

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

PROGETTO E SVILUPPO DI UNA CATENA DI MISURA DI
CURVE DI FORZA E SPOSTAMENTO

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT CHAIN
OF FORCE AND DISPLACEMENT

Relatore

Prof.ssa Milena Martarelli

Correlatore

Maria Teresa Calcagni

Tesi di Laurea di

Antonio Azzarone

A.A 2020/2021

INDICE

1. INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE.....	1
1.1 Caso studio.....	2
1.2 Ergonomia.....	3
2. MATERIALI E METODI.....	5
2.1 Allestimento banco.....	6
2.1.1 Dispositivi hardware.....	6
2.1.2 Dispositivi software.....	12
2.2 Realizzazione banco prova.....	16
3. ANALISI DEI RISULTATI.....	19
3.1 Analisi forza agente sul grilletto.....	20
3.1.1 Taratura cella di carico.....	20
3.1.2 Taratura sistema di misura di forza basato sulla misura di deformazione con estensimetri.....	21
3.2 Analisi spostamento.....	27
3.2.1 Taratura potenziometro lineare.....	28
3.2.2 Confronto dei due sistemi di misura dello spostamento: potenziometro e sensore ottico a triangolazione.....	32
3.3 misura di forza, deformazione e spostamento.....	35
4. CONCLUSIONI.....	38

1.INTRODUZIONE E STATO DELL'ARTE

1.1 CASO STUDIO

Lo scopo di questo lavoro è realizzare un sistema di monitoraggio delle grandezze che maggiormente influenzano la funzione di prodotti industriali e di uso comune per renderne efficiente l'utilizzo.

In particolare, è stata valutata l'applicabilità di sensori per la determinazione dell'ergonomia di prodotti che sono sottoposti ad un utilizzo assiduo da parte dei consumatori o operatori nelle condizioni di funzionamento. Nel dettaglio, è stato preso in esame un grilletto per pistola ad aria compressa realizzato in Poliammide.

Il materiale presenta le seguenti caratteristiche:

- Buone proprietà meccaniche e termiche;
- Buona resistenza alla fatica;
- Buona resistenza chimica;
- Buona resistenza all'usura.

Si tratta di un oggetto frequentemente usato dagli operatori; quindi, il funzionamento e le grandezze da cui è influenzato sono state esaminate per poter permettere di progettare un prodotto performante e di facile utilizzo associandone i valori di forza e spostamento.

Tuttavia, tale studio può essere applicato anche ad altri prodotti di uso comune come impugnature per verniciatura, spray per uso medico... per cui a beneficiarne non sarebbero solo gli operatori durante le loro mansioni ma anche i consumatori di un prodotto con la stessa morfologia dell'oggetto in esame.

La scelta dei sensori è stata determinante in quanto la misura delle forze in gioco è stata fatta sulla configurazione di utilizzo quindi i dispositivi scelti dovevano essere in grado di avere ingombri esigui per poter essere introdotti nell'oggetto complessivo. La valutazione è stata fatta quindi non solo in base ai range di lavoro delle grandezze in gioco ma anche in base agli ingombri e all'applicazione sullo strumento in esame durante l'utilizzo.

1.2 ERGONOMIA

L'Ergonomia è una scienza applicata interdisciplinare che si occupa dell'interazione tra l'uomo e il suo ambiente.

L'Ergonomia, come riportato dal Centro Italiano di Ergonomia [401], è rilevante in tanti luoghi del vivere e dell'agire, è però particolarmente evidente nei sistemi sociotecnici complessi, in cui le performance sono il risultato delle azioni dell'intero sistema nella sua interezza. Tali sistemi sono condizionati da fattori che impattano sulla salute e sul benessere degli individui che li compongono e che influiscono sulla capacità individuale di interagire positivamente sull'ambiente, migliorando o peggiorando le performance del sistema nel suo complesso. Tra i fattori impattanti, alcuni tra i principali sono quelli derivanti da stress fisico e mentale, carenza di comunicazione, mancanza di motivazione e di promozione professionale.

Il termine Ergonomia deriva dalle parole greche *ergon*(lavoro) e *nomos*(legge), il primo accenno all'uso di tale parola lo si deve allo studioso polacco Wojciech Jastrzębowski nel 1857 nella sua opera *Il profilo dell'ergonomia, ovvero la scienza del lavoro, basata sulle verità tratte dalle scienze naturali*.

Tuttavia, è solo nei primi anni del Novecento che si cominciano ad applicare sistematicamente i concetti di Ergonomia e del Fattore Umano nella progettazione dell'ambiente costruito.

Oggi più che mai l'Ergonomia rappresenta un valore aggiunto nel marketing.

L'Ergonomia Fisica si occupa dell'interazione tra l'essere umano e le sollecitazioni che provengono dall'ambiente in cui agisce.

Più in generale, l'Ergonomia Fisica studia come le caratteristiche anatomiche, antropomeccaniche, biomeccaniche, e fisiologiche possano influire sul benessere e la prestazione degli esseri umani nell'ambiente fisico, sia esso naturale o costruito.

Nei luoghi di lavoro, più propriamente, l'Ergonomia Fisica si occupa della progettazione degli spazi, degli attrezzi e dei processi produttivi in funzione delle capacità specifiche dei lavoratori. In questo senso l'approccio ergonomico cerca di ottimizzare l'interazione tra uomo, macchina ed ambiente, intervenendo sull'organizzazione, razionalizzando i processi e lo spazio appunto, migliorando il sistema posturale e riducendo di conseguenza le condizioni di stress psico-fisico.

Una importante applicazione dell'Ergonomia Fisica è l'Ergonomia del lavoro che, attraverso lo studio dell'Ergonomia della postazione di lavoro, può migliorare significativamente il benessere dei lavoratori. Si ricordi, infatti, che una delle principali conseguenze di una carente Ergonomia dei luoghi di lavoro è il cosiddetto sovraccarico biomeccanico dell'apparato muscolo-scheletrico che è la principale causa di insorgenza di malattie professionali nei paesi industrializzati.

I principali fattori di rischio e le circostanze che possono determinare un sovraccarico biomeccanico sono i seguenti:

- Movimentazione manuale dei carichi;
- Attività di traino o spinta;
- Assunzione di posture incongrue;
- Esecuzione di compiti ripetitivi;
- Utilizzo di forza intensa;
- Carenza di momenti di recupero.

Nell'utilizzo di pistole ad aria compressa si deve valutare il fatto che si tratti di un compito con movimenti ripetitivi in cui vi è la necessità di applicare una forza, in questo caso concentrata sul grilletto. I valori ottimali di forza impressa sul grilletto affinché si eviti l'incorrere di malattie muscoloscheletriche sono di 10N per grilletti attivati con la pressione del solo dito indice, 20N per grilletti attivati con dito indice e medio e di 30N per grilletti attivati con quattro dita.

Importante è anche la valutazione della corsa del grilletto per evitare il rischio di tendiniti nel polso. Insieme alla corsa del grilletto viene valutata la dimensione dell'impugnatura della pistola; infatti, la distanza tra il dorso dell'impugnatura e il grilletto nella posizione disattivata deve essere compresa tra 50 e 60 mm affinché il grilletto possa essere attivato sempre con la falange media del dito e non la distale. Il materiale del grilletto, e in generale della pistola, deve essere caratterizzato da bassa conducibilità termica in quanto l'aria compressa tende a raffreddare la pistola, deve fornire un buon attrito per garantire una presa salda, avere bassa densità per minimizzare il peso e non contenere nickel per evitare problemi dovuti al contatto prolungato con la mano.

L'*International Journal of industrial Ergonomics* [2] riporta uno studio che prevede l'intervista di quindici operatori che utilizzano pistole ad aria compressa per vernice e studiato sei diversi tipi di pistole.

In particolare, è stata misurata la forza impressa sul grilletto durante l'utilizzo; la misurazione è stata fatta attraverso un dinamometro attaccato un filo al grilletto correlandone i valori di corsa del grilletto.

I dati di forza sono stati raccolti nel punto di metà corsa del grilletto e a grilletto completamente attivato, viene mostrato come in alcuni modelli si arrivi a raggiungere valori di forza addirittura superiori a 50N.

Il banco di prova per valutare i diversi sensori è stato realizzato al fine di ottimizzare l'ergonomia del grilletto per pistole ad aria compressa associando le grandezze di forza e spostamento, partendo dalle funzioni del componente. In particolare, il range di forza da considerare in questo caso specifico va da 0 a 50 N mentre lo spostamento da attribuirgli va da 0 a 2 mm.

2.MATERIALI E METODI

2.1 ALLESTIMENTO DEL BANCO

2.1.1 DISPOSITIVI HARDWARE

- **SENSORE DI FORZA: CELLA DI CARICO**

La cella di carico utilizzata è prodotta dalla Kistler [3], il codice del modello è 9313AA1, ed è mostrata in Figura 1.

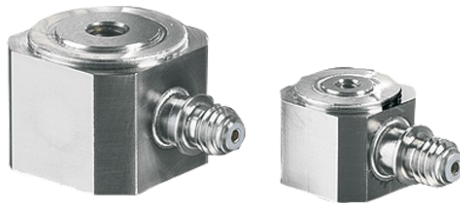


Figura 1. Cella di carico miniaturizzata.

Essendo una cella di carico di tipo piezoelettrico, è in grado di leggere sollecitazioni dinamiche e in particolare, per questo specifico sensore, di compressione. Il range di forza che è in grado di misurare è 0 - 5 kN ma come è illustrato in Figura 2, i range di misura calibrati tra cui poter scegliere in fase di utilizzo sono:

- 0 - 50 N
- 0 - 500 N
- 0 - 5000 N

La sensibilità è pari a -10pC/N cioè applicando una forza di 1 newton al sensore, viene prodotta una carica di -10 picocoulomb. Il segnale in uscita è espresso in volt e tramite un amplificatore viene inviato alla scheda di acquisizione della National Instrument, modello MY-DAQ. Il software di controllo dell'amplificatore della cella di carico è ManuWare ed è provvisto dall'azienda Kistler per l'utilizzo del dispositivo. Le dimensioni della cella sono 13x13x10 mm; essa presenta un foro filettato M2.5 per il suo fissaggio; il suo peso complessivo è di 10 g.

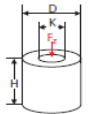
Technical data		Type	9313AA1
			
Measuring range	F_z	kN	0 ... 5
Permissible tensile force	F_z	kN	0 ... -0.5
Calibrated meas. ranges	F_z	kN	0 ... 0.05
	F_z	kN	0 ... 0.5
	F_z	kN	0 ... 5
Sensitivity	F_z	pC/N	≈ -10
Output signal		V	
Dimensions	D	mm	13
	K	mm	M2.5
	H	mm	10
Rigidity	$c_{A,z}$	kN/ μ m	≈ 0.56
Natural frequency	$f_n(z)$	kHz	>38
Weight		g	10
Operating temp. range ¹⁾		$^{\circ}$ C	-40 ... 120
Connector			KIAG 10-32 neg.
Deg. of protection to IEC/EN 60529			
screwed with cable (e.g. 1631C...)		IP65	•
welded with cable (e.g. 1983AD...)		IP68	•
screwed with cable (e.g. 1787A...)		IP67	•
Preloaded			
Ready for measurement			

Figura 2. Specifiche cella di carico miniaturizzata.

Il montaggio della cella di carico, sapendo che la superficie di misura ha diametro pari a 5 mm, può essere fatto in due diversi modi, come mostrato in Figura 3.

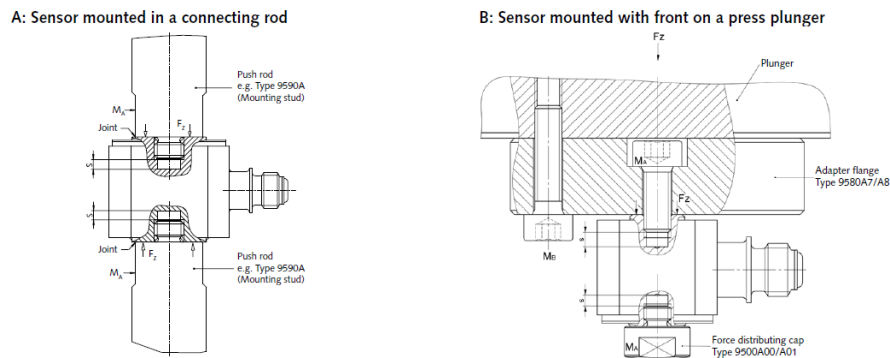


Figura 3. Illustrazioni per il montaggio.

• SENSORI DI DEFORMAZIONE: ESTENSIMETRI

Gli estensimetri che sono stati installati, nella configurazione a mezzo ponte di Wheatstone, sono HBM [4] di tipologia 1-LY11-3/120 a hanno resistenza pari a 120 Ω . Lo schema tipico di un estensimetro è riportato in Figura 4.

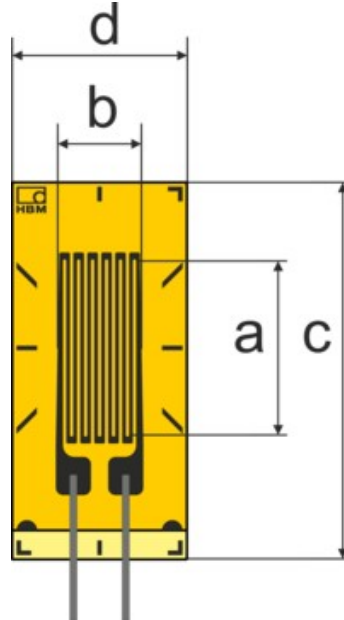


Figura 4. Estensimetro HBM.

L'incollaggio degli estensimetri è stato fatto tramite colla cianoacrilata dopo aver effettuato una pulizia accurata delle superfici d'utilizzo con carta vetrata prima a grana più spessa poi a grana più fine, terminando con garza imbevuta di acetone. La saldatura è stata fatta sui terminali dei sensori in modo che fossero collegati al canale di lettura della scheda di acquisizione alloggiata al sistema Spider 8 che rileva ed elabora dati tramite il software CatmanEasy.

In Figura 5, sono riportate le specifiche HBM degli estensimetri utilizzati in questa applicazione, in cui possono i parametri geometrici fanno riferimento alla Figura 4.

Ordering number ¹⁾	Pcs. per pack	Nominal (rated) resistance Ω	Dimensions [mm]				V_{max} ³⁾	Solder terminals	Pre-ferred types ⁴⁾
			Measuring grid		Carrier				
			a	b	c	d			
1-LY1□-3/120	10	120	3	1.6	8.5	4.5	4	LS7	1, 3

Figura 5. Specifiche estensimetri utilizzati.

