

UNIVERSITÀ DI PISA



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea

**Progettazione, sviluppo e test per il
microassemblaggio di microcomponenti**

Candidato:

Maurizio Barbuti

Firma _____

Relatori:

Ing. : Gualtiero Fantoni

Firma _____

Prof. Ing. : Marco Santochi

Firma _____

Ing. : Vinicio Tincani

Firma _____

Sessione di Laurea del 02/03/2011
Archivio tesi Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica
Anno accademico 2009/2010
Consultazione consentita

1.	Abstract	4
2.	Stato dell'arte	5
2.1.	Problemi legati all'assemblaggio di microcomponenti	6
2.2.	Manipolazione con contatto fisico.....	7
2.2.1.	Forze elettrostatica.....	7
2.2.2.	Forze di Van der Waals	8
2.2.3.	Tensioni superficiali	9
2.2.4.	Confronto.....	9
2.2.5.	Conclusioni.....	10
2.2.6.	Rilascio dell'oggetto dal gripper	11
2.2.7.	Gripper meccanici	11
2.3.	Gripper adesivi.....	14
2.4.	Gripper a depressione	16
2.5.	Trasporto di oggetti su onde ultrasoniche.....	16
2.6.	Micromovimenti distribuiti.....	17
2.7.	Assemblaggio seriale e parallelo.	19
2.8.	Il disegno biomimetico	21
2.8.1.	Sfide in Microassemblaggio	22
2.8.2.	Applicazione ai Microassemblaggi	23
2.8.3.	Attuazione concreta del fenomeno dell'abscissione.....	23
3.	Rilevatore indiretto della forza di serraggio.....	26
3.1.	Introduzione	26
3.2.	Progettazione Gripper	27
3.2.1.	Controllo indiretto della forza di grasping	27
3.2.2.	Modelli FEM	29
3.2.3.	Validazione sperimentale	36
3.3.	Test e controllo	40
3.3.1.	Descrizione della strumentazione utilizzata	41
3.3.2.	Fasi dell'esperimento.....	47
3.4.	Confronto tra i risultati FEM e quelli sperimentali.....	53
4.	Avvitatore per microviti.....	55
4.1.	Introduzione	55
4.2.	Schema dei carichi dei componenti dell'avvitatore.....	60
4.3.	Caratterizzazione della molla con Ansys.....	70
4.3.1.	Sistema Base Fissa - Molla.....	70
4.3.2.	Sistema Base Fissa - Molla - Base Mobile.....	73
4.4.	Analisi dell'avvitatore effettuata con Ansys.....	76
4.4.1.	Sistema Completo.....	76
4.4.2.	Analisi virtuale per rilevare la coppia sviluppata dall'attuatore.....	81
4.5.	Colle.....	84
4.5.1.	Procedure d'applicazione	86
5.	Manipolatore per microoggetti.....	87
5.1.	Introduzione	87
5.2.	Progettazione	93
5.2.1.	Primo prototipo realizzato.....	93
5.2.2.	Secondo prototipo.....	96
5.2.3.	Terzo prototipo	98
5.2.4.	Quarto prototipo	102
5.3.	Versione di prototipo automatizzato.....	102
6.	Conclusioni e sviluppi futuri.....	105

7.	Appendice	106
7.1.	Script Ansys del gripper con carico concentrato sui polpastrelli.....	106
7.2.	Script Ansys del gripper con contact12	125
7.3.	Disegni	136
7.3.1.	Disegni Avvitatore.....	136
7.3.2.	Disegni dispositivo solleva rosette: primo prototipo.....	142
7.3.3.	Disegni dispositivo solleva rosette: terzo prototipo	149
7.3.4.	Disegni dispositivo solleva rosette: quarto prototipo	154
7.3.5.	Disegni dispositivo solleva rosette automatizzato.....	158
8.	Bibliografia	164

1. ABSTRACT

In questa tesi viene studiata una stazione di microlavorazione composta da un microgripper, un microavvitatore ed un micromanipolatore per realizzare un collegamento tra due oggetti di materiale plastico utilizzando una micro-rosetta ed una micro-vite autofilettante. Lo studio si articola in tre parti. La prima parte consiste nella progettazione e realizzazione di un dispositivo capace di rilevare la forza di contatto durante le operazioni di pick and place, installato su un microgripper precedentemente realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Nucleare. La seconda parte della tesi ha previsto la progettazione e la realizzazione di un avvitatore azionato da un attuatore piezoelettrico. Lo spostamento generato dall'attuatore comprime una molla progettata e realizzata sulle specifiche fornite da questa tesi al fine di trasformare l'azione lineare dell'attuatore in una coppia torcente capace d'avvitare micro-viti. L'ultimo elemento studiato riguarda un innovativo manipolatore capace di afferrare micro-oggetti dalle svariate dimensioni e geometrie. L'afferraggio sfrutta le forze capillari generate da una goccia d'acqua, ed il rilascio dei micro-oggetti invece è basato sulle doti di idrofilia ed idrofobia di un particolare tessuto realizzato dall'università danese "DTU" che costituisce il fulcro del manipolatore. Tutti i componenti sono stati realizzati presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Pisa. Ad eccezione dell'avvitatore per il quale non è stato possibile reperire un generatore sufficientemente potente per farlo azionare, sono stati testati sperimentalmente tutti i componenti ottenendo ottimi risultati.

In this thesis we studied a micro station composed by a micro-gripper, a micro-screwdriver and a micromanipulator for making a link between two objects of plastic materials using a micro-washer and a micro-screw. The study is composed of three parts. The first part is about the design and implementation of a device able to detect the contact force during the pick and place operations. The device was installed in a micro-gripper previously realized by the Department of Mechanical and nuclear Engineering. In the second part of the thesis it was designed and completed a screwdriver driven by a piezoelectric actuator. The movement generated by the actuator compresses a spring, which was designed and built thanks to the specifications provided by this thesis, in order to transform the linear action of the actuator in a torque able to screw micro-screws. The last studied element is an innovative manipulator able to grip micro-objects with a variety of sizes and geometries. This grip exploits capillary forces generated by a drop of water, and the release of micro-objects is based on the qualities of hydrophilic and hydrophobic properties of a particular material, made by the Danish University "DTU", that constitutes the core of the manipulator. All components have been manufactured in the laboratories of the Department of Mechanical Engineering of the University of Pisa. All components were tested with good results, with the exception of the screwdriver, because it was not possible to find a generator powerful enough to operate it.

2. STATO DELL'ARTE

La realizzazione della maggior parte dei prodotti industriali richiede una complessa fase iniziale di assemblaggio, che consiste nella riunione di vari componenti in sottogruppi, successivamente in gruppi ed infine nella riunione dei gruppi per ottenere il prodotto o la macchina richiesta.

Alcune operazioni di assemblaggio quali quelle ottenute con il collegamento mediante viti e bulloni oppure quelle ottenute per saldatura, hanno carattere del tutto tecnologico; altre comportano l'adozione di appositi meccanismi di montaggio come robots industriali.

L'assemblaggio riguarda sia i macro che i micro prodotti (dimensioni del millimetro fino a dimensioni del nanometro) che stanno avendo sempre più rilevanza a causa della miniaturizzazione dei sistemi elettromeccanici. I prodotti ottenuti, chiamati micro-electromechanical systems (MEMS), hanno un potenziale enorme anche se tuttora inutilizzato. Proprio per questo, studi del CIRP - College International pour la Recherche en Productique - prevedano attorno alle tecnologie dei microsistemi, un mercato multimiliardario.

Le prime tecniche di microassemblaggio sono nate nel mondo della microelettronica, dove l'assemblaggio si limita al 2D. Il trasferimento delle loro conoscenze in campo 3D non è facilmente applicabile.

Nonostante le molteplici difficoltà incontrate, ad oggi sono molti gli studi applicati a questo campo dato che l'importanza dei micro-electromechanical systems venne già rilevata da Nexus (rete Europea per i microsistemi multifunzionali), la quale nel 1998 istituì una task force denominata "Market Analysis - MST" incaricata di esaminare l'andamento dei mercati "MST" dall'anno 1996 all'anno 2002.

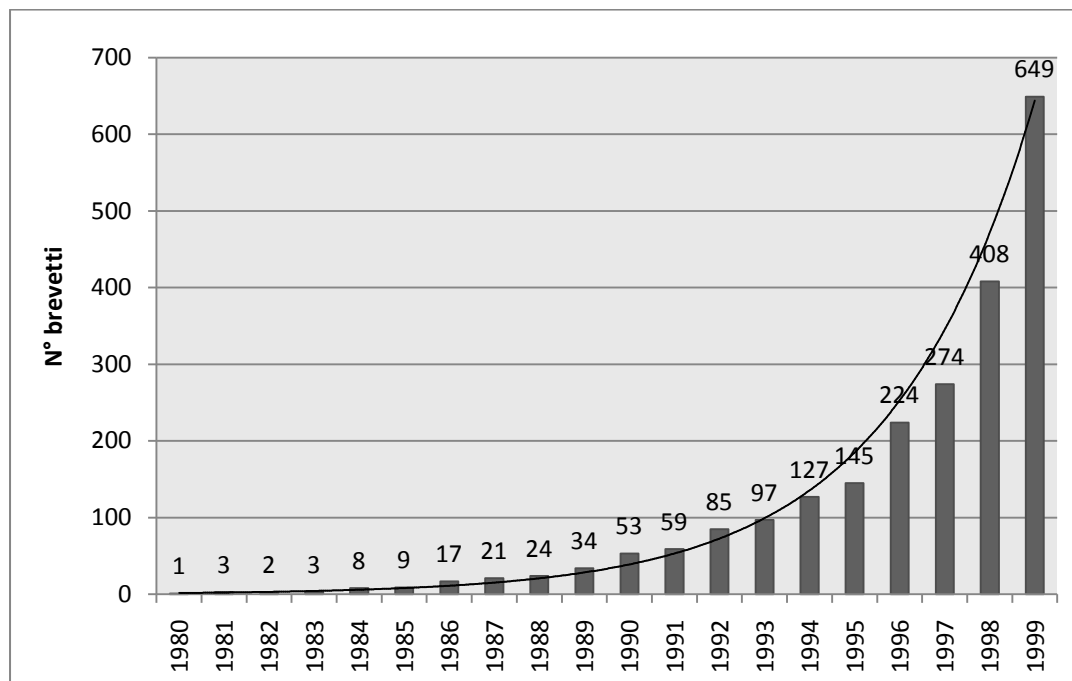


Fig. 2.1 Numero di brevetti riguardanti i MEMS (Fonte: Roger Grate Associates)

Tale ricerca fornì una previsione di crescita continua del 18% annuo, passando dai 14,4 miliardi di euro nel 1996, ai 38 miliardi di euro del 2002. L'analisi inoltre, prevedeva che nel 2002 i campi di applicazione più importanti sarebbero stati:

- testine per hard disk (12 miliardi di euro)
- testine per stampanti a getto d'inchiostro (10 miliardi di euro)
- pacemakers per il cuore (3,7 miliardi di euro)
- dispositivi diagnostici in-vitro (2,8 miliardi di euro)
- apparecchi acustici (2 miliardi di euro)
- sensori di pressione (1,3 miliardi di euro)
- sensori chimici (0,8 miliardi di euro).

2.1. Problemi legati all'assemblaggio di microcomponenti

Le principali differenze tra il macro ed il micro assemblaggio risiedono nella notevole precisione con cui si esegue il posizionamento dell'oggetto meccanico per effettuare l'assemblaggio automatico. Basti pensare che nel macro assemblaggio si utilizzano robot a 4÷6 gradi di libertà, i quali non riescono a garantire precisioni inferiori a qualche centinaia di micron, mentre nel microassemblaggio, spesso sono necessarie precisioni inferiori al micron. Risulta evidente che tali precisioni non sono raggiungibili con i tradizionali sistemi di regolazione a ciclo aperto convenzionalmente utilizzati nelle industrie tradizionali. Per questo nel microassemblaggio si devono utilizzare particolari accorgimenti, come sistemi di regolazione a ciclo chiuso, per compensare sia errori cinematici sia errori dovuti a dilatazioni termiche della struttura. Tuttavia tali esigenze si scontrano con la limitatezza di spazio e con la necessità di utilizzare sensori molto sensibili.

La movimentazione manuale dei microcomponenti è ostacolata dalla perdita della coordinazione diretta tra l'occhio e la mano, questo perché per osservare il micromondo sono necessari microscopi, e per effettuare la manipolazione sono necessari microgrippers. Per ottenere una buona risoluzione visiva, è quindi necessario utilizzare un microscopio a forte ingrandimento. La conseguenza risulta nel lavorare in un campo visivo ristretto (spesso più piccolo dell'oggetto stesso), in una breve profondità di messa a fuoco (limitata chiarezza visiva) ed in una piccola zona di lavoro. È possibile anche ridurre l'ingrandimento per aumentare il campo visivo, ma questo va a scapito della risoluzione. Inoltre, i microgrippers hanno molti meno gradi di libertà che non la mano umana ed in oltre, in genere i microgrippers non forniscono alcun ritorno di forza. Una soluzione a questo problema risulta l'utilizzo dei sistemi di visione anche se questa strada presenta non poche problematiche. Infatti la vista del sistema di visione può essere ostruito da oggetti che hanno ordini di grandezza maggiore degli oggetti in esame, inoltre la telecamera stessa ed altri strumenti ottici, possono ostacolare fisicamente la corretta manipolazione degli oggetti, specialmente in 3D. Esistono numerosi altri problemi correlati all'utilizzo del sistema di visione come la lentezza della risposta restituita, il costo molto elevato, la difficoltà della programmazione, la riflessione, le variazioni di colore e le condizioni di luce dell'ambiente in cui opererà il gripper.

Un'altra differenza tra l'assemblaggio di micro e macro sistemi è l'interazione meccanica che si genera fra i corpi. In entrambi i sistemi le forze in gioco sono le medesime. La differenza consiste nella prevalenza di una o dell'altra forza a seconda delle dimensioni dell'oggetto in esame. Nel macro mondo, aprendo le dita del gripper, la forza gravitazionale predomina sulle altre forze facendo cadere l'oggetto. Nel micro, la forza dominante non è la forza gravitazionale, a causa di effetti di scala, ma sono le forze elettrostatiche, la forza di Van der Waals e le forze di tensione superficiale. Questo perché la massa è funzione del volume $[L^3]$, mentre la rigidità e la resistenza alla trazione sono proporzionali rispettivamente a $[L]$ e $[L^2]$. Questo fa sì che una diminuzione della dimensione dell'oggetto in esame $[L]$, farà diminuire maggiormente la massa rispetto alla rigidità ed alla flessione, con conseguente prevalenza delle forze elettrostatiche e di Van

der Waals rispetto alla forza gravitazionale. Con l'aumento delle dimensioni dell'oggetto si avrà l'inversione del peso delle forze in gioco.

Un ulteriore differenza tra il macro ed il micro mondo è il costo dell'assemblaggio. I microcomponenti generalmente sono costituiti da centinaia o migliaia di parti in un singolo elemento e quindi il costo di solito è molto elevato. A tal fine per ridurre i costi si utilizza un assemblaggio in parallelo. Quando l'assemblaggio di questi microsistemi è effettuato uno ad uno, sia esso manuale od automatizzato, si aumentano notevolmente i costi di produzione.

2.2. Manipolazione con contatto fisico

I problemi nell'assemblaggio sono legati essenzialmente al modo in cui viene prelevato, posizionato e rilasciato l'oggetto.

Quando gli oggetti da manipolare sono di dimensioni inferiori al millimetro, le forze adesive che si generano tra pinza ed oggetto possono risultare significative rispetto alla forza gravitazionale. Si potrebbe pensare di utilizzare le forze superficiali come forze adesive per afferrare l'oggetto. Il problema è che queste forze risultano incontrollabili, ma essendo comunque presenti, perché dovute alla carica iniziale dell'oggetto, devono essere considerate durante la fase di pick and place per evitare che l'oggetto si posizioni in modo non corretto sulla pinza.

Le forze adesive vengono generate principalmente dall'attrazione elettrostatica, dalla forza di Van der Waals e dalla tensione superficiale. L'equilibrio tra queste forze dipende dalle condizioni ambientali, come umidità, temperatura, mezzo circostante, condizioni delle superfici, tipo di materiale, e dal moto relativo. Tsuchitani et al. [1] [2] ha studiato le forze superficiali nelle microstrutture, ed è ha concluso che le forze implicate nelle microstrutture solide sono:

- il ponte liquido (dovute alla condensazione dell'acqua) che si genera quando l'umidità dell'atmosfera intorno alle due superfici a contatto risulta essere elevata (oltre il 60%)
- i ponti di idrogeno che si creano tra due molecole di acqua presenti sulle due superfici, quando l'umidità è relativamente bassa
- la forza di Van der Waals, quando le molecole di acqua adsorbite sulla superficie sono quasi scomparse.

2.2.1. Forze elettrostatica

Le forze elettrostatiche si producono o dalla generazione di cariche elettriche (triboelettricità = produzione di cariche elettriche dovute a sfregamento) o dal trasferimento di cariche elettriche durante il contatto tra corpi. La relazione che determina la forza per unità di area (pressione) tra due superfici è la seguente:

$$p = \frac{1}{2} \varepsilon |E|^2 = \frac{\sigma_x^2}{2\varepsilon} \quad (1)$$

Dove “ ε ” è la costante dielettrica, “E” l'intensità del campo elettrico e “ σ ” la densità di carica. A pressione atmosferica ed ad una distanza di qualche centimetro, la resistenza della conduzione dielettrica dell'aria è circa 30 [kV/cm], il che limita la massima densità di carica a circa 3×10^{-5} [C/m²], od a pressioni di circa 50 [Pa]. Tuttavia, per piccole

distanze dell'ordine di 1 [μm], si sono verificate anche grandezze superiori a due ordini di grandezza.

Con buoni isolanti come il silice liscio e mica, anche ad 1 [μm] di distanza, la densità di carica può aumentare fino a 10 [mC/m²] con pressioni dell'ordine di 1 [MPa]. Quando due materiali con diversa carica vengono a contatto, la carica si distribuisce tra di essi per equiparare il potenziale.

Si considerino due sfere di metallo (isolate) portate a contatto e poi lentamente separate. Con un potenziale di contatto di 0,5 [V], la densità di carica iniziale sarà di circa 4 [mC/m²], con intensità di campo di 5 [mV/cm] [3], (dove l'intensità di campo rappresenta la differenza di potenziale tra due punti posti a 1 [m] di distanza). Per piccole distanze (dell'ordine di 1 [nm]), l'effetto tunnel elettronico e le emissioni di campo possono creare un trasferimento di carica, e per grandi distanze (dell'ordine di 1[μm]), può verificarsi la conduzione dielettrica dell'aria. Teoricamente, utilizzando gripper conduttori si potrebbe ridurre gli effetti di carica elettrostatica. Tuttavia, gli oggetti da manipolare, come pezzi in silicio, potrebbero essere ricoperti con materiali isolanti, come gli ossidi naturali. Mantenendo diversi giorni il silicio in aria, a temperatura ambiente, si forma uno strato di ossido naturale con spessore che può arrivare anche fino ad 1 [μm]. L'ossido naturale risulta un buon isolante e può resistere ad un'intensità di campo massimo di 30 [MV/cm] [3]. Questo vuol dire che l'ossido è in grado di conservare un gran quantitativo di carica. Con la costante dielettrica del silicio ($\epsilon = 3,9 \epsilon_0$), si possono raggiungere pressioni di picco dell'ordine di 100 [MPa]. Quando un gripper dotato di messa a terra, afferra un oggetto inizialmente carico, la carica può essere distribuita in zone del dielettrico che non sono in contatto. La rugosità superficiale del gripper può evitare la neutralizzazione della carica, attraverso il contatto di regioni di carica opposta. Le cariche residue possono causare adesioni.

2.2.2. Forze di Van der Waals

In chimica per forza di van der Waals si intende un tipo debole di attrazione intermolecolare causata da dipoli molecolari indotti. Il nome viene dal fisico olandese Johannes Diderik van der Waals che osservò deboli forze attrattive dovute a perturbazioni della nuvola elettronica nei gas nobili. Molecole complessivamente neutre sono soggette ad un'interazione elettrostatica, dovuta a fluttuazioni nella distribuzione delle cariche. Si tratta di forze attrattive a grande distanza e repulsive a piccola distanza, espresse analiticamente dalla legge di Lennard-Jones. Maggiori sono le dimensioni delle molecole di gas, maggiori sono queste forze, dato che aumenta il numero di elettroni che possono essere perturbati per formare dipoli indotti. E' un legame molto più debole del legame ionico e covalente.

La forza di Van der Waals che si genera tra una sfera ed un gripper piano può essere approssimata con:

$$F_{vdw} = \frac{Hr}{6Z^2} \quad Z \ll r \quad (2)$$

Dove "H" è la costante di Mammaker, "Z" la distanza tra le superfici, ed "r" il raggio della sfera.

Quando la distanza tra gli atomi tende a zero, le forze di attrazione si trasformano in forze repulsive. Pertanto, la minima distanza tra le superfici è approssimativamente assunta pari a 0,2 [nm]. Ad esempio, la forza che si sviluppa tra una sfera di diametro di 100 [μm] di SiO₂ ed un gripper in silicio, è uguale a 2,3 [μN].

Tale formula è valida per superfici lisce e per forze che decadano rapidamente all'aumentare della distanza. Per questo motivo, F. Arai [4], ha ricoperto le superfici delle

pinza con piccole piramidi. Queste piramidi sono costituite da incisioni anisotrope di "Si", poste ad intervalli di 10 [μm] l'una dall'altra e profonde un paio di micron. Le piramidi possono generare l'auto scarica a causa dell'elevato campo elettrico che si raggiunge sulle punte riducendo l'aria di contatto, ma al tempo stesso possono danneggiare la superficie di afferraggio. Inoltre le punte delle micro piramidi possono rompersi contaminando l'ambiente. Per migliorarne l'effetto, le micro piramidi sono rivestite con un sottile strato metallico.

2.2.3. Tensioni superficiali

Quando un corpo è esposto all'ambiente, sulla sua superficie si forma per adsorbimento, un sottile strato di acqua. In tale condizione, quando i due oggetti vengano uniti, lo strato di acqua che ricopre entrambi gli oggetti, si unisce in un unico film. A causa della tensione superficiale, i due corpi vengano attratti uno contro l'altro. L'aumento di umidità, raggi di curvatura maggiori, tempi di contatto più lunghi e superfici idrofiliche aumentano la tensione superficiale.

L'equazione di Kelvin [5], fornisce la misura della minima distanza che deve esserci tra le superfici in funzione dell'umidità relativa, al fine di prevenire la formazione di uno strato stabile di acqua tra i due oggetti. Questo strato di umidità provoca diversi problemi: le superfici degli oggetti subiscono un'attrazione che possono limitare il corretto funzionamento del meccanismo di rilascio e di aggancio dell'oggetto da parte del gripper, si verificano cortocircuiti elettrici ed aumenta l'attrito.

La soluzione consiste nel togliere l'acqua mediante tecniche di essiccazione. Per ridurre l'incollaggio generato dalle tensioni superficiali, possono essere fatte delle micro incisioni o possono essere lasciate delle micro creste sulla superficie di contatto. Ma queste possono soltanto rimuovere l'umidità dovuta al metodo di fabbricazione, per esempio dopo il lavaggio del pezzo. Quando la microstruttura non è racchiusa in un contenitore sigillato, il vapore acqueo può condensare su di essi durante l'uso formando strati di ossido naturale di silicio e di altri metalli non nobili. Un modo efficace per evitare l'adesione dei due corpi è quello di rivestire l'oggetto di materiale idrofobici. Le gocce potranno quindi esercitare una forza repulsiva piuttosto che una forza attrattiva. Per essere efficace, l'angolo di contatto tra l'acqua ed il rivestimento dovrebbe essere superiore a 90° .

2.2.4. Confronto

La Fig. 2.2 riporta l'andamento della forza adesiva e della forza di gravità in funzione del raggio dell'oggetto. Si considera che l'oggetto sia una sfera di silicio e che sia presa da un gripper con superficie piana. Per un corretto posizionamento, le forze adesive devono essere un ordine di grandezza inferiore alle forze gravitazionali, in quanto le tensioni superficiali dominerebbero e questo deve essere evitato. Le forze di Van der Waals possono diventare significative per raggi inferiori a 100 [μm] generando dal contatto cariche elettriche che potrebbero rendere inaffidabile la manipolazione di oggetti di dimensioni inferiori a 10 [μm].

Dalla Fig. 2.2 è possibile dedurre che mentre per l'afferraggio di oggetti di diametro maggiori di 1 [mm] le forze elettrostatiche risultano le forze di adesione più piccole, si può addirittura sostenere che siano le maggiori forze di afferraggio per oggetti di dimensione comprese tra 10 [μm] e 1 [μm].

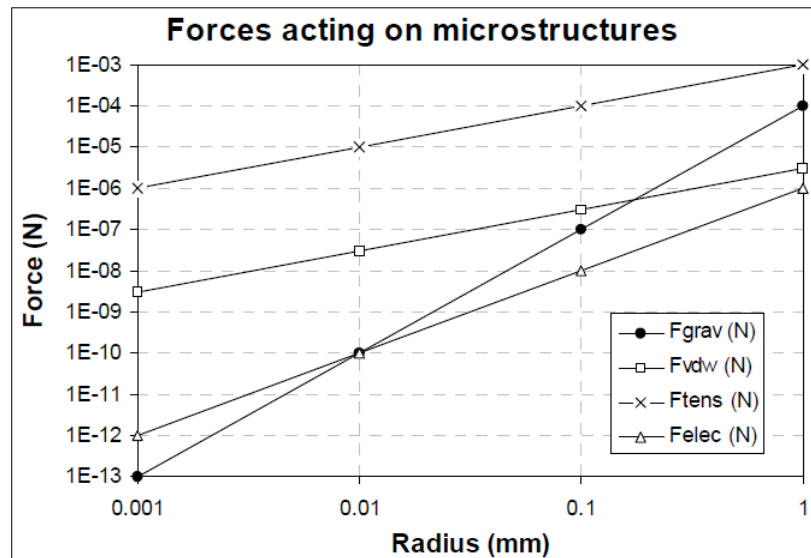


Fig. 2.2 Confronto tra le forze di adesione e le forze gravitazionali risultanti tra oggetti sferici ed il gripper.

Il primo motivo di tale variazione è dovuta al fatto che le forze di Van der Waals sono rilevanti solo per distanze non superiori a circa 100 $[\mu\text{m}]$. A meno che gli oggetti non siano molto lisci, l'effettiva distanza che intercorre tra la pinza e l'oggetto sarà maggiore, tranne che nei punti di contatto. Perché la tensione superficiale sia rilevante ci deve essere un contatto tra la superficie ed uno strato fluido, per eliminare questo effetto della tensione superficiale si può lavorare in un ambiente asciutto o sottovuoto.

Considerando che le forze elettrostatiche possono comparire per distanze dell'ordine del raggio dell'oggetto, se ne deduce che la rugosità delle superfici risulta meno importante per le forze elettrostatiche che non per le forze di Van der Waals.

2.2.5. Conclusioni

Scegliendo correttamente la geometria ed il materiale con cui si realizza il gripper, è possibile ridurre l'effetto di adesione. A tal fine è consigliabile seguire i punti riportati di seguito (Fearing, R.S [3]):

- Costruire il gripper e l'oggetto con materiali dotati di una minima differenza di potenziale
- utilizzare materiali conduttori che non formino facilmente ossidi superficiali
- mantenere l'area di contatto di piccole dimensioni. Pertanto, sono preferibili polpastrelli sferici che non piani. L'area di contatto può essere ridotta aumentando la rugosità del gripper. Questo potrà ridurre notevolmente la forza di Van der Waals
- alte pressioni di contatto, generate dalla forza d'adesione, possono causare deformazioni locali nella zona di contatto (deformazioni hertziane). Queste deformazioni possano aumentare l'area di contatto e di conseguenza le forze adesive. Pertanto, sono preferibili materiali duri
- l'effetto delle tensioni superficiali può essere ridotto utilizzando un ambiente secco e rivestimenti idrofobi. Un'alte alternativa è quella di eseguire l'assemblaggio all'interno di un fluido, che elimina gli effetti delle tensioni elettrostatiche e superficiali. L'effetto delle tensioni superficiali può aiutare per far aderire meglio l'oggetto nella sua locazione target che non al gripper
- cariche libere come nell'area ionizzata possono combinarsi insieme neutralizzando le cariche superficiali

2.2.6. Rilascio dell'oggetto dal gripper

Nella fase di rilascio del pezzo dal gripper, se la forza dominante è la forza di gravità, nel momento in cui il gripper apre le dita, la forza di gravità fa cadere l'oggetto nella posizione desiderata. In caso contrario, possono essere utilizzati diversi metodi come ad esempio:

- incollare l'oggetto nel posto giusto, Bark [6]
- rilasciare il componente mediante un apposito attrezzo meccanico, Bark, Böhlinger [6]
- iniezione di gas: un piccolo soffio di gas spinge via l'oggetto dal gripper, Bark, Zesch [6] [7]. Questa tecnica è particolarmente adatta quando vengono utilizzate gripper a depressione
- utilizzo di un meccanismo di rilascio costituito da un ago: l'ago spingerà l'oggetto fino a quando la tensione superficiale tra l'oggetto e l'ago sarà limitata. Raggiunta tale condizione la forza dominante sarà la forza di gravità in modo tale che l'oggetto potrà così rimanere nel posto voluto anche durante la fase di rimozione dell'ago, Bark, Zesch [6] [7]
- distruzione del gripper. Per esempio l'oggetto può essere rilasciato dal gripper riscaldando la pinza al fine di far evaporare il liquido adesivo. Un altro esempio è l'utilizzo di micro gripper ghiacciati e poi rilasciati a seguito di scongelamento, El-Khoury [9]
- vibrazione del gripper, Böhlinger [10]
- sblocco meccanico per contatto con un bordo tagliente, Zesch [8]
- usando effetti adesivi: l'adesione tra il substrato ed il microcomponente deve essere più resistente che non quella tra il gripper ed il microcomponente
- usando movimenti di rotolamento del gripper.

2.2.7. Gripper meccanici

I gripper meccanici sono comunemente usati per manipolare grandi oggetti. L'utilizzo di tali gripper nel micro mondo comporta una serie di problemi: forze troppo elevate possono danneggiare l'oggetto, oppure possono farlo saltare via od addirittura perderlo; mentre forze troppo deboli rischiano di far scivolare l'oggetto dalle dita. Pertanto, la forza esercitata dalla pinza dovrebbe essere controllata con precisione. Il modo migliore per afferrare micro-oggetti è quello di utilizzare microgripper in cui la forza di afferraggio e le dimensioni delle dita corrispondono ai valori richiesti. Ad oggi sono stati costruiti molti tipi di microgrippers. La Fig. 2.4 mostra un microgripper di tipo elettrostatico che ha una lunghezza totale di 400 [μm] ed uno spessore di 2,5 [μm]. Applicando una tensione di 45 [V], la pinza si chiude completamente. Teoricamente, a 50 [V] si ottiene una forza massima di serraggio di 0,1 [μN]. Tale gripper è stato utilizzato per afferrare sfere di polistirolo microscopiche di diametro 2,7 [μm], globuli rossi essiccati, e vari protozoi. Lo studio dei microgrippers ha presentato molti problemi, infatti sono molto fragili e devono essere utilizzati, immagazzinati e trasportati con cura. I microgripper come quello in Fig. 2.4 rischiano di rompersi istantaneamente se sottoposti ad un movimento più brusco di quello per cui sono stati progettati per la normale manipolazione. Tali rotture sono dovute alla resistenza che l'aria oppone al gripper durante il moto.

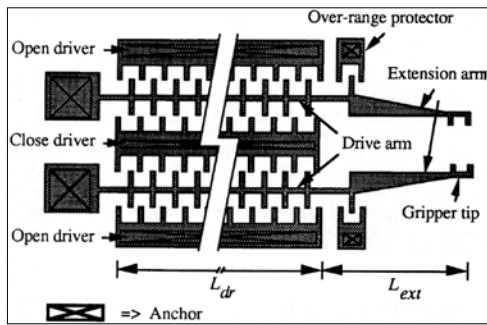


Fig. 2.3 Microgripper elettrostatico

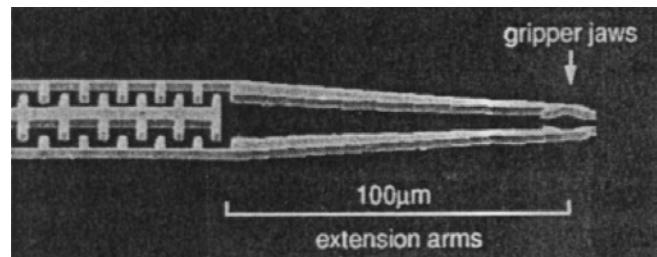


Fig. 2.4 Microgripper elettrostatico

Oltre al microgripper di tipo elettrostatico ne esistono anche altre tipologie che possono essere azionati idraulicamente (gripper di Suzumori [11]) o pneumaticamente (gripper di Peirs [12]).

Il gripper di Suzumori, è costituito da un dito mobile che quando viene messo in pressione si piega ed impatta contro l'alto dito che rimane fermo. Il prototipo ha dimensioni massime di 8 [mm] di larghezza e 18 [mm] di lunghezza ed ha una forza di presa di 2[N]. Il gripper di Peirs [12], è costituito da un pistone che guida contemporaneamente entrambe le ganasce grazie ad un particolare collegamento. Il prototipo ha un diametro di 5 [mm], e 18 [mm] di lunghezza e genera una forza di serraggio di 5 [N] ad una pressione di 10 [bar]. Questi gripper sono dotati di un sensore ad effetto Hall per misurare l'apertura della pinza. Altri progetti utilizzano un dito attaccata ad un piattaforma piezoelettrica Stewart. Tanikawa [13] usa due piattaforme di Stewart a sei gradi di libertà. Ogni piattaforma guida un dito, che è in realtà un ago di vetro. In questo modo è possibile afferrare, posare e ruotare sfere di vetro di diametro di 2 [μm], con accuratezza di posizionamento 0,1 [μm]. In Fig. 2.5, vengono riportati due microgrippers di Weck [14]. Sono composti da due dita di spessore 0,2 [mm] realizzate in lega di rame e berillio, che permettono la presa. Le dita sono montate su una piastra di acciaio non magnetico di alta qualità. Le dita possono essere realizzate in diverse forme e materiali.

In Fig. 2.5 vengono utilizzate due pinzette di 10 [μm] di spessore e di 50 [μm] di larghezza. Tali pinzette sono fissate alle dita del gripper mediante una resina adesiva. Il materiale utilizzato per realizzare le pinzette può essere sia titanio che acciaio di alta qualità. Tra i due bracci del gripper è presente un lamierino piegato ad U che ricopre il ruolo di una molla, e che ha la funzione di tenere aperte le pinze. E' possibile comprimere la molla ad U tirando il filo che viene posto esattamente nel centro del lamierino. Tale meccanismo garantisce una sistematica apertura delle pinze. La forza da applicare al filo, per aprire le pinzette, viene generata da un trasduttore a disco piezoelettrico o da un Picomotor piezoelettrico.

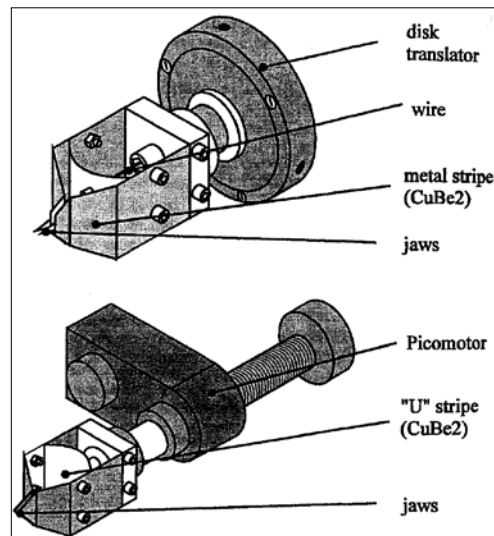


Fig. 2.5 Gripper piezoelettrico

Esistono anche esempi di gripper a dita parallele come proposto da Carrozza et al. [15], e Ando et al. [16], guidate da un piezoelettrico in cui il movimento è amplificato mediante meccanismi a leva utilizzando cerniere flessibili. Breguet [17] ha creato la pinza del gripper direttamente da una piastra di piezoceramica, come mostrato in Fig. 2.6. Gli elettrodi sono progettati per rendere attive solo le parti che si trovano sotto di loro. Inoltre tale gripper può essere facilmente integrato montando su un dito un sensore di forza piezoelettrico.

Questo gripper ha una lunghezza complessiva di 3 [cm] e può raggiungere un'apertura delle dita di 18 [μm] se sottoposto ad una tensione di 150 [V].

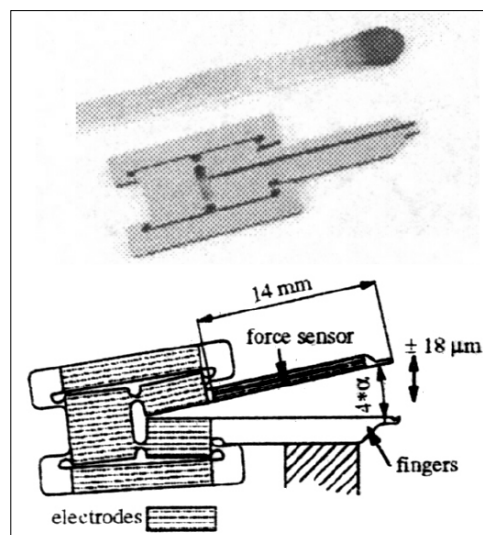


Fig. 2.6 Microgripper Piezoelettrico

Un approccio simile è stato seguito da Bellouard [18] per la progettazione di un gripper SMA. L'intera struttura del gripper è ottenuta dal taglio di un'unica lastra di SMA. Un prototipo utilizza una memoria di forma bidirezionale, mentre l'altro utilizza l'elasticità della struttura stessa, come molla di richiamo. L'ultima versione utilizza il calore locale generato da un raggio laser per far muovere una parte limitata del gripper. Il resto del gripper non subisce alcuna deformazione ed agisce come una molla di richiamo.

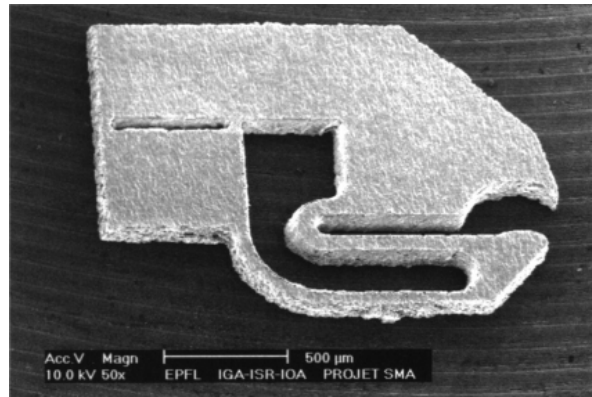


Fig. 2.7 Gripper SMA monolitico

Esistono altri gripper, che sfruttano le deformazioni termiche, come quelli di Greitmann [19] e Keller [20]. Greitmann utilizza un attuatore termico bimorfico per muovere un dito, mentre l'altro dito non viene azionato ma viene dotato di un sensore piezoresistivo per misurare le forze. Il gripper è lungo 1,5 [mm], ha apertura delle dita di 0,8 [mm], può afferrare oggetti con forze superiori a 1 [mN] e può misurare forze con una risoluzione di 0,2 [μ N].

Il microtweezers di Keller utilizza un elemento trave che può espandersi longitudinalmente sotto un adeguato incremento termico, generando così il movimento, che una volta amplificato dalla particolare geometria della struttura (Fig. 2.8.b) genererà l'apertura e la chiusura del gripper. La Fig. 2.8.a mostra un gripper che sfrutta la medesima tecnologia ma che monta pinzette di geometria differente studiate appositamente per l'applicazione da svolgere. Le dimensioni complessive di questo gripper risultano di 2 [mm] di larghezza e di 9 [mm] di lunghezza.

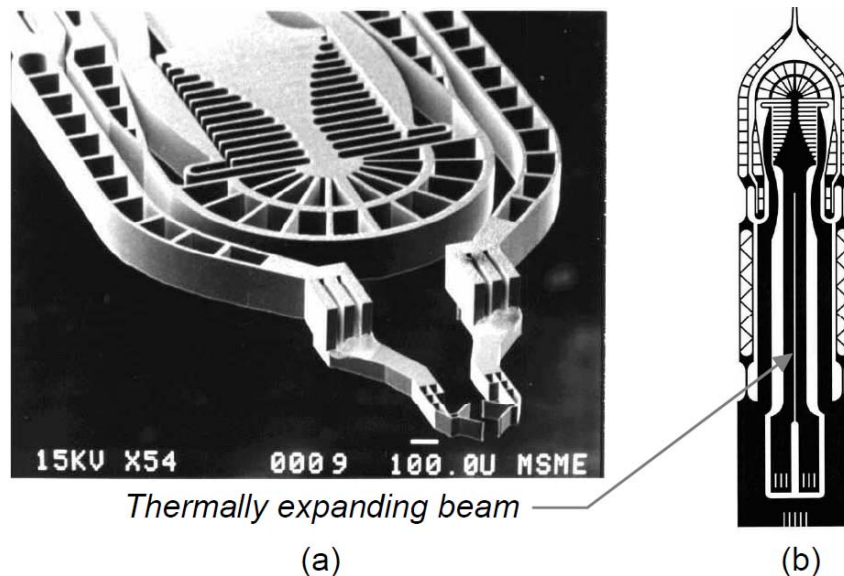


Fig. 2.8 Microtweezers termico

2.3. Gripper adesivi

Precedentemente sono state trattate le forze adesive, è stato detto che tali forze erano forze di disturbo, ma questo non è sempre vero, infatti possono anche essere usate per costruire gripper che sfruttino queste forze per afferrare e manipolare oggetti. Le forze di Van der Waals sono difficili da controllare, per questo il loro utilizzo dovrebbe essere limitato il più possibile. La forza elettrostatica, risulta relativamente facile da controllare,

ma non va bene per manipolare dispositivi IC sensibili alle cariche. Le forze dovute a tensioni superficiali sono forze generate dall'umidità dell'aria, che come tali possono essere controllate inserendo un micro riscaldatore nel gripper. In ambienti freddi, un oggetto può essere afferrato semplicemente toccandolo. Per rilasciare l'oggetto, è sufficiente fare evaporare l'acqua nella zona di contatto mediante un generatore di calore.

Quanto detto fin ora risulta valido soltanto in ambito teorico, in quanto il livello di umidità naturale non è in grado di generare una forza adeguata al sollevamento di oggetti.

Per questo nella pratica, invece di utilizzare i livelli di umidità naturale, la maggior parte dei gripper adesivi, viene dotata nella zona di contatto della pinza di un recipiente di acqua in grado di rilasciare piccole gocce tra la pinza e l'oggetto. In questo modo, quando il dito viene portato a contatto con l'oggetto da manipolare, le forze capillari agiscono perpendicolarmente alla superficie di presa, mentre la tensione superficiale garantisce il centraggio automatico dell'oggetto sulla pinza. Oltre all'effetto dell'auto-centratura, lo strato di liquido offre anche una certa cedevolezza lungo il piano orizzontale durante il montaggio, mantenendo un'elevata rigidità in direzione verticale, il che risulta abbastanza simile a quanto accade nel robot SCARA.

La Fig. 2.9 mostra le varie fasi di funzionamento di un gripper adesivo.

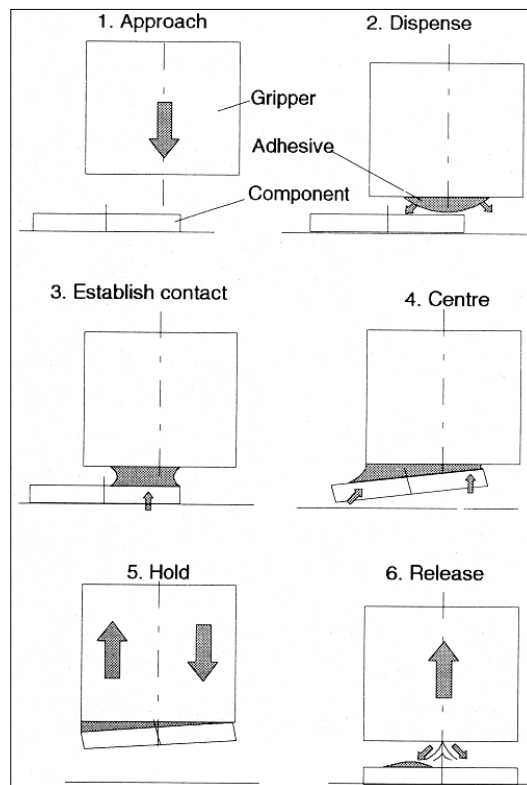


Fig. 2.9 Differenti fasi di lavoro di un gripper adesivo

La presa dell'oggetto è un processo dinamico. In particolare la diffusione delle gocce di liquido richiede un certo tempo. Questo provoca una variazione della forza di serraggio del gripper, dovuto ad esempio alla variazione dell'angolo di contatto tra gripper ed oggetto durante la fase di spargimento e di raccolta del liquido, Grutzeck [21]. Più i liquidi hanno maggiore diffusione, più basso sarà l'angolo di contatto, come nel caso statico. Anche in condizione statiche l'angolo di contatto può essere influenzato nel seguente modo. Generalmente l'angolo di contatto risulta più grande, dopo la diffusione che non dopo la fase di ritiro del liquido. Quando due superfici sono sufficientemente vicine, da far sì che il liquido rimanga al di sopra, il menisco del liquido inizialmente concavo diventa convesso e si genera una pressione invece che una forza di trazione.

2.4. Gripper a depressione

Il gripper a depressione risulta di facile costruzione in quanto costituito da un tubo sottile o pipetta, collegata ad una pompa a vuoto. Questi gripper sono poco costosi e sono facili da riparare. Quest'ultima caratteristica è molto importante perché i microtools sono fragilissimi e quindi devono essere sostituiti frequentemente. Purtroppo i gripper a depressione presentano un problema, in quanto il tubo che trasmette la depressione deve essere molto piccolo per consentire un'adeguata manipolazione, ed è quindi facilmente ostruibile da particelle di piccole dimensioni. Per questo sono state proposte alternative interessanti come quella di riuscire a far auto generare il vuoto direttamente al gripper. Per riuscire a creare il vuoto, sono stati realizzati dei micro fori con diametro di $10 \div 15$ [μm] sui polpastrelli. I fori sono realizzati mediante incisione isotropica del Si. Prima di impattare sull'oggetto, i micro fori del gripper vengono riscaldati in modo da farli espandere e quindi da far restringere il volume interno ai fori. Una volta effettuato il riscaldamento, il gripper viene portato in contatto con l'oggetto da prelevare. Avvenuto il contatto si verifica il raffreddamento del gripper che genera un aumento del volume dei micro fori. Teoricamente questo fenomeno consente di generare depressioni interne ad ogni micro foro dell'ordine di 0,18 [bar]. Tuttavia le forze adesive che sono state misurate sperimentalmente sono state superiori (circa il doppio), probabilmente a causa del contributo delle forze di superficie. La fase di rilascio dell'oggetto, viene fatta aumentando nuovamente la temperatura dei fori. Un pregio di questo tipo di gripper è che risponde molto velocemente a causa della sua piccola dimensione. Tuttavia per un corretto funzionamento deve verificarsi che sia il gripper che gli oggetti da manipolare abbiano superfici lisce per evitare perdite d'aria.

2.5. Trasporto di oggetti su onde ultrasoniche

Gli oggetti possono essere trasportati da onde generate su una superficie piana. Generalmente sono utilizzate due tipi di onde: onda di Lamb e di Rayleigh.

L'onde di Lamb generano una flessione lungo l'intero spessore della piastra (lo spessore è inferiore alla lunghezza d'onda), mentre le onde di Rayleigh si propagano solo sullo strato superficiale della piastra. Gli oggetti posti sulla superficie si muovono in direzione contraria a quella in cui viaggia l'onda. La piastra è realizzata in materiale piezoelettrico dove sono presenti elettrodi di trasduzione interdigitali (IDT) che generano il movimento dell'onda. Deve essere fatta particolare cura al fine di evitare riflessioni ai bordi della piastra. La costruzione ed il principio di funzionamento è identico a quella del motore lineare ad onda viaggiante ultrasonica.

Hélin [22] ha testato prototipi che lavorano con onde a 10 e 20 [MHz], raggiungendo una velocità di 18 [cm/s]. Il controllo del movimento è ottenuto regolando il tempo di guida dell'IDT. Un tempo d'azionamento di 100 [μs] sposta l'oggetto di 20 [nm], mentre un tempo d'azionamento di 50 [ms] muove l'oggetto di 1 [mm].

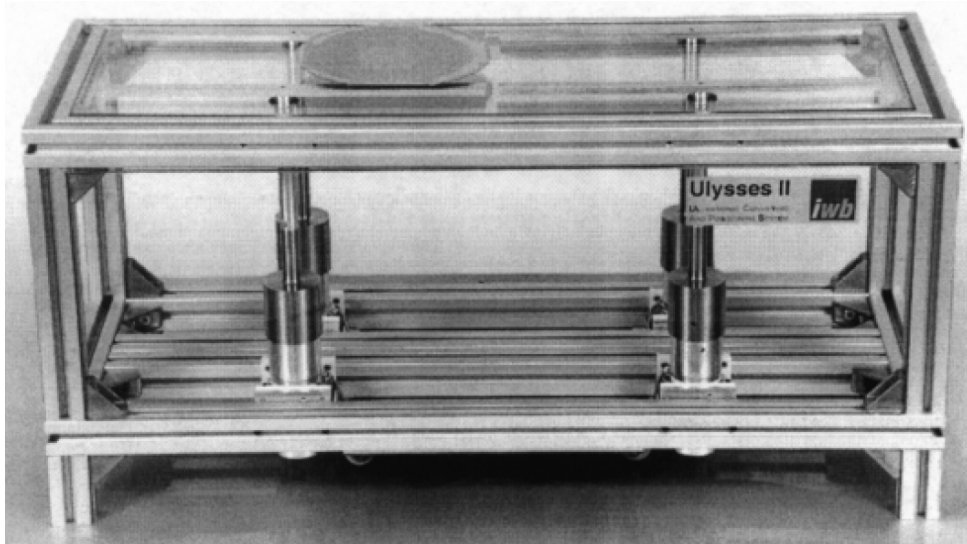


Fig. 2.10 Trasporto non tattile mediante onde ultrasoniche

Secondo Reinhart [23], i microcomponenti possono essere posizionati e manipolati all'interno di un campo ad onda stazionaria, mentre un sistema di trasferimento non-tattile può essere concepito attraverso l'utilizzo di campi che inducono la levitazione. La Fig. 2.10 mostra un semplice trasportatore piano non-tattile che utilizza onde ultrasoniche.

2.6. Micromovimenti distribuiti

I sistemi di micromovimento distribuito usano schieramenti di semplici attuatori che cooperano per far muovere oggetti posti al di sopra di essi per spostamenti relativamente grandi in direzioni ed orientamenti variabili. Gli attuatori sono costituiti da travi di lunghezza 100 [μm] che vengono attivati termicamente. Questi attuatori vengono chiamati "ciglia" data l'analogia con le loro controparti biologiche che si possono trovare ad esempio nel tratto respiratorio dell'uomo. Uno schieramento di ciglia è in grado di spostare oggetti di piccole dimensioni, collocati sopra di loro, mediante la vibrazione sincronizzata dei minuscoli peli. La Fig. 2.11.a mostra una serie di ciglia termiche in grado di generare un movimento lungo una direzione (in entrambi i sensi). Metà ciglia sono orientate in un senso, l'altra metà nel senso opposto. Entrambi i gruppi di ciglia vengono messe in moto con una differenza di fase di 90° come mostrato in Fig. 2.11.b. Gli ultimi due passaggi generano un piccolo spostamento. Questi sistemi sono in grado di raggiungere velocità di 27 [$\mu\text{m/s}$] con frequenze di funzionamento di 1 [Hz]. Per ottenere spostamenti sia lungo la direzione X che lungo la direzione Y, occorrono quattro ciglia, una per ogni direzione e senso. Il raggruppamento di queste quattro ciglia viene chiamato pixel di movimento. Il sistema di movimentazione consiste quindi in una serie di pixel di movimento. Se ne conclude che un controllo adeguato ne permette il movimento in ogni direzione.

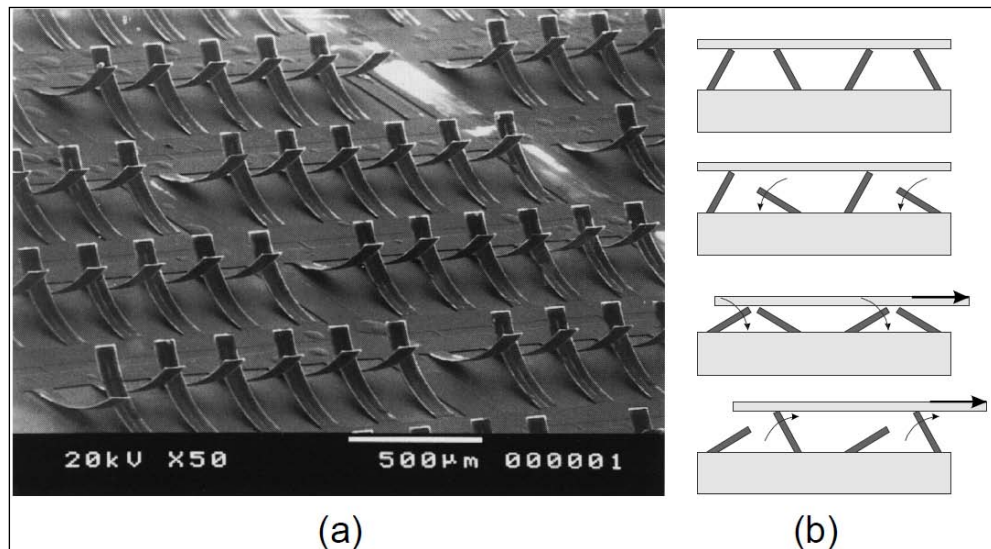


Fig. 2.11 Sistemi di micro attuatori ciliari per la movimentazione

Oltre al tipo di movimentazione termico delle ciglia visto precedentemente, ne esistono anche altre.

Coutinho [24], usa le forze di Lorentz per guidare le ciglia.

Suh [25] utilizza una combinazione termica ed elettrostatica di attuazione delle ciglia. L'attuatore di Suh, è in grado di sollevare oggetti di $70 \text{ } [\mu\text{N}/\text{mm}]$, con passo massimo di $9 \text{ } [\mu\text{m}/\text{ciclo}]$ e velocità di $200 \text{ } [\mu\text{m}/\text{s}]$.

Böhringer [26] usa risonatori torsionali elettrostatici per generare forze di $28 \text{ } [\mu\text{N}/\text{mm}]$. Ogni risonatore è costituito da una piastra sospesa su due travi torsionali che entrano in risonanza per alte frequenze [kHz].

Nel sistema sviluppato da Konishi [28], ogni pixel di movimentazione contiene quattro microugelli, uno per ogni direzione. Il flusso d'aria che esce da questi ugelli, non è utilizzato soltanto per guidare gli oggetti, ma anche per farli sollevare. Ciò evita l'insorgenza dell'attrito, problema importante nella micromeccanica. Il movimento che si genera è veloce, ma difficile da controllare a causa della mancanza di smorzamento. Gli ugelli possono essere chiusi selettivamente mediante forze elettrostatiche. Con un metodo multistrato, è possibile integrare i microattuatori, i sensori ed i circuiti. Si può avere un controllo maggiore sull'oggetto quando il movimento è diviso in zone che sono guidate indipendentemente. Inoltre muovendo una parte dell'oggetto in un modo ed un'altra in un'altro è possibile far ruotare l'oggetto. Il massimo del controllo sull'oggetto si ottiene quando ogni pixel di movimento è controllato in modo indipendente. Come indicato in Fig. 2.12 esistono diversi modi con cui questi microattuatori possono assolvere a specifici compiti di trasporto:

- trasporto
- allineamento
- posizionamento
- rotazione

Se il sistema è in grado di rilevare la posizione degli oggetti, allora quest'ultimo è in grado di muovere contemporaneamente più oggetti in direzioni diverse. Quando tutti gli attuatori devono essere controllati in modo indipendente, il cablaggio diventa un limite a causa delle ridotte dimensioni del dispositivo. Per questo, Mita [29] ha proposto un nuovo concetto di sistemi distribuiti: il comportamento del sistema totale è guidato

principalmente dalle interazioni dei controllori locali. Dato che i micro-attuatori sono molto fragili, i sistemi di trasporto devono essere abbastanza robusti contro i difetti locali.

Böhringer [26] [27] ha dimostrato e testato una strategia di controllo dell'attuatore per orientare e posizionare un oggetto, partendo da posizioni ed orientazioni arbitrarie. Con la loro teoria di campi vettoriali programmabili, è possibile realizzare un campo vettoriale in cascata con un multi-step, consentendo un unico ordinamento del posizionamento degli oggetti senza dover ricorrere a sensori di feedback.

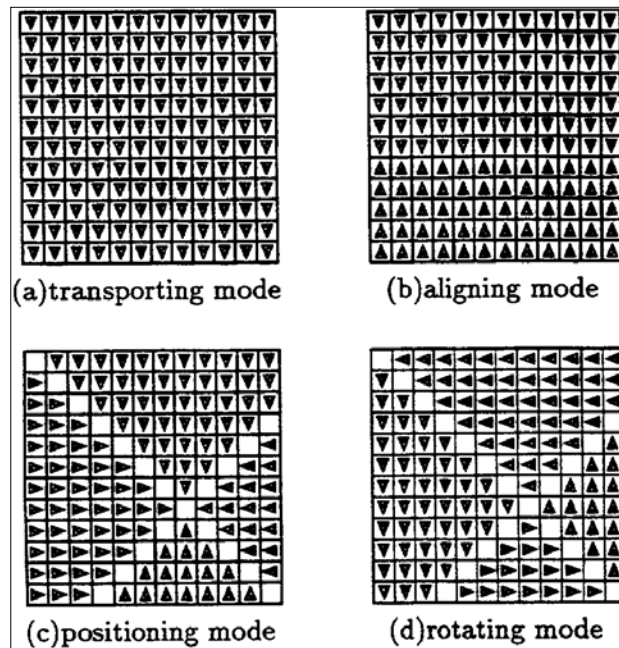


Fig. 2.12 Differenti modi di trasporto

2.7. Assemblaggio seriale e parallelo.

Mentre nel mondo dell'assemblaggio tradizionale possono essere (e sono state) automatizzate quasi tutte le operazioni di assemblaggio, al contrario nel mondo dei mini e micro componenti (almeno una dimensione sotto il millimetro) gli sforzi in questa direzione sono solo ad uno stadio iniziale.

Sebbene siano molti gli studi su tecniche di assemblaggio seriale, che magari cercano di sviluppare sistemi flessibili ed adatti a gestire componenti diversi, esistono molti promettenti studi di assemblaggio parallelo, meno flessibili dei primi, ma con un elevato numero di pezzi assemblati contemporaneamente. In particolare vanno ricordati una serie di metodi che vanno sotto la denominazione Self-Assembly.

Per esempio è stato sviluppato negli Stati Uniti un dispositivo di assemblaggio realizzato tramite una maschera con cavità di forma adatta ad alloggiare i componenti da assemblare (Fig. 2.13). Tali componenti (SMD: Surface Mounted Devices ovvero dispositivi a montaggio superficiale quali ad esempio le resistenze, i diodi, i condensatori usati nelle schede elettroniche) si trovano sospesi in un liquido e vengono trasportati dal flusso verso il supporto. Quando i componenti nel loro moto casuale entrano in una tasca, rimangono "assemblati" in quella posizione, altrimenti scivolano sul supporto e vengono rimessi in circolo. Il meccanismo di selezione e di assemblaggio è basato quasi esclusivamente sulla geometria del componente e delle tasche.

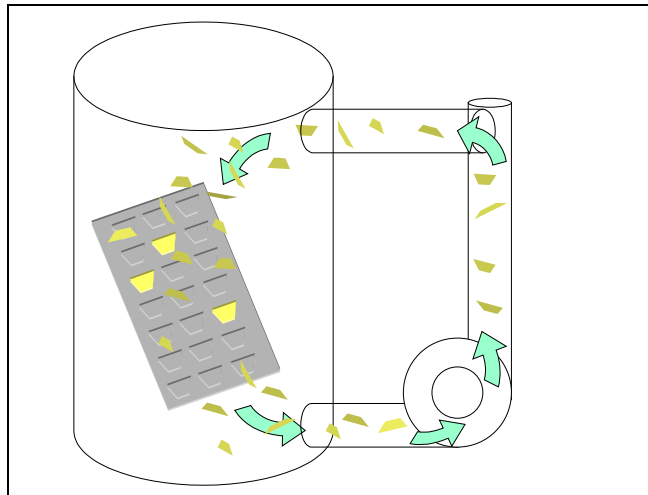


Fig. 2.13 Self Assembly

Altri sistemi sfruttano i campi magnetici: attraverso la creazione di una struttura composta da aree magnetizzate ed altre no, è possibile attrarre e posizionare componenti ferrosi o componenti amagnetici sui quali è stato depositato uno strato di materiale ferromagnetico.

Un altro interessante lavoro [30] ha portato allo sviluppo di un dispositivo elettrostatico per l'assemblaggio in parallelo. Il sistema (rappresentato in Fig. 2.14) è composto da una piattaforma vibrante, una base di alluminio sormontata da un vetrino, un generatore di tensione ed un generatore di segnale. La piattaforma vibrante è realizzata tramite un tubo piezoelettrico che viene messo in vibrazione dal generatore di segnale e portato a vibrare a circa 2200 [Hz]. Sul tubo è montata la base di alluminio su cui si trova un vetrino di 2 [mm] di spessore. Il vetro è stato prima ricoperto di un sottile strato di oro, poi, asportando localmente lo strato conduttore, sono state create delle piccole "finestre".

Applicando quindi una forte differenza di potenziale fra la superficie superiore del vetrino (quello ricoperto d'oro) e quella inferiore di alluminio, sulla faccia superiore del dispositivo, nei pressi delle aperture, si creano aree con un campo elettrico non nullo che tende ad attrarre la materia che gli si trova vicino.

Collocando sulla superficie vibrante alcuni pezzi (l'equipe ha effettuato lo studio utilizzando dei componenti elettronici a forma di parallelepipedo), con dimensioni circa uguali a quelle delle aperture, questi tendono a muoversi di moto casuale sulla superficie finché non viene applicata la differenza di potenziale, a questo punto, quando i pezzi passano vicino alle aperture, vengono catturati dal campo elettrostatico che "esce" dalle aperture stesse e lì tendono a rimanere.

Si ottiene quindi una superficie nella quale sono posizionati ed orientati in maniera regolare i componenti che possono essere poi assemblati tutti allo stesso tempo semplicemente pressandoci contro una maschera predisposta ad alloggiarli.

