

# POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
IN  
AUTOMAZIONE A FLUIDO

*Studio e realizzazione di un prototipo di mano articolata  
mediante stampa 3D e azionamento pneumatico*

Relatori:  
Prof.ssa Daniela MAFFIODO  
Prof. Terenziano RAPARELLI

Laureando:  
Valerio STANO

# INDICE

<b>SOMMARIO</b> .....	<b>4</b>
<b>CAPITOLO 1. STAMPA ADDITIVA</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1. Generalità sulla stampa additiva</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2. Vantaggi e Svantaggi della produzione additiva</b> .....	<b>6</b>
<b>1.3. Metodi di produzione additiva</b> .....	<b>8</b>
<b>1.4. Schema di produzione</b> .....	<b>10</b>
<b>1.5. FDM</b> .....	<b>13</b>
<b>1.6. Polyjet</b> .....	<b>14</b>
<b>CAPITOLO 2. STAMPA ADDITIVA NELLA PNEUMATICA</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1. Attuatori pneumatici</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2. Attuatori pneumatici nella robotica</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3. Soluzione prensile <i>soft robotic</i></b> .....	<b>18</b>
<b>2.3.1. <i>Soft robotic</i> con stampo</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2. <i>Soft robotic</i> senza stampo</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4. Mano robotica pneumatica attuata con PAM</b> .....	<b>24</b>
<b>CAPITOLO 3. PROGETTO <i>FR4-NK0</i></b> .....	<b>26</b>
<b>3.1. Schema iniziale</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2. Realizzazione in cad</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2.1. Assieme del singolo dito</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2.2. Design del palmo della mano</b> .....	<b>35</b>
<b>3.2.3. Assieme della mano</b> .....	<b>37</b>
<b>CAPITOLO 4. STUDI EFFETTUATI</b> .....	<b>41</b>

<b>4.1.</b>	<b>Analisi cinematica .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.</b>	<b>Analisi dinamica .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.</b>	<b>Analisi strutturale .....</b>	<b>62</b>
<b>CAPITOLO 5. REALIZZAZIONE .....</b>		<b>69</b>
<b>5.1.</b>	<b>Modifiche cad funzionali alla stampa .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2.</b>	<b>Stampe realizzate .....</b>	<b>77</b>
<b>5.2.1.</b>	<b>Stampa in scala 1:1 .....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.2.</b>	<b>Stampa in scala 2:1, prima versione.....</b>	<b>82</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Stampa in scala 2:1, seconda versione.....</b>	<b>83</b>
<b>5.3.</b>	<b>Versione Polyjet.....</b>	<b>86</b>
<b>CAPITOLO 6. PROVE SPERIMENTALI .....</b>		<b>90</b>
<b>CONCLUSIONI .....</b>		<b>105</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>107</b>

## SOMMARIO

Esistono attualmente diversi metodi per la produzione di un qualsiasi componente meccanico. Tra di essi particolare interesse scaturisce oggi quello della produzione additiva, attuabile attraverso l'utilizzo di stampanti 3D. Tale settore della produzione, negli ultimi decenni, ha visto un incremento notevole nella sua diffusione, soprattutto grazie all'innovazione tecnologica e al fatto che indubbiamente, nonostante le ancora attuali limitazioni, risulta un metodo efficace ed economico per la realizzazione di un qualsiasi componente, dal *design* più semplice a quello più complicato.

Particolare interesse in questo lavoro di tesi è infatti la possibilità di realizzare, attraverso l'utilizzo di questo metodo di produzione, una mano articolata attuata pneumaticamente senza bisogno di assemblaggio. La scelta di questa strada è dovuta alla particolare natura dell'oggetto da realizzare, in quanto la presenza di cilindri, pistoni e cerniere ne renderebbe più complicata, se non impraticabile, la realizzazione senza assemblaggio con metodi tradizionali.

Lo scopo della seguente tesi è dunque fornire un progetto che nel suo complesso sia facilmente riproducibile mediante stampa additiva, economico e che abbia la stessa efficacia di simili soluzioni prodotte utilizzando metodi classici.

Per la realizzazione del prototipo sono state utilizzate due stampanti 3D FDM (*Fusion Deposition Method*) entrambe multimateriale: una **Stratasys F370** e una **3ntr A4v3**, con **ABSplus** e **TPU** come materiali scelti.

Un altro prototipo invece è stato realizzato con tecnologia Polyjet, con la stampante **Objet30 Prime**, utilizzando come materiale invece **VeroWhitePlus (RGD835)**.

# CAPITOLO 1. STAMPA ADDITIVA

## 1.1. Generalità sulla stampa additiva

Specifichiamo prima di tutto cosa intendiamo per *stampa additiva*: la produzione additiva di oggetti tridimensionali partendo da un modello 3D digitale. Tale modello viene prodotto attraverso l'utilizzo di software dedicati e successivamente elaborato per essere realizzato con diverse tecnologie, tra cui anche quella che costruisce prototipo strato dopo strato, attraverso una stampante 3D.

La stampa 3D nasce nel 1986, con la pubblicazione del brevetto di Chuck Hull, coniando il termine di *stereolitografia* che egli stesso definisce:

*"Un sistema per generare oggetti tridimensionali basato sulla creazione di un modello trasversale dell'oggetto da costituire, sulla superficie di un medium fluido capace di alterare il suo stato fisico in risposta a stimoli sinergici quali radiazione incidente, bombardamento di particelle o reazioni chimiche, in lamine adiacenti che rappresentano le sezioni trasversali adiacenti successive dell'oggetto che si integrano tra loro, provvedendo ad una progressiva crescita per apposizione dell'oggetto desiderato, per cui un oggetto è creato da una superficie sostanzialmente planare del medium fluido durante il processo di formazione."* [1]

Quindi sostanzialmente la stampa 3D consente, grazie alla produzione in situ del pezzo, di realizzare praticamente qualsiasi geometria predisposta, anche di componenti che non richiedano assemblaggio.

Proprio queste sue caratteristiche la rendono un mezzo di utilizzo potenzialmente adattabile in qualsiasi ambito, infatti ad oggi la produzione attraverso stampa additiva ricopre svariati ambiti, dal settore aeronautico a quello medico, passando per quello automotive, ma anche ludico.

## 1.2. Vantaggi e Svantaggi della produzione additiva

Anche se dalle prime versioni di stampanti 3D stereolitografiche ad oggi sono passati decenni, facendo passi in avanti e consentendo la realizzazione di strutture via via più complicate e anche con la possibilità di utilizzare diversi materiali, ad oggi vi sono ancora da segnalare svantaggi:

- Difficoltà nella produzione e realizzazione su larga scala (produzione di massa): anche con le stampanti più moderne, vi sono limiti di tempo evidenti nella realizzazione di un prototipo per la diffusione a livello di massa, soprattutto per quel che riguarda determinate tipologie di stampa (stereolitografia), dovuto anche al fatto che spesso sono richieste lavorazioni successive necessarie a fornire il grado di rugosità/precisione richiesto;
- Limiti di ingombro: anche se come detto, la produzione additiva ha migliorato di molto il suo orizzonte realizzativo (potenzialmente limitato solo dall'immaginazione umana), ad oggi anche le stampanti più grandi esistenti, consentono uno spazio operativo massimo di circa 1m<sup>3</sup> (eccezione fatta per casi ancora isolati e sperimentali), ciò rende difficile quindi per il momento realizzare dei pezzi stampati di grandi dimensioni che non richiedano assemblaggio successivo;
- Materiali a disposizione: come detto, anche in questo ambito il ventaglio di possibilità si sta nel tempo ampliando, tuttavia ad oggi sono ancora pochi i materiali con cui è possibile lavorare con questo tipo di produzione. Si va dall'utilizzo di particolari metalli e leghe, a materiali elastoplastici e infine resine, a seconda del metodo di stampa prescelto.

Nonostante la presenza di indubbi svantaggi, la stampa 3D consente tuttavia di avere dei vantaggi notevoli:

- Prototipazione rapida ed eclettica: tramite uno dei tanti software di modellazione CAD 3D, è possibile la realizzazione rapida del singolo componente per verificarne le caratteristiche meccaniche preventivate;
- Unica macchina di produzione: a differenza dei metodi tradizionali, la maggior parte delle stampanti 3D sono in grado di produrre il componente desiderato direttamente sulla macchina, senza bisogno di spostamenti e/o ulteriori lavorazioni, fissaggi,

operazioni di spostamento all'interno della linea produttiva. Inoltre l'intervento umano si limita al solo avvio del programma di stampa e poco più;

- Geometrie complesse: a differenza dei metodi di produzione tradizionali, la stampa 3D consente di realizzare geometrie che o si dovrebbero ottenere dalla fusione e/o assemblaggio di differenti componenti prodotti tradizionalmente, o addirittura talmente complesse che sarebbe impossibile realizzare altrimenti. Ciò costituisce uno dei più grandi vantaggi di questo metodo, consentendo di realizzare, come già detto, anche componenti che non necessitano nessun assemblaggio successivo;
- Economicità: a seconda del metodo scelto è un parametro che può influire più o meno nella produzione, tuttavia nelle applicazioni più semplici, quali ad esempio modellini o primi prototipi, il risparmio economico può essere sostanziale.
- Guadagno prestazionale: proprio grazie al vantaggio di riuscire a realizzare geometrie complesse che possono richiedere l'assemblaggio o meno, oppure la possibilità di ottimizzare delle geometrie preesistenti, ciò comporta la possibilità di riduzione di ingombri e/o peso per componenti all'interno di strutture più complesse (ad esempio per tubi di scarico e/o sospensioni, ma anche apparati biomeccanici ecc.), guadagnando in termini di prestazioni, eliminando per esempio quelle perdite dovute alla saldatura di pezzi prodotti tradizionalmente.

A fronte di questi esaltanti vantaggi, è chiaro come oggi la produzione per mezzo di stampa additiva sia in forte sviluppo e uno dei campi interessati dalla maggiore ricerca, grazie alle possibilità che propone.

Già oggi, ove possibile sfruttarla, ne sono evidenti i benefici apportati, obiettivo futuro sarà quello di ampliarne sempre di più il campo di utilizzo e il range di materiali utilizzabili e le dimensioni massime realizzabili.

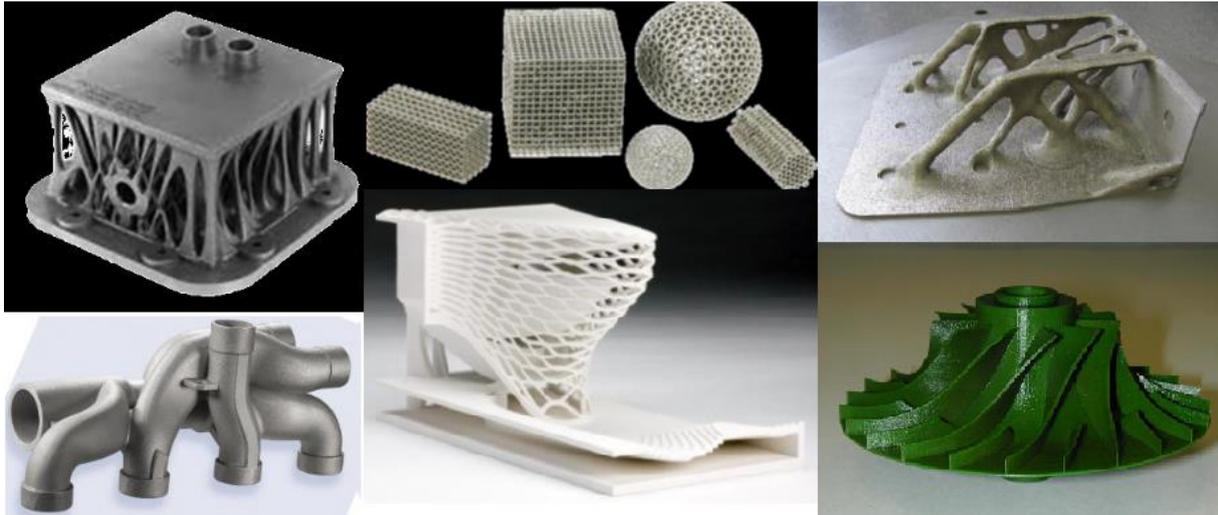


Figura 1 - esempi di applicazione della stampa additiva [2]

### 1.3. Metodi di produzione additiva

È giusto dunque porre una distinzione fra tutti i vari processi di stampa additiva, che variano sia nella tecnologia che nei materiali utilizzati. Per tale ragione, nel 2010, ASTM (American Society for Testing and Materials) ha classificato i processi di fabbricazione additiva in 7 categorie (Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2012) [3]:

- *VAT Photopolymerization*: utilizza una vasca di resina fotopolimerica, dalla quale il modello viene costruito strato per strato. Una luce ultravioletta è utilizzata per indurire la resina dove richiesto, mentre una piattaforma muove il modello verso il basso gradualmente dopo che ogni strato è stato polimerizzato;
- *Material jetting*: crea oggetti in maniera simile ad una stampante a getto di inchiostro bidimensionale. Il materiale viene gettato su una piattaforma di costruzione, tramite un ugello che si muove orizzontalmente, in maniera continua o con un approccio Drop On Demand. Il materiale si solidifica sulla piattaforma, è indurito mediante una luce ultravioletta e il modello si crea strato per strato;
- *Binder jetting*: utilizza 2 materiali, di cui un legante e uno a base polvere. Il legante funge da adesivo tra gli strati di polvere. Una testina di stampa si muove orizzontalmente sul piano xy della macchina e deposita alternativamente strati di materiale e di legante. Layer dopo layer, la piattaforma di costruzione su cui giace il modello scende grazie ad un elevatore;

- *Material extrusion*: detto anche FDM (*Fused Deposition Modelling*) è un processo di estrusione comune ed è un marchio commerciale della società Stratasys. Il materiale è depositato su una piattaforma mediante un ugello che si muove orizzontalmente sul piano xy. La piattaforma si muove lungo l'asse z, facendo scendere il modello, layer dopo layer.
- *Powder bed fusion*: comprende le seguenti tecniche di stampa comunemente utilizzate come sinterizzazione laser diretta dei metalli (DMLS), fusione del fascio di elettroni (EBM), sinterizzazione selettiva del calore (SHS), fusione laser selettiva (SLM) e sinterizzazione laser selettiva (SLS). La tecnologia a letto di polvere usa un raggio laser (LPBF) oppure un fascio di elettroni (EBM) per fondere della polvere. Tutte le tecniche a letto di polvere (PBF) prevedono la stesura del materiale in polvere sullo strato precedente grazie ad un rullo o ad una lama. Un elevatore si sposta lungo l'asse z, facendo scendere layer dopo layer il modello giacente sulla piastra di lavoro. Una tramoggia o un serbatoio forniscono di volta in volta il materiale nuovo in polvere che successivamente la lama stende su tutta la piastra;
- *Sheet lamination*: comprende la fabbricazione additiva ultrasonica (UAM) e la produzione di oggetti laminati (LOM). Il processo di fabbricazione additiva ad ultrasuoni utilizza fogli o nastri di metallo, che vengono uniti insieme mediante saldatura ad ultrasuoni. LOM utilizza un approccio simile strato per strato, ma utilizza la carta come materiale e dell'adesivo per unire i fogli al posto della saldatura. Gli oggetti laminati prodotti sono utilizzati spesso a scopo estetico e risultano poco adatti a quello strutturale. La tecnologia UAM prevede l'utilizzo di materiali metalli, tra i quali alluminio, rame, acciaio inox e titanio;
- *Direct Energy Deposition*: è un processo di stampa comunemente utilizzato per riparare o aggiungere materiale a componenti già esistenti. Una tipica macchina DED è costituita da un ugello montato su un braccio multiasse, che deposita il materiale fuso su una determinata superficie del componente e qui solidifica. Il processo è simile in linea di principio all'FDM, ma l'ugello può muoversi in qualsiasi direzione grazie alla macchina a 5 assi su cui è montato. Il materiale viene fuso durante la deposizione con un raggio laser o elettronico. Questo processo può essere utilizzato con materiali polimerici, ceramici, ma tipicamente è utilizzato con metalli.

## 1.4. Schema di produzione

Lo schema di produzione mediante la stampa additiva, qualsiasi metodo esso sia, è comune, quindi per quel che riguarda il processo che porta alla realizzazione del componente, è possibile definire i passaggi elencati di seguito:

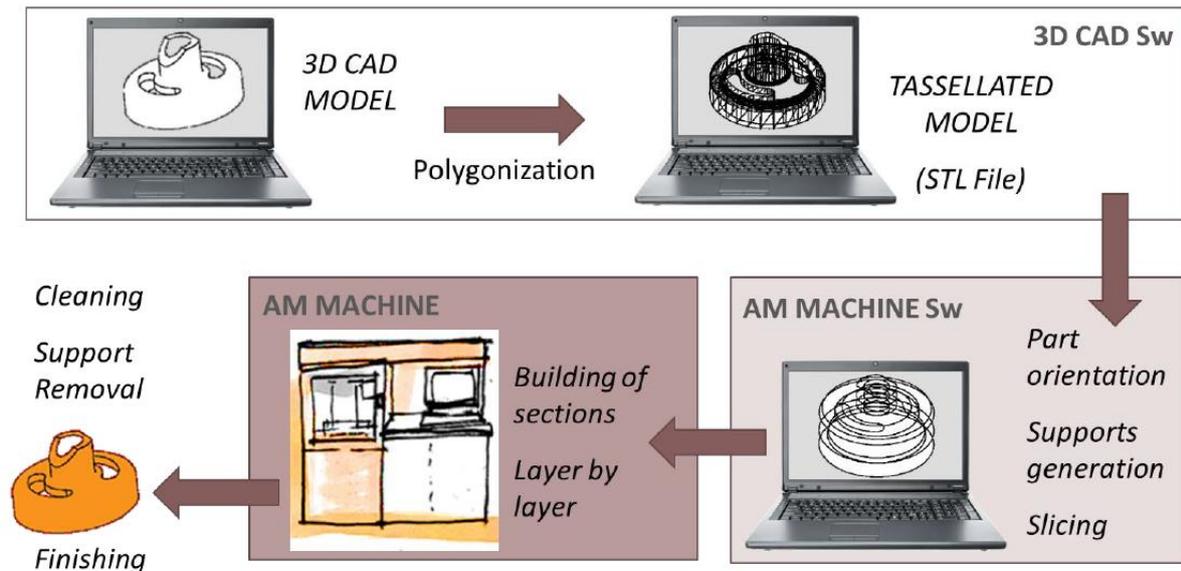


Figura 2 - passaggi nella realizzazione di un componente con stampa additiva [2]

- 1) Viene realizzato il modello 3D da stampare con un qualsiasi software cad a disposizione;
- 2) Il file cad viene convertito in un file STL, con il compito di dividere il solido da realizzare in un numero di poligoni necessario alla stampa, più o meno elevato a seconda della complessità dell'oggetto;
- 3) Il file STL viene analizzato da un software di stampa che ne controlla e corregge gli errori e soprattutto determina la posizione ottimale per la deposizione del materiale a seconda della geometria da realizzare, ne genera i supporti e determina gli strati da posizionare;
- 4) Il file ora è pronto per essere mandato in stampa, dove il filamento viene depositato strato dopo strato seguendo quelle che sono le indicazioni determinate nel passaggio (3);
- 5) Si ottiene così infine il prodotto finale, che può essere successivamente rifinito eliminando i supporti.

Bisogna porre particolare attenzione in ognuno di questi passaggi:

In (1) ossia nella realizzazione del cad, bisogna essere attenti a realizzare delle geometrie che rispettino i limiti di macchina ovviamente, dove la sensibilità della dimensione minima del modello 3D è determinata dallo strato minimo di materiale che è possibile depositare in una passata.

In (2), ossia nel passaggio al file STL, bisogna fare attenzione a non generare poligoni che si intersecano o geometrie che non coincidono. Per la risoluzione di tali errori tuttavia viene incontro il software di stampa che aiuta a correggere in automatico la divisione in poligoni e gli errori comuni.

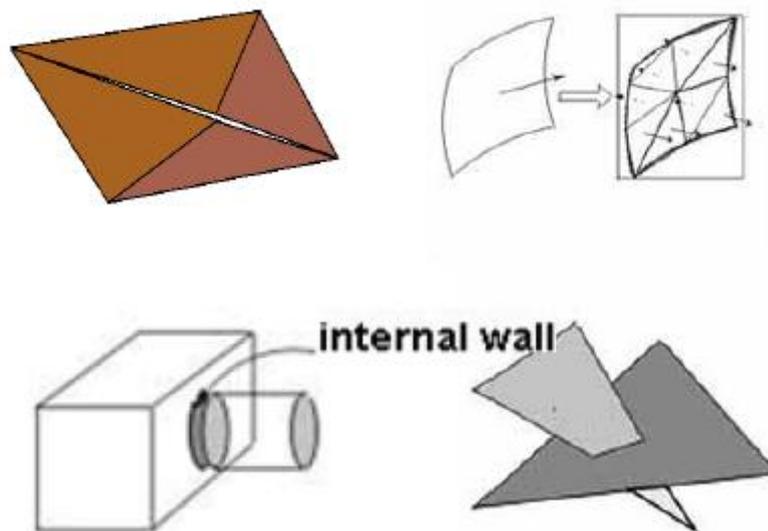


Figura 3 - errori comuni nella realizzazione del file STL

In (3) operazione fondamentale risulta essere l'orientamento del componente da realizzare. Infatti, essendo il metodo di FDM a deposizione di materiale, il risultato finale avrà caratteristiche meccaniche e geometriche tanto più fedeli all'originale quanto più saremo stati capaci a definire adeguatamente l'orientamento, la deposizione e i supporti necessari alla realizzazione di stampa. Le caratteristiche del solido finito saranno infatti influenzate dalle fibre di disposizione del materiale: una posa non adeguata può inficiare notevolmente tali valori.

## Part Orientation

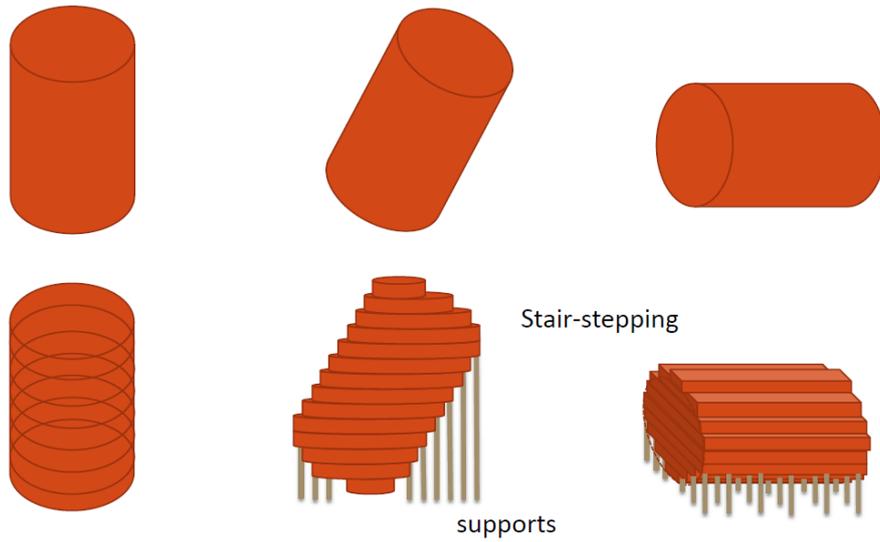


Figura 4 - problemi legati all'orientamento del solido da realizzare

Come si può evincere dall'immagine, è evidente che ogni singola geometria da realizzare può avere diversi orientamenti, comunque realizzabili, ma solo una sarà la configurazione ottimale.

## 1.5. FDM

In particolare, per questa tesi ci concentreremo, tra i tanti metodi possibili per la realizzazione attraverso stampa additiva, al metodo FDM (*Fused Deposition Modelling*) in quanto è stato quello prescelto per la produzione del prototipo progettato.

Le stampanti FDM lavorano con materiali polimerici con proprietà meccaniche differenti. Tali materiali vengono forniti come filamenti avvolti in bobine: il filamento solido viene riscaldato e reso malleabile. Facendolo passare attraverso un ugello, che si muove nello spazio 3D del volume di lavoro, il materiale viene depositato sul piatto sul quale strato dopo strato viene costruito il solido, seguendo il processo rappresentato in figura:

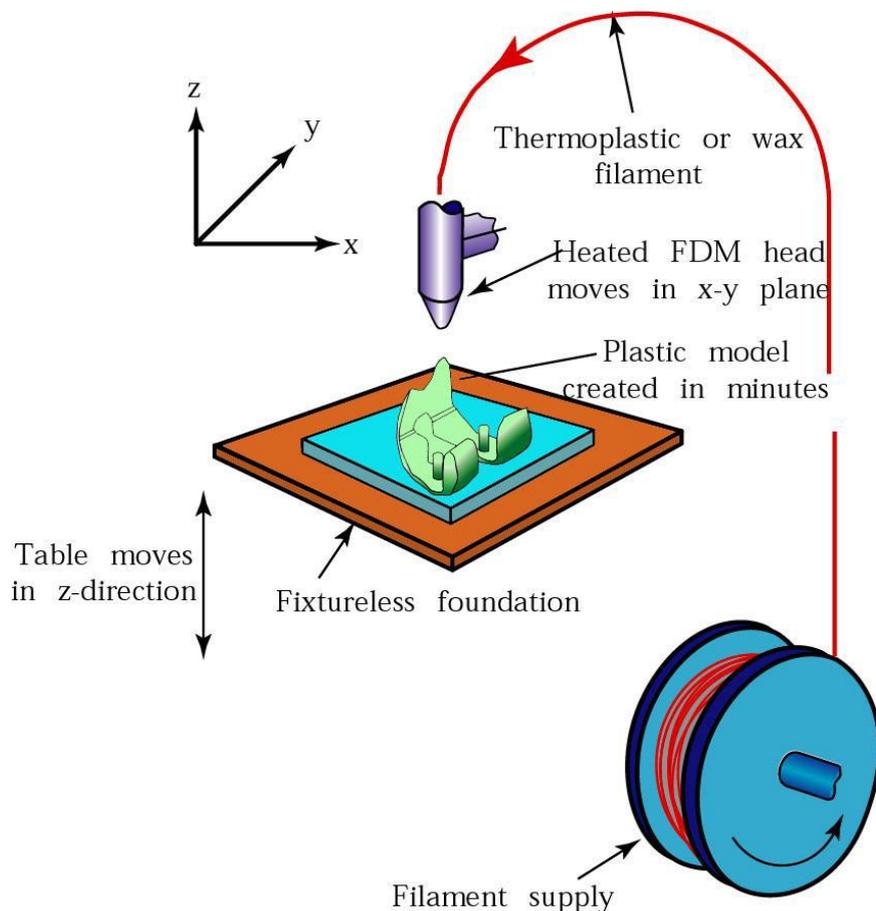


Figura 5 - processo di stampa FDM [2]

L'ugello è mobile sul piano XY, mentre il piatto si muoverà lungo Z. Strato dopo strato viene depositato il materiale, una volta completato uno strato, il piatto scorre verso il basso per permettere la deposizione di nuovo materiale.

Una volta completato l'ultimo strato, il componente così realizzato viene lasciato in bagno in vasca industriale per rimuovere il materiale di supporto e ottenere così il pezzo finito.

## 1.6. Polyjet

Altra tecnologia che ci interessa analizzare più nello specifico, è quella polyjet, anch'essa utilizzata per questo lavoro di tesi.

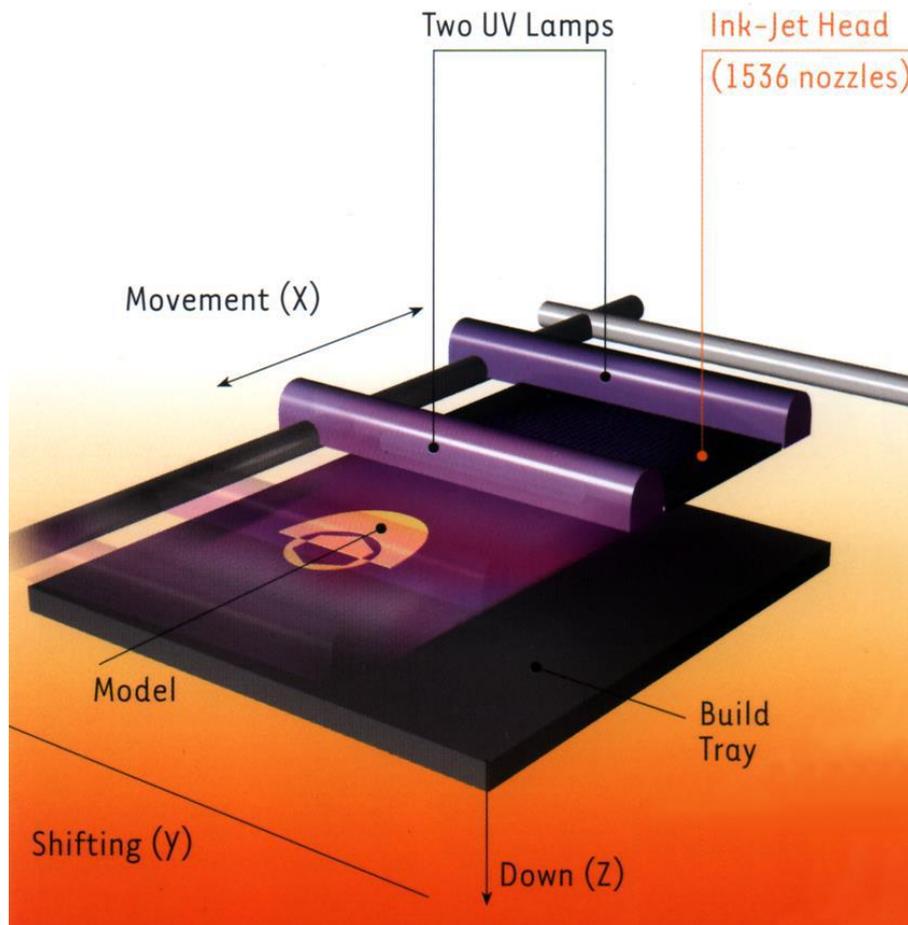


Figura 6 - esempio di stampa polyjet [2]

Le macchine che sfruttano questa tecnologia sono capaci di lavorare con fotopolimeri. Esse depositano materiale con strati di layer anche fino a  $1.5 \cdot 10^{-5}$  mm con parti che contengono 1536 ugelli indipendenti, permettendo una deposizione rapida e accurata. Ogni strato di fotopolimero che viene depositato è immediatamente colpito da un fascio di luce ultravioletta solidificandosi quasi istantaneamente, senza che sia dunque necessario lavoro di rifinitura successivo. Il materiale di supporto è costituito da gel che viene eliminato a mano o più spesso con acqua.

## CAPITOLO 2. STAMPA ADDITIVA NELLA PNEUMATICA

### 2.1. Attuatori pneumatici

Anche nel campo della pneumatica ha preso sempre più piede l'utilizzo della produzione additiva nella realizzazione di componenti, ciò grazie all'incredibile vantaggio che fornisce tale metodo. Come già detto infatti, grazie alla produzione istantanea di geometrie complicate, e data la natura della pneumatica, che prevede necessariamente l'utilizzo di condotti per l'attuazione dei diversi dispositivi, ecco che la stampa 3D viene incontro a quelle che sono le esigenze di realizzazione, ampliando le possibilità di produzione di pezzi altrimenti quasi irrealizzabili con altri metodi di produzione.

I casi di applicazioni sono innumerevoli, alcuni esempi sono di seguito riportati.

In ambito della microfluidica è stata realizzata nell'articolo redatto da Jingyi Wang, PingYao, Niandong Jiao, Steve Tung e Lianqing Li, una micropompa pneumatica interamente stampata 3D, avente una sensibilità di stampa di 100  $\mu\text{m}$  nelle direzioni x, y e z, con l'intento di testarne la quantità di flusso ottenuta. [4]

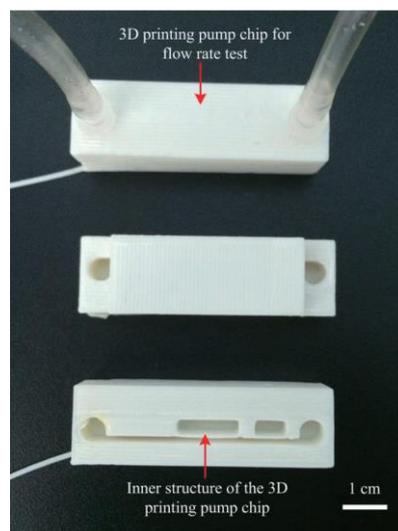


Figura 7 - micropompa pneumatica stampata 3D

Altro esempio è quello portato avanti nel lavoro di Xue Jiang e Peter B. Lillehoj, i quali si sono occupati di produrre valvole microfluidiche realizzate con stampe 3D multimateriale, in particolare alternando strati pseudo-gommosi e strati più rigidi generati dall'utilizzo di diversi materiali, dimostrando l'efficacia di tale metodo per i loro scopi. [5]

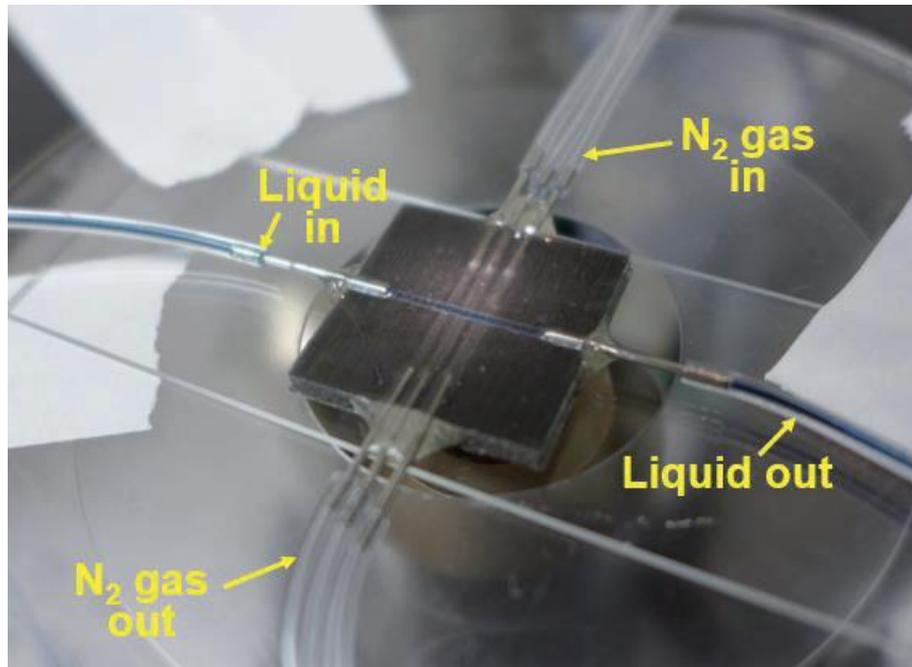


Figura 8 - valvole per microfluidica stampata 3D

## 2.2. Attuatori pneumatici nella robotica

Dato che il lavoro della seguente tesi riguarda la realizzazione di una mano articolata stampata interamente 3D, concentriamoci ora su quello che è il back-ground in cui allo stato attuale ci troviamo per quel che riguarda la produzione con stampa additiva in ambito robotico e attuazione pneumatica, essendo un tema affine con il progetto di tesi.

Uno degli esempi di stampa 3D applicata alla robotica è la realizzazione di una pelle per un robot pneumatico adattivo, in grado di reagire a determinati stimoli imposti dall'utilizzatore che, sollecitando determinati tasti, influenzerà il comportamento e le azioni del robot.

Il progetto realizzato da Ronit Slyper<sup>1</sup> e Jessica Hodgins ha utilizzato una stampante che permettesse di lavorare con materiali gommosi, quali il TAngoPlus, necessario alle capacità adattive del robot di essere manipolato dall'utente. [6]

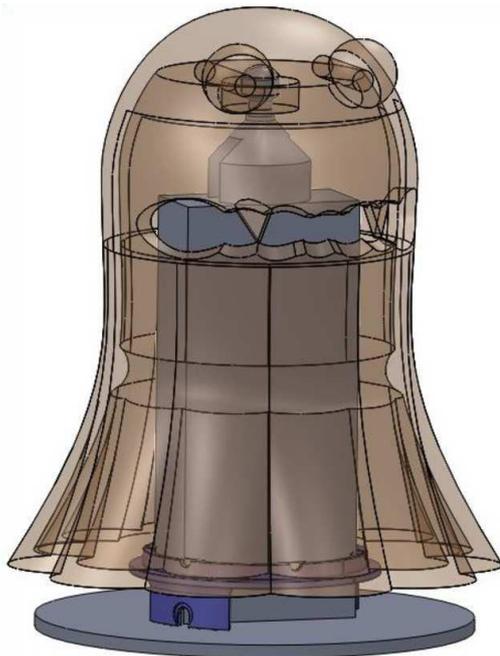


Figura 9 - robot skin additiva realizzata con stampa 3D

Altro esempio di applicazione in ambito robotico, è quello di questo semplice robot con un gripper ad un grado di libertà, azionato pneumaticamente, interamente stampato 3D e che non richiede alcun assemblaggio. [7]

Il progetto è stato ideato da Ying Wei, Yonghua Chen, Yang Yang, e Yingtian Li e stampato con un polimero e con una stampante, Objet Eden350V, che garantisce una risoluzione di 42  $\mu\text{m}$  lungo x e y e 16  $\mu\text{m}$  lungo z.

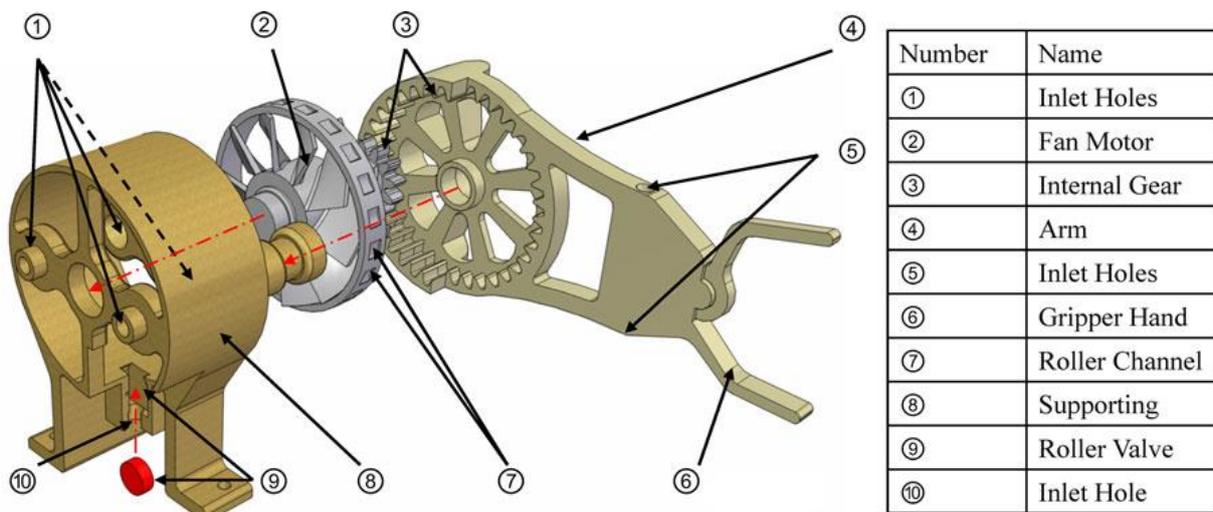


Figura 10 - componenti del robot 1gdl stampato 3D

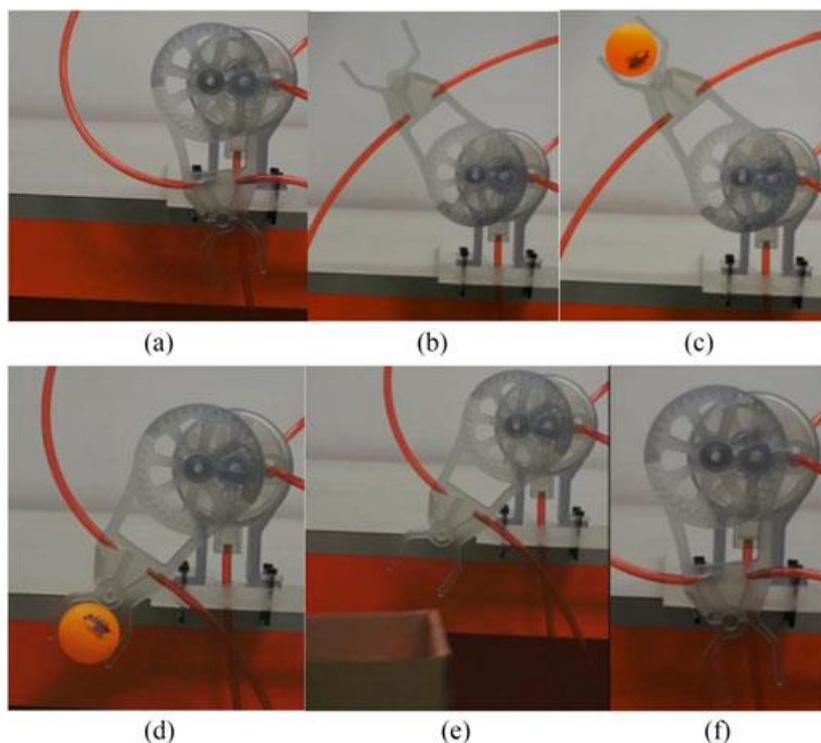


Figura 11 - realizzazione del movimento del robot 1gld

### 2.3. Soluzione prensile *soft robotic*

Particolare interesse ha adesso analizzare la messa in atto di alcune soluzioni per quel che riguarda la realizzazione di mano robotiche attuate pneumaticamente.

La prima soluzione che analizziamo è quella della prototipazione della così definita *soft robotic*, ossia una soluzione che prevede la realizzazione di una mano mediante dei meccanismi più o meno articolati che possano svolgere la funzionalità di dita prensili e definiti “pneuFlex”. Tali meccanismi si basano sul concetto che, una volta che essi vengono messi in pressione, generano una flessione proporzionale dell’attuatore, facendo sì che sia in grado per esempio di chiudersi attorno ad un oggetto e anche essere in grado di sollevarlo.

All’interno di questa categoria, ossia dei prototipi realizzati sfruttando la cosiddetta tecnologia soft, possiamo distinguere tra quelli che sono realizzati grazie all’utilizzo di stampi 3D riempiti con colata di materiali quali siliconi, e quelli che invece sono direttamente stampati, sfruttando quella che è la tecnologia di stampa di materiali simil silicone e/o stampa di multimateriali.

### 2.3.1. *Soft robotic con stampo*

Per la realizzazione della soluzione soft, una prima strada, prevede l'utilizzo di uno stampo nel quale effettuare la colata del materiale scelto, per poi avere, una volta estratto dallo stampo, l'attuatore vero e proprio. In tal caso la stampa additiva si limita alla produzione dello stampo nel quale viene successivamente effettuata la colata. Tuttavia, ha il vantaggio di essere una strada facilmente percorribile e realizzabile anche con metodi artigianali, dato che lo stampo non per forza debba essere realizzato con una stampante 3D, anche se se ne facilita la produzione.

