



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica specializzazione Progettazione Meccanica
a.a. 2021/2022
Sessione di Laurea Aprile 2022

Realizzazione di un attuatore pneumatico lineare a doppio effetto mediante Additive Manufacturing

Relatori:
Terenziano Raparelli
Daniela Maffiodo
Giuseppe Pepe

Candidati:
Walter Incardona

Indice

1	Introduzione	1
2	Generalità sulla stampa 3D	1
2.1	Vantaggi e svantaggi della stampa 3D	2
2.2	Tecnologie e materiali per l'additive manufacturing	3
2.3	Polyjet - Object30 Prime by Stratasys.....	4
2.4	FDM – Fused Deposition Material Ender 3 by Creality	4
2.5	SLS Selective Laser Sintering.....	6
2.6	Materiali per la stampa 3D	6
2.7	Additive manufacturing e pneumatica	9
2.8	Logica di progettazione e produzione in additive manufacturing.....	12
2.9	Design preliminare e scelta delle geometrie.....	13
2.9.1	Design della testata anteriore e delle sue guarnizioni	14
2.9.2	Design del corpo cilindro	16
2.9.3	Design del pistone e delle sue guarnizioni.....	17
3	Analisi FEM sul modello	20
3.1	Dati dei materiali	20
3.2	Preparazione del modello	22
3.3	Discussione dei risultati.....	24
3.4	Confronto analisi FEM dei tre modelli di materiale.....	28
4	Realizzazione dei componenti dell'attuatore	31
4.1	Stampa dei componenti con Object30 PRIME™ and Object Studio.....	31
4.1.1	Job 1: stampa delle guarnizioni in resina.....	32
4.1.2	Job 2: stampa del cilindro corpo e pistone	35
4.1.3	Job 3 e 4: stampa secondo provino RGD720.....	39
4.2	Stampa dei componenti con Creality Ender 3 FDM	42
4.2.1	Slicer Cura by Ultimaker	42
4.2.2	Stampa del pistone	43
4.2.3	Stampa della testata anteriore	46
4.2.4	Stampa del corpo cilindro	48
4.2.5	Stampa delle guarnizioni in TPU	50
4.3	Stampa dell'attuatore con SLS e Nylon PA12	54
4.3.1	Job di stampa SLS.....	56
5	Test e misure dei prototipi	57
5.1	Nuovo design del pistone e guarnizioni	59
5.2	Descrizione della prova di misura	62
5.2.1	Ottimizzazione del cilindro	66

5.2.2	Ottimizzazione della tenuta dello stelo nella testata anteriore	75
5.3	Studio della forza di spunto e della forza di attrito	81
5.4	Il caso delle guarnizioni	84
6	Future developments	85
7	Bibliografia e riferimenti	86

Indice delle figure.

Figura 1 - Particolare degli ugelli a sinistra, schema del processo di stampa a destra [13].....	4
Figura 2 - Esempio di stampa multi-materiale a sinistra, Object Prime sita nel laboratorio IAM del Politecnico.....	4
Figura 3 - Schema del processo di stampa FDM a sinistra [14], Creality Ender 3 a destra [15].....	5
Figura 4 - Schema della configurazione bowden [16] e particolare del flusso di raffreddamento	5
Figura 5 - schema del processo di stampa SLS [17]	6
Figura 6 - Applicazioni di componenti metallici in additive manufacturing [22]	7
Figura 7 - Immagini materiali ceramici	8
Figura 8 - Attuatori lineari pneumatici nella robotica industriale [18] [19]	9
Figura 9 - Dimostrazione di utilizzo dei soft pneumatic actuator come gripper [20].....	9
Figura 10 - Schema di attuazione del tentacolo soft actuator [21].....	10
Figura 11 - Attuatore realizzato in [3] con sensori ad effetto Hall	11
Figura 12 - Attuatore a doppio effetto implementato in macchina per testing [1].....	11
Figura 13 - Attuatore in ABS [6]	12
Figura 14 - Flowchart del design for additive	13
Figura 15 - Esploso e vista in sezione del primo prototipo.....	14
Figura 16 - particolari della sezione della testata anteriore	14
Figura 17 - Guarnizione per lo stelo all'interno della testata anteriore	15
Figura 18 - particolare dell'assemblaggio della testata anteriore e delle guarnizioni	15
Figura 19 - Sezione del cilindro	16
Figura 20 - Dimensioni standard sede O-ring [12]	17
Figura 21 - Dimensioni O-ring da alloggiare nel cilindro	17
Figura 22 - Sezione del pistone sviluppato in [2] con la testa cava	17
Figura 23 - Stelo con testa cava e forata	18
Figura 24 - Particolare della guarnizione e alloggiamento nel cilindro e funzionamento della tenuta in funzione dell'aria compressa	19
Figura 25 - Comportamento del PLA in diverse condizioni di stampa [5].....	20
Figura 26 - Comportamento trazione e compressione dei provini in PLA al variare dei parametri [5]	21
Figura 27 - Valutazione modulo Elastico PLA nelle tre direzioni principali [8].....	22
Figura 28 - Applicazione dei vincoli e dei carichi	22
Figura 29 - creazione della mesh del modello	23
Figura 30 - Nuovo modello con mesh con elementi solidi a 4 nodi.	24
Figura 31 - Andamento della Tensione di Von Mises alla pressione interna di 0,6 MPa.....	25
Figura 32 - Spostamento MAX alla pressione interna di 0,6 MPa	25
Figura 33 - Rappresentazione grafica spostamento equivalente a 4Mpa con fattore di scala 10	26
Figura 34 - Andamento della tensione equivalente di Von Mises	27
Figura 35 - Andamento dello spostamento equivalente al variare della pressione di alimentazione	27
Figura 36 - Andamento del coefficiente di sicurezza al variare della pressione di alimentazione	28
Figura 37 - Andamento della tensione equivalente massima in funzione della pressione di alimentazione per PLA e Nylon PA12.....	29
Figura 38 - Andamento dello spostamento massimo in funzione della pressione di alimentazione per PLA e Nylon PA12	29
Figura 39 - Andamento del coefficiente di sicurezza in funzione della pressione di alimentazione per PLA e Nylon PA12	30
Figura 40 - Interfaccia grafica di Object Studio	31
Figura 41 - Datasheet del TangoBlack usato per le guarnizioni [7]	32
Figura 42 - dati di processo calcolati da Object Studio	33
Figura 43 - Guarnizioni posizionate sul piano di stampa.....	34
Figura 44 - guarnizioni difettate e danneggiate	34

Figura 45 - Sezione della guarnizione CAD in alto; ricostruzione del pezzo difettato stampato in basso.....	35
Figura 46 - Dati del RGD720 e del suo materiale di supporto [7].....	36
Figura 47 - Cilindro e stelo posizionati nel piano di stampa ancora inglobati nel materiale di supporto.....	37
Figura 48 - Cilindro e stelo dopo il lavaggio	38
Figura 49 - errore di stampa, particolare della sezione circolare	38
Figura 50 - provino cilindro h=35mm difettato	39
Figura 51 - Stampa del provino del cilindro in qualità Standard	39
Figura 52 - Provini del cilindro. A sinistra qualità HQ, a destra qualità SQ	40
Figura 53 - Componenti stampati con Objet Prime non idonei	41
Figura 54 - Interfaccia di settaggio dei parametri di stampa in Cura.....	43
Figura 55 - Preparazione della stampa con supporti ad albero in Cura	44
Figura 56 - Orientazione orizzontale del pistone sul piano di stampa	45
Figura 57 - pistone stampato prima della rimozione dei supporti.....	46
Figura 58 - interfaccia di modifica del gcode in Cura	47
Figura 59 - Inserti metallici inseriti nella testata anteriore durante il processo di stampa.....	47
Figura 60 - Testata anteriore in PETG con dado metallico annegato e guarnizione in TPU integrata	48
Figura 61 - dimostrazione dell'effetto del parametro Z-seam	49
Figura 62 - Sezione con circonferenze concentriche dello spessore dell'ugello	50
Figura 63 - Cilindro stampato in PETG con inserto metallico alla base.....	50
Figura 64 - Scala di durezza del TPU secondo ASTM D-2240.....	51
Figura 65 - Caratteristiche meccaniche del TPU	51
Figura 66 - preparazione della stampa della guarnizione del pistone	52
Figura 67 - Guarnizioni in TPU, dimostrazione della deformazione.....	52
Figura 68 - Pistone con guarnizioni montate	53
Figura 69 - Provino e pistone in Nylon PA12.....	55
Figura 70 - Caratteristiche meccaniche del Nylon PA12 by EOS [8]	56
Figura 71 - Cilindro realizzato in SLS	57
Figura 73 - Attuatore 1	58
Figura 74 - Attuatore 2.....	58
Figura 75 - Dimensioni O-ring sostitutivo della guarnizione in TPU.....	59
Figura 76 - seconda versione del pistone	60
Figura 77 - seconda versione della guarnizione.....	61
Figura 78 - Assieme in sezione della seconda versione del prototipo	61
Figura 79 - Pistone dell'attuatore 4 con guarnizioni	62
Figura 80 - Schema del circuito realizzato per la misura della portata.....	63
Figura 81 - Misura della portata in fuga dell'attuatore 3	63
Figura 82 - Flussometro Festo usato nel circuito di test	64
Figura 83 - Andamento portata nell'attuatore 3 con alimentazione in camera posteriore.....	64
Figura 84 - Andamento portata nell'attuatore 3 con alimentazione in camera anteriore	65
Figura 85 - schema delle portate in ingresso e in fuga nell'attuatore.....	66
Figura 86 - Sezione del cilindro in Cura per, differenza di due gradi di riempimento: 20% e 100%.....	66
Figura 87 - Cilindro con infill 100%.....	67
Figura 88 - Attuatore 5.....	68
Figura 89 - Testata anteriore in Nylon PA12, parte inferiore con guarnizioni integrate	68
Figura 90 - Testata anteriore pezzo inferiore a sinistra e pezzo superiore a destra	68
Figura 91 - Particolare dei fori ovalizzati nella testata anteriore	69
Figura 92 - Nuovo attuatore in test	70
Figura 93 - Andamento portata nell'attuatore 5 con alimentazione in camera posteriore.....	70

Figura 94 - Andamento portata nell'attuatore 5 con alimentazione in camera anteriore	71
Figura 95 - Perdite attraverso la testata anteriore e la guarnizione attuatore 5	71
Figura 96 - Andamento portata in fuga attraverso le tenute dell'attuatore 5 con alimentazione in camera posteriore	72
Figura 97 - Estrusione dell'O-ring e bloccaggio del pistone.....	73
Figura 98 - Andamento della portata nell'attuatore 7 con alimentazione in camera posteriore.....	74
Figura 99 - Bolle d'aria nell'attuatore 7 dovute a perdite	74
Figura 100 - Sezione con testata munito di 2 anelli O-ring	75
Figura 101 - Attuatore 8.....	75
Figura 102 - Andamento della portata nell'attuatore 8 alimentazione camera posteriore.....	76
Figura 103 - Andamento della portata nell'attuatore 8 alimentazione camera anteriore	76
Figura 104 - Fughe maggiori alla giunzione e minori nello stelo.....	77
Figura 105 - Guarnizioni interne consumate dopo n cicli e portata in fuga anche attraverso lo stelo	78
Figura 106 - Prove di tenuta attuatore 7 con camera anteriore tappata.....	78
Figura 107 - Andamento della portata di fuga attraverso la giunzione del cilindro con la testata anteriore dell'attuatore 8	79
Figura 108 - Confronto tenuta attuatore 5 e 8 con alimentazione in camera posteriore	80
Figura 109 - Confronto delle portate degli attuatori 3, 5, 8 con alimentazione in camera posteriore.....	80
Figura 110 - Confronto delle portate degli attuatori 3, 7, 8 con alimentazione in camera anteriore	81
Figura 111 - Schema dell'equilibrio delle forze nell'attuatore	82
Figura 112 - Calcolo della forza di spinta al variare della pressione di alimentazione della camera posteriore dell'attuatore 8	83
Figura 113- Disegno del prototipo attuatore definitivo	83

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Report della Mesh.....	24
Tabella 2 - - Caratteristiche filamento PETG eSun [23].....	44
Tabella 3 - Impostazioni di stampa pistone PETG	45
Tabella 4 - Impostazioni di stampa testata anteriore PETG	48
Tabella 5 - Impostazioni di stampa cilindro PETG	49
Tabella 6 - Impostazioni di stampa guarnizione TPU	52
Tabella 7 - Datasheet stampante EOS Formiga P110 [8]	54
Tabella 8 - Attuatore 1	57
Tabella 9 - Attuatore 2	58
Tabella 10 - Attuatore 3	62
Tabella 11 - Attuatore 4	62
Tabella 12 - Impostazioni di stampa cilindro attuatore 5	67
Tabella 13 - Attuatore 5	67
Tabella 14 - Attuatore 6	69
Tabella 15 - Attuatore 7	73
Tabella 16 - Attuatore 7	75

1 Introduzione

Lo scopo di questo progetto è quello di investigare la fattibilità della realizzazione di un attuatore pneumatico lineare a doppio effetto con metodi di lavorazioni non tradizionali, in particolar modo con l'ausilio dell'additive manufacturing. La scelta ricade su questa tecnologia poiché la sua diffusione di utilizzo negli ultimi anni è diventata sempre più capillare e la presenza di una stampante 3D (di qualsiasi natura tecnologica) in uno studio, un laboratorio, una sede operativa è sempre più imprescindibile, il che rende questo progetto potenzialmente replicabile in qualsiasi situazione e ambiente.

Si vuole prima di tutto constatare la possibilità di costruire un cilindro pneumatico funzionante con una certa efficienza minima per poi, in caso di successo, allargare l'orizzonte di possibilità a nuove geometrie non convenzionali sfruttando appunto la potenzialità della prototipazione rapida della stampa 3D.

La tesi nasce anche dalla presa visione dello studio condotto in [10] nel quale si propone un tentativo di realizzazione del progetto FR4-NK0 di una mano articolata attuata in modo pneumatico ma realizzata in stampa 3D.

I vantaggi che si avrebbero da un attuatore così realizzato sono molteplici. Innanzi tutto l'utilizzo di polimeri invece di leghe ferrose introduce una serie di possibilità fino ad ora non considerate come ad esempio quella di utilizzare questo attuatore in ambienti ostili ai metalli oppure in presenza di campi elettromagnetici che interferiscono con i materiali ferromagnetici, basti pensare al campo medico sanitario. Ad esempio [2] propone l'utilizzo di un attuatore in materiale polimerico come soluzione one-shot cioè il suo ciclo di utilizzo è relegato ad una singola operazione alla fine della quale il pezzo viene rimosso e opportunamente smaltito dando spazio ad un nuovo attuatore identico appena stampato e che non è contaminato. In secondo luogo per una questione più tecnica i polimeri hanno generalmente un peso specifico minore rispetto ai metalli e quindi si riesce ad ottenere un rapporto peso/potenza di gran lunga più interessante.

Senza dimenticare l'imprescindibile fattore ecologico, si ritiene importante sottolineare che la maggior parte dei polimeri usati in questo progetto sono derivati da sostanze biologiche e sono riciclabili, come il PLA e il PETG.

Tutto ciò è ragionevolmente rapportato ad un discorso di scala e di potenza, è lecito pensare che per un'applicazione heavy-duty dove i carichi in gioco sono molto più gravosi l'utilizzo di polimeri risulta sicuramente svantaggioso rispetto al metallo. Tuttavia l'idea che ha spinto avanti questo progetto è quella di infondere la consapevolezza che è possibile replicare in casa il proprio attuatore lineare pneumatico completamente personalizzato secondo le proprie esigenze.

Con molta probabilità l'attuatore realizzato potrà essere attuato anche con un fluido non comprimibile, compatibilmente con le potenze in gioco. Inoltre si vuole ottenere un sistema che sia utilizzabile una volta estratto dalla macchina con il minor numero di post lavorazioni possibile. In una visione molto lungimirante si vuole riuscire a stampare tutto il complessivo in una unica soluzione, senza necessità di assemblaggio successivo.

I problemi più grandi che si sono posti davanti in questo lavoro sono quelli della finitura superficiale e quello della tenuta per evitare le fughe. Per rendere ancora più challenging questa tesi ci si è imposti l'ambizioso obiettivo di realizzare tutte le componenti dell'attuatore in stampa 3D.

L'obiettivo principale dunque è quello di ottenere un prototipo funzionante in tutte le sue parti, passare per una fase di ottimizzazione sia delle geometrie che dei parametri di processo e infine sperimentare nuove geometrie non convenzionali per un attuatore lineare pneumatico.

In seguito ad una ricerca bibliografica approfondita si è trovato poco materiale sull'argomento e ognuno degli studi fatti conclude che c'è ancora molto da esplorare proponendo diversi spunti di sperimentazione. Uno fra tutti è stato colto in questo lavoro per la progettazione di una testata del pistone innovativa gettando le basi per una tesi di progettazione di un nuovo componente. Questo lavoro unisce progettazione, prototipazione, ricerca dei materiali e caratterizzazione di essi, per giungere ad un risultato ingegneristicamente significativo.

2 Generalità sulla stampa 3D

La produzione additiva, convenzionalmente detta "stampa 3D" è un processo di costruzione che permette la realizzazione fisica di un prototipo mediante sovrapposizione di layer di materiale in progressione, partendo da un modello tri-dimensionale digitale. Proprio come suggerito dal nome additive manufacturing, si

riesce a produrre componenti aggiungendo il materiale solo laddove è necessario, idealmente evitando scarti di materiale.

Il primo brevetto di stampa 3D ha data 1986 e appartiene a Charles W. Hull il quale conia il termine "stereolitografia" così definendola:

"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]

La produzione additiva quindi, teoricamente, rende possibile la realizzazione di qualsiasi oggetto di ogni forma e/o dimensione. La più grande differenza rispetto alle lavorazioni tradizionali è che quest'ultime, partendo da un blocco di materiale (grezzo o semilavorato), procedono per asportazione di materiale, basti pensare alle macchine fresatrici e ai torni mentre le macchine per additive manufacturing procedono per addizione opportuna di materiale laddove necessario riuscendo quindi a realizzare geometrie complesse e addirittura impossibili con le lavorazioni tradizionali. Oggi giorno la stampa 3D è utilizzata in tantissimi settori: industriale, aeronautico, automotive, medico sanitario, design e moda, architettura e così via.

2.1 Vantaggi e svantaggi della stampa 3D

Partendo dal presupposto che la stampa 3D è un tipo di tecnologia in continua ed esponenziale evoluzione essa è ancora in parte limitata sotto determinati aspetti. I limiti maggiori sono sicuramente legati al tempo di realizzazione del pezzo e al costo della macchina, aspetti che però vanno opportunamente discussi in quanto bisogna distinguere prototipi progettuali e pezzi end-to-use. La produzione additiva ha accelerato drasticamente la fase di progettazione poiché si è ora in grado di realizzare prototipi sia funzionali che estetici in tempi iniqui se comparati a quelli delle lavorazioni tradizionali, questo è ciò che viene chiamata prototipazione rapida. La stampa 3D si svincola dalla standardizzazione dei pezzi e offre la totale personalizzazione nel design. Poiché il pezzo che viene estratto dalla macchina può necessitare di successive lavorazioni (post-produzione) questa tecnologia non è ancora in grado di sopperire alle richieste della produzione di massa e in larga scala. La stampa 3D però si integra molto bene all'interno di un processo di produzione tradizionale, in una singola macchina è possibile realizzare la maggior parte del processo di lavorazione del pezzo e l'intervento umano è pressoché nullo. L'additive manufacturing si integra benissimo anche nella nuova ottica di industria 4.0 dell'era digitale nella quale tutto è connesso e predilige la collaborazione fra uomo e macchina, con robot sempre più intelligenti. Sicuramente è una tecnologia sostenibile perché riduce di molto lo spreco dei materiali usati nel processo di produzione andando a riciclare il materiale in eccesso. La stampa 3D lascia più spazio all'opportunità di innovare sviluppando nuovi design o migliorando quelli esistenti. Le macchine più comunemente utilizzate per la stampa 3D hanno dei volumi di costruzione non molto estesi, nel 90% delle macchine non raggiungono neanche $0,05 m^3$ di volume ma è già sufficiente per coprire la maggior parte delle esigenze di progettazione. Esistono macchine ad alte prestazioni che hanno volumi di stampa anche nell'ordine del metro cubo.

Un altro grande vantaggio della stampa 3D è la possibilità di realizzare componenti costituiti da più materiali diversi tra loro e perfettamente integrati, realizzati utilizzando una sola macchina e senza necessità di assemblaggio successivo. Questo tipo di stampa è chiamata MMAM: Multi Material Additive Manufacturing. In [11] è stata realizzata una micro pompa attuata magneticamente in MMAM combinando l'uso del nylon e di un nylon caricato con micro particelle di NdFeB che vengono magnetizzate in un secondo momento a valle della stampa. Nel progetto presentato in questa tesi verranno utilizzati diversi materiali all'interno dello stesso assieme e, in uno sviluppo futuro, si pensa di realizzare l'assieme multi materiale con una singola macchina in un singolo job di stampa.

2.2 Tecnologie e materiali per l'additive manufacturing

La produzione additiva permette di realizzare diversi pezzi con un'ampia gamma di materiali dai polimeri alle leghe metalliche fino a materiali ceramici con opportuni processi tecnologici. Il concetto comune è quello di depositare uno strato dopo l'altro fino al completamento del pezzo. Vi sono diversi criteri di classificazione di queste tecnologie per esempio in base al materiale oppure in base alla fonte di energia utilizzata per trasformare il materiale. I principali sono:

- VAT Photopolymerization: una vasca è riempita con resina fotopolimerica nella quale il modello viene costruito strato per strato. Una luce ultravioletta impressiona la resina dove richiesto e la indurisce localmente, 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. Un ugello che si muove orizzontalmente, in maniera continua o con un approccio Drop On Demand, getta il materiale (foto-polimero) su una piattaforma di costruzione. Il materiale è indurito immediatamente mediante una lampada a luce ultravioletta montata direttamente dietro l'ugello e si solidifica sulla piattaforma, iterando questo processo per ogni strato si arriva alla completa realizzazione del pezzo. È una tecnologia estremamente interessante perché consente di creare in una singola soluzione un componente con più materiali tra loro diversi;
- Binder jetting: utilizza 2 materiali, di cui un legante (binder) 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 fuso e depositato su una piattaforma più o meno riscaldata 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. È la tecnologia più conosciuta e più utilizzata grazie alla sua semplicità sia di utilizzo che di costruzione della macchina;
- 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 metallici, tra i quali alluminio, rame, acciaio inox e titanio;
- Direct Energy Deposition (DED): è un processo di stampa utilizzato soprattutto per riparare o aggiungere materiale a componenti già esistenti. Una tipica macchina DED è costituita da un ugello montato su un braccio con più gradi di libertà, che deposita il materiale metallico 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.

Poiché le tecnologie utilizzate in questo progetto sono state tre, vale la pena descrivere brevemente più nel dettaglio le macchine che sono state utilizzate.

2.3 Polyjet - Object30 Prime by Stratasys

Questa macchina sfrutta la tecnologia Polyjet la quale elabora fotopolimeri ovvero polimeri che induriscono quando esposti ad una fonte luminosa, in questo caso raggi UV.

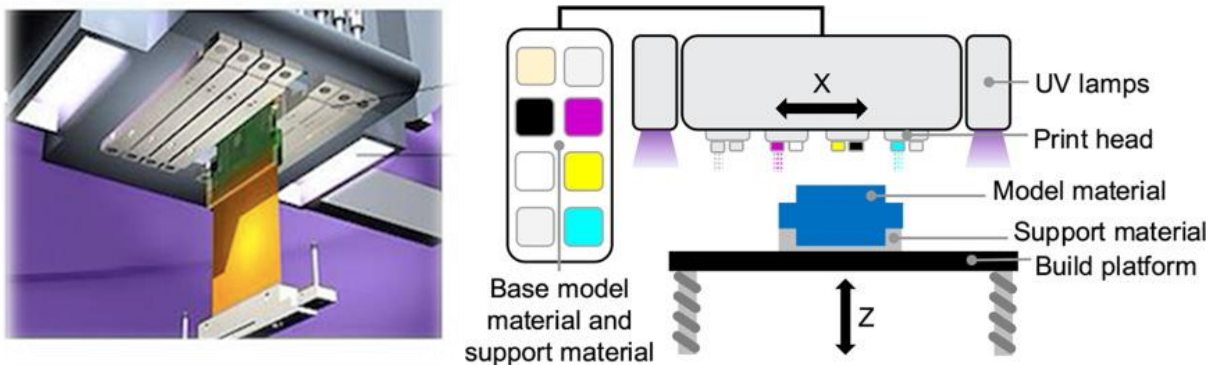


Figura 1 - Particolare degli ugelli a sinistra, schema del processo di stampa a destra [13]

La testa di stampa è composta da una matrice di numerosi e piccoli ugelli i quali gettano il fotopolimero sul piano di stampa alle coordinate indicate dal file contenente le istruzioni di realizzazione del modello. Quindi in una corsa di andata si deposita il materiale e nella corsa di ritorno viene accesa la lampada a raggi UV che fa il curing del polimero appena depositato. La tecnologia permette di depositare più materiali contemporaneamente, siano essi di pezzo oppure di supporto (Figura 1). Il materiale di supporto generalmente risulta essere gelatinoso e si rimuove in maniera relativamente semplice a mano o con acqua. È possibile stampare pezzi molto complessi e con materiali differenti, come evidenziato dalla Figura 2 dove ogni materiale è identificato da un colore diverso. In Figura 2 è riportata anche una foto della macchina presente nel laboratorio IAM del Politecnico di Torino utilizzata per la realizzazione dei pezzi per il prototipo oggetto di questa tesi.



Figura 2 - Esempio di stampa multi-materiale a sinistra, Object Prime sita nel laboratorio IAM del Politecnico

2.4 FDM – Fused Deposition Material Ender 3 by Creality

Le macchine stampanti con tecnologia FDM sono soprattutto di tipo cartesiano e processano dei materiali allo stato solido generalmente sotto forma di filamento avvolto in una bobina (Figura 3). Il diametro del filamento può variare a seconda della macchina e dell'applicazione, i più usati hanno diametro di 1,75mm e 2,85mm. La macchina porta il filamento a temperatura di fusione e attraverso un ugello lo estrude sul piano di stampa. È di cruciale importanza che il materiale aderisca perfettamente alla superficie la quale è riscaldata appunto per tale scopo. Gli ugelli attraverso i quali avviene l'estrusione possono avere diametri differenti, in linea generale sempre inferiore al diametro del filamento, in questo progetto è stato utilizzato un ugello standard in ottone con diametro interno di 0.4 mm. Il filamento viene spinto attraverso l'ugello

dall'estrusore, un sistema composto da un motore passo nel cui albero è calettata una ruota zigrinata, un cuscinetto di trascinamento premuto contro la ruota da un sistema di tensionamento a molla. Il filamento viene "morso" dalla ruota zigrinata e tenuto in posizione dal cuscinetto per essere accompagnato fino all'hot-end dove viene fuso ed estruso (Figura 4).

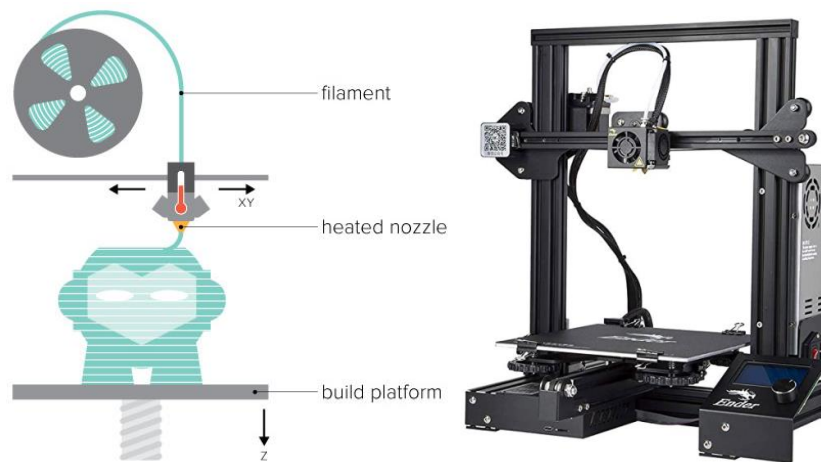


Figura 3 - Schema del processo di stampa FDM a sinistra [14], Creaform Ender 3 a destra [15]

La macchina che si è utilizzata per questo progetto è la Ender 3 by Creaform e prevede l'utilizzo di un tubo in PTFE, detto bowden, che il filamento percorre dall'estrusore fino all'hot-end, questo sistema permette una distribuzione furba delle masse nella macchina in quanto la i motori dovranno movimentare solo il blocco riscaldante il quale risulta essere piuttosto leggero e ciò garantisce una precisione di posizionamento maggiore.

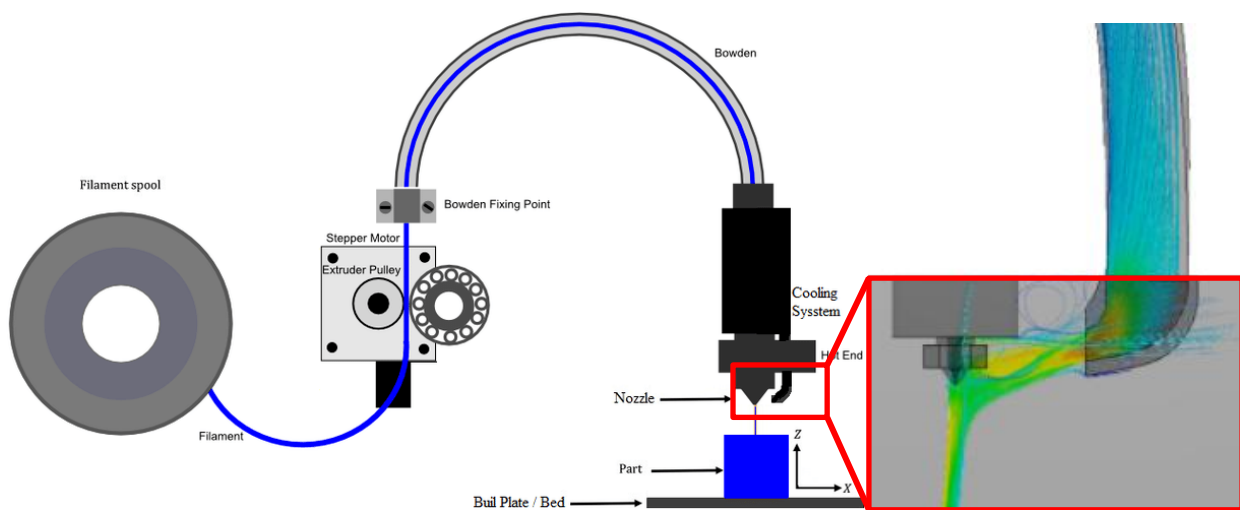


Figura 4 - Schema della configurazione bowden [16] e particolare del flusso di raffreddamento

Molte macchine hanno il gruppo estrusore montato direttamente sopra l'ugello minimizzando la distanza fra ruota zigrinata e ugello eliminando la necessità del tubo bowden. I vantaggi che si traggono da questo sistema detto "direct drive" sono legati alla maggiore facilità di stampaggio di determinati materiali, soprattutto quelli flessibili. Dovendo però movimentare una massa maggiore, la macchina è leggermente meno precisa di quella precedente. In questo progetto è stata utilizzata una stampante 3D di tipo bowden, nello specifico una Ender 3 by Creaform, della categoria entry level hobbistica. Si noti che in corrispondenza della sezione di uscita dell'ugello è presente una bocchetta di uscita di un condotto di aria. Questo flusso di aria a temperatura ambiente permette al materiale appena depositato di solidificarsi più velocemente.

2.5 SLS Selective Laser Sintering

La stampa 3D per sinterizzazione laser (Selective Laser Sintering) sfrutta la potenza di un laser per sinterizzare in maniera selettiva una porzione di polveri polimeriche stese su un letto di stampa.

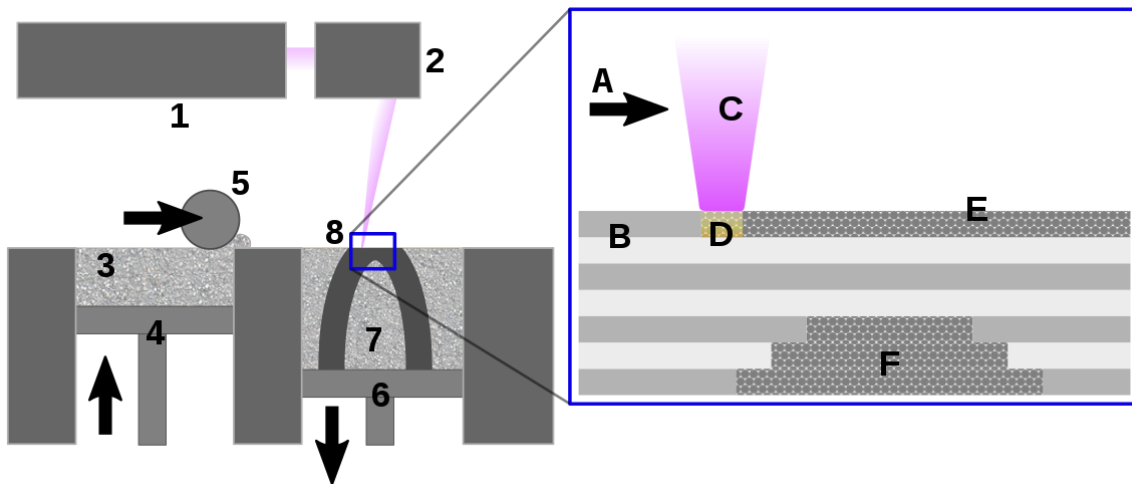


Figura 5 - schema del processo di stampa SLS [17]

In Figura 5 è riportato lo schema di funzionamento della macchina: a destra vi è l'alloggiamento con la piattaforma mobile del letto di stampa mentre a sinistra il container della polvere polimerica. Un rullo distribuisce in maniera uniforme la polvere trasferendola dal contenitore di sinistra a quello di destra, per costruire il nuovo strato. La piattaforma a sinistra sale ogni volta che si passa al layer successivo mentre quella di destra si abbassa per permettere al pezzo di essere completato strato dopo strato. La macchina riscalda la polvere portandola ad una temperatura di poco inferiore a quella di fusione. In questo modo, il laser può facilmente aumentare la temperatura di aree specifiche del letto di polvere, mentre traccia il modello per realizzare una parte solida. Il laser, attraverso un sistema di scanner e/o lenti viene indirizzato per andare a sinterizzare la porzione interessata del letto di polvere, come indicato a destra in figura 5, ciò consente di fondere assieme le particelle in maniera meccanica così da creare parti solide. La piattaforma si abbassa di un livello all'interno della camera di stampa, di solito intorno ai 50-200 micron, e il processo si ripete per ogni strato, fino al completamento delle parti. Ogni volta che il rullo passa sul piano di stampa stende un nuovo layer e compatta la polvere sottostante e a fine della stampa, infatti, il pezzo sarà immerso in un blocco di polvere. La polvere non fusa sostiene le parti durante la stampa ed elimina la necessità di strutture di supporto apposite, il che rende la sinterizzazione laser particolarmente adatta alle realizzazione di geometrie complesse anche di sottosquadri e parti a sbalzo. Occorre far raffreddare la camera alla fine della stampa prima di rimuovere il blocco di polvere questo permette al pezzo di stabilizzarsi e non incorrere a tensioni interne che porterebbero alla deformazione del componente. I pezzi che si ottengono da questa tecnologia sono caratterizzati da una superficie grezza per via della natura particellare della polvere.

2.6 Materiali per la stampa 3D

Nonostante si siano già menzionati alcuni dei materiali utilizzati nei diversi processi di stampa è opportuno, per completezza della trattazione, fare una breve descrizione dei materiali che più si utilizzano nella prototipazione in ambito additive manufacturing. Quando si parla di materiali per la stampa 3D è conveniente fare una divisione in tre macro categorie:

- materiali metallici
- materiali polimerici
- materiali ceramici

I materiali metallici processati in ambito additive sono forniti sotto forma di polveri le cui particelle hanno una dimensione media caratteristica per il tipo di macchina che si intende utilizzare. I materiali metallici per macchine che utilizzano un laser per fondere il materiale (L-PBF) sono diverse leghe di alluminio, nichel, cobalto, titanio, ad esempio:

- EOS MaragingSteel MS1, acciaio ad alte prestazioni;
- EOS StainlessSteel GP1, acciaio inossidabile;
- EOS NickelAlloy IN718, lega di alluminio resistente alle alte temperature per applicazioni per lo più aerospace;
- EOS CoblatChrome MP1, superlega decisamente performante e particolarmente resistente alla corrosione;
- EOS Titanium Ti64, titanio con alto grado di forza specifica e molto leggero;

I materiali metallici processati con tecnologia a fascio di elettroni (EBM) sono ad esempio le leghe di alluminio e titanio come la Ti6AL4V la quale viene utilizzata in campo medico chirurgico grazie alla sua peculiare bio compatibilità con il corpo umano, in particolare viene utilizzata per realizzare impianti nel sistema scheletrico per sostituire o riparare (Figura 6). Come nelle lavorazioni tradizionali dei metalli anche nel mondo additive manufacturing per i metalli sono previsti trattamenti termici e trattamenti superficiali. I processi e le applicazioni per i materiali metallici in ambito additive manufacturing sono decisamente affascinanti, interessanti e hanno un potenziale enorme ma appartengono ad una categoria caratterizzata da un altissimo contenuto tecnologico, per questo motivo sono costosi e poco diffusi.

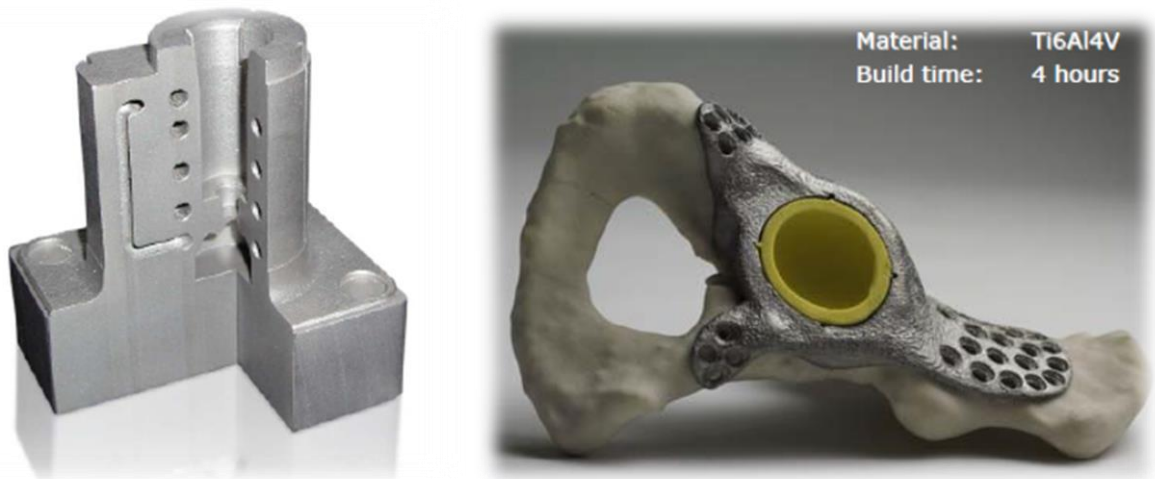


Figura 6 - Applicazioni di componenti metallici in additive manufacturing [22]

Per quanto riguarda i materiali polimerici utilizzati per la stampa 3D, la maggior parte di essi sono polimeri termoplastici e vengono forniti generalmente sotto forma di polveri o di pellet o avvolti in bobine di filamento di sezione variabile. I più comuni sono:

- PLA, poli lattato acido: il più diffuso nel mondo della stampa 3D formato desktop (dimensioni della macchina tipiche da scrivania). Si tratta di un polimero derivato dall'amido di mais, quindi di natura biologica e totalmente naturale;
- PETG poli etilene tereftalato con glicole: lo stesso polimero usato nelle bottigliette di plastica ma con l'aggiunta di glicole per rendere più fluido ed estrudibile il materiale alle alte temperature;
- ABS acrilonitrile butadiene stirene;
- TPU tetra poli uretano: polimero elastomero con buone proprietà che gli conferiscono resistenza alla corrosione;
- NYLON poli ammidici: un polimero con ottime caratteristiche meccaniche e anti corrosive.
- RESINE FOTOPOLIMERICHE: resine termoindurenti in formato liquido che si induriscono quando vengono colpite da fasci di raggi UV o determinate sorgenti luminose.