• SENSORE DI SPOSTAMENTO: POTENZIOMETRO

Il potenziometro è di tipo 3046-L-1 [5], prodotto Bourns ed è caratterizzato da range massimo di misura di 3.8 mm. Esso è illustrato in Figura 6. Lo strumento può operare ad una temperatura compresa tra -55°C e $+125^{\circ}\text{C}$. Il periodo di vita stimato del potenziometro affinché mantenga standard di misura adeguati è pari 500000 cicli.

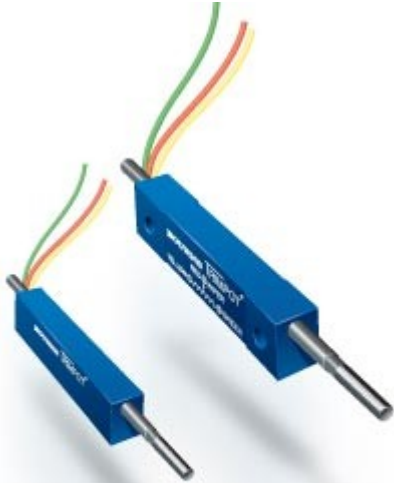


Figura 6. Potenziometro lineare.

Ulteriori specifiche sono riportate in Figura 7. Il potenziometro è stato collegato alla scheda di acquisizione MY-DAQ per poter rilevare ed elaborare lo spostamento.

Specifications[†]	
Standard Electrical Travel	0.15, 0.25, 0.35 in. (3.81, 6.35, 8.89 mm)
Standard Resistances	1K to 50K ohms ($\pm 20\%$)
Independent Linearity	$\pm 5\%$
Resolution	Infinite
Power Rating @ 70°C (158°F)	0.125 watt
Operating Temperature Range	-55°C to $+125^{\circ}\text{C}$
Temperature Coefficient	1000 PPM/ $^{\circ}\text{C}$
Insulation Resistance	50 megohms @ 500 VDC
Backlash	Negligible
Shaft Actuating Force	2N max. @ 21°C
Life	500,000 cycles
Shock	50 G for 7ms
Vibration	20 G, 10-2K Hz

Figura 7. Specifiche potenziometro lineare.

- **SENSORE DI SPOSTAMENTO OTTICO A TRIANGOLAZIONE**

Il dispositivo utilizzato per le prove è un M25L/20 prodotto dalla MELsensor [6]. Esso è rappresentato in Figura 8. Caratterizzato da un range di misura ± 10 mm, deve essere posizionato ad una distanza di 65 mm per garantire una misurazione corretta e può lavorare in un ambiente con temperatura compresa tra 0 e 50 °C. La sorgente luminosa ha una potenza di 1 MW e una lunghezza d'onda di 675 nm; il segnale in uscita è misurato in volt e può assumere un valore compreso tra ± 10 V. La frequenza di campionamento è di 125 kHz. Anche per la lettura dati del laser è stato collegato alla scheda di acquisizione MY-DAQ.



Figura 8. Sensori ottici a triangolazione MELsensor.

- SISTEMA DI ACQUISIZIONE DEGLI ESTENSIMETRI:
SPIDER8

Lo Spider8 [7] è un sistema di misura elettronico per misurazioni di variabili meccaniche come deformazione, forza, pressione, accelerazione e temperatura. Tutto ciò che condiziona il segnale, sollecitazioni per trasduttori passivi e amplificazione, digitalizzazione, interfaccia computer e tecnologia di connessione per un massimo di otto canali, è riunito in un unico alloggiamento. Lo Spider8, riportato in Figura 9, è connesso al computer tramite la porta stampante o attraverso un'interfaccia RS232 ed è pronto all'uso immediato.



Figura 9. Spider8.

- SCHEDA DI ACQUISIZIONE: NI-MY-DAQ

La scheda MY-DAQ, si veda Figura 10, prodotta dalla National Instrument [8] è un sistema di conversione dati da analogico a digitale. Combina una serie di strumenti plug-and-play basati su computer con portabilità per la progettazione anche al di fuori del laboratorio.



Figura 10. Scheda d'acquisizione MY-DAQ.

2.1.2 DISPOSITIVI SOFTWARE

• SOFTWARE MANUWARE PER IL CONTROLLO DELLA CELLA DI CARICO

Il software ManuWare [9] offre uno strumento multiuso per impostare i parametri degli amplificatori industriali. Al momento della connessione al PC questi strumenti sono identificati con una funzione di AutoScan ed elencati nel programma con il loro stato chiaramente mostrato. Le finestre di dialogo su misura per ogni particolare strumento rendono la configurazione dei parametri molto intuitiva. Una visualizzazione grafica delle misurazioni di prova e le funzioni ausiliarie per la messa in scala della misurazione indiretta aiutano l'utente a impostare le applicazioni di misurazione della grandezza da misurare. Il numero di canali di misurazione supportati contemporaneamente è limitato solo dalla potenza del computer utilizzato. Le impostazioni dei dispositivi completamente configurati possono essere salvate sul PC. In Figura 11, l'interfaccia per l'utilizzo del dispositivo: nel nostro specifico caso, è possibile visualizzare sia la forza sia il voltaggio.

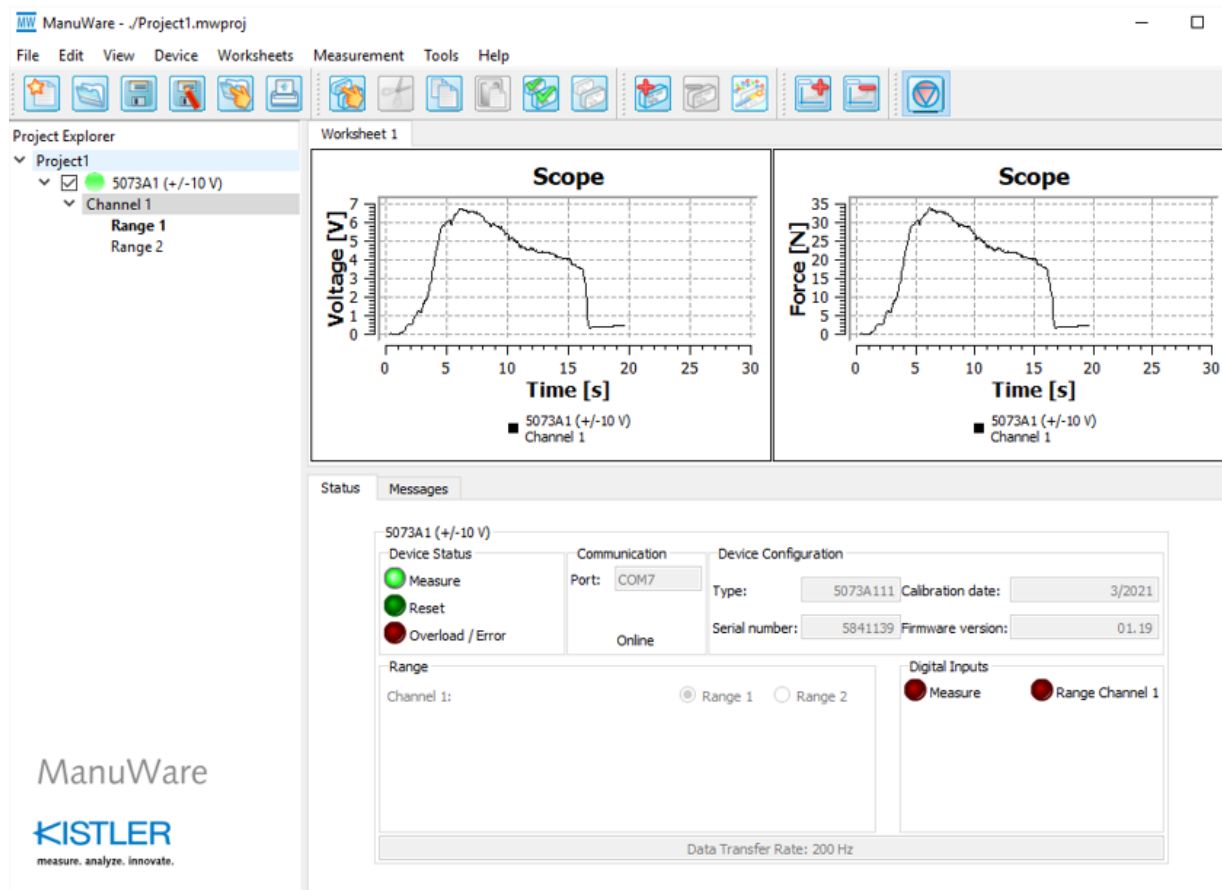


Figura 11. Interfaccia ManuWare.

- SOFTWARE CATMAN EASY PER IL CONTROLLO DEGLI ESTENSIMETRI

Catman Easy [10] è il software che permette l'acquisizione, visualizzazione e analisi dei dati provenienti dagli estensimetri. Catman Easy permette elaborazione in tempo reale di tutti i dati in entrata, offre supporto video completo in parallelo alla misurazione e confronta set di dati di grandi dimensioni.

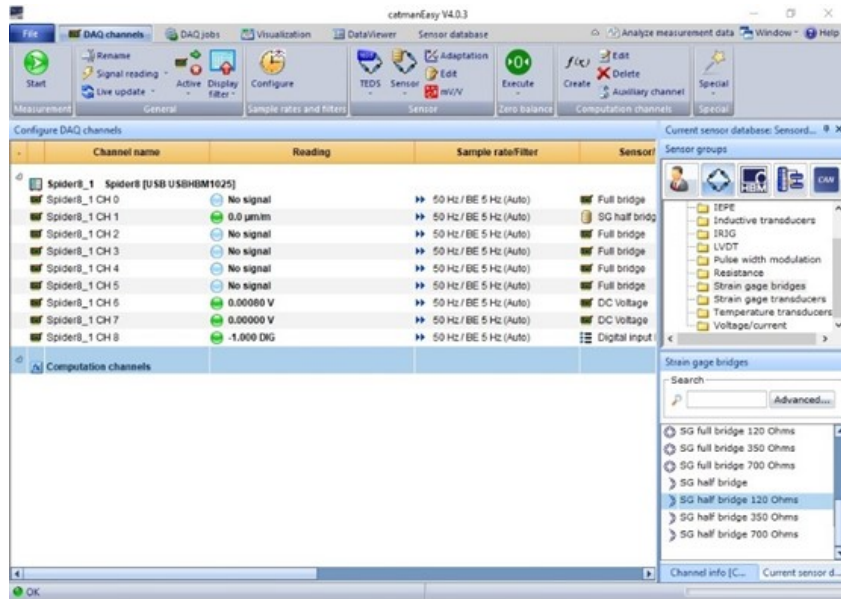


Figura 12. Interfaccia impostazione canali.

Nella schermata in Figura 12 è possibile vedere i canali dello Spider 8 dove è possibile scegliere la tipologia di sensore per l'acquisizione dei dati. In questo caso è stato utilizzato il canale 1, con rilevamento degli estensimetri in configurazione a mezzo ponte. Il sistema permette di settare i parametri di acquisizione in apposite finestre, quella per la definizione della frequenza di campionamento è raffigurata in Figura 13.

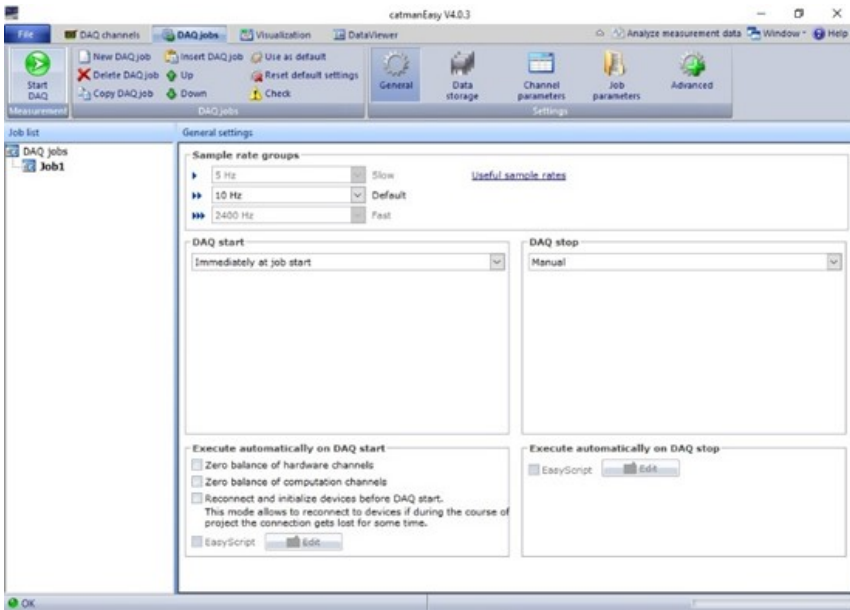


Figura 13. Schermata per impostare frequenza.

In Figura 14 è riportata una misura degli estensimetri collegati al banco: selezionando il canale è possibile visualizzare la misura, in tempo reale del dispositivo connesso.

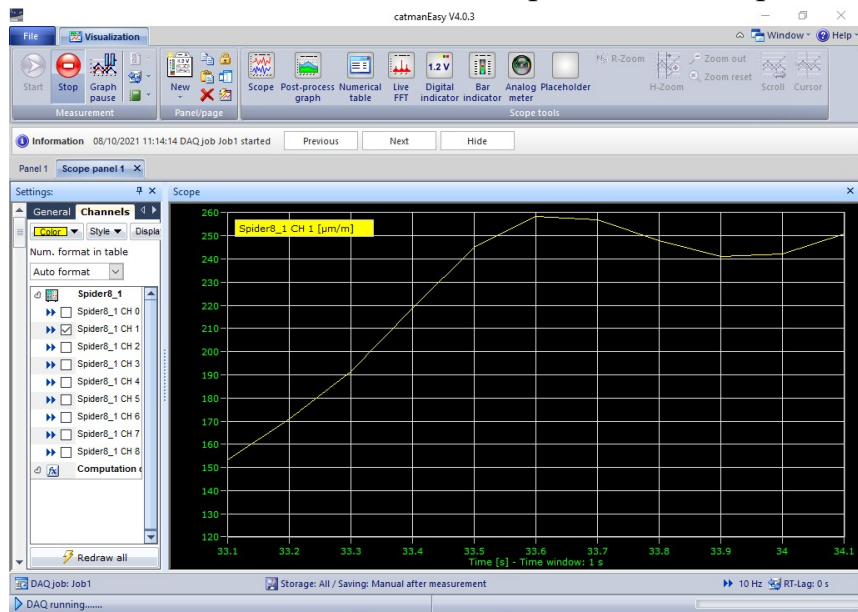


Figura 14. Schermata di visualizzazione durante la misura degli estensimetri.

