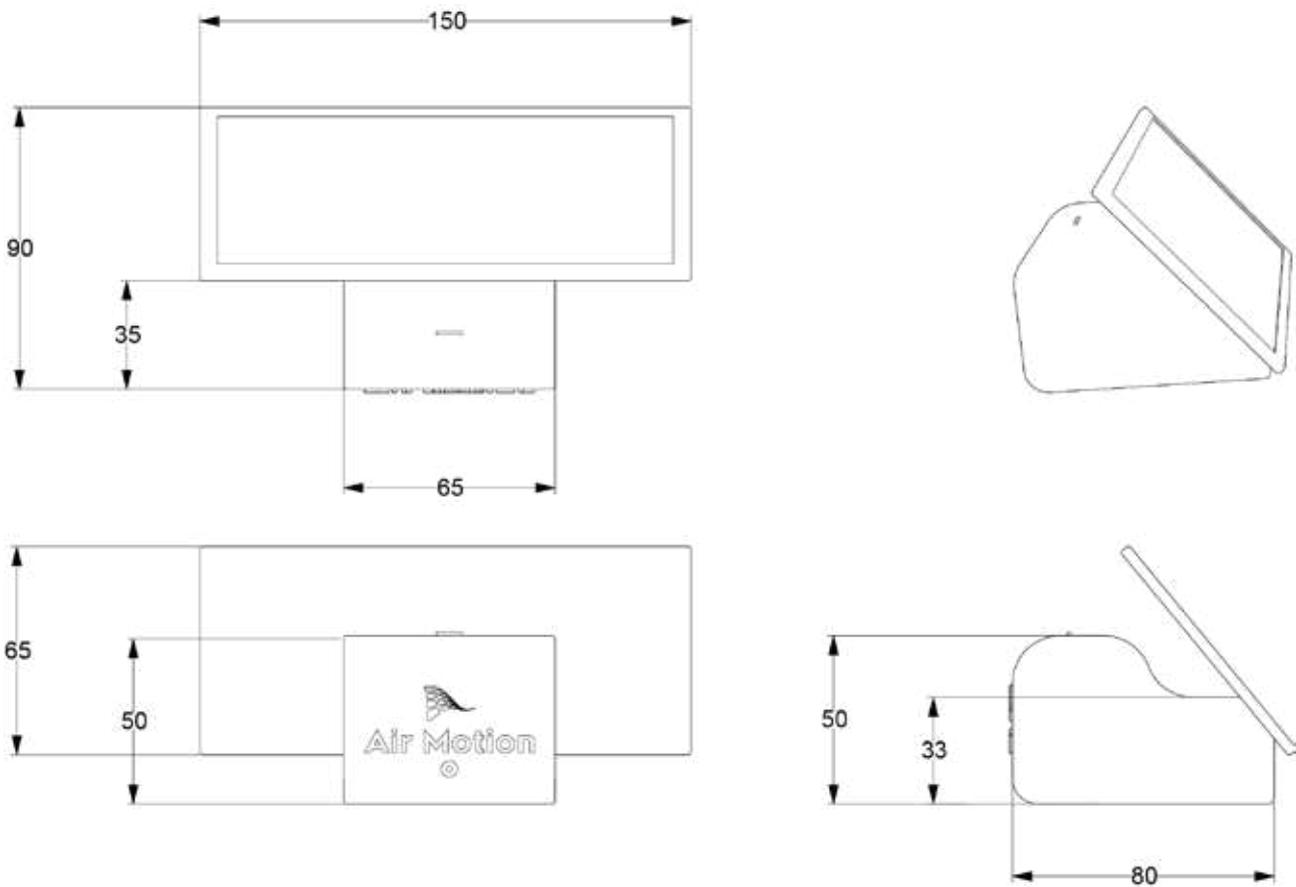
Dettaglio visualizzazione dei componenti interni.



Dettaglio fascia di collegamento univoco.



Dimensioni espresse in mm.



Visualizzazione del case elettronico e del collegamento dei tubi nella sua interezza.

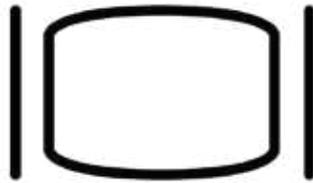




## 12.5 Presentazione del sistema

Viene qui presentato il sistema nella sua interezza, composto quindi dal componente di ge-

stione ed interfaccia utente, dai tubi di collegamento e dal soft robot indossabile.



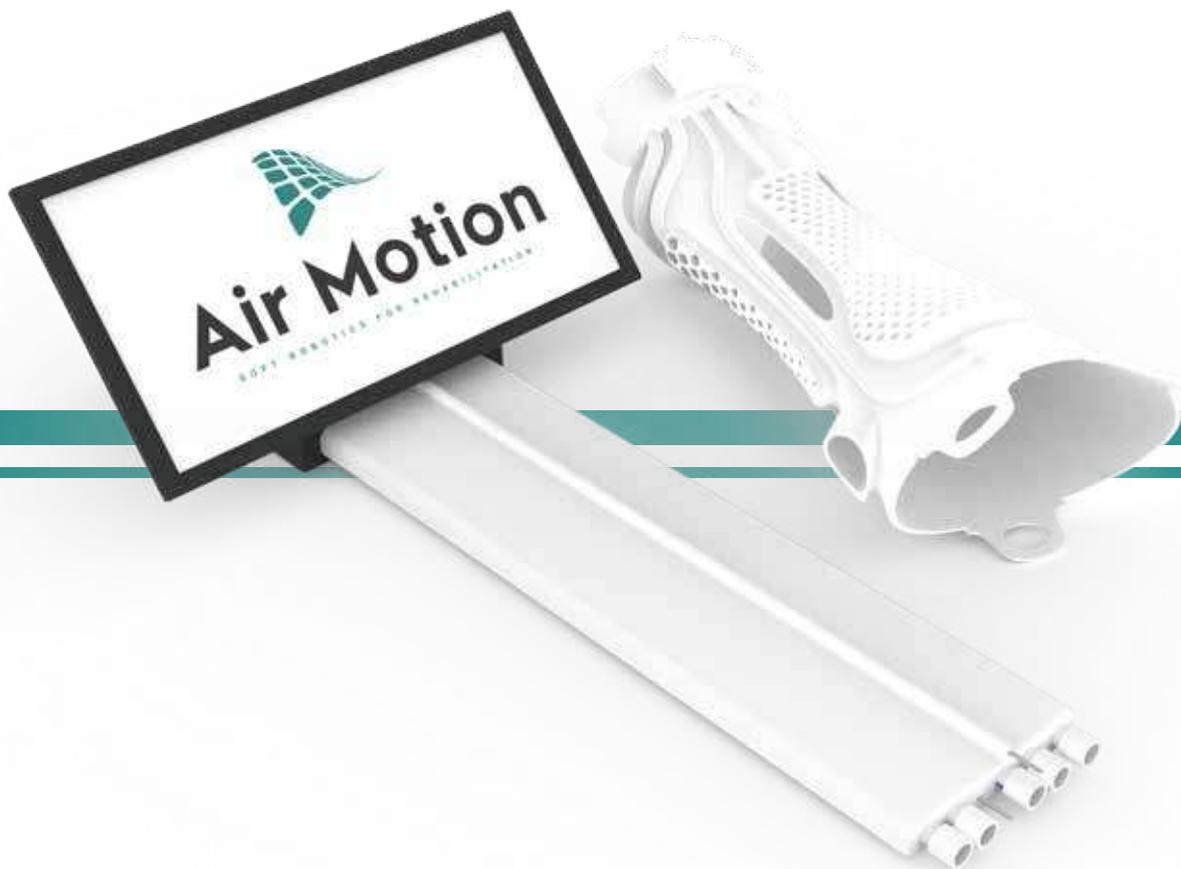
Case elettronico



Tubi flessibili



Soft robot





## 12.6 Applicazione di riferimento

L'applicazione relativa sistema è lo strumento che consente il monitoraggio dei progressi e dei parametri di riabilitazione e serve come base di valutazione per il fisioterapista o il medico di riferimento incaricato di seguire l'andamento della terapia del paziente.

Essendo il sistema progettato dedicato all'utilizzo domestico, è utile che tutti i parametri vengano tracciati e comunicati allo specialista, che potrà così poter seguire più agevolmente il percorso riabilitativo e conoscere con precisione l'attività dell'utente.

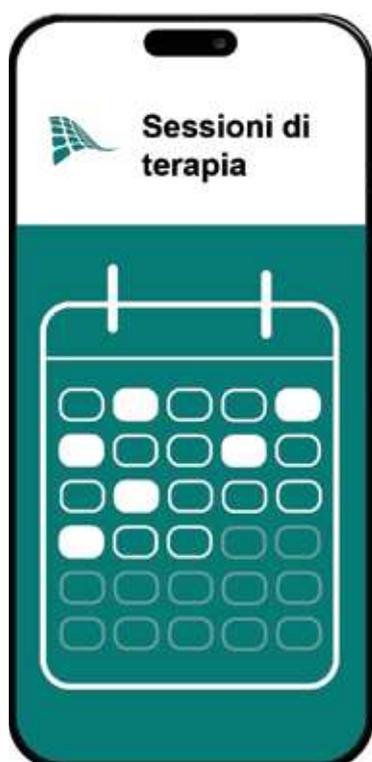


**Schermata iniziale**



**Opzioni di menu.**

A seguito della schermata iniziale, l'applicazione propone una serie di azioni da poter compiere. Queste riguardano la consultazione delle sessioni di terapia, dei grafici di progresso e degli obiettivi fissati.



### **Sessioni di terapia.**

La zona delle sessioni di terapia appare a mo di calendario e la sua utilità è quella di tracciare le tempistiche e le frequenze con cui l'utente segue la propria terapia riabilitativa.



### **Grafici di progresso.**

In questa parte, vengono riassunti gli andamenti dei progressi e degli errori compiuti durante le varie sessioni. Con questo strumento, il medico può compiere le valutazioni del percorso pur non seguendo a casa l'utente.



### **Obiettivi.**

La parte dedicata ai reminder degli obiettivi è utile al paziente per poter verificare per step il proprio miglioramento. Vengono infatti mostrati sia gli obiettivi raggiunti, che quelli ancora da completare, per permettere all'utente di potersi focalizzare durante la fasi di terapia sui vari parametri scelti dal medico di riferimento.

# 13

Comunicazione ed  
identità del progetto

## 13.1 Naming e logo

Per poter comunicare al meglio il progetto e l'identità del servizio che questo si propone di offrire, viene progettato il naming ed il logo dello stesso.

Per quanto riguarda il nome, viene scelto "Air Motion" per richiamare a primo impatto le parole chiave ed i punti di forza del sistema. La prima parola punta infatti a ricordare la tipologia di attuazione ed il campo semantico della soft robotica, associato al secondo termine, "Motion", che ne rafforza l'associazione individuando il tema del movimento e della riabilitazione.

Il secondo titolo, inoltre, conferisce ancora più

chiarezza, e pertanto viene scelto "Soft Robotics for Rehabilitation" volendo ricordare ancor di più la qualità e la specificità del sistema.

Il logo, invece, mira a richiamare più fattori: in prima istanza l'idea del movimento, ricordata grazie all'andamento ondulatorio e dinamico della figura, ed inoltre la forma del prodotto, con delle parti che ricordano la disposizione dei canali e la complessità delle camere d'aria che consentono il movimento, deformandosi.

Il colore verde viene inoltre scelto per la sua capacità di richiamare l'idea del miglioramento e del progresso in positivo, ma anche per richiamare la natura dell'ambito sanitario e medicale.



# Air Motion

SOFT ROBOTICS FOR REHABILITATION

*14*

Metodi di  
fabbricazione digitale

## 14.1 Silicone nelle applicazioni industriali

Per la progettazione del dispositivo soft robotico con attuazione pneumatica per la riabilitazione del polso presentato in questo elaborato è stato selezionato un materiale siliconico adatto al contatto con la pelle umana e con un elevatissimo grado di flessibilità, ovvero il silicone Ecoflex certificato Skin Safe e presentato precedentemente.

Tuttavia, è importante comprendere la natura del materiale silicone per poter analizzare i processi produttivi e per analizzare vantaggi e svantaggi del suo utilizzo.

Il silicone è disponibile in diverse forme e tipologie, ognuna con caratteristiche specifiche che le rendono adatte a diverse applicazioni.

**1. Silicone a base di gomma (RTV - Room Temperature Vulcanizing):** Questo tipo di silicone è comunemente utilizzato per la produzione di stampi, guarnizioni, sigillanti e rivestimenti protettivi. Si tratta di materiali elastomerici che possono essere induriti a temperatura ambiente senza la necessità di calore aggiuntivo. La vulcanizzazione avviene tramite un processo di reticolazione chimica o attraverso l'umidità nell'aria. I siliconi RTV sono disponibili in diverse consistenze, dalle gomme più morbide ai gel più rigidi, e possono essere formulati per offrire proprietà specifiche come resistenza al calore, alla trazione e alla compressione.

**2. Silicone liquido (LSR - Liquid Silicone Rubber):** Questo tipo di silicone è utilizzato principalmente per la produzione di parti iniettate a caldo, come guarnizioni, guanti, membrane, tappi e componenti per dispositivi medici. Il silicone liquido è un materiale termoindurente che viene iniettato in uno stampo e indurito a temperature elevate. Offre una buona resistenza alle alte e basse temperature, una notevole flessibilità e una lunga durata. Il silicone liquido può essere modellato in parti complesse con dettagli fini e può essere formulato per soddisfare specifiche esigenze di performance.

**3. Silicone conduttivo:** Questo tipo di silicone è arricchito con particelle conduttive, come metalli o carbonio, per fornire proprietà di conduzione elettrica o termica. È utilizzato in applicazioni che richiedono dissipazione del calore, schermatura elettromagnetica o connessioni elettriche affidabili. Il silicone conduttivo è ampiamente utilizzato nell'elettronica, nell'ingegneria dei polimeri e nelle applicazioni mediche.

**4. Silicone adesivo:** Questo tipo di silicone è progettato per fornire proprietà adesive ad alto livello e resistenza alla trazione. È utilizzato per incollare materiali diversi tra loro, sigillare giunti e fissare componenti in diverse applicazioni. Il silicone adesivo è disponibile in diverse forme, come sigillanti, nastro adesivo e pellicole adesive, e può essere formulato per aderire a una varietà di superfici, inclusi metalli, plastica, vetro e ceramica.

**5. Silicone medicale:** Questo tipo di silicone è progettato per essere biocompatibile e sicuro per l'uso in applicazioni mediche e biomediche. È utilizzato per la produzione di dispositivi medici impiantabili e non impiantabili, come protesi, cateteri, tubi flessibili, membrane e guarnizioni. Il silicone medicale è caratterizzato da elevata biocompatibilità, resistenza agli agenti chimici, stabilità termica e resistenza alla sterilizzazione.

Ogni tipologia di silicone è ovviamente adatta ad alcuni campi di applicazione piuttosto che ad altri, ed i principali campi di sviluppo sono i seguenti:

**1. Settore medico e sanitario:** il silicone è ampiamente utilizzato nel settore medico per la produzione di dispositivi e prodotti sanitari. Questi includono protesi, dispositivi impiantabili come valvole cardiache e giunti, cateteri, tubi flessibili, guarnizioni, membrane, sigillanti, presidi ortopedici, dispositivi per l'allatta-

mento al seno e molto altro ancora. Il silicone offre biocompatibilità, resistenza agli agenti chimici, flessibilità e resistenza alla sterilizza-

zione, rendendolo un materiale ideale per applicazioni mediche e biomediche.



*Fonte: Protesi estetica dell'avambraccio e della mano, Officina Ortopedica Giansanti*

**2. Settore industriale:** nel settore industriale, il silicone è utilizzato per una vasta gamma di applicazioni, inclusi sigillanti, lubrificanti, guarnizioni, rivestimenti protettivi, adesivi, rivestimenti antiaderenti, isolanti elettrici, guar-

nizioni di tenuta e altro ancora. Le proprietà di resistenza alle alte e basse temperature, alle sostanze chimiche, all'abrasione e alla corrosione rendono il silicone un materiale prezioso per una varietà di applicazioni industriali.



*Fonte: Guarnizioni in silicone, Betelli Srl*

**3. Settore automobilistico e aerospaziale:** nel settore automobilistico e aerospaziale, il silicone è utilizzato per la produzione di guarnizioni, tubi flessibili, guarnizioni di tenuta, cavi elettrici, connettori, ammortizzatori, isolanti termici, rivestimenti antirumore e molto altro ancora. Il silicone offre resistenza agli agenti atmosferici, alle temperature estreme, ai fluidi automotive e ai raggi UV, rendendolo un materiale prezioso per applicazioni in ambienti difficili.

**4. Settore elettronico:** nel settore elettronico, il silicone è utilizzato per la produzione di isolanti, sigillanti, guarnizioni, guaine protettive, cavi elettrici, connettori elettrici, membrane per tastiere, pulsanti e altro ancora. Il silicone offre isolamento elettrico, resistenza alle alte temperature, resistenza agli agenti chimici e all'umidità, protezione da polvere e contaminanti, rendendolo un materiale ideale per applicazioni elettroniche.

**5. Settore alimentare e culinario:** nel settore alimentare e culinario, il silicone è utilizzato per la produzione di utensili da cucina, stam-

pi per dolci, guanti da forno, tappetini per la cottura, sigillanti per alimenti e altri prodotti. Il silicone offre sicurezza alimentare, resistenza al calore, antiaderenza, flessibilità e facilità di pulizia, rendendolo un materiale popolare in cucina e nella preparazione di alimenti.

**6. Settore cosmetico e personale:** nel settore cosmetico e personale, il silicone è utilizzato per la produzione di prodotti per la cura della pelle, shampoo, balsami, creme idratanti, lubrificanti personali, protettivi solari, trucco e molto altro ancora. Il silicone offre texture morbide, idratazione, resistenza all'acqua, durata e sensazione di liscio sulla pelle e sui capelli, rendendolo un ingrediente comune in molti prodotti cosmetici e per la cura personale.

**7. Soft robotica:** nel settore della soft robotica, il silicone rappresenta uno dei materiali principalmente utilizzati grazie alle sue qualità di allungamento, alle volte del 900% per l'allungamento elastico, ed è utilizzato per la produzione di componenti flessibili, attuatori, parti di componenti, oltre che per la realizzazione di interi sistemi soft robotici.



*Fonte: "Nasa Investigating Soft Robots for Space Exploration"*

## 14.2 Metodi produttivi del silicone

Per selezionare il metodo produttivo è necessario prendere in considerazione le caratteristiche chiave del prodotto progettato, ovvero:

1. **Geometria complessa**
2. **Materiale siliconico**
3. **Biocompatibilità con la pelle umana**
4. **Deformazione a seguito di pressione**
5. **Forma personalizzata**

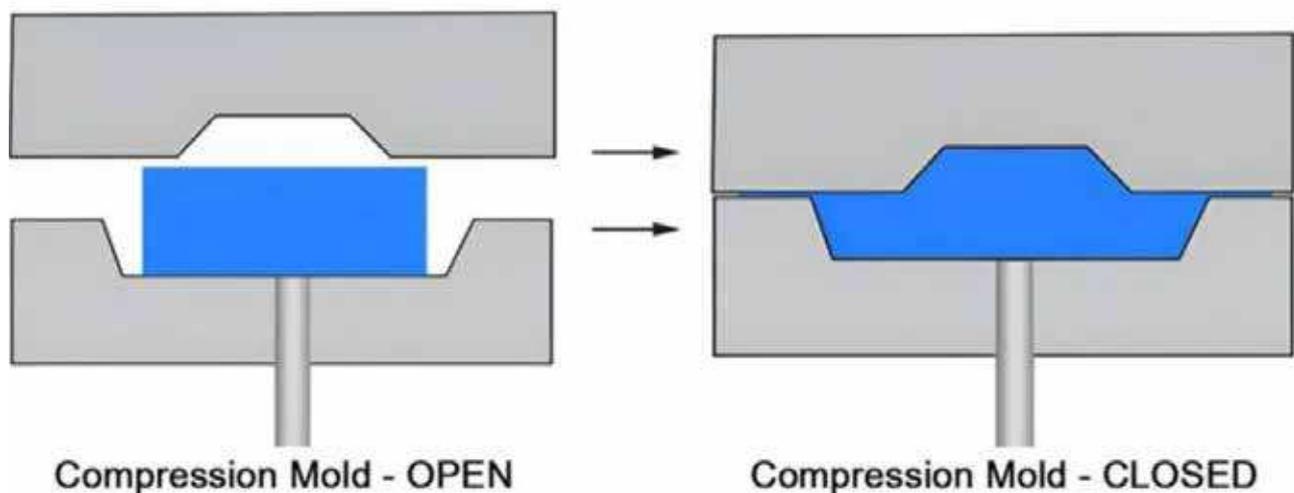
Per poter realizzare concretamente un prodotto con tali caratteristiche, le metodologie di produzione classiche della lavorazione del silicone presentano numerosi svantaggi, i quali rischiano di compromettere la qualità del pezzo finale e l'efficacia delle sue prestazioni.

I principali metodi di lavorazione del silicone sono lo stampaggio a iniezione, la colata a stampo, lo stampaggio a compressione, lo stam-

paggio a trasferimento e lo stampaggio liquido.

**1. Stampaggio a compressione:** nel processo di stampaggio a compressione, il silicone viene mescolato con agenti di vulcanizzazione e inserito in uno stampo aperto o chiuso. Lo stampo viene quindi chiuso e compresso per distribuire uniformemente il materiale in modo da riempire completamente lo stampo e ottenere una forma desiderata. Il silicone viene quindi riscaldato a temperature elevate per favorire la vulcanizzazione e indurire il materiale. Dopo il raffreddamento, l'oggetto stampato viene estratto dallo stampo. Questo processo è adatto per la produzione di guarnizioni, guarnizioni, sigillanti e altri componenti elastomerici, ed è particolarmente adatto per la produzione di lotti di piccole e medie dimensioni.

