



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Progettazione e analisi di un cambio spola
automatico per macchine da cucire**

**Design and analysis of an automatic shuttle
change for sewing machines**

Relatore: Chiar.Mo

Prof. Michele Germani

Tesi di Laurea di:

Alessandro Torresi

Anno Accademico 2018/2019

Alla mia famiglia e
agli amici più cari

Indice

Introduzione	6
1 Macchina da cucire	8
1.1 Breve storia della macchina da cucire.....	8
1.2 Principali componenti.....	13
1.3 Brother	15
1.4 Trismeccanica.....	17
2 Il cambio spola	18
2.1 Che cos'è e a cosa serve.....	18
2.2 Struttura del dispositivo.....	19
2.3 Scelta del materiale.....	21
2.4 I movimenti.....	24
3 Analisi di velocità	28
3.1 Introduzione al problema.....	28
3.2 Estrazione della spola dal caricatore.....	29
3.3 Movimento pistone	31
3.4 Modellazione del problema	34

3.4.1	Modello forza di pressione.....	35
3.4.2	Modello forza aerodinamica	36
3.5	Approccio euleriano	38
4	Regolazione aria.....	43
4.1	Rubinetto per l'afflusso di aria.....	43
4.1.1	Considerazioni teoriche	44
4.2	Struttura interna del rubinetto.....	46
4.3	Analisi geometrica della regolazione.....	48
4.4	Andamento grafico.....	50
4.5	Approccio euleriano rubinetto	53
4.6	Azione frenante.....	57
5	Analisi economica.....	61
5.1	Introduzione all'analisi.....	61
5.2	Calcolo del costo totale.....	63
5.2.1	Costo del materiale C_m	64
5.2.2	Costo di lavorazione C_w	65
5.2.3	Costo di set-up C_{su}	66
6	Risultati	68
6.1	Tempo di esecuzione	68

6.2	Parametri dell'attuatore	70
6.3	Prove e verifiche	71
	Conclusioni	73
	Bibliografia	75
	Ringraziamenti	76

Introduzione

Questa tesi tratta della progettazione e analisi di un cambio spola automatico per macchine da cucire di tipo Brother.

Brother è il nome dell'azienda produttrice della macchina da cucire sulla base della quale è stato sviluppato il dispositivo oggetto di analisi.

Il dispositivo in questione ha il compito di prelevare le spole da un caricatore e posizionarle all'interno della macchina in maniera automatica, andando a sostituire il lavoro manuale dell'operatore che aveva il compito di sostituire le spole una per una ogni qualvolta si fosse esaurito il filo al loro interno. Ciò permette di ridurre i tempi di ricarica e soprattutto consente all'operatore di gestire più di una macchina alla volta.

La movimentazione è gestita da attuatori pneumatici, uno girevole e due lineari, che compiono i loro movimenti mediante l'utilizzo di aria compressa.

L'azienda presso la quale si è svolto il lavoro è la Trismeccanica, un'azienda che si occupa di lavorazioni meccaniche ed elettromeccaniche con sede a Fermo.

Nel Capitolo 1 si parlerà della macchina da cucire in generale, della sua storia, della struttura e dei componenti che la costituiscono per poi descrivere in breve la Brother e la Trismeccanica.

Nel Capitolo 2 si tratterà la riprogettazione delle varie parti del meccanismo, la base di partenza infatti era un assieme già esistente il quale ha subito alcune modifiche sia a livello di numero dei pezzi che a livello di dimensioni, in un

processo di ottimizzazione sia di ingombri, sia di peso complessivo, sia di funzionalità.

Nel Capitolo 3 si svolgerà un'analisi relativa al processo di estrazione delle spole, ogni spola infatti è costituita da una capsula con al suo interno un rocchetto, su cui è avvolto il filo, appoggiato senza alcun tipo di bloccaggio e quindi se viene prelevata ad una velocità eccessiva c'è il rischio che il rocchetto scivoli fuori. L'obiettivo sarà cercare una correlazione tra pressione in ingresso e velocità del pistone dell'attuatore in uscita per valutare la pressione da utilizzare per ottenere la velocità desiderata, ossia quella velocità che permette di svolgere il prelievo nel minor tempo possibile senza far scivolare il rocchetto fuori dalla capsula.

Nel Capitolo 4 si focalizzerà l'attenzione sulla fase di regolazione dell'afflusso dell'aria all'interno dell'attuatore, in quanto ciò varia sensibilmente la velocità in ingresso e di conseguenza anche la velocità in uscita.

Nel Capitolo 5 si effettuerà una breve analisi del costo totale di produzione dell'intero cambio spola, per avere un'idea di quale sarebbe l'impatto economico relativo alla produzione di un intero lotto di tale prodotto.

Nel Capitolo 6 si analizzeranno i risultati ottenuti in maniera teorica e si confronteranno con il meccanismo reale attraverso delle prove.

1 Macchina da cucire

1.1 Breve storia della macchina da cucire

I primi tentativi ed esperimenti di cui ci resti testimonianza furono realizzati non prima del 1755: il 24 luglio di quell'anno l'inglese Charles F. Weisental brevettava una macchina con un ago a doppia punta e una cruna a metà della sua lunghezza, sperimentando un sistema di cucitura appena più avanzato del cucito a mano.

La successiva macchina da cucire fu quella di Thomas Saint, anch'egli anglosassone, che ottenne un brevetto il 17 luglio 1790.

Nonostante la sua macchina eseguisse solo una cucitura con il punto catenella, una tecnica in cui una serie di punti ad anello formano un motivo simile ad una catena, pare che questi avesse compreso con straordinaria chiarezza le principali ed essenziali caratteristiche della trovata: la sua macchina possedeva un piano orizzontale per supportare la stoffa, un braccio sospeso alla cui estremità era collocato un ago a movimento verticale, e un trasportatore che procedeva automaticamente tra un punto e l'altro.

Da quel momento in poi tali caratteristiche sarebbero state mantenute nella costruzione di ogni macchina per cucire.



Figura 1: La macchina di Thimonnier

Un passo fondamentale nella storia della macchina da cucire avvenne grazie al sarto francese Barthélemy Thimonnier, nativo di Arbresle (Francia, dipartimento del Rhône), che viveva a Saint-Étienne.

Osservando l'esecuzione di alcuni lavori all'uncinetto, rimase incuriosito dalla maniera in cui il punto veniva annodato, e ideò una macchina che facesse altrettanto, senza le dita e sei volte più rapidamente. Scoprivà così il punto formato dalle maglie di un filo continuo, fatto passare attraverso il tessuto da un ago uncinato.

La macchina cuciva un punto catenella come il modello di Saint, e nel 1830, stipulò un contratto con Auguste Ferrand, un ingegnere minerario, che fece i disegni necessari e presentò la domanda di brevetto.

Il brevetto per la sua macchina fu approvato nel luglio 1830, e nello stesso anno, avviò la prima società al mondo per la produzione di abbigliamento con 80 macchine. Lo stabilimento fu dato alle fiamme dai lavoratori del settore timorosi di perdere il lavoro.

Nel 1837 aveva trovato uno stratagemma per fermare il suo filo continuo ogni 5 punti: era la prima idea della navetta per fissare ogni punto in modo che non si possa scucire.

Sebbene nata in Europa, la macchina da cucire trova però in America la sua più massiccia diffusione. Furono proprio gli ingegneri meccanici statunitensi a conferire una utilità pratica alla trovata del francese Thimonnier, semplificandola e migliorandola. Decisiva a tal proposito fu l'invenzione della macchina da cucire a navetta, da parte di Elias Howe (1846).

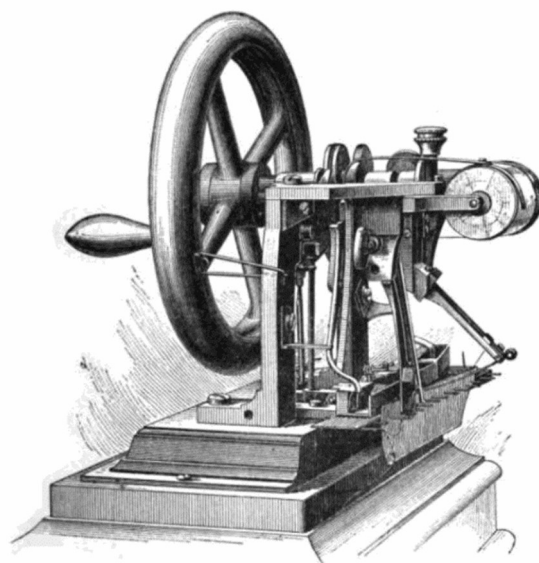


Figura 2: La macchina di Howe

Il processo di perfezionamento della macchina da cucire stava evolvendosi già da un centinaio di anni, quando, nel 1850 Isaac Merrit Singer (1811-1875), un tedesco-americano dalla grande personalità, si interessò alla questione.

La sua prima macchina, brevettata il 12 agosto 1851, possedeva un ago a movimento verticale, guidato da un albero sovrastante, e un trasportatore ruvido che scorreva attraverso una fessura del piano. Accanto all'ago un "*piedino premistoffa*" teneva pigiato il tessuto durante il lavoro di cucitura.

Nel 1854 Singer fondò la società I. M. Singer, per lo sfruttamento industriale del brevetto, e nel 1856 il marchio creò ed inaugurò il sistema di distribuzione delle macchine da cucire attraverso il noleggio e la vendita rateale; questo metodo fu diffuso in tutto il mondo dalla Singer Manufacturing Company.

Nel 1862, parallelamente agli sviluppi finora trattati, era apparsa sul mercato una temibile concorrente della Singer, la macchina per cucire Pfaff.

Già a quell'epoca funzionava per 200 punti al minuto, un vero record, anche se fa sorridere il confronto con le prestazioni attuali di 6.000 punti al minuto delle macchine rotative Pfaff.

Le antiche macchine per cucire Pfaff, come pure le Singer, prima di essere commercializzate, subivano un accurato procedimento di verniciatura con lacca nera e di abbellimento in filigrana d'argento o d'oro brunito, o con finimenti ed inserti madreperlacei, applicazione di decalcomanie e decorazioni a stampa. Certi motivi si ispirano allo *stile liberty* e le macchine che li riportano, essendo assai ricercate dai collezionisti, sono diventate una rarità.



Figura 3: La macchina Pfaff

In Italia la produzione di macchine da cucire ebbe inizio leggermente in ritardo a confronto con altri paesi; ma, grazie all'ottima qualità del prodotto, le macchine italiane vennero subito richieste all'estero.

Il marchio italiano più conosciuto e tuttora attivo nel settore del cucito è senza dubbio Necchi. Il pavese Vittorio Necchi (1898-1975) alla richiesta della moglie di una macchina per cucire invece di acquistarla pensò bene di fabbricarne una per uso domestico utilizzando la ghisa prodotta nelle fonderie di famiglia. Nel 1956 la “Mirella” oltre a vari premi entrò nel MOMA di New York come massimo riconoscimento del suo design.



Figura 4: La Necchi “Mirella” esposta al Moma di New York

Sempre a Pavia nacque la Vigorelli e a Milano la Borletti ‘punti perfetti’. Sul finire del Novecento l'Italia produce circa 200.000 pezzi l'anno. Oggi, l'avvento della tecnologia ha reso disponibili sul mercato macchine da cucire elettroniche con elevate prestazioni tecniche. Le macchine da cucire elettroniche sono progettate per essere efficienti e di semplice utilizzo, sono veri e propri piccoli computer che, grazie al software in dotazione, sono in grado di realizzare una miriade di punti attraverso la semplice pressione di un tasto.

1.2 Principali componenti

La macchina da cucire è un'apparecchiatura meccanica o elettromeccanica che viene utilizzata per congiungere insieme tramite cucitura stoffe o pelli di diverse forme e dimensioni attraverso il passaggio di uno o più fili dei materiali più disparati che possono andare dal cotone al nylon.

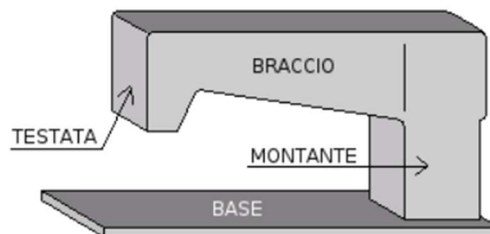


Figura 5: Struttura di una macchina da cucire

La struttura tipica della macchina per cucire è caratterizzata da una base da cui fuoriesce un montante che, oltre a contenere gli organi di movimento della barra ago e del tendifilo, serve a sostenere il braccio. L'estremità opposta del braccio termina con la testata che supporta la barra ago, il piedino e gli organi che determinano la tensione sul filo superiore. Sotto il piano della base si trovano gli organi che servono alla formazione del punto (Crochet e spole).

Il filo proveniente dall'esterno genericamente è avvolto attorno ad un supporto cilindrico detto rocchetto che può essere realizzato in diversi materiali quali ad esempio plastica o metallo o talvolta anche legno. Tranne nel caso in cui venga realizzato in legno, a sua volta il rocchetto è contenuto all'interno di una capsula genericamente metallica che ha il compito di proteggere il filo e di farlo svolgere nella maniera corretta.

Spesso si fa confusione sull'utilizzo dei termini, in quanto con il termine spola si può intendere il rocchetto da solo, oppure l'insieme di rocchetto e filo, oppure ancora l'insieme di rocchetto, filo e capsula.

Per evitare successive incomprensioni si utilizzerà quest'ultima definizione.

All'interno della macchina, al di sotto della base, è presente un organo detto crochet il quale è la sede delle spole e il responsabile della creazione del punto di cucitura insieme all'ago. Quest'ultimo si muove dall'alto verso il basso trasportando il cucirino, il filo per cucire, arrivato all'altezza del crochet si ferma e torna indietro verso l'alto facendo sì che il filo che era teso formi una gobbetta ed è proprio in questo punto che il filo viene afferrato dal crochet tramite un piccolo uncino (crochet infatti è "uncinetto" in francese) e viene congiunto con il filo contenuto nella spola.

Completando il suo movimento il crochet fa passare i due fili uniti attraverso alcune fessure per poi rilasciarli, a questo punto la tensione che aveva il filo trascinato dall'ago lo fa tornare verso il tessuto e si crea così il punto di cucitura.

Il crochet può essere genericamente di due tipi:

- oscillante
- rotativo

Come suggeriscono i nomi la distinzione è fatta in base al tipo di movimento che compie il crochet stesso, infatti nel primo caso oscilla alternativamente da destra a sinistra senza mai compiere un giro completo, cosa che accade invece nel modello rotativo, in quanto il crochet è posto in rotazione continuamente. Le macchine con il crochet oscillante risultano più rumorose rispetto alle altre. Questa distinzione è determinante nella costruzione della macchina, in quanto tutto si crea e si sviluppa a partire dal tipo di crochet.

1.3 Brother



Figura 6: Il logo di Brother

Brother Industries Ltd. (ブラザー工業株式会社 Burazā Kōgyō Kabushiki-gaisha) è un'azienda giapponese produttrice di una gran varietà di dispositivi, tra cui macchine per cucire, macchine utensili, etichettatrici, macchine per scrivere, fax, stampanti ed altri apparecchi elettronici. È quotata nella Borsa di Tokyo e fornisce i suoi prodotti sia con il proprio marchio sia come OEM in collaborazione con altre aziende.

Brother fu fondata a Nagoya nel 1908 con il nome di Yasui Sewing Machine Co. (produceva solo macchine per cucire). Nel 1954 fu creata la prima filiale oltreoceano, negli Stati Uniti d'America, la Brother International Corporation.

Nel 1958 fu fondata a Dublino una società di vendita per l'Europa e solo nel 1962 adottò la denominazione attuale di Brother Industries Ltd. L'azienda entrò nel mercato delle stampanti durante la collaborazione con Centronics.