- **SOFTWARE DI CONTROLLO DELLA SCHEDA NI-MY-DAQ:
LABVIEW**

Labview è un software per applicazioni che richiedono test, misurazioni e controllo con rapido accesso agli hardware e ai dati. Questo software offre un approccio alla programmazione di tipo grafico che aiuta a visualizzare ogni aspetto dell'applicazione includendo la configurazione degli strumenti, misurazione dei dati e debugging. Questo sistema permette di integrare sistemi di misurazione di diverse case produttrici. In Figura 15, è riportato lo schema del codice, detto anche VI o Virtual Instrument, per l'acquisizione dei dati tramite MyDAQ. Lo stesso codice sarà poi utilizzato anche per l'acquisizione dei dati misurati dal sensore di spostamento a triangolazione laser e dal potenziometro.

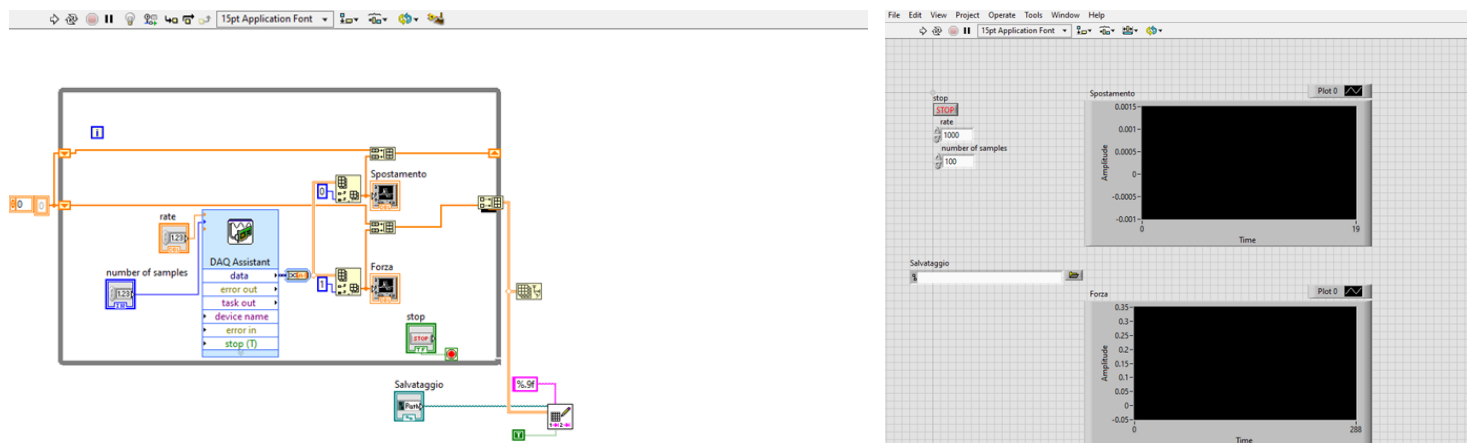
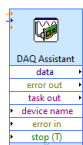


Figura 15. Schermata di acquisizione LabView.

Di seguito sono riportati i componenti del circuito di misura:

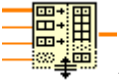
la regione più esterna indica un ciclo while, e ciò permette di acquisire in maniera continua le grandezze d'interesse, una volta attivato.



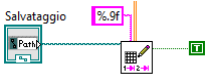
DAQ ASSISTANT: Scheda d'acquisizione all'interno della quale è possibile gestire i canali di acquisizione.



INDEX ARRAY: Indicizzazione del vettore, viene usato per entrambi i sensori per poi comunicarlo ai grafici.



BUILD ARRAY: Costruzione della matrice su cui registrare i dati acquisiti dai sensori.



Catena per la registrazione dei dati sulla memoria del PC.

- **SOFTWARE DI ELABORAZIONE DATI: MATLAB**

Per l'elaborazione dei dati invece è stato utilizzato il linguaggio di programmazione MATLAB. Utilizzato per il processamento, il confronto e l'analisi dei dati ottenuti dalle acquisizioni.

2.2 REALIZZAZIONE DEL BANCO PROVA

Il banco è composto da una piastra in alluminio su cui sono stati predisposti dei fori passanti e filettati per il montaggio dei componenti.

La cella di carico è stata montata su una guida micrometrica fissata sul banco che tramite un registro a vite permettere di gestire il carico applicato. I dati misurati dalla cella di carico vengono trasmessi tramite cavo ad un amplificatore e infine al computer dove vengono letti dal software ManuWare e salvati tramite Labview per l'elaborazione.

Per l'applicazione degli estensimetri sono stati usati due grilletti, su di ognuno viene montato un estensimetro. Il punto di applicazione dell'estensimetro sugli oggetti è stato determinato sulla base di uno studio tramite Metodo degli Elementi Finiti (metodo FEM) del grilletto che ha permesso di identificare la zona di massima deformazione nella condizione di applicazione del carico sulla zona di tiro. La zona più sollecitata è quella della parte posteriore del grilletto, compresa tra il punto di fissaggio e il punto di applicazione della forza.

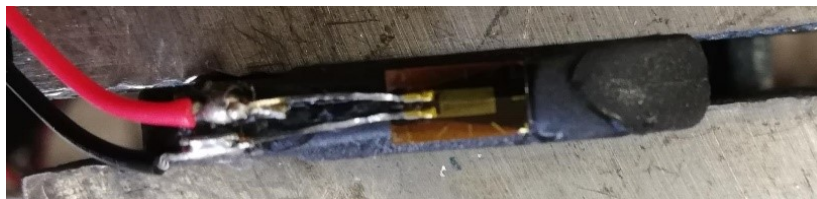


Figura 16. Estensimetro installato sul grilletto.

Gli estensimetri vengono collegati con la tecnica del mezzo ponte di Wheatstone, su di un grilletto viene applicato il carico mentre l'altro viene lasciato scarico (estensimetro "dummy"), in questo modo vengono eliminati tutti gli effetti dovuti alla temperatura che potrebbero andare ad interferire con la misurazione.

Gli estensimetri sono collegati allo Spider8 che ne permette la configurazione e la trasmissione di dati al computer e vengono poi salvati tramite il programma CatmanEasy. I dati dei sensori precedentemente illustrati vengono poi analizzati e confrontati in MATLAB.

I grilletti sono fissati tramite delle viti inserite nei fori predisposti sul banco.

Per misurare lo spostamento con il potenziometro lineare, questo viene montato tramite una morsa. L'asta di misurazione del potenziometro viene fissata a contatto con il dorso del grilletto nella configurazione in cui sul grilletto la forza è misurata tramite cella di carico. Nel caso in cui la forza viene misurata come grandezza derivata della deformazione mediante gli estensimetri non è possibile utilizzare il potenziometro in quanto non esiste superficie libera su cui possa essere applicato. Infatti, quasi tutta la superficie del grilletto è occupata dall'estensimetro.

Per poter misurare lo spostamento anche sul grilletto strumentato con estensimetro si è preferito utilizzare il sistema senza contatto ovvero il sensore ottico a triangolazione. La testa laser è stata fissata attraverso due viti al banco prestando attenzione che l'asse ottico sia perpendicolare alla superficie del grilletto.

Le configurazioni prese in considerazione per misurare forza e spostamento sono:

1. cella di carico – potenziometro, in Figura 17;
2. cella di carico – estensimetri – sensore ottico laser a triangolazione, in Figura 18;
3. sensore ottico laser a triangolazione e potenziometro, in Figura 19;

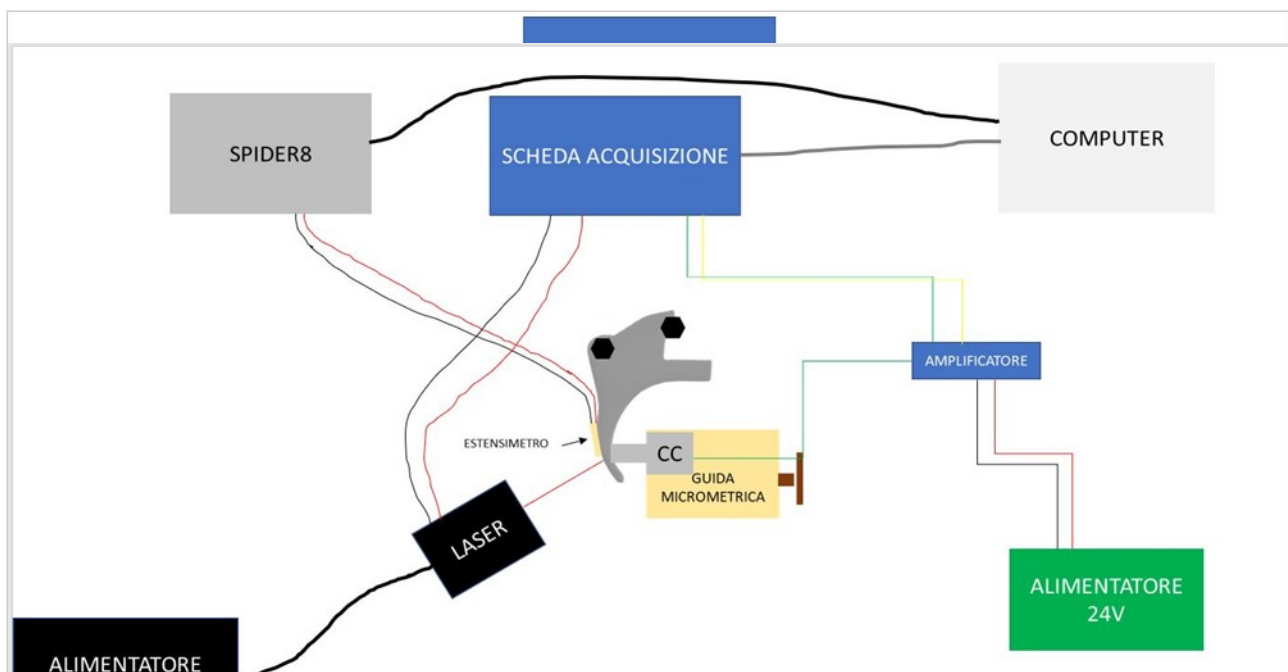


Figura 18. Configurazione con cella di carico, estensimetro e laser.

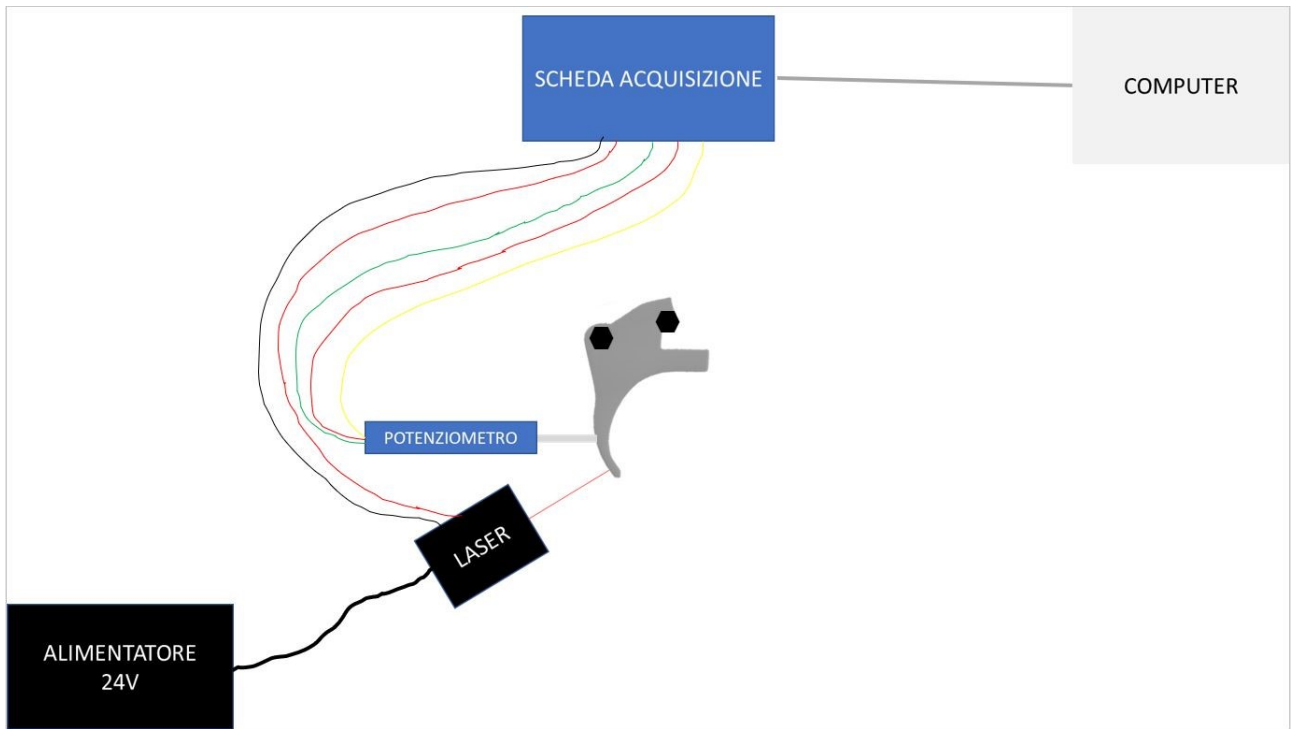


Figura 19. Configurazione con laser e potenziometro.

3. ANALISI DEI RISULTATI

3.1 ANALISI FORZA AGENTE SUL GRILLETTO

Si vuole valutare la forza applicata sul grilletto al fine di ottimizzarne le prestazioni. Vengono valutati diversi sensori al fine di comprendere quale sia la soluzione più efficace in sede di prototipazione: in particolare, è importante valutare quale sia il meno ingombrante per l'applicazione finale in modo che il sensore risulti il meno invasivo possibile.

Lo scopo principale è quindi quello di valutare l'affidabilità di misura e la metodologia di installazione di diversi sensori di forza.

3.1.1 TARATURA CELLA DI CARICO

Prima di effettuare le misurazioni si procede alla taratura della cella di carico. La cella di carico fornisce in uscita un segnale sottoforma di tensione elettrica misurata in volt, lo scopo della taratura è quello di trovare un fattore di conversione che permetta di trasformare il voltaggio in uscita in una misura di forza in newton. In questo caso è stato verificato che nonostante la configurazione, il sensore manteneva il fattore di conversione previsto dalle specifiche pari a 5 V/N.

Attraverso un filo legato ad un grilletto vengono applicati dei pesi con valore noto che andranno ad imprimere una forza, anch'essa nota e pari al peso delle masse applicate, sulla cella di carico.

Vengono così raccolti i dati di misurazione della cella di carico e confrontati con i valori dei pesi applicati.

Dopo diverse misurazioni e con un'attenta analisi dei dati raccolti si è arrivati a trovare un fattore di conversione pari a 5 N/V. Il fattore di conversione conferma il valore riportato anche nella configurazione desiderata.