L'immensa vastità di polimeri disponibili per la stampa 3D dona un'enorme quantità e libertà di progettazione per ogni tipo di applicazione. Sono molto diffusi anche i così detti filamenti rinforzati o caricati. Si tratta di filamenti di PLA, o Nylon oppure ancora ABS ai quali è stata aggiunta una certa quantità di additivi quali fibra di vetro, particelle metalliche o altro, per aumentare determinate caratteristiche meccaniche. Esistono per esempio diverse tipologie di nylon caricati che riescono ad essere ritardanti di fiamma oppure possedere una durezza superficiale maggiore.

Le ben note caratteristiche dei materiali ceramici come ad esempio: elevata durezza superficiale, isolamento elettrico, inerzia chimica, resistenza alle alte temperature, essere refrattari, ecc. li rendono davvero particolarmente interessanti per diverse applicazioni in svariati ambiti come quello medico e quello aerospaziale. È noto però che è difficile processare e lavorare i materiali ceramici, soprattutto se si vogliono ottenere geometrie complesse. I metodi tradizionali infatti prevedono di partire dalla produzione di polveri di particelle ceramiche, compattare tali polveri in diverse forme desiderate (forming) e sinterizzare quest'ultime (sintering). La stampa 3D diventa molto interessante quando si parla di materiali ceramici perché offre la possibilità di creare le parti in materiale ceramico in maniera diretta oppure in maniera indiretta [slide corso]. Il primo caso è proprio quello in cui dalla macchina viene estratto già il componente ceramico, nel secondo caso invece si stampa il calco che verrà utilizzato per compattare le polveri ceramiche (generalmente si tratta di calchi di geometria complessa). A seconda del tipo di tecnologia di additive manufacturing che si utilizza si possono ottenere componenti più o meno densi composti da [22]: zirconia, allumina, fosfati e trifosfati di calcio, soluzioni di Sali bario, ossidi di alluminio (Al_2O_3), silice (SiO_2), carburo di silicio (SiC), ossido di zirconio (ZrO_2) e così via (Figura 7).



Figura 7 - Immagini materiali ceramici

Le caratteristiche meccaniche e termiche dei materiali utilizzati in questo progetto di tesi saranno opportunamente illustrate in ogni sezione nella quale si descrive la realizzazione dei componenti e il processo scelto per realizzarli. Poiché lo stesso materiale può avere caratteristiche diverse a seconda del produttore, per semplicità e correttezza si riportano solo i dati dei materiali usati.

2.7 Additive manufacturing e pneumatica

Le motivazioni per le quali oggi si ricorre a sistemi pneumatici sono molteplici. Vale la pena fare un breve sunto perché alcune di queste motivazioni si sposano perfettamente con la stampa 3D. Gli attuatori pneumatici si preferiscono a quelli idraulici o elettromeccanici in primis per la sicurezza che l'aria compressa garantisce e la minore manutenzione richiesta. Un altro motivo rilevante per cui si preferisce un attuttore pneumatico è il suo rapporto potenza/peso decisamente più elevato rispetto ad un sistema elettro-meccanico (nel quale si ha un motore e un riduttore sicuramente accoppiato) o rispetto ad un sistema idraulico (nel quale vi è necessità di una pompa che metta in pressione il fluido) a beneficio dell'efficienza del sistema di attuazione. Inoltre, nei sistemi ad aria compressa si ha un'elevata risposta del sistema e in generale costa di meno rispetto agli altri tipi di attuazione. Gli attuatori pneumatici sono largamente usati in ambito industriale per l'automazione dei processi oppure come end-effector di bracci robotici manipolatori (Figura 8).

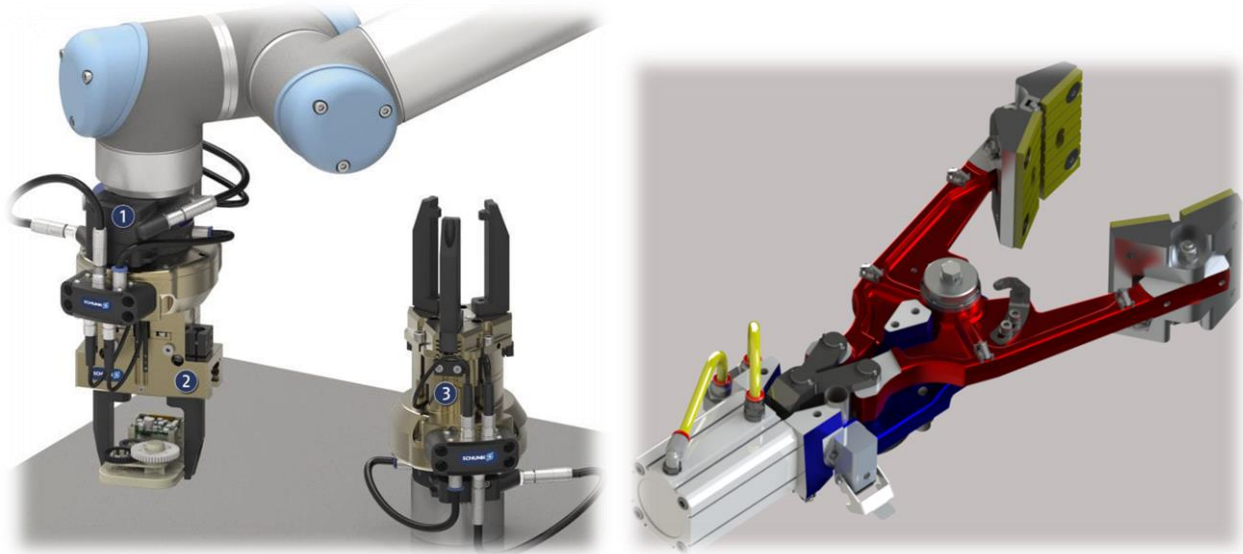


Figura 8 - Attuatori lineari pneumatici nella robotica industriale [18] [19]

Tuttavia la scelta di attuatori pneumatici (soprattutto quelli commerciali) è limitata dalla forte standardizzazione della taglia, del materiale e della potenza in uscita e l'aria compressa è un fluido fortemente non lineare che complica il controllo del sistema stesso. Proprio qui entra in gioco la potenzialità della stampa 3D che permette la realizzazione istantanea di geometrie complesse e l'utilizzo di materiali leggeri ed eco sostenibili (due fra i tanti vantaggi).

Le maggiori applicazioni di stampa 3D per sistemi pneumatici si riscontrano nell'ambito robotico e prevede soprattutto l'utilizzo di materiali flessibili per la realizzazione dei così detti *soft actuator* di cui un esempio è riportato in Figura 9 e Figura 10.

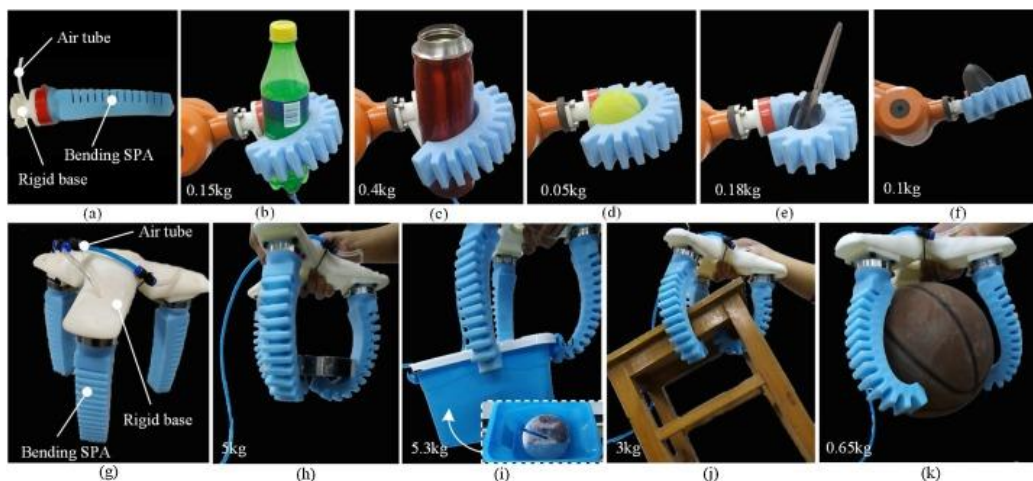


Figura 9 - Dimostrazione di utilizzo dei soft pneumatic actuator come gripper [20]

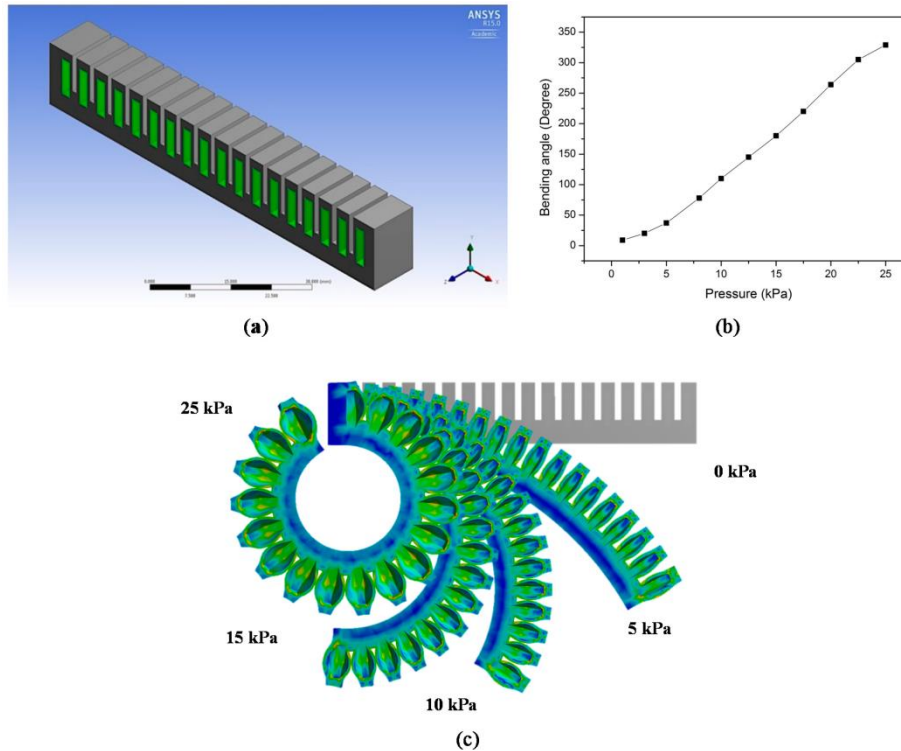


Figura 10 - Schema di attuazione del tentacolo soft actuator [21]

Sono attuatori che generalmente hanno la funzione di gripper e quindi afferraggio di oggetti. Il materiale flessibile permette all'attuatore di adattarsi in toto all'oggetto da manipolare rendendo così il robot capace di movimentare oggetti profondamente diversi tra loro oppure oggetti molto delicati. In questi casi la stampa additiva interviene in due modi:

- si realizza il tentacolo e l'attuatore direttamente in macchina;
- si sfrutta la stampa 3D per creare lo stampo dell'attuatore.

Sono invece molto rari i tentativi di realizzazione di attuatori lineari pneumatici mediante fabbricazione additiva. La letteratura esaminata presenta dei prototipi in cui alcuni componenti non sono stati stampati ma recuperati da cataloghi standard come ad esempio le guarnizioni e le tenute. In questo progetto ci si è fissati l'ambizioso obiettivo di realizzare un prototipo funzionante in cui ogni componente è stato progettato e stampato appositamente (fanno ovviamente eccezione i raccordi e gli elementi di fissaggio).

Dalla ricerca bibliografica condotta nelle prime fasi del presente lavoro è emerso che davvero pochi studi sono stati condotti in questo campo fortemente inesplorato ma potenzialmente promettente. In [3] Krause and Bhounsule hanno effettuato una serie di misure su un attuatore in cui il cilindro è stampato in PLA, il pistone è una barra di acciaio con la testata dotata di un magnete, Figura 11. All'interno delle camere sono presenti due sensori di pressioni, all'esterno del cilindro invece vi è una serie di sensori ad effetto Hall per misurare la posizione della testa del pistone. In serie al pistone è stato montato un attuatore lineare vite-madrevite per movimentare il pistone con precisione ed effettuare misure di forza. L'attuatore ha uno spessore del cilindro di 1,15 mm e un diametro interno di 30mm e per effettuare le misure è stata utilizzata una pressione intorno ai 4 bar.

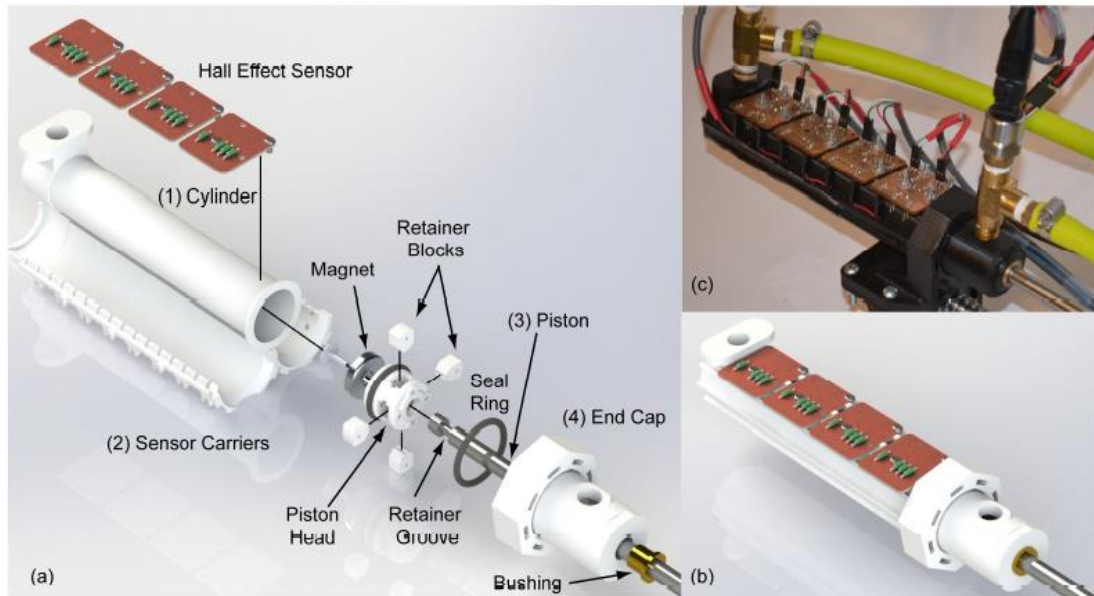


Figura 11 - Attuatore realizzato in [3] con sensori ad effetto Hall

In [1] hanno realizzato un attuatore pneumatico stampato in 3D per implementarlo nel sistema di afferraggio in una macchina per prova di trazione Shimadzu da 10 kN per la caratterizzazione di tessuti di legamenti muscolari. Il problema era che, con gli afferraggi originali, il tessuto veniva drasticamente lacerato, inoltre la prova doveva essere condotta col provino immerso in un fluido. Sfruttando la stampa 3D è stato realizzato un attuatore lineare a doppio effetto che rispetta gli ingombri della macchina, che può essere immerso in fluido senza corrodersi e che riuscisse a non lacerare i tessuti da testare (Figura 12).

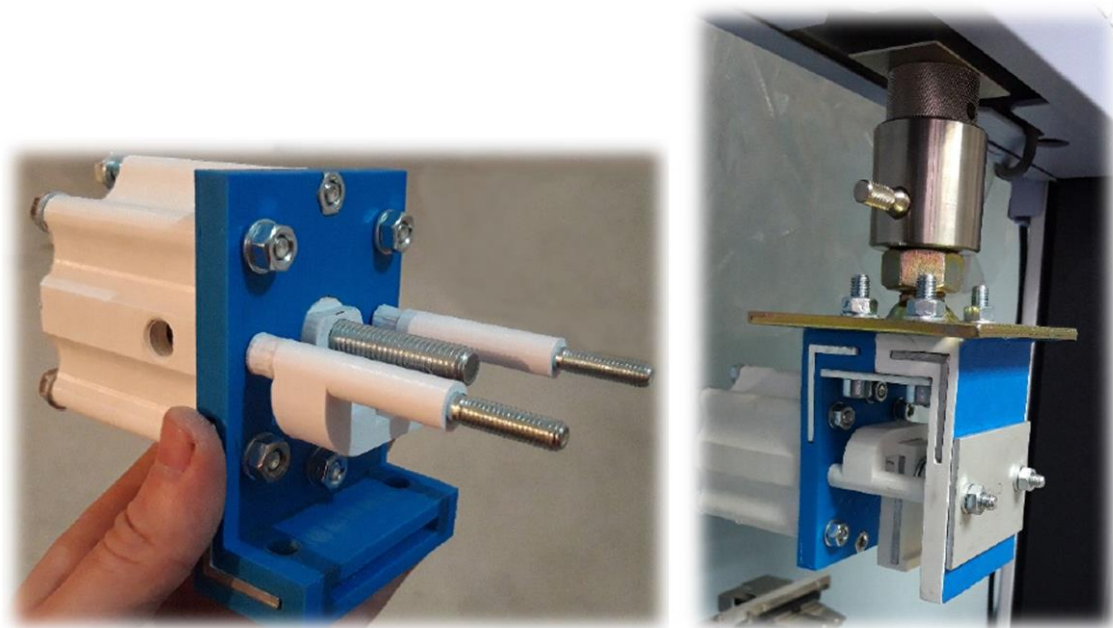


Figura 12 - Attuatore a doppio effetto implementato in macchina per testing [1]

Nel progetto [6] Nall e Bhosule hanno realizzato un cilindro pneumatico stampato in ABS con tecnologia FDM. Si tratta di un attuatore di misure molto contenute, infatti il diametro interno è 15mm e il pistone effettua una corsa massima di 20 mm (Figura 13). L'attuatore è del tipo On/Off cioè senza controllo nella corsa, una volta attuato esso genera una spinta impulsiva. Infatti è stato usato come elemento di spinta di un jumping-robot, capace di generare una potenza di 2W quando alimentato a 0,27 bar.

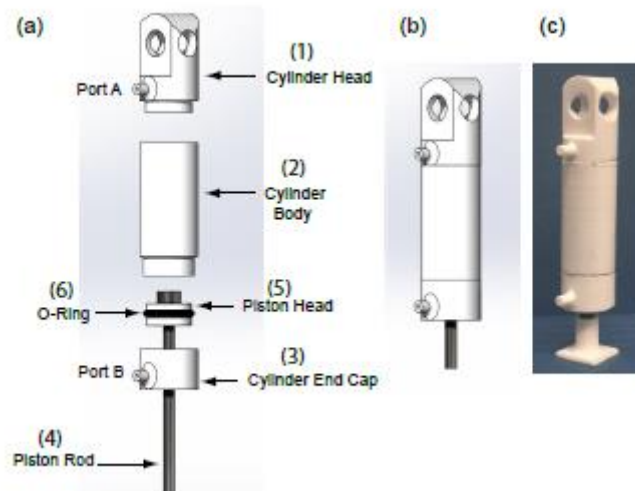


Figura 13 - Attuatore in ABS [6]

Hanno testato la spinta che riusciva a produrre il pistone grazie a dei sensori piezoelettrici installati sul capo dello stelo a contatto con il pavimento. Gli autori hanno concluso che un attuatore stampato in 3D combina le alte prestazioni della pneumatica con la leggerezza dei polimeri e la rigidità fornita da elementi metallici opportunamente inseriti nei diversi elementi, fornendo quindi le caratteristiche principali che deve avere un attuatore lineare per applicazioni robotiche.

Nel progetto qui presentato si vuole fare il passo ulteriore di ottenere un sistema funzionante dove ogni suo componente sia completamente stampato in 3D e, in una visione lungimirante, fornire le basi per la realizzazione in unica stampa dell'attuatore completo.

2.8 Logica di progettazione e produzione in additive manufacturing

In Figura 14 è riportato lo schema di massima che rappresenta la cosiddetta logica di “design for additive manufacturing”. Il punto di partenza per la progettazione in ottica stampa 3D è sempre la realizzazione di un modello tridimensionale in formato digitale con l'aiuto di un software CAD. Una volta definito il modello si passa alla creazione del file .STL nel quale le superfici del modello sono discretizzate con geometrie triangolari. Questo tipo di file viene inviato ad un software denominato “slicer” che seziona il modello secondo una certa direzione creando così i diversi layer. Nello slicer è possibile settare tutti i parametri di stampa desiderati e ciò che ne risulta è la traduzione del modello 3D in linguaggio macchina e il file può essere mandato alla stampante. Il file che contiene il linguaggio letto dalla macchina generalmente è un file del tipo .gcode il quale risulta essere una serie di istruzioni codificate che vengono lette dalla stampante ed eseguite in una sequenza ordinata. Il file .gcode è modificabile poiché è un comunissimo file di testo, tuttavia alcune macchine hanno uno Slicer proprietario che non produce un file editabile, generalmente perché può essere letto solo dalla macchina della casa madre.

Il processo segue un certo numero di iterazioni prima di ottenere il modello finale, tuttavia il tempo che intercorre fra un'iterazione e l'altra è relativamente molto breve.

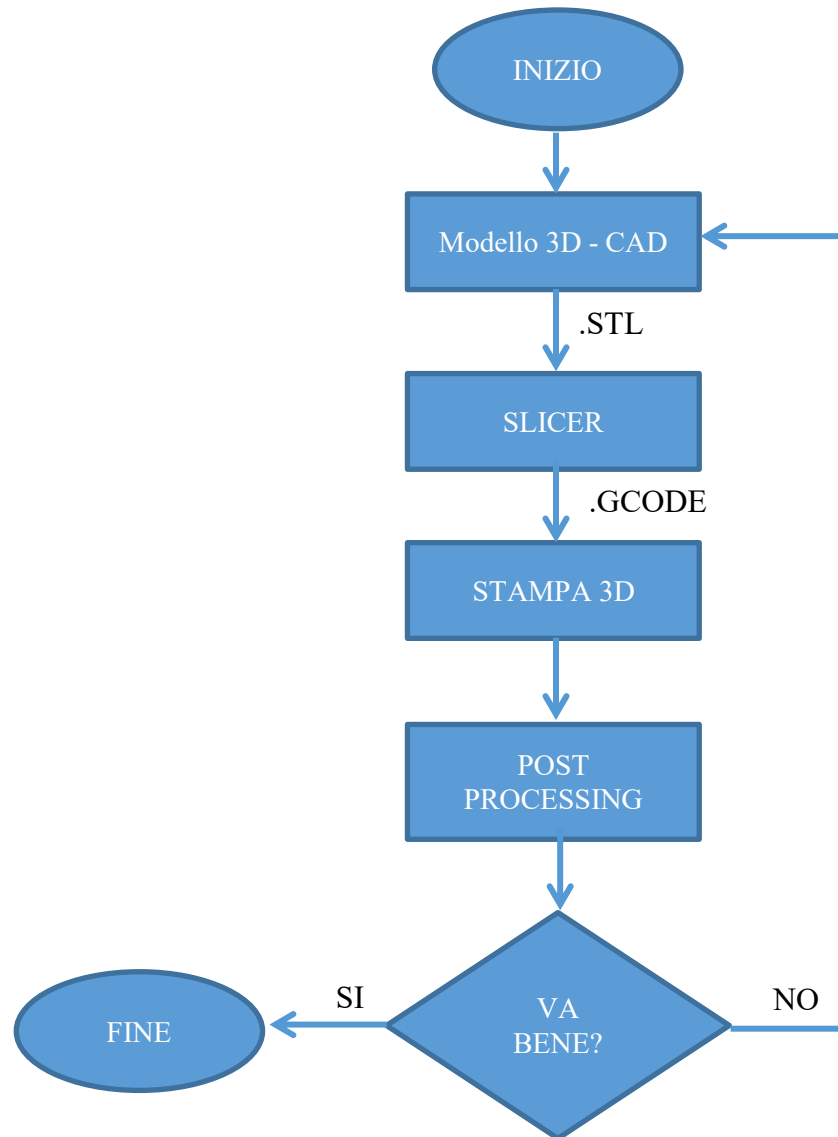


Figura 14 - Flowchart del design for additive

2.9 Design preliminare e scelta delle geometrie

L'attuatore, nel suo insieme, è stato concepito da zero, modellando pezzo per pezzo (Figura 15). Si è partiti dalle geometrie più semplici e le si è ottimizzate per la stampa additiva. Questo progetto si pone l'obiettivo principale di realizzare un modello funzionante risolvendo i problemi legati alle tenute e alla qualità superficiale del cilindro interno. Come suggerisce [1] il numero di bulloni per serrare la testata anteriore al corpo cilindrico deve essere maggiore o uguale a 4 in quanto delle analisi [1] hanno evidenziato il sorgere di deformazioni che portano all'apertura di fughe per l'aria compressa.

Nella fase iniziale si è deciso di usare 4 bulloni per il serraggio della testata anteriore.

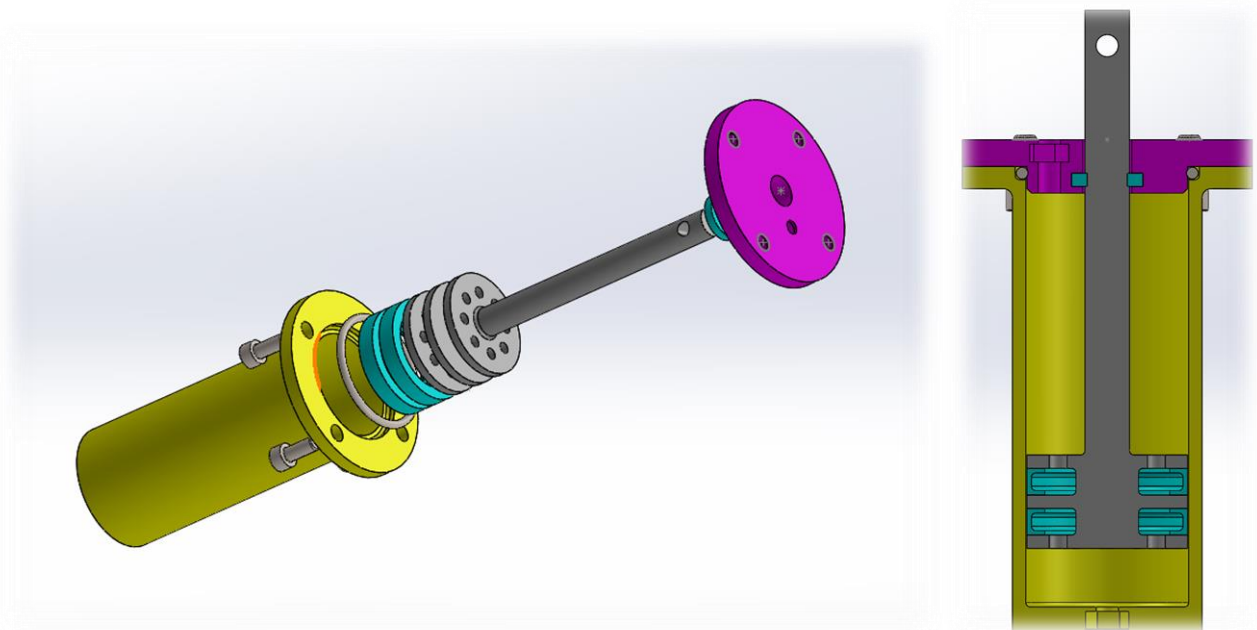


Figura 15 - Esploso e vista in sezione del primo prototipo

2.9.1 Design della testata anteriore e delle sue guarnizioni

La testata anteriore è uno dei pezzi più interessanti in questo progetto. La sua funzione è quella di chiudere e sigillare la camera interna del cilindro e supportare lo stelo del pistone, per questo integra due guarnizioni: una integrata al suo interno per isolare lo stelo e un'altra esterna di diametro maggiore per isolare la camera anteriore del cilindro. Quest'ultima è inizialmente identificata da un o-ring commerciale ma si prevede di sostituirla con una guarnizione custom stampata appositamente. La guarnizione per lo stelo invece viene stampata e nella sua progettazione si è tenuto in considerazione che una volta alloggiata nella sua sede essa eserciti un precarico radiale sullo stelo, sicuramente essa sarà quella più sollecitata in quanto è posta in moto relativo rispetto al pistone, per questo motivo il dimensionamento della sua sede è un calcolo molto delicato. La testata viene fissata al corpo cilindro con 4 viti M4 il cui dado è annegato all'interno di essa: all'interno infatti è stata modellata una sede esagonale per il dado, come mostrato in Figura 16:

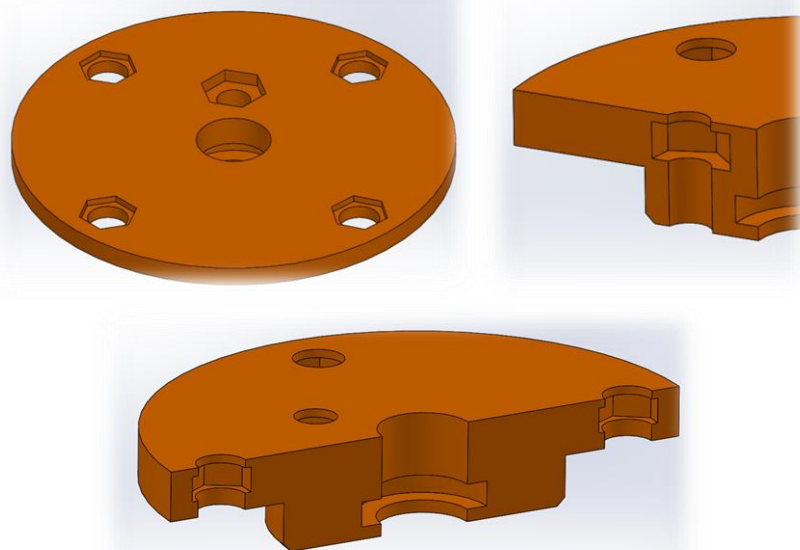


Figura 16 - particolari della sezione della testata anteriore

La guarnizione da alloggiare all'interno della testata è presentata in Figura 17. Il diametro interno è scelto di 9 mm perché si vuole creare una sorta di precarico della guarnizione sullo stelo per aumentare la forza di contatto e conseguentemente la sua tenuta, verrà dunque montata con interferenza sullo stelo. Il suo spessore è un valore di primo tentativo, lo spessore influisce direttamente sull'attrito che si sviluppa all'interfaccia durante lo strisciamento. Variando questo parametro infatti si agisce in due modi:

- aumenta l'area di contatto e quindi la superficie di azione della forza;
- aumenta lo schiacciamento all'interno della sede, aumentando quindi la forza in direzione radiale sul pistone.

Per semplicità si è deciso di prevedere una sezione quadrangolare, Figura 17.

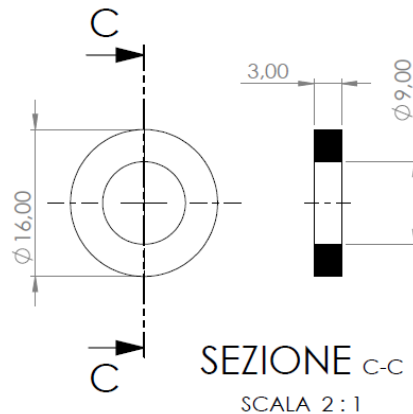


Figura 17 - Guarnizione per lo stelo all'interno della testata anteriore

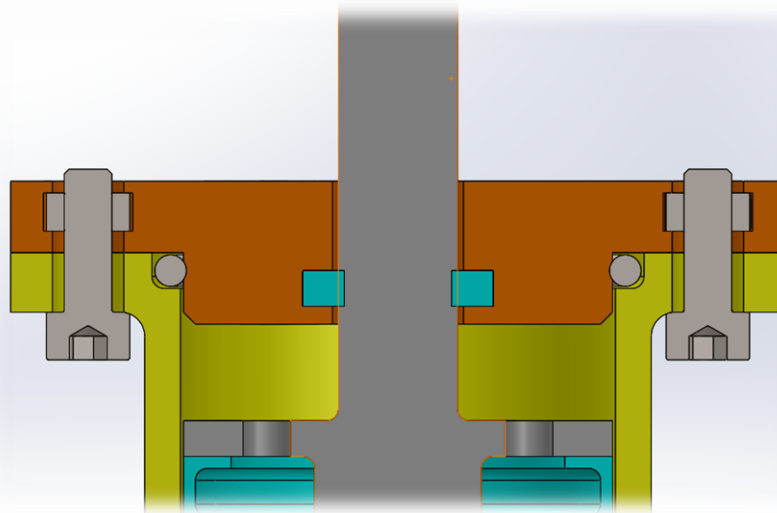


Figura 18 - particolare dell'assemblaggio della testata anteriore e delle guarnizioni

I 4 dadi vengono inseriti durante la stampa del pezzo: viene programmata una pausa nella quale la macchina si ferma e permette l'azione dell'operatore che posiziona i componenti desiderati. La macchina riparte e il materiale viene depositato sopra il pezzo e sopra i dadi.

Tale scelta progettuale consente una maggiore forza di serraggio dato che il sistema andrà in contro a pressioni ben al di sopra di quella ambiente, e assicura una maggiore durabilità dei componenti poiché i filetti non sono direttamente ricavati nella plastica che andrebbero inevitabilmente ad usurarsi con i continui montaggi e smontaggi del prototipo. Inoltre la scelta permette un risultato estetico nettamente migliore rispetto ad un serraggio con dadi a vista. Lo stesso stratagemma è stato usato per l'innesto del raccordo pneumatico. Un procedimento analogo è adottato per il calettamento della guarnizione per il pistone.

2.9.2 Design del corpo cilindro

Il cilindro è il componente che dovrà garantire la tenuta sia strutturale che fluidodinamica dell'attuatore. Il cilindro è provvisto, al fondo, di un attacco per il raccordo pneumatico accessoriato con un dado M5 per garantire un serraggio maggiore e assicurare maggiore durabilità dell'accoppiamento filettato. Nella parte anteriore vi è una flangia con 4 fori passanti per le viti che fissano la testata e una sede per la guarnizione di tenuta (Figura 19). La geometria di questa sede è stata modellata secondo lo standard per gli O-ring. Si è voluto optare per un O-ring per escludere nei primi test le perdite per fuga attraverso la guarnizione stessa stampata. Nel momento in cui si decide di passare alla guarnizione stampata non vi sarà bisogno di modificare la sede.

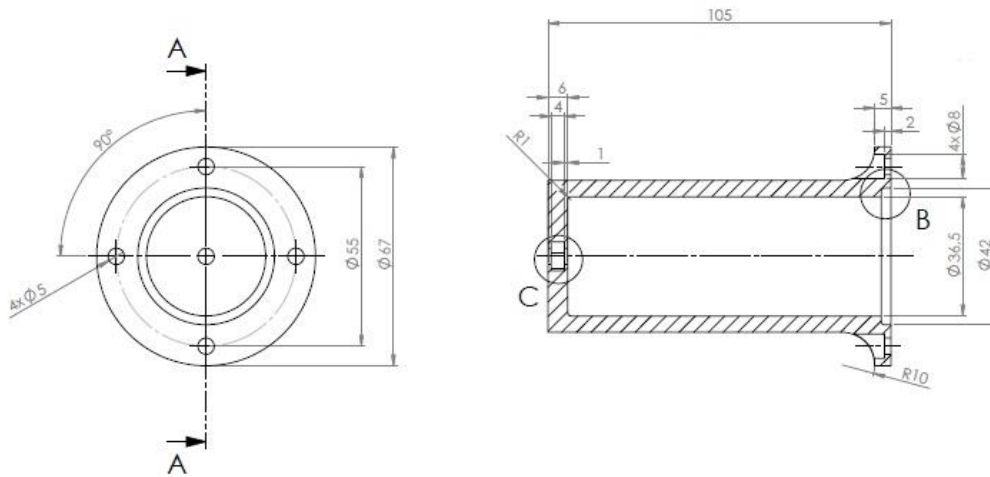


Figura 19 - Sezione del cilindro

Per ottimizzare il cilindro in ottica di stampa 3D FDM è stato aggiunto un grande raccordo tra il cilindro e la flangia in testa in modo tale da ridurre al minimo i supporti e avere una resistenza meccanica maggiore. Inoltre il raccordo consente di nascondere le teste delle viti e quindi avere una resa estetica molto più gradevole.

Nonostante in prima battuta si prevedeva l'utilizzo di una guarnizione stampata in 3D da alloggiare nel cilindro, si è preferito usare un anello O-ring commerciale per avere più probabilità di rispettare fin da subito determinate tolleranze geometriche. In ogni caso la guarnizione è stata realizzata e verrà testata in seguito. Per il dimensionamento della sede dell'O-ring si è fatto riferimento a tabelle standard che suggeriscono le dimensioni in base al tipo di applicazione, nel caso in esame si tratta di una guarnizione fissa, la condizione di destra in Figura 20.

ANELLO	RANGE d	C	GIOCO _{max}	B _{max} B _{min}	E _{max} E _{min}
2,62	9,13 - 71,12	3,5 ± 0,1	0,12	A _{min} + 4,8 A _{max} + 4,65	F _{min} - 4,65 F _{max} - 4,8
3,53	18,64 - 253,6	4,5 ± 0,1	0,15	A _{min} + 6,3 A _{max} + 6,13	F _{min} - 6,13 F _{max} - 6,3
5,34	37,37 - 149,2	7 ± 0,1	0,18	A _{min} + 9,5 A _{max} + 9,3	F _{min} - 9,3 F _{max} - 9,5
7	113,7 - 393,1	9,5 ± 0,1	0,2	A _{min} + 12,7 A _{max} + 12,45	F _{min} - 12,45 F _{max} - 12,7

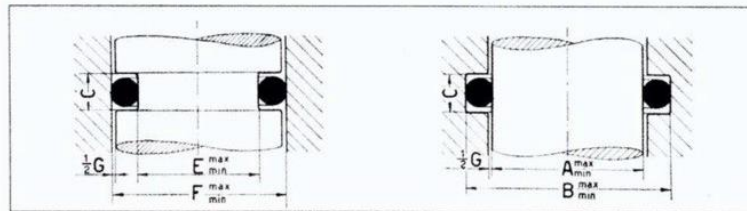


Figura 20 - Dimensioni standard sede O-ring [12]

Come noto, l’anello si trova in posizione di riposo quando non è ancora calettato ma una volta in esercizio l’anello viene schiacciato e modificando la sua geometria va a riempire tutta la sede effettuando l’azione di tenuta.

Per l’applicazione in questione si è scelto un anello O-ring con le seguenti dimensioni riportate in Figura 21.