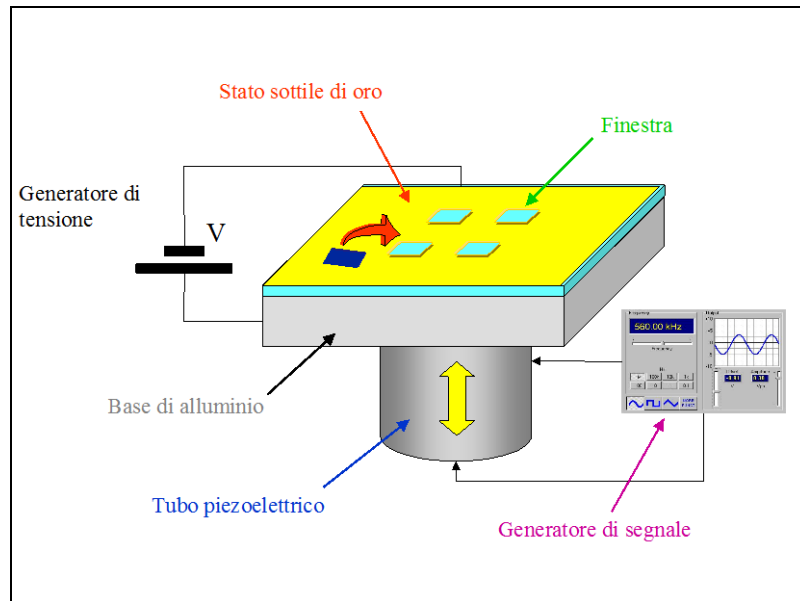


Fig. 2.14 Apparato sperimentale per l'assemblaggio parallelo effettuato tramite forti campi elettrostatici

Lo stesso gruppo di ricerca ha testato anche un altro sistema che parte dalla costruzione di un supporto con zone idrofile e zone idrofobe: le zone idrofobe sono quelle verso le quali i componenti devono muoversi e su cui si devono posizionare ed orientare. Infatti, ricoprendo i pezzi con sostanze idrofobe questi vengono respinti dalle aree idrofile verso le idrofobe dove il componente si auto-assembla [31]. Questi metodi di self-assembly appaiono molto interessanti soprattutto per la loro apparente semplicità e possibilità di automatizzazione del processo anche se problemi di affidabilità ne precludono ancora l'applicazione industriale.

2.8. Il disegno biomimetico

La manipolazione e l'assemblaggio di parti micromeccaniche è resa difficile dalle ridotte dimensioni dei componenti. Recentemente è sempre più frequente l'utilizzo di analogie con il mondo biologico per risolvere problemi in campo ingegneristico.

Il disegno biomimetico utilizza proprio le analogie con i processi biologici per risolvere i problemi nel campo dell'ingegneria. Un esempio ben noto del disegno biomimetico è quello del Velcro che è stato realizzato osservando la facilità con cui le piante di cockleburs si appiccicano agli abiti. Il Velcro è un sistema di chiusura inventato da Georges de Mestral agli inizi degli anni 1950. Il relativo brevetto risale al 1955. L'idea gli venne di ritorno da un passeggiata in campagna. Arrivato a casa si accorse di avere dei minuscoli fiori rossi attaccati alla giacca. Dopo averli analizzati al microscopio si rese conto che questi fiori, sul calice avevano degli uncini, i quali si incastravano ovunque, anche nelle anse formate dai peli del tessuto della giacca.

L'analogia è il procedimento logico con cui si cerca di estendere l'applicabilità di talune proprietà o regole da casi noti e definiti, ad altri che presentino aspetti di ragionevole somiglianza.

Il campo biologico può essere una ricca fonte di informazione per l'ingegneria, in quanto può essere particolarmente appropriato per trovare soluzioni ai problemi per le micro od addirittura nano scale, dal momento che molti processi biologici si verificano nella stessa scala.

Una importante applicazione del disegno biomimetico è lo sviluppo di nuovi gripper per vincere le forze specifiche di superficie nel microassemblaggio.

2.8.1. Sfide in Microassemblaggio

Il montaggio è un processo fondamentale nella fabbricazione del prodotto. Poiché l'assemblaggio dei microprodotti è particolarmente impegnativo, la prima strategia è quella di ridurre quanto più possibile la manipolazione dei microcomponenti attraverso una maggiore quantità d'integrazione dei componenti convenzionali, Alting et al., 2003 [32].

L'articolo di Shu [33] affronta i problemi di raccogliere, posizionare correttamente e stringere una vite di metallo di diametro di 0,6 [mm]. Queste viti, utilizzate per esempio negli apparecchi acustici, sono attualmente trattate ed inserite manualmente in componenti di plastica. E' relativamente difficile ottenere la forza e l'affidabilità di questi sistemi di collegamento con altri metodi di fissaggio. Pertanto, l'automazione della movimentazione ed inserimento di tali viti è di interesse.

Il problema è quello di sviluppare un microgripper capace di afferrare e rilasciare i micro oggetti che vinca il fenomeno dell'adesione dovuto alle forze di superficie che si generano tra i componenti. Tali forze risultano significative nell'ambito dei microcomponenti, perché le forze gravitazionali che agiscono su un oggetto, diminuiscono con le dimensioni mentre le forze di superficie in sostanza, rimangono le stesse o diminuiscono in modo minore (Van Brussel et al., 2000). Queste forze di superficie dipendono dalla progettazione del gripper e molti sforzi sono stati fatti per ridurre al minimo i loro effetti utilizzando svariate tipologie e configurazioni di gripper. Si è lavorato molto cercando di aumentare al massimo la rugosità delle superfici dei polpastrelli del gripper (Arai et al., 1996 [34]) per ridurre al minimo le superficie di contatto e quindi le forze di Van der Waals.

Due fenomeni importanti nel campo biologico che sono stati spunto per progettare diversi tipi di gripper sono la trascrizione del DNA ed il fenomeno di abscissione.

Per quanto riguarda la trascrizione del DNA sono state osservate e studiate le interazioni conformazionali tra le proteine che permettono l'inizio del fenomeno stesso. Queste interazioni sono state tradotte ingegneristicamente per ottenere la presa ed il rilascio del gripper di micro oggetti.

Il termine abscissione (dal latino *abscisio*, -ōnis, taglio, recisione) è il distacco di una parte da un corpo qualsiasi. È un termine usato solitamente in botanica per indicare il processo tramite il quale una pianta perde una o più parti non più necessarie della sua struttura, come può essere una foglia, un frutto, un fiore od un seme.

La maggioranza delle piante decidue perdono le foglie prima dell'inverno, mentre quelle sempreverdi lo fanno continuamente tutto l'anno. Se una foglia è danneggiata, la pianta può decidere di perderla per preservare l'acqua e la fotosintesi.

Nelle foglie, l'abscissione è il distacco del picciolo dal ramo durante il periodo autunnale. In questo periodo avvengono dei cambiamenti alla base del picciolo, dove viene prodotto un ormone, chiamato acido abscissico, che provocherà la formazione di due strati di cellule: uno protettivo, che proteggerà la parte terminale del ramo, e uno di separazione, che dividerà il picciolo dal ramo. Così facendo, i vasi conduttori che passano sia nel ramo che nel picciolo si spezzano, impedendo il passaggio della linfa verso la lamina. La foglia si secca e il vento ne provoca il distacco dal ramo.



Fig. 2.15 - Zona di abscissione

2.8.2. Applicazione ai Microassembaggi

La strategia estratta dal fenomeno dell'abscissione è che una zona intermedia viene utilizzata per permettere la separazione, nelle piante delle foglie e per i microoggetti dalla presa. Gli effetti di adesione tra la superficie del gripper ed il componente possono essere evitati eliminando la necessità di separare le due parti attraverso il concetto tradizionale di rilascio. Questo potrebbe essere ottenuto mediante la progettazione di "grandi" micro-gripper che rimangono collegati al microcomponente manipolato e poi distaccati in un secondo momento utilizzando il riscaldamento o l'immersione in solventi specifici.

L'utilizzo di una parte aggiuntiva al micro-gripper (Fig. 2.16) è necessaria per avere una massa significativa così da sfruttare la gravità. In questo modo l'oggetto può essere facilmente rilasciato. La parte costruita appositamente (aggiuntiva) può sia rimanere attaccata al microoggetto oppure essere successivamente rimossa. L'analogia con il processo biologico per questo caso è molto semplice: la pinza corrisponde alla pianta, la parte aggiuntiva dello strumento con la zona di abscissione, e il microoggetto che viene rilasciato alla foglia.

L'ultima cosa da fare è quella di eliminare la zona di abscissione o la parte aggiuntiva dello strumento che come abbiamo precedentemente detto può avvenire mediante riscaldamento o l'immersione in solventi specifici. Un'ulteriore tecnologia di abscissione nel campo ingegneristico è l'utilizzo del ghiaccio tra il gripper ed il microoggetto (Kochan, 1997 [35]) dove il microoggetto non deve essere rilasciato a causa di un aumento della forza gravitazionale, ma a causa dello scioglimento del ghiaccio.

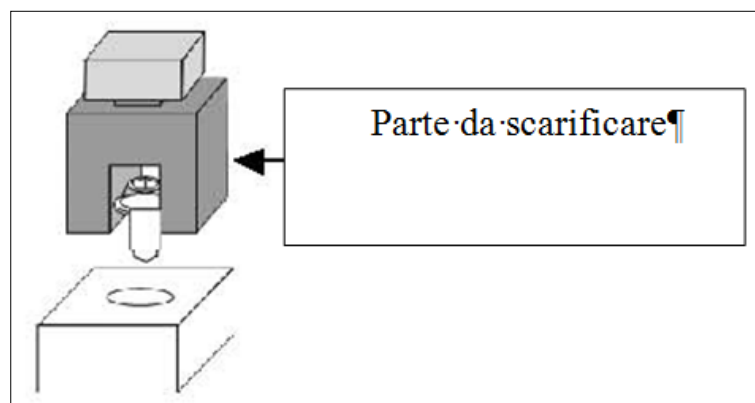


Fig. 2.16 - Principio di abscissione applicata al microassemblaggio.

2.8.3. Attuazione concreta del fenomeno dell'abscissione

Il microoggetto di interesse è una microvite di 0,6 [mm] con passo di 0,125 [mm] ed un diametro di 1,15 [mm]. La vite è in metallo e ricoperta d'oro e deve essere assemblata in un oggetto di polipropilene (Fig. 2.17).

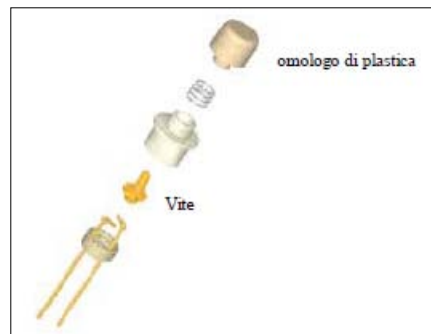


Fig. 2.17 - Assembly contenente microscrew di interesse (www.sonion.com, 2006).

E' stato scelto per questo esperimento un piccolo robot industriale con sei gradi di libertà ed una ripetibilità di $\pm 0,02$ [mm], il più alto della sua classe. Attualmente è utilizzato in molti processi industriali per diverse operazioni di movimentazione in primo luogo di parti in scala macro. Prima di utilizzare il robot per questo studio, è stata fatta la calibrazione completa di ripetibilità e precisione di posizionamento all'interno del volume di lavoro del robot (Ericksson et al., 2005 [36]). Le prestazioni sono risultate uguali alle specifiche attese. Il robot è destinato a diventare il punto centrale di quella che viene detta microfactory. Tuttavia, le pinze a disposizione non sono adatte per i microoggetti. Il robot viene posto su un tavolo di granito in una stanza a temperatura controllata (20 ± 1 °C) al Technical University of Denmark.

La zona di abscissione è fisicamente rappresentata da un'asta in polipropilene di 4 [mm] di diametro che è facilmente gripped e posizionata dal robot. La punta della bacchetta di polipropilene è localmente fusa mediante riscaldamento, e poi fissata sulla testa del vite. Il contatto con la vite è dato dalla solidificazione del polipropilene, così da avere un legame solido tra la bacchetta e la vite. Una volta che la vite raggiunge la sua posizione finale si applicherà un momento torgente tale da rompere il legame tra la vite e l'asta di polipropilene.

È stata scelta questa tecnica di abscissione per due principali motivi. Il primo che il materiale di polipropilene fondebodosi consente di conformarsi perfettamente alla testa della vite qualsiasi sia la su forma e dimensione. Il secondo motivo è che non si creano materiali contaminanti dopo il rilascio cosa che può avvenire utilizzando lo scioglimento del ghiaccio o l'utilizzo di solventi chimici.

Il robot è stato programmato per afferrare automaticamente l'asta di polipropilene e di spostarla in una zona di riscaldamento. Dopo il riscaldamento per un determinato periodo di tempo, l'asta è stata premuta contro la testa della vite montata verticalmente in un apposito supporto. La vite viene poi spostato nella posizione desiderata e serrata al substrato di plastica. La Fig. 2.18 contiene uno schema del setup. Le Fig. 2.19, Fig. 2.20, Fig. 2.21, mostrano vari componenti del setup.

Per l'asta sono stati utilizzati due diversi tipi di polipropilene. Inoltre, la temperatura di riscaldamento è stata variata incrementandola da 160 °C a 240 °C. L'asta è rimasta nella zona di riscaldamento per 10 secondi, e successivamente pressata sulla testa della vite per 10 secondi. Il diametro del foro nella plastica è di 0,4 [mm].

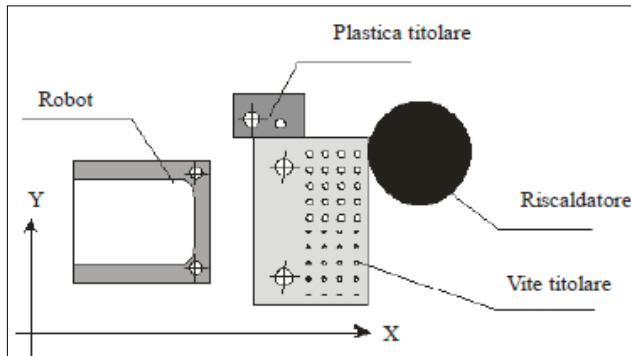


Fig. 2.18 Vista dall'alto del diagramma di setup sperimentale

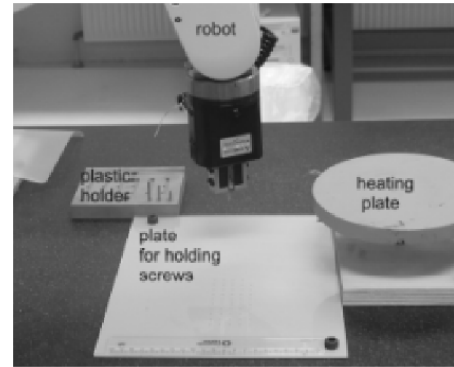


Fig. 2.19 Setup sperimentale

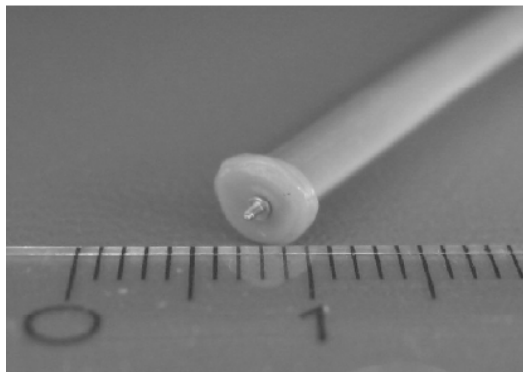


Fig. 2.20 Asta in polipropilene con vite

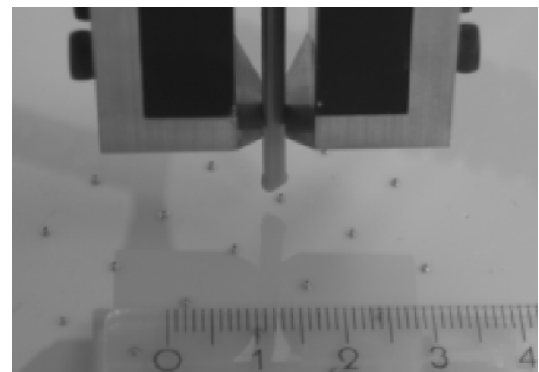


Fig. 2.21 Pinza con l'asta di polipropilene

Gli esperimenti hanno dimostrato che la strategia di abscissione è stata applicata per la presa automatizzata ed il rilascio di micro viti. La forza di legame tra l'asta in polipropilene e la vite si è rivelata sufficiente a garantire un fissaggio sicuro. La temperatura del dispositivo di riscaldamento è il parametro più critico per garantire il legame. È stato osservato che quando si utilizzano temperature inferiori a 180 °C, la vite non può essere serrata con successo nel substrato. Quando l'asta in polipropilene viene riscaldato nell'intervallo tra 180 °C e 200 °C, il processo di assemblaggio effettivo segue quello desiderato ispirato al fenomeno di abscissione come descritto precedentemente. Se l'asta in polipropilene viene riscaldata oltre i 200 °C, la vite non è rilasciata subito dopo il serraggio. In questo caso, è necessario applicare un'ulteriore forza con il robot per staccare la vite dall'asta di polipropilene. Ciò si spiega con il fatto che il materiale plastico viene fuso in misura maggiore a queste temperature e quindi tende a scorrere nelle fessure esagonali nella testa della vite.

Il robot industriale deve avere sufficiente ripetibilità nell'eseguire questa operazione.

Un'altro fattore critico è l'allineamento della barra di polipropilene nel robot. Se una barra è utilizzata più volte, la posizione e l'orientamento della punta dell'asta deve essere ben noto ai fini del controllo del robot. Tuttavia, se una barra è usata solo una volta e poi sostituita da una nuova per ogni vite, l'asta deve essere posizionato in modo coerente. In ogni caso, un sistema di visione e cicli di retroazione aumenterebbero la precisione e quindi il rendimento atteso del processo.

Questo articolo tratta quindi l'identificazione e l'uso di analogie biologiche per ispirare soluzioni per i problemi di adesione tra superficie che complicano la gestione automatizzata ed il rilascio di micro oggetti.

3. RILEVATORE INDIRETTO DELLA FORZA DI SERRAGGIO

3.1. Introduzione

Uno degli scopi di questa tesi è quello di progettare e realizzare una stazione di micro lavoro in parte composta da un microgripper in grado di rilevare la forza di contatto durante le operazioni di pick and place, legandosi ad un precedente studio del 2009 svolto dal Dr. Vinicio Tincani, e la completa progettazione e realizzazione di un microavvitatore. Questa stazione di lavoro è stata pensata per essere utilizzata nell'assemblaggio delle schede elettriche negli apparecchi acustici.

Il microgripper meccanico, è una struttura che immagazzina elevate quantità di energia potenziale elastica in rapporto alle proprie dimensioni nella fase di apertura e cede energia nella fase di chiusura fino a serrare fra le dita l'oggetto da manipolare. Questo processo di immagazzinamento e rilascio di energia potenziale elastica avviene ogni volta che il microgripper si trova ad afferrare un oggetto. Le caratteristiche comunemente richieste ad un microgripper meccanico sono:

- adeguata ampiezza di apertura/chiusura delle dita
- adeguata forza di presa (né troppo bassa da causare la perdita dell'oggetto afferrato, né troppo elevata da danneggiare i microcomponenti più delicati)

Le parti caratteristiche di un microgripper (con riferimento alla Fig. 3.1) sono:

- base fissa vincolata al telaio tramite un pernio forzato nel foro
- base mobile movimentata (generalmente) da un attuttore piezoelettrico mediante un secondo un pernio forzato nel foro della parte mobile
- sistema a molla piana di amplificazione delle deformazioni sui polpastrelli
- polpastrelli di presa con dentini che entrano fisicamente in contatto con l'oggetto da afferrare

La parte destra della figura Fig. 3.1 mostra l'apertura delle dita provocata da una forza di trazione esercitata sulla base mobile.

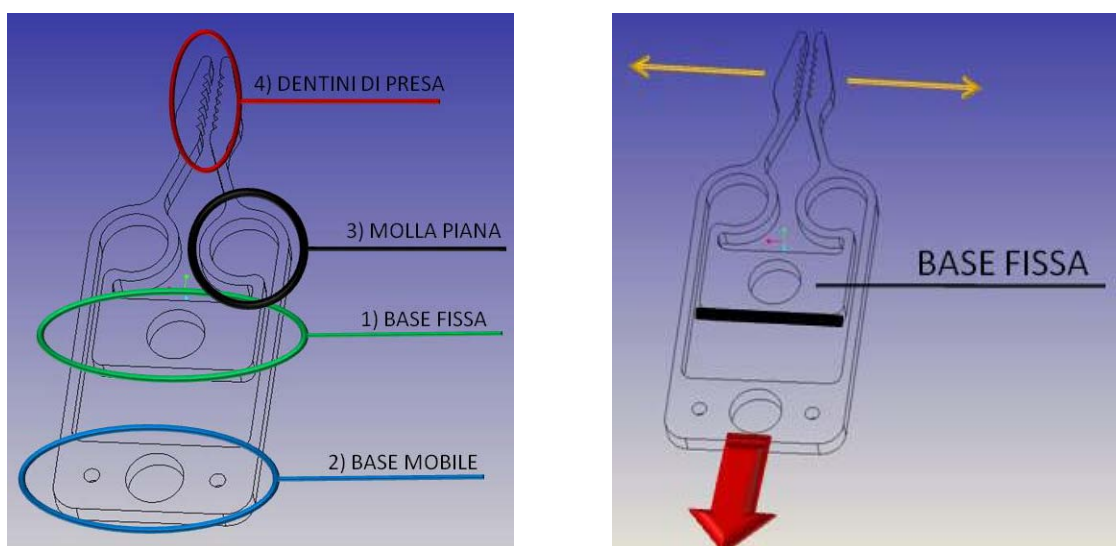


Fig. 3.1 A sinistra le parti caratteristiche di un microgripper, a destra il principio di funzionamento

3.2. Progettazione Gripper

Nell'ambiente del microassemblaggio si ha spesso a che fare con microcomponenti delicati come, ad esempio, strutture ad elevata fragilità o microlenti. Risulta utile in queste situazioni avere informazioni sull'intensità della forza di grasping in modo da assicurare la presa del componente salvaguardandone contemporaneamente l'integrità e riducendo il pericolo di danneggiamento sotto l'effetto delle forze di presa. Date le ridotte dimensioni del gripper non risulta agevole rilevare la forza di grasping direttamente sul polpastrello, per cui si è pensato di realizzare un controllo indiretto della forza di presa.

3.2.1. Controllo indiretto della forza di grasping

Per effettuare contemporaneamente le operazioni di pick and place e di monitoraggio della forza di grasping, è stato utilizzato come base di progetto il microgripper studiato nel 2009 (vedere parte di sinistra della Fig. 3.2).

L'idea è quella di realizzare una geometria tale da imporre ad un "punto strategico" traiettorie sufficientemente differenti nella fase di presa rispetto a quella di apertura. È stato perciò inserito, nei pressi dei polpastrelli, un elemento ad elevata cedevolezza concentrata "Hinge", in pratica una strizione o un indebolimento (vedere la parte destra della Fig. 3.2), che risulta scarico nel corso dell'apertura, mentre si carica progressivamente man mano che l'oggetto viene serrato fra le dita. La deformazione localizzata nella zona dell'hinge, che funge da cerniera elastica, provoca lo spostamento di un punto di osservazione "Pointer's Tip" (che da ora in avanti verrà chiamato "PT") differente dalla traiettoria che subirebbe in assenza di forze di grasping.

Il passo successivo è stato poi quello di mettere in relazione la posizione assunta dal "PT" con l'entità della forza di serraggio.

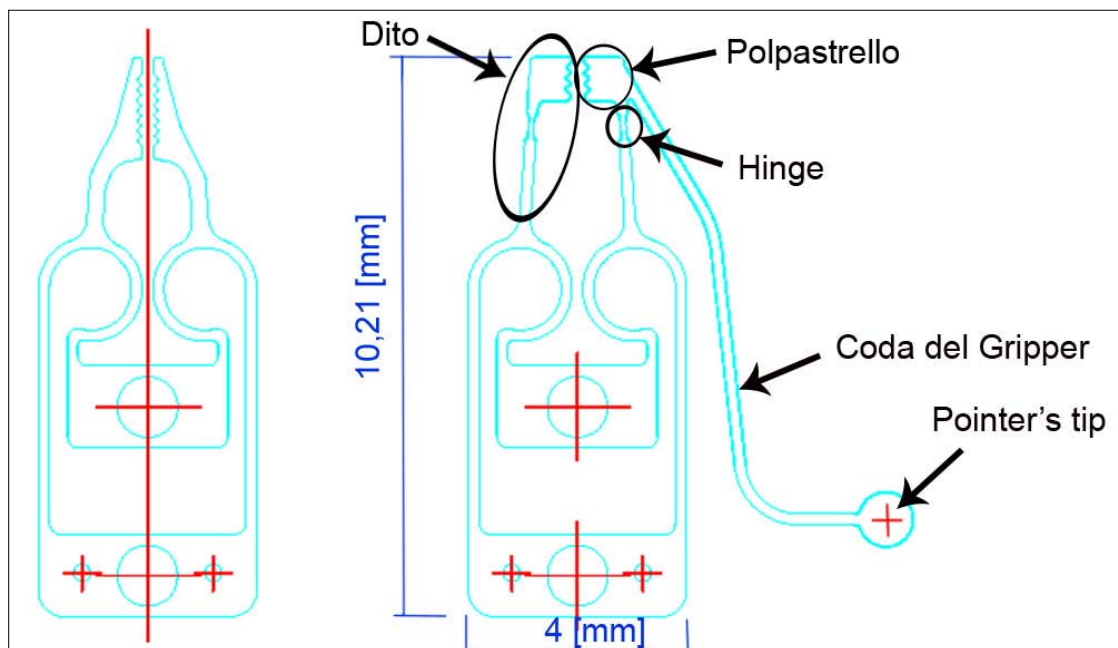


Fig. 3.2 A sinistra: gripper progettato dal Dott. Tincani nel 2009, a destra: gripper progettato e realizzato nella seguente tesi

Monitorando lo spostamento della posizione del baricentro del "PT" è possibile risalire, come si vedrà meglio successivamente, alle forze di contatto che si generano tra polpastrello ed oggetto da manipolare. Il "PT" (vedere Fig. 3.2) della coda del gripper è un punto "strategico" da monitorare in quanto possiede le seguenti caratteristiche:

- compie ampie corse nelle fasi di apertura e chiusura delle dita in modo da renderne la misurazione più agevole
- la traiettoria libera (traiettoria del “PT” sotto l’effetto esclusivo di una forza di trazione applicata alla piastra mobile, senza carichi applicati sui polpastrelli) è sufficientemente differente dalla traiettoria che si verifica in condizione di presa di oggetti
- è sufficientemente lontano dalla zona di presa in modo da amplificare lo spostamento e le rotazioni del polpastrello del gripper
- mantiene limitate gli ingombri, senza ostacolare il corretto svolgimento delle operazioni

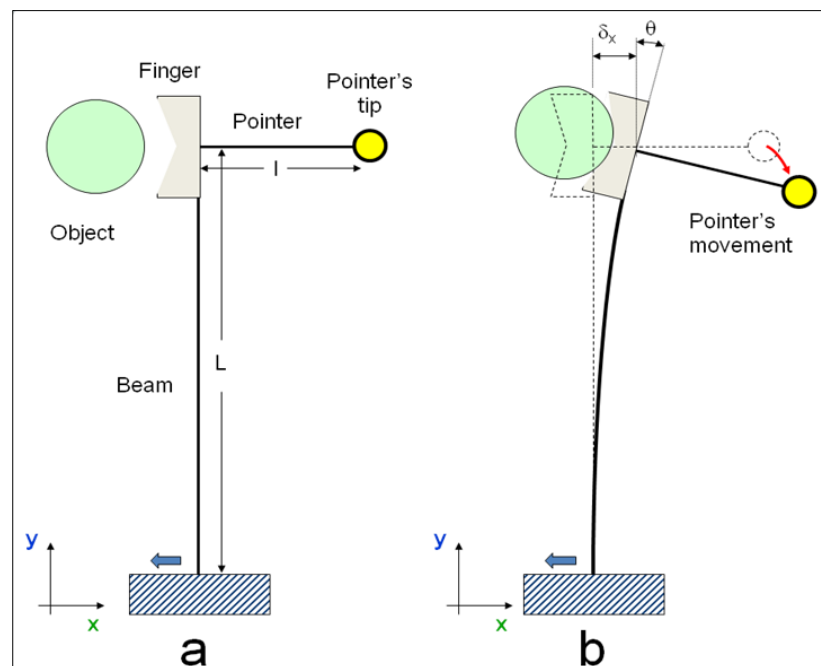


Fig. 3.3 Schema riassuntivo dello spostamento del pointer's tip allo spostamento del polpastrello del dito (Finger)

Con riferimento alla Fig. 3.3 è possibile notare che per amplificare gli spostamenti del “PT” è opportuno che la lunghezza “ L ” della coda del gripper sia sufficientemente grande.

Nel momento in cui l’oggetto viene serrato il polpastrello tenderà a ruotare attorno all’*hinge*, provocando la rotazione della coda, che si tradurrà in uno spostamento della posizione del “PT” facilmente misurabile durante l’esercizio.

Con l’apertura del gripper la paletta percorre una certa traiettoria che viene poi percorsa in senso opposta nella fase di chiusura libera. Nella condizione di presa di oggetti la traiettoria del “PT” subisce una discontinuità, che è amplificata proprio dall’*hinge*.

Con riferimento alla Fig. 3.4, per determinare la posizione ottimale del “PT” in modo da avere massima amplificazione e traiettorie di prese differenti rispetto a quella libera minimizzando gli ingombri, sono state proposte quattro diverse posizioni, tutte poste su una circonferenza di raggio 9,8 [mm] (paragonabile alla massima dimensione del gripper) con centro posto in “0” (punto d’attacco della coda). Le posizioni scelte dei punti della coda sono indicate nella figura Fig. 3.4 con i numeri 80000, 80001, 80002, 80003. Per ognuna di queste posizioni scelte è stato fatto un modello FEM al fine di ottenere la configurazione deformata del gripper che subisce il gripper sotto l’azione di trazione

applicata nel foro della piastra mobile da parte dell'attuatore piezoelettrico. In questo modo è stato possibile ottenere le coordinate finali dei "PT" al variare della forza di trazione, ed è stato possibile tracciarne le traiettoria libere.

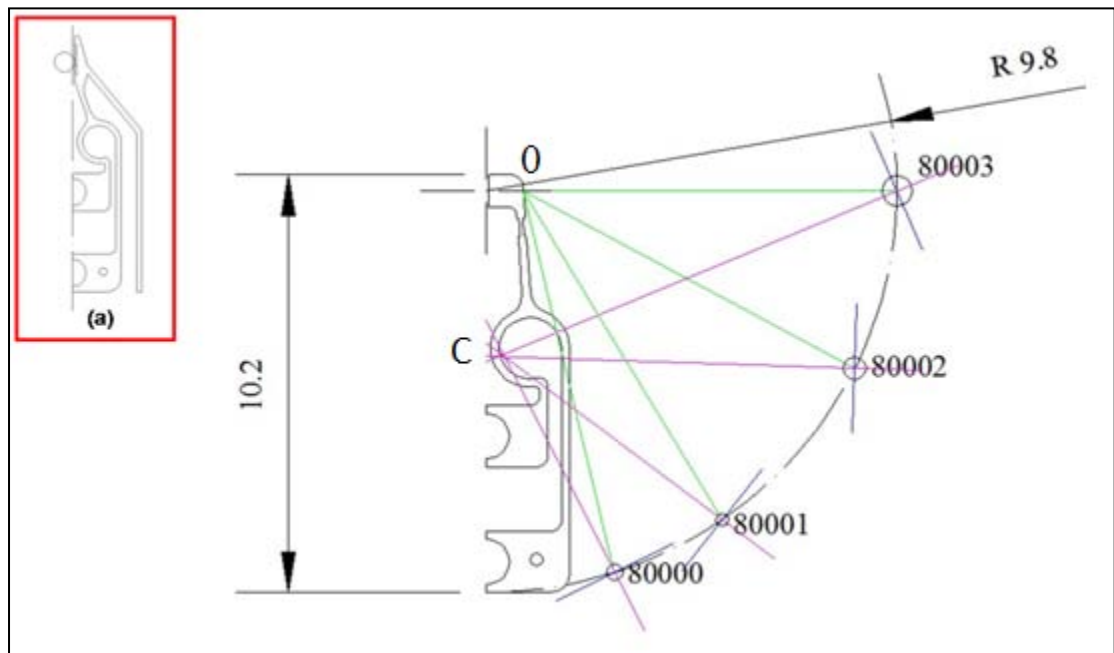


Fig. 3.4 In verde le rette che collegano il polpastrello del gripper con i vari PT, blu le traiettorie dei vari PT, in viola le perpendicolari alle traiettorie dei vari PT.

In Fig. 3.4 sono state riportate in blu le traiettorie libere ottenute durante la fase di apertura del gripper. Nella stessa figura sono state tracciate in viola le normali alle traiettorie libere da cui è possibile vedere che concorrono nel punto "C" che funge da fulcro di rotazione delle dita nella fase di apertura e chiusura libera.

3.2.2. Modelli FEM

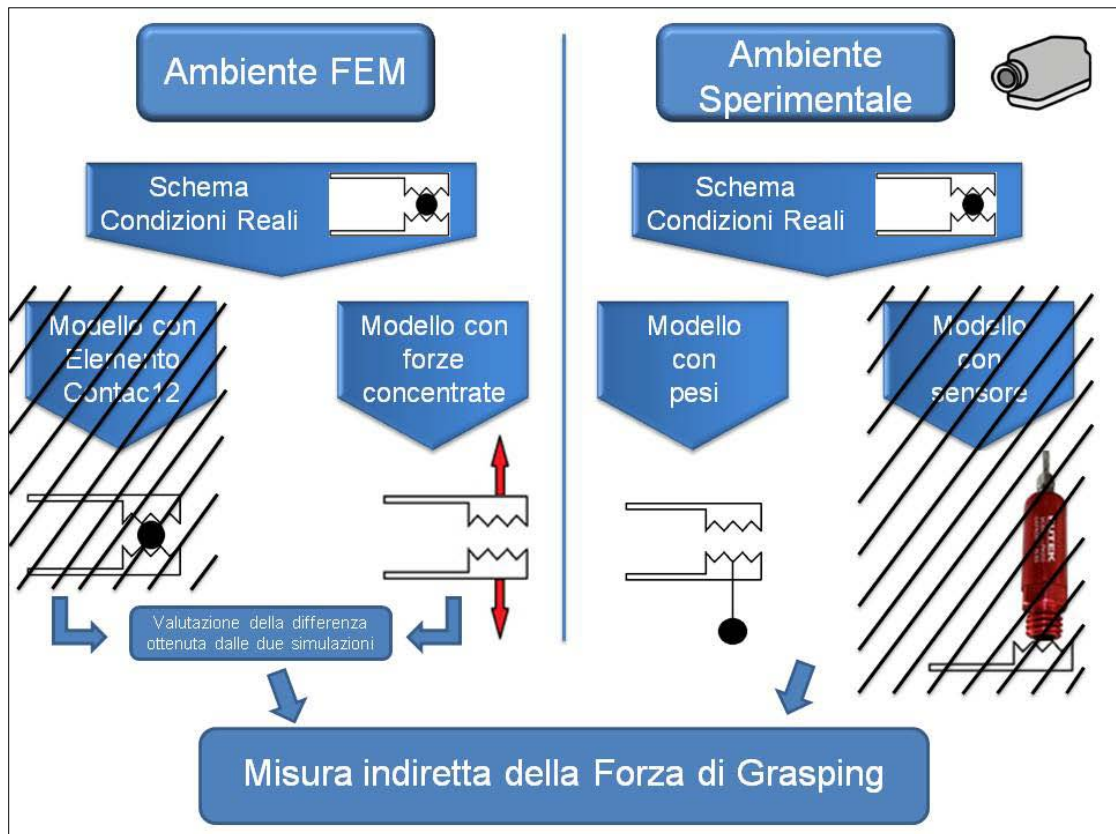


Fig. 3.5 Schema delle procedure utilizzate per effettuare l'analisi FEM e per effettuare l'analisi sperimentale

Per determinare le traiettorie dei vari "PT", presi in considerazione nel paragrafo precedente durante la fase di chiusura e serraggio di oggetti, si sono effettuate delle simulazioni agli elementi finiti. Lo scopo è quello di tracciare la traiettoria della paletta nella fase di chiusura e presa di perni cilindrici di vari diametri. I diametri presi in considerazione per un gripper siffatto sono $\phi=0,3$ [mm], $\phi=0,5$ [mm] e $\phi=0,7$ [mm].

Il microgripper preso in considerazione è una struttura a simmetria piana di spessore sottile caricato e vincolato nel piano. Ad eccezione della coda, che per altro è sempre scarica, il gripper possiede un evidente asse di simmetria (passante per gli assi dei fori delle basi); si riserva perciò la libertà di sfruttare o meno tale simmetria a seconda della convenienza.

Per effettuare la simulazione si sono simulati contemporaneamente due componenti il microgripper e il perno (vedere figura Fig. 3.6).

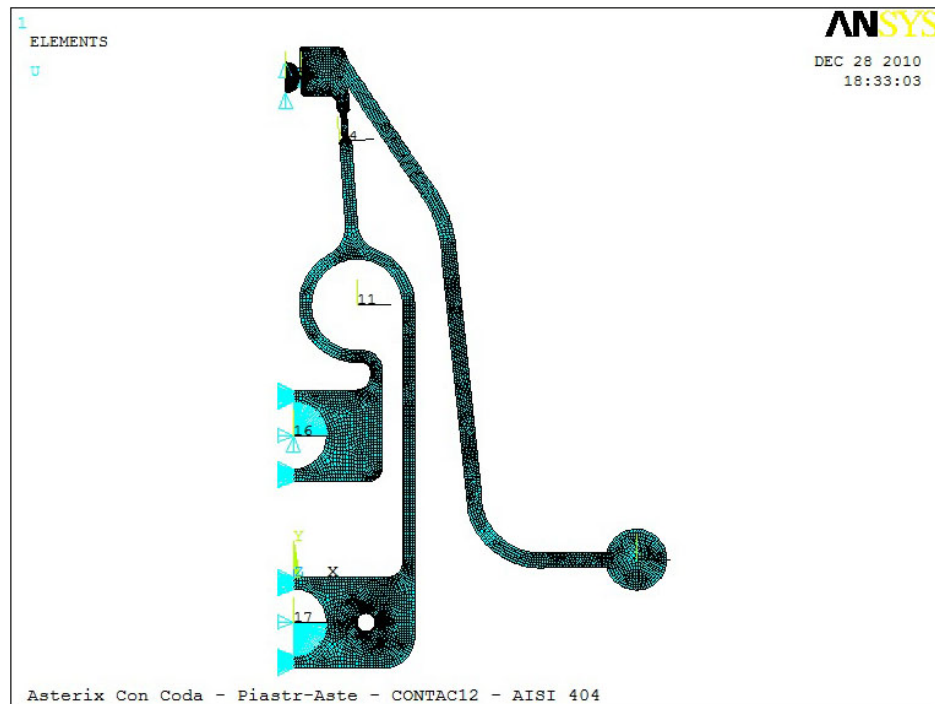


Fig. 3.6 Modello con CONTACT12 utilizzato per effettuare la simulazione Ansys

Modello FEM del microgripper:

- Scelta dell'elemento: per quanto descritto precedentemente si è utilizzato l'elemento Plane 82 in stato piano di tensione della libreria di Ansys ad otto nodi
- Simmetria: si è sfruttata la simmetria lungo il piano passante per gli assi dei fori delle basi, per cui si sono introdotti vincoli di simmetria ai nodi giacenti su di esso
- Vincoli e carichi: per simulare il contatto tra perno e base fissa, il centro del foro "Nodo Vincolo Master" (vedere Fig. 3.7) è stato collegato ai "Nodi Vincolo Slave" che si affacciano sul quarto di circonferenza superiore dello stesso con elementi asta 2D di elevata rigidità (elemento 2 della libreria di Ansys). Il nodo sull'asse del foro (Nodo Vincolo Master) è stato poi vincolato al fine di impedire gli spostamenti lungo "X" ed "Y". Per quanto riguarda la simulazione del perno sulla base mobile è stata utilizzata una procedura analoga. In questo caso il nodo sull'asse del foro (Nodo Master) è stato vincolato in modo da impedire lo spostamento lungo "X" e consentire lo scorrimento lungo "Y" al fine di impedire la rotazione del gripper. Il carico generato dall'attuatore piezoelettrico viene trasmesso al gripper sotto forma di spostamento diretto lungo "Y" del nodo centrale della piastra mobile

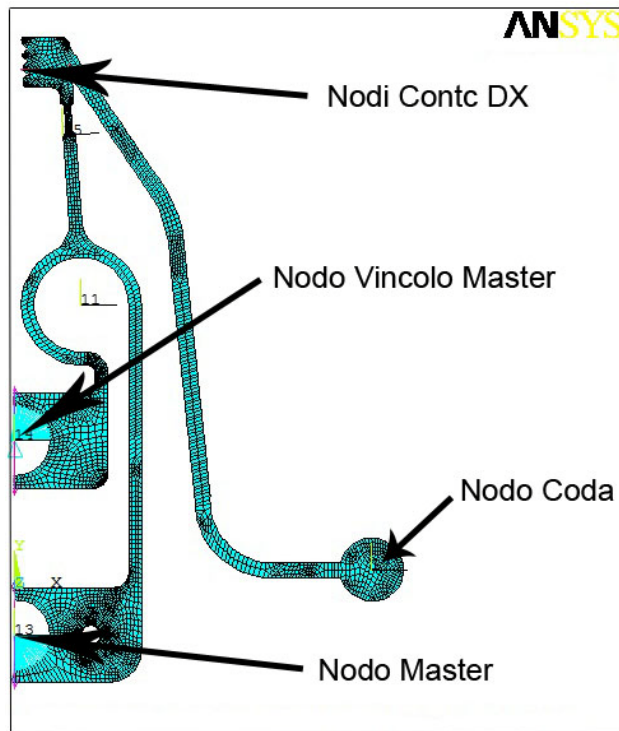


Fig. 3.7 Modello Ansys riportante i nomi dei nodi

Come precedentemente detto per determinare le forze di grasping è necessario modellare anche l'oggetto in presa che per semplicità si assumerà di forma cilindrica. Per simulare la presa è conveniente inizialmente posizionare il perno tangenzialmente ai polpastrelli, imporre un vincolo unilaterale di contatto fra dita e cilindro e infine imporre a quest'ultimo uno spostamento lungo "X" tale da portarlo in posizione simmetrica rispetto al gripper.

Modello FEM del perno:

- Scelta dell'elemento: per il perno si è utilizzato l'elemento Plane 82 in stato piano di tensione della libreria di Ansys ad otto nodi
- Simmetria: si è modellato soltanto metà perno dato che la posizione finale rispetta la configurazione simmetrica a presa avvenuta
- Vincoli e carichi: sull'asse di mezzeria del perno sono stati bloccati gli spostamenti dei nodi lungo "Y" mentre lungo "X" è stato imposto uno spostamento funzione delle dimensioni del perno tale da portare l'asse di mezzeria in corrispondenza dell'asse di simmetria del gripper
- Elementi di contatto: per simulare il contatto unilaterale (vedere l'ingrandimento della Fig. 3.8) si sono collegati i nodi prospicienti del perno e del polpastrello con elementi CONTCT12 della libreria di Ansys

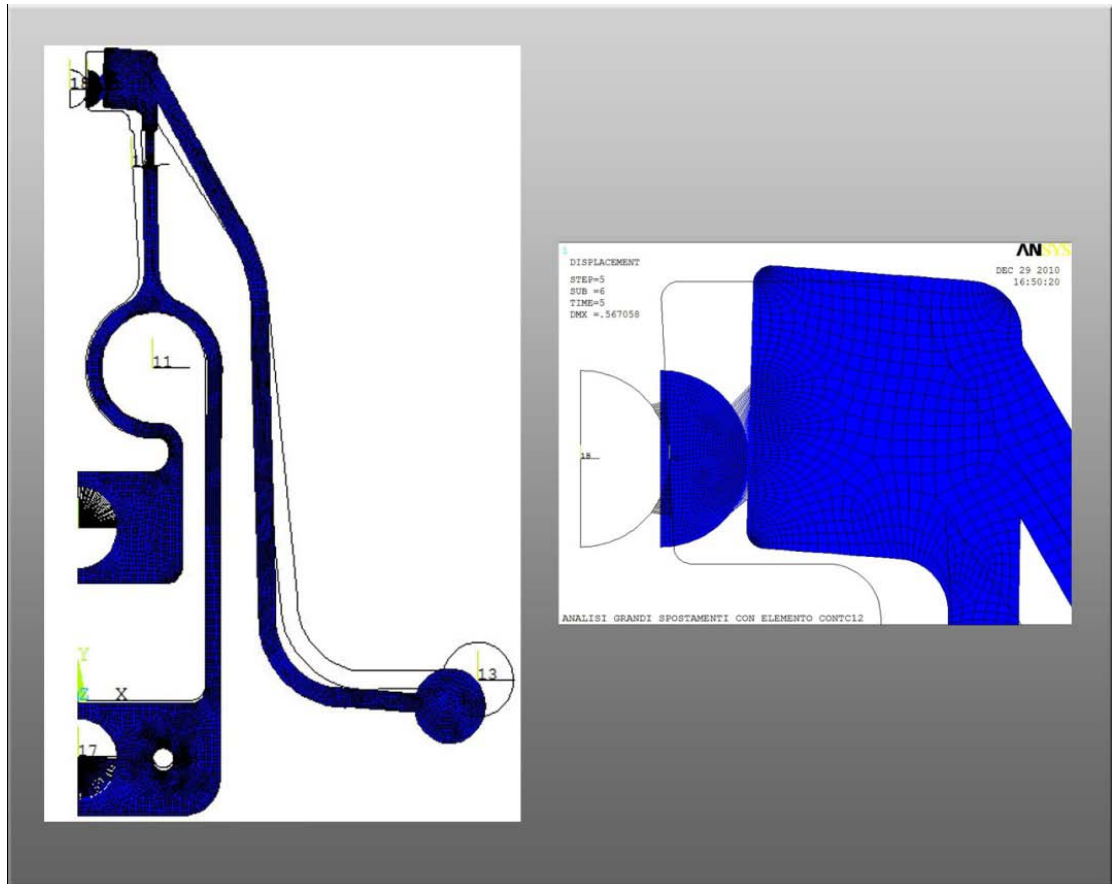


Fig. 3.8 A sinistra Modello deformato utilizzato per la prova Ansys, a destra ingrandimento della zona del contatto

Per ciascuna dimensione del perno sul nodo centrale della base mobile è stato imposto uno spostamento che varia da 0 a 0,12 [mm] (spostamento massimo raggiungibile dell'attuatore piezoelettrico) ad intervalli di 0,02 [mm] (simulando così la fase di chiusura dei polpastrelli) e contemporaneamente si è rilevata la reazione vincolare lungo "X" dei nodi sulla mezzeria del perno, che rappresenta la forza di grasping cercata e la posizione del baricentro della paletta (PT). La situazione di massima apertura delle dita si ha quando lo spostamento della base mobile provocato dall'attuatore è massimo (0,12 [mm]); diminuendo l'azione del piezoelettrico le dita vanno via via chiudendosi fino ad entrare in contatto con l'oggetto serrandolo sempre più. La situazione di massimo serraggio si ha quando l'azione esercitata dall'attuatore è nulla. Naturalmente la forza di presa risulterà funzione delle dimensioni del perno, e quindi diversa per i tre cilindri presi in considerazione. La traiettoria della paletta subirà una deviazione rispetto alla traiettoria libera di chiusura nel momento in cui avviene il contatto fra l'oggetto e i polpastrelli.

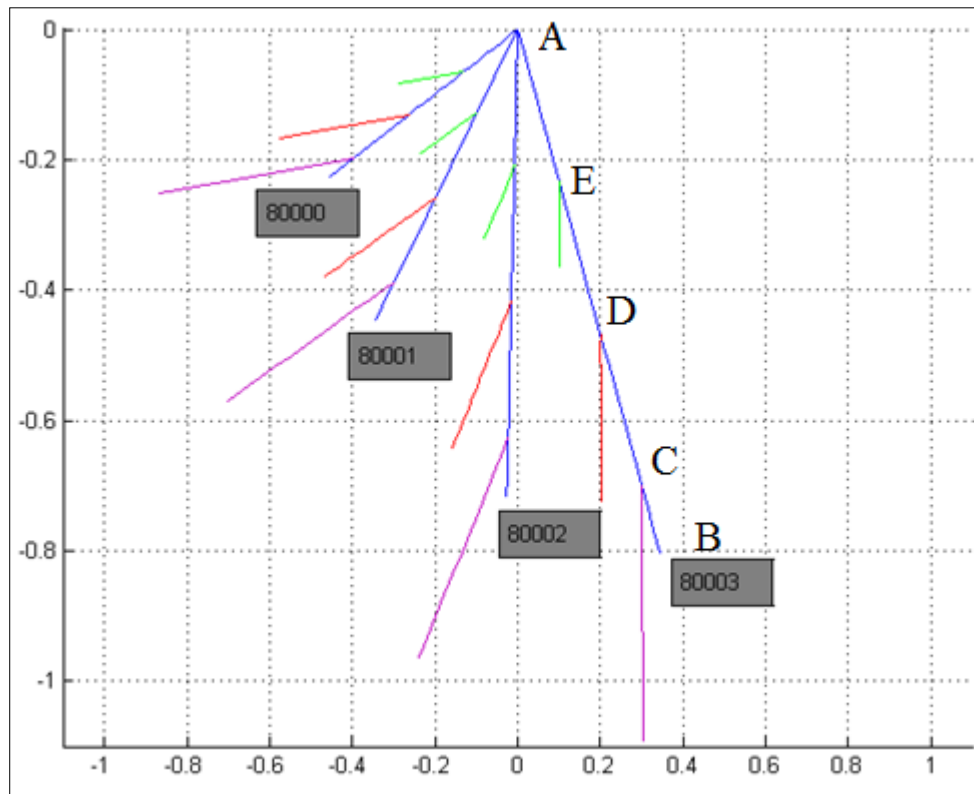


Grafico 3.1 In blu le traiettorie libere, in viola sono raffigurate le traiettorie durante la presa di cilindri di $\phi = 0,7$ [mm], in rosso le traiettorie durante la presa di cilindri di $\phi = 0,5$ [mm], in verde le traiettorie durante la presa di cilindri di $\phi = 0,3$ [mm]

Nel Grafico 3.1 sono state riportate in blu le traiettorie libere dei vari “PT”. Per una migliore visione ed un miglior confronto è stato fatto coincidere il loro punto iniziale (quindi quello a deformazione nulla). Una prima considerazione da fare è che dati i piccoli spostamenti in gioco le traiettorie libere sono praticamente rettilinee.

Le linee viola, rossa e verde rappresentano rispettivamente le traiettorie di grasping con perni di diametro $\Phi = 0,7$ [mm], $\Phi = 0,5$ [mm] e $\Phi = 0,3$ [mm] per ciascun “PT”.

Analizzando, ad esempio, la configurazione 80003 del gripper, si osserva dal Grafico 3.1 che il punto “A” rappresenta la posizione del “PT” quando le dita del gripper sono completamente chiuse, mentre il punto “B” evidenzia la situazione di massima apertura. Come abbiamo precedentemente detto la linea retta tracciata dal punto “A” al punto “B” rappresenta la traiettoria libera percorsa dal “PT” durante l’applicazione della forza di trazione generata dall’attuatore piezoelettrico al gripper. Una volta raggiunta la posizione di massima apertura del gripper (B), diminuendo la forza di trazione, il “PT” ripercorre l’identica traiettoria in senso opposto.

Se durante la fase di scarico i polpastrelli del gripper incontrano l’oggetto da afferrare, la traiettoria del “PT” subisce una deviazione funzione del diametro del perno raffigurate nel grafico dalle linee viola, rosse e verdi. I punti “C”, “D” ed “E”, rappresentano gli istanti in cui avviene la presa rispettivamente dei cilindri con diametro $\Phi = 0,7$ [mm], $\Phi = 0,5$ [mm] e $\Phi = 0,3$ [mm].

Dopo aver analizzato le diverse traiettorie assunte dalle quattro configurazioni ed aver considerato l’ingombro generato dalle stesse, la configurazione 80001 risulta la più efficiente, in quanto garantisce un buon compromesso tra ingombro ed amplificazione dello spostamento.

Il Grafico 3.2 rappresenta un ingrandimento delle traiettorie del “PT” scelto. Le isograspingforce derivano dall’analisi con Ansys nella situazione in cui viene applicata la

massima forza al foro della piastra mobile per consentire alle dita del gripper di aprirsi (simulando l'azione dell'attuatore piezoelettrico). Successivamente questa forza viene diminuita, anche se non completamente annullata, ma mantenuta ad un valore di 0,19 [N].

Le rette nere intercettano i medesimi valori della forza di grasping sui tre perni (rette di isograsping): come si può vedere tali rette risultano sostanzialmente parallele alla traiettoria libera.

Prendendo in esame l'afferraggio di un perno di diametro $\phi=0,7$ [mm] a partire dalla condizione di massima apertura (punto "B") nella fase di scarico il "PT" percorre il tratto "B-C" della traiettoria libera prima di entrare in contatto con il pezzo (punto "C"). Proseguendo con lo scarico il "PT" percorre adesso la traiettoria deviata "C-N" fino al completo rilascio del piezoelettrico (punto "N").

Nel caso invece di afferraggio di un perno $\phi=0,5$ [mm], dalla situazione di massima apertura (punto "B") la traiettoria percorsa dal "PT" segue inizialmente ancora la traiettoria libera stavolta però fino al punto "D" (punto di inizio contatto con il pezzo). La traiettoria deviata segue adesso la retta "D-Q" fino al completo rilascio dell'attuatore (punto "Q").

Discorso analogo per l'afferraggio del perno $\phi=0,3$ [mm].

La particolarità più interessante di questa analisi è che esiste una corrispondenza biunivoca fra la forza di grasping e la distanza del "PT" dalla retta di appartenenza della traiettoria libera indipendentemente dalle dimensioni dell'oggetto in presa. Questo implica che è possibile risalire all'intensità della forza di grasping misurando semplicemente la distanza della paletta dalla traiettoria libera, senza tener conto delle dimensioni del componente afferrato.

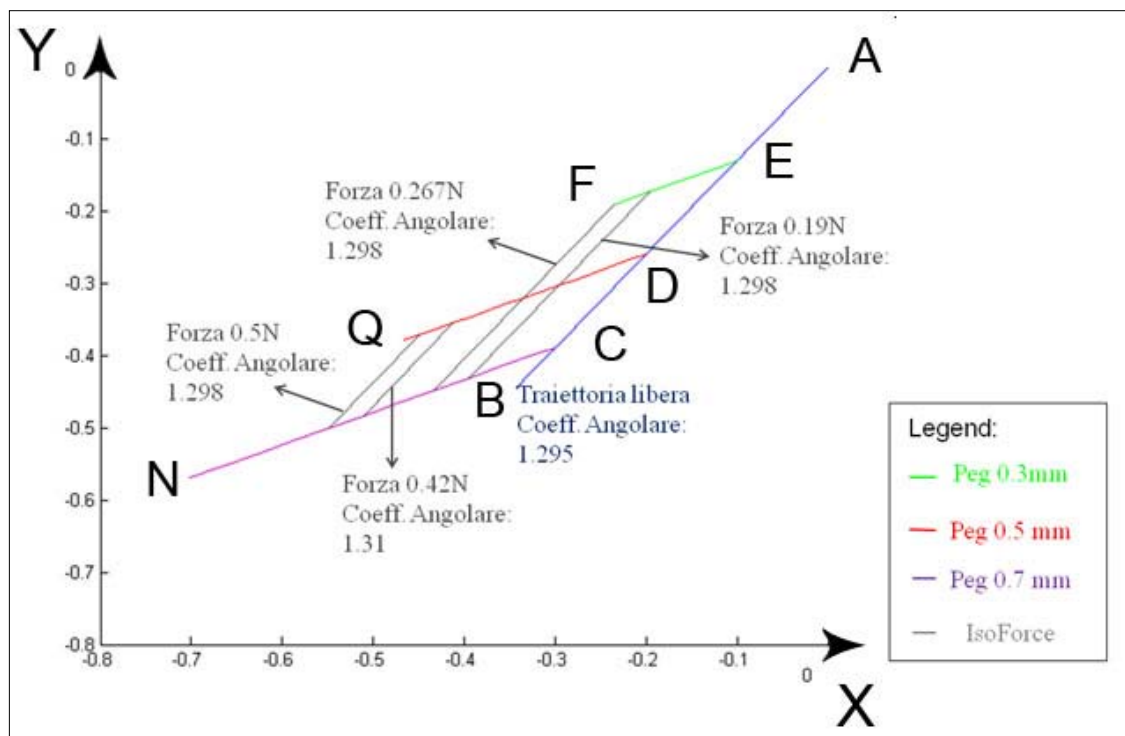


Grafico 3.2 Grafico di isograspingforce

La Fig. 3.9 mostra il gripper definitivo con le principali quote.

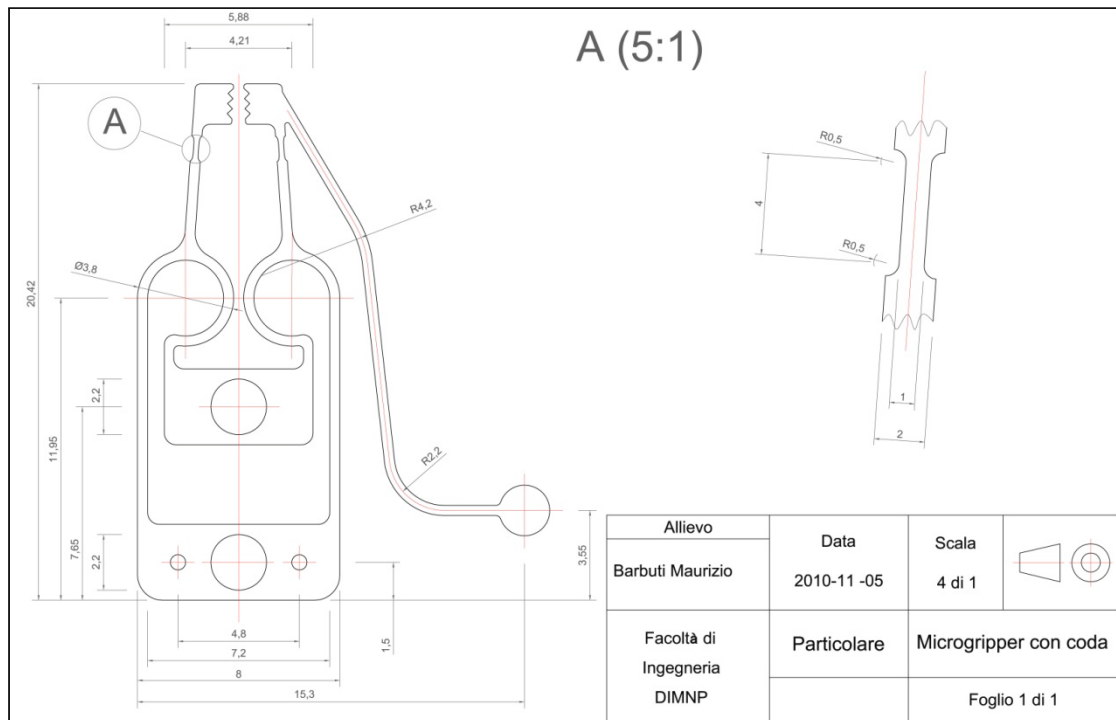


Fig. 3.9 Disegno quotato del Gripper

3.2.3. Validazione sperimentale

È necessario adesso pensare ad un setup sperimentale per validare quanto affermato nella precedente fase progettuale. Per mettere in relazione la forza di grasping con la posizione del “PT”, sono necessari un sistema di rilevamento delle forze di contatto fra polpastrello e pernio e un sistema di visione per seguire la traiettoria della paletta. Fra i sistemi di rilevamento della forza di afferraggio è stato preso in considerazione quello della (Fig. 3.10), poiché opera nel range di forze previste durante le simulazioni, è di piccole dimensioni, poco deformabile e di facile installazione.

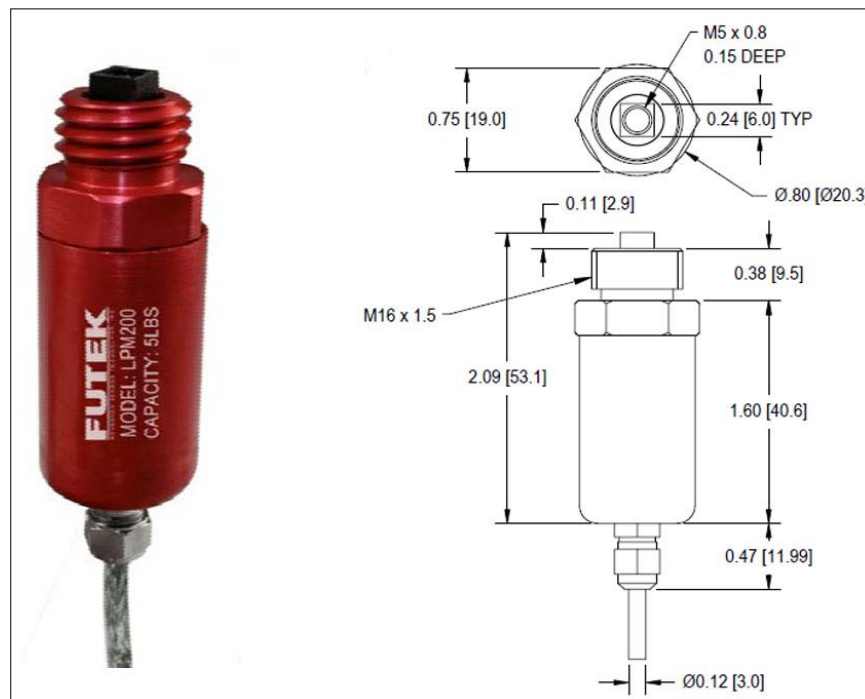


Fig. 3.10 FUTEK MODEL - LPM200

Previo troncamento del dito sprovvisto di paletta è possibile montare il sensore su una slitta micrometrica e simulare così il posizionamento di un perno di un determinato diametro fra le dita del gripper.

La posizione assunta dalla paletta in relazione alla risposta del sensore consente di validare i risultati delle simulazioni.

Al fine di evitare prove distruttive come quella precedentemente descritta, dato il numero limitato di gripper a disposizione, si è pensato ad una soluzione alternativa salvaguardandone l'integrità.

È possibile, in fase di sperimentazione, simulare la forza di serraggio disponendo il gripper orizzontalmente e applicando, al polpastrello provvisto di coda, un peso noto mediante una lenza da pesca. Tramite un sistema di visione è possibile poi valutare l'apertura e la posizione conseguentemente assunta dal "PT" mettendo contemporaneamente in relazione forza di grasping, posizione del "PT" e dimensione dell'oggetto in presa.

La soluzione adottata nella validazione sperimentale non differisce di molto dalla soluzione che utilizza il sensore di forza e per assicurarsi di ciò sono state effettuate delle simulazioni agli elementi finiti che prevedano spostamenti simmetrici dei punti centrali dei polpastrelli (quindi una situazione molto vicina a quella dell'esperimento) anziché modellare gripper e perno collegati con elementi gap.

Il modello di quest'ultima simulazione differisce dal precedente per l'imposizione di due forze simmetriche poste direttamente sui nodi centrali dei polpastrelli in modo da raggiungere la configurazione deformata durante il serraggio dei perni di diametri $\phi=0,3$ [mm], $\phi=0,4$ [mm] e $\phi=0,5$ [mm]

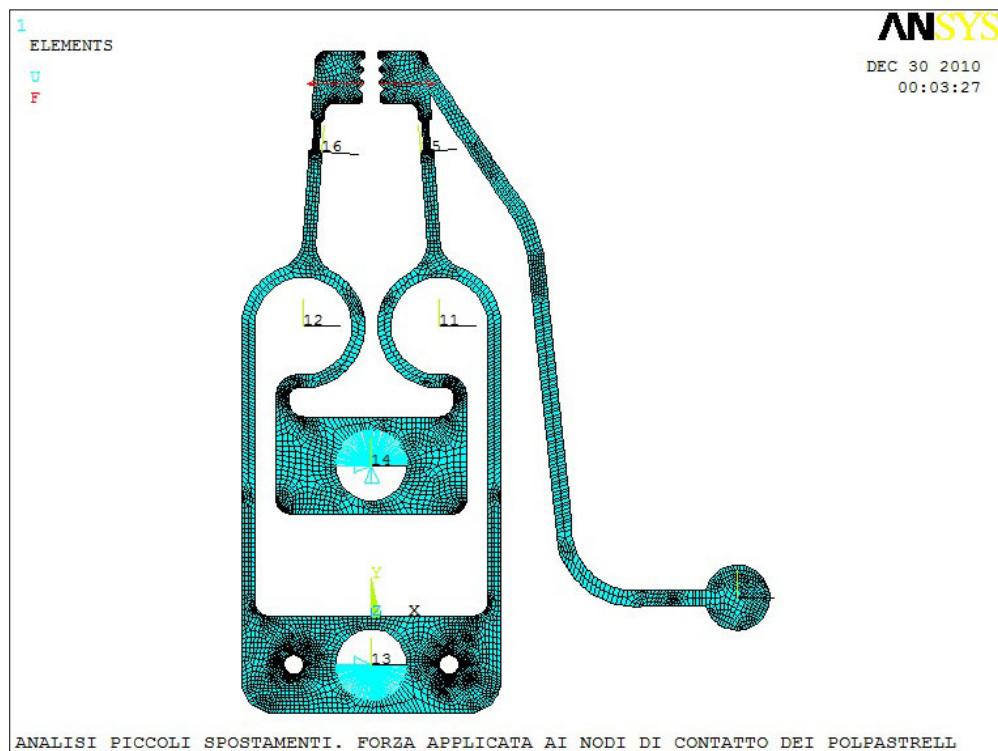


Fig. 3.11 Modello Ansys con simulazione del contatto concentrato su due nodi

Di seguito (Tabella 3-1) viene riportato il confronto tra le simulazioni effettuate.