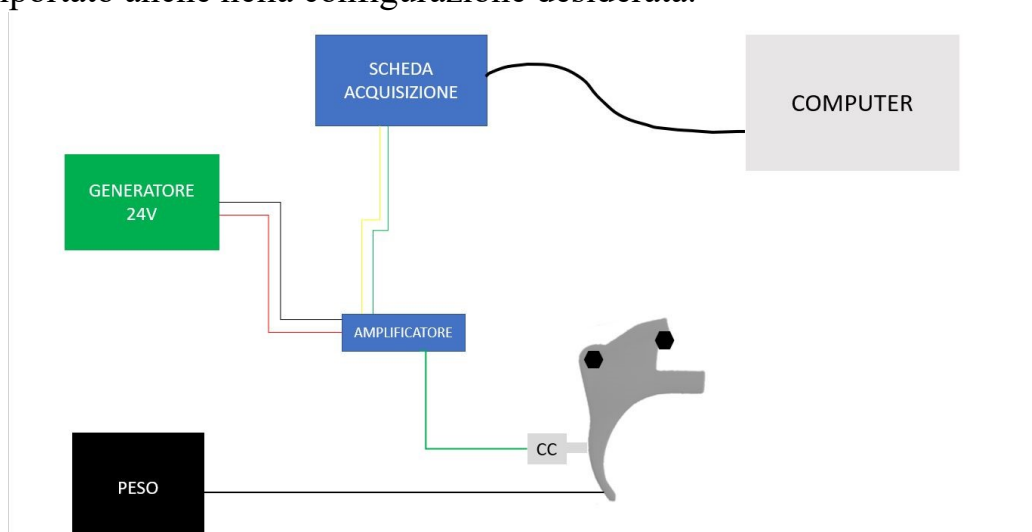


Figura 20. Schema del banco per taratura cella di carico.

3.1.2 TARATURA SISTEMA DI MISURA DI FORZA BASATO SULLA MISURA DI DEFORMAZIONE CON ESTENSIMETRI

Dopo l'installazione dei due estensimetri sui due grilletti, si procede all'acquisizione tramite circuito a mezzo ponte di Wheatstone.

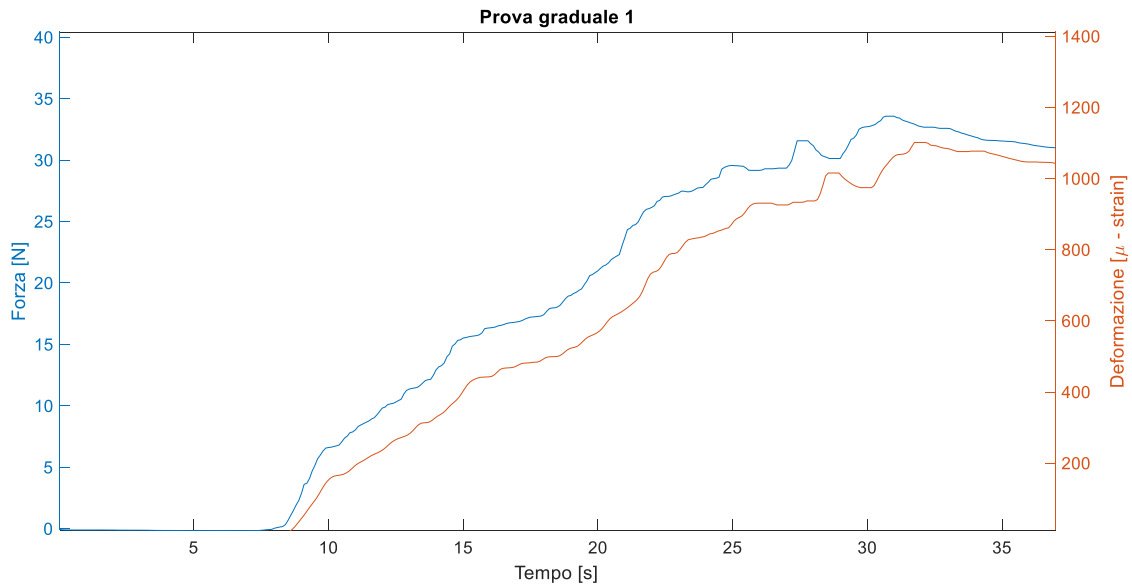
Nel sistema di acquisizione Spider8, attraverso il software CatmanEasy vengono inseriti i parametri relativi agli estensimetri installati a mezzo ponte di Wheatstone.

Questa prova è stata necessaria per tarare gli estensimetri in modo che fosse associato il valore della deformazione alla forza, misurata tramite la cella di carico così da trovare il fattore di conversione e da poter usare il sistema estensimetrico come trasduttore di forza nonostante misuri la deformazione di un oggetto sottoposto a sollecitazioni. Sono state effettuate diverse prove sia con variazione del carico graduale sia con carico impresso a gradino.

La variazione graduale serve a studiare qual è la ripetibilità della misura della deformazione rispetto alla misura della forza.

La variazione a gradino è servita per caratterizzare il sensore di deformazione: ad un valore di deformazione viene associato un valore di forza.

Di seguito sono riportate quattro prove graduali:



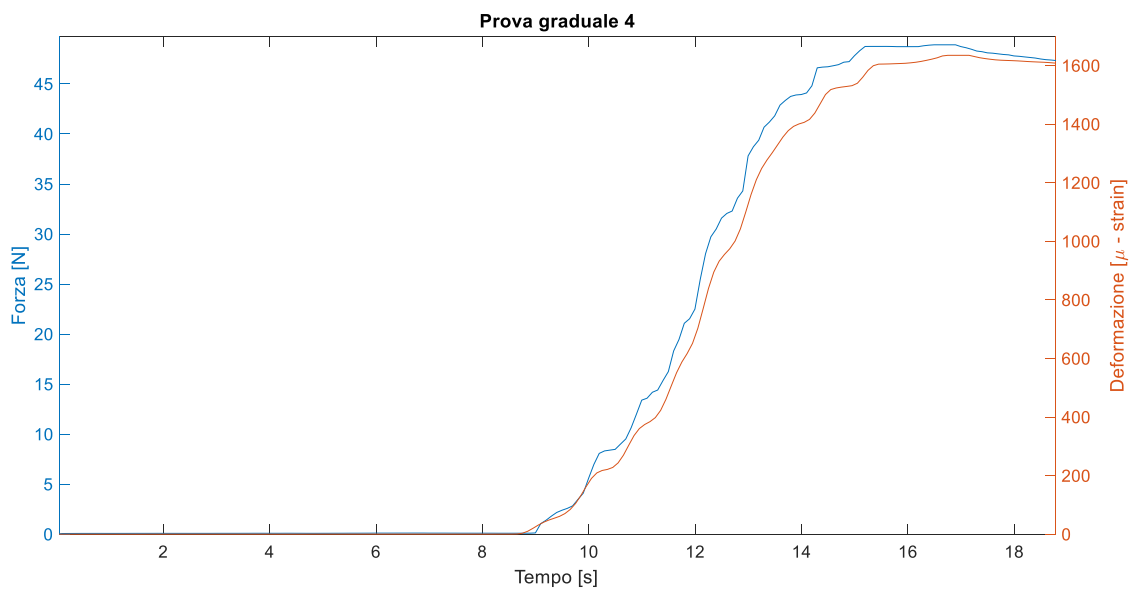
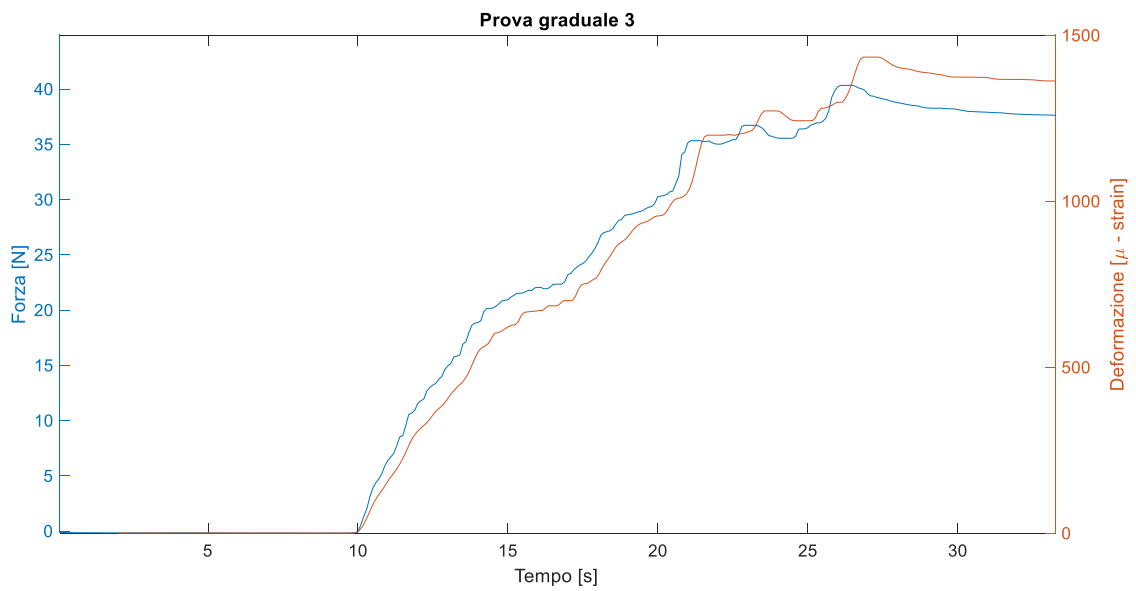
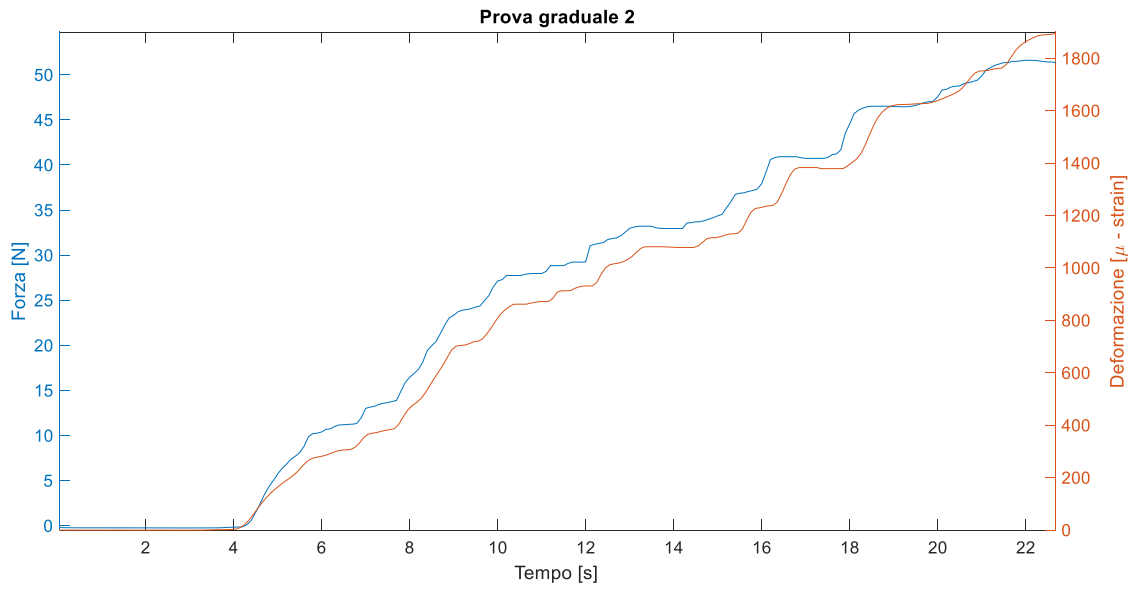
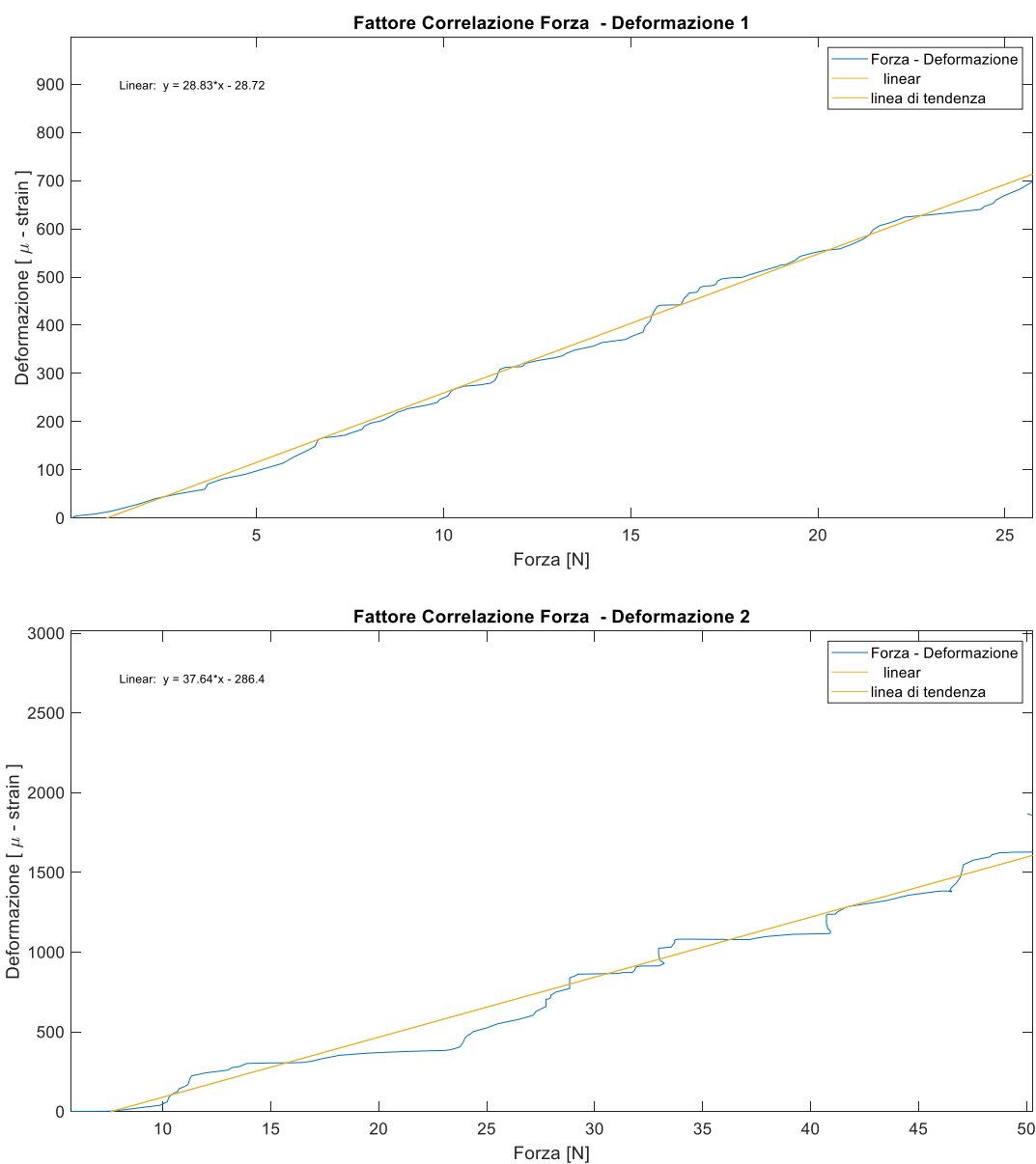


Figura 21. Misure di forza e deformazione per prove graduali.