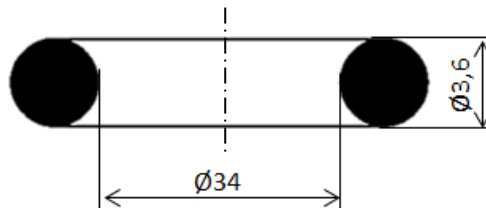


Figura 21 - Dimensioni O-ring da alloggiare nel cilindro

2.9.3 Design del pistone e delle sue guarnizioni

Il pistone di questo sistema rappresenta il componente più caratteristico. In [2] si presenta il prototipo di un particolare tipo di pistone stampato in 3D di dimensioni molto contenute per un attuttore lineare alimentato con fluido incompressibile per applicazioni medico sanitarie in ambienti in presenza di campi elettromagnetici (Figura 22). Il pistone in questione ha la testata forata per permettere al fluido di riempire la cavità individuata dalla guarnizione la quale si pressurizza e si schiaccia contro la parete interna del cilindro aumentando la sua capacità di tenuta. In quel progetto si era voluto sfruttare la stampa multi-materiale realizzando il pistone con la sua guarnizione in un’unica soluzione con due materiali differenti.

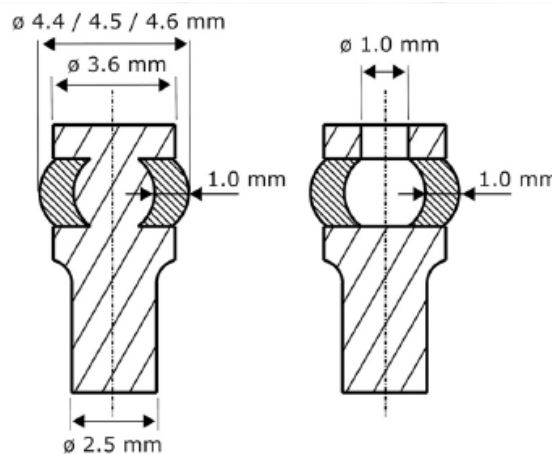


Figura 22 - Sezione del pistone sviluppato in [2] con la testa cava

Nel presente progetto si è voluto implementare la stessa soluzione opportunamente adattata per un cilindro a doppio effetto.

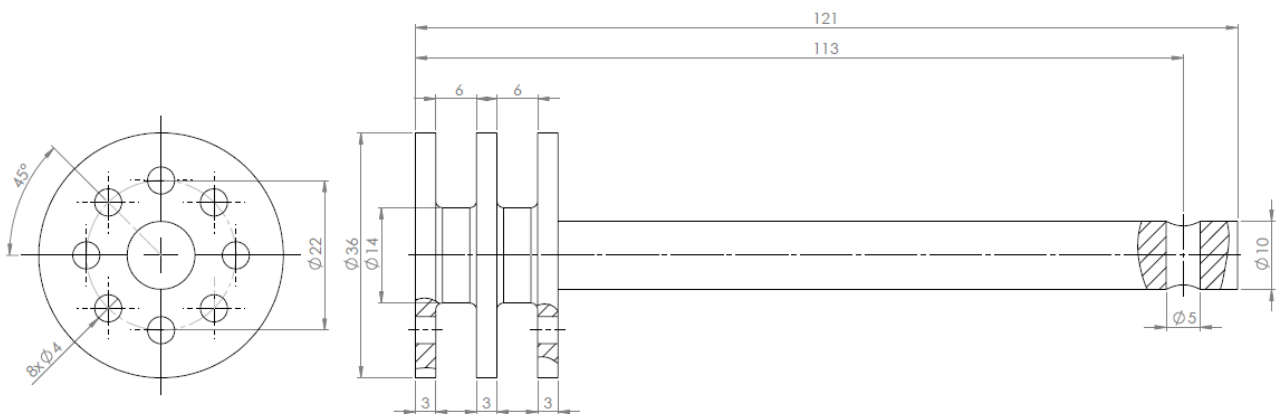
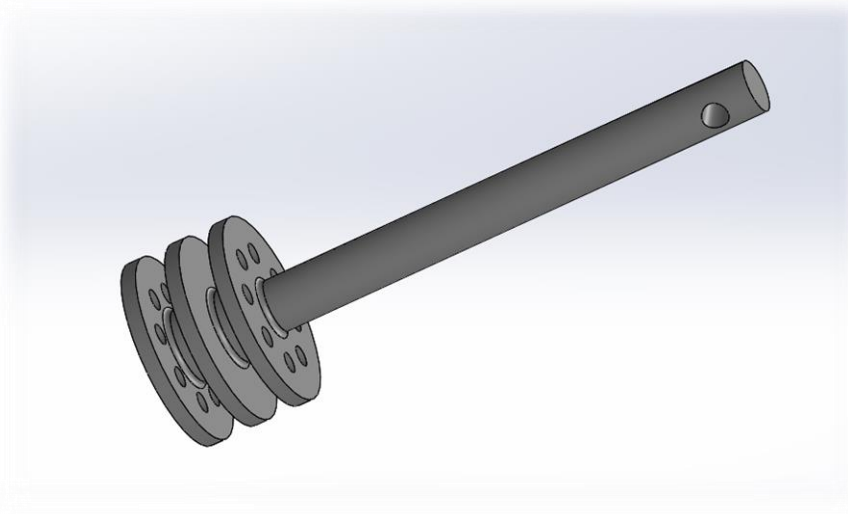


Figura 23 - Stelo con testa cava e forata

In Figura 23 è rappresentata una prima geometria del pistone. I fori presenti sui dischi del pistone permettono all'aria compressa di entrare nella camera creata dal pistone e le guarnizioni, fare espandere queste ultime che si schiacceranno contro la parete del cilindro aumentando l'azione di tenuta. Come si evince dalla Figura 241 e guarnizioni hanno una sezione con profilo a C, l'idea è che l'aria in pressione spinga i lembi contro il pistone e le pareti della guarnizione contro il cilindro. Si tratta di guarnizioni dinamiche solidali all'organo mobile, questo fa sì che la loro condizione di lavoro sia più critica per questo il dimensionamento della loro sede deve essere più accurata. Inoltre bisognerà valutare la loro resistenza all'abrasione che sicuramente si avrà a contatto con la superficie del cilindro.

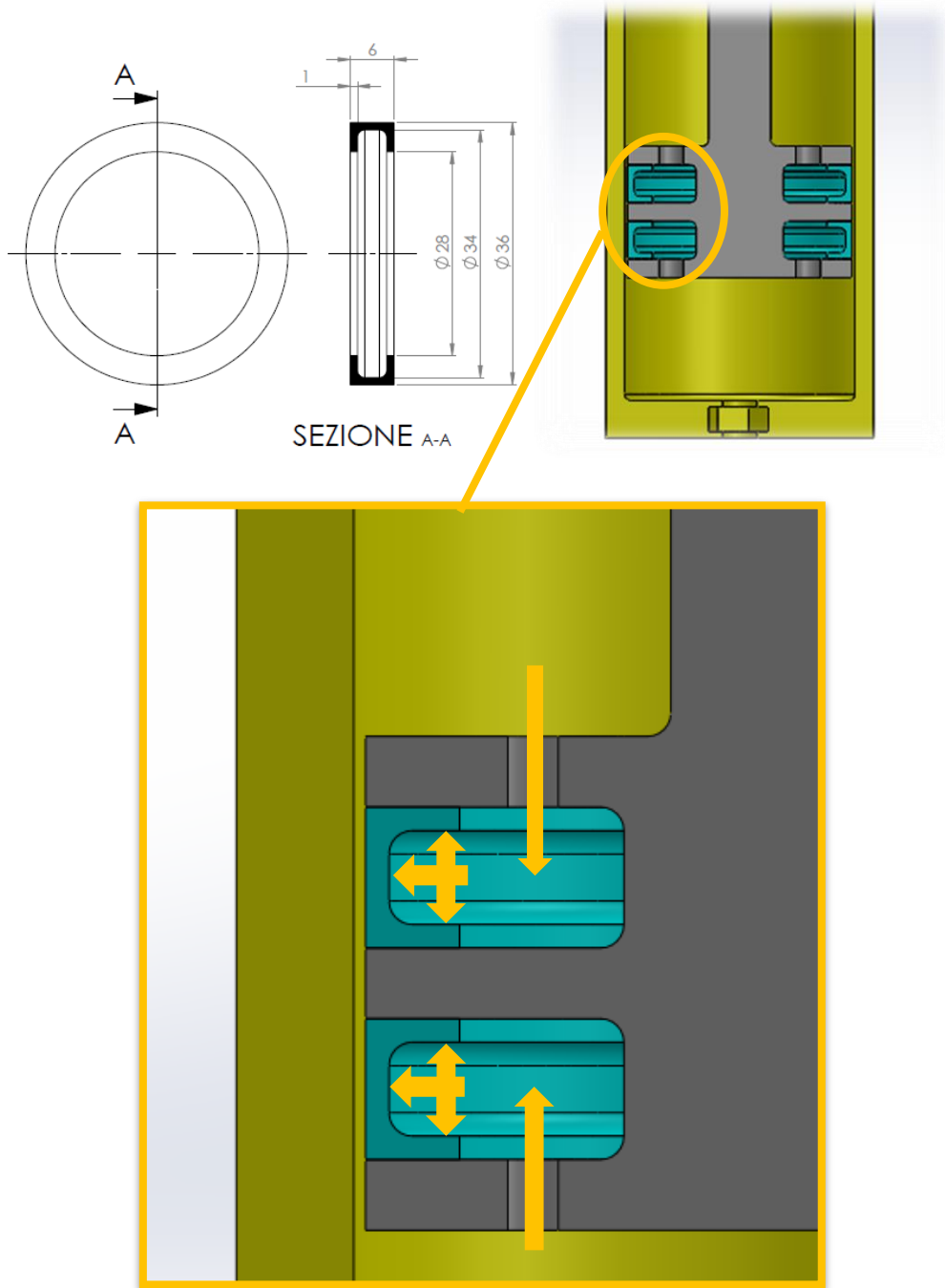


Figura 24 - Particolare della guarnizione e alloggiamento nel cilindro e funzionamento della tenuta in funzione dell'aria compressa

3 Analisi FEM sul modello

Si vuole, in questa sezione, impostare un calcolo agli elementi finiti statico lineare del modello progettato per avere una stima sulla previsione di resistenza del prototipo. È auspicabile sapere in anticipo fino a che pressione interna l'attuatore riesce a garantire il funzionamento prima di incorrere a cedimento.

3.1 Dati dei materiali

Per condurre una simulazione numerica sul modello bisogna innanzi tutto riuscire a caratterizzare il materiale. I componenti realizzati con stampa 3D sono, per loro natura, dei corpi non continui e in base alla tecnologia adoperata più o meno isotropi. Numerosi parametri influiscono sul comportamento dei pezzi stampati: tecnologia, materiale, parametri di processo, direzione di stampa, eccetera eccetera. Sarebbe infatti necessario condurre una campagna sperimentale per caratterizzare il materiale e definire i diversi moduli elastici principali. Poiché questo lavoro, seppur necessario, esula dall'obiettivo della presente tesi si è ricercato nella letteratura scientifica uno studio già effettuato e sfruttare i dati già acquisiti come input per il calcolo qui eseguito. In [5] si sono posti l'obiettivo di analizzare le proprietà meccaniche di provini realizzati PLA con stampa FDM valutando l'influenza di 6 diversi parametri sulla prova di trazione e di compressione:

1. altezza del layer: la distanza fra l'ugello e l'ultimo strato appena depositato;
2. diametro del filamento;
3. densità di riempimento;
4. direzione di stampa;
5. velocità di stampa: la velocità orizzontale sul piano XY dell'ugello durante l'estrusione;
6. pattern di riempimento: la geometria del riempimento fra le pareti.

I risultati che hanno ottenuto sono sintetizzati nella Figura 25.

Table 1. The orthogonal experiment table

Experiment Number	Layer height (mm)	Filling density (%)	Printing speed (mm/s)	Blank column	Tensile strength (MPa)	Compressive strength (MPa)
1	1 (0.15)	1 (40)	1 (30)	1	37.72	44.35
2	1	2 (60)	2 (40)	2	33.96	42.82
3	1	3 (80)	3 (50)	3	37.35	47.85
4	1	4 (100)	4 (60)	4	45.47	67.71
5	2 (0.20)	1	2	3	34.37	38.70
6	2	2	1	4	41.63	50.93
7	2	3	4	1	26.26	36.03
8	2	4	3	2	40.00	77.53
9	3 (0.25)	1	3	4	27.22	31.97
10	3	2	4	3	18.45	25.39
11	3	3	1	2	40.36	53.64
12	3	4	2	1	39.57	67.42
13	4 (0.30)	1	4	2	15.98	13.39
14	4	2	3	1	17.27	12.26
15	4	3	2	4	19.94	16.10
16	4	4	1	3	34.47	53.98

Figura 25 - Comportamento del PLA in diverse condizioni di stampa [5]

Hanno concluso che il parametro che più influisce sulla resistenza è l'altezza del layer, mentre il grado di riempimento e la velocità di stampa hanno circa lo stesso peso ma influiscono in misura minore. Si è notato come la resistenza a trazione diminuisca al crescere dell'altezza del layer e all'aumentare della velocità di stampa (Figura 26), sicuramente perché una distanza maggiore sfavorisce la fusione fra due strati successivi e una velocità maggiore non permette di stendere in maniera uniforme il materiale.

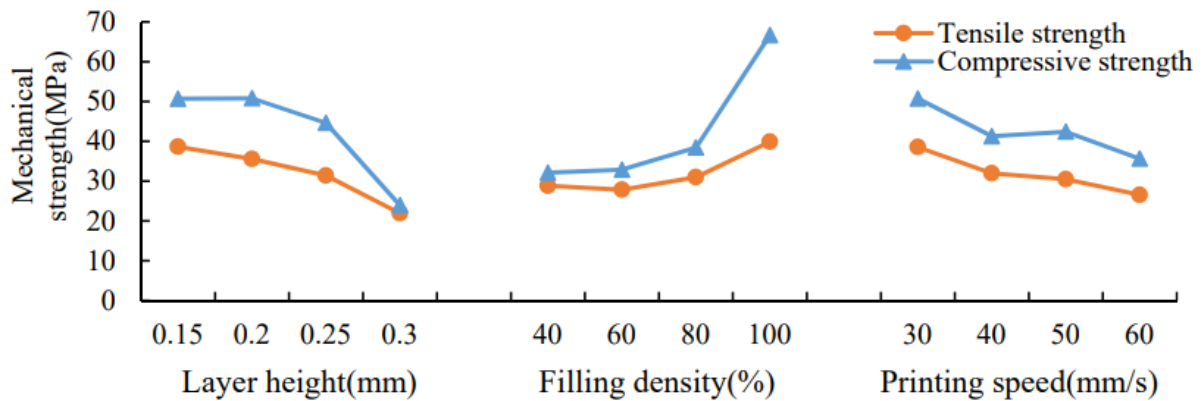


Figura 26 - Comportamento trazione e compressione dei provini in PLA al variare dei parametri [5]

È utile riportare che quando è scelto un riempimento del 100%, si può effettivamente evitare la formazione di difetti interni e quindi aumentare notevolmente le proprietà meccaniche del componente. La ricerca conclude che la massima resistenza a trazione è di 58,25 MPa, ottenuta con i seguenti parametri:

- altezza layer 0.15 – 0.20 mm;
- densità di riempimento: 100%;
- velocità di stampa: 30 mm/s.

Nel caso dell'attuatore oggetto di questa tesi è stato scelto (in generale) il seguente set di parametri:

- altezza layer 0.12 mm;
- densità di riempimento: 100%;
- velocità di stampa: 50 mm/s.

Si nota dunque che il riempimento e l'altezza dei layer si sposano perfettamente con i parametri che permettono di ottenere la massima resistenza a trazione. Ciò può essere vista come una fortunata coincidenza perché l'applicazione dell'attuatore vuole una superficie quanto più fine possibile e la si ottiene appunto con la minore altezza layer, il riempimento 100% permette di ottenere una tenuta attraverso lo spessore radiale del cilindro garantendo un isolamento totale.

Per completezza delle considerazioni teoriche è utile riportare che si è notato, per esperienza, anche come la ventilazione sia influente nell'efficacia di adesione fra un layer e il successivo, in particolare modo: aumentando la ventilazione il materiale appena depositato si solidifica più in fretta avendo meno tempo di fondersi con lo strato sottostante. Per i componenti che presentano porzioni a sbalzo generalmente si tende ad aumentare la ventilazione cosicché il materiale appena depositato solidifichi in fretta e sia supporto per lo strato successivo evitando colature di materiale e diminuendo la quantità di supporti necessari.

L'ultimo parametro di interesse è il modulo elastico E il quale varia in funzione della direzione di stampa di realizzazione del componente. In [8] è stato condotto uno studio volto alla caratterizzazione di un PLA caricato con diverse percentuali di grafene per aumentarne le proprietà meccaniche. In questa tesi si utilizzano i risultati di tale studio per impostare il modello per il calcolo numerico. Nella Figura 27 vengono riportati i moduli E_{11} e E_{22} i quali corrispondono rispettivamente al provino stampato con orientamento delle fibre a 0° e 90° rispetto alla direzione di trazione. Le percentuali di carica nella prima colonna si riferiscono alla quantità in peso di presente di grafene. Per completezza vengono prelevati anche i valori del modulo di Poisson e del modulo di taglio G .

carica	E_{11} [MPa]	E_{22} [MPa]	E_{45} [MPa]	ν_{12}	G_{12} [MPa]	$\frac{E_{11}}{2(1 + \nu_{12})}$ [MPa]
0%	3493	3276	3429	0,43	1219	1223
1%	3178	3032	3422	0,31	1387	1211
2%	3591	3116	3855	0,42	1489	1265

Figura 27 - Valutazione modulo Elastico PLA nelle tre direzioni principali [8]

Quindi per l'attuatore oggetto di questa tesi è stato individuato il valore di modulo elastico corrispondente a E_{22} 3276 MPa.

3.2 Preparazione del modello

L'analisi è stata condotta all'interno del software SolidWorks stesso. È stato creato un nuovo materiale custom chiamato PLA all'interno della famiglia delle plastiche con le proprietà meccaniche appena descritte. Anche per il TPU 85A è stato necessario creare un nuovo materiale custom e registrarlo nella libreria di SolidWorks.

Per l'applicazione dei carichi e dei vincoli si è deciso di impostare il seguente sistema:

- vincoli: si è dato vincolo rigido fisso alla superficie inferiore del cilindro in modo da bloccare il cilindro nello spazio;
- connessioni: il sistema di fissaggio dei bulloni è stato automaticamente identificato dal software e opportunamente modellato dando istruzione di considerare il caso di non compenetrazione dei diversi componenti. In automatico SolidWorks assegna una forza di serraggio che le viti esercitano sul componente nella zona di interfaccia, come si legge dalla tabella in Figura 25, è stata assegnata una forza di 1319,87 N ad ogni testa della vite sulla faccia della testata anteriore;
- Carichi: si è impostata una pressione interna in corrispondenza della superficie interna del cilindro e sulla faccia inferiore interna, una pressione di ugual valore alla superficie della testata anteriore interna al cilindro.

In Figura 28 sono riportati i carichi con le frecce di colore rosso mentre i vincoli sono colorati in verde.

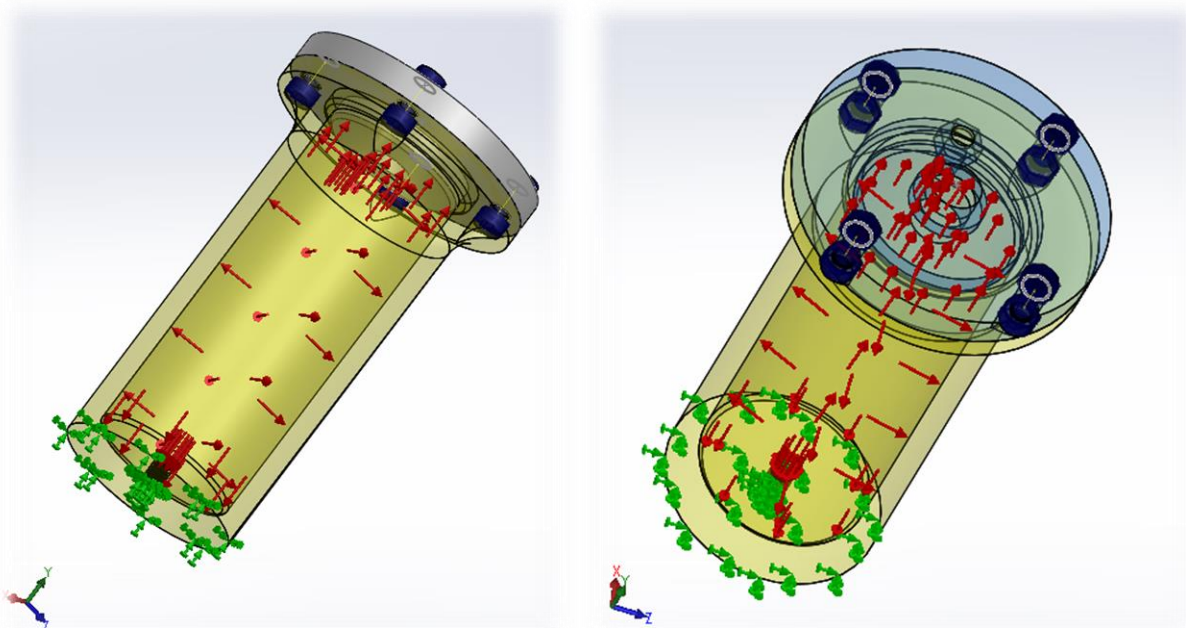


Figura 28 - Applicazione dei vincoli e dei carichi

Si è deciso di impostare una serie di casi di carico partendo da un valore di pressione interna di 0,1 MPa fino a 1,5 MPa. Considerando che il range medio di funzionamento degli attuatori lineari pneumatici è fino a 9 bar si vuole aumentare la pressione interna fino a raggiungere un coefficiente di sicurezza non idoneo e individuare una pressione di cedimento, oltre ad avere un'analisi di sensitività al variare della pressione di alimentazione.

È stata generata una mesh non troppo fine con dimensione media di 2 mm perché le geometrie non sono complesse e gli elementi sono del tipo solidi tetraedri a 4 nodi. Durante la generazione della mesh sono stati segnalati degli errori di compenetrazioni fra le guarnizioni e il pistone e fra gli O-ring e il cilindro, quindi sono state modificate le dimensioni e portate tutte alle grandezze nominali. Una volta costruita la mesh il modello si presenta in Figura 29:

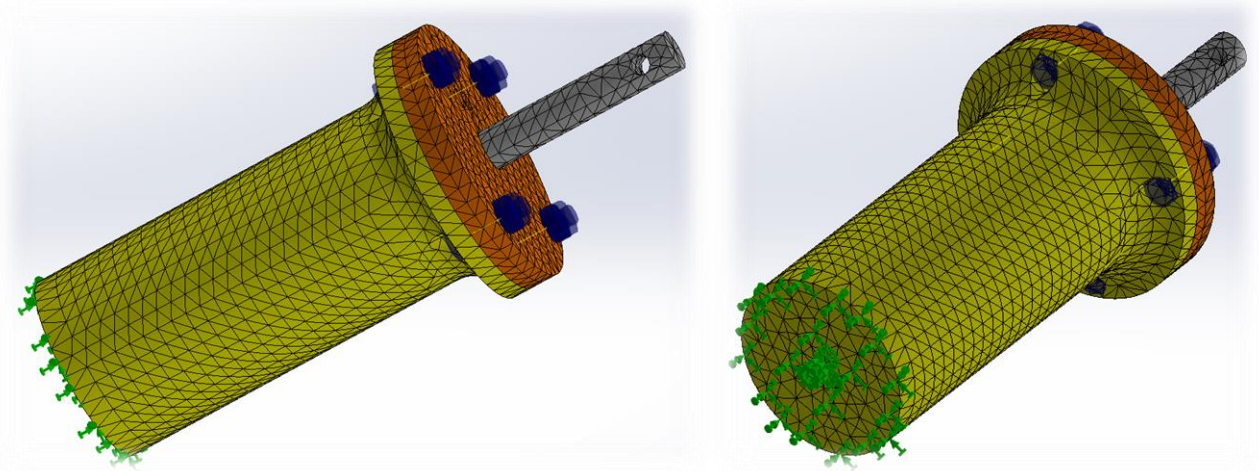


Figura 29 - creazione della mesh del modello

Definiti i vincoli e i carichi e definita una mesh la simulazione può essere lanciata.

Più volte il calcolo non è riuscito a raggiungere la convergenza, molto probabilmente la causa è legata agli elementi elastomerici nei quali il modulo di Young è molto basso e rende instabile il calcolo. Per questo motivo si è deciso di eliminare le guarnizioni e gli O-ring dal modello in quanto ritenuti non strutturali. Inoltre, essendo il carico applicato solo al cilindro e alla testata anteriore, per semplificare il modello si è deciso di eliminare anche il pistone, Figura 30 Figura 28. Pertanto si riportano i risultati con lo scopo principale di analizzare gli andamenti e confrontare i punti più sollecitati.

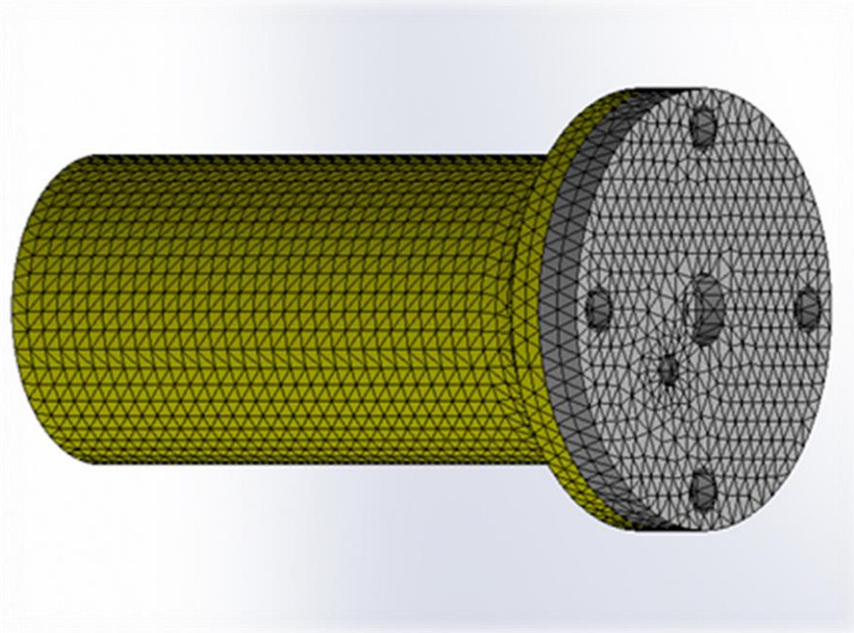


Figura 30 - Nuovo modello con mesh con elementi solidi a 4 nodi.

Nella **Tabella 1** è riportato il report della mesh generato direttamente da SolidWorks, per valutare la bontà della mesh. Se vi è un numero elevato di elementi distorti (identificabili mediante il jacobiano) i risultati della simulazione diventano molto poco affidabili. In questo caso non vi sono elementi distorti grazie anche alla semplicità della geometria del modello.

Tipo di mesh	Mesh di elementi solidi
Mesher usato:	Mesh standard
Transizione automatica:	Disattivato
Includi loop automatico della mesh:	Disattivato
Punti jacobiani	4 Punti
Dimensione elemento	2,83674 mm
Tolleranza	0,141823 mm
Grafico qualità della mesh	Ottima
Nodi totali	66507
Elementi totali	40611
Rapporto d'aspetto max	30,811
% di elementi con rapporto d'aspetto < 3	97
% di elementi con rapporto d'aspetto > 10	0,175
% di elementi distorti (Jacobiani)	0
Tempo per completare la mesh (hh:mm:ss):	00:00:06

Tabella 1 - Report della Mesh

3.3 Discussione dei risultati.

Si analizzano ora gli spostamenti, le tensioni massime raggiunte e il coefficiente di sicurezza calcolato secondo il criterio di Von Mises. Per semplicità si riportano i grafici del caso di carico con pressione interna a 0,6 MPa.

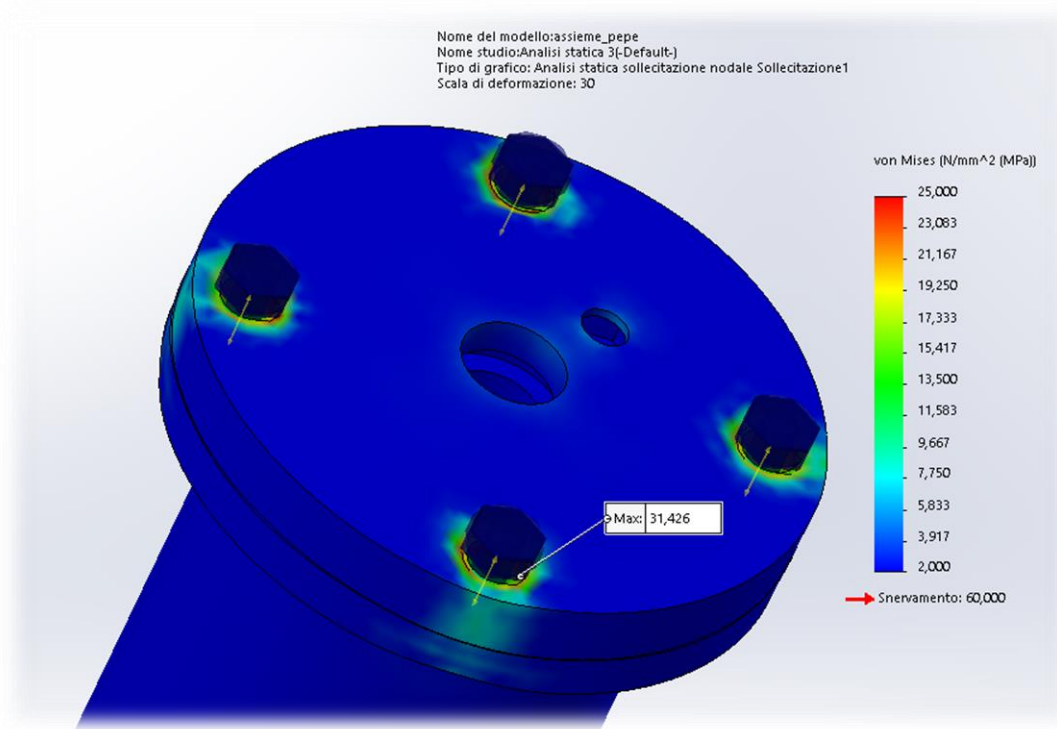


Figura 31 - Andamento della Tensione di Von Mises alla pressione interna di 0,6 MPa

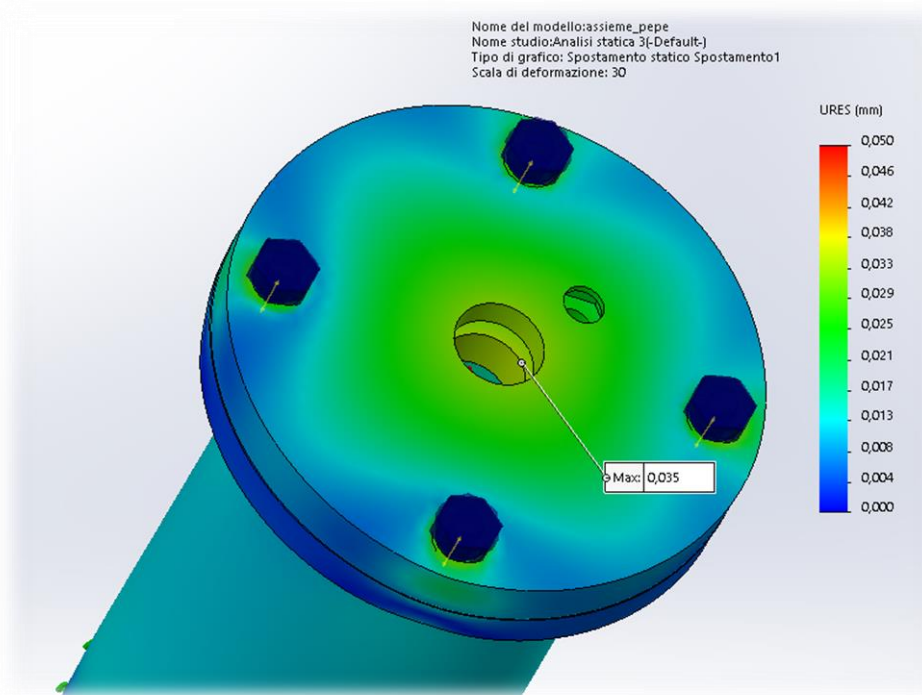


Figura 32 - Spostamento MAX alla pressione interna di 0,6 MPa

Nelle Figure 31 e 32 e 33 sono riportati, rispettivamente, i grafici e i valori della tensione equivalente massima secondo il criterio di Von e lo spostamento massimo rilevato. Per ottenere una rappresentazione apprezzabile della deformazione è stato necessario aumentare il fattore di scala di 30 volte. Si può notare come la tensione massima sia raggiunta in corrispondenza del bordo del foro di uno delle 4 viti di fissaggio della testata anteriore. Tuttavia con il valore massimo calcolato di 31,43 MPa si ha un coefficiente di

sicurezza molto vicino a 2, si deduce quindi che a 6 bar l'attuatore non ceda e riesca a contenere la pressione interna.

Lo spostamento massimo è localizzato nell'intorno del foro della testata nella quale scorre il pistone, più precisamente sul bordo inferiore. Come previsto, lo spostamento è nullo in corrispondenza della faccia inferiore del cilindro in corrispondenza del vincolo. Anche in questo caso per poter apprezzare graficamente uno spostamento è stato necessario aumentare il fattore di scala fino a 30. Aumentando la pressione di alimentazione si nota che lo spostamento massimo è sempre localizzato in corrispondenza del foro dello stelo nella testata anteriore. Ciò è ragionevole in quanto le viti in acciaio hanno una resistenza di gran lunga superiore alla testata. L'andamento ricorda quello di una piastra incastrata lungo il bordo esterno. Ragionevolmente, nel comportamento reale, una volta deformatasi la testata anteriore la tenuta verrebbe meno e l'aria che fuoriesce scaricherebbe istantaneamente il cilindro e la pressione al suo interno decade. Sarebbe invece interessante verificare sperimentalmente se si manifesti per prima una separazione dei layer nel cilindro o una separazione dei due corpi cilindro-testata.

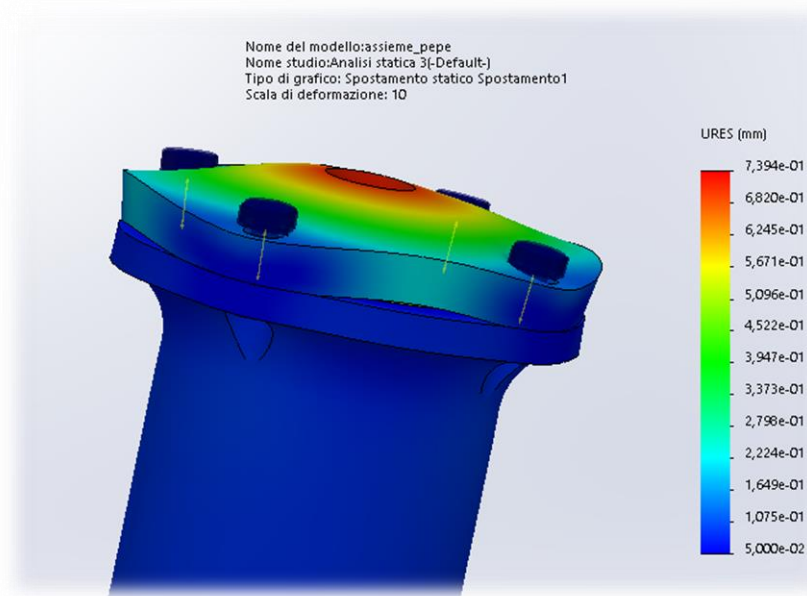


Figura 33 - Rappresentazione grafica spostamento equivalente a 4Mpa con fattore di scala 10

Nelle Figure 34, 35, 36 sono stati raccolti i risultati dei calcoli effettuati di tensione equivalente massima, spostamento risultante massimo e coefficiente di sicurezza per i diversi casi di carico. A rigore, per confrontare le diverse tensioni equivalenti, bisogna considerare sempre lo stesso nodo dove valutare la tensione, il quale non necessariamente sarà sempre quello più sollecitato per ogni caso di carico.

Bisogna tener presente, nella lettura di questi dati, che il calcolo è lineare statico e vi è approssimazione anche nella condizione di carico, cioè si ipotizza che l'assieme del cilindro e della testata realizzino una camera perfettamente isolata dall'ambiente esterno. Inoltre, non si considerano eventuali fughe che scaricherebbero la pressione interna: non pare infatti realistico che il componente possa reggere una pressione di alimentazione oltre 10 bar, tuttavia il punto più sollecitato e quello con lo spostamento maggiore risultano verosimili e possono essere tenuti in considerazione per le modifiche strutturali di progettazione future. In questo stadio della progettazione potrebbe essere un buon metodo quello di controllare lo spostamento massimo e assicurarsi che esso non superi i 0.12mm che equivale alla distanza minima tra un layer e il successivo durante la fase di stampa. Analizzando l'andamento del coefficiente di sicurezza, ammettendo di voler un coefficiente maggiore di 2, non si potrebbe alimentare l'attuatore con una pressione maggiore di 2 bar. Il calcolo però è stato qualitativamente utile per capire che, ad esempio, aumentare il numero di viti di fissaggio può essere un'ottima soluzione per aumentare la resistenza meccanica dell'attuatore, oppure aumentare lo spessore del cilindro per avere una minore deformazione nella direzione radiale.