Senza CONTACT12 e senza Attuatore Piezoelettrico			
Diametro del cilindro da afferrare		UX del nodo della coda	UY del nodo della coda
$\phi = 0,3$ [mm] \Rightarrow UX = 0,02489 [mm]		-0,042006	-0,040463
$\phi = 0,4$ [mm] \Rightarrow UX = 0,07489 [mm]		-0,12782	-0,12062
$\phi = 0,5$ [mm] \Rightarrow UX = 0,12489 [mm]		-0,21553	-0,19922
$\phi = 0,6$ [mm] \Rightarrow UX = 0,17489 [mm]		-0,30509	-0,27622
$\phi = 0,7$ [mm] \Rightarrow UX = 0,22489 [mm]		-0,39647	-0,35157

Con CONTACT12 e senza Attuatore Piezoelettrico			
Diametro del cilindro da afferrare		UX del nodo della coda	UY del nodo della coda
$\phi = 0,3$ [mm] \Rightarrow UX = 0,02489 [mm]		-0,042436	-0,040787
$\phi = 0,4$ [mm] \Rightarrow UX = 0,07489 [mm]		-0,12798	-0,12057
$\phi = 0,5$ [mm] \Rightarrow UX = 0,12489 [mm]		-0,21532	-0,19881
$\phi = 0,6$ [mm] \Rightarrow UX = 0,17489 [mm]		-0,30427	-0,27537
$\phi = 0,7$ [mm] \Rightarrow UX = 0,22489 [mm]		-0,39504	-0,35035

Senza CONTACT12 e senza Attuatore Piezoelettrico con analisi di piccoli spostamenti			
Daiametro del cilindro da afferrare		UX del nodo della coda	UY del nodo della coda
$\phi = 0,3$ [mm] \Rightarrow UX = 0,02489 [mm]		-0,041766	-0,040647
$\phi = 0,4$ [mm] \Rightarrow UX = 0,07489 [mm]		-0,12567	-0,1223
$\phi = 0,5$ [mm] \Rightarrow UX = 0,12489 [mm]		-0,20957	-0,20395
$\phi = 0,6$ [mm] \Rightarrow UX = 0,17489 [mm]		-0,29347	-0,28561
$\phi = 0,7$ [mm] \Rightarrow UX = 0,22489 [mm]		-0,37737	-0,36726

Tabella 3-1 Risultati ottenuti dalle simulazioni realizzate con e senza il CONTACT12. Il termine “senza Attuatore Piezoelettrico” indica che la prova è stata svolta senza alimentare l’attuatore piezoelettrico. Il termine “UX” (nella colonna diametro del cilindro da afferrare) identifica il valore dello spostamento che il nodo del polpastrello (su cui si sviluppa il contatto) deve subire al fine di effettuare un’apertura delle dita del gripper necessaria ad afferrare il cilindro di diametro “ ϕ ” desiderato

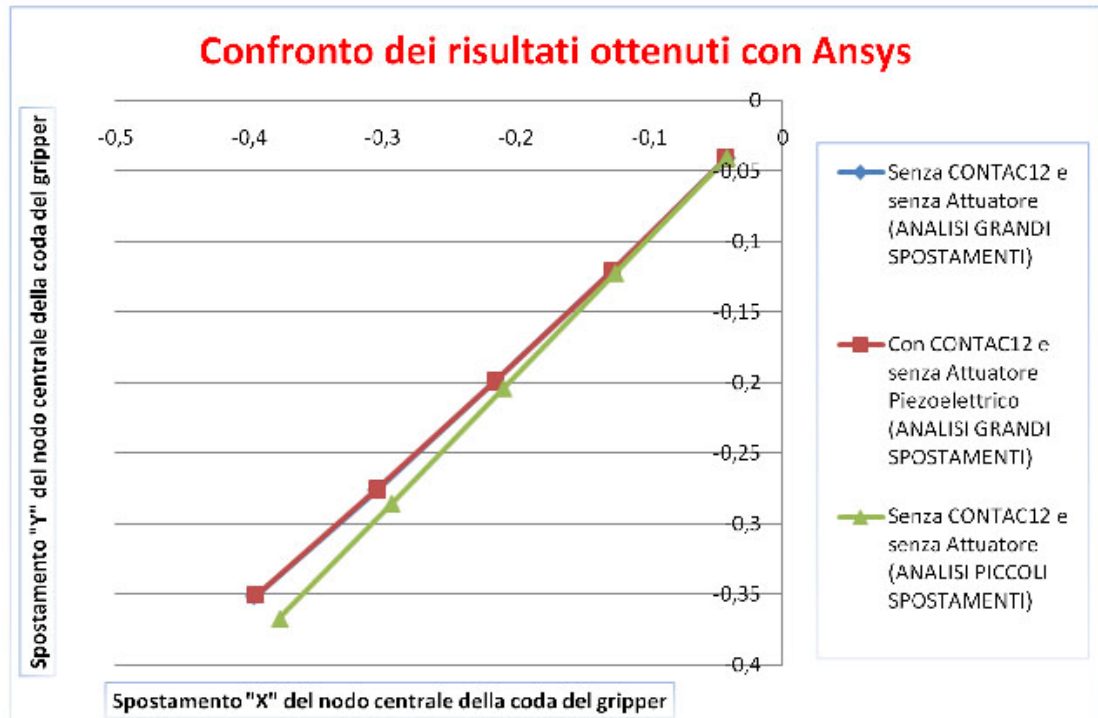


Grafico 3.3 Confronto dei risultati ottenuti con differenti modelli

Dal Tabella 3-1 e dal Grafico 3.3 è possibile notare che i risultati ottenuti dalle due simulazioni che utilizzano l'analisi per grandi spostamenti, sono sostanzialmente sovrapponibili (linea blu e rosa). Questo risultato ha permesso di poter continuare lo studio scegliendo uno dei due modelli indifferentemente. È stato scelto di utilizzare l'analisi con piccoli spostamenti perché oltre ad una più semplice stesura del programma in fase di scrittura, questo modello permette di effettuare simulazioni in tempi molto più brevi. A seguito della soluzione effettuata da Ansys, nel postprocessor viene chiesto di plottare la deformata dell'intero gripper rispetto all'immagine indeformata (Fig. 3.12).

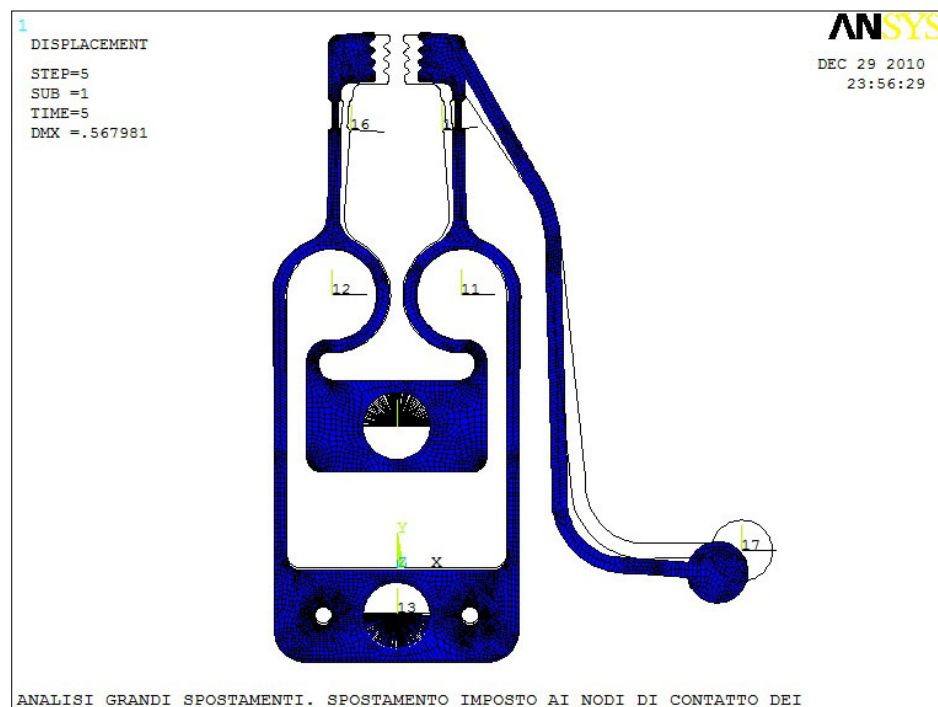


Fig. 3.12 Immagine plottata da Ansys con il comando "pldisp,2"

3.3. Test e controllo

Lo scopo del test è quello di riprodurre la presa di oggetti cilindrici di piccole dimensioni, determinandone la forza di contatto tra i polpastrelli del gripper e l'oggetto afferrato. Cercando di ricreare le condizioni reali di presa di oggetti noti, si è provato ad inserire direttamente nel gripper cilindri di diametro di 0,3 [mm], 0,4 [mm] e 0,5 [mm]. A causa delle ridotte dimensioni di quest'ultimi e del gripper stesso, anche quando siamo riusciti a posizionare i cilindri tra le dita, le perturbazioni create al sistema sono state ingenti, rischiando di ottenere misure non attendibili, e danneggiare l'intero sistema. Un'alternativa per ottenere i dati relativi alle forze di contatto che si sviluppano sui polpastrelli del gripper in fase di afferraggio, è stata quella di collegare un corpo di peso noto al dito del gripper dotato di coda, e successivamente misurare lo spostamento del dito e dell'estremità della paletta rispetto alla posizione imperturbata. In questo modo è stato possibile risalire indirettamente al valore della forza che si genera sul polpastrello del gripper conseguentemente ad una specifica apertura delle dita.

Al fine di caratterizzare la traiettoria del "PT" del microgripper in funzione della forza di serraggio che si sviluppa nella presa di oggetti cilindrici di diametro differenti, sono state adoperate le strumentazioni riportate in Fig. 3.13. È stato utilizzato un sistema di visione costituito da una mini telecamera, fissata su un'apposita struttura, dotata di elevata rigidezza, realizzata per l'occasione. Questa struttura si è resa necessaria per garantire un fissaggio permanente della telecamera e del micro gripper durante le fasi di apertura/chiusura e di presa/rilascio di oggetti cilindrici. La telecamera è stata collegata ad un pc su cui è stata effettuata l'acquisizione video. Importati i video sul pc sono stati elaborati con un apposito programma per estrapolarne la traiettoria del "PT" in funzione del carico applicato sul dito (dotato di coda) del polpastrello del gripper. In questo modo è stato possibile caratterizzare il microgripper.

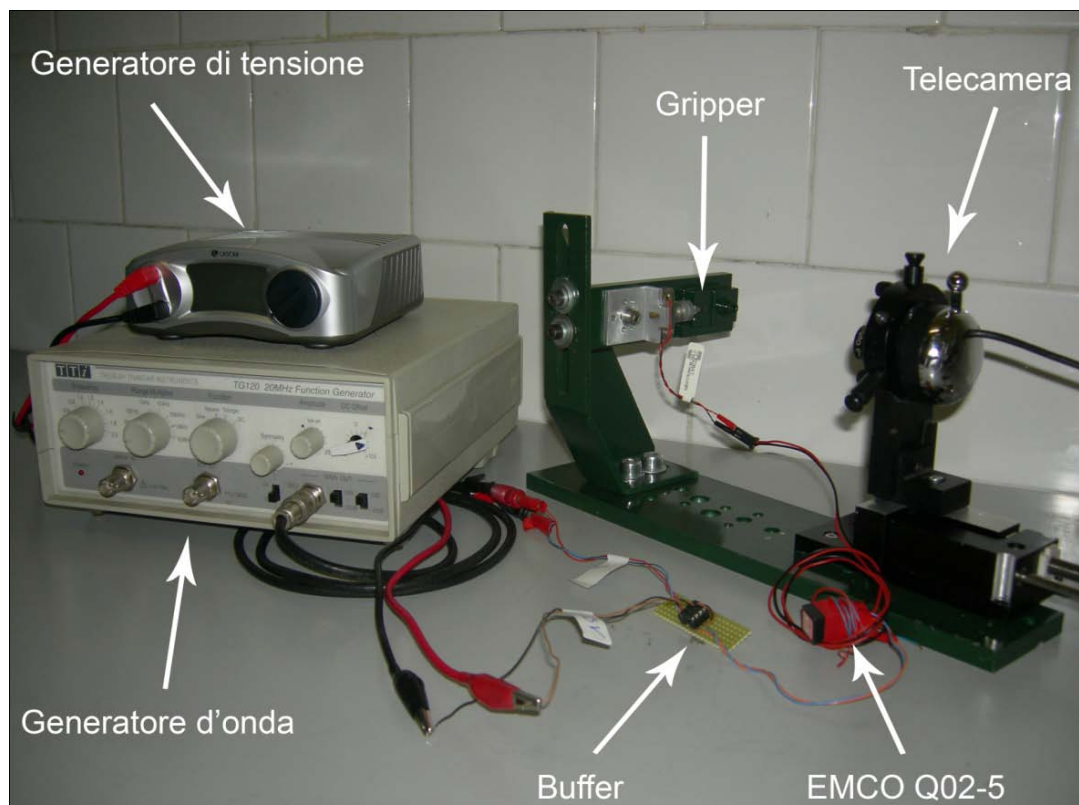


Fig. 3.13 Strumentazione adoperata per effettuare la prova sperimentale del gripper

3.3.1. Descrizione della strumentazione utilizzata

La struttura è composta da:

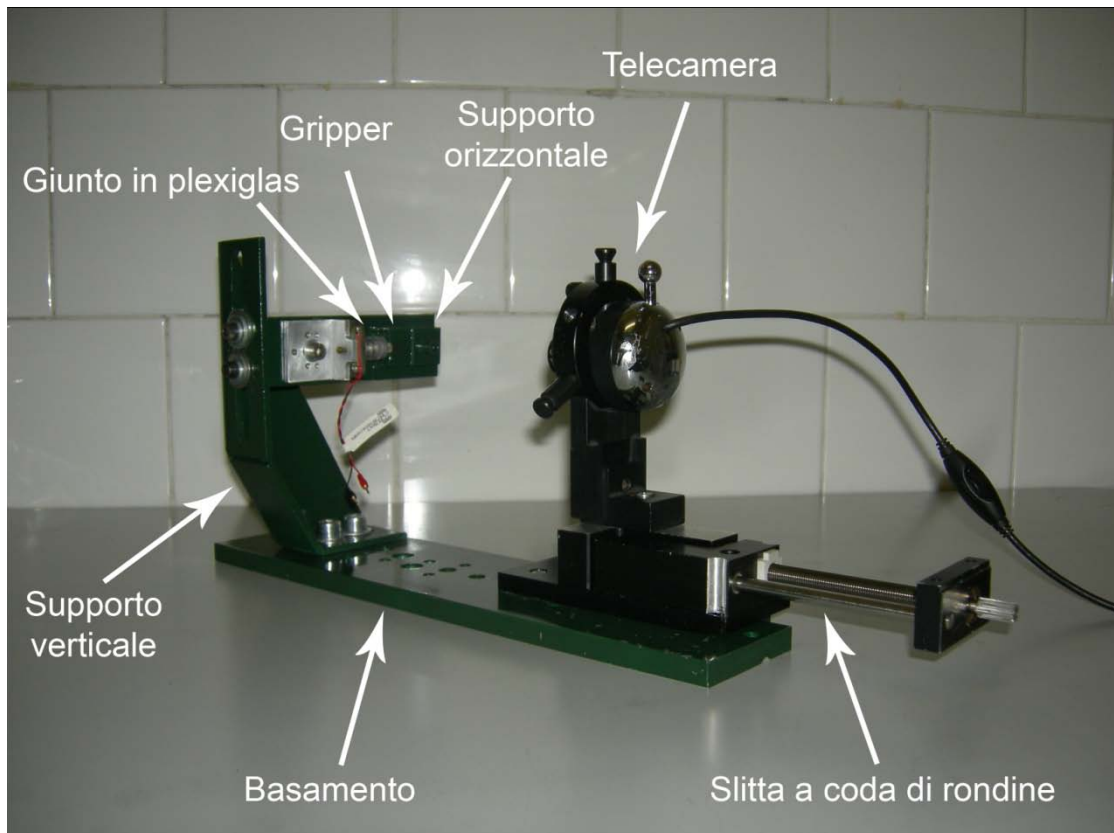


Fig. 3.14 Struttura realizzata per sorreggere il Microgripper e la telecamera

-) **Basamento:** componente di acciaio delle dimensioni di 320x80 [mm] che costituisce la base dell'intera struttura. La scelta delle dimensioni e del tipo di materiale utilizzato per costruire la base è stata effettuata in modo da ottenere un elevato peso per garantire l'imperturbabilità della struttura durante le prove.

-) **Slitta a coda di rondine:** supporto per la telecamera, dotata di una corsa di 20 [cm], capace di scorrere in direzione perpendicolare al gripper per riuscire ad avere una corretta messa a fuoco dell'immagine.

-) **Telecamera digitale** (marca: Edmund Optics, modello: 54855): webcam in miniatura ad elevato ingrandimento (dotata di uscita USB) che riprende la zona della coda del gripper (in particolare del "PT"). La telecamera è stata collegata al PC per registrare filmati in formato ".AVI" con risoluzione di 640x480 e con frequenza di aggiornamento di 30 fotogrammi al secondo. La telecamera è fissata alla slitta mediante un apposito dispositivo usato per applicazioni ottiche.

-) **Supporto verticale:** struttura costituita da una squadra a 90° in acciaio che serve da collegamento con il sistema su cui è posizionato sia il gripper che l'attuatore piezoelettrico (vedere supporto orizzontale Fig. 3.15).

-) **Supporto orizzontale** (Fig. 3.15). Struttura realizzata appositamente per sostenere sia il microgripper che l'attuatore piezoelettrico, è composto da:

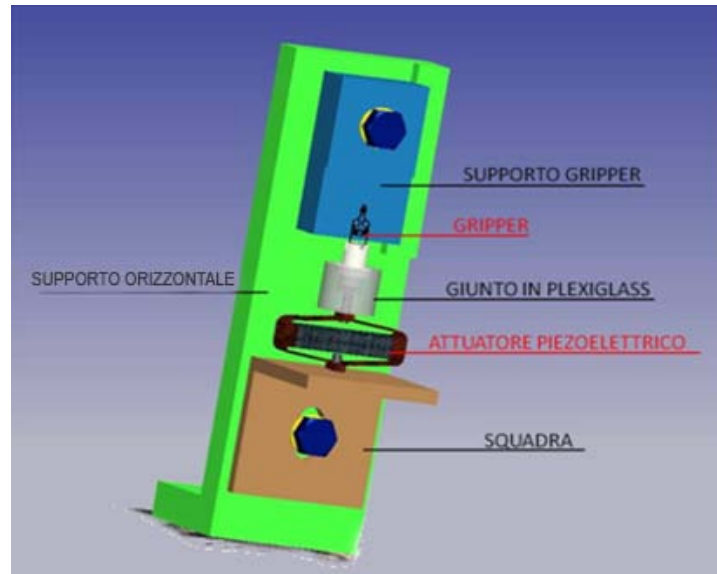


Fig. 3.15 Supporto orizzontale

- Supporto gripper: è dotato di un foro passante che ne permette il fissaggio al supporto orizzontale. All'estremità opposta è presente una battuta su cui si appoggia l'estremità inferiore della piastra fissa del gripper. Oltre alla battuta è presente un foro filettato M1 che serve per il serraggio della piastra fissa del gripper sul supporto.
- Gripper in acciaio

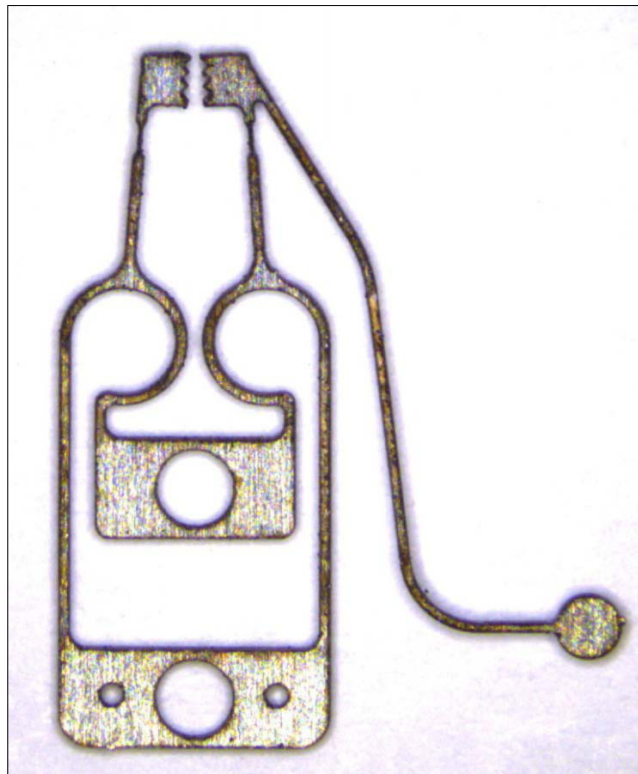


Fig. 3.16 Gripper al microscopio

- Giunto in plexiglas: data la difficile manipolazione del microgripper e la sua delicatezza (causata anche dalle ridotte dimensioni), si è scelto di inserire la base del gripper in un apposito giunto cilindrico in plexiglas. Per facilitare il posizionamento tale giunto è stato realizzato in due parti, collegate sotto un'adeguata pressione senza l'utilizzo di colle o perni. L'inserimento del microgripper nella parte superiore del giunto in plexiglas è stato fatto manualmente, creando una fessura nella parte superiore del giunto tale da ospitare la base del gripper. Successivamente è stato eseguito un foro passante nel giunto superiore, dove è stato inserito un perno di diametro 1 [mm] per impedire lo spostamento del gripper lungo il proprio asse. Come ulteriore garanzia di fissaggio sono state utilizzate alcune gocce di Attak. È stato scelto il plexiglas per realizzare il giunto perché è un materiale economico e facilmente lavorabile, per di più è in grado di resistere per pochi minuti all'azione dell'acetone. Caratteristica necessaria poiché l'acetone riesce a rimuovere velocemente il collegamento generato dall'Attak.

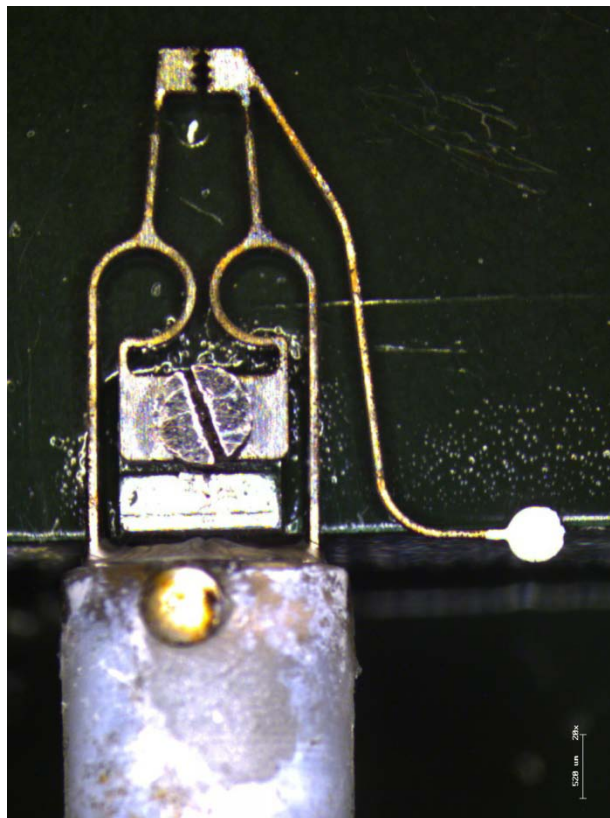


Fig. 3.17 Ingrandimento al microscopio del Gripper con il Giunto in plexiglass



Fig. 3.18 Ingrandimento del collegamento Gripper – Giunto in plexiglass

- L'attuatore piezoelettrico "APA120ML" di Fig. 3.19 è stato collegato, mediante una vite M2, al giunto in plexiglas.

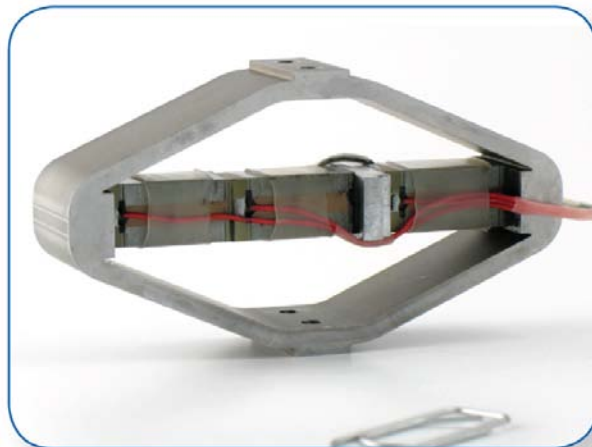


Fig. 3.19 Attuatore piezoelettrico "APA120ML"

References	Unit	APA120ML
Notes		space product
Displacement	(μm)	130
Blocked force	(N)	1400
Stiffness	(N/ μm)	10,8
Resonance frequency (free-free)	(Hz)	6450
Response time (free-free)	(ms)	0,08
Resonance frequency (blocked-free)	(Hz)	1750
Response time (blocked-free)	(ms)	0,29
Voltage range	(V)	-20 ... 150
Capacitance	(μF)	20,0
Resolution	(nm)	1,3
Thermo-mechanical behaviour	($\mu\text{m}/^\circ\text{K}$)	1,87
Height H (in actuation direction)	(mm)	45,0
Length	(mm)	78,9
Width (incl. edges, wires)	(mm)	22,5
Mass	(g)	160,0

Fig. 3.20 Data-Sheet dell'attuatore piezoelettrico utilizzato

Questo componente è costituito da una piccola barra di materiale piezoelettrico inserita in un guscio di forma ellittica di materiale metallico, avente la funzione di molla di richiamo. La barretta piezoelettrica se sottoposta ad una tensione tende ad espandersi lungo il proprio asse. Questo implica che sotto un'adeguata tensione il materiale piezoelettrico si dilata facendo schiacciare l'ellissi, mentre togliendo la tensione, la barretta piezoelettrica si ritira e quindi l'ellissi in ferro esterna tende a ritornare nella propria posizione iniziale. La deformazione dell'ellissi crea una forza di trazione alla base mobile del giunto in plexiglas che provoca così l'apertura delle dita del gripper.

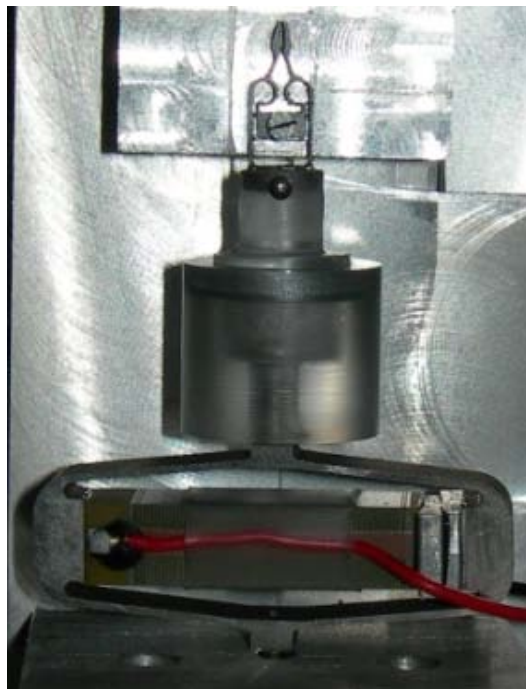


Fig. 3.21 Ingrandimento del collegamento tra attuatore piezoelettrico, giunto in plexiglas e microgripper

- Squadra a 90° in acciaio inox: struttura che serve per fissare l'attuatore piezoelettrico al supporto orizzontale. Questa fase richiede particolare attenzione, in quanto se l'interasse tra il foro della piastra fissa del gripper ed il foro di

fissaggio della squadra non risulta corretto, si potrebbe generare una forza sull'attuatore che determinerebbe una forza sul gripper e quindi l'apertura o la chiusura della pinza.

-) Verniciatura: la struttura così realizzata è stata dipinta di colore verde scuro, mentre la parte terminale della paletta del gripper è stata colorata di bianco. Questa accortezza serve per ottenere il contrasto tra la parte da analizzare (bianca) e la parte sottostante (verde scuro). In questo modo il sistema di visione incontrerà meno difficoltà nell'estrapolare il contorno della paletta del gripper.

-) Illuminazione: è importante che l'illuminazione della zona del gripper sia più uniforme possibile, in modo da evitare zone d'ombra che potrebbero forviare il programma di visione. Per questo il sistema di illuminazione è stato dotato di particolari lampade fornite di bracci che consentono un facile orientamento nello spazio.

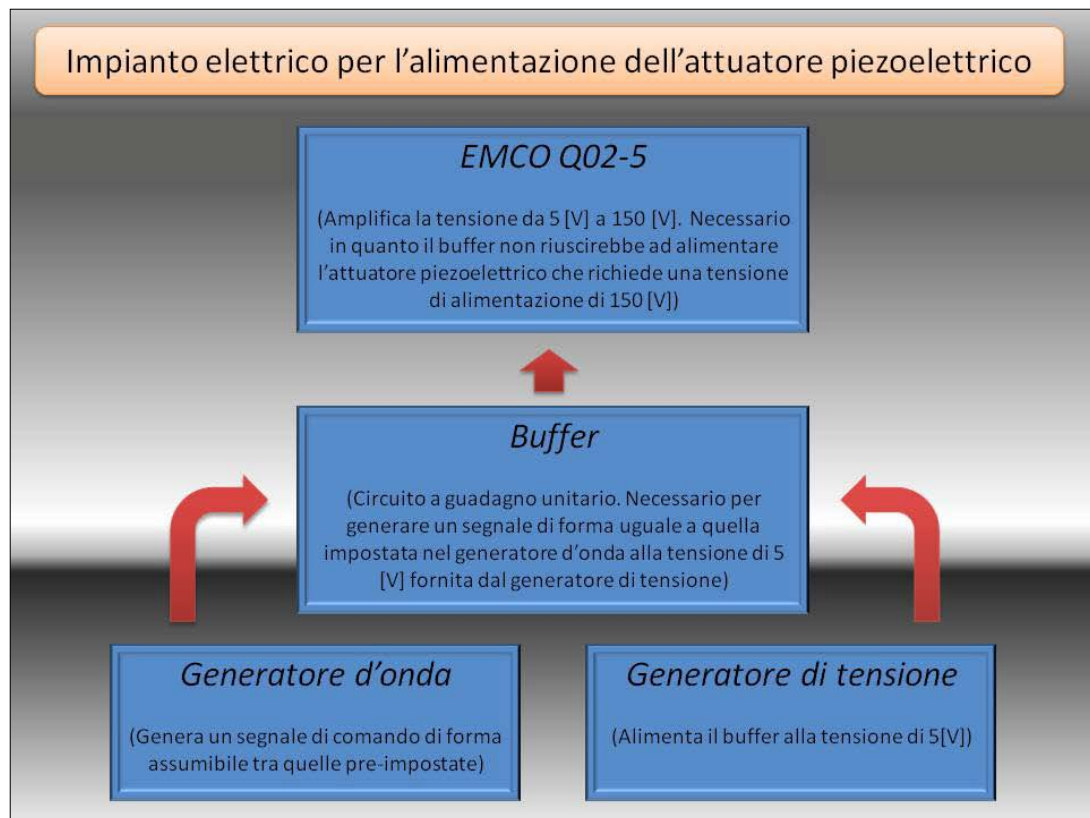


Fig. 3.22 Schema dell'impianto elettrico per l'alimentazione dell'attuatore piezoelettrico

-) Generatore d'onda: modella un segnale di comando che verrà inviato ad un ingresso del buffer (Fig. 3.22). Ha la possibilità di modellare un'onda impostabile tra le numerose configurazioni disponibili. Tra le varie forme assumibili dall'onda quella che è stata impostata è la quadra. Questa scelta è stata fatta per poter limitare al minimo la fase di transitorio dell'apertura e della chiusura del gripper, per poterne agevolare la misurazione della massima apertura. Il secondo parametro da impostare è la frequenza in [Hz], che nell'esperimento è stato regolato al minimo in modo da permettere al gripper di rimanere per un tempo maggiore nella configurazione di massima apertura in modo da poter effettuare fotografie di elevata qualità per poi poterle analizzare con gli appositi strumenti informatici.

-) Generatore di tensione: apparecchio in grado di alimentare il buffer (Fig. 3.22) con una tensione di uscita regolabile nell'intervallo compreso tra 0 [V] e 5 [V]

-) Buffer: circuito a guadagno unitario. Il buffer è in grado di unire la tensione fornita dal generatore di tensione con la forma del segnale modellato dal generatore di segnale (Fig. 3.22). Il segnale così generato non risulta ancora sufficiente ad alimentare direttamente l'attuatore piezoelettrico in quanto la tensione di uscita massima che si può raggiungere è di 5 [V].

-) EMCO Q02-5: fornisce la corretta amplificazione della tensione richiesta dall'attuatore piezoelettrico (Fig. 3.22). Caratteristiche:

- amplifica la tensione da 5 [V] a 150 [V]. La tensione in uscita del buffer ha al massimo un valore di 5 [V], che non riuscirebbe a generare la movimentazione dell'attuatore piezoelettrico che richiede invece tensioni di alimentazione dell'ordine dei 150 [V]
- ingombro limitato
- piccolo peso
- il voltaggio in uscita è direttamente proporzionale alla tensione d'ingresso ed è lineare da circa 0.7 [V] d'ingresso fino alla tensione massima di ingresso, consentendo una tensione di uscita regolabile

Ultra-Miniature DC to HV DC Converters							
0 to + or -100 through 0 to + or - 10,000 VDC @ 0.5 Watts Q Series					www.emcohighvoltage.com EMCO High Voltage Corporation		
MODEL	INPUT VOLTAGE	OUTPUT VOLTAGE	OUTPUT CURRENT	RIPPLE P-P	INPUT CURRENT		CASE
					NO	FULL	
Q02-5	0 to 5V	0 to +/-200V	2.5 mA	<0.25%	<50mA	<175mA	A

Fig. 3.23 Data-Sheet del generatore di tensione EMCO Q02-5

-) AMCAP: Piccola applicazione software che permette di catturare il segnale video.

-) Animation Shop: programma per i Web designer di alta qualità. È stato utilizzato per esplodere i filmati in fotogrammi sui quali sono state fatte le analisi per tracciare la traiettoria del "PT"

-) Ansys

3.3.2. Fasi dell'esperimento

L'esperimento è stato svolto seguendo le fasi riportate nella Fig. 3.24. Tale figura deve essere letta partendo da sinistra e andando verso destra. L'ordine è quello cronologico con le quali sono state svolte le operazioni effettuate durante l'esperimento. Nella parte alta della figura vengono riportati i software utilizzati, mentre nella parte centrale le operazioni effettuate e nella parte bassa i risultati ottenuti a fronte di ogni elaborazione.

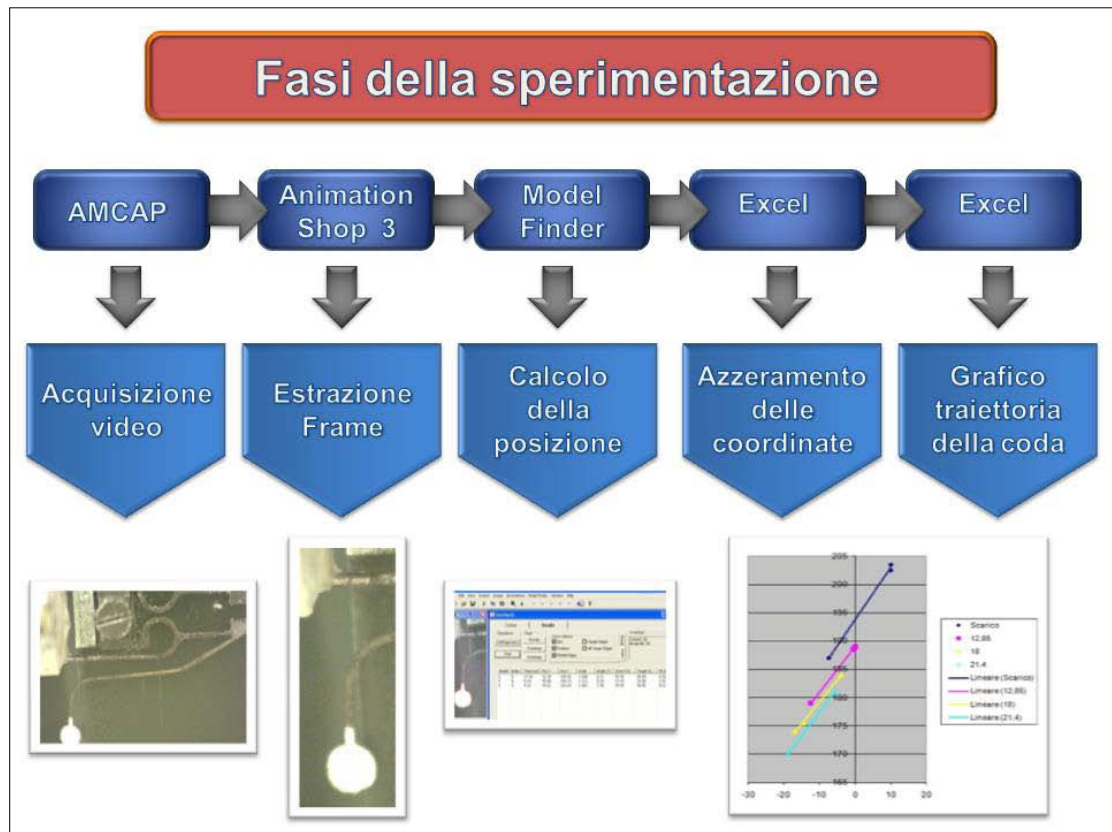


Fig. 3.24 Fasi seguite durante la sperimentazione

Definito il modello sperimentale è stata effettuata l'acquisizione video mediante il programma AMCAP. Il primo video è stato registrato con il gripper sottoposto all'azione dell'attuatore piezoelettrico, in assenza di altre forze né oggetti. Il ciclo di chiusura ed apertura del gripper è stato registrato per tre volte, in modo da avere misurazioni sufficientemente attendibili, ma non occupare eccessiva memoria del sistema informatico.

Successivamente, l'esperienza è stata ripetuta applicando un carico sul dito del gripper dotato di coda, utilizzando un filo di nylon di spessore 0,1[mm] su cui sono stati applicati vari piombi fino a raggiungere il peso voluto. Per evitare di perturbare il sistema ad ogni nuovo inserimento del piombo, è stata progettata una parte di collegamento tra il dito del gripper ed il filo che porta i piombi stessi. Questa zona è composta sempre da un filo di nylon avente ad un'estremità un nodo che ha permesso il legame al dito del gripper, dall'altra un amo dove è stato possibile agganciare il filo contenente diversi numero di piombi (vedere Fig. 3.25). Il dispositivo così realizzato ha permesso di lavorare in sicurezza contro possibili imprevisti che potrebbero danneggiare il gripper.

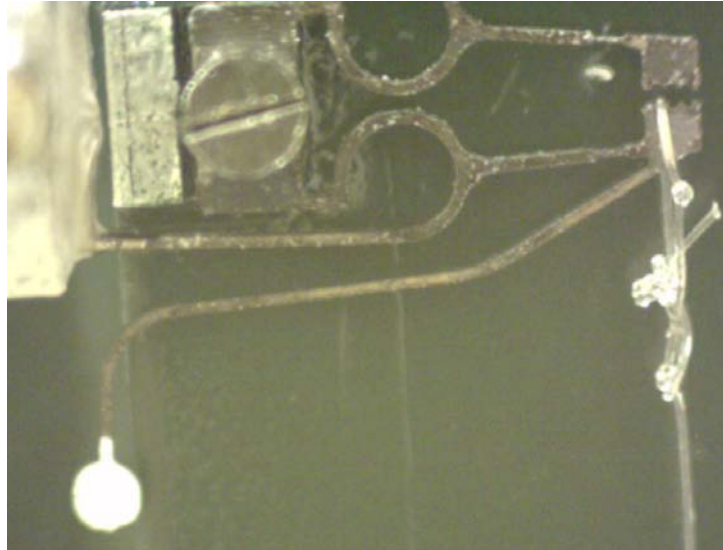


Fig. 3.25 Collegamento del filo da pesca al dito del gripper dotato di coda

Nella fase successiva sono state effettuate numerose prove, tutte registrate, aumentando ogni volta il peso applicato al dito del gripper ottenendo così numerose registrazioni:

- condizioni di dito scarico
- filo ed ago da pesca collegato con il dito ma senza pesi applicati al filo
- 10 [g]
- 10,95 [g]
- 11,9 [g]
- 12,85 [g]
- 13,8 [g]
- 14,75 [g]
- 15,7 [g]
- 16,65 [g]
- 17,6 [g]
- 18,55 [g]
- 19,5 [g]
- 20,45 [g]
- 21,4 [g]

Analizzando le varie registrazioni sono state rilevate le coordinate della coda del gripper al variare del peso applicato sul dito.

Per riuscire a calcolare la posizione delle coordinate è stato necessario scomattare i vari filmati in fotogrammi. Questa operazione è stata possibile grazie all'utilizzo del programma Animation Shop, con il quale una volta importato il singolo video è stato possibile salvarlo in fotogrammi di formato .JPG.



Fig. 3.26 Fotogramma filmato di prova del Gripper

Una volta ottenuti i fotogrammi è stato necessario utilizzare il programma di visione Model Finder per estrapolare la posizione delle coordinate del baricentro della coda del gripper. Il programma Model Finder permette infatti di convertire i fotogrammi da formato .JPG in foto a 8-bit insigned. L'area del gripper di cui si deve determinare le coordinate è quella della parte terminale della coda ("PT"), quindi è stato delimitato il contorno della coda del gripper nella foto a 8-bit, oscurando le zone dell'immagine che non devono essere considerate. Questo ha permesso al programma Model Finder di farne l'analisi geometrica soltanto della zona d'interesse (vedere Fig. 3.27).



Fig. 3.27 Fotogramma oscurato con Model Finder

Successivamente sono state estrapolate le coordinate della posizione della paletta del gripper.

Per ogni video il programma Model Finder ha fornito una tabella di valori, tra cui quelli delle coordinate del baricentro della coda del gripper, in formato .Txt.

Per poter confrontare i vari filmati è stato necessario definire un punto di riferimento (nello specifico è stato scelto lo spigolo inferiore sinistro della piastra fissa del gripper; vedere Fig. 3.28) rispetto al quale ricalcolare le coordinate della coda.



3.28 Punto fisso dello spigolo inferiore sinistro della piastra fissa del gripper

Alla fine i dati ottenuti sono stati riportati su una tabella in formato Excell per poter graficare l'andamento della posizione del gripper al variare del carico applicato sul dito.

I valori ottenuti nell'esperimento sono riportati nell'appendice, mentre il grafico ottenuto è riportato di seguito (Grafico 3.4).

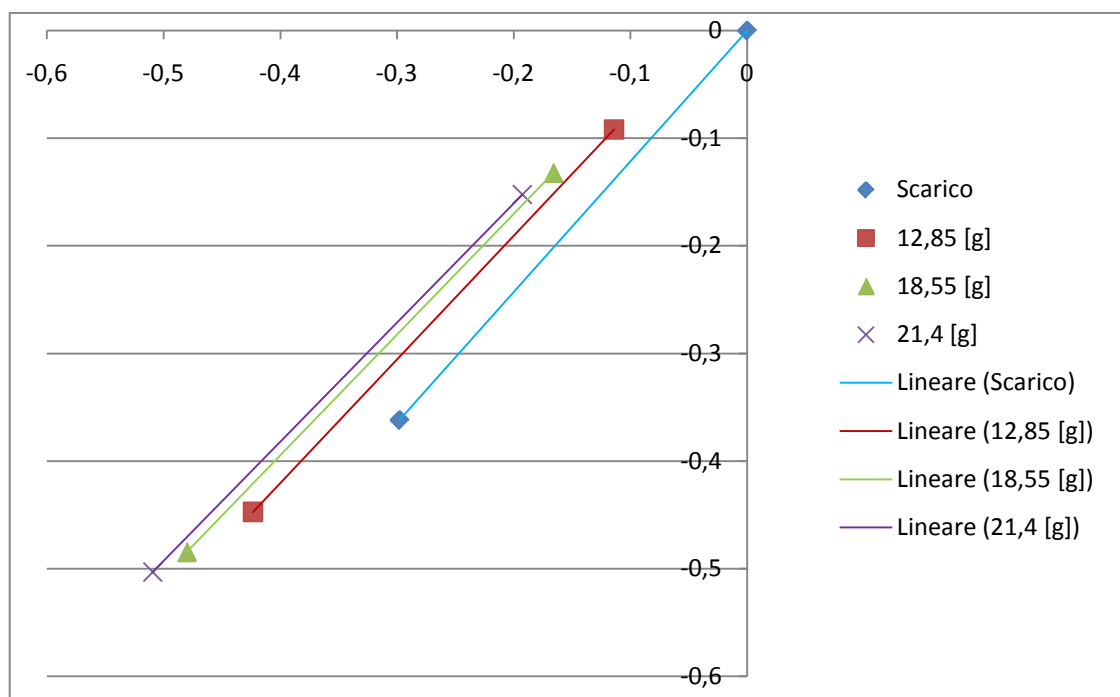


Grafico 3.4 Andamento delle coordinate delle posizioni della coda del gripper rispetto ad un punto fisso

Dal momento che le coordinate "X"- "Y" del sistema di riferimento del programma Model Finder, sono rispettivamente orientate verso destra e verso il basso (Fig. 3.31), ed

invece nel sistema di riferimento di Ansys (Fig. 3.30) l'asse delle "X" è verso destra e quello delle "Y" verso l'alto, i valori "Y" dei due sistemi sono opposti.

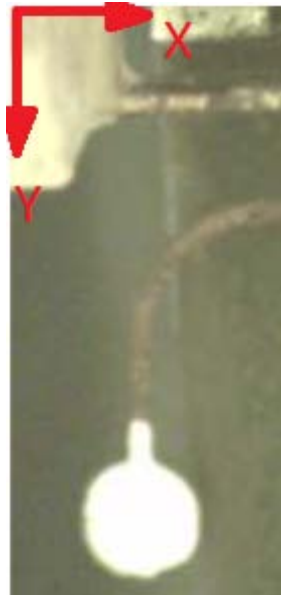


Fig. 3.30 Sistema di riferimento del Model Finder

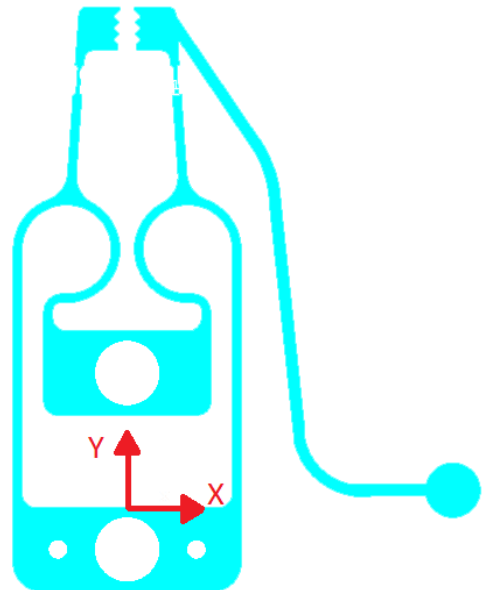


Fig. 3.29 Sistema di riferimento di Ansys

A causa di questa differenza per poter confrontare i risultati ottenuti dal Model Finder con quelli di Ansys, è necessario ruotare il sistema di riferimento dei risultati del Model Finder, assegnando ai valori delle coordinate "Y" del Model Finder, le coordinate "X" di Ansys, mentre alle coordinate "X" del Model Finder le coordinate "Y" di Ansys. Quello che si ottiene è (Grafico 3.5):

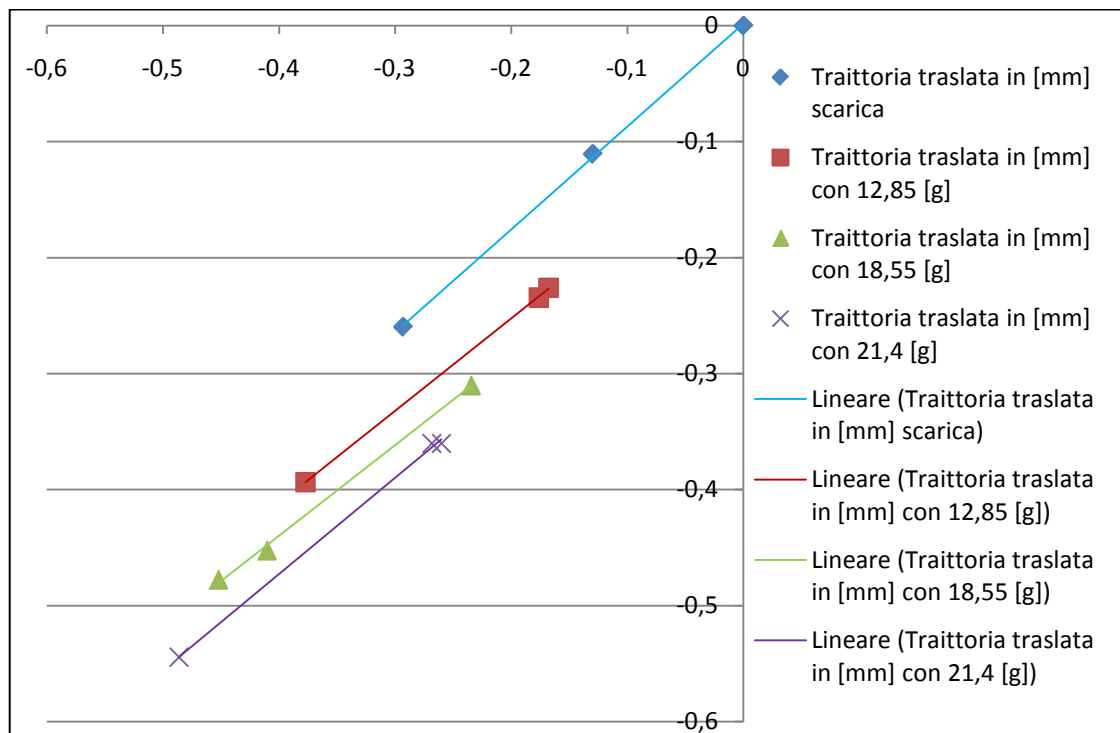


Grafico 3.5 Andamento delle coordinate delle posizioni della coda del gripper rispetto ad un punto fisso, con sistema di coordinate del Model Finder ruotato

3.4. Confronto tra i risultati FEM e quelli sperimentali

Il confronto tra le traiettorie percorse dal “PT” ottenute dall’analisi virtuale mediante il programma di calcolo Ansys (Grafico 3.6) e quelle ottenute sperimentalmente (Grafico 3.7), mostrano una somiglianza quasi totale.

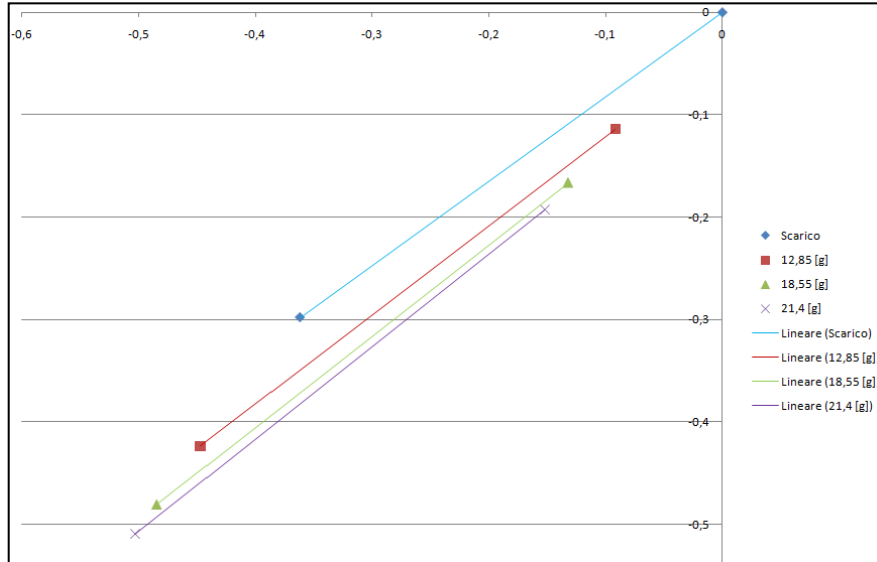


Grafico 3.6 Traiettoria del pointer's tip ottenuta dall'analisi di Ansys

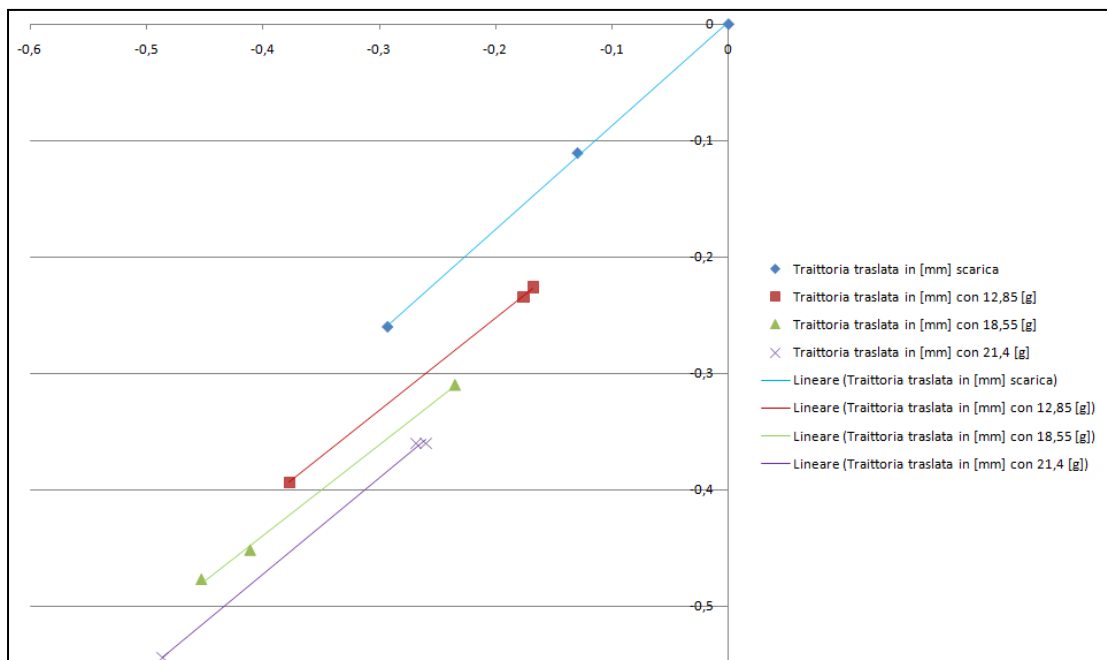


Grafico 3.7 Traiettoria del pointer's tip ottenuta dall'analisi sperimentale

L'unica differenza tra i due risultati è che le traiettorie ottenute con Ansys risultano più lunghe di quelle rilevate sperimentalmente. Questa differenza dipende dal fatto che nelle prove sperimentali sono presenti dei giochi che il modello teorico di Ansys non prevede. Infatti il serraggio della vite M1, che collega la “piastra fissa del gripper” con il “supporto gripper”, non è risultato affatto semplice a causa delle micro dimensioni e delle limitate strumentazioni a disposizione.

Già in fase di acquisizione video era visibile un piccolo movimento della piastra fissa, che teoricamente non doveva accadere, tuttavia non è stato possibile annientarlo per le motivazioni sopra dette.

Dal Grafico 3.5, Grafico 3.6 e Grafico 3.7 è possibile notare che la diminuzione della lunghezza della traiettoria è dovuta ad una traslazione del gripper nella fase iniziale di applicazione della forza di trazione dell'attuatore piezoelettrico. Ad esempio prendendo in riferimento la traiettoria del "PT" all'applicazione del carico di 12,85 [g] sul dito, è visibile che nella simulazione effettuata con Ansys le coordinate della posizione iniziale del "PT" risultano $X = -0,091792$ [mm] e $Y = -0,11413$ [mm] e nel caso sperimentale risultano $X = -0,16791875$ [mm] e $Y = -0,226125$ [mm] mentre le coordinate della posizione finale del "PT" nella simulazione effettuata con Ansys risultano $X = -0,44731$ [mm] e $Y = -0,42337$ [mm] e nel caso sperimentale risultano $X = -0,37729375$ [mm] e $Y = -0,393625$ [mm].

Dai risultati è evidente che la differenza tra le due traiettorie si verifica esclusivamente nella prima fase (applicazione del carico), mentre nella fase finale lo scostamento delle coordinate delle traiettorie è minimo.

4. AVVITATORE PER MICROVITI

4.1. Introduzione

Lo studio in questione prevede la progettazione e la realizzazione di un avvitatore utilizzabile per effettuare il collegamento della parte elettronica degli apparecchi acustici sulla struttura esterna dell'apparecchio realizzato in materiale plastico. Tale collegamento viene realizzato mediante il serraggio di micro viti metalliche dotata di geometria analoga a quella di Fig. 4.1.

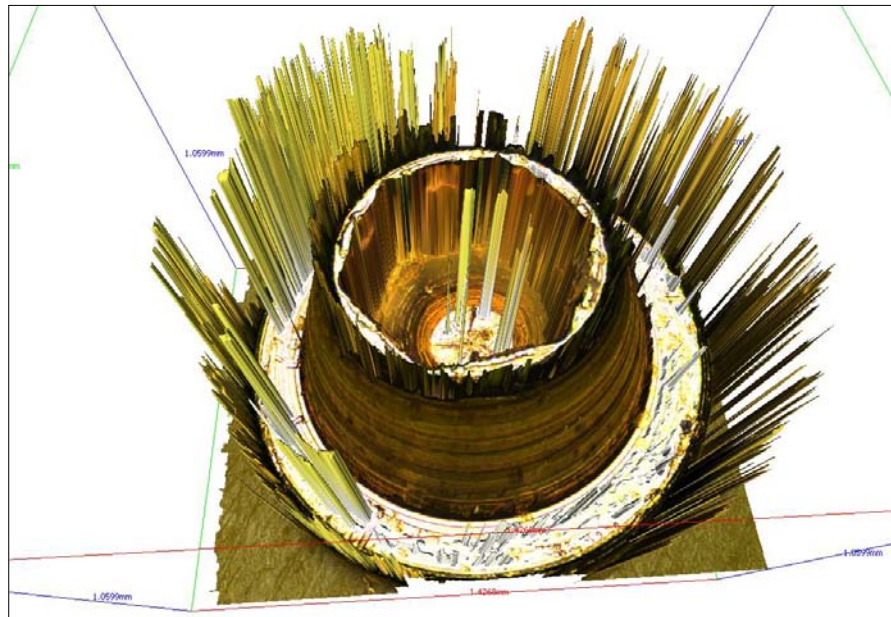


Fig. 4.1 Immagine della testa della micro vite ottenuta al sistema di visione

-) Micro-vite: vite autofilettante di dimensioni molto piccole (diametri dell'ordine di 0,5 [mm], Fig. 4.1). Tali dimensioni rendono estremamente difficile ogni tipo di lavorazione, per questo la testa della vite non ha una forma convenzionale (croce o taglio), ma una geometria particolare simile ad un cratere.

Vista la particolare geometria della testa della micro-vite, non è quindi possibile trasmettere la coppia torcente dall'avvitatore alla vite tramite un banale inserto. Per questo, in fase di progettazione dell'avvitatore, le forze ed i momenti che si generano durante la fase di serraggio vengono trasmesse mediante particolari colle dotate di bassa temperatura di fusione e non da convenzionali inserti.

Le fasi di preparazione e serraggio della micro-vite mediante l'avvitatore sono:

- applicazione di un'adeguata quantità di colla, allo stato solido, sulla parte terminale della punta dell'avvitatore
- avvicinamento dell'avvitatore in prossimità della testa della vite
- riscaldamento dell'estremità bassa della punta dell'avvitatore, mediante un apposito circuito elettrico, in grado di raggiungere temperature tali da rendere malleabile la colla
- inserimento della testa dell'avvitatore ricoperta di colla, sulla testa della micro vite

- spegnimento della resistenza che scalda la colla ed attesa di un tempo sufficiente a far verificare il solidificamento della colla
- sollevamento e posizionamento del sistema “avvitatore – vite” nella corretta zona in cui deve essere serrata la vite
- avvitatura
- riscaldamento della parte terminale della punta dell’avvitatore per eliminare l’effetto adesivo della colla tra la testa della vite e l’avvitatore
- sollevamento dell’avvitatore

L’avvitatore per svolgere in maniera efficace ed efficiente il proprio lavoro deve garantire particolari caratteristiche che risiedono sostanzialmente in piccole dimensioni d’ingombro ed elevata velocità di avvitamento. La Fig. 4.2 riporta il disegno 3D dell’avvitatore progettato ed in seguito realizzato nelle officine d’Ingegneria dell’Università di Pisa.

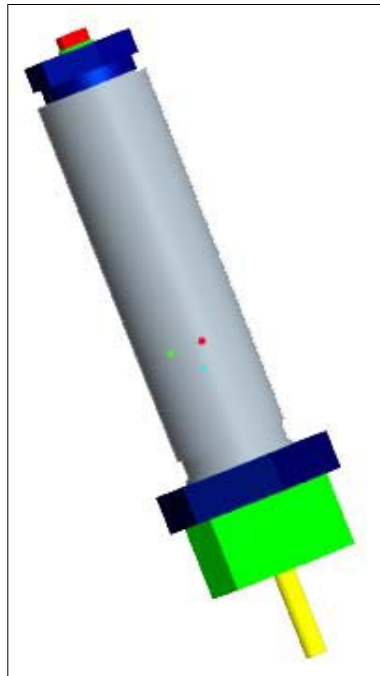


Fig. 4.2 Disegno 3D dell’avvitatore

Dalla Fig. 4.3 è possibile osservare le varie parti che compongono l’avvitatore.