### Compression Molding Process



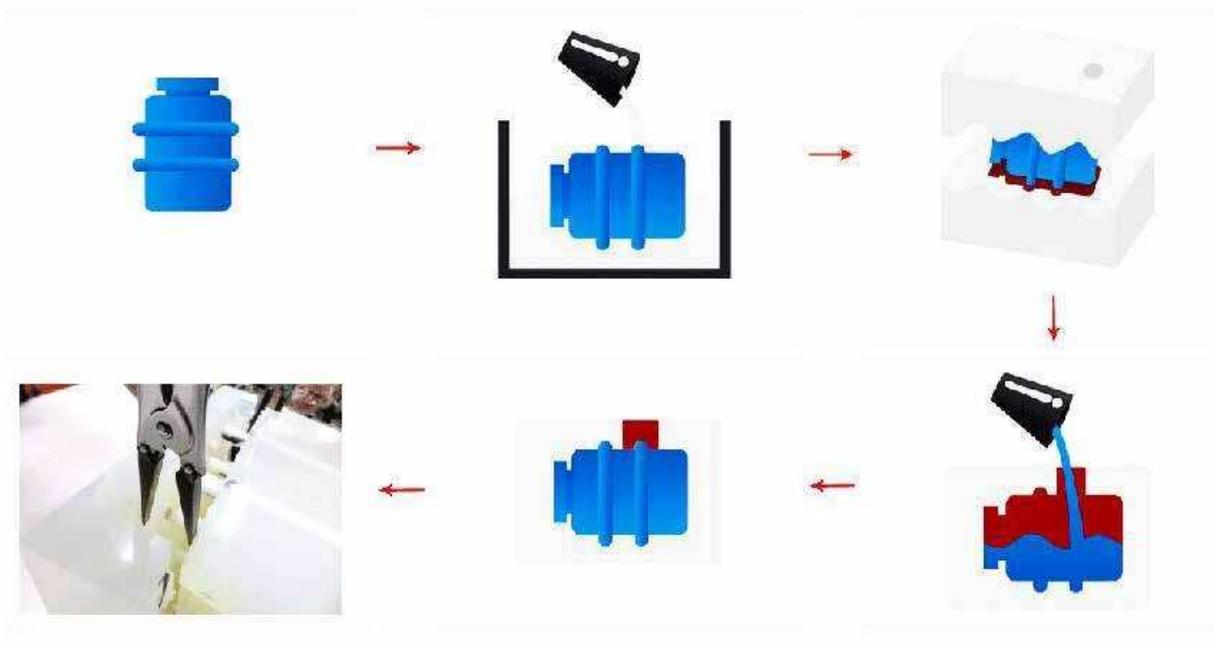
*Fonte: Processo dello stampaggio a compressione*

**2. Stampaggio per iniezione liquida (LIM - Liquid Injection Molding):** nel processo di stampaggio per iniezione liquida, il silicone liquido viene iniettato in uno stampo chiuso sotto pressione. Lo stampo è riscaldato per favorire la polimerizzazione del silicone e ottenere l'indurimento dell'oggetto stampato. Questo metodo consente di produrre parti complesse con dettagli fini e alta precisione, ed è ampiamente utilizzato per la produzione di componenti per l'industria automobilistica, elettronica, medicale e altri settori. Il processo offre anche una produzione efficiente e riduce al minimo i tempi di ciclo.

**3. Stampaggio a trasferimento:** nel processo di stampaggio a trasferimento, il silicone viene alimentato in uno stampo chiuso tramite un sistema di alimentazione, come un pistone o un cilindro. La pressione viene quindi applicata per distribuire uniformemente il materiale e favorire la vulcanizzazione. Questo metodo è simile allo stampaggio a compressione, ma offre maggiore precisione e controllo del processo. È adatto per la produzione di parti con geometrie complesse e precisione dimensionale elevata, ed è utilizzato in settori come l'elettronica, l'industria medica e l'automotive.

**4. Stampaggio a spruzzo (Spray Coating):** nel processo di stampaggio a spruzzo, il silicone liquido viene spruzzato su una superficie preparata utilizzando un'apparecchiatura di spruzzatura. Il silicone viene quindi indurito per formare uno strato protettivo o decorativo. Questo metodo è utilizzato per rivestire parti in metallo, plastica, vetro e altri materiali per fornire proprietà di protezione, isolamento, impermeabilizzazione o decorazione. È utilizzato in una varietà di settori, tra cui l'edilizia, l'automotive, l'industria elettronica e la produzione di giocattoli.

**5. Colata a stampo (Mold Casting):** nel processo di colata a stampo, il silicone liquido viene versato in uno stampo aperto o chiuso e lasciato indurire. Dopo il raffreddamento, l'oggetto stampato viene estratto dallo stampo. Questo metodo è adatto per la produzione di oggetti in silicone elastomerico con forme complesse e dettagliate. È utilizzato per la produzione di prototipi, articoli di consumo, articoli per l'edilizia e altro ancora. La colata a stampo offre flessibilità nel design e nella produzione di lotti di piccole e medie dimensioni.



Fonte: Processo della colata a stampo

Queste metodologie classiche, tuttavia, comportano non poche problematiche nel caso della realizzazione di geometrie piuttosto complesse sempre diverse (a seconda dell'anatomia del paziente per la progettazione presente in questo elaborato). Tutte queste lavorazioni, infatti, comportano lo sviluppo di alcune basi di produzione che ne consentano la realizzazione in serie, non adatta al concetto di "medicina personalizzata custom-made" descritto in questo documento, considerato come gran punto di forza nello sviluppo di un dispositivo sulla base delle specifiche esigenze di ciascun paziente.

Per comprendere gli svantaggi che la produzione classica di silicone comporta nel campo della robotica morbida è possibile consultare l'articolo "Challenges and Opportunities for Design, Simulation, and Fabrication of Soft Robots" di Hod Lipson pubblicato nella celebre rivista SoRo Soft Robotics, in cui vengono analizzate le principali sfide e problematiche che riguardano la progettazione, il controllo e la fabbricazione di robot morbidi.

Se infatti la progettazione negli ultimi anni ha avuto un'evoluzione molto elevata, come è già stato ampiamente discusso, e se già da tempo ormai si sono iniziate ad esplorare le nuove opportunità per il campo della soft robotica, viene denunciata la mancanza di strumenti adeguati di simulazione (progettati e totalmente dedicati

allo sviluppo di robot morbidi) e soprattutto di fabbricazione (che possano garantire la realizzazione veloce ed accurata di geometrie complesse monomateriche in materiali morbidi ed elastomerici).

La precedente e molto più sviluppata robotica rigida vanta oggi numerosi esempi di realizzazione e soprattutto moduli standardizzati non ancora disponibili per la più giovane soft robotica, la quale introduce l'utilizzo di nuovi materiali, processi produttivi e obiettivi di progettazione che necessitano di uno sviluppo specifico e quanto più possibile ottimizzato. Gli strumenti di fabbricazione consistono oggi principalmente nell'utilizzo di tecniche come la fusione o lo stampaggio, ma il vero potenziale della soft robotica e dell'utilizzo dei suoi materiali (in questo caso siliconi), si realizzerà con processi produttivi adatti alla materia utilizzata e che permettano la produzione di forme più complesse.

A tal proposito, di particolare interesse per la soft robotica sono due particolari tecniche di stampa 3D: la Pure Silicone Technology (ancora in attesa di brevetto) da parte della Formlabs, e la Rapid Liquid Printing da parte del MIT (brevettata nel 2021).

Per comprendere tali tecnologie produttive, è importante ricordare alcuni principi della stampa 3D.



## 14.3 Stampa 3D

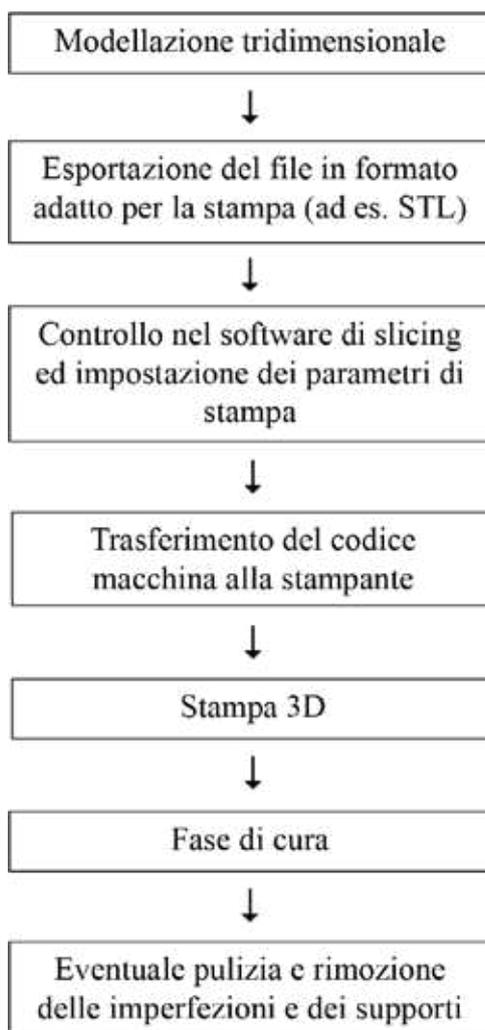
La tecnica di stampa 3D o manifattura additiva (AM) è ormai più che nota e testata dal punto di vista delle tecniche di lavorazione presenti e non è più utilizzata da tempo unicamente per la prototipazione rapida di alcuni pezzi di progettazione (in molteplici campi d'interesse), ma è sfruttata anche per la produzione industriale di prodotti, data la sua evoluzione, la precisione a cui si è arrivati, la rapidità di stampa, sempre più elevata, e la possibilità di utilizzare tecniche diverse a seconda delle esigenze e dei materiali necessari.

È infatti possibile stampare molteplici famiglie di materiali, plastici, elastomerici, metallici ecc, in forme di tutte le tipologie e più o meno

complesse a seconda dei casi e con tecniche differenti, come la FDM, la SLS, la SLA ed altre, che vengono di seguito accennate.

La stampa 3D ha rivoluzionato infatti il modo in cui si progetta, si prototipa e si producono oggetti fisici. Questa tecnologia innovativa consente di creare oggetti tridimensionali strato dopo strato secondo il concetto del layering, o stratificazione, partendo da file digitali, aprendo le porte a una vasta gamma di applicazioni in settori come ingegneria, medicina, design e manifattura.

Lo schema di processo della stampa 3D è infatti il seguente:

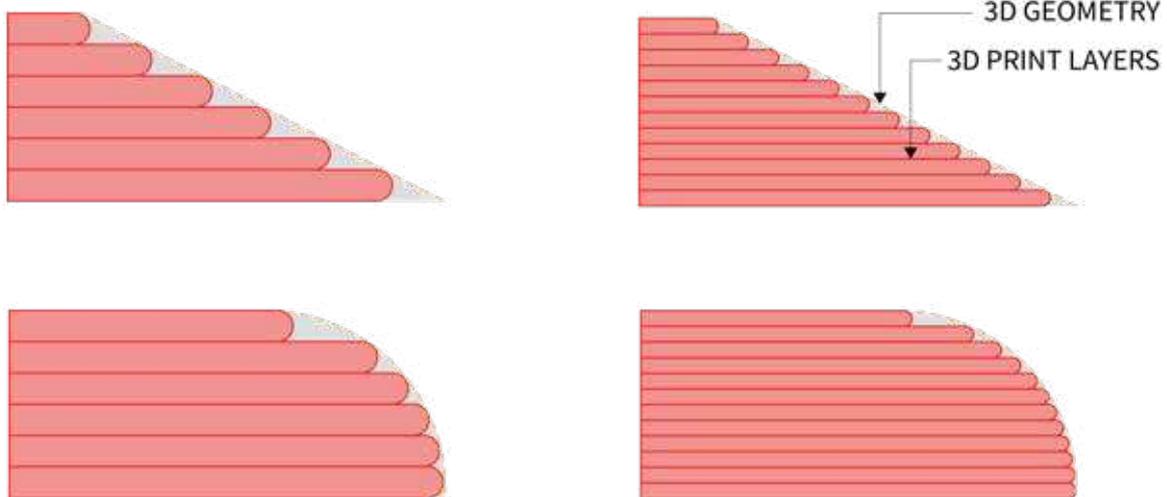


L'origine del processo è la modellazione tridimensionale, fase in cui è sempre necessario tenere a mente la tipologia di produzione che si andrà ad impiegare, e nel caso della stampa 3D è pressoché possibile potersi considerare totalmente liberi per quanto riguarda forme, geometrie e spessori (anche se ovviamente ci sono limiti e vincoli oggettivi da tenere a mente), e successivamente, a seconda del materiale necessario, viene selezionata la tecnica di stampa più adatta.

Una volta partita, la stampa risulta quasi sempre abbastanza veloce ed accurata (e negli ultimi anni alcune aziende leader hanno continuato a presentare sempre più evoluzioni per il parametro della velocità di stampa e della sua precisione, rendendola piuttosto competitiva rispetto ad altri metodi di produzione), ed in alcuni casi necessita di una fase di pulizia in cui devono essere eliminati i supporti strutturali prodotti

per la qualità del pezzo finale. Alcune stampanti permettono di produrre i supporti in materiali differenti da quelli di stampa per consentire una più facile pulizia e per non danneggiare il prodotto d'interesse.

La fase di stampa funziona secondo la metodologia di stratificazione, ovvero secondo il processo per cui la deposizione del materiale avviene secondo alcuni strati (che rappresentano le varie sezioni del prodotto) dove l'uno si appoggia sul precedente e così via. Anche il parametro di layering è fondamentale nella selezione della specifica tecnica e della specifica macchina: alcune tecniche permettono una stratificazione molto meno evidente, sia alla vista che al tatto, rispetto ad altre, e tale parametro coincide in parte anche con la precisione di stampa. Come per tutti gli altri parametri, macchine diverse e materiali diversi comportano precisioni differenti.



Fonte: Visualizzazione del concetto di layering, NExT Lab

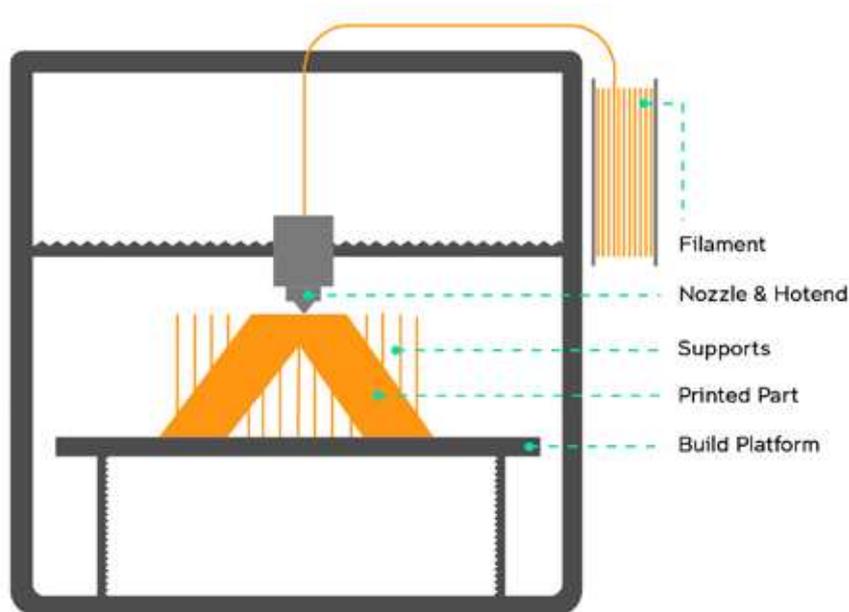
Le principali tecniche di stampa 3D sono le seguenti:

**1. FDM:** La fabbricazione a filamento fuso (FFF), nota anche come modellazione a deposizione fusa (con l'acronimo FDM) o come fabbricazione a filamento libero, è un processo di stampa 3D che utilizza un filamento continuo di un materiale termoplastico. Il filamento viene convogliato da una bobina di grandi dimensioni attraverso una testa di estrusione della stampante in movimento e riscaldata, e viene depositato sul lavoro in crescita. L'estrusore viene spostato sotto il controllo del computer per definire la forma stampata. Di solito l'estrusore si muove in due dimensioni per depositare un piano orizzontale, o strato, alla volta; il lavoro o la testina di stampa vengono poi spostati verticalmente di poco per iniziare un nuovo strato. La velocità della punta dell'estrusore può anche essere controllata per arrestare e avviare la deposizione e formare un piano interrotto senza stringere o gocciolare tra le sezioni. La deposizione di materiale fuso (FDM) è una delle tecniche più diffuse ed è apprezzata per la sua semplicità, versatilità e basso costo, ed è ampiamente utilizzata in ambiti come l'industria manifatturiera, l'educazione e il bricolage.

Per quanto riguarda i materiali, la plastica è

quello più comune per la stampa 3D tramite FDM. Possono essere utilizzati diversi polimeri, tra cui acrilonitrile butadiene stirene (ABS), policarbonato (PC), acido polilattico (PLA), polietilene ad alta densità (HDPE), PC/ABS, polietilene tereftalato (PETG), polifenilsolfone (PPSU) e polistirene ad alto impatto (HIPS). In genere, il polimero si presenta sotto forma di filamento fabbricato a partire da resine vergini. Inoltre, i fluoropolimeri come i tubi in PTFE sono utilizzati nel processo grazie alla capacità del materiale di resistere alle alte temperature. Questa capacità è particolarmente utile per il trasferimento dei filamenti. Le numerose varianti di EAM, ovvero di produzione additiva basata sull'estrusione, consentono di trattare molti altri tipi di materiali:

- Polimeri termoplastici, è l'applicazione più tipica della FDM;
- Materiali compositi con matrice polimerica e fibre dure corte o lunghe;
- Impasti ceramici e argille, spesso utilizzati in combinazione con la tecnica di robotizzazione;
- Miscele verdi di polveri ceramiche o metalliche e leganti polimerici, utilizzate nella EAM di metalli e ceramiche;
- Paste alimentari;
- paste biologiche, utilizzate nel bioprinting.



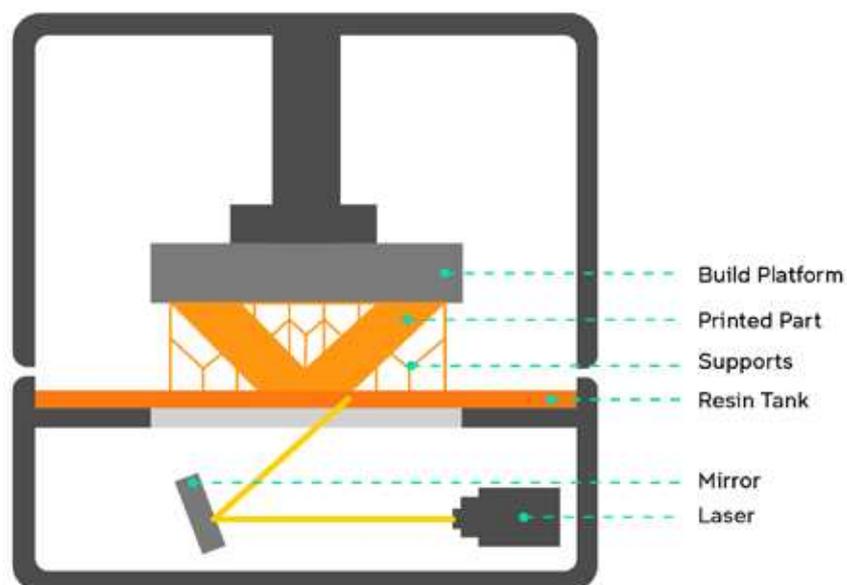
Fonte: Schema stampa FDM, UNSW Making

**2. SLA:** La stereolitografia (SLA) è una tecnica che utilizza un laser ultravioletto per indurire strati di resina fotosensibile liquida, solidificando il materiale strato dopo strato per creare parti precise e dettagliate. La SLA è ampiamente utilizzata per la produzione di prototipi e modelli concettuali ad alta definizione ed è la tecnica di stampa che garantisce una delle precisioni più elevate. La stereolitografia è un processo di fabbricazione additiva che, nella sua forma più comune, funziona focalizzando un laser ultravioletto (UV) su una vasca di resina fotopolimerica. Con l'aiuto di un software di fabbricazione assistita da computer o di progettazione assistita da computer (CAM/CAD), il laser UV viene utilizzato per disegnare un disegno o una forma pre-programmati sulla superficie della vasca di fotopolimero. I fotopolimeri sono sensibili alla luce ultravioletta, quindi la resina si solidifica fotochimicamente e forma un singolo strato dell'oggetto 3D desiderato. Quindi, la piattaforma di costruzione si abbassa di uno strato e una lama riveste la parte superiore della vasca con la resina. Questo processo viene ripetuto per ogni strato del disegno fino al completamento dell'oggetto 3D. Le parti completate

devono essere lavate con un solvente per pulire la resina bagnata dalle loro superfici. Per quanto riguarda i materiali, quelli liquidi utilizzati per la stampa SLA sono comunemente chiamati "resine" e sono polimeri termoindurenti. È disponibile in commercio un'ampia gamma di resine ed è anche possibile utilizzare resine fatte in casa per testare, ad esempio, diverse composizioni. Le proprietà dei materiali variano a seconda delle configurazioni della formulazione ed è possibile utilizzare materiali come:

- Resine standard, per la prototipazione generale
- Resine ingegneristiche, per specifiche proprietà meccaniche e termiche
- Resine dentali e mediche, per certificazioni di biocompatibilità
- Resine colabili, per un contenuto di ceneri nullo dopo la combustione
- Resine biomateriali, formulate come soluzioni acquose di polimeri sintetici come il polietilenglicole, o polimeri biologici come la gelatina, il destrano o l'acido ialuronico.

Recentemente, alcuni studi hanno testato la possibilità di utilizzare materiali verdi o riutilizzabili per produrre resine "sostenibili".



Fonte: Schema stampa SLA, UNSW Making

**3. SLS:** La sinterizzazione laser selettiva (SLS) è una tecnica di fabbricazione additiva (AM) che utilizza un laser come fonte di energia e calore per sinterizzare materiale in polvere (tipicamente nylon o poliammide), puntando il laser automaticamente su punti nello spazio definiti da un modello 3D, legando insieme il materiale per creare una struttura solida. È simile alla fusione laser selettiva; le due sono istanziazioni dello stesso concetto ma differiscono nei dettagli tecnici. La SLS (così come le altre tecniche AM citate) è una tecnologia relativamente nuova che finora è stata utilizzata principalmente per la prototipazione rapida e per la produzione di bassi volumi di componenti. I ruoli produttivi si stanno espandendo con il miglioramento della commercializzazione della tecnologia AM.

