UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica

"Studio e realizzazione di un banco per la misura sperimentale della risposta piezoresistiva di un campione di Velostat"

"Study and implementation of a measurement setup for the experimental evaluation of Velostat piezoresistive response"

Tesi di laurea di:

LUCA PERLINI

Relatore:

Prof.ssa **SUSANNA SPINSANTE**

Anno Accademico 2022-2023

Abstract

In questo elaborato vengono presentati materiali piezoresistivi, tra cui il Velostat, e vengono illustrate diverse modalità per la costruzione e la caratterizzazione di sensori di pressione basati su tali polimeri, come riportato nella letteratura scientifica.

In seguito, vengono introdotti due prototipi di sensori, accompagnati dall'illustrazione delle relative modalità di costruzione. Successivamente, sono stati eseguiti esperimenti su tali dispositivi tramite l'impiego di un partitore di tensione realizzato su breadboard e di un Moku, uno strumento multifunzione utilizzato sia come generatore di tensione che come oscilloscopio.

Gli esperimenti consistono nella misurazione della variazione di resistenza dei sensori in risposta alla pressione applicata e alla tensione di alimentazione. I risultati sono stati rappresentati in sei differenti grafici e successivamente analizzati. Le conclusioni hanno evidenziato che i sensori prototipo rispettano quanto riportato in letteratura. Inoltre, è stato possibile definire i limiti operativi di tali sensori.

Indice

INDICE.....3

CAPITOLO 1: CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI PIEZORESISTIVI.....4

1.1 PROPRIETÀ DI PIEZORESISTIVITÀ.....4
1.2 IL VELOSTAT.....5
1.3 PRESENTAZIONE DEI DISPOSITIVI.....7

CAPITOLO 2: IL BANCO DI MISURA.....34

2.1 I CAPIONI DI VELOSTAT.....34
2.2 I IL CIRCUITO ELETTRICO.....34
2.3 L'OSCILLOSCOPIO.....36

CAPITOLO 3: PROVE SPERIMENTALI.....38

3.1 PREPARAZIONE DEL SETUP.....38
3.2 SVOLGIMENTO DELLE PROVE.....38
3.2.1 MISURAZIONI CON RESISTORE FISSO DA 1 MΩ.....38
3.2.2 MISURAZIONI CON RESISTORE FISSO DA 1 KΩ.....43
3.2.3 MISURAZIONI CON RESISTORE FISSO DA 10 Ω.....45

CAPITOLO 4: ANALISI DEI RISULTATI.....48

4.1 GRAFICI TENSIONE MEDIA – FORZA APPLICATA.....48
4.2 CONSIDERAZIONI FINALI.....51

BIBLIOGRAFIA.....53

Capitolo 1

Caratterizzazione di materiali piezoresistivi: stato dell'arte

1.1 Proprietà di piezoresistività

La piezoresistività è una proprietà di alcuni materiali che indica la variazione della loro resistenza elettrica in risposta a una deformazione meccanica o una pressione applicata. In sostanza, i materiali piezoresistivi cambiano la loro resistività elettrica quando vengono sottoposti a sforzi meccanici, come la compressione o l'estensione.

I materiali piezoresistivi giocano un ruolo chiave in molte applicazioni, soprattutto nei sensori di pressione e nei dispositivi sensibili alla deformazione. Questi materiali sono spesso utilizzati in situazioni in cui è necessario rilevare e misurare la pressione o lo sforzo applicato, trasformando questa informazione in una variazione misurabile della resistenza elettrica.

Riguardo al Velostat, esso è un materiale conduttivo e, in particolare, mostra proprietà piezoresistive. Quando viene compresso o sottoposto a pressione, la distanza tra le particelle di carbonio nel polimero conduttivo si riduce, aumentando così la conducibilità elettrica del materiale.

Nel contesto dell'analisi delle proprietà del Velostat, è importante considerare come la piezoresistività di questo materiale può essere sfruttata per applicazioni specifiche, come la creazione di sensori di pressione flessibili o di superfici sensibili al tocco. La comprensione di come la resistività del Velostat varia in risposta alla pressione può essere fondamentale per progettare dispositivi elettronici sensibili alla deformazione in modo efficace.

1.2 Il Velostat

Il Velostat è un materiale polimerico riempito di carbon black (o nerofumo), materiale adatto a creare le condizioni di esistenza dell'effetto tunnel e della percolazione. La resistività del Velostat è inferiore a 500 Ω·cm e varia a seconda dello stress meccanico applicato.

Il modulo di elasticità è tipicamente compreso tra 270 MPa e 350 Mpa e la resistenza alla trazione è generalmente compresa tra 11,7 MPa e 13,7 Mpa. Proprio grazie alle sue proprietà meccaniche ed elettriche può essere utilizzato per rilevare flessione, allungamento e pressione. A causa del suo comportamento viscoelastico, però, non può essere utilizzato per fare delle misurazioni accurate delle quantità fisiche.

I materiali compositi a base polimerica sono molto promettenti per lo sviluppo di vari sensori tattili. Tali sensori necessitano di materiali polimerici molto stabili ed affidabili e sistemi efficienti ed accurati per la trasduzione del segnale. Uno di questi materiali più promettenti è il Velostat (o Linqstat). I principali vantaggi di questo materiale sono la flessibilità, le piccole dimensioni, la stabilità meccanica, chimica e il prezzo relativamente basso.

Il Velostat è un materiale polimerico composito costituito da carbonio e polietilene. La polvere di carbonio intrappolata trasforma il polietilene dielettrico in un materiale conduttivo, appartenente al gruppo dei materiali piezoresistivi. Può essere utilizzato per diversi scopi, tra cui la progettazione di sensori flessibili, molto richiesti per applicazioni meccatroniche e biomediche. Tuttavia, l'implementazione di sensori piezoresistivi nei sistemi meccatronici e robotici è ancora limitata dalla mancanza di materiali affidabili che abbiano caratteristiche stabili. Uno svantaggio di questi tipi di materiali è che le loro proprietà elettriche variano con l'invecchiamento del materiale poiché questi si deformano nel tempo e non ritornano al loro stato iniziale. Inoltre, solitamente soffrono di non linearità e di una pronunciata isteresi e la struttura del materiale non è omogenea. Tutte queste caratteristiche hanno un impatto sulla precisione, stabilità e ripetibilità dei risultati che li rendono inadatti a misurazioni di precisione.

La conduttività multidirezionale del Velostat rende complicato l'utilizzo dello stesso su delle matrici di sensori poiché la pressione applicata in un punto dell'array influenza la resistenza non solo di un singolo punto ma anche di molti punti adiacenti.

Questo viene spiegato dal fatto che la corrente segue sempre il percorso a minor resistenza. Questo problema viene generalmente risolto con una calibrazione precisa dei sensori in varie condizioni di utilizzo e attraverso l'implementazione di algoritmi intelligenti per l'elaborazione e l'analisi dei dati.

I vantaggi più significativi nell'utilizzare dei sensori resistivi rispetto ad altri tipi di sensori è il basso costo di produzione, la semplicità dei circuiti di interfacciamento e il semplice processo di acquisizione dati. Recentemente, strutture basate su Velostat, sono state implementate per varie applicazioni ma le valutazioni delle caratteristiche elettriche e meccaniche del materiale non sono ancora sufficienti.

1.3 Presentazione dei dispositivi

I sensori piezoresistivi basati su Velostat sono attualmente soggetti a numerosi studi riguardanti il loro comportamento elettrico e sono stati provati vari modi per la loro caratterizzazione.

Secondo l'articolo [1], i sensori resistivi flessibili per il rilevamento della forza possono essere suddivisi in quattro gruppi a seconda del fenomeno fisico che utilizzano:

1. Estensione;
2. Effetto tunnel;
3. Percolazione;
4. Piezoresistività.

La resistenza elettrica del Velostat viene solitamente misurata mediante elettrodi messi a contatto con il materiale, come mostrato in figura 1.

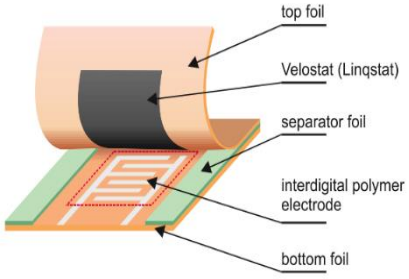


Figura 1: Struttura di un elemento sensibile basato su materiale Velostat (Linqstat).

Il Velostat viene incollato sul lato inferiore del foglio superiore e copre l'elettrodo, ciò garantisce che il materiale sia protetto dagli spostamenti. Viene poi posizionato un foglio separatore tra i due fogli esterni. Quando il foglio è a riposo, quindi non sono presenti delle sollecitazioni meccaniche, il Velostat non è in contatto con l'elettrodo consentendo così di mantenere il circuito aperto.

Per i due fogli esterni sono stati utilizzati due materiali diversi: poliestere e poliimmide.

MISURAZIONE DI UN SENSORE BASATO SU VELOSTAT

Il sensore è stato caratterizzato in modalità statica e in modalità dinamica.

-Misurazione statica

Questa misurazione di resistenza elettrica è stata realizzata attraverso l'utilizzo di diversi carichi.

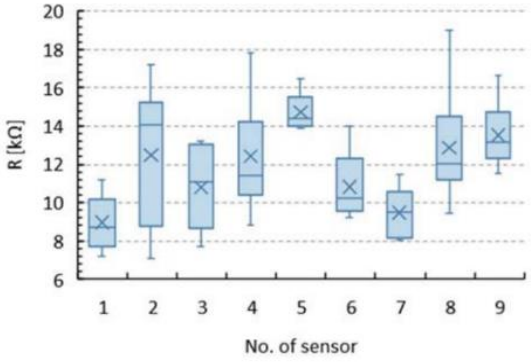


Figura 2. Diagramma per il valore della resistività dei singoli sensori per un carico leggero (20g).

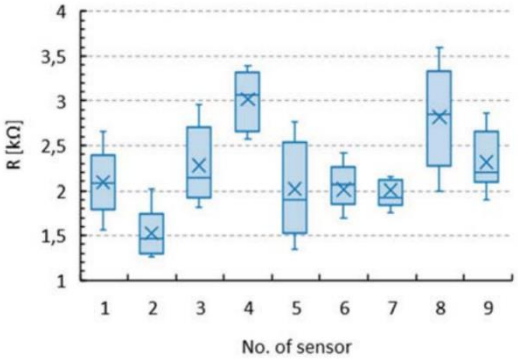


Figura 3. Diagramma per il valore della resistività dei singoli sensori per un carico pesante (100g).

Si possono vedere in Figura 2 i risultati del test con un piccolo carico (20g) e in figura 3 con un grande carico (100 g). É importante notare che la distribuzione dei valori di resistenza si restringe per un carico di peso maggiore e varia a seconda del tipo di elemento sensibile utilizzato.

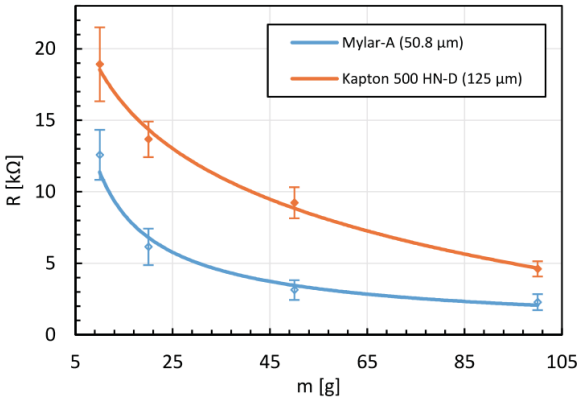


Figura 4. Dipendenze dei valori finali di resistività elettrica dal carico utilizzato.