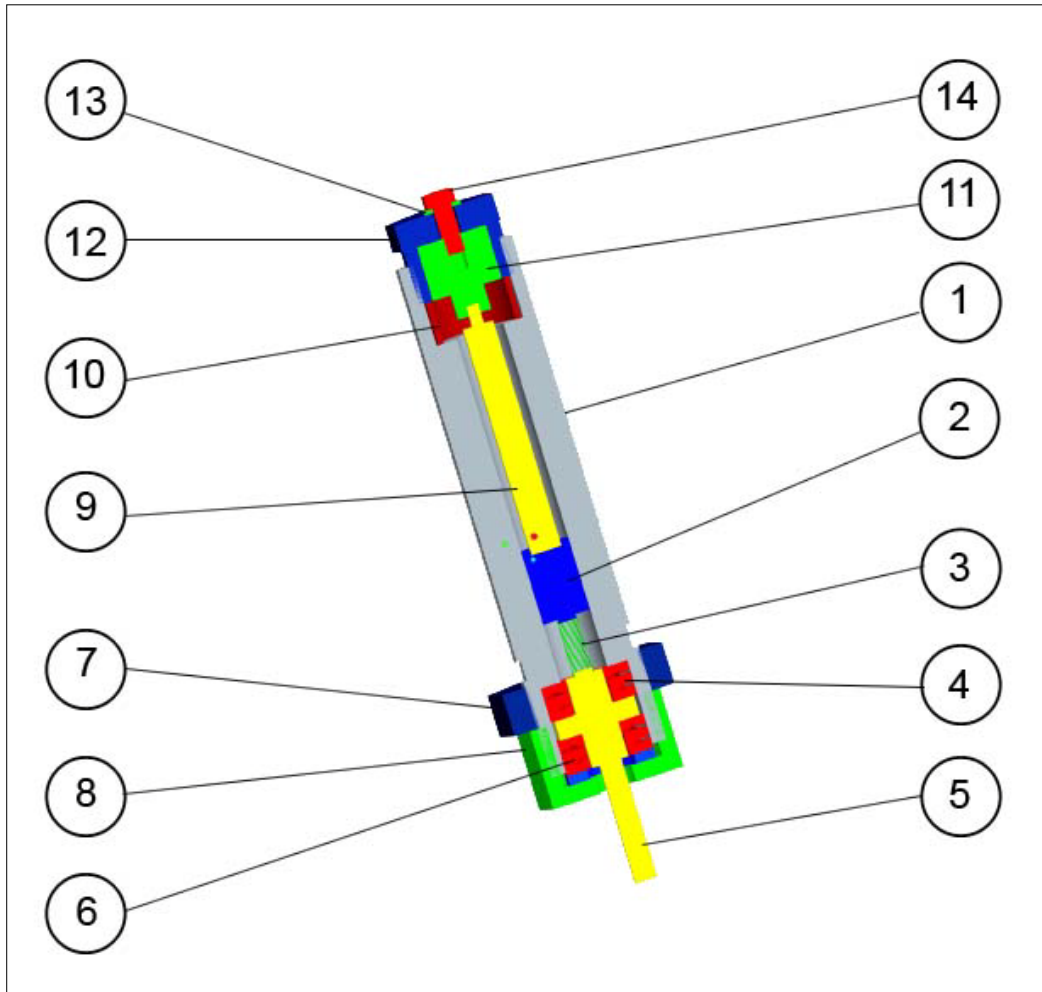


Fig. 4.3 Schema in sezione dell'avvitatore

Dove i numeri corrispondono ai seguenti componenti:

- telaio avvitatore (1)
- distanziale attuatore-molla (2)
- molla di torsione (3)
- spessore in teflon (4)
- punta avvitatore (5)
- spessore in teflon (6)
- dado (7)
- tappo femmina (8)
- attuatore piezoelettrico (9)
- molla di compressione (10)
- distanziale tappo maschio (11)
- tappo maschio (12)
- rosetta (13)
- vite (14)

-) Attuatore piezoelettrico (modello: PPA120XL): necessario per portare in compressione la molla di torsione (3). È in grado di sviluppare, sotto una differenza di potenziale di 150 [V], deformazioni assiali di 0,12 [mm] ad una frequenza che può arrivare fino a 100 [KHz]. Le caratteristiche dell'attuatore piezoelettrico, sono riportate in Fig. 4.4.

Properties PPA120XL	Standard technical conditions	Unit	Nominal values	Min. values	Max. values
Notes		-	-	-	-
Max. no load displacement	Quasistatic excitation, blocked-free	μm	130	117	150
Blocked force	Quasistatic excitation, blocked-free	N	7000	5600	8400
Stiffness	Quasistatic excitation, blocked-free	$\text{N}/\mu\text{m}$	53,85	43,08	59,23
Resonance frequency (free-free)	Harmonic excitation, free-free, on the admittance curve	Hz	5000	4250	5500
Response time (free-free)	Harmonic excitation, free-free, on the admittance curve	ms	0,10	0,09	0,12
Capacitance	Quasistatic excitation, free-free, on the admittance curve	μF	72,00	64,80	93,60
Max. tensile force	Static effort, blocked-free	N	3500	2625	3500
Resolution	Quasistatic excitation	nm	1,30	-	-
Height (in actuation direction)		mm	140,00	139,80	140,20
Depth (base)		mm	30,00	29,80	30,20
Width (base incl. wedge & wires)		mm	30,00	29,80	30,20
Mass		g	384,0	-	-
Standard mechanical interface (top)	1 centered M5 threaded hole 6 mm deep & 4 M3 threaded holes on \varnothing 20 mm 6 mm deep	-	-	-	-
Standard mechanical interface (base)	1 centered M5 threaded hole 6 mm deep & 4 M3 threaded holes on \varnothing 20 mm 6 mm deep	-	-	-	-
Standard electrical interface	2 PTFE insulated AWG26 wires 100 mm long with \varnothing 1 banana plug	-	-	-	-

Fig. 4.4 Datasheet dell'attuatore piezoelettrico utilizzato modello: PPA120XL

-) Circuito elettrico per alimentare l'attuatore piezoelettrico: è il medesimo di quello utilizzato per azionare il gripper.

-) Molla: elemento appositamente progettato e realizzato al fine di ottenere una rotazione reciproca delle due superfici (superiore ed inferiore, Fig. 4.5), nel momento in cui viene sottoposta a compressione.

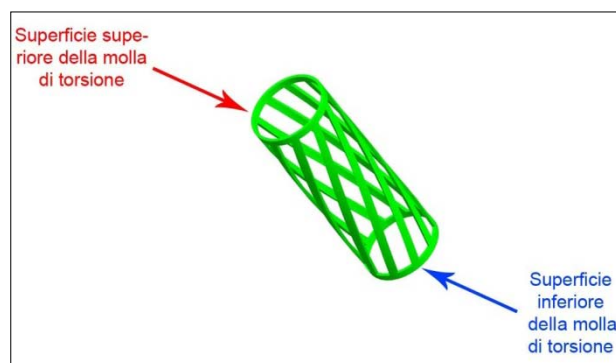


Fig. 4.5 Molla di torsione

La molla è costituita da una serie di piccole aste inclinate di 15° rispetto alla normale al piano (Fig. 4.6). Portando in compressione la molla, si generano sulle aste le reazioni "R" (forza lungo l'asse di ogni singola asta) che data la geometria dell'elemento (forma sottile e lunga) rispondono alle caratteristiche dell'asta. Il fatto di assimilare le spire della molla ad aste comporta che l'unica reazione che può sopportare è quella a sforzo normale. La forza di compressione a cui è sottoposta ogni singola asta è pari a:

$$F_{\text{Compressione}} = \frac{K \times \Delta Y_{\text{Attuatore}}}{10}$$

Dove “K” è la costante elastica della molla, “ $\Delta Y_{\text{Attuatore}}$ ” è lo spostamento lungo “Y” dell’attuatore piezoelettrico dalla condizione scarica fino al valore massimo di allungamento che si verifica per valori di tensione di 150 [V], mentre il numero al denominatore rappresenta il numero di aste che costituiscono la molla.

Come mostrato in Fig. 4.6 la molla, se portata in compressione, genera tante reazioni “R” quante sono il numero di aste che la costituiscono. Tuttavia è possibile scomporre le reazioni “R” nelle forze “ F_Y ” e “ F_X ”. L’azione che il “distanziale attuatore-molla” e la punta dell’avvitatore esercitano sulla molla, sono rappresentate dalle “ $F_{\text{compressione}}$ ”, mentre le reazioni che la molla fa sui sopra detti componenti sono rappresentate dalle reazioni “ $F_{X\text{-Tot}}$ ”, “ $F_{Y\text{-Tot}}$ ” e “ M_Y ”. Per rispettare la teoria “azione – reazione” deve necessariamente verificarsi che la “ $F_{\text{compressione}}$ ” risulti in modulo uguale alla “ $F_{Y\text{-Tot}}$ ”. Le componenti “ $F_{X\text{-Tot}}$ ” poste all’estremità superiore ed inferiore della molla sono di verso opposto. Queste due componenti generano la coppia dell’avvitatore (M_Y) che ne provoca il moto.

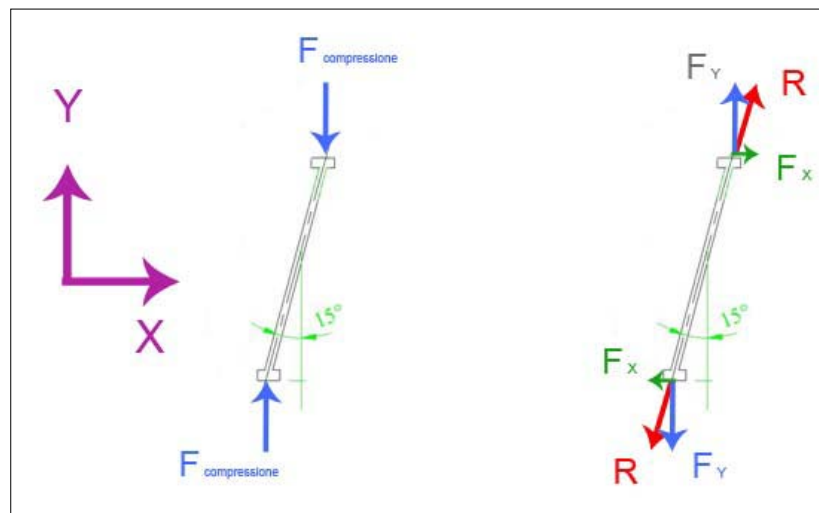


Fig. 4.6 Forze e reazioni che agiscono sul singolo elemento della molla

Progettata la molla, è stata fatta realizzare mediante taglio laser ad una ditta esterna. Il materiale con cui è stata realizzata è acciaio armonico.

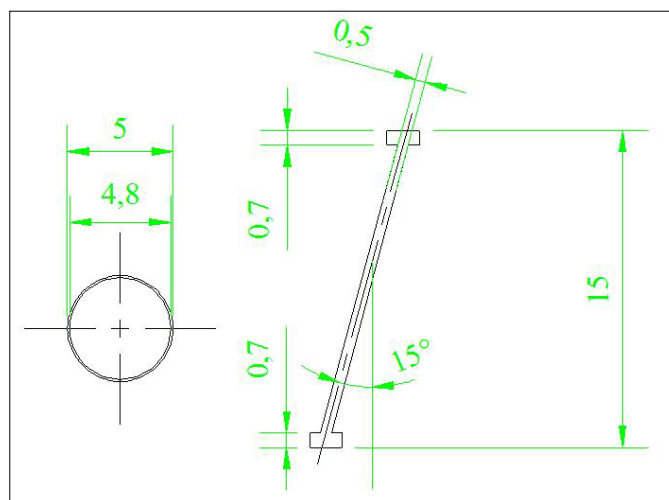


Fig. 4.7 Geometria quotata di una spirale della molla motrice

La molla (3) essendo il componente che genera la rotazione, è l'elemento di maggiore interesse dell'intero avvitatore.

-) Spessori (4 e 6): realizzati in teflon per limitare al massimo gli attriti che nascono per opporsi alla rotazione della punta e che limitano il corretto funzionamento dell'avvitatore. Oltre al basso coefficiente d'attrito ($f=0,04$) il teflon è estremamente economico e facile da lavorare. La soluzione ottimale sarebbe quella di utilizzare i cuscinetti assiali della SKF modello 51100 che limiterebbero ulteriormente l'attrito. Per motivi economici è stato utilizzato il teflon, ma in fase di progettazione sono state rispettate le misure dei cuscinetti SKF per poter avere in un futuro la possibilità di sostituirli, ed aver così una migliore efficienza dell'avvitatore senza doverne apportare alcuna modifica.

-) Dado (7), tappo femmina (8) e tappo maschio (12): sono stati acquistati in mesticheria per non sovraccaricare le officine della facoltà e per ridurre i tempi di attesa dovuti alla lavorazione. Tale scelta ha introdotto un ulteriore problema, poiché tappi di queste dimensioni sono utilizzati esclusivamente in campo idraulico quindi le filettature sono Whitworth e Gas che presentano accoppiamenti con gioco. Per eliminare questo gioco sono stati presi due accorgimenti: sulla parte bassa dell'attuatore è stato inserito un dado (7), che permette un serraggio del tipo dado controdado con il dado femmina (8); nella parte superiore è stata introdotta una molla di compressione (10), che comprime il tappo maschio (12).

-) Distanziale attuatore-molla (2) e punta avvitatore (5): sono stati realizzati in alluminio, in quanto le sollecitazioni a cui vengono sottoposti sono limitate e quindi non è necessario utilizzare materiali di alta resistenza come l'acciaio. L'alluminio ha reso molto più agevoli le operazioni di lavorazione alle macchine utensili, inoltre è un materiale facilmente reperibile all'interno delle officine della facoltà.

Dato che il momento generato dalla molla viene trasferito per attrito dalla punta al telaio dell'avvitatore, l'utilizzo dell'alluminio limita il valore massimo del momento che può essere trasmesso all'interno dell'avvitatore, in quanto il coefficiente d'attrito statico che si ha nel contatto di due superfici rispettivamente di alluminio e di acciaio risulta pari a $f=0.61$, mentre quello con l'acciaio su acciaio è pari a $f=0.74$. A fronte dei vantaggi precedentemente citati, l'utilizzo dell'alluminio rispetto all'acciaio ha fatto diminuire il valore di coppia massima sviluppabile dall'avvitatore. Se ne deduce l'importanza della scelta dei materiali con cui vengono realizzati i vari componenti.

Consapevoli del fatto di aver inserito un fattore limitante è stato scelto comunque di agevolare le operazioni di lavorazione dei componenti della struttura utilizzando l'alluminio, basandosi anche sui dati ottenuti dalle prove virtuali eseguite con il programma di calcolo Ansys che ha permesso di prevedere il corretto funzionamento della struttura.

4.2. Schema dei carichi dei componenti dell'avvitatore

Di seguito vengono riportati gli schemi delle forze che si scambiano reciprocamente i componenti dell'avvitatore durante il funzionamento.

-) Avvitatore: durante la fase di avvitamento, la vite esercita le seguenti reazioni sull'avvitatore (Fig. 4.8):

- $F_{PA-VITE}$ = Forza Punta avvitatore - Vite
- $M_{PA-VITE}$ = Momento Punta avvitatore - Vite

Queste reazioni sono compensate dall'azione contemporanea svolta dal peso dell'avvitatore ($F_{PESO} \cong 10[N]$) e dall'azione del robot che sostiene la struttura. Lo studio in questione è stato pensato per fare in modo che il robot possa posizionare l'avvitatore nella corretta postazione per eseguire l'operazione di serraggio. Poiché l'avvitatore possa compensare il movimento traslazionale dall'alto verso il basso che subisce quando la vite viene serrata, è stata presa un'opportuna precauzione in fase di progettazione. Al robot è stato imposto di bloccare la rotazione dell'avvitatore attraverso " M_{EXT} ", mentre consente a quest'ultimo di poter scorrere l'ungo il proprio asse. In pratica il progetto lascia labile lo spostamento verticale dell'avvitatore, affidando la responsabilità di tale spostamento unicamente alla forza peso. Questo permette in fase di serraggio, che l'avvitatore sia in grado di poter scendere mantenendo con continuità il contatto con la testa della vite non distaccandosi mai da quest'ultima.

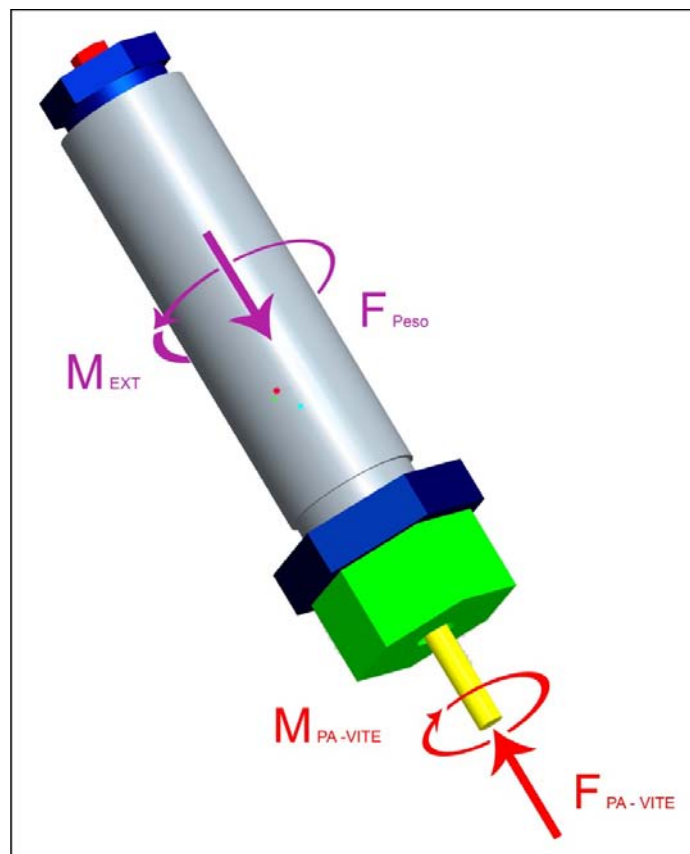


Fig. 4.8 Schema forze – Avvitatore

-) Attuatore piezoelettrico: come già esposto precedentemente nel momento in cui l'attuatore piezoelettrico viene sottoposto ad una differenza di tensione, questo tende a dilatarsi con spostamenti che possono arrivare fino a valori di 0,12 [mm] per tensioni di 150 [V]. Dalla Fig. 4.9 è possibile notare che l'allungamento dell'attuatore crea le seguenti reazioni:

- F_{CSA-AP} = Forza Centraggio superiore attuatore - Attuatore piezoelettrico
- F_{AP-CMP} = Forza Attuatore piezoelettrico - Collegamento mola piezo

Inoltre l'elemento molla, per le motivazioni espresse nel punto precedente, una volta portata in compressione immette nel sistema una coppia che viene trasmessa all'avvitatore attraverso:

- $M_{AP-CMP} = \text{Momento Attuatore piezoelettrico - Collegamento mola piezo}$
- $M_{CSA-AP} = \text{Momento Centraggio superiore attuatore - Attuatore piezoelettrico (momento di reazione al } M_{AP-CMP})$

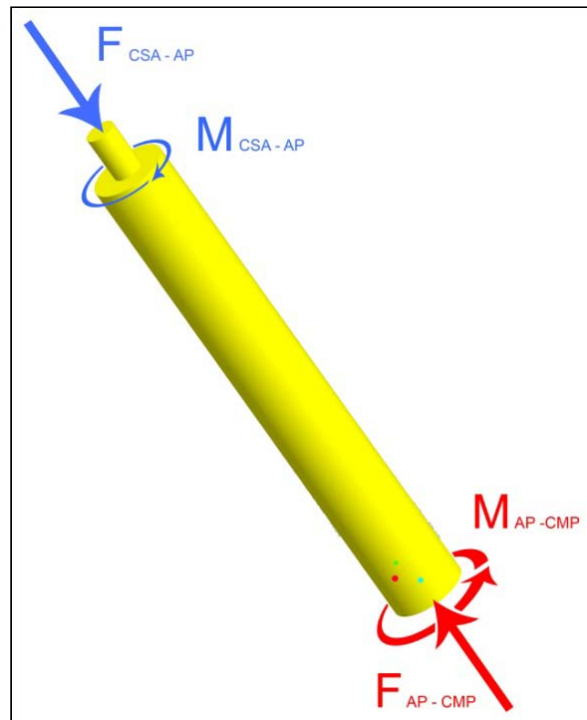


Fig. 4.9 Schema forze – Attuatore Piezoelettrico

-) Centraggio superiore attuatore: come mostrato in Fig. 4.10, la forza " F_{CSA-AP} " ed il momento " M_{CSA-AP} " dall'attuatore piezoelettrico vengono trasmesse al "centraggio superiore attuatore". Perché questo sia mantenuto in equilibrio si generano le reazioni:

- $F_{TS-CSA} = \text{Forza Tappo superiore-Centraggio superiore attuatore}$
- $M_{TS-CSA} = \text{Momento Tappo superiore-Centraggio superiore attuatore}$

È da sottolineare che l'unione dell'attuatore con il "centraggio superiore attuatore" avviene grazie al contatto che si genera tra la punta dell'attuatore ed il foro del centraggio superiore. Per aumentare il momento trasmesso tra i due componenti è stato realizzato un collegamento con interferenza, in modo sia da aumentare il valore dell'attrito tra le due superfici che da facilitare l'operazione di assemblaggio, in quanto i due elementi si comportano come un unico componente.

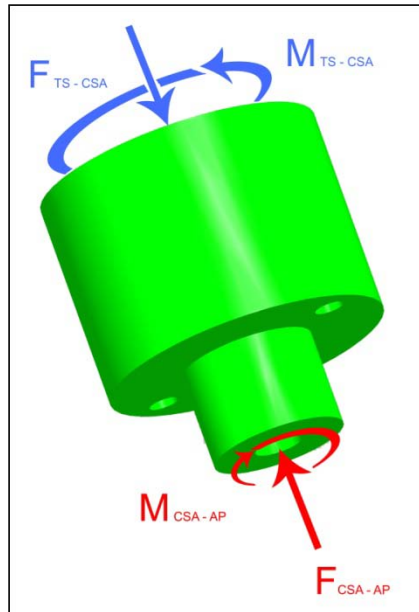


Fig. 4.10 Schema forze – Centraggio Superiore Attuatore

-) Tappo superiore: il collegamento tra il “centraggio superiore attuatore” ed il “tappo superiore” è affidato in parte all’attrito che si genera tra i due componenti poiché il loro è un collegamento con interferenza, ed in parte all’attrito che si viene a creare tra la faccia inferiore del “tappo superiore” e la faccia superiore del “centraggio superiore attuatore”, in quanto i due componenti vengono ulteriormente collegati grazie ad una vite M5x12 che serra i due elementi.

Le forze che agiscono sul “tappo superiore” Fig. 4.11 risultano:

- F_{TS-CSA} = Forza Tappo superiore-Centraggio superiore attuatore
- M_{TS-CSA} = Momento Tappo superiore-Centraggio superiore attuatore
- F_{TEL-TS} = Forza Telaio-Tappo superiore (forza che nasce dal collegamento con la vite M5x12)
- F_{TS-MA} = Forza Tappo superiore-Molla alta (forza che esercita la molla alta sulla base inferiore del tappo superiore)
- M_{TEL-TS} = Momento Telaio-Tappo superiore (momento che si genera tra la filettatura del tappo superiore ed il telaio)

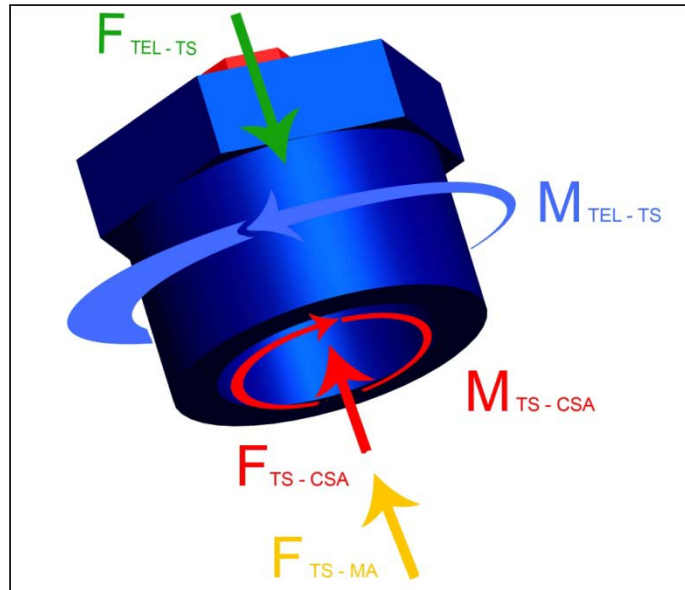


Fig. 4.11 Schema forze - Tappo Superiore

-) Molla alta: la Fig. 4.12 mostra lo schema delle forze che si hanno sulla molla alta

- F_{TS-MA} = Forza Tappo superiore-Molla alta
- $F_{MA-TELAIO}$ = Forza Molla alta-Telaio (reazione alla F_{TS-MA})

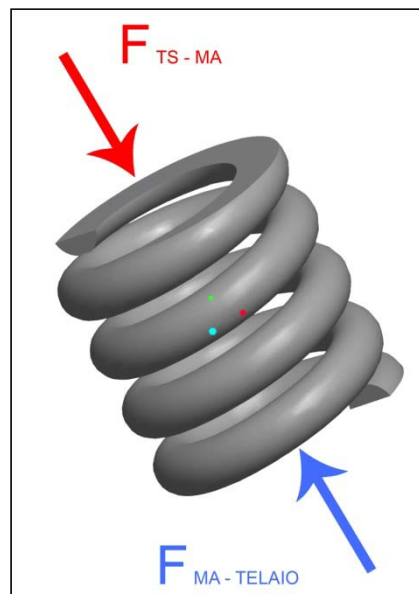


Fig. 4.12 Schema forze - Molla Alta

-) Collegamento molla piezo: sul fronte opposto l'attuatore piezoelettrico è in contatto con il "collegamento molla piezo". Le forze ed i momenti che si sviluppano sono mostrati in Fig. 4.13, dove i termini hanno significato di:

- F_{AP-CMP} = Forza Attuatore piezoelettrico - Collegamento molla piezo (forza derivante dall'allungamento dell'attuatore)
- M_{AP-CMP} = Momento Attuatore piezoelettrico - Collegamento molla piezo (momento che si genera dall'allungamento dell'attuatore)

Per compensare queste reazioni nascono sulla parte opposta del “collegamento molla piezo” le reazioni:

- $F_{\text{CMP-MM}}$ = Forza Collegamento molla piezo - Mola motrice
- $M_{\text{CMP-MM}}$ = Momento Collegamento molla piezo - Mola motrice

Come è possibile notare dalla Fig. 4.13, oltre alle forze ed ai momenti sopra menzionati è presente anche la:

$$F_{\text{ATT-CMP-TEL}} = \text{Forza Attrito - Collegamento molla piezo - Telaio}$$

Tale forza è dovuta al fatto che, per come è strutturato l'avvitatore, l'unica possibilità di deformazione che si ha a fronte di un allungamento dell'attuatore è quella nella parte bassa della struttura, in quanto l'elemento più cedevole è la molla motrice. Detto questo risulta ovvio che dato un allungamento dell'attuatore, questo spostamento si ripercuoterà totalmente sull'elemento “collegamento molla piezo” che scorrerà rispetto alle pareti rigide del telaio, con sviluppo di attrito.

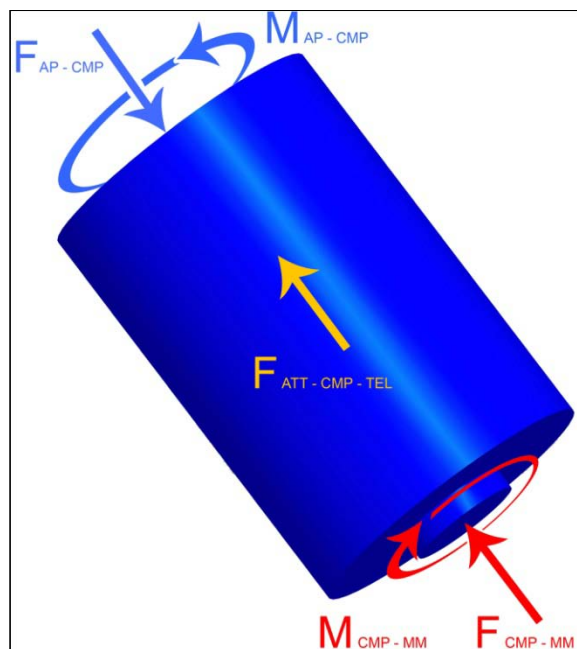


Fig. 4.13 Schema forze – Collegamento Molla Piezo

-) Molla: le forze ed i momenti che agiscono sulla molla sono mostrati in Fig. 4.14 ed hanno il seguente significato:

- $F_{\text{CMP-MM}}$ (Forza Collegamento molla piezo - Mola motrice)
- $M_{\text{CMP-MM}}$ (Momento Collegamento molla piezo - Mola motrice)
- $F_{\text{MM-PA}}$ (Forza Mola motrice – Punata avvitatore)
- $M_{\text{MM-PA}}$ (Momento Mola motrice – Punata avvitatore)

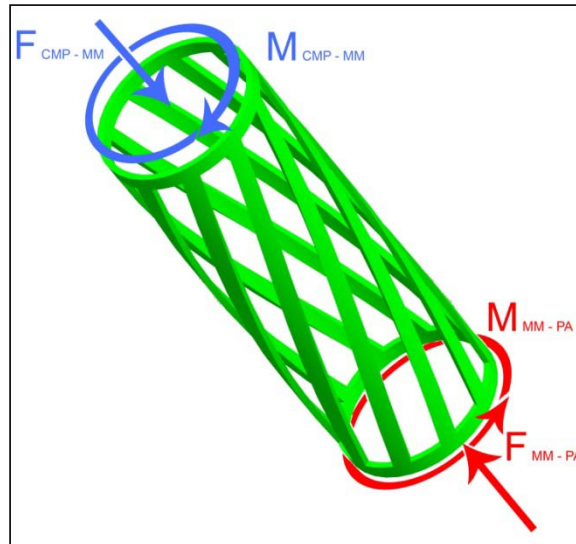


Fig. 4.14 Schema forze – Molla Motore

-) Punta dell'avvitatore: la Fig. 4.15 mostra lo schema delle forze della "Punta dell'avvitatore". La forza ed il momento che la molla esercita sulla punta sono:

- F_{MM-PA} (Forza Mola motrice – Punata avvitatore)
- M_{MM-PA} (Momento Mola motrice – Punata avvitatore)

Dove la coppia " M_{MM-PA} " è trasmessa dall'attrito che si sviluppa nel contatto tra la superficie inferiore della molla e quella superiore della punta dell'avvitatore.

Oltre alle reazioni che la molla esercita sulla punta si scaricano anche le reazioni che provengono dalla testa della vite:

- $F_{PA-VITE}$ (Forza Punata avvitatore – Vite)
- $M_{PA-VITE}$ (Momento Punata avvitatore – Vite)

Per ottenere l'equilibrio dell'avvitatore, si dovranno considerare anche le reazioni e le coppie resistive che gli spessori in teflon provocano sull'avvitatore:

- F_{PA-CA} (Forza Punata avvitatore – Cuscinetto alto)
- M_{PA-CA} (Momento Punata avvitatore – Cuscinetto alto)
- F_{PA-CB} (Forza Punata avvitatore – Cuscinetto basso)
- M_{PA-CB} (Momento Punata avvitatore – Cuscinetto basso)

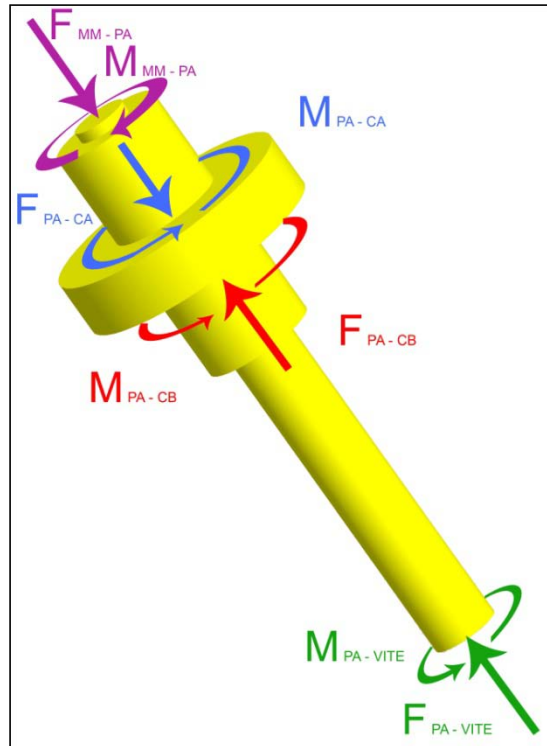


Fig. 4.15 Schema forze – Punta Avvitatore

-) Cuscinetto alto: la Fig. 4.16 mostra lo schema delle forze da cui è possibile osservare la forza ed il momento che la punta dell'attuatore esercita sul cuscinetto alto:

- F_{PA-CA} = Forza Punta avvitatore – Cuscinetto alto
- M_{PA-CA} = Momento Punta avvitatore – Cuscinetto alto

sono equilibrate dalle reazioni che il telaio fa sul cuscinetto, mediante:

- F_{CA-TEL} = Forza Cuscinetto alto – Telaio
- M_{CA-TEL} = Momento Cuscinetto alto – Telaio

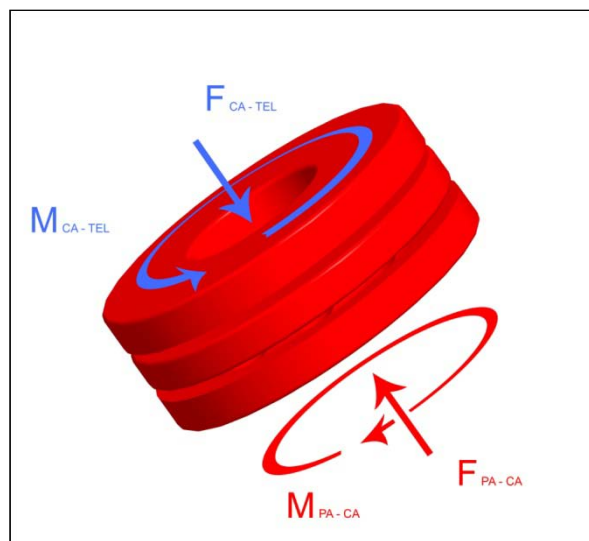


Fig. 4.16 Schema forze – Cuscinetto Alto

-) Cuscinetto basso: la Fig. 4.17 mostra lo schema delle forze da cui è possibile osservare la forza ed il momento che la punta dell'attuatore esercita sul cuscinetto basso:

- F_{PA-CB} = Forza Punta avvitatore – Cuscinetto basso
- M_{PA-CB} = Momento Punta avvitatore – Cuscinetto basso

sono equilibrate dalle reazioni che il telaio fa sul cuscinetto basso, mediante

- F_{CB-TEL} = Forza Cuscinetto basso – Telaio
- M_{CB-TEL} = Momento Cuscinetto basso – Telaio

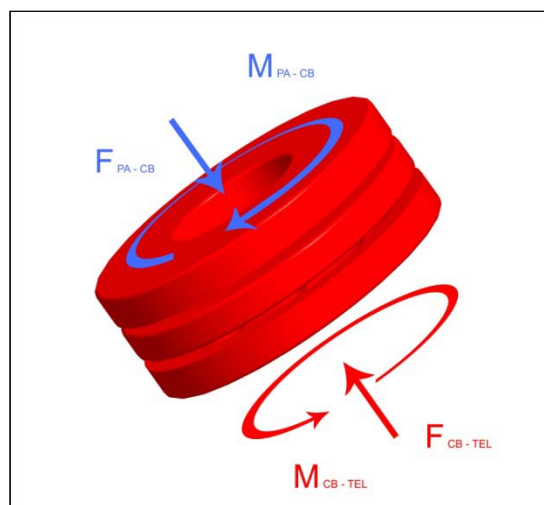


Fig. 4.17 Schema forze – Cuscinetto Basso

-) Tappo femmina: su tale componente si scaricano la forza ed il momento proveniente dal “cuscinetto basso”. La Fig. 4.18 mostra lo schema delle forze:

- F_{CB-TEL} = Forza Cuscinetto basso – Telaio
- M_{CB-TEL} = Momento Cuscinetto basso – Telaio

Per restare in equilibrio nascono così le reazioni generate dalla filettatura dell'attuatore sul tappo femmina:

- F_{TEL-TF} = Forza Telaio – Tappo femmina
- M_{TEL-TF} = Momento Cuscinetto Telaio – Tappo femmina

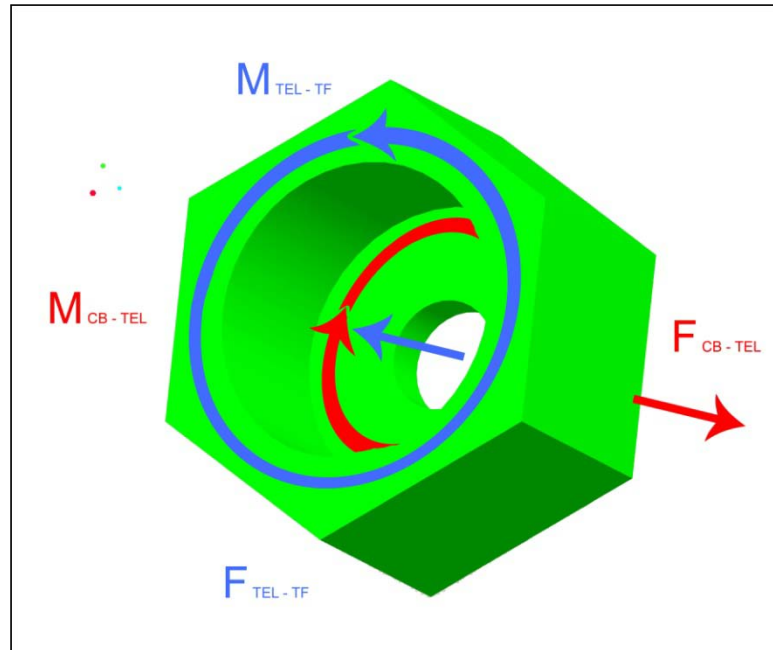


Fig. 4.18 Schema forze – Tappo Femmina

-) Telaio: in Fig. 4.19 sono riportare le forze in gioco:

- “ F_{TEL-TS} ” e “ M_{TEL-TS} ”: reazioni che il tappo superiore fa sul telaio attraverso la filettatura gas
- “ F_{MA-TEL} ”: reazione che la molla esercita sul telaio
- “ F_{PESO} ”: forza peso del componente avvitatore
- “ M_{EXT} ”: vincolo offerto dal robot all’avvitatore che ne impedisce la rotazione
- “ $F_{ATT-CMP-TEL}$ ”: forza di attrito che il componente “collegamento molla piezo” esercita sul telaio quando riceve uno spostamento verso il basso
- “ F_{CA-TEL} ” ed il momento “ M_{CA-TEL} ”: reazioni che il “cuscinetto alto” esercita sul telaio
- Inoltre per concludere l’analisi delle forze e dei momenti che costituiscono l’equilibrio del “telaio” si deve analizzare la forza “ F_{TEL-TF} ” ed il momento “ M_{TEL-TF} ” che sono le azioni che il “tappo femmina” esercita sul telaio attraverso la filettatura whitworth.

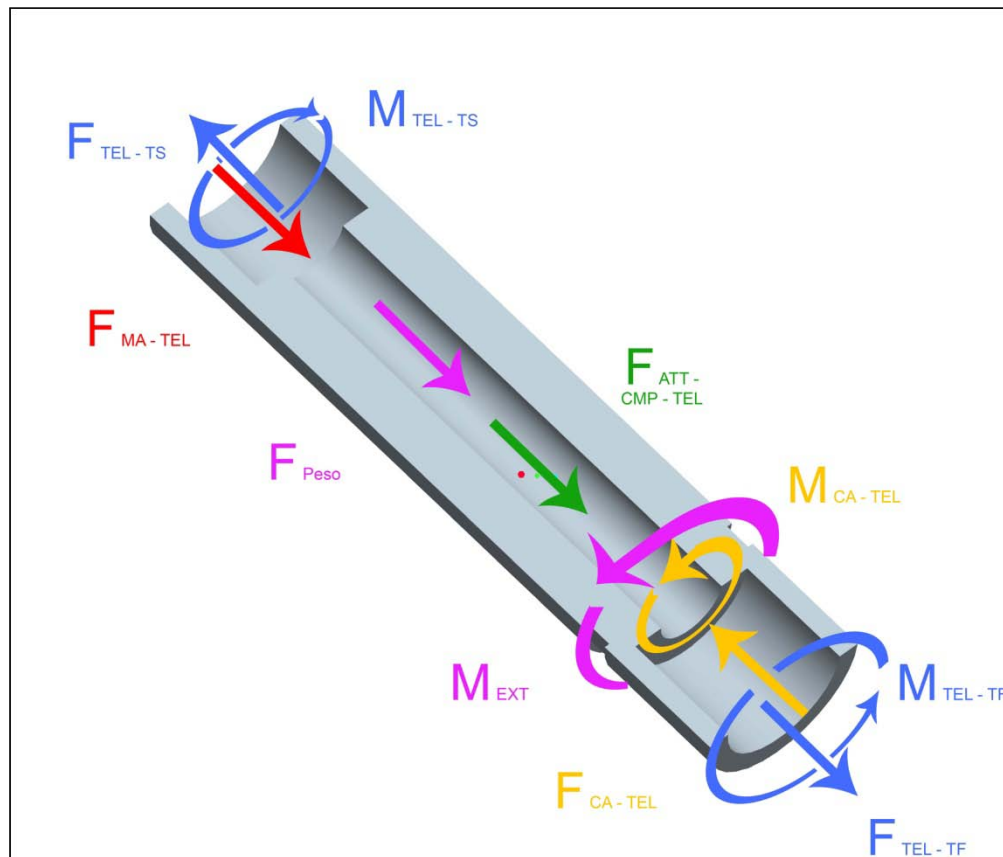


Fig. 4.19 Schema forze – Telaio

4.3. Caratterizzazione della molla con Ansys

4.3.1. Sistema Base Fissa - Molla

Per caratterizzare la “molla motrice”, è stata eseguita l’analisi virtuale mediante il programma di calcolo Ansys. Data l’elevata complessità della geometria della molla, invece che effettuare una programmazione tradizionale da riga di comando è stata effettuata l’analisi in ambiente Workbench. L’ambiente Workbench permette di importare geometrie 3D in formato .IGES (realizzate con programmi esterni come Pro-e). È stato così realizzato, sia il modello 3D della “molla motrice” sia della “base cubica” su cui viene appoggiata la molla. Disegnati i due componenti è stato fatto l’assieme, che è stato salvato in formato .IGES. Scelta come tipo di analisi quella statica, sono stati inseriti i valori dei coefficienti che identificano le varie tipologie dei materiali con cui è stato realizzato l’avvitatore. Richiamata la geometria, non è rimasto altro che aprire l’ambiente “Mechanical” di Ansys.

La Fig. 4.20 rappresenta il modello virtuale del sistema “Molla - Base Fissa”.

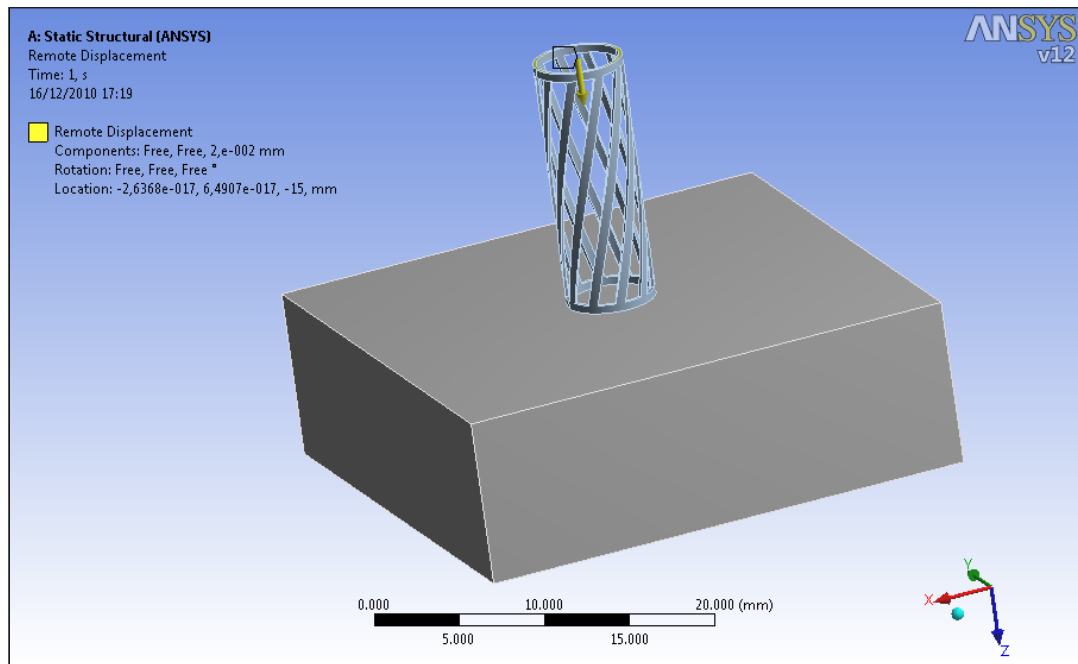


Fig. 4.20 Modello “Base Fissa-Molla” adoperato per l’analisi Ansys

Nell’ambiente “Mechanical” oltre a nominare i singoli componenti e richiamare i rispettivi materiali è stato inserito un sistema di riferimento cilindrico nella parte alta della molla, che servirà per rilevare le rotazioni della molla quando quest’ultima è sottoposta a schiacciamento. Inoltre è stato necessario definire il tipo di contatto che si sviluppa tra le superfici in esame (superfici bassa della molla con superficie alta della base). Il contatto che simula in modo migliore quello che succede nella realtà è il contatto con attrito, che nel seguente studio dove le superfici sono d’acciaio e d’alluminio il coefficiente d’attrito $f=0,61$.

Definiti i parametri sopra descritti è stata fatta la “Mesh” di entrambi i modelli. Successivamente è stata vincolata la struttura fissando totalmente la parte inferiore della “Base” ed inoltre attraverso il comando “Remote Displacement” è stato inserito il carico sulla molla, in modo da far spostare la superficie superiore della molla lungo l’asse “Z”, per simulare lo spostamento dell’attuatore piezoelettrico quando è sottoposto a tensione.

Per concludere la configurazione della Workbench è stata plottata la deformazione della superficie superiore della molla rispetto al sistema cilindrico precedentemente definito con coordinata “Y” che corrisponde alla rotazione lungo l’asse “Z”.

Terminata il settaggio del programma sono state simulate le deformazioni della molla con valori da 0,02[mm] fino a 0,16[mm] incrementando di 0,02[mm] ad ogni step.

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 4-1.

Caratterizzazione (Base Fissa - Molla) con $f=0,61$		
Spostamento	Sol. Piccoli Spostamenti: Rotazione [mm]	Sol. Piccoli Spostamenti: Rotazioni [°]
0,02	0,085983	1,859985579
0,04	0,17197	3,720057685
0,06	0,25795	5,579978368
0,08	0,34393	7,439899051
0,1	0,42991	9,299819733
0,12	0,5159	11,15995674
0,14	0,60188	13,01987742
0,16	0,68786	14,8797981

Tabella 4-1 Risultati Ansys “Base Fissa - Molla” - analisi piccoli spostamenti

Tracciando i valori riportati nella Tabella 4-1 su un grafico si ottiene il Grafico 4.1 riportato di seguito.

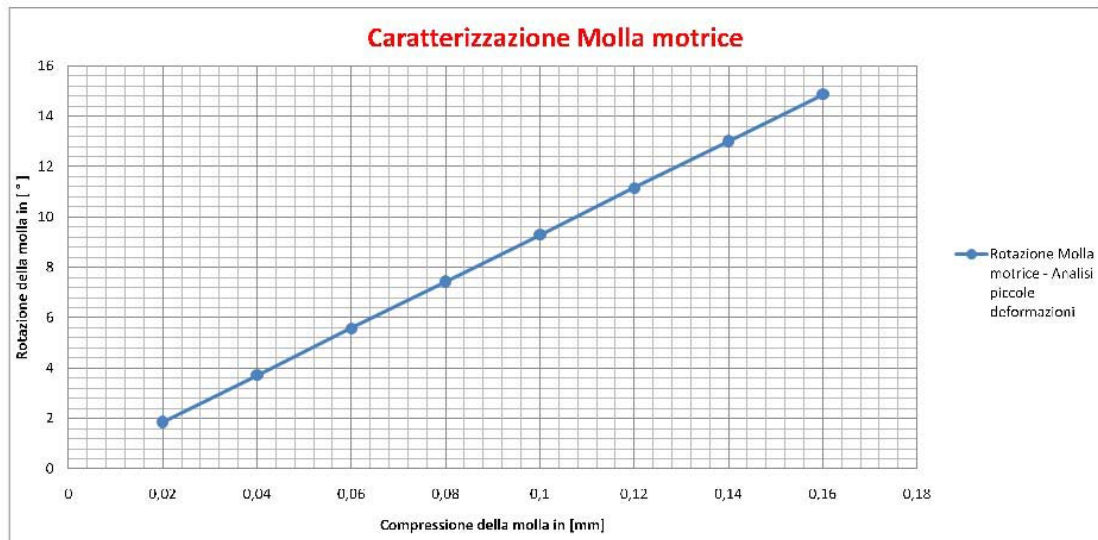


Grafico 4.1 Rotazioni ottenute dal modello “Base Fissa - Molla” - analisi piccoli spostamenti

Come ulteriore prova è stata eseguita l’analisi descritta precedentemente non più per piccoli spostamenti ma per grandi spostamenti. Rieseguendo le varie simulazioni al variare della compressione imposta alla molla si ottengono i seguenti risultati (Tabella 4-2).

Caratterizzazione (Base Fissa - Molla) con $f=0,61$		
0,02	0,085702	1,853906982
0,04	0,17082	3,695180868
0,06	0,2553	5,522653527
0,08	0,33912	7,335849057
0,1	0,42224	9,133902175
0,12	0,50474	10,91854344
0,14	0,58891	12,73931018
0,16	0,66899	14,47160197

Tabella 4-2 Risultati Ansys “Base Fissa - Molla” - analisi grandi spostamenti

Tracciando i valori riportati nella Tabella 4-2 su un grafico è possibile ottenere il Grafico 4.2 riportato di seguito.

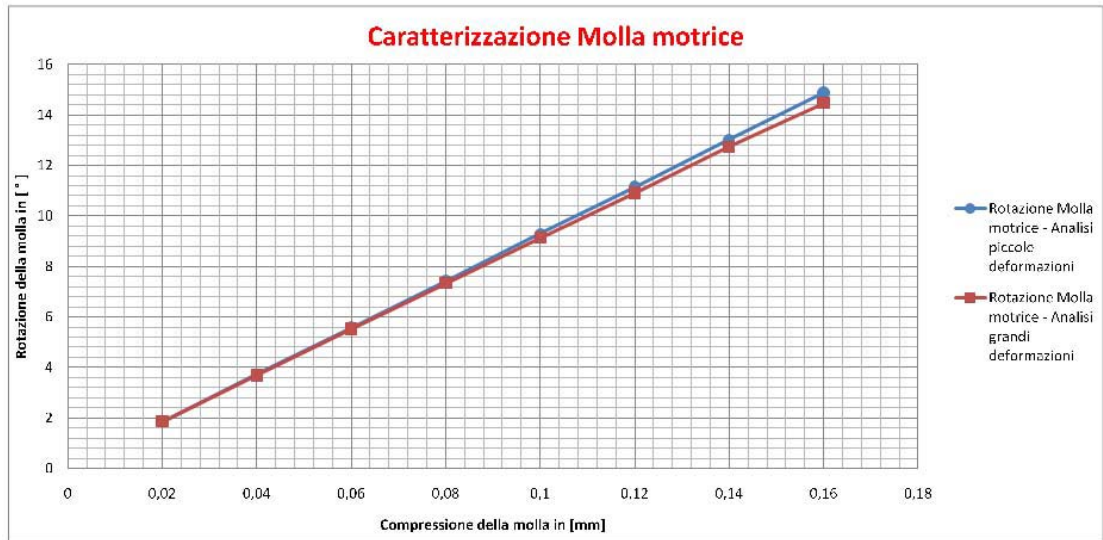


Grafico 4.2 Rotazioni ottenute dal modello “Base Fissa - Molla” - analisi grandi spostamenti

Dal Grafico 4.2 e dalla Tabella 4-3, si osserva che lo scostamento che si verifica tra il valore di rotazione ottenuta con l’analisi per piccoli spostamenti e quello ottenuto per grandi spostamenti è un errore proporzionale al valore di deformazione a cui è sottoposta la molla, più precisamente la percentuale dell’errore aumenta all’aumentare della compressione della molla. A fronte di quest’andamento è possibile notare che l’errore commesso non risulta molto elevato, infatti per deformazioni di 0,16[mm] l’errore è del 2,74%.

Spostamento	Errore commesso tra l'analisi di piccoli spostamenti e quello di grandi spostamenti
0,02	0,33%
0,04	0,67%
0,06	1,03%
0,08	1,40%
0,1	1,78%
0,12	2,16%
0,14	2,15%
0,16	2,74%

Tabella 4-3 Errore commesso tra l’analisi “Base Fissa - Molla” tra l’analisi per piccoli e grandi spostamenti

4.3.2. Sistema Base Fissa - Molla - Base Mobile

Per effettuare una migliore simulazione della caratterizzazione della “molla motrice”, è stata eseguita nuovamente l’analisi virtuale mediante il programma “Ansys”, utilizzando la procedura descritta nel paragrafo precedente, con l’unica modifica, come mostrato in Fig. 4.21, di adoperare un modello dotato di una base aggiuntiva posta sulla superficie superiore della “molla”.

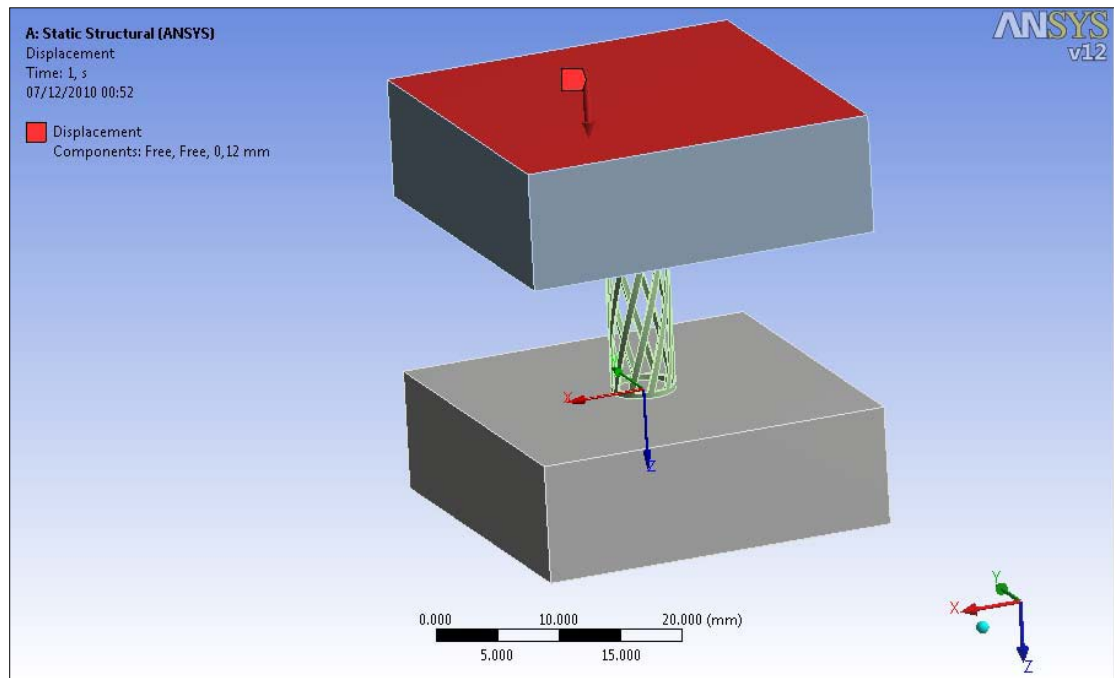


Fig. 4.21 Modello “Base Fissa-Molla-Base Mobile” adoperato per l’analisi Ansys

La simulazione del modello “Base Fissa - Molla - Base Mobile” è stata fatta per ottenere la caratterizzazione della molla nelle condizioni di lavoro all’interno dell’avvitatore. Nell’avvitatore, la molla si trova tra il componente (2) “distanziale attuatore-molla” ed il componente (5) “punta avvitatore”. La simulazione prevede l’applicazione del carico, sottoforma di uno spostamento verso il basso della “Base superiore”, al fine di comprimere la molla. A seguito la molla tenderà sia a dilatarsi radialmente che a generare una rotazione in senso opposto delle superfici superiore ed inferiore della molla. Essendo bloccata la “base inferiore” e sviluppandosi attrito tra le superfici della molla e quelle delle “Basi”, l’effetto di rotazione si verificherà esclusivamente sulla superficie superiore, trascinando con se la “Base superiore” che è stata lasciata labile alla rotazione l’ungo l’asse “Z”. Il fatto che la molla non possa deformarsi radialmente in modo libero a causa dell’attrito presente tra le superfici della molla e quelle degli elementi (2) e (5), comporta che la rotazione, in fase di compressione, sia limitata. Infatti l’attrito impedisce alla molla di deformarsi radialmente, quindi la molla potrà deformarsi solamente nella parte centrale, mantenendo quasi inalterata la deformazione nelle zone vicine al contatto con le superfici dei corpi (2) e (5). Quello che si ottiene è un effetto analogo all’utilizzo di una molla di lunghezza inferiore.

Effettuata la simulazione per gli step di carico descritti nel paragrafo precedente si ottengono i valori della rotazione della superficie superiore della molla (Tabella 4-4). La simulazione è stata effettuata sia con analisi per grandi spostamenti che per piccoli spostamenti.

Caratterizzazione (Base Fissa - Molla - Base Mobile) con $f=0,61$		
Spostamento	Sol. Piccoli Spostamenti: Rotazioni [mm]	Sol. Piccoli Spostamenti: Rotazioni [°]
0,02	0,083311	1,802184834
0,04	0,16662	3,604326403
0,06	0,24993	5,406489605
0,08	0,33324	7,208652806
0,1	0,41655	9,010816008
0,12	0,49986	10,81297921
0,14	0,58317	12,61514241
0,16	0,66649	14,41752193
Spostamento	Sol. Grandi Spostamenti: Rotazioni [mm]	Sol. Grandi Spostamenti: Rotazioni [°]
0,02	0,083025	1,795998077
0,04	0,16563	3,582910708
0,06	0,24728	5,349164764
0,08	0,32676	7,068477346
0,1	0,40385	8,736089412
0,12	0,47895	10,36065377
0,14	0,55239	11,94930898
0,16	0,62415	13,5016224

Tabella 4-4 Risultati Ansys “Base Fissa – Molla – Base Mobile” ottenuti per l’analisi con grandi spostamenti e per l’analisi con piccoli spostamenti

Graficando i valori della Tabella 4-4 si ottiene il Grafico 4.3.

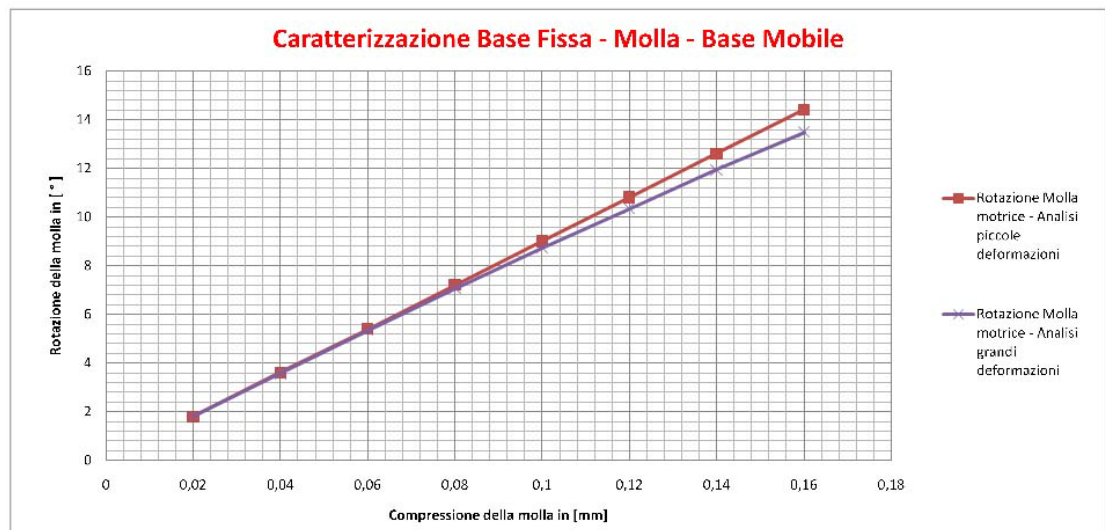


Grafico 4.3 Rotazioni ottenute dal modello “Base Fissa – Molla – Base Mobile” per l’analisi con grandi spostamenti e per l’analisi con piccoli spostamenti

Anche per questa simulazione lo scostamento che si verifica tra il valore di rotazione ottenuta con l’analisi per piccoli spostamenti e quella per grandi spostamenti è un errore proporzionale al valore di deformazione a cui è sottoposta la molla (Tabella 4-5). Tuttavia è da osservare che per una compressione della molla di 0,12[mm] si ha un errore del 4,18%, mentre nel modello precedente era del 2,16%.

Spostamento	Errore commesso tra l'analisi di piccoli spostamenti e quello di grandi spostamenti
0,02	0,34%
0,04	0,59%
0,06	1,06%
0,08	1,94%
0,1	3,05%
0,12	4,18%
0,14	5,28%
0,16	6,35%

Tabella 4-5 Errore commesso tra l'analisi "Base Fissa – Molla – Base Mobile" tra l'analisi per piccoli e grandi spostamenti

4.4. *Analisi dell'avvitatore effettuata con Ansys*

4.4.1. Sistema Completo

Nei paragrafi precedenti è stata caratterizzata la molla. Al fine di valutare l'entità della rotazione della punta dell'avvitatore, la caratterizzazione della sola molla non ha molta importanza. Per riuscire a valutare in anticipo le prestazioni dell'avvitatore è quindi necessario eseguire un'analisi virtuale ben più complessa di quelle viste fino ad ora.

Anche per quest'analisi, data la complessità della geometria in studio, viene utilizzata l'ambiente Workbench di Ansys. Come per l'analisi precedenti è stato necessario eseguire il modello 3D dei componenti:

- base inferiore
- punta avvitatore
- base superiore
- molla
- cilindro

Realizzati i modelli è stato costruito l'assieme. Una volta importata la geometria del complessivo nella Workbench, sono stati definiti i materiali con cui sono realizzati i componenti ed è stato aperto l'ambiente "Mechanical".

La Fig. 4.22 mostra il modello adoperato per effettuare l'analisi virtuale del "sistema completo".

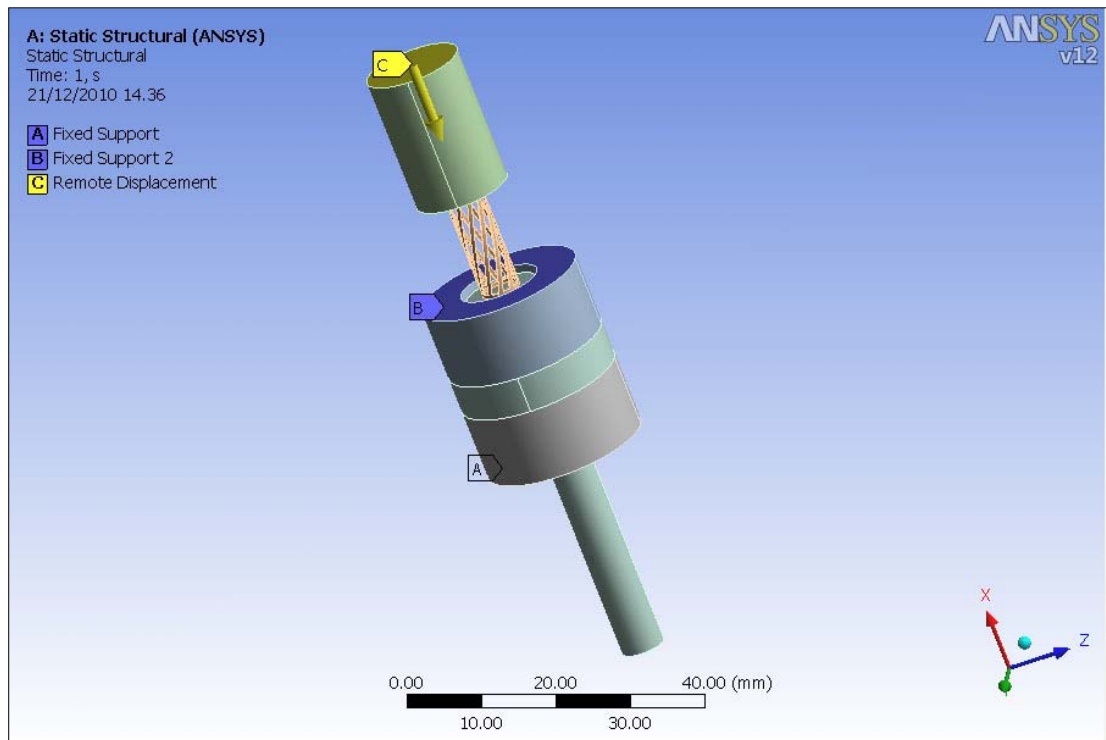


Fig. 4.22 Modello “Sistema Completo” adoperato per l’analisi Ansys

Sono stati definiti come nel caso precedente i nomi dei singoli componenti ed il sistema di riferimento utilizzato, inoltre è stato necessario specificare il tipo di contatto che si sviluppa tra le superfici in esame:

- superficie alta della molla con la superficie inferiore del cilindro
- superficie bassa della molla con la superficie superiore della punta dell’avvitatore
- superficie alta della punta con la superficie inferiore della base alta
- superfici bassa della punta con la superficie superiore della base bassa

Sono quindi stati inseriti i coefficienti d’attrito pari a $f=0,61$ per simulare l’attrito tra “cilindro - molla” e tra “punta - molla”, mentre è stato utilizzato $f=0,04$ per riprodurre l’attrito tra “punta - base alta” e tra “base bassa - punta”.