Esempio di tale soluzione è il seguente gripper:

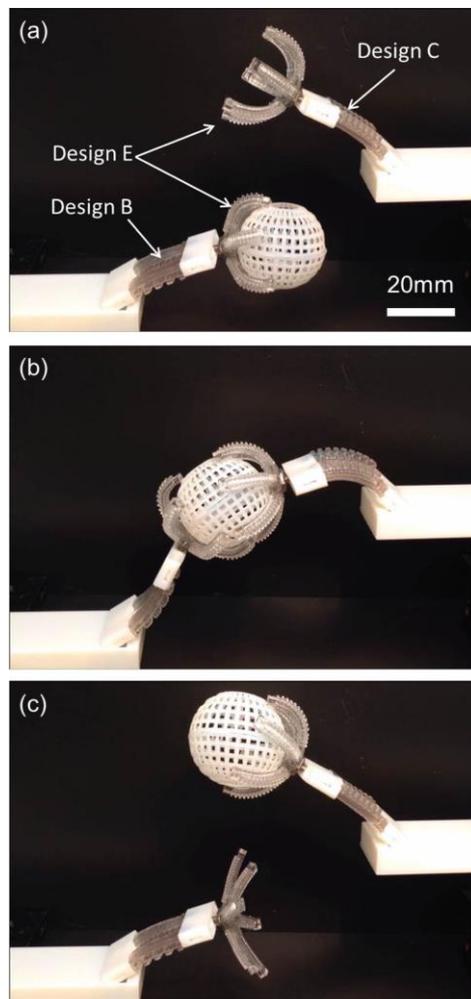


Figura 12 - softgripper realizzato con stampo

Il progetto realizzato da Yongha Hwang, Omeed H. Paydar e Robert N. Candler si basa sul concetto di Pneuflex, ossia quell'attuatore pneumatico che, grazie alle differenti coefficienti di

dilatazione ottenuti dalla parte interna ed esterna, grazie alla creazione di specifiche camere, fa sì che quando sia mandato in pressione, si richiuda su se stesso. [8]

Come materiale per la realizzazione degli attuatori è stata utilizzata una miscela 15:1 di PDMS prepolimero (Sylgard 184, Dow Corning, MI, USA) e agente indurente.

Si tratta di un gripper molto piccolo, con una lunghezza di 30 mm attuato a 90 kPa. Il gripper è in grado di sollevare un peso di 10.95g, equivalente a ~107 mN.

Altro esempio è la seguente mano:

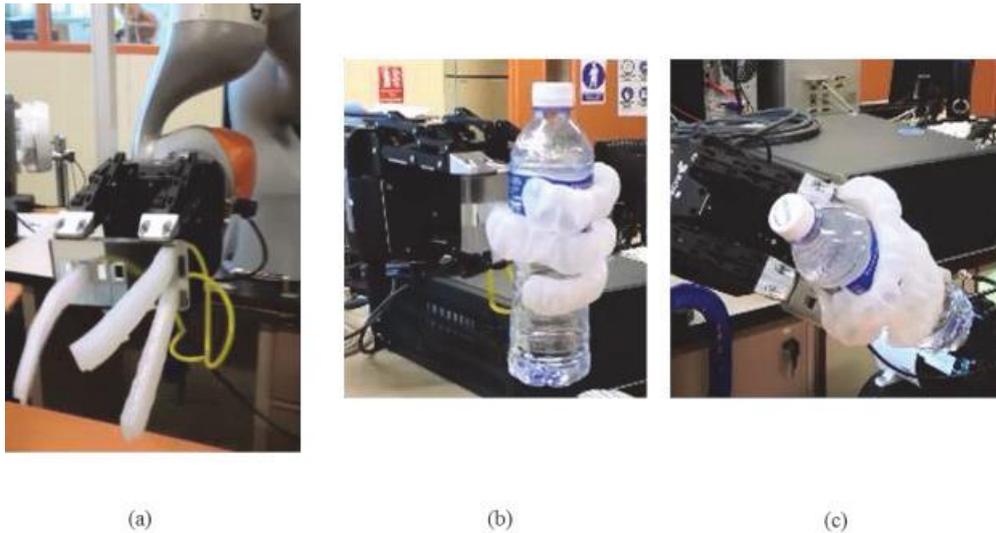


Figura 13 - mano con dita PneuFlex realizzate con stampo

Anche in questo caso il lavoro di Jin-Huat Low e Ang Marcelo H. Jr. si basa sulla tecnologia PneuFlex ottenuta con lo stampo. [9]

L'attuatore è stato realizzato con DS10-M. L'attuatore è lungo 146mm, mentre la pressione applicata è di 100kPa, sollevando un peso totale di 600 g, questo significa che ogni attuatore soft può contribuire con circa 2N di forza.

### 2.3.2. *Soft robotic senza stampo*

Abbiamo visto dei casi di realizzazione di soft-robotic mediante l'utilizzo di stampi, ora però valutiamo le soluzioni sempre nell'ambito soft che però prevedono la stampa diretta degli attuatori pneumatici.

Ciò è possibile grazie all'utilizzo di stampanti multimateriale, in particolare materiali elastici, indispensabili per questo tipo di applicazioni.

Il primo esempio che andiamo ad analizzare è il seguente gripper, realizzato da Zhongkui Wang and Shinichi Hirai e stampato tramite 3D printer (EDEN260V/Objet260Connex™ system), in grado di stampare direttamente con 14 materiali differenti l'oggetto in questione. [10] È stato utilizzato un mix di materiale gommoso (TangoBlack+) e un materiale duro tipo polipropilene (VeroWhite). La pressione di esercizio è 40kPa per sollevare un peso di 50g, esempio medio del peso di un piatto.

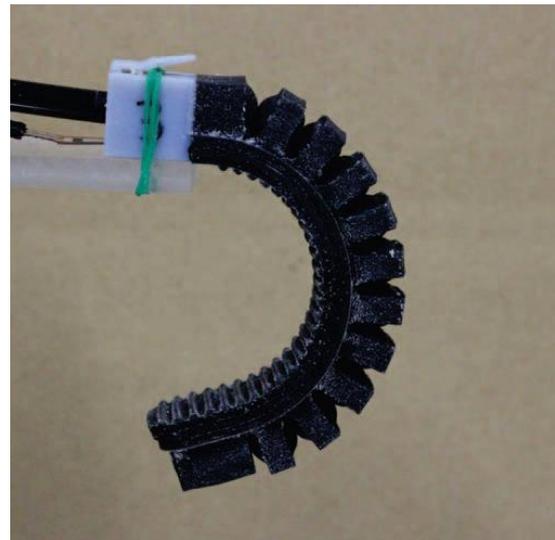
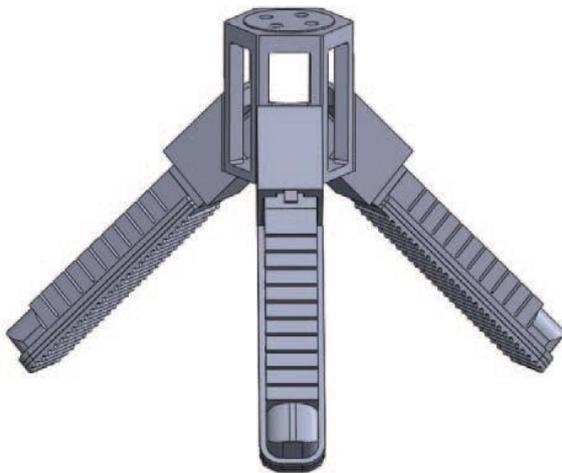


Figura 14 - cad e realizzazione del gripper realizzato con stampa multimateriali

Altro esempio è un altro gripper realizzato da Martin Manns, Jorge Morales e Peter Frohn, e stampato con una Keyence© Agilista 3200® 3D printer. Questa stampante 3D lavora con materiali a base di silicone, permettendo la creazione immediata del componente. È necessaria una pressione di 55 KPa per la deformazione massima. [11]

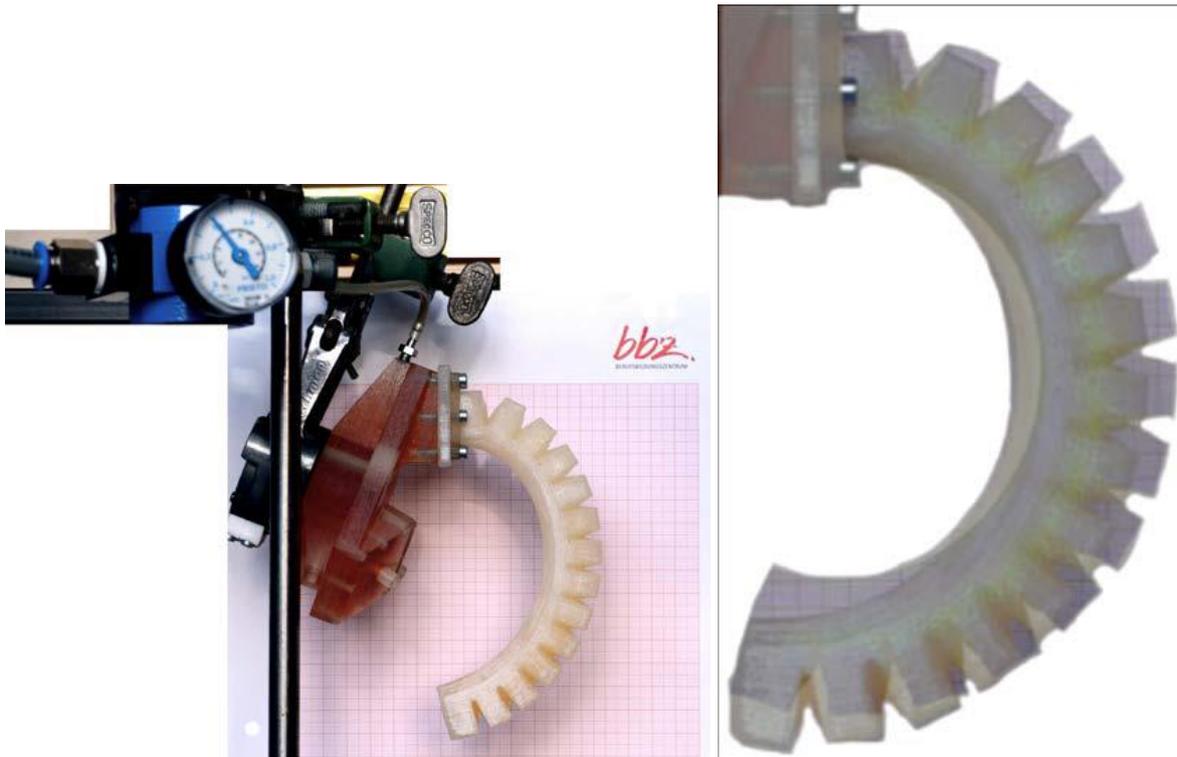


Figura 15 - gripper stampato 3d con materiali silicinei

Sempre con stampa multimateriali, nel lavoro di Nianfeng Wang, XianDong Ge, Hao Guo, Chaoyu Cui, Xianmin Zhang è stato realizzato anche questo gripper, attraverso l'utilizzo di una 3D printer Object260 Connex, che utilizza una tecnologia PolyJet, tra le più avanzate in ambito di produzione additiva, in grado di utilizzare fino a 8 getti di materiale liquido fotopolimero, il quale diventa solido quando esposto ad una luce a raggi UV.

I Materiali utilizzati sono TangoBlack+ e Verowhite, miscelati, con una precisione 0.1mm.

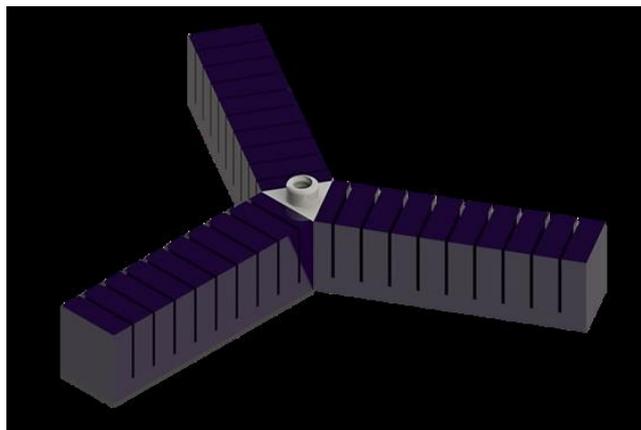


Figura 16 - cad del gripper stampato con multimateriali

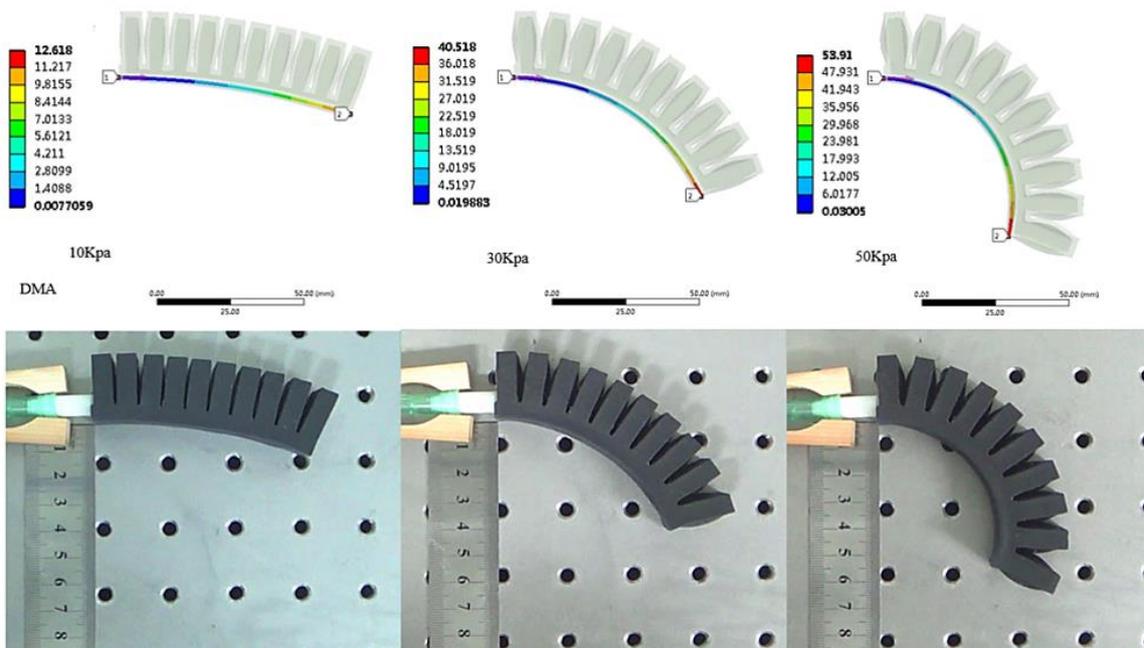


Figura 17 - confronto modello e realizzazione gripper

Altra soluzione con pneuflex ideata da Lisen Ge, Longteng Dong, Dong Wang, Qi Ge e Guoying Gu., è la scelta di utilizzo di stampa DLP, nella quale il modello 3D è diviso in piani orizzontali. Tali piani vengono convertiti in immagini 2D. Una luce viene proiettata per far solidificare il fotopolimero in resina, che definisce dinamicamente l'immagine del piano 2D sulla superficie della resina per ogni layer. [12]

Il processo viene ripetuto strato dopo strato finché non viene completato l'intero oggetto.

Materiale utilizzato: Tangoplus FLX930.

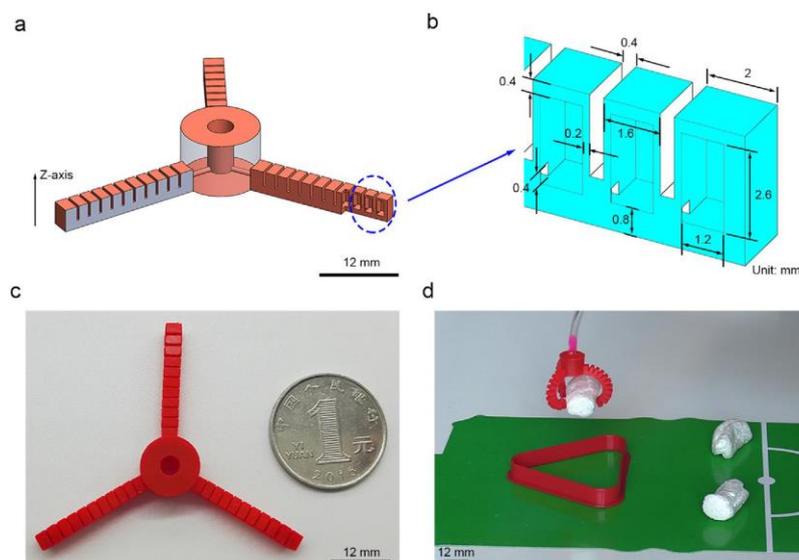


Figura 18 - cad e realizzazione del microgripper

Il problema che accomuna tali progetti è sostanzialmente legato a due fattori, il primo dovuto alla disponibilità di stampanti complesse e con multijet o multimateriali, non facilmente reperibili, ad esempio non presenti nel nostro Politecnico, ma inoltre altro punto fondamentale è il fatto che gli attuatori PneuFlex presentano determinati problemi legati alla fatica e alle deformazioni che subiscono nei successivi utilizzi o sotto il peso di carichi.

Essendo infatti materiali come siliconi o comunque con un elevato grado di elasticità, dovuto al principio di base di funzionamento che ne prevede la deformazione, è chiaro che vanno incontro nell'utilizzo continuato a deformazioni che possono risultare compromettenti.

In aggiunta a ciò, se ne riscontra come evidente da questi esempi riportati, in generale dimensioni e carichi sopportabili ridotti.

## **2.4. Mano robotica pneumatica attuata con PAM**

Ciò che è stato analizzato finora, classificata come *soft robotic* (con o senza stampo), prevedeva l'utilizzo di attuatori pneumatici basati sul modello pneuflex.

Concentriamoci ora invece su soluzioni che si basino sempre sull'attuazione pneumatica, ma non prevedano l'utilizzo di tali attuatori pneuFlex.

Un'alternativa per trasmettere il moto con attuazione pneumatica viene ottenuta principalmente sfruttando i cosiddetti PAM (Pneumatic Actuated Muscle), soprattutto sottoforma di tendini pneumatici: sono degli attuatori pneumatici formati da camere interne le quali, simulando il comportamento di un muscolo, in base alla pressione di attuazione si contraggono o si dilatano, generando movimento.

Un esempio è questa mano realizzata sempre mediante stampa 3D [13]:

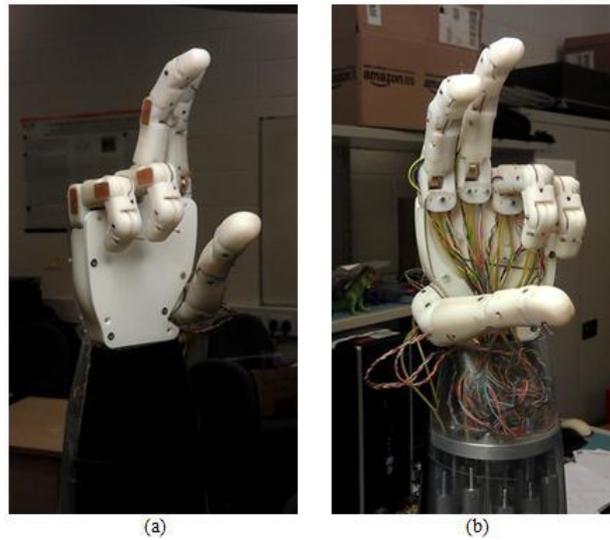


Figura 19 - mano stampata 3D con assemblaggio e attuata da PAM

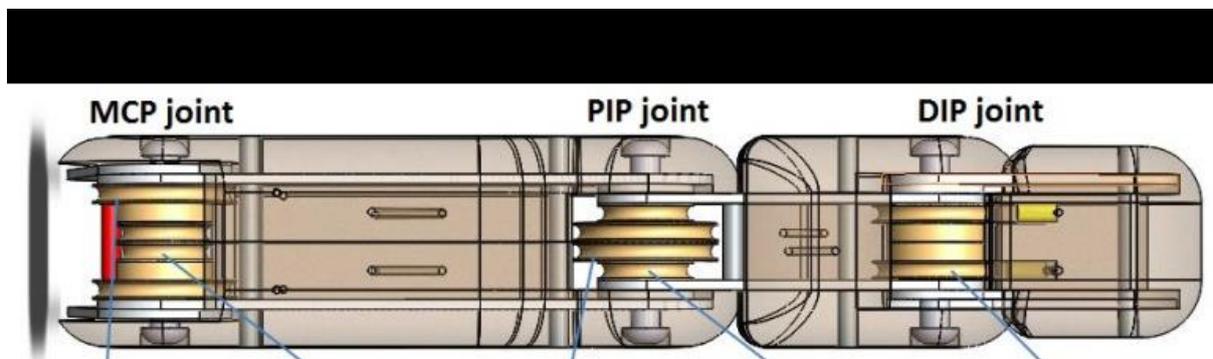


Figura 20 - vista di un dito della mano, dalla quale è possibile notare gli incavi per l'innesto dei tendini pneumatici

Tuttavia, tale soluzione, seppure ancora completamente stampabile mediante produzione additiva, e dalle elevate caratteristiche, non consente un'attuazione realizzata direttamente all'interno della mano, in quanto sfrutta, per far sì di controllare le falangi, l'utilizzo dei PAM e, all'interno delle singole dita, dei tendini pneumatici, inseriti in seguito.

Ovviamente i vantaggi di tale soluzione prevedono un maggiore controllo nei gradi di libertà e nella forza prensile della mano, ciononostante esula da quello che è l'obiettivo di questa tesi, che prevede la possibilità di attuare il movimento della mano stampando direttamente il componente finito compreso di attuatore interno.

## CAPITOLO 3. PROGETTO *FR4-NK0*

### 3.1. Schema iniziale

A differenza delle soluzioni proposte finora, in questo lavoro di tesi si è scelto di procedere con un sistema di attuazione pneumatica innestato all'interno del dito stesso, ma ottenuta per mezzo di cilindri ad aria compressa.

È stata pensata e realizzata una mano articolata, in cui su ogni dito sono incernierati due cilindri pneumatici, uno nella prima e uno nella seconda falange, ognuno dei quali controlla la falange  $n+1$ . l'ultima falange dunque non prevede attuatori posizionati su di essa, non avendo una falange successiva da movimentare. La prima falange invece, quella di collegamento fra dito e palmo della mano, sarà a sua volta comandata da un cilindro installato sul palmo stesso.

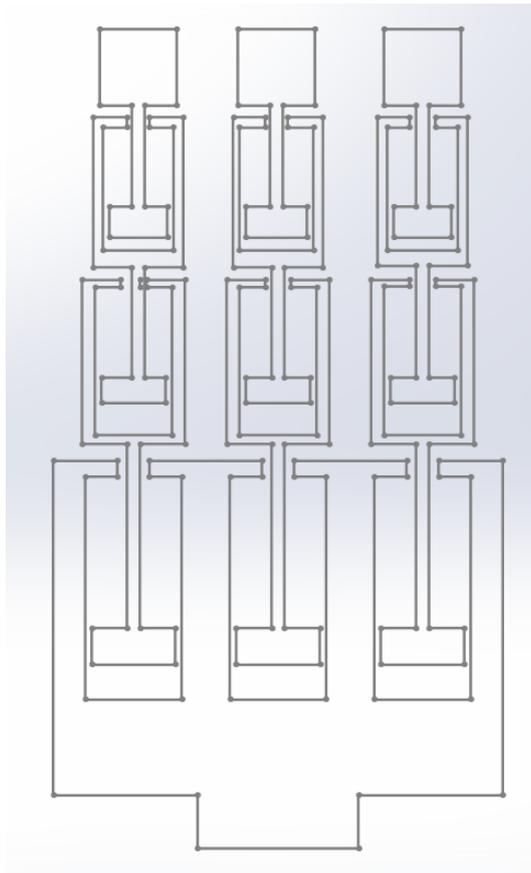


Figura 21 - schema di base del progetto da sviluppare

L'idea è stata sviluppata prendendo come spunto il progetto originario del Professor Raparelli di una mano articolata azionata pneumaticamente, qui sotto richiamata. [14]

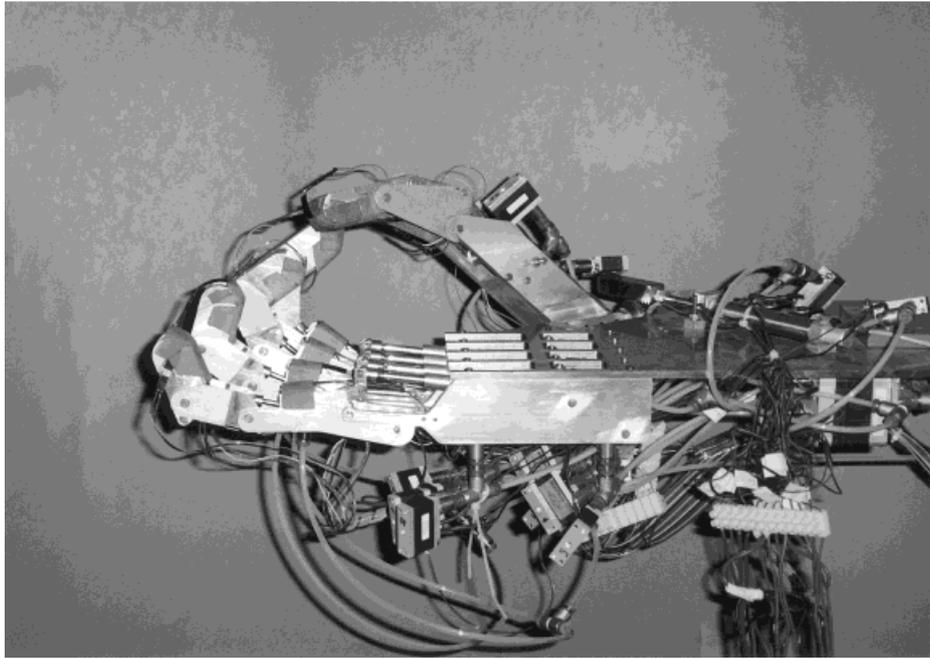


Figura 22 - mano del progetto preso come riferimento

Tale soluzione infatti già prevedeva l'utilizzo di cilindri pneumatici per l'attuazione, come possiamo vedere anche dal modello cinematico del singolo dito:

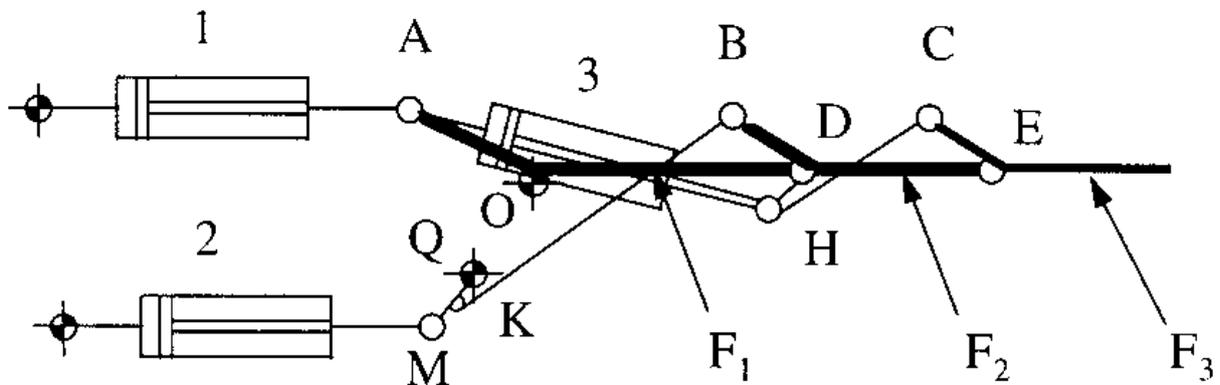


Figura 23 - modello cinematico della mano [14]

Le differenze rispetto a tale progetto sono innanzitutto dovute alle diverse tecnologie a disposizione per la realizzazione, infatti per questo lavoro di tesi si utilizzerà una stampante 3D, e inoltre anche dal punto di vista dell'attuazione: nel caso in esempio di partenza era una configurazione ad un solo grado di libertà, legata all'escursione del primo cilindro, mentre nel caso in esame si è reso ogni cilindro indipendente, portando i gradi di libertà a 3, ossia uno per ogni falange.

## 3.2. Realizzazione in cad

### 3.2.1. Assieme del singolo dito

Partiamo dunque analizzando l'assieme del singolo dito progettato, costituito unendo in un unico file le falangi e inserendo cilindri, camice e pistoni. Il dito ha una lunghezza totale (misurati dalla punta della terza falange all'asola della prima) di 96 mm, una larghezza massima di 20 mm e un'altezza massima di 16 mm.

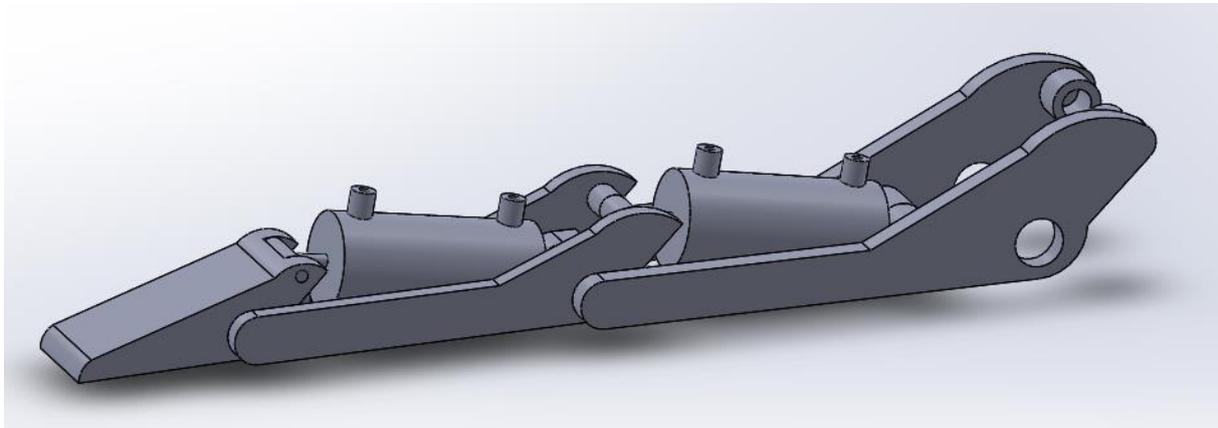


Figura 24 - assieme del dito

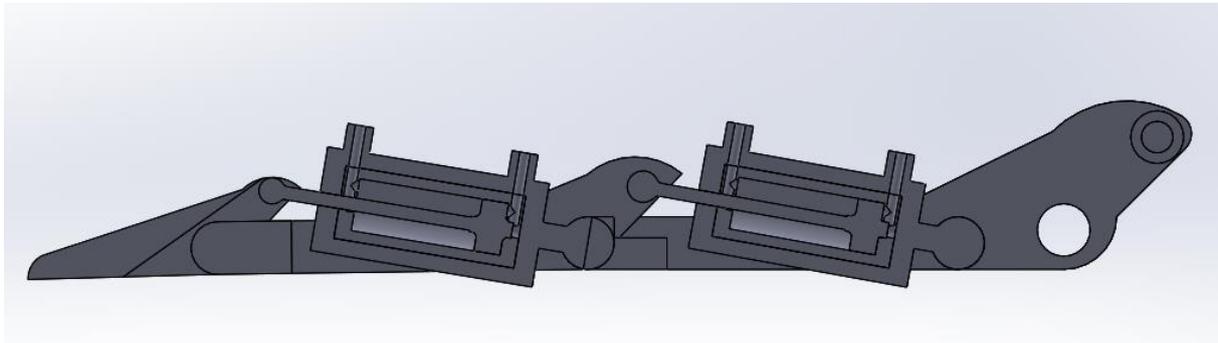


Figura 25 - vista in sezione dell'assieme

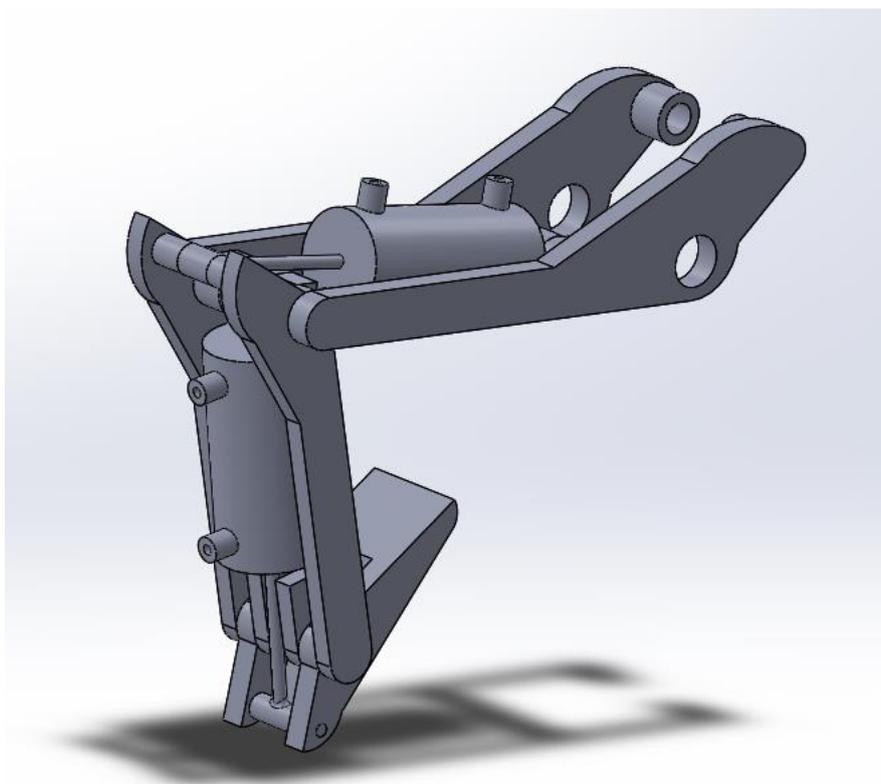


Figura 26 - dito ripiegato

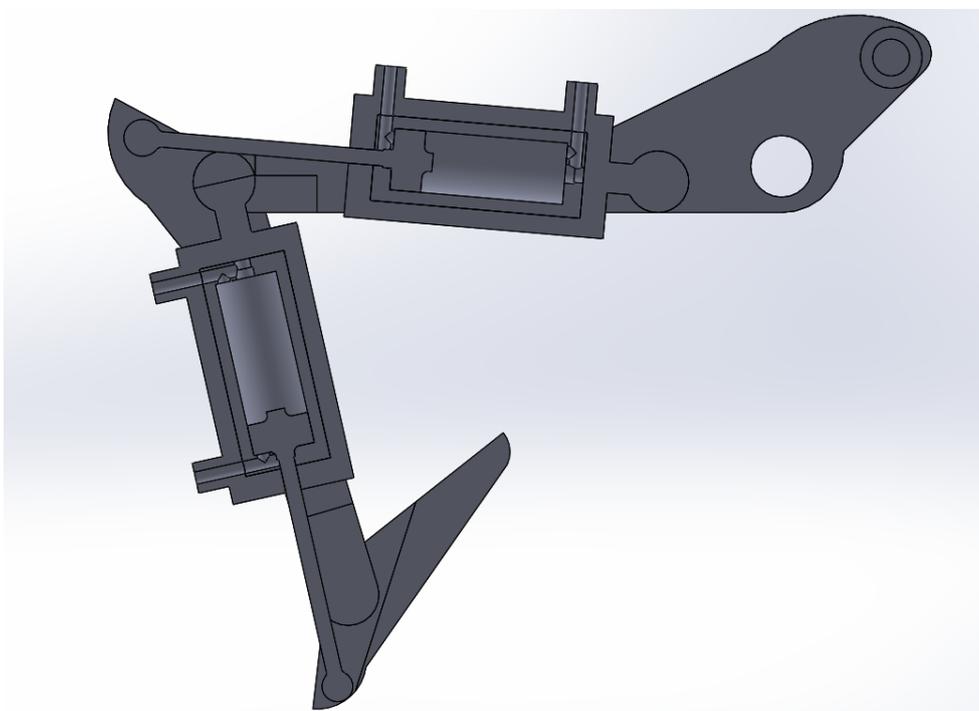


Figura 27 - vista in sezione del dito ripiegato

I cilindri presenti sul dito sono concettualmente identici tra loro, differiscono invece per la corsa interna, leggermente più corta per i cilindri presenti sulla prima falange. Come si nota

dalle immagini, i cilindri, compiendo la loro corsa, fanno sì che la falange controllata si pieghi di un angolo direttamente proporzionale alla corsa stessa dei cilindri di riferimento.

Ogni cilindro è stato realizzato unendo due solidi, uno che costituisce la camera esterna dello stesso e un altro interno che forma la camicia interna del cilindro, come si nota dalla fig. 28.

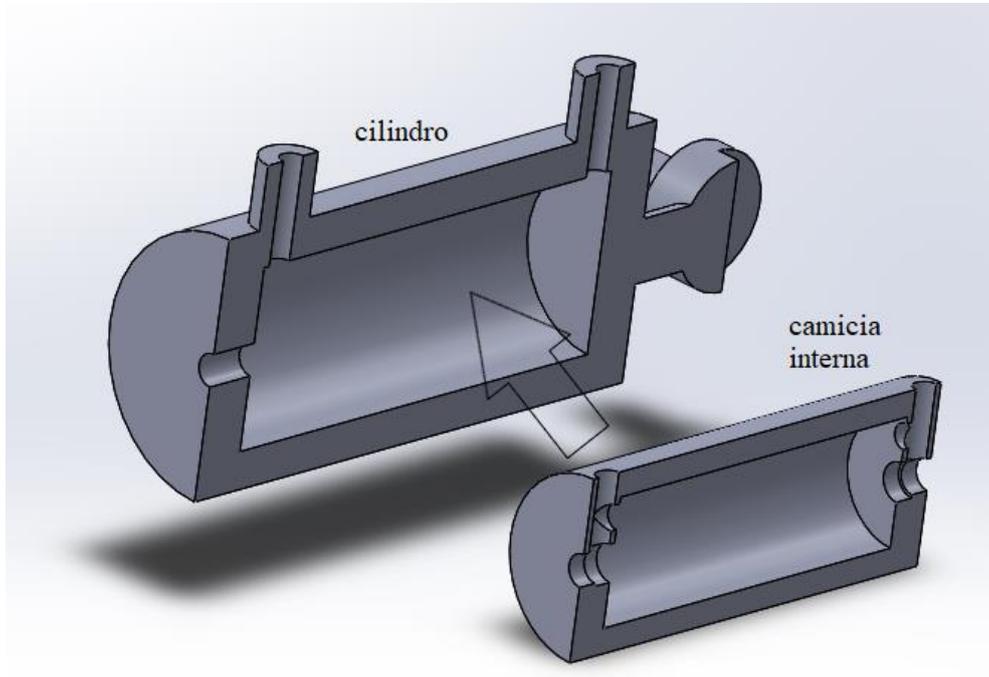


Figura 28 - accoppiamento camicia interna - cilindro, vista in sezione

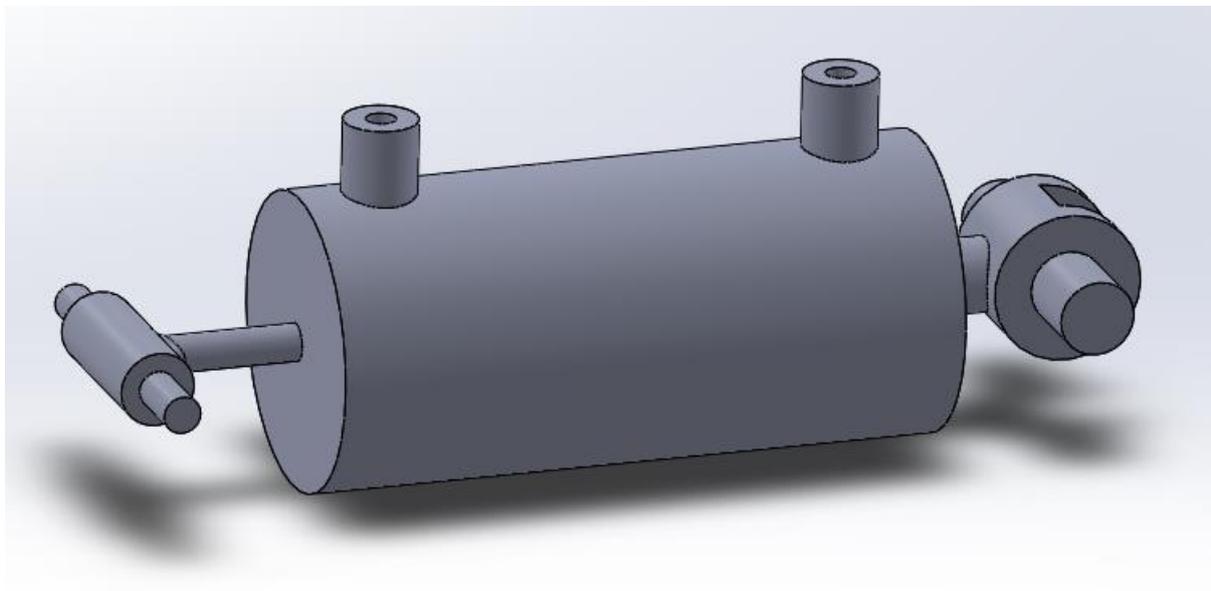


Figura 29 - vista del cilindro sulla seconda falange

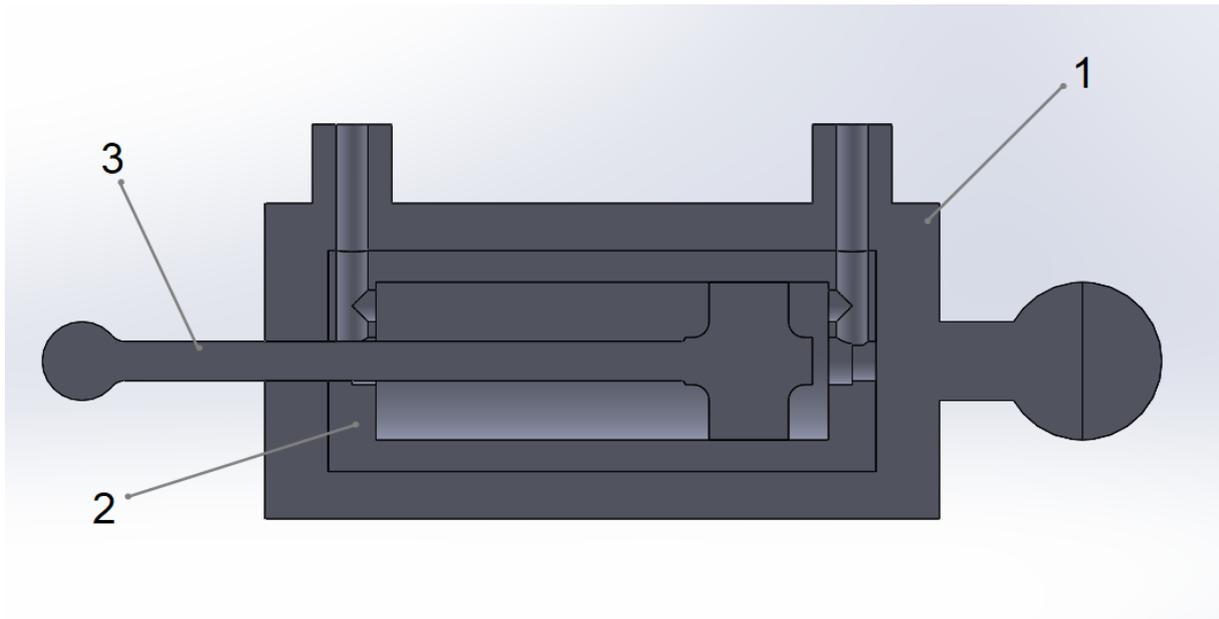


Figura 30 - vista in sezione del cilindro sulla seconda falange

Tale soluzione è stata dettata sapendo fin dal principio di voler utilizzare due materiali diversi nella stampa, per far sì che ci fosse tenuta e scorrimento del pistone all'interno della camera stessa: in teoria, il materiale interno, più flessibile e leggero di quello esterno, dovrebbe servire a fare da tenuta della camera del cilindro, cercando di consentire al contempo lo scorrimento del pistone senza impuntamento. Il solido interno, ossia la camicia del cilindro, indicata in figura 29 in (2) sarà quindi stampato con il TPU, mentre la parte esterna del cilindro (1) e il pistone (3) con ABSplus.