La dipendenza dal tipo di lamina utilizzata può essere spiegata attraverso la presenza dell'effetto tunnel. Infatti, la distanza tra le particelle di carbonio diminuisce quando il Velostat viene compresso da un carico creando così una dipendenza di questa proprietà elettrica dalle sollecitazioni meccaniche.

È anche possibile notare che il sensore creato basato su materiale poliestere ha una sensibilità maggiore rispetto a quello creato con poliimmide. Il motivo risiede nel fatto che questi due materiali presentano proprietà meccaniche differenti e sono stati utilizzati spessori differenti.

-Misurazione dinamica

La misurazione dinamica è stata effettuata attraverso il microcontrollore XCM1100.

Il migliore modo per caratterizzare l'uscita del sensore è quello di valutare le caratteristiche di trasmissione in funzione della tensione di uscita sul carico di ingresso.

La misurazione dinamica è stata eseguita a tre diverse pressioni: 0.62 kPa, 1.87 kPa e 3.12 kPa.

La pressione viene aumentata ogni 60 secondi mentre viene continuamente monitorata la tensione di uscita.

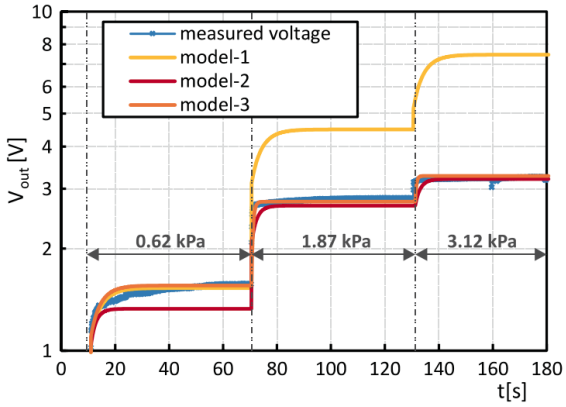


Figura 5. Dipendenza temporale della tensione di uscita del sensore per pesi diversi. Valori misurati e calcolati.

Sono stati creati tre diversi modelli di calcolo ma solamente il terzo fornisce dei buoni risultati rispetto ai valori misurati. Quest'ultimo può essere utile per compensare parzialmente le proprietà sfavorevoli come la viscoelasticità.

Nell'articolo [2] viene analizzata una matrice di sensori.

Le matrici di trasduttori capacitivi, resistivi e piezoelettrici sono solitamente utilizzate per misurare la pressione in una certa area. La calibrazione di questi dispositivi, soprattutto se si tratta di sensori ad uso medico è fondamentale per l'affidabilità e la ripetibilità dei risultati. Nell'articolo si studia la calibrazione di una matrice di sensori basata su Velostat 32x32 e si dimostrano metodologie di calibrazione adatte al dispositivo.

In numerose applicazioni è importante lo studio della distribuzione del peso plantare, come in ambito medico quando si ha a che fare con pazienti diabetici o semplicemente per la creazione di calzature.

Le matrici di sensori comunemente utilizzate si basano su trasduttori capacitivi, piezoelettrici e resistivi. La matrice in esame è una matrice di sensori 32x32 con ciascun sensore che misura 6 mm x 6 mm con una distanza di 7 mm tra i sensori adiacenti. Verranno illustrate tre diverse strategie di calibrazione che possono essere utilizzate in diverse circostanze di disponibilità dei dati, con livelli crescenti di accuratezza.

TARATURA DEL SENSORE

Sfide di calibrazione

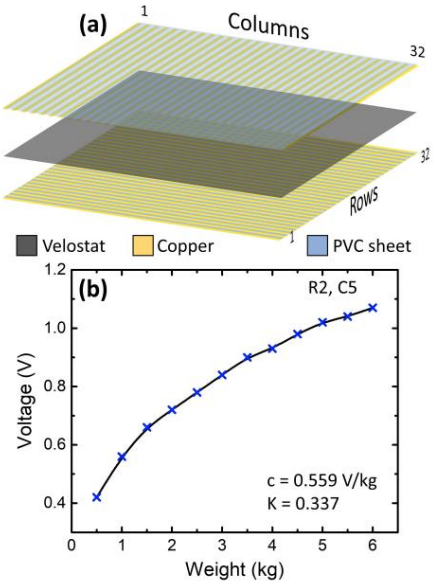


Figura 6. (a) Costruzione del sensore di pressione flessibile. (b) Peso rispetto alla tensione per un singolo sensore con i suoi valori c e K.

Il tappetino sensore è una struttura a tre strati con gli strati esterni in fogli di polivinilcloruro (PVC) con elettrodi di rame incollati in allineamento orizzontale e verticale, formando un'architettura come mostrato in Figura 6a.

La calibrazione di questa configurazione presenta tre principali sfide: innanzitutto i 1024 sensori richiedono 2048 parametri che sono poco pratici da gestire, poi il posizionamento accurato dei pesi su un singolo sensore senza distribuire il peso su nessun altro sensore è un processo molto complicato, in terzo luogo l'approccio di utilizzare una superficie piana per distribuire uniformemente il peso sulla matrice del sensore e leggere i valori dai singoli sensori non produce caratteristiche di calibrazione accurate poiché è presente un'interferenza direzionale, ossia crosstalk tra colonne ma non tra righe.

Calibrazione e precisione di un singolo sensore:

Per calibrare un singolo sensore viene utilizzato un foglio di acrilico di dimensioni 6 mm x 6 mm, opportunamente posizionato sull'area di rilevamento di un singolo sensore, che funge da superficie di carico su cui vengono posizionati i pesi.

Vengono posizionati dei pesi in un intervallo da 0.5 kg a 6.0 kg, ad intervalli di 0.5 kg. In Figura 6b è possibile notare la curva peso-tensione.

ANALISI DEI PARAMETRI DI UNA MATRICE DI SENSORI

Le caratteristiche dei pixel del sensore nella matrice dovrebbero avere somiglianze locali che ci consentirebbero di ridurre il numero di parametri e quindi il numero di misurazioni di per calibrare l'intera matrice del sensore. Per caratterizzare la matrice di

sensori è stata presa la risposta di 64 sensori e si sono estratte dalle misurazioni le loro caratteristiche di calibrazione.

Sono stati presi 32 sensori nella riga 2 e 32 sensori nella colonna 4 per evitare qualunque tipo di bias direzionale. Il processo di calibrazione seguito è lo stesso di quello utilizzato per il singolo sensore. I valori di tensione in funzione del peso sono mostrati nella Figura 7.

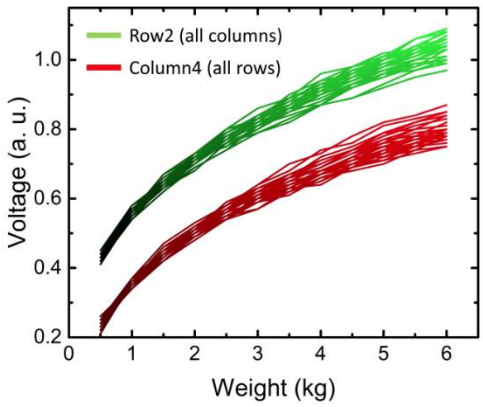


Figura 7. Tensione e peso per 32 sensori ciascuno della riga 2 e della colonna 4.

STRATEGIE DI CALIBRAZIONE PROPOSTE

2 parametri

Questa è l'approssimazione più ampia delle caratteristiche del sensore della matrice.

4 parametri

Ciò comporta 2 parametri ciascuno per un set di 16 colonne.

64 parametri

Ciò comporta 2 parametri ciascuno per tutte le 32 colonne. Per questo si misurano le caratteristiche per 32 sensori in una singola riga e si utilizzano tali valori rappresentativi per l'intera colonna. Questo è l'approccio che si deve avere per una miglior precisione.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Attraverso la misurazione del peso (noto inizialmente) di alcune persone si è ricavato che tra i tre metodi precedentemente esposti, quello a 64 parametri è stato quello più preciso con un errore medio del 4.23%.

Facendo riferimento all'articolo [3] è possibile vedere ulteriori metodi di caratterizzazione dei sensori di pressione basati su Velostat, infatti, in questo documento si intende valutare le caratteristiche del Velostat, implementandolo nella progettazione di sensori flessibili.

In questo documento si intende valutare le caratteristiche del Velostat, implementandolo nella progettazione di sensori flessibili. La risposta del sensore è stata valutata eseguendo test in modalità statica, di carico a lungo termine e ciclica. I risultati sperimentali hanno rilevato l'isteresi e le proprietà non lineari del sensore. La risoluzione trasversale del sensore è stata definita misurando la risposta del sensore a diverse distanze dal punto di carico. Attraverso lo studio di sensibilità, isteresi, tempo di risposta, risoluzione trasversale e deformazione rispetto alla forza di compressione applicata è possibile utilizzare il Velostat come materiale sensibile per sensori con una singola coppia di elettrodi o attraverso una matrice.

INTRODUZIONE

I materiali compositi a base polimerica sono molto promettenti per lo sviluppo di vari sensori tattili. Tali sensori necessitano di materiali polimerici molto stabili ed affidabili e sistemi efficienti ed accurati per la trasduzione del segnale. Uno di questi materiali più promettenti è il Velostat (o Linqstat). I principali vantaggi di questo materiale sono la flessibilità, le piccole dimensioni, la stabilità meccanica, chimica e il prezzo relativamente basso.

Il Velostat è un materiale polimerico composito costituito da carbonio e polietilene. La polvere di carbonio intrappolata trasforma il polietilene dielettrico in un materiale conduttivo, appartenente al gruppo dei materiali piezoresistivi. Può essere utilizzato per diversi scopi, tra cui la progettazione di sensori flessibili, molto richiesti per applicazioni meccatroniche e biomediche. Tuttavia, l'implementazione di sensori piezoresistivi nei sistemi meccatronici e robotici è ancora limitata dalla mancanza di materiali affidabili che abbiano caratteristiche stabili. Uno svantaggio di questi tipi di materiali è che le loro proprietà elettriche variano con l'invecchiamento del materiale poiché questi si deformano nel tempo e non ritornano al loro stato iniziale. Inoltre, solitamente soffrono di non linearità e di una pronunciata isteresi e la struttura del materiale non è omogenea.

Tutte queste caratteristiche hanno un impatto sulla precisione, stabilità e ripetibilità dei risultati che li rendono inadatti a misurazioni di precisione.

La conduttività multidirezionale del Velostat rende complicato l'utilizzo dello stesso in matrici di sensori poiché la pressione applicata in un punto dell'array influenza la resistenza non solo di un singolo punto ma anche di molti punti adiacenti. Questo viene spiegato dal fatto che la corrente segue sempre il percorso a minor resistenza. Questo problema viene generalmente risolto con una calibrazione precisa dei sensori in varie condizioni di utilizzo e attraverso l'implementazione di algoritmi intelligenti per l'elaborazione e l'analisi dei dati.