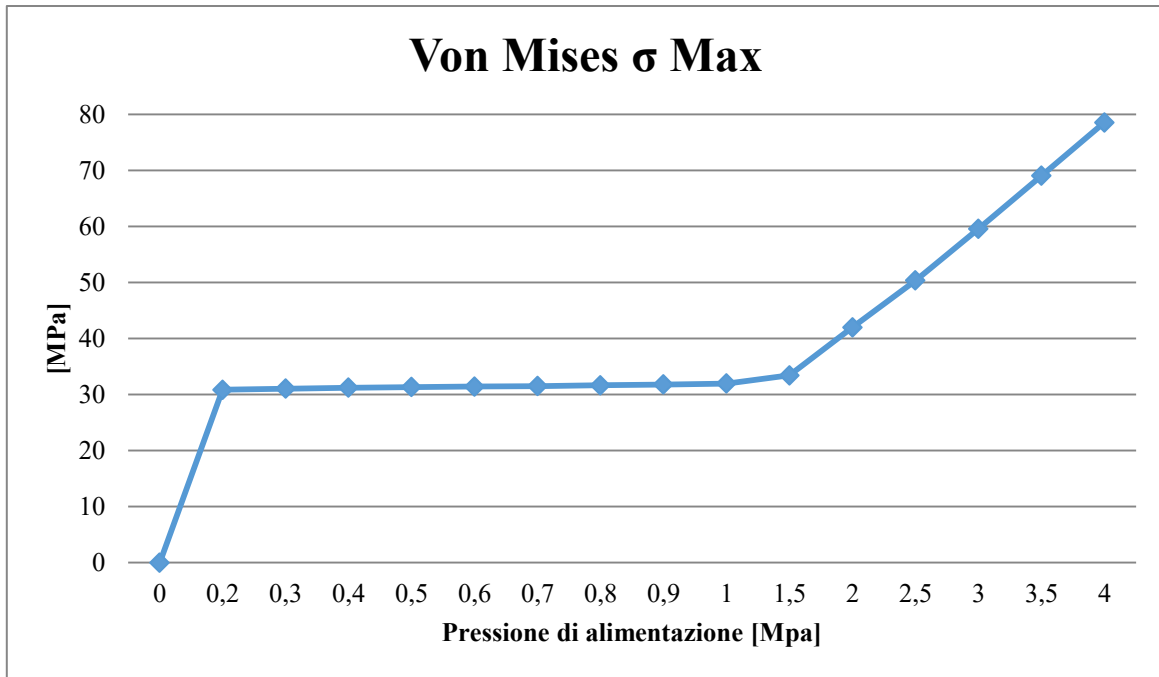


Figura 34 - Andamento della tensione equivalente di Von Mises

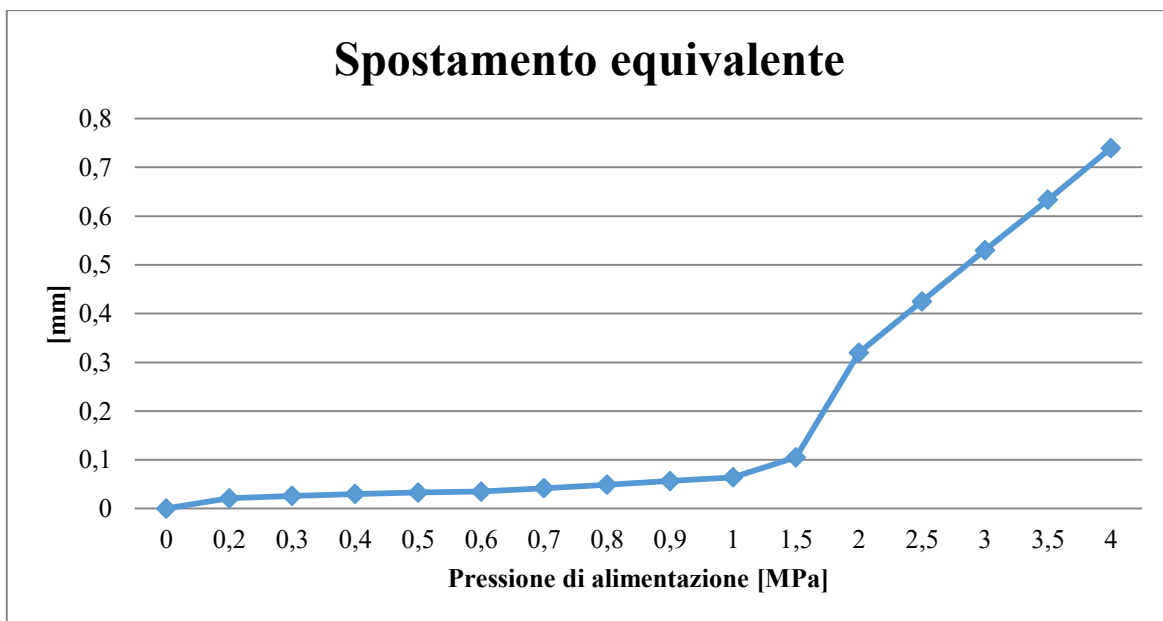


Figura 35 - Andamento dello spostamento equivalente al variare della pressione di alimentazione

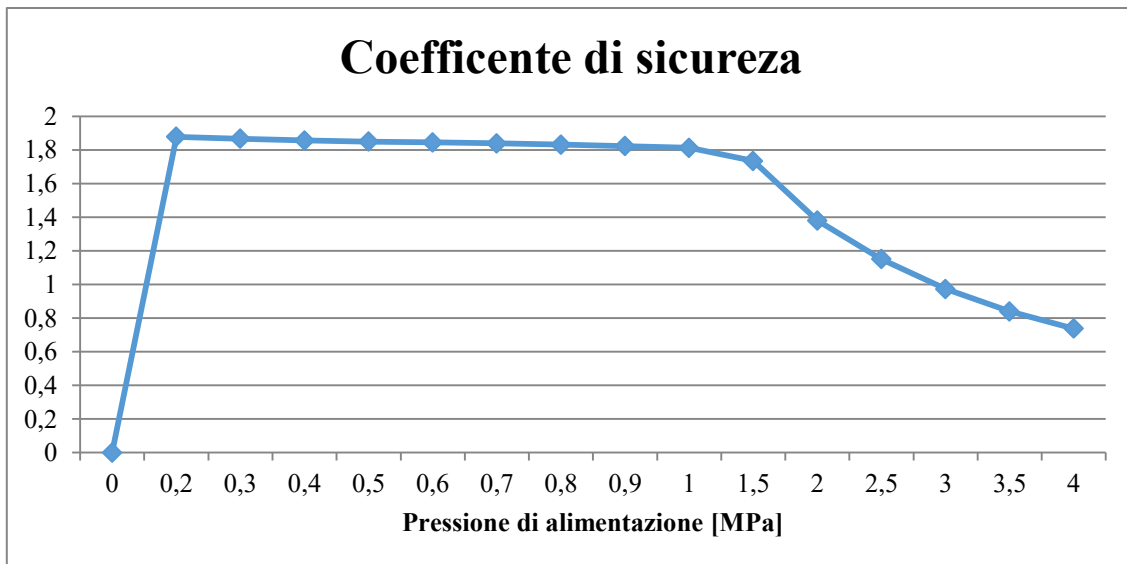


Figura 36 - Andamento del coefficiente di sicurezza al variare della pressione di alimentazione

3.4 Confronto analisi FEM dei tre modelli di materiale

Il calcolo è stato condotto mantenendo lo stesso modello CAD ma inserendo i materiali che si intende utilizzare in questo progetto, per poter costruire un confronto tra i diversi comportamenti meccanici sotto le stesse condizioni di carico. In particolare i materiali registrati sono:

- Nylon PA12 processato con tecnologia di stampa SLS;
- PLA processato con tecnologia FDM.

È necessario sottolineare che lo spostamento massimo che viene calcolato nel caso di attuatore in Nylon è localizzato in corrispondenza del bordo di uno dei 4 fori per le viti di fissaggio nella testata anteriore fino alla pressione di alimentazione di 0.6 Mpa. Non appena si passa al caso di carico con pressione pari a 0.7 Mpa il punto con spostamento massimo è localizzato nel bordo inferiore interno del foro per lo stelo.

Il calcolo non ha raggiunto la convergenza per valori superiori a 2,5 MPa.

I risultati rispecchiano quanto previsto ovvero che il Nylon PA12 stampato con SLS predilige la finitura superficiale a scapito delle caratteristiche meccaniche. Infatti, il modello settato con materiale Nylon PA12 esibisce uno spostamento doppio rispetto al modello in PLA (Figura 38 - Andamento dello spostamento massimo in funzione della pressione di alimentazione per PLA e Nylon PA12 Figura 38). Il vantaggio comunque di usare Nylon PA12 stampato con SLS è quello di avere un comportamento isotropo del componente.

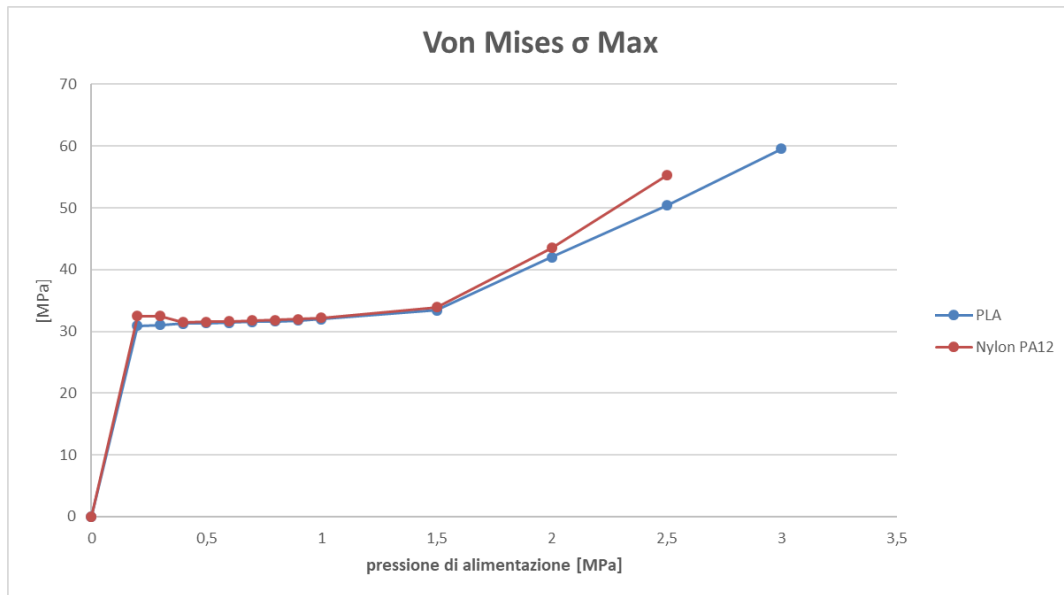


Figura 37 - Andamento della tensione equivalente massima in funzione della pressione di alimentazione per PLA e Nylon PA12

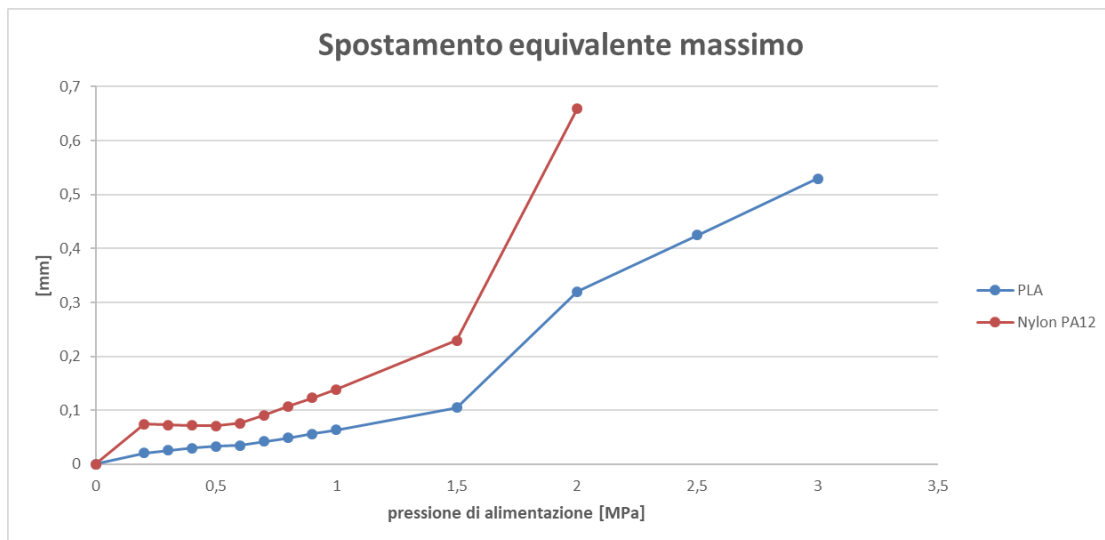


Figura 38 - Andamento dello spostamento massimo in funzione della pressione di alimentazione per PLA e Nylon PA12

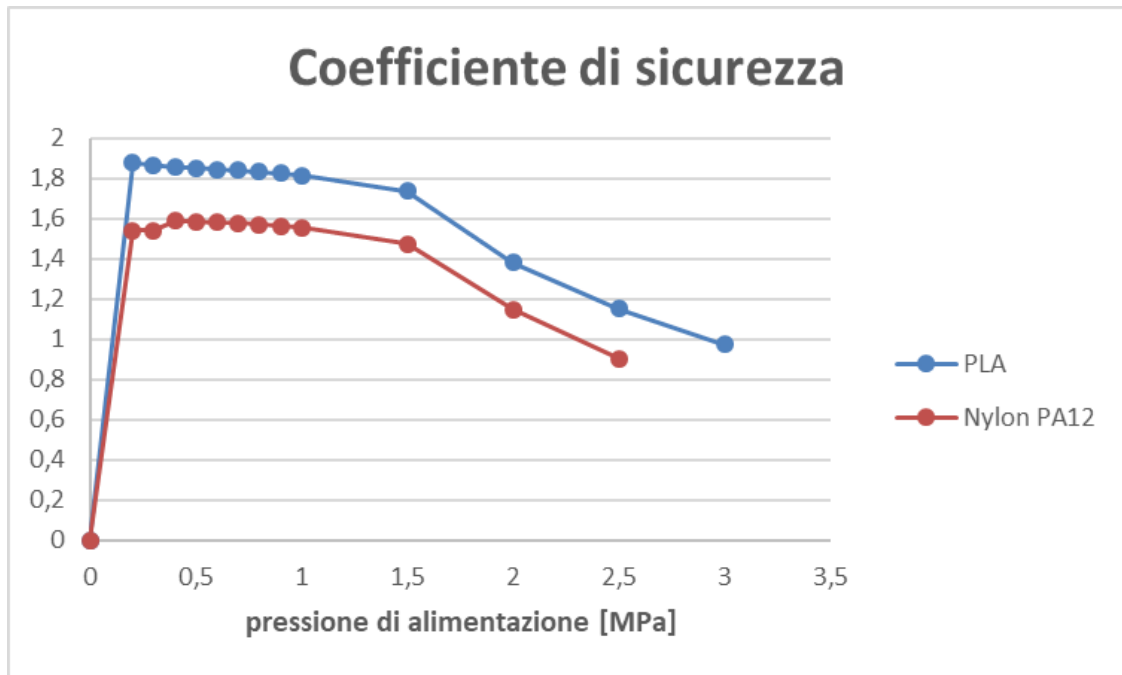


Figura 39 -Andamento del coefficiente di sicurezza in funzione della pressione di alimentazione per PLA e Nylon PA12

4 Realizzazione dei componenti dell'attuatore

La fase realizzativa dei prototipi è stata quella più interessante e più corposa del progetto, poiché proprio in questa fase si è potuto constatare quali fossero gli eventuali limiti dei componenti. Questa fase puramente sperimentale ha soprattutto l'obiettivo di confrontare i risultati della simulazione numerica con quelli effettivamente misurati per correggere il modello o eventualmente validarlo.

Per scegliere i materiali con i quali realizzare i prototipi sono stati prima visionati diversi provini dimostrativi, forniti dal laboratorio del politecnico stesso. Come illustrato nell'introduzione della tesi, le macchine usate sono state la Object Prime di Stratasys per la tecnologia Polyjet, la Ender 3 di Creality con tecnologia FDM e la Eos Formiga con tecnologia SLS.

Di seguito vengono riportate tutte le fasi realizzative in ordine cronologico di produzione.

4.1 Stampa dei componenti con Object30 PRIME™ and Object Studio

La macchina messa a disposizione che è stata usata per la realizzazione dei primi prototipi, sia per le guarnizioni che per i corpi rigidi, è la Object30 Prime™ by Stratasys. La macchina è particolarmente indicata per la costruzione di strumentazione medico-sanitaria, apparecchi che devono stare a contatto con la cute per diverso tempo e attrezzatura chirurgica [7]. È inoltre indicata per la realizzazione di prototipi di guarnizioni, connettori e tenute, per questo si sposa perfettamente col presente progetto. La macchina riesce ad elaborare fino a 12 materiali diversi.

Il software slicer proprietario di Stratasys è chiamato Object Studio all'interno del quale si importano i file .STL direttamente generati dal software CAD (Solidworks nel caso in esame). L'interfaccia utente si presenta come in Figura 40:

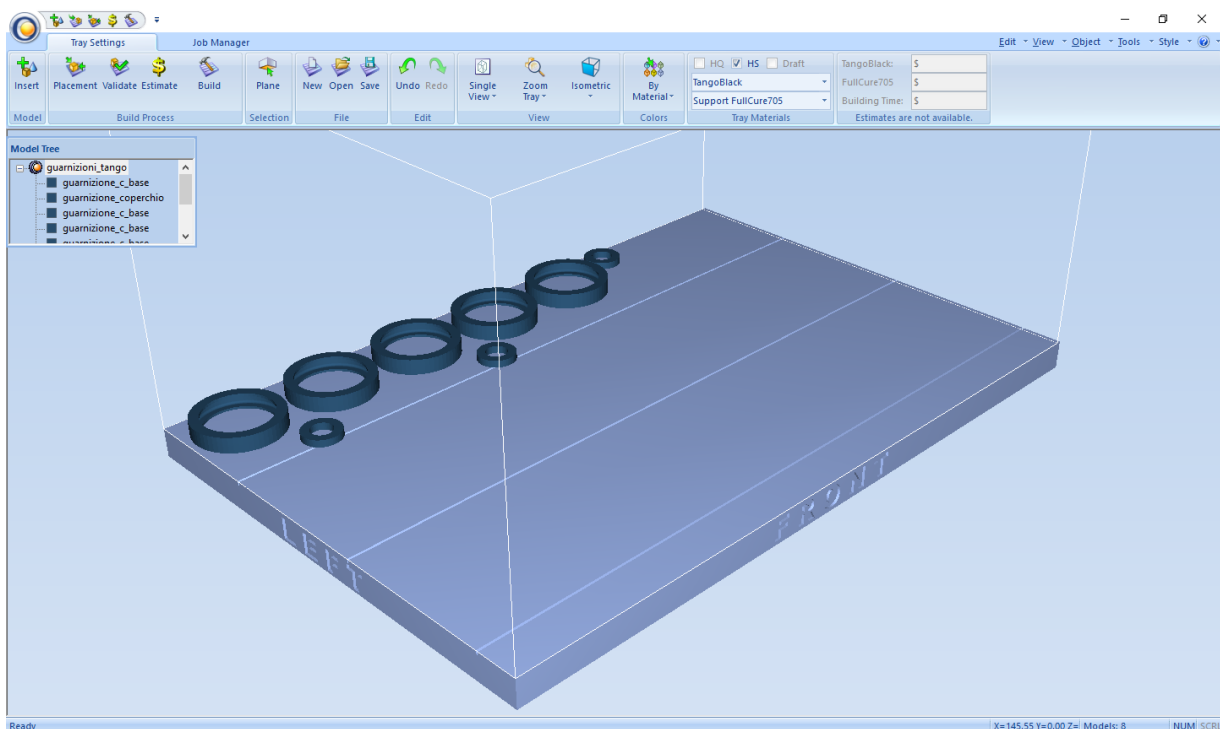


Figura 40 - Interfaccia grafica di Object Studio

Nell'area di lavoro è rappresentato il volume di stampa della macchina e in particolar modo l'orientazione del piano di stampa. La procedura è abbastanza guidata ed è possibile modificare i vassoi, assegnare i materiali sia del pezzo che dei supporti, gestire le code di stampa. Una volta caricati i modelli da realizzare si scelgono i parametri di processo come la qualità, il materiale e così via. Data l'elevata complessità della tecnologia polyject, Stratasys non permette all'utente di intervenire su molti parametri come ad esempio la personalizzazione di eventuali supporti, la velocità di spostamento della testa, ma limita la scelta alla selezione tra diversi "profili" di stampa preconfigurati, quali:

- HQ, High Quality
- HS, High Speed
- DRAFT, low quality

È comodo però far decidere al software la posizione dei pezzi sul piano per ottimizzare il tempo di stampa. Una volta finito lo slicing il programma comunica i dati dello stato della stampante e, verificato il tutto, si lancia la stampa. Lo slicer fornisce le stime della quantità di materiale che verrà utilizzato ed il tempo totale di stampa.

4.1.1 Job 1: stampa delle guarnizioni in resina.

Per tutte le guarnizioni si è scelto un profilo di stampa HS: High Speed, perché l'unico previsto per il TangoBlack. Il TangoBlack è il nome commerciale che Stratasys ha dato alla sua resina ideale per creare prototipi flessibili con caratteristiche estetiche e fisiche che ricordano la gomma. È usato per simulare rivestimenti "soft-touch" (Figura 41), superfici antiscivolo, particolarmente indicato per la realizzazione di guarnizioni custom [7] superfici ad alto coefficiente di grip e soles di calzature. È utilizzato anche per la creazione di shock-absorber e smorzatori di vibrazioni [7]. Le caratteristiche meccaniche sono riportate in Figura 41.

TangoBlack FLX973			
	ASTM	METRIC	ENGLISH
Tensile Strength	D-412	1.8-2.4 MPa	115-220 psi
Elongation at Break	D-412	45-55%	45-55%
Compressive Set	D-395	0.5-1.5%	0.5-1.5%
Shore Hardness (A)	D-2240	60-62 Scale A	60-62 Scale A
Tensile Tear Resistance	D-624	3-5 Kg/cm	18-24 lb/in
Polymerized Density	D-792	1.14-1.15 g/cm³	

SYSTEM AVAILABILITY	LAYER THICKNESS CAPABILITY	SUPPORT STRUCTURE	AVAILABLE COLORS
Objet30 Prime™	28 microns	SUP705 (WaterJet removable) SUP706 (Soluble)	Black, Gray
Objet260/500 Connex1™	16 microns	SUP705 (WaterJet removable) SUP706 (Soluble)	Black, Gray, Translucent
Objet260/350/500 Connex3™	16 microns		Black, Gray, Translucent
Stratasys J735™, Stratasys J750™	14 microns		Black, Gray, Translucent
Objet1000 Plus™	16 microns	SUP705 (WaterJet removable)	Black, Translucent

Figura 41 - Datasheet del TangoBlack usato per le guarnizioni [7]

Questo profilo prevede un'altezza di layer pari a 28 μm ed è stata impostata una superficie di tipo "Glossy" poiché la si vuole liscia.

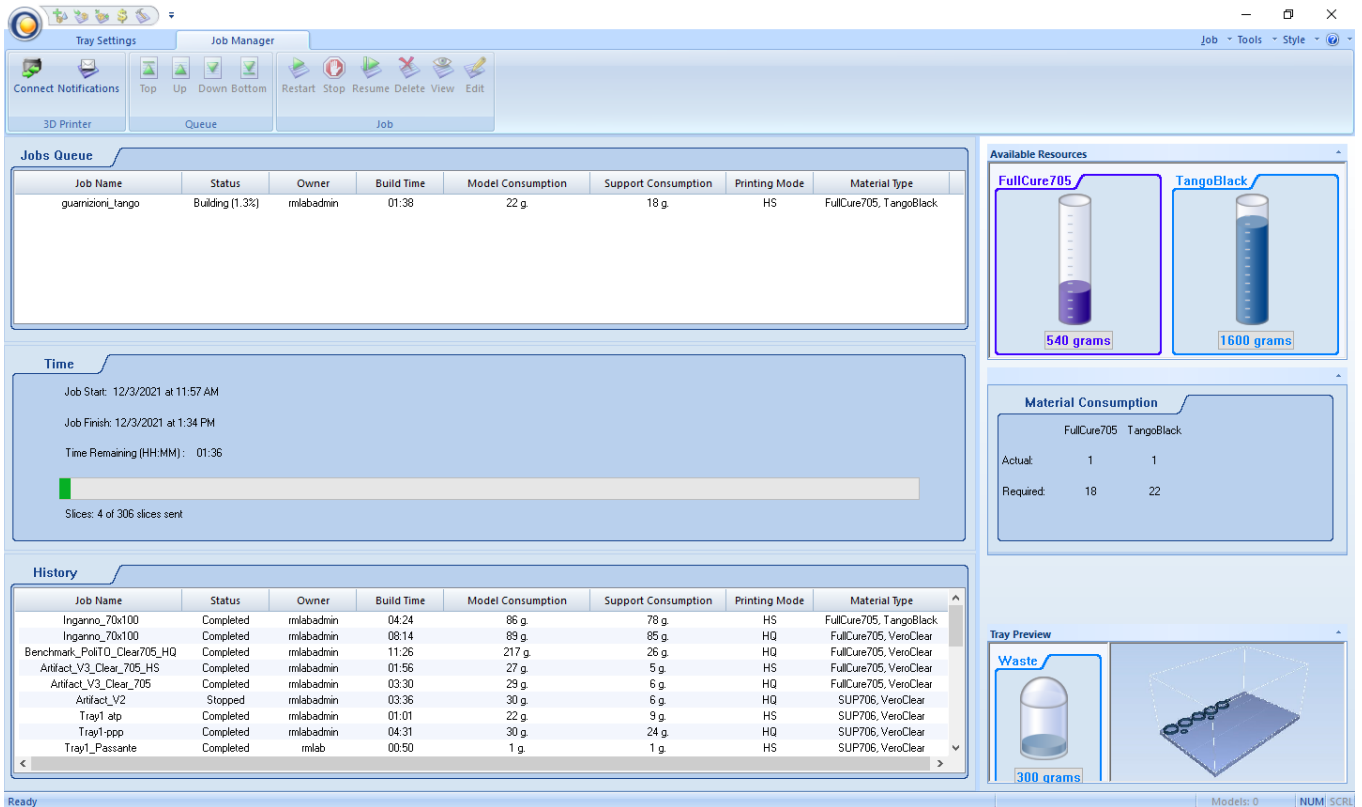


Figura 42 - dati di processo calcolati da Object Studio

Si è deciso di mandare per prima in stampa le guarnizioni dell'attuatore sia perché il materiale caricato in macchina era già il TangoBlack sia perché esse andranno calettate nel pistone e annegate nella testata e quindi dovranno essere già disponibili al momento delle altre stampe. Nonostante le guarnizioni necessarie siano solo due per la testa del pistone e una piccola dentro la testata, si è deciso di stampare un numero di copie superiore per sicurezza e ricambio in caso di rottura durante il montaggio.

Il primo job prevede: 4 guarnizioni con profilo a C e 3 guarnizioni per la testata, tempo di stampa stimato di 6h.

Una volta terminata la stampa e aperta la macchina i componenti si presentano come in Figura 43:





Figura 43 - Guarnizioni posizionate sul piano di stampa

Nonostante la stampa sia stata completata al 100% senza nessun messaggio di errore dalla macchina o dal software, sfortunatamente queste prime prove non hanno dato i risultati sperati in quanto la geometria risultante dei pezzi non rispecchia quelle dei CAD. I pezzi una volta rimossi dalla macchina appaiono come in Figura 44:



Figura 44 - guarnizioni difettate e danneggiate

Si presentano fortemente deformate e pare che la macchina non sia riuscita depositare il materiale di supporto alla base delle guarnizioni. In realtà, poiché il software non propone un'anteprima 3D di stampa, non è ben chiaro il motivo di tale errore di stampa. Con una prima analisi si nota che la macchina ha depositato materiale di pezzo al posto dei supporti facendo fondere insieme la base e la guarnizione, per maggiore comprensione si osservi la Figura 45 nella quale si riporta una ricostruzione del pezzo difettato.

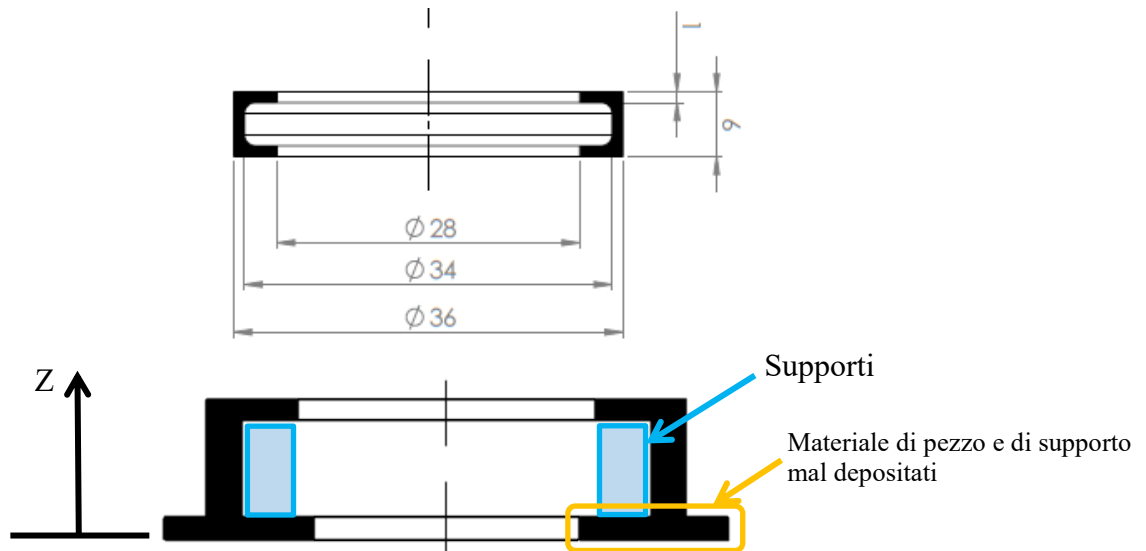


Figura 45 - Sezione della guarnizione CAD in alto; ricostruzione del pezzo difettato stampato in basso

Il materiale di supporto lo si può trovare, giustamente, all'interno del pezzo nella cavità individuata dai due lembi. Durante la rimozione di tale materiale, il quale risulta essere molto spugnoso, i diversi componenti si sono danneggiati. Si nota, dunque, che la resistenza del materiale è decisamente sotto la soglia dichiarata dai dati di targa. Il danneggiamento dei pezzi durante la pulizia e la rimozione dei supporti evidenzia lo stato di degradazione del TangoBlack. Si ipotizza che tale fenomeno sia dovuto al fatto che il flacone utilizzato riporta una data di scadenza ormai trapassata rispetto alla data di esecuzione della stampa.

Sono state condotte altre prove simili per verificare che il problema non fosse dovuto ai modelli ma alle condizioni operative della macchina, ma i risultati sono stati tutti negativi.

4.1.2 Job 2: stampa del cilindro corpo e pistone

Il secondo Job di stampa prevede la realizzazione del corpo cilindro e del relativo pistone. Le due parti sono importate nel programma e posizionate nel piano virtuale.

In questo caso il materiale usato è il RGD720, una resina molto simile al VeroClear (purtroppo non disponibile al momento della stampa) ma con una minore trasparenza scelta appositamente per poter vedere attraverso il cilindro il movimento del pistone quando è attuato. I dati tecnici sono riportati nella Figura 46 (dati direttamente prelevati dal sito web di Stratasys):

PRIMARY MATERIAL: RGD720 SECONDARY MATERIAL: VEROBLACKPLUS RGD875			
PROPERTY	ASTM	UNITS	RGD7513-DM (DOTS) RGD7523-DM (GRID)
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-65
Elongation at break	D-638-05	%	15-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000
Flexural strength	D-790-03	MPa	80-110
Flexural modulus	D-790-04	MPa	2700-3300
HDT, oC @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50
Izod notched impact	D-256-06	J/m	20-30

PRIMARY MATERIAL: RGD720 SECONDARY MATERIAL: TANGOBLACK FLX973					
PROPERTY	ASTM	UNITS	RGD7210-DM	RGD7220-DM	RGD7230-DM
Tensile strength	D-638-03	MPa	50-55	50-55	45-50
Elongation at break	D-638-05	%	15-25	15-25	15-25
Modulus of elasticity	D-638-04	MPa	2200-2500	2000-2300	1700-2000
Flexural strength	D-790-03	MPa	80-90	75-85	70-80
Flexural modulus	D-790-04	MPa	2300-2700	2200-2600	2100-2400
HDT, oC @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50	45-50	45-50
Izod notched impact	D-256-06	J/m	20-30	20-30	20-30

Figura 46 - Dati del RGD720 e del suo materiale di supporto [7]

Questa volta il software ha reso disponibile il profilo HQ per un'alta qualità di stampa. Il software, inoltre, suggerisce di orientare i due pezzi di natura assial-simmetrica con l'asse direzionato parallelamente al piano di stampa, probabilmente perché calcola un tempo minore di esecuzione e un minor consumo di materiale.

Il job ha un tempo di completamento previsto di 24h.

Prima di mandare in stampa questi due componenti è necessario eseguire il cambio del materiale, quindi si sostituisce il contenitore del TangoBlack con quello del RGD720. Questa operazione è gestita dalla macchina che esegue una pulizia degli ugelli e uno spurgo dei condotti. È stata effettuata anche una pulizia a mano delle teste porta ugelli e del piano di stampa con una soluzione alcolica.

I due componenti una volta aperta la macchina si presentano come in Figura 47:

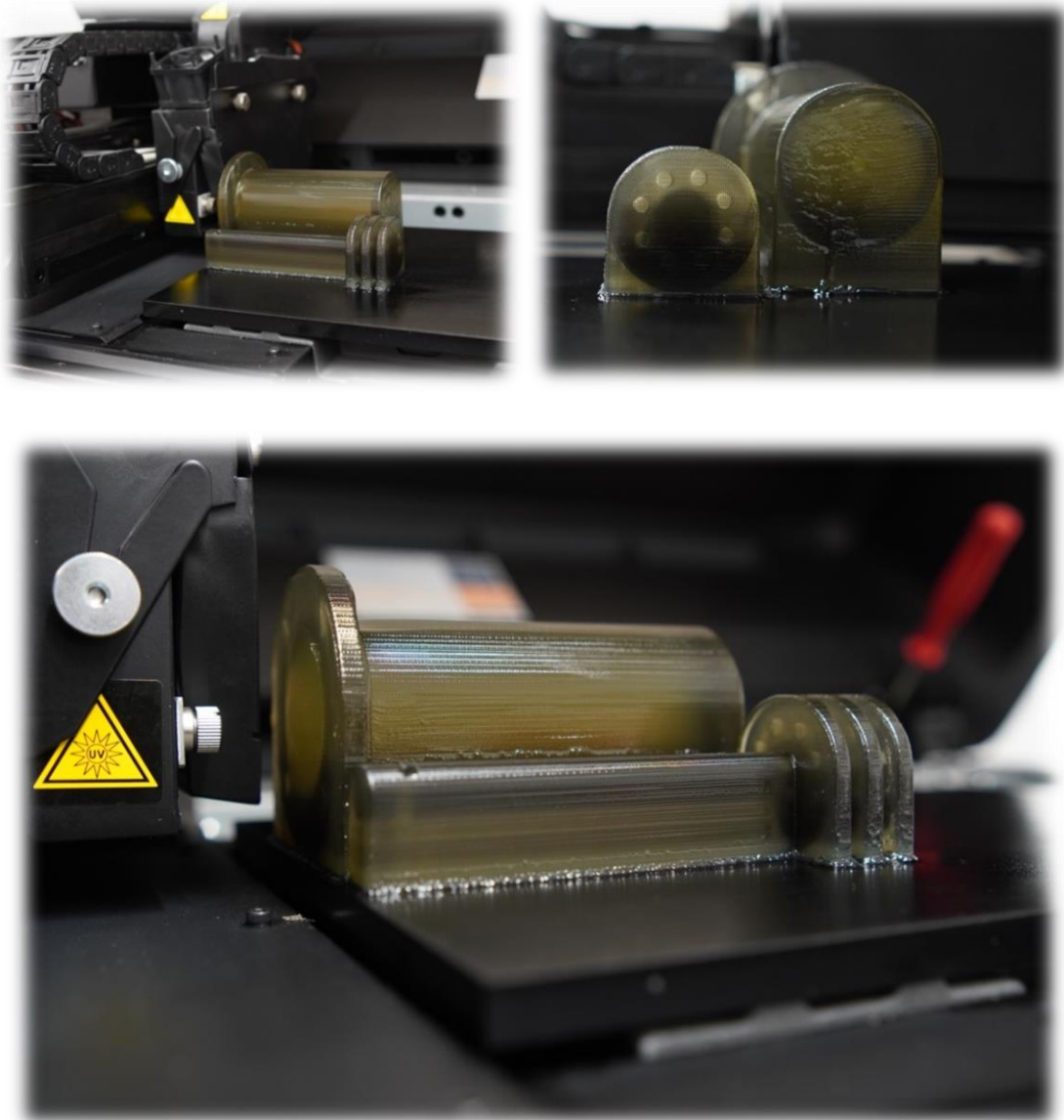


Figura 47 - Cilindro e stelo posizionati nel piano di stampa ancora inglobati nel materiale di supporto

Come si evince dalle foto, i pezzi sono interamente ricoperti dal materiale di supporto, quindi una volta rimossi i pezzi dal piano di stampa si è passati al lavaggio per la rimozione dei supporti. La consistenza dei supporti ricorda quella di un materiale siliconico ma più friabile. Con l'aiuto di un getto d'acqua in pressione e dopo circa 60 minuti di lavaggio i pezzi si presentano come in Figura 48:



Figura 48 - Cilindro e stelo dopo il lavaggio

Il gradiente di colore, non previsto e non voluto, è dovuto sicuramente ad una pulizia non corretta degli ugelli della macchina durante il cambio del materiale, nonostante sia un'operazione automatica interamente gestita dalla macchina ma soprattutto dispendiosa in termini di quantità di resina. Si evince che, con molta probabilità, la stampante ha avuto un periodo esteso di non attività e necessita dunque di essere ricalibrata. Ad ogni modo, si è passati innanzitutto alla misurazione delle geometrie. Il pistone ha un diametro della testa effettivo di 36mm - anche se la sezione non è perfettamente circolare - e una lunghezza effettiva di 121 mm, in linea con la geometria CAD. La stampa del cilindro, invece, ha presentato un grosso difetto di circolarità, come si vede in Figura 49:



Figura 49 - errore di stampa, particolare della sezione circolare

La circonferenza interna del cilindro risulta gravemente appiattita/ovalizzata sicuramente a causa del peso: evidentemente il materiale di supporto non è abbastanza rigido da sostenere tale carico. La causa è sicuramente da ricercare anche nell'orientamento del pezzo sul piano di stampa, considerando la direzione di stampa. L'errore risultante è di circa 2 mm sul diametro, rendendo impossibile l'accoppiamento con il pistone. Anche la circonferenza esterna risulta deformata seppur in misura minore, ad ogni modo si rende necessario ripetere la stampa modificando, in questo caso, solo l'orientamento per la direzione di stampa posizionando in verticale il cilindro cioè con l'asse perpendicolare al piano e parallela alla direzione di stampa.

Prima di stampare il nuovo cilindro nella sua interezza, si è ritenuto opportuno riprodurre solo una porzione di cilindro per verificare che le misure effettive risultanti permettano l'accoppiamento e verificare che il filetto sia corretto per il raccordo che si dovrà innestare.

4.1.3 Job 3 e 4: stampa secondo provino RGD720

SI è deciso di stampare i primi 35 mm del cilindro. Questa prova consentirà di verificare il filetto per il raccordo e la sua efficacia di tenuta, il diametro interno effettivo e la qualità della superficie di accoppiamento. Il materiale è la resina RGD720, la qualità impostata è HQ, il tempo stimato di stampa è 5h. Dopo il lavaggio il componente presenta gravi errori di stampa come si può osservare in Figura 50. Quasi 1/3 della superficie cilindrica esterna risulta stratificata e sfogliata, ancora una volta pare che la macchina non riesca a depositare adeguatamente il materiale di pezzo e quello di supporto. Non si riescono a capire a fondo le cause di questi errori di stampa soprattutto perché in fase di preparazione del modello in Object Studio non è possibile agire sui parametri di stampa e di processo.



Figura 50 - provino cilindro h=35mm difettato

Si decide allora di riproporre la stessa stampa per escludere eventuali errori casuali della macchina. Il pezzo da stampare è lo stesso della prova precedente con la sola modifica lato CAD del foro filettato, ora un $M5 \times 1mm$ invece del precedente $M5 \times 1,6mm$. Questa volta si è deciso di scegliere una qualità minore di stampa selezionando SQ (Standard Quality) invece di HQ. Il pezzo è stato collocato in una posizione diversa rispetto a quello precedente poiché in questo job è presente un altro componente, come mostrato nella Figura 51.