Nel 1968 la società trasferì la sede nel Regno Unito, ad Audenshaw, Manchester, dopo aver acquisito la Jones Sewing Machine Company, una storica azienda britannica di macchine da cucire. Nel 1985 aprì una fabbrica a Wrexham dopo aver aperto un altro centro produttivo a Taiwan.

Alla fine degli anni '80 entra nel mondo delle stampanti laser e fax.

Nel dicembre 2011 Brother ha diversificato le attività acquisendo Nefsis, società innovatrice nel software di collaborazione e conferenza remota basato sul web. Nel novembre 2012 annuncia di aver costruito l'ultima macchina per scrivere fatta nel Regno Unito nella sua fabbrica nel nord del Galles, donata al Museo della Scienza di Londra.

Brother è stata sponsor del Manchester City dal 1989 al 1999.

La sede di Brother con la quale si sono stretti i contatti e che ha inviato la macchina alla Trismeccanica è quella di Francoforte.

Il modello di macchina da cucire in base al quale è stato realizzato il prototipo di cambio spola automatico è la Brother BAS 326 A, una macchina che permette di programmare il percorso di cucitura in modo elettronico.

Il modello in sé in realtà non influisce in maniera preponderante sulla progettazione del cambio spola, quello che è determinante è il tipo di crochet, in questo caso oscillante.

1.4 Trismeccanica



Figura 7: Il logo di Trismeccanica srl

La Trismeccanica s.r.l. di Bracalente Emiliano & C. è un'azienda presente dal 1983 sul mercato delle lavorazioni meccaniche di precisione e delle lavorazioni meccaniche per conto di terzi. L'azienda esegue lavorazioni di tornitura, fresatura, foratura e rettifica con attrezzature di moderna tecnologia, che consentono accuratezza nella produzione di ogni articolo. Nel corso degli anni di attività si è specializzata in diversi settori come quello tessile, nautico, motoristico e delle trasmissioni meccaniche.

L'azienda dispone di vari reparti per la lavorazione di barre, profilati e tubi e viene offerto inoltre l'assemblaggio ed il trattamento della superficie, fornendo il prodotto finito in medie e piccole serie. La qualità del lavoro svolto da Trismeccanica nei settori delle lavorazioni meccaniche per conto di terzi e delle lavorazioni meccaniche di precisione hanno portato l'azienda a collaborare con alcune case motociclistiche prestigiose, come ad esempio l'Aprilia e la Ducati. Queste collaborazioni, oltre ad essere un vanto per la loro officina meccanica, sono una sicura garanzia della cura che viene dedicata alla lavorazione di ogni singola componente da parte di Trismeccanica.

2 Il cambio spola

2.1 Che cos'è e a cosa serve

Il cambio spola automatico è un sistema che permette di sostituire le spole esaurite con spole nuove, ogni qualvolta ce ne sia la necessità. È un sistema automatizzato gestito da aria compressa e sostanzialmente preleva le spole impilate in un caricatore, le aggancia, le trasporta fino al crochet e le deposita all'interno della macchina.

In un sistema di sostituzione manuale l'operatore incaricato ha il compito di sostituire una spola alla volta, effettuando il suo lavoro sulla macchina mentre questa non è in funzione e gestendo non più di una macchina alla volta.

In caso di un sistema automatizzato il compito dell'operatore è quello di impilare una decina di spole nel caricatore e posizionare quest'ultimo al suo posto nel dispositivo. In questo modo un singolo operatore riesce a controllare fino a tre macchine alla volta, inoltre mentre lavora su una macchina le altre due rimangono in funzione e in questa maniera aumenta la produttività.

La maggior parte delle limitazioni progettuali sono dovute agli ingombri che si hanno a disposizione nella parte sottostante al piano della macchina per cucire, ovvero la zona dove è posizionato il crochet.

Nel caso in questione si aveva a disposizione molto spazio in orizzontale rispetto allo spazio in verticale quindi l'insieme si è sviluppato principalmente in questa direzione. Si aveva disponibile abbastanza spazio davanti al crochet e molto spazio verso destra, quindi si è deciso di disporre il caricatore sulla destra in modo trasversale rispetto alla direzione frontale.

2.2 Struttura del dispositivo

Il cambio spola è costituito dalle seguenti parti:

- Attacco cucitrice
- Attacco base
- Base di ancoraggio
- Supporto aggancio spola
- Supporto attuatore lineare
- Attacco attuatore lineare
- Gancio
- Attacco caricatore
- Giunto

Come dato di partenza si aveva la forma della zona circolare intorno alla sede del crochet, quindi il primo pezzo ad esser stato progettato è l'attacco alla cucitrice, che sostanzialmente è un anello circolare che si va ad incastrare sulla macchina con due piedini che fungono da collegamento con il resto.

Un discorso simile si può fare con l'attacco del caricatore, si ha un anello a forma di goccia (il caricatore infatti è fatto a goccia) con un corpo a forma di parallelepipedo per collegarsi alla base.

La base di ancoraggio è una piastra a forma di L, un estremo si collega all'attacco del caricatore, l'altro all'attacco alla cucitrice.

Per essere più precisi dal lato della cucitrice la base si collega ad un supporto (attacco base) che è collegato al di sotto dell'attacco alla cucitrice, con un angolo di inclinazione di circa 12°: in questa maniera le spole esaurite che cadono sulla base possono scivolare in un contenitore usato per la raccolta.

Nella parte centrale della base c'è il cuore del dispositivo.

Al di sotto della base è posto un attuatore girevole pneumatico (verrà spiegato in seguito che cos'è e come lavora) mentre al di sopra della base è posizionato il supporto aggancio spola.

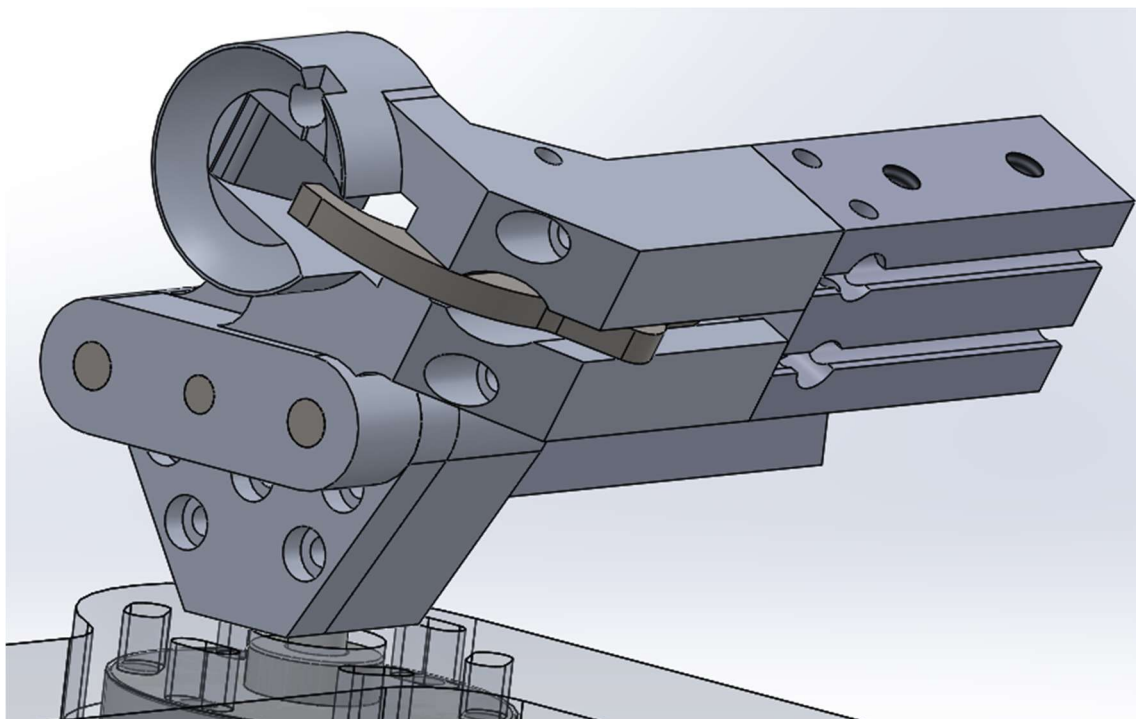


Figura 8: Il supporto che aggancia la spola e le altre parti ad esso collegate

Nella parte inferiore di *Figura 8* si intravede l'attuatore girevole e la base di ancoraggio (volutamente in trasparenza), leggermente sopra si nota il supporto dell'attuatore lineare grande (analizzato anch'esso più avanti), che ha una forma a V con due occhielli che fungono da supporto per le aste di guida, uno scavo centrale sul quale appoggia l'attuatore stesso e nella parte inferiore un foro circolare per accogliere l'albero dell'attuatore girevole. L'albero presenta uno scavo piano che funge da battuta per una vite senza testa che va infilata

nell'apposito foro presente sul supporto: in questa maniera albero e supporto ruotano in modo solidale.

Tale attuatore è fissato tramite l'ultimo pezzo, l'attacco del pistone, il quale ha una forma simile al supporto dell'attuatore grande e presenta diversi fori, due servono per far passare le aste di guida, uno per lo stelo dell'attuatore e i restanti per le viti di collegamento.

2.3 Scelta del materiale

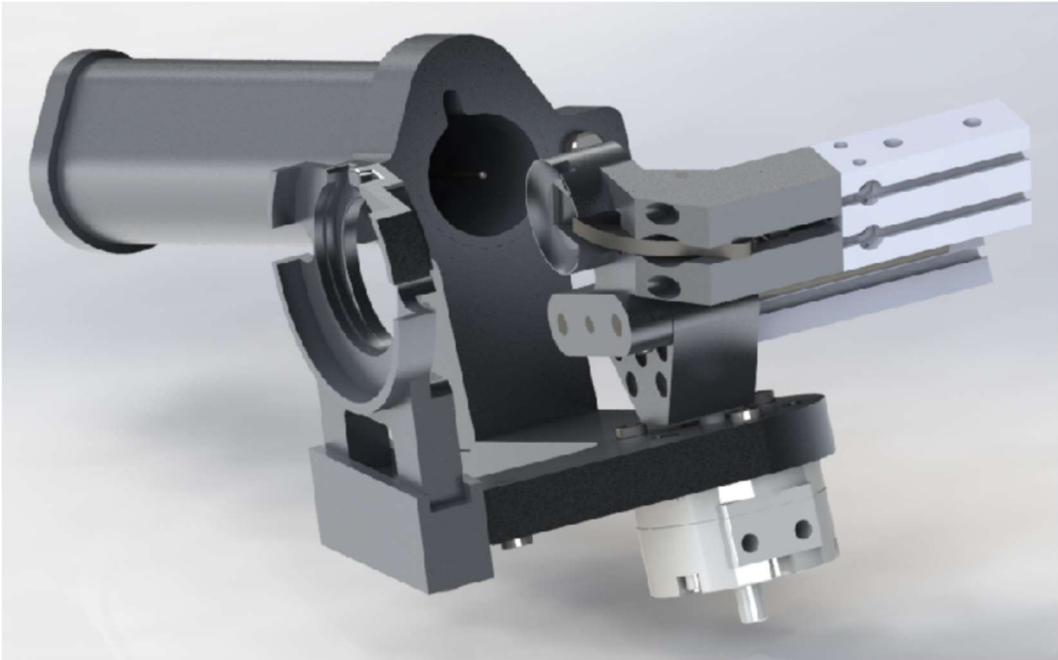
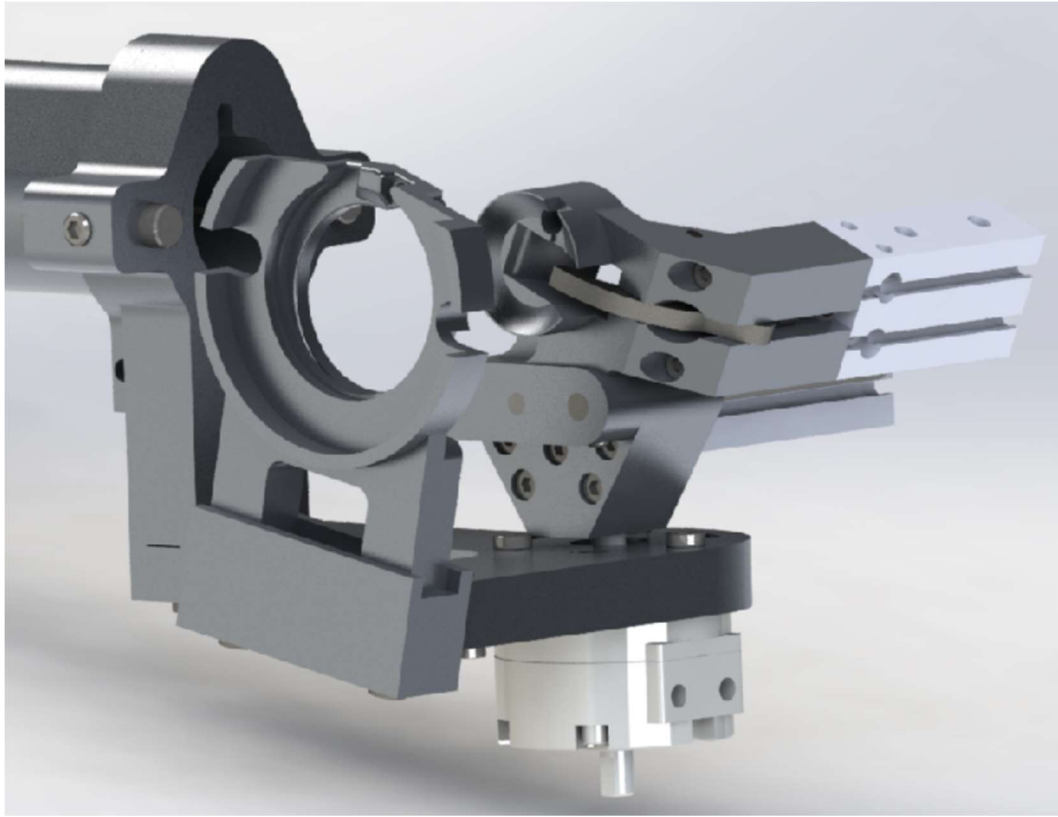
Il materiale utilizzato per realizzare la maggior parte dei pezzi è l'ergal una particolare lega di alluminio della serie 7000 che presenta un'ottima resistenza meccanica ma una maggiore suscettibilità agli agenti corrosivi, dovuta alla presenza dello zinco. Per contrastare i rischi della corrosione i pezzi sono stati sottoposti ad un trattamento di anodizzazione galvanica, un processo elettrochimico non spontaneo mediante il quale si viene a creare uno strato protettivo di ossido di alluminio sulla superficie del pezzo stesso che ha il compito di proteggere dalla corrosione.