Definiti i parametri sopra descritti è stata eseguita la “Mesh” dell’intero modello. Inoltre sono state completamente vincolate la superficie inferiore della “base bassa” e la superficie superiore della “base alta”.

Una volta vincolata la struttura, sono stati applicati i carichi al modello:

- carico che comprime la molla
- forza, diretta dal basso verso l’alto, di reazione della testa della vite sulla punta dell’avvitatore. Questa forza deriva dal fatto che il robot non vincola l’avvitatore l’ungo l’asse verticale, ma lo lascia labile. Quindi la forza peso dell’avvitatore verrà scaricata sulla testa della vite

Il carico sulla molla è stato inserito con il comando “Remote Displacement”, con il quale è possibile far spostare la superficie superiore del cilindro lungo l’asse “Z”, in modo

da simulare lo spostamento dell'attuatore piezoelettrico, mentre la forza di reazione di 10 [N] che la testa della vite esercita sulla punta dell'avvitatore è stata inserita mediante il comando "Loads - Force".

Per concludere la configurazione, è stato plottata sia la rotazione della superficie superiore ed inferiore della molla che quella della superficie inferiore della punta dell'avvitatore.

Come nei casi precedenti, sono state eseguite le simulazioni delle deformazioni della molla con valori da 0,02[mm] fino a 0,16[mm] incrementando di 0,02[mm] ad ogni step.

I risultati ottenuti per l'analisi per piccole deformazioni, sono riportati nella Tabella 4-6.

Caratterizzazione Sistema Completo, f=0,61 e Forza di 10[N] sulla punta analisi piccole deformazioni		
Spostamento	Rotazione Molla Alta [mm]	Rotazioni Molla Alta[°]
0,02	0,00E+00	0
0,04	0,0019472	0,04212186
0,06	0,0053242	0,115173176
0,08	0,011644	0,251883187
0,1	0,013549	0,293092176
0,12	0,013868	0,299992789
0,14	0,0182724	0,395268838
0,16	0,035727	0,772847014
Spostamento	Rotazioni Molla Bassa[mm]	Rotazioni Molla Bassa[°]
0,02	0,00E+00	0
0,04	0,1073	2,321115251
0,06	0,2012	4,352361495
0,08	0,30421	6,5806754
0,1	0,39539	8,553082562
0,12	0,48892	10,57632496
0,14	0,58036	12,55435645
0,16	0,7019	15,1835116
Spostamento	Rotazioni Punta [mm]	Rotazioni Punta [°]
0,02	0,00E+00	0
0,04	0,12115	2,314968153
0,06	0,22737	4,344649682
0,08	0,34282	6,550700637
0,1	0,44626	8,527261146
0,12	0,55211	10,54987261
0,14	0,65561	12,52757962
0,16	0,78878	15,0722293

Tabella 4-6 Risultati Ansys "Sistema Completo" - analisi piccoli spostamenti

Graficando i valori della Tabella 4-6 si ottiene il Grafico 4.4.

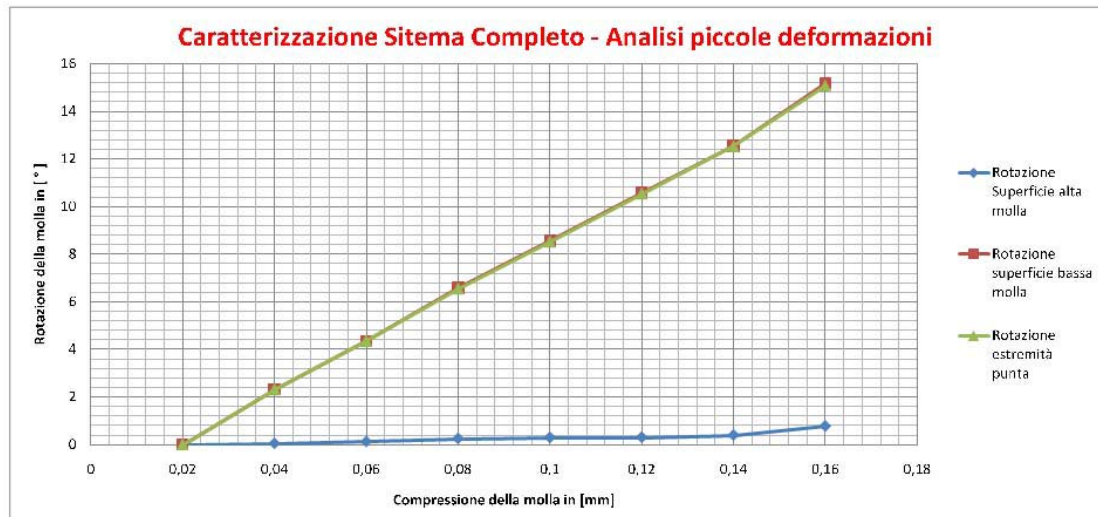


Grafico 4.4 Rotazioni ottenute dal modello "Sistema Completo" - analisi piccoli spostamenti

Purtroppo, è stato da subito evidente, che l'analisi di una simulazione che rispecchi le condizioni reali di lavoro dell'avvitatore risulta troppo gravosa da essere calcolata mediante Ansys. Una delle prime conseguenze della difficoltà d'analizzare questo modello è rappresentata dal notevole aumento dei tempi di calcolo (qualche ora per ogni spostamento imposto alla molla). Il pc prima di generare la soluzione deve svolgere circa 250 iterazioni.

È facilmente osservabile che le soluzioni ottenute dal modello sopra descritto sono poco attendibili. Infatti confrontando i risultati ottenuti per compressioni della molla di 0,12 [mm] e 0,16 [mm] nelle tre simulazioni prese in considerazione, si ottengono valori discriminanti (Tabella 4-7).

Compressione molla [mm]	Rotazione molla [°]	Tipo di simulazione utilizzata
0,12	11,16	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,12	10,92	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Grandi Spostamenti
0,12	10,81	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,12	10,36	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Grandi Spostamenti
0,12	10,58	Modello "Completo" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,12	10,55	Modello "Completo" - Analisi Grandi Spostamenti
0,16	14,88	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,16	14,47	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Grandi Spostamenti
0,16	14,42	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,16	13,5	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Grandi Spostamenti
0,16	15,18	Modello "Completo" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,16	15,07	Modello "Completo" - Analisi Grandi Spostamenti

Tabella 4-7 Confronto dei risultati delle rotazioni ottenute dalla simulazione Ansys con vari modelli

Non è spiegabile il valore ottenuto dall'analisi con il modello completo su cui agisce la forza di reazione della vite, in quanto per valori di compressione della molla di 0,16 [mm] si ottiene una rotazione di 15,18° maggiore della rotazione ottenuta nel modello "Base Fissa - Molla" (14,88°).

Poiché l'elemento che genera la rotazione nell'avvitatore è la molla, è normale aspettarsi che la rotazione della punta dell'avvitatore risulti se non minore perlomeno uguale alla rotazione della molla nel modello "Base Fissa - Molla", in quanto nell'avvitatore andranno considerati anche gli attriti che si generano tra le superfici della punta ed i cuscinetti in Teflon. Per questa ragione la simulazione del modello completo dotato di forza di reazione della vite sull'avvitatore non verrà preso in considerazione.

Per ottenere un risultato più attendibile, il modello utilizzato per effettuare l'analisi è stato semplificato, non è stata considerata la forza di reazione che la testa della vite esercita sulla punta dell'avvitatore. Questa semplificazione, ha permesso di ottenere sensibili riduzioni nel tempo di calcolo, riducendo notevolmente anche il numero di iterazioni necessarie ad ottenere la soluzione (Tabella 4-8).

Caratterizzazione Sistema Completo, $f=0,61$ e Forza di 10[N] sulla punta analisi piccole deformazioni		
Spostamento	Rotazione Molla Alta [mm]	Rotazioni Molla Alta[°]
0,02	6,10E-04	0,013185579
0,04	0,0087508	0,18929744
0,06	0,0114563	0,247822858
0,08	0,0172445	0,373033289
0,1	0,0067163	0,145287105
0,12	0,033213	0,718464127
0,14	0,0066969	0,144867444
0,16	0,0192127	0,415609422
Spostamento	Rotazioni Molla Bassa[mm]	Rotazioni Molla Bassa[°]
0,02	6,16E-02	1,332791732
0,04	0,12779	2,764355246
0,06	0,19008	4,111813484
0,08	0,254	5,494531907
0,1	0,31	6,705924769
0,12	0,38828	8,399278933
0,14	0,43713	9,456002884
0,16	0,50468	10,91724552
Spostamento	Rotazioni Punta [mm]	Rotazioni Punta [°]
0,02	7,00E-02	1,338184968
0,04	0,14406	2,752738854
0,06	0,2185425	4,175971338
0,08	0,2941902	5,62146879
0,1	0,354069	6,765649682
0,12	0,452444	8,645426752
0,14	0,496618	9,489515924
0,16	0,573265	10,95410828

Tabella 4-8 Risultati Ansys "Sistema Completo" - analisi piccoli spostamenti

Graficando i valori della Tabella 4-8 si ottiene il Grafico 4.5.

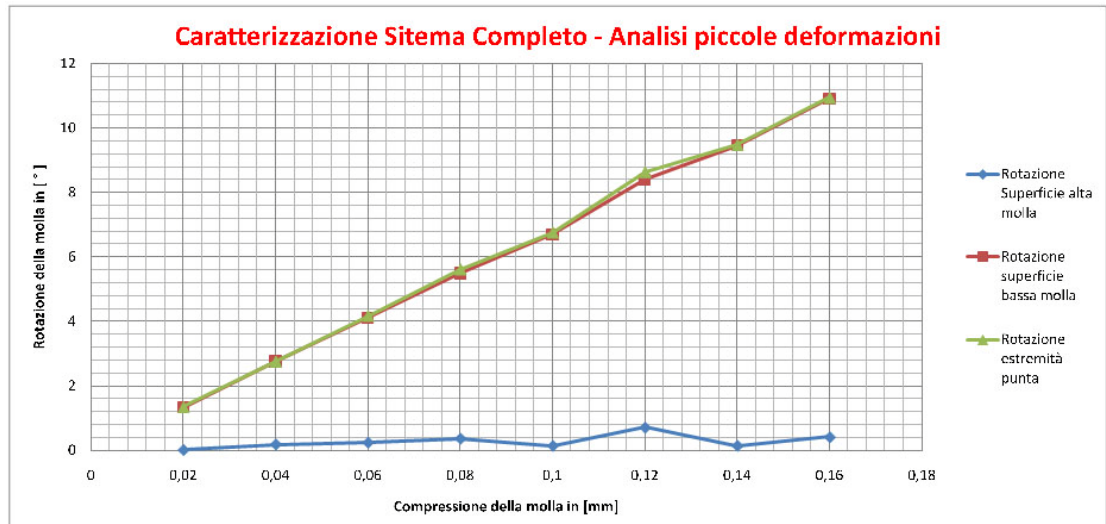


Grafico 4.5 Rotazioni ottenute dal modello "Sistema Completo" - analisi piccoli spostamenti

I risultati ottenuti nel Grafico 4.5 sono molto simili a quelli che ci aspettavamo. Infatti la rotazione della punta dell'avvitatore risulta notevolmente ridotta rispetto alla rotazione della molla ottenuta dal modello "Base Fissa - Molla". Tale riduzione è facilmente spiegabile in quanto all'intero dell'avvitatore si hanno delle perdite di coppia dovute ad attriti.

Compressione molla [mm]	Rotazione molla [°]	Tipo di simulazione utilizzata
0,12	11,16	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,12	10,92	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Grandi Spostamenti
0,12	10,81	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,12	10,36	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Grandi Spostamenti
0,12	10,58	Modello "Completo" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,12	10,55	Modello "Completo" - Analisi Grandi Spostamenti
0,12	8,64	Modello "Completo - Senza forza della vite" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,16	14,88	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,16	14,47	Modello "Base Fissa - Molla" - Analisi Grandi Spostamenti
0,16	14,42	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,16	13,5	Modello "Base Fissa - Molla - Base Mobile" - Analisi Grandi Spostamenti
0,16	15,18	Modello "Completo" - Analisi Piccoli Spostamenti
0,16	15,07	Modello "Completo" - Analisi Grandi Spostamenti
0,16	10,95	Modello "Completo - Senza forza della vite" - Analisi Piccoli Spostamenti

Tabella 4-9 Confronto dei risultati delle rotazioni ottenute dalla simulazione Ansys con vari modelli

Il risultato ottenuto è di fondamentale importanza per questo studio, in quanto prevede che l'attuatore così progettato sarà in grado di generare, sotto una differenza di potenziale di adeguata, rotazioni a vuoto di 8,64° della punta dell'avvitatore. Chiaramente questa rotazione nell'utilizzo reale, sarà ulteriormente limitata a causa della coppia resistente che la vite oppone alla punta dell'avvitatore per effettuare il serraggio.

È da sottolineare che per l'analisi con il modello completo non è stata eseguita l'analisi per grandi deformazioni non riuscendo a far convergere la soluzione anche aumentando la risoluzione della Mesh.

4.4.2. Analisi virtuale per rilevare la coppia sviluppata dall'attuatore

A questo punto della simulazione, è naturale voler prevedere il valore della coppia che l'avvitatore è in grado di sviluppare al variare del valore della compressione a cui viene sottoposta la molla. La conoscenza del valore di coppia generata dall'avvitatore ha

notevole importanza poiché è il parametro di maggior interesse per poter valutare le prestazioni dell'avvitatore.

Per prevedere questo valore è stata effettuata un'ulteriore analisi con Ansys utilizzando il modello precedentemente descritto "Modello Completo senza forza della vite" dove è stato aggiunto un elemento di forma cubica che simula un piano sul quale appoggiare la testa dell'avvitatore (Fig. 4.23).

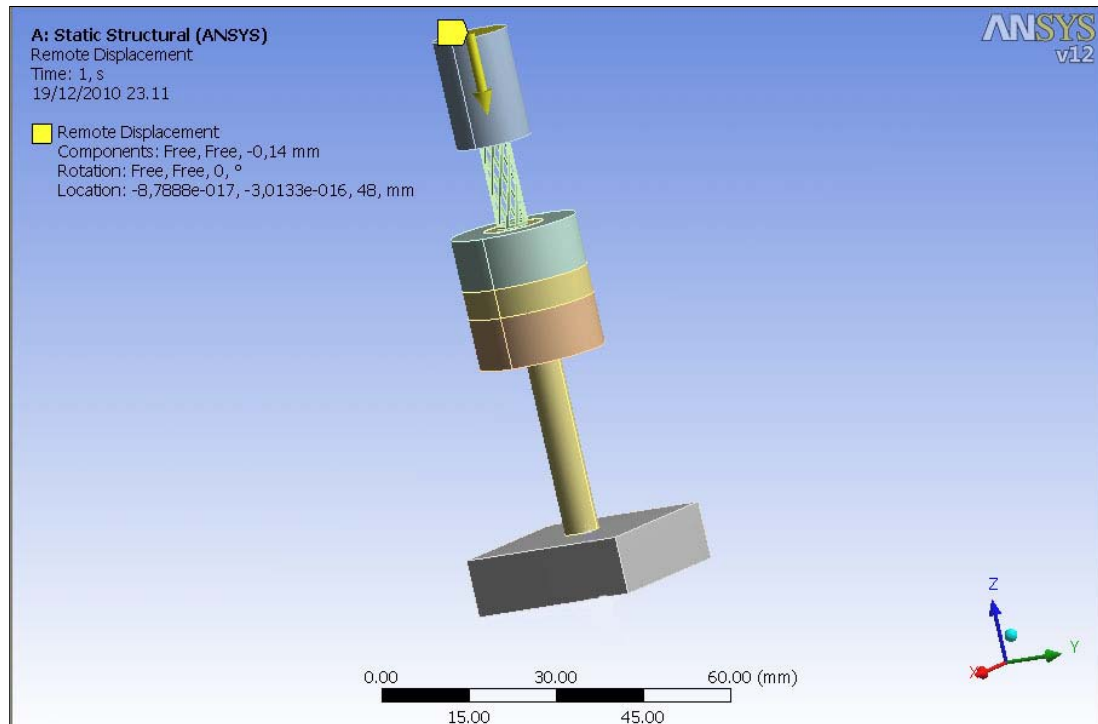


Fig. 4.23 Modello "Sistema Completo" adoperato per valutare in Ansys il valore della coppia sviluppata dall'attuatore

I parametri inseriti nella Workbench non vengono variati rispetto a quelli utilizzati nel modello precedente, tuttavia questa analisi necessita di un'ulteriore vincolo rigido che viene posto tra la "punta dell'avvitatore" e "l'elemento di forma cubica". Questo collegamento ha la funzione di impedire la rotazione della punta dell'avvitatore. In questo modo è possibile sia rilevare il valore della coppia che l'attuatore sviluppa in funzione di una determinata compressione imposta alla molla, che rilevare possibili scorrimenti che si possono verificare tra la superfici alta della "molla" e quella del "collegamento molla – attuatore" o tra la superfici bassa della "molla" e quella del "punta dell'attuatore".

Il modello ottenuto è riportato in Fig. 4.24. Da tale figura è possibile osservare sia la coppia di reazione che il piano esercita alla punta dell'avvitatore che un'immagine amplificata del modo con cui la molla si deforma sotto una compressione.

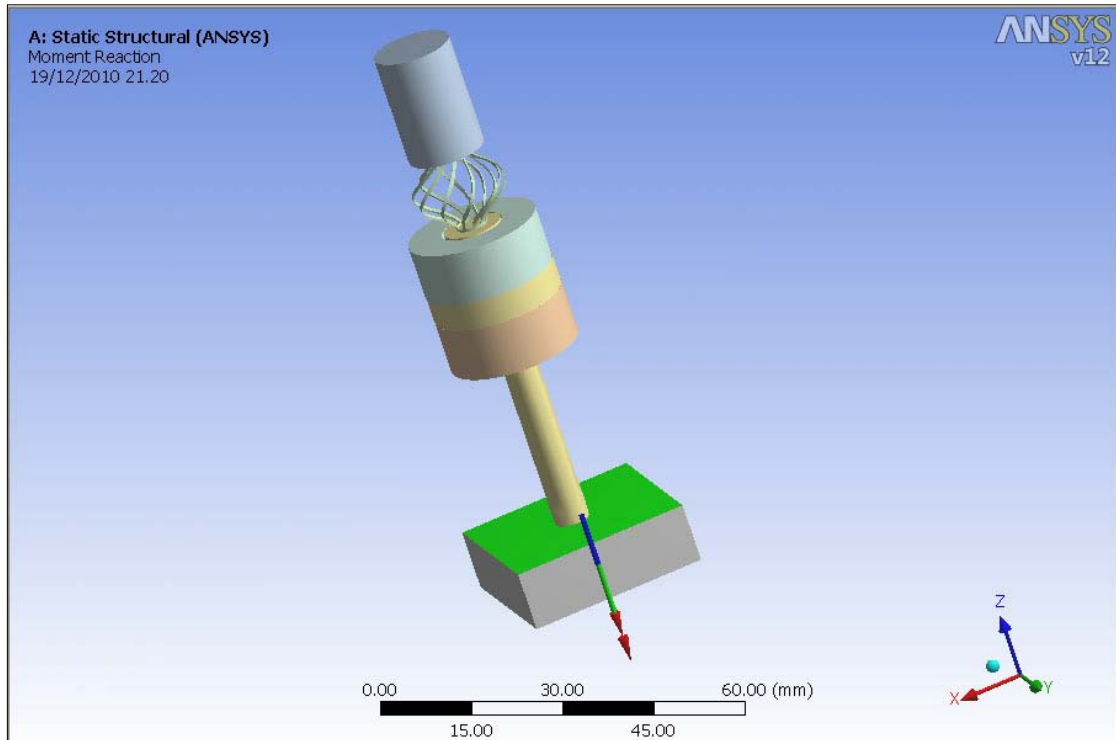


Fig. 4.24 Modello adoperato per rilevare la coppia sviluppata dall'attuatore in funzione della compressione imposta alla molla

La Tabella 4-10 fornisce i valori ottenuti dall'analisi. È da sottolineare il valore della coppia sviluppata dall'attuatore per una compressione di 0,12 [mm] con una differenza di potenziale di 150[V], pari a $M=12,148$ [Nmm]. Questo è il valore massimo di coppia che l'avvitatore riesce a sviluppare, poiché allungamenti maggiori di 0,12 [mm] sono soltanto virtuali.

È possibile quindi affermare che il progetto in studio sarà in grado di avvitare qualsiasi vite che richieda una coppia di serraggio inferiore a 12,148 [Nmm].

Coppia erogata dall'avvitatore	
Sistema Completo, $f=0,61$ e Forza di 10[N] sulla punta	
analisi piccole deformazioni	
Spostamento	Coppia resistente [N*mm]
0,02	2,0253
0,04	4,0506
0,06	6,0758
0,08	8,101
0,1	10,123
0,12	12,148
0,14	14,174
0,16	16,202

Tabella 4-10 Coppia generata dall'avvitatore in funzione del valore di compressione imposta alla molla

Graficando i valori della Tabella 4-10 si ottiene il Grafico 4.6.

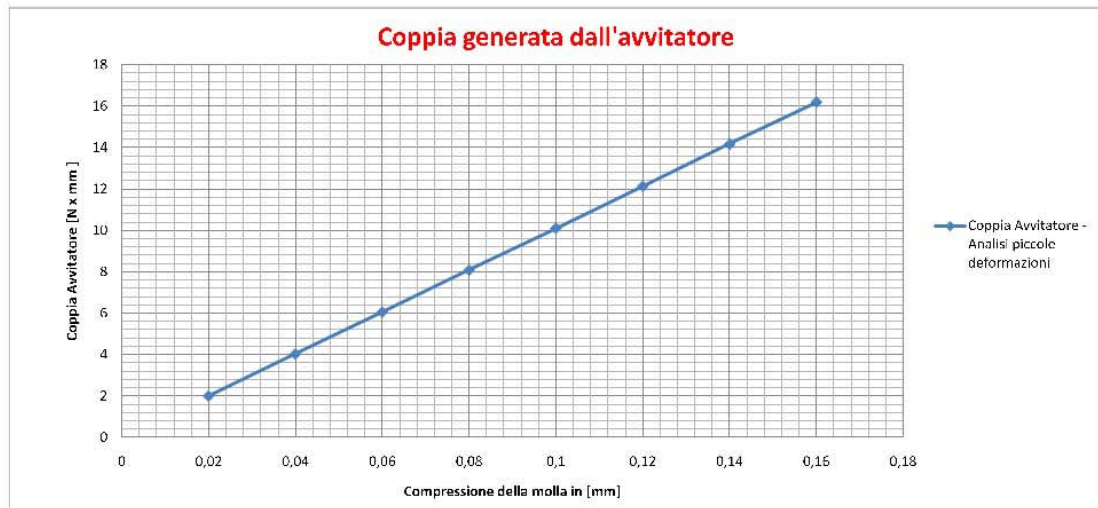


Grafico 4.6 Coppia generata dall'avvitatore in funzione del valore di compressione imposta alla molla

4.5. Colle

Come detto precedentemente, la testa della micro-vite non è dotata di una convenzionale testa a taglio od a croce, ma bensì di una particolare geometria simile ad un cratere. Per questo, già in fase di progetto dell'avvitatore, è stato pensato di trasmettere la coppia dalla punta dell'avvitatore a quella della vite mediante apposite colle dotate di caratteristica basso fondente. L'idea risiede nell'utilizzare resistenze poste direttamente sulla punta dell'avvitatore che possono essere azionate o spente in tempi molto brevi, in modo da poter sciogliere quando opportuno la colla sulla testa della vite. Per incrementare le prestazioni dell'avvitatore, l'idea è stata quella di realizzare una sorta di caverna all'interno della punta dell'avvitatore. In fase di presa della colla, la punta dell'avvitatore viene posta in un crogiolo dove si mantiene la colla allo stato fuso. La colla risalirà nella caverna per capillarità, e una volta tolta la punta dal crogiolo, la colla si solidificherà al proprio interno. Così facendo si dà la possibilità all'avvitatore di avere un piccolo serbatoio di colla sufficiente ad effettuare il collegamento di più viti in successione.

Per ragioni di limitatezza di tempo e di elevata quantità di materiale trattato in questa tesi, non è stato possibile progettare e realizzare tale dispositivo, che potrà essere uno spunto per tesi future. Tuttavia di seguito vengono analizzate alcune colle adeguate a tal fine. Tra le varie case fornitrici, quella con caratteristiche compatibili con il nostro studio è stata la ditta Aremco's Crystalbond.

Questi adesivi sono materiali ideali per eseguire assemblaggi temporanei di prodotti che richiedono cubettatura, lucidatura ed altri processi di lavorazione. I collegamenti ottenuti con questi adesivi hanno alta resistenza ed aderiscono facilmente con la semplice fusione al calore a materiali come metalli, vetro e ceramica. Quando l'azione della colla non serve più, questi adesivi vengono rimossi mediante riscaldamento e successiva pulizia della zona d'incollaggio con detergenti forniti dalla ditta.

Crystalbond™ 509

Fornisce un'eccellente adesione e minimizza l'otturazione che si verifica utilizzando utensili diamantati rispetto alle cere. Questa colla, per spessori sottili, risulta trasparente. È solubile in 509-S, inodore, non infiammabile, biodegradabile ed il solvente è risciacquabile in acqua. La temperatura di fusione è di 121 °C.

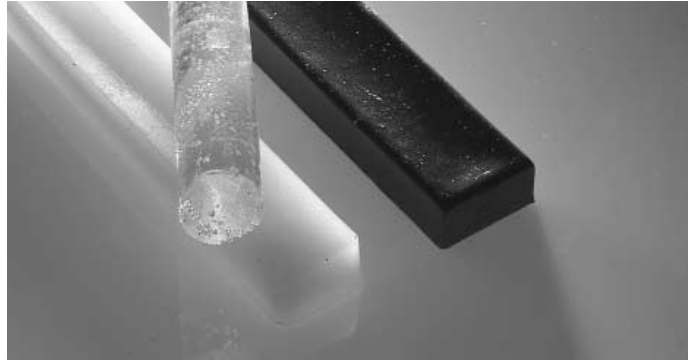


Fig. 4.25 Crystalbond™ 509, 555 and 590

Crystalbond™ 555 e 555-HMP

Dotata di bassa temperatura di fusione 54 °C, questa colla è adatta per sistemi di adesione che richiedano moderato-stress, incisioni al plasma a secco per wafers (sottile fetta di materiale semiconduttore) di silicio, rivestimento di strutture in Teflon placcato in rame, e cubettatura di ceramica. Trasparente in sezioni sottili. Solubile in acqua calda.

Crystalbond™ 590

Colla ad alta resistenza, adatto per realizzare sistema adesivi ad alta efficienza, ideale per il taglio a cubetti in miniatura. Solubile in alcool isopropilico o 590-S, idrodispersibile. La temperatura di fusione è di 150 °C.

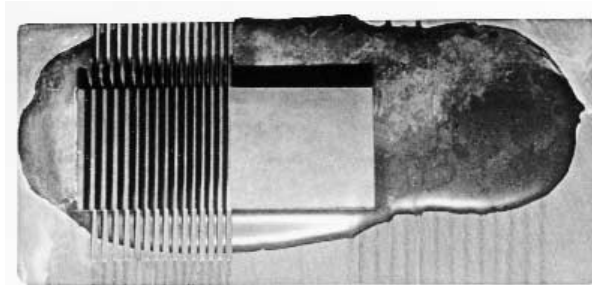


Fig. 4.26 Crystalbond™ 590 bonds an advanced ceramic which is diced into 25-50 mil sections.

PRODUCT SPECIFICATIONS						
Product No.	509	555	555-HMP	590	559	562
Trade Name	Crystalbond™	Crystalbond™	Crystalbond™	Crystalbond™	Wafer-Mount™	Wafer-Mount™
Form	Stick	Stick	Stick	Stick	Sheet	Sheet
Size ^Ø	7/8" Ø x 7"	1/2" x 1" x 7"	1/2" x 1" x 7"	5/8" x 1-1/4" x 7-1/2"	.005" x 10" x 10"	.003" x 8" x 10"
Weight	≈ .2 lbs/stick	≈ .15 lbs/stick	≈ .15 lbs/stick	≈ .5 lbs/stick	N/A	N/A
Flow Point, °F (°C)	250 (121)	120 (54)	150 (66)	302 (150)	N/A	200 (93)
Viscosity, cps	6,000	500	500	9,000	N/A	N/A
Color	Clear/Amber	White	White	Brown	Clear	White
Solvent	509-S or Acetone	509-S or Hot Water	509-S or Hot Water	590-S or Isopropyl Alcohol	Acetone or MEK	562-S

Fig. 4.27 Modelli di colle disponibili della ditta Aremcó's Crystalbond

4.5.1. Procedure d'applicazione

Crystalbond™ 509 *, 555, 555-, *HMP* 590

- Utilizzare una piastra calda od un forno, per trasferire il flusso di calore dal supporto in ceramica o vetro nella zona selezionata dell'adesivo *Crystalbond*™. Assicurarsi di lavorare in una zona ben ventilata, e di non superare la temperatura di fusione, in caso contrario, l'adesivo inizierà a decomporsi.
- Applicare uno strato uniforme di adesivo, riscaldare la piastra di montaggio e posizionare il substrato sopra l'adesivo. Utilizzare un peso per generare una pressione al substrato al fine di rimuovere le bolle d'aria in modo da garantire che il substrato sia parallelo alla piastra.
- Rimuovere la piastra di montaggio dalla fonte di calore e lasciarla raffreddare lentamente a temperatura ambiente fino a quando il collante non si è indurito.
- Tagliare in strati sottili o processare il substrato come richiesto, quindi rimuovere le parti riscaldando nuovamente il blocco di fissaggio fino alla temperatura di fusione.

Analizzate le caratteristiche delle colle disponibili, il modello che soddisfa maggiormente le caratteristiche necessarie per lo studio è il prodotto con codice 555 poiché ha la temperatura di fusione più bassa.

5. MANIPOLATORE PER MICROOGGETTI

5.1. Introduzione

Giunti a questo punto per terminare la micro stazione di lavoro non resta che progettare un dispositivo in grado di effettuare azioni di “pick and place” sulle micro-rosette. In letteratura esistono svariate tipologie di gripper che adempiano a questo scopo. Il modo classico fin’ora utilizzato è quello di ridurre gripper a due dita in scala (principio delle pinzette). Le difficoltà che nascono dall’utilizzo di questi gripper sono molte, per questo negli ultimi anni sono stati proposti numerosi altri principi. Lambert [38] ha proposto un innovativo gripper che sfrutta la presa capillare come alternativa a quella delle pinzette miniaturizzate ed ai gripper a depressione. I vantaggi di questo modello di gripper risiedono sostanzialmente nella possibilità di presa di oggetti dotati di geometria regolare ma anche complesse come anelli o palline. È possibile osservare che la “ $F_{grasping}$ ” è funzione di “ L ”, mentre la “ F_{peso} ” è funzione di “ L^3 ”. È anche possibile osservare che nei gripper a depressione la “ $F_{depressione}$ ” è funzione di “ L^2 ”. Quindi la forza capillare negli oggetti dotati di dimensioni sub millimetriche risulta predominante rispetto alla forza peso ed alla forza di depressione.

Inoltre, come indicato da Grutzeck e Kiesewetter, esiste un effetto di smorzamento che previene i danni meccanici dovuti a pressioni di contatto elevate.

Un esempio presente in letteratura, analogo al caso in studio, è quello che si occupa della progettazione di una pinza da utilizzare per l’inserimento di sfere (di diametro 500 μm) in un foro come mostrato in Fig. 5.1 (Lambert [38]).

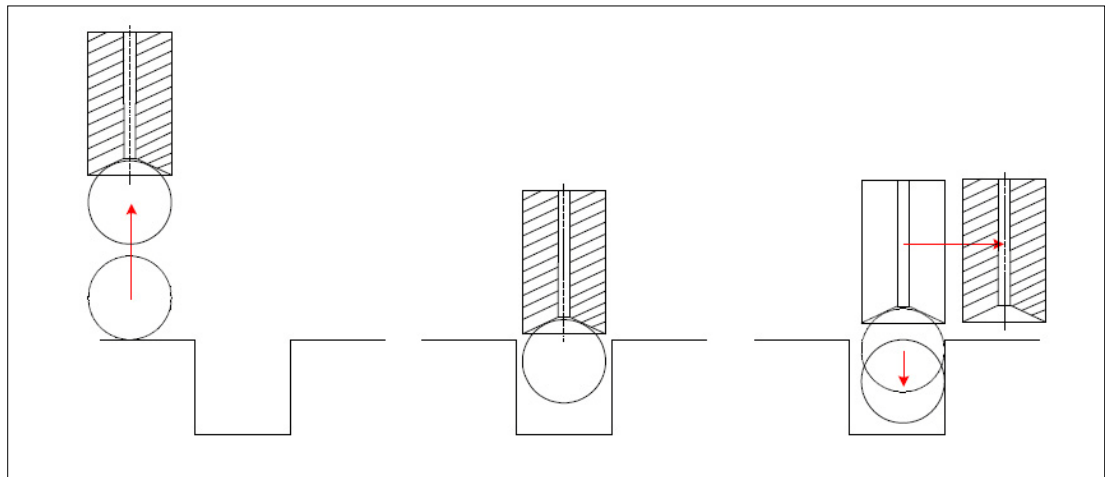


Fig. 5.1 Schema dell’handling di un gripper capillare per l’inserimento di una sfera in un foro

Un requisito che viene posto per effettuare questa operazione è quello di evitare l’utilizzo delle convenzionali pinzette, in quanto potrebbero provocare graffi sulla superficie della sfera. Per questa ragione e per il fatto che il peso delle sfere è molto piccolo (circa 3.8 μN), si presenta adeguato l’utilizzo di gripper a presa capillare poiché le tensioni superficiali sulla base di presa possono arrivare a generare forze fino a 150 μN .

Come mostrato nello schema di Fig. 5.1, le forze di grasping sono generate dalla forza capillare, mentre il rilascio avviene meccanicamente facendo spostare lateralmente il gripper una volta che la sfera è nel foro.

Per creare le forze capillari è necessario che sulla superficie di contatto tra il gripper e la sfera sia presente del liquido.

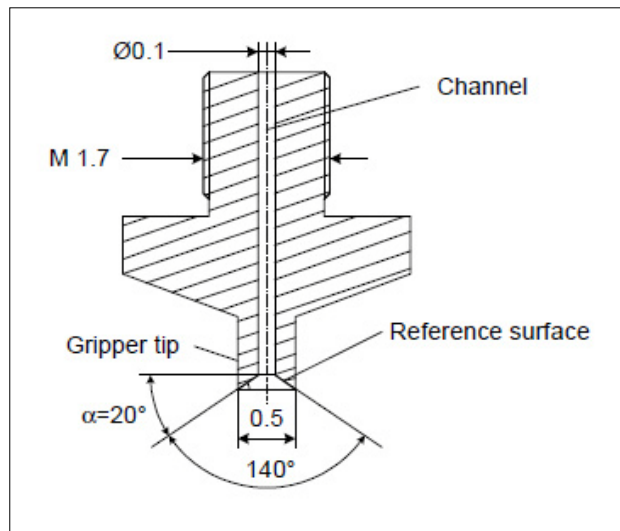


Fig. 5.2 Gripper a forza capillare di Lambert. Il contatto con la sfera avviene sulla “Reference surface”

Il gripper proposto da Lambert è schematizzato nella Fig. 5.2. Tale gripper è realizzato in acciaio inox. Sono state proposte due soluzioni per alimentare il liquido necessario per generare la forza di grasping:

- controllando la pressione all’interno del canale del gripper
- immergendo nell’acqua la punta del gripper

La prima soluzione è stata scartata a causa dell’instabilità della goccia quando l’altezza di quest’ultima risulta prossima a metà del diametro del gripper. La seconda soluzione è miglior della prima anche perché si ha una buona ripetibilità del volume di liquido trasferito al gripper a seguito dell’immersione della punta nel liquido.

Il liquido che è stato utilizzato è un olio di lubrificazione con una tensione superficiale $\gamma = 34.5 \text{ [mNm}^{-1}\text{]}$. È da notare che non viene utilizzata acqua convenzionale, in quanto quest’ultima tenderebbe ad evaporare durante gli esperimenti depositando residui di calcare. Il materiale con cui vengono realizzate le sfere da afferrare è ZrO_2 .

La Fig. 5.3 mostra un ciclo di montaggio realizzato da Lambert:

- la prima immagine mostra la sfera da manipolare posta nella parte inferiore destra della figura. La sfera “galleggia” su una goccia di liquido (per effetto della tensione superficiale, come nel water strider, e non a causa del principio di Archimede)
- la seconda figura mostra il gripper che si allinea sopra la sfera da afferrare
- la terza immagine mostra l’afferraggio della sfera da parte del gripper, che viene spostata come rappresentato nelle immagini 4, 5 e 6 fino a raggiungere la sua posizione finale
- la settima immagine mostra lo spostamento radiale della pinza necessario per eseguire l’operazione di rilascio
- infine, il gripper viene allontanato

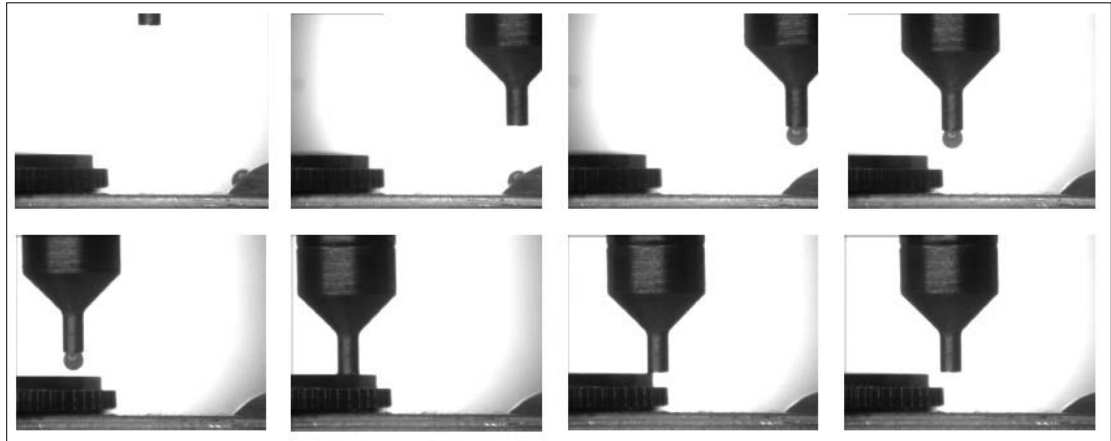


Fig. 5.3 Sequenza di assemblaggio: il diametro della sfera manipolata è di 0,5 [mm]

I risultati dei modelli numerici di Lambert sono riportati in Fig. 5.5. tali grafici raffigurano il valore della forza e del volume di liquido interposto tra il gripper e la sfera da afferrare in funzione dell'angolo " β " di riempimento che forma il liquido sulla sfera Fig. 5.4.

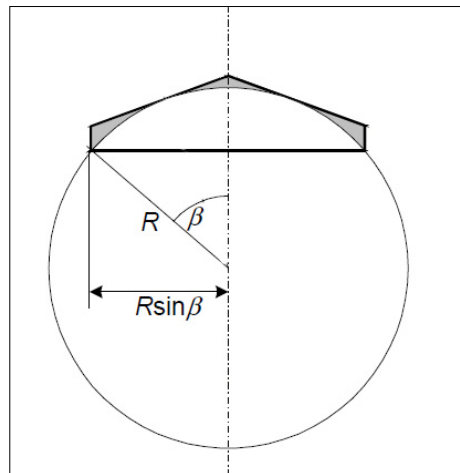


Fig. 5.4 Angolo " β " di riempimento del liquido sulla sfera

I valori delle forze corrispondenti ai massimi angoli di riempimento " β " risultano rispettivamente pari a 97 [μN] per la pinza $\phi = 0.3$ [mm] e 168 [μN] per la pinza $\phi = 0.5$ [mm].

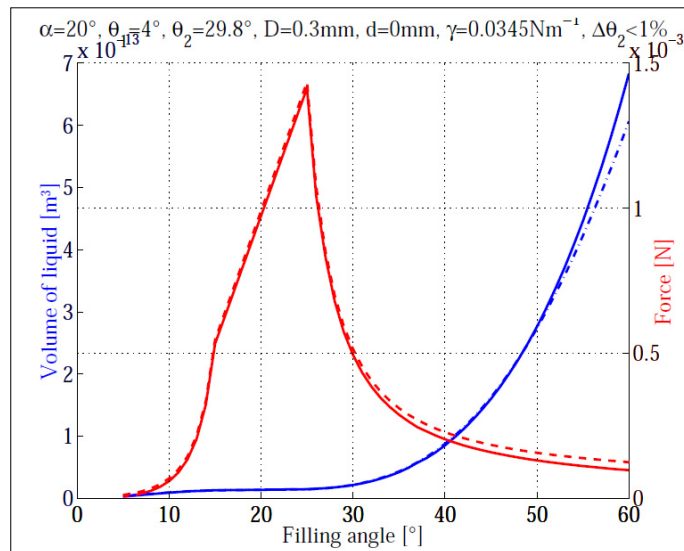


Fig. 5.5 Risultati delle forze generate dal modello numerico di Lambert

A fronte dei risultati ottenuti da Lambert, lo studio in questione si propone come ulteriore specifica di progetto, quella di poter rilasciare la rosetta da manipolare in qualsiasi posizione. In pratica quello che si vuole raggiungere è effettuare lo sgancio dell'oggetto da manipolare senza dover necessariamente ricorrere ad una superficie di contatto con la quale dover far impattare l'oggetto.

È stato possibile verificare quest'ultima specifica, utilizzando l'innovativo tessuto studiato dall'Università danese "DTU" (Denmark Technical University) che opera in collaborazione con l'Università di Pisa. Il tessuto utilizzato sfrutta il fenomeno delle tensioni superficiali mediante l'apporto di piccole gocce di liquido (proprio come adoperato da Lambert). L'evoluzione di questo particolare tessuto consiste nel fatto che è idrofilo in tutta la sua superficie ad eccezione di una piccola zona anulare con un raggio interno variabile tra 0,5 [mm] e 1,5 [mm] ed esterno di 3 [mm] come mostrato in Fig. 5.6.

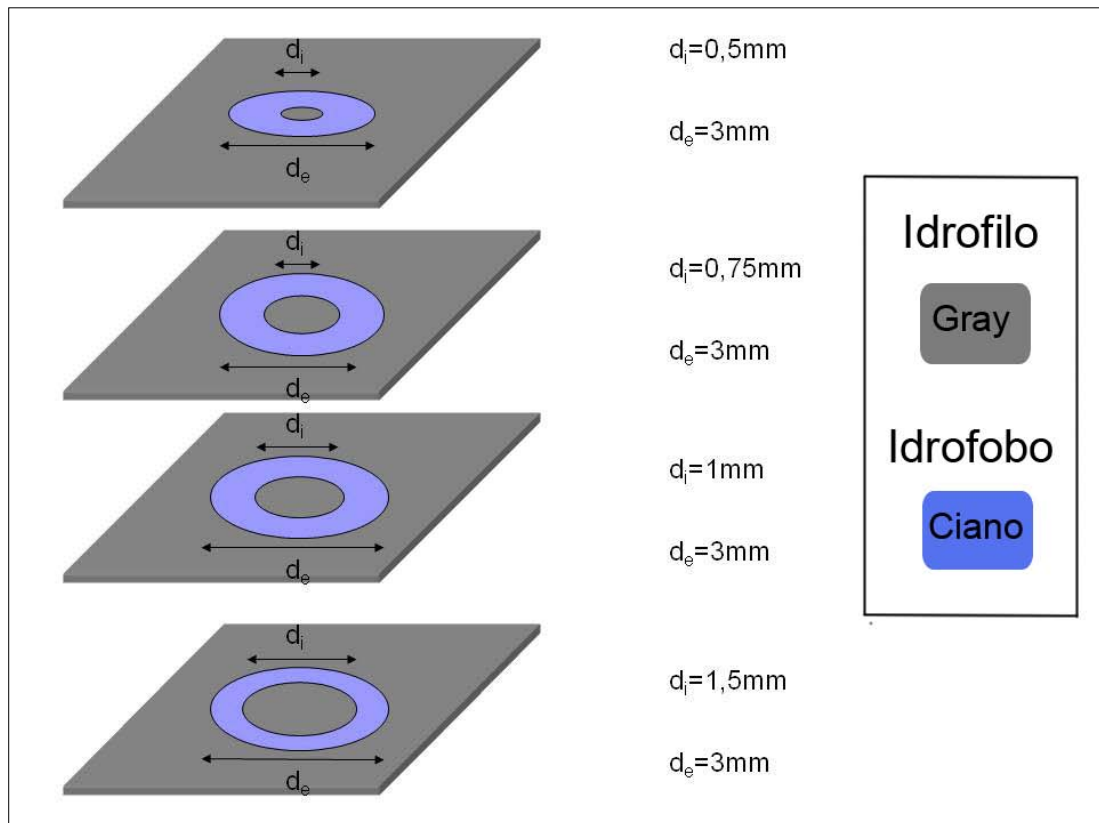


Fig. 5.6 Tessuto realizzato dall'Università danese "DTU" adoperato per il sollevamento delle rosette

Il concetto di idrofilia del materiale è legato al concetto di bagnabilità. È possibile definire l'angolo di contatto " θ_c " (Fig. 5.7) di un liquido su una superficie, come l'angolo formato da una goccia di acqua posta a contatto con essa. Minore è l'angolo di contatto (cioè più "schiacciata" è la goccia), più elevata è l'idrofilicità del materiale.

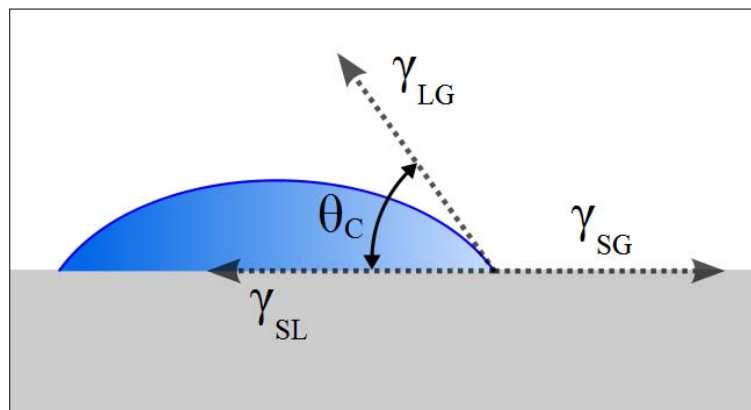


Fig. 5.7 Schema della bagnabilità di un liquido in cui viene riportato l'angolo di contatto " θ_c "

Per idrofobia (dal greco hydor, acqua, e phobos, paura) si intende la proprietà fisica di specie chimiche di essere respinte dall'acqua. Si utilizza inoltre il termine in senso più ampio per indicare la proprietà di materiali di non assorbire e non trattenere acqua al loro interno o sulla loro superficie. Per questo una superficie si dice idrofobica quando una goccia d'acqua sulla sua superficie forma un angolo di contatto " θ_c " superiore ai 90° . Se tale angolo è superiore ai 150° la superficie è detta superidrofobica (Fig. 5.8).



Fig. 5.8 Esempio di una goccia di rugiada sulla superficie superidrofobica di una foglia

Il funzionamento del tessuto realizzato dalla “DTU” basa il proprio funzionamento sul concetto di idrofilia e di idrofobia. Tale tessuto in realtà è realizzato in materiale gommoso, simile ad una camera d’aria di una ruota di una bicicletta. Questa caratteristica gli consente di deformarsi notevolmente se sottoposto a trazione. Il funzionamento di utilizzo è il seguente:

- si dispone una membrana realizzata dalla “DTU” su una superficie piana
- si porta in trazione la membrana facendo attenzione a dilatarla radialmente in modo uniforme, così da ottenere che anche a fine trazione l’anello di materiale idrofobico rimanga, seppur di dimensioni maggiori, sempre di geometria circolare
- nel centro dell’anello viene posta una goccia di liquido (composti oliosi per lunghi esperimenti, altrimenti è possibile utilizzare acqua)
- si avvicina la membrana precedentemente stirata, su cui è stata posta una goccia di liquido, all’oggetto da afferrare
- si solleva la membrana (che per forze capillari porta con sé il micro oggetto da manipolare) e si colloca nella posizione voluta
- l’oggetto da manipolare viene rilasciato togliendo la forza che teneva in trazione la membrana

Il procedimento sopra descritto funziona proprio grazie al fatto che la goccia di liquido che attrarrà l’oggetto da manipolare mediante forze capillari si trova all’interno di una superficie idrofila circondata da una superficie idrofoba. Dopo aver portato in trazione la membrana la superficie idrofila avrà aumentato la sua area. La quantità di acqua che questa zona può attrarre risulta maggiore rispetto alla condizione originaria della membrana. Una maggiore superficie di contatto tra la membrana e la goccia è fondamentale per poter sviluppare maggiori forze capillari necessarie per supportare il peso sia della goccia che dell’oggetto da manipolare. Inoltre la trazione della membrana è un punto focale anche al fine del rilascio dell’oggetto. Infatti, togliendo il pretensionamento alla gomma, si ottiene un restringimento della superficie tale da far cadere la goccia, ottenendo così il rilascio dell’oggetto. L’acqua infatti, essendo circondata da una superficie idrofoba non potrà ridistribuirsi uniformemente, e quindi perdendo il giusto rapporto tra volume e superficie

tale da generare una forza capillare sufficiente a sostenere il peso della goccia e dell'oggetto, tenderà a cadere trascinando con sé l'oggetto.

Questa innovativa tipologia di gripper risulta chiaramente molto appetibile in quanto i limiti che introduce sono veramente pochi, sia perché:

- può afferrare oggetti dalle più svariate geometrie
- non danneggia né perturba anche oggetti molto fragili
- può rilasciare l'oggetto in qualsiasi posizione voluta senza necessità di ingaggio

5.2. Progettazione

Lo scopo di quest'ultima fase della tesi riguarda la valutazione delle reali prestazioni del tessuto realizzato dall'Università danese "DTU". È stato quindi necessario effettuare delle prove sperimentali di presa e rilascio di oggetti di peso e dimensioni note. Per questo sono stati progettati ed in seguito realizzati macchinari in grado di estendere la membrana in modo da mantenere la forma dell'anello, di materiale idrofobo, come tale anche a fine estensione. Questo impone che i macchinari progettati dovranno rispondere alle seguenti specifiche di progetto:

- generare un allungamento del 30% della membrana della zona interna all'anello di materiale idrofobo
- produrre l'allungamento in modo uniforme. La membrana nella zona interna all'anello deve allungarsi in modo radiale
- devono verificarsi piccole variazioni di lunghezza, durante la fase di trazionamento, lungo la direzione perpendicolare alla superficie della membrana
- limitato ingombro, soprattutto nella zona di presa per favorirne la visione

Sono stati così progettati e realizzati vari prototipi, al fine di ottenere una versione che rispecchiasse esattamente le specifiche di progetto.

Di seguito verranno elencati i vari prototipi che sono stati realizzati e testati.

5.2.1. Primo prototipo realizzato

Il primo prototipo realizzato e testato è stato il più semplice da produrre, tuttavia è stato quello che ha mostrato i limiti maggiori. Si tratta di un cilindro che presenta un foro filettato, completamente passante, coassiale con l'asse del cilindro (Fig. 5.9). All'interno del foro filettato è ospitata una vite, con testa a brugola incassata. Infine sono state effettuate due gole sulla parte esterna del cilindro, una posta sull'estremità alta "gola superiore" e l'altra sull'estremità bassa "gola inferiore".

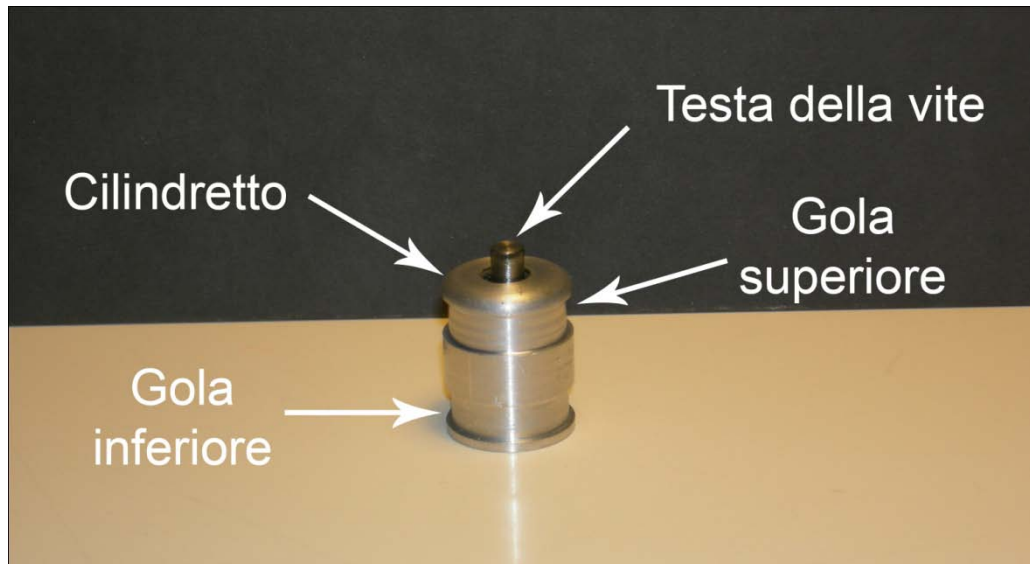


Fig. 5.9 Schema descrittivo del "cilindretto"

Il funzionamento è molto semplice, viene posta la membrana gommosa dell'Università danese "DTU" sulla testa del cilindretto, facendo attenzione a mantenere l'anello di materiale idrofobo (realizzato con laser subacqueo) esattamente sopra la testa della vite. La membrana così posizionata viene fissata mediante una fascetta in plastica. È importante sottolineare che, prima di coprire il cilindro con la membrana, per salvaguardarne la durata, viene adoperato come accorgimento quello di applicare una goccia di olio sopra la testa della vite. In questo modo viene limitato l'attrito che si genera tra la testa della vite e la membrana durante la fase di avvvitamento. Per rendere ancora più sicuro il collegamento della membrana sul cilindretto, la fascetta viene serrata fino a farla entrare nella "gola superiore" (vedere Fig. 5.9).

Completato il dispositivo, non resta che far ruotare la vite, con l'apposita chiave a brugola, per fare uscire la testa all'esterno della superficie del cilindro. In questo modo la membrana tende ad assumere la classica forma a tenda canadese, poiché viene sollevata nella parte centrale dalla vite, su cui è stato centrato l'anello della membrana, mentre la parte in contatto con la superficie laterale del cilindro rimane ferma. Portando la membrana in trazione viene di conseguenza allungata anche la zona idrofila, interna all'anello, di una quantità sufficiente a far trattenere la goccia di liquido ed a farla cadere nel momento in cui viene rilasciata la membrana.

Per effettuare il test sperimentale è stata realizzata un'apposita struttura ("banco prova" vedere Fig. 5.10 e Fig. 5.11) al fine di sorreggere il prototipo in modo stabile, sia per limitarne le perturbazioni dovute all'ambiente esterno, sia per avere la possibilità di effettuare prove ripetibili.

Il "banco prova" è composta da:

- base: piastra rettangolare d'acciaio
- squadrette: lamierini d'acciaio piegati a 90° e successivamente incollate sulla base
- capriata: lamierino d'acciaio piegato a ferro di cavallo necessario a sorreggere il prototipo. Successivamente le squadrette sono state forate ed inbulate con la capriata

- spessori in Pvc: necessari a fissare il prototipo alla capriata. Sono stati realizzati partendo da un pezzo di dimensioni rettangolari e di spessore uguale a quello della gola inferiore del cilindretto
- lamierino di serraggio: componente d'acciaio su cui è stato effettuato un foro di diametro maggiore a quello del diametro esterno del prototipo
- bulloni: sono stati effettuati quattro fori passanti per serrare il tutto con quattro bulloni

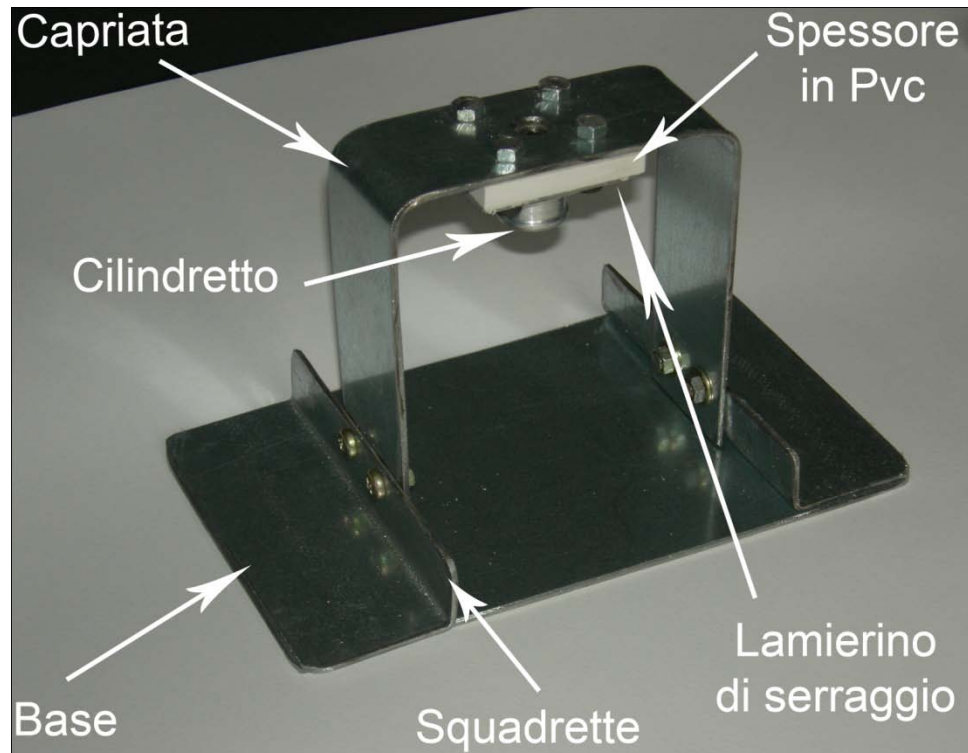


Fig. 5.10 Descrizione della struttura realizzata per la prova sperimentale del primo prototipo

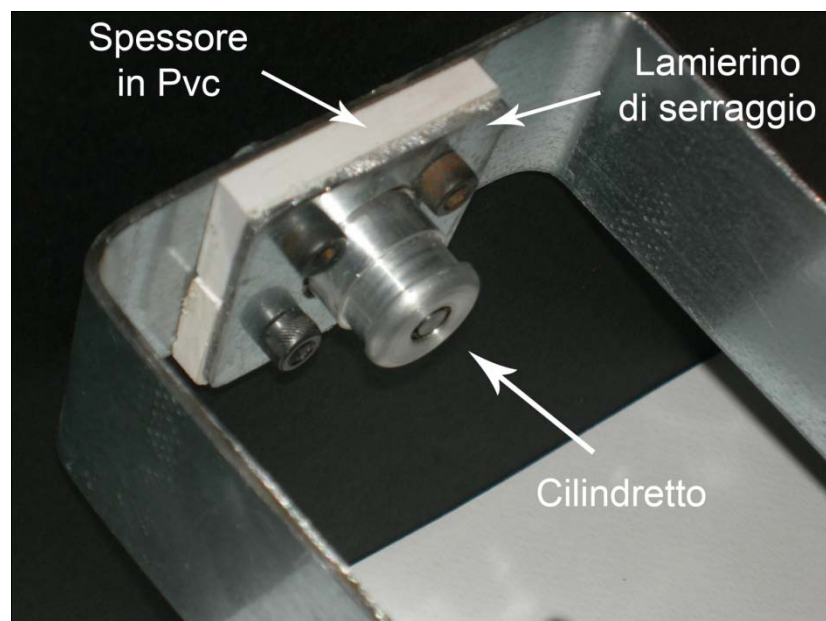


Fig. 5.11 Ingrandimento della struttura realizzata per la prova sperimentale del primo prototipo

Il primo prototipo così realizzato è risultato perfettamente funzionante, tuttavia presenta i seguenti limiti:

- al momento in cui si aziona la vite per mettere in trazione la membrana, la distanza di quest'ultima rispetto alla superficie inferiore del cilindretto varia. Quindi non sarà più nota la posizione della membrana lungo l'asse perpendicolare al cilindretto, problema da non sottovalutare nel caso in cui si decida di far movimentare da un robot la struttura. Inoltre è da notare che al fine del corretto funzionamento la parte di membrana che deve essere allungata è la parte interna all'anello, di materiale idrofobo, che si trova a contatto con la testa della vite. Purtroppo questa zona è anche quella che subirà la più piccola dilatazione, in quanto entra in gioco le forze di attrito che si sviluppano nel contatto tra membrana e testa della vite. Ne consegue che per generare un allungamento adeguato della membrana interna all'anello, deve necessariamente verificarsi un'importante spostamento della vite, amplificando così il limite appena descritto.
- la filettatura della vite non garantisce una precisione tale da far ruotare la vite in modo perfettamente coassiale, il che implica un'oscillazione della zona della membrana su cui si sviluppa la presa dell'oggetto durante la fase di avvvitamento

Risulta facilmente visibile che i problemi sopra elencati sono intrinseci al tipo di prototipo realizzato, quindi per risolvere i problemi appena esposti si è passati a realizzare un secondo prototipo descritto di seguito.