Il cilindro della prima falange ha una corsa di 11.5mm, mentre quello posto sulla seconda falange, che aziona la prima, ha una corsa leggermente più lunga di 11.75 mm, invece l'alesaggio è uguale per entrambi ed è di 5mm. La lunghezza totale, da testa del pistone alla cerniera, è di 28.25mm per il cilindro presente sulla seconda falange e di 27,50mm per il cilindro sulla prima falange.

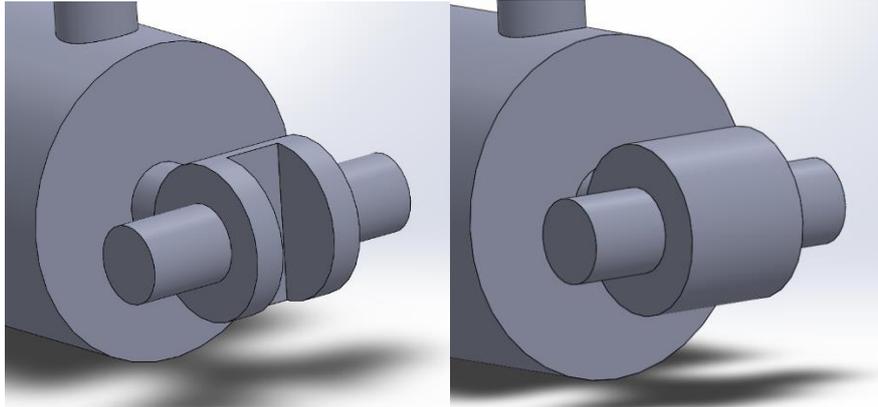


Figura 31 - differenza fra le estrusioni delle cerniere fra cilindro della prima falange e cilindro della seconda

L'accoppiamento fra pistoni e falangi azionate avviene incernierando i pistoni direttamente nell'assieme del progetto, in modo che possa essere stampato senza assemblaggio.

Stesso ragionamento per quel che riguarda la cerniera presente sulla parte esterna dei cilindri, la quale in particolare risulta tagliata sul cilindro relativo alla seconda falange, per consentire maggiore escursione nel movimento della falange stessa, senza che ci fossero collisioni fra i corpi, così da poter allungare la corsa e di conseguenza, l'angolo di rotazione massimo di ciascuna falange. Mentre sulla cerniera del cilindro della prima falange, tale intaglio non è stato necessario in quanto si è limitato l'angolo di escursione della seconda falange (figura 30). Come si può notare, la corsa dei vari cilindri è stata realizzata cercando di far sì che si ottenga la chiusura massima possibile senza entrare nei limiti critici del progetto, evitando di raggiungere le configurazioni limite. Ciò ha fatto sì che quando i pistoni completano la loro corsa, facciano percorrere alle falangi movimentate un'escursione in angoli che corrisponde a  $115^\circ$  per la terza falange,  $105^\circ$  per la seconda e poco più di  $90^\circ$  per la terza, mentre il pollice copre un'escursione di  $75^\circ$  circa.

Le falangi saranno invece da realizzare sempre con un unico materiale, che è lo stesso dei cilindri e dei pistoni, ossia l'ABS.

La prima falange ha una lunghezza massima di 60mm, è alta 16mm e larga 20mm con uno spessore di 2,5mm. Inoltre, presenta delle estrusioni e dei fori che formano l'alloggiamento per l'accoppiamento con la cerniera del cilindro da un lato, mentre dall'altro l'accoppiamento con la falange successiva.

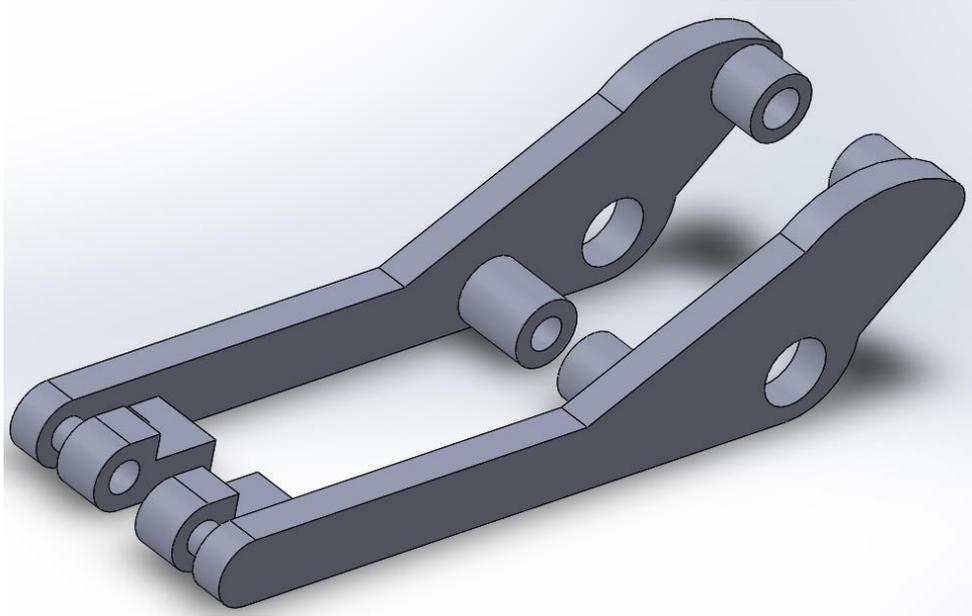


Figura 32 - cad 3D della prima falange

La seconda falange invece ha una lunghezza massima 46.50mm, è alta 10,65mm ed è larga 35mm, con uno spessore di 2mm.

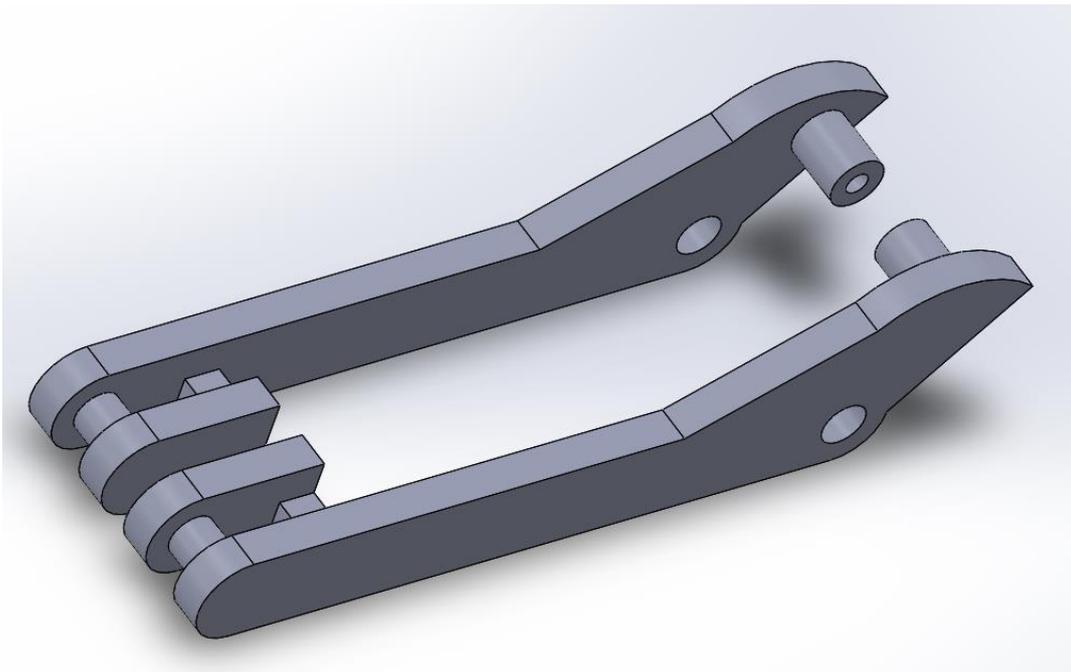


Figura 33 - cad 3D della seconda falange

Entrambi questi elementi hanno dunque sia la sede delle cerniere di accoppiamento con i cilindri, sia quelle che riguardano l'accoppiamento con il pistone che le movimentano. Inoltre, sono intagliate per far che non vi sia collisione fra i corpi in movimento.

La prima falange invece non è tagliata, non andando incontro a nessuna possibile collisione, ed è incernierata alla seconda falange e al pistone di riferimento. Ha una lunghezza totale di 26mm, larga 11mm e alta 9,10mm. Il taglio estruso lungo lo spessore è fatto per far sì che nella rotazione non vi siano parti che collidono con la cerniera di accoppiamento con la seconda falange.

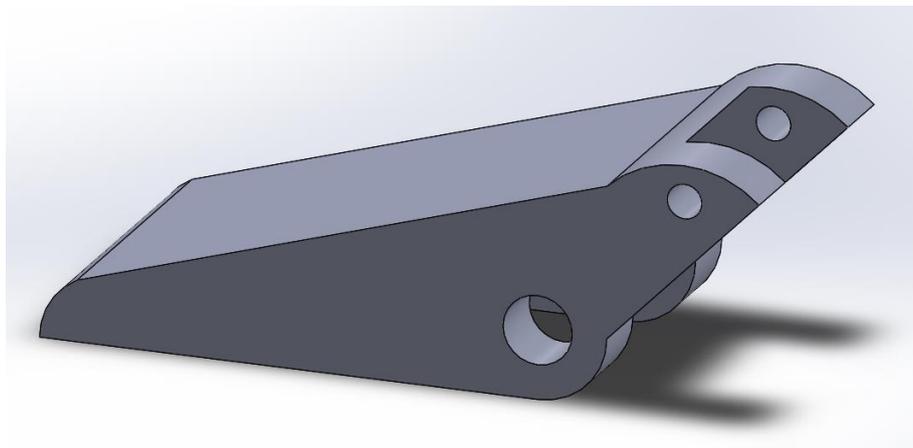


Figura 34 - cad 3D della terza falange

### 3.2.2. Design del palmo della mano

Di seguito è invece riportato il design della mano, priva di cilindri, con cerniere per l'alloggiamento delle falangi delle tre dita, mentre quello che è il corpo del pollice è realizzato di pezzo con la mano stessa.

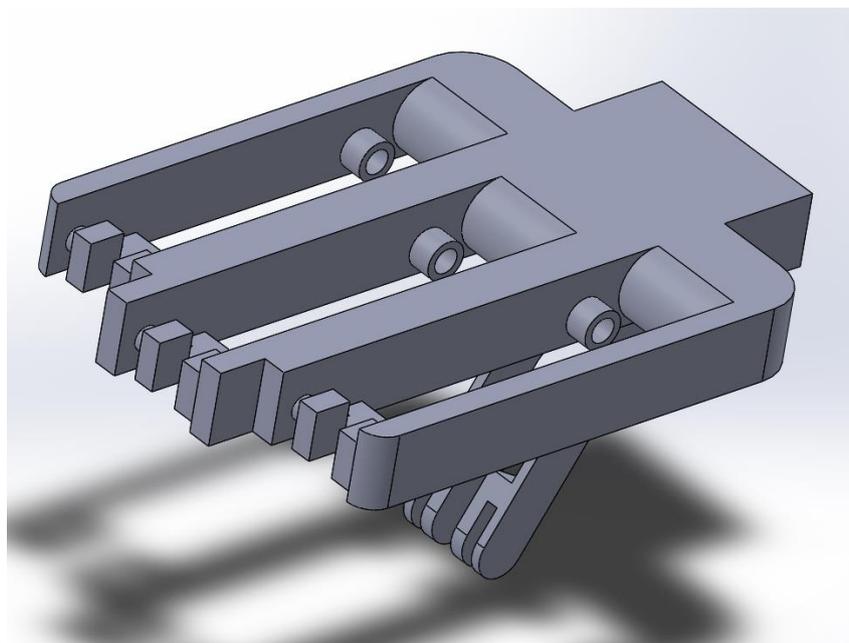


Figura 35 - vista in cad 3D del corpo della mano

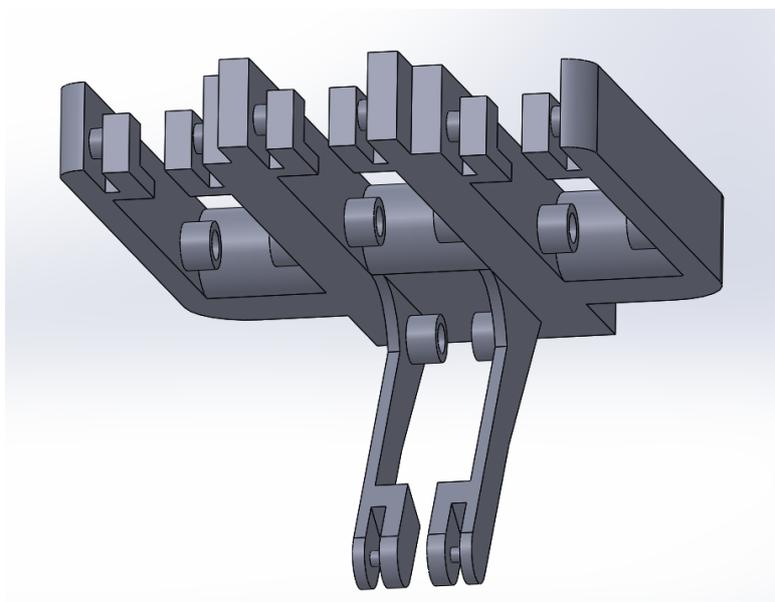


Figura 36 - vista in cad 3D del corpo della mano incentrata per visualizzare la realizzazione di pezzo del pollice

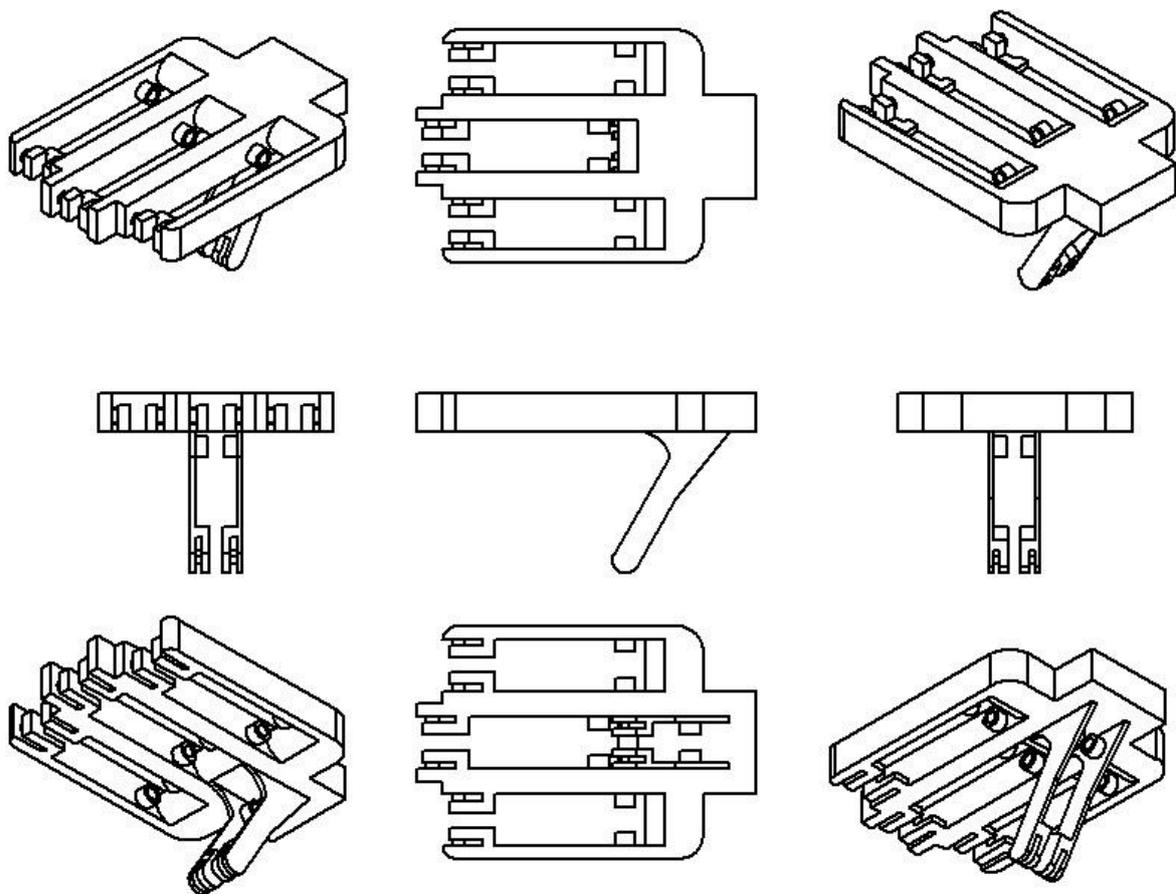


Figura 37 - varie viste della mano

Anche per quel che riguarda la mano, gli intagli sulle nocche sono dovuti al fatto di evitare le collisioni fra gli steli dei pistoni dei cilindri che movimentano le relative prime falangi di ogni dito.

Il corpo della mano ha una lunghezza di 130mm, un'altezza di 15mm e una larghezza di 90mm. All'interno del corpo sono ricavati gli incavi per le sedi dei cilindri che movimenteranno le prime falangi delle rispettive dita. Essendo la larghezza delle prime falangi di 20mm, si è scelto di realizzare una mano di 90mm di ingombro, per essere in linea con le dimensioni umane, di conseguenza saranno tre le dita da inserire sul corpo della mano, quindi distanziate tra di loro 1cm ciascuna, con uno spessore residuo sui bordi di 5mm.

### 3.2.3. Assieme della mano

Come ultimo passo si è realizzato l'assieme della mano stessa, unendo le tre dita così composte alle apposite sedi di accoppiamento create, in modo da avere l'assieme finale della mano. Le tre dita sono identiche tra loro; il pollice invece presenta un'unica falange mobile, essendo inglobato alla mano stessa.

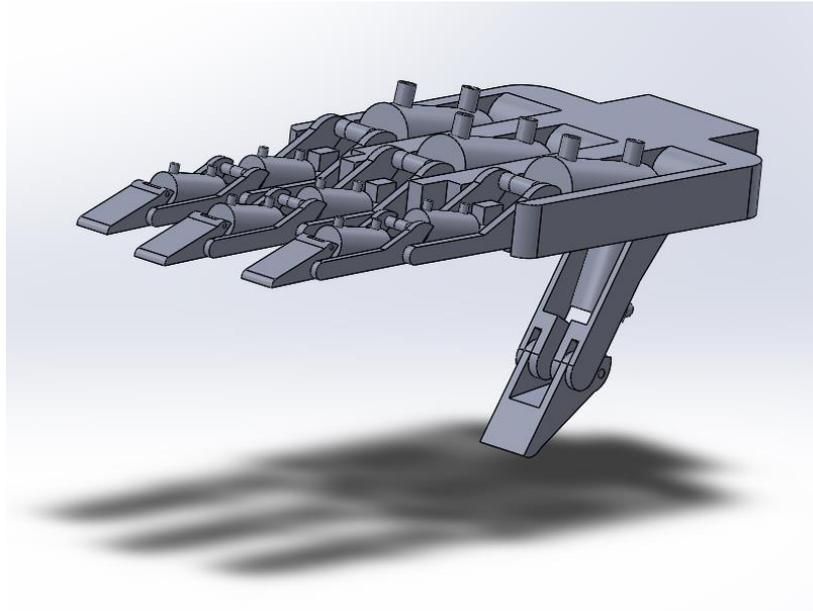


Figura 38 - vista del cad 3D dell'assieme

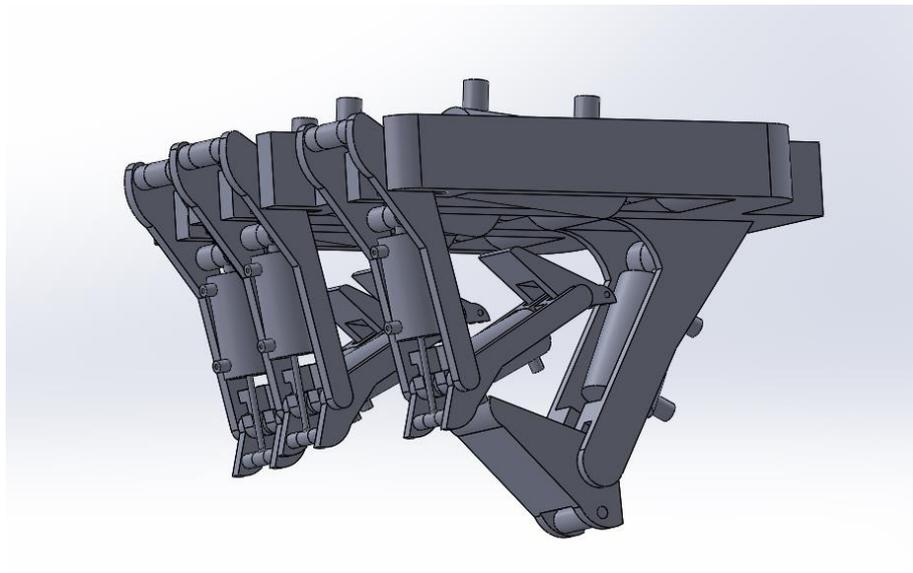


Figura 39 - vista in cad 3D della mano a pugno chiuso

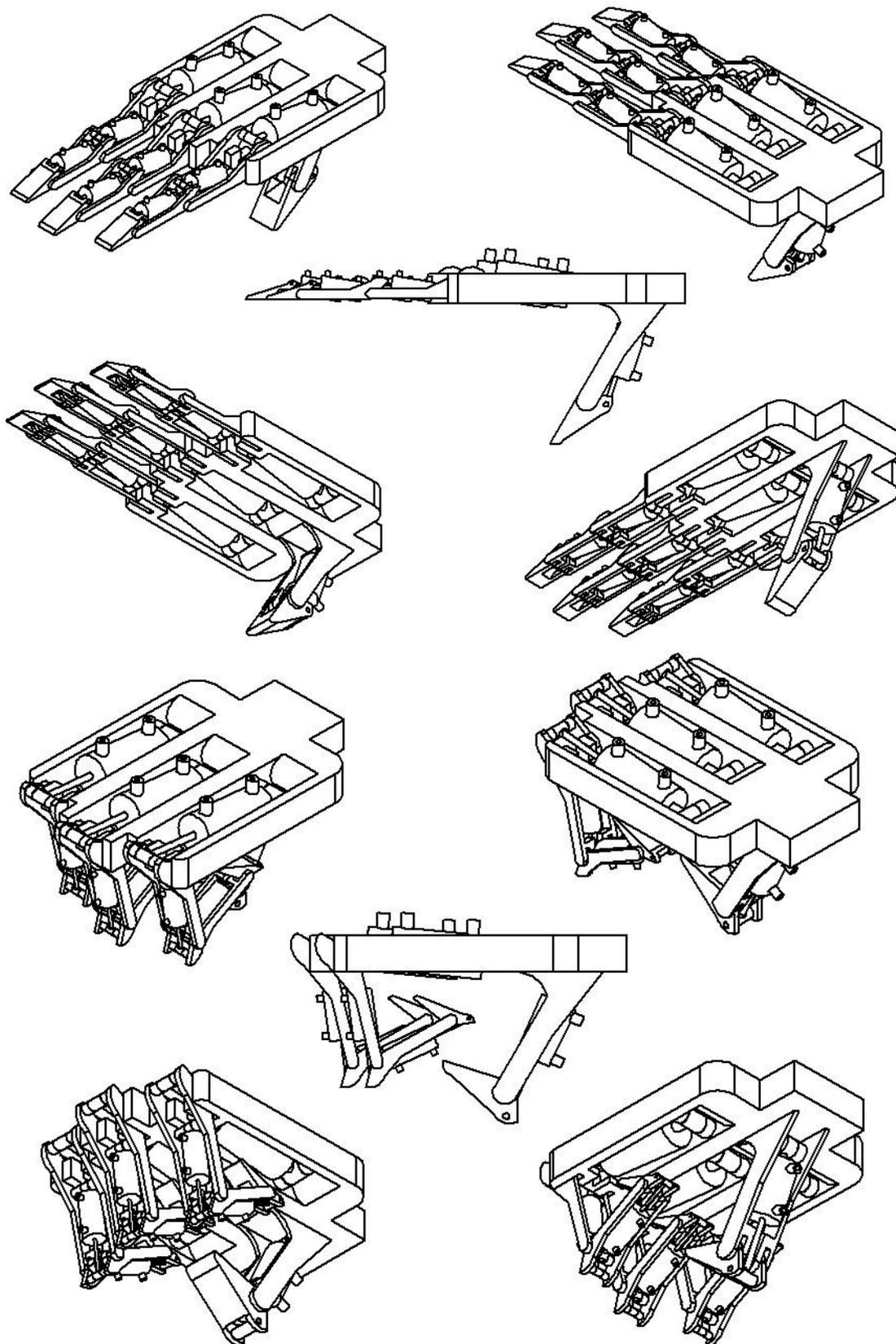


Figura 40 - varie viste della mano aperta e a pugno chiuso

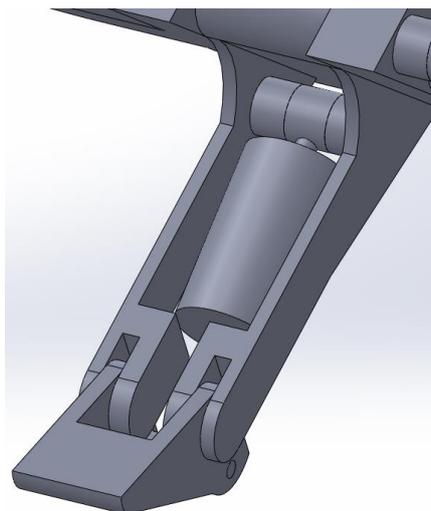


Figura 41 - particolare del pollice

Come si può notare dalle immagini, si è fatto sì che l'escursione massima degli angoli delle falangi, le loro dimensioni e relativi movimenti reciproci, sono state realizzate in modo tale che si potesse ottenere comunque una chiusura quasi totale del pugno, senza che però le varie falangi delle dita entrassero in contatto tra di loro nel moto di chiusura, a prescindere dalla loro posizione, sempre tenendo conto che la falange del pollice sia rientrata e che sia richiusa solo in seguito al passaggio della prima falange, come si può notare nel dettaglio di seguito riportato.

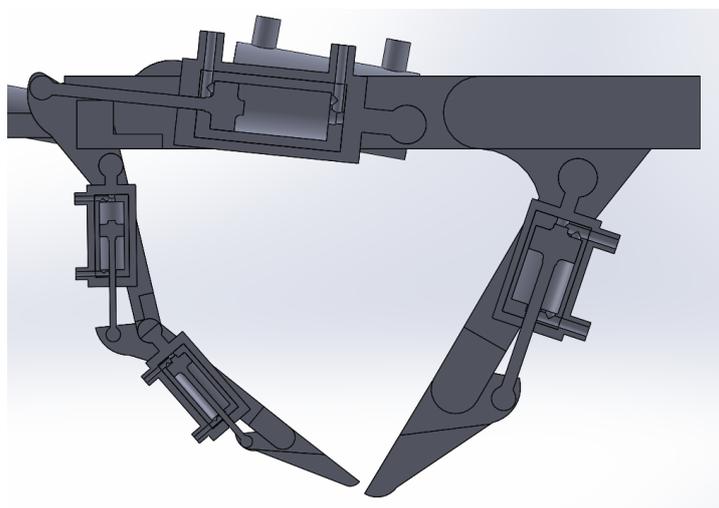


Figura 42 - distanza minima tra ultima falange del dito e falange del pollice

Anche nella condizione limite di seconda falange completamente estesa e terza falange completamente rientrata, si noti che risulterà sempre esserci un gioco minimo tra la prima falange e la punta del pollice nel luogo massimo dei punti dell'end effector del singolo dito.

La geometria realizzata, le corse dei pistoni e la dimensione totale della mano, con estensione dalla punta dell'ultima falange alla fine del polso, è un totale di 220mm, sempre per cercare di essere fedeli alle dimensioni umane. Sulla mano vi è un totale di 10 cilindri: 2 per ogni dito, 3 sul palmo, ognuno dei quali muove la prima falange del dito di riferimento, ed uno situato diversamente per il pollice.

Sullo stesso principio di funzionamento di quelli presenti sulle dita, sono i cilindri costituiti sulla mano e sul pollice, i quali però risultano ovviamente diversi in dimensioni e corsa. La corsa dei cilindri posti nella mano è di 19mm con un alesaggio di 10mm ed un ingombro totale di 51mm, mentre la corsa del cilindro del pollice è di 11mm e il suo alesaggio è 10mm e un ingombro totale di 37mm.

Di seguito è riportata un'immagine esplicativa delle dimensioni e differenze fra i vari cilindri.

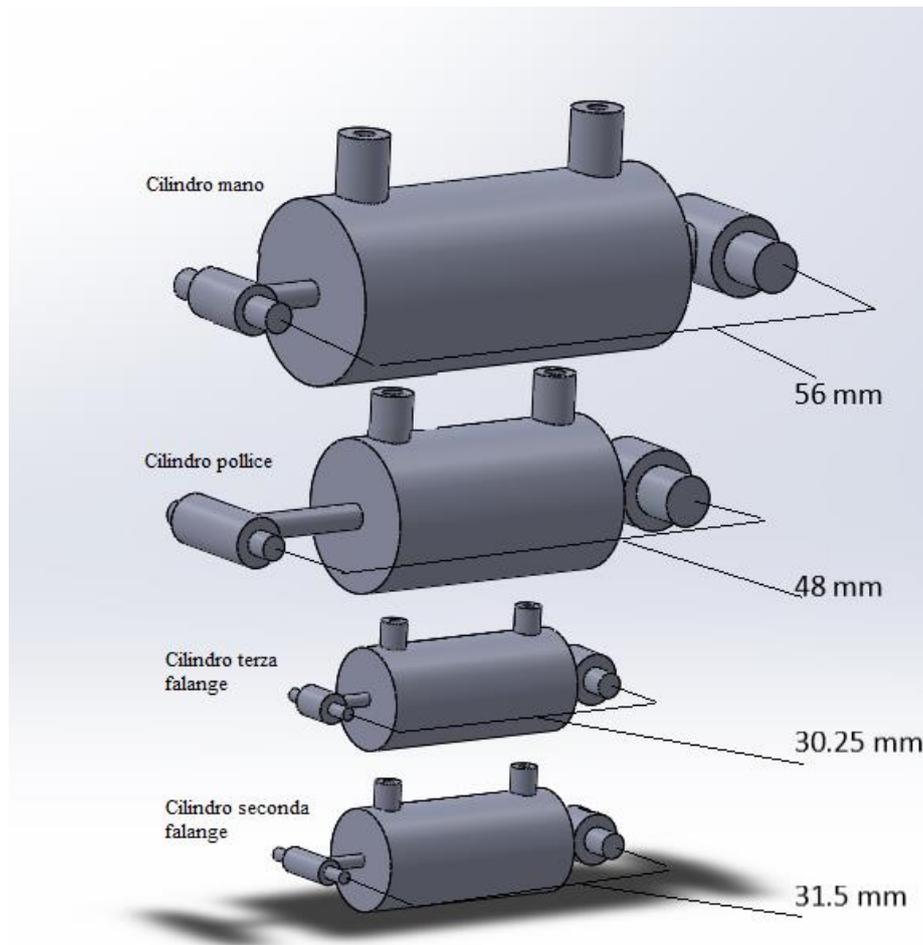


Figura 43 - complessivo con tutti i cilindri

## CAPITOLO 4. STUDI EFFETTUATI

Nel lavoro di questa tesi, una volta definito il progetto globale di partenza, ci si è tuttavia concentrati sullo studio del singolo dito, data la complessità del sistema totale, per verificare la funzionalità e la fattibilità del lavoro futuro per quel che riguarda l'intera mano basata su questo tipo di attuazione pneumatica ottenuta mediante produzione additiva.

Si è quindi proceduto ad effettuare sul singolo dito preso in considerazione, un'analisi cinematica, un'analisi dinamica e infine un'analisi strutturale.

### 4.1. Analisi cinematica

Per definire la cinematica del dito progettato, è innanzitutto necessario stabilire un modello dello stesso da poter studiare.

Pur essendo un oggetto tridimensionale, in realtà il suo campo di azione è planare, sarà possibile dunque valutarlo nel solo piano 2D XY. La modellazione in questo caso è stata effettuata utilizzando il software GIM [15].

È stato quindi realizzato il seguente modello, impostando tre elementi separati, ossia le tre falangi, tre barre/pistone, che di fatto rappresentano i cilindri dell'attuazione, e relative cerniere. Ovviamente, studiando il solo dito, in questa analisi si è considerata ferma la mano a cui è collegata la prima falange e il primo cilindro che la aziona, di fatto considerando l'origine O come fissa.

Assumendo che la forza applicata ad ogni falange dal pistone di riferimento sia trasmessa esattamente lungo la direzione dell'asse del cilindro di attuazione, allora possiamo il seguente schema:

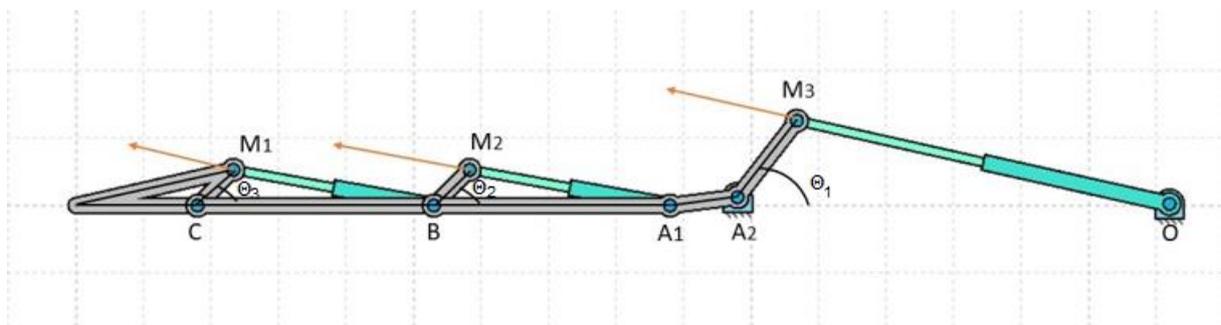


Figura 44 - modello del dito schematizzato con il software GIM

Considerato che ogni corpo ha 3 gradi di libertà, si possono calare i gradi di libertà della struttura come:

$$g.d.l = 3n - v$$

Dove  $n$  è il numero di corpi e  $v$  è il numero totale di vincoli imposti. Nel nostro caso  $n=3$  e  $v=6$ , ossia 2 per ogni cerniera, presenti in C, B e  $A_2$ .

Si noti come la struttura rappresenti in totale 3 gradi di libertà, indicati con i relativi angoli  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  e  $\Theta_3$ , ognuno indicativo della singola falange, riferiti rispetto all'orizzontale del sistema di riferimento posto nell'origine O.

Analizziamo nello specifico l'accoppiamento tra falangi in modo da stabilire facilmente quali siano i parametri di riferimento.

1) Terza falange – seconda falange:

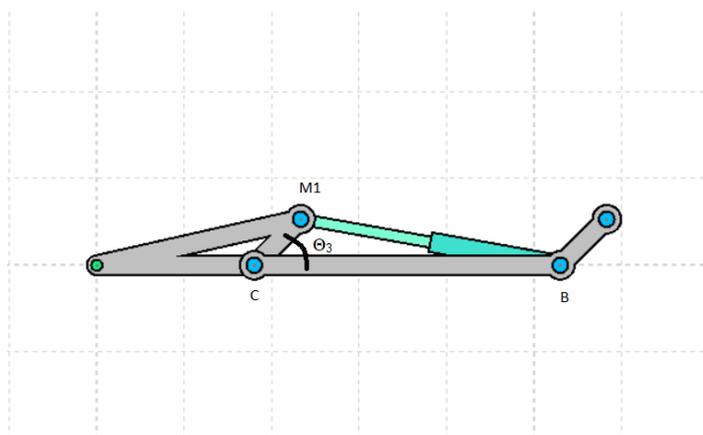


Figura 45 - accoppiamento seconda e terza falange

C è il centro di rotazione della cerniera che collega la terza falange alla seconda;

B è il centro di rotazione della cerniera che collega la seconda falange alla prima;

$M_1$  è il centro di rotazione dell'accoppiamento rotoidale tra pistone del primo cilindro e terza falange;

Da questo schema è possibile evidenziare che il triangolo CBM riporta le seguenti caratteristiche:

$$CM_1 = \text{cost.} = 7.5\text{mm}$$

$$CB = \text{cost.} = 35\text{mm}$$

$BM_1 = l_0 + c_1$ , dove  $c_1$  rappresenta la corsa del cilindro posto sulla seconda falange e varia tra 0 e 11,75 mm, di conseguenza si avrà  $l_0=30.25\text{mm}$ , distanza iniziale quando il pistone è fermo, ossia con  $c_1=0$ .

Per il seguente triangolo a noi interessa conoscere il parametro teta, quindi utilizzando il teorema di Carnot è possibile dire che:

$$\cos \Theta_3 = \frac{\overline{CM_1^2} + \overline{CB^2} + \overline{BM_1^2}}{2\overline{CM_1} \cdot \overline{CB}}$$

Abbiamo stabilito dunque la dipendenza di  $\Theta_3$  da  $c_1$ .

2) Seconda falange – terza falange:

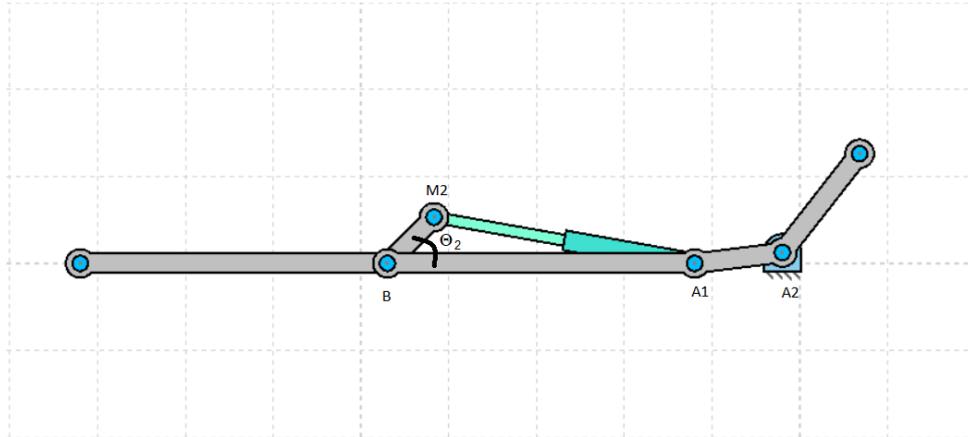


Figura 46 - accoppiamento seconda e prima falange

B è il centro di rotazione della cerniera che collega la seconda falange alla terza;

A<sub>1</sub> è il centro di rotazione della cerniera che collega base del cilindro 2 con la terza falange;

M<sub>2</sub> è il centro di rotazione dell'accoppiamento rotoidale tra pistone del secondo cilindro e seconda falange;

A<sub>2</sub> è il centro di rotazione della cerniera che collega la prima falange alla mano;

Da questo schema è possibile evidenziare che il triangolo A<sub>1</sub>BM<sub>2</sub> riporta le seguenti caratteristiche:

$$\overline{BM_1} = \text{cost.} = 7.5\text{mm}$$

$$\overline{BA_1} = \text{cost.} = 35\text{mm}$$

$\overline{A_1M_2} = l_0 + c_2$ , dove  $c_2$  rappresenta la corsa del secondo cilindro e varia tra 0 e 11,5 mm, di conseguenza si avrà  $l_0 = 30.25\text{mm}$ , distanza iniziale quando il pistone è fermo, ossia con  $c_2=0$ .

Per il seguente triangolo a noi interessa conoscere il parametro teta, quindi utilizzando il teorema di Carnot è possibile dire che:

$$\cos \Theta_2 = \frac{\overline{BM_2^2} + \overline{BA_1^2} - \overline{M_1A_2^2}}{2\overline{BM_2} \cdot \overline{BA_1}}$$

Abbiamo stabilito dunque la dipendenza di  $\Theta_2$  da  $c_2$ .