I vantaggi più significativi nell'utilizzare dei sensori resistivi rispetto ad altri tipi di sensori sono il basso costo di produzione, la semplicità dei circuiti di interfacciamento e il semplice processo di acquisizione dati. Recentemente, strutture basate su Velostat, sono state implementate per varie applicazioni ma le valutazioni delle caratteristiche elettriche e meccaniche del materiale non sono ancora sufficienti.

La sensibilità del Velostat alla pressione applicata è definita principalmente da due fenomeni fisici:

1. Effetto tunnel;
2. Percolazione.

Riguardo l'effetto tunnel, questo influenza la conduttività del materiale composito quando la distanza tra le particelle conduttive all'interno del materiale varia a causa della pressione applicata che lo deforma.

La percolazione, invece, è una funzione delle caratteristiche geometriche del materiale. È legata ad un cambiamento di conduttività tra lo strato isolante e conduttivo causato dalla variazione di pressione applicata. La conduttanza del materiale varia a causa della variazione dell'area di contatto delle particelle conduttrici, andando così a creare percorsi conduttivi interni al materiale.

Velostat modifica la propria resistenza elettrica a causa di entrambi gli effetti sopra menzionati, quando vengono applicate tensione, pressione o flessione meccanica.

Nel caso in cui si effettui pressione sul materiale, maggiore è il carico e maggiore sarà la conduttività e minore la resistenza poiché il percorso degli elettroni si accorcia.

Un carico maggiore (più di 3 N) potrebbe causare danni al Velostat e portare alla perdita di conduttività o all'accorciamento del circuito di misurazione.

È possibile notare nel confronto tra materiale polietilene-carbonio nuovo ed usato che il primo presenta una resistenza elettrica maggiore.

Il design del sensore è una caratteristica importante che consente l'uso dello stesso materiale piezoresistivo per diverse applicazioni andando a variarne il volume, area, forma e distribuzione.

Questo articolo analizza il comportamento del Velostat sotto carichi ripetuti a lungo termine, è possibile applicare il modello del materiale elasto-plastico.

Un altro problema nella creazione di sensori tattili è l'utilizzo di matrici di sensori formate sullo stesso foglio Velostat. Questa tecnologia può essere molto utile per rilevare il tocco o la distribuzione di peso all'interno della zona di interesse.

Lo scopo di questo studio è valutare le caratteristiche del materiale composito polimerico Velostat e definire la maggior parte dei metodi per l'applicazione pratica di questo materiale composito nei sensori tattili.

FASE SPERIMENTALE

In questa ricerca sono state analizzate due tipi di caratteristiche: meccaniche ed elettriche.

Le proprietà elettriche sono state testate valutando la non linearità della resistenza ed attraverso una valutazione quantitativa dell'isteresi, insieme ai parametri di assestamento del materiale dopo alcune prove.

La ricerca sperimentale è costituita da quattro fasi:

-La valutazione dello spostamento del sensore in base alla forza di compressione.

-La determinazione della tensione di uscita in funzione della pressione

-Il rilevamento del tempo di risposta del sensore in funzione della tensione

-La misura della tensione dipendente dalle distanze tra i contatti del sensore.

ATTREZZATURA

La struttura del banco di prova è illustrata in Figura 8.

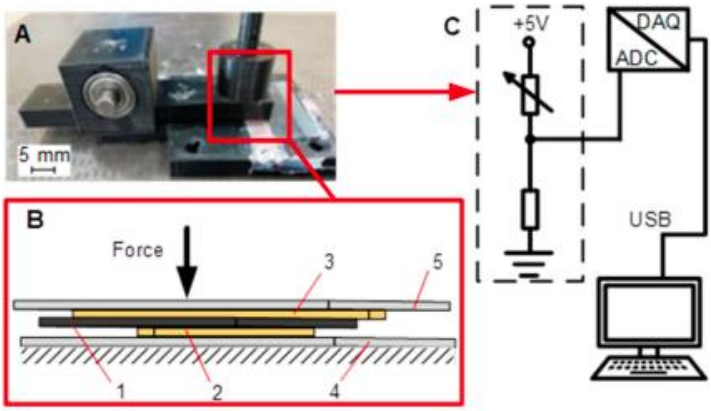


Figura 8. Struttura del banco di prova.

Il foglio di Velostat (1) è stato posizionato tra due elettrodi di rame (50 x 5 x 0.2) mm (2 e 3), l'elettrodo inferiore (2) era fissato a una piastra fissa del banco di prova (4), l'elettrodo superiore era fissato al Velostat.

Nell'esperimento la pellicola di Velostat seguiva la forma della superficie sensibile del sensore, inoltre la pellicola utilizzata era molto sottile. È importante ricordare che il Velostat deve essere ricoperto con un rivestimento simile alla pellicola per proteggere dagli agenti esterni e preservarne le sue caratteristiche.

Gli elettrodi (2 e 3) erano posizionati perpendicolarmente tra loro, l'area di contatto tra questi era di 25 mm^2. La forza è stata applicata su una piastra mobile (5) nella direzione normale. La resistenza è stata valutata misurando la tensione tra gli elettrodi (2 e 3) e calcolata dai parametri del circuito elettrico.

I segnali sono stati convertiti in digitale da un ADC, trasmessi ed elaborati al PC.

METODOLOGIA

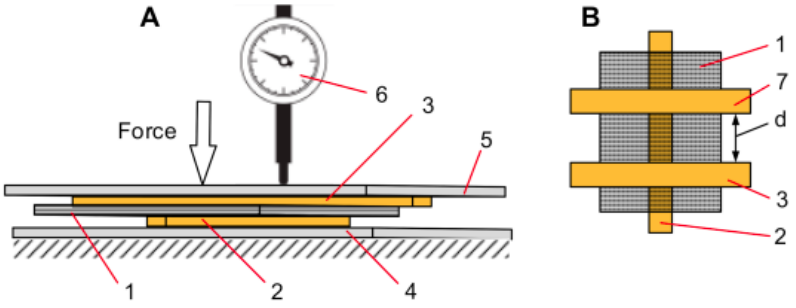


Figura 9. Banco di prova per la valutazione del sensore con un peso variabile, dove: 1-materiale composito Velostat, 2-elettrodi inferiori, 3-elettrodi superiori permanenti, 4-telaio del banco di prova, 5-piastra superiore, 6-indicatori. (B) Struttura di test, utilizzata per quantificare la dipendenza tra pressione e misurazioni, basata su elettrodi posizionati perpendicolarmente posti sul lato opposto del Velostat, dove: 7-elettrodo superiore mobile, distanza-d.

Il foglio di Velostat è stato compresso dalla forza in direzione normale tra due elettrodi nel punto di contatto (Figura 9). La deformazione è stata misurata utilizzando un comparatore. Il piano mobile del banco di prova è stato caricato con una forza che varia gradualmente da 0 N a 2.94 N con un incremento di 0.42 N ogni 5 s. La forza è stata gradualmente aumentata fino a raggiungere il valore massimo e poi ridotta con la stessa sequenza. I cicli di caricamento sono stati ripetuti dopo 60 s.

Applicando il carico descritto in modo ciclico, sono stati eseguiti diversi esperimenti in condizioni diverse.

La prima serie di misurazioni è stata effettuata con un materiale nuovo. L'esperimento è stato ripetuto 7 volte. Dopo questo test il Velostat è stato fatto tornare alla condizione di riposo. La seconda serie di misurazioni è stata eseguita con lo stesso materiale dopo 60 minuti con la stessa metodologia. Il terzo esperimento è stato eseguito dopo aver mantenuto il Velostat per 60 minuti caricato con una forza di 2.94 N. Successivamente la forza è stata ridotta a 0 N e l'esperimento è stato ripetuto utilizzando la stessa metodologia.

VALUTAZIONE DELLE PROPRIETA' ELETTRICHE DEL SENSORE

Per valutare le proprietà elettriche del sensore, è stata eseguita una serie di esperimenti che ci hanno permesso di definire le principali caratteristiche come sensibilità, tempo di risposta e risoluzione trasversale.

VALUTAZIONE DELLA SENSIBILITA' DEL SENSORE

La sensibilità del sensore, che definisce la relazione tra la sua resistenza e il carico applicato, è stata determinata quando il sensore veniva premuto con una certa forza e quindi rilasciato. Un simile esperimento ci ha permesso di definire l'isteresi del sensore. Per la ricerca sono stati utilizzati due Velostat, uno nuovo e uno usato.

Durante il test il materiale piezoresistivo è stato pressato con una forza compresa tra 0.14 N e 3.08 N con un incremento di 0.42 N. La forza veniva incrementata di 0.14 N ogni 8 minuti fino al raggiungimento del valore massimo. Un periodo di tempo così lungo è stato selezionato per avere la possibilità di una migliore osservazione della deriva della sensibilità. Dopo aver raggiunto il valore massimo, la forza è stata ridotta di 0.14 N ogni 8 minuti fino ad arrivare a 0 N. L'esperimento è stato ripetuto 11 volte.

VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RISPOSTA DEL SENSORE

Il tempo di risposta del sensore definisce la quantità di tempo necessaria affinché il segnale del sensore si stabilizzi dopo la variazione di carico. Questo valore quantifica la rapidità del sensore nel misurare processi dinamici.

VALUTAZIONE DELLA RISOLUZIONE DEL SENSORE TRASVERSALE

Le misurazioni della resistenza sono state eseguite con uno strato Velostat fissato alla piastra inferiore senza forza (0 N) e con diversi valori di forza di compressione: 0.98 N,2.24 N e 3.08 N applicati in ordine casuale. Le distanze tra i contatti sono state verificate in modalità scarica.

Le distanze tra i contatti permanenti e mobili sono state impostate sui valori (1.5, 3, 6, 9, 12, 15 e 18) mm e sono state applicate in ordine casuale. Tutti gli esperimenti sono stati ripetuti 11 volte e per ogni test sono stati calcolati i valori medi di resistenza.

CALCOLI

Il modo più adatto per ottenere dati da sensori resistivi è implementare un circuito partitore di tensione costituito dalla variabile, che è il sensore stesso, e da ulteriori resistori di riferimento (Figura 8c).

RISULTATI DELLA RICERCA SPERIMENTALE

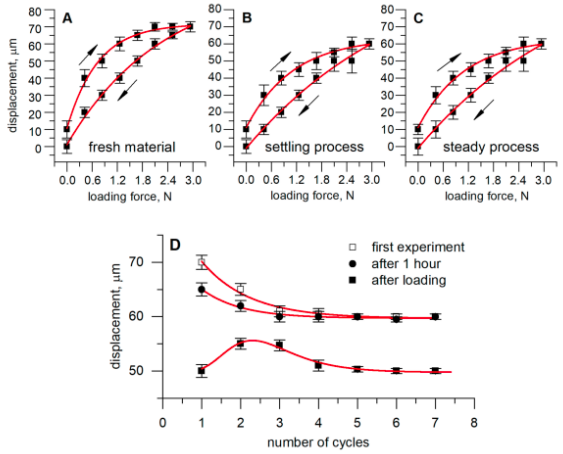


Figura 10. Dipendenza della deformazione del sensore dal carico applicato in diverse condizioni sperimentali: (a) primo ciclo, nuovo materiale; (b) quarto ciclo, processo di stabilizzazione; (c) settimo ciclo, processo costante; (d) dipendenza dallo spostamento dal numero di esperimenti, eseguiti all'inizio dell'esperimento, dopo una pausa di un'ora durante la quale il sensore è stato scaricato e dopo una pausa di un'ora durante la quale il sensore è rimasto carico con 2,88 N.