5.2.2. Secondo prototipo

Il secondo prototipo è stato molto più complesso da realizzare (vedere Fig. 5.12). È costituito dal:

- telaio
- punzone
- manopola
- piastra
- pinze

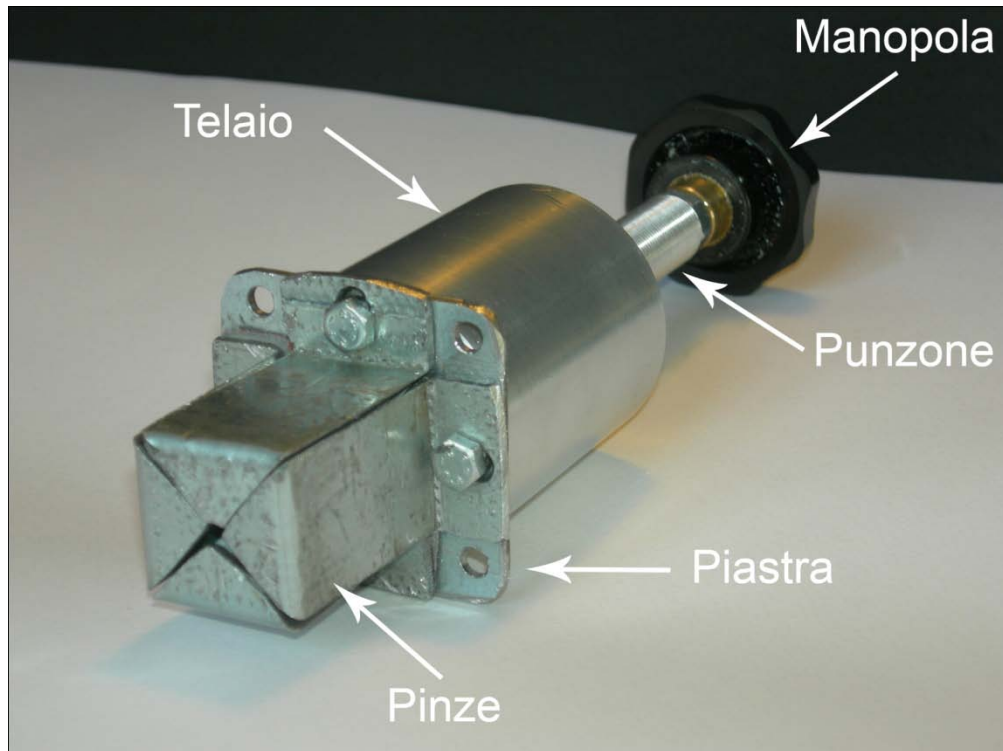


Fig. 5.12 Schema descrittivo del secondo prototipo

Il punzone grazie ad una filettatura posta sulla parte posteriore si avvita al telaio. In questo modo ruotando la manopola solidale al punzone è possibile farlo traslare lungo l'asse del telaio. La parte anteriore del punzone ha forma troncoconica (vedere Fig. 5.13). Questa geometria è dettata dal fatto che le pareti coniche andranno ad impattare con le pareti interne delle pinze generando una loro apertura a seguito della rotazione della manopola. Per il funzionamento del prototipo non resta che incollare la membrana gommosa della "DTU" sulle pareti superiori delle pinze per determinarne la dilatazione al momento della loro apertura. È possibile far questo utilizzando colle di tipo domestico adoperate per il bricolage come la colla "Nexus" della Bostik.

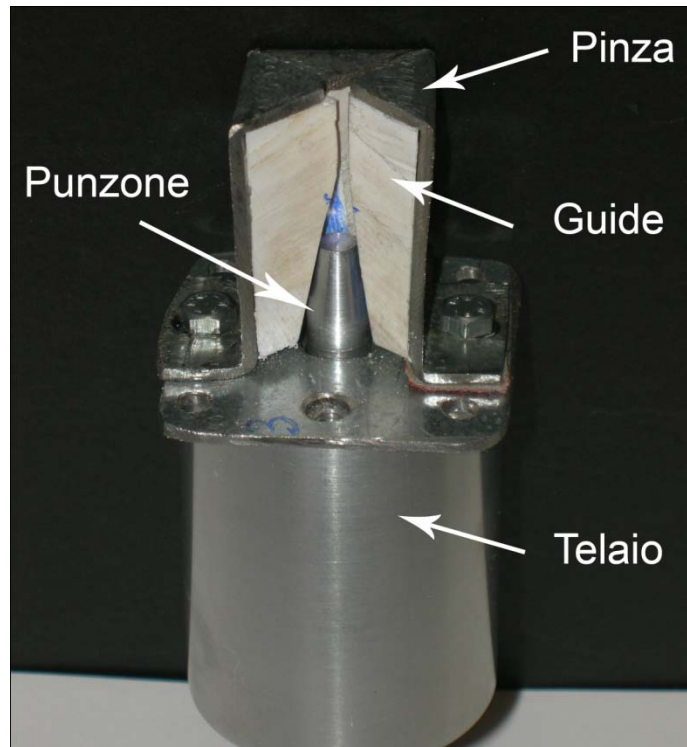


Fig. 5.13 Schema di funzionamento di apertura dei denti

Questo prototipo presenta i seguenti limiti:

- in fase di lavorazione occorre prestare elevata attenzione sia durante la piegatura delle pinze, per garantire una superficie della zona di contatto con l'oggetto da prelevare perfettamente piana, sia delle guide in pvc (successivamente incollate sulle pinze), per garantire la coassialità del cono che si viene a creare nelle guide, necessario per ottenere un'apertura omogenea delle pinze al fine di mantenere la membrana nella corretta posizione e per farla dilatare uniformemente.
- elevata dimensione della zona di presa degli oggetti da afferrare, limitando notevolmente la vista della zona di presa

5.2.3. Terzo prototipo

Il terzo prototipo nasce dall'esperienza acquisita con i precedenti test. Con questo prototipo è stato possibile risolvere problemi come quello di garantire l'apertura contemporanea delle pinze e di ridurre le dimensioni della struttura soprattutto nella zona di presa del carico.

Il terzo prototipo (Fig. 5.14) è costituito da:

- telaio
- punzone
- manopola
- cilindro in polipropilene

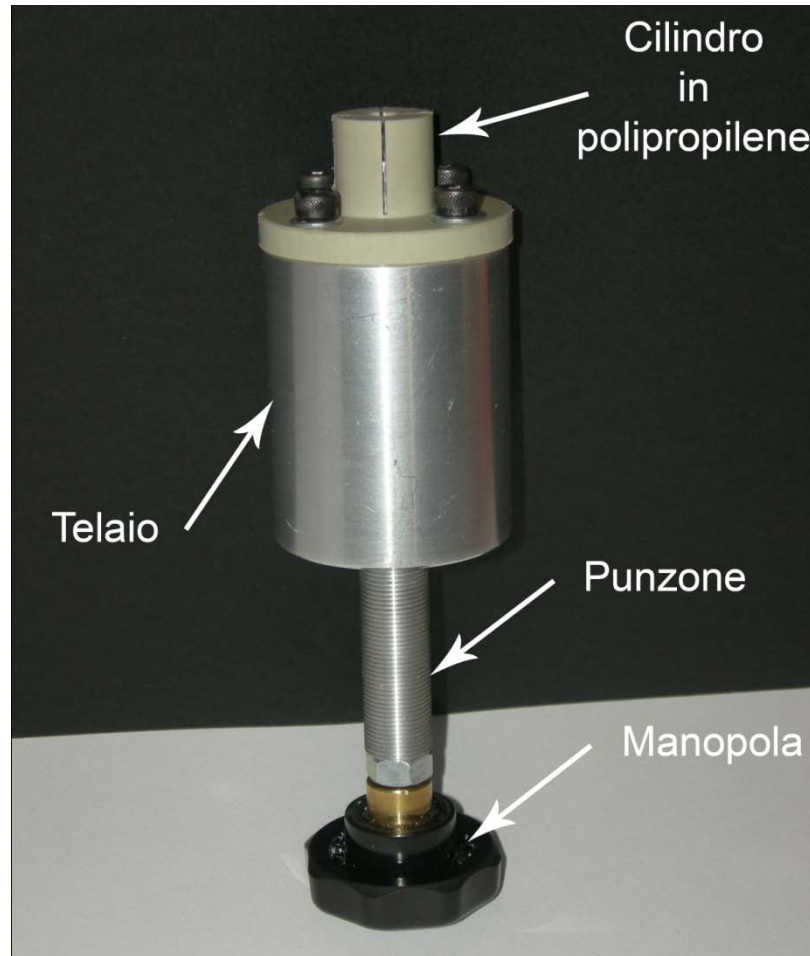


Fig. 5.14 Schema descrittivo del terzo prototipo

I componenti “telaio”, “punzone” e “manopola” risultano i medesimi di quelli utilizzati nel secondo prototipo, mentre il “cilindro in polipropilene” è nuovo.

Il “cilindro” (mostrato in Fig. 5.15) è stato realizzato mediante le seguenti lavorazioni:

- si utilizza una barra cilindrica di polipropilene (PP) di dimensioni $\phi = 50$ [mm] e $h = 30$ [mm]
- foratura passante: viene eseguita al tornio con una punta di $\phi = 2$ [mm]
- conicità interna (vedere Fig. 5.16): fondamentale al fine del funzionamento, in quanto su queste superfici viene fatto impattare il “punzone” che provoca l’apertura dei lembi esterni del cilindro per portare in trazione la membrana
- cilindratura esterna: eseguita con $\phi = 20$ [mm]
- foratura centrale: si esegue il foro $\phi = 5$ [mm]. Il foro viene eseguito nella zona dove sarà collocata la membrana, quindi impedisce che la colla venga a contatto con la membrana stessa. Quest’accortezza risulta indispensabile perché altrimenti la membrana nella zona di presa non potrebbe allungarsi della quantità necessaria a garantire il rilascio dell’oggetto da manipolare
- taglio: il cilindro in PP viene tagliato in quattro spicchi mediante una fresa dotata di disco da 0,8 [mm]. Questa lavorazione è di fondamentale importanza

perché permetterà ai quattro spicchi di allargarsi durante l'inserimento del punzone determinando il trazionamento della membrana

- fori di fissaggio: infine si eseguono i quattro fori necessari per effettuare il collegamento con il telaio

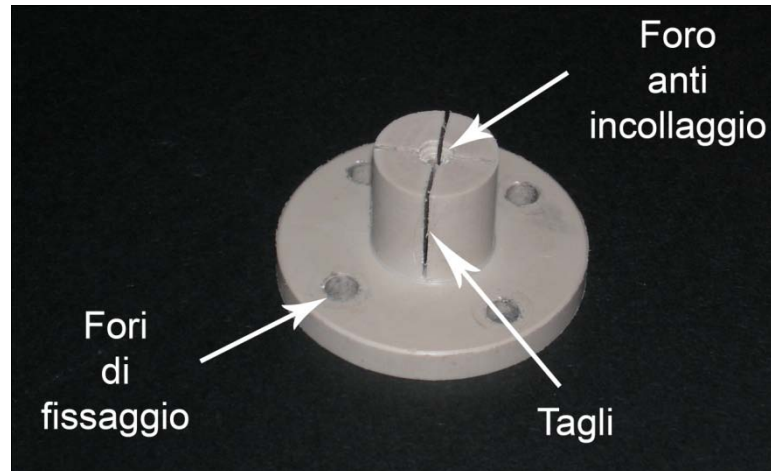


Fig. 5.15 Schema descrittivo del "cilindro in polipropilene"

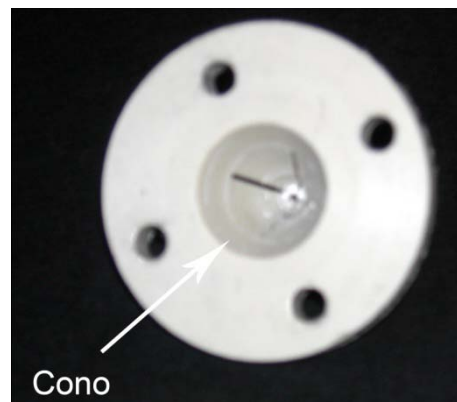


Fig. 5.16 Vista posteriore del "cilindro in polipropilene"

Il funzionamento del dispositivo è molto semplice e risulta analogo a quello descritto per il secondo prototipo:

- si porta in trazione la membrana fino ad estenderla di un 30% azionando la "manopla"
- si deposita una goccia di acqua sulla superficie idrofila posta all'interno dell'anello idrofobo della membrana
- si porta il dispositivo in contatto con l'oggetto da prelevare
- si solleva il dispositivo che trattiene a se anche l'oggetto da manipolare e si porta nella posizione in cui si vuole rilasciare l'oggetto
- si rilascia l'oggetto svitando il "punzone" e quindi riportando la membrana alle condizioni di partenza

Il dispositivo fin qui descritto risulta perfettamente funzionante, tuttavia alcuni miglioramenti possono essere apportati. A questo proposito sviluppi futuri possono essere

quelli di migliorare la durata a cicli di fatica ripetuta del “cilindretto in polipropilene” realizzandolo non mediante lavorazioni alle macchine utensili, ma per stampaggio. Per ottenere i migliori risultati, è necessario che il polipropilene fluisca, durante lo stampaggio attraverso lo strozzamento della cavità che forma la cerniera, nella direzione perpendicolare ad essa, in modo da ottenere un favorevole allineamento delle macromolecole. Altro accorgimento è quello di flettere due o tre volte la cerniera non appena stampata.

Sono state eseguite simulazioni con Ansys per valutare la possibile realizzazione del cilindro sopra descritto con materiali come acciaio od alluminio. Tuttavia i risultati ottenuti sono stati scoraggianti, poiché date le ridotte dimensioni del prototipo, le deformazioni che si generano non consentono di trazionare la membrana. Per ottenere la giusta trazione si dovrebbe costruire un prototipo con dimensioni estremamente grandi in proporzione al peso da sollevare. Considerando inoltre che il prototipo deve rimanere in campo elastico al fine di ritornare nelle condizioni originarie nel momento in cui viene cessato il carico, i materiali ferrosi sono stati definitivamente scartati.

Per limitare le dimensioni del prototipo, è stato quindi naturale pensare di realizzarlo in materiali plastici, sfruttando le notevoli proprietà di questi di potersi deformare. Tra le varie tipologie di plastica si è scelto di utilizzare il polipropilene, in quanto dotato di ottime caratteristiche di resistenza a flessione ripetuta. In letteratura [39] sono riportate prove di laboratorio dove non si sono avuti segni di rottura dopo aver sottoposto una cerniera di PP ad oltre 70'000'000 cicli di flessione.

Realizzato il “cilindretto in polipropilene” ed assemblato mediante le quattro viti al telaio non è rimasto altro che fermare la membrana incollandola sulla base superiore del cilindretto.

La scelta della colla ha richiesto numerose prove sperimentali, in quanto il polipropilene è un materiale non facilmente incollabile. Per questo sono state effettuate ricerche specifiche ed alla fine l'unica colla adatta per il “PP” è risultata la colla “3030” bi componente della “Loctite” (Fig. 5.17).

Caratteristiche di Loctite® 3030

- Adesione eccellente su PP, LDPE, HDPE e plastiche simili
- Rapida polimerizzazione: da 3 a 5 min. di tempo pelle, meno di 10 min. di completa polimerizzazione
- Non necessita di primer o di preparazione delle superfici
- Senza solventi e volatili
- Non infiammabile
- Incolla substrati differenti
- Incolla substrati di simile flessibilità
- Contiene spaziatori per controllare lo spessore del cordolo di adesivo
- Riempie i giochi

Prestazioni dell'adesivo polimerizzato

Resistenza a trazione, ASTM D 4501	Valori [N/mm ²]
PP	14
LDPE	4 (cedimento del substrato)
HDPE	14
ABS	15
PVC	8
PC	7
Resistenza a trazione, ASTM D 1002	Valori [N/mm ²]
Acciaio	5
Alluminio	5
Acciaio INOX	4

Fig. 5.17 Specifiche colla “3030” bi componente della “Loctite”

Tuttavia con profondo sconcerto si è verificato che tale colla non adempie affatto alle specifiche sopra riportate. Per questo è stato necessario eseguire alcuni test con diverse colle sui componenti in polipropilene. Alla fine la colla che ha mostrato risultati migliori è stata la “Nexus” della “Bostik”, applicata su una zona preventivamente ben sgrassata e dotata di superficie irregolare (precedentemente limata e lasciata volutamente rugosa).

Come accennato in precedenza la fase di incollaggio ha richiesto molta attenzione in quanto non devono essere assolutamente incollate le quattro pinze del cilindretto, e neppure la zona di membrana inclusa nell'anello di materiale idrofobo.

5.2.4 Quarto prototipo

Sempre nell'ottica di ottenere la configurazione migliore, ne è stato realizzato anche un quarto prototipo. Questo sostanzialmente non apporta ulteriori migliorie a quelle ottenute con il terzo, tranne quella di limitare in modo drastico le dimensioni nella zona del contatto.

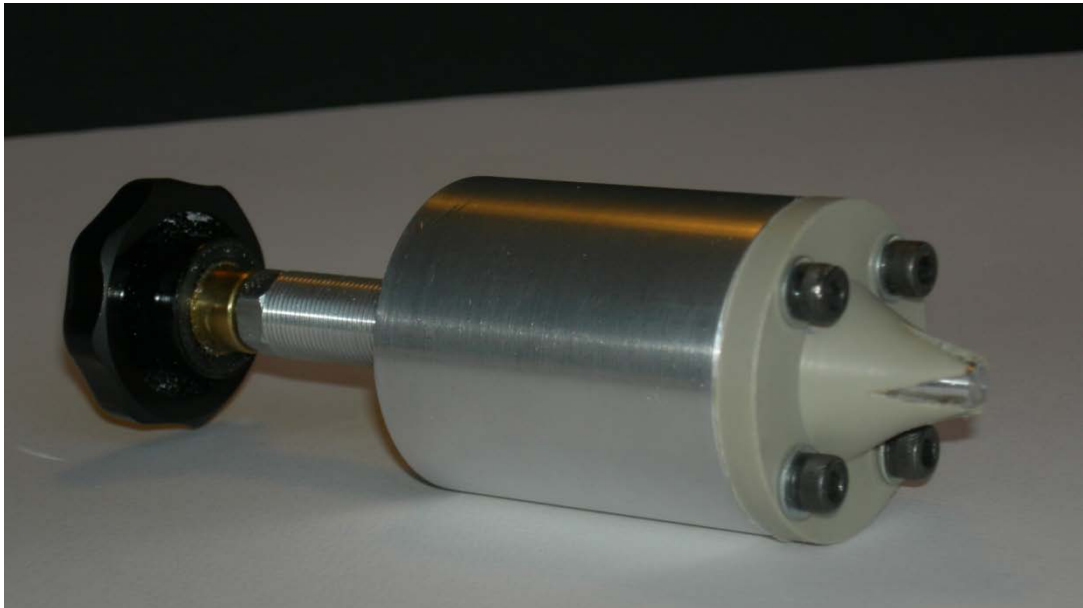


Fig. 5.18 Quarto prototipo

A fronte dei miglioramenti apportati, purtroppo non è stato possibile effettuare un test sperimentale, in quanto proprio a causa della testa conica del componente in "PP" è stato necessario tagliare la membrana per sagomarla in modo corretto alla superficie. Quest'operazione ha introdotto spigoli nella membrana che, una volta portata in trazione, ha mostrato tutti i suoi limiti generando degli strappi in quest'ultima. Questo problema sarebbe risolvibile se fosse data, già in fase di costruzione, la forma conica alla membrana come quella del cilindro in polipropilene.

5.3. *Versione di prototipo automatizzato*

Il ciclo di prove sperimentali sopra descritte sono servite a definire la migliore geometria del prototipo. Tuttavia lo studio fin qui trattato non avrebbe molto senso se il prototipo non venisse attuato e movimentato da un sistema automatico. Per questo è stato progettato, ma non realizzato (a causa dei costi d'acquisto legati all'attuatore), una versione del dispositivo sopra descritto che funzioni in modo automatizzato.

Specifiche richieste:

- piccolo ingombro
- minime variazioni di altezza lungo l'asse del telaio
- ripetibilità e riproducibilità

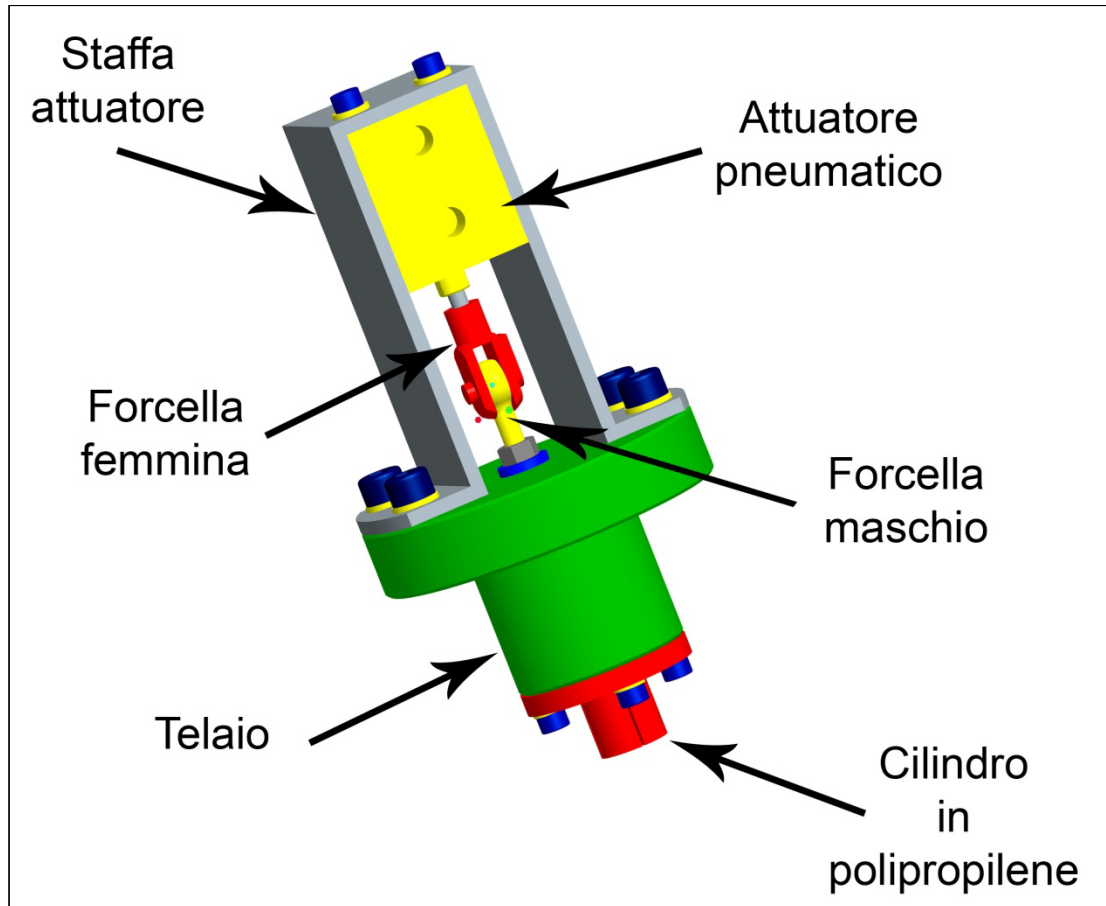



Fig. 5.19 Assieme realizzato con Pro-e della versione automatizzata del dispositivo solleva rosette


Per trasformare l'attuazione manuale (attraverso la manopola) in un sistema automatizzato, viene sfruttata l'azione di un attuatore. Al fine di scegliere il tipo di attuatore è stato necessario determinare le specifiche di forza e di corsa che deve sviluppare il pistone. Sono state quindi eseguite prove sperimentali, ponendo la base del punzone su una bilancia, ed inserendo il cilindro in PP sulla parte superiore del punzone. È stata così valutata la forza necessaria ad estendere la membrana di un valore sufficiente al funzionamento del dispositivo solleva rosette. La forza ottenuta è di $10 \text{ [Kg]} \cong 9,8 \text{ [dN]}$. In base a questa caratteristica ed alle dimensioni d'ingombro, è stato scelto l'attuatore pneumatico a doppio effetto a corsa breve modello "44100027" della ditta "Asca Joucomatic" [dimensioni = $38 \times 44 \times 38,5 \text{ [mm]}$] (vedere Fig. 5.21); forza assiale che riesce a sviluppare = $29,4 \text{ [daN]}$ a 6 [bar] (vedere Fig. 5.20)].

CARATTERISTICHE GENERALI	
Rilevamento	Previsto per fine corsa magnetico
Fluido	Aria o gas neutri, filtrati, lubrificati o non
Pressione di utilizzo	10 bar max.
Temperatura ambiente	da -10°C a +70°C
COSTRUZIONE	
Corpo	Leggera
Stelo pistone	Acciaio inossidabile (Ø8, 10, 12 e 20 mm)
	Acciaio cromato (Ø 16, 25 e da 32 a 100 mm)
Estremità stelo	Filettata femmina
Parti interne	POM (resina acetlica) o lega leggera
Guarnizione pistone	PUR (poliuretano) e NBR (nitrile)
Bussola di guida	Autolubrificante
Fissaggio frontale, posteriore o laterale	Mediante viti (non fornite) o flangia (vedere capitolo fissaggi)

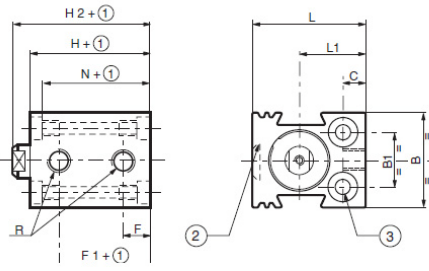


SCELTA DEL MATERIALE									
Ø (mm)	forze di spinta a 6 bar (daN)	forza di ritorno a molla (daN)	corsa (mm)	cilindro previsto per fine corsa		tipo di fine corsa installabile		peso (kg)	Ø raccordo
				codice	riferimento	magnetico a lamina ILS (reed)	elettronico magnetoresistivo		
25	29,4	24,7	10	44100027	K25D10-M	•	•	0,170	G 1/8

Fig. 5.20 Caratteristiche attuatore pneumatico

INGOMBRI (mm) 

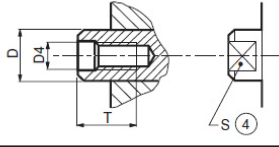
Ø da 8 a 25 mm - a semplice e doppio effetto



- 1 Corsa
Per le corse non standard, aggiungere il valore della corsa standard immediatamente superiore.
- 2 3ª scanalatura su Ø da 16 a 100
- 3 Fori e lamature di fissaggio (vedere dettaglio più sotto e pagine successive)
- 4 Quote della fresatura

NOTA : Nella versione a semplice effetto il collegamento si effettua sulla via collocata in F.

Attacco dello stelo dei cilindri Ø 8 a 100 mm



Ø	B	B ₁	C	Ø D	Ø D ₁	Ø D ₂	Ø D ₃	Ø D ₄	Ø D ₅	E ₁	E ₂	E ₃	F	F ₁	H	H ₁	H ₂	H ₃	L	L ₁	L ₂	N	Ø R	S	T
25	38	26	9	9,8	5,5	10	M6	M5	-	18	5,7	12,3	9,5	24,5	38,5	-	44	-	44	25	-	33,8	G1/8	8	11

Fig. 5.21 Ingombri attuatore pneumatico

6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Le stazioni di microlavorazione sono un concetto emergente di fondamentale importanza che negli ultimi anni si è andato sempre più diffondendo con l'uso di microprodotti nei più svariati campi, della biomedica, dell'elettronica e dell'ottica. Poiché le microstazioni entrino a far parte degli ambienti industriali, è importante la standardizzazione dei metodi di lavoro. Per questo motivo diventa indispensabile l'uso di robot industriali, in grado di eseguire operazioni con alta precisione e riproducibilità.

Con la progettazione e realizzazione dei tre componenti di questa tesi abbiamo cercato di dare un contributo nello sviluppo di sistemi automatizzati per migliorare le stazioni di lavoro industriali. Il dispositivo capace di rilevare indirettamente la forza di contatto durante le operazioni di pick and place è stato testato ed è perfettamente applicabile nel mondo lavorativo. Anche per quanto riguarda il micro-manipolatore abbiamo ottenuto dei dati sperimentali che concordano perfettamente con le specifiche di partenza. Il lavoro fin ora svolto risulta efficace ma non efficiente, per questo può essere una base per studi futuri al fine di rendere la struttura efficiente ottimizzando le caratteristiche necessarie per l'automatizzazione. Un possibile punto da sviluppare potrebbe essere quello di determinare la quantità ottimale di liquido (acqua od olio) necessario per il corretto funzionamento del manipolatore. L'avvitatore pur essendo stato progettato e realizzato non è stato testato per l'impossibilità di reperire un sistema elettrico dotato di specifiche adeguate per far allungare sufficientemente l'attuatore piezoelettrico. Ad oggi lo studio e la progettazione di questo sistema elettrico è stato affidato ad un Ingegnere elettronico esterno all'Università di Pisa. Le prospettive future sono quindi quelle di alimentare l'avvitatore con tale sistema elettrico, in modo da valutarne le reali prestazioni.

7. APPENDICE

7.1. *Script Ansys del gripper con carico concentrato sui polpastrelli*

finish
/clear

C*** Gripper con elementi Piastre e Aste, Load e Deformazioni imposte, Piccole e Grandi Deformazionio

/filename, Asterix Con Coda - Aste - Load e Deformazioni imposte - Piccole e Grandi Deformazionio

/TITLE, Asterix Con Coda - Piastre e Aste - Load e Deformazioni imposte - Piccole e Grandi Deformazionio - AISI 404

C***DEFINIZIONE PARAMETRI

spessore=0.4 !Spessore lungo l'asse "Z" del Gripper [mm]
s=0.2 !Larghezza dei tratti fini della piastra [mm]
sl=2 !Semilarghezza della piastra mobile [mm]
Lm=1.5 !Altezza delle parti mobile e fissa (attacchi) [mm]
Lcd=4.47 !Altezza della costola dritta [mm]
Rr=0.85 !Raggio medio circonferenza grande [mm]
dc=1.05 !Distanza lungo "X" dal centro del cerchio grande al piano di simmetria [mm]
slm=1.47 !Semi larghezza della parte fissa [mm]
df= 3.07 !Distanza tra le parti alte del lamierino mobile da quello fisso [mm]
dmin=1.57 !Distanza minima tra la parte fissa e mobile [mm]
racg=0.5 !Raggio di raccordo grande [mm]
racp=0.23 !Raggio di raccordo piccolo [mm]
racpp=0.15 !Raggio di raccordo piccolissimo [mm]
rf=0.55 !Raggio dei fori che si trovano sul piano di simmetria [mm]
rfp=0.15 !Raggio dei fori piccoli [mm]
lfp=1.2 !Distanza dall'asse lungo "X" del foro piccolo[mm]
a=100 !Area dell'elemento trave 2D [mm^2]
dby=7.91 !Distanza lungo Y tra il sistema posto sulla parte alta della piastra mobile e la parte inferiore del dito [mm]
day=8.71 !Distanza lungo Y tra il sistema posto sulla parte alta della piastra mobile e la parte superiore del dito [mm]
passo=0.2 !Passo della dentata [mm]
rc=0.5 !Raggio del cerchio della coda
SpostPiezo=0.12 !Escursione fatto dal Piezoelettrico(0.12[mm]) se sottoposto a una tensione di 150[V]

C***PARAMETRI DEL MATERIALE

!AISI Type 404 Chromium steel. It is composed of (in weight percentage) 0.05% Carbon (C), 1.00% Manganese (Mn), 0.50% Silicon (Si), 11.0-12.5% Chromium (Cr), 1.25-2.00% Nickel (Ni), 0.03% Phosphorus (P), 0.03% Sulfur (S), and the base metal Iron (Fe).

E1=190000

nu=0.27

densEq=0.0000077 !Densità $7,7 \cdot 10^3$ [kg/m^3]

E2=5000000

/PREP7

C***ELEMNT0

ET,1,82,,3 !Definisco il 1° elemento, Piastra a 8 nodi

ET,2,1 !Definisco il 2° elemento, Asta nel piano

C***MATERIALE

MP,EX,1,E1 !Tipo di Materiale del 1° elemento, materiale Lineare Elastico Omogeneo Isotropo, con modulo di Young pari a 190 [MPa]

MP,PRXY,1,nu

MP,DENS,1,densEq !Densità equivalente

MP,EX,2,E2 !Tipo di Materiale del 2° elemento, asta con modulo di Young pari a 5'000 [MPa]

C***REAL CONSTANTS

r,1,spessore !Definizione delle Real Constant del 1° elemnto. Si definisce lo spessore dell'elemento piano

r,2,a !Definizione delle Real Constant del 2° elemnto. Si definisce l'area dell'elemento trave

C***KPOINTS DELLA PIASTRA MOBILE

k,1,sl-s

k,2,sl-(s/2)

k,3,sl

k,4,sl,-Lm

k,5,-(sl-s)

k,6,-(sl-(s/2))

k,7,-sl

k,8,-sl,-Lm

C***KPOINTS DELLA LINEA DEL DRAG

k,9,sl-(s/2),Lcd

k,11,-(sl-(s/2)),Lcd

C***LINEE DELLA PIASTRA MOBILE E DELLA LINEA DI DRAG

1,3,4

1,4,8

1,8,7

1,5,1

lfillt,1,2,racg !Genera un raggio di raccordo fra le linee 1 e 2 con raggio di raccordo (grande) "racg"

lfillt,2,3,racg !Genera un raggio di raccordo fra le linee 2 e 3 con raggio di raccordo (grande) "racg"

k,15,sl,2*racp !Piccolo rettangolo necessario per costruire il raccordo interno sulla piastra mobile
 k,16,sl-(s/2),2*racp
 k,17,sl-s,2*racp
 l,16,9
 l,1,17
 l,17,15
 l,15,3
 lfillt,4,8,racp !Genera un raggio di raccordo fra le linee 4 e 8,con raggio di raccordo (piccolo) "racp"
 l,18,3

k,20,-sl,2*racp !Piccolo rettangolo necessario per costruire il raccordo interno sulla piastra mobile
 k,21,-(sl-(s/2)),2*racp
 k,22,-(sl-s),2*racp
 l,21,11
 l,7,20
 l,20,22
 l,22,5
 lfillt,16,4,racp !Genera un raggio di raccordo fra le linee 16 e 4,con raggio di raccordo (piccolo) "racp"
 l,7,24

local,11,1,dc,Lcd !Sistema di riferimento cilindrico posto sul centro del cerchio grande
 k,25,0,0 !Centro del cerchio grande
 k,26,Rr,88 !Kpoint esterno di giunzione del dente con il cerchio
 k,27,Rr,100 !Kpoint interno di giunzione del dente con il cerchio
 k,28,Rr,270
 l,9,26
 l,26,27
 l,27,28
 csys,0 !Riattiva il sistema di riferimento cartesiano

local,12,1,-dc,Lcd !Sistema di riferimento cilindrico posto sul centro del cerchio grande
 k,29,0,0 !Centro del cerchio grande
 k,30,Rr,80 !Kpoint esterno di giunzione del dente con il cerchio
 k,31,Rr,92 !Kpoint interno di giunzione del dente con il cerchio
 k,32,Rr,270
 l,11,31
 l,31,30
 l,30,32
 csys,0

C***AREA DELLA PIASTRA MOBILE

AL,1,5,2,6,3,18,4,12 !Crea l'area della piastra mobile a partire dalle linee 1,5,2,6,3,18,4,12
 AL,12,10,9,8,11 !Crea l'area di SX sopra la piastra mobile
 AL,18,14,15,16,17 !Crea l'area di DX sopra la piastra mobile

C***LINEA DI DRAG CHE UNISCE LA CURVA GRANDE ALLA PIASTRA FISSA

k,33,slm-(s/2),Lcd-Rr

k,34,slm-(s/2),df+racp

l,28,33

l,33,34

lfillt,25,26,racp !Crea il raggio di raccordo tra le linee rette 25-26, con raggio di raccordo "racp"

k,37,-(slm-(s/2)),Lcd-Rr

k,38,-(slm-(s/2)),df+racp

l,32,37

l,37,38

lfillt,28,29,racp !Crea il raggio di raccordo tra le linee rette 28-29, con raggio di raccordo "racp"

C***COSTRUZIONE DELL'AREA DI DRAG

adrag,9,,,,,7 !Genera area trascinando la linea 9 lungo la linea 7

adrag,31,,,,,19

adrag,34,,,,,20

adrag,37,,,,,21

adrag,40,,,,,25

adrag,43,,,,,27

adrag,46,,,,,26

adrag,15,,,,,13 !Genera area trascinando la linea 15 lungo la linea 13

adrag,52,,,,,22

adrag,55,,,,,23

adrag,58,,,,,24

adrag,61,,,,,28

adrag,64,,,,,30

adrag,67,,,,,29

C***COSTRUZIONE DELLA PARTE FISSA

k,69,slm,df !Kpoint in alto a Dx del rettangolo fisso

k,70,slm,dmin !Kpoint in basso a Dx del rettangolo fisso

k,71,slm-s,df

k,72,-slm,df !Kpoint in alto a Dx del rettangolo fisso

k,73,-slm,dmin !Kpoint in basso a Dx del rettangolo fisso

k,74,-(slm-s),df

l,54,71

l,71,74

l,74,67

lfillt,73,74,racp !Genera un raggio di raccordo tra le linee 73 e 74,con raggio di raccordo (piccolo) "racp"

lfillt,74,75,racp !Genera un raggio di raccordo tra le linee 74 e 75,con raggio di raccordo (piccolo) "racp"

1,68,72
 1,72,73
 1,73,70
 1,70,69
 1,69,53
 lfillt,77,78,racp !Genera un raggio di raccordo tra le linee 77 e 78,con raggio di raccordo (piccolo) "racp"
 lfillt,78,79,racp !Genera un raggio di raccordo tra le linee 78 e 79,con raggio di raccordo (piccolo) "racp"
 1,69,75
 1,72,76

C***AREA DELLA PIASTRA FISSA

AL,80,49,76,83 !Crea l'area di SX di collegamento della curva con la piastra fissa
 AL,84,73,70,75 !Crea l'area di DX di collegamento della curva con la piastra fissa
 AL,79,82,78,81,77,84,74,83 !Crea l'area della piastra fissa a partire dalle linee 79,82,78,81,77,84,74,83

C***DITO DI DESTRA

k,100,0.71,dby !Kpoint che rappresenta l'attacco del dito nella parte interna
 l,100,46
 lfillt,42,85,racg !Crea il raggio di raccordo tra le linee rette 42-85, con raggio di raccordo "racg"
 k,101,0.14,dby !Kpoint che rappresenta la parte più bassa del dito
 l,100,101
 lfillt,88,85,racpp !Crea il raggio di raccordo tra le linee rette 88-85, con raggio di raccordo "racpp"
 k,102,0.1,day !Kpoint che rappresenta la parte più alta del dito
 l,101,102
 lfillt,88,90,0.05
 k,103,0.85,day !Kpoint che rappresenta il punto più alta del dito esterno
 l,102,103
 lfillt,90,92,0.05
 k,104,0.87,8.54
 k,105,0.87,8.32
 k,106,0.87,8.1
 k,107,0.9,8.1
 k,108,0.91,dby
 l,103,104
 l,104,106
 l,106,107
 l,107,108
 l,108,44
 l,108,82
 lfillt,92,94,racpp
 lfillt,98,36,racg
 l,81,90
 l,104,107
 al,102,39,87,86,103,101

al,103,85,89,99,98
 al,99,88,91,90,93,92,100,94,104,97

C***DITO DI SINISTRA

k,109,-0.71,dby !Kpoint che rappresenta l'attacco del dito nella parte interna
 l,109,59
 lfillt,105,62,racg !Crea il raggio di raccordo tra le linee rette 105-62, con raggio di
 raccordo "racg"
 k,110,-0.14,dby !Kpoint che rappresenta la parte più bassa del dito
 l,109,110
 lfillt,105,108,racpp !Crea il raggio di raccordo fra le due linee rette 105-108, con raggio di
 raccordo "racpp"
 k,111,-0.1,day !Kpoint che rappresenta la parte più alta del dito
 l,110,111
 lfillt,108,110,0.05
 k,112,-0.85,day !Kpoint che rappresenta il punto più alta del dito esterno
 l,111,112
 lfillt,110,112,0.05
 k,113,-0.91,dby
 l,112,113
 lfillt,112,114,racpp
 l,113,57
 lfillt,116,56,racg
 l,116,92
 l,113,95
 al,107,59,118,117,119,106
 al,119,116,120,109,105
 al,120,108,111,110,113,112,115,114

C***CODA DEL DITO DI DESTRA

k,200,2.5,5.91
 l,105,200
 k,201,3.09,0.28
 l,200,201
 lfillt,121,122,2.1
 k,202,5.65,0.28
 l,201,202
 lfillt,122,124,1.1
 adrag,95,,,,,121,123,122,125,124
 circle,202,rc,,360
 al,141,142,143,144

C***INTRODUZIONE PARAMETRI DELLE DITA DI SINISTRA

aadd,all

C***STRINZIONE DITO DI DESTRA

local,15,0,0.7625,7.158,,4 !Sistema di riferimento cartesiano posto sulla strinzione del dito di sinistra
 k,210,0,0
 k,211,0,0.5
 k,212,0.05,0.03
 k,213,0.05,(0.5-0.03)
 l,210,211
 l,211,213
 l,213,212
 l,212,210
 lfillt,12,15,0.05 !Raggio di raccordo tra le linee 12-15, con raggio di raccordo "0.05"
 lfillt,18,15,0.05 !Raggio di raccordo tra le linee 18-15, con raggio di raccordo "0.05"
 al,9,12,31,15,34,18

 k,214,0.2,0
 k,215,0.2,0.5
 k,216,0.15,0.03
 k,217,0.15,(0.5-0.03)
 l,214,215
 l,215,217
 l,217,216
 l,216,214
 lfillt,39,40,0.05 !Raggio di raccordo tra le linee 39-40, con raggio di raccordo "0.05"
 lfillt,43,40,0.05 !Raggio di raccordo tra le linee 43-40, con raggio di raccordo "0.05"
 al,37,39,46,40,49,43
 csys,0

 asba,33,1 !Operazione Booleane di sottrazione per togliere l'area (1) dalla (33)
 asba,3,2 !Operazione Booleane di sottrazione per togliere l'area (2) dalla (3)

C***STRINZIONE DITO DI SINISTRA

local,16,0,-0.7625,7.158,,4 !Sistema di riferimento cartesiano posto sulla strinzione del dito di sinistra
 k,220,0,0
 k,221,0,0.5
 k,222,-0.05,0.03
 k,223,-0.05,(0.5-0.03)
 l,220,221
 l,221,223
 l,223,222
 l,222,220
 lfillt,39,43,0.05
 lfillt,64,43,0.05
 al,37,39,67,43,70,64

 k,224,-0.2,0
 k,225,-0.2,0.5
 k,226,-0.15,0.03
 k,227,-0.15,(0.5-0.03)
 l,224,225

1,225,227
 1,227,226
 1,226,224
 lfillt,84,85,0.05
 lfillt,87,85,0.05
 al,83,84,95,85,97,87
 csys,0

asba,1,2
 asba,4,3

C***FORO SULLA PARTE FISSA

k,300,,-Lm/2 !Centro del foro fisso
 circle,300,rf,,360
 al,83,84,87,105 !Area compresa (tra le linee 83,84,87,105) del semicerchio della piastra fissa
 asba,1,2 !Operazione Booleane di sottrazione per togliere l'area del semicerchio (2) dalla piastra fissa (1)

C***FORO SULLA PARTE MOBILE

k,400,,-Lm/2 !Centro del foro fisso
 circle,400,rf,,360
 al,107,116,118,119 !Area compresa nelle linee 107,116,118,119 del semicerchio della piastra mobile
 asba,3,1 !Operazione Booleane di sottrazione dell'area del semicerchio (1) dalla piastra mobile (3)

C***FORO PICCOLO DI DESTRA SULLA PIASTRA MOBILE

k,500,lfp,-Lm/2
 circle,500,rfp,,360
 al,120,126,128,129
 asba,2,1 !Operazione Booleane di sottrazione per togliere l'area del semicerchio (1) dalla piastra mobile (2)

C***FORO PICCOLO DI DESTRA SULLA PIASTRA MOBILE

k,600,-lfp,-Lm/2
 circle,600,rfp,,360
 al,132,135,138,139
 asba,3,1 !Operazione Booleane di sottrazione per togliere l'area del semicerchio (1) dalla piastra mobile (3)

C***DENTATURA DEL DITO DI DESTRA

*do,i,0,2,1 !Inizio del loop, "i" è il parametro che va da "0" a "3" con incrementi di "1" in "1"
 k,(700+i),0.21,(8.12+(i*passo)) !3 kpoints (700-701-702) posti a X=0.21 e Y=[(Primo punto=8.12)+(i*Passo)]

*enddo

*do,j,0,3,1 !Kpoints sulla superficie del dito
 k,(800+j),0.1,(8.12-(passo/2)+(j*passo))
 *enddo

*do,k,0,2,1 !Linee che costituiscono il perimeto della dentatura
 l,800+k,700+k
 l,700+k,800+k+1
 *enddo

*do,w,0,2,1 !Linee che uniscono i kpoints sulla superficie del dito
 a,800+w,700+w,800+w+1
 *enddo

asba,2,1 !Sottrazione l'area del 1° dente dall'area del dito
 asba,5,3 !Sottrazione l'area del 3° dente dall'area del dito
 asba,1,4 !Sottrazione l'area del 4° dente dall'area del dito

C***DENTATURA DEL DITO DI SINISTRA

*do,i,0,2,1 !Inizio del loop, "i" è il parametro che va da "0" a "3" con incrementi di "1" in "1"
 k,(900+i),-0.21,(8.12+(i*passo)) !3 kpoints (900-901-902) posti a X=0.21 e Y=[(Primo punto=8.12)+(i*Passo)]
 *enddo

*do,j,0,3,1 !Kpoints sulla superficie del dito
 k,(1000+j),-0.1,(8.12-(passo/2)+(j*passo))
 *enddo

*do,k,0,2,1 !Linee che costituiscono il perimeto della dentatura
 l,1000+k,900+k
 l,900+k,1000+k+1
 *enddo

*do,w,0,2,1 !Linee che uniscono i kpoints sulla superficie del dito
 a,1000+w,900+w,1000+w+1
 *enddo

asba,2,1 !Sottrae l'area del 1° dente dall'area del dito
 asba,5,3 !Sottrazione l'area del 3° dente dall'area del dito
 asba,1,4 !Sottrazione l'area del 4° dente dall'area del dito

C***Richiamo il 1° elemento

type,1 !Si attiva l'elemento 1 (piastra)
 mat,1 !Si attiva il materiale 1
 real,1 !Si attiva le Real Costants 1

```
C***MESH
smrsize,2
amesh,all
nrefine,all,,1,,off !Infittimento. Si può impostare da 1-5, dove 1 è il minimo infittimento
alls
```

```
C***SI RICHIAMA IL 2° ELEMENTO (ASTA DI COLLEGAMENTO DEL MASTER
AGLI SLAVE)
type,2 !Si attiva l'elemento 2 (piastra)
mat,2 !Si attiva il materiale 2
real,2 !Si attiva le Real Costants 2
```

```
C***CREAZIONE DEL NODO AL CENTRO DEL FORO DOVE SI APPLICA LA
FORZA
local,13,1,-Lm/2 !Si attiva il sistema di riferimento cilindrico posto sul centro della piastra
mobile
n,,0,0,0
C***APPLICAZIONE DEL CERING (ricerca del nodo MASTER)
nsel,s,loc,x,-0.001,(rf+0.001) !Si seleziona una fascia di nodi che si trovano sull
semicerchio della piastra mobile
nsel,r,loc,y,0,-180
*get,NodoMaster,node,,num,max !Si chiama "NodoMaster" il nodo che ha numerazione
maggiore
C***CREAZIONE DELLE ASTE CHE COLLEGANO GLI SLAVE AL NODO
MASTER
nsel,u,,NodoMaster
*do,m,0,72,1
  *get,NodoTempm,node,,num,max
  e,NodoTempm,NodoMaster
  nsel,u,node,,NodoTempm
*enddo
nsel,all
csys,0
d,NodoMaster,ux
```

```
C***VINCOLI LUNGO L'ASSE Y
local,14,1,,df-Lm/2
n,,0,0,0
C***APPLICAZIONE DEL CERING (ricerca del nodo VINCOLOMASTER)
nsel,s,loc,x,-0.001,(rf+0.001) !Si seleziona una fascia di nodi che si trovano sul
semicerchio della piastra mobile
nsel,r,loc,y,0,180
*get,NodoVincoloMaster,node,,num,max !Si chiama "NodoVincoloMaster" il nodo che ha
numerazione maggiore
C***CREAZIONE DELLE ASTE CHE COLLEGANO GLI SLAVE CON IL NODO
MASTER
nsel,u,,NodoVincoloMaster
*do,k,0,72,1
```

```

*get,NodoVincoloTempk,node,,num,max
e,NodoVincoloTempk,NodoVincoloMaster
nselect,u,node,,NodoVincoloTempk
*enddo
nselect,all
csys,0 !Riattiva il sistema di riferimento cartesiano
d,NodoVincoloMaster,ux
d,NodoVincoloMaster,uy

```

```

C*** Si selezionano i nodi di contatto delle dita con l'oggetto da sollevare
!nlist,2393 !Comando per visualizzare le coordinate del nodo di contatto del dido di DX
nselect,s,node,,2393 !Si seleziona il nodo n°2393
cm,NodiContacDX,node !Call this group of nodes 'NodiContacSX'
allselect
!nlist,2398 !Comando per visualizzare le coordinate del nodo di contatto del dido di SX
nselect,s,node,,2398 !Si seleziona il nodo n°2170
cm,NodiContacSX,node !Call this group of nodes 'NodiContacDX'
allselect

```

```

C*** SI SELEZIONA IL NODO DELLA CODA DI CUI SI VUOLE LA
TRAIETTORIA
local,17,1,5.65,0.28 !Sistema di riferimento cilindrico posto sulla centro del cerchio della
coda
nselect,s,loc,x,-0.03,0.03
cm,NodoCoda,node
allselect
csys,0
nlist,NodoCoda !Comando per visualizzare le coordinate del NodoCoda

```

```

C*** SCELTA DEL TIPO DI ANALISI PER LA CONDIZIONE DI FORZA
APPLICATA AI NODI DEI POLPASTRELI NELLA ZONA DEL CONTATTO
*ASK,FL1,ANALISI IN PICCOLI (0) O GRANDI (1) SPOSTAMENTI ?
*IF,FL1,EQ,0,THEN
/TITLE,ANALISI PICCOLI SPOSTAMENTI. FORZA APPLICATA AI NODI DI
CONTATTO DEI POLPASTRELLI

```

```

C***Soluzione per forza applicata ai nodi dei polpastrelli su cui si verifica il
contatto
*ASK,load,Forza in [Grammi] da applicare ai nodi di contatto lungo X,0 !Carico
f,NodiContacDX,fx,(load*0.00981) !Carico al nodo "NodiContacDX"
f,NodiContacSX,fx,-(load*0.00981) !Carico al nodo "NodiContacSX"
d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
finish
/solu !Ambiente risolutore
antype,0
solve

```

```

finish

/post1 !Ambiente output
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI" premere invio per continuare,0 !D'ha il tempo per
poter vedere il grafico
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X" premere invio per continuare,0 !D'ha il tempo
per poter vedere il grafico
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA" premere invio per continuare,0
nset,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda sul centro del foro" premere invio
per continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda sul centro del foro" premere invio
per continuare,0

*ELSE
/TITLE,ANALISI GRANDI SPOSTAMENTI. FORZA APPLICATA AI NODI DI
CONTATTO DEI POLPASTRELLI
NLGEOM,ON !Attiva l'analisi "large strain/displacement"
FINISH !Esce da PREP

/solu
time,1 !Primo step di carico da applicare
f,NodiContacDX,fx,0 !Applica il carico al nodo "NodiContacDX"
f,NodiContacSX,fx,-0 !Applica il carico al nodo "NodiContacSX"
d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
lswrite,1
time,2 !Secondo step di carico da applicare
f,NodiContacDX,fx,(0.01285*9.81) !Applica il carico al nodo "NodiContacDX"
f,NodiContacSX,fx,-(0.01285*9.81) !Applica il carico al nodo "NodiContacSX"
d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
lswrite,2
time,3 !Terzo step di carico da applicare
f,NodiContacDX,fx,(0.01855*9.81) !Applica il carico al nodo "NodiContacDX"
f,NodiContacSX,fx,-(0.01855*9.81) !Applica il carico al nodo "NodiContacSX"
d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
lswrite,3
time,4 !Quarto step di carico da applicare
f,NodiContacDX,fx,(0.0214*9.81) !Applica il carico al nodo "NodiContacDX"
f,NodiContacSX,fx,-(0.0214*9.81) !Applica il carico al nodo "NodiContacSX"
d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster sotto"
l'azione del Piezoelettrico

```

```

lswrite,4

Issolve,1,4 !Legge e risolve il carico multisteps
finish
save

/post1
set,1 !Seleziona i risultati del primo step di carico
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con forza di contatto F=0[g]" premere invio per
continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con forza di contatto F=0[g]" premere invio per
continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA con forza di contatto F=0[g]" premere invio per
continuare,0
nset,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
nset,all
nset,s,node,,NodiContacDX !Seleziona il "NodiContacDX". E' il nodo di contatto
del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del precedentemente
selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

set,2 !Seleziona i risultati del secondo step
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con forza di contatto F=12.85[g]" premere invio per
continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con forza di contatto F=12.85[g]" premere invio
per continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA con forza di contatto F=12.85[g]" premere invio
per continuare,0
nset,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda". Rappresenta il centro del
cerchio della coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
prnsol,u,y

```

```

*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
nse1,all
nse1,s,node,,NodiContacDX !Seleziona il "NodiContacDX". E' il nodo di contatto
del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del precedentemente
selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

set,3
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con forza di contatto F=18.55[g]" premere invio per
continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con forza di contatto F=18.55[g]" premere invio
per continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA con forza di contatto F=18.55[g]" premere invio
per continuare,0
nse1,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
nse1,all
nse1,s,node,,NodiContacDX !Seleziona il "NodiContacDX". E' il nodo di contatto
del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del nodo
precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

set,4
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con forza di contatto F=21.4[g]" premere invio per
continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con forza di contatto F=21.4[g]" premere invio
per continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA con forza di contatto F=21.4[g]" premere invio
per continuare,0
nse1,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato

```



```

*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere invio
per continuare,0
nse1,all
nse1,s,node,,NodiContacDX !Seleziona il "NodiContacDX". E' il nodo di contatto
del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del nodo
precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0
*ENDIF

```

```

C*** ANALISI PER LA CONDIZIONE DI SPOSTAMENTO IMPOSTO AI NODI DEI
POLPASTRELI NELLA ZONA DEL CONTATTO
!*ASK,FL1,ANALISI IN PICCOLI (0) O GRANDI (1) SPOSTAMENTI ?
!*IF,FL1,EQ,0,THEN
! /TITLE,ANALISI PICCOLI SPOSTAMENTI. SPOSTAMENTO IMPOSTO AI NODI
DI CONTATTO DEI POLPASTRELLI

```

```

C***Soluzione per spostamento imposto ai nodi dei polpastrelli su cui si verifica il
contatto
*ASK,deltX,Spostamento nodi
! d,NodiContacDX,ux,deltX !Spostamento imposto del nodo "NodiContacDX" per
portarlo in presa con il cilindro di diametro "deltX" [mm]
! d,NodiContacSX,ux,-deltX !Spostamento imposto del nodo "NodiContacSX" per
portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,5[mm]
!d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
! finish
! /solu !Ambiente risolutore
! antype,0
! solve
! finish

! /post1 !Ambiente output
! pldisp,2 !Plotta la deformata
! *ASK,IFL,"DEFORMAZIONI" premere invio per continuare,0
! plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indeformata
! *ASK,IFL,"Spostamento lungo X" premere invio per continuare,0
! plns,s,eqv
! *ASK,IFL,"ANALISI STATICA" premere invio per continuare,0
! nse1,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
! prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato

```

```

!           *ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda sul centro del foro" premere
invio per continuare,0
!           prnsol,u,y
!           *ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda sul centro del foro" premere invio
per continuare,0
!           nsel,all
!           nsel,s,node,,NodiContacDX !Seleziona il "NodiContacDX" che rappresenta il
nodo di contatto del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
!           prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del precedentemente
selezionato
!           *ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

!*ELSE
! /TITLE,ANALISI GRANDI SPOSTAMENTI. SPOSTAMENTO IMPOSTO AI NODI
DI CONTATTO DEI POLPASTRELLI
!       NLGEOM,ON           ! Attiva l'analisi "large strain/displacement"
!       FINISH             ! Esce da PREP

!       /solu
!       time,1 !Primo step di carico da applicare
!       d,NodiContacDX,ux,0.02489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacDX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,3[mm]
!       d,NodiContacSX,ux,-0.02489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacSX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,3[mm]
!       !d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
!       lswrite,1
!       time,2 !Secondo step di carico da applicare
!       d,NodiContacDX,ux,0.07489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacDX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,4[mm]
!       d,NodiContacSX,ux,-0.07489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacSX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,4[mm]
!       !d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
!       lswrite,2
!       time,3 !Terzo step di carico da applicare
!       d,NodiContacDX,ux,0.12489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacDX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,5[mm]
!       d,NodiContacSX,ux,-0.12489 !Spostamento imposto del nodo "nodo
NodiContacSX" per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,5[mm]
!       !d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
!       lswrite,3
!       time,4 !Quarto step di carico da applicare
!       d,NodiContacDX,ux,0.17489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacDX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,6[mm]
!       d,NodiContacSX,ux,-0.17489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacSX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,6[mm]
!       !d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico

```

```

!      lswrite,4
!      time,5 !Quinto step di carico da applicare
!      d,NodiContacDX,ux,0.22489 !Spostamento imposto del nodo "NodiContacDX"
per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,7[mm]
!      d,NodiContacSX,ux,-0.22489 !Spostamento imposto del nodo "nodo
NodiContacSX" per portarlo in presa con un cilindro di diametro D=0,7[mm]
!      !d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del "NodoMaster" sotto
l'azione del Piezoelettrico
!      lswrite,5

!      lssolve,1,5 !Legge e risolve il carico multisteps
!      finish
!      save

!      /post1
!      set,1 !Seleziono i risultati del primo step di carico
!      pldisp,2 !Plotta la deformata
!      *ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con cilindro D=0.3 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indefornata
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X con cilindro D=0.3 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plns,s,eqv
!      *ASK,IFL,"ANALISI STATICA con cilindro D=0.3 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      nsel,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      prnsol,u,y
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      nsel,all
!      nsel,s,node,,NodiContacDX !Seleziona i "NodiContacDX" che rappresenta i nodi
di contatto del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del nodo
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

!      set,2 !Seleziono i risultati del secondo step
!      pldisp,2 !Plotta la deformata
!      *ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con cilindro D=0.4 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indefornata
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X con cilindro D=0.4 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plns,s,eqv

```

```

!      *ASK,IFL,"ANALISI STATICA con cilindro D=0.4 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      nsel,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCod" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      prnsol,u,y
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      nsel,all
!      nsel,s,node,,NodiContacDX !Seleziona il "NodiContacDX" che rappresenta il
nodo di contatto del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del nodo
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

!      set,3
!      pldisp,2 !Plotta la deformata
!      *ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con cilindro D=0.5 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indefornata
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X con cilindro D=0.5 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plns,s,eqv
!      *ASK,IFL,"ANALISI STATICA con cilindro D=0.5 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      nsel,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      prnsol,u,y
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      nsel,all
!      nsel,s,node,,NodiContacDX !Seleziona il "NodiContacDX" che rappresenta il
nodo di contatto del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del precedentemente
selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

!      set,4 !Seleziono i risultati del quarto step di carico
!      pldisp,2 !Plotta la deformata
!      *ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con cilindro D=0.6 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indefornata

```

```
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X con cilindro D=0.6 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plns,s,eqv
!      *ASK,IFL,"ANALISI STATICA con cilindro D=0.6 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      nsel,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      prnsol,u,y
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      nsel,all
!      nsel,s,node,,NodiContacDX !Seleziona i "NodiContacDX" che rappresenta i nodi
di contatto del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del nodo
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

!      set,5 !Seleziono i risultati del quinto step di carico
!      pldisp,2 !Plotta la deformata
!      *ASK,IFL,"DEFORMAZIONI con cilindro D=0.7 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indeformata
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X con cilindro D=0.7 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      plns,s,eqv
!      *ASK,IFL,"ANALISI STATICA con cilindro D=0.7 [mm]" premere invio per
continuare,0
!      nsel,s,node,,NodoCoda !Seleziona il "NodoCoda" che rappresenta il centro del
cerchio della coda
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del "NodoCoda"
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      prnsol,u,y
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo Y del NodoCoda - centro della coda" premere
invio per continuare,0
!      nsel,all
!      nsel,s,node,,NodiContacDX !Seleziona i "NodiContacDX" che rappresenta i nodi
di contatto del polpastrello di destra con il cilindro da afferrare
!      prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo "X" del nodo
precedentemente selezionato
!      *ASK,IFL,"Spostamento lungo X dei NodiContacDX - nodi di contatto del
polpstrlo di DX" premere invio per continuare,0

!*ENDIF
```

7.2. Script Ansys del gripper con contact12

finish

/clear

C*** Gripper con elementi Piastre e Aste. Spostamento imposto del dito de gripper (Contac12)

/filename, Asterix Con Coda - Piastr-Aste - CONTAC12

/TITLE, Asterix Con Coda - Piastr-Aste - CONTAC12 - AISI 404

C***DEFINIZIONE PARAMETRI

spessore=0.4 !Spessore lungo l'asse "Z" del Gripper [mm]

s=0.2 !Larghezza dei tratti fini della piastra [mm]

sl=2 !Semilarghezza della piastra mobile [mm]

Lm=1.5 !Distanza tra la parte mobile e quella fissa (attacchi) [mm]

Lcd=4.47 !Altezza della costola dritta [mm]

Rr=0.85 !Raggio medio circonferenza grande [mm]

dc=1.05 !Distanza lungo "X" del centro del cerchio grande dal piano di simmetria [mm]

slm=1.47 !Semi larghezza della parte fissa [mm]

df= 3.07 !Distanza tra le parti alte del lamierino mobile e fisso [mm]

dmin=1.57 !Distanza minima tra la parte fissa e quella mobile [mm]

racg=0.5 !Raggio di raccordo grande [mm]

racp=0.23 !Raggio di raccordo piccolo [mm]

racpp=0.15 !Raggio di raccordo piccolissimo [mm]

rf=0.55 !Raggio dei fori che si trovano sul piano di simmetria [mm]

rfp=0.15 !Raggio fori piccoli [mm]

lfp=1.2 !Distanza dall'asse lungo X del foro piccolo[mm]

a=100 !Area dell'elemento trave 2D [mm^2]

dby=7.91 !Distanza lungo "Y" tra il sistema posto sulla parte alta della piastra mobile e la parte inferiore del dito [mm]

day=8.71 !Distanza lungo "Y" tra il sistema posto sulla parte alta della piastra mobile e la parte superiore del dito [mm]

passo=0.2 !Passo della dentatura [mm]

rc=0.5 !Raggio del cerchio della coda

lsiz=10 !Numero di suddivisioni della mesh nella zona di contatto

AperDit=0.25022 !Apertura del dito [mm]

SemAperDit=(AperDit/2) !Semi apertura del dito [mm]

SpostPiezo=0.12 !Escursione (0.12[mm]) effettuata dal Piezoelettrico sotto una tensione di 150 [V]

D=0.5 !Diametro del cilindro da movimentare

C***PARAMETRI DEL MATERIALE

!AISI Type 404 Chromium steel. It is composed of (in weight percentage) 0.05% Carbon (C), 1.00% Manganese (Mn), 0.50% Silicon (Si), 11.0-12.5% Chromium (Cr), 1.25-2.00% Nickel (Ni), 0.03% Phosphorus (P), 0.03% Sulfur (S), and the base metal Iron (Fe).