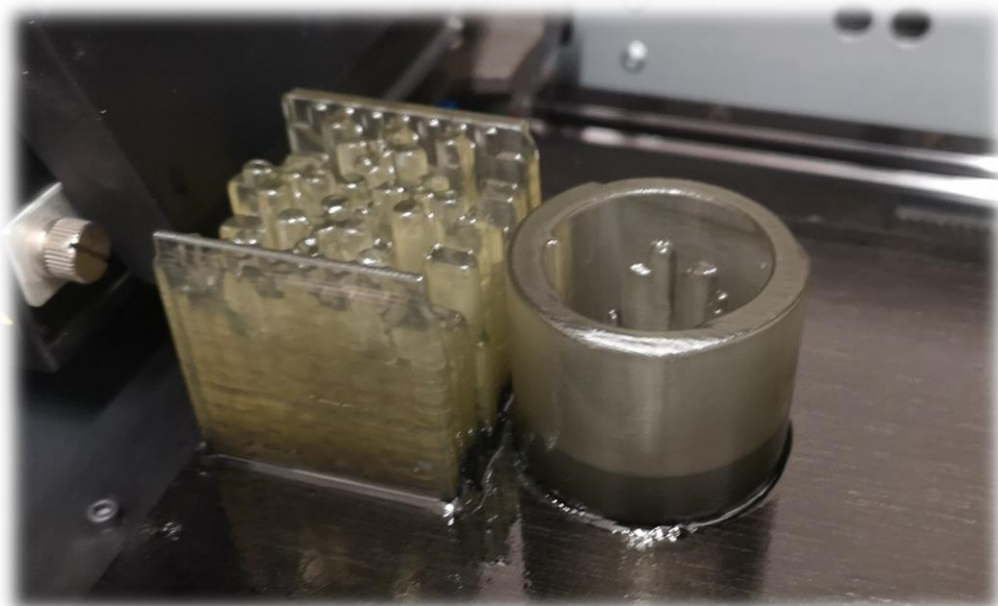


Figura 51 - Stampa del provino del cilindro in qualità Standard

Il componente si presenta migliore rispetto al precedente già dall'apertura della copertura della macchina (Figura 52). Qualche difetto con effetto di "colatura" è ancora tuttavia presente sul bordo esterno del cilindro, mentre nel bordo interno si sono formate come delle stalattiti. Una volta pulito il componente nell'idro-pulitrice si nota un difetto nella superficie interna (che è quella di interesse perché di accoppiamento) del solito effetto di colatura del materiale, non è chiaro se si tratta di materiale di supporto o di pezzo.



Figura 52 - Provini del cilindro. A sinistra qualità HQ, a destra qualità SQ

La filettatura ora corretta sembra saldare molto bene il raccordo, infatti si è reso necessario l'utilizzo di un attrezzo per serrare fino in fondo il raccordo. La superficie non si presenta liscia come previsto (in confronto con i provini dimostrativi), al tatto si percepiscono forti irregolarità anche dovute alla difficile rimozione dei piccoli residui di supporti. Il diametro medio misurato è di 36mm contro i 36,5mm nominali previsti al CAD. L'accoppiamento infatti non è con gioco come previsto ma risulta incerto/interferenza, tuttavia facendo scorrere i due pezzi il pistone porta via residui di materiale dal cilindro, sicuramente materiale di supporto. Per riuscire ad accoppiare i due componenti, piuttosto che stampare un nuovo provino si è deciso di lavorare il pistone e passarlo in tornitura. Il provino del cilindro, invece, è stato lavorato a mano con l'ausilio di carta abrasiva fine. A valle di queste lavorazioni, i nuovi diametri risultano essere:

- diametro pistone pari a 35.9mm
- diametro cilindro pari a 36.2mm

I due componenti ora riescono ad essere accoppiati ma hanno bisogno di troppa post-lavorazione prima di poter essere assemblati. Non si è ritenuto opportuno valutare la possibilità di modificare le geometrie al CAD in quanto gli errori di stampa sono stati una costante in tutte le prove effettuate, rendendo di fatti inutilizzabili i componenti. La scelta è stata dettata anche dalla volontà di evitare inutili sprechi di materiale.



Figura 53 - Componenti stampati con Objet Prime non idonei

Le diverse prove di stampa condotte con la Stratasys Object hanno dato risultati molto lontani dalle aspettative e gli inconvenienti logistici di disponibilità del materiale hanno portato ad un cambio di direzione. Si è deciso di cambiare tecnologia e spostarsi verso la stampa 3D SLS con nylon PA12 e stampa 3D FDM con PLA, TPU, PETG.

4.2 Stampa dei componenti con Creality Ender 3 FDM

La macchina utilizzata per stampare i pezzi con la tecnologia FDM è la Ender 3 della Creality (Figura 3). Nella Tabella 2 sono riportate alcune caratteristiche tecniche.

Machine model	Ender-3
Molding technology	FDM(Fused Deposition Molding)
Printing size	220*220*250mm
Printing speed	≤180mm/s, normal 30-60mm/s
Printing precision	±0.1mm
Nozzle diameter	standard 0.4mm, can be in 0.3 or 0.2mm
Hotbed temperature	≤100°C
File transfer	Online or SD card offline
File format	STL, OBJ, AMF
Slicing software	Cura, Repetier-Host, simplify3D
Power supply	input: AC 115V/230V output: DC 24V 270W
Filament	PLA, ABS, TPU, wood, copper, gradient, etc.
N.W.	6.62kg
Machine size	440*440*465mm
G.W.	8.1kg
Packaging size	530*380*200mm

Tabella 2 - Principali caratteristiche tecniche della Creality Ender 3 [15]

4.2.1 Slicer Cura by Ultimaker

Il software slicer usato per generare i file .gcode da inviare alla macchina è Cura by Ultimaker. Si tratta di uno dei software più utilizzati in campo additive manufacturing sia in ambito ingegneristico che hobbistico, è completo sotto ogni punto di vista e soprattutto è compatibile con la stragrande maggioranza delle stampanti 3D in commercio. Cura permette di intervenire su un grandissimo numero di parametri del processo di stampa e di salvare diversi profili di stampa in base, per esempio, al materiale che si vuole utilizzare (Figura 54). È stato scelto questo software anche perché la sua interfaccia utente è decisamente intuitiva e userfriendly. Come illustrato in seguito, Cura offre un'anteprima di stampa tridimensionale e ciò torna fortemente utile per poter fare considerazioni sulla scelta di alcuni parametri come, ad esempio, la creazione di supporti personalizzati.

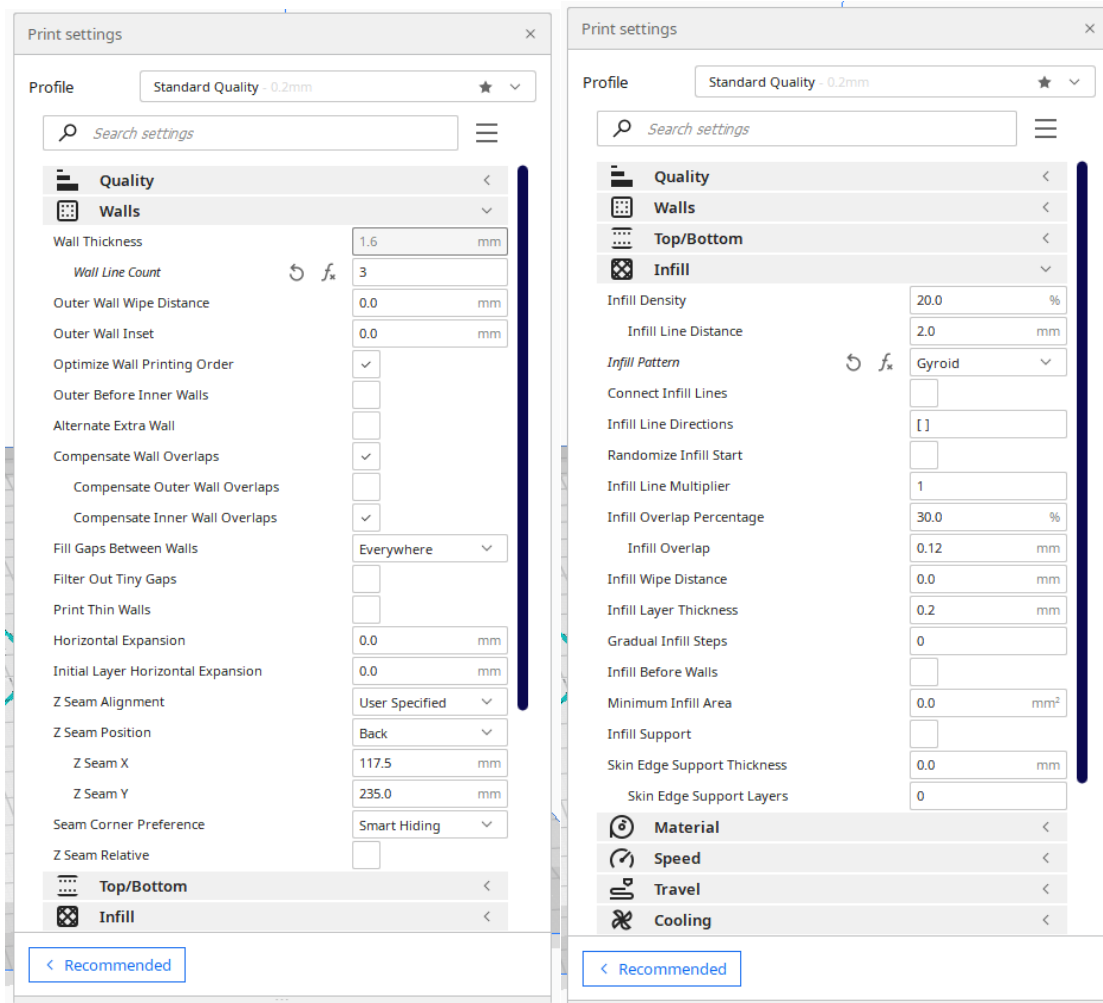


Figura 54 - Interfaccia di settaggio dei parametri di stampa in Cura

4.2.2 Stampa del pistone

Il materiale utilizzato per il pistone è PETG Poli Etilene Tereftalato, nello specifico prodotto da eSun (Tabella 3). La scelta ricade su questo polimero per diverse ragioni: prima di tutto perché è possibile estruderlo a temperature mediamente più alte degli altri materiali per stampa 3D FDM (circa 240° C) senza incorrere in problemi di deformazioni dovute a gradienti di temperatura. Si vuole stampare a temperature più alte in modo tale da incrementare l'adesione fra i vari layer, in secondo luogo perché più resistente rispetto al PLA in vista delle prove di forza da effettuare.

Filament Properties Table	
3D PRINTING FILAMENT	PETG
Density(g/cm ³)	1.27
Heat Distortion Temp(°C,0.45MPa)	64
Melt Flow Index(g/10min)	20 (250°C/2.16kg)
Tensile Strength(MPa)	52.2
Elongation at Break(%)	83
Flexural Strength(MPa)	58.1
Flexural Modulus(MPa)	1073
IZOD Impact Strength(kJ/m ²)	4.7
Durability	8/10
Printability	9/10

Tabella 3 - Caratteristiche filamento PETG eSun [23]

La geometria di questo componente ci costringe a generare una certa quantità di supporti.

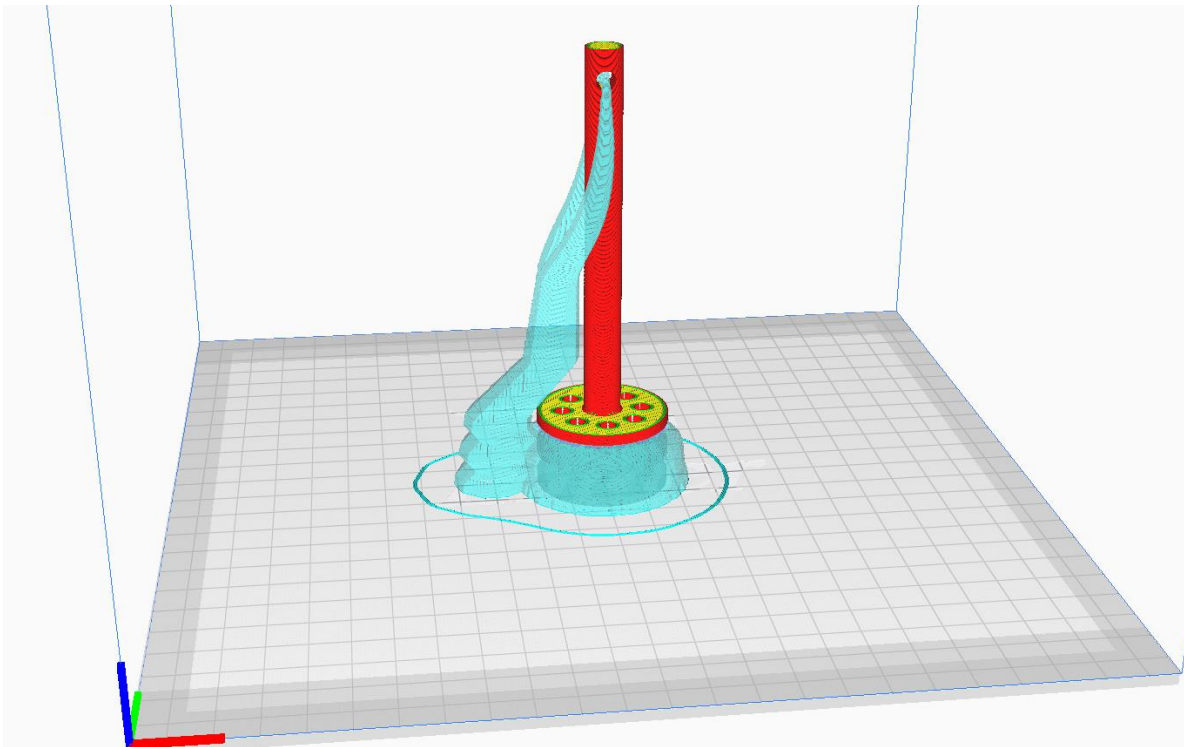


Figura 55 - Preparazione della stampa con supporti ad albero in Cura

L'orientamento in verticale sul piano di stampa non è casuale (Figura 55), si vuole ottenere la massima precisione sul piano XY che la macchina può offrire poiché il pezzo si accoppia col cilindro. Il pistone può essere stampato anche in orizzontale, il che porterebbe ad un vantaggio ovvero maggiore resistenza meccanica in esercizio ma servirebbero molti supporti che vanno a condizionare la superficie di scorrimento col cilindro. In Figura 56 è rappresentata l'anteprima del pezzo se stampato in orizzontale, la porzione colorata in azzurro rappresenta i supporti:

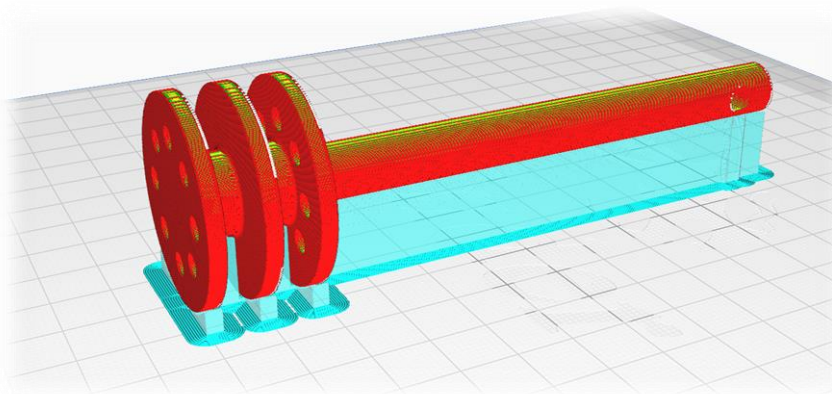


Figura 56 - Orientazione orizzontale del pistone sul piano di stampa

Si evince perfettamente la superficie risultante come successione di layer, sarebbe necessaria una post lavorazione per recuperare circolarità della superficie.

Anche ponendo il pezzo in verticale è necessario far generare dei supporti. In questo caso si è scelto di far costruire dei supporti così detti “ad albero”. I supporti ad albero consentono di avere meno superficie in comune con il pezzo, si allungano i tempi di stampa ma si guadagna in finitura superficiale. Nella Tabella 4 - Impostazioni di stampa pistone PETG Tabella 4 vengono riportati i parametri principali impostati per questa stampa:

Temperatura ugello	245° C
Temperatura piano di stampa	80° C
Altezza layer	0.12 mm
Grado di riempimento	30 %
Velocità	50 mm/s
Numero di pareti	3
Percentuale overlap	30%
Z-seam position	Random
Supporti	Si, ad albero
Modifica gcode	-
Tempo di stampa	6 h
Peso stimato	14 g
Compensazione XY layer iniziali	0.4 mm

Tabella 4 - Impostazioni di stampa pistone PETG



Figura 57 – pistone stampato prima della rimozione dei supporti

Generalmente i primi layer di ogni pezzo stampato risultano leggermente dilatati nelle direzioni che giacciono sul piano XY, per molteplici ragioni. In questo caso questo fenomeno porterebbe il componente a non avere le stesse dimensioni determinate a CAD in tutta la sua lunghezza e inficiare dunque l'accoppiamento. Per ovviare a questo problema si ricorre ad un particolare funzione racchiusa in Cura nella quale si assegna un valore di correzione che agisce sui primi n layer depositati generando un perimetro con offset negativo pari al valore impostato. In sostanza si comunica allo Slicer di generare un .gcode che comanda alla macchina di realizzare circonferenze (nel pistone i primi layer sono appunto dei cerchi) di diametro inferiore, diminuito proprio del valore impostato.

4.2.3 Stampa della testata anteriore

Come spiegato nel capitolo di design e scelta delle geometrie, si prevede di accessorare la testata con diversi inserti metallici e guarnizioni in gomma. Per far ciò si rende necessario intervenire nel momento opportuno operando direttamente nel volume di stampa compatibilmente coi movimenti della macchina. In Cura è possibile modificare il gcode con un'interfaccia molto intuitiva, come mostrato in Figura 58.

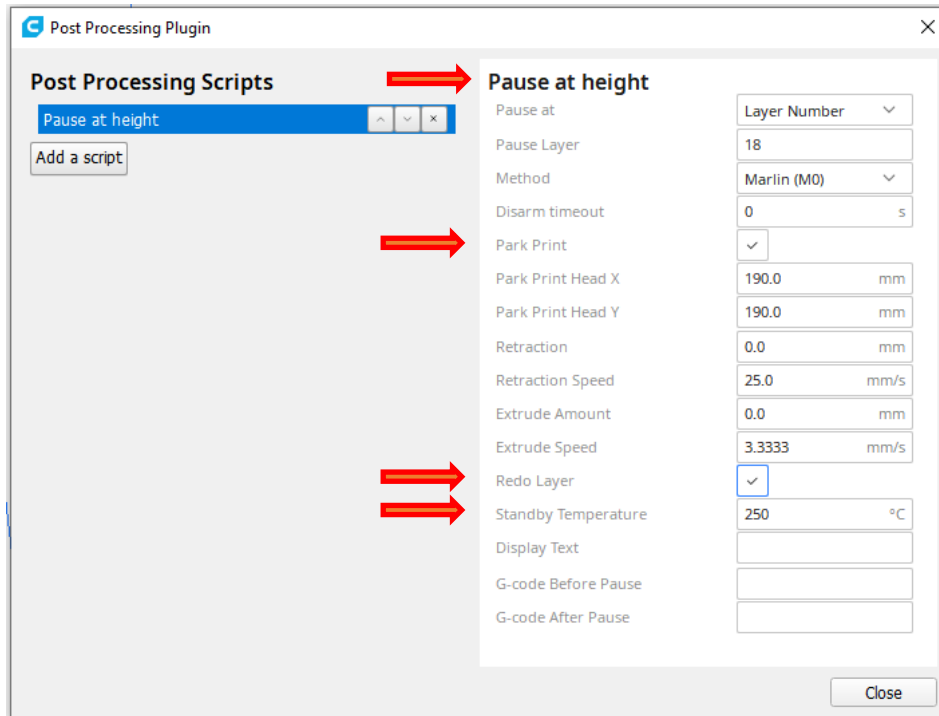


Figura 58 - interfaccia di modifica del gcode in Cura

In questa finestra di setup è possibile personalizzare il comando da dare alla macchina, in particolare è stato ordinato di fermarsi al layer numero 18, mantenere la temperatura a 205° C (standby temperature) e posizionare l'hotend in una posizione lontana dal pezzo (park print head) per facilitare l'inserimento dei componenti metallici e ripetere l'ultimo layer prima della pausa per garantire una maggiore continuità e adesione del materiale (redo layer). Verrà aggiunto questa modifica al gcode ogni qualvolta si voglia intervenire sul pezzo durante la stampa, tre volte in questo caso.

Il materiale scelto è lo stesso PETG usato per gli altri due pezzi, Figura 59.

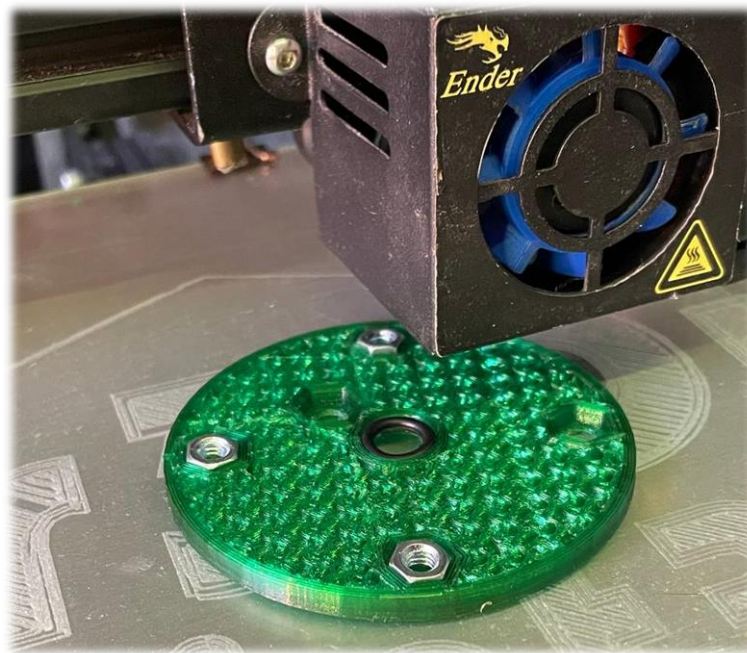


Figura 59 - Inserti metallici inseriti nella testata anteriore durante il processo di stampa

In **Tabella 5** sono riportati i parametri di processo per la stampa della testata anteriore in PETG.

Temperatura ugello	245° C
Temperatura piano di stampa	80° C
Altezza layer	0.12 mm
Grado di riempimento	30 %
Velocità	50 mm/s
Numero di pareti	4
Percentuale overlap	30%
Z-seam position	Random
Supporti	No
Modifica gcode	Pause at height
Tempo di stampa	6 h
Peso stimato	9 g
Compensazione XY layer iniziali	No

Tabella 5 - Impostazioni di stampa testata anteriore PETG

Tuttavia, dopo i test di montaggio precedenti si è deciso di non annegare i dadi all'interno del componente per via della scarsa affidabilità della macchina che porta ad un'insufficiente adesione del layer depositato subito dopo la pausa. Pertanto l'unico dado annegato sarà quello destinato al raccordo pneumatico.

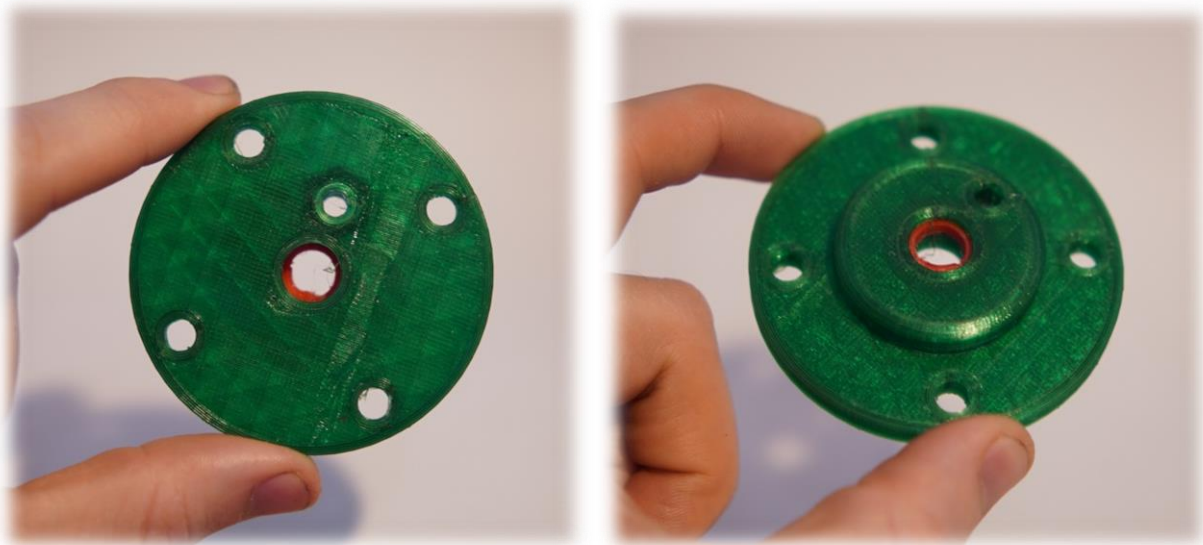


Figura 60 - Testata anteriore in PETG con dado metallico annegato e guarnizione in TPU integrata

4.2.4 Stampa del corpo cilindro

Anche per il cilindro è stato usato il PETG di eSun. Le caratteristiche che deve avere il cilindro sono:

- Resistenza meccanica
- Tenuta per l'aria compressa quindi bassa porosità
- Innesto per il raccordo.

Alla luce di queste condizioni si sono scelti i parametri di stampa riportati in Tabella 6:

Temperatura ugello	245° C
Temperatura piano di stampa	80° C
Altezza layer	0.12 mm
Grado di riempimento	40 %
Velocità	50 mm/s
Numero di pareti	3
Percentuale overlap	30%
Z-seam position	Random
Supporti	No
Modifica gcode	“Pause at height”
Tempo di stampa	7 h
Peso stimato	58 g

Tabella 6 - Impostazioni di stampa cilindro PETG

Poiché la superficie interna del cilindro è l'area di maggior interesse i parametri sono stati scelti per ottimizzarla. Per le stesse spiegazioni avanzate per il pistone, anche il cilindro viene stampato in verticale rispetto al piano di stampa. Si è scelta una distanza di layer di 0.12mm per ottenere una rugosità superficiale quanto più fine possibile. Da alcune prove condotte in precedenza ci si è accorti che anche il punto di inizio di ogni layer è determinante per la tenuta del pezzo. Come riportato nella Figura 61, i punti di colore bianco indicano il punto di inizio dal quale l'ugello comincia a depositare il materiale in quel layer. Si nota come essi siano tutti impilati in direzione Z generando una sorta di cucitura lungo tutto il cilindro. Ci si è accorti che proprio in corrispondenza di quella cucitura si ha una grossa perdita di aria.

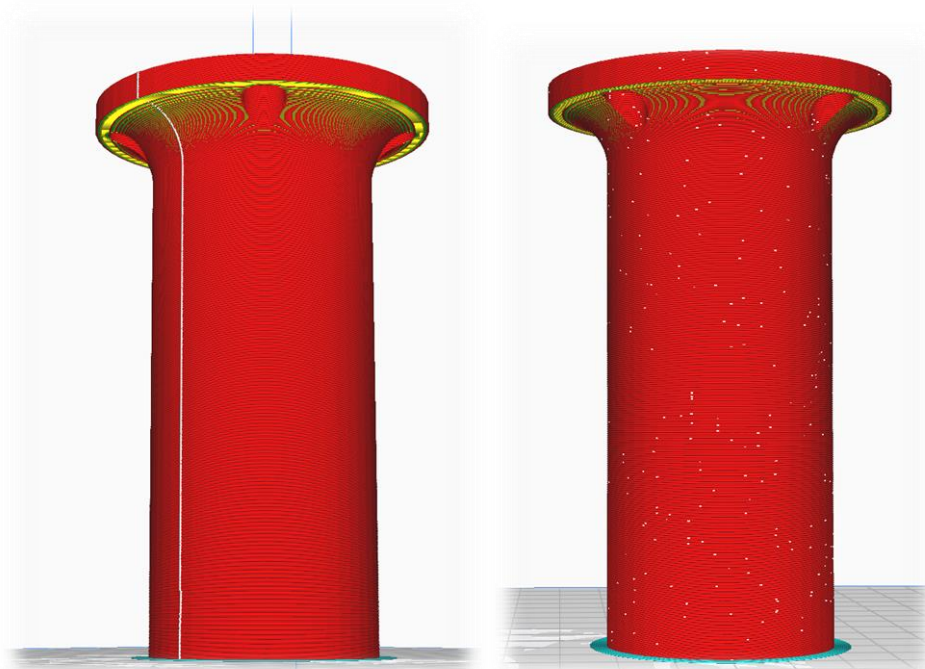


Figura 61 - dimostrazione dell'effetto del parametro Z-seam

Per ovviare al problema è stato dato il comando di usare una posizione random ogni volta che la macchina avanza layer dopo layer. In uno scenario in cui bisogna ottimizzare la resa estetica del componente questa sarebbe una soluzione poco consigliata in quanto la superficie presenta dei piccoli punti in cui si ha avuto sovra estrusione.

Se necessario o desiderato si può lavorare la superficie con carta vetrata molto fine, nel caso in esame non è stata eseguita alcuna post lavorazione.

Lo spessore del cilindro è di 3 mm, considerando il diametro dell'ugello 0,4mm e un numero di pareti pari a 4 si costringe la stampante a costruire lo spessore mediante circonferenze concentriche che vanno ad accavallarsi (overlap) per ottenere un grado di compattezza radiale quanto più alto possibile ed evitare fughe quando il cilindro viene posto in pressione.

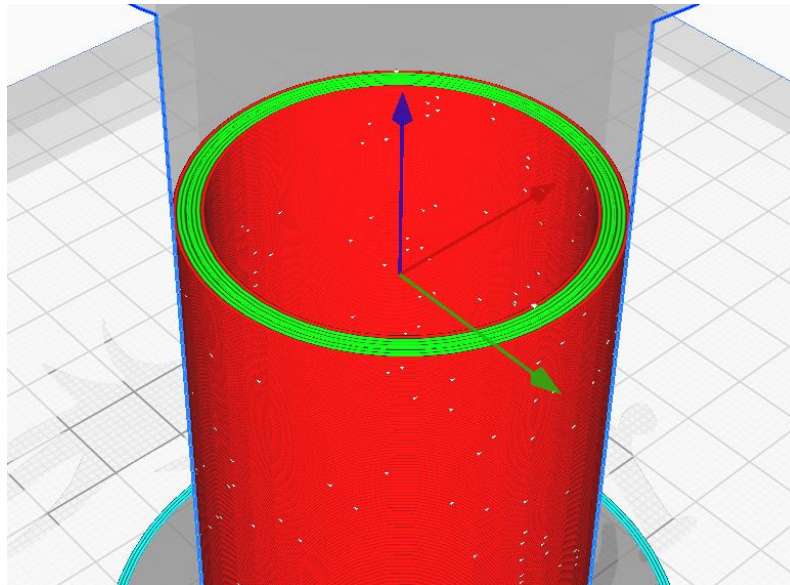


Figura 62 - Sezione con circonferenze concentriche dello spessore dell'ugello

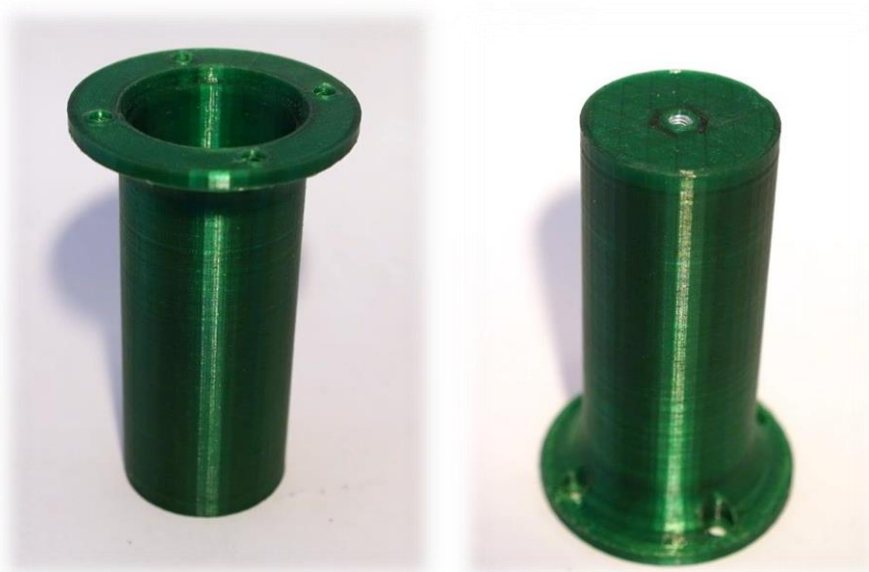


Figura 63 - Cilindro stampato in PETG con inserto metallico alla base

4.2.5 Stampa delle guarnizioni in TPU

Il materiale individuato per la realizzazione delle guarnizioni è il TPU, un elastomero termoplastico (TPE). Il TPU è resistente ad alcuni agenti chimici e alle abrasioni, viene adoperato in ambito sportivo, aerospaziale, industriale ad esempio per la costruzione di cinghie di trasmissione, in ambito robotico per la realizzazione di soft gripper, e poi ancora smorzatori, shock absorber, cover per cellulari eccetera eccetera.

Il Tetra Poli Uretano è un elastomero che, in base ai monomeri e additivi che compongono la catena, possiede differenti gradi di deformabilità ed elasticità misurati nella scala di durezza secondo la norma ASTM D-2240.

SHORE HARDNESS SCALES



Figura 64 - Scala di durezza del TPU secondo ASTM D-2240

Il TPU usato in questo progetto è il TPU 85A, che contrariamente a quanto mostrato nello schema in effetti ha un'elasticità più vicina ad una gomma per matita piuttosto che ad un tacco per scarpe. Ad ogni modo le proprietà meccaniche sono riportate nella tabella riportata nella Figura 65.



TPU 85A
Thermoplastic Polyurethane

Mechanical Properties

Type	Test Method	Imperial	Metric
Tensile Strength, Ultimate	ASTM D638	3,700 psi	26 MPa
Tensile Strength, Yield	ASTM D638	580 psi	4 MPa
Tensile Elongation at Yield	ASTM D638	65%	65%
Tensile Modulus	ASTM D638	1,800 psi	12 MPa
Tensile Elongation at Break	ASTM D638	660%	660%
Toughness (stress x strain)	ASTM D638	12,000 in-lbf/in ³	82.7 m*N/m ³ x10 ⁶
Hardness	ASTM D2240	85 Shore A	85 Shore A
Impact Strength (Notched Izod, 23 °C)	ASTM D256	2.0 ft.lbf/in ²	4.2 kJ/m ²
Abrasion Resistance (Mass loss, 10,000 cycles)	ASTM D4060	0.08 g	0.08 g

Figura 65 - Caratteristiche meccaniche del TPU

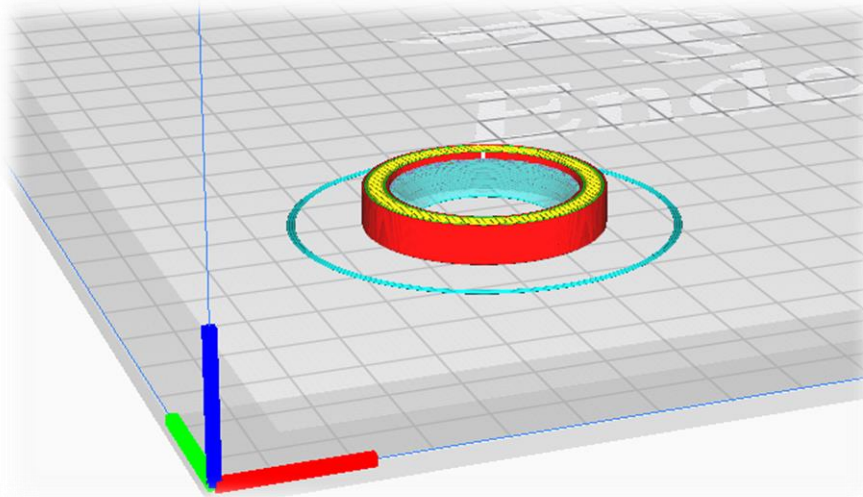


Figura 66 - preparazione della stampa della guarnizione del pistone

Le guarnizioni sono state stampate una alla volta con le impostazioni di stampa riportate in Tabella 7:

Temperatura ugello	240° C
Temperatura piano di stampa	70° C
Altezza layer	0.12 mm
Grado di riempimento	20 %
Velocità	20 mm/s
Numero di pareti	3
Percentuale overlap	30%
Z-seam position	Random
Supporti	Si, ad albero
Modifica gcode	-
Tempo di stampa stimato	2.5h
Peso stimato	1 g

Tabella 7 - Impostazioni di stampa guarnizione TPU

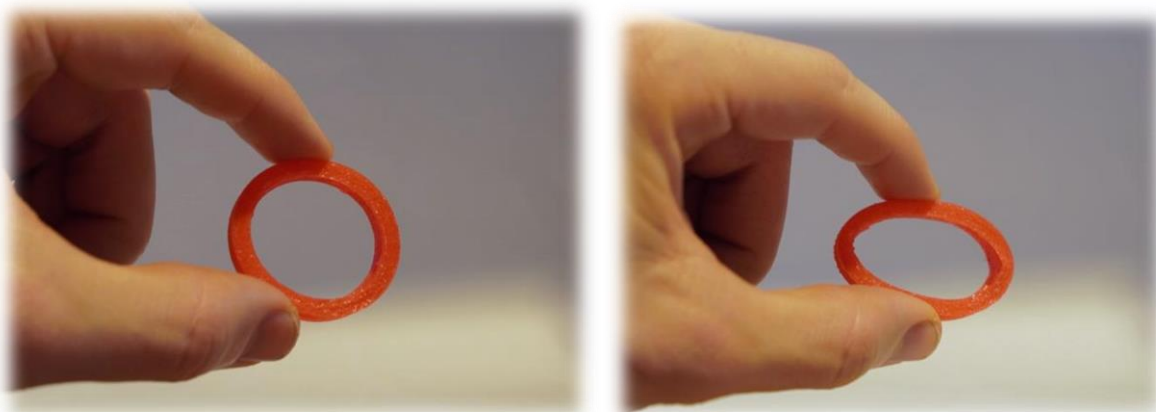


Figura 67 - Guarnizioni in TPU, dimostrazione della deformazione

Il TPU è un materiale molto difficile da stampare per via della sua eccessiva flessibilità. Di fatti, quando è portato alla temperatura di fusione, esso tende a rompersi molto facilmente. Immaginando l'ugello che deposita il materiale, se la velocità di spostamento è troppo elevata e non si concede il tempo necessario per aderire al piano di stampa, il materiale sarà inevitabilmente sottoposto a trazione e si romperà. Per questo

motivo il TPU va stampato a velocità molto ridotte. Si è resa necessaria, inoltre, una modifica alla macchina, in quanto il filamento troppo flessibile non riusciva ad essere spinto attraverso il tubo bowden e finiva per arrotolarsi fra gli ingranaggi dell'estrusore, è stato dunque stampato un pezzo modificato che obbligasse il filamento a seguire il percorso corretto.

Il montaggio delle guarnizioni nel pistone non è risultato complicato, grazie anche all'elasticità del TPU. Le misure a fine stampa sono state validate e gli accoppiamenti funzionano come previsto.



Figura 68 - Pistone con guarnizioni montate

4.3 Stampa dell'attuatore con SLS e Nylon PA12

La stampante utilizzata per realizzare l'attuatore con la tecnologia SLS è la EOS Formiga P110, presente presso il laboratorio dell'IAM del Politecnico di Torino. In Tabella 8 vengono riportate le principali caratteristiche tecniche della stampante.