Sono state valutate le caratteristiche meccaniche del materiale basate sulla deformazione statica sotto carico. La procedura di valutazione è stata eseguita andando a ricavare una dipendenza tra il carico applicato e la deformazione del sensore.

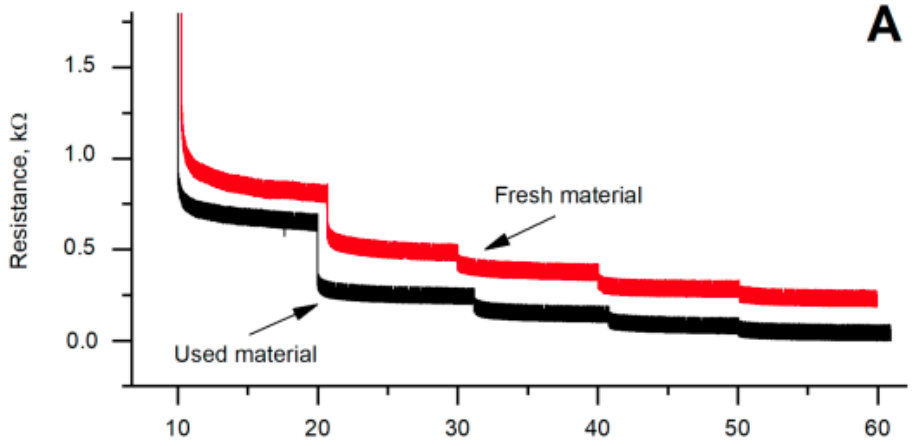
La prima serie di esperimenti è stata eseguita con un foglio di Velostat nuovo che è stato caricato e scaricato ciclicamente. La massima deformazione di compressione è stata definita analizzando lo spostamento verticale della piastra mobile del banco di prova (Figura 8b), misurato durante il primo ciclo. Il materiale ha mostrato una rigidità di contatto non lineare come risposta alla pressione. Lo spostamento iniziale della piastra del banco di prova è stato di 70 µm sotto una forza di 2 N. Continuando il carico ciclico, lo spostamento è gradualmente diminuito e dopo il quinto ciclo, ha raggiunto caratteristiche stabili. I risultati medi che rappresentano la deformazione sotto il carico massimo (2.88 N) sono rappresentati in Figura 10d.

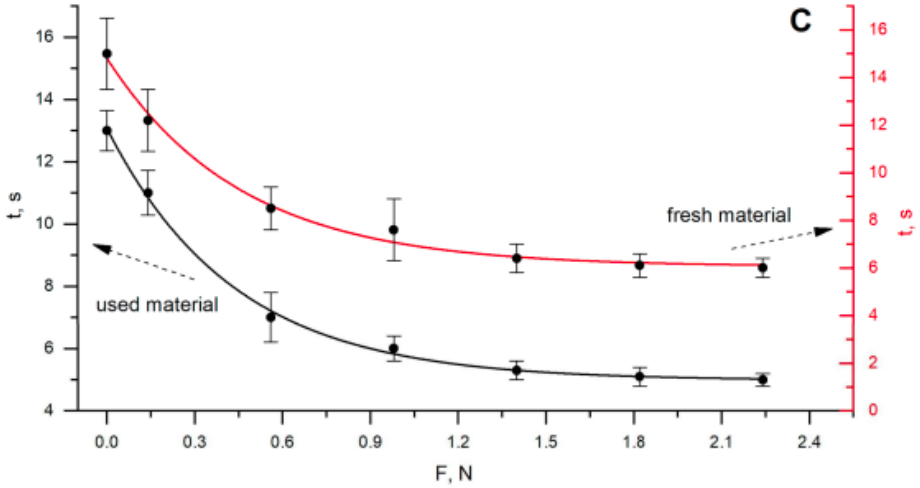
Questi risultati mostrano come il materiale non recuperi le sue proprietà originali dopo un carico a lungo termine, oppure che un periodo di tempo di 60 s tra lo scarico e l'inizio dell'esperimento è un periodo troppo breve. Ciò significa che quando si implementa Velostat nei sensori professionali, occorre tenere conto del tipo di carico, eseguire test aggiuntivi e sviluppare un algoritmo di compensazione per i casi in cui il sensore è esposto al carico massimo per lunghi periodi.

I risultati della valutazione della sensibilità del sensore (Figura 11a, b) mostrano il comportamento non lineare dei sensori, che corrisponde alle sue proprietà meccaniche. Si vede che nel confronto tra materiale nuovo ed usato, il primo presenta una resistenza maggiore.

Si può affermare che questo cambiamento è causato dagli effetti precedentemente descritti: il carico applicato provoca una diminuzione dello spessore del materiale, influenza la rugosità superficiale e la compressione dei granuli di carbonio li porta più in profondità. Ciò influisce sulla diminuzione della distanza tra le particelle conduttrici e aumenta la conduttività del materiale.

L'esperimento di stabilizzazione dei materiali nuovi e usati a base di Velostat mostra come questo se sottoposto ad una forza maggiore, necessita di un tempo di assestamento minore (Figura 11c) poiché il processo di deformazione è più veloce.





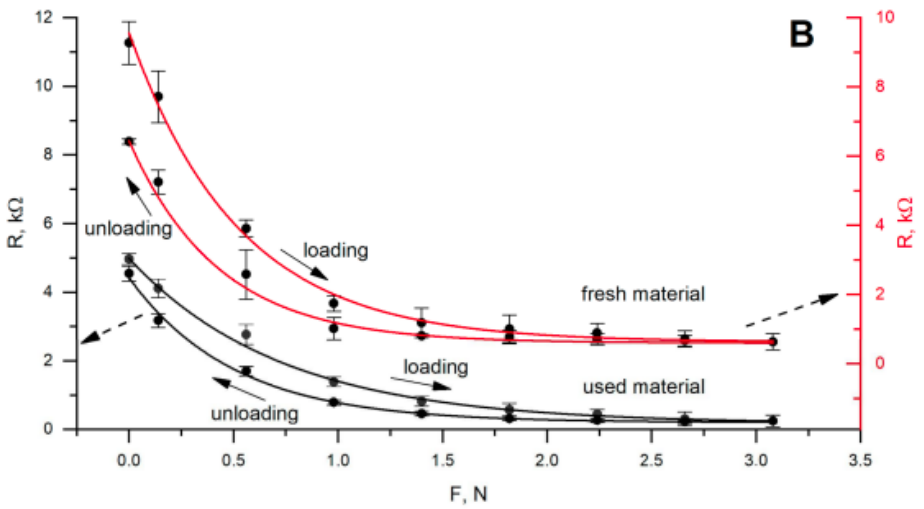


Figura 11. (a) Dipendenza della resistenza dal tempo. Il materiale è stato compresso con una forza compresa tra 0,14 N e 3,08 N con un incremento di 0,42 N. La forza è stata incrementata dal valore minimo ogni 8 minuti. (b) Dipendenze tra il carico e la resistenza di un materiale usato e fresco. (c) Il tempo di risposta dei materiali usati e nuovi a base di Velostat.

I risultati delle Figure 3-5 mostrano le correlazioni tra le proprietà meccaniche ed elettriche di Velostat. La deriva osservata nelle caratteristiche elettriche e meccaniche ci permette di concludere che dopo 5-7 cicli di carico, i cambiamenti nelle strutture del materiale rallentano significativamente e le caratteristiche diventano più stabili.

I cicli di isteresi esistenti nel ciclo di carico e l'assestamento dei parametri di resistenza dopo alcuni cicli indicano l'elevato valore dell'attrito interno; pertanto, l'utilizzo del materiale in applicazioni dinamiche richiede ulteriori ricerche.

CONCLUSIONI

L'uso del Velostat come materiale sensibile per sensori di pressione, di forza e tattili presenta numerosi vantaggi:

-Possibilità di produrre un elemento sensibile della forma richiesta dall'applicazione;

-Dimensioni ridotte;

-Possibilità di realizzare un array di sensori;

-Il materiale flessibile è adatto a creare sensori della forma desiderata.

Questi tipi di sensori presentano anche delle caratteristiche che ne limitano il campo di utilizzo, infatti, la ricerca sperimentale ha dimostrato che è necessario un trattamento ciclico iniziale prima di procedere con la calibrazione del sensore. In secondo luogo, le caratteristiche del materiale sono rappresentate da un significativo processo di isteresi che

indica un elevato attrito interno che causa limitazioni nella misurazione di carichi variabili.

La non linearità è tipica di questo sensore piezoresistivo e potrà essere compensata mediante l'elaborazione dei dati. L'influenza del carico di prossimità crea una condizione controversa, perché carichi più elevati hanno un'influenza più significativa sull'area di contatto tra elettrodi e il composito polietilene-carbonio.

I sensori tattili possono ambire ad una risoluzione più elevata, mentre i sensori di forza sono limitati dall'elevato carico che devono sopportare.

Nell'articolo [4] viene studiato un tappetino sensibile intelligente, basato su Velostat. Sono stati proposti vari design e geometrie per tappetini-sensori e le loro proprietà elettriche e meccaniche, inclusa la riproducibilità, sono state studiate attraverso i test eseguiti. I sensori di pressione sono interfacciati con un microcontrollore Arduino per monitorare, leggere con alta precisione e controllare la variazione della resistenza sotto la pressione applicata. È stato quindi sviluppato un metodo di approssimazione basato su un algoritmo di rete neurale per esplorare la relazione tra le diverse forme del tappeto, la pressione e le sollecitazioni applicate sul tappeto, la resistenza del materiale conduttivo Velostat e il numero di celle di rilevamento attive per controllare il sistema di gestione del segnale di ingresso.

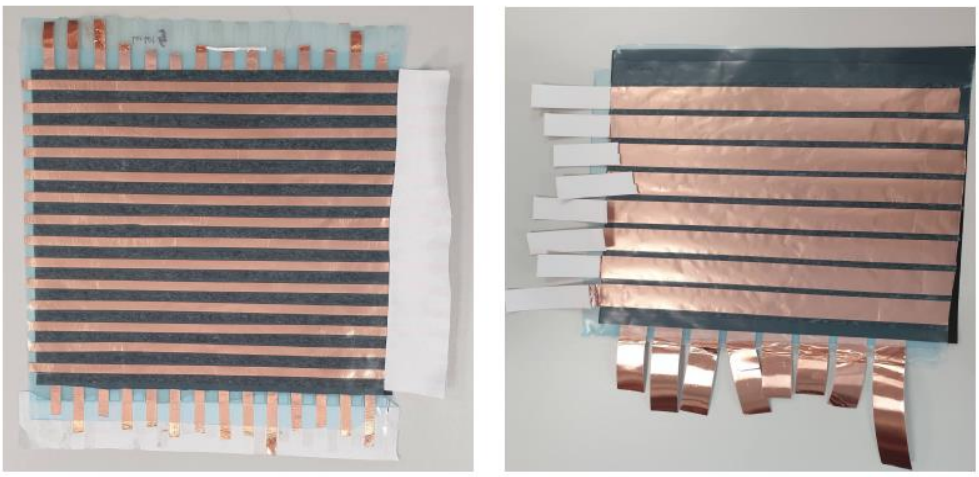
INTRODUZIONE

In ambienti lavorativi, i sensori di pressione possono essere utilizzati per supportare i lavoratori attraverso il monitoraggio e l'analisi delle forze fisiche esercitate dal corpo. Grazie ai bassi costi di produzione, elevata flessibilità e la semplicità dell'acquisizione dei dati, sono le caratteristiche per cui i sensori piezoresistivi sono i più utilizzati in questo ambito.