E1=190000

nu=0.27

densEq=0.0000077 !Densità $7,7 \cdot 10^3$ [kg/m^3]

E2=5000000

/PREP7

C***SCELTA DEL TIPO DI ELEMENTO

ET,1,82,,,3 !1° elemento, piastra a 8 nodi

ET,2,1 !2° elemento, Asta nel piano

ET,3,12,,,1 !3° elemento di contatto, punto a punto

C***MATERIALE

MP,EX,1,E1 !Tipo di Materiale del 1° elemento, materiale Lineare Elastico Omogeneo Isotropo, con modulo di Young pari a 210[MPa]

MP,PRXY,1,nu

MP,DENS,1,densEq !Densità equivalente

MP,EX,2,E2 !Definisco il tipo di Materiale del 2° elemento, asta con modulo di Young pari a 500'000=[MPa]

C***REAL CONSTANTS

r,1,spessore !Real constant. Spessore del 1° elemnto, cioè dell'elemento piano

r,2,a !Real constant del 2° elemnto. Area dell'elemento trave

r,3,-90,1000000000000

C***KPOINTS DELLA PIASTRA MOBILE

k,1,,,

k,2,sl-s

k,3,sl-(s/2)

k,4,sl

k,5,sl,-Lm

k,6,,-Lm

C***KPOINTS DELLA LINEA DI DRAG

k,7,sl-(s/2),Lcd

C***LINEA DELLA PIASTRA MOBILE E DELLA LINEA DI DRAG

l,1,2

l,4,5

l,5,6

l,6,1

lfillt,2,3,2,racg !Raggio di raccordo tra le linee 2 e 3 con raggio di raccordo (grande) "racg"

k,10,sl,2*racp !Piccolo rettangolo necessario per costruire il raccordo interno sulla piastra mobile

k,11,sl-(s/2),2*racp

k,12,sl-s,2*racp

l,11,7

l,2,12

l,12,10

l,10,4

lfillt,7,1,racp !Raggio di raccordo fra le linee 7 e 1, con raggio di raccordo (piccolo) "racp"
1,14,4

local,11,1,dc,Lcd !Sistema di riferimento cilindrico posto sul centro del cerchio grande
k,15,0,0 !Centro del cerchio grande
k,16,Rr,88 !Kpoint esterno di giunzione del dente con il cerchio
k,17,Rr,100 !Kpoint interno di giunzione del dente con il cerchio
k,18,Rr,270
l,7,16
l,16,17
l,17,18
csys,0 !Sistema di riferimento cartesiano

C***PIASTRA MOBILE

AL,1,11,2,5,3,4 !Crea l'area della piastra mobile a partire dalle linee 1,11,2,5,3,4
AL,7,8,9,11,10 !Crea l'area di SX sopra la piastra mobile

C***COSTRUZIONE DELLA LINEE DI DRAG CHE UNISCE LA CURVA GRANDE ALLA PARTE FISSA

k,19,slm-(s/2),Lcd-Rr
k,20,slm-(s/2),df+racp
l,18,19
l,19,20
lfillt,15,16,racp !Raggio di raccordo tra le linee rette 15-16, con raggio di raccordo "racp"

C***COSTRUZIONE DELL'AREA DI DRAG

adrag,8,,,,,6 !Genera l'area trascinando la linea 8 lungo la linea 6
adrag,18,,,,,12
adrag,21,,,,,13
adrag,24,,,,,14
adrag,27,,,,,15
adrag,30,,,,,17
adrag,33,,,,,16

C***PIASTRA FISSA

k,37,slm,df !Kpoint in alto a Dx del rettangolo fisso
k,38,slm,dmin !Kpoint in basso a Dx del rettangolo fisso
k,39,0,dmin
k,40,0,df
k,41,slm-s,df
l,35,37
l,37,38
l,38,39
l,39,40
l,40,41
l,41,36

lfillt,40,41,racp !Raggio di raccordo tra le linee 40 e 41,con raggio di raccordo (piccolo)
 "racp"
 lfillt,44,43,racp !Raggio di raccordo tra le linee 44 e 43,con raggio di raccordo (piccolo)
 "racp"
 l,44,37

C***AREA DELLA PIASTRA FISSA

AL,36,39,44,46 !Area di collegamento della curva con la piastra fissa
 AL,44,40,45,41,42,43 !Area della piastra fissa a partire dalle linee 44,40,45,41,42,43

C***DITO DI DESTRA

k,100,0.71,dby !Kpoint che rappresenta l'attacco del dito nella parte interna
 l,100,28
 lfillt,47,29,racg !Raggio di raccordo tra le linee 47-29, con raggio di raccordo "racg"
 k,101,0.14,dby !Kpoint che rappresenta la parte più bassa del dito
 l,100,101
 lfillt,47,50,racpp !Raggio di raccordo tra le linee 47,50, con raggio di raccordo "racpp"
 local,12,0,0.12511,8.2078
 $K,102,(((D/3)*(0.01489))/(0.2978)),-(D/3)$
 l,101,102
 K,103,,
 l,102,103
 $K,104,-(((0.02511)*(D/3)))/(0.5022),(D/3)$
 l,103,104
 csys,0
 k,105,0.1,day !Kpoint che rappresenta la parte più alta del dito
 l,104,105
 lfillt,50,52,0.05
 k,106,0.85,day !Kpoint che rappresenta il punto più alta del dito esterno
 l,105,106
 lfillt,55,57,0.05
 k,107,0.87,8.54
 k,108,0.87,8.32
 k,109,0.87,8.1
 k,110,0.9,8.1
 k,111,0.91,dby
 l,106,107
 l,107,109
 l,109,110
 l,110,111
 l,111,26
 lfillt,57,59,racpp
 lfillt,63,23,racg
 l,45,55
 l,48,111
 al,66,26,49,48,67,65
 al,67,47,51,68,63
 l,50,109
 al,68,50,56,69,61,62

al,69,52,53,54,55,58,57,64,59,60

C***CODA DEL DITO DI DESTRA

k,200,2.5,5.91

l,108,200

k,201,3.09,0.28

l,200,201

lfillt,70,71,2.1

k,202,5.65,0.28

l,201,202

lfillt,71,73,1.1

adrag,60,,,,,70,72,71,74,73

local,13,1,5.65,0.28 !Sistema di riferimento cartesiano posto sul centro del cerchio della coda

circle,202,rc,,,360

al,90,91,92,93

csys,0 !Sistema di riferimento cartesiano

C***UNIONE DELLE AREE CHE COSTITUISCANO IL GRIPPER

aadd,all

C***STRINZIONE DITO DI DESTRA

local,14,0,0.7625,7.158,,4 !Sistema di riferimento cartesiano posto sulla strinzione del dito di sinistra

k,210,0,0

k,211,0,0.5

k,212,0.05,0.03

k,213,0.05,(0.5-0.03)

l,210,211

l,211,213

l,213,212

l,212,210

lfillt,11,18,0.05 !Raggio di raccordo tra le due linee 11-18, con raggio di raccordo "0.05"

lfillt,18,21,0.05 !Raggio di raccordo tra le due linee 18-21, con raggio di raccordo "0.05"

al,8,11,24,18,26,21

k,214,0.2,0

k,215,0.2,0.5

k,216,0.15,0.03

k,217,0.15,(0.5-0.03)

l,214,215

l,215,217

l,217,216

l,216,214

lfillt,30,33,0.05 !Raggio di raccordo tra le linee 30-33, con raggio di raccordo "0.05"

lfillt,33,36,0.05 !Raggio di raccordo tra le linee 33-36, con raggio di raccordo "0.05"

al,27,30,44,33,49,36

csys,0

asba,22,1 !Operazione Booleana di sottrazione per togliere l'area (1) dalla (22)
 asba,3,2 !Operazione Booleana di sottrazione per togliere l'area (2) dalla (3)

C***FORO SULLA PARTE FISSA

k,300,,df-Lm/2 !Centro del foro fisso
 circle,300,rf,,360
 al,27,30,36,63 !Area compresa (tra le linee 27,30,36,63) del semicerchio della piastra fissa
 asba,1,2 !Operazione Booleana di sottrazione dell'area del semicerchio (2) dalla piastra fissa (1)

C***FORO SULLA PARTE MOBILE

k,400,-Lm/2 !Centro del foro fisso
 circle,400,rf,,360
 al,30,36,42,69 !Area compresa nelle linee 30,36,42,69 del semicerchio della piastra mobile
 asba,3,1 !Operazione Booleana di sottrazione dell'area del semicerchio (1) dalla piastra mobile (3)

C***FORO PICCOLO DI DESTRA SULLA PIASTRA MOBILE

k,500,lfp,-Lm/2
 circle,500,rfp,,360
 al,4,36,42,78
 asba,2,1 !Operazione Booleana di sottrazione per togliere l'area del semicerchio (1) dalla piastra mobile (2)

C***GEOMETRIA DEL PERNO DA SOLLEVARE

local,15,1,(SemAperDit-(D/2)),8.2078
 k,1500,0,,
 k,1501,D/2,90
 k,1502,D/2,38.2
 k,1503,D/2,0
 k,1504,D/2,-38.2
 k,1505,D/2,-90
 l,1501,1502
 l,1502,1503
 l,1503,1504
 l,1504,1505
 csys,0 !Sistema di rifeimento cartesiano
 l,1501,1505

C***INFITTIMENTO DELLA ZONA DI CONTATTO

lesize,84,,(2*lsiz) !Linea del cilindro da sollevare
 lesize,87,,(2*lsiz) !Linea del cilindro da sollevare
 lesize,54,,lsiz !Linea del dito nella zona di contatto
 lesize,53,,lsiz !Linea del dito nella zona di contatto

C***RICHIAMO DEL 1° ELEMENTO

type,1 !Si attiva l'elemento 1 (piastra)
 mat,1 !Si attiva il materiale 1
 real,1 !Si attiva le Real Costants 1

C***MESH DEL GRIPPER

smrtsize,1
 amesh,3
 nrefine,all,,1,,off !Infettimento nei nodi. Si pu impostare da 1-5, dove 1 è il minimo

C***CREA L'AREA E ESEGUE LA MESH DEL SEMI-PERNO DA SOLLEVARE

al,81,84,87,88,89
 asel,s,area,,1 !Select top area
 smrtsize,3
 amesh,1
 allsel

C***RICHIAMO DEL 3° ELEMENTO NECESSARI PER CREARE IL CONTATTO TRA POLPASTRELLO E CILINDRO DA SOLLEVARE

type,3 !Activates or sets this element type
 real,3 !Activates or sets the real constants

C***Si SELEZIONA IL GRUPPO DI NODI DEL SEMICILINDRO "NodiOggettoCp" SU CUI SI GENERA IL CONTATTO

asel,s,area,,1 !Select top area
 nsla,s,1 !Select the nodes within this area
 csys,15
 nsel,r,loc,x,((D/2)-0.0001),((D/2)+0.0001) !Select bottom layer of nodes in this area
 nsel,r,loc,y,-(38.2-0.001),(38.2-0.001)
 csys,0
 cm,NodiOggettoCp,node !Call this group of nodes 'NodiOggettoCp'

C***SI SELEZIONA IL GRUPPO DI NODI DEL POLPASTRELLO "NodiDitoCp" SU CUI SI GENERA IL CONTATTO

allsel !Relect everything
 asel,s,area,,3 !Select bottom area
 nsla,s,1 !Select nodes in this area
 local,16,0,0.12511,8.2078,,2.8624
 nsel,r,loc,y,-((D/3)-0.001),((D/3)-0.001) !Select bottom layer of nodes in this area
 nsel,r,loc,x,-0.001,0.001
 cm,NodiDitoCp,node !Call this group of nodes "NodiDitoCp"
 allsel
 nsel,s,node,,NodiOggettoCp
 nsel,a,node,,NodiDitoCp

e,26496,57

```
*do,m,0,18,1
  e,26676-m,1891+m
*enddo
```

```
*do,n,0,19,1
  e,26657-n,24688+n
*enddo
```

```
*do,v,0,19,1
  e,26677+v,24687-v
*enddo
```

```
*do,v,0,18,1
  e,26697+v,1890-v
*enddo
```

```
nselect,all
```

```
C***SI RICHIAMA IL 2° ELEMENTO, ASTA DI COLLEGAMENTOI TRA IL NODO
"MASTER" E DLI "SLAVE"
```

```
type,2 !Si attiva l'elemento 2 (piastra)
```

```
mat,2 !Si attiva il materiale 2
```

```
real,2 !Si attiva le Real Costants 2
```

```
C***VINCOLI DELLA PIASTRA FISSA
```

```
local,16,1,,df-Lm/2
```

```
n,,0,0,0
```

```
C***APPLICAZIONE DEL CERING (ricerca del nodo VINCOLOMASTER)
```

```
nselect,s,loc,x,-0.001,(rf+0.001) !Si seleziona una fascia di nodi che si trovano sul
semicerchio della piastra mobile
```

```
nselect,r,loc,y,0,91
```

```
*get,NodoVincoloMaster,node,,num,max !Si chiama "NodoVincoloMaster" il nodo che ha
numerazione maggiore
```

```
C***CREAZIONE DELLE ASTE CHE COLLEGANO GLI SLAVE CON IL NODO
MASTER
```

```
nselect,u,,NodoVincoloMaster
```

```
*do,k,0,40,1
```

```
  *get,NodoVincoloTempk,node,,num,max
```

```
  e,NodoVincoloTempk,NodoVincoloMaster
```

```
  nselect,u,node,,NodoVincoloTempk
```

```
*enddo
```

```
nselect,all
```

```
csys,0 !Sistema di rifeimento cartesiano
```

```
d,NodoVincoloMaster,ux
```

```
d,NodoVincoloMaster,uy
```

C***NODO AL CENTRO DEL FORO DOVE VIENE APPLICATA LA FORZA DI TRAZIONE GENERATA DELL'ATTUATORE PIEZZOLETTICO

local,17,1,-Lm/2 !Sistema di riferimento cilindrico posto sul centro della piastra mobile
n,,0,0,0

C***APPLICAZIONE DEL CERING (ricerca del nodo MASTER)

nselect,s,loc,x,-0.001,(rf+0.001) !Si seleziona una fascia di nodi che si trovano sul semicerchio della piastra mobile

nselect,r,loc,y,0,-91

*get,NodoMaster,node,,num,max !Si chiama "NodoMaster" il nodo che ha numerazione maggiore

C***CREAZIONE DELLE ASTE CHE COLLEGANO GLI SLAVE CON IL NODO MASTER

nselect,u,,NodoMaster

*do,j,0,40,1

 *get,NodoTempj,node,,num,max
 e,NodoTempj,NodoMaster

 nselect,u,node,,NodoTempj

*enddo

nselect,all

csys,0

C***VINCOLO DELLA PIASTRA MOBILE LUNGO X

d,NodoMaster,UX

C***VINCOLI DEL SEMICILINDRO DA AFFERRARE

local,18,0,(SemAperDit-(D/2)),8.2078

nselect,s,loc,x,-0.0001,0.0001

nselect,r,loc,y,-((D/2)+0.001),((D/2)+0.001)

cm,NodiSpst,node !Call this group of nodes 'NodiSpst'

nselect,u,loc,y,-((D/2)-0.001),((D/2)-0.001)

d,all,uy

csys,0

allsel

C***SIMMETRIA

nselect,s,loc,x,-1,0.001

nselect,u,loc,y,-(Lm/2-0.01),-(Lm/2+0.01)

nselect,u,loc,y,df-(Lm/2+0.01),df-(Lm/2-0.01)

nselect,r,loc,y,-(Lm+1),(Lm+df+0.1)

dsym,symm,x

nselect,all

csys,13

nselect,s,loc,x,-0.03,0.03

cm,NodoCoda,node !Call this group of nodes 'NodoCoda'

nselect,all

csys,0

```

C***VIENE ESEGUITA UN'ANALISI CON GRANDI SPOSTAMENTI PERCHE'
L'ELEMENTO CONTC12 INTRODUCE UNA NON LINEARITA'
/TITLE,ANALISI GRANDI SPOSTAMENTI CON ELEMENTO CONTC12
NLGEOM,ON      ! Attiva l'analisi "large strain/displacement"
FINISH        ! Esce da PREP
/solu !Ambiente risolutore
time,1 !Primo step di carico da applicare
d,NodiSpst,ux,0.02489
!d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del NodoMaster sotto l'azione del
Piezoelettrico
lswrite,1

time,2 !Secondo step di carico da applicare
d,NodiSpst,ux,0.07489
!d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del NodoMaster sotto l'azione del
Piezoelettrico
lswrite,2

time,3 !Terzo step di carico da applicare
d,NodiSpst,ux,0.12489
!d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del NodoMaster sotto l'azione del
Piezoelettrico
lswrite,3

time,4 !Quarto step di carico da applicare
d,NodiSpst,ux,0.17489
!d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del NodoMaster sotto l'azione del
Piezoelettrico
lswrite,4

time,5 !Quinto step di carico da applicare
d,NodiSpst,ux,0.22489
!d,NodoMaster,uy,-SpostPiezo !Spostamento imposto del NodoMaster sotto l'azione del
Piezoelettrico
lswrite,5

lssolve,1,5 !Legge e risolvi il carico multisteps
finish
save

/post1 !Ambiente output
set,1 !Seleziona i risultati del primo step di carico
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI afferrando cilindri di D=0.3[mm]" premere invio per
continuare,0 !D'ha il tempo per poter vedere il grafico
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indeformata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con perno cilindri di D=0.3[mm]" premere invio per
continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA aprendo le dita di X=0.3[mm]" premere invio per
continuare,0

```

```
nset,s,node,,NodoCoda !Seleziona il NodoCoda che rappresenta il centro del cerchio della coda
prnsol,u,x          !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del NodoCoda precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per continuare,0
```

```
set,2 !Seleziona i risultati del secondo step di carico
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI aprendo le dita di X=0.4[mm] e UY=0[mm]" premere invio per continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con perno 0.4[mm] e UY=0[mm]" premere invio per continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA aprendo le dita di X=0.4[mm] e UY=0[mm]" premere invio per continuare,0
nset,s,node,,NodoCoda !Seleziona il NodoCoda che rappresenta il centro del cerchio della coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del NodoCoda precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per continuare,0
```

```
set,3 !Seleziona i risultati del terzo step di carico
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI aprendo le dita di X=0.5[mm]" premere invio per continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti ux rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con perno 0.5[mm]" premere invio per continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA aprendo le dita di X=0.5[mm]" premere invio per continuare,0
nset,s,node,,NodoCoda !Si seleziona il NodoCoda che rappresenta il centro del cerchio della coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del NodoCoda precedentemente selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per continuare,0
```

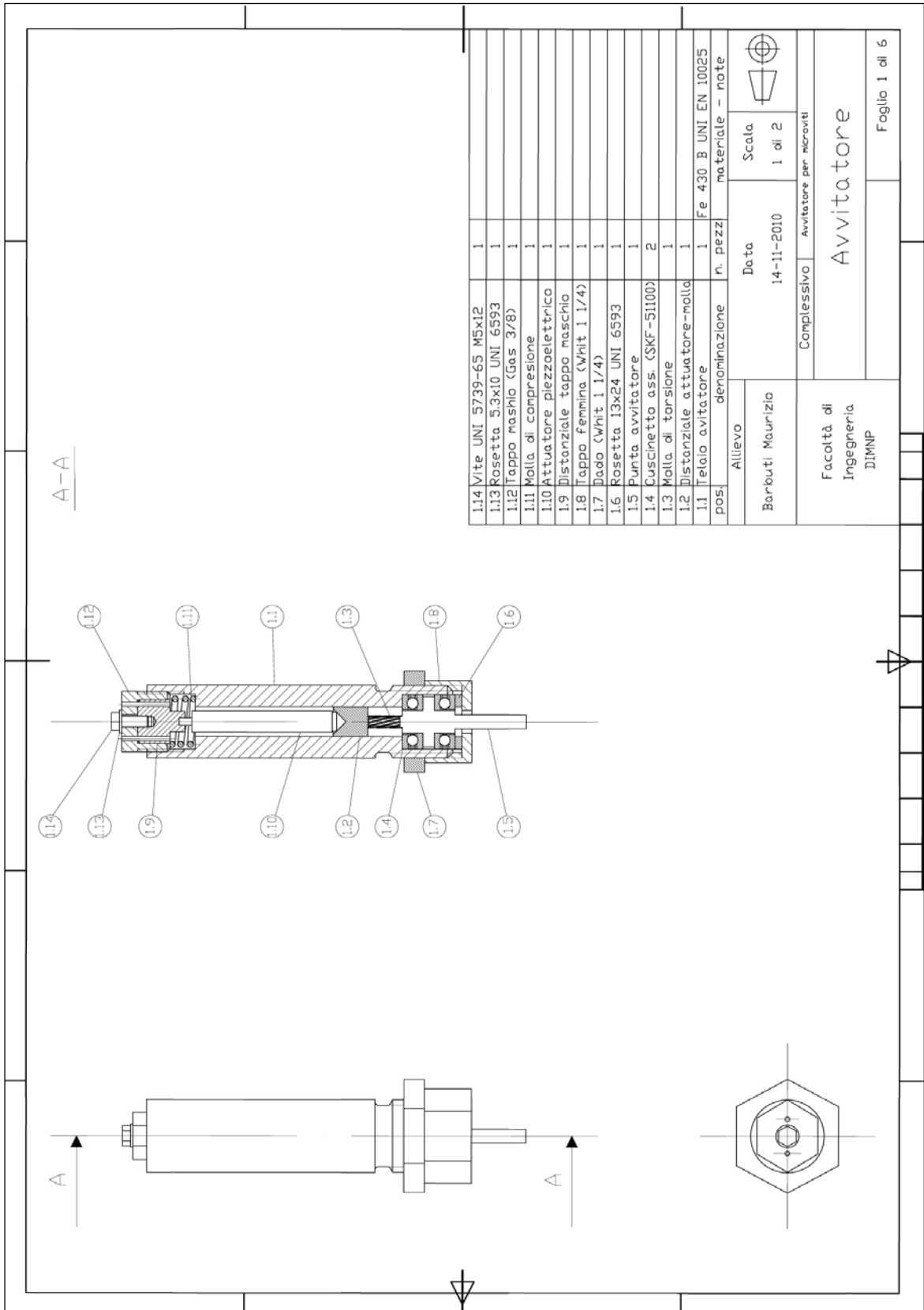


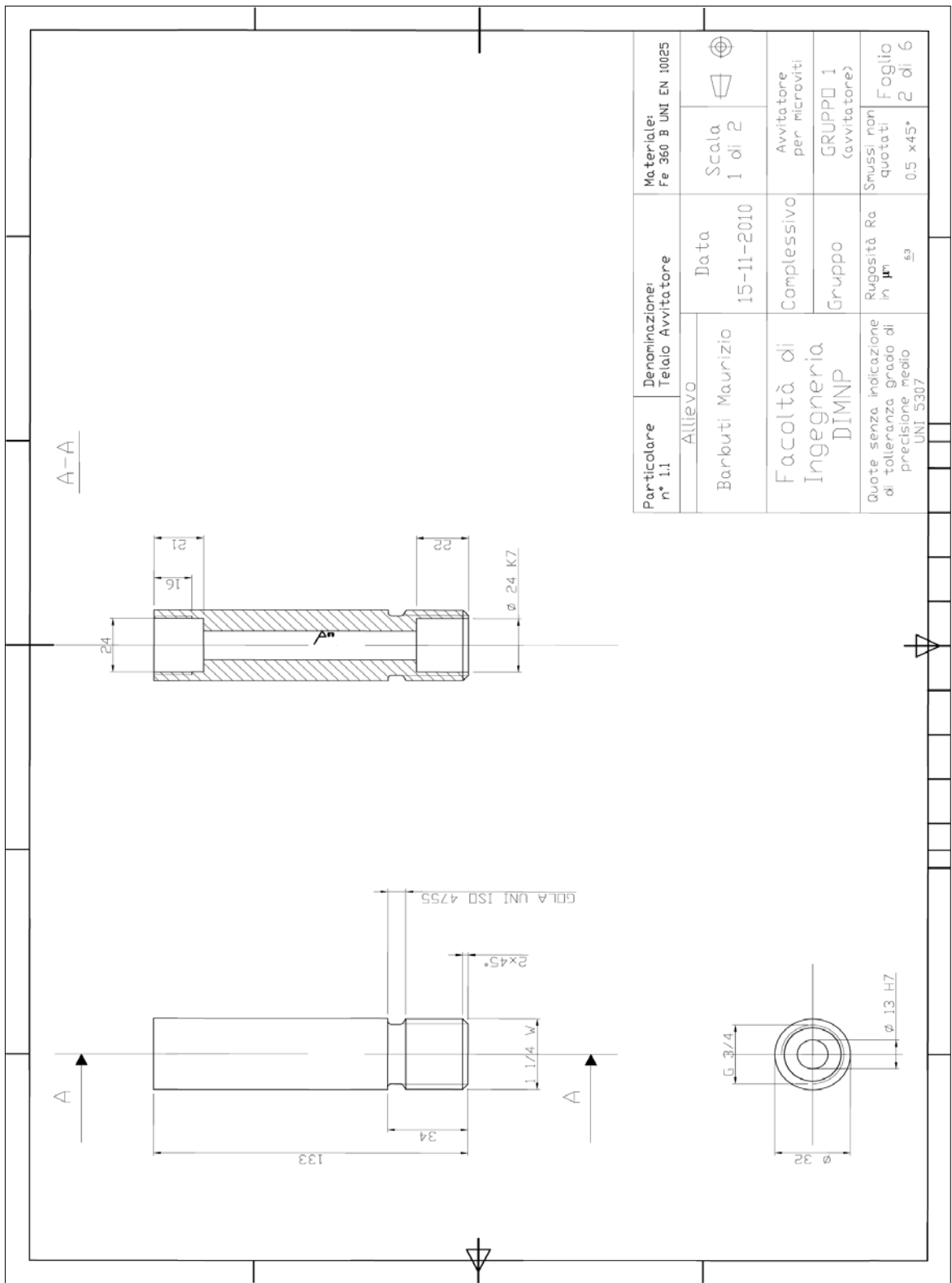
```
set,4 !Seleziona i risultati del quarto step di carico
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI aprendo le dita di X=0.6[mm] e UY=0[mm]" premere
invio per continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con perno 0.6[mm] e UY=0[mm]" premere invio per
continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA aprendo le dita di X=0.6[mm] e UY=0[mm]" premere
invio per continuare,0
nset,s,node,,NodoCoda !Seleziona il NodoCoda che rappresenta il centro del cerchio della
coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del NodoCoda precedentemente
selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per
continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per
continuare,0
```

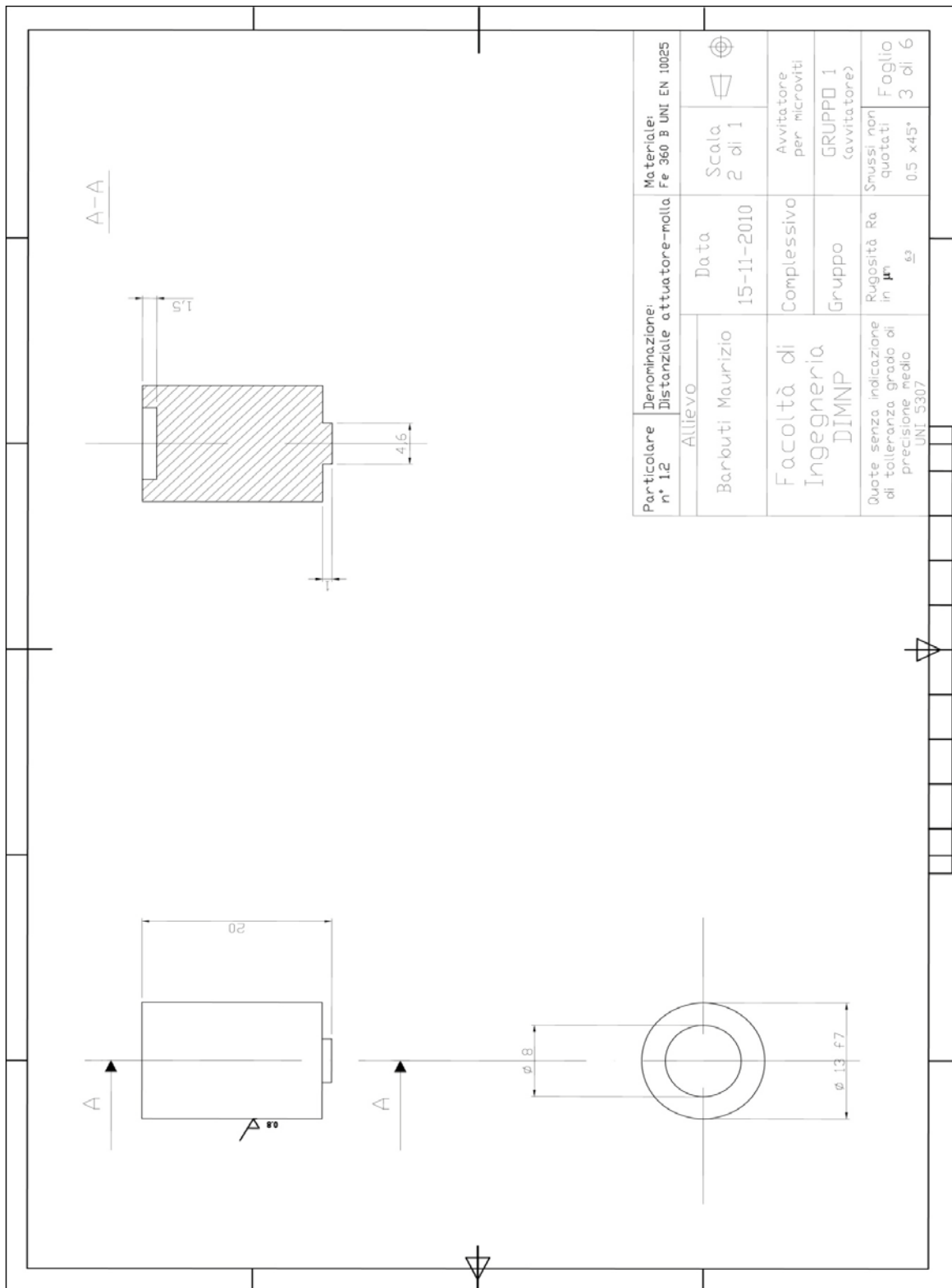
```
set,5 !Seleziona i risultati del quinto step di carico
pldisp,2 !Plotta la deformata
*ASK,IFL,"DEFORMAZIONI aprendo le dita di X=0.7[mm] e UY=0[mm]" premere
invio per continuare,0
plnsol,u,x,2 !Mostra gli spostamenti "ux" rispetto all'indefornata
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X con perno 0.7[mm] e UY=0[mm]" premere invio per
continuare,0
plns,s,eqv
*ASK,IFL,"ANALISI STATICA aprendo le dita di X=0.7[mm] e UY=0[mm]" premere
invio per continuare,0
nset,s,node,,NodoCoda !Seleziona il NodoCoda che rappresenta il centro del cerchio della
coda
prnsol,u,x !Stampa la soluzione degli spostamenti lungo X del NodoCoda precedentemente
selezionato
*ASK,IFL,"Spostamento lungo X del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per
continuare,0
prnsol,u,y
*ASK,IFL,"Spostamento lungo y del NodoCoda sul centro del foro" premere invio per
continuare,0
```

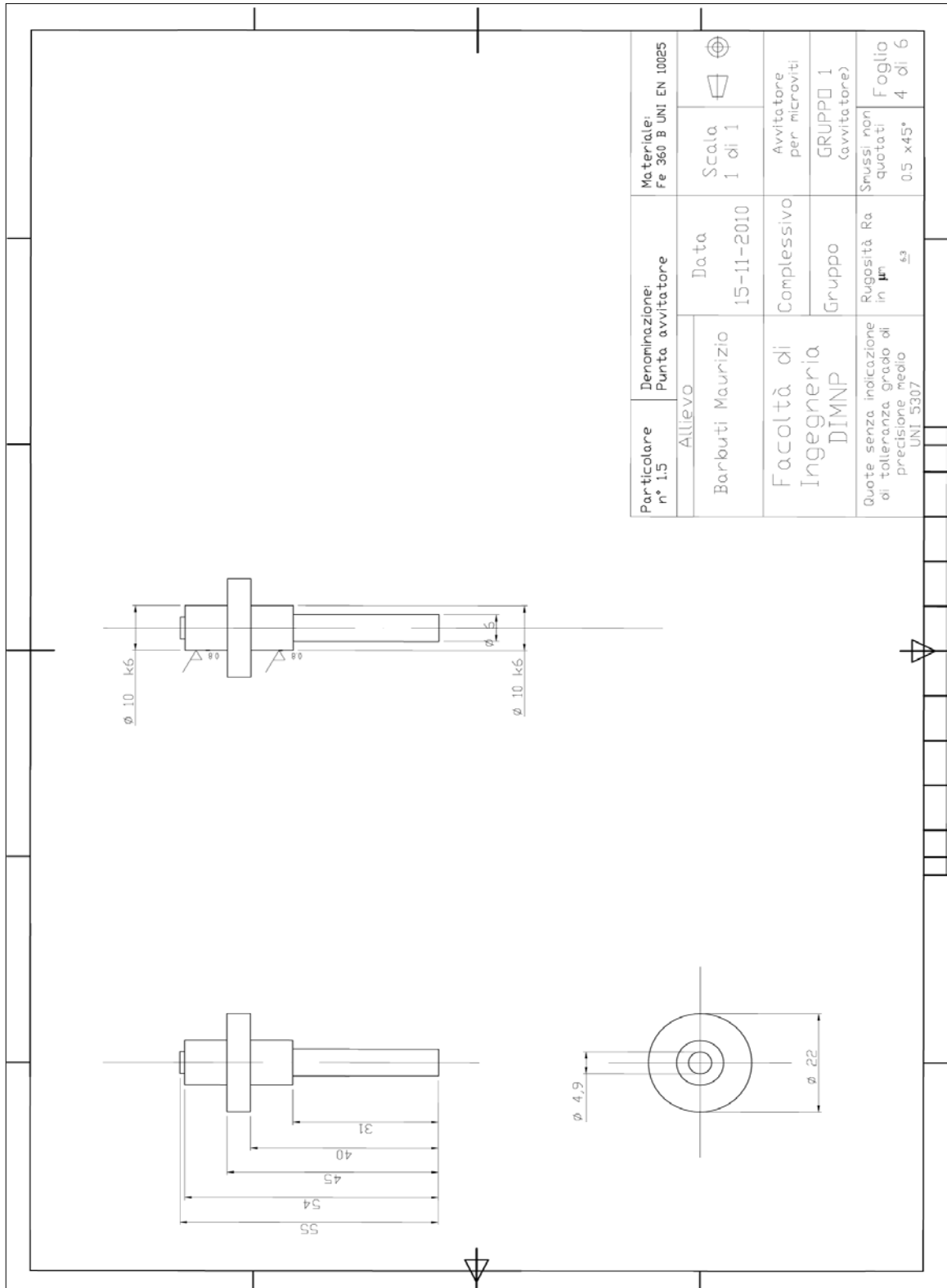
7.3. Disegni

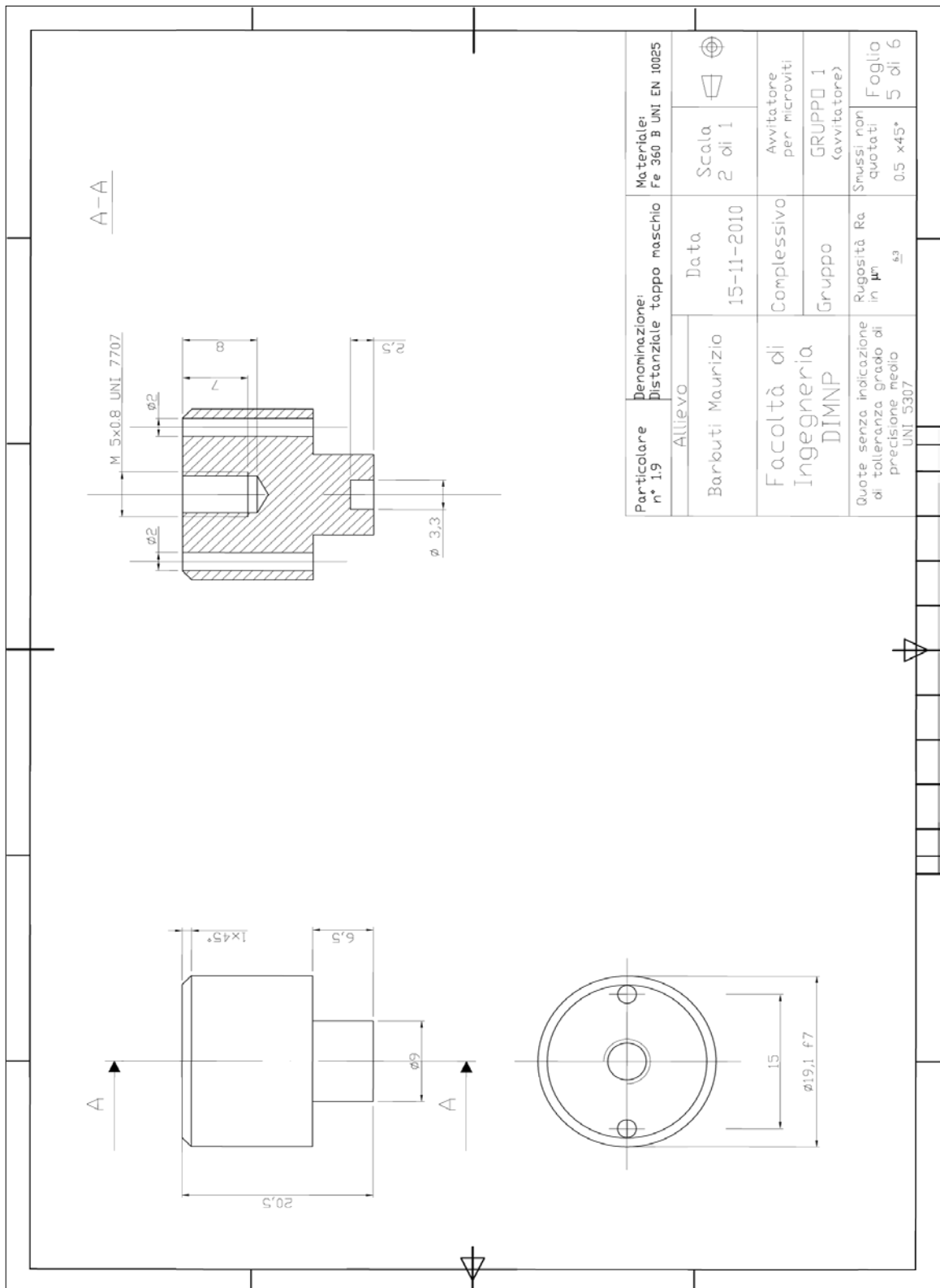
7.3.1. Disegni Avvitatore

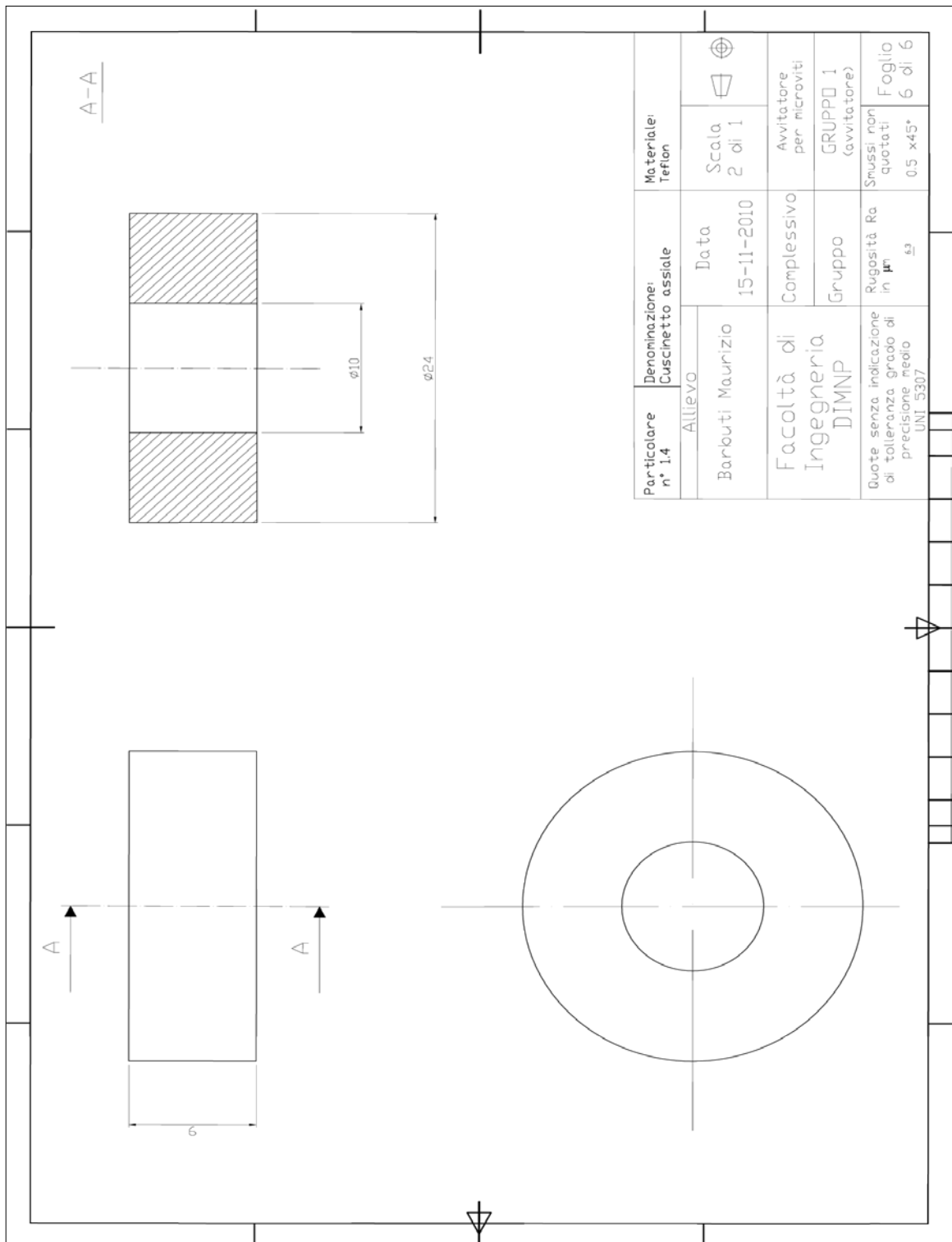




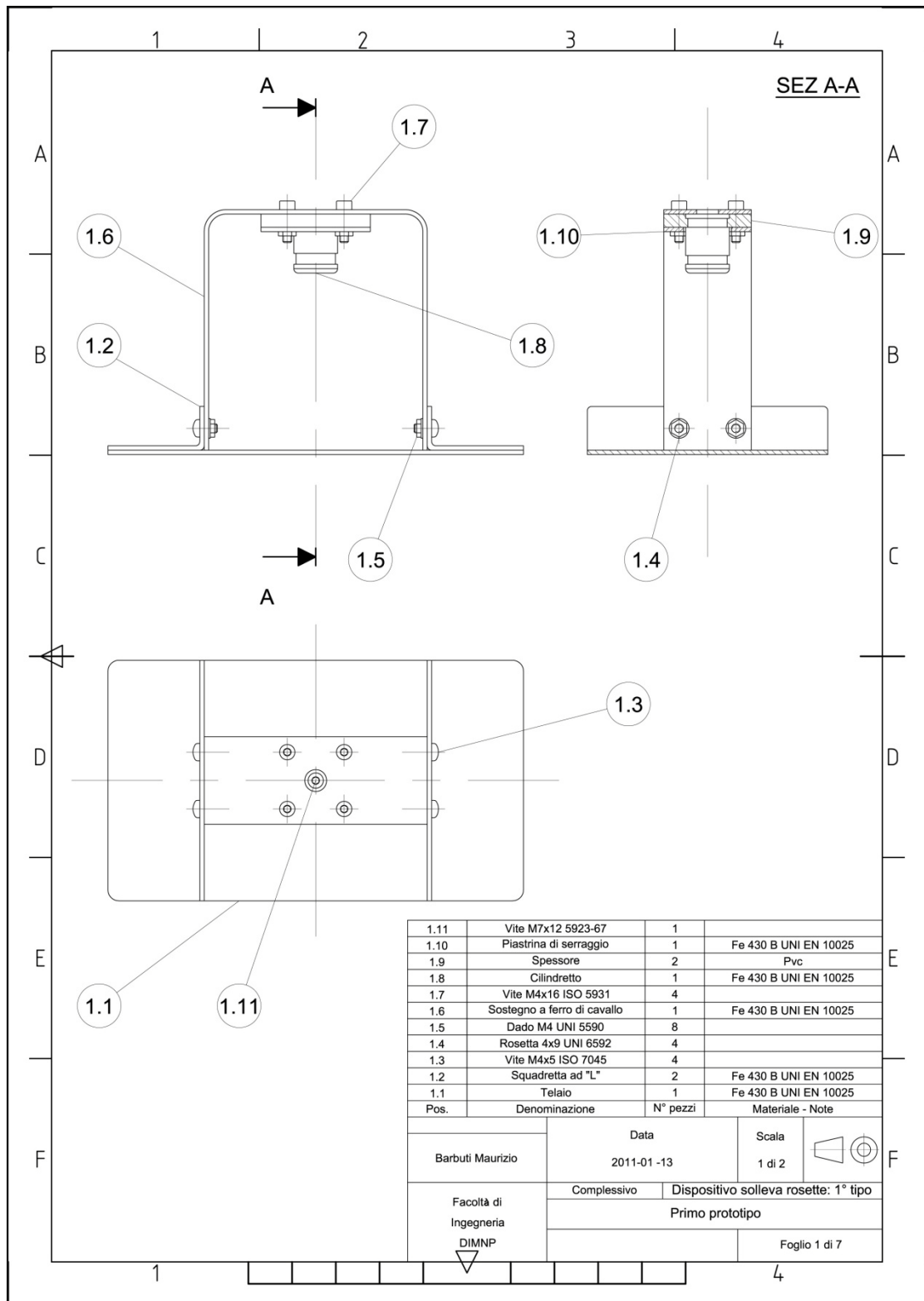


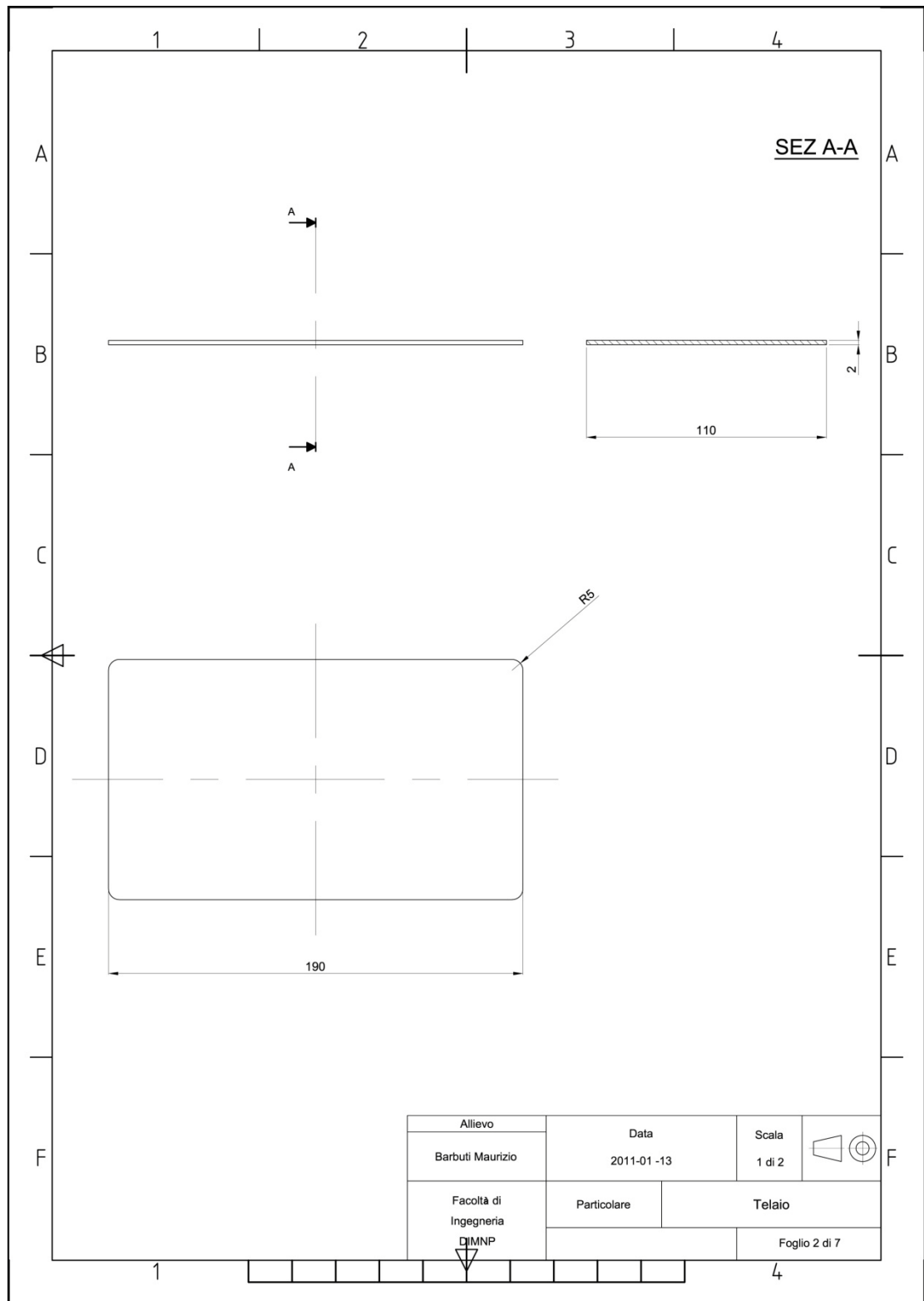


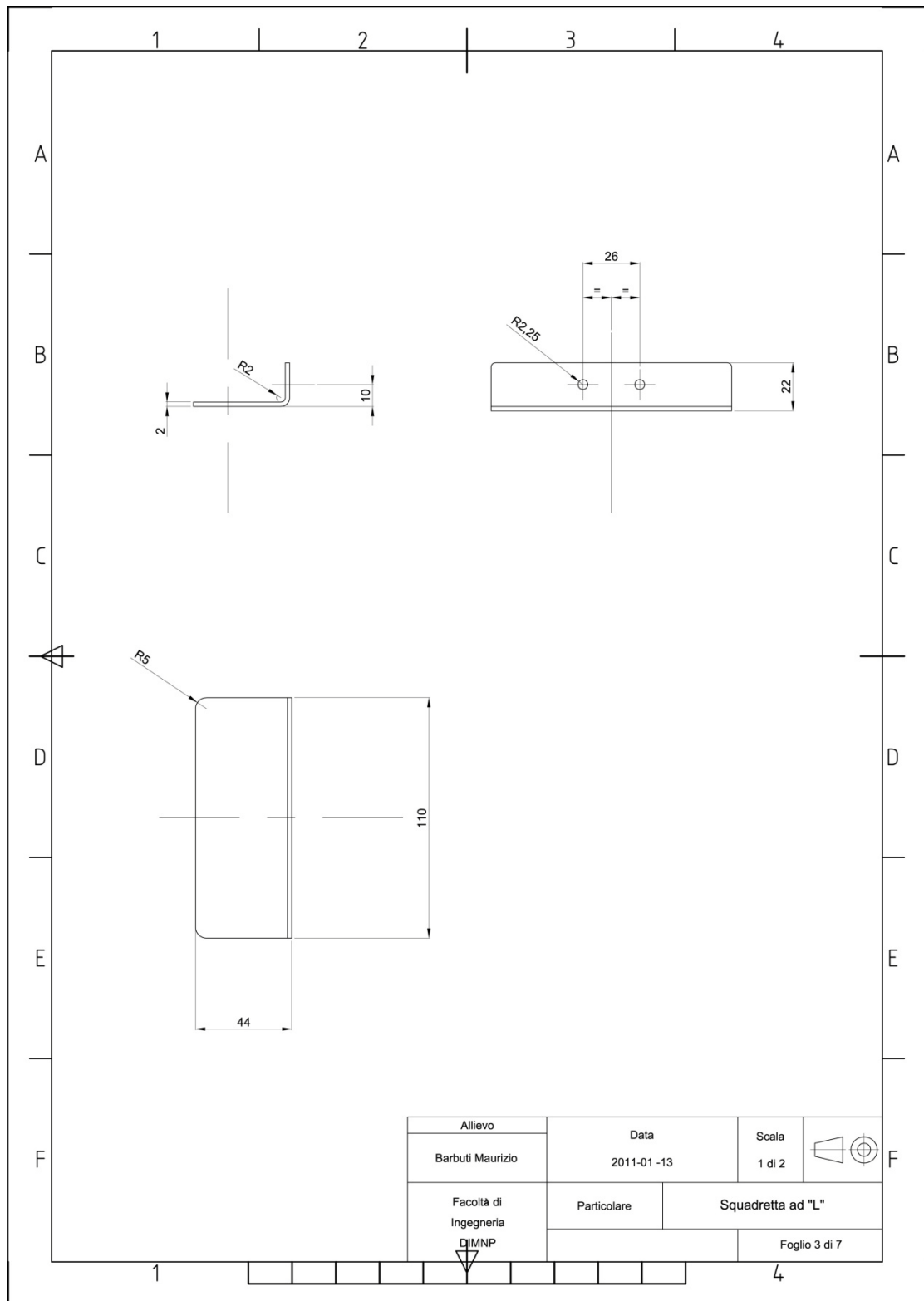


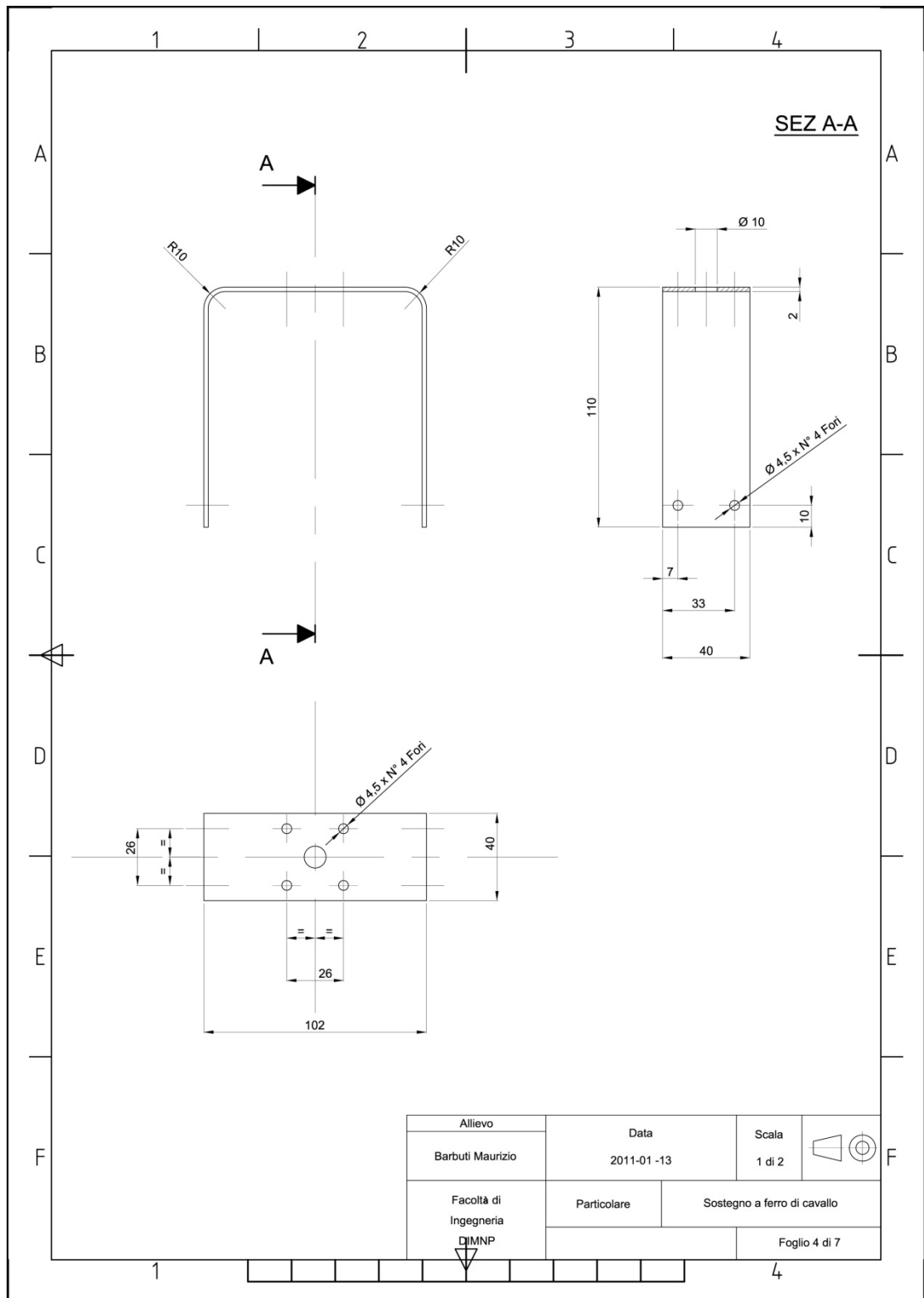


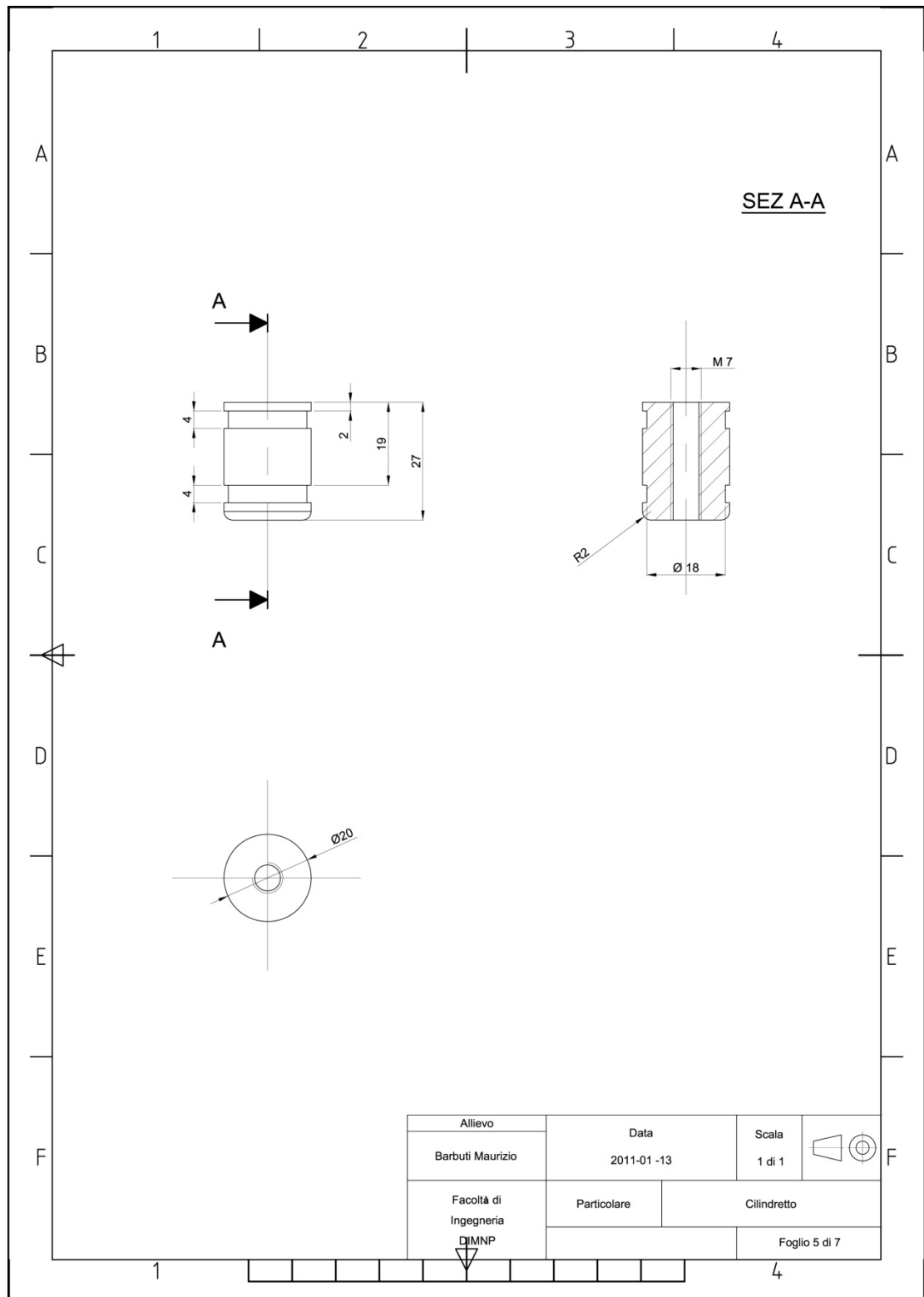
7.3.2. Disegni dispositivo solleva rosette: primo prototipo