Technical Data FORMIGA P 110 Velocis	
Building volume	200 x 250 x 330 mm (7.9 x 9.8 x 13 in)
Laser type	CO ₂ ; 30 W
Building rate	up to 1.2 l/h
Layer thickness (depending on material)	0.06 – 0.10 – 0.12 mm (0.0024 - 0.0039 - 0.0047 in)
Precision optics	F-theta lens, high-speed scanner
Scan speed during build process	up to 5 m/s (16.4 ft/s)
Power supply	16 A
Power consumption	typical 3 kW, maximum 5 kW
Dimensions (W x D x H)	1,320 x 1,067 x 2,204 mm (51.97 x 42.01 x 86.77 in)
Recommended installation space	min. 3.2 x 3.5 x 3.0 m (126 x 138 x 118 in)
Weight	approx. 600 kg (1.323 lb)

Tabella 8 - Datasheet stampante EOS Formiga P110 [8]

La superficie risultante dei provini in RGD720 è stata analizzata dal tecnico di laboratorio esperto di queste tecnologie e, dietro suo prezioso consiglio, è stato stampato un provino di una porzione inferiore del cilindro in Nylon PA12 per constatare le tolleranze della macchina e la resa superficiale dei pezzi. Sono stati stampati i primi 35 mm del cilindro (Figura 69).

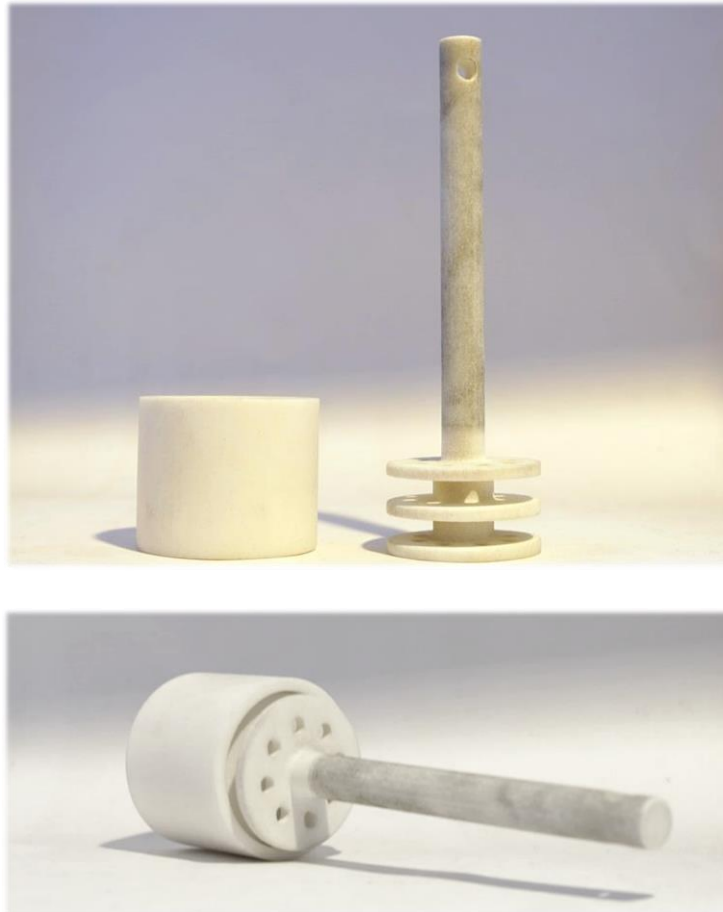


Figura 69 - Provino e pistone in Nylon PA12

Dopo aver analizzato il provino stampato in Nylon PA12 si è deciso di realizzare due prototipi: uno con corpo cilindrico stampato in SLS e uno stampato in FDM per poter, a valle dei test di misura, costruire un confronto.

Ci si aspetta una resa superficiale migliore con la stampa in SLS, tuttavia la stampa 3D FDM permette una customizzazione dei parametri di gran lunga maggiore.

Le caratteristiche di un componente stampato con nylon sono tipiche di un componente totalmente funzionale e pronto all'uso, infatti grazie alle eccellenti proprietà meccaniche spesso si usa questa tecnologia in luogo dello stampaggio ad iniezione. Per il progetto di questa tesi è stato usato il Nylon PA12 PA 2200 Performance 1.0 by EOS, che si presenta sotto forma di polvere molto fine i cui pezzi stampati godono delle seguenti proprietà:

- alta resistenza e rigidità;
- ottima resistenza chimica;
- eccellente stabilità a lungo termine;
- alta risoluzione;
- ottima predisposizione ai trattamenti per la finitura superficiale;
- biocompatibilità;
- adatto al contatto con alimenti (ad eccezione degli alimenti a base alcolica);

Questo materiale, se stampato in SLS, ottimizza la resa superficiale sacrificando in parte le proprietà meccaniche. Nello specifico è indicato usare il Nylon PA12 in SLS quando si desidera ottenere una buona rugosità superficiale, stabilità termica e chimica e soprattutto buona resistenza all'usura ammettendo di abbassare la resistenza alle sollecitazioni meccaniche. Questa condizione è accettabile in questa fase del progetto nella quale si predilige il funzionamento dell'attuatore piuttosto che una ottimizzazione delle

prestazioni in termini di potenza. In altre parole si preferisce, al momento, avere una superficie molto liscia piuttosto che una resistenza alle alte pressioni.



e-Manufacturing Solutions

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Izod Impact notched (23°C)	4.4	kJ/m ²	ISO 180/1A
Shore D hardness (15s)	75	-	ISO 868

3D Data	Value	Unit	Test Standard
The properties of parts manufactured using additive manufacturing technology (e.g. laser sintering, stereolithography, Fused Deposition Modelling, 3D printing) are, due to their layer-by-layer production, to some extent direction dependent. This has to be considered when designing the part and defining the build orientation.			
Tensile Modulus			ISO 527-1/-2
X Direction	1700	MPa	
Y Direction	1700	MPa	
Z Direction	1700	MPa	
Tensile Strength			ISO 527-1/-2
X Direction	50	MPa	
Y Direction	50	MPa	
Z Direction	50	MPa	
Strain at break			ISO 527-1/-2
X Direction	20	%	
Y Direction	20	%	
Z Direction	10	%	
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)	53	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)	4.8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)	1500	MPa	ISO 178

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)	163	°C	ISO 306

Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density (lasersintered)	930	kg/m ³	EOS Method
Powder colour (ac. to safety data sheet)	White	-	-

Figura 70 - Caratteristiche meccaniche del Nylon PA12 by EOS [8]

Anche in questa macchina purtroppo non è possibile agire direttamente su una vasta gamma di parametri. Il produttore consiglia di usare un'altezza dei layer pari a 100 µm che permette di avere la migliore resa delle performance del componente soprattutto quando si parla di comportamento a frattura e quando si prevede che il pezzo sia sottoposto ad un carico multi-assiale in tutte e tre le direzioni, conservando una buona finitura superficiale. Le parti realizzate con questo materiale sono caratterizzate da un alto grado di isotropia sia per quanto riguarda la resistenza che la rigidezza.

Non c'è stato bisogno di modificare le geometrie per ottimizzarle e adattare a questo tipo di stampa, infatti l'unica modifica lato CAD sono state le due filettature nella testata anteriore e nel cilindro. La necessità di tale modifica deriva dal fatto che non è possibile programmare una pausa per inserire componenti estranei durante la stampa, quindi le filettature per i raccordi sono state ricavate direttamente sul pezzo e, in una prima fase, si è utilizzata la testata stampata in FDM per via delle guarnizioni da annegare.

Questi componenti sono stati realizzati direttamente dai tecnici del laboratorio IAM e non è stato possibile assistere alla preparazione dei modelli e della macchina, pertanto è nota solo una stima dei tempi e dei parametri settati. Sono stati lanciati due Job (senza considerare la stampa del provino).

4.3.1 Job di stampa SLS

I Job lanciati nella macchina SLS prevedono:

- il cilindro (versione design preliminare);
- il pistone (versione design preliminare);
- il cilindro (versione ottimizzata);
- il pistone (versione ottimizzata);
- la testata anteriore (configurazione in due pezzi).

Sono stati stampati questi componenti per testare lo scorrimento relativo, le tolleranze con gli O-ring e la tenuta con le guarnizioni dello stelo. È stato assemblato l'attuatore utilizzando la testata anteriore realizzata in PETG e le guarnizioni realizzate in TPU (Figura 731).



Figura 71 - Cilindro realizzato in SLS

Ci si è accorti che le tolleranze sono decisamente diverse tra le due macchine/tecnologie. Prima di tutto il pistone e il cilindro si accoppiano quindi il gioco è stato raggiunto con successo. Per verificare e fare un confronto dimensionale si è provato ad utilizzare il pistone in resina nel cilindro in nylon ma vi è interferenza e nessuna possibilità di opportuno accoppiamento, mentre il pistone realizzato in resina e successivamente tornito non riesce ad accoppiarsi con le guarnizioni.

5 Test e misure dei prototipi

Una volta realizzati tutti i componenti necessari, si è proceduto all'assemblaggio dei prototipi. I prototipi assemblati in questa fase sono 2:

- Attuatore 1:

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	FDM	PETG
Pistone	POLYJECT	Rigid720
Guarnizioni pistone	FDM	TPU 85A
Guarnizione testa cilindro	FDM	TPU 85A
Guarnizione testata anteriore	FDM	TPU 85A
Testata anteriore	FDM	PETG

Tabella 9 - Attuatore 1

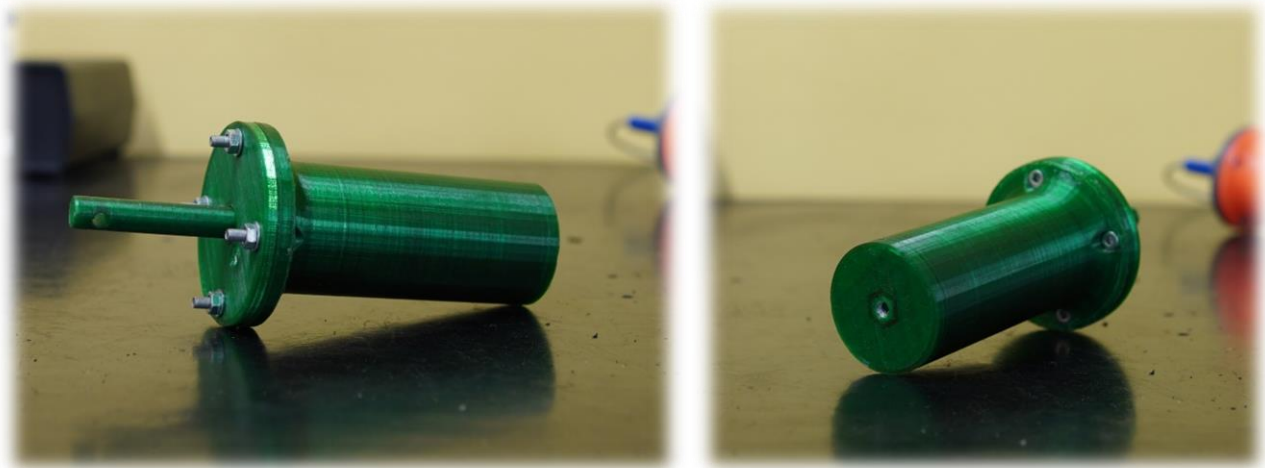


Figura 72 - Attuatore 1

- Attuatore 2:

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	SLS	NYLON PA12
Pistone	SLS	NYLON PA12
Guarnizioni pistone	FDM	TPU 85A
Guarnizione testata cilindro	FDM	TPU 85A
Guarnizione testata anteriore	FDM	TPU 85A
Testata anteriore	FDM	PETG

Tabella 10 - Attuatore 2

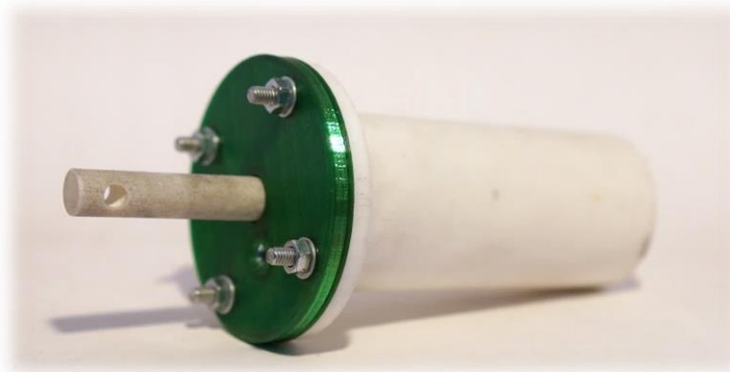


Figura 73 - Attuatore 2

Subito dopo l'assemblaggio dell'attuatore interamente stampato in FDM si è notato come l'attrito fra il pistone e la guarnizione sita nella testata fosse molto marcato si è deciso di utilizzare il pistone precedentemente realizzato in resina con la Stratasys Object Prime. Per l'attuatore realizzato in Nylon PA12 con tecnologia SLS è stato utilizzato la stessa identica testata anteriore dell'attuatore 1 in quanto era necessario annegare sia la guarnizione che il dado per il raccordo e la macchina SLS non consente di programmare una pausa ed intervenire nel volume di stampa. Dopo un piccolo numero di cicli effettuati in modo manuale, per saggiare la forza di primo distacco, alcuni frammenti della guarnizione della testata sono fuoriusciti. Dopo aver smontato la testata per ispezionare il problema ci si è accorti che la guarnizione si è lacerata e fusa localmente a causa del calore sviluppato per il forte attrito, invalidando dunque la sua funzione di tenuta. Per questo motivo si è deciso di sostituire la guarnizione con un O-ring commerciale.

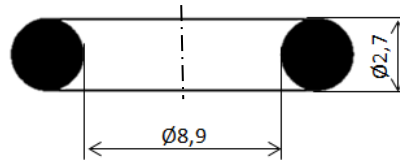


Figura 74 - Dimensioni O-ring sostitutivo della guarnizione in TPU

La sostituzione della guarnizione ha reso necessario riprogettare la sede di alloggiamento, in seguito verrà trattato a parte il caso delle guarnizioni perché si è dimostrato essere il limite più alto da superare.

Le misure e i test che si vogliono condurre consistono innanzitutto in prove di tenuta e successivamente misura di forza di attrito, di perdite, e di resistenza massima.

Prima di tutto si è connesso il sistema ad un condotto di alimentazione con regolatore di pressione per individuare eventuali perdite e verificare a quale pressione si verificasse la fuori uscita del pistone. Sfortunatamente non si è verificata alcuna attivazione dell'attuatore fino alla pressione di 1,5 bar e ci si è accorti che tutta l'aria entrante nella camera di alimentazione (quella posteriore, in questo caso) passava attraverso la testa del pistone e fuoriusciva dal condotto di alimentazione della camera anteriore. Questo comportamento è stato riscontrato in entrambi i prototipi ciò porta a pensare che il sistema di guarnizioni sulla testa del pistone non funziona o che in qualche modo la forza di attrito che si sviluppa tra la testata e il pistone è ancora troppo elevata. Ci si è interrogati sulle possibili cause del fallimento della tenuta. La spiegazione più plausibile è che l'aria trovi meno resistenza a passare tra la superficie interna del cilindro e la guarnizione piuttosto che entrare nella camera del pistone e pressurizzare la guarnizione. È dunque necessario riprogettare il sistema di tenuta della testata. Le strade percorribili a questo punto sono molteplici:

- aumentare il diametro esterno della guarnizione per creare più interferenza durante il montaggio;
- aumentare l'altezza della guarnizione in modo tale che, una volta montata sul pistone, essa risulta precaricata e spinge maggiormente contro la parete del cilindro;
- usare la stessa guarnizione e incollarla al pistone. Si tratta di una soluzione molto vicina all'idea individuata all'inizio di questo progetto, nell'ottica di usare una stampante multi-materiale nella quale non si poneva il problema dell'incollaggio.

La prima soluzione è stata implementata nell'attuatore stampato in SLS ma il risultato è stato fallimentare. La seconda soluzione ha portato una serie di problematiche relative all'accoppiamento del pistone col cilindro e alla difficoltà di mantenere in posizione la guarnizione durante il montaggio. Si rendeva necessario modificare la sede della guarnizione nel pistone pertanto si è deciso di riprogettare la testa del pistone.

5.1 Nuovo design del pistone e guarnizioni

Volendo ancora credere nella configurazione di tenuta attiva con guarnizioni gonfiabili si presenta in Figura 75 il nuovo pistone. Il componente risulta semplificato rispetto alla versione precedente. In particolar modo la testa è stata alleggerita e sono scomparsi i dischi che ospitavano i fori per il passaggio dell'aria. Vi è un disco che si accoppia con il cilindro e sul quale si appoggiano le nuove guarnizioni, le quali sono state modificate contestualmente al pistone. Per evitare che le guarnizioni traslino durante la corsa del pistone sono stati previsti due riscontri che le bloccano in posizione. Per completare l'assieme si è utilizzato lo stesso cilindro della prova precedente. Il pistone viene realizzato in PLA con stampa FDM con Creality Ender 3 per ragioni di tempo e di logistica.

Una volta assemblati i componenti si nota subito come nella nuova configurazione si sviluppi molto più attrito fra le superfici in moto relativo.

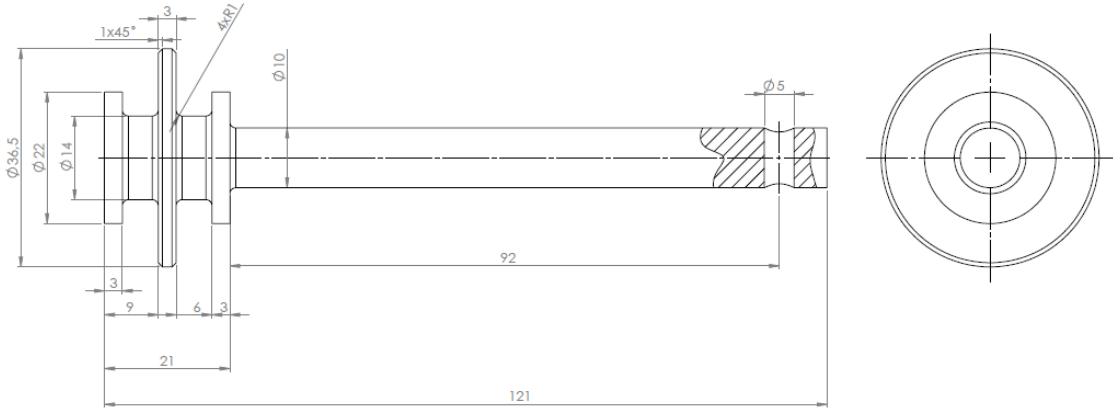
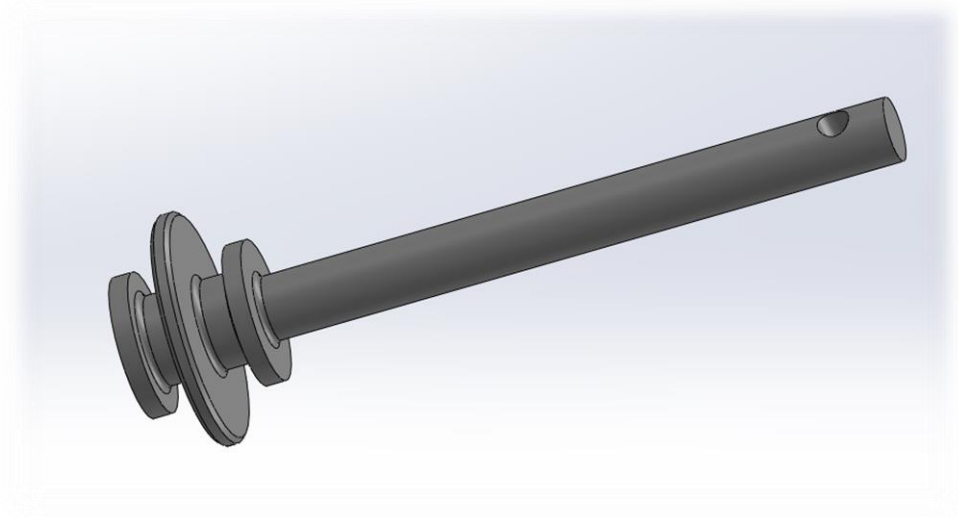


Figura 75 - seconda versione del pistone

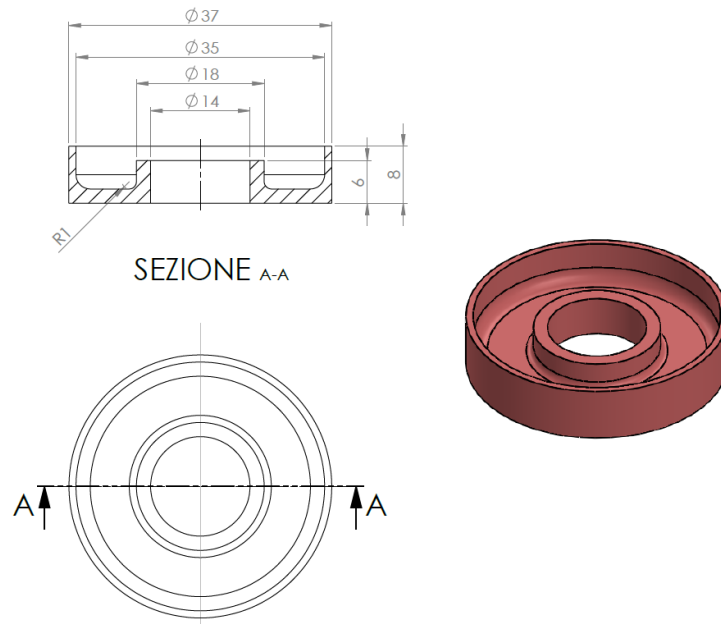


Figura 76 - seconda versione della guarnizione

Il nuovo sistema ha lo stesso principio di funzionamento della precedente versione ma è stato rivisto l'accoppiamento delle guarnizioni: ora sono saldamente accoppiate con il pistone, ne è impedita la traslazione grazie ai due risalti, non formano più una camera isolata con il pistone ma possono ancora dilatarsi ed essere pressurizzate spingendo di più contro la parete interna del cilindro quando la camera viene alimentata. Inoltre il loro diametro esterno in partenza è stato imposto maggiore del diametro interno del cilindro.

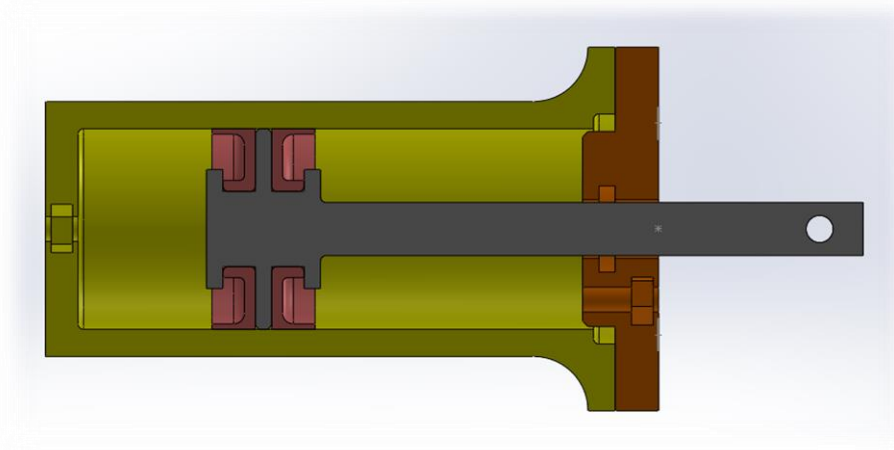


Figura 77 - Assieme in sezione della seconda versione del prototipo

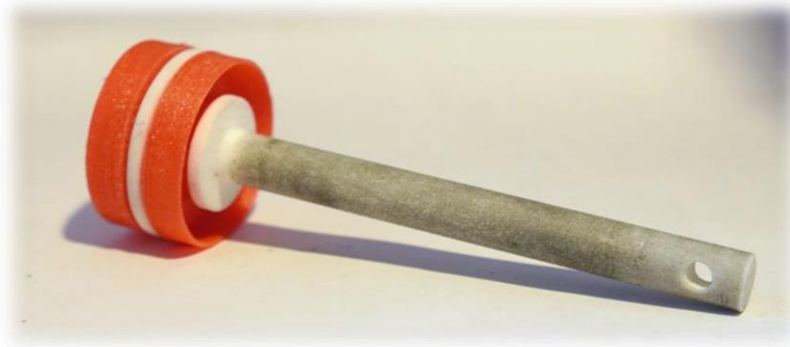


Figura 78 - Pistone dell'attuatore 4 con guarnizioni

Quindi i nuovi attuatori sono così composti:

- Attuatore 3:

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	FDM	PETG
Pistone	FDM	PLA
Guarnizioni pistone	FDM	TPU 85A
Guarnizione testa cilindro	FDM	TPU 85A
Guarnizione testata anteriore	FDM	TPU 85A
Testata anteriore	FDM	PETG

Tabella 11 - Attuatore 3

- Attuatore 4:

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	SLS	Nylon PA12
Pistone	SLS	Nylon PA12
Guarnizioni pistone	FDM	TPU 85A
Guarnizione testa cilindro	FDM	TPU 85A
Guarnizione testata anteriore	FDM	TPU 85A
Testata anteriore	FDM	PETG

Tabella 12 - Attuatore 4

5.2 Descrizione della prova di misura

I test condotti sull'attuatore sono volti a verificare che il pistone riesca a completare un'intera corsa di fuoriuscita e di rientro, individuare e quantificare eventuali perdite. Di seguito è riportato lo schema del circuito di misura.

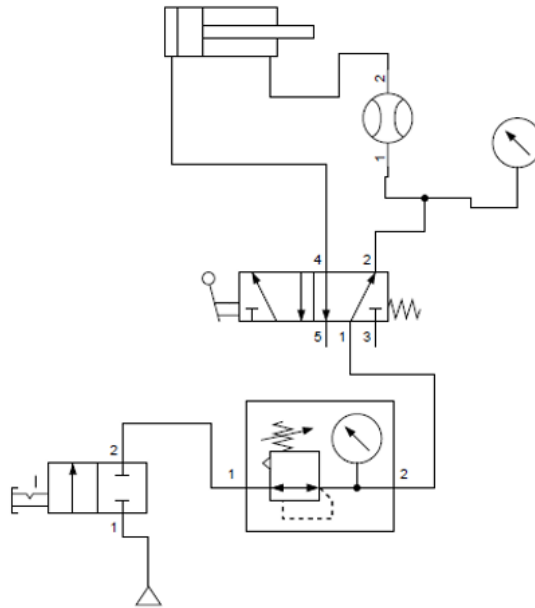


Figura 79 - Schema del circuito realizzato per la misura della portata

È stata usata una valvola monostabile 2/2 interposta fra l'alimentazione e il regolatore di pressione come valvola di sicurezza in caso di intercettazione e per isolarlo dall'alimentazione. Una valvola monostabile 5/2 con comando a leva è stata adoperata per alimentare una camera per volta in modo tale che quando lo stelo finisce la sua corsa si commuta la valvola per ripristinare la posizione iniziale dello stesso. Tra la valvola 5/2 e l'attuatore si è interposto il misuratore di portata. Di seguito è riportata un'immagine del circuito realizzato in laboratorio.

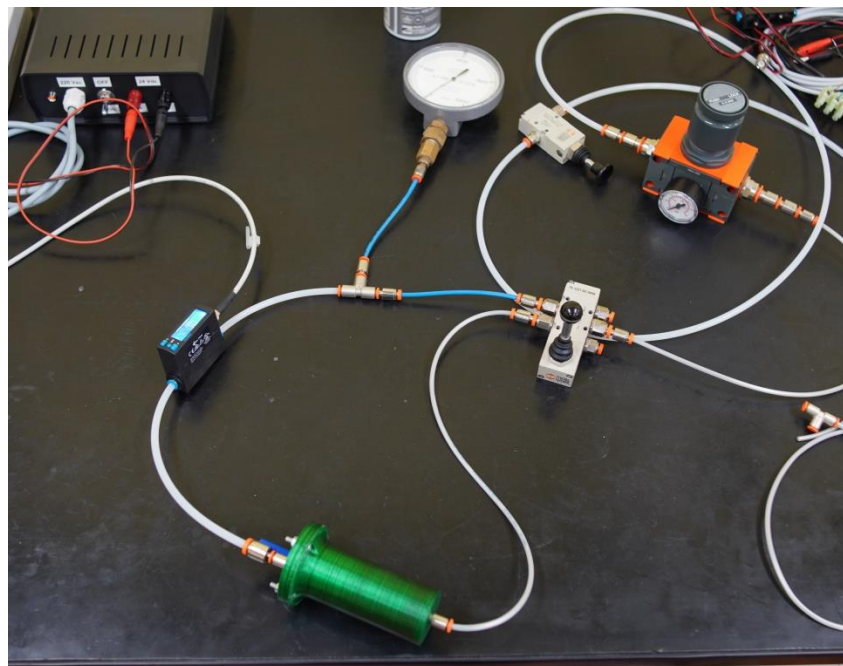
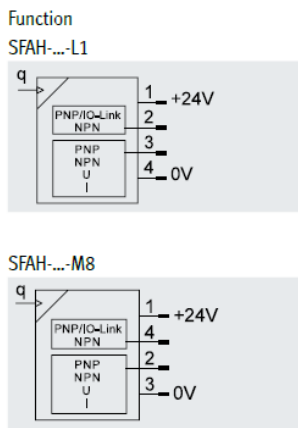


Figura 80 - Misura della portata in fuga dell'attuatore 3

Per misurare la portata in fuga è stato adoperato un misuratore di portata digitale di Festo.

Data sheet



- Flow rate
 - 0.002 ... 0.1 l/min
 - 0.01 ... 0.5 l/min
 - 0.02 ... 1 l/min
 - 0.1 ... 5 l/min
 - 0.2 ... 10 l/min
 - 1 ... 50 l/min
 - 2 ... 100 l/min
 - 4 ... 200 l/min
- Maximum versatility and reduced warehousing thanks to switchable electrical outputs
- Measuring signal filter for setting the rise time
- Additional filter for smoothing the display values



Figura 81 - Flussometro Festo usato nel circuito di test

In prima battuta si era scelto un misuratore con una scala di 0,1 – 5 l/min, ma una volta giunti a 0,5 bar la portata letta andava oltre la sensibilità dello strumento, rendendo la misura non più affidabile. Per questo motivo si è scelto un misuratore con una scala maggiore di 1 – 50 l/min.

Per ottenere una misura oggettiva e coerente si valuta la portata in fuga quando si alimenta la camera anteriore con il pistone tutto rientrato sin dall’inizio della prova, analogamente lato camera posteriore quando il pistone è tutto fuori uscito. L’attuatore 3 funziona e il pistone fuoriesce ad una pressione di 0,9 bar. Tuttavia le fughe non sono poche e sono localizzate soprattutto in corrispondenza dell’o-ring nella testata anteriore all’interfaccia col pistone, infatti per far rientrare il pistone è necessaria una pressione di 1,7 bar. Di seguito sono riportati due grafici per quantificare le perdite, uno per la camera posteriore e uno per la camera anteriore (Figura 82 e Figura 83). Si è aumentata gradualmente la pressione di alimentazione a step di 0,1 bar e per ogni step viene fatta la lettura sul flussimetro. Per ogni prova sono state effettuati 3 cicli di misura per avere una misura statistica media.

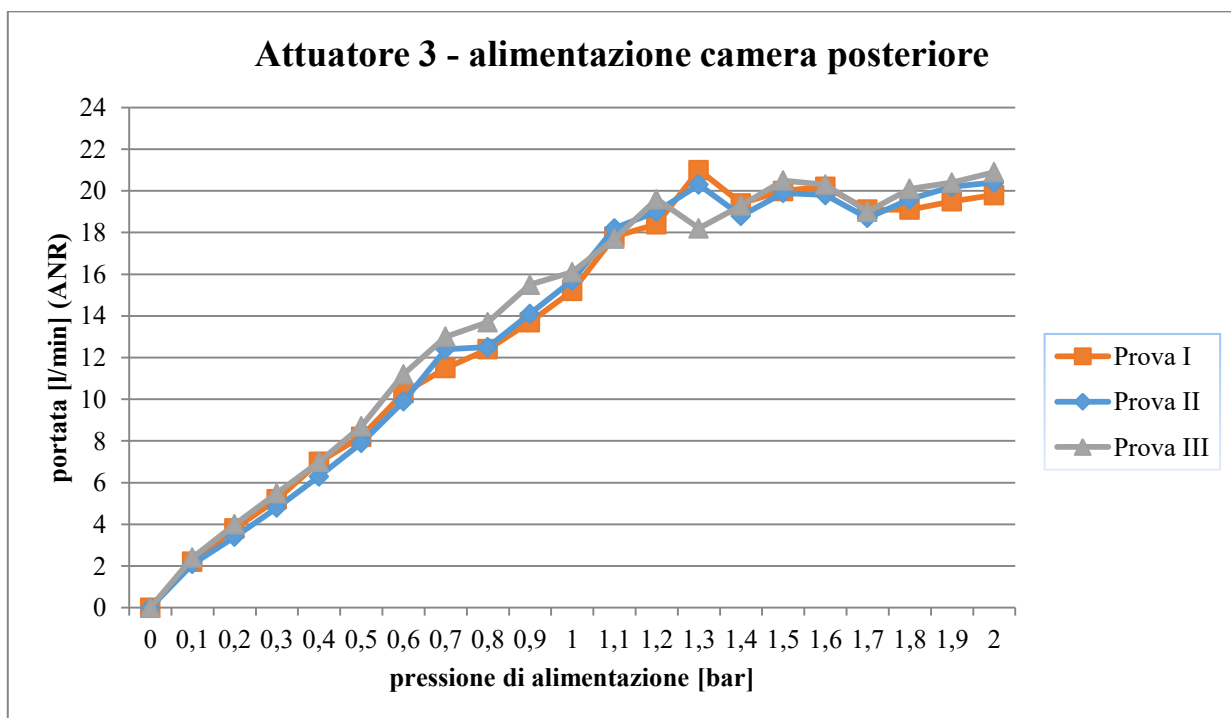


Figura 82 - Andamento portata nell’attuatore 3 con alimentazione in camera posteriore

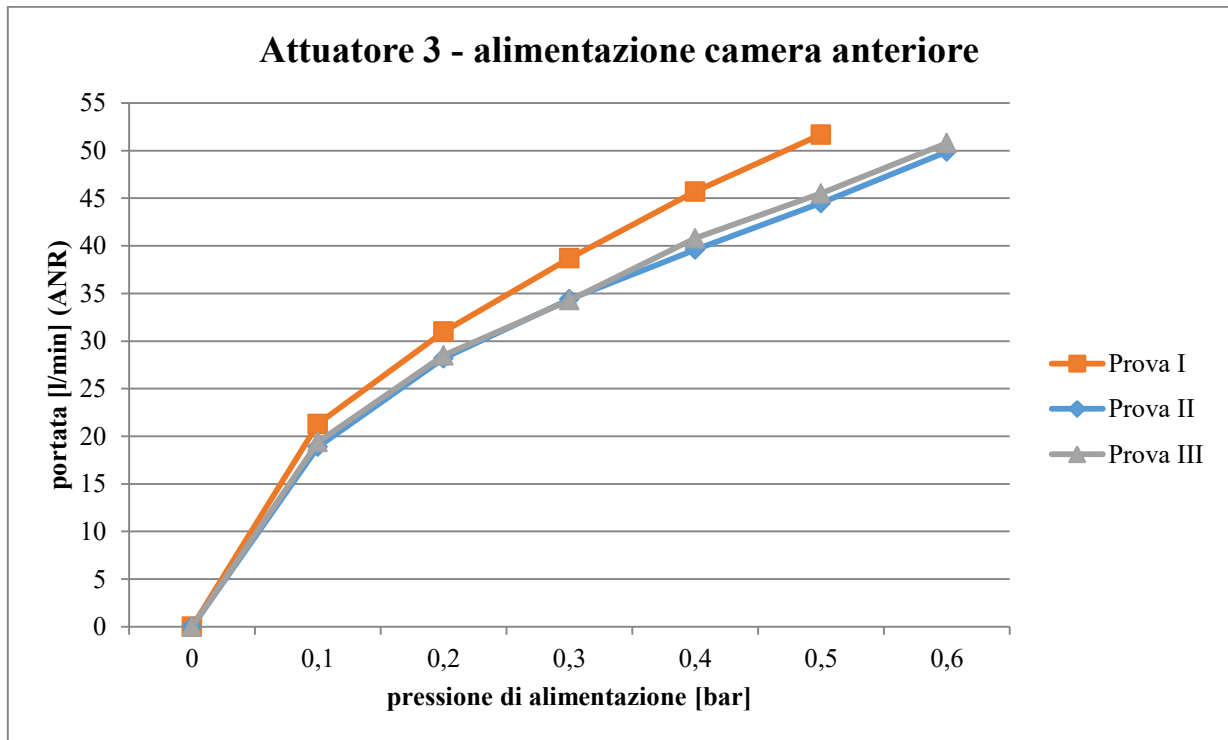


Figura 83 - Andamento portata nell'attuatore 3 con alimentazione in camera anteriore

È chiaro come le perdite siano nettamente maggiori quando viene alimentata la camera anteriore, di fatti si raggiunge quasi subito il fondo scala del misuratore di portata. Mentre quando si alimenta la camera posteriore si raggiunge l'asintoto a circa 2 bar, con una portata di circa 20 l/min.

Per quanto riguarda l'attuatore 4 realizzato in Nylon PA12 non è stato possibile ancora una volta eseguire delle misure valide poiché permane il problema dell'isolamento fra le due camere seppur in misura minore, sia la tenuta dell'anello O-ring posto nel cilindro. Quest'ultimo problema è legato alle tolleranze della macchina usata per realizzare i componenti in particolar modo la sede dell'O-ring. Come fatto per il cilindro in PLA serve condurre una piccola campagna di provini per correlare le tolleranze della macchina al CAD e trovare la misura corretta, purtroppo la disponibilità della macchina e il tempo sono limitati dunque non è stato possibile sviluppare a fondo l'attuatore 4.

Con l'ausilio di un fluido cerca-fughe le perdite sono state individuate:

- Giunzione cilindro-testata, dovute probabilmente ad una errata geometria della sede dell'oring;
- Attraverso la carcassa, dovute alla porosità risultante dalla stampa per una non totale adesione dei layer;
- Attraverso l'O-ring del pistone sito nella testata.

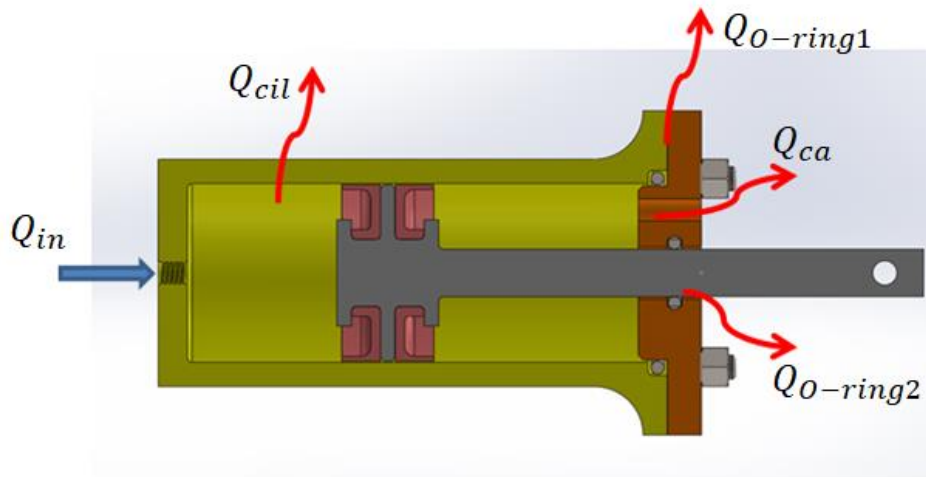


Figura 84 - schema delle portate in ingresso e in fuga nell'attuatore

$$Q_{in} = Q_{cil} + Q_{O-ring1} + Q_{O-ring2} + Q_{ca}$$

In Figura 84 si è voluto schematizzare la situazione delle portate in fuga che costituiscono le perdite quando viene alimentata la camera posteriore. L'obiettivo dunque è eliminare tutti i contributi di portata in fuga.