Il design tipico di un sensore di pressione flessibile è costituito da Velostat come strato piezoresistivo e un nylon argentato conduttivo sopra uno strato isolante in neoprene. I sistemi sensibili alla pressione vengono utilizzati per monitorare la presenza dell'utente e per ottenere informazioni sullo stato di salute dell'utente rilevando eventuali anomalie anatomiche.

Il presente articolo presenta la caratterizzazione di un tappetino sensibile basato su Velostat e un sistema di controllo adottato come soluzione target per migliorare la diagnosi medica.

La fabbricazione, il metodo e i materiali della superficie del tappetino sono descritti utilizzando strumenti semplici. I diversi design e la geometria dei tappetini sensore fatti in casa (Figura 12 a, b) sono proposti per esplorare le proprietà elettriche e meccaniche, inclusa la ripetibilità, attraverso i test condotti.



(a) (b)

Figura 12. (a) Prototipo di tappetino n.1 sensibile alla pressione con una dimensione della cella sensibile di 5 x 5 mm^2, (b) Prototipo di tappetino n.2 sensibile alla pressione con una dimensione della cella sensibile di 25 x 25 mm^2.

Viene fornito un sistema di acquisizione dati che utilizza un software e un microcontrollore Arduino per automatizzare le misurazioni dei sensori del tappetino nel banco prova. Pertanto, il metodo basato sull'algoritmo di rete neurale è sviluppato per ottenere una relazione tra le diverse geometrie dei tappetini, la pressione e le tensioni applicate al tappeto, la resistenza del materiale conduttivo e il numero di celle di rilevamento.

La novità di questo metodo prevede un sistema intelligente completato da un sistema di misurazione, un microcontrollore e periferiche, incluso un algoritmo innovativo per la descrizione delle caratteristiche della matrice di rilevamento della pressione 2D basato su materiali commerciali che possono essere integrati in modelli reali, cioè anche installato su un letto di un paziente.

Questo tappetino può raccogliere diverse informazioni, tra cui qualità del sonno, rilevamento della postura, frequenza cardiaca, respirazione e pressione sanguigna.

MATERIALE

I sensori del tappeto sono realizzati utilizzando il Velostat. La conduttività di questo non dipende dall'umidità e dall'invecchiamento del materiale.

In tabella si riportano i dati tecnici del sensore.

Technical Details	Adafruit 1361 Velostat
Membrane dimensions	280 mm × 280 mm
Membrane thickness	4 mil/0.1 mm
Weight	approx. 18.66 g
Working Temperature	from −45 °C to +65 °C (−50 °F to 150 °F)
Heat sealable	Yes
Longitudinal resistance	<500 Ω/cm
Surface resistivity	31,000 Ω/cm^2

Tabella 1. Dettagli tecnici del Velostat.

COSTRUZIONE DEL TAPPETINO

Il prototipo risponde alla norma internazionale PN-EN 60601-2-52:2019, che riguarda i dispositivi elettromedicali e i requisiti dettagliati per la sicurezza di base e le prestazioni essenziali dei letti medici. Si applica anche la norma IEC 60601-2-52:2009 che riguarda la sicurezza di base e le prestazioni essenziali dei letti medici destinati agli adulti.

Ogni letto medico contiene una piattaforma di supporto del materasso ed è destinato ad assistere il paziente nella diagnosi, monitoraggio, prevenzione, trattamento, nell'attenuazione della malattia o nella compensazione di un infortunio o handicap.

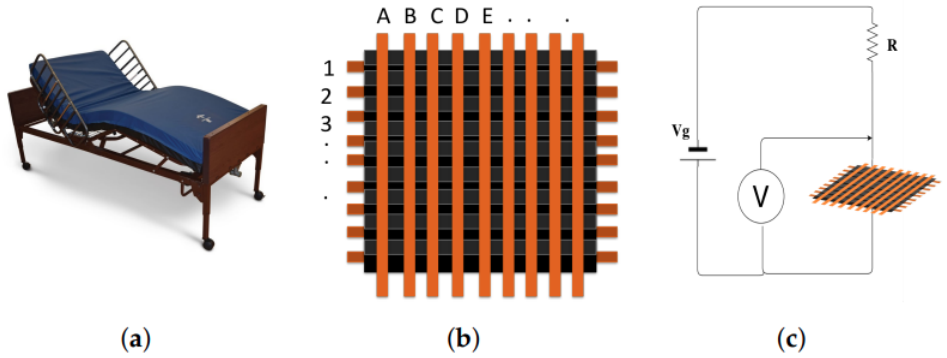


Figura 2. (a) Tipico letto medico; (b) Sensore Velostat a matrice; (c) schema del circuito elettrico.

Le parti del letto medico (Figura 13a) su cui è posizionato il tappetino sono il poggiatesta, sezione posteriore, sedile, sezione delle gambe e poggiapiedi.

Lo standard di sicurezza IED 60611-2-52 si concentra sui letti medici per adulti, compreso il carico di lavoro sicuro (SWL). Questo è definito come il carico massimo ammissibile comprendente di paziente, materasso, biancheria da letto e accessori che può essere sollevato in sicurezza dal letto.

In questo lavoro viene sviluppato e caratterizzato un prototipo di materassino flessibile utilizzato in un letto ospedaliero. I materiali utilizzati sono fogli di Velostat, nastri di rame adesivi, pellicola di protezione superficiale e nastro biadesivo largo 5 mm. I nastri adesivi in rame sono posizionati sulla lamina Velostat a distanze uniformi l'uno dall'altro. Sull'altro lato del Velostat è stato utilizzato lo stesso metodo, ma i nastri di rame sono stati posizionati alla stessa distanza ma in direzione opposta (Figura 14). Infine, i fili isolati vengono fatti aderire in posizione tra le strisce di rame e vengono saldati dei rivestimenti protettivi trasparenti. Il nastro conduttivo di rame è progettato per condurre elettricità ed è considerato un materiale conduttivo isotropo, cioè conduttivo in tutte le direzioni. Questo è rivestito con un adesivo acrilico uniformemente disperso con sfere conduttrici per fornire una resistenza elettrica molto bassa attraverso il nastro. Il nastro autoadesivo in rame EMI da 10 mm x 30 m fornisce un eccellente isolamento contro campi elettromagnetici e le relative interferenze. La matrice del sensore è stata creata utilizzando il nastro di rame e il Velostat. La striscia di rame è stata tagliata in lunghezze uguali e posizionata su entrambi i lati del tappeto, da una parte disposta per colonne e dall'altra disposta per righe.

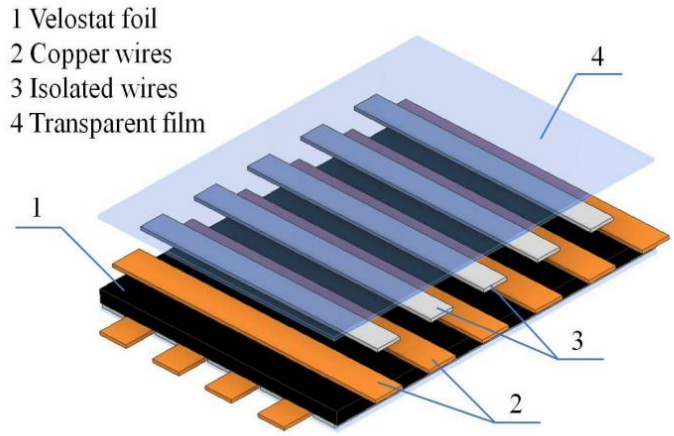


Figura 14. Costruzione del tappetino

RISULTATI SPERIMENTALI

Primo test sperimentale

Inizialmente, le misurazioni sono state eseguite su prototipi di tappetini selezionati con i dettagli geometrici e tecnici presentati in Tabella 2.

Velostat Pressure Sensing Mat	n.1	n.2
Transparent Plastic [cm]	21.5 × 17.5	16 × 11
Copper Tape Conductive Adhesive [cm]	0.5 × 20	2.5 × 34.5
Number of Copper Tapes	14	8
Insulation Tape Adhesive [cm]	0.4 × 17	0.4 × 30.5
Number of Insulation Tapes	15	9
Velostat Conductive Sheet [cm]	17 × 17	30.5 × 30.5

Tabella 2. Specifiche tecniche e geometriche.

La resistenza del tappeto è stata misurata con una tensione di alimentazione specifica e il carico sul tappeto è stato aumentato con un peso noto. Nel primo esperimento di prova il sistema di misurazione era collegato al tappetino sensore ed era costituito da un alimentatore, due multimetri digitali e cavi. Le misurazioni di tensione e resistenza sono state condotte utilizzando un resistore R di 250 Ω collegato in serie al tappetino, come mostrato in Figura 13c. La tensione di alimentazione è stata impostata a 5 V. I multimetri utilizzati erano dei Sanwa PC510, con un campo di misurazione di tensione di 500 mV AC e una precisione dello 0,08% e un Sanwa CD771 con un campo di misurazione di 400mV e una precisione di (0,5% +2). L'alimentatore da banco utilizzato era un Tektronix PWS2323, 32 v CC, 3 A. La bilancia elettronica Lucznik KS-509 S è stata utilizzata per misurare il peso dei materiali e della pellicola.

Sono state condotte quattro prove utilizzando diversi elementi di contatto da applicare sul tappeto, come mostrato in Figura 6. La forza di pressione è stata calcolata utilizzando come elemento di contatto:

-Un disco di legno con raggio 48,3 mm e spessore di 4 mm (test 1);

-Un cilindro di acciaio di raggio 35,5 mm (test 2);

-Una piccola spugna (test 3).

La variazione della resistenza del tappeto (Ω) in funzione della pressione espressa in N per i diversi test condotti è riportata in Figura 15. All'aumentare della forza applicata al sensore del tappeto, questo mostra una diminuzione della resistenza elettrica.

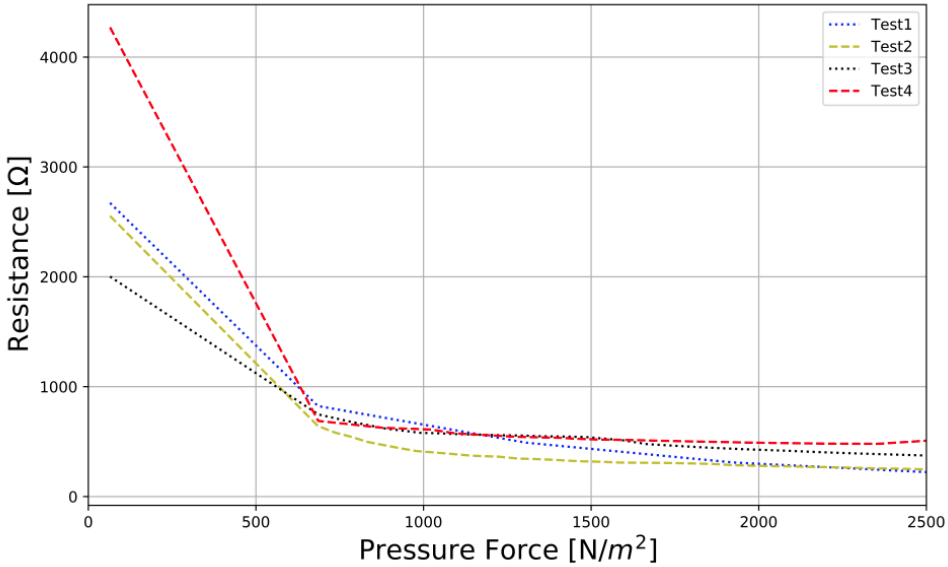


Figura 15. Resistenza in funzione della pressione applicata sul tappetino.