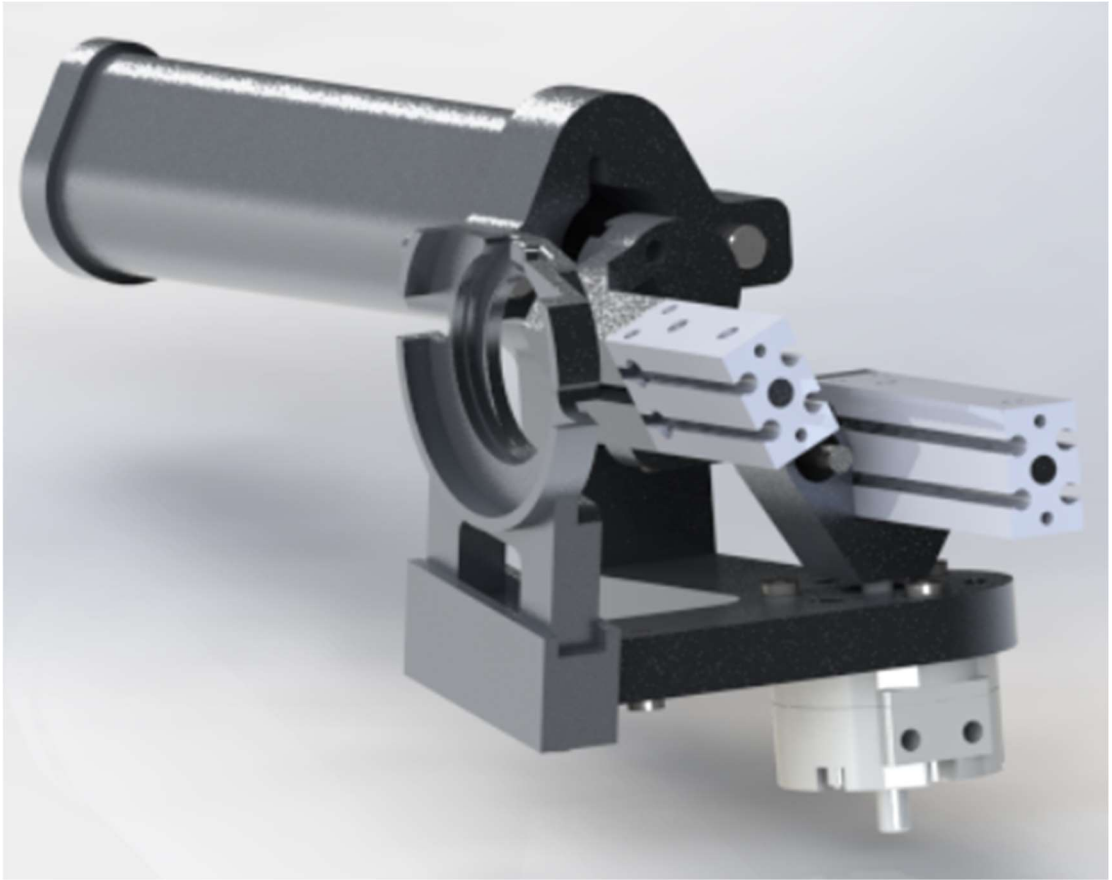
Un ulteriore aspetto che gioca a favore dell'ergal è la sua bassa densità, per esempio se confrontata con quella dell'acciaio che è circa tre volte maggiore, che ne riduce di molto il peso a parità di dimensioni mantenendo al contempo delle buone prestazioni meccaniche.

Il gancio e il giunto sono stati realizzati in acciaio inossidabile.

Soprattutto il gancio deve possedere una buona resistenza meccanica in quanto è soggetto ad usura dato il tipo di lavoro che svolge (oggetto del paragrafo seguente), soprattutto nella parte terminale a forma di uncino che entra in contatto con le spole di acciaio.

L'aspetto finale dovrebbe essere il seguente.





2.4 I movimenti

Di seguito si vuole spiegare come effettivamente lavora il cambio spola, quali sono i movimenti che compie, come sono fatti e come lavorano gli attuatori nominati in precedenza che gestiscono tali movimenti e il tempo di esecuzione.

La posizione di partenza è quella in cui il supporto che aggancia la spola si trova nella zona centrale esattamente sopra l'attuatore girevole, rivolto verso la cucitrice e il pistone dell'attuatore lineare grande è al punto morto inferiore.

Un sensore posto nella parte frontale del supporto emette un segnale elettrico quando la cucitrice espelle la spola esaurita e quello è il momento in cui inizia il processo automatizzato di sostituzione della spola.

Il tempo totale per effettuare tutto il processo è circa 9 secondi.

Il processo si compone dei seguenti passaggi:

- rotazione del supporto verso il caricatore
- avanzamento fino al caricatore
- aggancio della spola
- estrazione della spola
- trasporto della spola fino al crochet
- rilascio della spola
- regressione fino al punto di partenza

Nel sistema sono presenti tre attuatori pneumatici, due lineari e uno girevole.

Un attuatore è un dispositivo che trasforma un segnale di input in movimento, nel caso di attuatori pneumatici l'input è l'aria compressa e il movimento può essere lungo una linea retta (lineare) o una rotazione (girevole).

I due attuatori lineari hanno al loro interno un pistone che scorre tra due posizioni che tipicamente si chiamano punto morto inferiore (PMI) e punto morto

superiore (PMS), la distanza che il pistone percorre per arrivare da un punto all'altro viene chiamata corsa. Tale pistone è assimilabile ad un disco al quale è attaccato uno stelo che fuoriesce dall'attuatore.

I due attuatori in questione differiscono per la corsa e di conseguenza anche per le dimensioni, quello più grande ha una corsa di 40 mm, il più piccolo 10 mm.



Figura 9: Le due tipologie di attuatore, lineare e girevole

La rotazione del supporto verso il caricatore è gestita dall'attuatore girevole, tramite la rotazione dell'albero che fuoriesce dalla parte superiore.

Questo particolare modello di attuatore è progettato in modo da garantire una rotazione massima di 90° , percorribile in entrambi i sensi.

Il primo movimento è una rotazione oraria di 90° al termine della quale il supporto che aggancia la spola è rivolto verso il caricatore.

L'avanzamento fino al caricatore è gestito dall'attuatore lineare grande, il pistone percorre tutta la corsa in questo passaggio, da PMI a PMS.

Il trasporto della spola si compone di tre movimenti:

- regressione fino al centro → il pistone grande torna a PMI
- rotazione antioraria di 90° → si indirizza la spola verso la macchina
- avanzamento fino al crochet → il pistone grande torna a PMS

I due passaggi più interessanti sono l'aggancio e l'estrazione della spola: il primo verrà spiegato qui di seguito, il secondo verrà approfondito nel capitolo 3

in quanto, come si vedrà successivamente, risulterà essere più complicato di quello che possa sembrare.

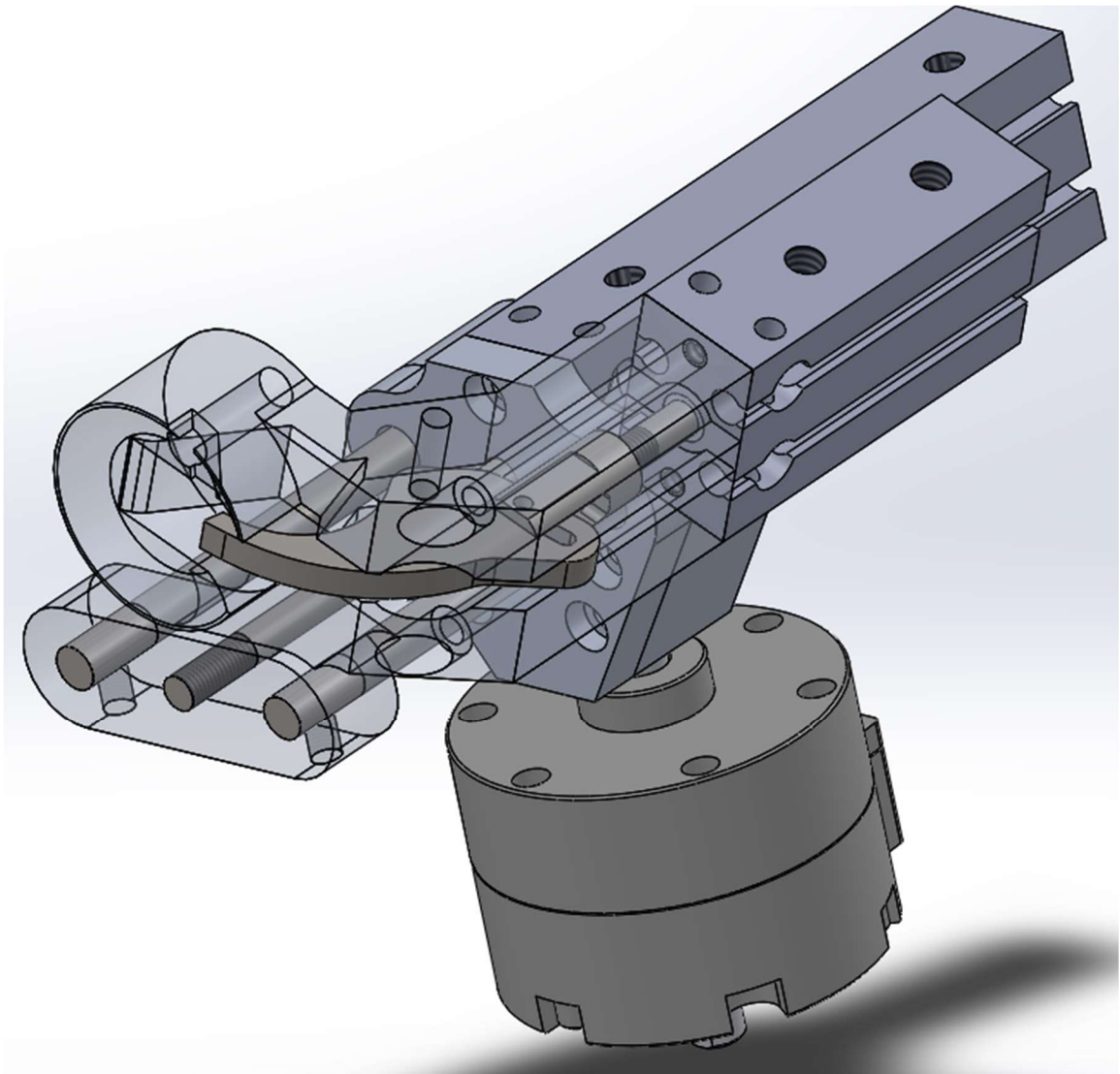


Figura 10: Supporto aggancio spola volutamente in trasparenza per mostrare il meccanismo che afferra le spole, costituito da un gancio che ruota in base all'avanzamento o regressione dell'attuatore lineare

In *Figura 10* si apprezza il meccanismo ideato per afferrare le spole.

Si concentri l'attenzione sull'attuatore lineare piccolo collegato alla parte posteriore del supporto, in particolare sullo stelo che fuoriesce nella parte anteriore e che si muove in modo solidale al pistone all'interno di una cavità predisposta nel supporto aggancia spola.

Avvitato all'estremità dello stelo è presente un giunto in acciaio che termina con una specie di pinza che serve ad afferrare il gancio successivamente vincolato ad esso tramite una spina. Poiché il gancio a sua volta è vincolato al supporto tramite un'altra spina, grazie alla spinta dello stelo può ruotare.



Figura 11: Il guscio di una spola

Durante la rotazione la parte terminale del gancio fatta ad uncino apre lo sportellino presente sul guscio della spola mostrata in *Figura 11*, entra nella fessura presente sullo sportellino stesso e vi si aggancia. Un ulteriore dispositivo di bloccaggio fa sì che l'uncino non si sfilii inavvertitamente.

Come già anticipato la fase di estrazione della spola verrà analizzata nel capitolo successivo, in quanto è necessario fare delle considerazioni più approfondite riguardo il legame tra velocità dello stelo e pressione dell'aria.

3 Analisi di velocità

3.1 Introduzione al problema

Le spole, costituite da guscio e rocchetto, sono inizialmente impilate in un caricatore mediante un perno centrale, vengono prelevate una alla volta e vengono trasportate fino al crochet.

Il rocchetto è costituito da due dischi metallici forati al centro e collegati, sempre nella zona centrale, da un cilindretto anch'esso forato. Il guscio è un disco spesso forato in maniera tale che il rocchetto può essere inserito al suo interno.

Il rocchetto non è vincolato in alcun modo al guscio, quindi se il guscio viene estratto con un movimento brusco c'è il rischio che scivoli fuori in quanto la forza d'attrito che si instaura tra i due è molto bassa.

L'accelerazione che riceve il rocchetto è la stessa che si impone al guscio durante l'estrazione, essa dipende dalla velocità con la quale si muove il pistone dell'attuatore grande che gestisce il movimento dell'aggancio spola e ovviamente dallo spazio necessario per effettuare tale movimento.

L'obiettivo di tale analisi è quello di calcolare dapprima la velocità limite che innesca lo sfilamento, per calcolare poi la velocità ottimale che permette di abbassare il tempo necessario a completare il percorso caricatore-crochet evitando lo sfilamento del rocchetto.

In un secondo momento si vuole cercare una correlazione tra pressione dell'aria in ingresso e velocità in uscita, in modo da conoscere il valore della pressione che garantisca la velocità calcolata nella fase precedente.

3.2 Estrazione della spola dal caricatore

Le spole possono essere di varie dimensioni, quella che verrà presa in esame e che fungerà da esempio per le considerazioni ha le seguenti caratteristiche:

- $m = 25 \text{ g}$ → relativa a rocchetto e guscio
- $De = 24 \text{ mm}$ → relativo al guscio
- $Di = 6 \text{ mm}$ → relativo al rocchetto
- $L = 14 \text{ mm}$ → relativo al rocchetto

Si parte con il calcolare la forza necessaria per estrarre la spola dal caricatore e verificare se tale forza si mantiene inferiore alla forza di attrito che si instaura tra guscio e rocchetto. Come forza di attrito si prende in considerazione la minima forza di attrito dinamica, ovvero quella che innesca il moto di sfilamento.

Il contatto avviene tra il perno centrale del caricatore e il cilindretto forato del guscio, il diametro nel punto di contatto vale $d=3 \text{ mm}$ mentre la lunghezza di contatto è $L=14 \text{ mm}$, quindi si ha una superficie di contatto $A=277 \text{ mm}^2$.

La massa che si considera è quella totale scritta sopra, inoltre ipotizzando che il contatto avvenga lungo la totalità della superficie circolare si giunge ad una pressione di contatto:

$$(3.1) p_c = \frac{9.8m}{A} = 8.7 * 10^{-4} MPa$$

Da questa pressione di contatto si può ricavare la pressione di attrito:

$$(3.2) p_{att} = \mu_s p_c = 6.5 * 10^{-4} MPa$$

Ora si deve ricavare la forza di contatto relativa a tale pressione:

$$(3.3) F = p_{att} A_{front} = p_{att} \frac{\pi D_e^2}{4} = 0.02N$$

Ora si calcola la minima forza d'attrito che fa sfilare il rocchetto dal guscio e la si confronta con questa forza appena calcolata:

$$(3.4) F_{att} = \mu_s N = \mu_s m g = 0.08N$$

Si nota che è un valore superiore rispetto alla forza con la quale viene estratta la spola dal caricatore, perciò durante la fase di estrazione dal caricatore il rocchetto non si sfilava dal guscio. Tale forza imprime alla spola un'accelerazione:

$$(3.5) a = \frac{F}{m} = 0.8 \text{ m/s}^2$$

Si ipotizzi che durante l'estrazione la spola si muova di moto uniformemente accelerato, di tale moto si conoscono l'accelerazione (appena calcolata) e lo spazio totale percorso ($\Delta s = 4 \text{ mm}$), vale quindi:

$$(3.6) v_f^2 - v_i^2 = -2a\Delta s$$

Imponendo la condizione $v_i = 0$ si ottiene $v_f = -0.08 \text{ m/s}$.

Il segno meno indica il verso di tale velocità, opposta rispetto alla direzione del moto. L'attuatore imprime al guscio della spola una forza che lo farà muovere in una direzione, questo movimento farà muovere il rocchetto nella direzione opposta, contraria al moto del pistone dell'attuatore.

3.3 Movimento pistone

Ciò che fa muovere l'aggancio spola è un attuatore pneumatico, cilindrico a montaggio universale doppio effetto, stelo semplice, nello specifico il modello SMC CDU10-40D, volendo esplicitare il significato del codice:

- SMC è l'azienda produttrice
- CU sta per cilindro universale
- La prima D indica che ha il magnete incorporato
- 10 è il diametro del pistone
- 40 è la corsa dello stelo
- La seconda D indica che è a doppio effetto

Come già detto si vuole trovare una correlazione tra pressione dell'aria in ingresso nell'attuatore e velocità in uscita del pistone, in modo da capire come variare la pressione per ottenere la velocità desiderata.