A differenza di SLA e FDM, che richiedono spesso strutture di supporto speciali per fabbricare progetti sporgenti, la SLS non ha bisogno di un alimentatore separato per il materiale di supporto, perché il pezzo da costruire è circondato da polvere non sinterizzata in ogni momento. Ciò consente di costruire geometrie precedentemente impossibili. Inoltre, poiché la camera della macchina è sempre piena di polvere, la fabbricazione di più pezzi ha un impatto molto minore sulla difficoltà complessiva e sul prezzo del progetto, grazie a una tecnica nota come “nesting”, in cui più pezzi possono essere posizionati in modo da rientrare nei limiti della macchina. Un aspetto progettuale da tenere pre-

Come è stato accennato, la stampa 3D continua a rappresentare una tecnologia in rapida evoluzione con applicazioni sempre più ampie e diverse. Le varie tecniche offrono vantaggi unici in termini di precisione, tempi di stampa e materiali disponibili, consentendo agli utenti di selezionare l’approccio più adatto alle proprie esigenze specifiche. Tuttavia, è importante considerare attentamente le sfide associate a ciascuna tecnica, tra cui costi, complessità e limitazioni di design, al fine di ottenere i migliori risultati possibili e le precisioni più adeguate.

sente, tuttavia, è che con la SLS è “impossibile” fabbricare un elemento cavo ma completamente chiuso. Questo perché la polvere non sinterizzata all’interno dell’elemento non può essere drenata.

La qualità delle strutture stampate dipende da vari fattori, tra cui le proprietà della polvere, come la dimensione e la forma delle particelle, la densità, la rugosità e la porosità. Inoltre, la distribuzione delle particelle e le loro proprietà termiche influiscono molto sulla fluidità della polvere. I materiali disponibili in commercio utilizzati per la SLS si presentano sotto forma di polvere e comprendono, a titolo esemplificativo, polimeri quali poliammidi (PA), polistireni (PS), elastomeri termoplastici (TPE) e poliarileterchetoni (PAEK). Le poliammidi sono i materiali più comunemente utilizzati per la SLS grazie al loro comportamento ideale di sinterizzazione come termoplastico semicristallino, che consente di ottenere parti con proprietà meccaniche desiderabili. Il policarbonato (PC) è un materiale di grande interesse per la SLS grazie alla sua elevata tenacità, stabilità termica e resistenza alla fiamma; tuttavia, questi polimeri amorfi lavorati con la SLS tendono a produrre pezzi con proprietà meccaniche e precisione dimensionale ridotte e quindi sono limitati ad applicazioni in cui queste sono di scarsa importanza. I materiali metallici non sono comunemente utilizzati nella SLS dopo lo sviluppo della fusione laser selettiva.

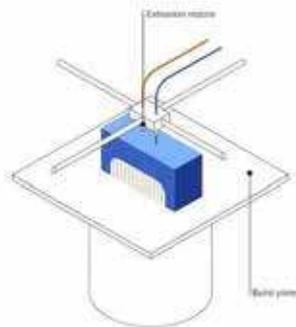
Tuttavia, la stampa 3D ha recentemente permesso lo sviluppo di un nuovo concetto, molto utile al fine di comprendere l’elaborato in questione, conosciuto come stampa 4D, che viene di seguito analizzato, e che consiste nella produzione tramite stampa 3D di un manufatto che non si comporta in maniera statica, ma che risponde nel tempo a determinati stimoli e che varia appunto il proprio comportamento nella dimensione tempo, in questo caso associato ad una nuova dimensione di calcolo.

# Comparing FDM, SLS, and SLA 3D Printing

Additive manufacturing, also known as 3D printing, saves time and costs, expanding product development possibilities. A versatile and accessible alternative to traditional subtractive manufacturing, 3D printing has its foothold in a wide range of industries as its different applications continue to grow. There are three well-known types of 3D printing: Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA). Each method has its unique benefits.

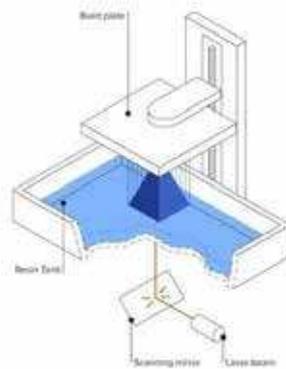
## FDM Fused Deposition Modeling

Fused deposition modeling (FDM), also known as Fused Filament Fabrication (FFF), is widely adopted by hobbyist 3D printers. Used at the consumer level, FDM 3D printers build parts by melting and extruding thermoplastic filament, which a printer nozzle deposits layer by layer in the build area. FDM requires minor training on build setup, machine operation, and finishing, and involves little to no maintenance.



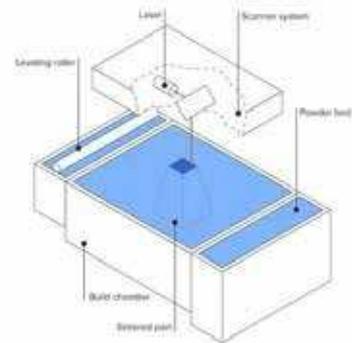
## SLA Stereolithography

The first 3D printing technology invented in the 1980s, SLA 3D printers use a laser to cure liquid resin into hardened plastic, a process called photopolymerization. Compared with all plastic 3D printing technologies, SLA parts have the highest resolution and accuracy, the smoothest surfaces, and the smallest surface finish. SLA remains the most versatile 3D printing technology. SLS needs moderate training on build setup, maintenance, machine operation, and finishing.



## SLS Selective Laser Sintering

Best primarily for industrial applications, SLS 3D printers use a high-powered laser to fuse small particles of polymer powder. The infrared powder supports the part during printing and eliminates the need for dedicated support structures. This makes SLS ideal for complex geometries, including internal features, undercuts, thin walls, and negative features. Getting started with SLS involves minor training on build setup, maintenance, machine operation, and finishing.



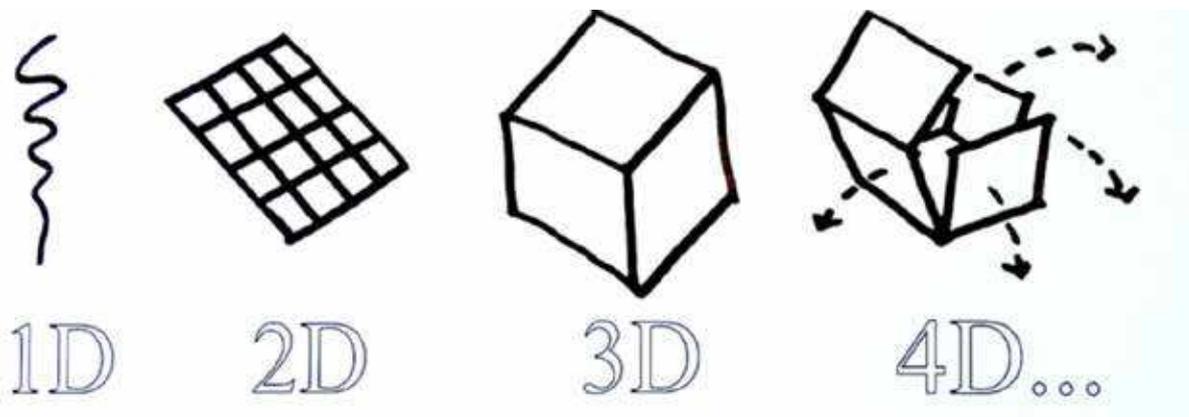
Fonte: Schema diversi tipi di stampa 3D: FDM, SLA e SLS, Formlabs

## 14.4 Stampa 4D

La stampa 4D è stata inizialmente definita come stampa 4D = stampa 3D + tempo, dove la forma, le proprietà o la funzionalità di una struttura stampata in 3D possono cambiare in funzione del tempo; tuttavia, questa definizione risulta essere molto limitante, e la stampa 4D è un concetto che contempla molteplici parametri. Introdotta per la prima volta nel 2013 da Skylar Tibbits presso il MIT (Massachusetts Institute of Technology), la stampa 4D aggiunge una dimensione temporale al processo di produzione, consentendo ai manufatti di trasformarsi, adattarsi e rispondere in modo autonomo agli stimoli ambientali. Questa tecnologia rivoluzionaria

si basa sul concetto di materiali intelligenti o di stimoli applicati, capaci di modificare la forma, struttura o funzione nel tempo, aprendo nuove possibilità nell'ambito del design, dell'ingegneria e della medicina.

Esistono almeno due stati stabili in una struttura stampata in 4D, e la struttura può passare da uno stato all'altro un altro sotto lo stimolo corrispondente secondo cui è stata progettata; gli elementi fondamentali della stampa 4D sono la struttura di stampa 3D, lo stimolo, il materiale reattivo allo stimolo, il meccanismo di interazione e la modellazione matematica.



Fonte: Significato di stampa 4D, *A Short Review on 4D Printing*, *International Journal of 3D Printing*, 2018

**1. Struttura di stampa 3D:** di solito, una struttura stampata in 4D viene creata combinando diversi materiali (o un singolo materiale) nella distribuzione appropriata in un'unica struttura una singola struttura stampata una sola volta. Le proprietà dei materiali, come il rapporto di rigonfiamento e il coefficiente di espansione termica, porteranno al comportamento desiderato di cambiamento di forma desiderato.

**2. Stimolo:** lo stimolo è necessario per innescare le alterazioni di forma/ proprietà/funzionalità di una struttura stampata in 4D. Gli stimoli che i ricercatori hanno utilizzato finora nella stampa 4D includono l'acqua, il calore, una combina-

zione di calore e luce, e una combinazione di acqua e calore. La selezione dello stimolo dipende dai requisiti dell'applicazione specifica, che determina anche i tipi di applicazione specifica, che determina anche i tipi di materiali utilizzati nella struttura stampata in 4D. Solitamente, la stampa 4D viene considerata tale quando la forza non è direttamente applicata dallo sforzo umano ma coincide con fattori ambientali o del contesto in cui il manufatto si trova; la stampa 3D di attuatori pneumatici azionati automaticamente, pertanto, non è l'esempio più immediato di stampa 4D e non rappresenta l'applicazione più "classicamente" intesa di questa tipologia di concetto, ma è comunque assimilabile per comprenderne la logica di fondo.

**3. Materiale intelligente o reattivo allo stimolo:** il materiale reattivo allo stimolo è uno dei componenti più critici della stampa 4D. I materiali reattivi agli stimoli possono essere classificati in diverse sottocategorie, e la capacità di questo gruppo di materiali è definita dalle seguenti caratteristiche: autosensibilità, capacità decisionale, reattività, memoria di forma, autoadattabilità, multifunzionalità e autoriparazione.

**4. Meccanismo di interazione:** in alcuni casi, la forma desiderata di una struttura stampata in 4D non si ottiene direttamente esponendo semplicemente i materiali allo stimolo. Lo stimolo deve essere applicato in una certa sequenza, con una determinata “potenza” e per un periodo di tempo adeguato, che in questo articolo viene definito meccanismo di interazione. Ad esempio, uno dei principali meccanismi di interazione è la termomeccanica vincolata. In

questo meccanismo, lo stimolo è il calore e il materiale intelligente ha un effetto di memoria di forma. Si tratta di un ciclo in 4 fasi. In primo luogo, la struttura viene deformata da un carico esterno ad alta temperatura; in secondo luogo, la temperatura viene abbassata mentre il carico esterno viene mantenuto; in terzo luogo, la struttura viene scaricata a bassa temperatura e viene raggiunta la forma desiderata; in quarto luogo, la forma originale può essere recuperata riscaldando la struttura.

**5. Modellazione matematica:** la matematica è necessaria per la stampa 4D per progettare la distribuzione del materiale e la struttura necessaria per ottenere il cambiamento di forma, proprietà o funzionalità desiderato. È necessario sviluppare modelli teorici e numerici per stabilire le connessioni tra quattro elementi fondamentali: struttura del materiale, forma finale desiderata, proprietà del materiale e stimolo.



*Fonte: 4D printing, ABB*

Una delle caratteristiche chiave della stampa 4D è la programmabilità. Utilizzando materiali intelligenti come polimeri attivati da calore, umidità o altri stimoli, è possibile progettare strutture che possono reagire in modo predefinito a specifiche condizioni ambientali. Ad esempio, è possibile progettare un'ala di aeroplano che si piega automaticamente in risposta a variazioni di temperatura o umidità, migliorando così l'efficienza aerodinamica.

Un'altra caratteristica distintiva della stampa 4D è l'autonomia. Le strutture stampate possono essere progettate per eseguire compiti specifici senza l'intervento umano. Ad esempio, è possibile creare dispositivi medici che si auto-as-

semblano o sistemi di monitoraggio ambientale che si attivano in risposta a determinati segnali. Questo potenziale per l'autonomia apre nuove prospettive nell'ambito della robotica, dell'automazione e della tecnologia indossabile.

Nel caso della progettazione di attuatori pneumatici siliconici per un dispositivo soft robotico, è chiaro che la deformazione avviene a seguito di uno stimolo programmato dall'intervento umano e pertanto la risposta è a livello di logica e schema di processo molto differente da un'attuazione tramite calore, ad esempio, o grazie all'utilizzo di materiali a memoria di forma (scartata nelle fasi concettuali di progettazione).

## 14.5 Pure Silicone Technology, Silicone 40A Resin, Formlabs

Seppure la stampa 3D risulti essere la più indicata metodologia di lavorazione per parti complesse e soprattutto personalizzate a seconda dei casi specifici, questa contempla una serie molto vasta di materiali, ma tra questi spesso non rientra il silicone: la manifattura additiva di silicone, infatti, è molto complessa e fino ad ora non ha avuto grandi implementazioni.

È solo recentemente, nel 2023, che una delle aziende leader del settore, la Formlabs, ha sviluppato un materiale al 100% siliconico adatto alle tecnologie di stampa 3D già disponibili, la Silicone 40A Resin, il primo materiale accessibile per la stampa 3D in silicone puro reso possibile dalla Pure Silicone Technology™, in attesa di brevetto, che combina le eccezionali proprietà del silicone fuso con i vantaggi della stampa 3D.

Mentre le opzioni di stampa 3D elastomerica sono ampiamente disponibili, oggi esistono poche soluzioni sul mercato che offrono la stampa 3D in silicone puro con proprietà avanzate del materiale a causa dei costi elevati o delle sfide tecniche. Formlabs ha inventato la Pure Silicone Technology™ che si basa sull'ecosistema di stereolitografia (SLA) della stessa azienda per produrre internamente parti in silicone al 100% in poche ore, proprio come accade per la stampa SLA che utilizza le resine viste in precedenza.

I pezzi in resina siliconica 40A, con durometro 40A Shore, allungamento a rottura del 230% e resistenza alla lacerazione di 12 kN/m, sono ideali per le applicazioni che richiedono duttilità e durata anche in caso di allungamento, flessione o compressione ripetuti. I pezzi realizzati con la resina siliconica 40A hanno una resilienza di rimbalzo del 34%, un'eccellente resistenza chimica e termica (da -25°C a 125°C) e possono presentare caratteristiche fini di 0,3 mm e forme complesse, difficili da ottenere con i metodi di produzione tradizionali.

I componenti in resina siliconica 40A sono ideali per le seguenti applicazioni:

- Prototipazione rapida, beta test e fasi di con-

valida del ciclo di sviluppo del prodotto per beni di consumo elastici, componenti automobilistici e apparecchiature industriali come connettori, gommini, attuatori, tastiere e cinturini.

- Produzione efficiente in termini di costi di volumi ridotti o personalizzati di parti per uso finale in ambienti interni, come guarnizioni e tenute.

- Ausili e strumenti di produzione personalizzati di alta qualità e lunga durata, come stampi di colata flessibili, maschere, attrezzature e utensili di mascheratura.

- Componenti di dispositivi medici, protesi adattate al paziente e applicazioni di audiologia.

- Pezzi di geometria complessa difficili da produrre con i metodi tradizionali.

I componenti in silicone, grazie alle loro qualità di flessibilità, durata e compressione, oltre che di resistenza chimica e alle temperature, sono utilizzati in un'ampia gamma di applicazioni e settori, dalle guarnizioni nella produzione automobilistica agli attuatori e soffietti nella robotica, fino ai prodotti di consumo come indossabili, auricolari, utensili da cucina e altro ancora.

La produzione di massa di migliaia di pezzi in silicone è conveniente ed efficiente grazie allo stampaggio a iniezione, allo stampaggio a compressione o ai processi di estrusione. Questi flussi di lavoro, tuttavia, richiedono attrezzature e macchinari costosi e spesso l'esperienza di un appaltatore esterno specializzato nella progettazione e nella fabbricazione di tali strumenti, ma soprattutto non consentono la produzione di pezzi "unici" tipici ad esempio della medicina personalizzata.

È da questi svantaggi dei metodi di lavorazione del silicone che nasce la necessità di sviluppare o una nuova tecnica di stampa o un materiale adatti ai fini ultimi, e l'esempio della Formlabs è uno dei principali che tentano di rispondere

con efficienza a questa problematica. Per gli ingegneri, i progettisti e i produttori che desiderano produrre parti in silicone puro in quantità ridotte (1-1000), il costo e il tempo necessario per fabbricare uno strumento rappresentano un ostacolo. I processi a basso costo, come la colata di silicone, sono possibili per bassi volumi, ma richiedono molta manodopera e tempo, sono difficili da replicare perfettamente e hanno limitazioni di progettazione o di

geometria. Anche la stampa 3D con materiali elastomerici è un'alternativa rapida ed economica, ma le proprietà di questi materiali sono spesso inferiori a quelle del silicone. Sebbene alcuni produttori di stampanti 3D offrano materiali in silicone puro per la stampa 3D diretta di parti in silicone, questi sistemi costano oltre 100.000 dollari e non vengono pertanto presi in considerazione.



*Fonte: Esempi di pezzi stampati con il Silicone 40A Resin, Formlabs*

## 14.6 Rapid Liquid Printing, MIT

Se nel caso precedente è stato presentato un materiale silconico adatto alla stampa 3D, qui viene invece presentata una metodologia di stampa tridimensionale innovativa e di grande potenzialità, chiamata Rapid Liquid Printing e brevettata da parte del Self Assembly Lab del MIT nel 2021.

Abbreviata come RLP, è un nuovo processo di stampa che consiste nell'utilizzo di un robot, ovvero una macchina a portale o un braccio robotico, che disegna fisicamente un oggetto con del materiale liquido (solitamente silicone e fotopolimeri) all'interno di un serbatoio (spazio 3D delimitato dalle pareti della vasca) contenente una sospensione in liquido gel.

Viene ritenuta una soluzione che permette la combinazione di materiali industriali con velocità di stampa elevate in un processo controllato con precisione per produrre prodotti, sia di grandezze medie che di largo ingombro, su larga scala e personalizzati. In questa tipologia di stampa 3D, infatti, può essere utilizzato qualsiasi materiale che possa indurirsi tramite polimerizzazione per processi chimici o fotopolimerizzazione: questo permette l'utilizzo di una gamma più vasta di materiali anche di alta qualità come gomme, schiume e plastiche, che vengono utilizzati in ambito industriale. Può essere implementata su qualsiasi macchina controllabile numericamente, ovvero macchine CNC e pertanto richiede, come negli altri casi, la generazione di un codice macchina a seconda del modello 3D d'interesse.

La stampa RLP è di recentissimo sviluppo e pertanto, seppur sia stata brevettata, non sono ancora disponibili macchine relative sul mercato ed è una tecnologia ancora sconosciuta ai più. Numerosi studi prevedono un significativo aumento degli investimenti in tale tecnologia perché le sue potenzialità sono numerose e di grande rilevanza.

È stato previsto che il mercato della stampa liquida rapida potrà crescere da 48 milioni di dollari dal 2023 fino ai 284 milioni entro il 2027. Si prevede che il mercato della stampa liquida

rapida crescerà a un CAGR più elevato in tale periodo a causa del previsto aumento della domanda di progettazione e produzione personalizzate. Si prevede, infatti che diverse aziende adotteranno stampanti rapide per scopi di produzione poiché la tecnologia facilita la produzione di prodotti con geometrie complesse e offre prezzi competitivi rispetto ai metodi di produzione tradizionali. La crescita è prevista soprattutto nel settore automobilistico grazie alla crescente domanda di veicoli ibridi e veicoli elettrici che alimenta la crescita di domanda di nuovi componenti automobilistici e una migliore progettazione del motore, così come nel settore medicale e sanitario dove il concetto di produzione rapida e personalizzata è sempre più significativo per l'accuratezza ed efficienza dei servizi.

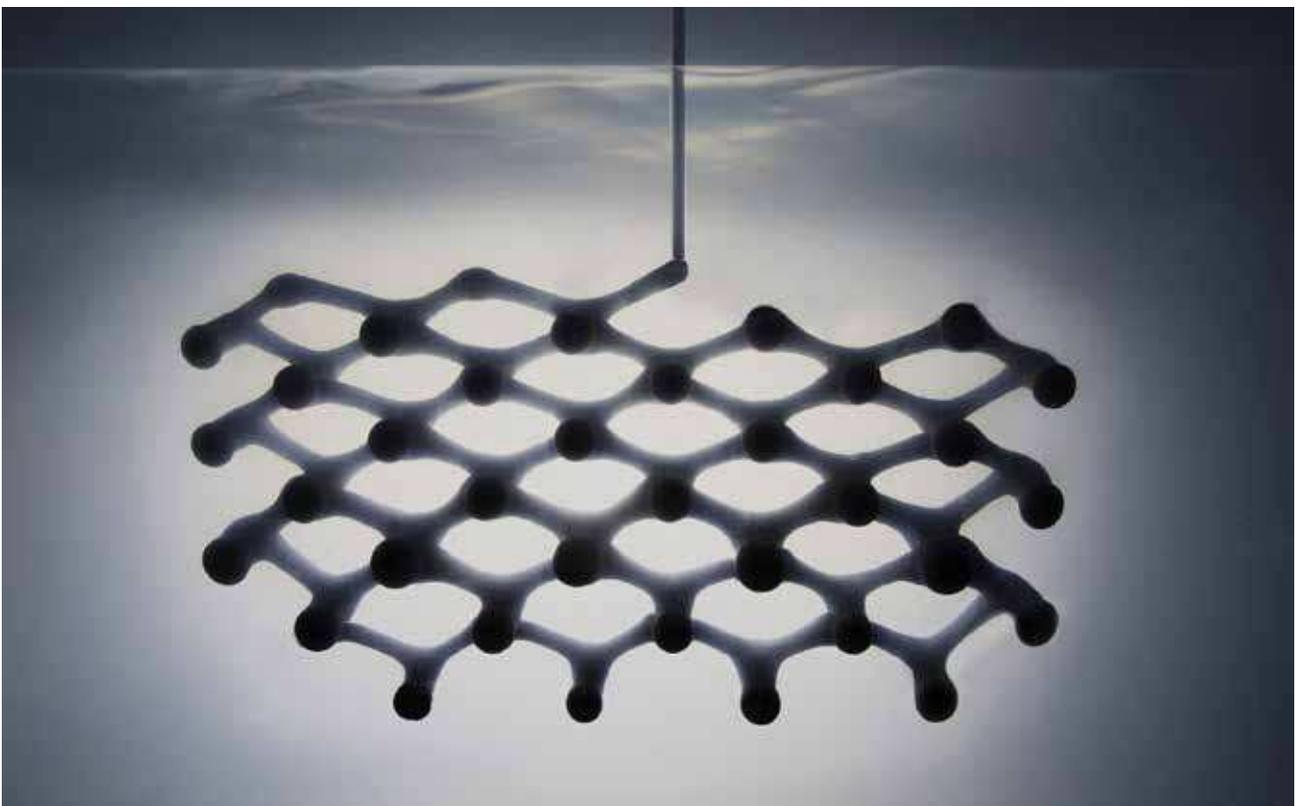
Tale tecnica, infatti, oltre che a garantire qualità del pezzo finale, possibilità di stampare quasi qualsiasi forma, anche complessa, con nuovi materiali prima pressoché inutilizzabili nella manifattura additiva, mira a risolvere i principali svantaggi della stampa 3D, quali la necessità di avere supporti strutturali, l'impiego di numerose ore per produrre un pezzo e la (a volte) scarsa qualità del prodotto finito dovuta al comportamento anisotropo del materiale.