3) Prima falange – palmo:

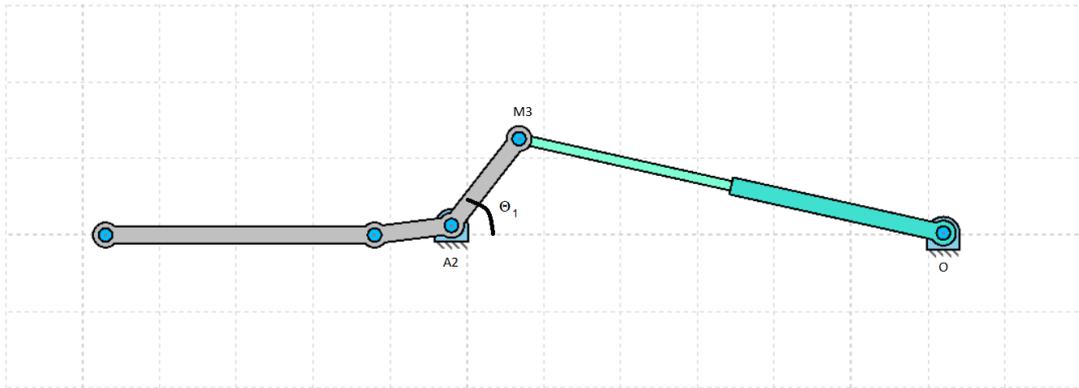


Figura 47 - accoppiamento prima falange palmo

O è il centro di rotazione della cerniera che collega base del primo cilindro con la prima falange;

M<sub>3</sub> è il centro di rotazione dell'accoppiamento rotoidale tra pistone del primo cilindro collegato alla mano e prima falange;

A<sub>2</sub> è il centro di rotazione della cerniera che collega la prima falange alla mano;

Da questo schema è possibile evidenziare che il triangolo A<sub>2</sub>M<sub>3</sub>O riporta le seguenti caratteristiche:

$$A_2M_3 = \text{cost.} = 10\text{mm}$$

$$A_2O = \text{cost.} = 65\text{mm}$$

OM<sub>3</sub> = l<sub>0</sub> + c<sub>3</sub>, dove c<sub>3</sub> rappresenta la corsa del cilindro sulla mano e varia tra 0 e 11,25 mm, di conseguenza si avrà l<sub>0</sub> = distanza iniziale quando il pistone è fermo, ossia con c<sub>3</sub> = 0.

Per il seguente triangolo a noi interessa conoscere il parametro teta, quindi utilizzando il teorema di Carnot è possibile dire che:

$$\cos \Theta_1 = \frac{\overline{A_2O^2} + \overline{M_3A_2^2} - \overline{M_3O^2}}{2\overline{M_3A_2} \cdot \overline{A_2O}}$$

Abbiamo stabilito dunque la dipendenza di  $\Theta_1$  da c<sub>3</sub>, ed inoltre dimostrato come, conoscendo c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> e c<sub>3</sub>, sia possibile definire  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$  e  $\Theta_3$  e di conseguenza tutto il moto del singolo dito: conoscendo le corse, ricavo i relativi angoli e da essi, derivando nel tempo, quindi le velocità e accelerazioni angolari di ogni singola falange, di conseguenza, con le equazioni di cinematica posso ricavare la velocità di tutti i punti del meccanismo.

I calcoli per calcolare velocità e accelerazioni non sono stati eseguiti analiticamente, ma utilizzando sempre il software di calcolo, GIM, il quale consente di generare il modello 2D e, impostati i vincoli, di calcolare le velocità e le accelerazioni dei punti di interesse.

Sui singoli cilindri si sono imposte determinate condizioni, di seguito riportate:

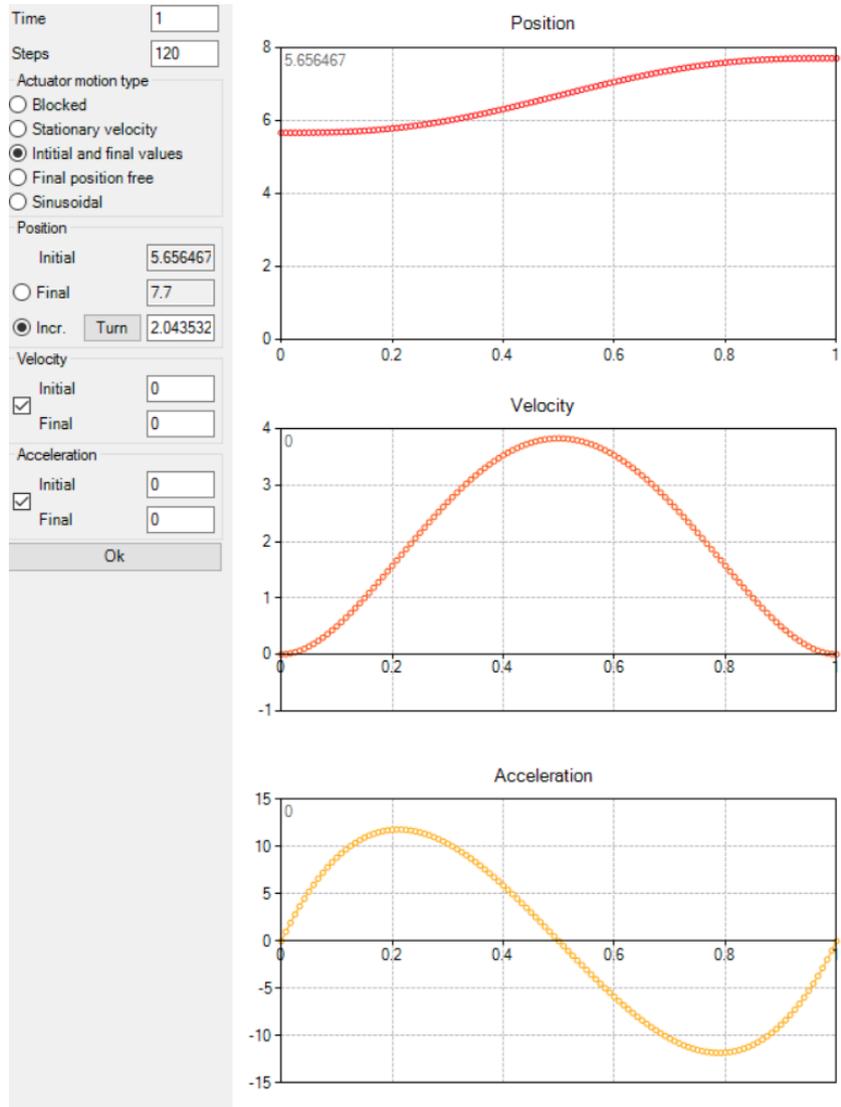


Figura 48 - vincoli imposti sul primo cilindro

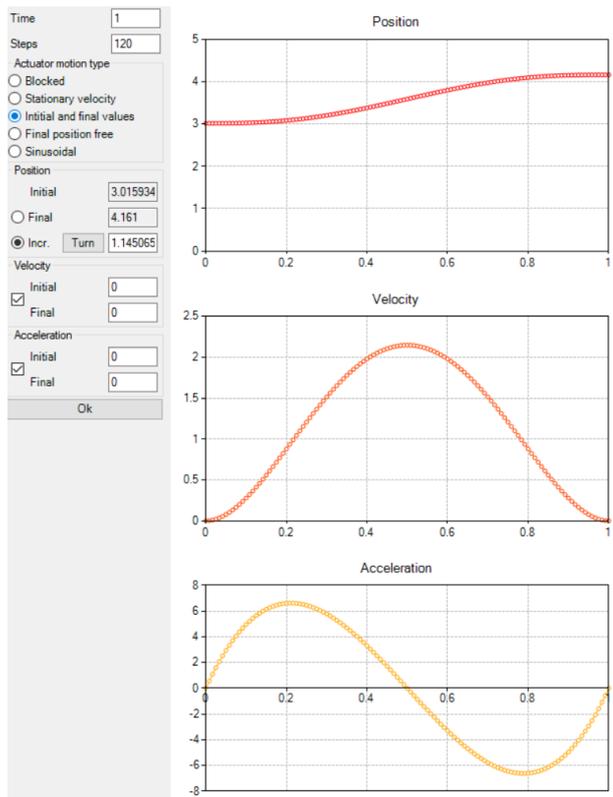


Figura 49 - vincoli imposti sul secondo cilindro

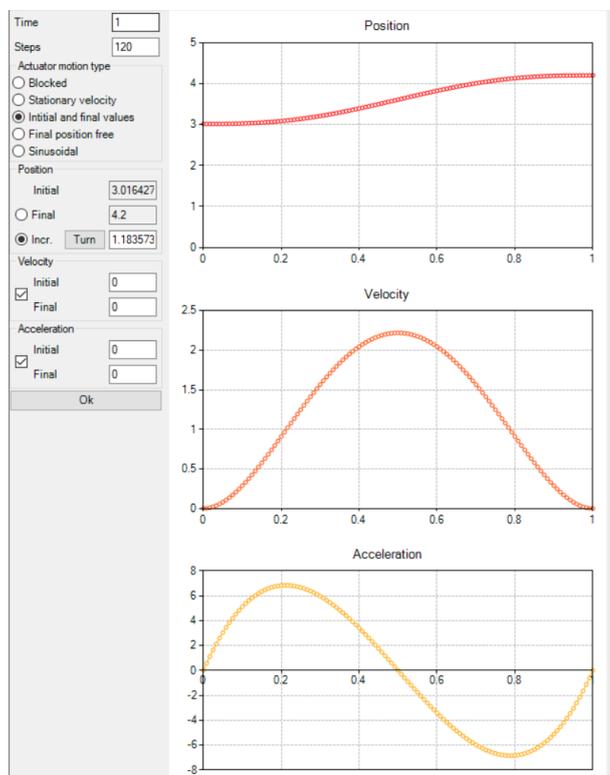


Figura 50 - vincoli imposti sul terzo cilindro

Oltre all'indicazione delle varie corse dei cilindri, si è imposto un andamento di velocità e accelerazioni come riportato, ossia da valori iniziali e finali entrambi nulli, infatti si vuole ottenere che a corsa nulla o a corsa totalmente percorsa per ogni cilindro, il dito sia fermo, non vi dovranno essere dunque velocità ed accelerazioni residue.

Altra condizione imposta, ma anch'essa consona con il funzionamento ideale, è quella di far sì che i cilindri completino le differenti corse nello stesso tempo, in modo tale da rappresentare apertura ed una chiusura uniforme del dito attorno ad un qualsiasi oggetto.

Con tali condizioni, il software è in grado di generare automaticamente la traiettoria (in verde) degli elementi che costituiscono l'assieme, di seguito riportata.

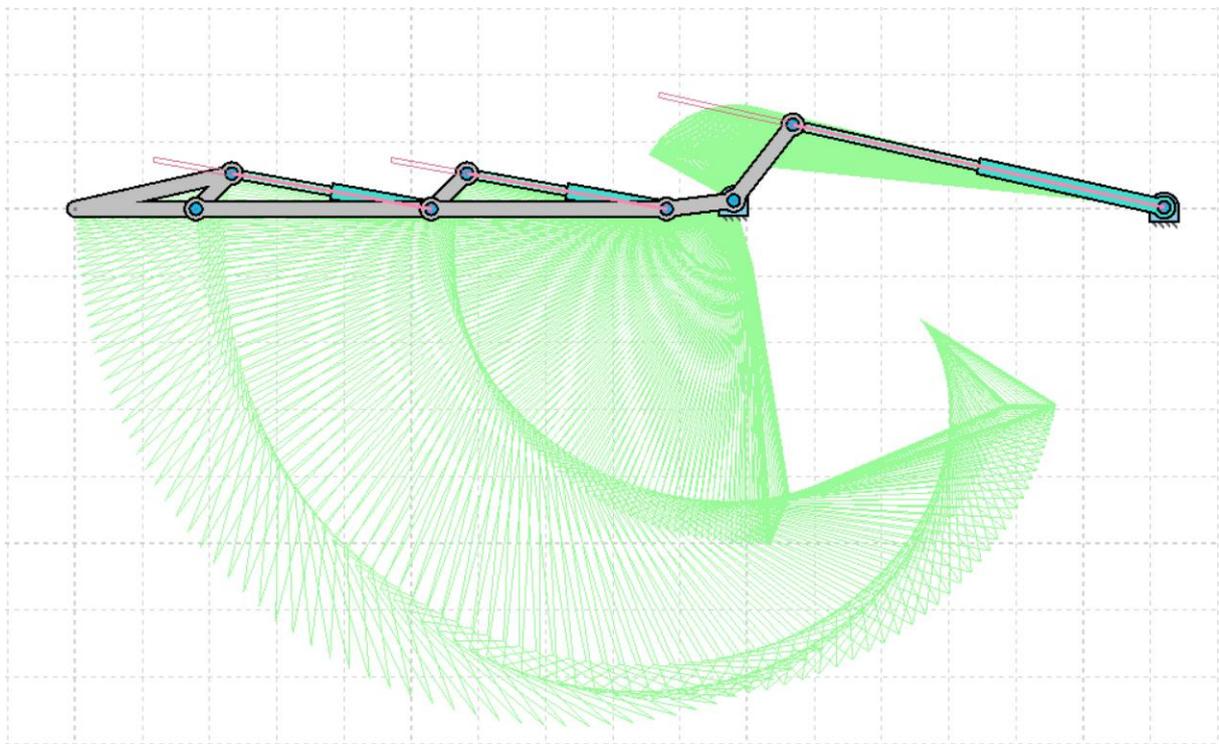


Figura 51 - traiettoria del meccanismo, posizione iniziale

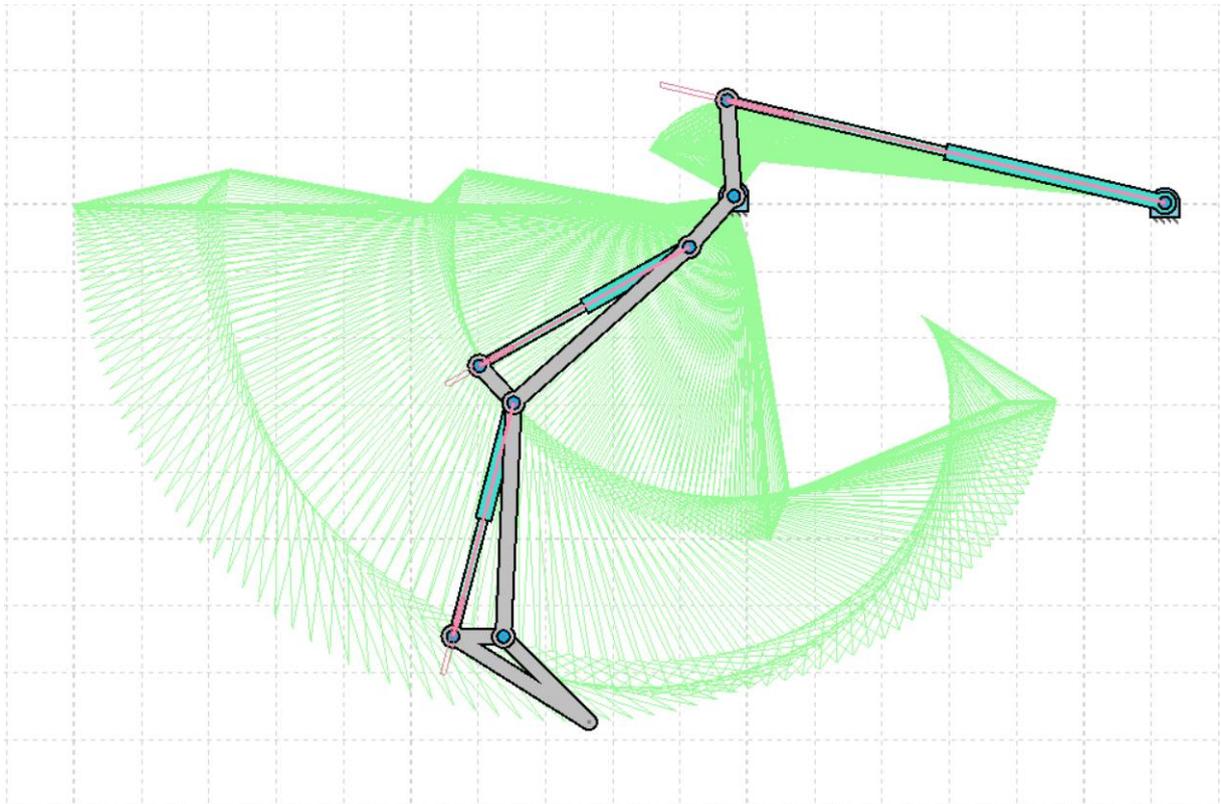


Figura 52 - traiettoria meccanismo, posizione intermedia

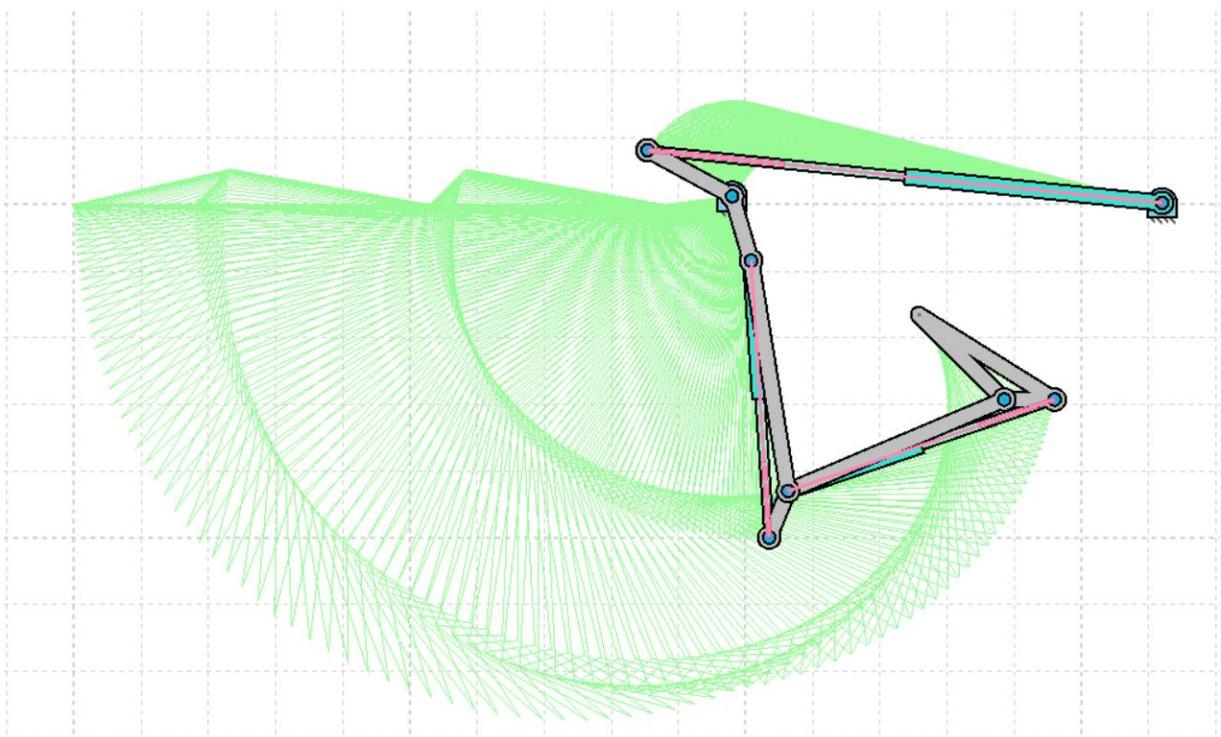


Figura 53 - traiettoria del meccanismo, posizione finale

Sono state calcolate inoltre l'andamento delle velocità e delle accelerazioni dei punti notevoli del dito da considerare, in particolare riportate insieme ai loro valori massimi, che ovviamente

sono quelli più significativi. Sull'asse delle Y troviamo riportati i valori di velocità e accelerazioni, mentre su quello delle X il tempo scandito tra 0 e 1, dove 0 corrisponde ai cilindri a corsa nulla, quindi con il pistone completamente rientrato e fermo, mentre 1 corrisponde alla massima estensione della corsa, quindi con pistoni completamente estesi. La scala del modello è in cm: il software si basa sulle condizioni imposte, quindi le velocità sono espresse in [cm/s] e le accelerazioni in [cm/s<sup>2</sup>]