Si può notare come forza e deformazione abbiano un andamento coerente tra loro, ciò mostra come il sistema estensimetrico permetta di misurare accuratamente la deformazione a cui è sottoposto il grilletto all'applicazione del carico e a tradurlo in una misura di forza.

Graficando la deformazione letta dagli estensimetri in funzione della forza misurata dalla cella di carico è possibile ricavare la curva ingresso-uscita del sistema estensimetrico. Come si può osservare nei grafici di Figura 22, la curva ingresso-uscita può essere rappresentata da una retta la cui pendenza rappresenta la costante di sensibilità statica del sistema estensimetrico.



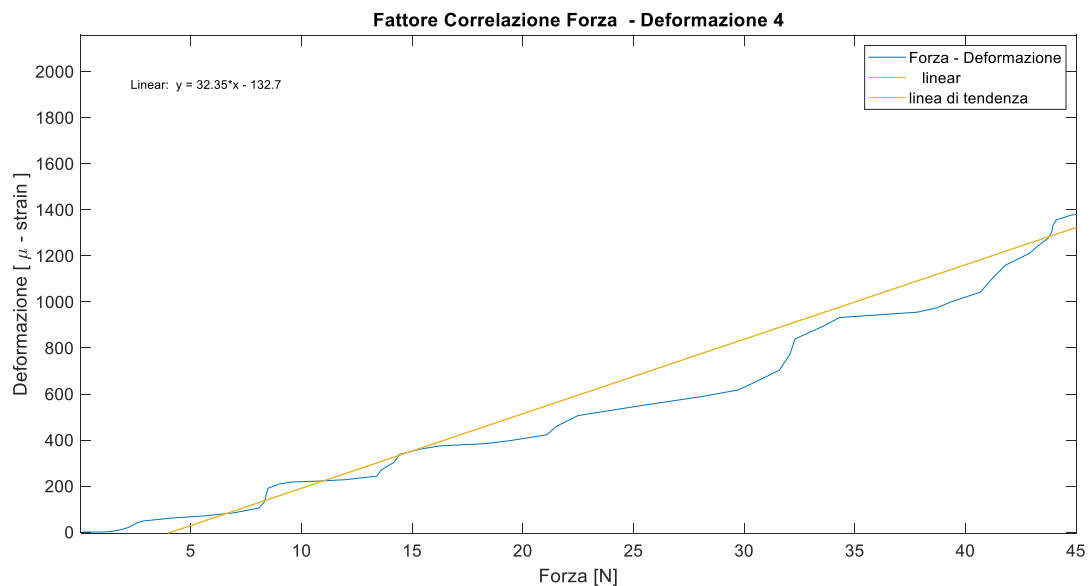
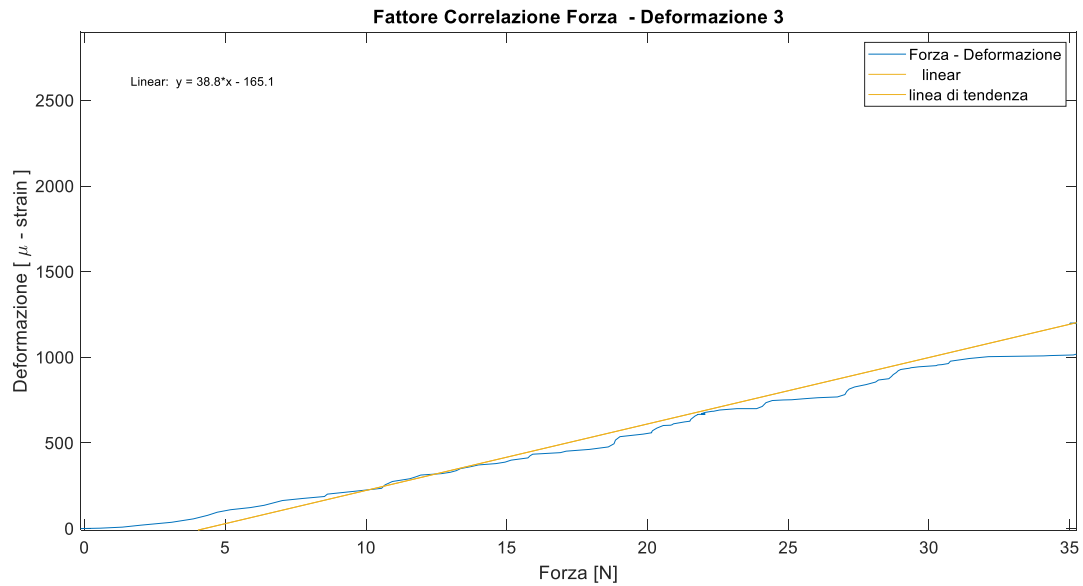
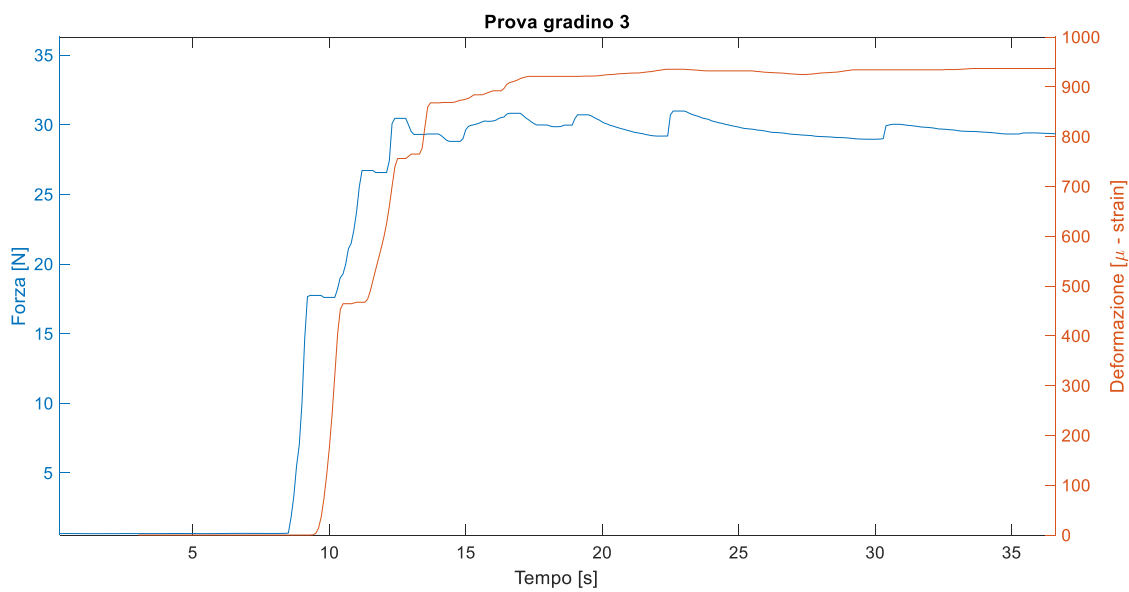
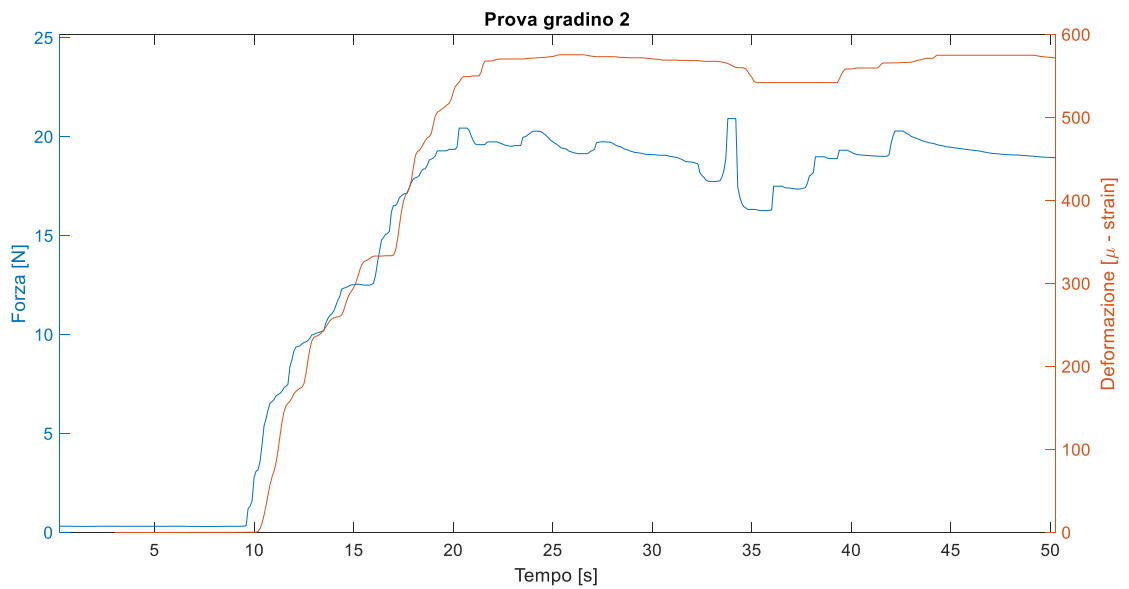
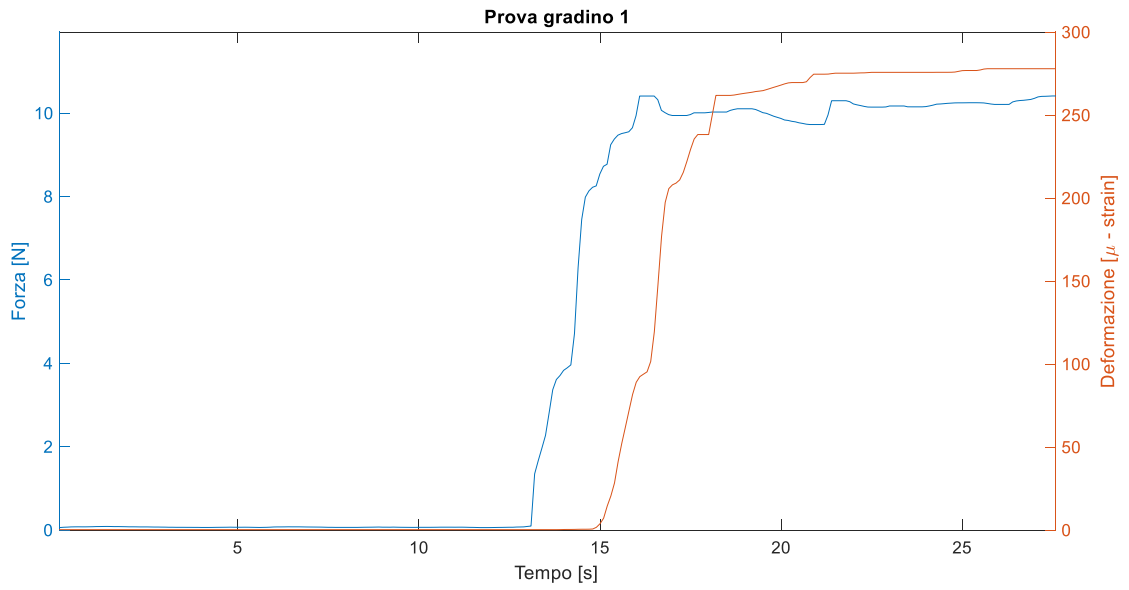


Figura 22. Correlazione tra forza e deformazione.

I coefficienti angolari delle rette che approssimano le curve riportate in Figura 22 assumono dei valori tra 28 e 38 N/ μ -strain; il loro valor medio è 34 N/ μ -strain, che viene assunto come fattore di taratura per il sistema estensimetrico.

Di seguito sono riportate quattro prove a gradino:

Il carico viene applicato in maniera molto veloce e con valore incrementale di 10 N per ottenere la curva di caratterizzazione degli estensimetri.



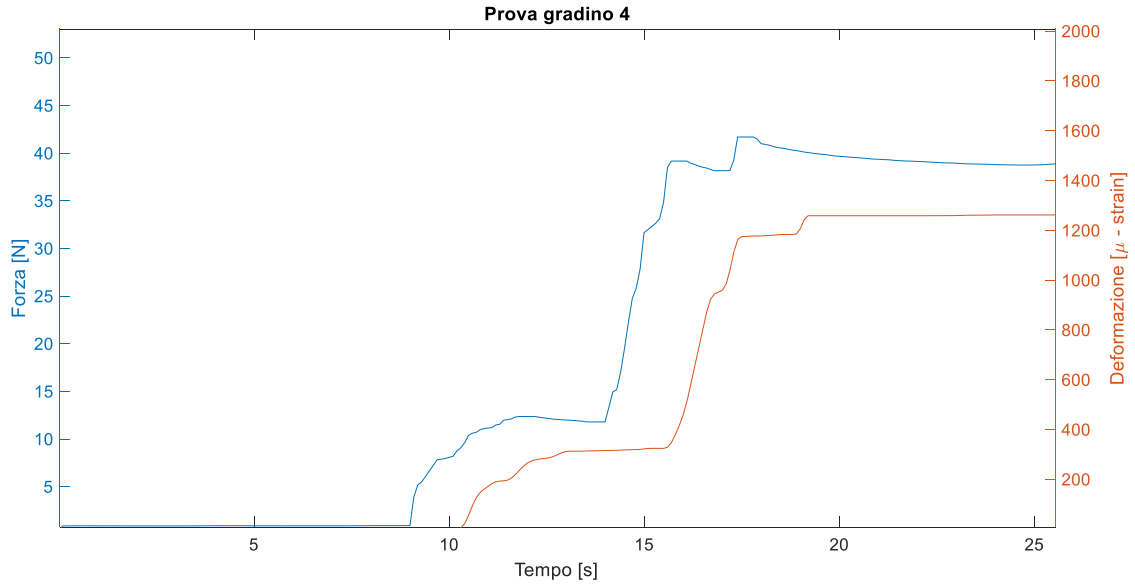


Figura 23. Misure di forza e deformazione per prove a gradino.

Anche per queste prove si estrapolano i dati per graficare una curva ingresso-uscita del sistema estensimetrico come riportato in Figura 24.