Uscita teorica				(N)		
Diametro (mm)	Misura dello stelo (mm)	Direzione d'esercizio	Sezione equivalente (mm ²)	Pressione d'esercizio (MPa)		
				0.3	0.5	0.7
6	3	OUT	28.3	8.49	14.2	19.8
		IN	21.2	6.36	10.6	14.8
10	4	OUT	78.5	23.6	39.3	55.0
		IN	66.0	19.8	33.0	46.2
16	6	OUT	201	60.3	101	141
		IN	172	51.6	86.0	121
20	8	OUT	314	94.2	157	220
		IN	264	79.2	132	185
25	10	OUT	491	147	246	344
		IN	412	124	206	288
32	12	OUT	804	241	402	563
		IN	691	207	346	454

Figura 12: Il catalogo dell'attuatore lineare

Si prenda in considerazione il catalogo dell'attuatore che fornisce l'uscita teorica in termini di Newton, quindi di forza, in base ad alcuni valori della pressione di esercizio, per diverse dimensioni del pistone e dello stelo.

Ø10

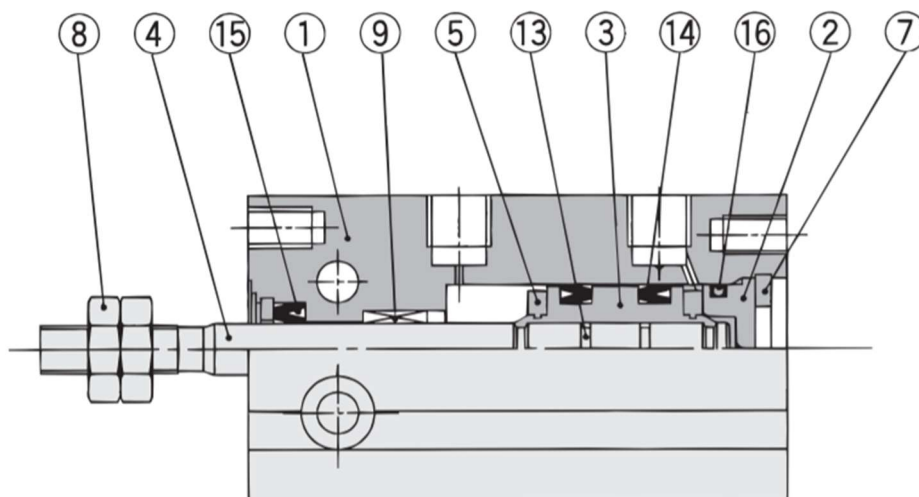


Figura 13: Spaccato dell'attuatore, in particolare si noti che lo stelo è indicato con il numero 4 e il pistone con il numero 3. In alto a sinistra è indicato il diametro del pistone

In *Figura 13* si può vedere che il pistone è calettato sullo stelo ad un'estremità e insieme scorrono all'interno del corpo dell'attuatore tra due estremi, individuati dai due punti in cui può essere immessa l'aria. A seconda del punto di immissione l'aria spinge sulle due facce opposte del pistone, che differiscono l'una dall'altra per la presenza dello stelo (ecco spiegata la differenza tra le due sezioni equivalenti in *Figura 12*).

Quando l'aria spinge sulla faccia maggiore del pistone, lo stelo viene trascinato fuori dall'attuatore, si ha infatti la fase denominata OUT, nel caso in cui c'è spinta sulla faccia minore del pistone lo stelo viene trascinato dentro e si ha la fase denominata IN.

Per estrarre la spola dal caricatore il pistone si deve muovere all'indietro (fase IN), la pressione di esercizio è 3 *atm* (corrispondente a 0.3 *MPa*), quindi dalla tabella si ricava che la forza da considerare è 19.8 *N*.

A questo punto è necessario creare un modello per studiare il problema.

Un modello è una rappresentazione di un problema il cui scopo è quello di rappresentare il più incisivamente possibile il fenomeno in questione e determinarne in maniera teorica l'andamento futuro.

La caratteristica fondamentale di un buon modello non è tanto la perfezione, quanto la fedeltà alla realtà, infatti più è fedele al caso reale e meglio lo descriverà e i risultati trovati in modo teorico saranno il più possibile uguali a quelli che poi saranno sperimentati nella realtà.

Ora bisogna valutare quale sia il modello che meglio descrive questo fenomeno per poter cercare la giusta relazione tra velocità e pressione.

3.4 Modellazione del problema

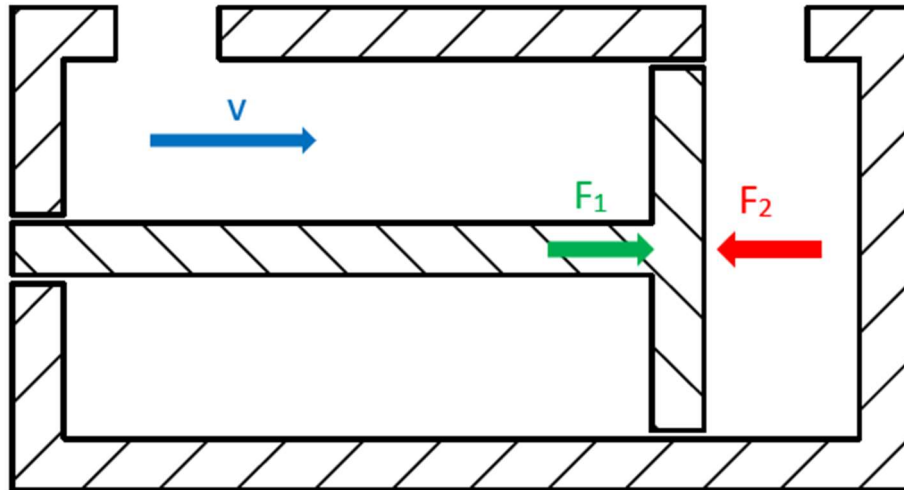


Figura 14: Modello schematico dell'analisi delle forze del sistema

Si consideri il sistema schematizzato come in *Figura 14*.

La T orizzontale è, in maniera semplificata, l'insieme dello stelo di diametro $d=4mm$ e del pistone di diametro $D=10mm$, il pistone ha una lunghezza $h=10mm$, la lunghezza totale è $l=52mm$. È quindi possibile calcolare il volume totale dell'insieme stelo-pistone:

$$(3.7) V = \frac{\pi D^2}{4} h + \frac{\pi d^2}{4} (l - h) = 1813 \text{ mm}^3$$

Il materiale di cui è costituito è acciaio inossidabile ($\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$), da cui la massa sarà:

$$(3.8) m = \rho V = 14g$$

Si consideri il caso IN nel quale il pistone si muove verso l'interno dell'attuatore, con una velocità, che si ipotizza costante, di modulo v diretta verso destra.

Le forze agenti sul sistema sono due:

- F_1 concorde al verso del moto
- F_2 che si oppone al moto stesso

La prima è ricavabile dal catalogo riportato in *Figura 12* e vale $F_1=19.8 N$, mentre la seconda è da calcolare. Per farlo è possibile scegliere tra due strade, distinguendo tra due casi:

- F_2 forza di pressione
- F_2 forza di resistenza aerodinamica

In base a quale dei due si scelga cambia ovviamente il valore di tale forza, ma la risoluzione del problema è sempre la stessa, in quanto in entrambi i casi l'equazione risolvente sarà del tipo:

$$(3.9) F_1 - F_2 = ma$$

L'incognita è ovviamente l'accelerazione e sfruttando il tempo impiegato per effettuare l'operazione di estrazione della spola è possibile calcolare la velocità alla quale si muove il pistone.

3.4.1 Modello forza di pressione

Nel primo caso la F_2 è facilmente ricavabile, in quanto anche questa forza è tabellata nel catalogo di *Figura 12*.

Si noti però che $F_2=23.6 N$ risulta essere maggiore della F_1 , in quanto nonostante la pressione sia la stessa anche sull'altra faccia del pistone, la superficie sulla

quale agisce è maggiore. Sostituendo tali valori nella (3.9) si otterrebbe un'accelerazione negativa, il che vorrebbe dire che il pistone sotto l'azione di tali forze si muoverebbe nella direzione opposta al moto. Si può concludere che questo modello non risulta valido.

3.4.2 Modello forza aerodinamica

Nel secondo caso vale

$$(3.10) F_2 = \frac{1}{2} c_d \rho S v^2$$

Dove:

- $c_d \rightarrow$ coefficiente di resistenza aerodinamica
- $\rho \rightarrow$ densità dell'aria
- $S \rightarrow$ superficie che si oppone al flusso dell'aria
- $v \rightarrow$ velocità relativa tra pistone e aria

Il coefficiente c_d è tabellato e dipende dalla forma del corpo immerso nel fluido.

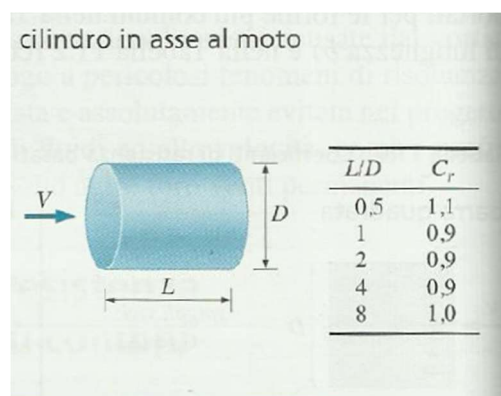


Figura 15: Coefficiente di resistenza aerodinamico per un cilindro in asse al moto al variare di L/D

Per quanto riguarda il coefficiente aerodinamico si sceglie $c_d = 1.1$, Il fluido con il quale si ha a che fare è aria alla pressione di 3 atm per cui $\rho = 3.675 \text{ kg/m}^3$, la superficie di contatto è $S = 78.5 \text{ mm}^2$ e per quanto riguarda la velocità relativa è necessario ipotizzare alcuni valori e vedere come si modificano i risultati.

Si seguono i seguenti step per l'analisi:

- Si ipotizza un valore di pressione al quale corrisponderà una certa F_1
- Si ipotizza un valore di velocità al quale corrisponderà una certa F_2
- Si sostituiscono i valori nella (3.9) e si calcola a
- Agendo su pressione e velocità, mantenendo costante una e facendo variare l'altra, si osservano i risultati

Già dai primi tentativi si nota subito che per avere valori di accelerazione accettabili è necessario considerare valori di pressione bassissimi ($p = 10^{-4} \text{ MPa}$) e valori di velocità elevatissimi ($v = 10^5 \text{ mm/s}$), ovviamente non realizzabili nel caso in esame.

Per di più mantenendo questi valori di velocità e considerando la pressione di esercizio $p = 0.3 \text{ MPa}$ si otterrebbe un'accelerazione $a = 1400 \text{ m/s}^2$, la quale si mantiene pressochè costante anche cambiando la velocità di diversi ordini di grandezza.

In conclusione anche questo modello è da considerarsi non valido.

3.5 Approccio euleriano

Fino ad adesso per effettuare l'analisi si è utilizzato un approccio di tipo lagrangiano, si focalizzava l'attenzione sul sistema pistone-stelo e si analizzava il suo moto all'interno di un fluido, ma quando si ha a che fare con un fluido è consigliabile utilizzare un approccio di tipo euleriano.

Questo tipo di approccio presuppone la definizione di un volume di controllo, attraverso la cui superficie di contorno il fluido entra ed esce. All'interno del volume di controllo stesso si definiscono delle variabili di campo, funzioni dello spazio e del tempo, come ad esempio il campo di pressione (scalare), il campo di velocità (vettoriale) e il campo di accelerazione (vettoriale).

La differenza sostanziale tra sistema e volume di controllo è che nel primo caso si considera una quantità di materia di identità fissata, mentre nel caso di un volume di controllo si considera una regione dello spazio nella quale le condizioni si modificano nel tempo. Perciò l'approccio euleriano richiede una riscrittura delle usuali equazioni del moto che seguono l'approccio lagrangiano, il teorema che fa da giunzione tra i due approcci è denominato Teorema del trasporto di Reynolds.

Se al tempo t il sistema coincide con il volume di controllo, al tempo $t+dt$ il sistema si sarà spostato nella direzione del moto mentre il volume di controllo rimane fisso. Volendo essere più precisi se si indicano con A_1 e A_2 le due superfici iniziale e finale del volume di controllo la prima superficie si sposta di una quantità $v_1 dt$ mentre la seconda superficie di una quantità $v_2 dt$.

Considerando una qualsiasi grandezza estensiva B e la sua corrispondente grandezza intensiva $b=B/m$ il teorema afferma che "la variazione nell'unità di tempo della grandezza B del sistema è uguale alla variazione nell'unità di tempo

della grandezza B del volume di controllo più il flusso di B attraverso la superficie di controllo”, in formule:

$$(3.11) \frac{dB}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{x_1}^{x_2} \rho b A dx \right) + \int_A \rho b (\bar{v} * \hat{n}) dA$$

Dove v è la media delle due velocità.

Si noti che il prodotto $(\bar{v} * \hat{n})$ è un prodotto vettoriale quindi tiene conto del verso di entrambi i vettori velocità e normale, quindi nel caso i due vettori abbiano versi opposti è necessario considerare un segno meno.

Le due equazioni che si utilizzano per la risoluzione del problema sono:

- Conservazione della massa → la quantità totale di materia di un sistema chiuso rimane costante
- Conservazione della quantità di moto → la variazione nell'unità di tempo della quantità di moto di un corpo è uguale alla risultante delle forze agenti su di esso

In formule si hanno le seguenti relazioni

$$(3.12) \sum_i \dot{M}_{i,out} = \sum_i \dot{M}_{i,in}$$

$$(3.13) \sum_i (\dot{M}_i u_i)_{out} - \sum_i (\dot{M}_i u_i)_{in} = \sum_i F_i$$

Per riscrivere queste due formule nella forma valida in riferimento al volume di controllo basta sfruttare il teorema del trasporto di Reynolds andando ad individuare di volta in volta cosa si debba sostituire al posto di B e di b .

Per quanto riguarda la conservazione della massa, detta anche equazione di continuità, vale $B=m$ e $b=1$, per la conservazione della quantità di moto vale $B=mv$ e $b=v$.

Fatte tutte queste premesse si può passare alla risoluzione del problema.

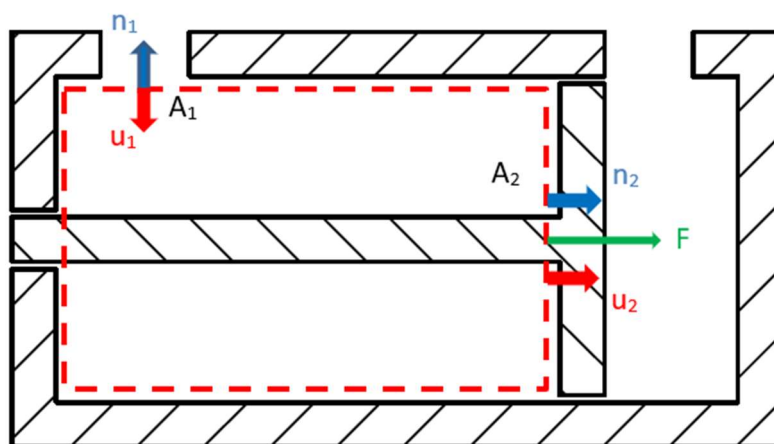


Figura 16: Schema per l'approccio di tipo euleriano

Si schematizza il sistema come in *Figura 16*, il rettangolo tratteggiato in rosso è il volume di controllo, la sezione di ingresso nel volume di controllo indicata con l'indice 1 è la zona di immissione dell'aria compressa, la sezione d'uscita indicata con l'indice 2 è la superficie di contatto aria-pistone (tabellata nel catalogo) e la forza che si scambiano aria e pistone (anche questa tabellata nel catalogo) corrisponde alla risultante delle forze che compare nell'equazione della quantità di moto. Si conoscono le due sezioni $A_1=11.33 \text{ mm}^2$ e $A_2=66 \text{ mm}^2$, la pressione di esercizio $p=0.3 \text{ MPa}$, la risultante $F=19.8 \text{ N}$ e si vuole calcolare la u_2 . Per quanto riguarda la densità essa varia al variare della pressione e ipotizzando l'aria come gas perfetto è possibile scrivere:

$$(3.14) \frac{p_{atm}}{\rho_{atm}} = \frac{p}{\rho}$$

Quindi invece che $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ si considera $\rho=3.675 \text{ kg/m}^3$.