Secondo test sperimentale

Nel secondo esperimento le misurazioni del tappetino del sensore di pressione sono state effettuate utilizzando come forza di pressione i pesi di calibrazione cilindrici. Pesi di calibrazione basati su quattro cilindri di diametro d pari a 9.75 mm e una base di schiuma sono stati applicati al tappetino su diverse celle sensibili della matrice del sensore per misurare la resistenza.

La variazione della resistenza del tappeto (Ω) in funzione della pressione espressa in N per le diverse celle sensibili (B1, E1, B4, E4) del tappeto è riportata in Figura 7.

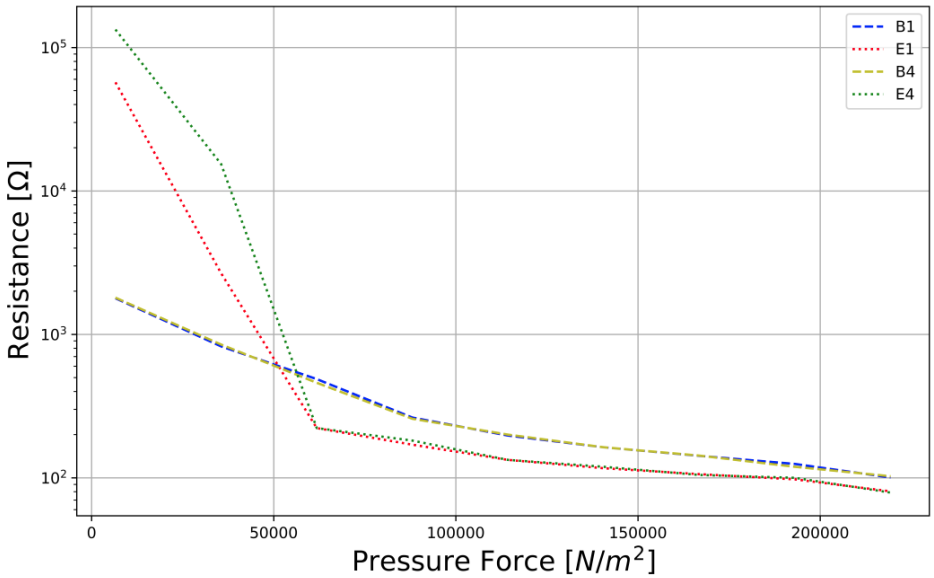


Figura 16. Resistenza in funzione della forza applicata sul tappetino per differenti celle attive.

Le righe e le colonne della matrice sono numerate, rispettivamente, con lettere (A, B, C…) e con numeri (1, 2, 3…) come mostrato in Figura 13b. I pesi del carico applicato sul tappetino sono 50 g di piastra, 221 g di tavola e 220 g di cilindro d'acciaio. La tensione di alimentazione è di 4 V. È stata testata la ripetibilità dell'esperimento del tappetino, fornendo lo stesso risultato di resistenza con la stessa procedura di misurazione per gli stessi pesi (Figura 17). Le pressioni aggiuntive sono state ottenute aumentando i pesi da 500 g a 5000 g e leggendo il valore di resistenza con un multimetro con una tensione costante di 5 V.

Quindi sono state ripetute le misure con pesi decrescenti da 5000 g a 500 g.

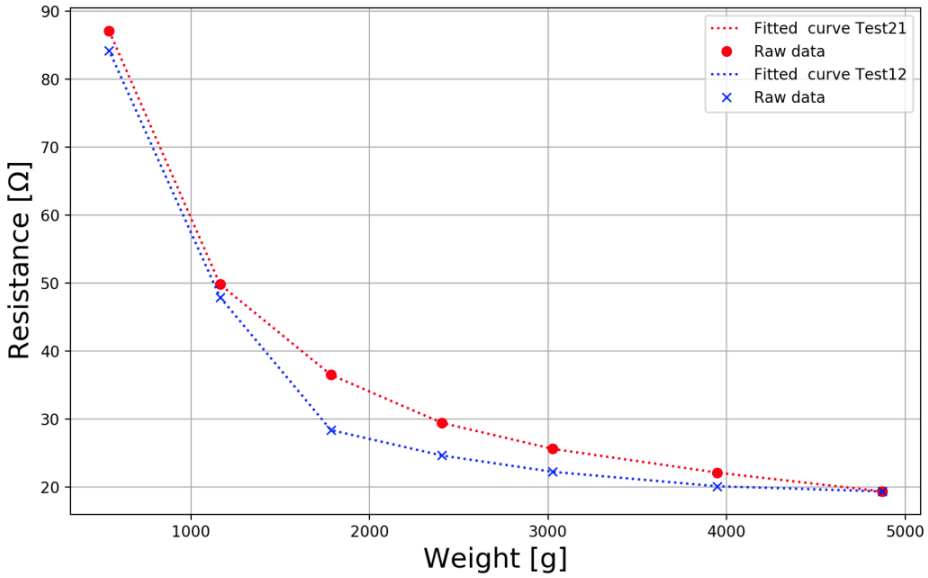
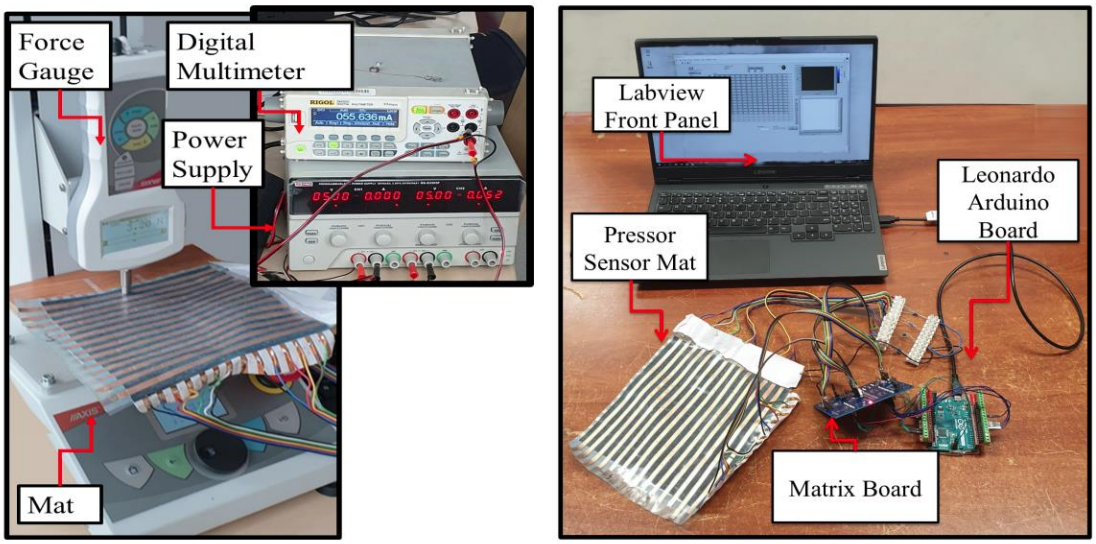


Figura 17. Resistenza in funzione del peso applicato sul tappetino.

Terzo test sperimentale

Nel terzo esperimento, le misurazioni del tappetino sensore di pressione sono state eseguite utilizzando il multimetro digitale Rigol DM3058E da $5\frac{1}{2}$ cifre, l'alimentatore RS PRO e il dinamometro FB200 200 N (20 kg) 0,05 N (Figura 5a).

Il misuratore di forza è stato utilizzato per la misurazione della forza di pressione sul tappetino.



(a) (b)

Figura 18. (a) Il supporto è costituito dal tappetino sensibile alla pressione, dal manometro, dal multimetro digitale e dall'alimentatore; (b) supporto da laboratorio utilizzato per misurazioni condotte utilizzando il sistema embedded Arduino e compatibilità laptop con LabVIEW 2018 SP1.

Per eseguire le misurazioni, il dinamometro è stato montato su un supporto in posizione verticale e opportunamente calibrato. Il dinamometro è stato utilizzato per applicare carichi diversi e misurare la pressione sui prototipi di tappetini con geometrie diverse, come mostrato in Figura 18a.

La matrice del tappeto è una disposizione quadrata di elementi in righe e colonne, composta da 14 x 14 elementi sensibili.

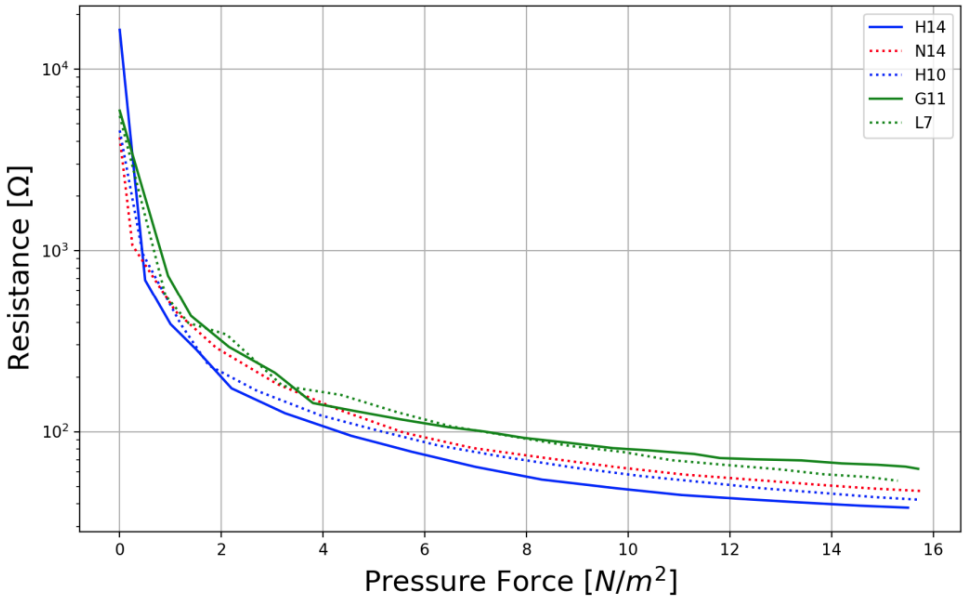


Figura 3. Resistenza in funzione della forza applicata al tappetino sensibile n.2 per differenti punti.

Per misurare la corrente e la tensione è stato utilizzato il multimetro e si presuppone una tensione di alimentazione di 5 V, 3,3 V e 7,5 V. Gli elementi della cella considerati sotto la pressione del dinamometro sono H14, N14, H10, L7 e G11. La variazione della resistenza in funzione della forza applicata per i test condotti è riportata in Figura 17.