Nel caso della RLP, infatti, tali punti sono di particolare vantaggio:

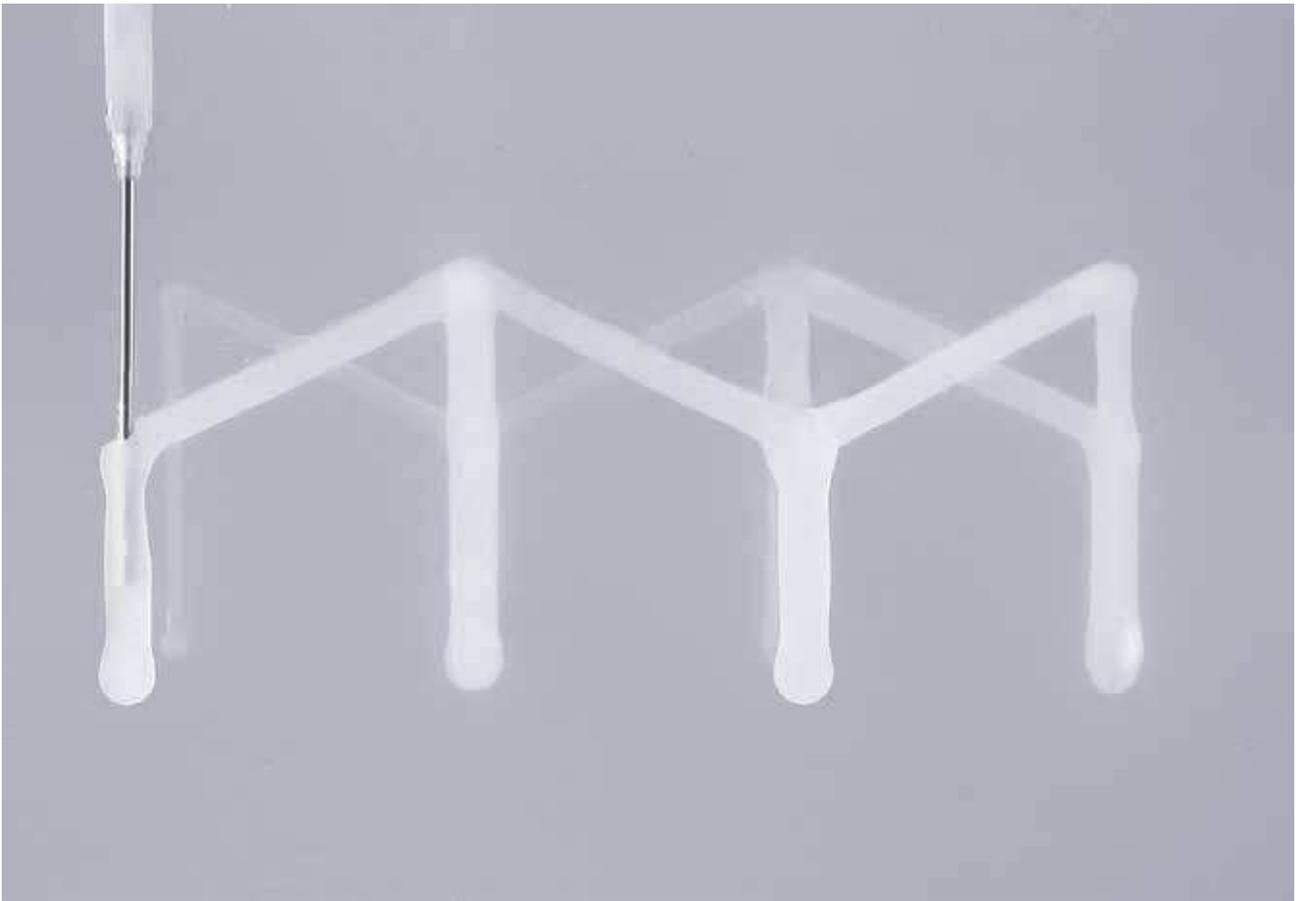
- 1. Velocità:** come suggerisce il nome, rapid, la tecnica analizzata in questa fase di ricerca è molto più veloce rispetto alla stampa 3D a filamento o a resina, e permette quindi un grande risparmio sui tempi di lavorazione industriali. La fase di stampa è la più rapida presente in via di sviluppo e seppure la fase di cura (ovvero l'indurimento e la fotopolimerizzazione) sia più lunga, è importante ricordare che più pezzi potrebbero essere fatti indurire contemporaneamente, riducendo in questo caso le tempistiche di una produzione più larga.



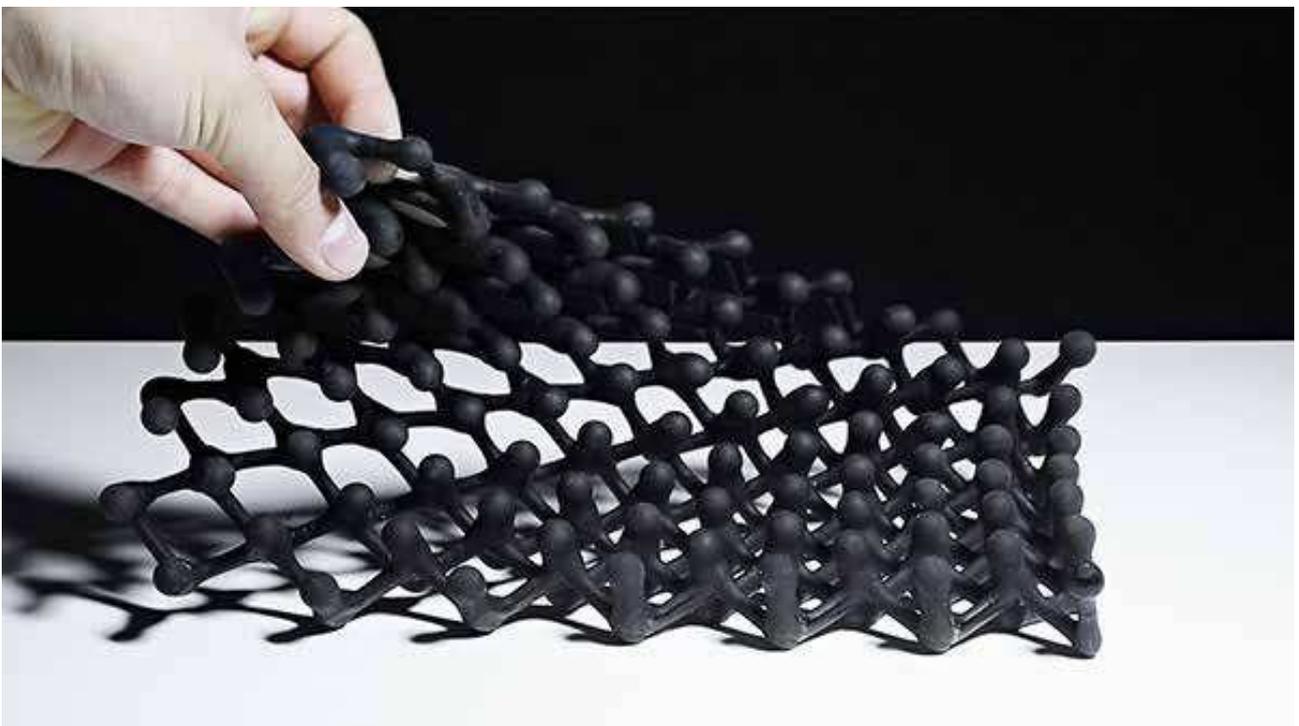
*Fonte: Rapid Liquid Printing, Self-Assembly Lab, MIT*



*Fonte: Rapid Liquid Printing, Self-Assembly Lab, MIT*



*Fonte: Rapid Liquid Printing, Self-Assembly Lab, MIT*



*Fonte: Rapid Liquid Printing, Self-Assembly Lab, MIT*

**2. Supporti:** poiché la stampa avviene in ambiente liquido in gel, questo materiale fornisce già supporto alla deposizione di materiale e pertanto è possibile stampare “a mezz’aria” il manufatto, senza che questo collassi sul fondo, senza dover prevedere supporti strutturali aggiuntivi, come invece accade nel caso della stampa 3D. Questo riduce chiaramente ancora di più i tempi di stampa ma soprattutto evita la fase di cura manuale e non compromette la qualità del pezzo finito. Inoltre, la mancanza di

supporti elimina anche la previsione degli stessi nel software di slicing, il quale diventa quindi dedicato unicamente alla generazione del percorso macchina.

**3. Larga Scala:** grazie alla velocità e alla mancanza di supporti strutturali, la RLP viene ipotizzata come la prossima tecnologia di produzione per le grandi industrie e per la realizzazione di pezzi strutturali. Potendo funzionare su qualsiasi macchina a controllo numerico, è



*Fonte: Rapid Liquid Printing, Self-Assembly Lab, MIT*

possibile pensare non solo ad un impiego per manufatti di dimensioni medie, come accade nella stampa 3D, ma anche potenzialmente ad un impiego per prodotti di più largo ingombro.

**4. Qualità del materiale:** è poi possibile analizzare la qualità del pezzo finito, tecnicamente superiore rispetto a quella garantita dalla stampa 3D tradizionale. Seppure quest'ultima sia stata recentemente sottoposta a moltissime evoluzioni dal punto di vista della precisione, è importante sapere che, quando il filamento fuso si deposita, questo va immediatamente incontro ad un raffreddamento, e talvolta la deposizione di materiale può comportare la generazione di difetti strutturali e nodi, punti d'imperfezione che causano un comportamento anisotropo. Nel caso della RLP, invece, il materiale viene depositato allo stato liquido e viene mantenuto in posizione dal gel: i layer di deposizione si fondono quindi tra di loro prima che avvenga la polimerizzazione, e da questo ne consegue un comportamento isotropo.

**5. Disponibilità geometrica:** di grande valore è, inoltre, il vantaggio rispetto alla stampa 3D della molto più elevata libertà nel poter progettare geometrie di nature diverse e anche potenzialmente molto complesse. Non dovendo più intervenire sui supporti strutturali, il progettista è in grado di produrre e disegnare forme con dettagli interni complessi, mentre nella manifattura additiva classica questo non è sempre possibile perché è necessario avere spazio di azione per eliminare tali supporti e levigare poi la parte presa in esame. L'unica limitazione nella geometria, è la stessa presente nella stampa

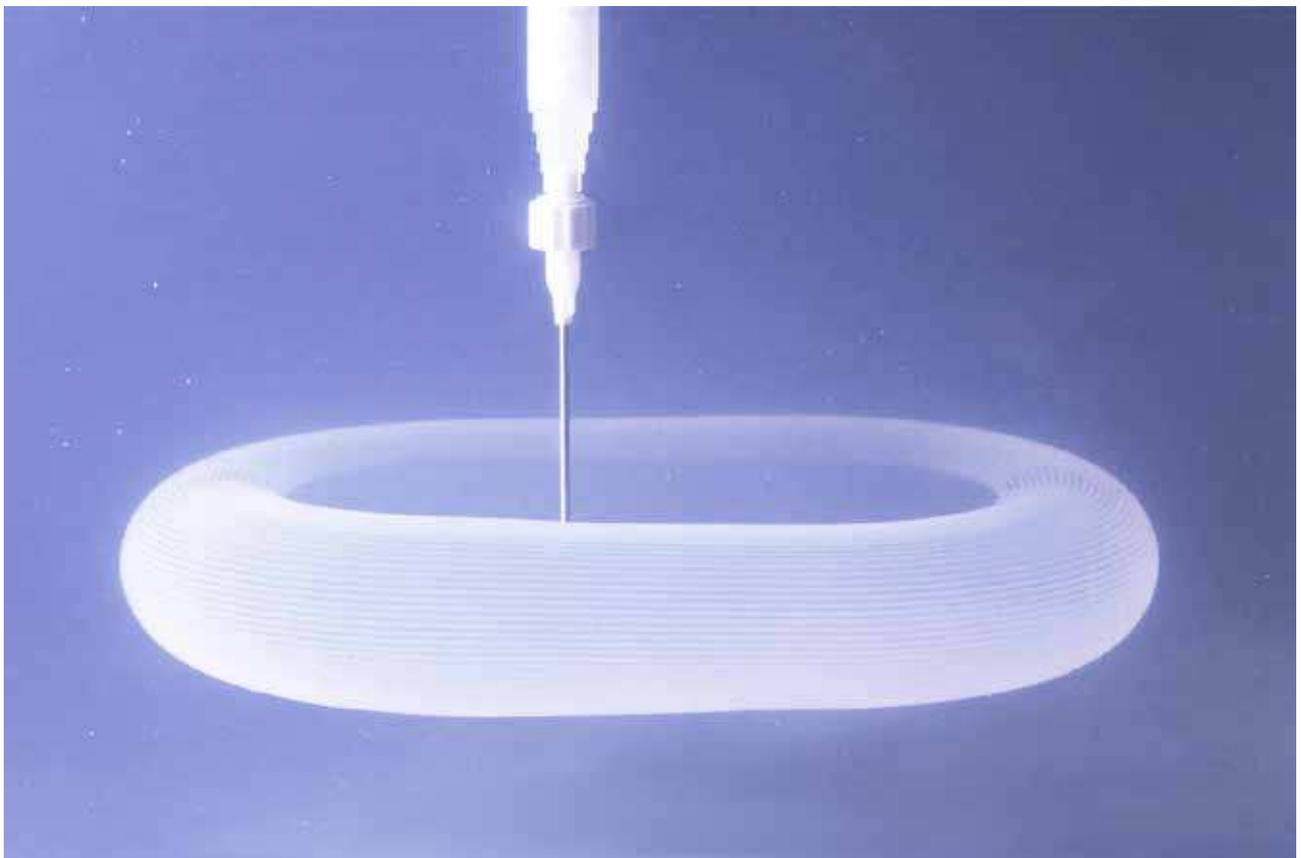
3D a polvere, quindi non è possibile disegnare forme chiuse e cave poiché il gel di supporto rimarrebbe all'interno. Per ovviare a tale problematica, è sempre necessario prevedere punti di apertura della struttura da cui poter far uscire il gel e pulire il manufatto finito.

La tecnica Rapid Liquid Printing è quindi di grande interesse per la ricerca di questo elaborato e rappresenta una possibile soluzione per la produzione del pezzo progettato.

Tra i vari impieghi, infatti, di grande interesse risulta essere la sperimentazione da parte del Self Assembly Lab riguardante la realizzazione di oggetti pneumatici con tecnica RLP. Questa sperimentazione ha anche dato vita a una mostra, chiamata "**Liquid to Air: Pneumatic Objects**", mostra di opere gonfiabili stampate in 3D dal Self-Assembly Lab, dal MIT e dal designer svizzero Christophe Guberan, esposta alla Patrick Parrish Gallery di New York. Utilizzando il Rapid Liquid Printing, il Self-Assembly Lab ha creato un modo per realizzare prodotti dinamici, personalizzati e di grandi dimensioni, con forme complesse, camere interne, superfici intricate e altre caratteristiche uniche. L'oggetto, una volta stampato nel gel di sospensione, viene rimosso dal serbatoio, lavato con acqua e gonfiato per assumere la forma desiderata. Ogni prodotto può essere sgonfiato, immagazzinato, spedito e quindi gonfiato di nuovo. Con la stampa liquida rapida, la produzione può quindi essere reimmaginata come un'esperienza artistica senza limiti di scala o di gravità, che ci chiede di ripensare il design, la produzione, l'uniformità, la logistica e i cicli di vita dei prodotti.



*Fonte: Rapid Liquid Printing, Liquid to Air, Self-Assembly Lab, MIT*



*Fonte: Rapid Liquid Printing, Liquid to Air, Self-Assembly Lab, MIT*





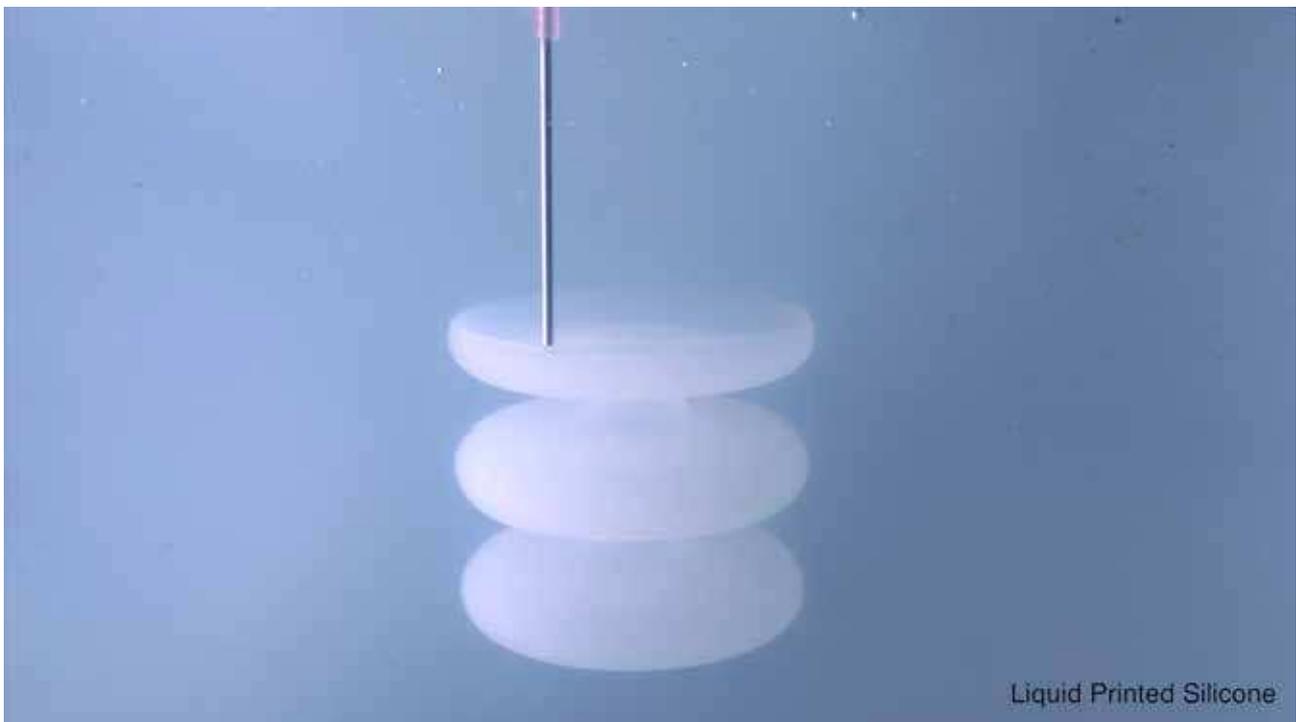
*Fonte: Rapid Liquid Printing, Liquid to Air, Self-Assembly Lab, MIT*

Anche il dipartimento di Design BMW, sempre in collaborazione con MIT, ha sviluppato con successo tecnologie di materiali gonfiabili stampati che si autotrasformano, si adattano e passano da uno stato all'altro. Questa commissione visionaria è stata presentata al V&A e per la prima volta esposta durante la mostra "**The Future Starts Here**", che esplora il potere del design nel plasmare il mondo di domani.

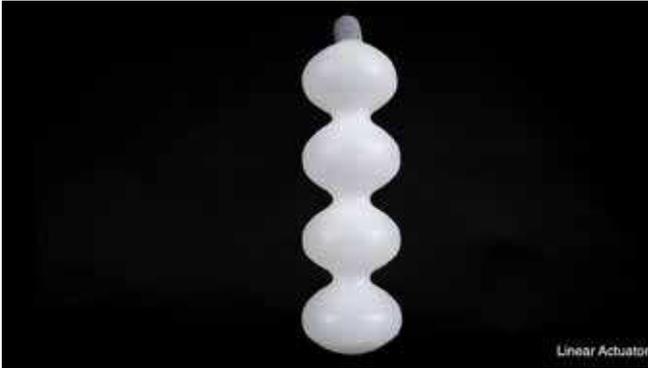
Il Dipartimento di Design BMW e il Self-Assembly Laboratory del MIT hanno iniziato il loro studio interdisciplinare due anni fa con l'ambizione reciproca di spingere i confini delle tecnologie dei materiali. I concetti lungimiranti di BMW di interni del futuro in grado di integrare e adattarsi senza soluzione di continuità sono stati il punto di partenza di un'esplorazione approfondita da parte del Self-Assembly Laboratory del MIT. Questa collaborazione ha portato al primo esempio di un gonfiabile completamente stampato che può essere personalizzato in qualsiasi dimensione o forma. L'oggetto stampato in silicone può cambiare forma

a seconda della pressione dell'aria nel sistema. I controlli pneumatici del sistema consentono alla struttura stampata di trasformarsi in una varietà di forme, funzioni o caratteristiche di rigidità.