- VELOCITÀ DEI PUNTI NOTEVOLI

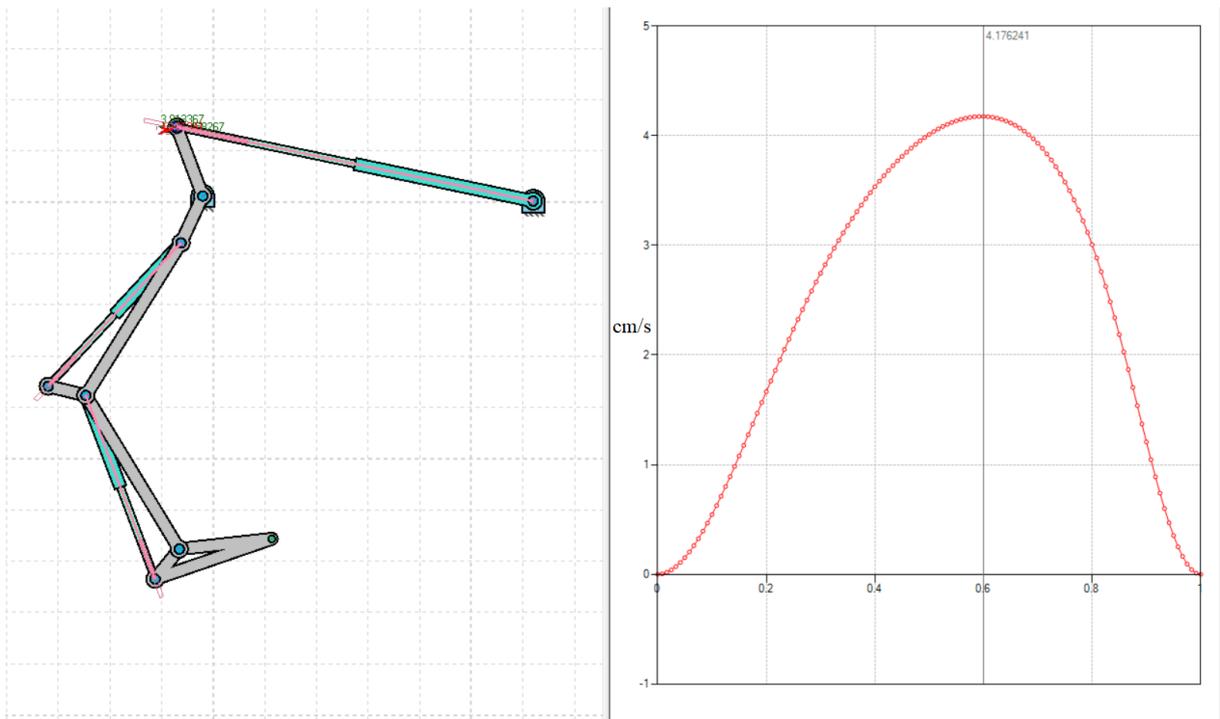


Figura 54 - velocità nel punto M3

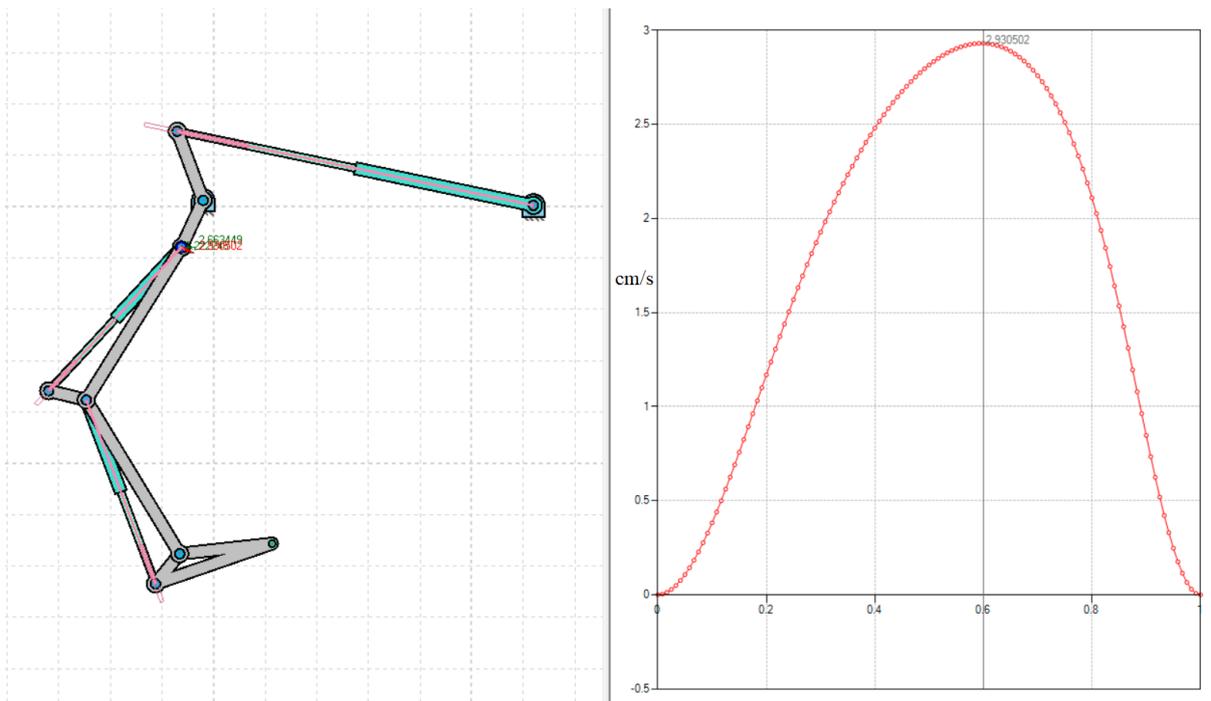


Figura 55 - velocità nel punto A1

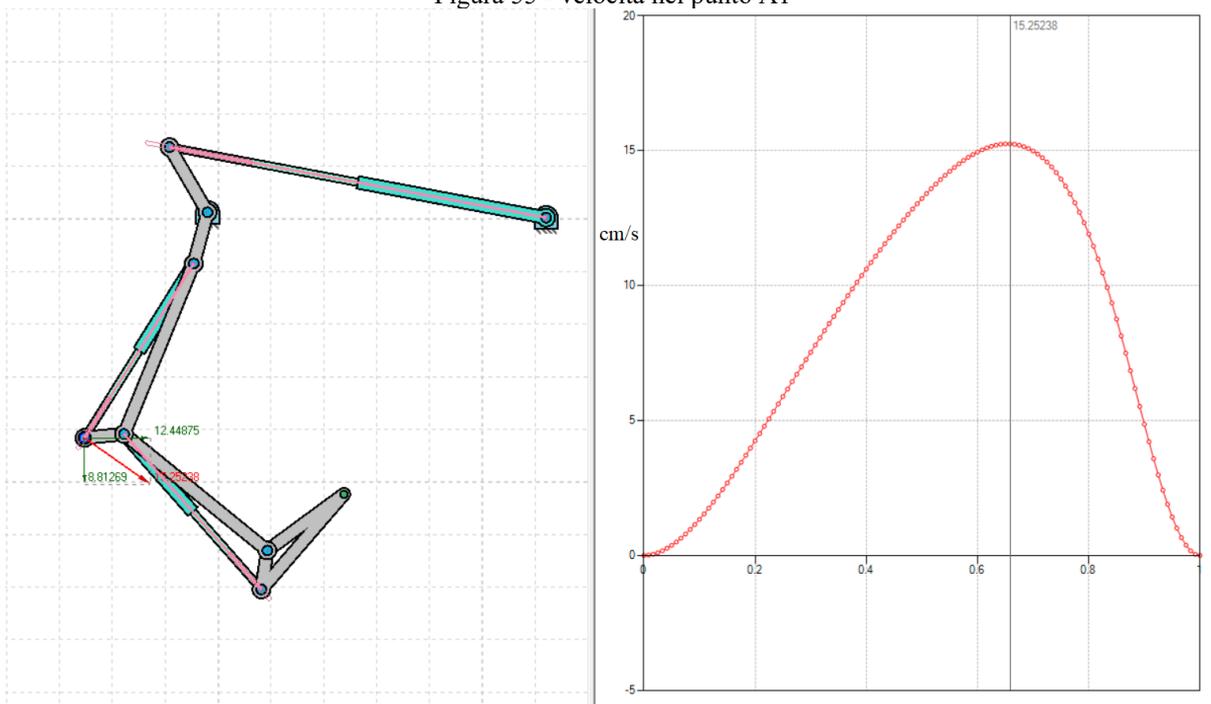


Figura 56 - velocità nel punto M2

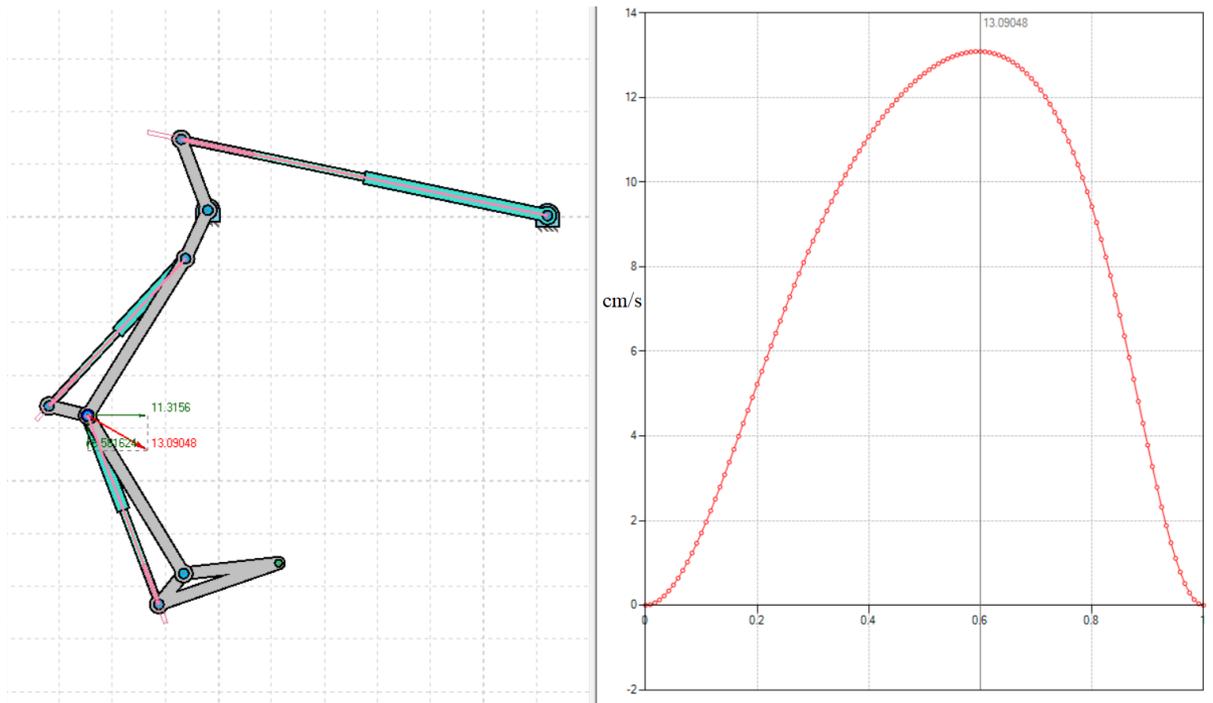


Figura 57 - velocità nel punto B

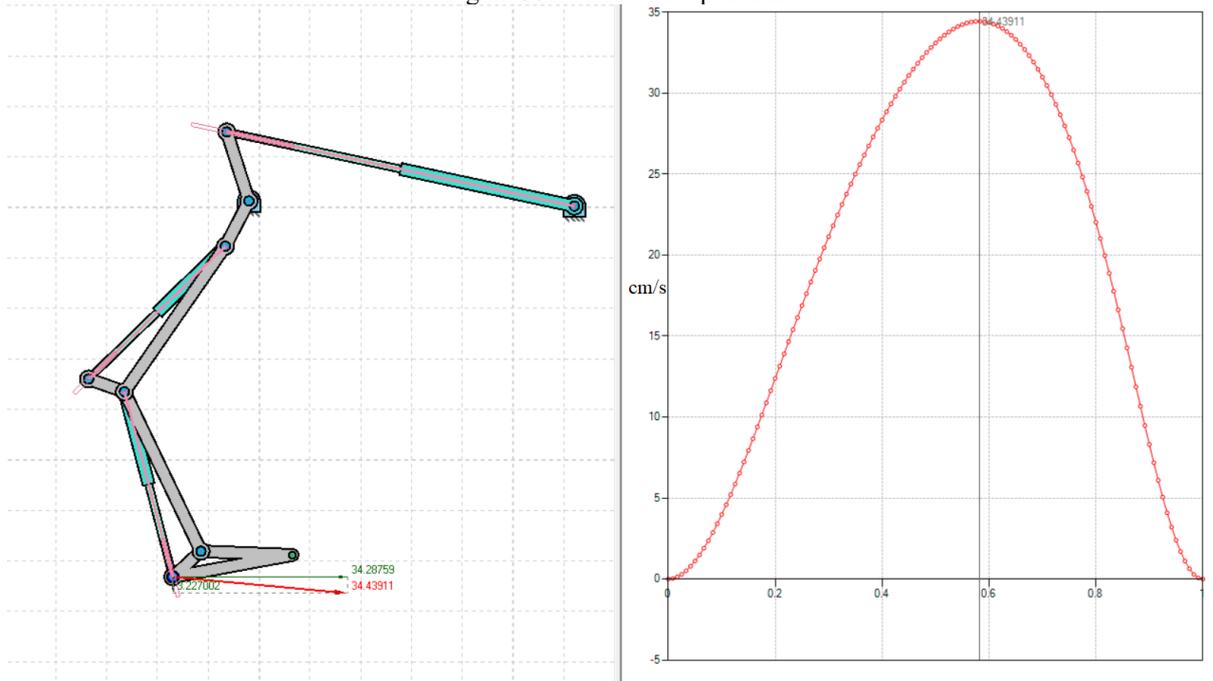


Figura 58 - velocità nel punto M1

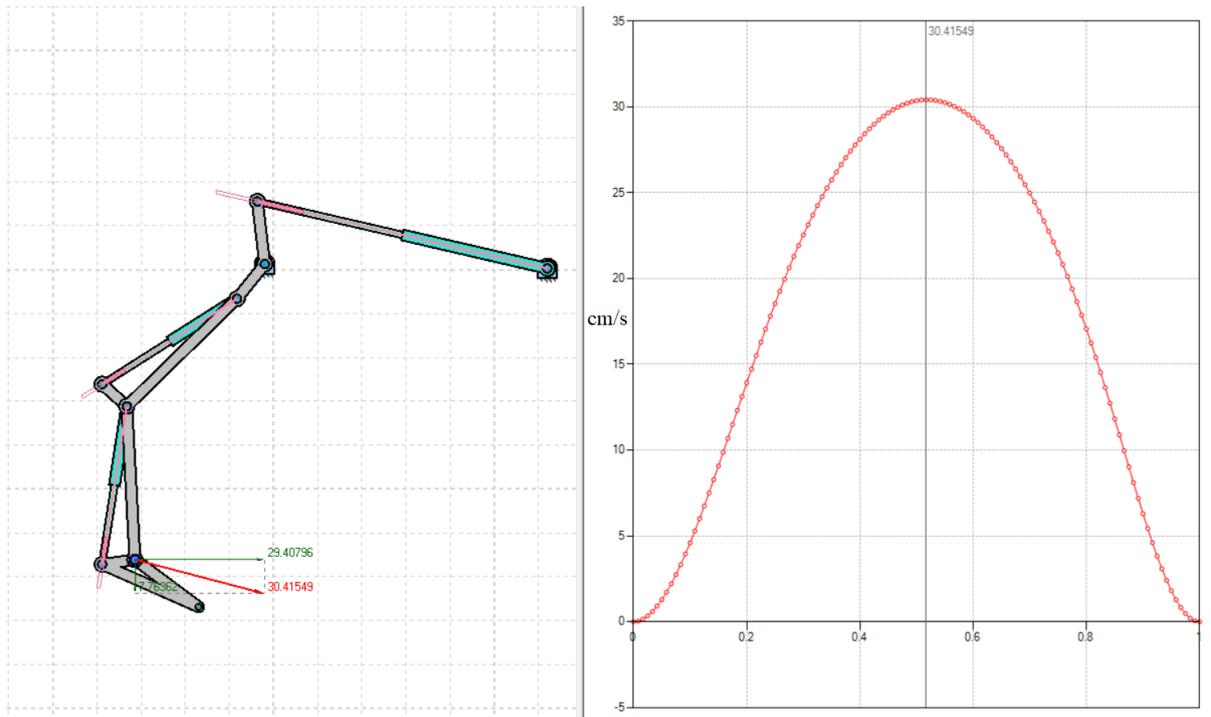


Figura 59 - velocità del punto C

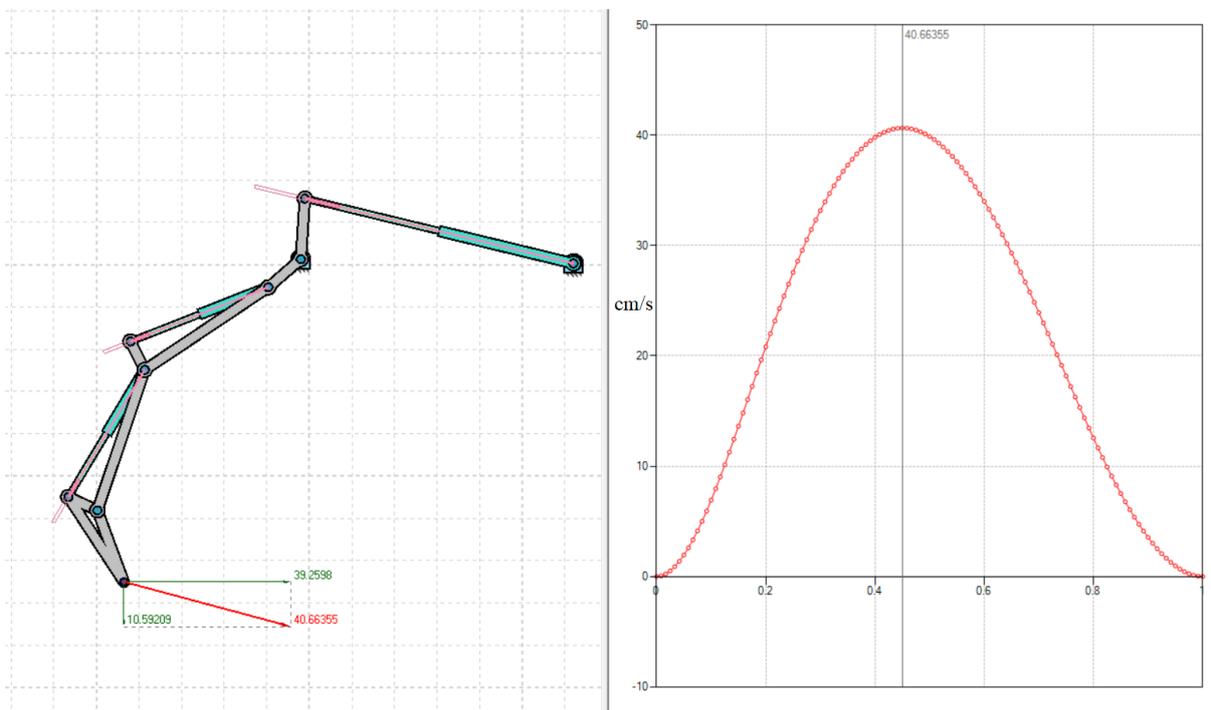


Figura 60 - velocità della punta

- ACCELERAZIONI DEI PUNTI NOTEVOLI

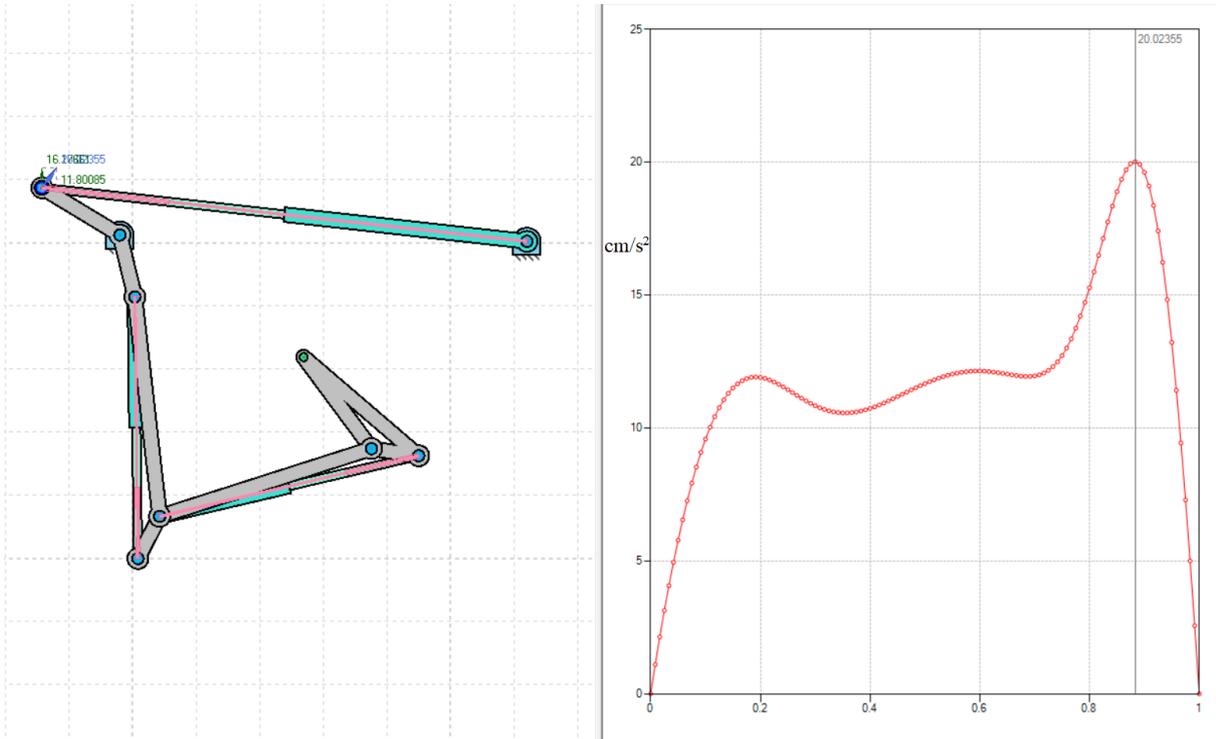


Figura 61 - accelerazione punto M3

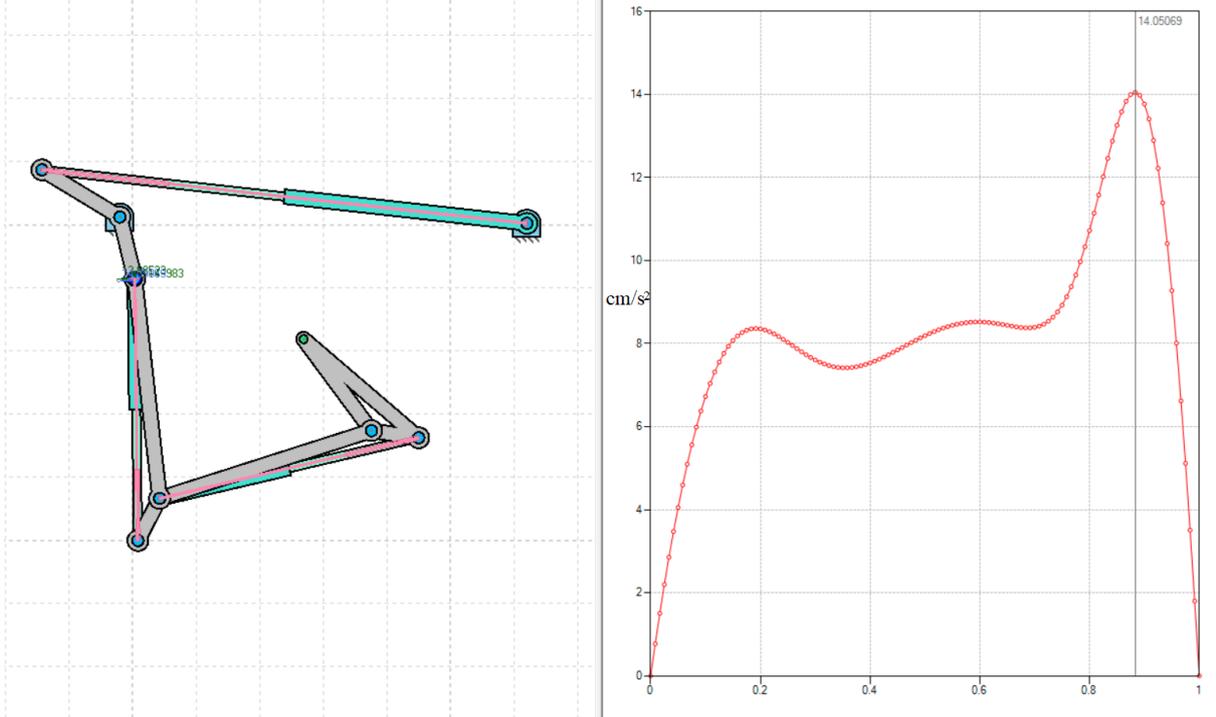


Figura 62 - accelerazione punto A1

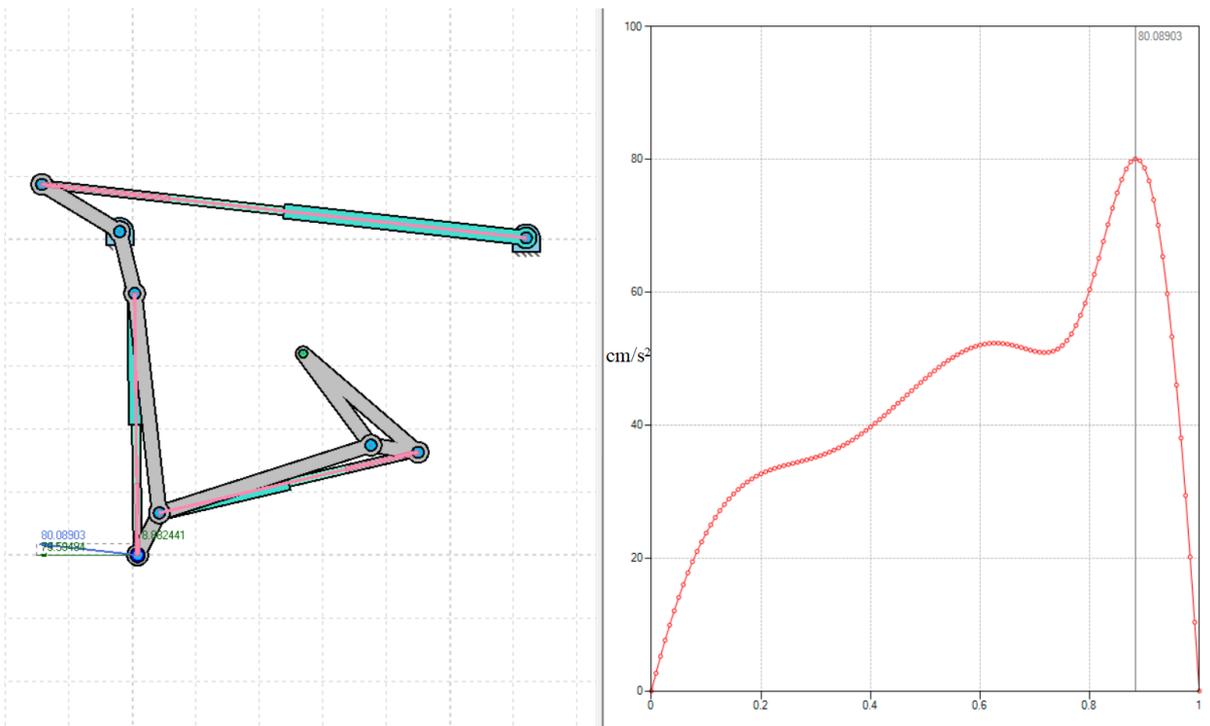


Figura 63 - accelerazione punto M2

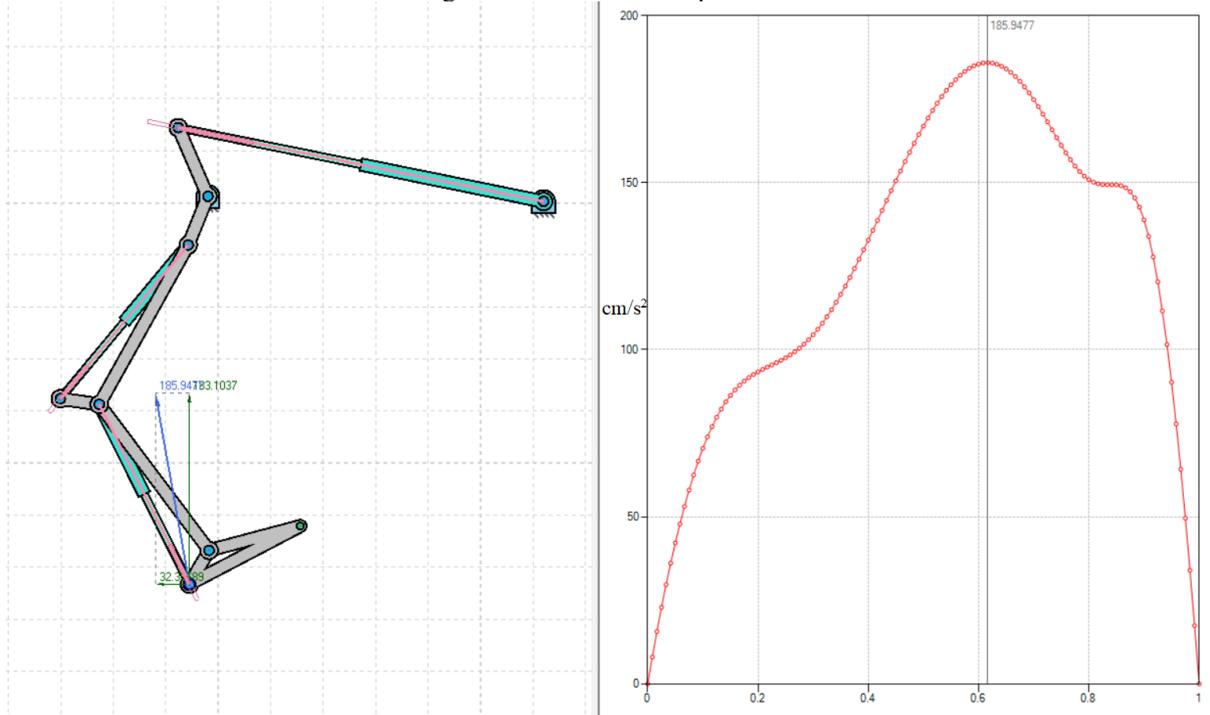


Figura 64 - accelerazione punto M1

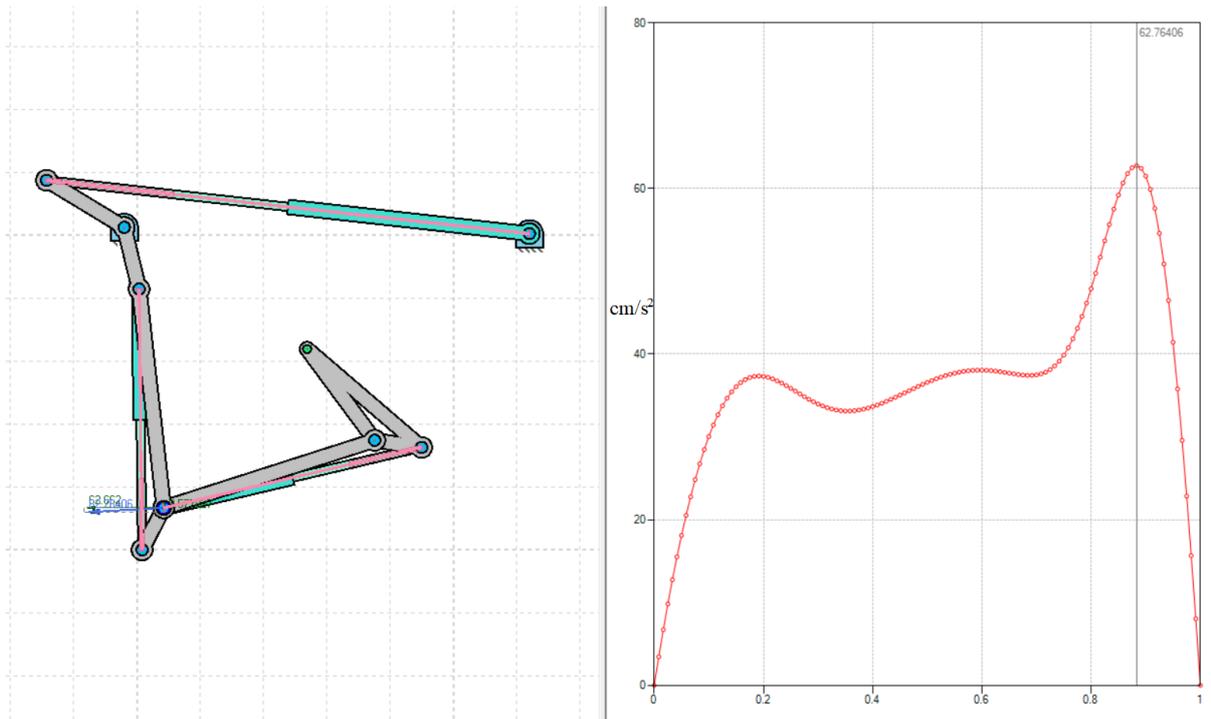


Figura 65 - accelerazione punto B

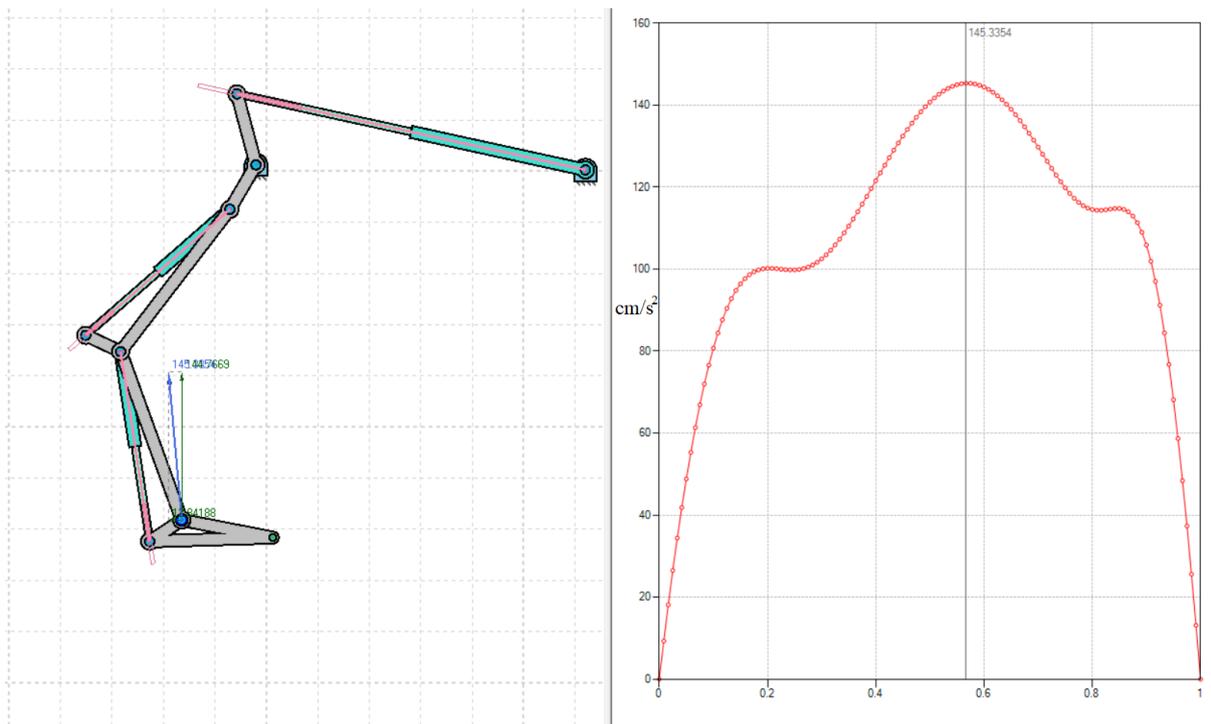


Figura 66 - accelerazione punto C

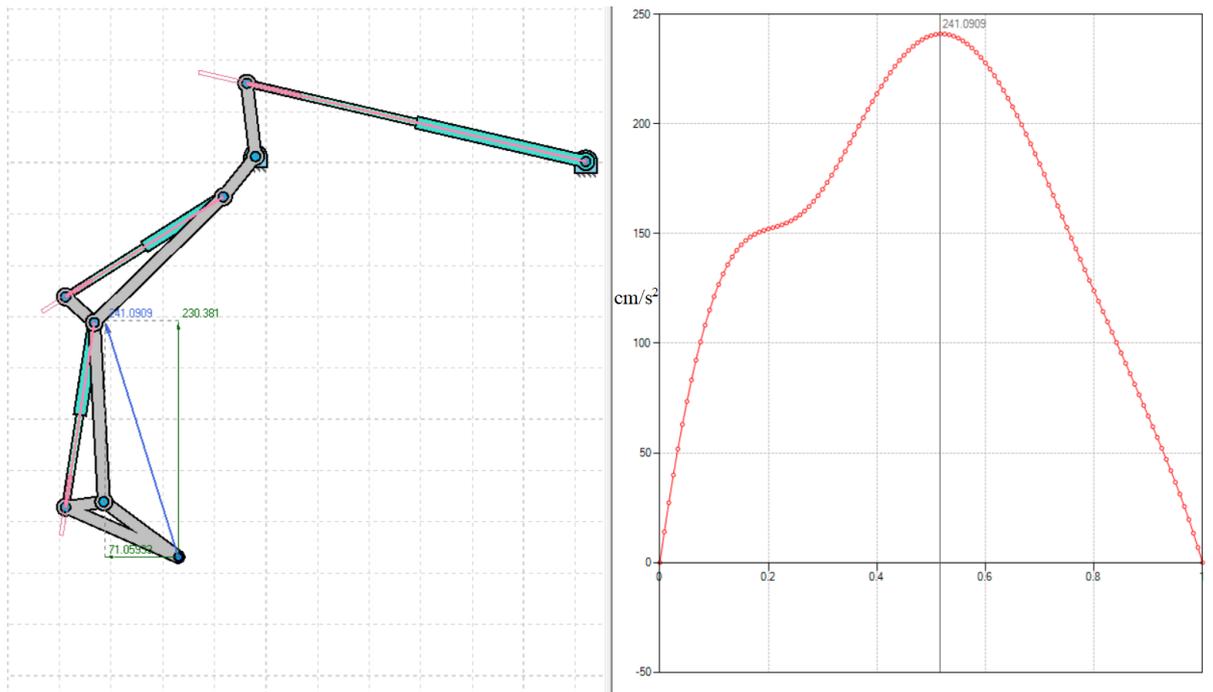


Figura 67 - accelerazione punta

È riportato infine l'andamento nello spazio dell'end effector del dito, che può essere significativo nel momento in cui si voglia conoscere i volumi di lavoro, con le dimensioni massime che vengono ricoperte.

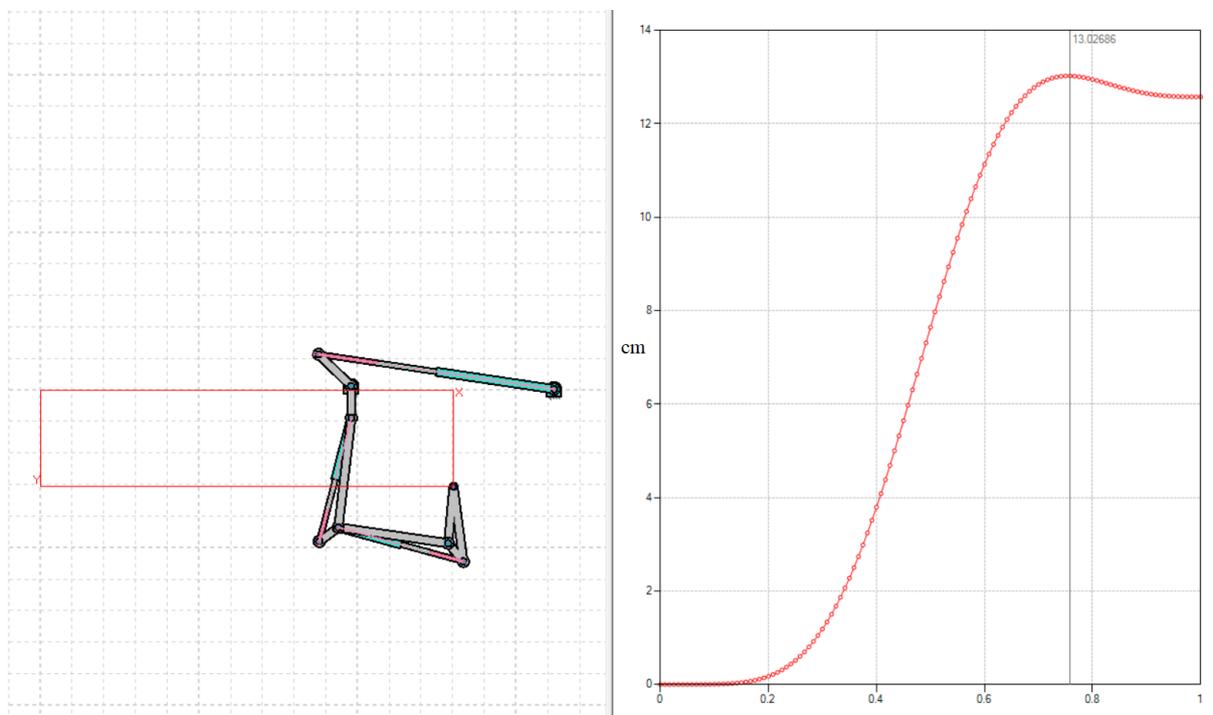


Figura 68 - traiettoria lungo X e massima ampiezza punta

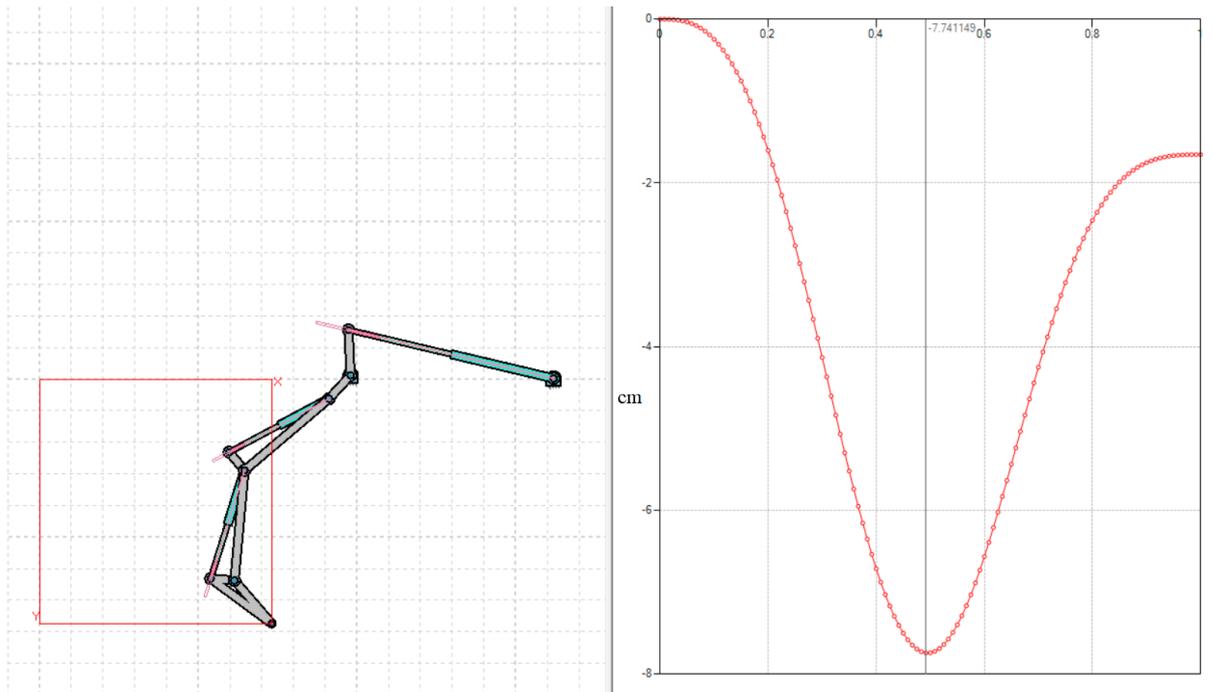


Figura 69 - traiettoria lungo Y e massima ampiezza punta

Si può notare che nel suo percorso l'end effector avrà come massimo spostamento lungo X a 13 cm, mentre lungo Y a 7.74cm.

## 4.2. Analisi dinamica

Per quel che riguarda invece l'analisi dinamica, sempre effettuata con il già menzionato software GIM, il modello geometrico rimane lo stesso, ma esso è stato implementato inserendo delle modifiche:

- sono state trascurate in questa analisi l'ingombro dei cilindri, considerando idealmente solo la loro azione espressa attraverso un'asta di azionamento, come il software suggerisce, per semplificare il modello;
- le varie forze peso di ciascun elemento, considerate applicate nel relativo centro di massa, in particolare per quel che riguarda la prima e la seconda falange, tale forze peso sono significative di quello che è anche tutto il cilindro, essendo idealizzato in questo modello come una linea di attuazione, almeno si vuole, così facendo, tenere conto della massa del cilindro stesso, anche se di regola, il peso del cilindro non avrebbe la sua applicazione nel centro di massa ideale dell'elemento costituente la falange in questione;
- dei momenti resistenti applicati ad ogni cerniera di accoppiamento rotoidali, significativi dell'attrito inevitabilmente presente in tale configurazione;

Le forze peso considerate sono date dalla massa degli oggetti stessi.

Per il momento resistente applicato sulle cerniere è stato invece considerata la teoria degli accoppiamenti rotoidali: in realtà le cerniere hanno diametri differenti, ma molto simili tra loro, per semplicità si è considerato come accoppiamento indicativo per tutte quello tra prima falange e seconda falange.

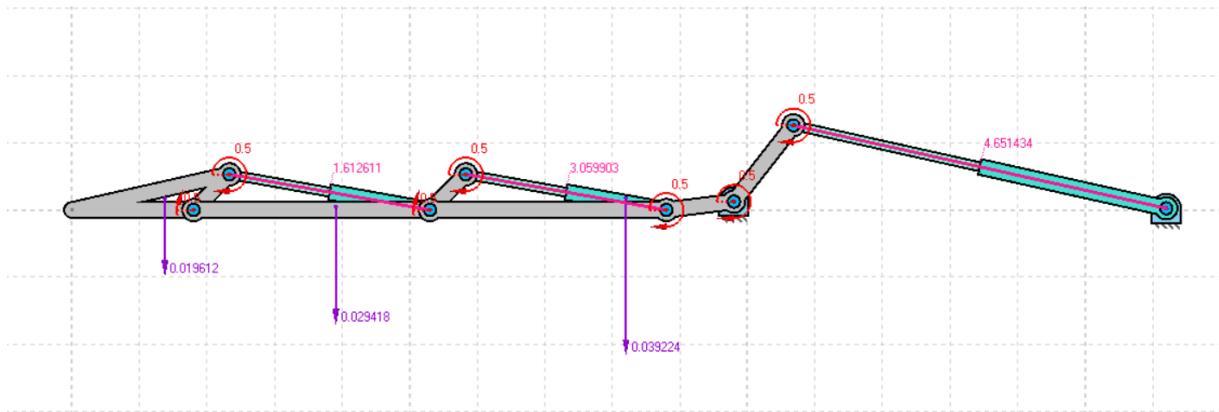


Figura 70 - modello dinamico del meccanismo con forze e momenti

È stato quindi possibile analizzare l'andamento delle forze nell'analisi dei vari corpi costituenti l'assieme dito.

L'equazione fondamentale della dinamica delle macchine impone che l'equilibrio delle forze sia:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_{est} + \vec{F}_i = 0$$

Dove si intende con  $\vec{F}_{est}$  la risultante delle forze esterne mentre con  $\vec{F}_i$  la risultante di tutte le forze d'inerzia.

Obiettivo dell'analisi dinamica è stato proprio quello di ricavare le forze agenti sui vari elementi costituenti il dito, in particolare quelle agenti sulle cerniere di collegamento fra falangi e pistoni. Così facendo è possibile ricavare le forze necessarie a far sì che i pistoni azionino le falangi: essendo il cilindro idealizzato in un'asta in questo caso, per semplice equilibrio si è ricavato la forza agente sul pistone stesso, ossia la forza che è necessario applicare affinché il pistone sia in grado di spostarsi e consentire il movimento. Con tale forza si può calcolare quella che dovrebbe essere la pressione di esercizio, essendo noto dall'equazione di  $F = p \cdot S$  dove  $p$  è la pressione di esercizio,  $S$  è la superficie della testa del pistone su cui viene applicata la forza, ossia  $S = \pi \cdot r^2 = 19.6mm^2$ , si ricava di conseguenza  $p = F/S$ .

Sulla base di queste considerazioni, andiamo dunque ad analizzare i risultati del modello.

1) Equilibrio terza falange:

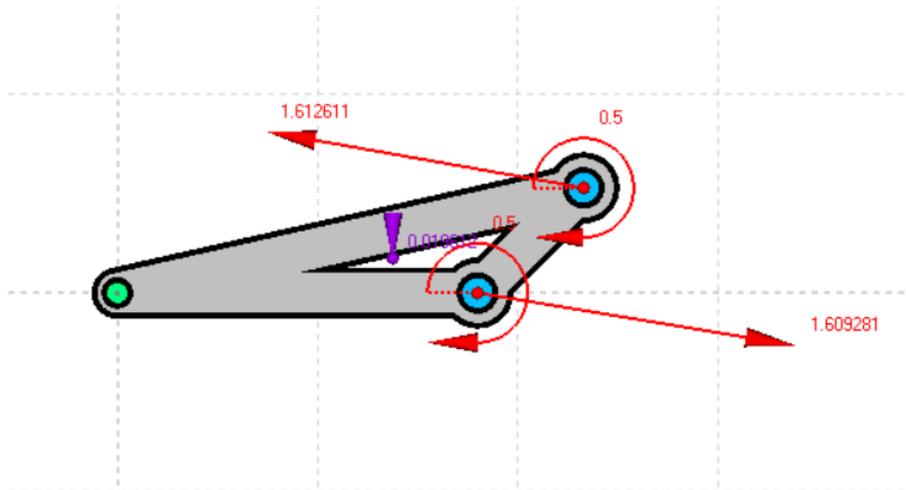


Figura 71 - equilibrio terza falange

Dall'equilibrio risulta che la forza applicata dal pistone alla terza falange sia  $F=1.613\text{N}$ , questo implica che il pistone della seconda falange dovrà essere attuato con una pressione di  $p=0.823\text{ bar}$ . Le altre forze si considerano equilibrate dai vincoli.

2) Equilibrio seconda falange:

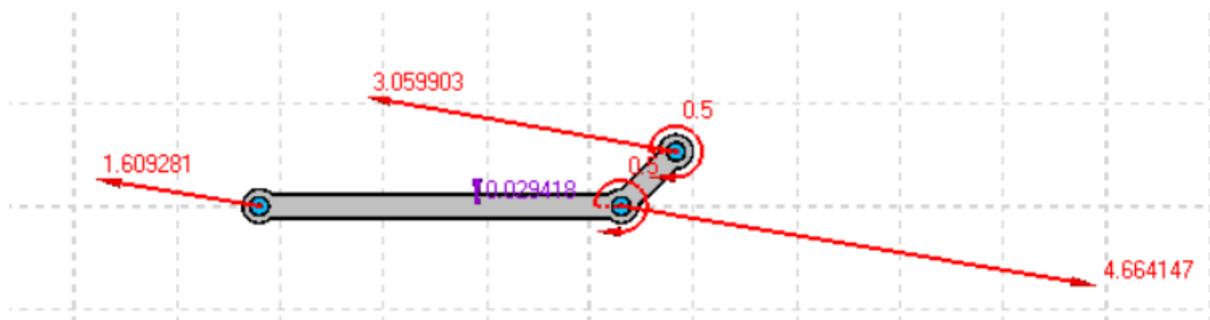


Figura 72 - equilibrio seconda falange

Dall'equilibrio delle forze sulla seconda falange si ricava una forza di  $F=3.06\text{N}$ , da cui si ricava una pressione di  $p=1.56\text{ bar}$ .

### 3) Equilibrio prima falange:

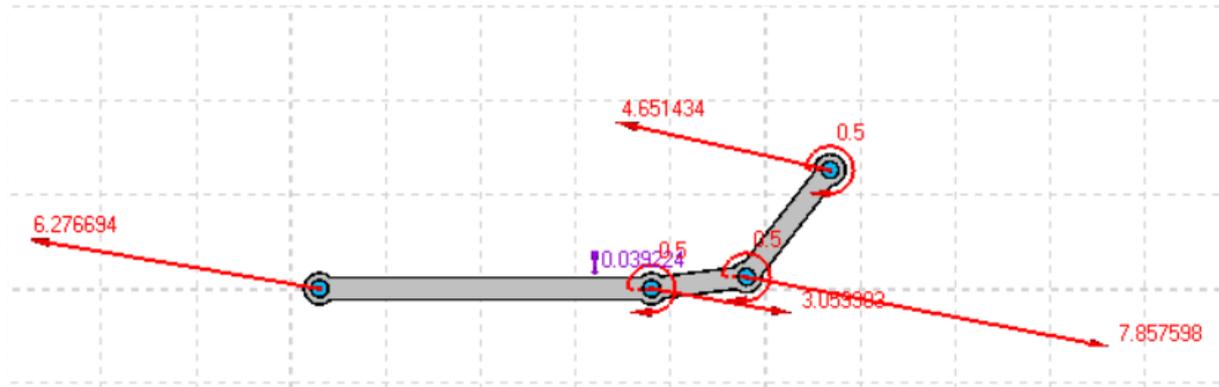


Figura 73 - equilibrio prima falange

In questo caso, la forza agente sulla prima falange è di  $F=4.651\text{N}$ . In questo caso però la superficie del cilindro cambia, avendo il cilindro posto sulla mano un alesaggio doppio di quello delle dita, si avrà una superficie di  $S=78.54\text{mm}^2$  il che vuol dire che si otterrà una pressione di esercizio di  $p=0.592\text{ bar}$ .

### 4.3. Analisi strutturale

L'analisi strutturale è stata effettuata con il software di modellazione 3D SolidEdge, il quale consente di assegnare delle caratteristiche ai materiali e in seguito applicare dei carichi, per poter valutare quali siano le tensioni che si generano all'interno del corpo.

Il software è in grado di ricostruire in automatico la massa della parte, una volta inserite le caratteristiche di riferimento del materiale, in questo caso l'ABS, si ricava la massa delle parti che costituiscono l'assieme.

Nome solido	Materiale	Massa	Volume
pistone_1.par:1	ABS, impatto medio (Predefinito)	0,000 kg	109,895 mm <sup>3</sup>
terza_falange_1.par:1	ABS, impatto medio (Predefinito)	0,003 kg	2596,444 mm <sup>3</sup>
cilindro_3_1.par:1	ABS, impatto medio (Predefinito)	0,001 kg	1122,120 mm <sup>3</sup>
pistone_terza_falange_1.par:1	ABS, impatto medio (Predefinito)	0,000 kg	109,025 mm <sup>3</sup>
seconda_falange_1.par:1	ABS, impatto medio (Predefinito)	0,001 kg	1283,811 mm <sup>3</sup>
cilindro_2_1.par:1	ABS, impatto medio (Predefinito)	0,001 kg	1119,862 mm <sup>3</sup>
prima_falange_1.par:1	ABS, impatto medio (Predefinito)	0,001 kg	895,436 mm <sup>3</sup>

Figura 74 - masse dei componenti calcolate dal software in seguito all'applicazione del materiale

Nel caso di esempio studiato, è stato semplicemente inserito un carico concentrato in punta all'ultima falange, il quale simula quello che dovrebbe essere la forza resistente esercitata da un oggetto al quale la mano possa appoggiarsi, oltre a naturalmente la forza peso dell'oggetto proprio, applicando la gravità al sistema.

Per prima cosa è necessario definire quali siano i vincoli applicati all'assieme. Si è simulato un caso in cui il dito sia fermo e completamente esteso, considerandolo quindi incernierato e bloccato al palmo della mano. Per fare ciò si è posto un vincolo nell'asola di collegamento della prima falange, che è quella dove ha sede l'accoppiamento con il palmo della mano.

Nome vincolo	Tipo di vincolo	Gradi di libertà
Fisso 1	Fisso	FREE DOF: Nessuna

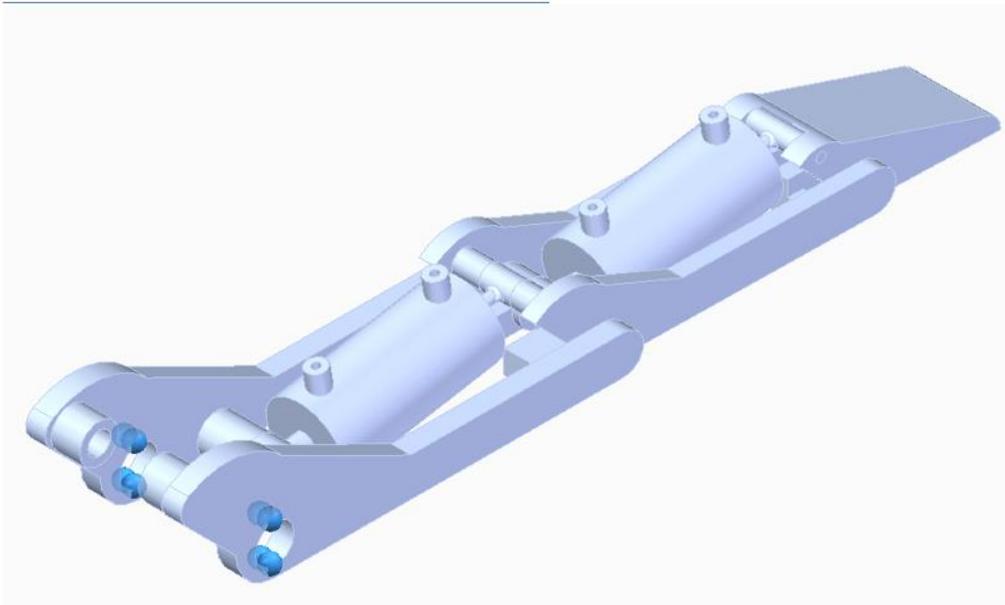


Figura 75 - definizione dei vincoli

La forza applicata è stata considerata di 2N, si è voluto così facendo, simulare appunto l'approccio al sollevamento a velocità costante di un carico avente massa pari a 600g e che sia idealmente ripartito equamente sulle tre dita, per un contributo di 200g a dito.

Nome del carico	Tipo di carico	Valore di carico	Distribuzione del carico	Direzione di carico	Opzione Direzione di carico
Forza 1	Forza	2 N	Per entità	( -0,03, 1,00, 0,00 )	Lungo un vettore
Gravità 1	Gravità	981 cm/s <sup>2</sup>		( 0,00, -1,00, 0,00 )	Lungo un vettore

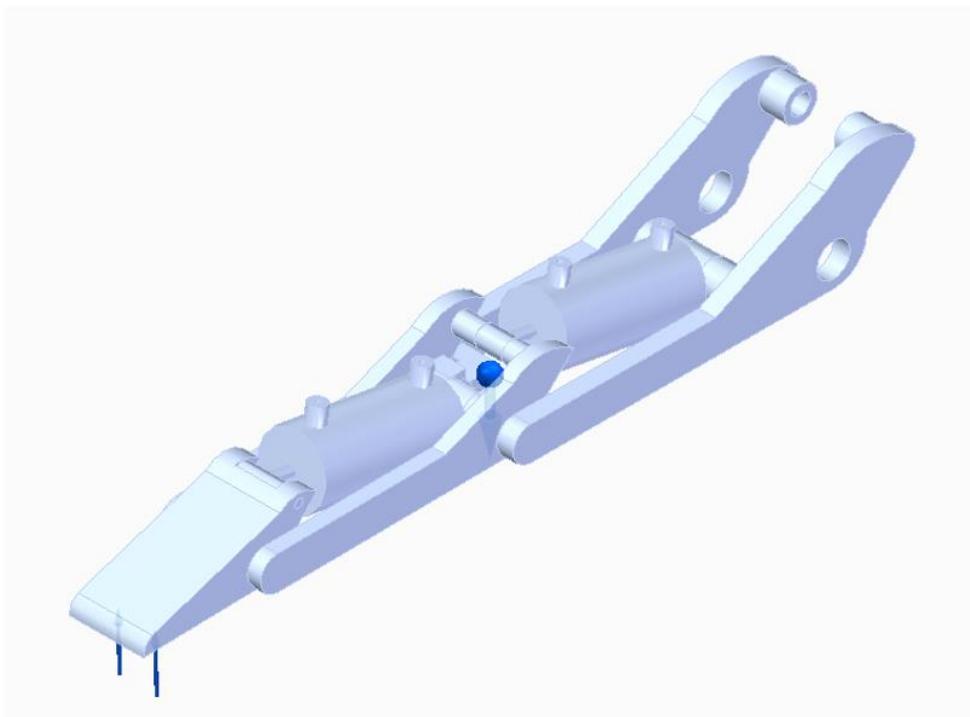


Figura 76 - carichi applicati all'assieme

Affinché si possa simulare l'analisi FEM con il software è necessario definire la mesh da applicare al sistema, che in questo caso viene applicata automaticamente dal software per adattarsi alle geometrie del corpo da studiare. In questo caso è stata applicata una mesh tetraedrica.

<b>Tipo di mesh</b>	<b>Tetraedrico</b>
Numero totale di corpi sottoposti a mesh	7
Numero totale di elementi	74.804
Numero totale di nodi	127.340
Dimensione mesh soggettiva (1-10)	3

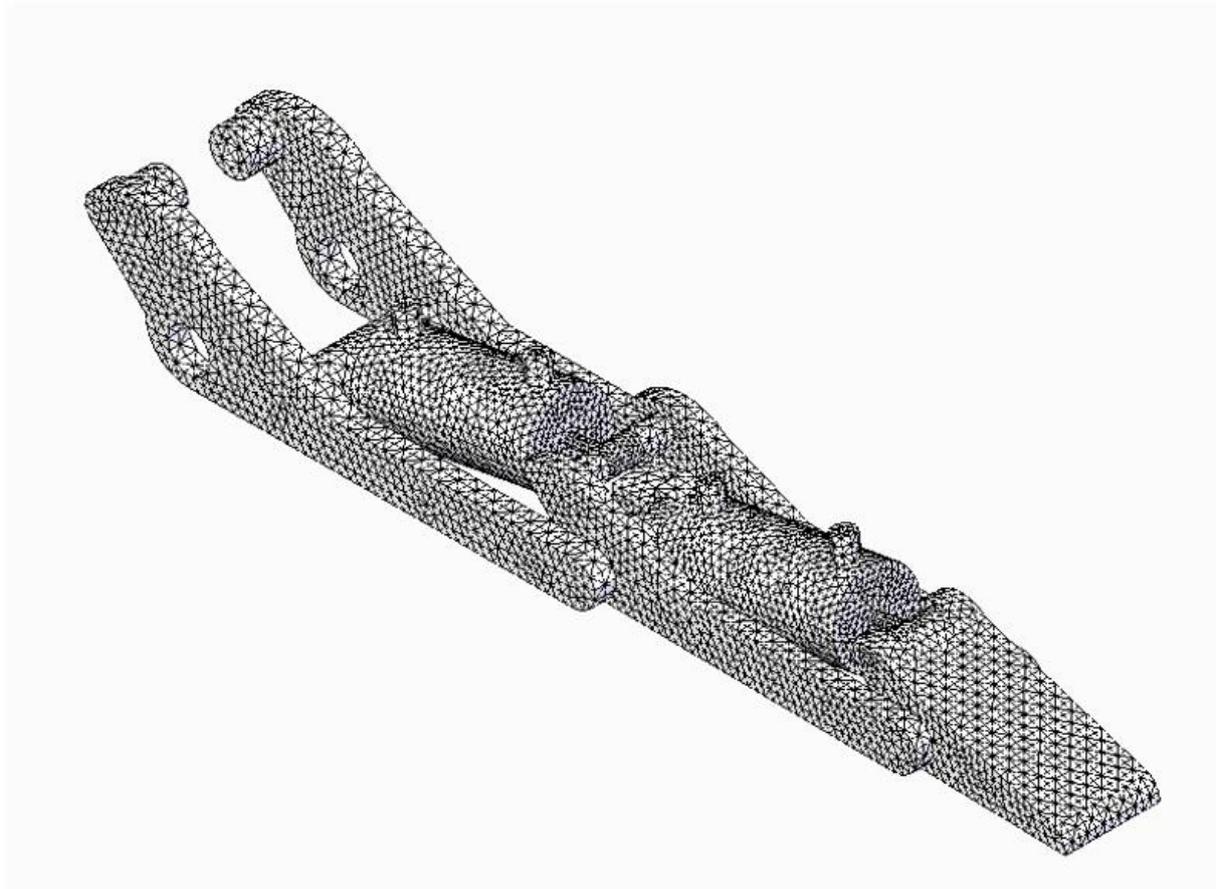


Figura 77 - mesh applicata al sistema

Una volta definito completamente le condizioni iniziali, è possibile avviare l'analisi strutturale, dalla quale si estrapolano i seguenti risultati:

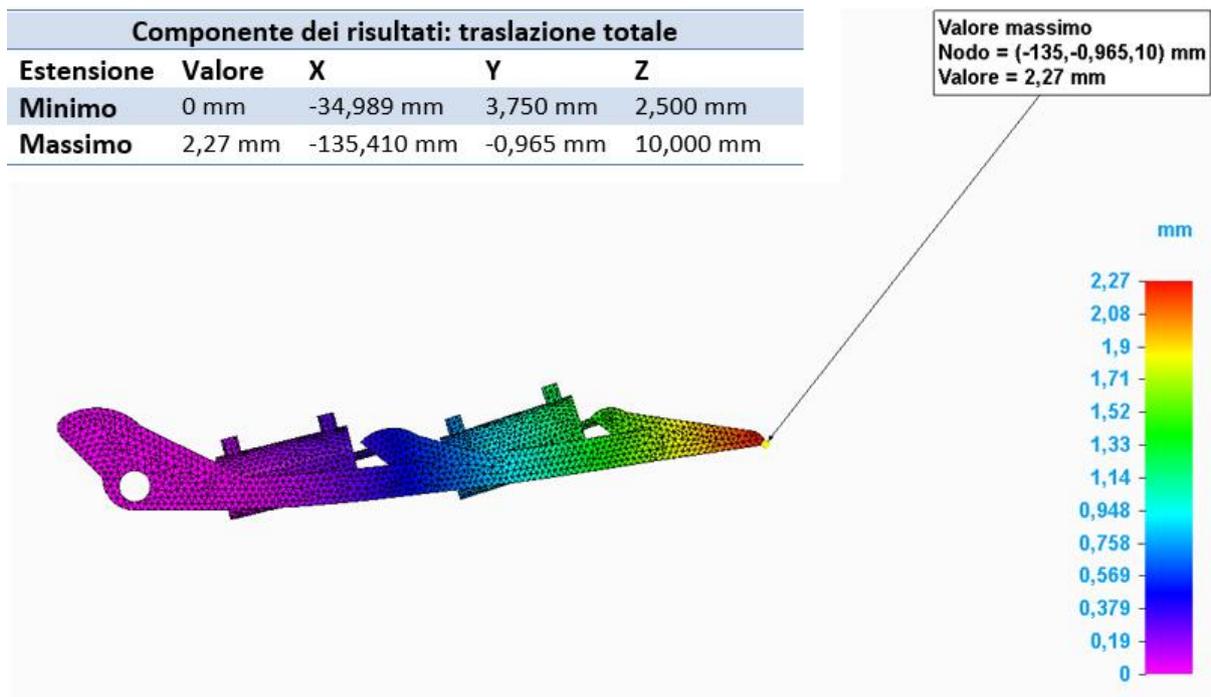


Figura 78 - risultati dell'analisi strutturale - Spostamenti

Come prevedibile, lo spostamento massimo si ha proprio sulla punta dell'end effector del dito, per un valore di 2.27mm.