Quarto test sperimentale

Il sistema di misurazione collegato al sensore del tappeto è costituito da un alimentatore, un multiplexer, una scheda Arduino e cavi. Le misure di tensione e resistenza sono state condotte collegando in serie al tappetino un resistore da 2 kΩ, come mostrato nello schema elettrico di Figura 13c. La tensione di alimentazione è di 4,2 V.

METODO

Approccio della rete neurale al sensore

Una rete neurale è un modello computazionale ispirato alla struttura e alla funzione del sistema nervoso umano. Può essere utilizzato per riconoscere modelli complessi e per stabilire relazioni nei dati. La rete neurale artificiale (ANN) è costituita da un insieme di nodi, noti come "neuroni artificiali", organizzati in blocchi chiamati strati e collegati tra loro tramite pesi. Ogni neurone artificiale riceve input da altri neuroni e produce un output come feed di inoltro, che viene poi assegnato ai neuroni successivi. In particolare, un'apposita funzione matematica nota come funzione di attivazione, mappa gli input alle corrispondenti uscite. Alcune funzioni di attivazione aiutano a catturare una forte non linearità nei dati e, per questo motivo le reti neurali sono state utilizzate per i dati sperimentali raccolti in laboratorio provenienti dai sensori dei tappetini.

CONCLUSIONI

Questo articolo ha descritto i tappetini intelligenti sensibili basati su materiale polimerico Velostat. Attraverso i test eseguiti in laboratorio sono stati studiati vari design, geometrie, proprietà elettriche e meccaniche dei tappetini sensore home made.

È stato sviluppato un metodo di approssimazione basato su algoritmi di rete neurale per determinare la relazione tra le diverse forme del tappeto, pressione e stress esercitato sul tappeto e la resistenza del materiale.

L'evoluzione dell'elettronica a basso consumo e la disponibilità di nuovi materiali intelligenti sono molto utili ai fini dello sviluppo di nuovi sistemi indossabili per applicazioni mediche, monitoraggio dello stile di vita e rilevamento delle prestazioni. L'articolo [5] articolo presenta lo sviluppo e la realizzazione di una nuova soletta intelligente per il monitoraggio della distribuzione della pressione plantare e dei parametri dell'andatura; include infatti una matrice di rilevamento piezoresistivo basata su uno strato di Velostat per tradurre la pressione applicata in un segnale elettrico. Inizialmente vengono fornite le caratterizzazioni dei materiali accurate e complete dei sensori di pressione basati su Velostat in funzione delle dimensioni, del materiale di supporto e dell'andamento della pressione. Viene discussa la realizzazione e la sperimentazione di una matrice di rilevamento piezoresistivo affidabile e a basso costo basata su una struttura a sandwich. Quest'ultima è interfacciata con una sezione di condizionamento ed elaborazione a basso consumo basata su una scheda Arduino e un multiplexer analogico per l'acquisizione dei dati di pressione. La soletta include un accelerometro capacitivo a tre assi per il rilevamento dei parametri dell'andatura (tempo di oscillazione e tempo di appoggio) caratteristici della camminata. È incluso un modulo bluetooth low energy (BLE) 5.0 per trasmettere in tempo reale i dati acquisiti verso un PC, tablet o smartphone, per visualizzarli ed elaborarli utilizzando un'applicazione di elaborazione personalizzata. Inoltre, la soletta intelligente è dotata di una sezione di raccolta piezoelettrica per recuperare l'energia derivante dalla camminata. I test sul campo indicano che per una velocità di camminata superiore a 1 m/s, i requisiti di potenza del dispositivo (ovvero P = 5,84 mW) erano soddisfatti. Oltre 9 giorni di autonomia sono comunque garantiti dalla batteria integrata da 380 mAh in totale assenza di apporti energetici dalla sezione di accumulo di energia.

INTRODUZIONE

L'applicazione studiata in questo articolo è significativa, sia per il controllo delle malattie croniche che dei parametri vitali e delle prestazioni degli sportivi; i recenti progressi nell'elettronica e nelle comunicazioni a basso consumo hanno consentito lo sviluppo di dispositivi IoMT (internet of medical things) o IoHT (Internet of healthcare things) con notevoli miglioramenti tecnologici nella sanità e nella cultura della prevenzione. Nello specifico, il mercato dei dispositivi indossabili è in rapida crescita

garantendo pronto intervento, prevenzione e risparmio di tempo. I recenti progressi tecnologici hanno portato allo sviluppo di dispositivi biomedici indossabili, ad esempio per l'analisi dell'andatura, che è cruciale poiché la distribuzione della pressione plantare riflette la struttura del piede e la postura dell'utente. Queste solette intelligenti si basano su sensori di pressione (FSR), come resistori sensibili alla forza, per raccogliere dati relativi alla pressione plantare. Questo articolo riporta la progettazione di una soletta intelligente a basso costo, compatta ed affidabile per il monitoraggio della distribuzione della pressione plantare e dei parametri dell'andatura. È dotata di una matrice di sensori piezoresistivi basata su uno strato di Velostat, in una struttura a sandwich.

I principali contenuti di questo lavoro sono:

1. Una caratterizzazione completa dei sensori piezoresistivi basati su Velostat con diverse dimensioni, materiali di supporto, metodi di fissaggio e andamenti della pressione per determinare la soluzione più adatta per l'implementazione della matrice di rilevamento;
2. Progettazione della matrice di sensing, comprendente 8 FSR interfacciati con una sezione di condizionamento e acquisizione basata su una scheda Arduino;
3. Test della soletta intelligente a basso consumo mediante acquisizione dei dati di pressione e accelerazione forniti dalla matrice di rilevamento e dall'accelerometro a tre assi;
4. Sviluppo di un'applicazione Custom Processing, implementando un metodo di interpolazione per estendere la mappa di pressione acquisita.

La scheda Arduino acquisisce ed elabora i dati dei sensori, ottimizza il consumo energetico e gestisce la trasmissione dei dati, utilizzando un modulo BLE, verso un dispositivo host (ad esempio un PC) per il post-processing dei dati. Sfruttando le modalità a basso consumo, il fabbisogno energetico della soletta è di soli 5,84 mW.

STRUTTURA DEI SENSORI DI PRESSIONE REALIZZATI, SETUP SPERIMENTALE E METODOLOGIA PER LA CARATTERIZZAZIONE DEI SENSORI PIEZORESISTIVI

Questa sezione riporta i risultati delle caratterizzazioni di diversi sensori di pressione basati su Velostat con diverse forme e dimensioni per comprendere meglio il comportamento del materiale. I sensori testati erano basati su una struttura a sandwich (Figura 12). Lo strato piezoresistivo è posto tra due supporti in PVC (cloruro di

Figura 20. Configurazione a sandwich usata per la realizzazione dei sensori di pressione basati su Velostat.

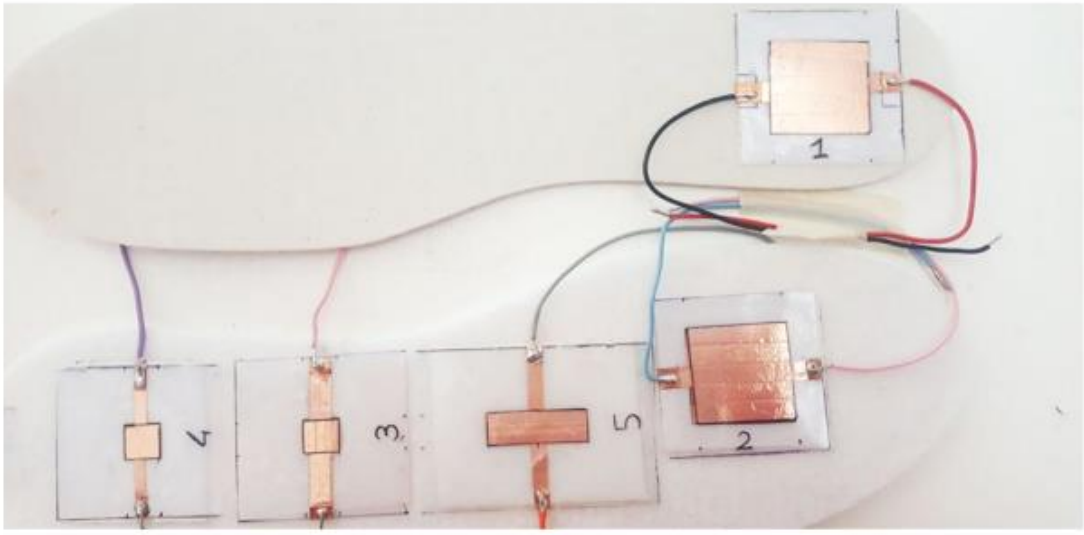


Figura 21. Sensori piezoresistivi realizzati con diverse forme e dimensioni.

polivinile), con spessore di 0,2 mm, su cui erano posizionati simmetricamente due elettrodi di rame. Lo strato di Velostat, posto tra due elettrodi, non è stato incollato ai substrati ma sigillato nell'area di rilevamento mediante resina epossidica. Inoltre, agli elettrodi sono stati collegati due percorsi in rame per renderli accessibili per la

misurazione della resistenza elettrica. In questo modo sono stati realizzati diversi sensori di pressione con dimensioni e forme diverse (Figura 13).

Capitolo 2

Il banco di misura

2.1 I campioni di Velostat

Sono stati utilizzati due sensori quadrati di diversa area, entrambi basati su Velostat. Il primo sensore (Figura 22a) ha un'area di 5 x 5 cm² e presenta due alette di rame, esterne alla sua area e decentrate rispetto ai suoi lati, con le quali si è potuto fare le varie misurazioni. Il secondo sensore (Figura 22b) ha un'area di 8 x8 cm² e presenta delle alette di rame, esterne alla sua area, centrate su due lati opposti del quadrato.

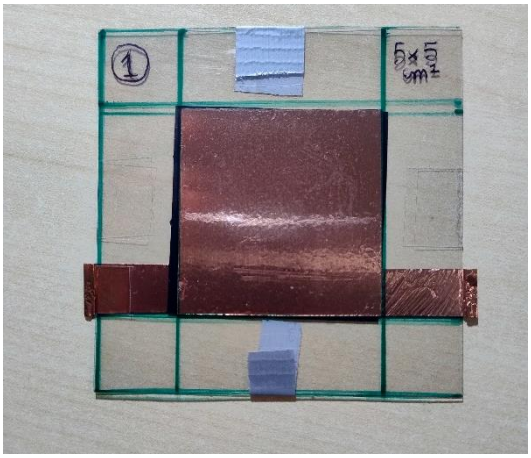


Figura 22a. Sensore 5 x 5 cm²

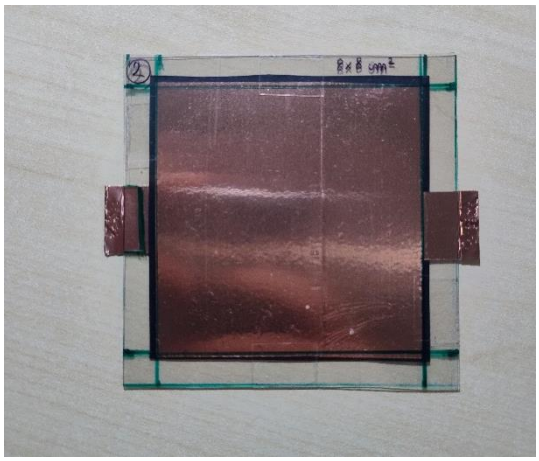


Figura 22b. Sensore 8 x 8 cm²

2.2 Il circuito elettrico

Per le misurazioni di tensione è stato creato un partitore di tensione (Figure 23 e 24) alimentato attraverso il generatore di tensione interno al Moku:Go, lo strumento utilizzato come oscilloscopio. Il partitore presentava poi un resistore fisso (Rfisso) e un resistore variabile (Rsens) che schematizzava il comportamento del sensore di pressione.