Esplicitando i termini della (3.13) si ottengono le seguenti relazioni:

$$(3.15) \sum_i (\dot{M}_i u_i)_{out} - \rho A_2 |u_2| u_2$$

$$(3.16) \sum_i (\dot{M}_i u_i)_{in} = \rho A_1 |u_1| u_1$$

$$(3.17) \sum_i F_i = - \oint p \hat{n} dA = -(p_1 A_1 \hat{n}_1 + p_2 A_2 \hat{n}_2) + F$$

Mettendo insieme si ottiene:

$$(3.18) \rho A_2 |u_2| u_2 - \rho A_1 |u_1| u_1 = -(p_1 A_1 \hat{n}_1 + p_2 A_2 \hat{n}_2) + F$$

Che è l'equazione risolvente del problema.

Si noti che \hat{n}_1 ha verso discorde rispetto alla u_1 , mentre \hat{n}_2 ha verso concorde rispetto alla u_2 , ne deriva che nel primo caso al posto del versore normale andrà sostituito il valore -1 mentre nel secondo caso andrà sostituito +1, l'equazione diventa quindi:

$$(3.19) \rho A_2 u_2^2 - \rho A_1 u_1^2 = p_1 A_1 - p_2 A_2 + F$$

Inoltre la densità e la pressione rimangono costanti tra le due sezioni, quindi l'equazione si può ulteriormente semplificare raccogliendo i termini comuni:

$$(3.20) \rho (A_2 u_2^2 - A_1 u_1^2) = p (A_1 - A_2) + F$$

A questo punto si può richiamare l'equazione di continuità (3.12) la quale esplicitando i termini diventa:

$$(3.21) \rho A_2 |u_2| = \rho A_1 |u_1|$$

Di nuovo, essendo la densità costante, si può semplificare da entrambi i membri e si può esprimere una velocità in funzione dell'altra.

Dato che si vuole far comparire solo la velocità di uscita u_2 nell'equazione risolvente si esplicita la u_1 in funzione della u_2 :

$$(3.22) u_1 = \frac{A_2}{A_1} u_2$$

Sostituendo la (3.22) nella (3.18) e svolgendo i conti si ottiene:

$$\rho(A_2 u_2^2 - \frac{A_2^2}{A_1} u_2^2) - p(A_1 - A_2) = F$$

$$\rho A_2^2 u_2^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) - p(A_1 - A_2) = F$$

$$\rho A_2 u_2^2 \left(\frac{A_1 - A_2}{A_1} \right) - p(A_1 - A_2) = F$$

$$\left(\rho \frac{A_2}{A_1} u_2^2 - p \right) (A_1 - A_2) = F$$

$$\rho \frac{A_2}{A_1} u_2^2 - p = \frac{F}{(A_1 - A_2)}$$

$$\rho \frac{A_2}{A_1} u_2^2 = \frac{F}{(A_1 - A_2)} + p$$

$$u_2^2 = \frac{\left(\frac{F}{A_1 - A_2} + p \right)}{\rho \frac{A_2}{A_1}}$$

$$(3.23) u_2 = \sqrt{\frac{\left(\frac{F}{A_1 - A_2} + p \right)}{\rho \frac{A_2}{A_1}}}$$

Sostituendo i valori noti si ottiene $u_2=130 \text{ m/s}$ valore alto ma più basso rispetto ai precedenti, quindi accettabile, ciò significa che il modello funziona.

4 Regolazione aria

4.1 Rubinetto per l'afflusso di aria

Nell'analisi precedente si è supposto che la sezione d'ingresso nel volume di controllo attraverso la quale entra l'aria compressa rimanesse costante, in realtà è possibile variare tale sezione mediante l'utilizzo di un rubinetto. A questo punto diventa interessante vedere come varia la velocità u_2 in funzione della variazione della sezione A_1 , per fare ciò è necessario analizzare il rubinetto e vedere come funziona la regolazione.



Figura 17: Il rubinetto

Il tubo dell'aria viene attaccato al tratto orizzontale a destra, mentre la parte filettata in basso si avvita all'attuatore, il perno nella parte superiore si avvita e scendendo o salendo ostruisce o meno il passaggio dell'aria.

Si voglia dapprima effettuare un'analisi qualitativa della situazione per poi calcolare in maniera rigorosa la relazione che sussiste tra A_1 e u_2 , in base alle dimensioni effettive del perno regolatore.

Un'ulteriore correzione da fare è relativa alla sezione da considerare.

Nell'analisi svolta nel capitolo precedente si era considerata la sezione del tubo di plastica dell'aria ($\phi=3.8 \text{ mm}$) mentre adesso si consideri la sezione di uscita del rubinetto, ovvero il foro interno della parte filettata in basso ($\phi=1.5 \text{ mm}$).

4.1.1 Considerazioni teoriche

Riprendendo l'equazione risolvente (3.23):

$$u_2 = \sqrt{\frac{\left(\frac{F}{A_1 - A_2} + p\right)}{\rho \frac{A_2}{A_1}}}$$

e sostituendo il nuovo valore di A_1 si ottiene $u_2=47 \text{ m/s}$ (dall'analisi precedente si era ottenuto $u_2=130 \text{ m/s}$). Si nota una considerevole variazione considerando la presenza del rubinetto, quindi la regolazione diventa determinante per la riduzione della velocità. Si ipotizzi che ad ogni passaggio della regolazione la sezione si riduca di 10 volte, tramite calcoli iterativi si osserva cosa succede.

A1 (m ²)	A2-A1 (m ²)	A2/A1	u2 (m/s)
1,76715E-06	6,42329E-05	37,34835998	47,39031
1,76715E-07	6,42329E-06	3,734835998	4,739031
1,76715E-08	6,42329E-07	0,3734836	0,473903
1,76715E-09	6,42329E-08	0,03734836	0,04739

Figura 18: Esempio di calcolo della velocità

Si nota, anche dopo pochi passaggi, che la velocità ha lo stesso andamento della sezione, quindi ad ogni passaggio si riduce di un ordine di grandezza.

Si ricordi che deve valere $v=0.08 \text{ m/s}$, quindi in questo caso sarebbero necessari quattro passaggi.

Non è possibile giungere a delle conclusioni sull'andamento della velocità solo in base a delle ipotesi, però è interessante per farsi un'idea dell'andamento della velocità u_2 in funzione della variazione della sezione A_1 .

Può risultare interessante graficare tale andamento, considerando che ad ogni passaggio la sezione si riduca di un 10% invece che di 10 volte. Inoltre per avere un buon numero di dati si ipotizzino 100 “scalini”, ovvero si ipotizzi che la sezione subisca 100 passaggi della regolazione (aspetto che nella realtà sarebbe possibile ma difficilmente attuabile).

Il risultato sarebbe il grafico mostrato in *Figura 19*.

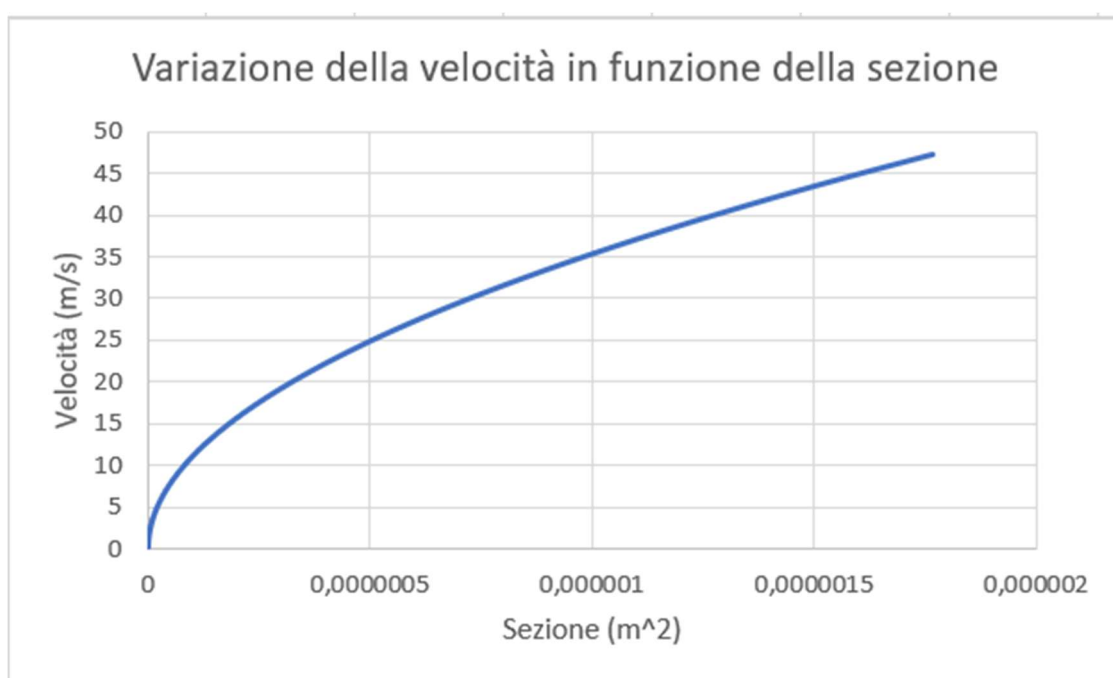


Figura 19: Andamento della velocità al variare della sezione

4.2 Struttura interna del rubinetto

Si passi ora ad analizzare la struttura interna del rubinetto in modo da analizzare nel dettaglio come varia la sezione d'ingresso.



Figura 20:
Struttura interna
del rubinetto

Rimuovendo la plastica è possibile vedere la struttura del rubinetto e si possono effettuare alcune osservazioni:

Nella parte destra dove si attacca il tubo dell'aria era presente solo un tubo di plastica a sezione costante ($\phi=3.8\text{ mm}$).

L'aria entra dentro il corpo del rubinetto attraverso 8 fori uguali di diametro $\phi=1\text{ mm}$, tali fori sono posti lungo due circonferenze, 4 per parte, divisi da una guarnizione.

Il perno regolatore ha $d=M2$ e ha una corsa di 3 mm , la distanza tra i due dadi varia tra 4 e 1 mm .

Andando a tagliare il corpo all'altezza della guarnizione centrale è possibile avere informazioni ulteriori sul perno.

La base inferiore del perno è piana, non filettata e vale $d=1,5\text{ mm}$.

La lunghezza totale del perno, dalla faccia superiore della parte bianca in alto alla superficie piana in basso, è 16 mm .

Conoscendo la lunghezza totale del perno, la corsa e misurando la distanza tra la circonferenza dove giacciono i centri dei fori superiori e la faccia superiore del dado grande è possibile stabilire con esattezza le posizioni iniziale e finale della superficie piana inferiore del perno rispetto ai fori stessi.

Questo permette di creare un modello tramite un sistema di tipo CAD (in questa analisi si userà Solidworks) utile per lo studio dell'ostruzione dei fori.

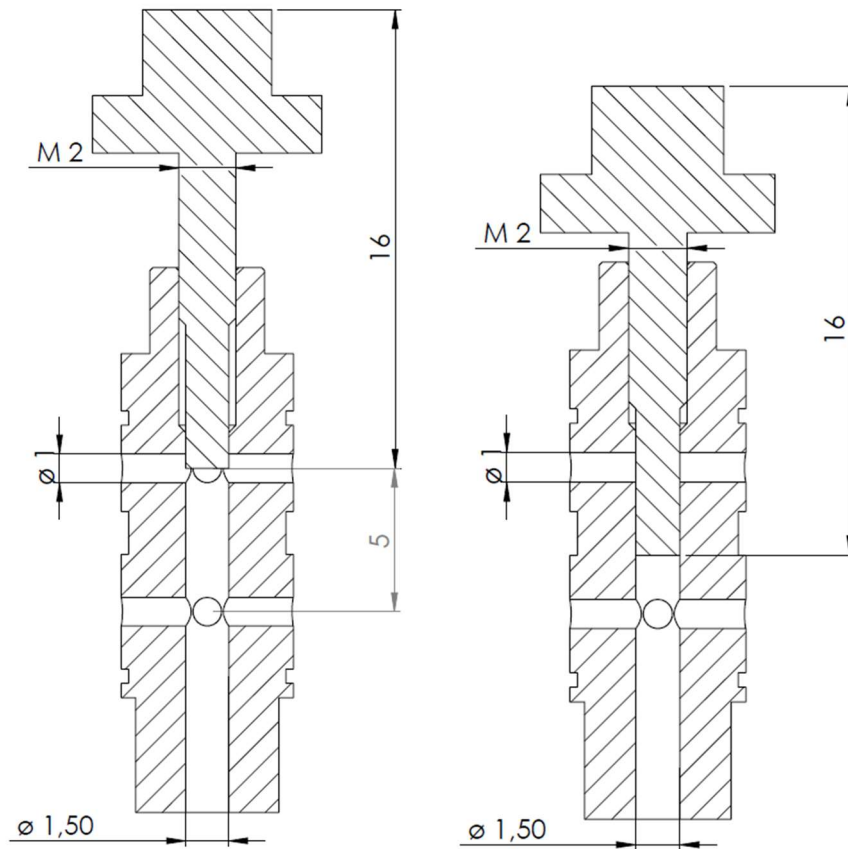


Figura 21: Rubinetto aperto e chiuso

In *Figura 21* si distinguono i due casi estremi, rubinetto aperto e chiuso.

Nel primo caso l'estremo inferiore del perno si trova esattamente a metà dei fori in alto, nel secondo caso ostruisce completamente i fori superiori senza coprire, nemmeno in parte, quelli inferiori.

Si ricordi infatti che il perno ha una corsa di 3 mm e l'interasse tra le due serie di fori è 5 mm , pertanto il perno non ostruisce in alcun modo i fori inferiori.

Al fine dell'analisi i fori inferiori sono quindi influenti in quanto durante la regolazione l'aria passerà sempre attraverso la totalità della loro sezione, pertanto d'ora in avanti si farà riferimento esclusivamente ai fori superiori.

4.3 Analisi geometrica della regolazione

La regolazione avviene ruotando il perno attraverso la manopola posta in alto, per via della rotazione ad ogni giro il perno si abbasserà di una quantità p che corrisponde al passo della filettatura del gambo del perno stesso ($p=0.4mm$).

Si concentri l'attenzione su un singolo foro, si vuole analizzare quanta porzione di foro viene coperta ogni volta che il perno avanza, in modo da valutare quanta aria in meno entra ad ogni step della regolazione.

Si prenda in considerazione la situazione in cui il perno sia avanzato di una certa quantità d , se si immagina di guardare attraverso il foro si può avere una situazione simile a quella schematizzata in *Figura 22*.