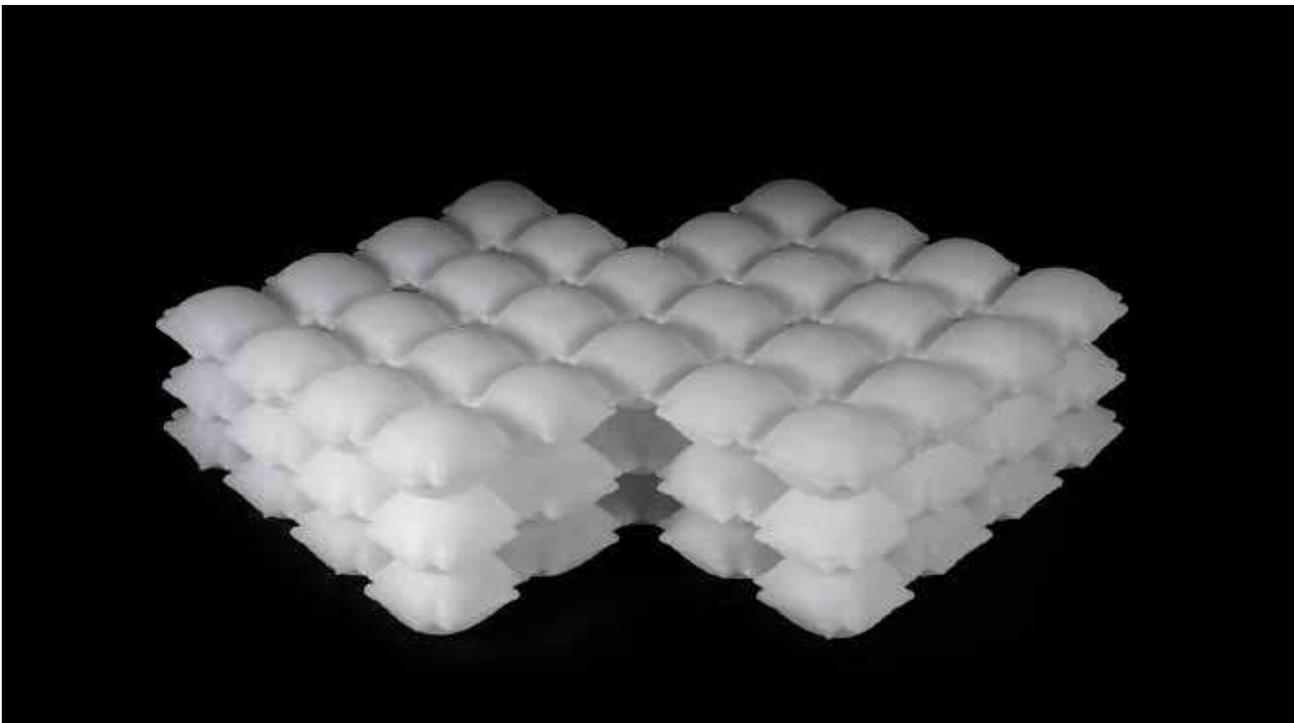
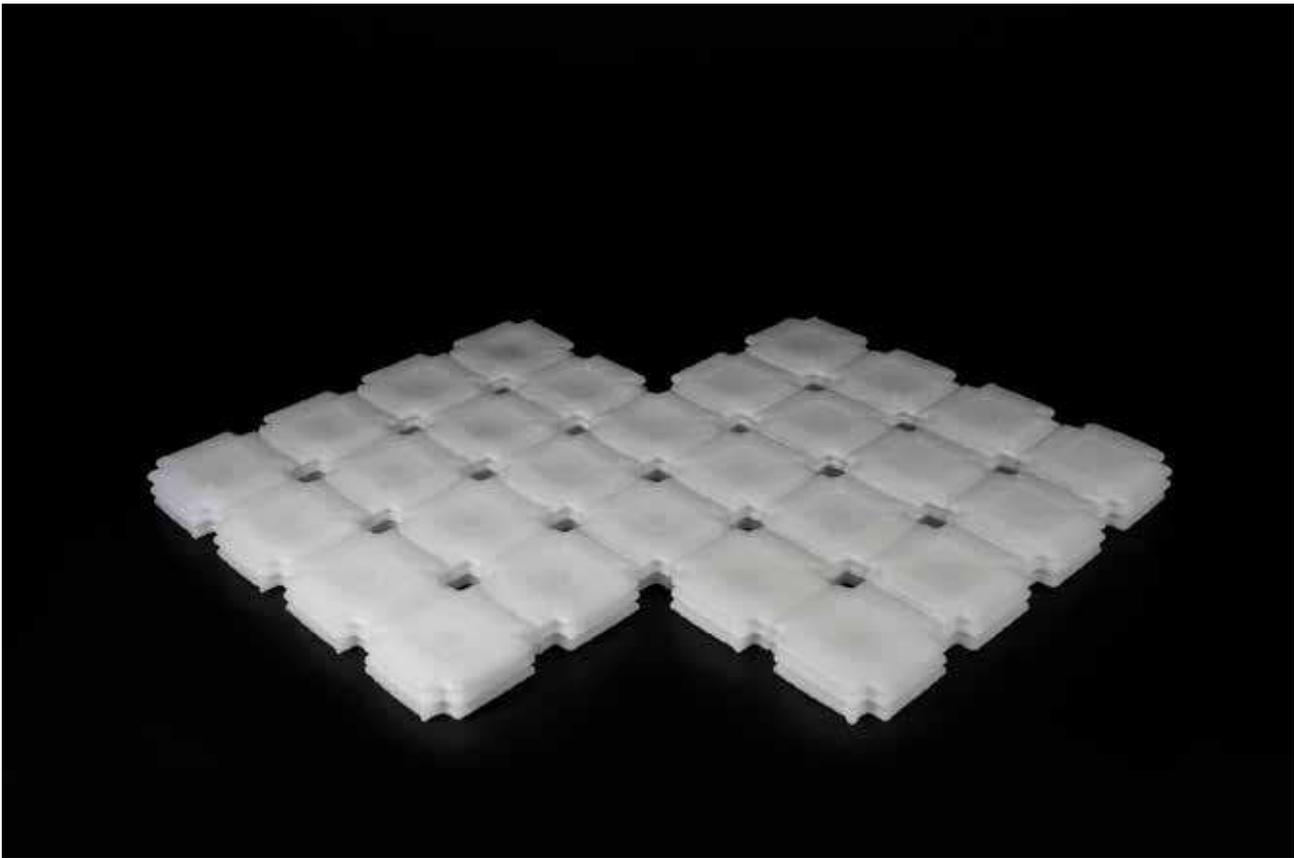
"The Future Starts Here" riunisce tecnologie e progetti innovativi attualmente in fase di sviluppo in studi e laboratori di tutto il mondo. Basandosi su ricerche internazionali e lavorando a stretto contatto con una serie di aziende, università, professionisti e consulenti, la mostra esplora oltre 100 progetti che stanno dando forma al mondo di domani. Il V&A si addentra nell'avanguardia del design, mostrando idee in fase di realizzazione. È la prima volta che un museo raccoglie progetti che stanno plasmando il mondo di domani su una scala così ampia. "Siamo orgogliosi di essere tra i partecipanti alla mostra", conclude Martina Starke, "Il progetto 'Liquid Printed Pneumatics' è un esempio perfetto di una proficua collaborazione interdisciplinare che vedremo sempre più spesso nei prossimi anni, soprattutto in BMW".



*Fonte: Rapid Liquid Printing, Pneumatic Printing, Self-Assembly Lab, MIT*



Fonte: Rapid Liquid Printing, Pneumatic Printing, Self-Assembly Lab, MIT





*Fonte: Rapid Liquid Printing, Pneumatic Printing, Self-Assembly Lab, MIT*

## 14.7 RLP per attuatori pneumatici in silicone

Tra le tecnologie presentate ed ipotizzate come vantaggiose al fine di produrre il manufatto presentato in questo elaborato, si opta per ipotizzare di produrlo utilizzando la tecnica RLP. Lo sviluppo del materiale Silicone 40A Resin da parte di Formlabs è molto interessante e rappresenta sicuramente un punto di svolta nella ricerca e scienza dei materiali, ma tuttavia è un materiale non adatto alla produzione di pezzi a contatto per tempo prolungato con la pelle umana e soprattutto la sua categoria di rigidità non è adatta allo sviluppo di attuatori pneumatici come quelli progettati in questa sede.

Pertanto, si ritiene sicuramente importante portare avanti la riflessione riguardante l'importanza dello sviluppo di materiali sempre più funzionali e performanti, ma per il momento si opta per l'utilizzo di una tecnica di stampa nuova in grado di produrre manufatti in silicone che rispondano alle necessità descritte nella progettazione.

La tecnica Rapid Liquid Printing, come accennato, è adatta alla realizzazione di attuatori pneumatici in silicone, e viene qui presentato uno studio di centrale importanza che ne testimonia la validità, ovvero "Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics" presentato dal Self Assembly Lab del MIT e dal centro di design ed ingegneria computazionale dell'Università di Zurigo nel 2021.

Lo studio parte dalla considerazione sull'evoluzione della manifattura additiva (AM) come metodologia per superare le difficoltà dei tradizionali metodi di produzione. Presentando la stampa liquida rapida, RLP, come possibile metodo di realizzazione di prodotti in silicone, esplora l'importanza di questo materiale nel campo specifico della soft robotica e lo individua come materiale dominante soprattutto nel campo dell'attuazione pneumatica, utilizzata quindi anche in questa progettazione specifica. Gli attuatori pneumatici sono più leggeri e utilizzano meno materiali e componenti, supportando allo stesso tempo deformazioni molto lisce e complesse. I metodi di fabbricazione per

gli attuatori pneumatici morbidi devono consentire la produzione di strutture geometriche complesse che, a loro volta, consentono un movimento articolato. I metodi che meglio affrontano queste sfide ricadono in due categorie principali: stampaggio e colata in silicone e AM.

Lo stampaggio e la colata in silicone sono ampiamente utilizzati grazie alla loro economicità e alla ampia disponibilità commerciale del silicone. Tuttavia, questi vantaggi sono compensati dalla lunga e costosa fase di sviluppo associata alla realizzazione dello stampo. Gli stampi sono anche limitati per quanto riguarda la geometria, il che a sua volta limita la complessità possibile del movimento robotico.

Nonostante molti sforzi siano stati compiuti per sviluppare attuatori e robot pneumatici morbidi, non esiste un singolo approccio conosciuto per convalidare un nuovo metodo di progettazione o di fabbricazione rispetto allo stato dell'arte. Questo lavoro introduce una procedura di test di riferimento per quantificare e confrontare le prestazioni dei metodi di produzione della SR con la RLP. Un attuatore lineare pneumatico morbido è progettato come riferimento e la sua qualità è valutata in base a quattro criteri: allungamento, forza esercitata, fatica ciclica e pressione massima sostenuta. Viene inoltre valutata la pressione massima degli attuatori. Per verificare la coerenza della procedura, la stessa geometria dell'attuatore viene testata utilizzando tre metodi di produzione: colata in silicone, stampa polimerica multimateriale (MMPP) e RLP. La qualità della RLP come valido metodo di produzione è valutata nella fabbricazione in un unico passaggio di un braccio piegato e un gripper complessi a più camere. I risultati vengono confrontati con i metodi di stampa in silicone esistenti.

La manifattura additiva (AM) è sempre più utilizzata per superare le difficoltà dei tradizionali metodi di fabbricazione. Questo approccio può produrre parti robuste e prevedibili direttamente e offre all'utente una maggiore libertà di progettazione. Ad esempio, geometrie com-



Research Paper

## Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics

Bjorn Sparrman<sup>a</sup>, Cosima du Pasquier<sup>b</sup>, Charles Thomsen<sup>b</sup>, Shokofeh Darbari<sup>a</sup>, Rami Rustom<sup>a</sup>, Jared Laucks<sup>a</sup>, Kristina Shea<sup>b</sup>, Skylar Tibbitts<sup>a,\*</sup><sup>a</sup> Massachusetts Institute of Technology, Self-Assembly Laboratory, 265 Mass. Av., MA 02139, USA<sup>b</sup> ETH Zurich, Engineering Design and Computing Laboratory, Tannenstrasse 3, ZH 8092, Switzerland

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Additive manufacturing  
Silicone printing  
Embedded printing  
Rapid Liquid Printing, soft actuators

## ABSTRACT

A silicone-based embedded additive manufacturing method, called Rapid Liquid Printing (RLP) is applied to the fabrication of soft pneumatic actuators to investigate and demonstrate its potential for applications in soft robotics. This process is shown to improve on traditional silicone casting and additive manufacturing of elastomers, the two main manufacturing methods used in soft robotics, by offering complete design freedom at high speed without compromising material properties. Contrary to existing silicone printing techniques, RLP uses commercially available materials and a simple robotic arm or gantry CNC machine to print large structures in a supporting gel at a rate of four times the speed of state-of-the-art multi-material printers. To determine the applicability of RLP for soft robotics and in the production of soft actuators, a benchmark testing procedure for pneumatic linear actuators is developed. A linear actuator design is manufactured using three techniques: silicone casting, multi-material polyjet printing, and RLP. These actuators are tested for elongation and fatigue behavior through cycling and force. Rapid liquid printed actuators perform comparably for elongation range and exceed the two other methods for repeatability and longevity. A complex, multi-chambered demonstrator is designed from the actuator geometry to showcase the advantages of RLP versus existing silicone printing methods including speed, scale, and part complexity. These results demonstrate the applicability of RLP to the field of soft robotics and pave the way for its further implementation in the manufacturing of soft pneumatic actuators.

Fonte: Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics, Self-Assembly Lab, MIT

plesse generate da un algoritmo di ottimizzazione sono facilmente realizzate senza costosi post-processi o assemblaggi. Tuttavia, questi vantaggi sono stati limitati dalla lentezza della stampa, dai volumi di stampa ridotti e dalla difficoltà di stampare materiali durevoli, flessibili ed altamente elastici. Questo lavoro presenta un metodo di manifattura additiva di silicone integrato che combina i vantaggi dell'AM con la resistenza e l'elasticità dei tradizionali materiali pneumatici morbidi come il silicone nella produzione di attuatori morbidi. La stampa liquida rapida (RLP) utilizza un braccio robotico o un sistema CNC a portale per depositare il silicone in un bagno gel autorigenerante ad alta velocità e precisione, realizzando strutture complesse a più camere.

La robotica morbida (SR) affronta i limiti della robotica classica nei contesti industriali e domestici introducendo robot morbidi e flessibili

li con un'interazione migliorata uomo-robot. L'uso di materiali morbidi per la robotica offre anche la possibilità di incorporare il controllo direttamente nel materiale a basso costo di produzione. Il potenziale della SR ha incoraggiato il suo utilizzo in molti settori e applicazioni. L'industria medica sta esplorando l'uso di attuatori morbidi in strumenti chirurgici ed endoscopici. L'industria alimentare e farmaceutica ha adottato pinze morbide che possono prendere e posizionare oggetti diversi senza danneggiarli. Sono in corso studi su robot morbidi per missioni di ricerca e soccorso. Gli attuatori morbidi stampati in 3D sono stati utilizzati anche per creare strutture morfologiche.

L'uso di polimeri elastici come il silicone attualmente domina il campo della SR. L'attuazione termica, luminosa ed igroscopica sono state utilizzate come metodi di attuazione. Tuttavia, l'attuazione pneumatica è più ampia-

mente utilizzata. Gli attuatori pneumatici sono più leggeri e utilizzano meno materiali e componenti, supportando allo stesso tempo deformazioni molto lisce e complesse. I metodi di fabbricazione per gli attuatori pneumatici morbidi devono consentire la produzione di strutture geometriche complesse che, a loro volta, consentono un movimento articolato. I metodi che meglio affrontano queste sfide ricadono in due categorie principali: stampaggio e colata in silicone e AM.

Il stampaggio e la colata in silicone sono ampiamente utilizzati grazie alla loro economicità e alla ampia disponibilità commerciale del silicone. Tuttavia, questi vantaggi sono compensati dalla lunga e costosa fase di sviluppo associata alla realizzazione dello stampo. Gli stampi sono anche limitati per quanto riguarda la geometria, il che a sua volta limita la complessità possibile del movimento robotico.

Nonostante molti sforzi siano stati compiuti per sviluppare attuatori e robot pneumatici morbidi, non esiste un singolo approccio conosciuto per convalidare un nuovo metodo di progettazione o di fabbricazione rispetto allo stato dell'arte. Questo lavoro introduce una procedura di test di riferimento per quantificare e confrontare le prestazioni dei metodi di produzione della SR con la RLP. Un attuatore lineare pneumatico morbido è progettato come riferimento e la sua qualità è valutata in base a quattro criteri: allungamento, forza esercitata, fatica ciclica e pressione massima sostenuta. Viene inoltre valutata la pressione massima degli attuatori. Per verificare la coerenza della procedura, la stessa geometria dell'attuatore viene testata utilizzando tre metodi di produzione: colata in silicone, stampa polimerica multimateriale (MMPP) e RLP. La qualità della RLP come valido metodo di produzione è valutata nella fabbricazione in un unico passaggio di un braccio piegato e un gripper complessi a più camere. I risultati vengono confrontati con i metodi di stampa in silicone esistenti.

Il primo contributo di questo lavoro è dimostrare l'applicabilità degli avanzamenti nella stampa del silicone per affrontare le limitazioni nel campo dell'AM dei materiali morbidi. La

RLP può produrre geometrie arbitrariamente complesse con gomme al silicone commercialmente disponibili senza compromettere le loro proprietà materiali. Sono evitabili difficili e laboriose fasi di post-processing utilizzando un bagno gel per sostenere geometrie complesse. Questi vantaggi rendono la RLP un metodo di AM del silicone veloce ed economico che può essere utilizzato per produrre robusti attuatori morbidi che mostrano elevata elasticità, flessibilità e capacità di gonfiaggio, ad esempio per applicazioni nella robotica morbida.

Il secondo contributo di questo lavoro è proporre un metodo di benchmarking standard che può essere utilizzato per confrontare progettazioni e metodi di fabbricazione per attuatori morbidi.

Il contributo finale di questo studio è convalidare la RLP per la produzione di attuatori pneumatici morbidi confrontandone le prestazioni.

Mentre il metodo di stampa del silicone presentato in questo articolo può essere applicato alla fabbricazione di una vasta gamma di oggetti flessibili, l'attenzione qui è rivolta a convalidarlo quantitativamente per gli attuatori morbidi.

Esistono due principali approcci di produzione per tali applicazioni: i processi di colata e stampaggio, inclusa la litografia morbida, e la manifattura additiva. Gomme al silicone ed elastomeri sono i principali materiali utilizzati, e vengono di seguito analizzate le caratteristiche per ciascun metodo di lavorazione.

**1. AM:** la manifattura additiva e la stampa 3D offrono diversi vantaggi nella produzione di attuatori morbidi, ovvero la capacità di progettare parti con complessità geometrica arbitraria che non potrebbero essere prodotte con altri metodi, la capacità di modulare le proprietà del materiale in tutta la struttura stampata, ad esempio rigidità ed elasticità, e la capacità di iterare rapidamente su un design. Tuttavia, questi vantaggi sono stati compensati dall'incapacità di stampare materiali flessibili robusti e dai piccoli volumi di costruzione delle stampanti attuali. Allo stesso modo, il comportamento anisotropo del materiale introdotto dai metodi di fabbricazione stratificata può influenzare anche le proprietà

meccaniche delle parti prodotte.

La stampa fotopolimerica (SLA e polyjet) è stata principalmente utilizzata per stampare attuatori pneumatici. Geometrie cave o sporgenti rimangono una sfida sostanziale nella creazione di camere stagna all'aria. Queste caratteristiche sono possibili grazie al materiale di supporto stampato insieme alla parte. Tuttavia, il processo di pulizia è lungo, difficile e può potenzialmente danneggiare la parte. Per superare questa limitazione, Robert MacCurdy et al. hanno utilizzato polimeri fotosensibili e liquidi non indurenti come strutture di supporto in combinazione con la stampa fotopolimerica.

La fattibilità delle tecniche di stampa 3D per la produzione di attuatori pneumatici è maggiormente compromessa dall'incapacità di produrre materiali duri, flessibili ed altamente elastici. I materiali flessibili disponibili commercialmente per la stampa SLA e polyjet hanno una resa allungamento relativamente bassa, circa il 240% rispetto al 340% dei siliconi della stessa durezza. I siliconi stampabili più morbidi sono noti per raggiungere deformazioni fino al 1000%. Di conseguenza, pieghe o soffiamenti devono essere aggiunti al design per ottenere un'ampia gamma di deformazioni. Inoltre, le proprietà meccaniche dei materiali polyjet sono fortemente dipendenti dal tempo, in modo che le parti stampate inizino rapidamente a degradarsi e non siano adatte per applicazioni industriali.

In risposta a queste limitazioni, è stato svolto un ampio lavoro per combinare i vantaggi della gomma al silicone con la libertà geometrica della manifattura additiva. La stampa di silicone sta emergendo come un nuovo campo ed è stata dimostrata funzionare con tecniche come la scrittura diretta di inchiostro (DIW), il processo digitale a luce (DLP) o la fotopolimerizzazione in vasca (VPP), e la fusione e fabbricazione di filamenti (FFF). I risultati sono promettenti poiché tutte le tecniche supportano una precisione su scala micron e una maggiore allungamento alla rottura rispetto a quanto possano sostenere gli elastomeri commerciali. Le stampe mantengono anche le loro prestazioni per oltre 1000 o addirittura 30.000 cicli.

Tuttavia, ciascuna di queste tecniche ha i suoi svantaggi. La DIW richiede proprietà reologiche molto specifiche a seconda del suo metodo di indurimento. Le stampe realizzate con DIW possono essere indurite con UV, termicamente o in un bagno di supporto. L'uso di un bagno di supporto è noto come stampa 3D integrata, un sottogruppo al quale appartengono RLP e FRE. Al momento, tutti e tre i metodi di indurimento richiedono una complicata progettazione su misura della resina. Nel caso di RLP, risultati accurati, ad alta velocità e su larga scala sono ottenuti con siliconi pronti all'uso attraverso un calcolo accurato del percorso degli strumenti.

La VPP richiede viscosità molto basse che possono essere raggiunte solo utilizzando reagenti che possono essere volatili e tossici. Inoltre, raggiunge solo piccole stampe a un costo dell'attrezzatura elevato.

La FFF ha avuto solo un successo limitato nella stampa di elastomeri a causa del complesso processo di adesione tra strati degli inchiostri e delle forze dovute all'interazione della punta con il filamento. Ciò significa che gli sforzi attuali per stampare silicone utilizzando FFF combinano l'elastomero con una struttura di supporto aggiuntiva. Tuttavia, il costo e l'uso diffuso di questo metodo hanno motivato recenti sforzi di stampare attuatori morbidi con esso, utilizzando resina elastomerica morbida e poliuretano.