E' possibile dunque calcolare i coefficienti di sicurezza sullo spostamento massimo applicati al corpo, dal quale si evidenzia un valore minimo di 2.88.

Componente risultato: Coefficiente di sicurezza				
Estensione	Valore	X	Y	Z
Minimo	2,88	-72,457 mm	7,593 mm	9,757 mm
Massimo	4,43e+07	-54,132 mm	3,699 mm	10,750 mm

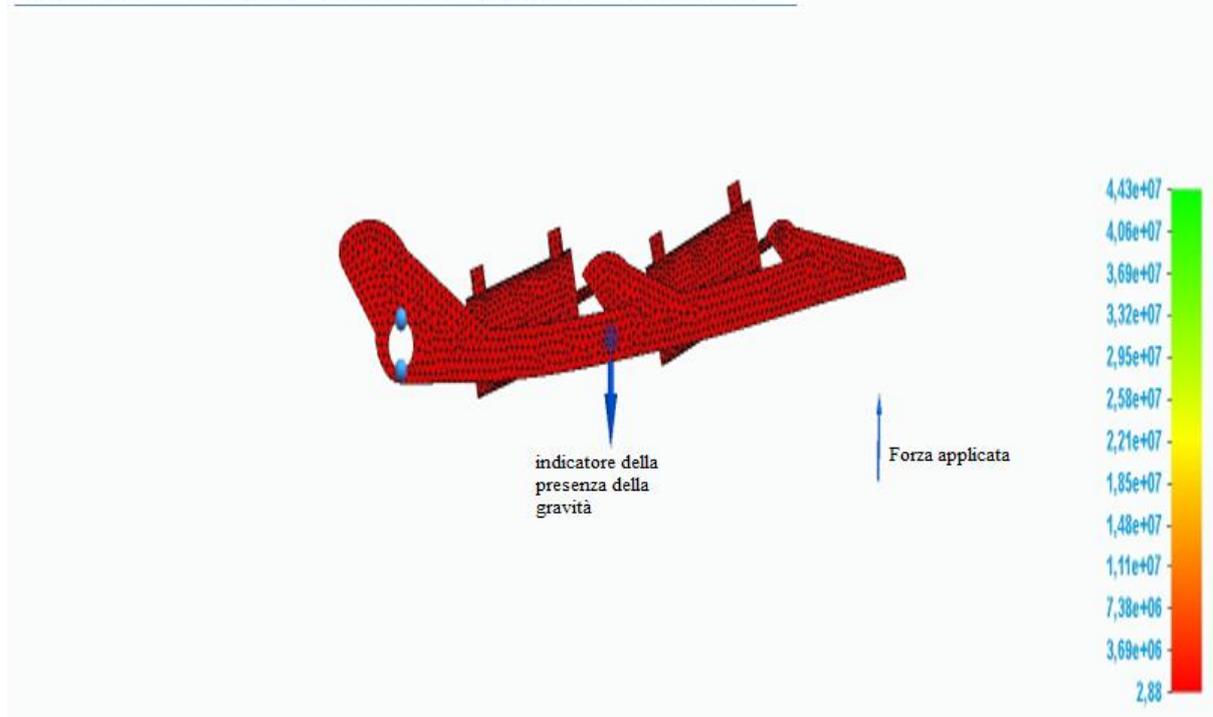


Figura 79 - coefficienti di sicurezza Spostamenti

Sono state in seguito calcolate le tensioni all'interno del corpo, utilizzando il criterio di Von Mises, automaticamente calcolato dal software.

Componente dei risultati: Von Mises				
Estensione	Valore	X	Y	Z
Minimo	9,81e-07 MegaPa	-54,132 mm	3,699 mm	10,750 mm
Massimo	15,1 MegaPa	-72,457 mm	7,593 mm	9,757 mm

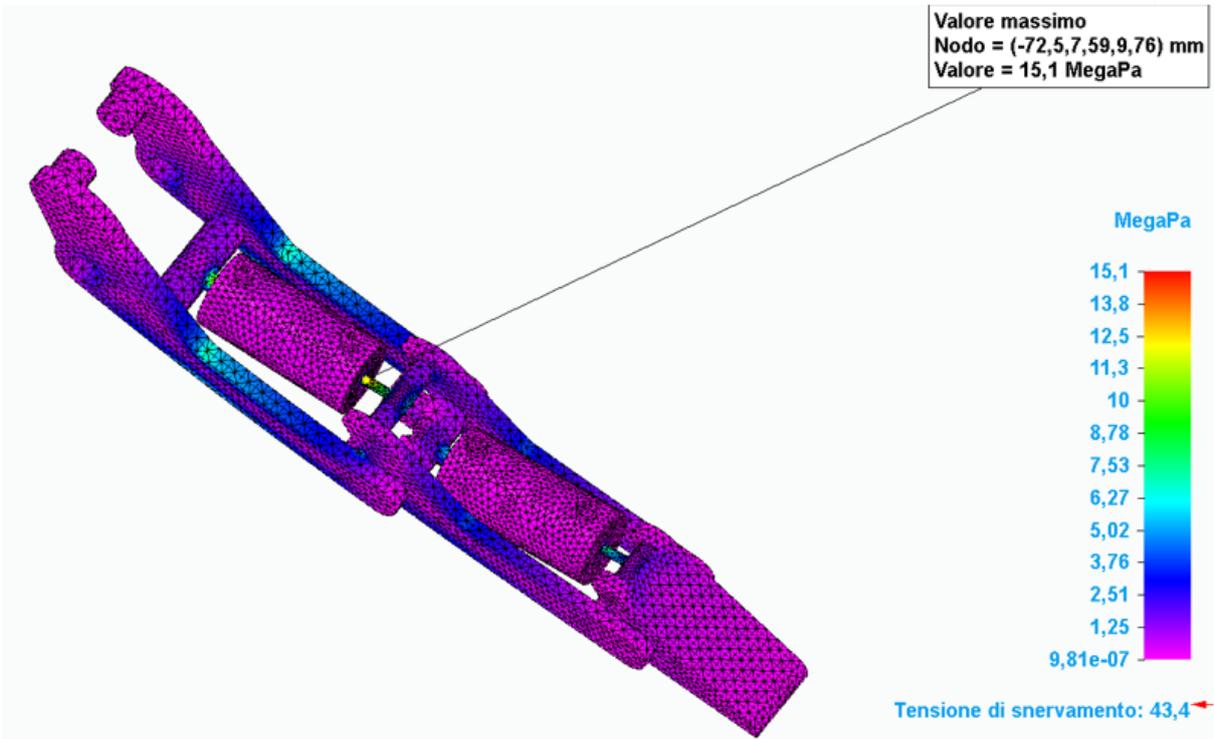


Figura 80 - risultati analisi strutturali - Tensioni

Come si può notare dai risultati della simulazione, la tensione massima generata dal carico è di 15,1Mpa ed è rilevata nel punto di contatto fra il pistone e cilindro della prima falange. Tuttavia, come si può notare dai risultati, risulta decisamente inferiore alla tensione di snervamento, con un coefficiente di sicurezza di 2,87.

## CAPITOLO 5. REALIZZAZIONE

Parallelamente al lavoro di progettazione, analisi cinematica e calcolo strutturale, si è anche realizzato il dito oggetto di studio, in realtà molto significativo riguardo quello che poi effettivamente sia il funzionamento finale, essendo la mano formata da tre dita identiche fra loro.

Essendo la caratteristica che contraddistingue il funzionamento stesso del pezzo, si vuole quindi valutare sperimentalmente il risultato ottenuto, per aver modo di corroborare le scelte progettuali e/o eventualmente correggere quelle che saranno le problematiche rilevate nelle prove, così da implementare in futuro il modello.

È stata realizzata quindi una delle dita del progetto con due stampanti 3D FDM in dotazione presso il laboratorio del Politecnico: una **STRATASY F370** e una **3ntr A4v3**.

Queste stampanti consentono l'utilizzo di due materiali diversi, uno è l'**ABSplus**, che è quello che costituisce la base solida e vera e propria del prototipo, il quale presenta caratteristiche meccaniche più elevate e soprattutto un grado di resistenza maggiore rispetto all'altro materiale, ossia il **TPU**, che invece è stato utilizzato per realizzare quella che è la camicia interna del cilindro.

Si è optato per questa scelta ibrida prevedendo che il TPU, essendo più malleabile rispetto all'ABS, materiale con cui è stato realizzato invece il resto del dito e in particolare il cilindro e il pistone, fornisca una adeguata tenuta all'interno della camera del cilindro, e soprattutto che non causi fenomeni di impuntamento: in teoria essendo più resistente, il pistone dovrebbe essere libero di scorrere all'interno della camera. Tenuta e impuntamento sono i fenomeni che rappresentano i principali problemi legati alla realizzazione mediante stampa 3D di cilindri pneumatici, ecco perché si è posta particolare attenzione su questa soluzione.

Sono riportate di seguito le schede tecnica delle stampanti utilizzate e le caratteristiche meccaniche dei materiali.



# ABSplus-P430

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC  
FOR 3D PRINTERS

ABSplus™ is a true production-grade thermoplastic that is durable enough to perform virtually the same as production parts. When combined with FDM® 3D Printers, ABSplus is ideal for building 3D models and prototypes in an office environment.

MECHANICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ Axis		XZ Axis	
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,700 psi		33 MPa	
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4,580 psi		31 MPa	
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	320,000 psi		2,200 MPa	
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	6%		6%	
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	2%		2%	
IZOD Impact, notched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	2.0 ft-lb/in		108 J/m	

MECHANICAL PROPERTIES	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
		XZ Axis	ZX Axis	XZ Axis	ZX Axis
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,450 psi	5,060 psi	58 MPa	35 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	300,000 psi	240,000 psi	2,100 MPa	1,650 MPa
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	4%	4%	2%	2%

THERMAL PROPERTIES <sup>2</sup>	TEST METHOD	ENGLISH		METRIC	
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	204 °F		96 °C	
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	180 °F		82 °C	
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC (B57B)	228 °F		108 °C	
Melting Point	-----	Not Applicable <sup>3</sup>		Not Applicable <sup>3</sup>	
Coefficient of Thermal Expansion	ASTM E831	4.20x10 <sup>-4</sup> in/in/°F		8.82x10 <sup>-4</sup> mm/mm/°C	

STRATASYS.COM



A GLOBAL LEADER IN APPLIED ADDITIVE TECHNOLOGY SOLUTIONS



# ABSplus-P430

PRODUCTION-GRADE THERMOPLASTIC  
FOR 3D PRINTERS



ELECTRICAL PROPERTIES <sup>4</sup>	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	2.6x10 <sup>10</sup> - 5.0x10 <sup>10</sup> ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D160-99	2.3 - 2.85
Dissipation Factor	ASTM D160-99	0.0040 - 0.0063
Dielectric Strength	ASTM D149-06, Method A, ZY Orientation	130 V/mil
Dielectric Strength	ASTM D149-06, Method A, ZX Orientation	200 V/mil

OTHER <sup>5</sup>	TEST METHOD	VALUE
Specific Gravity	ASTM D792	1.04
Rockwell Hardness	ASTM D786	108.5

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
uPrint SE Plus™	0.013 inch (0.330 mm) 0.010 inch (0.254 mm) 0.007 inch (0.178 mm) <sup>6</sup>	Isolable Support	<input type="checkbox"/> Ivory <input type="checkbox"/> White <input checked="" type="checkbox"/> Black <input type="checkbox"/> Dark Gray <input checked="" type="checkbox"/> Red <input type="checkbox"/> Blue <input checked="" type="checkbox"/> Olive Green <input type="checkbox"/> Nocturne <input type="checkbox"/> Fluorescent Yellow



The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End use material performance can be impacted (±) by, but not limited to, part design, and use conditions, test conditions, color etc. Actual values will vary with build conditions. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions, or end use. Each user is responsible for determining that the Stratays material is safe, lawful, and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal or recycling method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratays makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against product infringement.

<sup>1</sup>Build orientation is on side long edge. <sup>2</sup>Isoture value unless otherwise noted. <sup>3</sup>Due to amorphous nature, material does not display a melting point. <sup>4</sup>All Electrical Property values were generated from the average of test plaques built with default part clarity (opaque). Test plaques were 4.0 x 4.0 x 0.1 inches (100 x 100 x 2.5 mm) and were built both in the flat and vertical orientation. The range of values is mostly the result of the difference in properties of test plaques built in the flat vs. vertical orientation. <sup>5</sup>0.007 inch (0.178 mm) layer thickness available on Chromatic Elite and Fortus 250mc only. Ivory is the only color option for uPrintSE. The test data was collected using ABSplus Ivory (Natural) specimens. ABSplus colored materials will have similar properties, but can vary up to 10%.

Orientation: Use Stratays testing white paper for more detailed description of build orientations.

XZ - X or "on edge"

XY - Y or "flat"

ZX - or "upright"




**HEADQUARTERS**  
7665 Commerce Way, Eden Prairie, MN 55344  
+1 888 480-3548 (U.S. Toll Free)  
+1 952 897-8000 (INT)  
+1 952 937-0070 (FAX)

1 Hutzman Ct., Science Park, PO Box 2496  
Rethoveld 76124, Braam  
+972 74 745-4000  
+972 74 745-5000 (FAX)

STRATASYS.COM

ISO 9001:2008 Certified

©2014, 2015, 2017 Stratays Inc. All rights reserved. Stratays, Stratays logo, FDM Technology, Fused Deposition Modeling, uPrint SE Plus, ABSplus, Catalyst EX, and Smart Supports are trademarks of Stratays, Inc. All other trademarks are the property of their respective owners, and Stratays assumes no responsibility with regard to the selection, performance, or use of these non-Stratays products. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. M65\_TSM\_ABSplusP430\_1117a

Figura 81 - caratteristiche ABSplus

# FDM TPU 92A

Thermal Properties	Test Method	Value
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi	ASTM D648	38 °C (100.4 °F)
Heat Deflection (HDT) @ 15 psi	NA	56 °C (132.8 °F)
Vicat Softening Temperature (Rate B/50)	ASTM D1525	65 °C (203 °F)
Glass Transition Temperature (Tg)	DMA (SSYS)	-42 °C (-43.6 °F)
Coefficient of Thermal Expansion (x-direction)	ASTM E831	139 µm/m-°C (7.72E-05 in/in-°F)
Coefficient of Thermal Expansion (y-direction)	ASTM E831	158 µm/m-°C (8.83E-05 in/in-°F)
Coefficient of Thermal Expansion (z-direction)	ASTM E831	178 µm/m-°C (9.78E-05 in/in-°F)

Electrical Properties	Test Method	Value
		XY Orientation      XZ Orientation
Volume Resistivity	ASTM D257	6.09E+10 ohm-cm      7.17E+13 ohm-cm

Other	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.13502
Flame Classification	UL94	HB* and V2**

\* HB: Slow burning on a horizontal specimen, burning rate < 10 mm/min for thickness < 3 mm or burning stops before 100 mm.  
 \*\* V-2: Burning stops within 30 seconds on a vertical specimen; drops of flaming particles are allowed.

### Stratasys Headquarters

7605 Commerce Way,  
 Eden Prairie, MN 55344  
 +1 800 801 8491 (US Toll Free)  
 +1 952 937-3000 (Intl)  
 +1 952 937-0070 (Fax)

1 Holtzman St., Science Park,  
 PO Box 2456  
 Rehovot 76124, Israel  
 +972 74 745 4000  
 +972 74 745 5000 (Fax)

stratasys.com  
 ISO 9001:2008 Certified

© 2018 Stratasys Ltd. All rights reserved. Stratasys, Stratasys logo, FDM, F123 and OSR Support are trademarks or registered trademarks of Stratasys Ltd. and/or its subsidiaries or affiliates and may be registered in certain jurisdictions. All other trademarks belong to their respective owners. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. VDS: FDM TPU92A 1018a

# FDM TPU 92A

FDM TPU 92A is a thermoplastic polyurethane with a Shore A value of 92. The material exhibits high elongation, superior toughness, durability and abrasion resistance.

FDM TPU 92A brings the benefits of elastomers to FDM 3D printing and offers the capability to quickly produce large and complex elastomer parts. Typical applications include flexible hoses, tubes, air ducts, seals, protective covers and vibration dampeners.

FDM TPU 92A is available on the 1.25mm, 3.0mm and 6.35mm filament sizes and is compatible with OSR™ soluble support material.

Mechanical Properties	Test Method	Value	
		XY Orientation	XZ Orientation
Shore Hardness (molded)	ASTM D2240	92 Shore A	92 Shore A
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	15.6 MPa (2,265 psi)	16.1 MPa (2,332 psi)
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	16.8 MPa (2,432 psi)	17.4 MPa (2,519 psi)
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	15.3 MPa (2,212 psi)	20.7 MPa (3,000 psi)
Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	552%	492%
Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D412	466%	385%
Tensile Stress at 100% Elongation (PSI)	ASTM D412	6.9 MPa (999 psi)	7.6 MPa (1,096 psi)
Tensile Stress at 300% Elongation (PSI)	ASTM D412	11.0 MPa (1,593 psi)	11.9 MPa (1,722 psi)
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	1.8 MPa (255 psi)	2.4 MPa (351 psi)
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	25.6 MPa (3,719 psi)	36.9 MPa (5,349 psi)
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	No break	No break
Tear Strength - Stamped	ASTM D624-C	84.6 N/mm (463 lbF/in)	NA
Compressive Strength, Yield (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	2.6 MPa (384 psi)	2.6 MPa (384 psi)
Compressive Strength, Ultimate (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	2.6 MPa (384 psi)	2.6 MPa (384 psi)
Compressive Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D695	16.9 MPa (2,457 psi)	16.9 MPa (2,457 psi)
Compression Set at 22 Hours @ 23 °C	ASTM D395	21%	NA
Compression Set at 22 Hours @ 70 °C	ASTM D395	44%	NA

Figura 82 - caratteristiche TPU

## Stampanti 3D FDM

	STRATASYS F370™	FORTUS 380mc™	FORTUS 450mc™	Stratasys F900™
Camera di costruzione	355 x 254 x 200 mm (14 x 10 x 8 pollici)	355 x 305 x 305 mm (14 x 12 x 12 pollici)	406 x 350 x 406 mm (16 x 14 x 16 pollici)	914 x 610 x 914 mm (36 x 24 x 36 pollici)
Dimensioni/ peso del sistema	1.826 x 964 x 711 mm (72 x 38 x 28 pollici) 527 kg (1000 lb) con materiali di consumo	1.270 x 901,7 x 1984 mm (50 x 35,5 x 78,5 pollici) 601 kg (1325 lb)	1.270 x 901,7 x 1984 mm (50 x 35,5 x 78,5 pollici) 601 kg (1325 lb)	2.772 x 1.693 x 2.027 mm (109,1 x 66,3 x 79,8 pollici) 2889 kg (6325 lb)
Tipiche di materiali	ABS-M30 ASA PC-ABS PLA	ABS-M30 ABS-M30 ABS-F307 ASA PC-ISO PC PC-ABS FDM Nylon 12	ABS-M30 ABS-M30 ABS-F307 Antero 800NA ASA PC-ISO PC PC-ABS FDM Nylon 12 Nylon 12CF FDM ST-130 Resina ULTEM 9085 Resina ULTEM 1010	ABS-M30 ABS-M30 ABS-F307 ASA PC-ISO PC PC-ABS PPSF FDM Nylon 12 FDM Nylon 12CF FDM Nylon 6 ST-130 Resina ULTEM 9085 Resina ULTEM 1010
Confronto della produttività	1,5 x (modalità standard) 3 x (produttività veloce)	2,0 x	2,0 x	2,1 x
Accensione della parte	Le parti sono prodotte con un'accuratezza di: +/- 0,200 mm (0,008 pollici) o +/- 0,002 mm (0,0002 pollici), a seconda del valore più grande.	I componenti sono prodotti con un margine di precisione pari a: +/- 0,127 mm (a 0,005 pollici) o a 0,0015 mm/min (a 0,0015 pollici), prendendo tra i due il valore maggiore.	I componenti sono prodotti con un margine di precisione pari a: +/- 0,127 mm (a 0,005 pollici) o a 0,0015 mm/min (a 0,0015 pollici), a seconda di quale sia il valore maggiore.	I componenti sono prodotti con un margine di precisione pari a: +/- 0,09 mm (0,0035 pollici) o +/- 0,0015 mm/min (0,0015 pollici), a seconda di quale sia il valore maggiore.*
Software	<b>Insight™</b> Il software Insight predice il file delle parti digital 3D (informati come STL) da produrre su uno stampante 3D FDM individuando automaticamente gli strati e generando le strutture di sostegno e i percorsi di estrusione del materiale con un solo pulsante. Se necessario, l'utente può ignorare le impostazioni predefinite di stampa e modificare manualmente i parametri che controllano l'aspetto, la resistenza e la precisione dei componenti, come pure la spesa e l'efficienza del processo FDM.			
	<b>Control Center™</b> Control Center è il software che consente la comunicazione tra il workstation dell'utente e i sistemi FDM, gestendo i lavori e monitorando lo stato di produzione dei sistemi FDM. Quest'applicazione software fornisce il controllo per ottimizzare l'efficienza, la produttività e l'utilizzo riducendo al minimo, al contempo, il tempo di risposta. Control Center è incluso con il software Insight.			
	<b>GenCAD Print</b> GenCAD Print semplifica il flusso di lavoro di produzione della stampa 3D facilitando e fornendo informazioni relative all'utilizzo della stampante, in modo da consentire al suo team di ottenere stampe di qualità in modo più rapido. Stampa direttamente da CAD, organizza code di stampa, monitora i livelli di materiale e lavora visualizzando il modello nei dettagli. La funzione di antipetura del vassoio e delle testine supporta la regolazione di varia di anelli in stampa.			

La precisione dipende dalla geometria. La precisione relativa alla precisione ottenibile sono ricavate da dati generati con una rete dimensionale del 90%. La precisione dei componenti Z include un'ulteriore tolleranza di -0,001" (senza della sezione).

\*Per ulteriori informazioni, vedere il white paper sulla precisione dei sistemi Stratasys F900.

Figura 83 - scheda tecnica Stratasys F370

	A4v4
Max printing envelope*	295x195x200mm
Nozzle	2 (3 opt.)
Max nozzle T	450°C
Max bed T	160°C
Max heated chamber T	90°C
Max speed	300 mm/sec
Removable tray	yes
Mechanical precision XY	0,011 mm
Polymer	Any thermoplastic**
Elastomers	Yes (opt.)
Min/Max layer thickness	0.1 / 0.6 mm
Software	SSI
Operating system	Windows 32/64
Networking	Optional
Certification	CE
Peak power	5A 230V
Size	528 x 515 x 615 mm
Weight	43 Kg

Technical data may be changed without notice  
 \*: standard configuration, all extruder used  
 \*\*: any polymer available as filament



Figura 84 - scheda tecnica 3ntr A4v4

## 5.1. Modifiche cad funzionali alla stampa

Purtroppo, per le caratteristiche della macchina in questione attualmente a disposizione nel laboratorio, non è stato possibile realizzare il progetto di base come idealmente pensato, ossia senza che vi sia richiesto l'assemblaggio. Infatti, teoricamente esistono stampanti in grado di generare supporti all'interno della camera del cilindro, i quali successivamente alla stampa vengono sciolti e rimossi dalla stessa, ciononostante non è stato possibile realizzare il prototipo con le stampanti in dotazione con tale tecnica. Si è dunque optato ad effettuare le seguenti modifiche:

- I due cilindri delle dita sono stati divisi in due metà, da unire in seguito attorno al pistone, e sono inoltre stati separati dalla cerniera che ne controlla la rotazione e l'unione alla falange di riferimento. Questo per consentire di stampare separatamente in un unico file il resto dell'assieme, e poter in seguito mediante operazioni manuali, chiudere i cilindri attorno ai pistoni. Ancora, la camera interna del cilindro è stata scanalata con guide a di  $50^\circ$  ogni  $40^\circ$  di rotazione che consentissero un miglior innesto e coesione dei due differenti materiali a contatto, ossia l'ABSplus costituente il cilindro e il TPU costituente la camicia vera e propria in cui scorrerà il pistone. Sulle superfici laterali dei cilindri sono stati creati degli intagli dello spessore di 1mm per favorire il successivo incollaggio.
- Sono stati modificati i condotti di attuazione, per renderli più idonei al fissaggio dei tubi standardizzati di comando per il collegamento pneumatico, ciò per far sì che garantissero il bloccaggio degli stessi, ricordando la forma del nipplo.

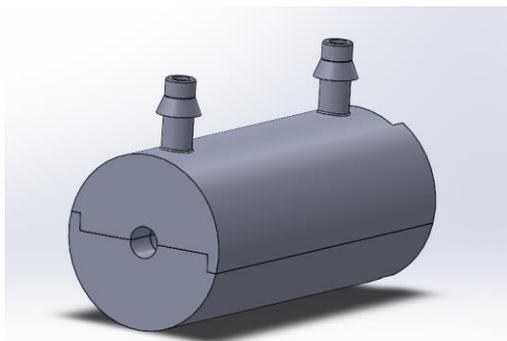


Figura 85 - vista cilindro modificato

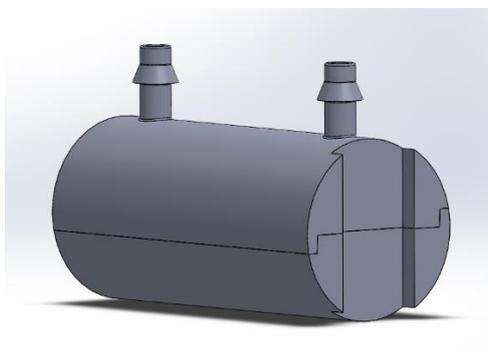


Figura 86 - dettaglio modifica attacco cerniera

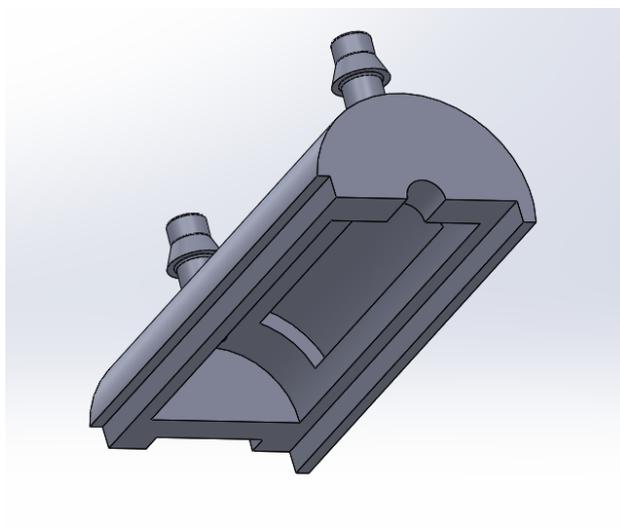


Figura 87 - parte superiore del cilindro con intagli e sedi

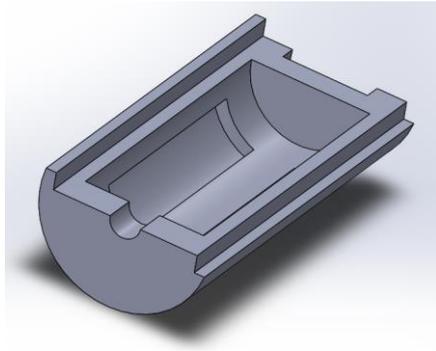


Figura 88 - parte inferiore cilindro con intagli e sedi



Figura 89 - modifiche ai condotti di attuazione

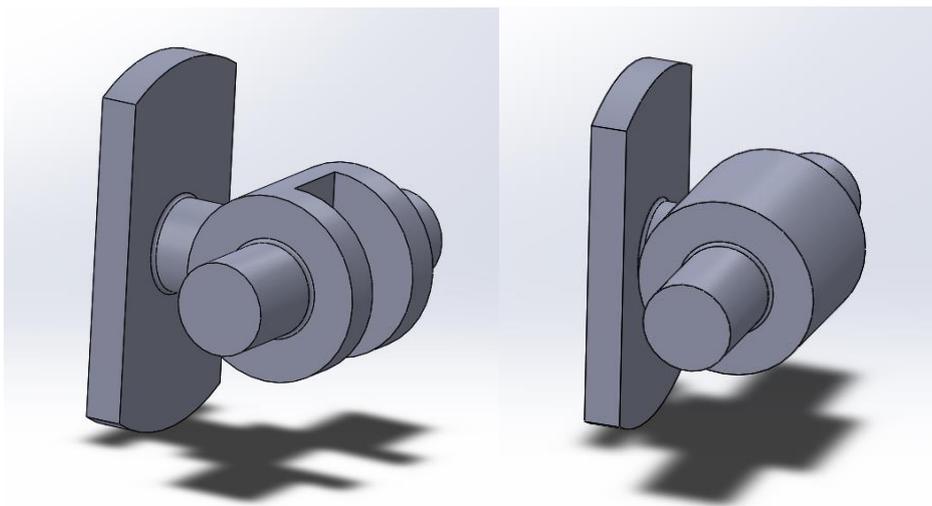


Figura 90 - cerniere modificate per assemblaggio successivo

Anche la camicia interna in TPU dei cilindri è stata divisa in due metà, superiore ed inferiore, e poiché si realizza direttamente in un'unica stampa multimateriale, collegata all'ABS dei cilindri, è stato necessario creare le già menzionate guide che fungessero da supporto per il fissaggio del materiale.

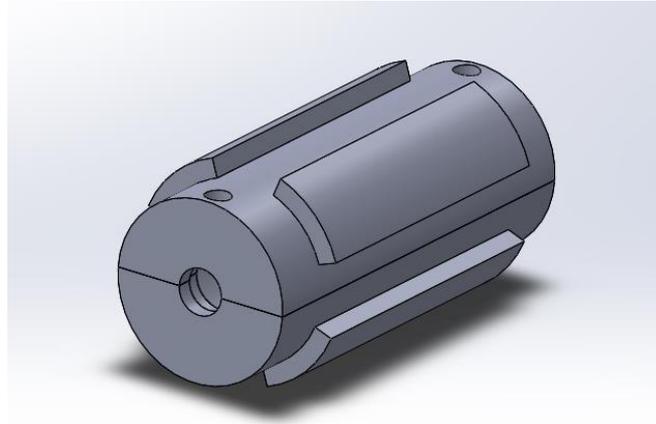


Figura 91 - camicia interna del cilindro divisa e con estrusioni per il fissaggio

Falangi, pistoni e cerniere infatti sono state invece realizzate in un'unica stampa senza assemblaggio, cercando di tenere fede a quello che era l'obiettivo iniziale della tesi, ossia la realizzazione della mano senza che fosse necessario un successivo assemblaggio.

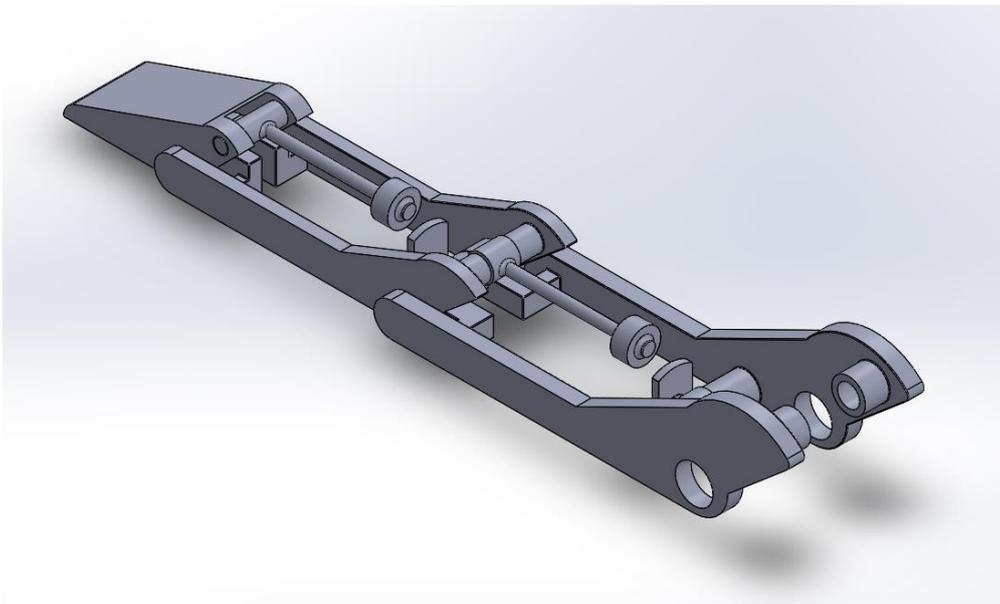


Figura 92 - assieme senza cilindri

Ulimo accorgimento è stato quello di definire il gioco minimo di accoppiamento fra superfici di 0,3mm, per far sì che nella stampa fossero riconosciuti come componenti separati, avendo una sensibilità di posa di strati di 0,20mm. Se tale condizione non fosse rispettata, non riconoscerebbe gli elementi come separati e si genererebbe un solido unico.

Si sono inoltre raccordate tutte le superfici con un raggio di raccordo pari allo strato minimo di posa, ossia 0,20 mm.

## 5.2. Stampe realizzate

Una volta ottenuti i file cad finali compresi di modifiche precedentemente elencate, si è proceduto a convertirli in file STL idonei per la stampa.

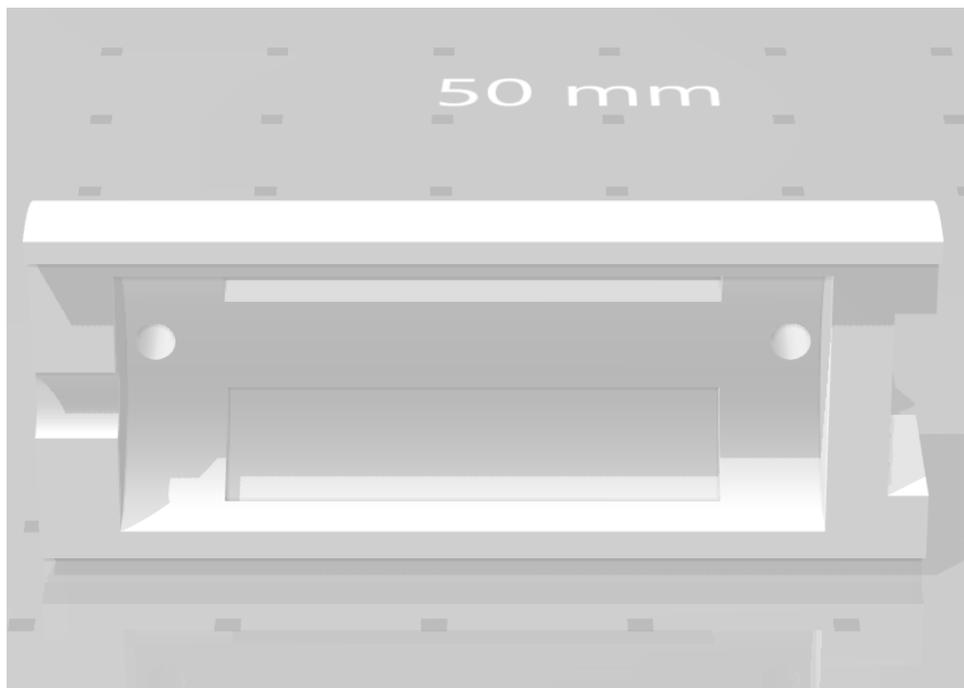


Figura 93 - STL del cilindro

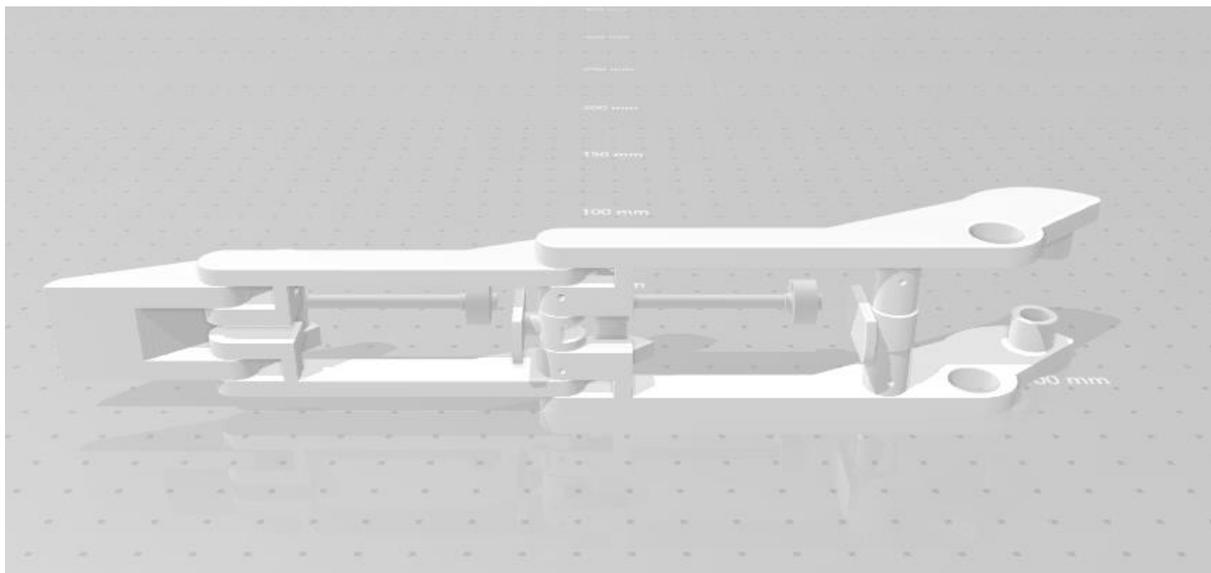


Figura 94 - STL dell'assieme senza cilindri

Questi file STL vengono elaborati con il software **Grabcast** di stratasys che gestisce i polimeri. Si definisce l'orientamento e viene impostato un piccolo spurgo iniziale per ottimizzare la resa del materiale e viene impostato lo strato minimo per la massima qualità.

Si può scegliere il grado di riempimento dell'oggetto, per farlo pieno oppure ad alta densità. Il problema del pieno è che può creare tensioni che su pezzi grandi, alternativamente si potrebbe scegliere struttura a nido d'ape. Si imposta anche il supporto che può essere intero o parziale. Oppure giocare sul fatto che ricopra o meno tutte le superfici. In realtà valgono queste considerazioni per pezzi grandi, non nel nostro caso in cui le dimensioni sono ridotte.

Altro software importante che interviene in questo momento è **Materialise magics**, il quale consente in automatico, una volta inserito il file STL da stampare e definito l'orientamento del pezzo, di correggere gli errori rilevabili evidenziati nella prima parte di questa tesi, ossia la correzione di geometrie che si intersecano o che non combaciano perfettamente, cosa facilmente riscontrabile, soprattutto per geometrie elaborate che vengono successivamente scomposte in triangoli.