5.2.1 Ottimizzazione del cilindro

Prima di tutto si è modificato il cilindro, in particolar modo si è aumentato lo spessore per costringere la stampante a formare dei wall e un riempimento interno. Il numero delle pareti è ora 4 e il riempimento è salito al 100%.

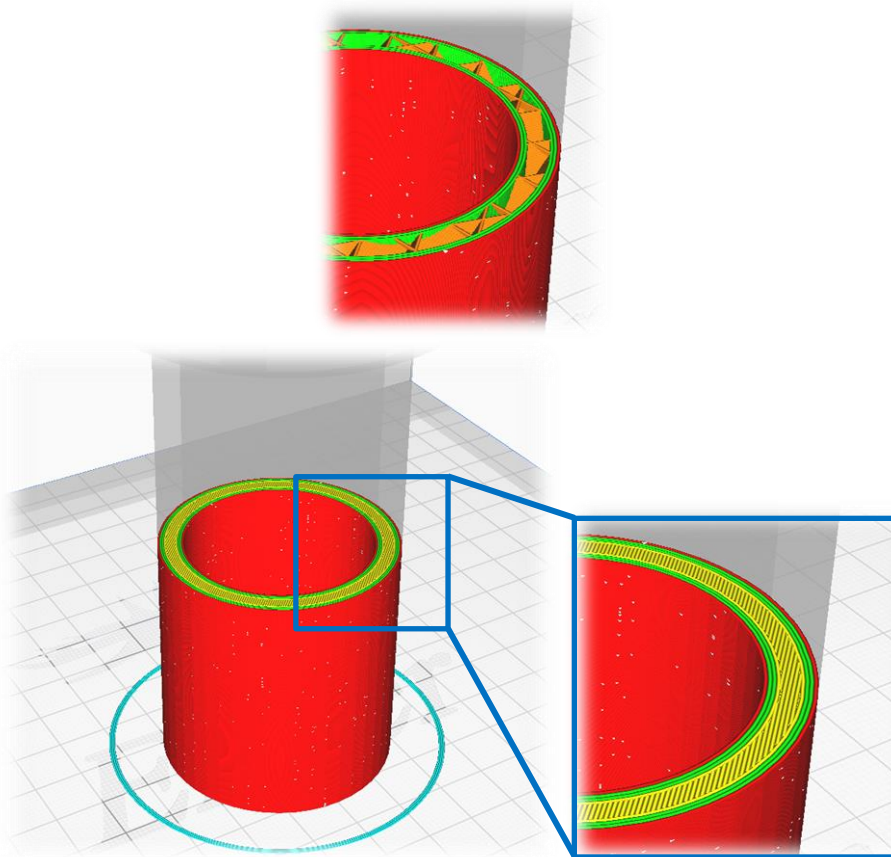


Figura 85 - Sezione del cilindro in Cura per, differenza di due gradi di riempimento: 20% e 100%

In Figura 85 è mostrata la differenza fra un riempimento al 100% e uno al 20%. Per l'ottimizzazione si è voluti partire da una condizione di massimo riempimento per fissare un parametro e poi diminuire finché non si ottiene il minimo spessore che riesce a garantire tenuta. Idealmente il riempimento massimo crea una parete non porosa e quindi isola completamente la camera interna del cilindro. Le nuove impostazioni di stampa del cilindro dunque sono:

Materiale	PLA
Temperatura ugello	210° C
Temperatura piano di stampa	60° C
Altezza layer	0.12 mm
Grado di riempimento	100 %
Velocità	50 mm/s
Numero di pareti	4
Percentuale overlap	50%
Z-seam position	Random
Supporti	No
Modifica gcode	-
Tempo di stampa stimato	26h
Peso stimato	108g

Tabella 13 - Impostazioni di stampa cilindro attuatore 5

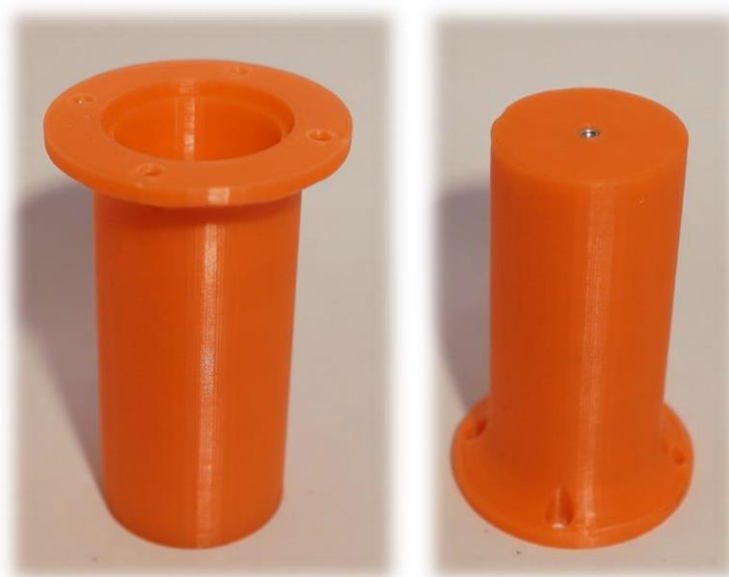


Figura 86 - Cilindro con infill 100%

La testata anteriore è stata modificata aumentando lo spessore in direzione assiale della flangia di connessione al corpo del cilindro. Si è deciso di stamparlo con un riempimento maggiore, fino al 50% per conferire maggiore resistenza meccanica, non si è ritenuto indispensabile settare un riempimento 100% in quanto non si sono verificate perdite attraverso il componente.

- Attuatore 5:

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	FDM	PLA
Pistone	FDM	PLA
Guarnizioni pistone	-	O-ring
Guarnizione testata	-	O-ring
Guarnizione testata anteriore	-	O-ring
Testata anteriore	FDM	PLA

Tabella 14 - Attuatore 5



Figura 87 - Attuatore 5

Per realizzare l'attuatore interamente in NylonPA12 con la SLS si è reso necessario trovare una soluzione per integrare l'anello O-ring per lo stelo. Si è deciso allora di stampare la testata in due parti, ottenute tagliando il componente originale con un piano perpendicolare all'asse del cilindro all'altezza della sede dell'O-ring. In questo modo sarà possibile sia posizionare l'anello sia, in un secondo momento, sostituirlo.



Figura 88 - Testata anteriore in Nylon PA12, parte inferiore con guarnizioni integrate

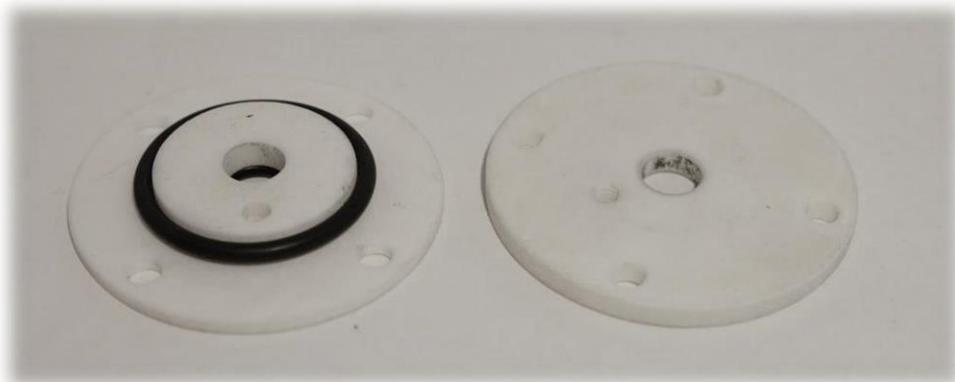


Figura 89 - Testata anteriore pezzo inferiore a sinistra e pezzo superiore a destra

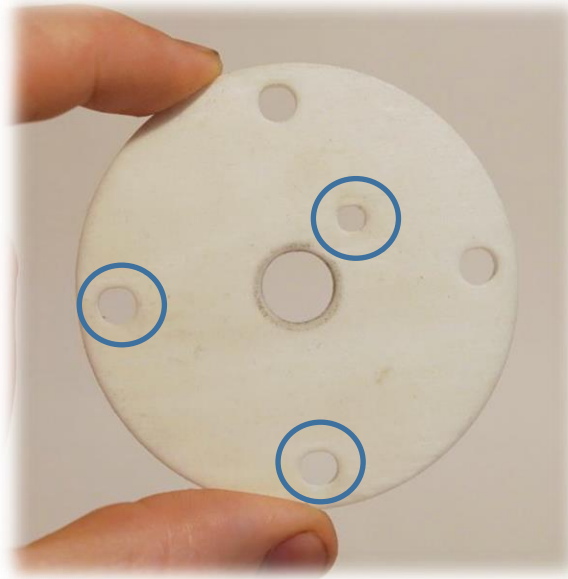


Figura 90 - Particolare dei fori ovalizzati nella testata anteriore

I due pezzi, sicuramente, sono stati posizionati con il loro asse in direzione perpendicolare rispetto alla direzione di stampa infatti i fori sono risultati ovalizzati (Figura 90) e la filettatura non appropriata infatti è risultato complicato montare il raccordo. Per motivi di tempo si è deciso di usare una testata realizzata in PLA appositamente per questo cilindro. Nonostante queste difficoltà l'attuatore è stato assemblato e costituisce l'attuatore 6.

- Attuatore 6:

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	SLS	Nylon
Pistone	SLS	Nylon
Guarnizioni pistone	-	O-ring
Guarnizione testa cilindro	-	O-ring
Guarnizione testata anteriore	-	O-ring
Testata anteriore superiore	SLS	Nylon
Testata anteriore inferiore	FDM	PLA

Tabella 15 - Attuatore 6

I test eseguiti sui nuovi attuatori sono gli stessi di quelli precedenti, per misurare le portate in fuga. Analizzando i dati riportati sul grafico seguente si nota come la portata in fuga sia globalmente minore, infatti si ha un asintoto a circa 17 l/min contro i 22 l/min del prototipo precedente ma ad una pressione maggiore.

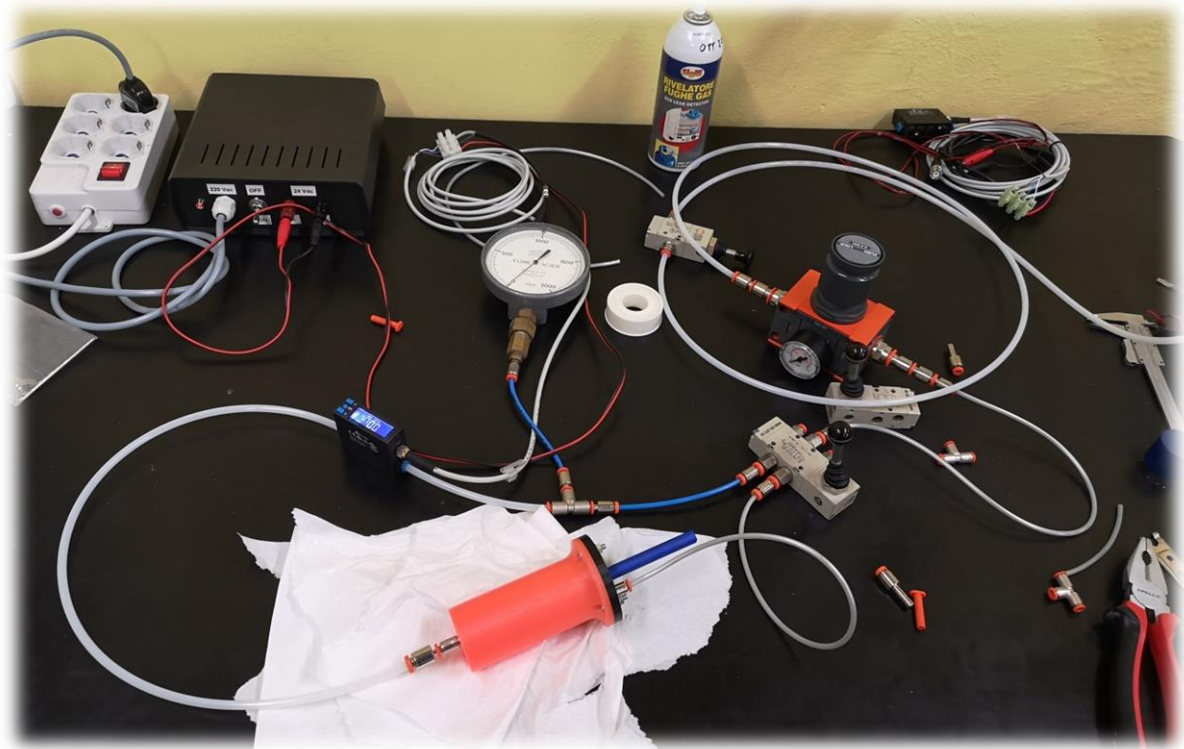


Figura 91 - Nuovo attuatore in test

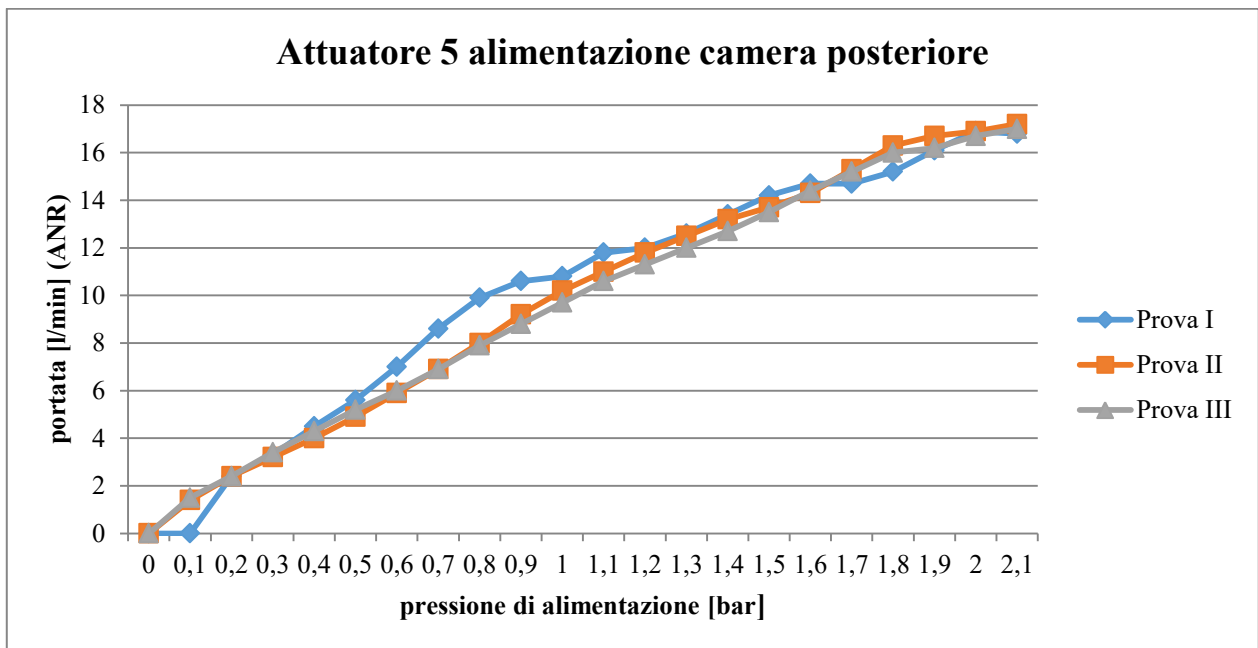


Figura 92 - Andamento portata nell'attuatore 5 con alimentazione in camera posteriore

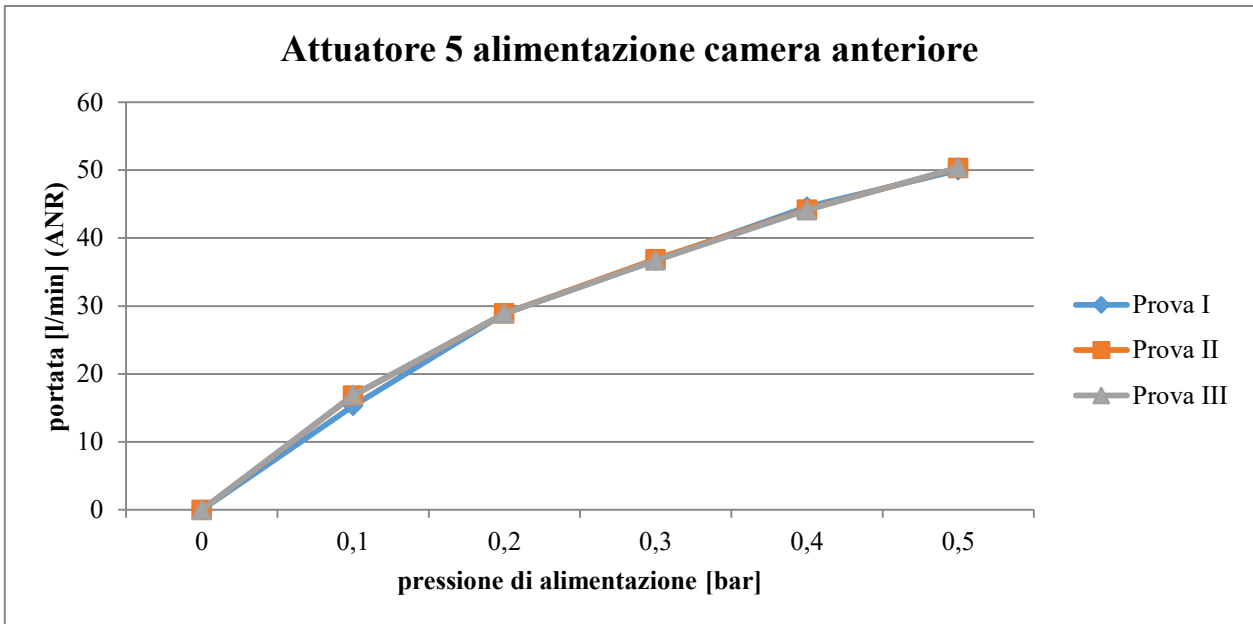


Figura 93 - Andamento portata nell'attuatore 5 con alimentazione in camera anteriore

In questo nuovo attuatore sono state eliminate le perdite in fuga attraverso il corpo del cilindro, la soluzione di aumentare al 100% il riempimento e aumentare lo spessore si sono rivelate corrette. La portata in perdita ora ha il contributo preponderante delle fughe attraverso le guarnizioni della testa dell'attuatore in corrispondenza dello stelo e il contributo minore dato dalle fughe attraverso l'O-ring nel cilindro.

$$Q_{in} = Q_{O-ring} + Q_{O-ring}$$



Figura 94 - Perdite attraverso la testata anteriore e la guarnizione attuatore 5

Per quantificare queste perdite si è tappato l'ingresso della camera anteriore e, con il pistone tutto fuoriuscito, si è alimentata la camera posteriore. L'andamento della portata in fuga al variare della pressione di alimentazione è il seguente:

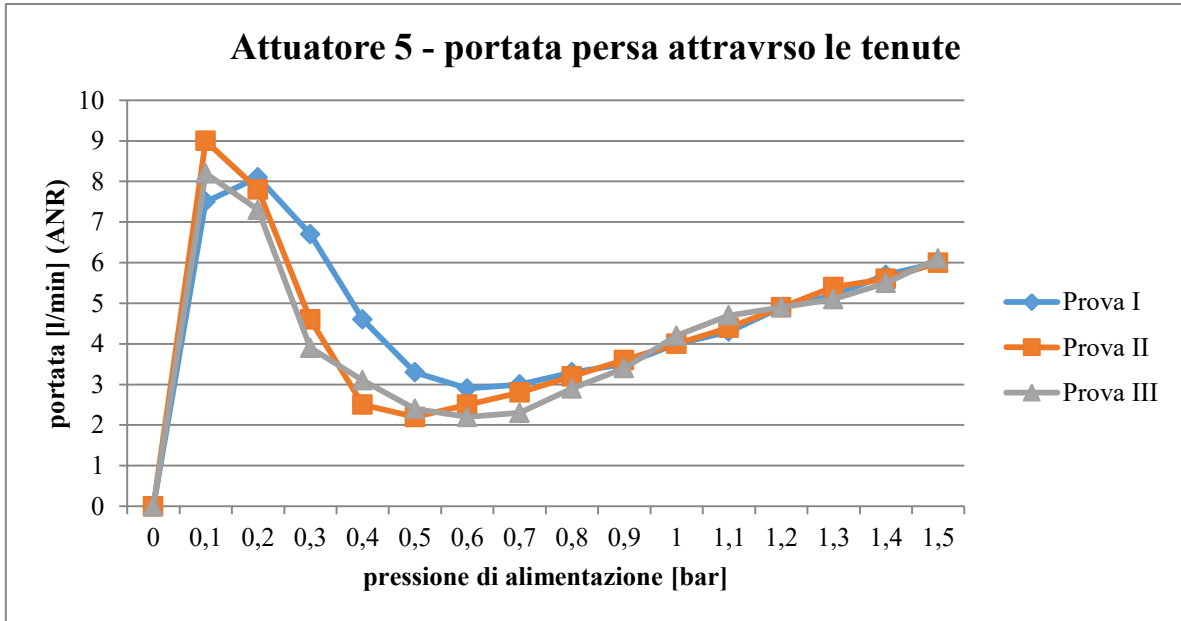


Figura 95 - Andamento portata in fuga attraverso le tenute dell'attuatore 5 con alimentazione in camera posteriore

Tutte le curve presentano un minimo alla pressione di 0.4 - 0.6 bar, la quale corrisponde alla pressione minima di attuazione, per poi risalire in maniera graduale.

Lo stesso non può essere detto alimentando la camera anteriore, si nota infatti come le perdite siano addirittura superiori al modello precedente. La perdita maggiore è stata individuata in corrispondenza della guarnizione dello stelo, sia per via della sua sede ancora mal dimensionata che scarica tutta la portata di alimentazione sia per il suo prematuro consumo.

Nonostante le guarnizioni usate per l'attuatore 6 siano le stesse utilizzate per l'attuatore 5, non è stato possibile inserire il pistone all'interno del cilindro. Ciò è sicuramente dovuto alle diverse tolleranze dimensionali che la macchina per SLS impone, infatti il pistone in PLA si accoppia con interferenza nel cilindro in SLS. È stato necessario realizzare un set di guarnizioni con diametro leggermente minore, nello specifico di 36 mm. Questo prototipo è stato testato con la testata anteriore divisa in due pezzi ma dopo un solo ciclo di fuoriuscita e rientro la guarnizione posta al suo interno è stata letteralmente estrusa attraverso il foro lacerandosi e facendo piantare il pistone, si osservi la Figura 96. È stato necessario smontare la testata e rimuovere la guarnizione danneggiata.

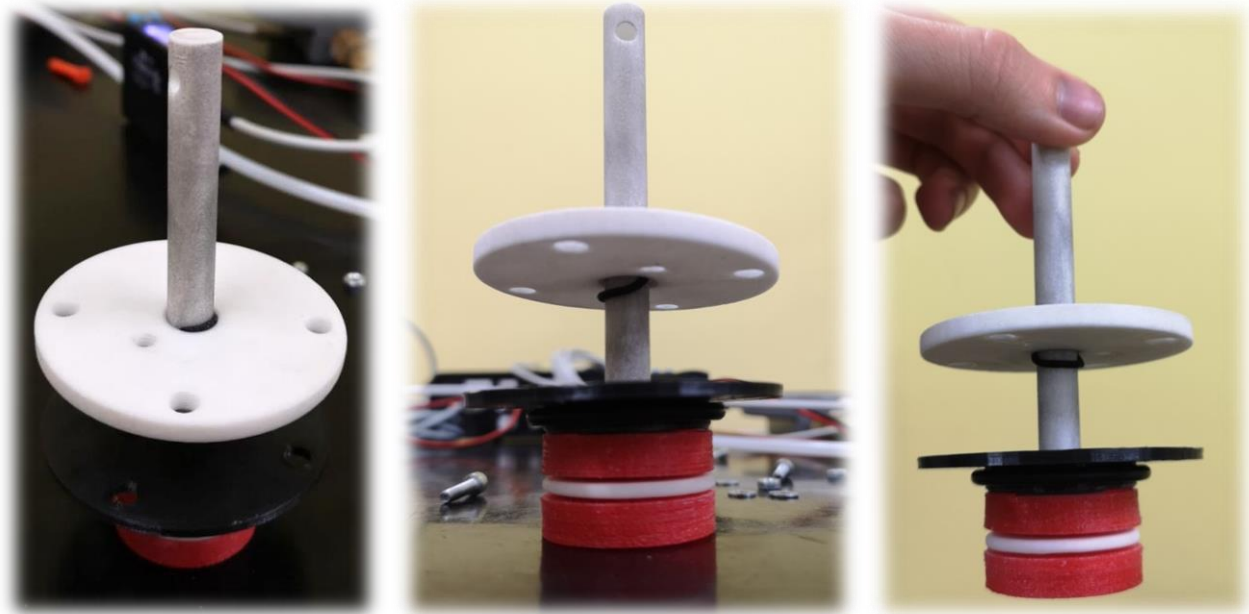


Figura 96 - Estrusione dell'O-ring e bloccaggio del pistone

La criticità è sorta sicuramente a causa di un'errata sede di alloggiamento per l'O-ring e un attrito troppo elevato a contatto con lo stelo. Ancora una volta il problema delle guarnizioni risulta l'ostacolo maggiore da superare.

Per poter comunque effettuare le misure sull'attuatore è stata montata la testata in PLA in quanto i due cilindri condividono la stessa identica geometria CAD. I dati sono riportati nel grafico seguente.

- Attuatore 7

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	SLS	Nylon
Pistone	SLS	Nylon
Guarnizioni pistone	-	O-ring
Guarnizione testata	-	O-ring
Guarnizione testata anteriore	-	O-ring

Tabella 16 - Attuatore 7

L'attuatore è mostrato in Figura 98.

La pressione media di spunto è 0,22 *bar*, si tratta di una pressione inferiore a quella dell'attuatore stampato in FDM, grazie alla forza di attrito minore sviluppata all'interno del sistema.

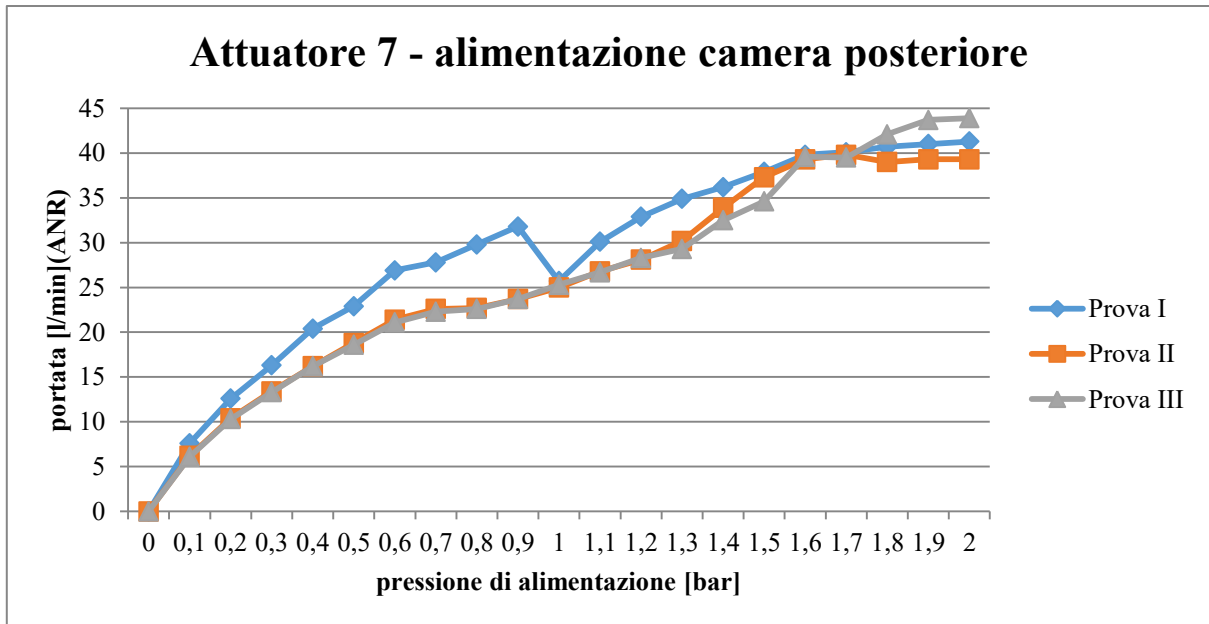


Figura 97 - Andamento della portata nell'attuatore 7 con alimentazione in camera posteriore

Ricordiamo però che le guarnizioni in questo cilindro hanno un diametro esterno minore rispetto al cilindro in PLA e il gioco che si è creato nel loro accoppiamento col cilindro non permette alle guarnizioni di effettuare una tenuta opportuna. Per questo motivo, come si evince dal grafico in Figura 97, si tratta delle perdite fino ad ora più alte registrate. Durante la prima misurazione si è verificata un'anomalia quando si è raggiunti l'intorno di 1 bar, nel quale la portata in fuga è temporaneamente crollata. Un fenomeno che non si è verificato durante le altre due misurazioni, dovuto probabilmente ad uno spostamento del pistone dall'esterno.



Figura 98 - Bolle d'aria nell'attuatore 7 dovute a perdite

In Figura 98 è illustrato l'attuatore 7 alimentato nella camera posteriore e con del liquido cerca fughe opportunamente distribuito in corrispondenza della giunzione cilindro-testata anteriore. Si notano le bolle d'aria che svelano appunto le perdite attraverso la fessura. Si nota anche il pistone annerito dopo aver effettuato un certo numero di cicli, che evidenzia il consumarsi dell'O-ring.

5.2.2 Ottimizzazione della tenuta dello stelo nella testata anteriore

Come ultimo ciclo di iterazione di ottimizzazione del modello si è deciso di focalizzarsi sul problema della guarnizione dello stelo sita all'interno della testata anteriore. Analizzando il comportamento dello stelo all'interno della sua sede si nota come la guarnizione funga da perno attorno al quale lo stelo è libero di ruotare e andare in contro ad impuntamento. In questo modo apre alternativamente delle luci che permettono il passaggio dell'aria. Il fenomeno è sicuramente dovuto alle tolleranze di accoppiamento e alla deformabilità degli elementi elastomerici. Si è deciso allora di vincolare ulteriormente lo stelo aumentando il numero di guarnizioni nella testata anteriore.

Di seguito è riportata la sezione della testata anteriore per meglio comprendere come è stata posizionata la guarnizione aggiuntiva.

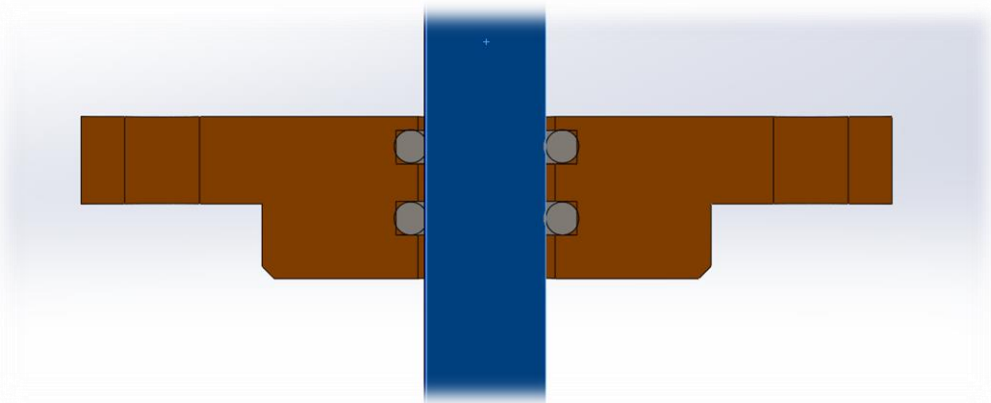


Figura 99 - Sezione con testata munito di 2 anelli O-ring

Come previsto la forza di attrito sullo stelo è aumentata anche se in misura minore di quanto ci si aspettava e la pressione media di spunto quando si alimenta la camera posteriore è salita a 0,55 bar.

- Attuatore 8:

Componente	Tecnologia	Materiale
Corpo cilindro	FDM	PLA
Pistone	FDM	PLA
Guarnizioni pistone	-	O-ring
Guarnizione testata	-	O-ring
Guarnizione testata anteriore	-	O-ring
Testata anteriore 2 O-ring	FDM	PLA

Tabella 17 - Attuatore 8

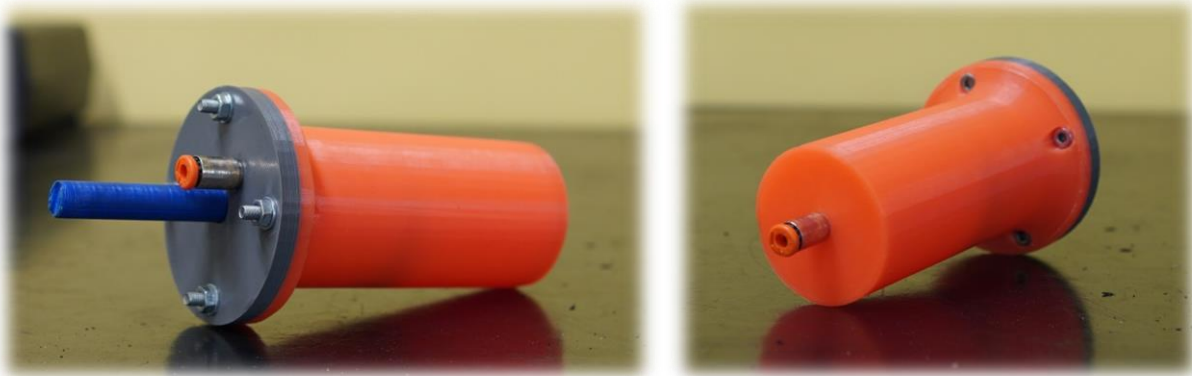


Figura 100 - Attuatore 8

Di seguito sono riportati i dati raccolti con le misure effettuate. Il circuito è lo stesso identico delle prove precedenti.

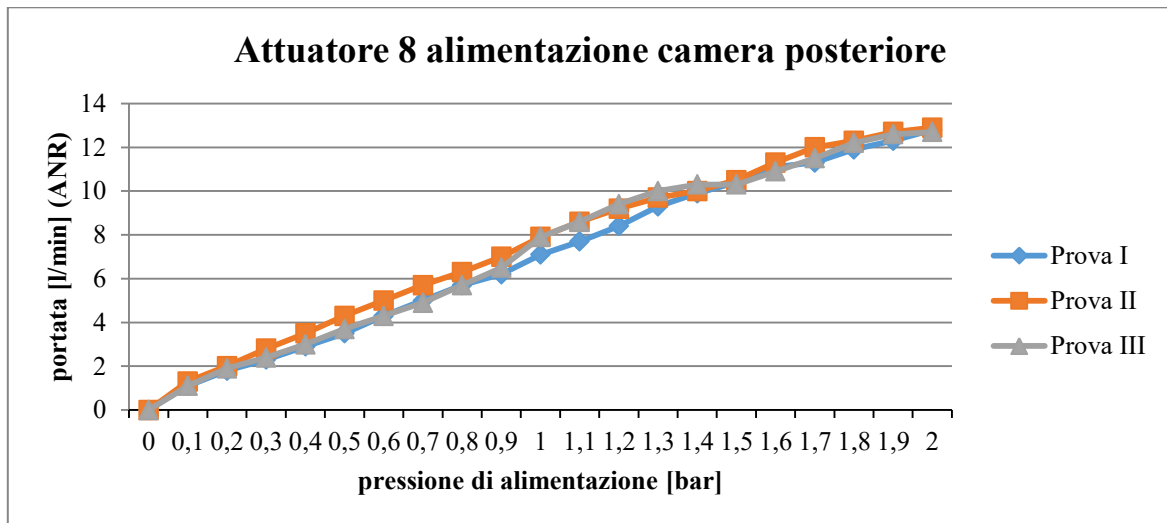


Figura 101 - Andamento della portata nell'attuatore 8 alimentazione camera posteriore

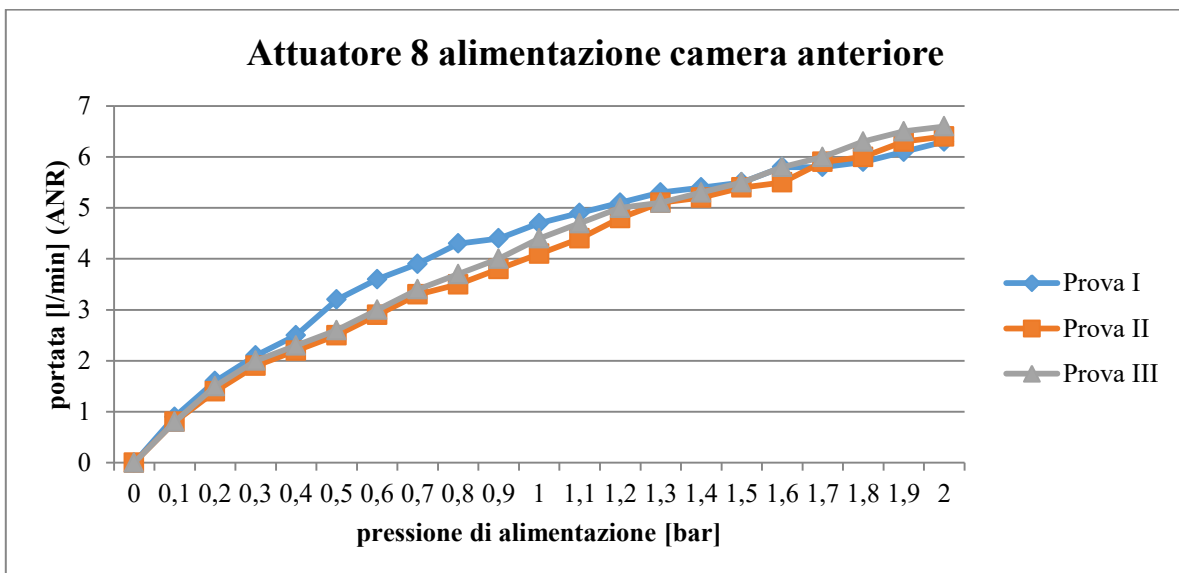


Figura 102 - Andamento della portata nell'attuatore 8 alimentazione camera anteriore

Come si evince dai grafici qui riportati i risultati sono positivamente inaspettati, infatti le perdite registrate sono nettamente inferiori ai modelli precedenti. Le perdite in corrispondenza dell'interfaccia stelo-testata sono state quasi del tutto eliminate e diventano ampiamente trascurabili rispetto a quelle che si hanno alla giunzione testata-cilindro.