Tutte le tecniche esistenti sono ancora limitate in termini di velocità di stampa e dimensioni del letto di stampa. Nuove ricerche si sono concentrate sullo sviluppo di inchiostri personalizzati per nuovi processi. Tuttavia, poiché questi materiali elastomerici faticano a soddisfare gli standard per le applicazioni industriali in generale, la MA con materiali conformi ha trovato un uso limitato, di solito per applicazioni altamente specifiche. L'introduzione di RLP, utilizzando materiali pronti all'uso che non richiedono alcun passaggio di post-elaborazione aggiuntivo, è una nuova soluzione per gli attuatori morbidi. Il suo ampio volume di costruzione consente di stampare più attuatori morbidi in pochi minuti. Inoltre, ogni metodo oltre a FRE (e RLP) richiede una struttura di supporto aggiuntiva che limita lo spazio di progettazione

realizzabile e, per estensione, limita la capacità di produrre le cavità interne necessarie per gli attuatori pneumatici.

**2. Colata e stampaggio:** I processi di colata e stampaggio sono l'approccio più comune per la produzione di robot morbidi, utilizzando stampi monoparte o biparte per colare gomme al silicone commercialmente disponibili come Ecoflex o Dragonskin. Le forme complesse e le caratteristiche interne sono difficili da ottenere con le tecniche di colata. Le limitazioni geometriche diventano limitazioni delle prestazioni poiché gli attuatori sono quindi vincolati a semplici modalità di deformazione. Geometrie più complesse possono essere realizzate colando parti dell'attuatore e assemblandole. Tuttavia, le parti prodotte in questo modo sono laboriose e a rischio di delaminazione. Marchese et al. hanno sviluppato un metodo di colata a cera persa per superare questi vincoli di progettazione e consentire la creazione di forme 3D complesse come un pesce che nuota autonomamente. Sebbene i metodi a cera persa aumentino la libertà di progettazione della colata in silicone, l'uso di un nucleo di cera aumenta il costo, lo spreco e la complessità della produzione. La colata in silicone rimane complessivamente un processo lungo e complesso.

La litografia morbida è stata utilizzata per contrastare le difficoltà incontrate dalla colata tradizionale. Piccoli motivi di rilievo sono resi in fogli di elastomero con l'uso di timbri elastomerici. Questo processo consente la formazione di canali e cavità necessari per gli attuatori morbidi tramite la saldatura dei fogli stampati. Sebbene gli stampi riutilizzabili rendano questa tecnica più economica, può produrre solo attuatori relativamente piatti.

Incorporando rinforzi eterogenei come fibre, legno o carta all'interno degli attuatori elastomerici, la funzionalità di un attuatore SR può essere migliorata. Questi rinforzi biasimano gli attuatori pneumatici, consentendo un'ampia gamma di movimento. Questo approccio è stato ampiamente utilizzato con la colata a cera persa, la litografia morbida e le tecniche di laminazione del foglio. Risultati simili sono

stati ottenuti anche colando elastomeri di diversa durezza nello stesso stampo. Tuttavia, questi processi richiedono molto tempo e la consistenza della produzione richiede un lungo periodo di sviluppo.

RLP, presentato per la prima volta nel 2017, è un processo di stampa 3D in cui materiale liquido non polimerizzato viene depositato in un bagno di gel a base acquosa, mediante un braccio robotico o un sistema CNC a portale. Le proprietà tixotropiche e auto-riparanti del gel trattengono il materiale depositato durante il necessario periodo di polimerizzazione, dopodiché le parti possono essere estratte e lavate con acqua. Con RLP è possibile utilizzare una vasta gamma di materiali liquidi che polimerizzano chimicamente o per foto-polimerizzazione, sebbene questo lavoro si concentri su siliconi ad indurimento per addizione come il Moldstar 30 della Smooth-On. Per produrre corpi solidi, superfici lisce, camere ermetiche e altre geometrie complesse a varie scale e risoluzioni, sono state sviluppate nuove capacità per RLP, incluse le modalità software, le formulazioni dei materiali e le capacità multi-materiali. Per stampare gli attuatori pneumatici morbidi in questo studio, la geometria desiderata viene generata come file .stl e successivamente convertita in un percorso di lavoro specifico per i requisiti di RLP. La geometria a maglia viene reinterpretata come una serie di superfici con vari spessori. Queste superfici dell'attuatore vengono ridisegnate come un percorso elicoidale con un passo di 0,5 mm. Lo spessore e le dimensioni delle caratteristiche della parte sono controllati e modificati modulando una variabile nel processo di stampa, la velocità del capo di stampa, mantenendo costanti altre due, il tasso di estrusione e lo spaziamento del percorso degli utensili. La punta di estrusione è mantenuta in costante contatto con il materiale depositato precedentemente mantenendo il rapporto tra il passo del percorso degli utensili e lo spessore del muro tra 1:2 e 1:8. Ciò favorisce l'omogeneità nella parte e impedisce l'inclusione accidentale di gel di supporto nella parte stampata. La relazione tra la distanza di passo

e lo spessore del muro stampato influisce notevolmente sulla finitura superficiale finale. Con un rapporto superiore a 1:2 tra passo e spessore del muro, è garantita la produzione di una membrana ermetica all'aria. Con un rapporto superiore a 1:8 e ai tassi di estrusione necessari per evitare l'otturazione della testa di stampa, il movimento della macchina diventa troppo veloce e le piccole parti vengono distorte dalle elevate forze di taglio e dall'accelerazione della macchina nel gel. Inoltre, con rapporti superiori a 1:8, l'ago di estrusione viene profondamente inglobato nel materiale di stampa e distorce la parte. Il rapporto tra passo e la finitura superficiale risultante viene selezionato per corrispondere il più possibile al design previsto. Nel caso della SR, si desidera una finitura liscia, evitando possibili concentrazioni di stress create da superfici irregolari.

Il supporto continuo del bagno di gel consente la stampa in configurazioni non planari, dove l'angolo del capo di stampa cambia rispetto alla superficie stampata. La posizione finale degli elementi stampati rispetto ai percorsi degli utensili è influenzata dall'angolo del capo di stampa. Pertanto, durante le operazioni di stampa non planari in cui cambia l'angolo relativo

del capo di stampa, l'algoritmo di stampa modifica il percorso degli utensili in modo che la posizione finale degli elementi stampati rimanga accurata. Questa tecnica è importante per mantenere il passo del percorso desiderato durante la stampa di una superficie ermetica all'aria, che è fondamentale in un attuatore pneumatico. Nel caso della stampa di oggetti altamente complessi, può essere utile dividere la geometria in diverse zone con orientamenti di percorso degli utensili individualizzati. Poiché la stampa non deve procedere in strati di impilamento, i percorsi degli utensili di queste zone separate possono seguire l'angolo più vantaggioso per la loro geometria individuale, consentendo strutture complesse con finiture superficiali coerenti. Una volta identificate queste zone e applicati i percorsi degli utensili, uno script di sequenza delle zone ordina le zone per evitare collisioni con elementi stampati in precedenza. Osservando le linee guida sul passo, le zone distinte sono posizionate una accanto all'altra garantendo l'adesione.

Per la post-elaborazione, le parti vengono lasciate a polimerizzare per almeno due ore prima di essere rimosse dal bagno di gel, lavate con acqua e lasciate asciugare completamente

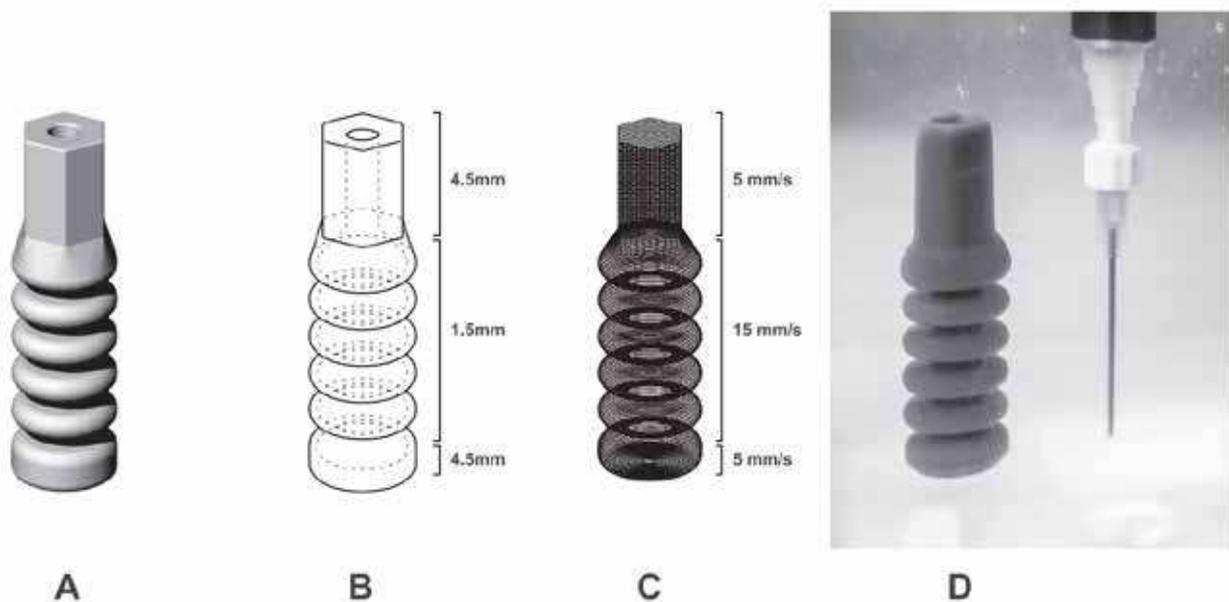


Fig. 2. RLP Process A. CAD Modeling B. Sectioning C. Toolpath Generation D. Printed Actuator.

Fonte: Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics, Self-Assembly Lab, MIT

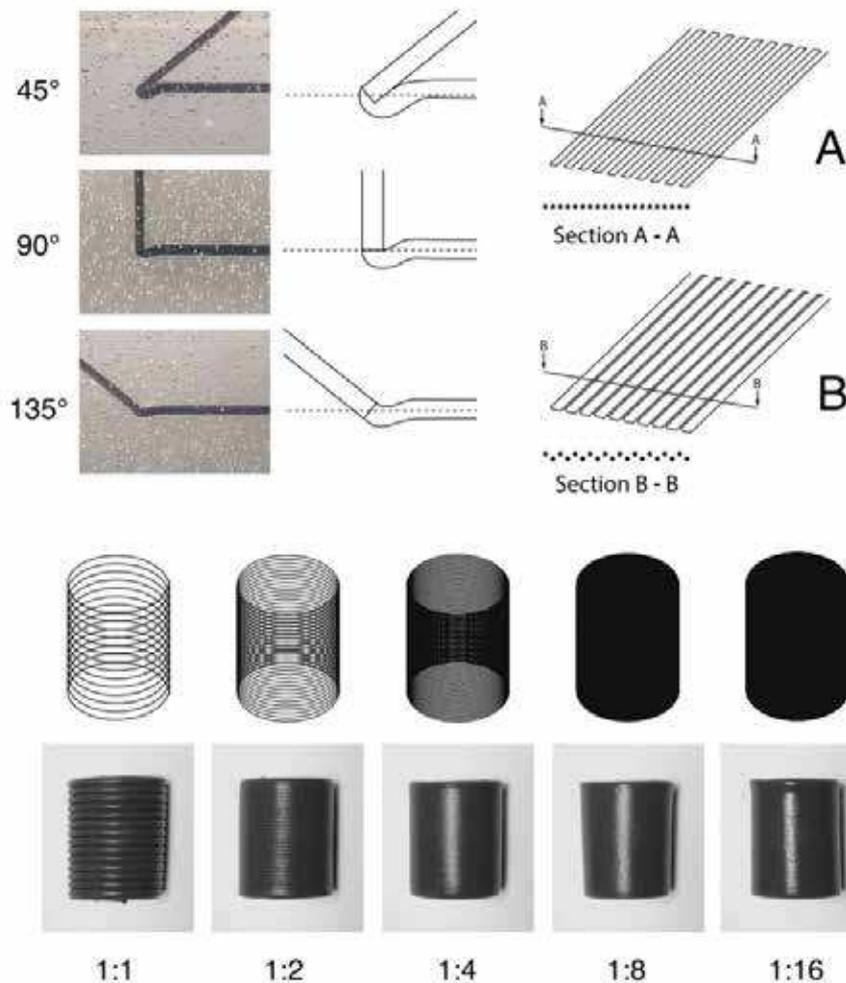


Fig. 3. Top left: impact of the printhead to extrusion angle on centerline position; top right: print strategies for angled closed surface- A. unaltered toolpath, B. adapted toolpath; bottom left to right: impact of increasing stepover on surface finish.

Fonte: *Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics, Self-Assembly Lab, MIT*

su una superficie pulita. A differenza di molti materiali poliuretanici, il silicone non reagisce aggressivamente con il gel, consentendo una finitura superficiale liscia indipendentemente dalla complessità della parte o dalle caratteristiche del ribaltamento. Gli attuatori vengono post-induriti a 80°C per due ore per garantire la massima durezza.

Il design dell'attuatore lineare è simile a quello presentato da MacCurdy et al. e du Pasquier et al. È composto da cinque soffietti. L'attuatore è progettato per rispettare i vincoli geometrici imposti dai tre metodi di produzione. Per consentire le caratteristiche della colata di silicone, lo spessore della parte è fissato a 1,5 mm e lo spazio interno tra i soffietti è di 4,65 mm. Estr-

polando questa dimensione, la lunghezza della parte è stata fissata a 71 mm.

### Colata di silicone

Gli attuatori sono stati colati direttamente in un unico pezzo utilizzando un metodo di cera persa adattato per evitare la delaminazione. Le due metà del mold esterno sono state stampate in ABS con una Stratasys Uprint, una stampante FDM, e poi saturate con acetone per una finitura superficiale liscia. Il mold interno è stato stampato in PVA solubile su un Flashforge Creator Pro. Il silicone utilizzato è Smooth-On Moldstar 30. Una volta che tutte le parti del mold erano pronte, il silicone è stato mescolato e sottoposto a sottovuoto per alcuni minuti a -0,75 bar. È stato poi versato nel mold e lascia-

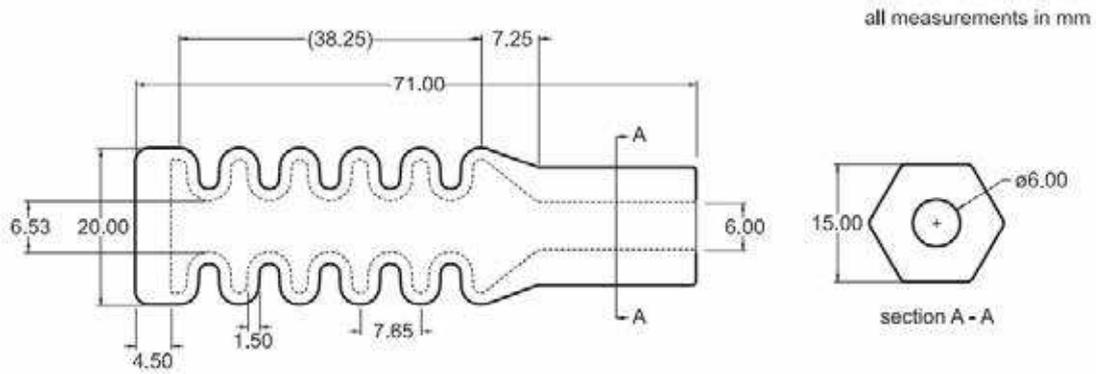


Fig. 4. Linear actuator design parameters (top) and fabricated Samples for A. RLP B. Silicone Casting and C. MMPP.

Fonte: Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics, Self-Assembly Lab, MIT

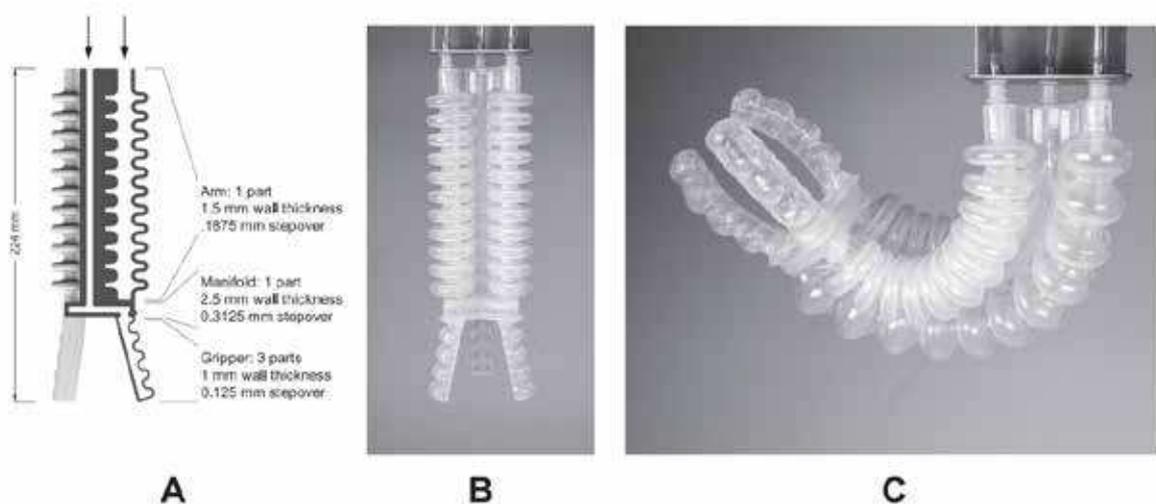


Fig. 7. Demonstration of the advantage of RLP for soft robotic fabrication, showing A. internal routing of air channels and the different printing zones with printing parameters B. printed arm in resting position and C. printed arm bending and gripping.

Fonte: Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics, Self-Assembly Lab, MIT

to a polimerizzare a temperatura ambiente per almeno quattro ore. L'attuatore è stato quindi estratto dal mold e lasciato durante la notte in un bagno d'acqua a 40°C per sciogliere il mold centrale. Il PVA residuo è stato infine rimosso utilizzando una stazione di lavaggio ad alta pressione con getto d'acqua.

### RLP

Gli attuatori sono stati stampati con RLP utilizzando una macchina a tre assi con un estrusore pneumatico basato su cartuccia. La gomma siliconica platinum Smooth-On Moldstar 30 è caricata in una cartuccia a due componenti in rapporto 1:1 e utilizzata per stampare la geometria dell'attuatore. La cartuccia è stata dotata di un miscelatore statico e di un ago luer lock da 18 gauge. Il miscelatore combina accuratamente le due componenti di silicone prima che siano estruse dall'ago nel bagno di supporto in gel. La stampa viene eseguita con una fresatrice CNC Shopbot Desktop montata con il capo di stampa estrusore e un portale configurato su misura per consentire un movimento z più ampio. Dopo due ore, le parti vengono estratte, brevemente sciacquate con acqua, post indurite

su una piastra calda per due ore a 80°C e sono pronte per essere testate.

### MMPP

Infine, gli attuatori sono stati stampati anche con un Connex J750. Le parti sono state stampate in Agilus Shore 30A di Stratasys e nel materiale di supporto dissolvente Statasys SUP706. Sono state pulite con una combinazione di getto d'acqua ad alta pressione e soluzione solvente per il materiale di supporto. I parametri di stampa prescritti da Müller et al. vengono implementati per garantire proprietà meccaniche coerenti e ottimizzate: gli attuatori vengono stampati in lunghezza, parallelamente all'asse x del letto di stampa, e vengono testati almeno 24 ore dopo la stampa.

I risultati preliminari dei test di caratterizzazione meccanica dei tre metodi di produzione mostrano che RLP supera sia MMPP che la colata. Le proprietà intrinseche dell'elastomero stampato, Agilus nero, spiegano perché i suoi campioni si allungano approssimativamente la metà dei campioni di RLP e sono quattro volte meno resistenti. La colata e RLP, tuttavia, utilizzano

**Table 1**

Mechanical characterization of the three processes.

	<b>Youngs Modulus</b>	<b>Elongation at break</b>	<b>Ultimate tensile stress</b>
<b>Silicone Casting</b>	0.61 MPa	311%	2.38 MPa
<b>RLP</b>	0.68 MPa	359%	2.78 MPa
<b>MMPP</b>	0.36 MPa	190%	0.69 MPa

**Table 2**

Manufacturing process duration.

	<b>Pre-processing</b>	<b>Fabrication</b>	<b>Post-processing</b>
Silicone Casting	7 h	4 h	12 h
RLP	0.5 h	0.08 h	4 h
MMPP	0 h	1 h	5 h

Fonte: Printed silicone pneumatic actuators for soft robotics, Self-Assembly Lab, MIT

**Table 3**

Testing results for elongation, cycling and force for MIT and ETH.

<b>Elongation</b>	Average max. elongation % of $L_{\text{initial}}$	Average standard deviation m	Rate of change $\Delta d/\Delta P$	# of failures during testing
<b>Silicone Casting</b>	212	0.182	$1.11 \cdot 10^{-2}$	4/5
<b>Rapid Liquid Printing</b>	197	0.0389	$9.28 \cdot 10^{-3}$	0/5
<b>Multi Material Printing</b>	222 <sup>a</sup>	0.0811	$2.39 \cdot 10^{-2}$	5/5
<b>Cycling</b>	Average elongation % of $L_{\text{initial}}$	Average standard deviation m	Rate of change	# of failures during testing
<b>Silicone Casting</b>	172	$3.37 \cdot 10^{-3}$	–	3/5
<b>Rapid Liquid Printing</b>	177	$4.06 \cdot 10^{-3}$	–	0/5
<b>Multi Material Printing</b>	169 <sup>b</sup>	$1.51 \cdot 10^{-1}$	–	5/5
<b>Force</b>	Max. elongation pressure kPa	Corresponding max. force	Rate of change $\Delta F/\Delta P$	# of failures during testing
<b>Silicone Casting</b>	55.0	15.2	0.234	N/A
<b>Rapid Liquid Printing</b>	55.0	13.3	0.197	N/A
<b>Multi Material Printing</b>	35.0	10.5	0.299	N/A

<sup>a</sup> Elongation for  $P_{\text{max}} = 20.7$  kPa; all tests failed beyond.<sup>b</sup> Elongation for  $P_{\text{test}} = 6.90$  kPa instead of  $P_{\text{test}} = 20.7$  kPa.

entrambi lo stesso materiale. Le loro differenze nelle prestazioni sono dovute alla leggera retrazione del silicone durante la formatura, che si traduce in campioni a forma di manubrio leggermente più sottili. RLP produce campioni fedeli alla forma. Questo fenomeno è ancora più evidente per gli attuatori a causa della loro geometria più complessa.