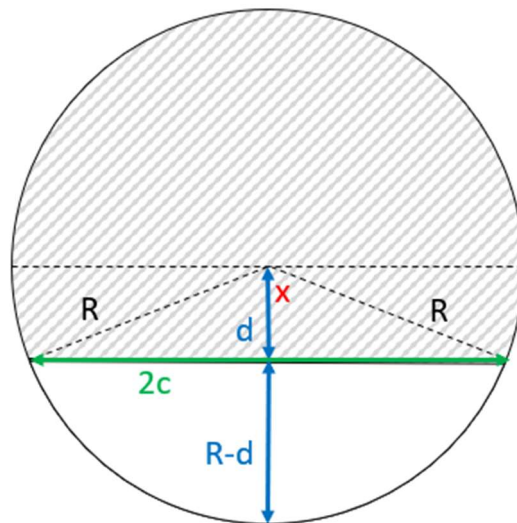


Figura 22: Geometria del foro

La linea che individua la faccia inferiore del perno coincide con una corda del foro se lo si pensa come un cerchio. L'obiettivo quindi diventa calcolare l'area del segmento circolare individuato da tale corda (la parte bianca di *Figura 22*).

Tale area si ottiene come sottrazione tra l'area del settore circolare di ampiezza $2x$ e l'area del triangolo isoscele di base $2c$ e lato R . L'aspetto interessante non è tanto il valore numerico dell'area, quanto la sua dipendenza da d .

Si cominci con l'espressione dell'area del settore circolare.

Un settore circolare è una porzione di un cerchio individuato da due raggi e da un arco, i due raggi al centro individuano un angolo di ampiezza $2x$, si dice che l'arco del settore circolare sottende un angolo di ampiezza $2x$.

Dato che l'arco è una porzione dell'intera circonferenza e che l'angolo sotteso è una porzione dell'intero angolo giro, si possono sfruttare queste relazioni per calcolare l'area del settore come porzione dell'area totale del cerchio:

$$(4.1) A_S : A_C = 2x : 2\pi$$

Da cui si ottiene la relazione desiderata:

$$(4.2) A_{Sett} = \frac{\pi R^2 2x}{2\pi}$$

Il foro ha diametro $\phi=1$, quindi $R=1/2$, di conseguenza la (4.2) diventa:

$$(4.3) A_{Sett} = \frac{x}{4}$$

É ora il turno dell'area del triangolo isoscele, banalmente:

$$(4.4) A_T = \frac{bh}{2} = cd$$

Finalmente l'area del segmento circolare, in funzione dell'avanzamento d :

$$(4.5) A_{Segm} = A_{Sett} - A_T = \frac{x}{4} - cd$$

4.4 Andamento grafico

Ad un primo sguardo si è portati a pensare che la relazione sia di tipo lineare e quindi in un piano in cui si ha d sulle ascisse e A_{segm} sulle ordinate si avrebbe una retta con coefficiente angolare $-c$ e intercetta sulle ordinate $x/4$.

Ciò non è vero in quanto la corda non rimane costante, bensì anch'essa varia in funzione dell'avanzamento d .

Riprendendo *Figura 22* si osserva che il triangolo isoscele può essere scomposto in due triangoli rettangoli uguali, ognuno dei quali ha il cateto maggiore che vale c , il cateto minore che vale d , l'ipotenusa che vale R e l'angolo acuto maggiore che vale x . In un qualsiasi triangolo rettangolo i cateti sono legati dalla seguente relazione:

$$(4.6) \frac{c}{d} = \tan x$$

Che può essere riscritta esplicitando c in funzione di d :

$$(4.7) c = d \tan x$$

Sostituendo la (4.7) nella (4.5) si ottiene:

$$(4.8) A_{segm} = \frac{x}{4} - d^2 \tan x$$

Anche l'angolo x , così come la corda c , non rimane costante ma varia al variare dell'avanzamento d , in particolare diminuisce all'aumentare dell'avanzamento.

Facendo di nuovo riferimento a *Figura 22* si ottiene:

$$(4.9) \frac{d}{R} = \cos x$$

Per quanto riguarda l'angolo x vale $0 < x < \pi/2$, mentre per l'avanzamento d vale $0 < d < R$, per essere più precisi vale $x = \pi/2$ per $d = 0$ (quando il rubinetto è aperto) e $x = 0$ per $d = R$ (quando il rubinetto è chiuso), si ritrova quello che si era osservato in precedenza.

Con tali limitazioni è possibile invertire la relazione precedente:

$$(4.10) \quad x = \cos^{-1}\left(\frac{d}{R}\right) = \cos^{-1}(2d)$$

Dove si è sostituito $R=1/2$ per comodità di scrittura.

Sostituendo la (4.10) nella (4.8) si ottiene:

$$(4.11) \quad A_{Segm} = \frac{\cos^{-1}(2d)}{4} - d^2 \tan[\cos^{-1}(2d)]$$

Si tralasci per un attimo l'intera equazione e ci si concentri solo sulla tangente, in quanto bisogna semplificare la scrittura mediante l'utilizzo delle relazioni trigonometriche che legano le varie funzioni, in questo caso bisogna esprimere la tangente in funzione del coseno:

$$(4.12) \quad \tan x = \frac{\sqrt{1 - (\cos x)^2}}{\cos x}$$

Non vi è dubbio riguardo il segno positivo della radice al numeratore date le limitazioni scritte in precedenza. Andando a sostituire il valore di x :

$$(4.13) \quad \tan[\cos^{-1}(2d)] = \frac{\sqrt{1 - \{\cos[\cos^{-1}(2d)]\}^2}}{\cos[\cos^{-1}(2d)]}$$

Sia al numeratore che al denominatore è presente la composizione di una funzione con la sua inversa, il risultato è l'argomento di tale funzione.

È possibile quindi riscrivere la relazione precedente come segue:

$$(4.14) \tan[\cos^{-1}(2d)] = \frac{\sqrt{1 - 4d^2}}{2d}$$

E finalmente sostituendo la (4.14) nella (4.11) si ottiene:

$$(4.15) A_{Segm} = \frac{\cos^{-1}(2d)}{4} - \frac{d\sqrt{1 - 4d^2}}{2}$$

È ora finalmente possibile graficare l'andamento di tale funzione.

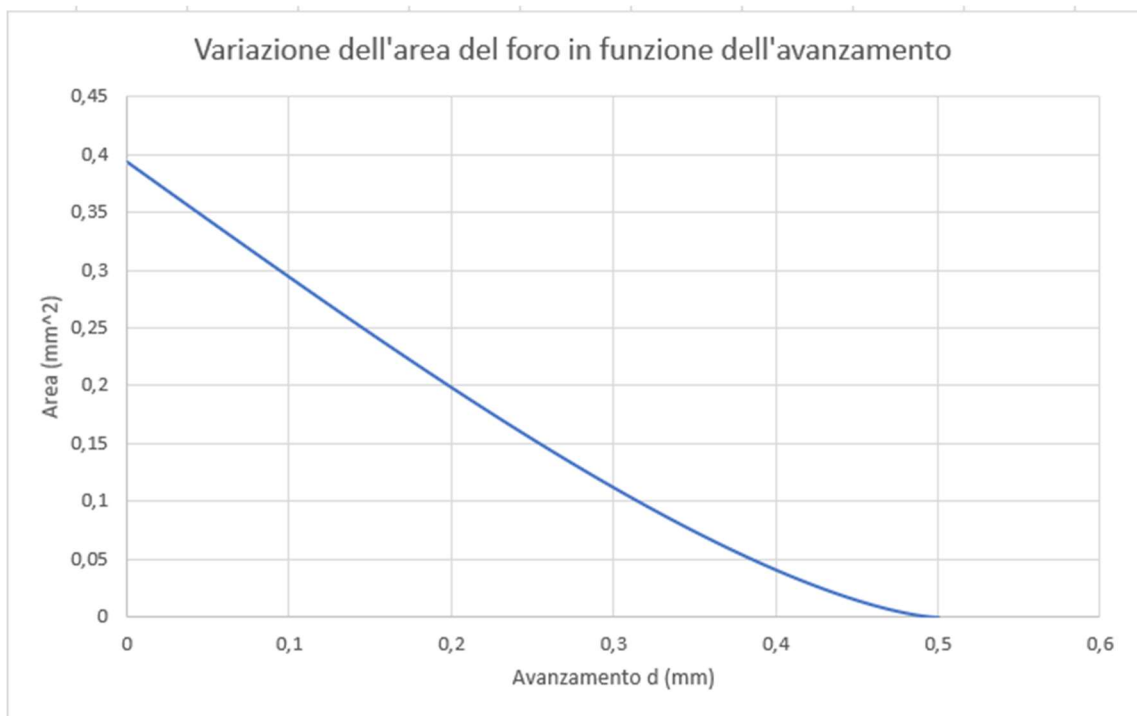


Figura 23: Andamento grafico

A questo punto è necessario effettuare una nuova analisi tramite l'approccio euleriano.

4.5 Approccio euleriano rubinetto

Nell'analisi effettuata al capitolo precedente l'attenzione era stata rivolta all'attuatore, tralasciando cosa succedesse prima. Successivamente però si è appreso che la presenza del rubinetto influisce sulla velocità in ingresso nel volume di controllo (*Figura 16*) e quindi risulta necessario effettuare un'altra analisi, questa volta concentrando l'attenzione sul rubinetto.

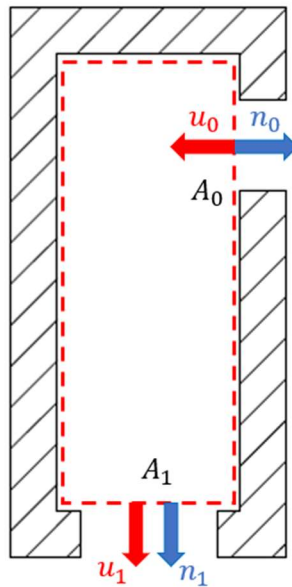


Figura 24: Schema per l'approccio euleriano del rubinetto

La sezione A_1 è esattamente la stessa dell'analisi precedente ($A_1=1.77 \text{ mm}^2$), u_0 è la velocità alla quale si muove l'aria compressa, la quale per legge non può superare i 10 m/s , A_0 è variabile e corrisponde all'area effettiva attraverso cui l'aria entra nel rubinetto: si ricordi che l'aria entra attraverso otto fori, per i fori inferiori si considera la totalità dell'area in quanto la regolazione non li interessa,

mentre per i fori superiori si considera l'area calcolata precedentemente per un singolo foro, moltiplicata per quattro. Si ottiene così:

$$(4.16) A_0 = \pi + \cos^{-1}(2d) - 2d\sqrt{1 - 4d^2}$$

Per l'equazione di continuità applicata al volume di controllo vale:

$$(4.17) A_0 u_0 = A_1 u_1$$

Ricavando u_1 in funzione di u_0 :

$$(4.18) u_1 = \frac{A_0}{A_1} u_0$$

E sostituendo nell'equazione della quantità di moto ricavata al capitolo precedente si ottiene:

$$(4.19) \rho \left[A_2 u_2^2 - A_1 \left(\frac{A_0}{A_1} u_0 \right)^2 \right] = p(A_1 - A_2) + F$$

Lo scopo a questo punto è esprimere u_2 in funzione di A_0 :

$$\rho \left(A_2 u_2^2 - \frac{A_0^2}{A_1} u_0^2 \right) = p(A_1 - A_2) + F$$

$$\rho A_2 u_2^2 = p(A_1 - A_2) + F + \rho \frac{A_0^2}{A_1} u_0^2$$

$$(4.20) u_2^2 = \frac{p(A_1 - A_2) + F}{\rho A_2} + \frac{u_0^2}{A_1 A_2} A_0^2$$

Nel piano che ha A_0^2 sulle ascisse e u_2^2 sulle ordinate la (4.20) è una retta.

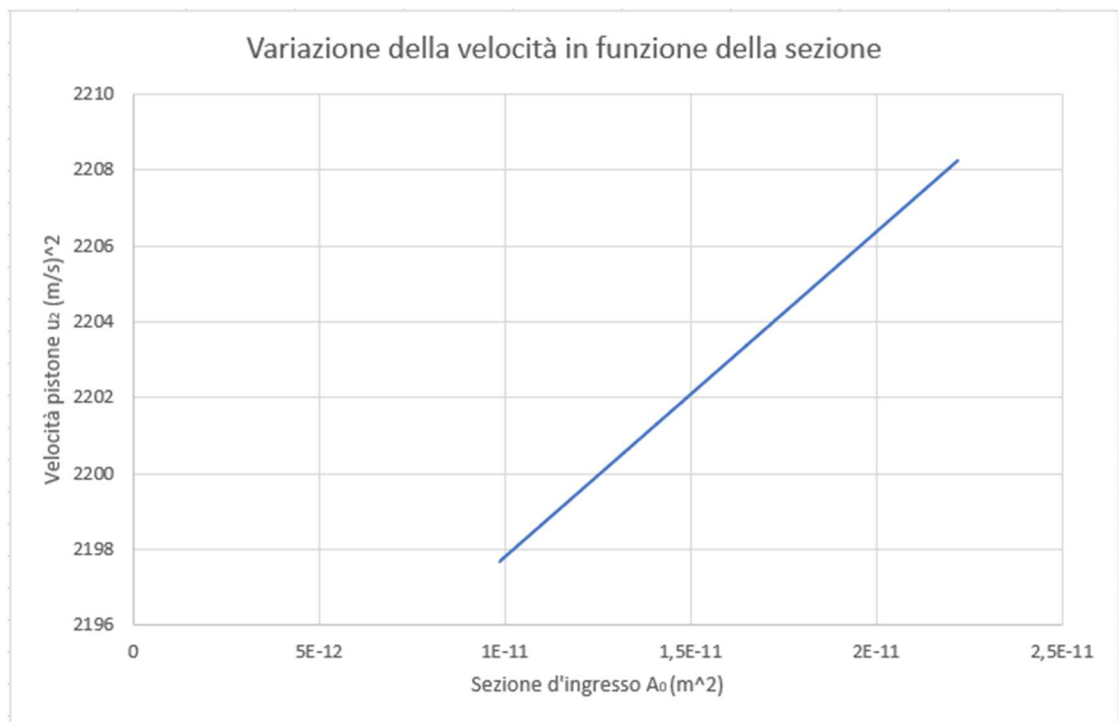


Figura 25: Relazione lineare

Per avere un'idea migliore dei valori in gioco è utile graficare non tanto la relazione tra le due funzioni elevate al quadrato, piuttosto avere u_2 in funzione della sezione A_0 . Osservando la relazione precedente otterremo una relazione del tipo $y = \sqrt{ax^2 + b}$.