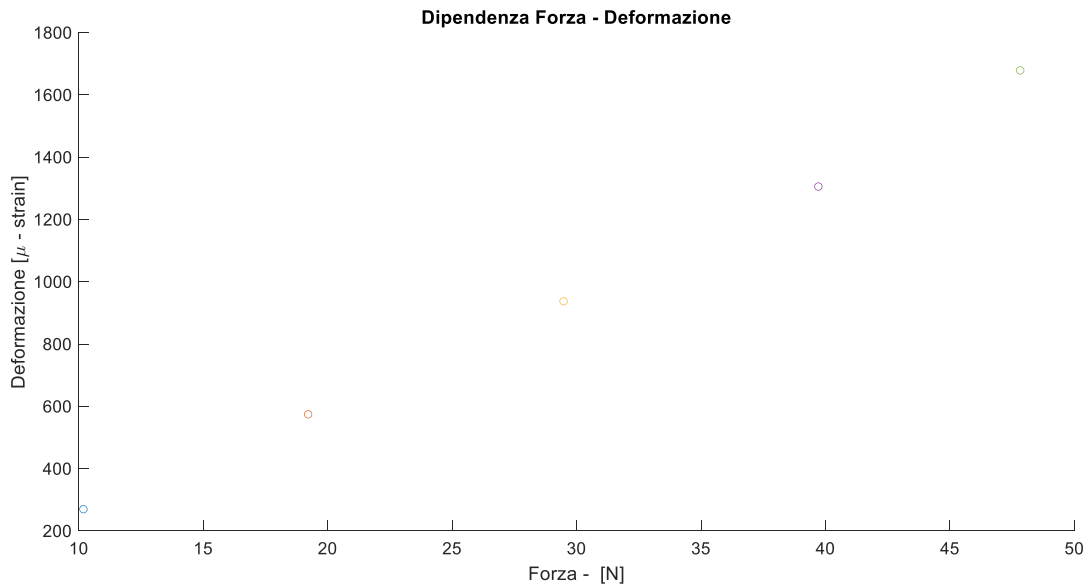


Figura 24. Curva di caratterizzazione forza-deformazione.

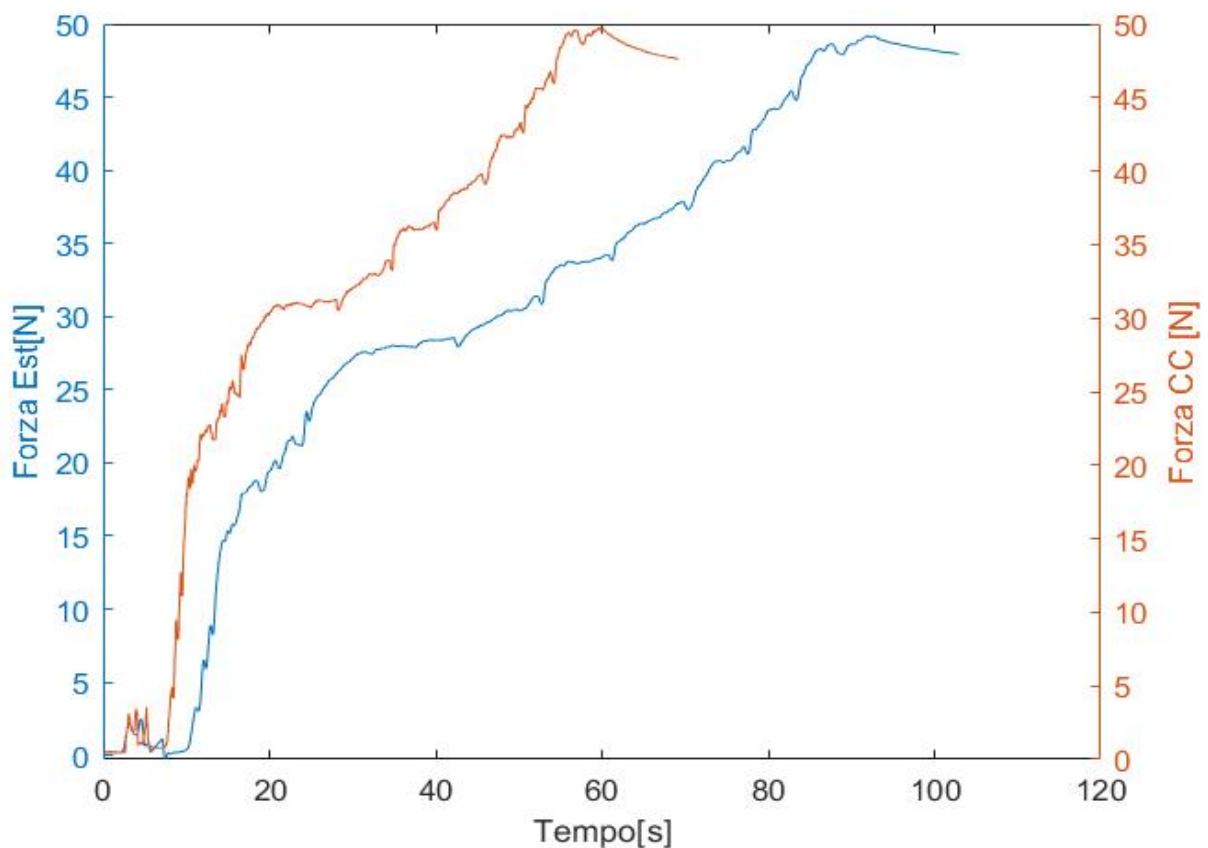


Figura 25. Misura di forza con estensimetro e cella di carico.

Impostando il fattore di conversione a 34 N/microstrain le misure di estensimetro e cella di carico risultano perfettamente coerenti.

3.2 ANALISI SPOSTAMENTO

Si vuole misurare lo spostamento in quanto è importante in relazione alla quantità di prodotto da elargire durante le operazioni di lavoro, in base alla posizione assunta dal grilletto nel tratto compreso tra posizione di disattivazione e di completa attivazione verrà applicata una diversa quantità di vernice.

Risulta anche importante la correlazione tra forza e spostamento al fine di poter avere una regolazione ottimale, l'andamento di forza e spostamento deve risultare lineare tra loro.

Per l'analisi dello spostamento vengono installati un potenziometro lineare e un sensore di spostamento ottico a triangolazione laser.

3.2.1 TARATURA POTENZIOMETRO LINEARE

Il segnale in uscita del potenziometro lineare è espresso in volt, si procede quindi alla taratura, statica e dinamica, per trovare il fattore di conversione per convertire il segnale in uscita in una misura di spostamento (millimetri).

1) TARATURA STATICA

Vengono forniti degli spostamenti noti attraverso una slitta micrometrica e vengono raccolti i dati in uscita forniti dal potenziometro lineare.

La slitta micrometrica è collegata ad un computer attraverso il quale è possibile impostarne i movimenti.

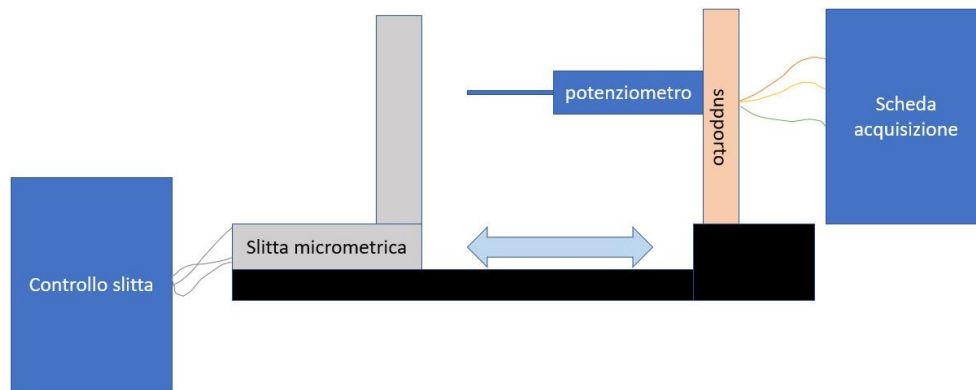


Figura 26. Configurazione banco per taratura statica potenziometro.

Sono forniti spostamenti pari ad un decimo di millimetro.

Viene costruita una tabella in cui sono riportati i valori di spostamento forniti e i valori del segnale in uscita espressi in volt.

Partendo da questi dati tabellati si costruisce un grafico.

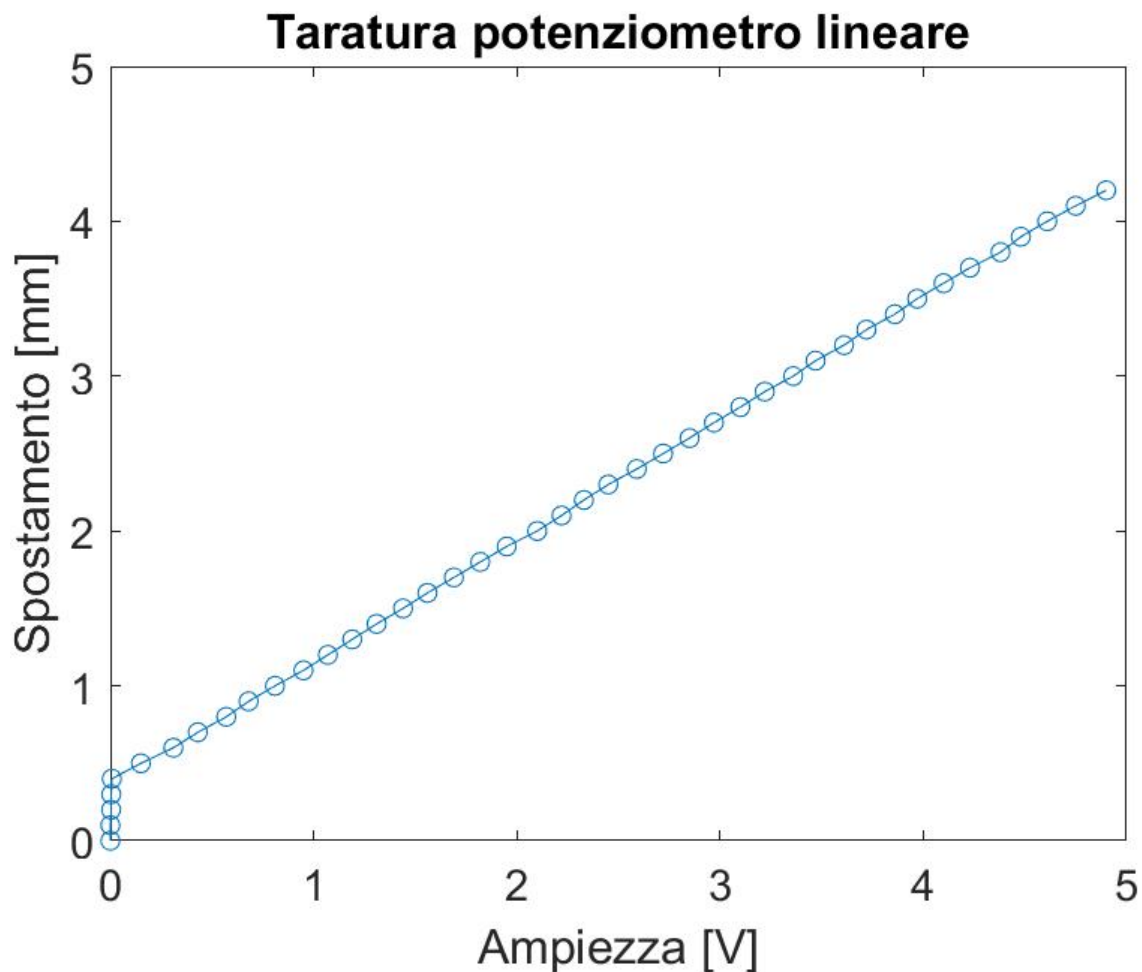


Figura 27. Taratura statica potenziometro lineare.

Si nota la linearità con cui il segnale in uscita segue l'andamento degli spostamenti e viene costruita la retta interpolante i punti.

La retta ha equazione $y[\text{mm}] = 0.8x[\text{V}] + 0.3$, il fattore di conversione o costante di sensibilità statica sarà quindi 0.8 mm/V .

2) TARATURA DINAMICA

La taratura dinamica viene effettuata al fine di valutare come varia la risposta del sensore al variare della frequenza.

La taratura viene effettuata con l'utilizzo di un macchinario per test universale prodotto dalla SiPlan.

Attraverso un computer è possibile impostare il ciclo di spostamento da effettuare, il numero di cicli e la frequenza; vengono effettuati diversi test con ciclo di

spostamento di 3 mm partendo da una frequenza di 1 Hz con numero di cicli pari a 100 cicli fino ad arrivare ad una frequenza di 10 Hz e 500 cicli.



Figura 28. Macchinario test universale SiPlan.

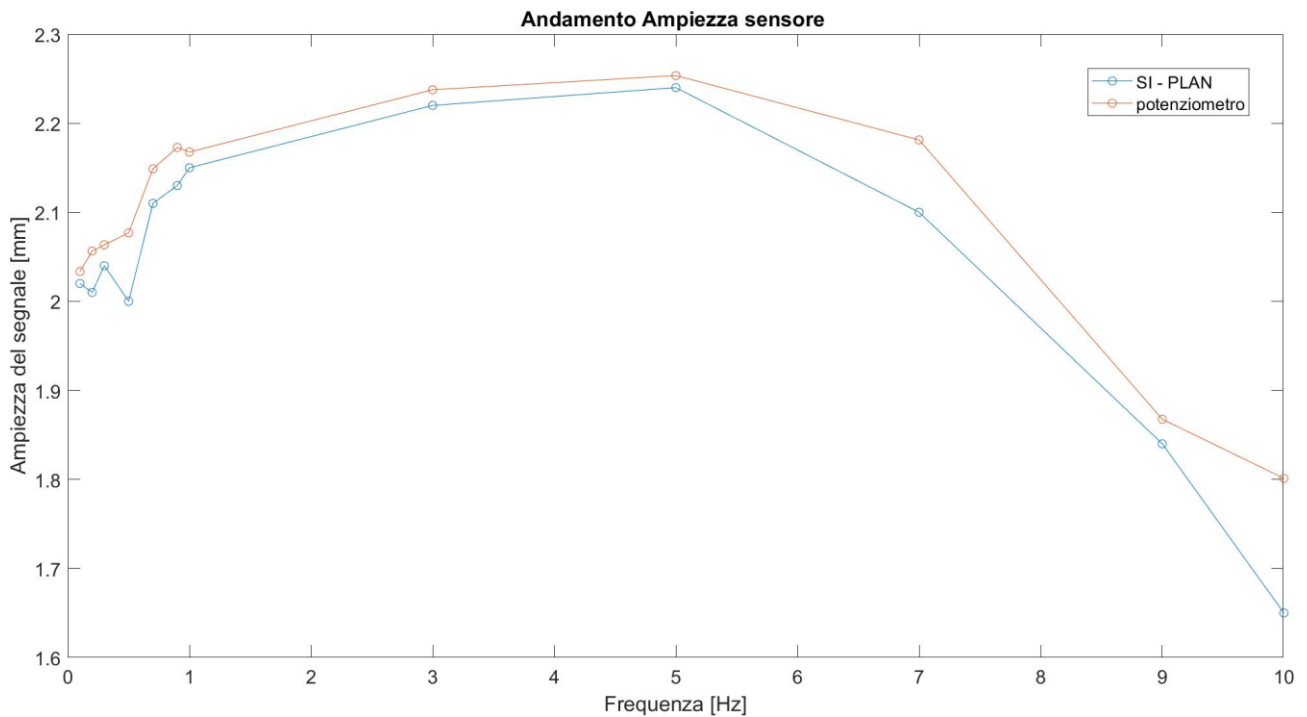


Figura 29. Ampiezze misurate da SiPlan e potenziometro.