I risultati di allungamento variano fino al 19% su tutti i metodi. La deviazione standard degli attuatori in silicone colato è da 1,3 a 4,7 volte superiore rispetto ai loro corrispettivi RLP, e la maggior parte delle parti in colata si rompono durante i test. Le differenze nelle proprietà meccaniche sottolineano quanto possa essere dipendente dall'utente e imprevedibile la qualità della colata. Gli attuatori MMPP sono stati testati a pressioni più basse in quanto non potevano sopportare pressioni oltre 20,7 kPa. Di conseguenza, le deformazioni di MMPP possono essere misurate solo alle due pressioni di prova più basse. Questa limitazione influenza a sua volta la massima forza che gli attuatori MMP possono trasmettere, poiché è inferiore del 32% e del 21% rispetto agli attuatori in colata e RLP rispettivamente.

Le carenze degli elastomeri MMPP sono mostrate più chiaramente nei risultati dei test ciclici. Tutti gli attuatori si rompono e raggiungono al massimo 45 cicli. Sebbene il loro allungamento sia in media più alto rispetto agli attuatori in silicone, è irregolare e imprevedibile. Gli attuatori in silicone colato si comportano meglio, ma tre attuatori falliscono nei primi 500 cicli di test e le misurazioni dell'allungamento iniziano a variare significativamente sopra i 200 cicli. Inoltre, falliscono in media al 25% della pressione massima che gli attuatori RLP possono sopportare. Un leggero aumento dello spostamento può essere osservato durante i primi cicli di RLP, che è dovuto al rilassamento del materiale siliconico. Gli attuatori si stabilizzano nei primi 20 cicli e si comportano in modo robusto e coerente e nessuno si rompe entro i 500 cicli di test.

La procedura di benchmarking proposta in questo articolo può essere utilizzata per confrontare qualsiasi metodo di produzione di SR utiliz-

zando un semplice design di attuatori morbidi. Può aiutare gli utenti futuri a convalidare nuovi metodi rispetto al benchmark SR e a documentarne i miglioramenti. Tuttavia, ci sono diversi passaggi che possono rendere la procedura più facilmente applicabile per gli utenti futuri. In primo luogo, l'uso di materiali della stessa classe generalmente produce risultati comparabili. I materiali mostrati qui sono scelti per coprire il possibile spettro di risultati per le applicazioni SR, in modo che gli utenti possano determinare approssimativamente le prestazioni del proprio metodo di produzione.

Prima di tutto, la modellazione e la previsione della dinamica dei fluidi del bagno di gel e del materiale siliconico possono aumentare il controllo sulla stabilità dimensionale delle stampe. Uno studio più approfondito della composizione del materiale, più precisamente della sua viscosità non polimerizzata e della tiosotropia, può migliorare ulteriormente la precisione del processo e ridurre la dimensione minima di stampa.

Questo lavoro convalida un nuovo metodo AM per gli attuatori morbidi che combina la resistenza e l'elasticità del silicone colato con la libertà di progettazione e le caratteristiche dei metodi di stampa 3D commercialmente disponibili. Un metodo di test di benchmarking dell'attuatore lineare è sviluppato e utilizzato per convalidare RLP rispetto alla colata di silicone e MMPP, i due altri metodi di produzione dominanti in SR. Il metodo di benchmarking può essere utilizzato in diversi laboratori per confrontare qualitativamente i metodi di produzione. Piccole variazioni nei parametri di confronto e nell'allestimento consentiranno anche un confronto quantitativo.

Gli attuatori RLP si dimostrano superiori agli attuatori in colata e MMPP in termini di robustezza e prevedibilità e le loro eccellenti prestazioni cicliche li rendono più adatti per applicazioni di SR durevoli. La promessa di questo metodo nelle applicazioni di SR è dimostrata attraverso la progettazione e la produzione additiva di un braccio robotico morbido integrato e di un gripper, che entrambi utilizzano i vantaggi delle prestazioni prevedibili per il controllo, la capa-

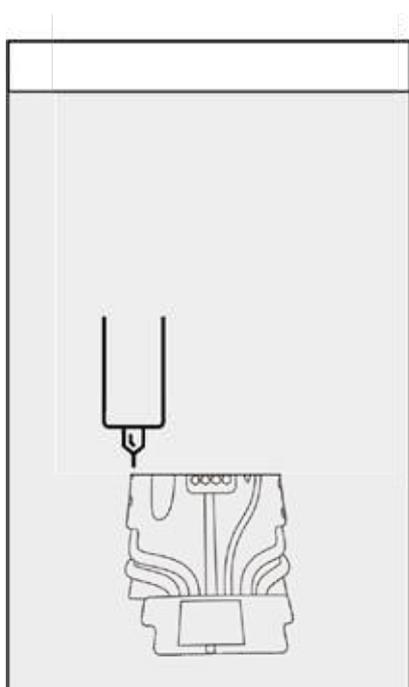
cità di fabbricare geometrie interne complesse e mostrano le possibilità di stampa di grande formato e di alta velocità di RLP rispetto ad altri metodi di stampa in silicone.

Il metodo RLP si comporta bene rispetto ai metodi di produzione di SR esistenti riassunti in questo lavoro e affronta diverse carenze che ostacolano l'applicazione di SR in più campi.

Alla luce delle sperimentazioni analizzate e del confronto con sistemi più tradizionali di produzione di attuatori pneumatici specificatamente dedicati alla soft robotica, è legittimo ipotizzare che la Rapid Liquid Printing possa essere un potenziale metodo vantaggioso per la fabbricazione personalizzata.

Viene pertanto prevista la stampa del dispositivo progettato mediante tecnica Rapid Liquid Printing in silicone certificato per il medicale.

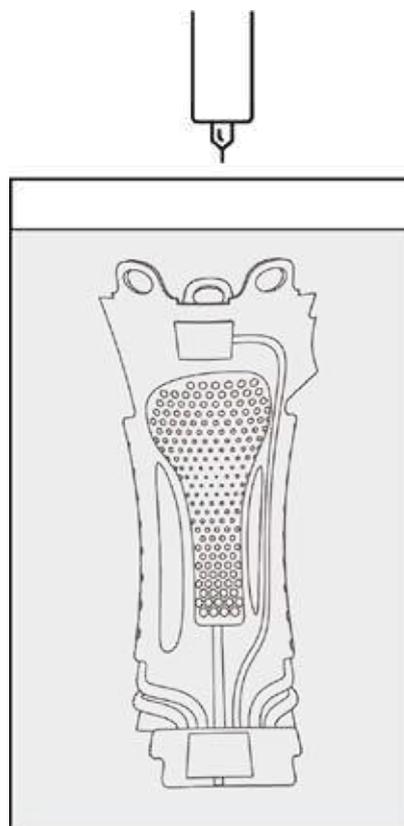
La procedura di stampa è caratterizzata, come visto in fase di ricerca, da alcuni step, che vengono di seguito schematizzati.



#### **Avvio fase di stampa.**

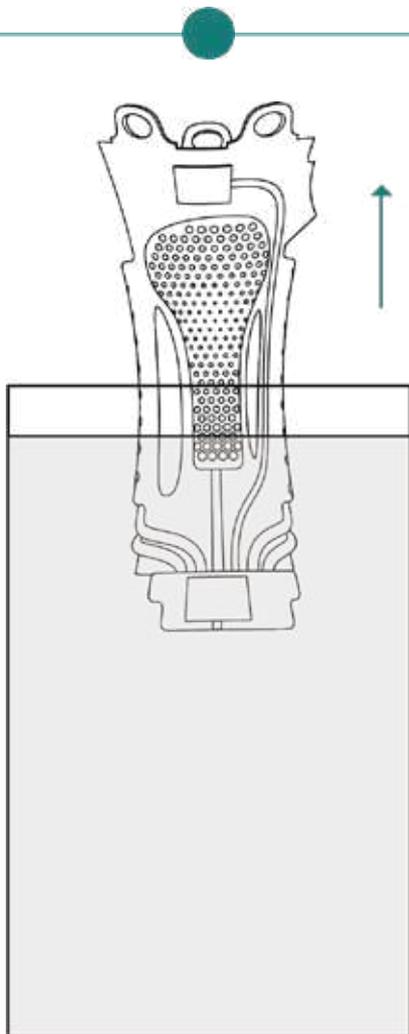
Il prodotto viene stampato mediante layering in una vasca di gel di sospensione partendo dal basso.

Un estrusore con siringa, grazie alla pressione verso il basso, rilascia il materiale componendo il prodotto progettato.



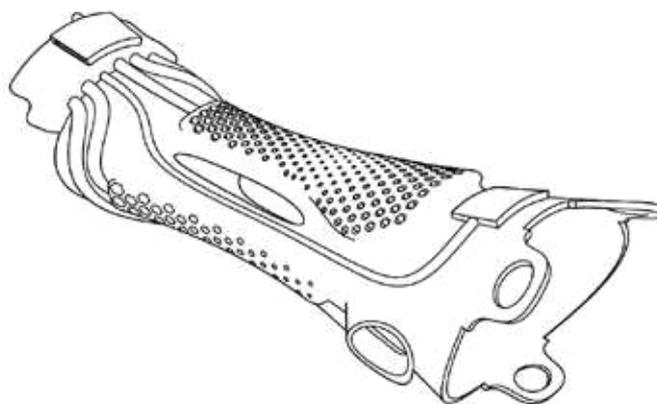
#### **Fine fase di stampa.**

Il prodotto viene completato con la metodologia descritta ed è privo di supporti. Lo stampato rimane pertanto in sospensione all'interno della vasca di gel.



#### **Estrazione del dispositivo.**

Dopo il tempo di cura previsto per il silicone, il dispositivo è solido e pronto per essere estratto dalla sospensione in gel in cui ha giaciuto fino a questo momento.



#### **Pulizia del dispositivo.**

Il prodotto stampato viene pulito per rimuovere eventuali residui di gel ed asciugato adeguatamente. Ora è pronto per essere utilizzato.

*15*

Conclusioni

All'interno dell'elaborato qui presentato è stato possibile apprezzare molteplici aspetti della progettazione; partendo dapprima dalla ricerca, sono stati individuati alcuni aspetti di particolare rilevanza per quanto riguarda la tematica della riabilitazione a seguito di alcune problematiche, nello specifico del polso, ed alcune metodologie per poterla rendere il più vantaggiosa possibile per l'utente.

In particolare, la robotica è il campo di supporto principale da subito individuato, sia grazie allo studio dei suoi parametri sia grazie all'attenta osservazione di alcuni casi studio particolarmente significativi, e procedendo con la ricerca è stato possibile individuare la più specifica soft robotica come interessante campo di sviluppo e di potenziale progettazione.

Dopo un'attenta analisi di quest'ultima, la quale appare come grande promessa soprattutto per il campo di progettazione medicale, è stato possibile procedere con la progettazione di un dispositivo di supporto alla riabilitazione, che possa garantire vantaggio all'utente nelle varie fasi di terapia anche grazie ad un approccio custom-made che tenga conto dei suoi specifici deficit e della sua specifica anatomia.

Lo studio degli attuatori pneumatici in particolare ha rappresentato un punto cruciale e di grande valore nella progettazione del dispositi-

vo, il quale appare, dopo molteplici modifiche e ottimizzazioni formali, un prodotto funzionale che, collegandosi ad una stazione di controllo hardware, è indossabile ed in grado di fornire il supporto desiderato nella fase di terapia riabilitativa.

Di non seconda importanza è inoltre la scelta della tecnica produttiva, la quale, individuata nella stampa 3D Rapid Liquid Printing, è anch'essa un promettente futuro per la produzione custom di dispositivi medicali in silicone, nonostante la sua recentissima invenzione.

In conclusione, si osserva come la disciplina del design possa fare la differenza nella progettazione di dispositivi di tale importanza, agendo non solo sul piano della ricerca, dell'ottimizzazione formale e delle funzionalità, ma anche sul piano dell'accettabilità da parte dell'utente, della soluzione di problematiche tipiche, dell'individuazione di nuovi materiali e tecniche produttive innovative.

Questa è, a mio avviso, la vera potenzialità e bellezza di tale disciplina che, grazie alla sua trasversalità, sempre più radicata nella sua natura, può fare la differenza tra un prodotto od un sistema mal progettato e ben progettato, agendo sempre nell'ottica della completa proiezione e della progettazione nella vera accezione del suo termine: "pro-gettare", ovvero gettare in avanti.

*16*

Fonti

## 16.1 Bibliografia

Design e Scienza, Carla Langella, Listlab, 2019

Confini e contesti. La doppia prospettiva della ricerca in design, FRID, IUAV, 2019

Soft Robotics: Applications, Design and Control, Silvia Terrile, Tesi di Dottorato, Università di Madrid, 2021

Soft Robotics in Rehabilitation, Amir Jafari, Nafiseh Ebrahimi, Mara Conner, 2021

## 16.2 Sitografia

Bio-inspired pneumatic shape-morphing elastomers | Nature Materials

Programmable Morphing Hydrogels for Soft Actuators and Robots: From Structure Designs to Active Functions | Accounts of Chemical Research (acs.org)

Shape-changing polymers for biomedical applications - Journal of Materials Chemistry B (RSC Publishing)

3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures | Nature Communications

4D Printing of Morphing Structures - Tech Briefs

Design and fabrication of a shape-morphing soft pneumatic actuator: Soft robotic pad | Request PDF (researchgate.net)

Materials | Free Full-Text | 4D Printing Self-Morphing Structures (mdpi.com)

Computational Design of Active Lattice Structures for 4D Printed Pneumatic Shape Morphing | IDETC-CIE | ASME Digital Collection

Soft robotics e adattamento all'ambiente: novità dagli USA (tech4future.info)

Insufficienza cardiaca: ecco il soft robot che aiuta il cuore a battere (biomedicalcue.it)

Soft robotics, l'Italia regina della ricerca (tech4future.info)

Soft Robotics Toolkit

Biomedical applications of soft robotics | Nature Reviews Materials

(2) The incredible potential of flexible, soft robots | Giada Gerboni - YouTube

XoSoft: Soft modular biomimetic exoskeleton to assist people with mobility impairments - Home Building a better corset – with 3D printing (newatlas.com)

Could the 3D-printed cast put plaster to pasture? (newatlas.com)

.design - Medaarch

Innovazione e design nell'industria del pneumatico. (unive.it)

Design of a system for the real-time pressure control of mountain bikes front tyres (polimi.it)

Case history La Milagrosa -Modellazione 3D in Ortopedia (3dwasp.com)

data-driven midsoles with New Balance - Nervous System (n-e-r-v-o-u-s.com)

CORTEX - EVILL (evilldesign.com)

Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation (harvard.edu) Wyss institute  
Soft Robotics in Rehabilitation | ScienceDirect  
Chapter 8. An artificial skeletal muscle for use in pediatric rehabilitation robotics (sciencedirectas-sets.com)  
Soft robotics for hand rehabilitation - ScienceDirect  
Hand rehabilitation using Soft-Robotics | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore  
Exo Glove (wevolver.com)  
Tactilus Flex Sensor| Compression Force Sensing Resistor (fsr) | Force Sensing Resistors | Force Sensing Resistors | Tactilus | Surface Pressure Indicator | Mapping | Force Sensing And Profiling (sensorprod.com)  
Gloreha-Hand Robotic Rehabilitation: Design, Mechanical Model, and Experiments | Request PDF (researchgate.net)  
Concept and Design of a 3D Printed Support to Assist Hand Scanning for the Realization of Customized Orthosis (hindawi.com)  
Computer-aided design to support fabrication of wrist splints using 3D printing: A feasibility study - Abby M Paterson, Ella Donnison, Richard J Bibb, R Ian Campbell, 2014 (sagepub.com)  
A Critical Analysis of a Hand Orthosis Reverse Engineering and 3D Printing Process (hindawi.com)  
Motor Skins at Wear It Innovation Summit: Start-Up Pitch. Soft-exoskeletons for normal life (youtube.com)  
MotorSkins – DesignFarmBerlin  
Design parametrico per la personalizzazione di dispositivi ortesici (polimi.it)  
Progettazione, modellazione e controllo di un esoscheletro pneumatico per uso industriale = Design, modeling and control of a pneumatic esoskeleton for industrial applications. - Webthesis (polito.it)  
Progettazione e test sperimentali della cintura pelvica in un esoscheletro per il supporto del tronco = Design and experimental tests of the pelvic belt in a trunk supporting exoskeleton - Webthesis (polito.it)  
2015\_-\_polygerinos\_-\_icra\_-\_soft\_robotic\_glove\_for\_hand\_rehabilitation\_and\_task\_specific\_training  
Adv Funct Materials - 2014 - Mosadegh - Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly  
appls-ci-13-00553-v2  
frobt-10-1075634  
Series\_Elastic\_Actuation\_for\_Assistive\_O  
Smart\_Materials\_and\_Their\_Application\_in  
Soft\_Robotics\_in\_Body\_Assistance\_An\_Inte  
A Fully Fabric-Based Bidirectional Soft Robotic  
Moving toward Soft Robotics A Decade Review  
<https://softroboticstoolkit.com/>  
<https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing/>  
<https://selfassemblylab.mit.edu/liquid-to-air>  
<https://selfassemblylab.mit.edu/liquid-printed-pneumatics>







Sostegno alla riabilitazione della locomozione, Hurley Medical Center

### La riabilitazione del polso

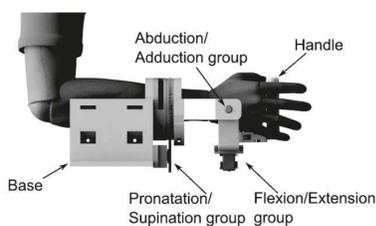
La riabilitazione del polso è un'attività necessaria per tutti quei pazienti che necessitano di recuperare la normale mobilità a seguito di problematiche di varia natura, come ad esempio a seguito di fratture o lesioni provocate da incidenti. Tradizionalmente, la riabilitazione, e quindi il recupero, che avviene secondo graduali movimenti del polso e della mano, secondo tutti gli angoli e le direzioni di movimento possibili, viene fatta in centri specializzati in cui il paziente è prontamente seguito dai medici o dai fisioterapisti che gli illustrano l'utilizzo di macchinari specifici.

Natura del deficit

Movimentazioni

Frequenza elevata

Fasi di terapia



Elementi di robotica rigida. "Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-aligning Wrist rehabilitation robot", 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics



Caso studio ArmAssist, Technalia

### La soft robotica

La Soft Robotica è la branca della robotica che ha come obiettivo quello di sviluppare dispositivi e sistemi robotici privi di corpi rigidi che si adattano all'ambiente in cui vivono reagendo a stimoli e forze esterne progettate e/o previste. La robotica morbida può avvalersi di molteplici e diverse tipologie di attuazione, può rivolgersi a numerosi campi d'applicazione e può riguardare la progettazione di sistemi per numerose funzioni. L'ambito medicale è di particolare interesse per la progettazione di dispositivi robotici morbidi.

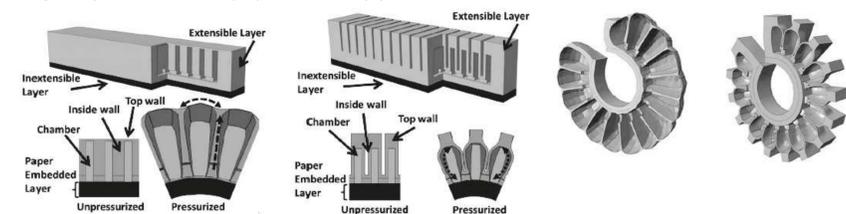
Molteplici applicazioni

Molteplici tipologie di attuazione

Materiali morbidi

Elevata potenzialità per il campo medicale

Studio degli attuatori pneumatici. "Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly", MIT



### Design di dispositivi medici Custom - Made

La rapida evoluzione progettuale e produttiva scaturita dall'opportunità di applicare gli strumenti del design parametrico e fabbricazione digitale alla produzione di artefatti medici per la riabilitazione ortopedica, insieme alla convergenza tra discipline mediche, biologiche e ingegneristiche, evidenzia come il design, che confina tra sapere e contesti accademici, professionali e produttivi, abbia la capacità di risolvere le difficoltà ergonomiche, estetiche e terapeutiche, migliorando l'esperienza del paziente nel periodo in cui è soggetto a trattamento terapeutico.

Specificità anatomica

Produzione on demand

Costo più elevato

Eliminazione dei prodotti inventuti

Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation, The Wyss Institute, MIT

MotorSkins, Facundo Gutierrez and Khushyar Razghandi



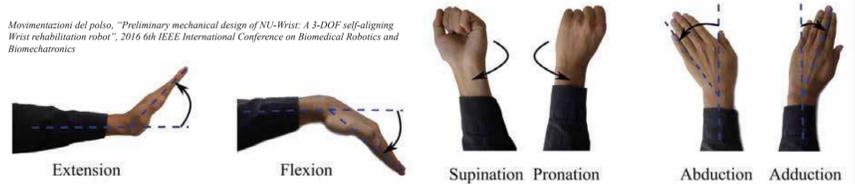
### La riabilitazione

Attività di rieducazione del corpo a seguito di un evento dannoso, come una lesione, un intervento chirurgico, complicazioni del movimento dovute a problemi di salute ed altre motivazioni. La riabilitazione è un processo nel corso del quale si porta una persona con disabilità a raggiungere il miglior livello di autonomia possibile sul piano fisico, funzionale, sociale, intellettuale e relazionale, con la minor restrizione delle sue scelte operative, pur nei limiti della sua menomazione.

Riabilitazione in ambito sanitario

Riabilitazione in ambito domestico

Movimentazioni del polso. "Preliminary mechanical design of NU-Wrist: A 3-DOF self-aligning Wrist rehabilitation robot", 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics



### La riabilitazione del polso robot-assistita

La riabilitazione mediante robot funzionali è sempre più diffusa ed apprezzata nel campo sanitario e gli studi e l'esperienza confermano che la riabilitazione robotica si rivela più efficace di quella tradizionale. Questo accade perché i robot consentono di agire con maggiore precisione ed efficienza in merito ai punti cruciali della terapia, soprattutto in riferimento alla necessità di elevata ripetibilità delle movimentazioni e degli esercizi di riabilitazione.