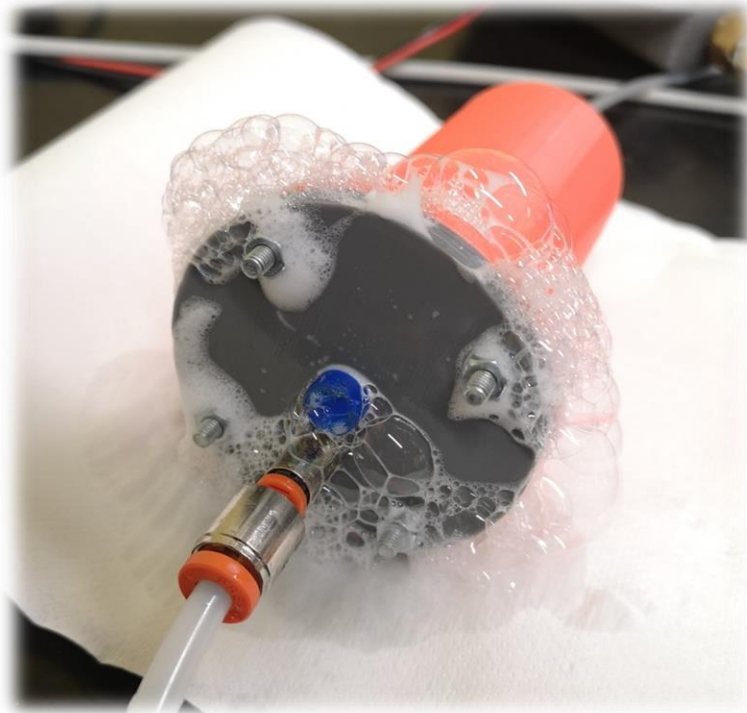


Figura 103 - Fughe maggiori alla giunzione e minori nello stelo

In particolare si è notato che le perdite in corrispondenza della giunzione sono maggiori quando viene alimentata la camera anteriore, complice anche la posizione del pistone che dipende dalla camera alimentata ma comunque conferma che le guarnizioni striscianti calettate sulla testa del pistone funzionano e riescono a far tenuta isolando bene (ma non ancora perfettamente) le due camere. Anche in questo caso, dopo un certo numero di cicli lo stelo ha cominciato ad annerirsi, sintomo di un'usura dei due O-ring.

A questo punto si è deciso di ripetere la prova di tenuta del cilindro per valutare in maniera univoca le perdite attraverso la giunzione. Il circuito per la prova è lo stesso delle prove precedenti nel quale si tappa la camera anteriore e si alimenta la camera posteriore con pistone tutto fuoriuscito. Durante l'esecuzione della prova è stato accuratamente verificato che non vi fossero perdite in corrispondenza della tenuta dello stelo.

Prima di discutere i risultati di quest'ultima prova è necessario riportare che:

- le guarnizioni nella testata anteriore sono consumate e lo si capisce dai residui che il pistone asporta ogni volta che fuoriesce dal cilindro;
- il prototipo è rimasto inutilizzato e conservato in laboratorio per una settimana abbondante dopo l'ultimo test;
- durante la fase di misura si è notato come l'aria in pressione attraversasse il componente pistone lungo il suo asse e non la guarnizione (Figura 105), ciò è dovuto ad un errore di stampa del pistone nel quale è assente la testa con il foro per l'aggancio di eventuali tool.

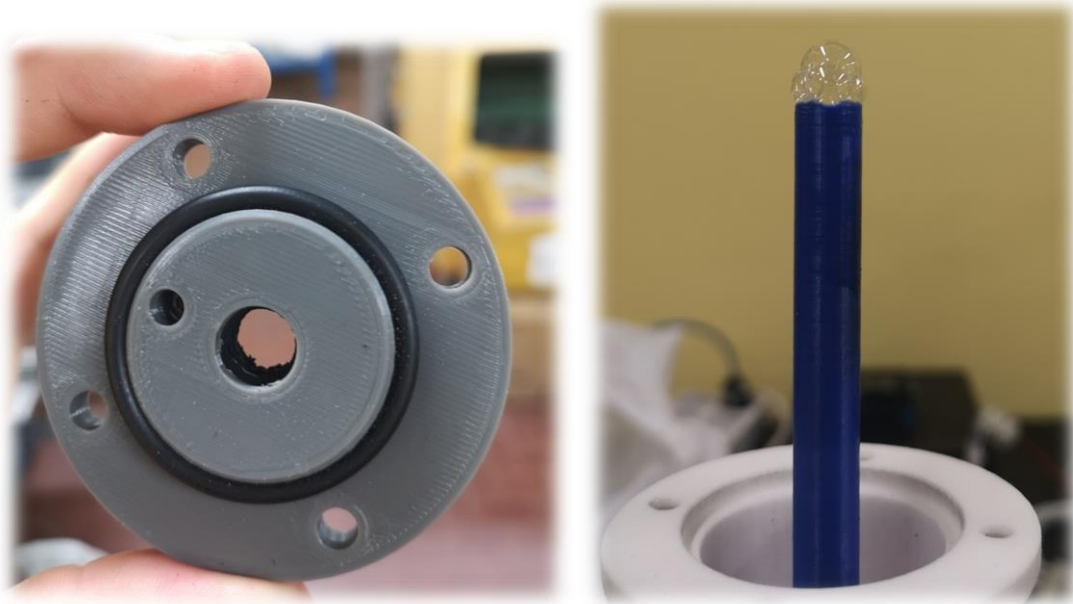


Figura 104 - Guarnizioni interne consumate dopo n cicli e portata in fuga anche attraverso lo stelo

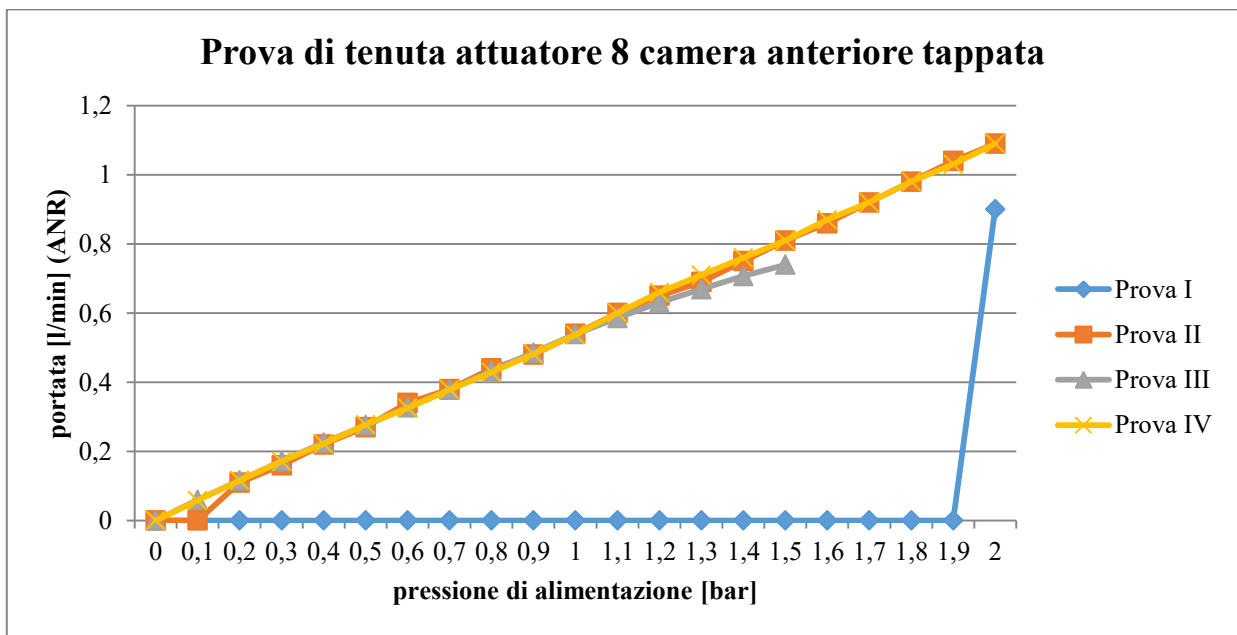


Figura 105 - Prove di tenuta attuatore 7 con camera anteriore tappata

La tenuta del sistema è pressoché perfetta infatti il sistema non registra portata fino alla pressione di 2 bar dove si ha un valore di portata persa di 0.9 l/min, inoltre la lancetta del manometro ora è molto sensibile al cambiamento della pressione infatti essa si muove non appena viene sfiorata la manopola del regolatore di pressione. L'andamento della curva relativa alla prova 1 è giustificato dal fatto che è stato utilizzato il flussimetro con fondo scala 1-50 l/min, rendendo dunque la misura non attendibile. Per avere una maggiore accuratezza è stato necessario installare il flussometro digitale con un fondo scala di 0.1 - 5 l/min, nella prova II. Nella prova III invece si è voluto usare il flussometro ancora più preciso con fondo scala 0.01 l/min fino a 0.5 l/min fino alla pressione di 1 bar circa e switchare a quello superiore fino alla pressione di 2 bar.

Con i dati fino ad ora raccolti è possibile quantificare la portata persa attraverso la giunzione. Ricordando lo schema e l'equilibrio:

$$Q_{in} = Q_{cil} + Q_{O-ring1} + Q_{O-ring2} + Q_{ca}$$

Avendo eliminato i contributi Q_{ca} e Q_{cil} e $Q_{O-ring2}$ la portata misurata dal flussimetro è solo quella che fuoriesce dalla giunzione $Q_{O-ring1}$. Considerando che l'alimentazione è data nella camera posteriore vi è ancora margine di miglioramento delle guarnizioni che isolano le due camere. La portata Q_{ca} trafileta può essere quantificata con un semplice equilibrio imponendo la continuità della portata. Nell'equilibrio del sistema:

$$Q_{in} = Q_{cil} + Q_{O-ring1} + Q_{O-ring2} + Q_{ca}$$

Sono note Q_{in} , $Q_{O-ring1}$, Q_{cil} e $Q_{O-ring2}$ sono nulle (comunque nettamente trascurabili) quindi

$$Q_{ca} = Q_{in} - Q_{O-ring1}$$

E l'andamento è riportato nel grafico in Figura 107.

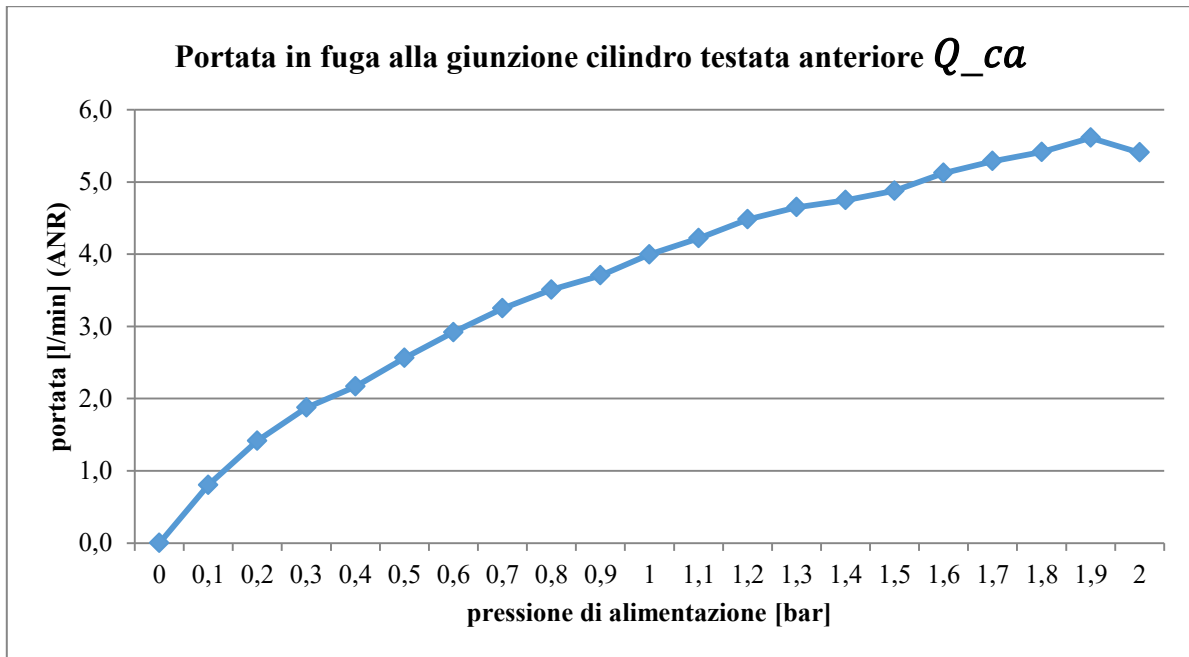


Figura 106 - Andamento della portata di fuga attraverso la giunzione del cilindro con la testata anteriore dell'attuatore 8

È opportuno, a questo punto, confrontare i risultati di tutte le sessioni di test effettuate per verificare i miglioramenti. Per poter condurre il confronto è stata fatta la media delle tre misure di ogni test.

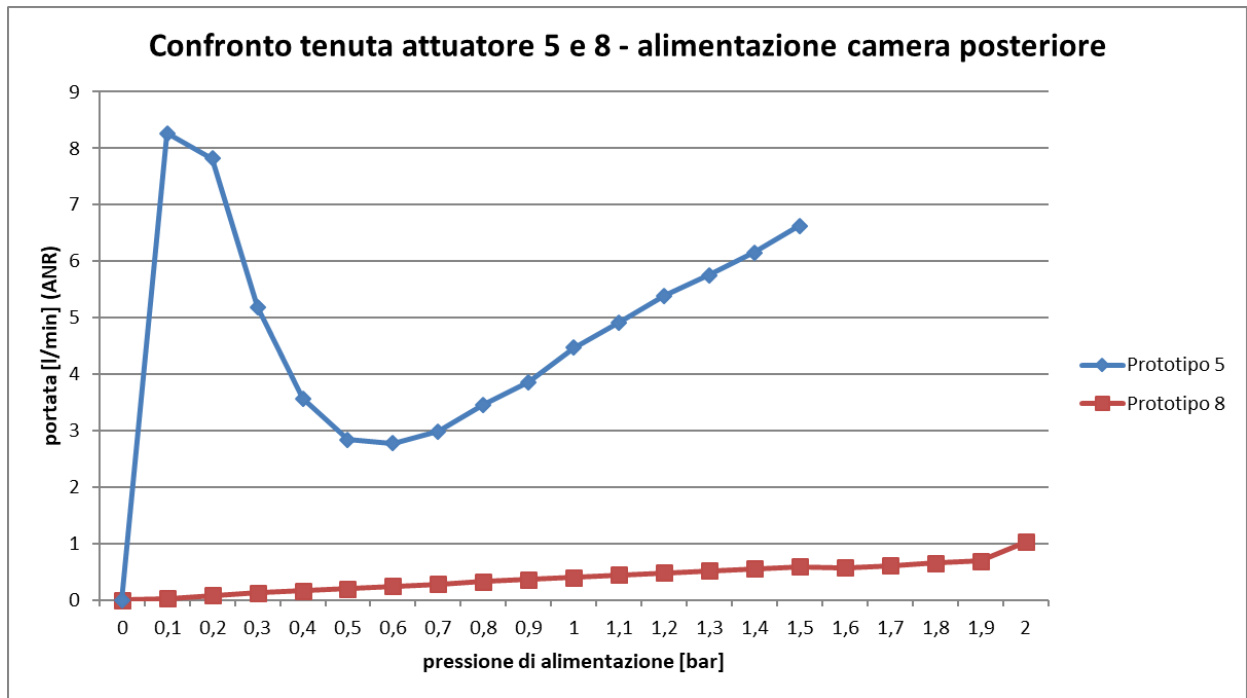


Figura 107 - Confronto tenuta attuatore 5 e 8 con alimentazione in camera posteriore

In questo confronto (Figura 108) è marcato l'andamento completamente diverso della portata in fuga, infatti non è presente alcun minimo nel secondo test (curva rossa) il che rende ancora più inspiegabile l'andamento della curva blu. Si può sottolineare che il minimo è circa in corrispondenza della pressione minima di attuazione per quel prototipo. Si nota anche che le perdite in corrispondenza della tenuta dello stelo erano quelle più rilevanti se confrontate con quelle attraverso la giunzione. Nelle Figure 109 e 110 sono riportate le fughe degli attuatori 3, 5, 8

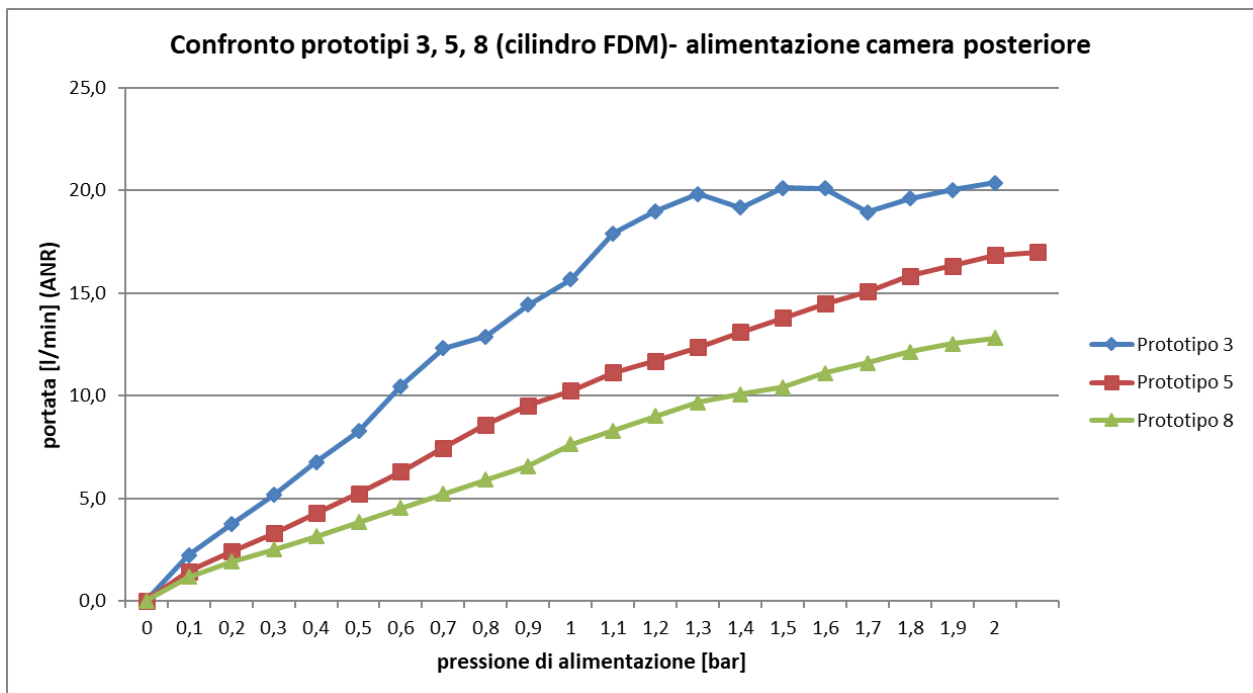


Figura 108 - Confronto delle portate degli attuatori 3, 5, 8 con alimentazione in camera posteriore

Quando viene alimentata la camera posteriore il valore registrato alla pressione di 2 bar è di 12,7 l/min contro i 21 l/min del primo modello che corrisponde ad una riduzione del 46%. La differenza è ancora più marcata se si confrontano i dati quando è alimentata la camera anteriore:

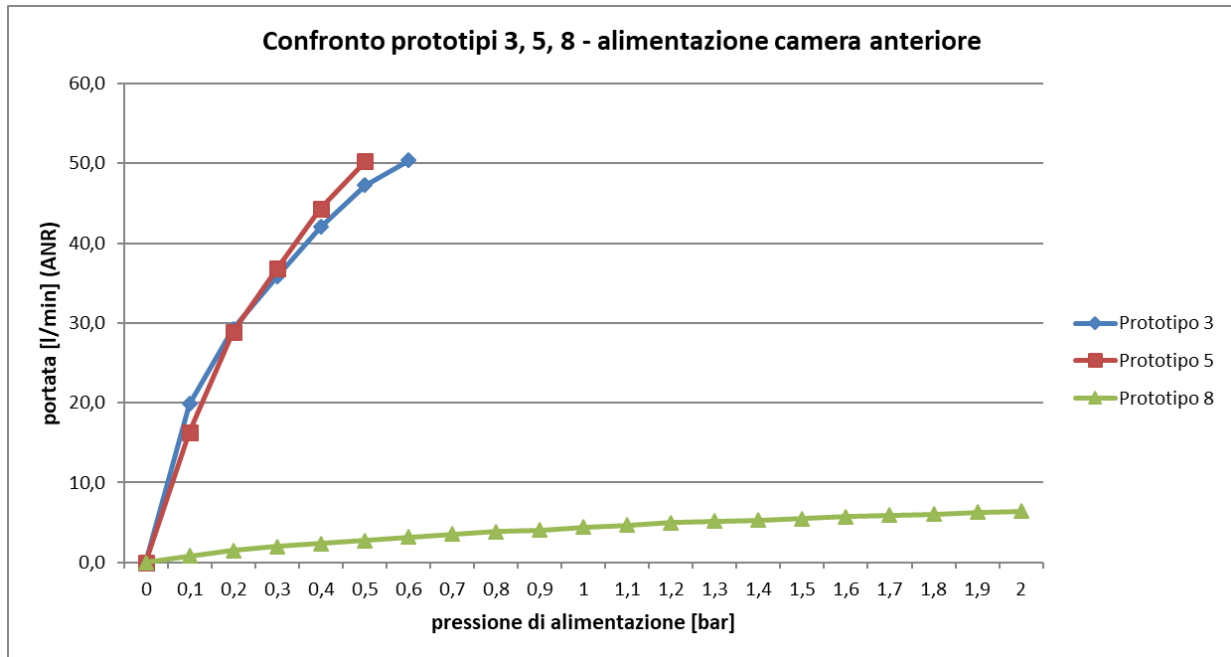


Figura 109 - Confronto delle portate degli attuatori 3, 7, 8 con alimentazione in camera anteriore

In questo caso le perdite sono state ridotte dell'86%. In uno scenario ideale il flussimetro deve rilevare portata solo quando il pistone è in movimento e restituire zero quando il pistone è fermo. Durante queste misurazioni si è notato come la posizione del pistone lungo la sua corsa influisce tantissimo su diversi aspetti. L'usura delle guarnizioni nella testata anteriore porta lo stelo ad impuntarsi e ciò diventa critico soprattutto nella fase di rientro in cui il pistone viene a trovarsi in una condizione di carico di trazione (infatti uno dei pistoni utilizzati si è spaccato proprio per questo fenomeno). Inoltre i punti di contatto fra il pistone e il cilindro sono maggiormente concentrati lungo la superficie delle sue guarnizioni e in alcune condizioni risultano essere poco rigidi.

5.3 Studio della forza di spunto e della forza di attrito

Basandosi sulla pressione di spunto è possibile calcolare la forza di attrito che si sviluppa nelle superfici striscianti delle guarnizioni e tenute. Si approssima il calcolo ad un semplice equilibrio di forze alla traslazione orizzontale (Figura 111).

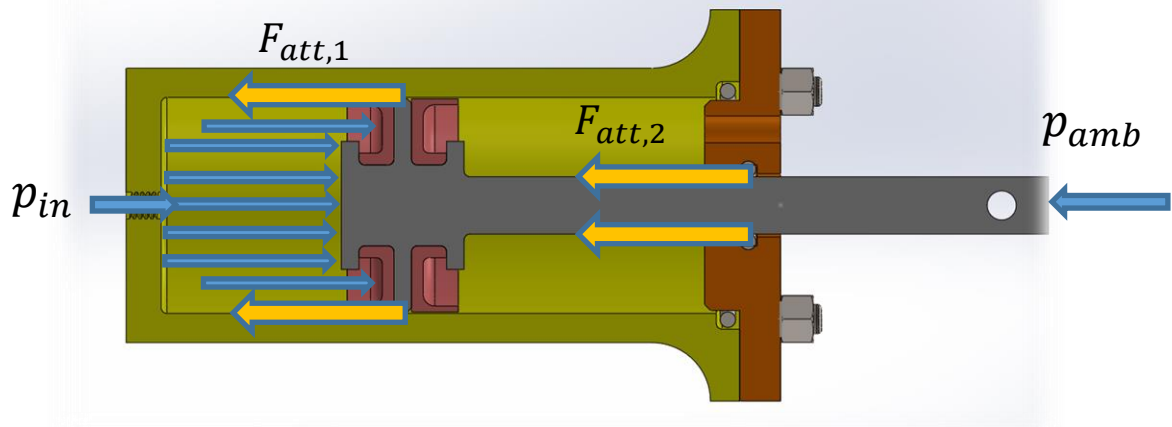


Figura 110 - Schema dell'equilibrio delle forze nell'attuatore

Quando viene alimentata la camera posteriore, l'area sulla quale agisce la pressione dell'aria compressa è data dalla sezione circolare del pistone più l'area della corona circolare della guarnizione. Quando si alimenta la camera anteriore, invece, si considera la stessa area della camera posteriore diminuita della superficie dello stelo:

$$F_{att,tot} = p_{spunto} \cdot (A_{testa} + A_{guarn}) - p_{amb} \cdot A_{stelo}$$

$$F_{att,tot} = p_{spunto} \cdot (A_{testa} + A_{guarn} - A_{stelo})$$

Dove la pressione ambiente è il riferimento quindi posta a zero e la p_{spunto} è la pressione di spunto ovvero la pressione alla quale si ha il primo movimento del pistone senza necessità che questo sviluppi un moto regolare. Le aree in questione valgono:

$$A_{stelo} = 78,54 \text{ mm}^2$$

$$A_{guarn} = 416,46 \text{ mm}^2$$

$$A_{testa} = 380,13 \text{ mm}^2$$

$$A_{testa} - A_{stelo} = 301,59 \text{ mm}^2$$

Prendendo in considerazione l'attuatore 7, quando viene alimentata la camera posteriore, si calcola una forza d'attrito di 39,5N alla pressione di spunto di 0,55 bar. La forza teorica massima ottenibile è pari alla pressione di alimentazione moltiplicata per l'area su cui agisce. Considerando costante la forza d'attrito, si determina la forza di spinta che l'attuatore esercita fino alla pressione di 2 bar sottraendo alla forza teorica massima la forza d'attrito, Figura 111.

Alla pressione di 2 bar si calcola una forza di attuazione pari a $159,32\text{N} - 39,5\text{N} = 119,82\text{N}$.

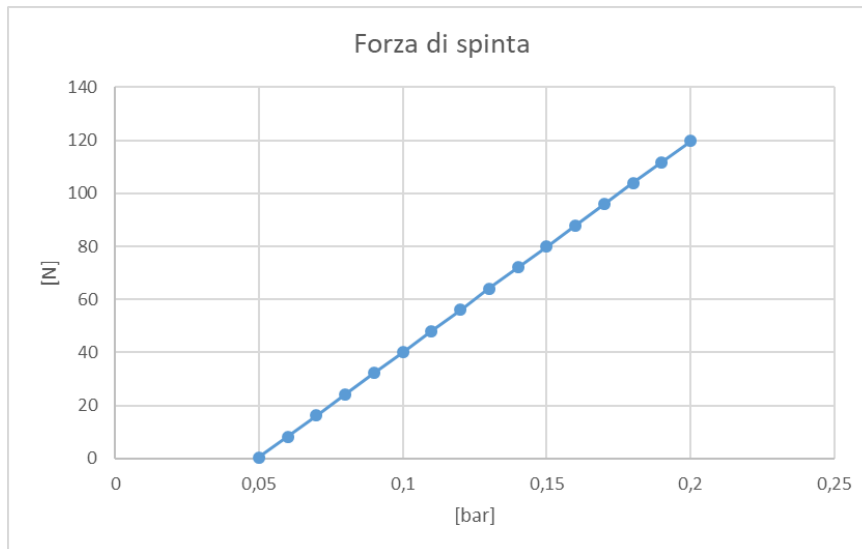


Figura 111 - Calcolo della forza di spinta al variare della pressione di alimentazione della camera posteriore dell'attuatore 8

In Figura 112 è riportato l'andamento della forza di spinta effettiva che l'attuatore genera al variare della pressione di alimentazione della camera posteriore.

In 113 è riportato il prototipo nel suo insieme finale, con indicazione di misure di massima e alcune caratteristiche geometriche di ingombro.

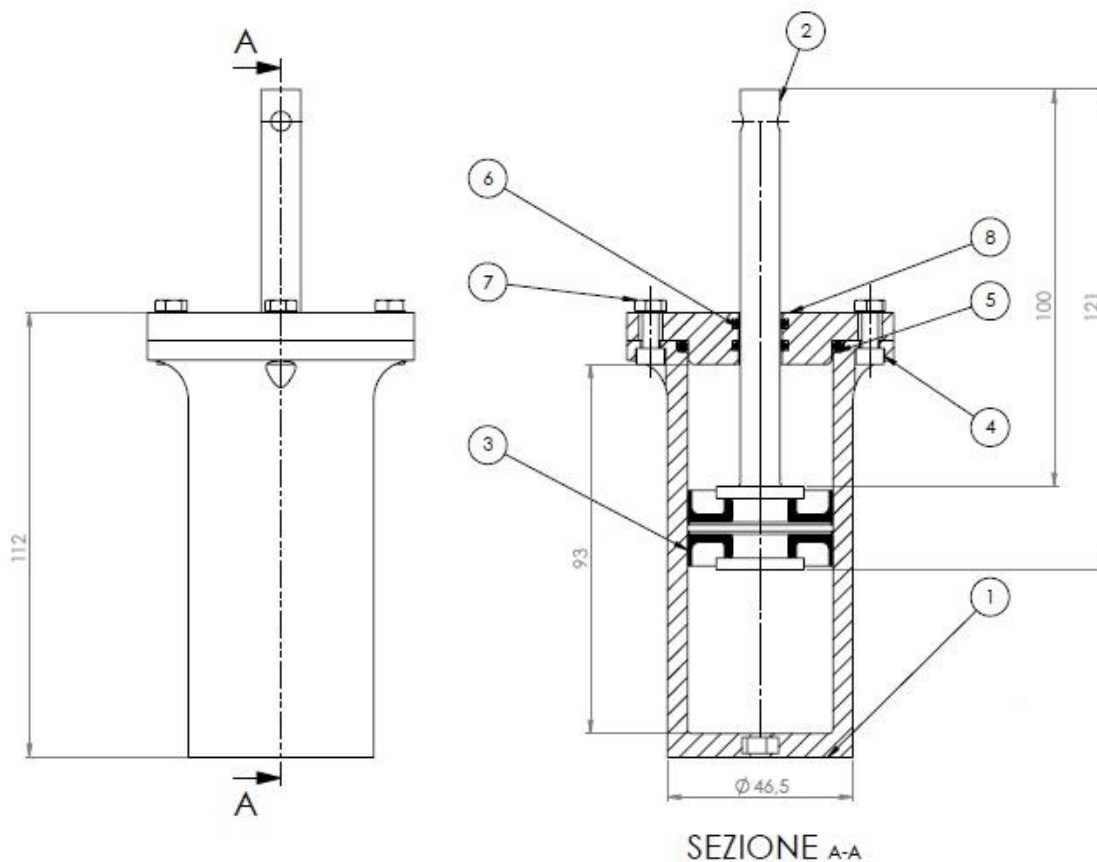


Figura 112- Disegno del prototipo attuatore definitivo

5.4 Il caso delle guarnizioni

A valle di tutta la fase di misurazione si è constatato (come previsto) che il problema più insidioso da risolvere fosse quello delle guarnizioni e della loro sede all'interno dei componenti. Sono stati realizzati diversi provini che simulavano la sede della guarnizione per lo stelo nella testata, i provini infatti differivano tra loro per le dimensioni della sede per l'O-ring. Il mal funzionamento dell'anello di tenuta infatti inficia sia la tenuta sia lo scorrimento dello stelo all'interno di esso. Il problema è tenere in considerazione tre fattori:

- Dimensione della sede: altezza e diametro
- Attrito con lo stelo
- Precisione della macchina

Si tratta di tre condizioni che vanno in antitesi reciprocamente, cioè se si vuole aumentare la forza di contatto fra la guarnizione e lo stelo bisogna diminuire le dimensioni della sede di alloggiamento dell'O-ring, questo causa un inevitabile incremento della forza di attrito e lo stelo risulterebbe piantato. Inoltre, a seguito della procedura con la quale si inserisce l'anello all'interno del componente durante la fase di stampa, esso stesso funge da supporto per lo strato di materiale che viene depositato sopra. Questa condizione non permette un grande margine di modifica in termini di altezza della sede dell'O-ring. Altro problema che si riscontra è la difficoltà di misurare e quindi verificare la sede realizzata perché è completamente nascosta e inaccessibile. Il parametro che si è controllato dunque è stato soprattutto il diametro della sede per l'O-ring. Si è dunque trovato un compromesso tra la forza di attrito che si sviluppa tra gli organi mobili e l'azione di tenuta individuando un certo valore di diametro. Per risolvere temporaneamente il problema dell'attrito che si sviluppa tra gli organi mobili si può lavorare lo stelo con carta abrasiva molto fine rendendo la sua superficie più liscia. Una soluzione simile è lavorare il cilindro, diminuendo così la forza di attrito con le guarnizioni della testa del pistone, con il rischio però di inficiare la tenuta delle stesse. Un'altra possibile soluzione è quella di scegliere un materiale diverso per l'anello O-ring, per rimanere all'interno del parco materiali per additive manufacturing si può scegliere un TPU più rigido (per esempio un 95A). Spostandosi invece in un contesto più commerciale, vale decisamente la pena sfruttare guarnizioni quadrilobate o con molla interna che permette di avere una precarico della forza di contatto sempre attiva.

6 Future developments

A valle dei risultati ottenuti e dei problemi riscontrati si è certi affermare che esiste un margine di miglioramento su diversi aspetti del progetto.

In primis sarebbe interessante analizzare le performance di prototipi realizzati con delle macchine correttamente calibrate e funzionante al top delle proprie caratteristiche. Congiuntamente alla scelta di queste, è bene fare una ricerca opportuna e oculata dei materiali disponibili e della loro qualità, analizzandone caratteristiche e proprietà.

A questo proposito si cita il caso delle guarnizioni realizzate con la tecnica della stampa 3D, che rappresenta sicuramente un campo da esplorare e di fondamentale interesse per la funzionalità dell'assieme. Si suggerisce, ad esempio, di impiegare una macchina a doppio estrusore in grado di processare due materiali differenti contemporaneamente. In questo modo sarebbe possibile realizzare la stampa multi-materiale di una guarnizione "semirigida", dotata di una sorta di scheletro che conferisca maggiore rigidità e le permetta di essere mantenuta in posizione senza essere trascinata dagli elementi mobili con cui è a contatto. Inoltre sarebbe possibile realizzare in un'unica soluzione il pistone corredato delle guarnizioni.

Proprio per la presenza di organi in moto relativo tra loro, si ritiene utile condurre uno studio sull'interazione del TPU delle guarnizioni con il pistone, per verificarne la resistenza a strisciamento in funzione della direzione di stampa del pistone stesso.

La ricerca di materiali specifici ed opportuni si estende in realtà anche agli altri elementi dell'assieme unitamente alla sperimentazione di nuove geometrie più efficienti, sia in termini di prestazioni che di processo di realizzazione. A questo proposito risulta interessante condurre con software di calcolo dedicato una ricostruzione di "topology optimization", in modo da alleggerire ulteriormente il sistema senza inficiare la resistenza meccanica.

Risulta utile e altresì interessante condurre degli esperimenti volti alla determinazione delle caratteristiche strutturali dei componenti dell'assieme. In un'ottica più ampia, dunque, si suggerisce di esplorare il cedimento dei componenti stampati in 3D e sottoposti carico di pressione interna, analogamente al caso dei serbatoi in pressione.

Con queste premesse, a valle di questa tesi, si ritiene sicuramente necessario incrementare il lavoro di simulazione numerica, con una solida e consistente base di dati dei materiali impiegati e, soprattutto, processati con le varie tecnologie di stampa 3D, impiegando un modello che tenga conto della struttura caratteristica layer-by-layer dei componenti stampati.

Viene da sé che una forte spinta sulla simulazione dev'essere accompagnata da un lavoro di analisi, verifica e validazione dei risultati attraverso un processo di adeguata sperimentazione e misura dei prototipi realizzati. In particolare, è utile determinare l'azione dell'attrito, i range di forza e conseguente stabilità degli attuatori progettati e realizzati, a partire dall'oggetto di questa tesi.

In conclusione, si ritiene necessario sottolineare ancora una volta che il progetto dell'attuatore analizzato in questo lavoro di tesi non è per nulla concluso e si trova ancora in fase di elaborazione. Tuttavia questa tesi dimostra quanto sia effettivamente possibile realizzare un attuatore lineare a doppio effetto in tutte le sue parti interamente mediante additive manufacturing, obiettivo ultimo della tesi stessa.

7 Bibliografia e riferimenti

- [1] Ivan Grgić, Vjekoslav Wertheimer, Mirko Karakašić, Željko Ivandić Development of a 3D Printed Double-Acting Linear Pneumatic Actuator for the Tendon Gripping, MDPI Journal, Polymers, 2021, 13, 2528
- [2] Marius Siegfarth, Tim Philipp Pusch, Antoine Pfeil and Pierre Renaud, Fan Stallkamp Multi-material 3D printed hydraulic actuator for medical robots, Rapid Prototyping Journal, 26/6, 2020, 1019-1026, Emerald Publishing Limited) ISSN 1355-2546)
- [3] Jeremy Krause, Pranav Bhounsule A 3D Printed Linear Pneumatic Actuator for Position, Force and Impedance Control, MDPI Journal, Actuators, 2018
- [4] Mechanical Properties of 3D-Printing Polylactic Acid Parts subjected to Bending Stress and Fatigue Testing J. Antonio Travieso-Rodriguez, Ramon Jerez-Mesa, Jordi Llumà, Oriol Traver-Ramos, Giovanni Gomez-Gras and Joan Josep Roa Rovira
- [5] Zhu Yu, Gao Yingchao, Jiang Jie, Hai Gu, Shuaishuai Lv, Hongjun Ni, Xingxing Wag, Chaofan Jia Study on Effects of FDM 3D Printing Parameters on Mechanical Properties of Polylactic Acid, 2019, IOP Con. Ser.: Mater. Sci. Eng. 688 033026
- [6] Christian L., Nalland Pranav A. Bhounsule A Miniature 3D Printed On-Off Linear Pneumatic Actuator and Its Demonstration into a Cartoon Character of Hopping Lamp, MDPI Journal, Actuators, 2019, 8, 72
- [7] <https://www.stratasys.com/>
- [8] <https://www.eos.info/en>
- [9] Caratterizzazione meccanica a trazione di Acido Polilattico additivato con grafene e stampato in 3D, con tecnologia FDM, Michele Torre, Tesi di Laurea Magistrale, Università degli studi di Pavia, 2016
- [10] Studio e realizzazione di un prototipo di mano articolata mediante stampa 3D e azionamento pneumatico, Valerio Stano, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, 2018
- [11] Compact, magnetically actuated, additively manufactured pumps for liquids and gases.
- [12] Chirone E., Tornincasa S., Disegno Tecnico Industriale, Gruppo Editoriale Il Capitello
- [13] Xingjian Wei, Na Zou, Li Zeng, Zhijian Pei, PolyJet 3D printing: Predicting color by multilayer perceptron neural network, Annals of 3D Printed Medicine, Volume 5, 2022, 100049, ISSN 2666-9641
- [14] <https://3dream.pl/en/3d-printing/>
- [15] <https://www.creality.com/goods-detail/ender-3-3d-printer>
- [16] Sardinha, Manuel. (2017). Design and development of a modular fused deposition modelling apparatus, Figure 2. 10.13140/RG.2.2.30873.06243.
- [17] https://it.wikipedia.org/wiki/File:SLS_schematic.svg
- [18] <https://schunk.com>
- [19] Krzysztof Słomiany, <https://grabcad.com/library/pneumatic-gripper-11>
- [20] Haili Li, Jiantao Yao, Pan Zhou, Xinbo Chen, Yundou Xu, Yongsheng Zhao, High-force soft pneumatic actuators based on novel casting method for robotic applications, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 306, 2020, 111957, ISSN 0924-4247
- [21] Hu, W.; Mutlu, R.; Li, W.; Alici, G. A Structural Optimisation Method for a Soft Pneumatic Actuator. Robotics 2018, 7, 24. <https://doi.org/10.3390/robotics7020024>
- [22] Salmi, Dispense corso “Additive Manufacturing Systems and Materials”, Politecnico di Torino, 2019
- [23] <https://www.esun3d.com/petg-product/>