Il grafico in Figura 30 mostra l'andamento delle ampiezze di spostamento fornite dalla macchina (curva in blu) e le ampiezze effettivamente misurate dal potenziometro (curva in rosso). Se si calcola il rapporto fra le ampiezze si ottiene l'ampiezza della funzione di risposta in frequenza del sensore che viene riportata in Figura 31. Questa curva si mantiene sufficientemente piatta in tutto il range di frequenza indagato e pertanto si può dedurre che il potenziometro lavora bene fino a 10 Hz. La differenza di misura tra lo spostamento effettivo della macchina e lo spostamento misurato dal sensore è di circa un decimo di millimetro e andando a calcolare il rapporto tra le due misure si può vedere come esso si attesti ad un valore circa pari a 1.2.

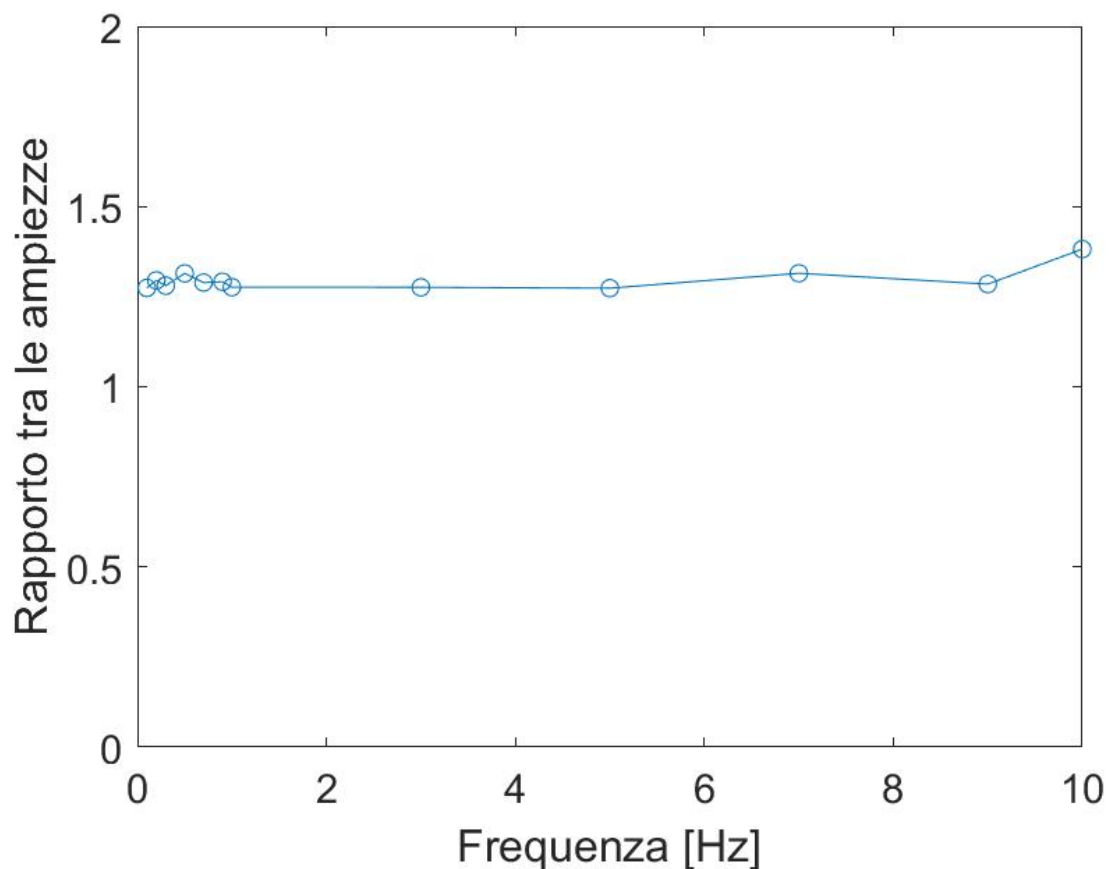


Figura 30. Ampiezza della funzione di risposta in frequenza ovvero rapporto tra le ampiezze misurate da Siplan e potenziometro.

3.2.2 CONFRONTO DEI DUE SISTEMI DI MISURA DELLO SPOSTAMENTO: POTENZIOMETRO E SENSORE OTTICO A TRIANGOLAZIONE

Come si può notare dalla Figura 19 che raffigura la disposizione dei sensori di spostamento per la misura dello spostamento del grilletto, il punto di applicazione del potenziometro è diverso dal punto in cui è focalizzato il sensore laser. Pertanto, per poter confrontare i dati di spostamento misurati dai due sensori nelle due posizioni diverse occorre prevedere quale sarà lo spostamento in tali posizioni. Nota la curva del profilo del grilletto, Figura 32, e la direzione di misura del sensore laser e quella del potenziometro (rispettivamente la retta blu e quella rossa in Figura 33), tramite un modello geometrico è possibile ricavare lo spostamento misurato dai due sensori provocato da una rotazione del grilletto intorno al suo fulcro. In Figura 34 vengono riportati gli spostamenti calcolati per i due sensori in funzione dell'angolo di rotazione del grilletto.

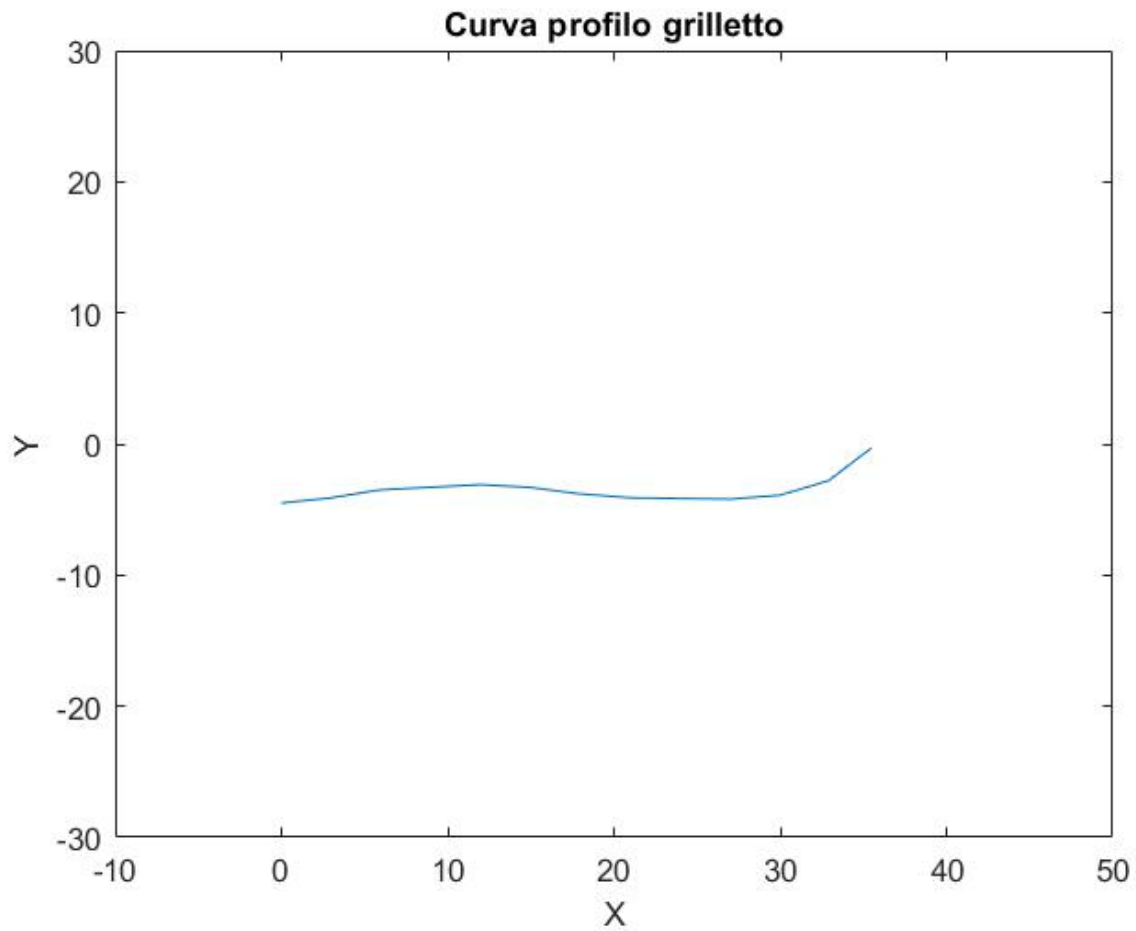


Figura 31. Curva di profilo del grilletto costruita tramite Matlab.

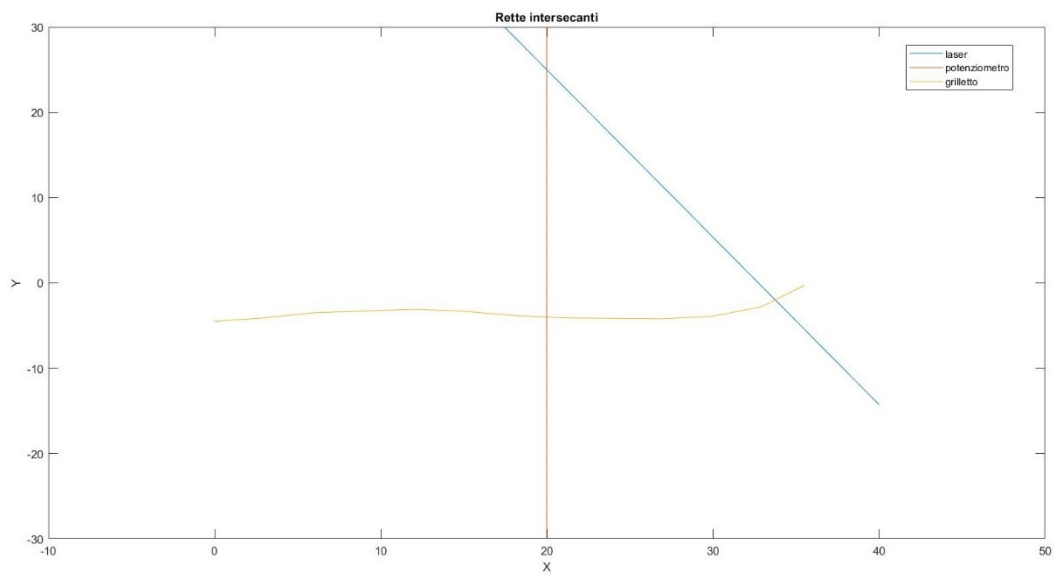


Figura 32. Rappresentazione tramite Matlab delle posizioni di potenziometro e laser rispetto al grilletto.

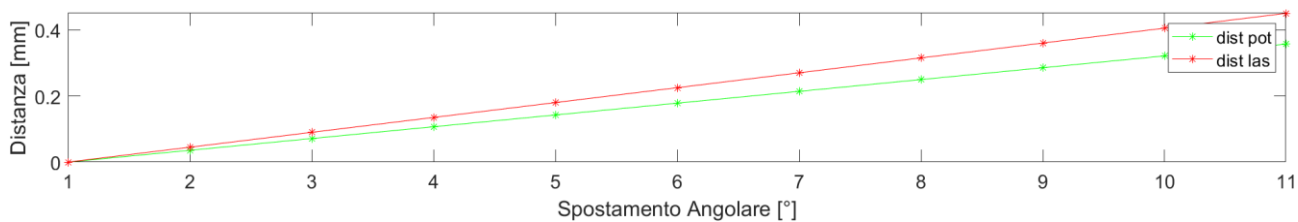


Figura 33. Andamento spostamenti misurati da potenziometro e laser.

Se si grafica lo spostamento misurato nella posizione in cui è applicato il potenziometro in funzione di quello misurato nel punto in cui è focalizzato il sensore laser è possibile stabilire una correlazione tra i due spostamenti, come riportato in Figura 35.

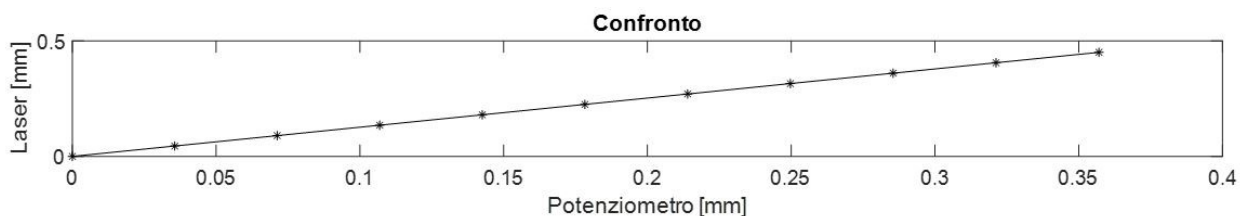


Figura 34. Correlazione tra gli spostamenti misurati da laser e potenziometro.

Il rapporto tra le due misure si attesta intorno ad un valore di 1.2, che permette di ricavare una misura partendo dall'altra in maniera piuttosto affidabile.

3.3 MISURA DI FORZA, DEFORMAZIONE E SPOSTAMENTO

Una volta installati e tarati opportunamente i vari sensori si procede alle prove finali: delle due misure di spostamento fornite da laser e potenziometro ne verrà mostrata soltanto una, visto che, come descritto nel paragrafo precedente, partendo da una misurazione è possibile ricavare l'altra.

Il carico viene applicato tramite la cella di carico, la deformazione viene misurata con l'estensimetro montato sul dorso del grilletto e lo spostamento viene misurato con il potenziometro lineare.

Vengono effettuate diverse prove con carico applicato gradualmente.