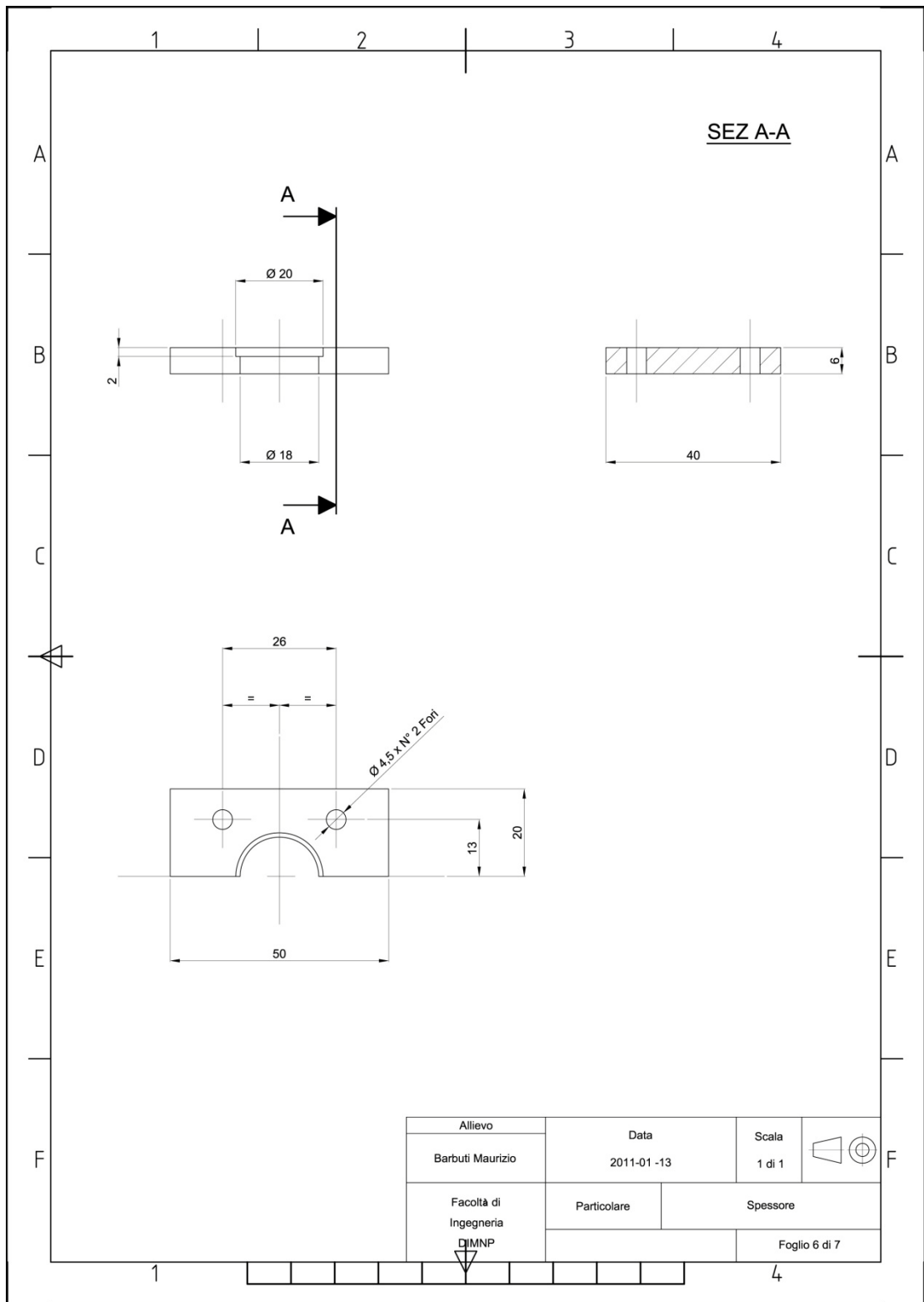


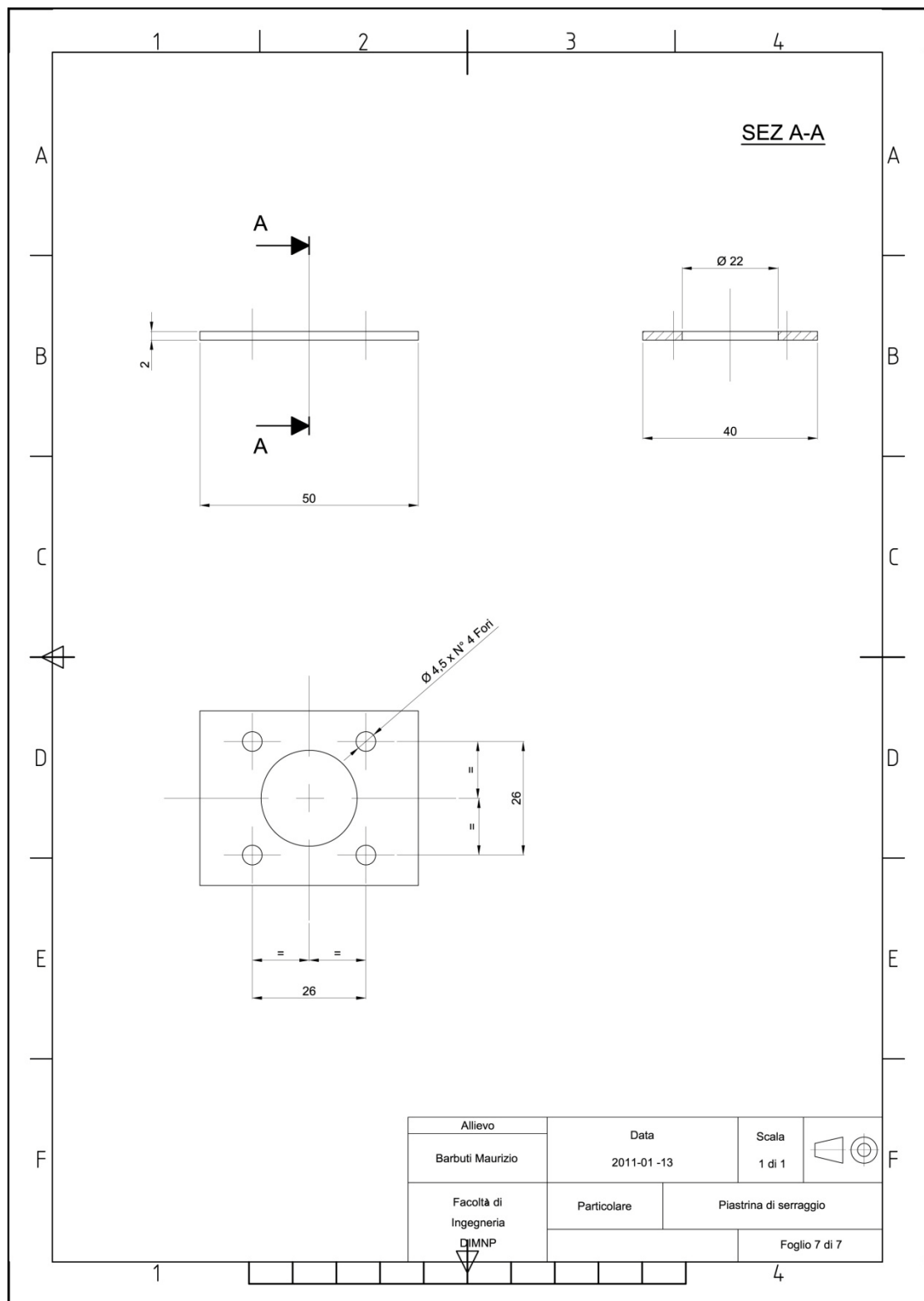




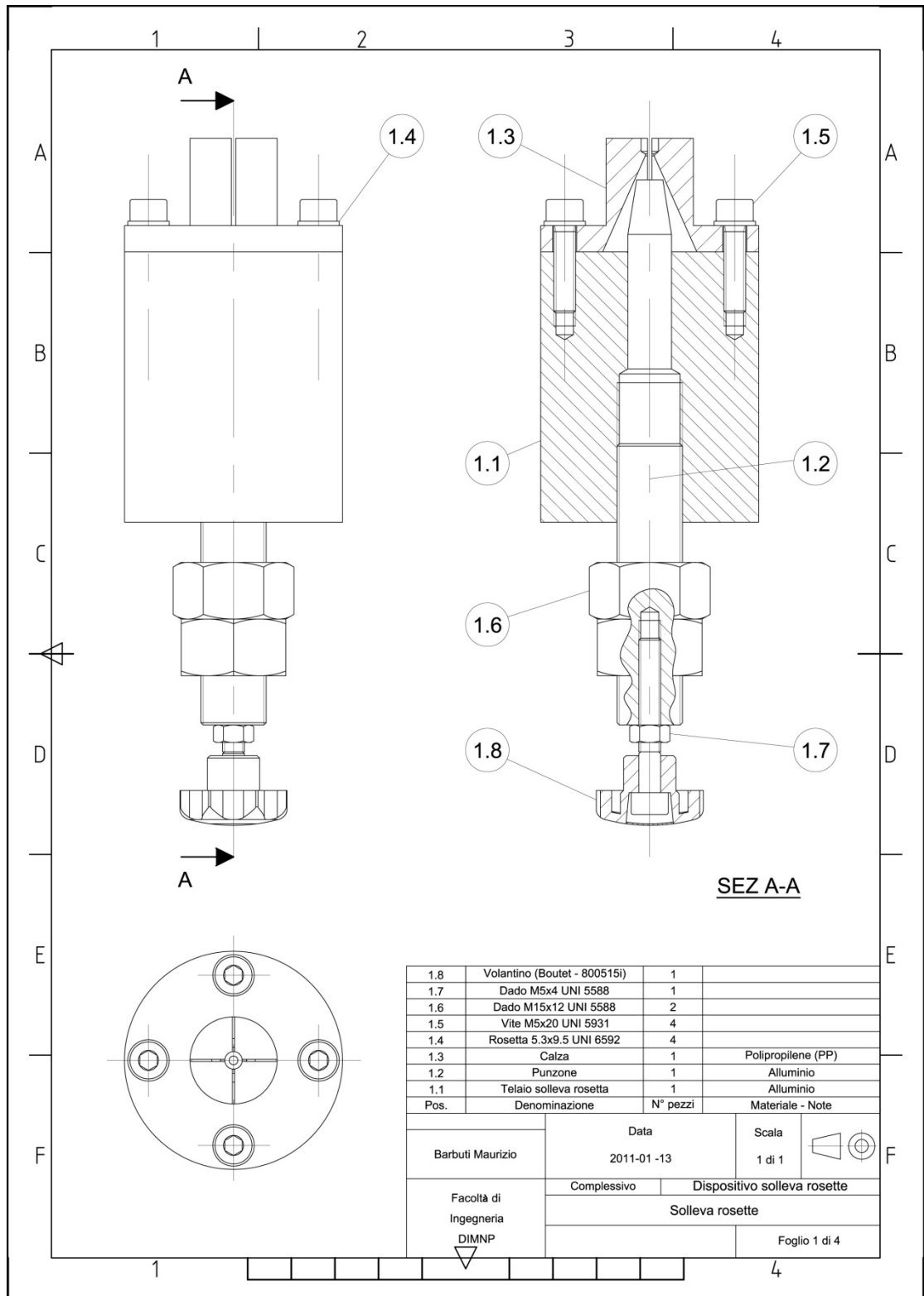


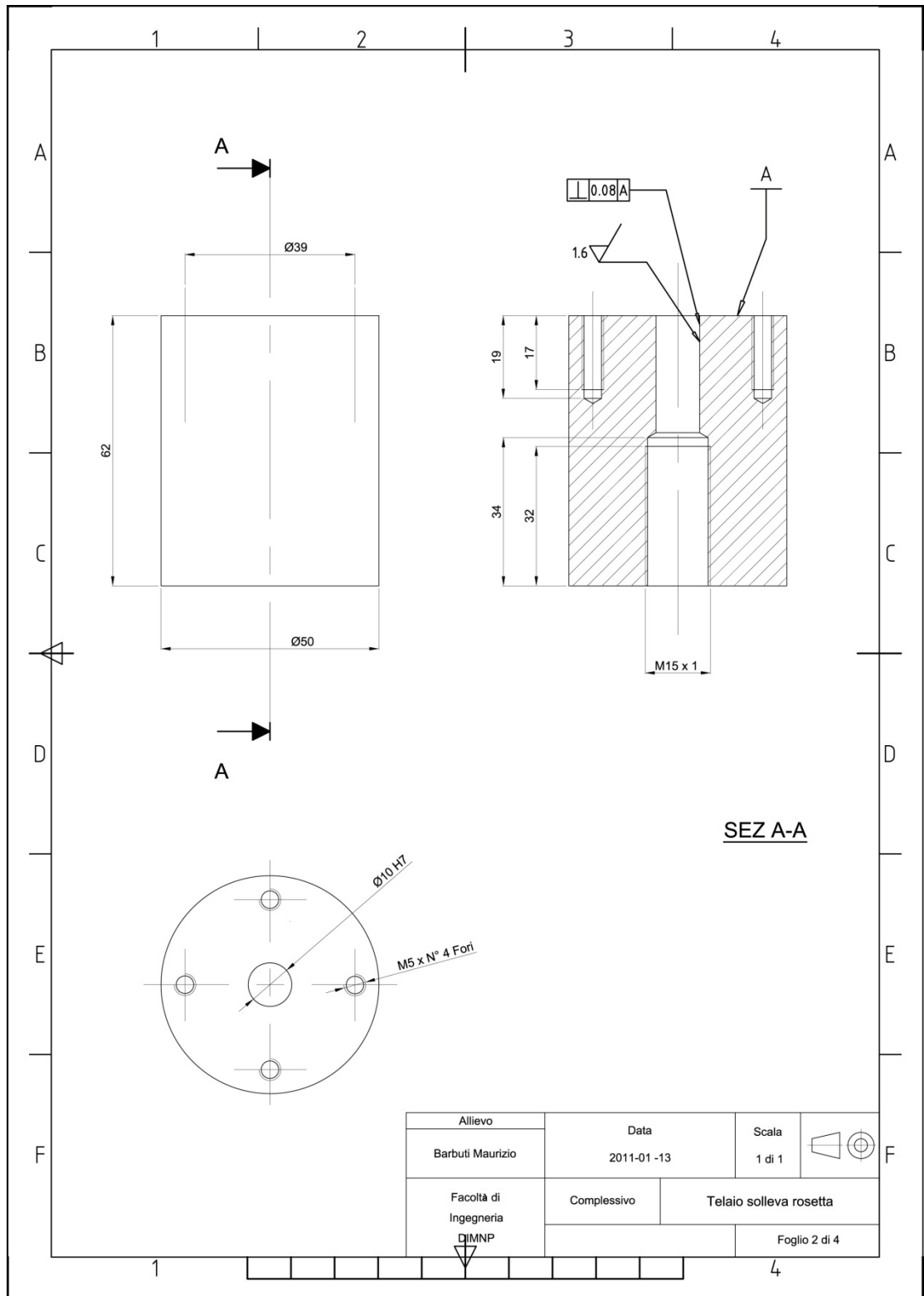


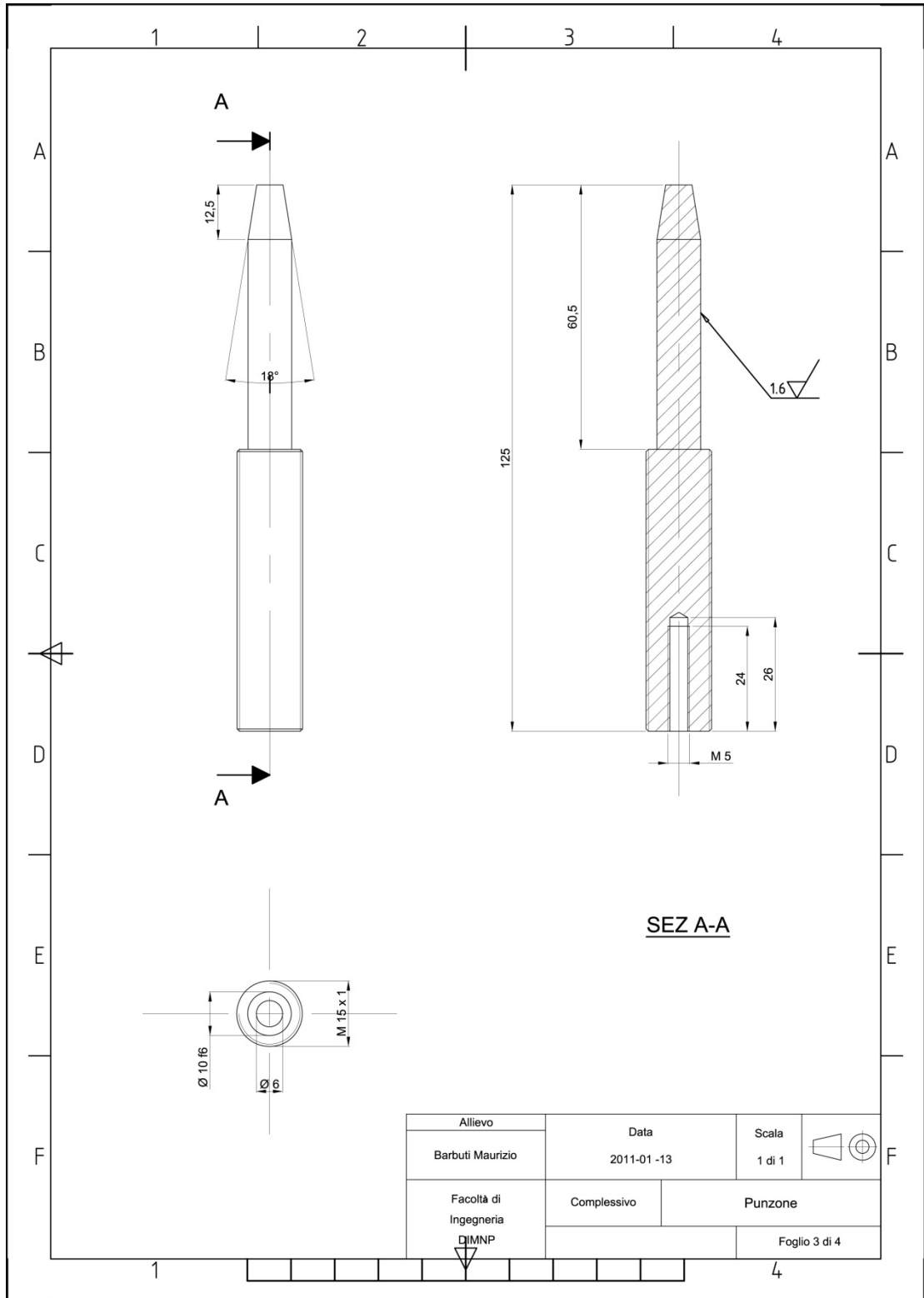


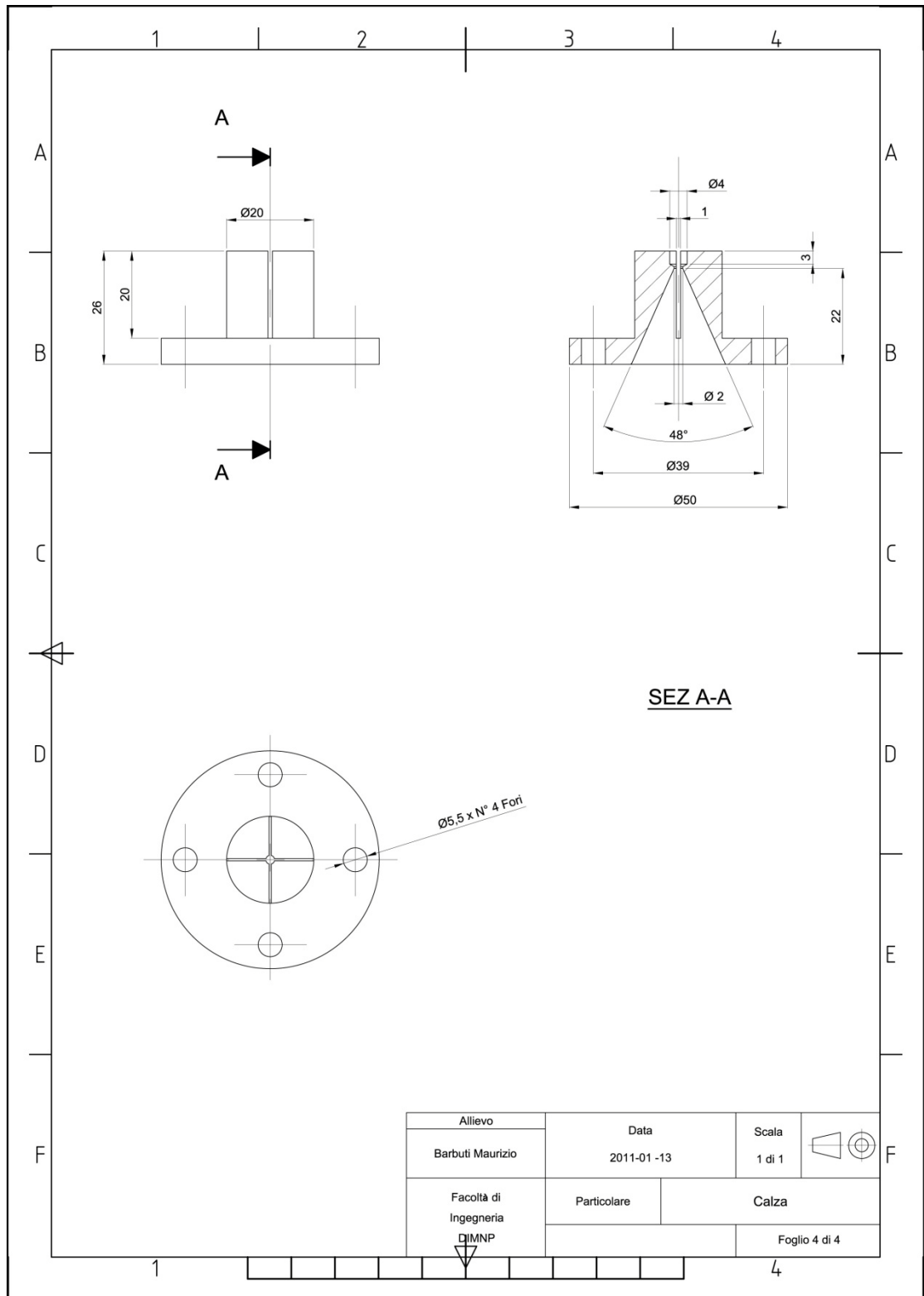


7.3.3. Disegni dispositivo solleva rosette: terzo prototipo

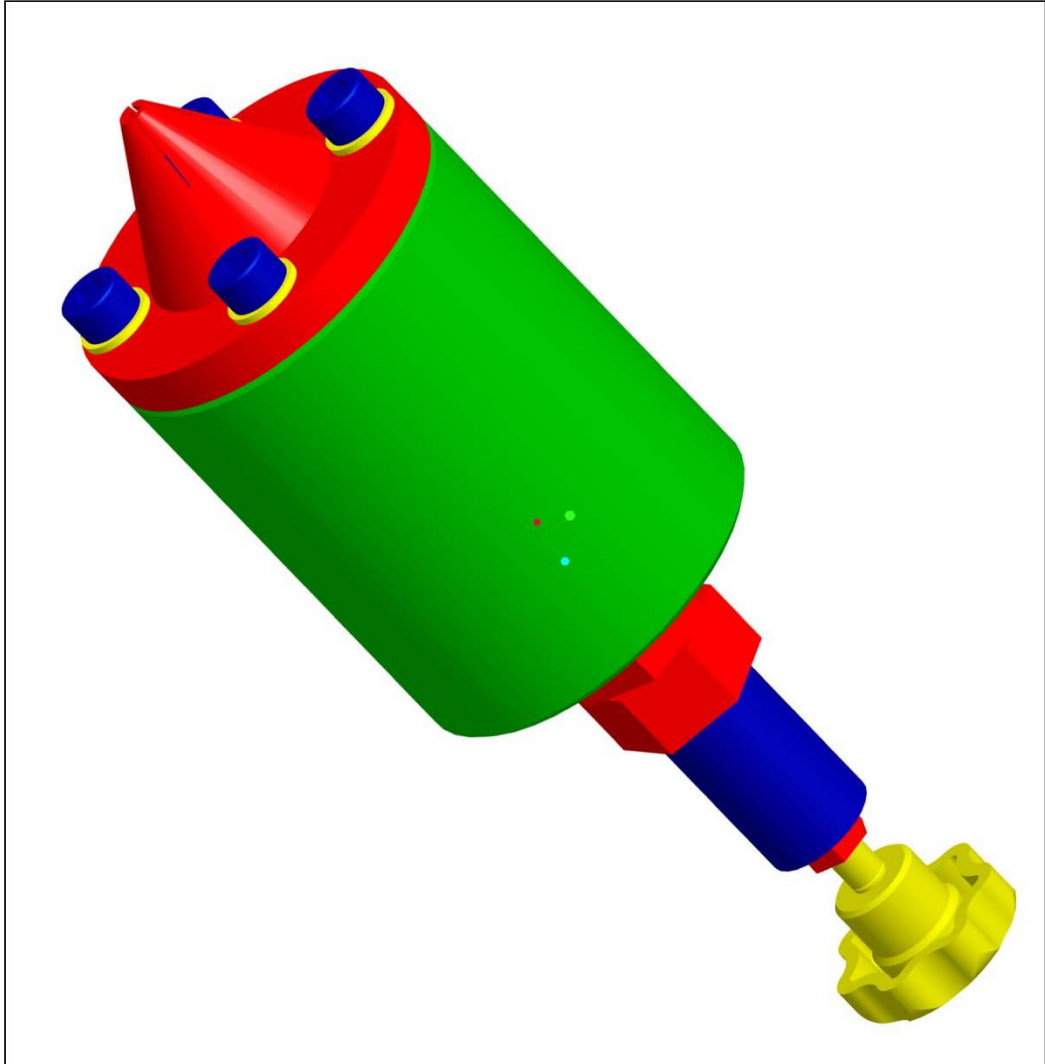


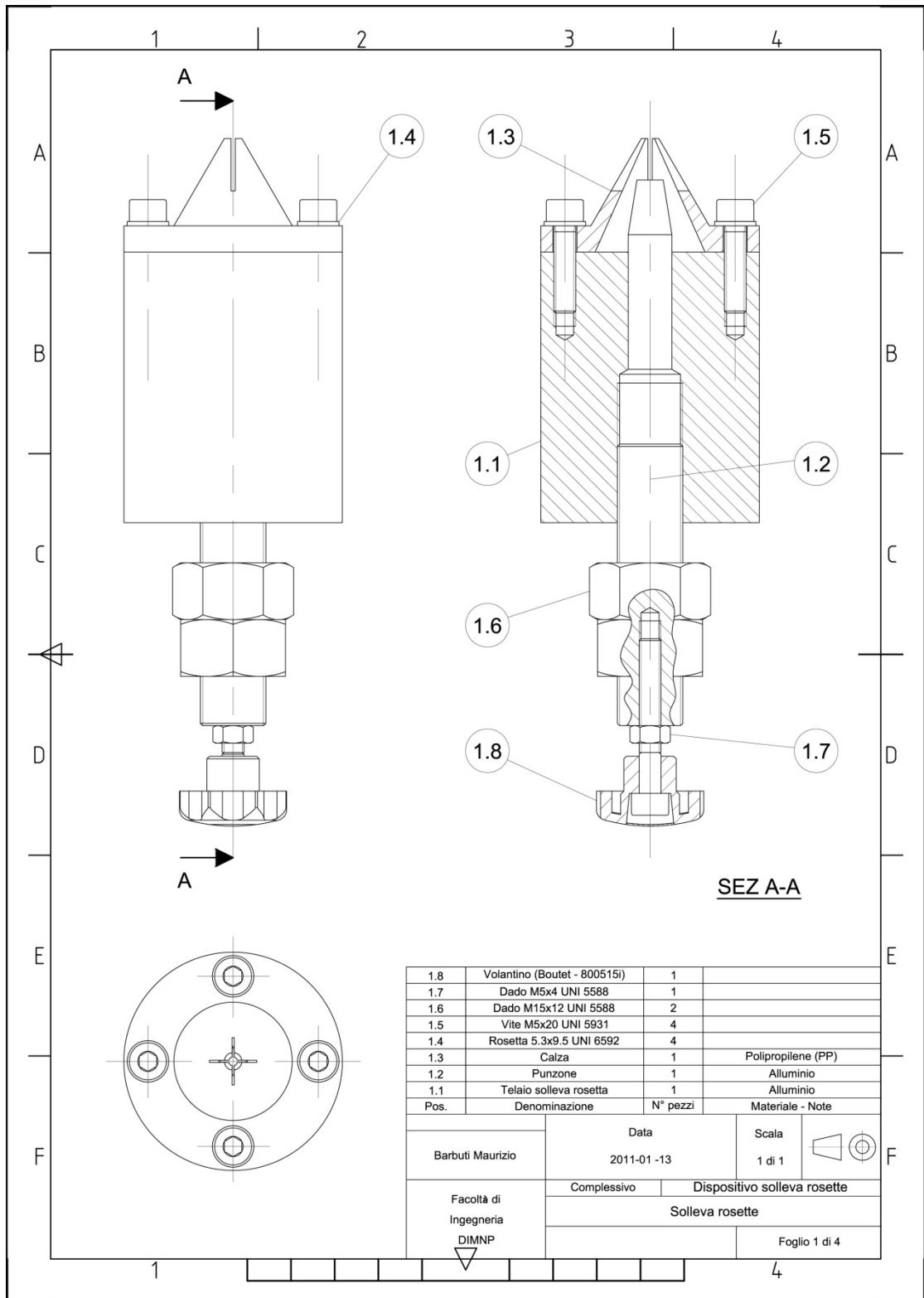


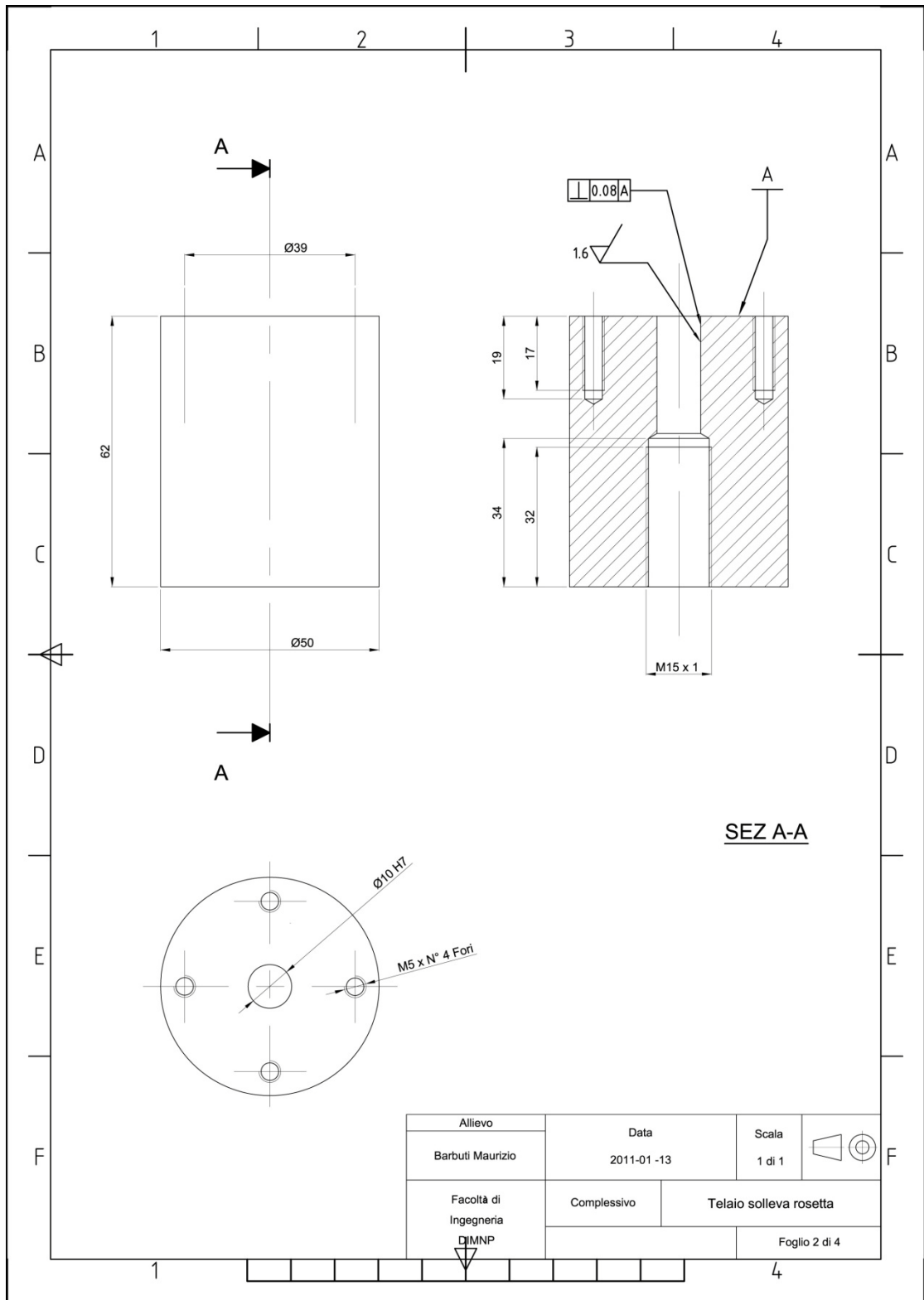


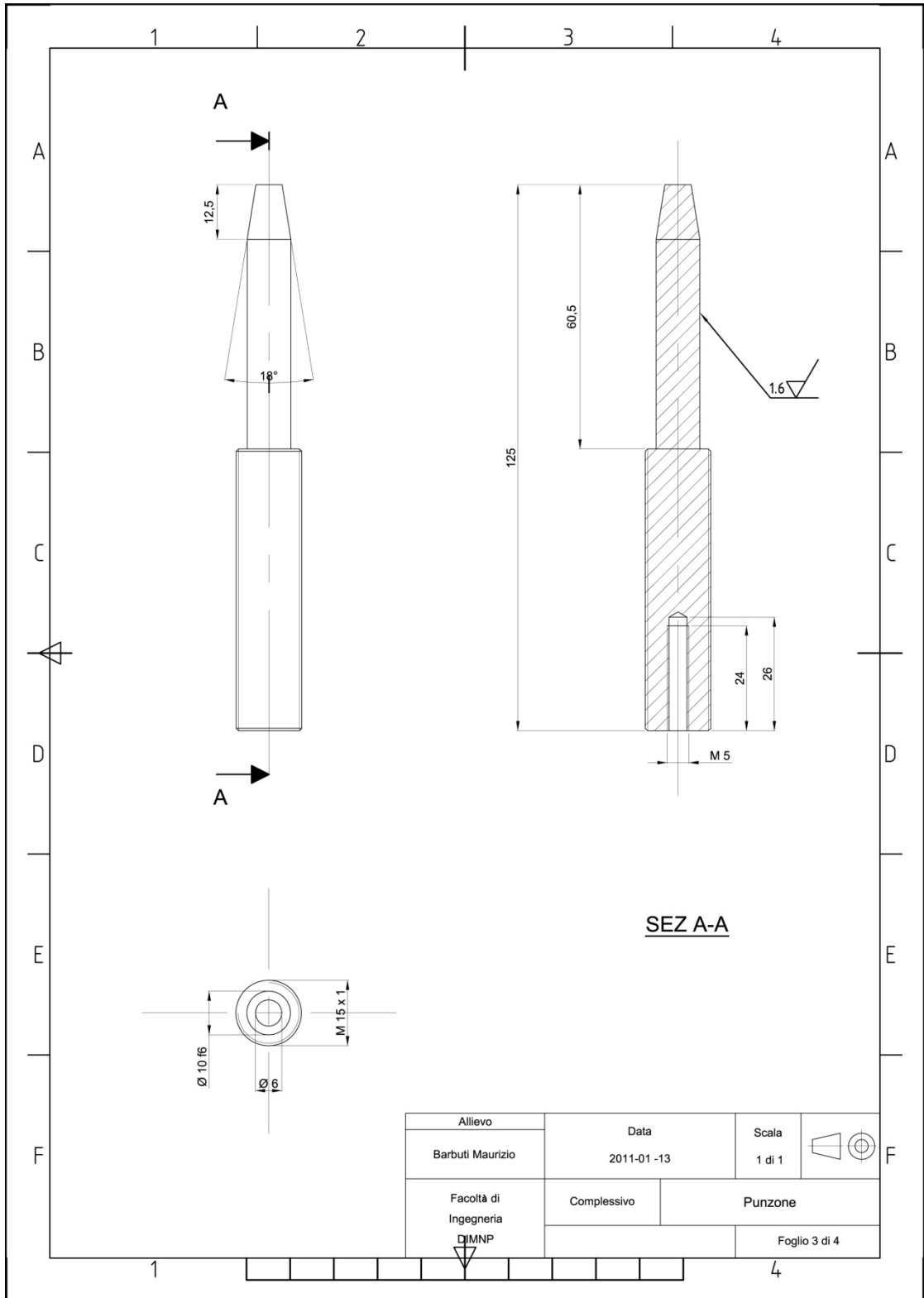


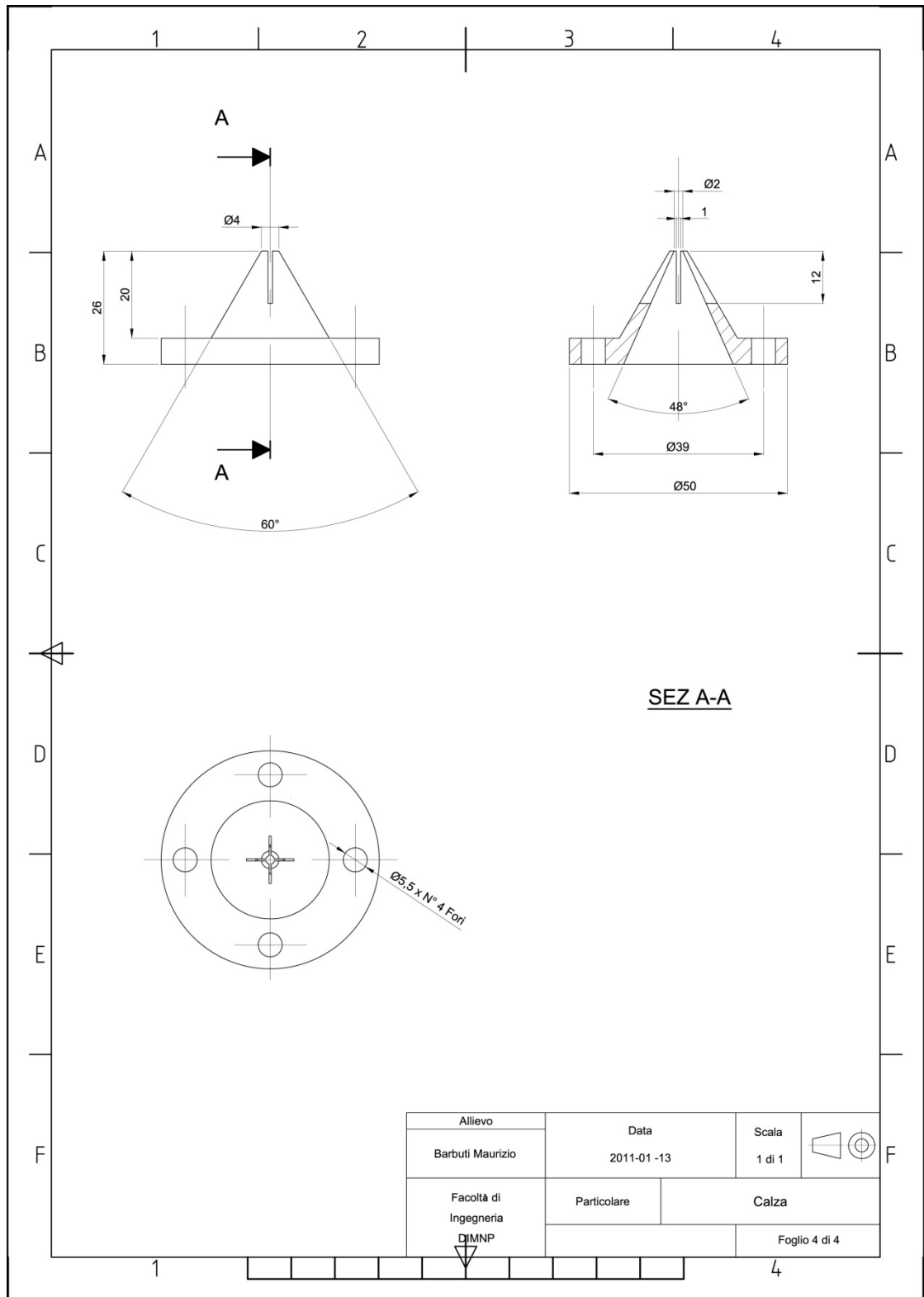
7.3.4. Disegni dispositivo solleva rosette: quarto prototipo



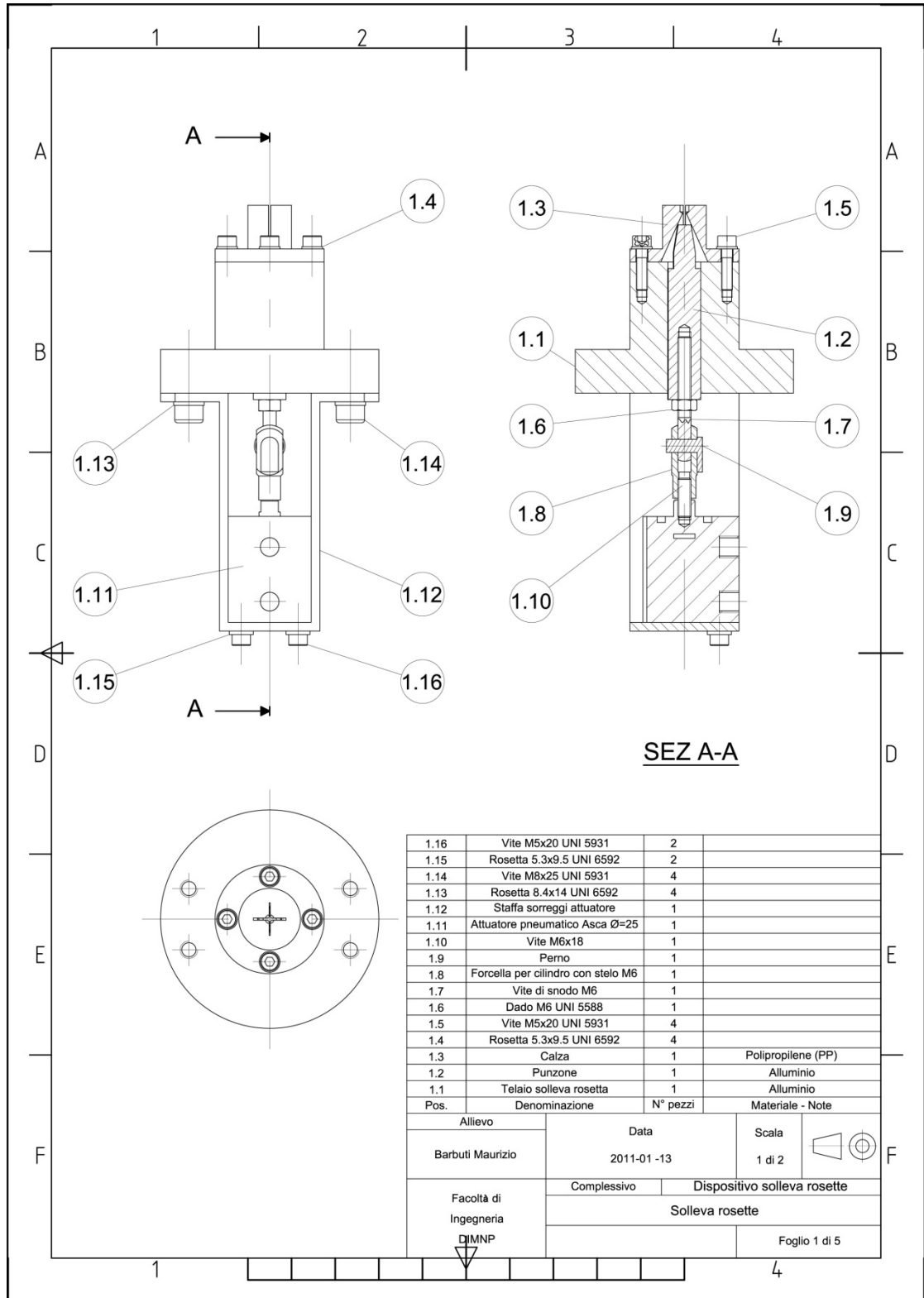


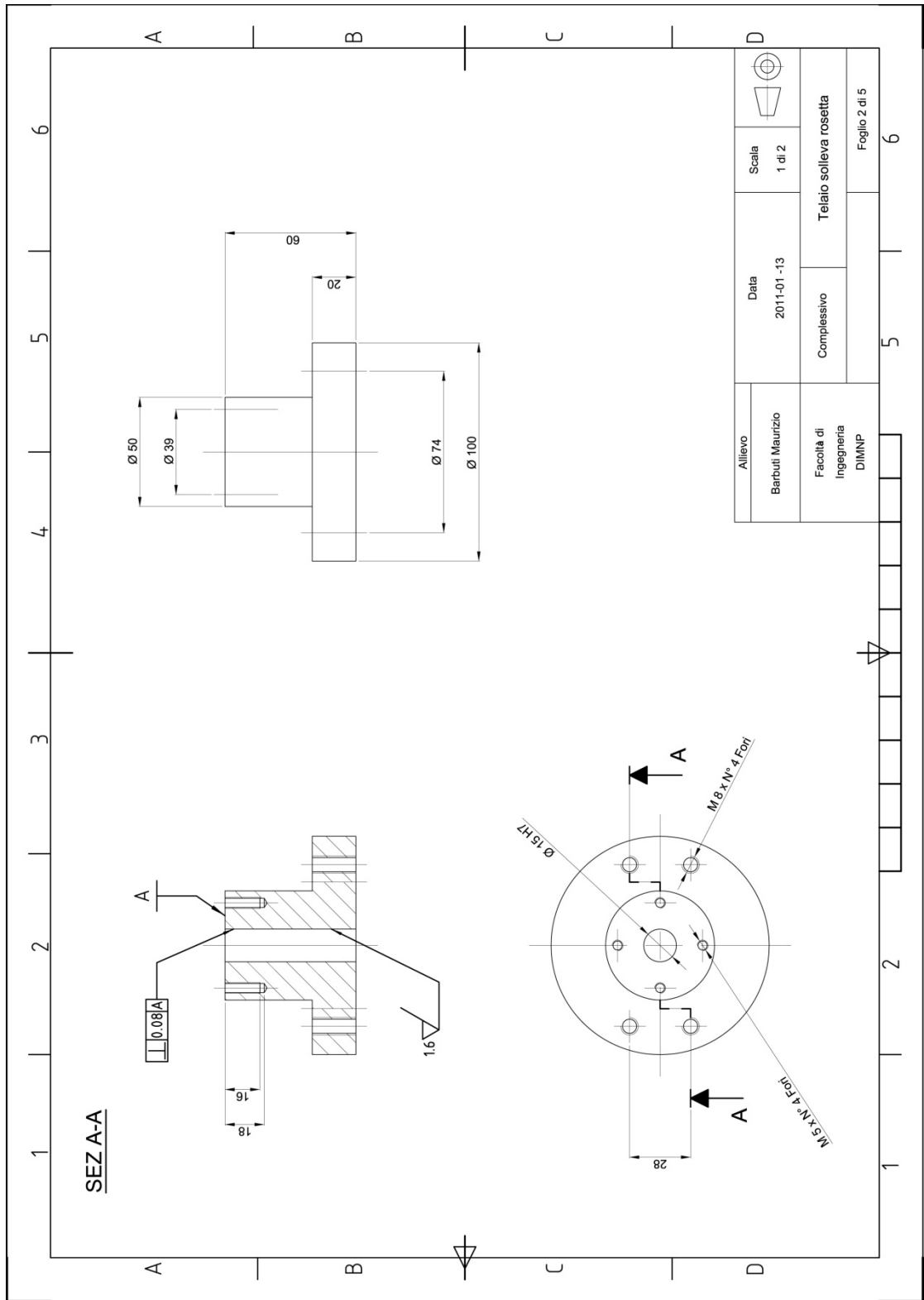


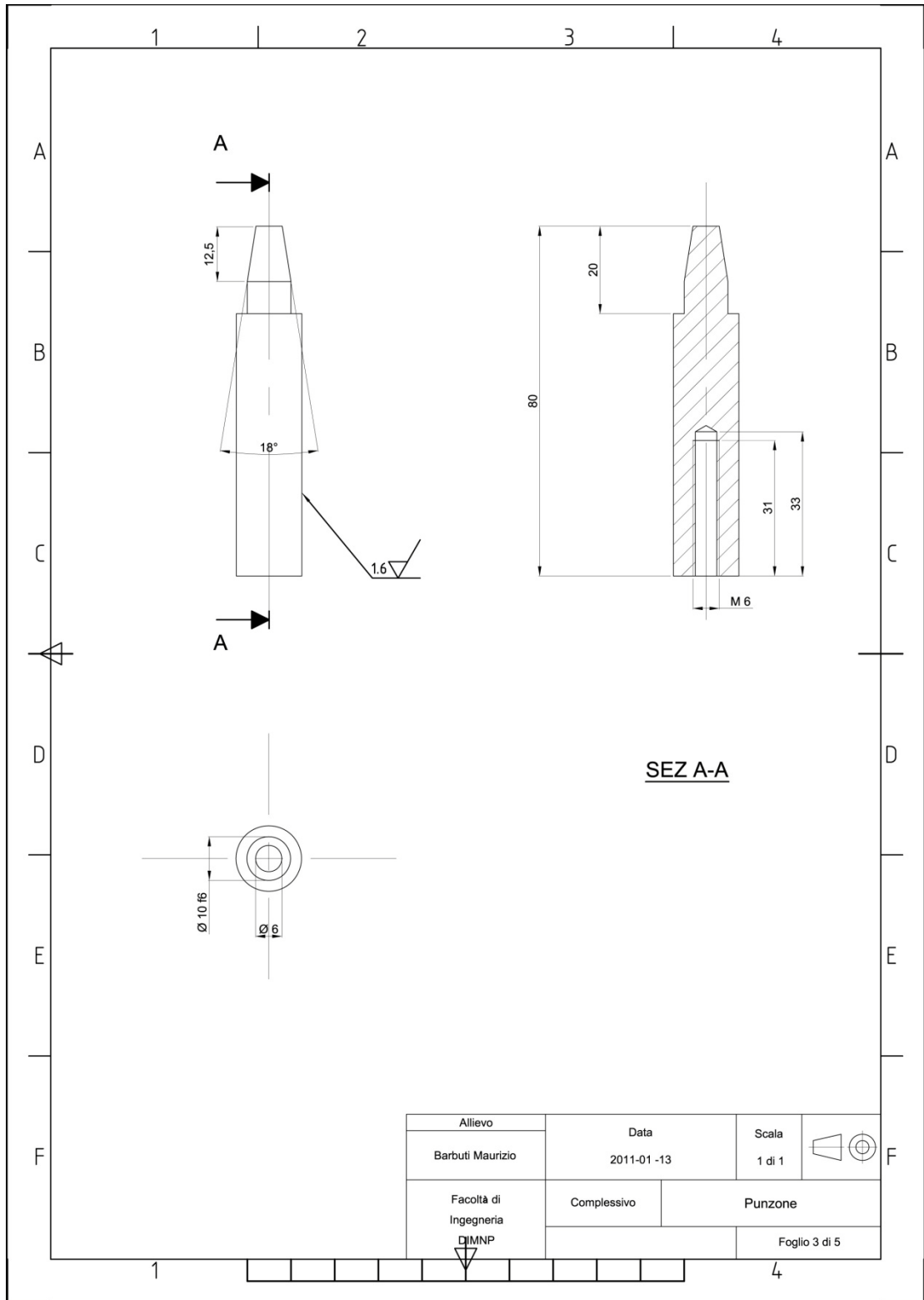




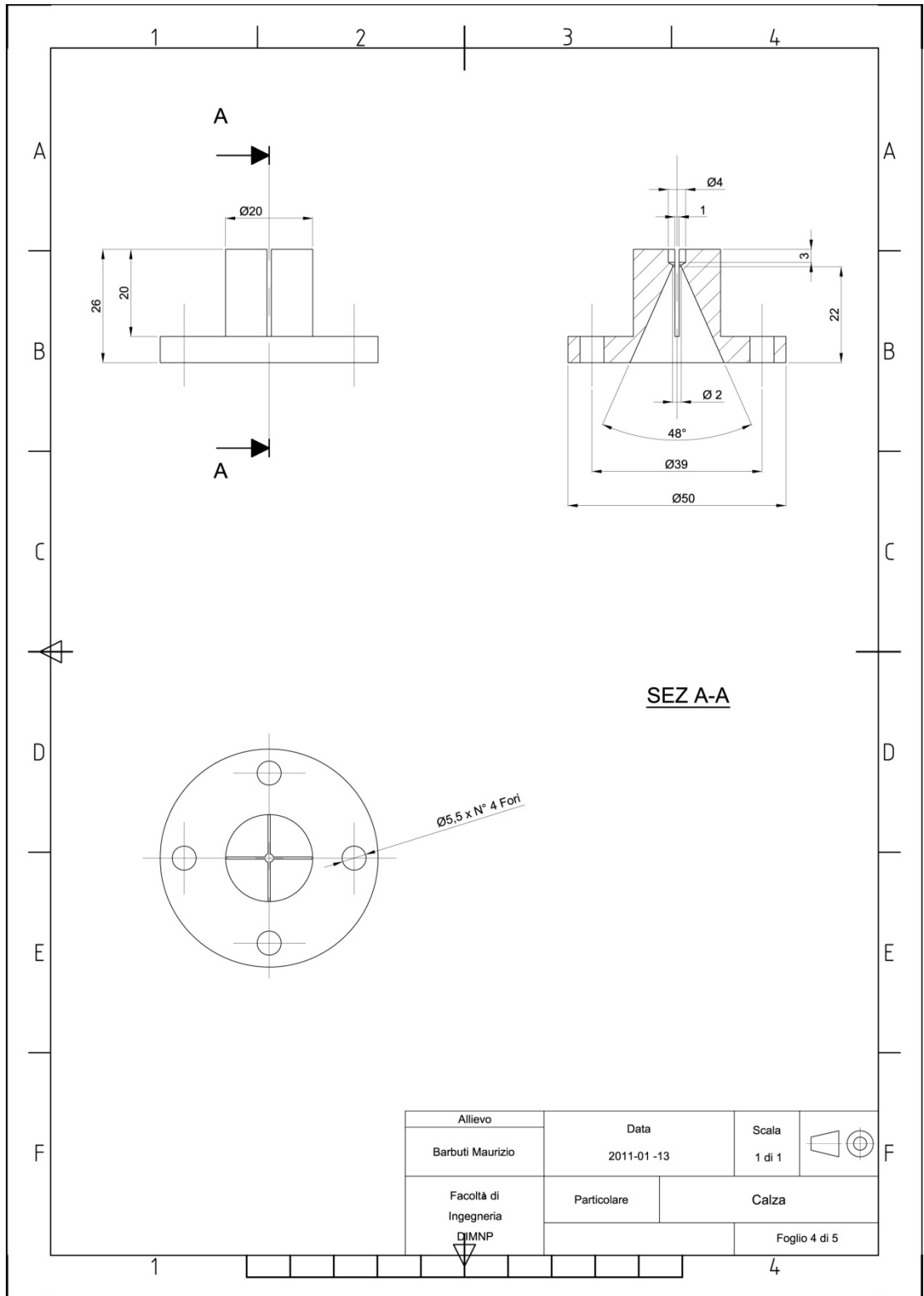
7.3.5. Disegni dispositivo solleva rosette automatizzato

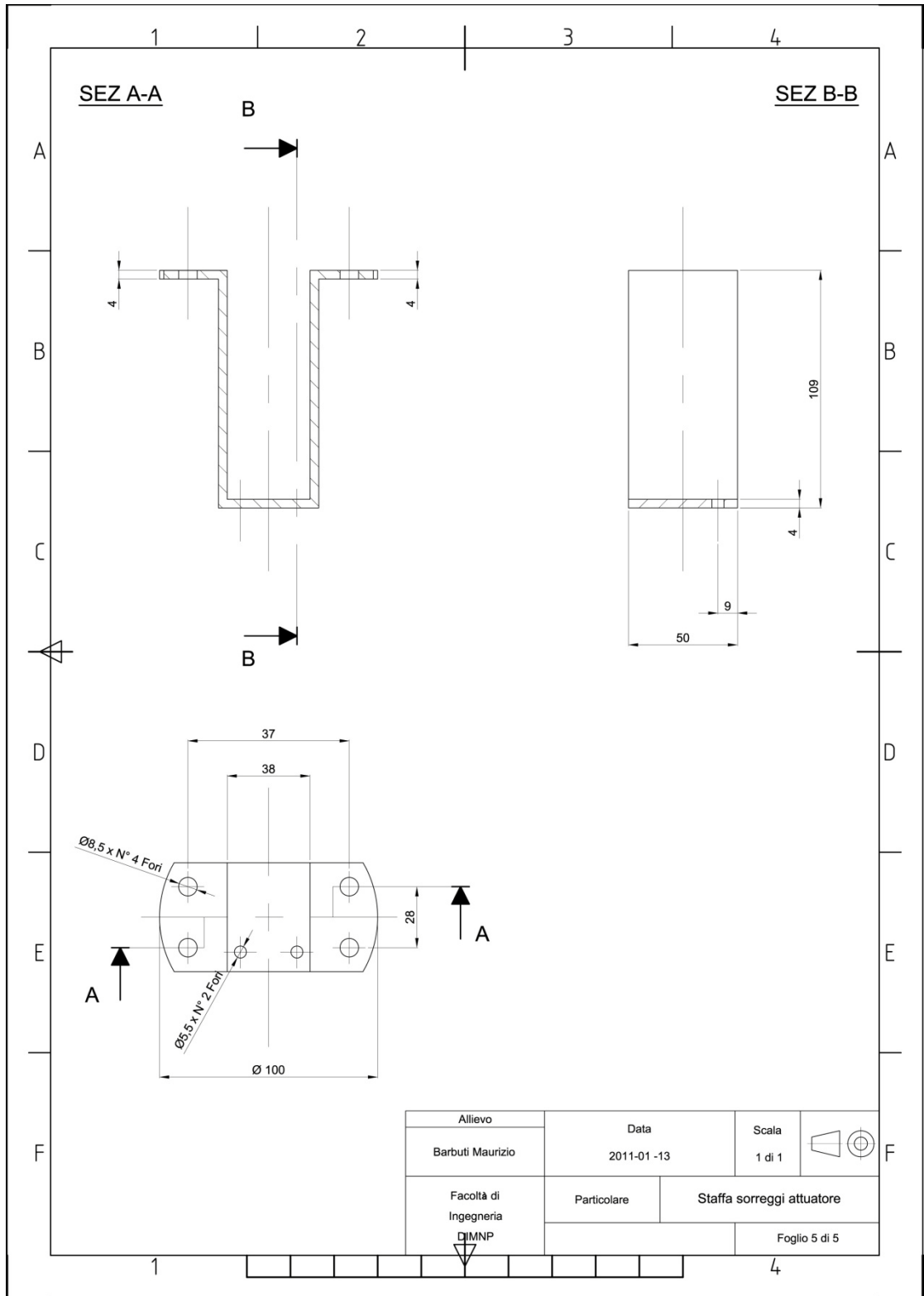






Alievo	Data	Scala	
Barbuti Maurizio	2011-01 -13	1 di 1	
Facoltà di Ingegneria DIMNP	Complessivo	Punzone	
			Foglio 3 di 5





8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Tsuchitani S., et al., "*Measurement of the Surface Force in Micro Structures and Its Reduction*" Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers, 30/2:136-142 1994.
- [2] Tsuchitani S., Suzuki S., et al., "*Theoretical Study on the Surface Force in Microstructures*" Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers. 32/5:637-645 1996.
- [3] Fearing R.S., "*Survey of Sticking Effects for Micro Parts Handling*", Proc. IROS '95, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2:212-217, 1995.
- [4] Arai F., Andou D., Nonoda Y., Fukuda T., Iwata H., Itoigawa K., "*Micro Endeffector with Micro Pyramids and Integrated Piezoresistive force Sensor*", Proc. IROS 2:842-849 1996.
- [5] Adamson A.W., "*Physical Chemistry of Surfaces*", Wiley&Sons, Fifth edition, pp. 58-59, 1990.
- [6] Bark C., Binnenboese T., "*Gripping with low viscosity fluids*", IEEE Int. Workshop on MEMS, 301-305,1998.
- [7] Böhringer K.F., Prasad R., McDonald N.C., "*Design, fabrication and characterization of single crystal silicon latching snap fasteners for micro assembly*", Proc. of ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition (IMECE'95), 1995.
- [8] Zesch W., Brunner M. , Weber A., "*Vacuum tool for handling micro-objects with a nano-robot*", Proc. ICRA, 1761-1766, 1997.
- [9] El-Khoury M., "*Ice gripper handles micro-sized components*", Design News, September, pp. 8, 1998.
- [10] Böhringer, K.F., Fearing, R.S., Golgberg K.Y., "*Chapter Micro-assembly, to appear in The Handbook of Industrial Robotics*", Second Edition, Wiley & Sons, 1998.

- [11] Suzumori K., Iikura S., Tanaka H., "*Flexible Microactuator for Miniature Robots*", Proc. IEEE MEMS workshop, 204-209, 1991.
- [12] Peirs J., Reynaerts D., Van Brussel H., "*A Micro Robotic Arm for a Self Propelling Colonoscope*", Proc. Actuator '98, 576-579, 1998.
- [13] Tanikawa T., Arai T., Masuda T., "Development of Micro Manipulation System with Two-Finger Micro Hand", Proc. IROS, 2:850-855, 1996.
- [14] Weck M., Hümmler J., Petersen B., "*Assembly of hybrid micro systems in a large chamber electron microscope by use of mechanical grippers*", Proc. of SPIE, Micromachining and Microfabrication Process Technology III, 3223:223-229, 1997.
- [15] Carrozza M.C., Dario P., Menciassi A., Fenu A., "Manipulating Biological and Mechanical Micro-Objects Using LIGA-Microfabricated End-Effectors", Proc. ICRA, 1811-1816, 1998.
- [16] Ando Y., "*Micro Grippers*", J. Robotics Mechatronics, 2:214-217, 1992.
- [17] Breguet J.-M., Henein S., Mericio R., Clavel R., "*Monolithic Piezoceramic Flexible structures for Micromanipulation*", Proc. of the 9th Int. Precision Engineering Seminar, 397-400, 1997.
- [18] Bellouard Y., Clavel R., Gotthardt R., Bidaux J.-E., Sidler T., "*A New Concept of Monolithic Shape Memory Alloy Micro-devices used in Micro-robotics*", Proc. Actuator 98, 499-502, 1998.
- [19] Greitmann G., Buser R.A., "*Tactile microgripper for automated handling of microparts*", Sensors and Actuators, A53:410-415, 1996.
- [20] Keller C.G., Howe R.T., "*Hexsil Tweezers for Teleoperated Micro-Assembly*", IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 72-73, 1997.

- [21] Grutzeck H., Kiesewetter L., "*Downscaling of Adhesive and Capillary Grippers for Micro Assembly*", Micro System Technologies 98, 6th Int. Conf. On Micro Electro, Opto, Mechanical Systems and Components, 237-242, 1998.
- [22] Hélin P., Druon C., Sadaune V., "*A Microconveyor Using Surface Acoustic Waves in the HF Band*", Proc. Mecatronics '96, 580-582, 1996.
- [23] Reinhart G., Höppner J., "*Berührungslose Handhabung mit Leistungsschall*", Werkstattstechnik, 89/9:429-432, 1999.
- [24] Coutinho M.G., Will P.M., Viswanathan P.S., "*The Intelligent Motion Surface: A hardware/software tool for the assembly of meso-scale devices*", Proc. ICRA, 1755-1760, 1997.
- [25] Suh J.W., Glander S.F., Darling R.B., Storment C.W., Kovacs G.T.A., "*Combined Organic Thermal and Electrostatic Omnidirectional Ciliary Microactuator Array for Object Positioning and Inspection*", MEMS Workshop, 168-173, 1996.
- [26] Böhringer K.-F., Donald B.R., Mihailovich R., MacDonald N.C., "*A Theory of Manipulation and Control for Microfabricated Actuator Arrays*", IEEE MEMS, 102-107, 1994.
- [27] Böhringer K.-F., Suh J.W., Donald B.R., Kovacs, G.T.A., "*Vector Fields for Task-level Distributed Manipulation: Experiments with Organic Micro Actuator Arrays*", Proc. ICRA, 1779-1786, 1997.
- [28] Konishi S., Fujita H., "*Two-dimensional Conveyance System using Cooperative Motions of Many Microactuators*", Proc. IROS '96, 2:988-992, 1996.
- [29] Mita Y., Konishi S., Fujita H., "*Implementation of a micro conveyance system controller*", Proc. of the 3rd France-Japan Congress & 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2:583-588, 1996.
- [30] Böhringer K.F., Cohn M., Goldberg K., Howe R., Pisano A., "*Parallel microassembly with electrostatic force fields*", Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1204-1211, 1998.

- [31] <http://www.ee.washington.edu/research/mems/videos/index.htm>
- [32] Alting L., Kimura F., Hansen H.N., Bissacco G., “*Micro Engineering*”, Annals of the CIRP, 52/2:635-657, 2003.
- [33] Shu L., Lenau T., Hansen H., Alting L., “*Biomimetics Applied to Centering in Microassembly*”, Annals of the CIRP, 52/1:101-104, 2003.
- [34] Arai F., Andou D., Fukuda T., “*Adhesion forces reduction for micro manipulation based on micro physics*”, Proceedings of the 9th International Workshop on Micro Electromechanical Systems (IEEE), p.354-359, 1996.
- [35] Kochan A., “*European project develops “ice” gripper for micro sized components*”, Assembly automation, Vol. 17 No 2, p.114-115, 1997.
- [36] Eriksson T., Hansen H.N., Mazzola S., “*Automation of microfactories: towards using small industrial robots*”, Proceedings of the 1st International Conference on Multi Material Micro manufacture (4M), Karlsruhe, Germany, p. 287-290, 2005.
- [37] Grutzeck H., Kiesewetter L., “*Downscaling of grippers for micro assembly*”, Proceedings of 6th International Conference on Micro Electro, Opto Mechanical Systems and Components, Potsdam, 1998.
- [38] Lambert P., “*A Contribution to Microassembly: a Study of Capillary Forces as a gripping Principle*”. PhD thesis, Université libre de Bruxelles, Belgium, 2004.
- [39] Villavecchia V., Elgenmann G., “*Nuovo dizionario di merceologia e chimica applicata*”, vol.5.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il Prof. Ing. Marco Santochi e l' Ing. Gualtiero Fantoni per avermi dato l'opportunità di svolgere il lavoro di tesi presso il dipartimento di Ingegneria Meccanica sezione Produzione dell'Università di Pisa e per la loro disponibilità a dirimere i mie dubbi durante la stesura di questo lavoro.

Ringrazio l' Ing. Vinicio Tincani, per la sua continua presenza, la fiducia fin da subito dimostratami e per avermi guidato e seguito durante lo svolgimento del lavoro con consigli e confronti che hanno trasformato i miei dubbi in certezze.

Ringrazio tutti i componenti del laboratorio della Facoltà di Ingegneria Meccanica per il loro indispensabile contributo per la realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha dato tutto ciò che mi è servito per diventare quello che sono!

Ringrazio particolarmente mia sorella Serena per avermi seguito, anche nei momenti difficili, nella stesura di questa tesi.