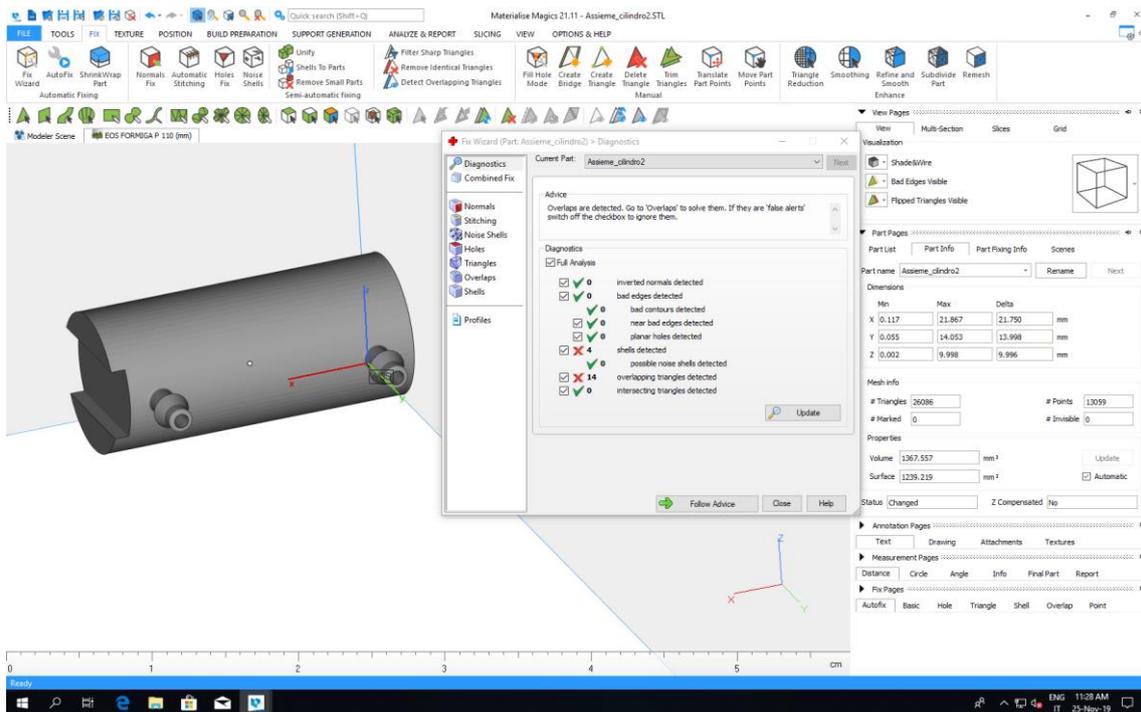


Figura 95 - cattura immagine dell'ambiente di lavoro di Grabcast, in particolare con attenzione alle correzioni apportate da materialise magics su STL del cilindro

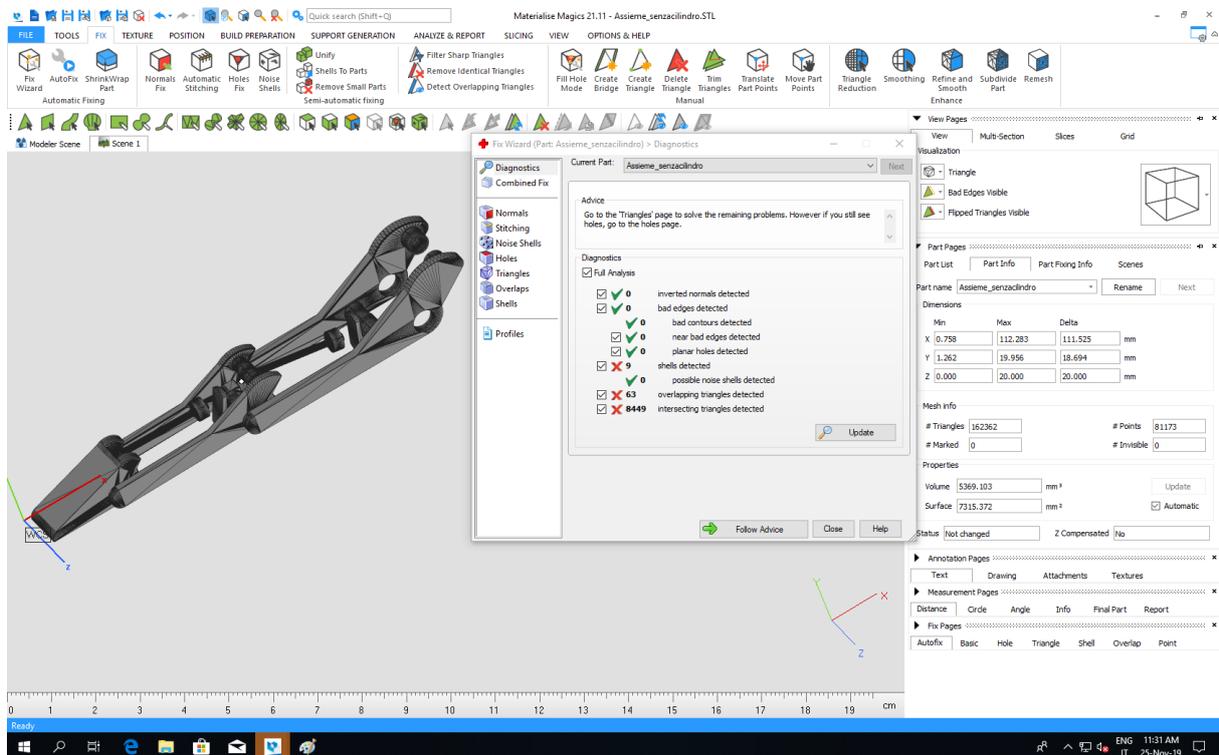


Figura 96 - cattura immagine dell'ambiente di lavoro di Grabcast, in particolare con attenzione alle correzioni apportate da materialise magics su STL dell'assieme senza cilindri

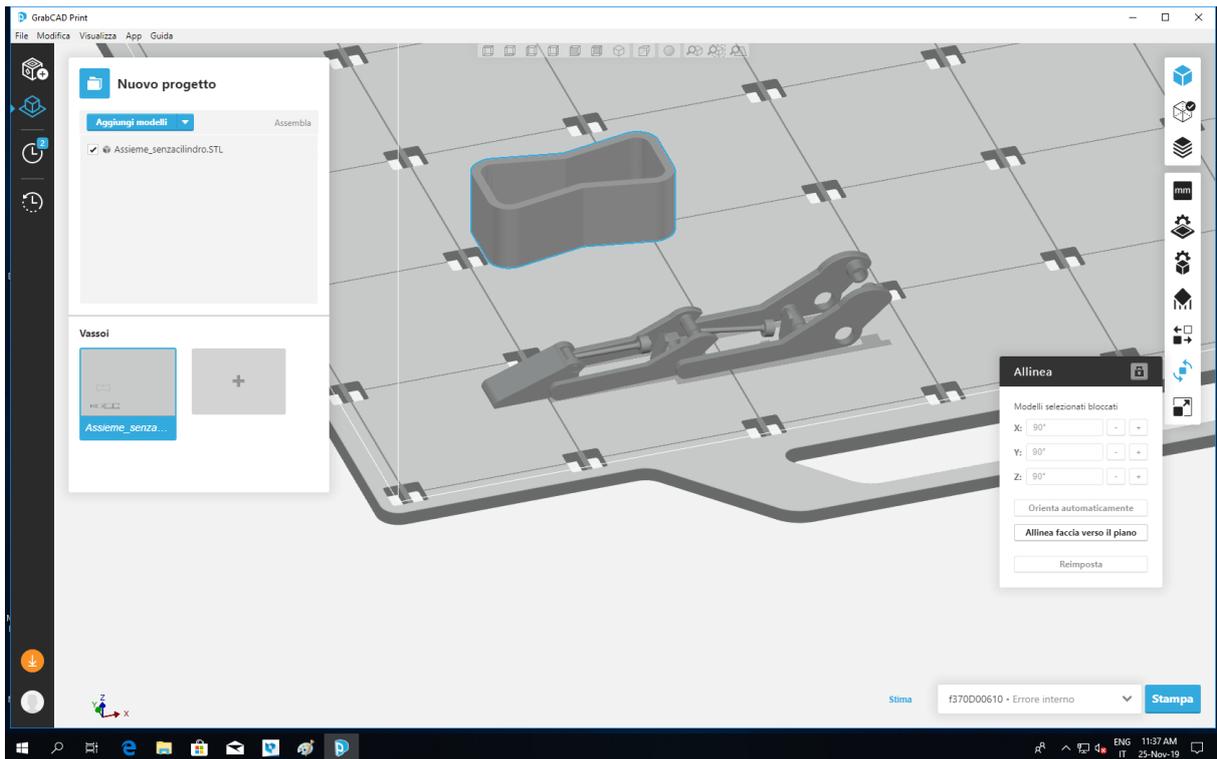


Figura 97 - cattura immagine dell'ambiente di lavoro di Grabcast, in particolare con attenzione all'orientamento dell'assieme senza cilindri sulla piastra e solido di spurgo.

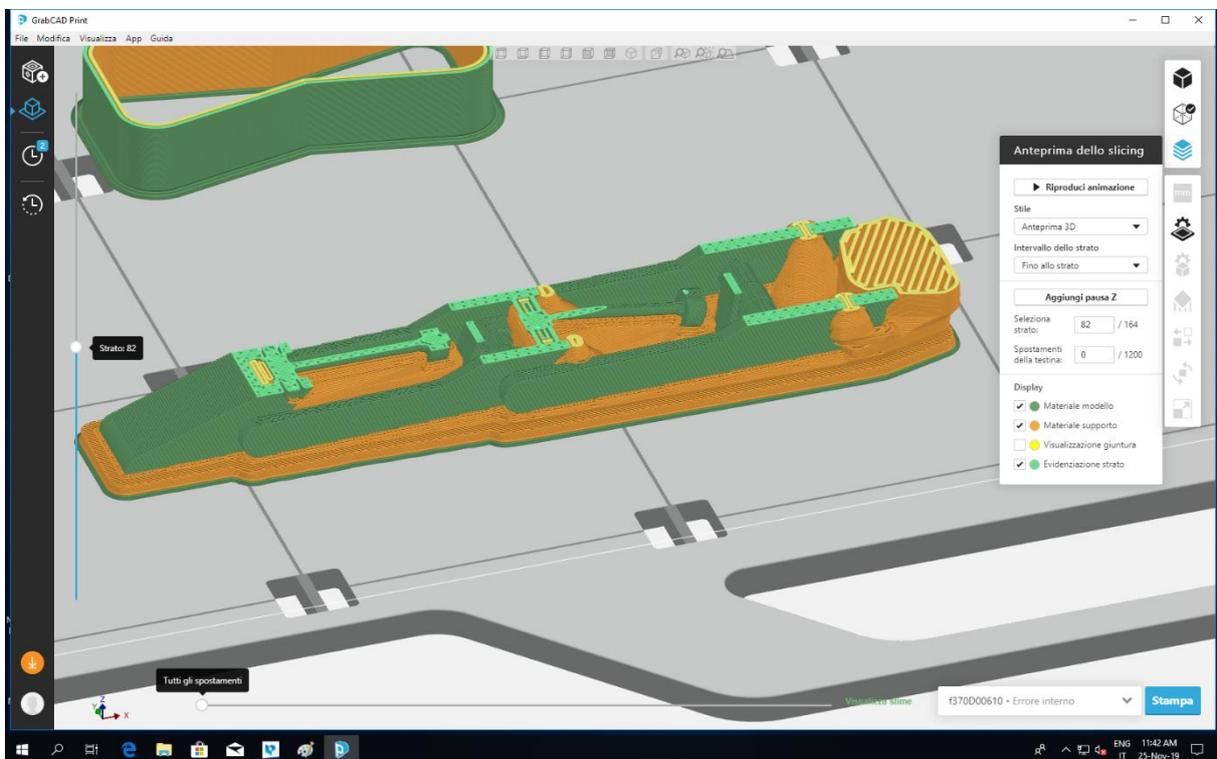


Figura 98 - cattura immagine dell'ambiente di lavoro di Grabcast, in particolare con attenzione alla deposizione del materiale di supporto

Una volta effettuati questi passaggi, il componente può essere stampato. Dopodiché il tempo di stampa effettivo varia a seconda delle dimensioni del pezzo, per esempio, nel caso in esame, l'assieme senza cilindri è stato realizzato in 8h e 30minuti circa.

Una volta stampati, i pezzi sono stati tenuti a bagno in una vasca industriale riempita con 40 litri di acqua bollente e soda caustica per diverse ore, procedimento necessario ad eliminare i supporti generati nella stampa.

### **5.2.1. Stampa in scala 1:1**

Sono stati effettuati diversi tentativi di stampa, la prima versione in scala 1:1 ha presentato dei risultati non soddisfacenti.

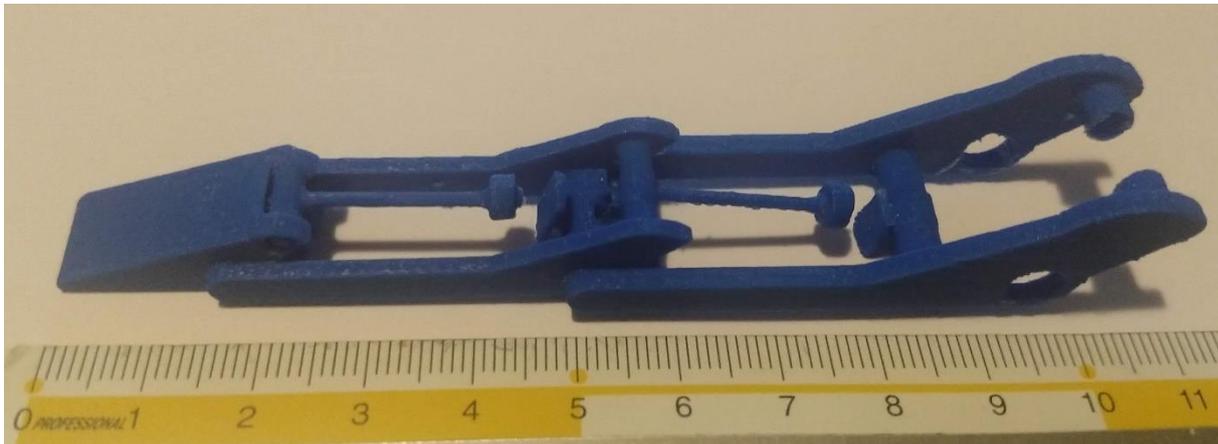


Figura 99 - stampa in scala 1:1 dell'assieme senza cilindri

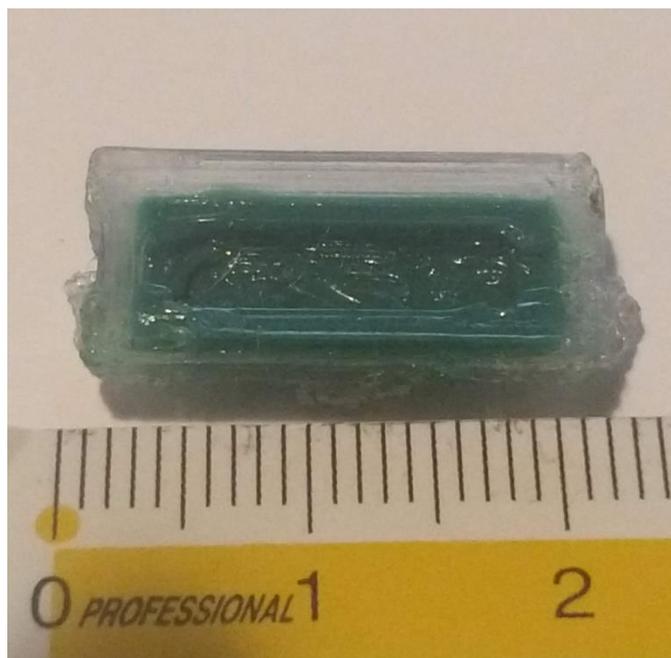


Figura 100 - parte inferiore del cilindro

Le dimensioni ridotte si sono rivelate incompatibili con le caratteristiche meccaniche e superficiali richieste per il funzionamento preventivato, rendendo di fatto impossibile il testing, per via di superfici scabrose e pistoni poco resistenti.

### **5.2.2. Stampa in scala 2:1, prima versione**

Si è quindi optato per una stampa in scala 2:1 dell'assieme, per cercare comunque di avere delle prove che validino il progetto di base. La prima versione prevedeva che i cilindri fossero stampati divisi in due parti, direttamente sulla stampante multimateriale, che stampa insieme ABS e TPU, tuttavia anche in questo caso i risultati sono stati scadenti, rendendone ancora una volta impossibile il testing. Tale problema è da riscontrare nel fatto che la stampante multimateriale con ABS risente molto delle condizioni di umidità dell'ambiente in cui lavora. Complice anche una geometria complessa per quel che riguarda la stampa dei condotti di attivazione che rendono difficoltoso l'orientamento finale per la messa in posa della stampa, il risultato finale non è neanche misurabile, come si evince dalle immagini.

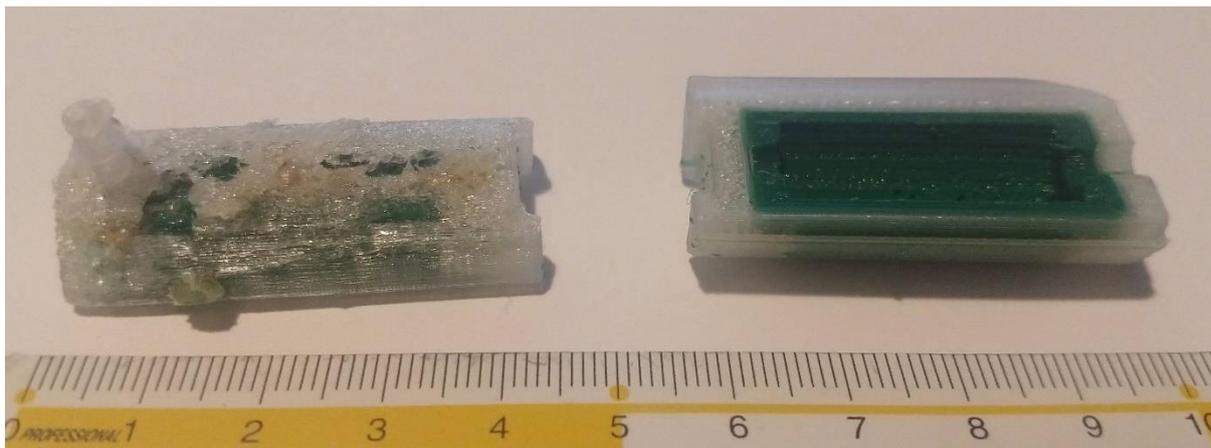


Figura 101 - parte inferiore e superiore dei cilindri in ABS con camicia in TPU ottenuti con stampa multimateriale

L'assieme senza cilindri, tuttavia ha presentato dei buoni risultati a livello di rifinitura globale, e quindi è stato conservato per il secondo tentativo di stampa.

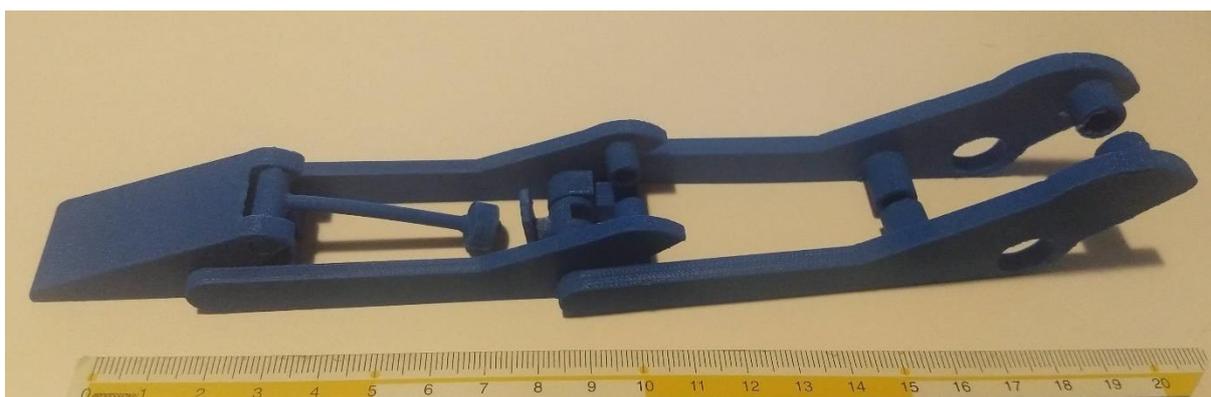


Figura 102 - assieme in scala 2:1 senza cilindri

### 5.2.3 Stampa in scala 2:1, seconda versione

Alla fine, si è scelto di stampare i cilindri divisi in 4 parti diverse, stampando singolarmente la camicia e la parte esterna, per parte inferiore e superiore. Ciò per evitare la criticità che si era riscontrata nella stampa multimateriale contemporanea fra ABS e TPU.

Ovviamente è stato necessario applicare delle modifiche per quel che riguarda le sedi di alloggiamento fra camicia interna di TPU e parte esterna del cilindro in ABS, non essendo più realizzate contemporaneamente di pezzo sulla macchina, ma da fissa dopo. Quindi le guide

create sulla superficie cilindrica della camera interna, e di contro sulla superficie cilindrica esterna della camicia, sono state ruotate di modo che fosse possibile unirle successivamente. Così facendo finalmente si sono ottenuti dei risultati accettabili per poter effettuare le prove sperimentali.

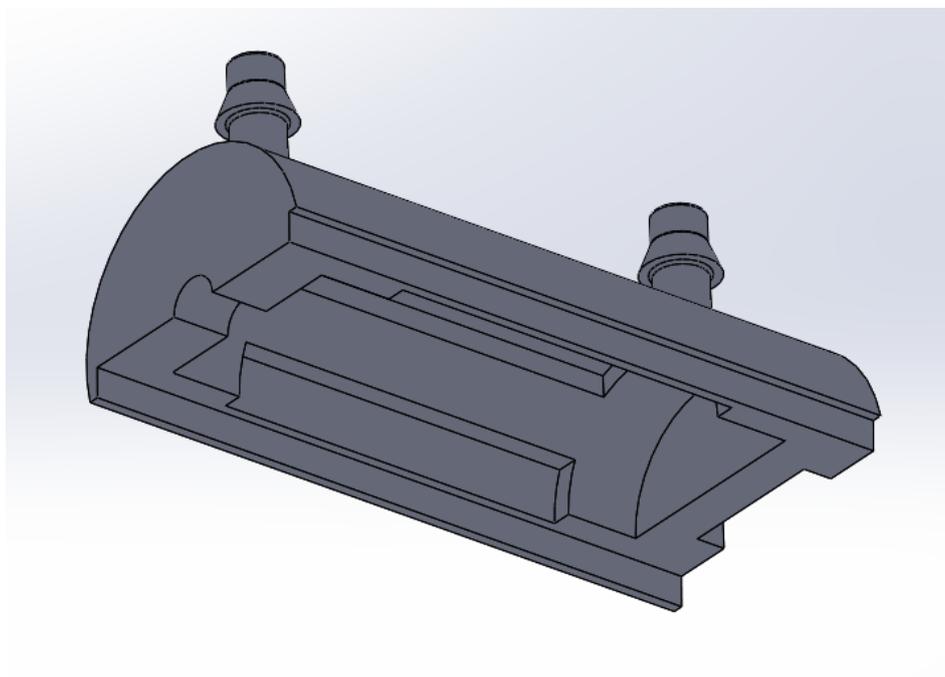


Figura 103 - parte superiore del cilindro con nuove guide

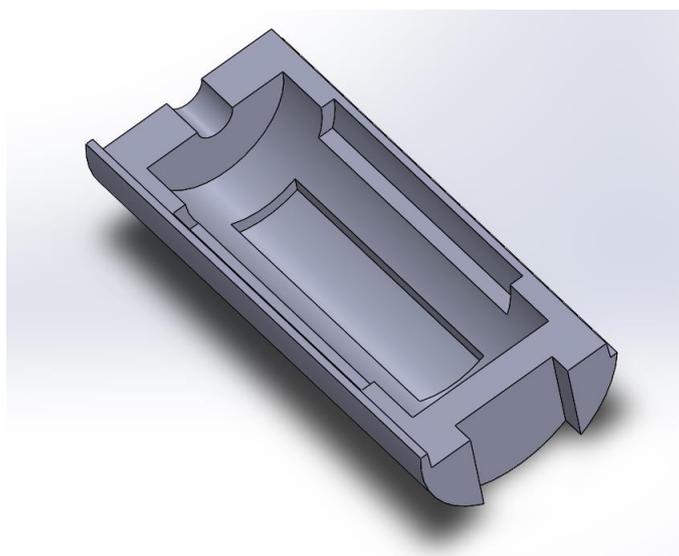


Figura 104 - parte inferiore del cilindro con nuove guide

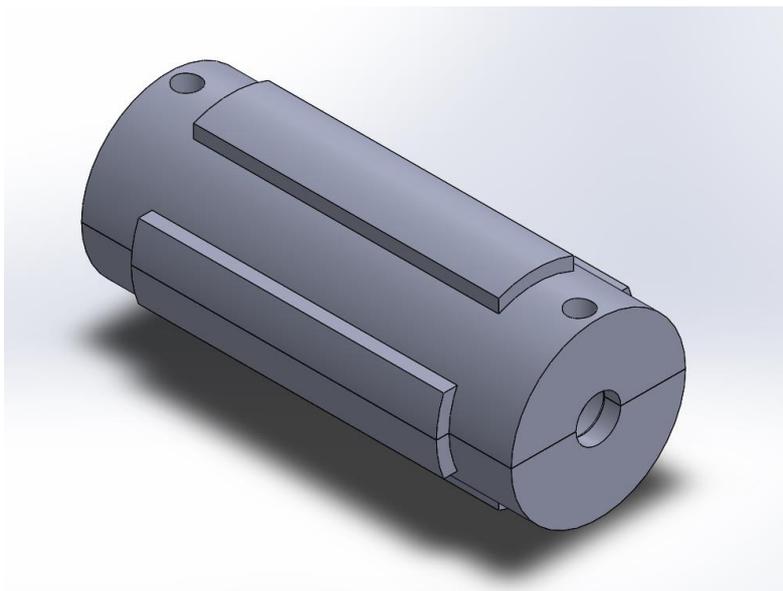


Figura 105 - camicia cilindro con nuove estrusioni per il fissaggio

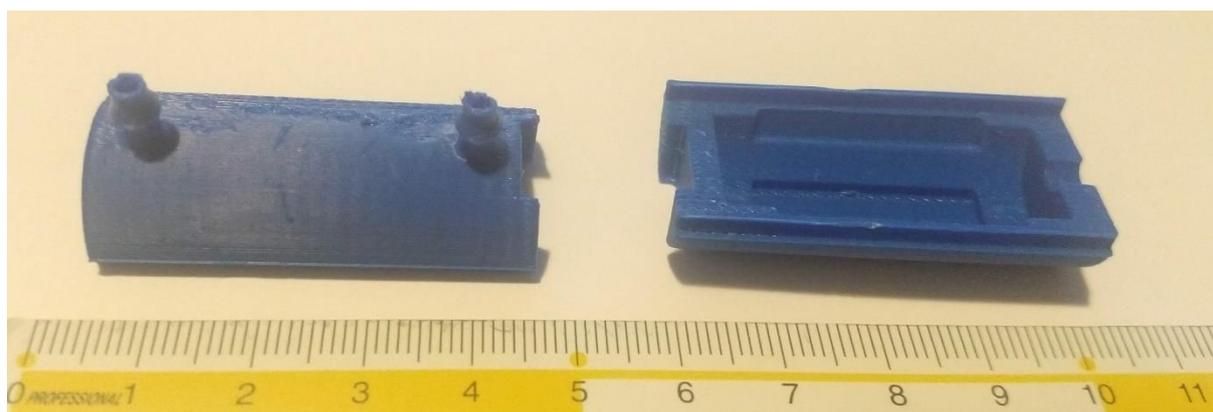


Figura 106 - parte superiore ed inferiore del cilindro in ABS



Figura 107 - camicia interna del cilindro in TPU

Si è quindi infine, ottenuti i pezzi sgrossati dei supporti, proceduto all'assemblaggio manuale dei cilindri, che sono stati incollati tra di loro attorno al pistone e alle relative cerniere.

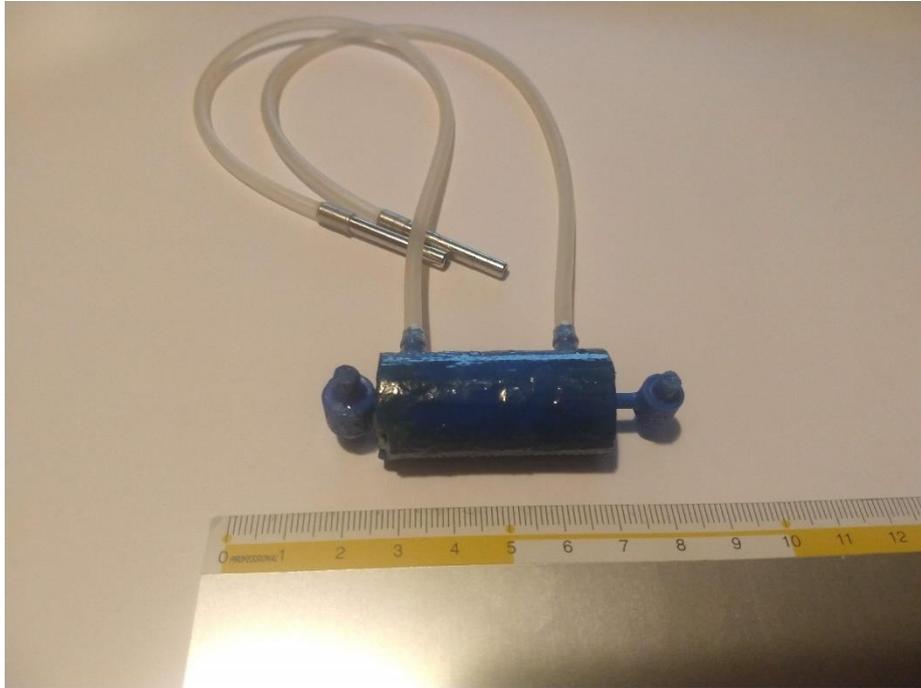


Figura 108 - cilindro finale assemblato

### 5.3. Versione Polyjet

Altro tentativo per stampare il prototipo in scala 1:1 è stato effettuato con la tecnologia Polyjet a deposizione di resina. È stata utilizzata una stampante **Stratasys Objet30 Prime** la quale conferisce alla stampa un livello di rifinitura decisamente superiore, avendo una risoluzione sullo strato depositato che scende fino a 16  $\mu\text{m}$ .

Sono riportate le caratteristiche del materiale in resina utilizzato e la scheda tecnica della relativa stampante.

# Our 3D PolyJet printers. More materials. More potential.



	Objet30 Pro	Objet30 Prime™	Objet Eden260VS™
Maximum Build Size (XYZ)	294 x 192 x 148.6 mm (11.57 x 7.55 x 5.85 in.)	294 x 192 x 148.6 mm (11.57 x 7.55 x 5.85 in.)	255 x 252 x 200 mm (10.0 x 9.9 x 7.9 in.)
System Size	826 x 600 x 620 mm (32.5 x 23.6 x 24.4 in.)	826 x 600 x 620 mm (32.5 x 23.6 x 24.4 in.)	870 x 1200 x 735 mm (34.2 x 47.2 x 29 in.)
System Weight	106 kg (234 lbs.)	106 kg (234 lbs.)	254 kg (560 lbs.)
Layer Thickness	28 microns (0.0011 in.), 16 microns (0.0006 in.) for VeroClear material	28 microns (0.0011 in.) for Tango™ materials; 16 microns (0.0006 in.) for all other materials	Horizontal build layers as fine as 16 microns (.0006 in.)
Accuracy <sup>1</sup>	0.1 mm (0.0039 in.)	0.1 mm (0.0039 in.)	20-85 microns for features below 50 mm; up to 200 microns for full model size
Model Material Options	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Rigid Opaque:</b> VeroWhitePlus™, VeroGray™, VeroBlue™, VeroBlack™, VeroBlackPlus™</li> <li>• <b>Transparent:</b> VeroClear™</li> <li>• <b>Simulated Polypropylene:</b> Rigur™, Durus™</li> <li>• High Temperature</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Rigid Opaque:</b> VeroWhitePlus, VeroGray, VeroBlue, VeroBlack, VeroBlackPlus</li> <li>• <b>Transparent:</b> VeroClear and RGD720</li> <li>• <b>Simulated Polypropylene:</b> Rigur, Durus</li> <li>• High Temperature</li> <li>• <b>Rubber-Like:</b> TangoGray™ and TangoBlack™</li> <li>• Bio-compatible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Rigid Opaque:</b> VeroWhitePlus, VeroBlackPlus®, VeroGray, VeroBlue</li> <li>• <b>Rubber-like®:</b> TangoPlus™, TangoBlackPlus™, TangoBlack, TangoGray</li> <li>• <b>Transparent:</b> VeroClear and RGD7202</li> <li>• <b>Simulated Polypropylene®:</b> Rigur and Durus</li> <li>• High Temperature<sup>2</sup></li> <li>• Bio-compatible<sup>2</sup></li> </ul>
Digital Material Options	-	-	-
Support Material	SUP705 (WaterJet removable) SUP706B (soluble)	SUP705 (WaterJet removable) SUP706B (soluble)	SUP705 (WaterJet removable) SUP707 (soluble)
Software	Objet Studio™	Objet Studio™	Objet Studio™

Figura 109 - scheda tecnica della stampante Stratasys Object30 Prime



# VeroWhitePlus™ (RGD835)

RIGID OPAQUE MATERIAL SIMULATING STANDARD PLASTICS

	ASTM	UNITS	METRIC	UNITS	IMPERIAL
Tensile Strength	D-638-03	MPa	50-65	psi	7250-9450
Elongation at Break	D-638-05	%	10-25	%	10-25
Modulus of Elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000	psi	290,000-435,000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	75-110	psi	11000-16000
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2200-3200	psi	320,000-465,000
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	°F	113-122
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50	°F	113-122
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30	ft lb/inch	0.375-0.562
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.1-1.5	%	1.1-1.5
Tg	DMA, E»	°C	52-54	°F	126-129
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76	Scale M	73-76
Polymerized Density	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	1.17-1.18		
Ash Content	USP281	%	0.23-0.26	%	0.23-0.26

©2016 Stratasys Ltd. All Rights Reserved.

**stratasys**

Figura 110 - caratteristiche meccanica del VeroWhitePlus (RGD835)

Per tale stampa, non più multimateriale e soprattutto senza assemblaggio, è stato prodotto un cilindro a parte di prova come corpo unico, senza la separazione dunque tra camicia interna e parte esterna e soprattutto senza divisione in due metà da unire successivamente.

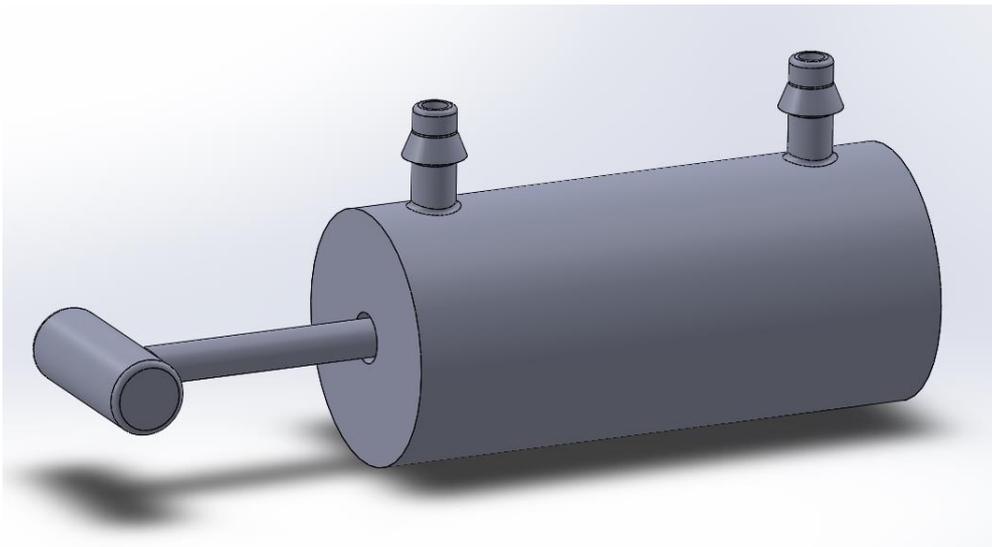


Figura 111 - cilindro per prova di stampa Polyjet

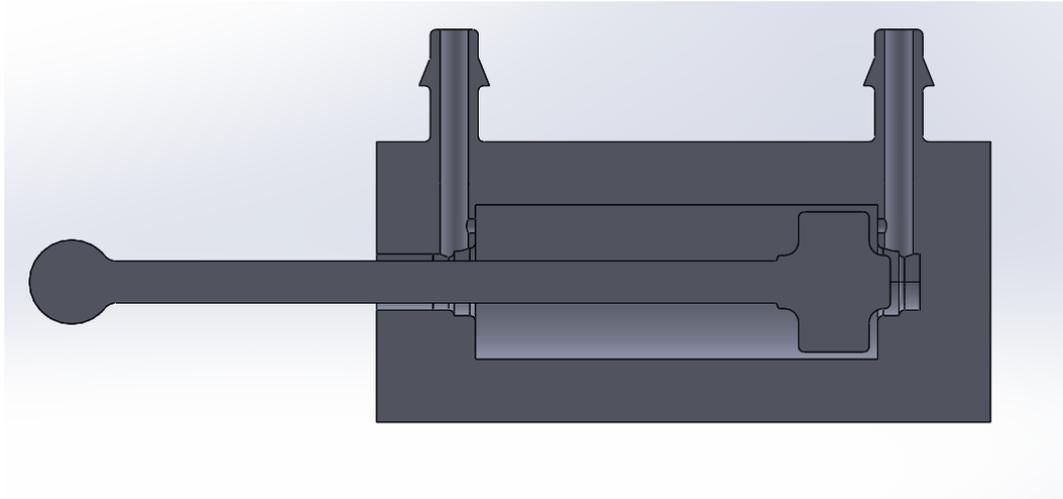


Figura 112 - vista in sezione del cilindro per la prova di stampa polyjet

Effettivamente tale stampa a livello di rifinitura generale è stata nettamente superiore, tuttavia, data la necessità di un gioco il quanto più possibile ridotto, impostato in questo caso a 0,25mm, il materiale di supporto necessario a creare la camera interna del cilindro non è stato espulso del tutto, nonostante le 24h in bagno in vasca industriale. Ciò ha causato il bloccaggio del pistone all'interno del cilindro, rendendo instabile il componente. Purtroppo, non è stato possibile effettuare nuovi tentativi di stampa con questa tecnologia in quanto era terminata la materia prima a disposizione nel laboratorio.

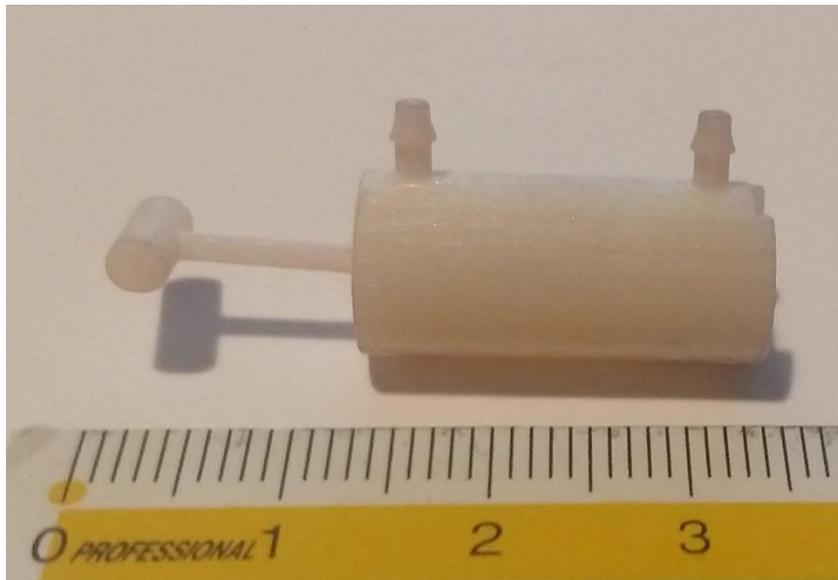


Figura 113 - cilindro realizzato in resina con tecnologia Polyjet in scala 1:1

## CAPITOLO 6. PROVE SPERIMENTALI

Una volta ottenuto un prodotto funzionale al testing, si è proceduto in prima analisi ad effettuare delle prove di tenuta e funzionamento sul singolo cilindro in seguito all'incollaggio.

Sono in seguito riportate le immagini della sola prova qualitativa, nella quale il cilindro è stato immerso in una bacinella d'acqua per valutare le perdite dallo stesso e dalle quali si è notato come in realtà vi fossero delle perdite anche sulla parte di superficie cilindrica che non necessitava incollaggio, per evidenti porosità createsi in fase realizzativa.



Figura 114 - immagine della prova qualitativa che evidenzia la formazione di bolle

Dato che il semplice incollaggio si è rilevato insufficiente, il cilindro è stato ripassato più volte con dell'acetone, il quale con questo tipo di materiale ha un doppio beneficio, poiché sia riesce a sciogliere superficialmente le due metà da unire, rendendo il serraggio più efficace, sia genera una patina ricoprente che funge da ulteriore tenuta.