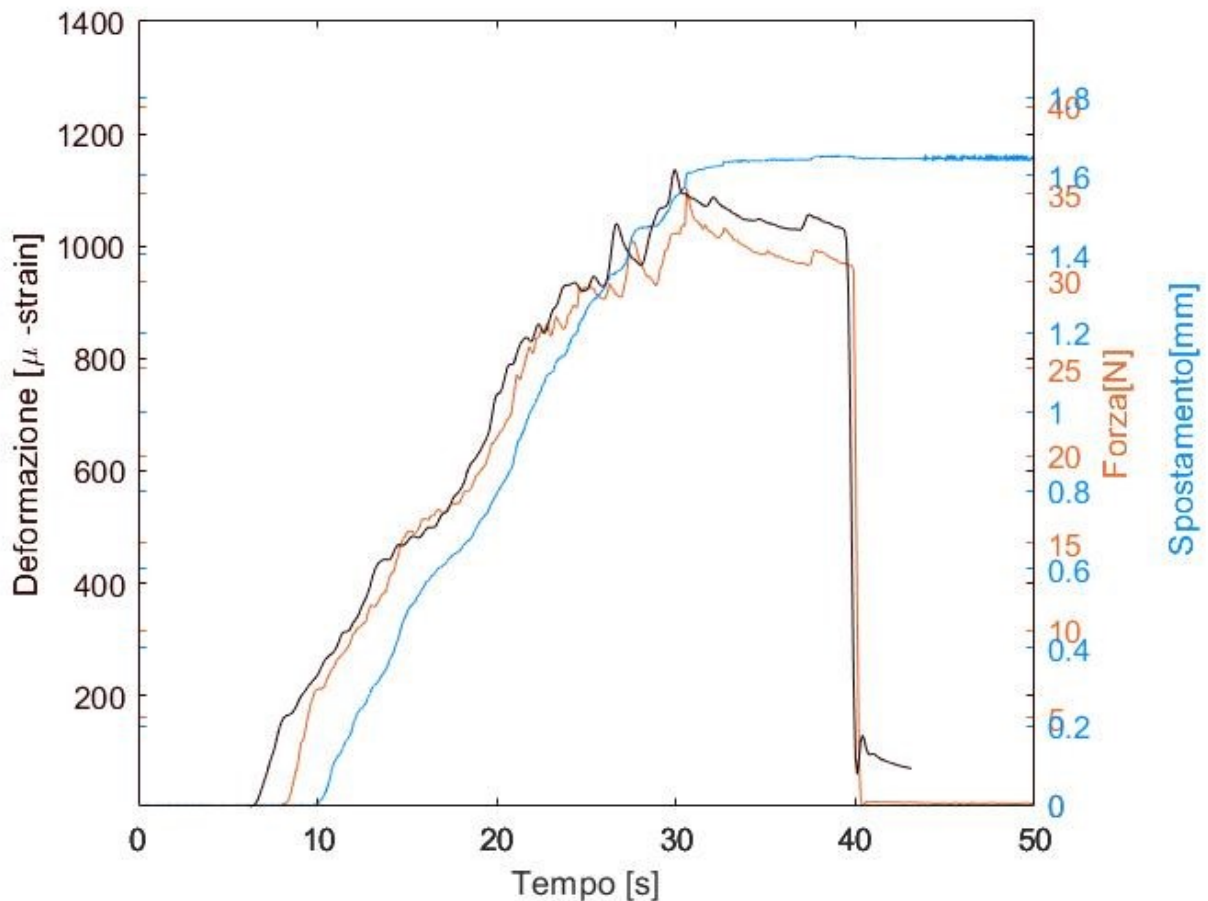


Figura 35. Misure di forza, deformazione e spostamento, carico massimo di 35 N.

Nella prova con carico graduale fino ad una forza massima circa pari a 35 N si registrano una deformazione massima di 1200 μ -strain e uno spostamento di 1.6 mm.

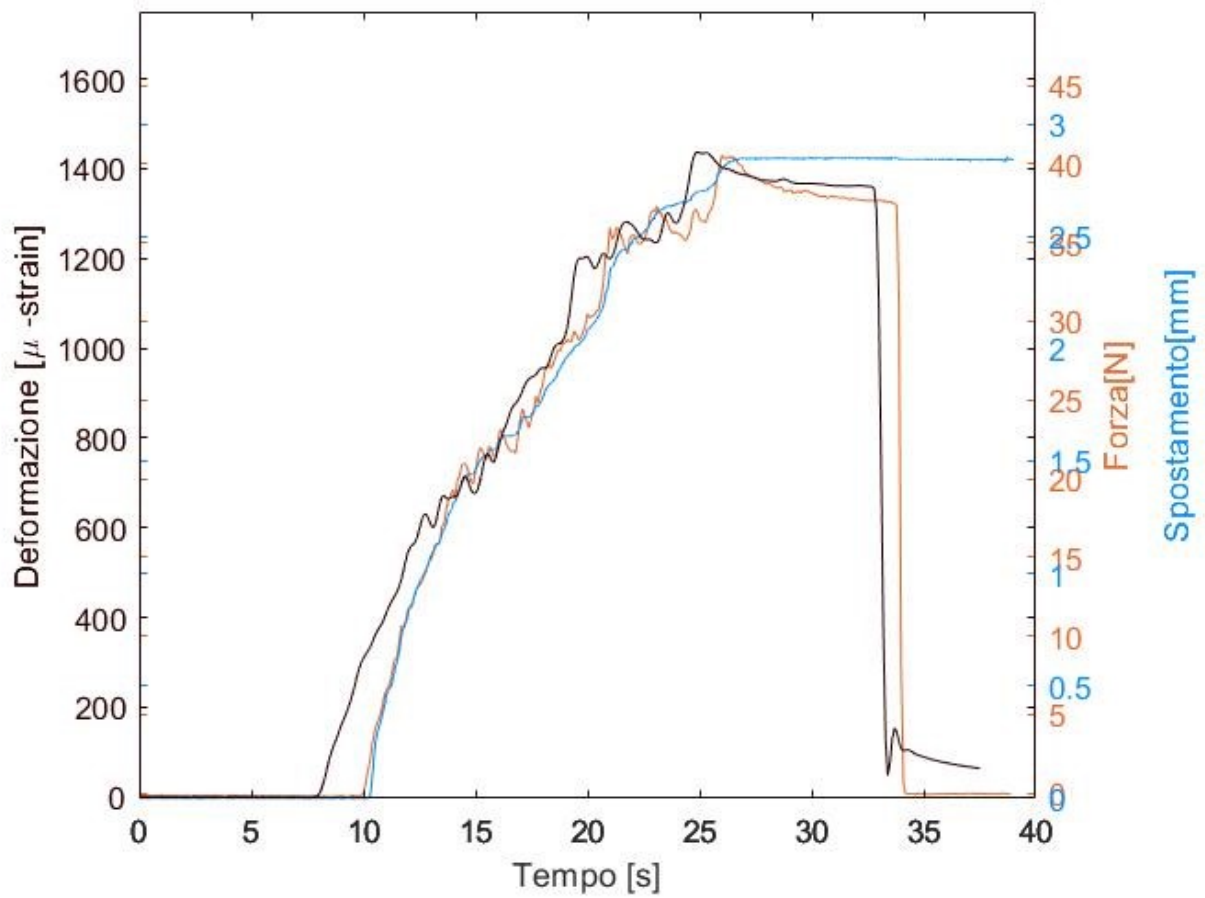


Figura 36. Misure di forza, deformazione e spostamento, carico massimo di 40 N.

Nella prova con carico graduale fino ad una forza massima pari circa a 40 N si registrano una deformazione massima di 1500 μ -strain e uno spostamento di 2.8 mm.

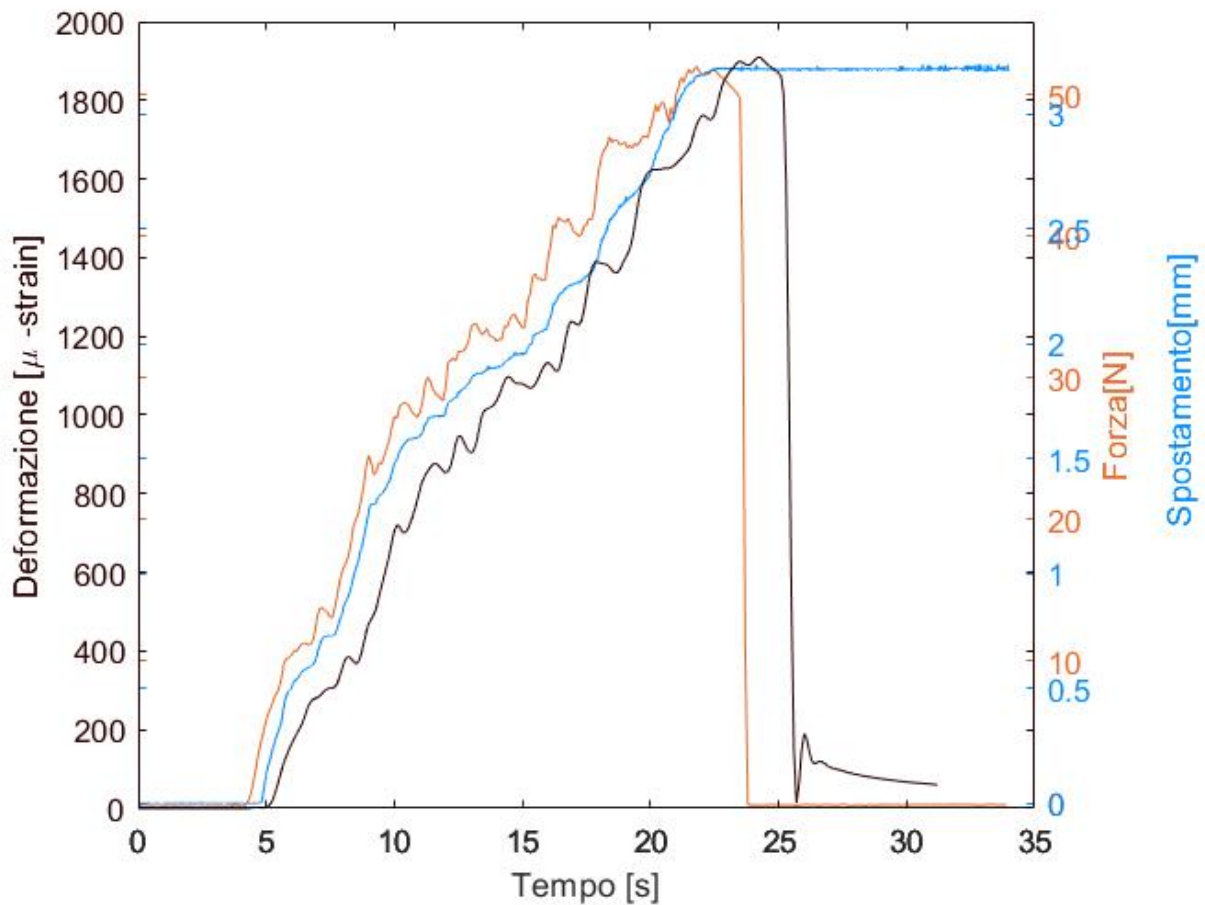


Figura 37. Misure di forza, deformazione e spostamento, carico massimo di 50 N.

Nella prova con carico graduale fino ad una forza massima di 50 N si registrano una deformazione massima di 1900 μ -strain e uno spostamento di 3.1 mm.

Le misure di forza, deformazione e spostamento sono importanti per la valutazione del prodotto in sede di progettazione.

Le misure di forza e spostamento sono importanti per migliorare l'ergonomia del grilletto e la misura di deformazione può essere importante per valutare la possibilità di rotture considerando che si esamina un elemento sottoposto a compiti continuativi e ripetitivi.

4. CONCLUSIONI

Le prove effettuate hanno dato esito positivo, tutti i sensori valutati offrono ottime prestazioni per il caso preso in esame. Di seguito si riportano le valutazioni sui singoli sensori.

- La cella di carico offre ottime prestazioni per la misurazione della forza, il segnale in uscita è buono con ottima sensibilità.

Per le misurazioni di forza è estremamente affidabile, ma può risultare ingombrante per l'installazione su di una pistola ad aria compressa durante la fase di progettazione sia per le dimensioni sia per i cavi di collegamento per la trasmissione dati.

- Gli estensimetri sono maggiormente utilizzati per la misura di deformazioni in cui mostrano un'ottima sensibilità.

Si è visto come attraverso un'opportuna taratura sia possibile misurare una forza e potrebbero considerarsi un'alternativa alla cella di carico.

Gli estensimetri sono sensori poco invasivi, ma una volta avvenuta l'installazione non possono essere staccati a meno di non rovinare completamente il sensore. Gli estensimetri inoltre risentono molto dei vincoli a cui sono sottoposti, ad esempio se l'asta di misurazione del potenziometro lineare toccasse l'estensimetro, la misurazione ne risentirebbe pesantemente.

- Il potenziometro garantisce una misura di spostamento molto affidabile, è un sensore di facile installazione e ha ottime prestazioni sia per misure statiche che dinamiche.

- Il sensore laser di spostamento offre una misurazione molto affidabile, richiede un'installazione attenta e accurata al fine di posizionarlo perfettamente allineato con l'elemento di cui si vuole misurare lo spostamento.

Può risultare estremamente ingombrante l'installazione in sede di progettazione, inoltre è un sensore che risente molto di elementi di disturbo come la polvere che potrebbe andare ad interferire con la misurazione.

BIBLIOGRAFIA

1. Centro Italiano di Ergonomia, *Che cosa è l'Ergonomia, ottimizzare l'interazione con l'ambiente costruito*.
(<https://www.centro-ergonomia.it/ergonomia.html>)
2. Björing, Gunnar, and Göran M. Hägg. *The ergonomics of spray guns—Users' opinions and technical measurements on spray guns compared with previous recommendations for hand tools*. *International Journal of Industrial Ergonomics* 25.4 (2000): 405-414.
3. Specifiche cella di carico: (<https://www.kistler.com/it/product/type-9313aa1/>).
4. Specifiche estensimetri: (<https://www.hbm.com/it/4561/ly-estensimetri-lineari-con-1-griglia-di-misura/>).
5. Specifiche potenziometro lineare:
(https://partnership.bourns.com/bu/bu_linear_motion_pot.shtml).
6. Specifiche sensore ottico a triangolazione:
(<http://www.sensortech.it/pages/prodotti/autom/mel.asp>).
7. Specifiche Spider8: (<https://manualzz.com/doc/37560508/spider8--spider8-30-spider8-01>).
8. Specifiche MY-DAQ: (<https://www.ni.com/it-it/shop/hardware/products/mydaq-student-data-acquisition-device.html>).
9. Specifiche ManuWare: (<https://www.sens2b-sensors.com/en/item/manuware-software-for-easy-setup-of-industrial-charge-amplifier-and-transmitter-parameters>).
10. Specifiche CatmanEasy: (<https://www.hbm.com/it/2290/catman-software-di-acquisizione-dati/>).