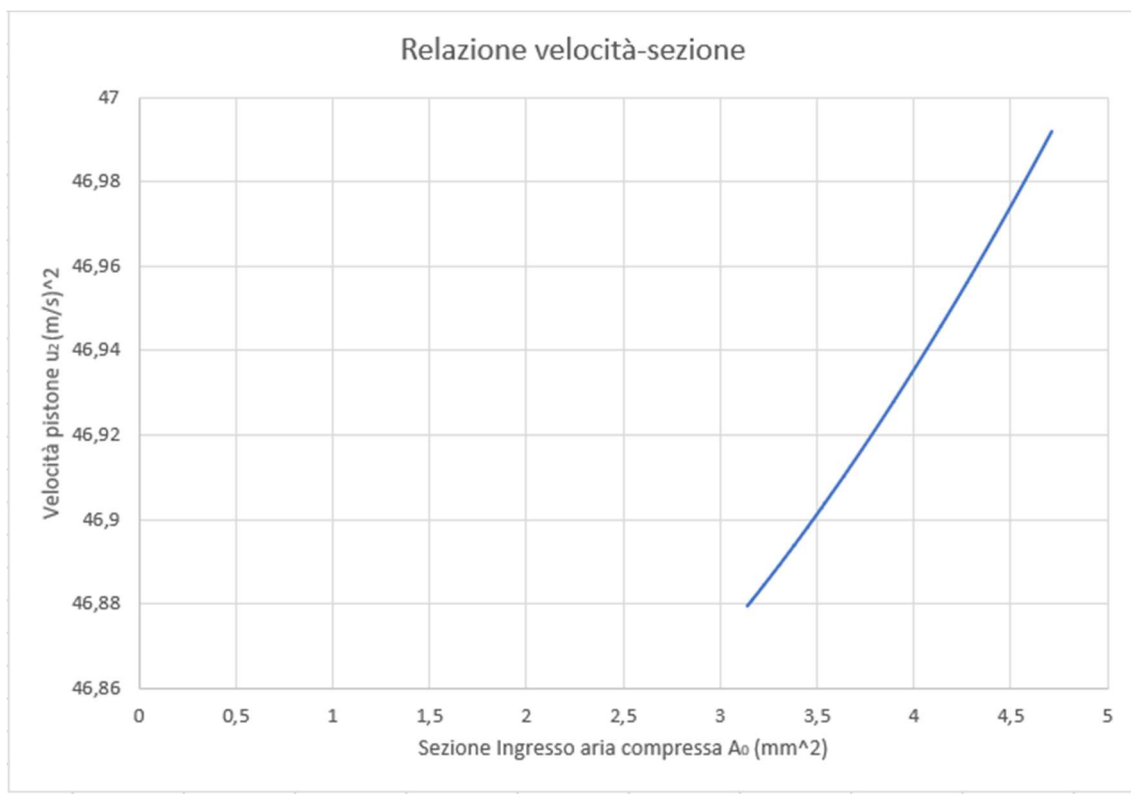


Figura 26: Relazione velocità-sezione

4.6 Azione frenante

I valori di u_2 che si ottengono ($u_2=29 \text{ m/s}$) sono sempre più bassi ma ancora molto distanti da quello che bisogna ottenere ($u_2=0.08 \text{ m/s}$), questo perchè è necessario effettuare un'ultima considerazione riguardante l'attuatore e la regolazione dell'aria. Se si riprende in esame la struttura dell'attuatore si nota che l'aria non entra solo da una parte, bensì è presente una seconda sezione in cui l'aria passa ed è possibile regolare l'afflusso tramite un rubinetto del tutto analogo a quello analizzato poco fa.

L'aria che entra da questa seconda sezione funge da freno per il pistone, quindi per ottenere la velocità desiderata è necessario regolare le manopole da una parte e dall'altra in modo che la differenza delle due velocità sia uguale al valore desiderato. La situazione si studia di nuovo mediante un approccio euleriano.

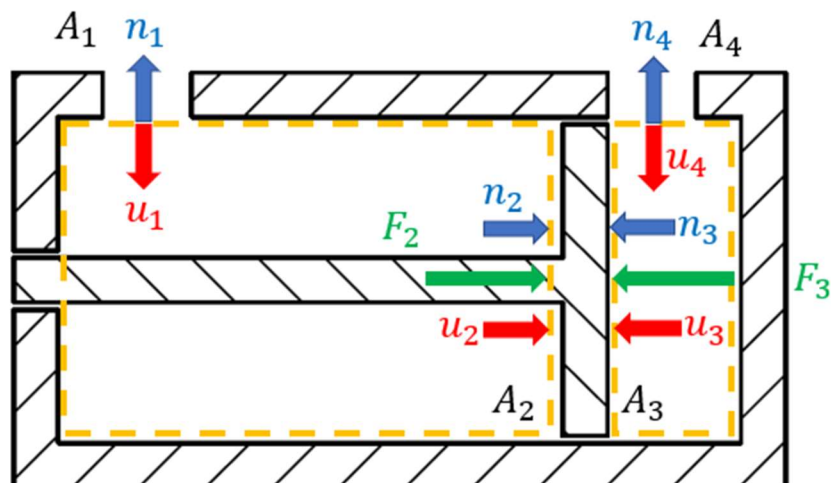


Figura 27: Schema approccio euleriano

Per quanto riguarda il volume di controllo nella parte sinistra di *Figura 27* valgono tutte le considerazioni fatte nel capitolo 3, quindi si passa ad analizzare direttamente quello nella parte destra della figura. Anche in questo caso si applicano l'equazione della quantità di moto e l'equazione di continuità, considerando A_4 la sezione di ingresso e A_3 la sezione di uscita. L'obiettivo è ricavare una relazione tra u_3 e A_4 , per poi considerare il rubinetto sopra, il quale fornirà la relazione tra A_4 e A_5 .

$$(4.21) \rho A_3 |u_3| u_3 - \rho A_4 |u_4| u_4 = -(p_4 A_4 \hat{n}_4 + p_3 A_3 \hat{n}_3) + F_3$$

$$(4.22) \rho A_3 |u_3| = \rho A_4 |u_4|$$

Ricavando u_4 in funzione di u_3 dall'equazione di continuità (4.22) e sostituendo tale valore di u_3 nell'equazione della quantità di moto (4.21) si ottiene:

$$(4.23) \rho (A_3 u_3^2 - \frac{A_3^2}{A_4} u_3^2) - p(A_4 - A_3) = F_3$$

Si consideri ora il rubinetto, le considerazioni sono uguali al caso precedente, quindi saranno uguali anche le relazioni, l'unica accortezza è sostituire l'indice 4 al posto dell'1, l'indice 5 al posto dello 0 e l'indice 3 al posto del 2.

$$(4.24) u_3^2 = \frac{p(A_4 - A_3) + F_3}{\rho A_3} + \frac{u_5^2}{A_4 A_3} A_5^2$$

Si analizzino i dati presenti all'interno di questa formula:

- p è la stessa di prima $\rightarrow p=0.3 \text{ MPa}$
- ρ è la stessa di prima $\rightarrow \rho=3.675 \text{ Kg/m}^3$
- F_3 si ricava dal catalogo $\rightarrow F_3=23.6 \text{ N}$
- A_3 si ricava dal catalogo $\rightarrow A_3=78.5 \text{ mm}^2$

- A_4 è uguale ad $A_1 \rightarrow A_4=1.77 \text{ mm}^2$
- u_5 è uguale ad $u_0 \rightarrow u_5=10 \text{ m/s}$

Quello che si vuole calcolare adesso è la differenza tra le due velocità, motrice e frenante, per confrontare tale valore con quello richiesto ($v=0.08 \text{ m/s}$).

Sostituendo i valori sopra elencati si ottiene $v=-75 \text{ m/s}$, valore elevato e per giunta negativo, di fatto non accettabile.

Una semplificazione che è stata fatta è stata quella di considerare che i due volumi di controllo si trovino nelle stesse condizioni, ovvero che la pressione sia la stessa (e di conseguenza la densità) e che la regolazione sia uguale da entrambe le parti, ossia che l'avanzamento del perno sia lo stesso quindi risultano uguali le sezioni di ingresso.

Quello che si considera adesso è avere due condizioni diverse:

- $p_1 \neq p_2$
- $\rho_1 \neq \rho_2$
- $d_1 \neq d_2$

Per risolvere il problema si utilizza il risolutore di Excel, uno strumento che permette di calcolare il valore desiderato facendo variare più parametri contemporaneamente, una volta che per gli stessi sia stato definito il dominio.

Parametri Risolutore

Imposta obiettivo: ↑

A: Max Min Valore di:

Modificando le celle variabili: ↑

Soggette ai vincoli:

-
-
-
-
-
-
-
-

Rendi non negative le variabili senza vincoli

Selezionare un metodo di risoluzione: ↓

Metodo di risoluzione

Selezionare il motore GRG non lineare per i problemi lisci non lineari del Risolutore. Selezionare il motore Simplex LP per i problemi lineari e il motore evolutivo per i problemi non lisci.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2		volumi di controllo 1				volumi di controllo 2									
3		d1	0,01	mm		d2	0,49	mm		d	0,01	mm	d	0,49	mm
4		A1	1,77	mm ²		A4	1,77	mm ²		A	0,3827	mm ²	A	0,001329	mm ²
5			1,77E-06	m ²			1,77E-06	m ²		A0	4,672392	mm ²	A5	3,14691	mm ²
6		A2	66	mm ²		A3	78,5	mm ²		A0	4,67E-06	m ²	A5	3,15E-06	m ²
7			0,000066	m ²			7,85E-05	m ²		(A0) ²	2,18E-11	m ⁴	(A5) ²	9,9E-12	m ⁴
8		A1-A2	-6,4E-05	m ²		A4-A3	-6,4E-05	m ²		(u2) ²	28336,14	(m/s) ²	(u3) ²	28309,21	(m/s) ²
9		A1*A2	1,17E-10	m ²		A4*A3	1,17E-10	m ²		u2	168,3334	m/s	u3	168,2534	m/s
10		p	0,304052	MPa		p	0,496565	MPa		RISOLUTORE					
11			304052,3	Pa			496564,6	Pa		v	0,08	m/s			
12		F2	20,06745	N		F3	38,98032	N							
13		u0	10	m/s		u0	10	m/s							
14		p	1,225	kg/m ³		p	1,225	kg/m ³							
15		p1	3,72464	kg/m ³		p1	6,082916	kg/m ³							
16															

Figura 28: Parametri e risultati del risolutore

5 Analisi economica

5.1 Introduzione all'analisi

Si voglia effettuare un'analisi economica per valutare il costo dell'intero processo di produzione atto a realizzare il cambio spola.

Per processo di produzione, o processo produttivo, si intende l'insieme delle operazioni necessarie a trasformare un pezzo grezzo in prodotto finito.

Si vuole analizzare il costo relativo alla realizzazione di ogni singolo componente presente nell'insieme, i quali sono:

- Attacco base
- Supporto pistone
- Supporto aggancio spola
- Base di ancoraggio
- Attacco cucitrice
- Giunto
- Attacco pistone
- Gancio
- Attacco caricatore

	A	B	C	D	E	F
1	NOME	CODICE	IMMAGINE	MATERIALE	MACCHINA	LAVORAZIONE
2	ATTACCO BASE	X-1		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
3	SUPPORTO PISTONE	X-2		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
4	SUPPORTO AGGANCIO SPOLA	X-3		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
5	BASE DI ANCORAGGIO	X-4		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
6	ATTACCO CUCITRICE	X-5		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
7	GIUNTO	X-6		ACCIAIO INOX	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
8	ATTACCO PISTONE	X-7		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
9	GANCIO	X-8		ACCIAIO INOX	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA
10	ATTACCO CARICATORE	X-9		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA

Figura 29: Tabella delle parti in esame e relative operazioni

5.2 Calcolo del costo totale

L'obiettivo di tale analisi è il calcolo del costo totale di produzione.

Si prenderanno in considerazione esclusivamente i costi diretti, ossia quella tipologia di costi che sono imputabili in maniera certa ed univoca ad un solo oggetto di costo.

Per quanto riguarda i costi indiretti, essendo di difficile imputazione e soprattutto di difficile stima, non saranno oggetto di questa analisi.

Fatte tutte queste premesse è possibile definire il costo totale come somma di tre contributi:

$$(5.1) C_{tot} = C_m + C_w + C_{su}$$

I termini che compaiono nell'equazione sono:

- C_m → Costo del materiale
- C_w → Costo di lavorazione
- C_{su} → Costo di set-up

Ciascun termine sarà calcolato in relazione alla singola parte, quindi si otterrà il costo totale necessario alla realizzazione di ogni componente, quindi facendo la somma di tutti i contributi si otterrà il costo totale vero e proprio.

5.2.1 Costo del materiale C_m

Il costo del materiale è la somma da spendere per comprare tutto il materiale necessario a realizzare quel singolo pezzo.

Si misura in €/PZ ed è dato dalla seguente formula:

$$(5.2) C_m = c_m p$$

- c_m è il costo unitario di materiale
- p è il peso del pezzo

Il primo termine è il costo necessario per realizzare 1 Kg di componente. Tale valore espresso in €/Ton è stabilito dal mercato per diversi materiali. Per l'analisi che si sta effettuando è richiesto il costo espresso in €/Kg, quindi con una semplice conversione si ottiene per l'alluminio $c_m=1.6$ €/Kg, mentre per l'acciaio $c_m=0.8$ €/Kg.

Il secondo termine viene misurato in Kg e viene ricavato dal disegno effettuato tramite programmi di tipo CAD, nei quali è possibile stimare appunto tale valore. É chiaro che rimane una stima, ma nonostante ciò è più che sufficiente per il tipo di analisi che si sta effettuando.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	NOME	CODICE	IMMAGINE	MATERIALE	MACCHINA	LAVORAZIONE	COSTO MATERIALE (€/Kg)	PESO (Kg)	COSTO MATERIALE (€/PZ)
2	ATTACCO BASE	X-1		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,05	0,080

Figura 30: Esempio di costo del materiale per il prodotto X-1

5.2.2 Costo di lavorazione C_w

Il costo di lavorazione è il costo del lavoro operaio, ovvero il costo da corrispondere all'operaio per la lavorazione del pezzo.

Si misura in €/PZ ed è dato dalla seguente formula:

$$(5.3) C_w = c_w t_w$$

- c_w è il costo unitario di lavoro
- t_w è il tempo di lavorazione

il primo termine è il costo dell'operaio nell'unità di tempo, si misura in €/min e dipende dalla retribuzione dell'operario e dall'orario di lavoro.

Generalmente la retribuzione si calcola in €/mese, quindi considerando che un operaio lavora 8 h/giorno e considerando le varie relazioni che sussistono tra minuti, ore, giorni e mesi si ottiene $c_w=0.7$ €/min.

Il secondo termine è il tempo durante il quale la macchina è in funzione per la realizzazione del pezzo, si misura in min/PZ e dipende dalla geometria del pezzo e dai parametri del tipo di lavorazione da effettuare, tale valore quindi varierà da un pezzo all'altro e si può calcolare solo in maniera sperimentale, ovvero solo mediante misurazione durante il processo di lavorazione.

	A	B	C	D	E	F	J	K	L
1	NOME	CODICE	IMMAGINE	MATERIALE	MACCHINA	LAVORAZIONE	COSTO LAVORAZIONE (€/min)	TEMPO LAVORAZIONE (min)	COSTO LAVORAZIONE (€/PZ)
2	ATTACCO BASE	X-1		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	0,7	3,6	2,52

Figura 31: Esempio di costo di lavorazione per il prodotto X-1

5.2.3 Costo di set-up C_{su}

Il costo di set-up è il costo relativo alle operazioni di attrezzaggio della macchina, da effettuare quando la macchina non è in funzione.

Si misura in €/PZ ed è dato dalla seguente formula:

$$(5.4) C_{su} = c_{su} t_{su}$$

- c_{su} è costo unitario di set-up
- t_{su} è il tempo di set-up

Il primo termine corrisponde al costo unitario di lavorazione in quanto, nonostante la macchina è ferma e non lavora, l'operaio svolge diverse operazioni, come ad esempio il posizionamento del pezzo sulla macchina, il cambio di orientazione del pezzo rispetto all'utensile, la sostituzione dell'utensile stesso e via dicendo. Quindi $c_{su}=c_w=0.7 \text{ €/min}$.

Il secondo termine è il tempo durante il quale vengono svolte tutte le operazioni precedentemente elencate, si misura in min/PZ ed è il tempo durante il quale l'operatore lavora sulla macchina mentre quest'ultima è ferma. Anche in questo caso tale valore è misurabile solo durante il processo.

	A	B	C	D	E	F	M	N	O
1	NOME	CODICE	IMMAGINE	MATERIALE	MACCHINA	LAVORAZIONE	COSTO SET-UP (€/min)	TEMPO SET-UP (€/min)	COSTO SET UP (€/PZ)
2	ATTACCO BASE	X-1		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	0,7	2,6	1,8

Figura 32: Esempio di costo di set-up per il prodotto X-1

In conclusione il costo totale di produzione dell'assieme è $C_{tot}=43 \text{ €/PZ}$.