Elevata ripetibilità

Guida nelle movimentazioni

Elevata precisione

Controllo e monitoraggio

Soft Robot, DARPA

Anti-Roach, Otherlab

Soft gripper, Robohub



### Attuazione pneumatica - Pneu Nets

Gli attuatori elastomerici alimentati pneumaticamente sono di particolare interesse per la robotica morbida poiché possono essere leggeri, potenzialmente di un costo modesto, con possibilità diverse di fabbricazione e in grado di fornire una movimentazione non lineare con semplici input. Gli attuatori pneumatici possono inoltre garantire elevate variazioni di volume. Gli attuatori pneumatici, ovvero quelli funzionanti tramite la pressurizzazione dell'aria, sono costituiti per funzionare da un network chiamato Pneu-Net nel quale piccoli canali in materiali elastomerici sono modellati per permettere movimenti sofisticati con controlli semplici.

Leggerezza

Materiali morbidi

Elevata capacità di deformazione

Programmazione del movimento

Cortex, Jake Eviell

Ortesi per mano, Mhox Design



### Progettazione di ortesi soft robotiche ad attuazione pneumatica per la riabilitazione

L'attuazione pneumatica risulta particolarmente vantaggiosa ai fini della progettazione di dispositivi che interagiscono con i pazienti in modalità sicura, e rappresenta un'ottima sostituzione alla robotica rigida soprattutto per motivazioni legate all'interazione con il paziente ed al costo.

Lo stato dell'arte della robotica morbida con attuazione pneumatica di dispositivi medici ed ortesi di supporto vanta molti esempi di progettazione di guanti per la gestione e la rieducazione dei movimenti della mano, di esoscheletri per il supporto alla locomozione degli arti inferiori ed altre tipologie di esempi.

Programmabilità

Supporto alla riabilitazione

Gestione autonoma della terapia

Leggerezza

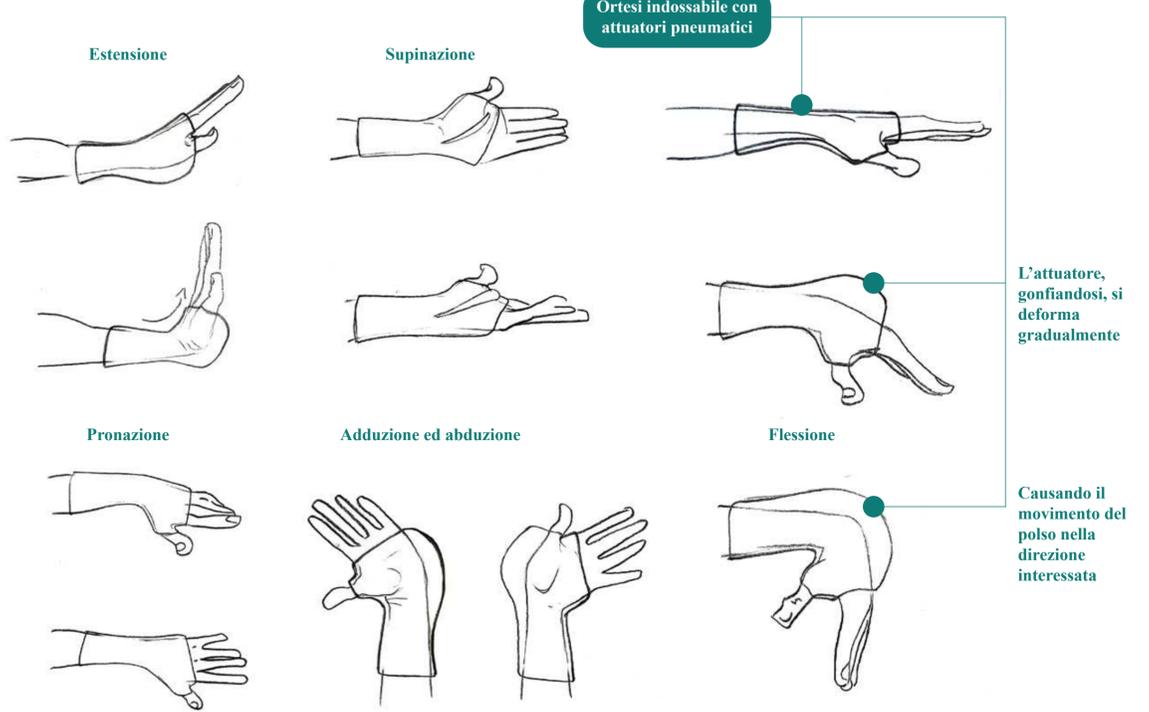
**Definizione del progetto**

Progettazione di un dispositivo soft robotico ad attuazione pneumatica indossabile e producibile mediante tecnica custom-made che permetta la riabilitazione del polso in coerenza con i parametri di frequenza, movimentazioni corrette da svolgere e fasi di terapia.

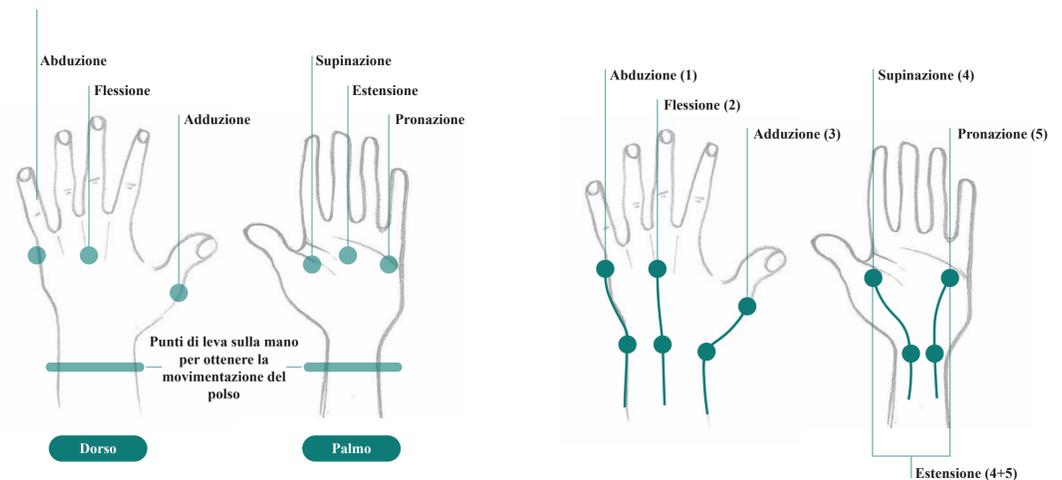
**Analisi dei requisiti del sistema**

ID	NOME	DESCRIZIONE	PRIORITA'
R01	Attivazione	Il dispositivo si deve accendere tramite un tasto d'accensione	Alta
R02	Alimentazione	Il dispositivo deve potersi alimentare, o grazie ad una batteria o grazie ad un alimentatore	Alta
R03	Autonomia	Il dispositivo deve rimanere attivo almeno per tutta la durata di una sessione di terapia riabilitativa	Alta
R04	Flessione ed estensione	Il dispositivo deve essere di ausilio e di resistenza alla riabilitazione dei movimenti di flessione ed estensione del polso	Alta
R05	Adduzione ed abduzione	Il dispositivo deve essere di ausilio e di resistenza alla riabilitazione dei movimenti di adduzione ed abduzione del polso	Alta
R06	Supinazione e pronazione	Il dispositivo deve essere di ausilio e di resistenza alla riabilitazione dei movimenti di supinazione e pronazione del polso	Alta
R07	Utilizzo domiciliare	Il dispositivo deve essere adatto all'utilizzo nell'ambiente della casa	Alta
R08	Comunicazione con l'applicazione	Il dispositivo deve essere in grado di comunicare con l'applicazione di riferimento	Alta
R09	Controllo delle movimentazioni e monitoraggio	Il dispositivo deve essere in grado di controllare le movimentazioni del polso per poterle rendere visualizzabili nell'applicazione di riferimento	Alta
R10	Spegnimento	Il dispositivo si deve poter spegnere tramite un tasto di spegnimento	Alta
R11	Indossabilità	Il dispositivo deve essere comodamente indossabile da parte dell'utente	Alta
R12	Lavabilità	Il dispositivo indossabile deve essere lavabile	Alta

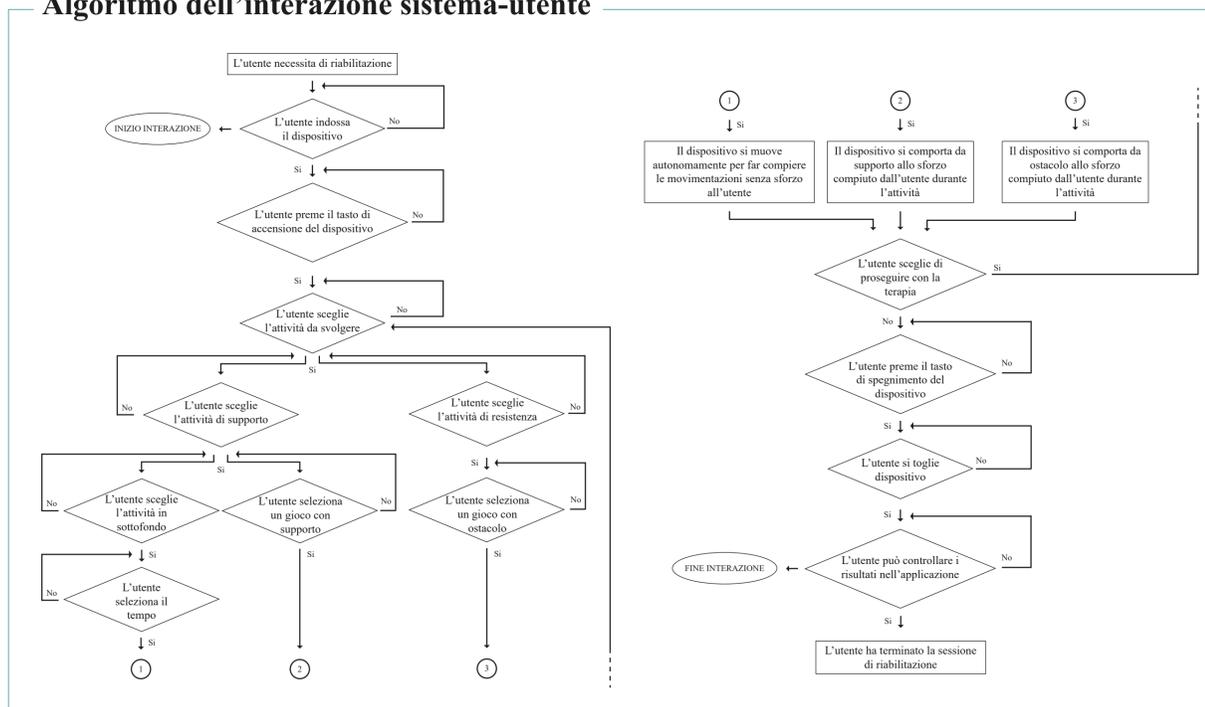
**Schizzi progettuali**



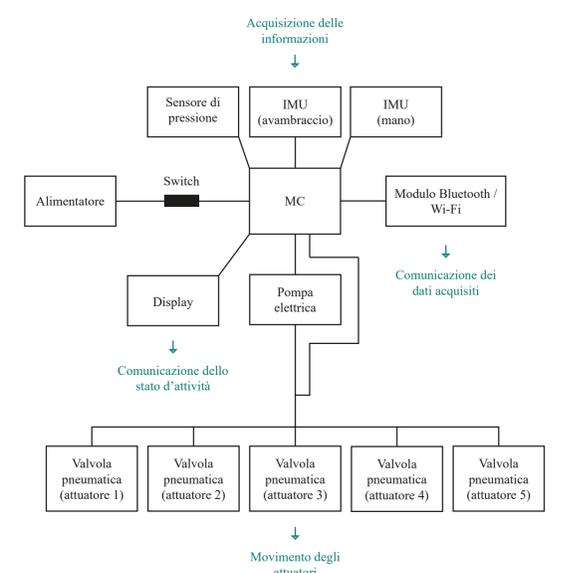
**Individuazione del posizionamento e quantità degli attuatori**



**Algoritmo dell'interazione sistema-utente**

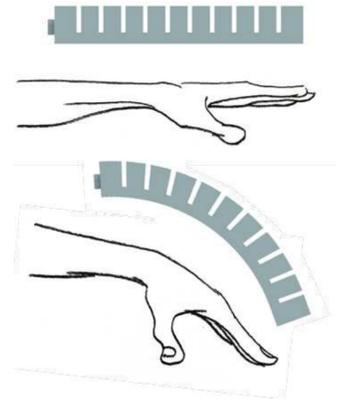
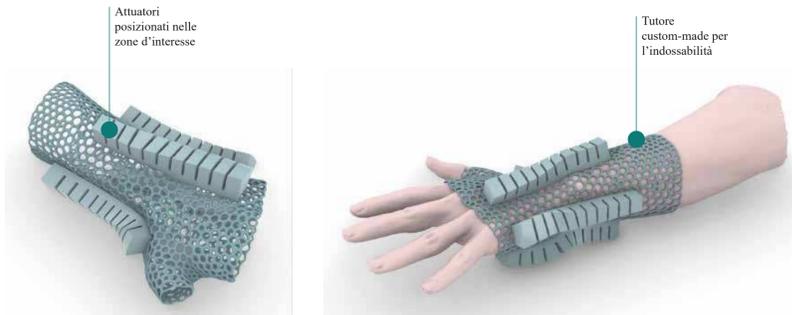
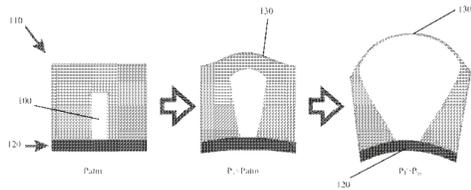


**Schematico dei componenti hardware**

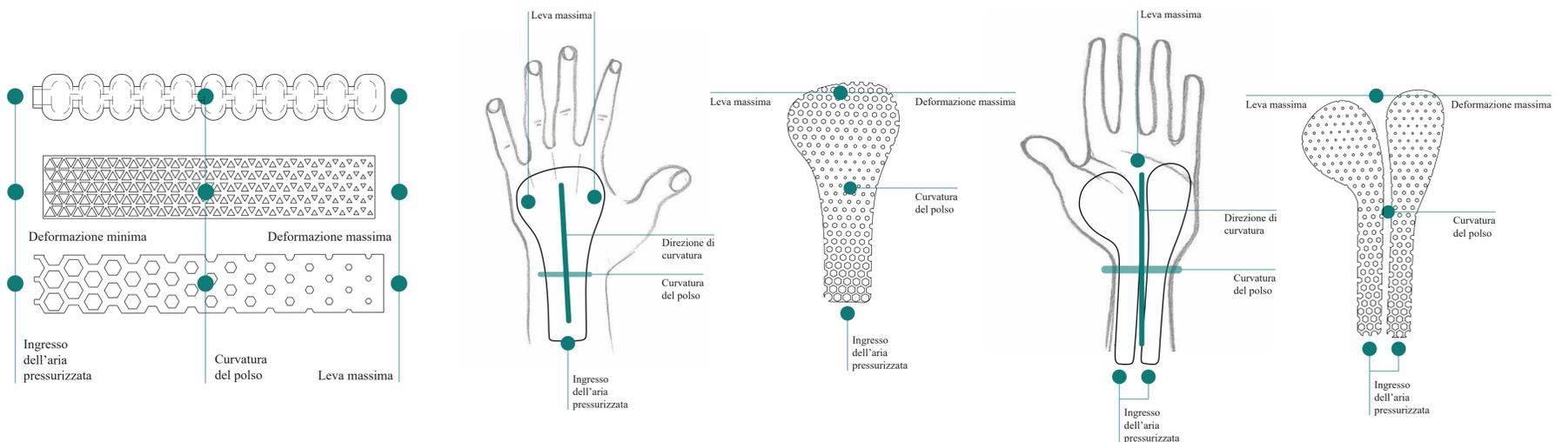


Progettazione degli attuatori

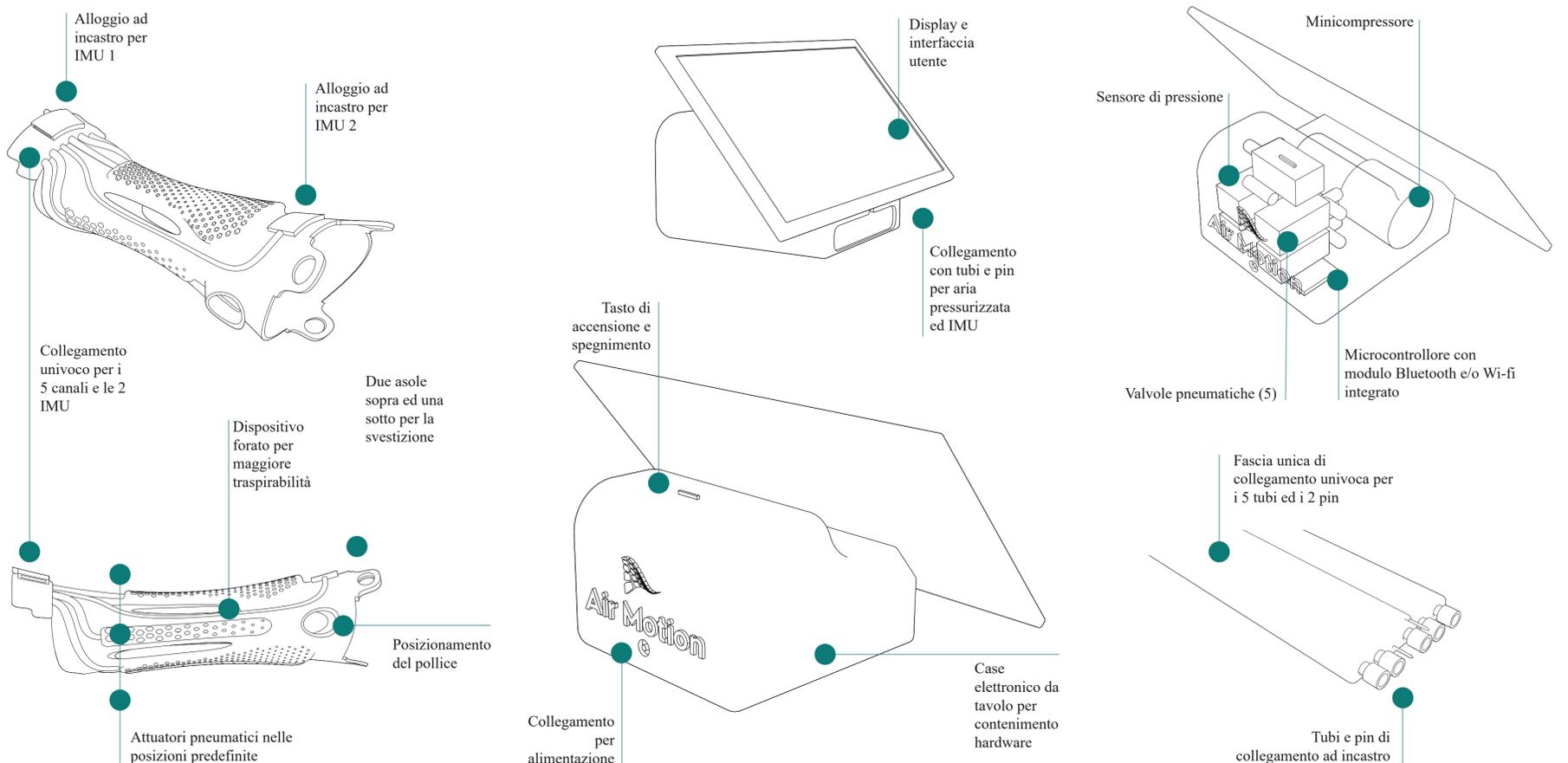
Attuatore brevettato



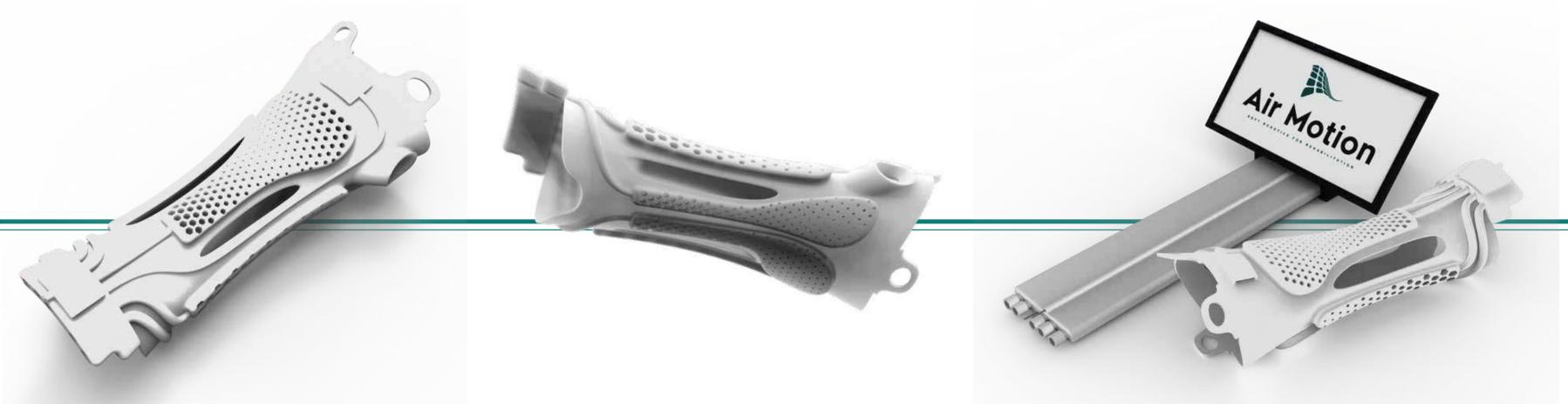
Nuove ipotesi formali



Progettazione del soft robot e del sistema di controllo



Visualizzazione del soft robot e del sistema di controllo



Studio sui materiali e sui metodi di fabbricazione digitale

Stampa del silicone medicale Ecoflex Superflex 00-10 (Smooth On) mediante tecnica Rapid Liquid Printing (Self-Assembly Lab, Massachusetts Institute of Technology).



Schema della stampa Rapid Liquid Printing del soft robot