Figura 115 - operazione di fissaggio con passate di acetone



Figura 116 - risultato finale in seguito alle passate di acetone

In seguito a questa miglioria, si è proceduto ad effettuare nuove prove in laboratorio, le quali stavolta hanno dato risultati. Si è calcolato innanzitutto quelle che erano le pressioni necessarie all'attuazione del cilindro. Sono di seguito riportati i risultati delle prove:

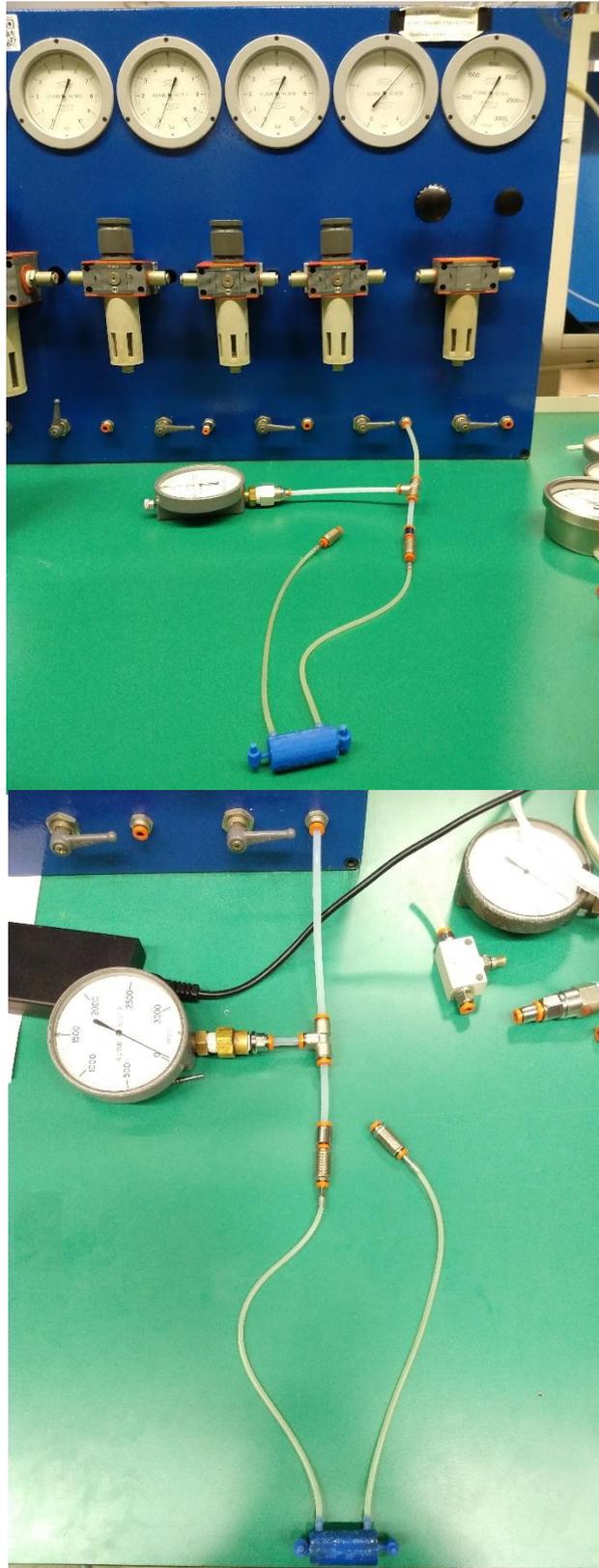


Figura 117 - immagini dell'impianto di prove per l'attuazione

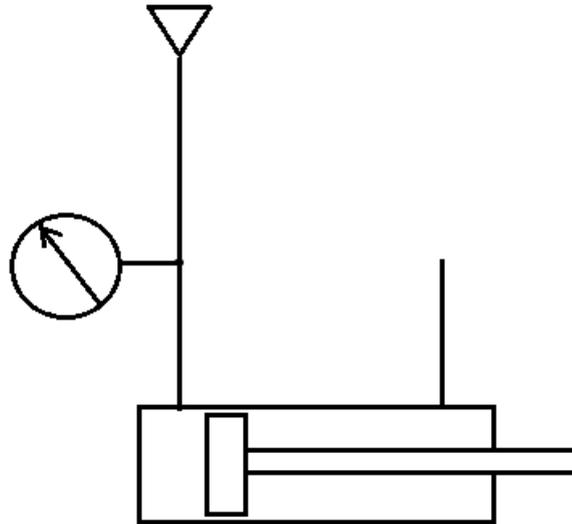


Figura 118 - schema pneumatico impianto di attuazione

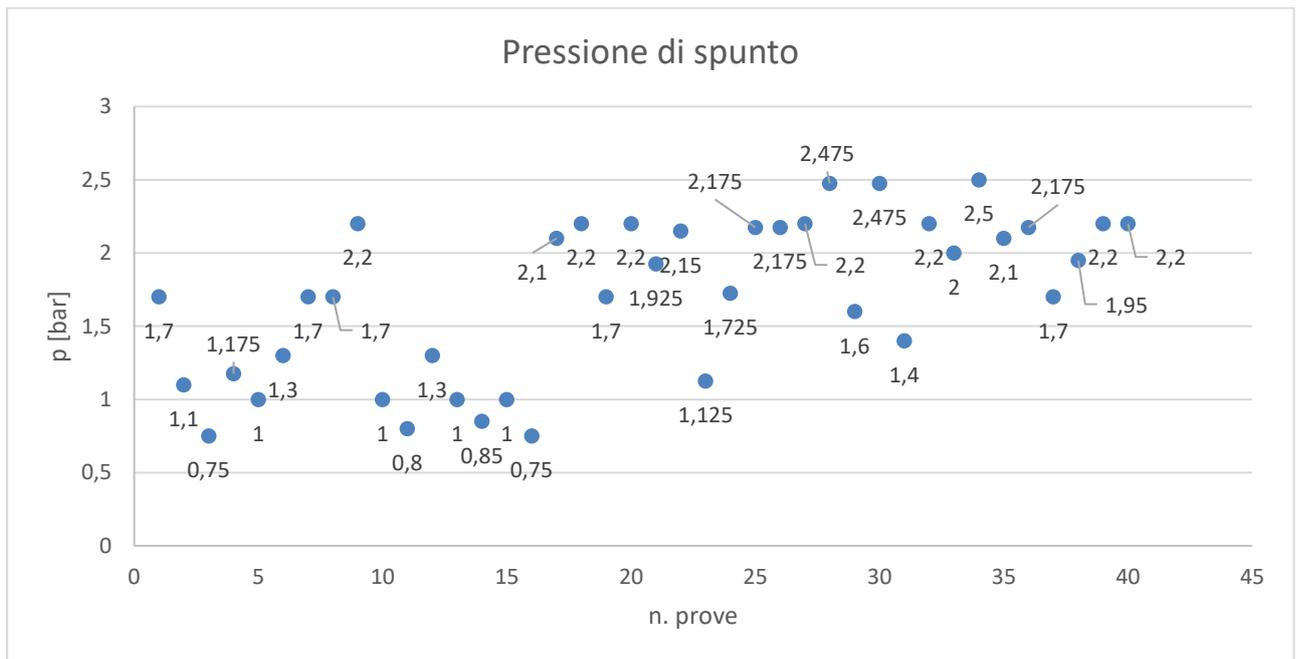


Figura 119 - grafico delle pressioni ottenute con 40 prove

È possibile dunque calcolare un valor medio, date le 40 prove, pari a:

$$\bar{p} = \frac{1}{40} \sum p_i$$

Dove  $p_i$  sono i singoli valori di pressione registrati. Si ottiene dunque, effettuando il calcolo  $\bar{p} = 1.7 \text{ bar}$ .

In seguito, senza comando, con un dinamometro si sono valutate le forze necessarie a vincere l'attrito di primo distacco

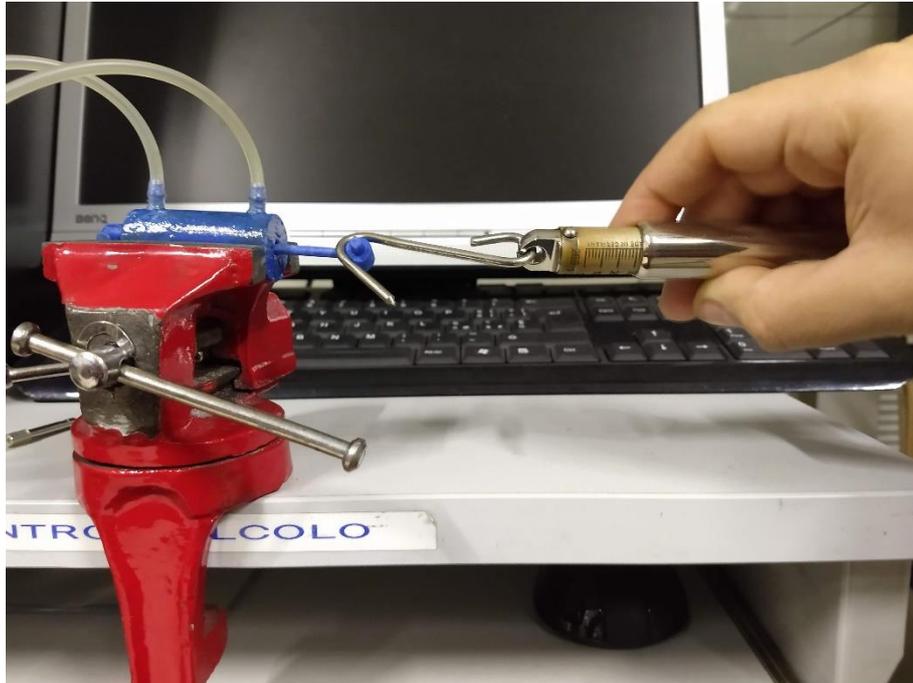


Figura 120 - prove dinamometriche

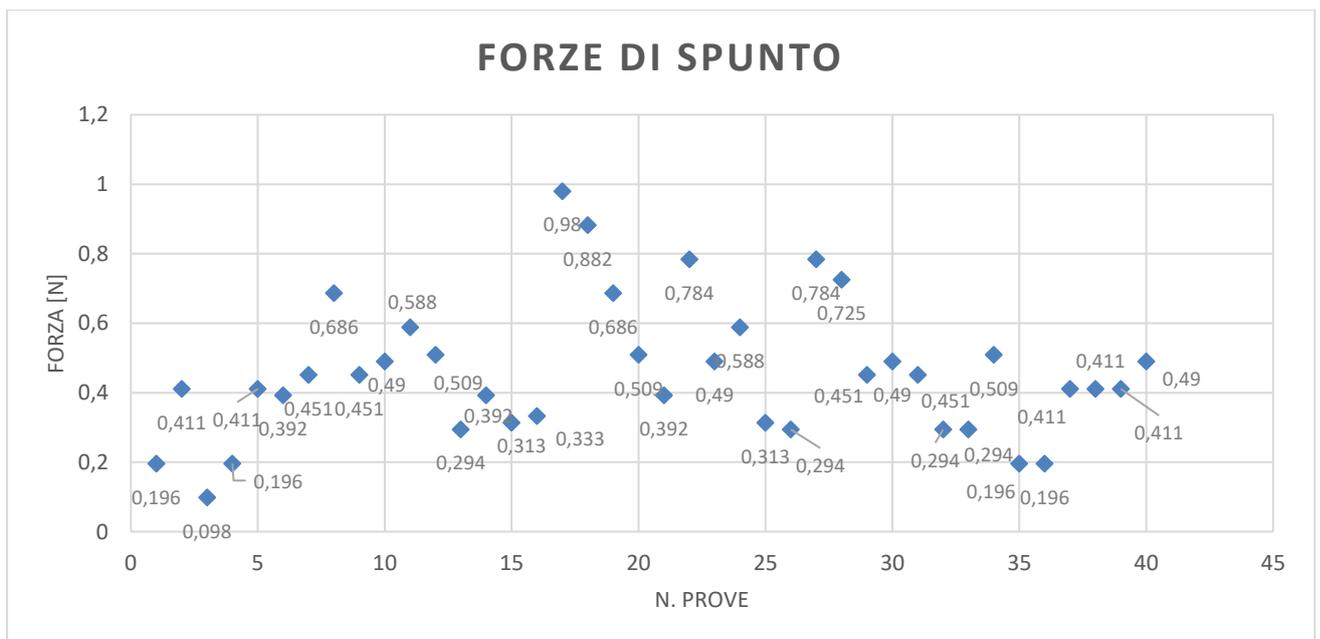


Figura 121 - forza rilevate per vincere l'attrito di primo distacco con 40 prove

È possibile dunque calcolare un valor medio, date le 40 prove, pari a:

$$\bar{F} = \frac{1}{40} \sum F_i$$

Dove  $F_i$  sono i singoli valori di forza registrati. Si ottiene dunque, effettuando il calcolo  $\bar{F} = 0.456 N$ .

È evidente come le imperfezioni all'interno del cilindro, sia per rifinitura superficiale, sia per le operazioni di incollaggio, abbiano generato delle superfici irregolari all'interno dello stesso, infatti si noti come i valori di attuazione e di forza di primo distacco siano notevolmente altalenanti, seppur si possa notare qualche assestamento intorno a dei valori che risultano più spesso presenti.

Dati gli scarsi risultati nell'attivazione del cilindro, si è proceduto in seconda battuta ad effettuare diverse prove per cercare di valutare quali fossero le perdite all'interno del cilindro stesso.

Per misurare le perdite, si è utilizzato un flussimetro che è stato collegato alternativamente sia alla camera anteriore che a quella posteriore: quando una delle due era attivata, la seconda era tappata, così da poter calcolare le fughe nel relativo percorso dell'aria.

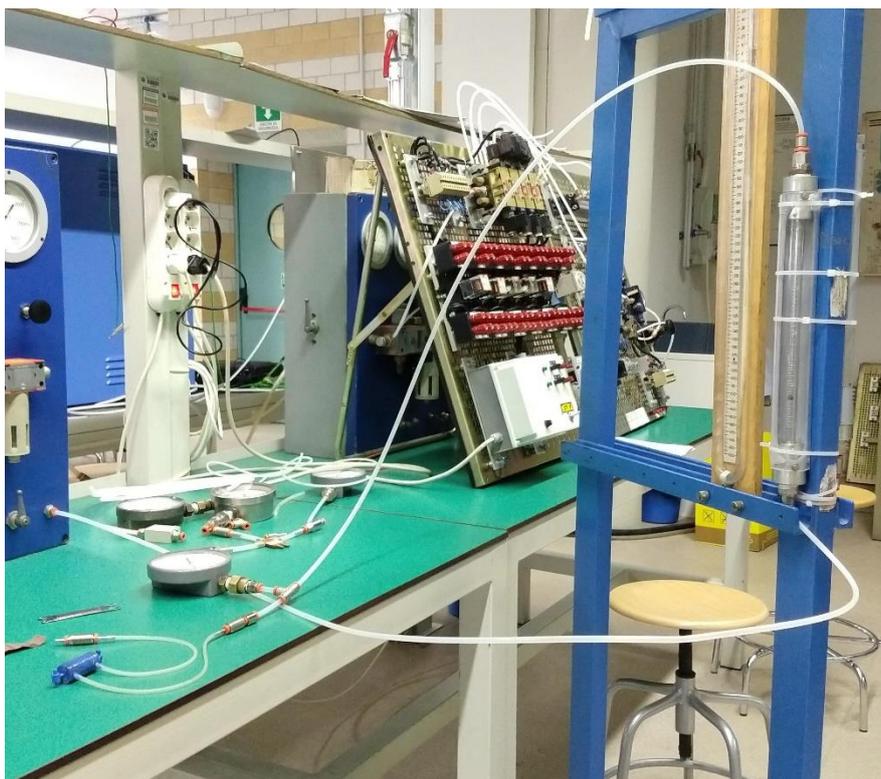


Figura 122 - impianto di prova per misurare le perdite

Le portate nelle caratteristiche sono portate in volumi normali. La scala graduata riportata sui flussimetri è in volumi normali, ma è riferita a condizioni specifiche di pressione e di temperatura utilizzate per la taratura dello strumento. Tali condizioni sono 20°C per la temperatura mentre per la pressione, la pressione ambiente (pressione assoluta di taratura  $P_T = 1 \text{ bar}$ ) se sulla targhetta dello strumento è indicato 760 mmHg, o la pressione di 1 bar relativo (pressione assoluta  $P_T = 2 \text{ bar}$ ) se sulla targhetta è indicato 1 Kg/cm<sup>2</sup>. Se le condizioni di prova sono differenti da quelle di taratura, la portata in volumi normali viene calcolata con la formula:

$$Q_{VN} = Q_L \sqrt{\frac{P T_T}{P_T T}}$$

Dove  $Q_L$  è il valore letto,  $P$  la pressione assoluta di prova (data la piccola caduta di pressione attraverso il galleggiante del flussimetro può essere letta sia a monte che a valle del flussimetro),  $P_T$  la pressione assoluta di taratura,  $T_T$  la temperatura assoluta di taratura e  $T$  la temperatura assoluta di prova.

Nel caso in esame, la  $P_T$  del flussimetro era pari esattamente a 1bar, mentre la  $T_T$  era 20°C. Si è provveduto quindi a correggere i valori di portata letti sul flussimetro utilizzando la formula di conversione, con i valori di pressione rilevati, trascurando la differenza di temperatura, considerato il rapporto  $\frac{T_T}{T} = 1$ .

Per l'esecuzione di tali prove si è proceduto registrando il dato di portata ogni aumento di 0.1 bar sulla pressione di alimentazione, partendo proprio dal valore 0.1 bar e arrivando ad un massimo di 2 bar. Si è scelto di fermarsi a 2 bar, data la scala del flussimetro il quale registra appunto un valore minimo di cm<sup>3</sup>/s ANR e un valore massimo di 220 cm<sup>3</sup>/s ANR, che era raggiunto proprio in corrispondenza dei 2 bar durante l'esecuzione.

Sono quindi state eseguite 4 prove diverse, ognuna ripetuta per 3 volte:

- 1) Perdite nel cilindro con camera posteriore tappata, camera anteriore attuata e pistone rientrato:

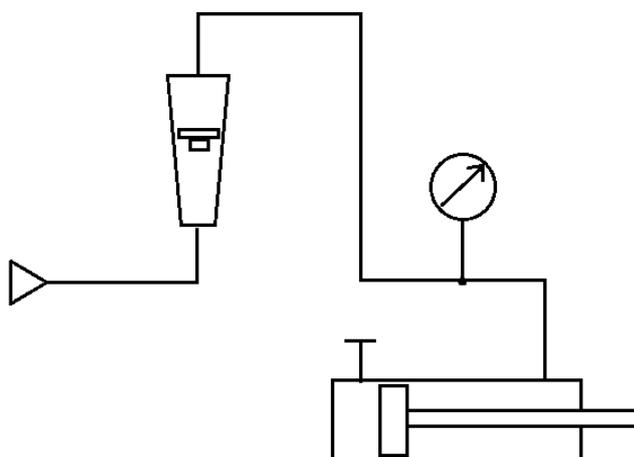


Figura 123 - schema pneumatico camera anteriore attuata con pistone rientrato

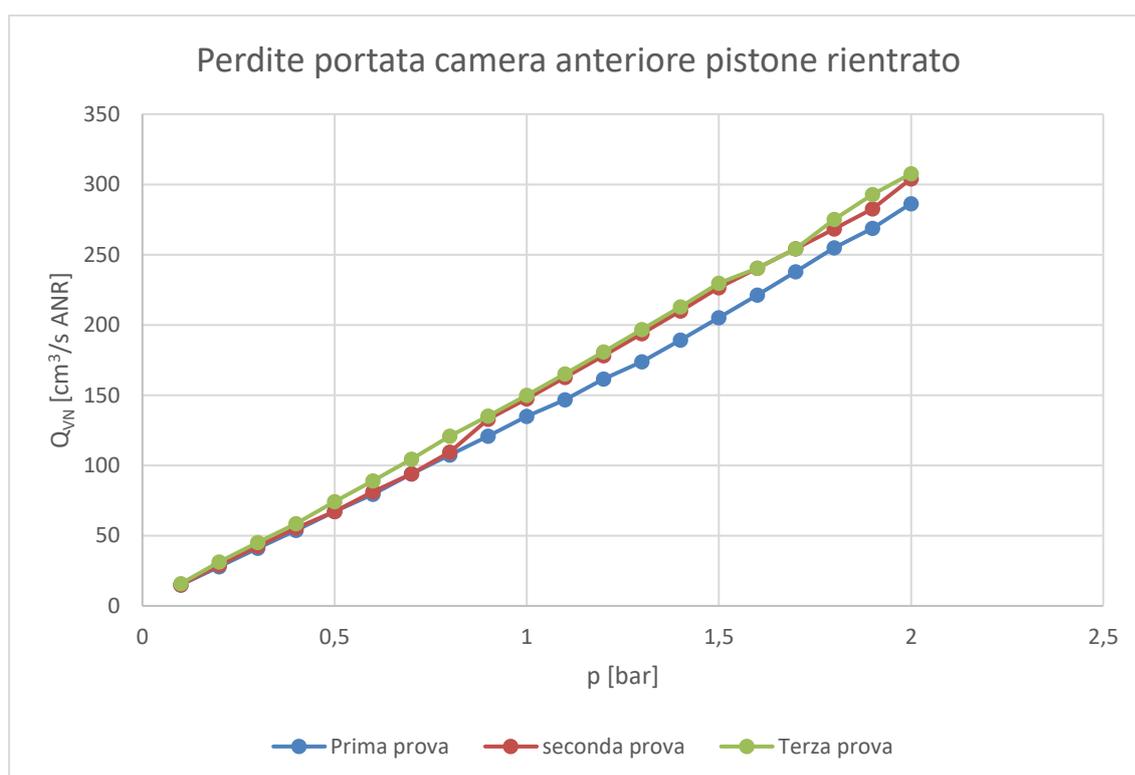


Figura 124 - grafico perdite camera anteriore con pistone rientrato e camera posteriore tappata

Nell'esecuzione di tali prove si è registrato un valore minimo di portata per 0,1 bar di alimentazione pari a 15 cm<sup>3</sup>/s ANR comune a tutte le prove. Le curve invece si differenziano in particolare da un certo punto in poi: la seconda e la terza prova hanno fatto registrare valori più alti di portata in generale su tutta la scala. In particolare, nella seconda prova (in rosso,

fig. 124) i dati rilevati sono rimasti in linea con la prima prova (in blu, fig.124) fino ad un valore di pressione di alimentazione di 0,8 bar, facendo registrare un livello di perdita pari a  $107 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$ .

La terza prova (in verde, fig. 124) ha fatto registrare valori più alti rispetto alla prima durante l'intera esecuzione.

In particolare, vengono riportati i valori massimi di perdita raggiunti per ogni prova con 2 bar di alimentazione, ossia  $286 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la prima prova,  $304 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la seconda e  $308 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la terza.

- 2) Perdite nel cilindro con camera posteriore tappata, camera anteriore attuata e pistone fuoriuscito:

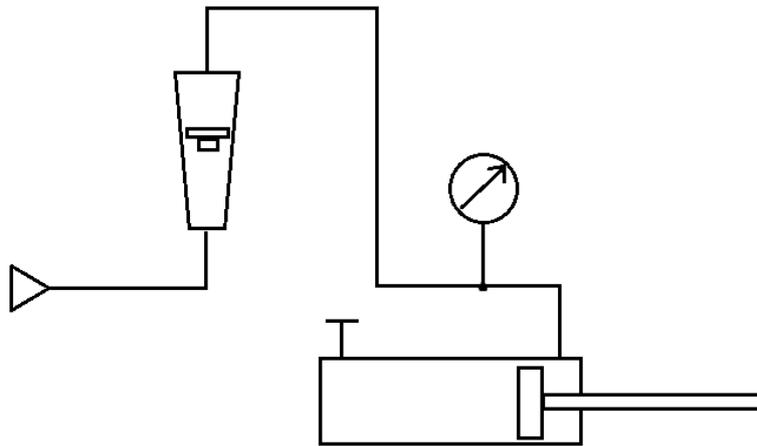


Figura 125 - schema pneumatico camera anteriore attuata e pistone fuoriuscito

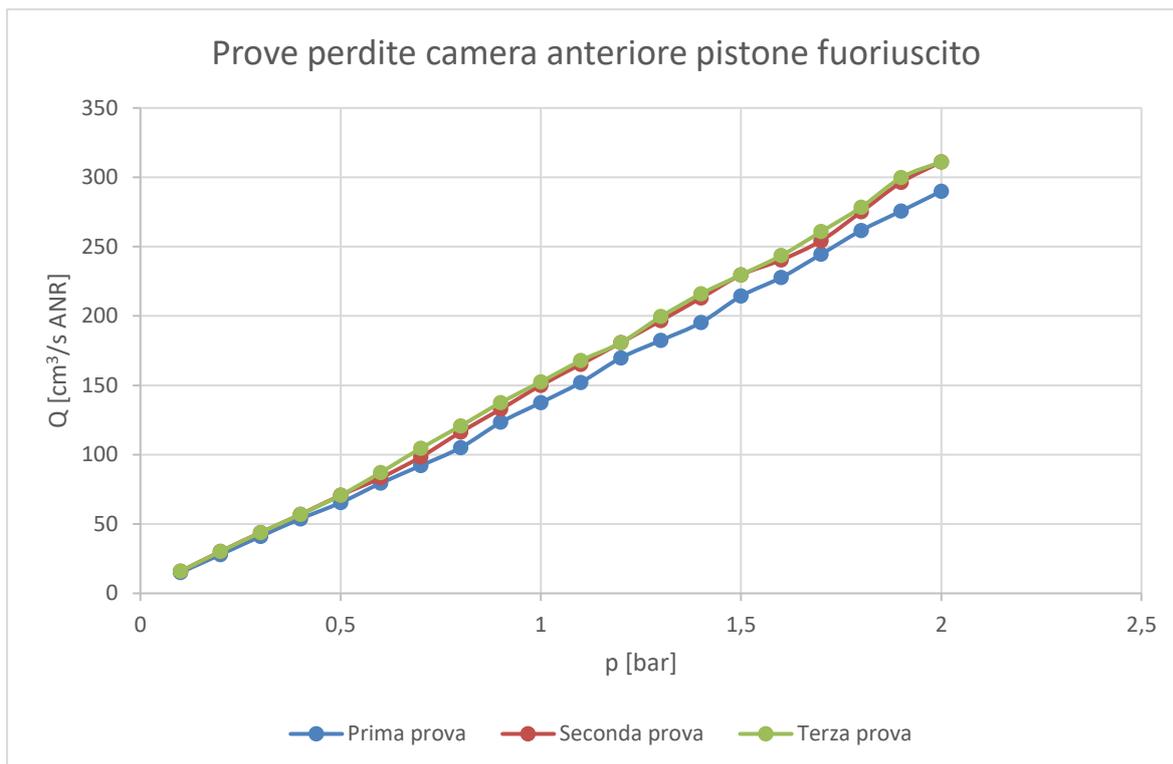


Figura 126 - grafico perdite camera anteriore con pistone fuoriuscito e camera posteriore tappata

Nell'esecuzione di tali prove si è registrato un valore minimo di portata per 0,1 bar di alimentazione pari a 15 cm<sup>3</sup>/s ANR comune a tutte le prove. Le curve invece si differenziano in particolare da un certo punto in poi: la seconda e la terza prova hanno fatto registrare valori più alti di portata in generale su tutta la scala. In particolare, nella seconda prova (in rosso, fig. 126) i dati rilevati sono rimasti in linea con la prima prova (in blu, fig.126) fino ad un valore di pressione di alimentazione di 0,4 bar, facendo registrare un livello di perdita di portata pari a 55 cm<sup>3</sup>/s ANR.

La terza prova (in verde, fig. 126) ha fatto registrare valori più alti rispetto alla prima durante l'intera esecuzione.

In particolare, vengono riportati i valori massimi di perdita raggiunti per ogni prova, ossia 290 cm<sup>3</sup>/s ANR per la prima prova, 311 cm<sup>3</sup>/s ANR per la seconda e per la terza.

Da segnalare il fatto che durante l'esecuzione di tali prove, essendo alimentata la camera anteriore ed essendo il cilindro completamente fuoriuscito, ci si aspettava che ad un certo valore di pressione ci sarebbe stato il rientro del pistone, come da normale principio di funzionamento, purtroppo ciò non è avvenuto.

3) Perdite nel cilindro con camera posteriore attuata e pistone rientrato:

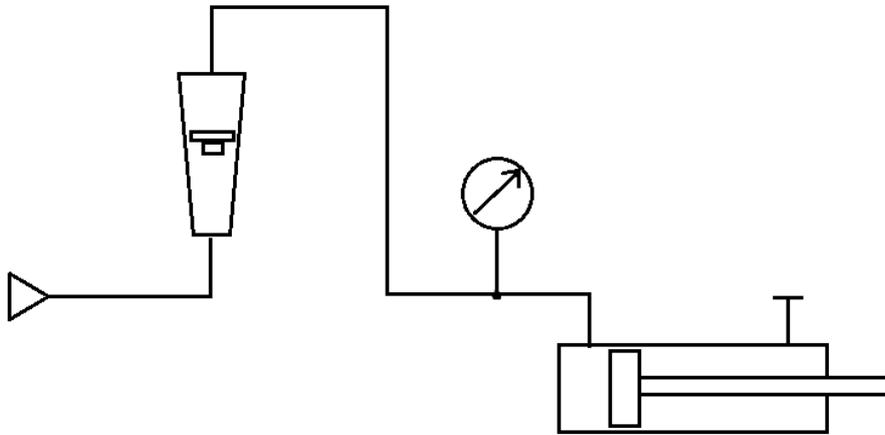


Figura 127 - schema pneumatico di misurazione delle perdite con attuazione su camera posteriore, pistone rientrato e camera anteriore tappata

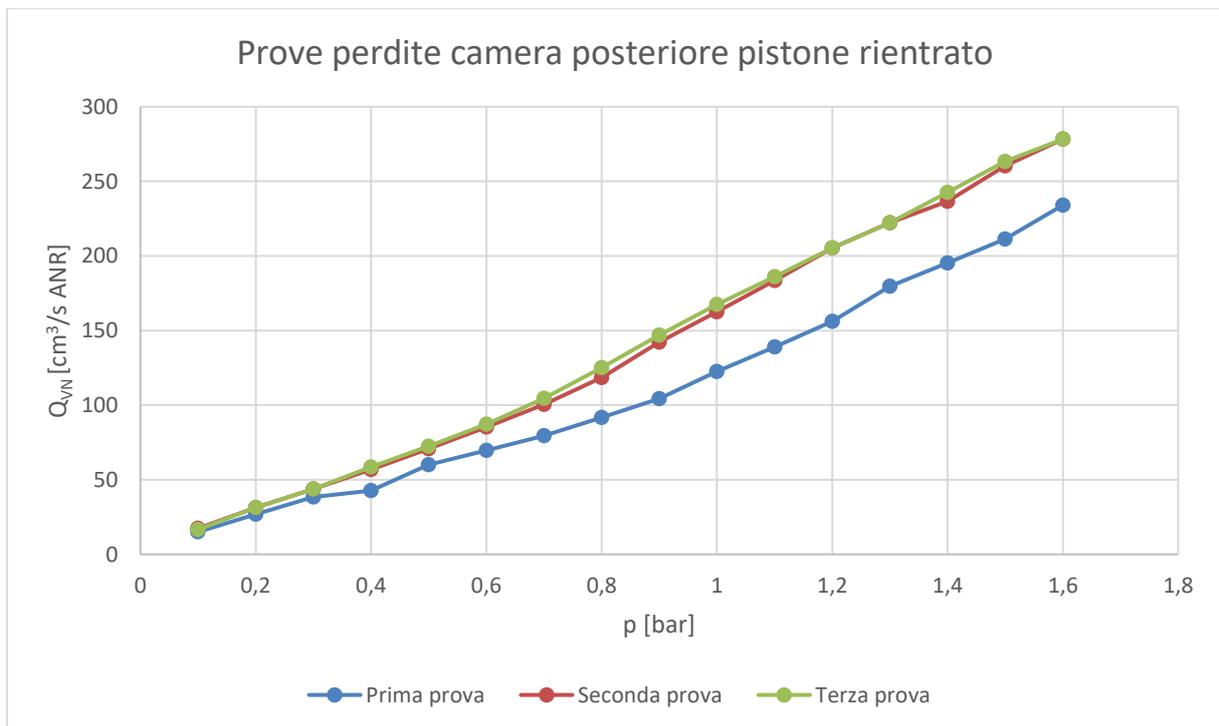


Figura 128 - grafico perdite camera posteriore con pistone fuoriuscito e camera anteriore tappata

Nell'esecuzione di tali prove si è registrato un valore minimo di portata già differente di prova in prova: le curve sono state separate fin da subito con 0,1 bar di alimentazione, facendo

registrare valori pari a  $15 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la prima prova (in blu, fig. 128),  $17 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la seconda (in rosso, fig. 128) e  $16 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la terza (in verde, fig.128). Le curve quindi si differenziano da subito, mentre la seconda e la terza prova hanno fatto registrare valori pressoché sovrapponibili durante l'intera esecuzione.

In particolare, vengono riportati i valori massimi di perdita raggiunti per ogni prova, ossia  $234 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la prima prova,  $278 \text{ cm}^3/\text{s ANR}$  per la seconda e per la terza, valori in questo caso raggiunti a 1,6 bar di pressione. In tal caso infatti, trattandosi di alimentazione effettuata nella camera posteriore a cilindro rientrato, non è stato necessario andare oltre in quanto ad 1,7 bar è avvenuta l'attuazione e il pistone è fuoriuscito, come si può notare infatti nei grafici (fig.128), a differenza delle prove eseguite in altre configurazioni, l'asse delle ascisse si ferma a 1,8 bar e gli ultimi valori sono registrati proprio in corrispondenza di 1,6 bar.

4) Perdite nel cilindro con camera posteriore attuata e pistone fuoriuscito:

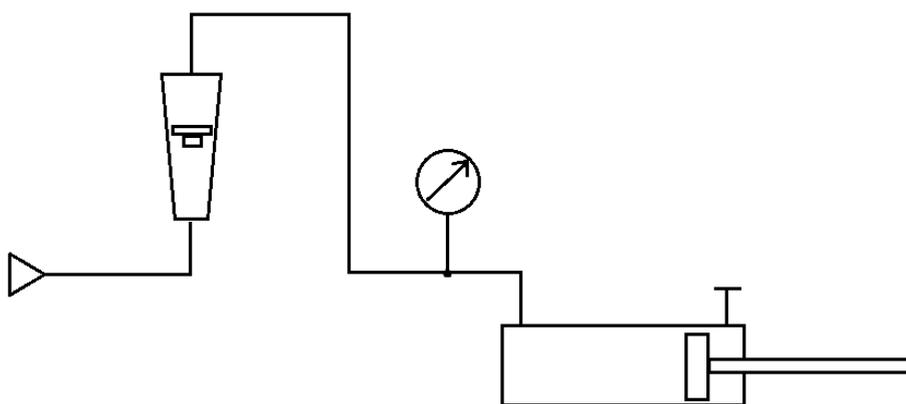


Figura 129 - schema pneumatico di misurazione delle perdite con attuazione su camera posteriore, pistone fuoriuscito e camera anteriore tappata

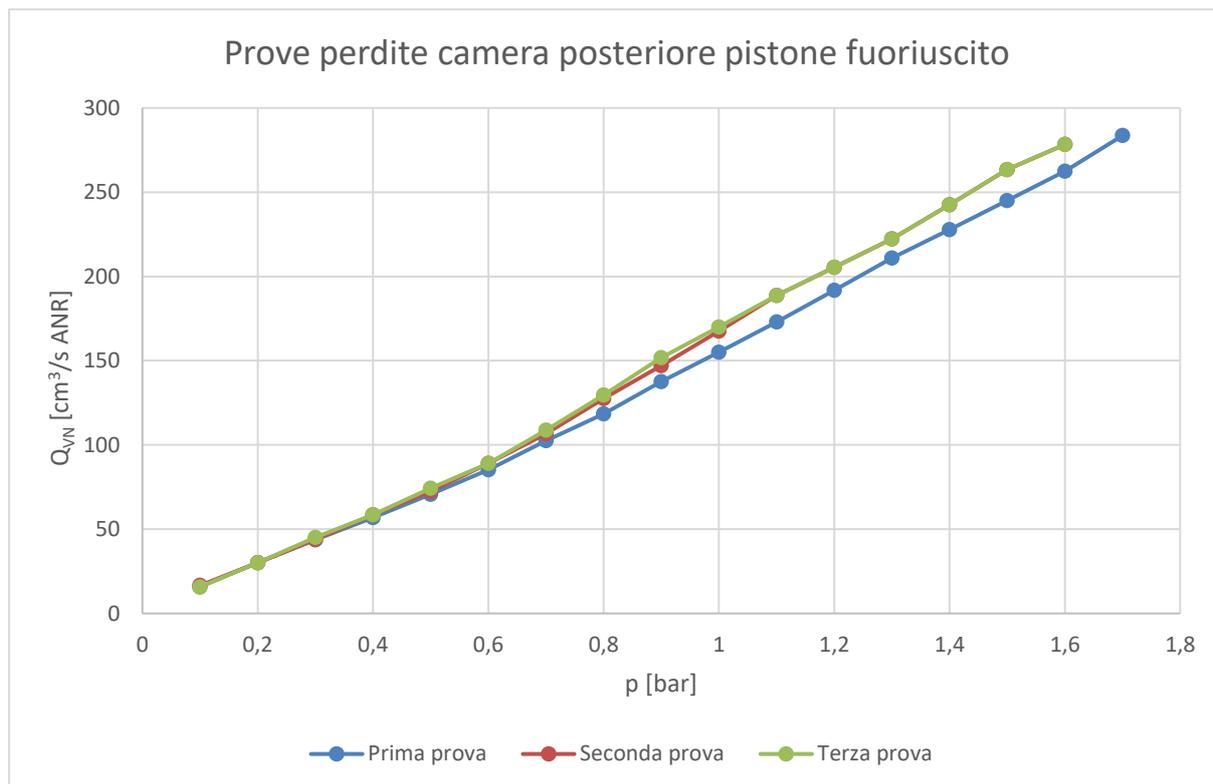


Figura 130 - grafico perdite camera posteriore con pistone fuoriuscito e camera anteriore tappata

Nell'esecuzione di tali prove si è registrato un valore minimo di portata per 0,1 bar di alimentazione pari a 16 cm<sup>3</sup>/s ANR comune a tutte le prove. Le curve invece si differenziano in particolare da un certo punto in poi: la seconda e la terza prova hanno fatto registrare valori più alti di portata in generale su tutta la scala. In particolare, nella seconda prova (in rosso, fig. 130) i dati rilevati sono rimasti in linea con la prima prova (in blu, fig.130) fino ad un valore di pressione di alimentazione di 0,5 bar, facendo registrare un livello di perdita pari a 72 cm<sup>3</sup>/s ANR.

La terza prova (in verde, fig. 130) ha fatto registrare valori più alti rispetto alla prima durante l'intera esecuzione.

In particolare, vengono riportati i valori massimi di perdita raggiunti per ogni prova, ossia 284 cm<sup>3</sup>/s ANR per la prima prova, 278 cm<sup>3</sup>/s ANR per la seconda e per la terza. In queste prove invece ci si è fermati a valori di pressione pari a 1,6 bar non perché ci fosse stata un'attuazione, ma semplicemente perché si è raggiunto prima rispetto alle altre prove, il fondo scala del flussimetro utilizzato, rendendo impossibile arrivare ai 2 bar preventivati. Ciò

dovuto probabilmente al fatto che, essendo state le ultime prove eseguite, evidentemente le tenute hanno ceduto leggermente, rendendo più alti i valori di perdita.

Commentando in generale, come si evince da tutte queste prove, le perdite sono sostanziali e costantemente in aumento con la pressione di attuazione, come presumibile. Si noti tuttavia che le seconde e le terze prove delle varie configurazioni sono state decisamente peggiori a livello prestazionale, facendo registrare valori più alti praticamente su tutta la scala di misurazione, ciò probabilmente dovuto al fatto che durante le prove stesse, la tenuta della colla del cilindro ha cominciato a cedere leggermente, causando perdite inevitabilmente maggiori.

Si è provveduto infine ad effettuare delle prove qualitative sempre immergendo in acqua il cilindro alimentato per valutare i miglioramenti apportati dalla ripassata delle superfici con acetone, dai quali, sempre basandosi su un'analisi solo qualitativa e quindi non oggettiva, sembrerebbe comunque la situazione di tenuta migliorata, essendosi generate meno bolle. Riprova di questo sono anche le prove realizzate che, seppur con risultati non esaltanti, sono state tuttavia eseguibili, a differenza del precedente tentativo in cui non vi era modo di attuare il cilindro.



Figura 131 - cilindro immerso in acqua per valutazione qualitativa della produzione di bolle

## CONCLUSIONI

L'obiettivo della presente tesi era dimostrare che fosse realizzabile una mano articolata attuata pneumaticamente che fosse interamente ottenuta mediante stampa 3D. Per effettuare l'azionamento si è optato per dei cilindri pneumatici.

Una volta ideato il progetto, si è proceduto in prima battuta, ad effettuare un'analisi cinematica, dinamica e strutturale di una sola delle dita che costituiscono l'intera mano. La scelta è dovuta al fatto che il singolo dito risulta comunque significativo di tutto il progetto stesso, essendo una novità in questo ambito ed essendo la preoccupazione principale assicurarsi del funzionamento dei cilindri pneumatici ottenuti mediante stampa additiva.

Si è quindi proceduto a realizzare fisicamente il componente e a testarlo in laboratorio per valutarne l'efficienza della soluzione.

Una volta ottenuta la stampa, l'obiettivo può dirsi centrato in parte, in quanto il progetto è stato realizzato, tuttavia per limiti dovuti alla tecnologia a disposizione, sono state necessarie delle modifiche che ne hanno in parte inficiato le caratteristiche. Innanzitutto, la necessità di stampare in una scala 2:1 rispetto a quella ideata, in quanto per limiti tecnologici non è stato possibile realizzare il prototipo 1:1.

Cosa più grave sono state le modifiche necessarie a stampare i cilindri stessi, in quanto, non potendo essere realizzati di pezzo, sono stati composti e assemblati in seguito, realizzandoli divisi a metà. Ciò ha naturalmente compromesso la tenuta globale degli stessi, non essendo stata sufficiente l'utilizzo di colla e acetone per il fissaggio.

Si è proceduto dunque a testarne l'efficacia in laboratorio, ma per via degli scarsi risultati, ci si è concentrati sull'identificare quali fossero le perdite sullo stesso. Le prove hanno evidenziato che effettivamente, come si temeva, il problema è legato principalmente alla tenuta e allo scorrimento all'interno dei cilindri.

Le dimensioni ridotte, unite alla scelta dei materiali utilizzati e alla tecnologia di stampa predisposta, si sono rilevate essere scelte realizzative non in grado di soddisfare quelle che erano le aspettative di base del progetto: materiali troppo porosi, con una qualità di stampa non elevata a livello di rifinitura, sono state inadatte a far sì che i cilindri adempissero

correttamente al proprio compito, generando perdite troppo elevate e superfici scabrose che mal si sposano con lo scorrimento del pistone all'interno della camera stessa.

Si consiglia quindi, per i lavori futuri, di riuscire ad utilizzare delle tecnologie consone o procedere a delle modifiche che possano quindi validare il progetto di studio.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Charles W. Hull, “*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*” – United States Patents, Mar. 11, 1986
- [2] immagini prese dalle slide del corso di “Impianti meccanici” – didattica polito – 09\_ additive manufacturing
- [3] <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>
- [4] J. Wang, P. Yao, N. Jiao, S. Tung, L. Liu - “*Pneumatic Pump Chip by 3D Printing Technology*” - 2015 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)
- [5] Xue Jiang and Peter B. Lillehoj – “*Pneumatic Microvalves Fabricated by Multimaterial 3D Printing*” - Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems April 9-12, 2017, Los Angeles, USA
- [6] Ronit Slyper and Jessica Hodgins – “*Prototyping Robot Appearance, Movement, and Interactions Using Flexible 3D Printing and Air Pressure Sensors*” - 2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. September 9-13, 2012. Paris, France.
- [7] Ying Wei, Yonghua Chen, Yang Yang, and Yingtian Li – “*Novel Design and 3-D Printing of Nonassembly Controllable Pneumatic Robots*” - IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 21, NO. 2, APRIL 2016
- [8] Yongha Hwang, Omeed H. Paydar, Robert N. Candler – “*Pneumatic microfinger with balloon fins for linear motion using 3Dprinted molds*” - Sensors and Actuators A 234 (2015) 65–71
- [9] Jin-Huat Low Ang Marcelo H. Jr. – “*Customizable Soft Pneumatic Finger Actuators for Hand Orthotic and Prosthetic Applications*” - 2015 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)
- [10] Zhongkui Wang and Shinichi Hirai – “*A 3D Printed Soft Gripper Integrated with Curvature Sensor for Studying Soft Grasping*” - Proceedings of the 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, December 13-15, 2016
- [11] Martin Manns, J. Morales, P. Frohn – “*Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators*” - Martin Manns et al. / Procedia CIRP 72 (2018) 328–333
- [12] Lisen Ge, Longteng Dong, Dong Wang, Qi Ge e Guoying Gu - “*A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators*” - L. Ge et al. / Sensors and Actuators A 273 (2018) 285–292

- [13] Emre Akyürek, Tatiana Kalganova, Mashood Mukhtar, Leonid Paramonov, Luke Steele, Michal Simko, Luke Kavanagh, Alisdair Nimmo, Anthony Huynh – “*Design and Development of Low Cost 3D Printed Ambidextrous Robotic Hand Driven by Pneumatic Muscles*” - International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR) ISSN: 2321-0869, Volume-2, Issue-10, October 2014
- [14] T. Raparelli, G. Mattiazzo, S. Mauro, M. Velardocchia – “*Design and Development of a Pneumatic Anthropomorphic Hand*” - Journal of Robotic Systems 17(1), 1 - 15 (2000)
- [15] Petuya, V.; Macho, E.; Altuzarra, O.; Pinto, C. and Hernández, A. "*Educational Software Tools for the Kinematic Analysis of Mechanisms*". Comp. Appl. Eng. Education. First published online: February 24, 2011. DOI: 10.1002 cae.20532. ISSN: 1061-3773.
- [16] E. Ciulli – “*Elementi di Meccanica*” – EDIZIONI PLUS, Università di Pisa, 2003