	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	NOME	CODICE	IMMAGINE	MATERIALE	MACCHINA	LAVORAZIONE	COSTO MATERIALE (€/Kg)	PESO (Kg)	COSTO MATERIALE (€/PZ)	COSTO LAVORAZIONE (€/min)	TEMPO LAVORAZIONE (min)	COSTO LAVORAZIONE (€/PZ)	COSTO SET-UP (€/min)	TEMPO SET-UP (€/min)	COSTO SET UP (€/PZ)	COSTO TOTALE (€/PZ)
1	ATTACCO BASE	X-1		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,05	0,080	0,7	3,6	2,52	0,7	2,6	1,8	4,4
2	SUPPORTO PISTONE	X-2		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,02	0,032	0,7	3,28	2,30	0,7	2,28	1,6	3,92
3	SUPPORTO AGGANCIO SPOLA	X-3		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,067	0,107	0,7	8,28	5,80	0,7	4,00	2,8	8,7
4	BASE DI ANCORAGGIO	X-4		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,145	0,232	0,7	5,14	3,60	0,7	3,14	2,2	6,03
5	ATTACCO CUCITRICE	X-5		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,046	0,074	0,7	6,85	4,80	0,7	3,57	2,5	7,37
6	GIUNTO	X-6		ACCIAIO INOX	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	0,8	0,003	0,002	0,7	3,28	2,30	0,7	2,28	1,6	3,89
7	ATTACCO PISTONE	X-7		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,016	0,026	0,7	2,85	2,00	0,7	1,72	1,2	3,22
8	GANCIO	X-8		ACCIAIO INOX	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	0,8	0,009	0,007	0,7	2,57	1,80	0,7	1,14	0,8	2,6
9	ATTACCO CARICATORE	X-9		ALLUMINIO	CENTRO DI LAVORO	TORNITURA E FRESATURA	1,6	0,098	0,157	0,7	2,62	1,83	0,7	1,28	0,9	2,89
10																
11															€	43,03

Figura 33: Tabella riassuntiva del costo totale di produzione

6 Risultati

6.1 Tempo di esecuzione

Si ricordi che l'obiettivo dell'analisi era calcolare la velocità ottimale che rendesse minimo il tempo di esecuzione. Analizzando la fase di estrazione della spola si è ottenuto il valore della minima velocità che innesca lo sfilamento del rocchetto dal guscio che per comodità si esprime stavolta in mm/s ($v_g=80 mm/s$).

Per calcolare il tempo di esecuzione totale si assume che il cambio spola si muove di moto uniforme, quindi è possibile calcolare il tempo di esecuzione di ogni singolo movimento (quelli elencati al paragrafo 2.4) tramite la (6.1):

$$(6.1) t_i = \frac{\Delta s_i}{v}$$

I movimenti sono i seguenti:

1. rotazione oraria di 90°
2. avanzamento fino al caricatore
3. aggancio della spola
4. estrazione della spola
5. regressione fino al centro
6. rotazione antioraria di 90°
7. avanzamento fino al crochet
8. rilascio della spola
9. regressione fino al punto di partenza

Per quanto riguarda i movimenti 2, 5, 7, 9 è possibile conoscere esattamente lo spazio percorso in quanto corrisponde alla corsa totale dell'attuatore lineare grande responsabile di quel movimento ($\Delta s_g=40 \text{ mm}$).

Per quanto riguarda il movimento 4 lo spazio percorso già è noto, in quanto è stato utilizzato nel Capitolo 3 per calcolare la velocità del moto ($\Delta s_4=4 \text{ mm}$).

Per quanto riguarda i movimenti 1, 6 questi sono realizzati dall'attuatore girevole, si ricordi che questo particolare modello consente una rotazione massima di 90° e nel catalogo è riportato direttamente il tempo necessario ad effettuarla ($t_1=t_6=0.3 \text{ s}$).

Per quanto riguarda i movimenti 3, 8 lo spazio percorso dall'attuatore grande è nullo (l'attuatore grande non effettua corsa), infatti in questo caso bisogna considerare il movimento dell'attuatore piccolo per il quale però è necessario effettuare una stima. Si suppone inoltre che i due tempi coincidano, in quanto i movimenti sono uno l'opposto dell'altro (aggancio e rilascio della spola).

Si ipotizza che la velocità dell'attuatore piccolo sia un decimo della velocità di quello grande ($v_p=8 \text{ mm/s}$) e per effettuare tali movimenti si ritiene necessaria una corsa di 4 mm ($\Delta s_p=4 \text{ mm}$).

$$(6.2) t_{TOT} = \sum_i t_i$$

$$(6.3) t_{TOT} = 2t_1 + 2 \frac{\Delta s_p}{v_p} + 4 \frac{\Delta s_g}{v_g} + \frac{\Delta s_4}{v_g} \cong 4s$$

Quindi ipotizzando di usare la velocità limite si otterrebbe un tempo di $4s$, circa la metà dei $9s$ iniziali. Però nella realtà applicativa sarebbe troppo rischioso utilizzare la velocità limite, quindi si userà circa il 70% di tale velocità ($v=56 \text{ mm/s}$), ottenendo così un tempo di 5.20 s , che rimane un ottimo risultato rispetto a quello iniziale.

6.2 Parametri dell'attuatore

Tramite l'analisi con l'approccio euleriano è stato possibile ricavare le condizioni di esercizio che garantissero la velocità desiderata ed erano le seguenti:

- $d_1=0.01 \text{ mm}$
- $d_2=0.49 \text{ mm}$
- $p_1=0.3 \text{ MPa}$
- $p_2=0.49 \text{ MPa}$

Quanto si modificherebbero tali condizioni se la nuova velocità alla quale si muove il pistone dell'attuatore grande è diminuita del 30% ($v=56 \text{ mm/s}$)?

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1															
2		volumi di controllo 1				volumi di controllo 2									
3		d1	0,01	mm		d2	0,49	mm		d	0,01	mm	d	0,49	mm
4		A1	1,77	mm ²		A4	1,77	mm ²		A	0,3827	mm ²	A	0,001329	mm ²
5			1,77E-06	m ²			1,77E-06	m ²		A0	4,672392	mm ²	A5	3,14691	mm ²
6		A2	66	mm ²		A3	78,5	mm ²		A0	4,67E-06	m ²	A5	3,15E-06	m ²
7			0,000066	m ²			7,85E-05	m ²		(A0) ²	2,18E-11	m ⁴	(A5) ²	9,9E-12	m ⁴
8		A1-A2	-6,4E-05	m ²		A4-A3	-6,4E-05	m ²		(u2) ²	26715,8	(m/s) ²	(u3) ²	26697,49	(m/s) ²
9		A1*A2	1,17E-10	m ²		A4*A3	1,17E-10	m ²		u2	163,4497	m/s	u3	163,3937	m/s
10		p	0,324155	MPa		p	0,564163	MPa		RISOLUTORE					
11			324154,7	Pa			564163,1	Pa		v	0,055999	m/s			
12		F2	21,39421	N		F3	44,2868	N							
13		u0	10	m/s		u0	10	m/s							
14		ρ	1,225	kg/m ³		ρ	1,225	kg/m ³							
15		ρ1	3,970895	kg/m ³		ρ1	6,910998	kg/m ³							
16															

Figura 34: Calcoli risolutore per il nuovo valore della velocità

Si nota che i parametri sono rimasti pressochè invariati, sono aumentate leggermente le due pressioni, $p_1=0.32 \text{ MPa}$ e $p_2=0.56 \text{ MPa}$.

Si nota che la p_2 deve subire un incremento maggiore e di conseguenza aumenta la forza frenante, ma d'altronde c'era da aspettarselo in quanto la velocità deve diminuire.

6.3 Prove e verifiche

Una volta analizzati tutti i dati, eseguiti tutti i calcoli e trovati i parametri di esercizio è necessario effettuare delle prove per avere un riscontro pratico utile per validare effettivamente il modello.

Fin da subito però si sono riscontrati alcuni problemi.

In primo luogo non è stato possibile realizzare un nuovo prototipo che tenesse conto delle modifiche progettuali apportate durante la fase iniziale di riprogettazione, dato che non si è ritenuto necessario realizzarlo esclusivamente ai fini dell'analisi in quanto le modifiche erano solo migliorative e non andavano a modificare troppo le prestazioni del prototipo già presente.

Per questo motivo le prove sono state effettuate sul prototipo pre-esistente.

In secondo luogo si sono riscontrati problemi relativi alle prove stesse, in quanto gli strumenti a disposizione non erano sufficienti a calcolare alcune grandezze con la dovuta precisione, ad esempio non è stato possibile calcolare il tempo totale con la giusta precisione, nè tantomeno la velocità effettiva alla quale si muovesse lo stelo dell'attuatore lineare grande.

Entrambi gli attuatori però sono dotati di due sensori che emettono un segnale luminoso quando il pistone raggiunge le due posizioni estreme, uno controlla la posizione del punto morto inferiore, l'altro quella del punto morto superiore.

Grazie a questi segnali luminosi è possibile effettuare una stima abbastanza accurata riguardo il tempo necessario affinché il pistone compia l'intera corsa.

Un valore che si riesce a calcolare con esattezza è la pressione di esercizio, in quanto l'aria proviene da un compressore che segnala con esattezza la pressione alla quale si trova l'aria stessa, con un precisione del decimo di atmosfere (0.1 atm).

Un altro valore che si riesce a tenere abbastanza sotto controllo è l'avanzamento del perno. Quest'ultimo infatti dipende dal passo della filettatura del perno regolatore, inoltre sulla testa del perno stesso è presente un segno che aiuta a stabilire di quanto sia stato ruotato il perno.

Il perno ha una filettatura $M2$ e un passo $0.4mm$, quello che si vuole calcolare è la rotazione da attuare per avere $d_1=0.01mm$ e $d_2=0.49mm$ (da scomporre in $0.4mm$ corrispondenti ad un giro completo più $0.09mm$), quindi sfruttando la proporzione:

$$(6.4) p : 360^\circ = d : \varphi$$

È possibile ricavare l'angolo di rotazione φ tramite la (6.5):

$$(6.5) \varphi = \frac{360^\circ d}{p}$$

Dalla quale si ottiene $\varphi_1=9^\circ$ e $\varphi_2=81^\circ$.

Tali angoli non saranno ottenibili in modo esatto, ma sono stimabili.

In conclusione purtroppo c'è da dire che non è stato possibile effettuare prove accurate in quanto gli strumenti che si hanno a disposizione limitano la possibilità di entrare nel dettaglio. Nonostante ciò il prototipo funziona, la spola viene trasportata correttamente dal caricatore al crochet senza perdere il filo durante il tragitto.

Conclusioni

In questo lavoro si sono analizzate le varie fasi attraverso le quali bisogna passare per realizzare un cambio spola automatico.

Si è partiti dalla storia della macchina da cucire in modo da inquadrare l'argomento all'interno di un contesto storico caratterizzato dal susseguirsi di numerose evoluzioni che hanno stravolto il modo di cucire fino a giungere ad un sistema automatizzato che agevola e velocizza il lavoro dell'operatore.

Successivamente è stata fatta una reingegnerizzazione del prototipo già esistente in modo da migliorare i punti deboli, uno su tutti dividere la base in tre parti in modo da facilitare il processo produttivo con forme più regolari e inoltre agevolare il montaggio-smontaggio e le regolazioni.

In seguito si è passati all'analisi vera e propria, trovare la velocità ottimale alla quale far muovere il cambio spola in modo da minimizzare il tempo di sostituzione della spola, evitando altresì movimenti bruschi che possono causare la caduta del rocchetto sul quale è avvolto il filo. Poiché tale velocità dipende dal moto dello stelo dell'attuatore lineare, è stato necessario concentrarsi su di esso cercando la correlazione tra pressione in ingresso e velocità in uscita.

Andando sempre più a fondo nell'analisi si è scoperto che la regolazione dell'afflusso di aria modifica tale relazione, che di fatto diventa una relazione tra la sezione di ingresso attraverso cui fluisce l'aria e la velocità del pistone. É

stato quindi necessario studiare la struttura del rubinetto regolatore studiando nel dettaglio la variazione della sezione utile in funzione della regolazione.

Essendo presenti due rubinetti regolatori, uno relativo all'azione motrice dell'aria sul pistone l'altro relativo all'azione frenante, la velocità del pistone deriverà dall'azione combinata dei due effetti. Ciò vuol dire che esistono più combinazioni attraverso le quali è possibile ottenere il risultato desiderato in quanto le variabili in gioco sono quattro, è però possibile ridurre drasticamente il numero di combinazioni imponendo delle limitazioni fisiche a tali variabili.

Giunti quindi alla soluzione finale si è reso necessario verificare tramite prove sperimentali la veridicità di tali risultati ed è qui che sono sorti i primi problemi.

La strumentazione a disposizione infatti non ha permesso un'accurata misurazione delle variabili in gioco, in quanto era richiesta una precisione superiore a quella che poteva essere garantita. Questo si è verificato essere un limite abbastanza rilevante in quanto le prove sono risultate utili a metà.

Un aspetto molto positivo di tale lavoro c'è stato: quest'analisi ha permesso di creare una base per lo studio di strutture di questo tipo, infatti nonostante diversi tipi di macchine da cucire comportano una diversa forma del cambio spola, il ragionamento che c'è dietro rimane lo stesso quindi modificando esclusivamente pochi parametri è possibile studiare diverse soluzioni, ottenendo quindi un alto livello di flessibilità del prototipo, il quale è in grado di adattarsi a diverse soluzioni attraverso piccole modifiche.

Bibliografia

- 1) Giuseppe Cozzo, Cinzia Santoro (2011), **Meccanica dei fluidi (Seconda edizione)**, Ed. McGraw-Hill
- 2) Marco Bramanti, Carlo D. Pagani, Sandro Salsa (2008), **Analisi matematica 1**, Ed. Zanichelli
- 3) **Dispense del corso Studi di fabbricazione**, Prof. Archimede Forcellese, Università Politecnica delle Marche
- 4) **SMC Corporate Website Catalogo prodotti**, Attuatore lineare
https://content2.smcetech.com/pdf/CU_B_IT.pdf
- 5) **SMC Corporate Website Catalogo prodotti**, Attuatore girevole
<https://docs.rs-online.com/3d36/0900766b8129d5f7.pdf>
- 6) **Sito web Trismeccanica srl**, <https://www.trismeccanica.it/>
- 7) **Sito web Brother**, <https://www.brother.it/>
- 8) The Sew Blog, **Storia della macchina da cucire**

Ringraziamenti

Prima di tutti voglio e devo ringraziare i miei genitori e mia sorella, per il supporto continuo che hanno nei miei confronti, per l'affetto che mi dimostrano anche senza dire niente e soprattutto perchè senza il loro supporto la mia carriera universitaria non sarebbe esistita.

In secondo luogo voglio ringraziare la Trismeccanica per avermi dato l'opportunità di sperimentare cosa significa far parte di un ambiente lavorativo e sentirsi al tempo stesso in un ambiente quasi familiare, con le dovute "distanze" da mantenere, esperienza che fino ad ora avevo sperimentato solo in parte con il Polimarche Racing Team. Seppur breve tale esperienza all'interno dell'azienda ha fatto sì che io crescessi sia a livello professionale che a livello umano.

Ringrazio inoltre il professor Michele Germani per la disponibilità, l'aiuto nel colmare le mie lacune tecniche e la professionalità dimostrate.

Ringrazio i miei amici più stretti che ci sono sempre stati e mi hanno aiutato a vivere questi anni universitari con meno pesantezza.

Ringrazio tutti i coinquilini con i quali ho convissuto durante questi anni, con i quali ho condiviso momenti che difficilmente dimenticherò, sia quelli positivi che quelli negativi, soprattutto i secondi perchè sono serviti da lezione molto più dei momenti positivi.

Ringrazio infine tutte le persone che ho conosciuto durante l'intero percorso, e fidatevi ne sono davvero moltissimi, alcuni dei quali da perfetti sconosciuti sono diventati grandi amici.

Ciao.