Lo schema elettrico è stato costruito su una breadboard in modo tale da facilitare l'utilizzo del circuito e semplificare la sostituzione di Rfisso durante le prove svolte.

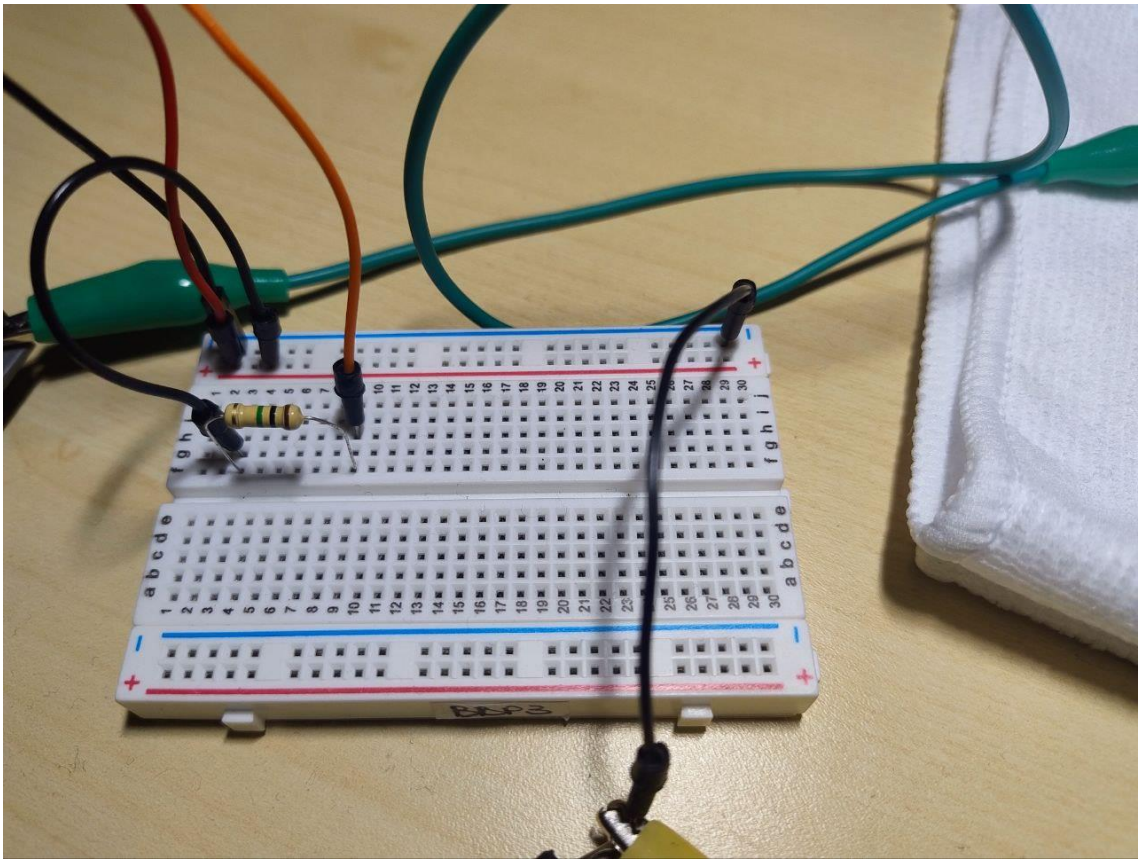


Figura 23. Foto della breadboard con partitore di tensione.

Questo partitore è stato utilizzato per poter misurare la tensione ai capi dei sensori di pressione e per poter verificare eventuali variazioni di comportamento dei sensori al variare della tensione di alimentazione a parità di pressione esercitata sull'elemento sensibile. Infatti, variando il valore del resistore Rfisso, è possibile modificare la differenza di potenziale presente ai capi del sensore.

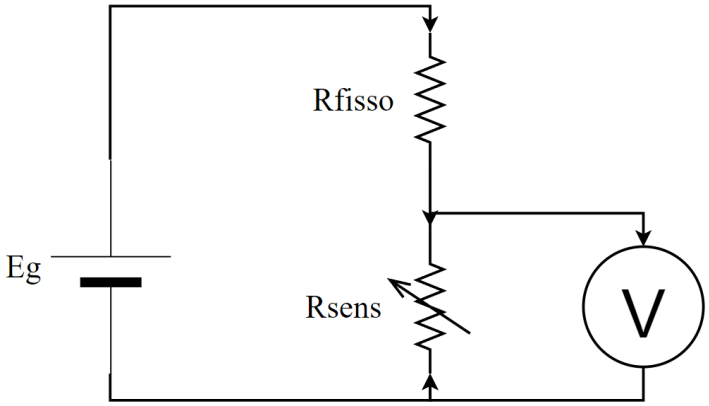


Figura 24. Schema elettrico del partitore di tensione.

2.3 L'oscilloscopio

Tutte le misurazioni effettuate sono state fatte attraverso l'utilizzo del Moku:GO, uno strumento della società Liquid Instruments. Moku:GO è un dispositivo compatto e versatile che combina diverse funzionalità di strumenti di misura elettronici in un unico dispositivo. Tra le sue capacità ci sono oscilloscopio, generatore di forme d'onda, analizzatore di spettro e altro ancora. Per queste applicazioni è sempre stato utilizzato in modalità oscilloscopio in modo da poter visualizzare l'andamento della tensione misurata nel tempo ed è anche stata utilizzata la sua funzione interna di generatore di tensione continua, impostata sempre a 16 V, per alimentare il partitore di tensione.

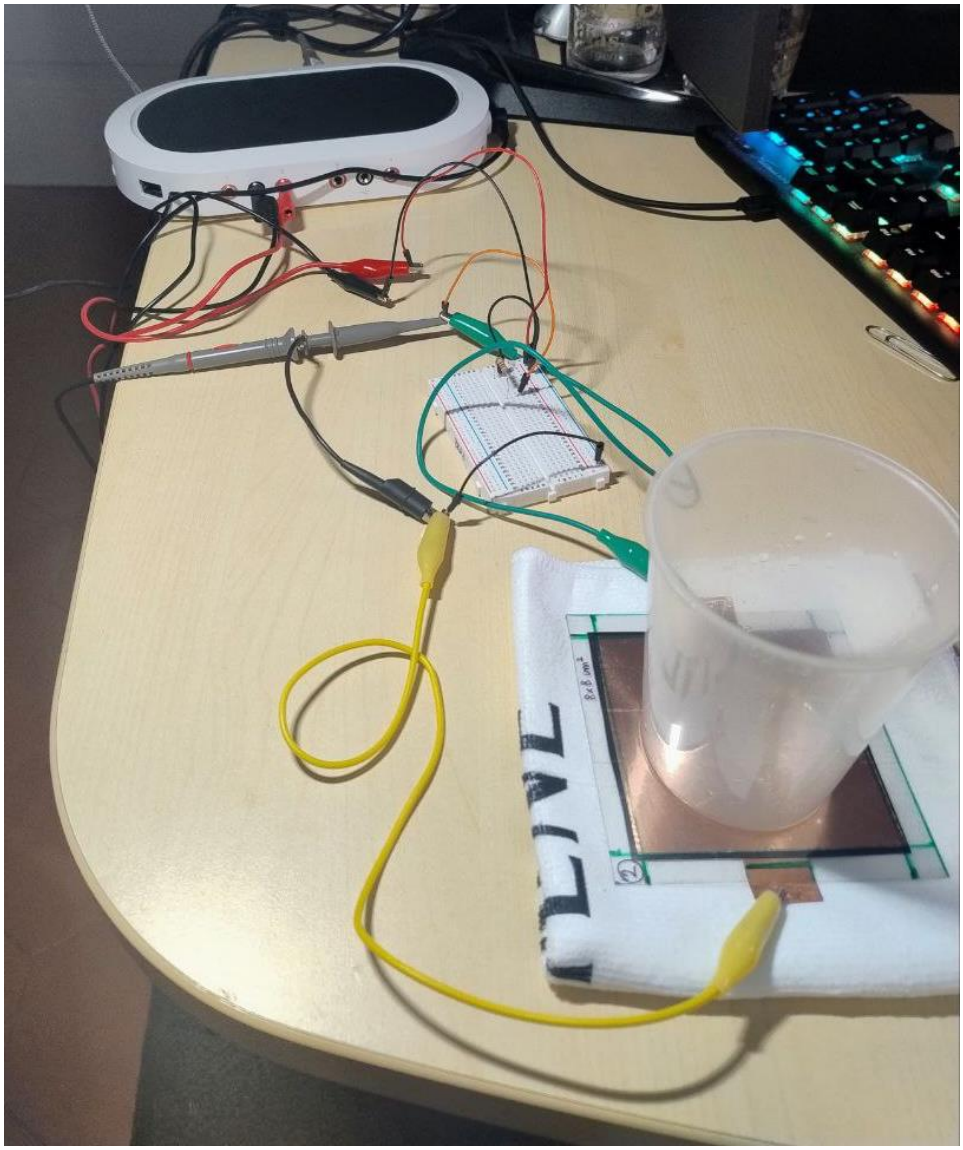


Figura 25. Foto del setup completo.

Per interfacciare lo strumento con il circuito elettrico sono stati necessari due cavi per l'alimentazione ed una sonda che è stata collegata ai capi del resistore variabile, che è il sensore sotto test in questo caso, andando così a completare il setup (Figura 25).

Collegando il Moku, tramite cavo USB, al computer è stato possibile utilizzare la sua interfaccia attraverso il suo software.

Capitolo 3

Prove sperimentali

3.1 Preparazione del setup

Prima dell'inizio dello svolgimento delle prove, attraverso l'utilizzo di un multimetro, è stata calcolata la resistenza del sensore 8 x 8 cm^2 scarico, che corrisponde a circa 1 kΩ e quella del sensore 5 x 5 cm^2 che corrisponde a circa 6 kΩ.

Il setup precedentemente descritto è sempre stato mantenuto fisso e non è mai stato spostato, né cambiati i collegamenti o i morsetti utilizzati, per evitare il più possibile che questi fattori potessero influire nei risultati finali.

La tensione di alimentazione del partitore di tensione è sempre stata mantenuta costante a 16 V DC.

3.2 Svolgimento delle prove

3.2.1 Misurazioni con resistore fisso da 1 MΩ

La prima misurazione è stata effettuata utilizzando il sensore 8 x 8 cm^2 e il resistore fisso da 1 MΩ che permette di effettuare le misurazioni avendo il tappetino sensibile alimentato con una tensione bassa, nell'ordine della decina di mV.

Con il sensore scarico, attraverso l'interfaccia dell'oscilloscopio del Moku:Go (Figura 26) è stata misurata una differenza di potenziale tra i capi del sensore di circa 21,7 mV e una deviazione standard di circa 0,8 mV che però risultava altamente variabile rispetto alla tensione poiché quest'ultima si è stabilizzata dopo un lasso di tempo di circa 10 minuti.

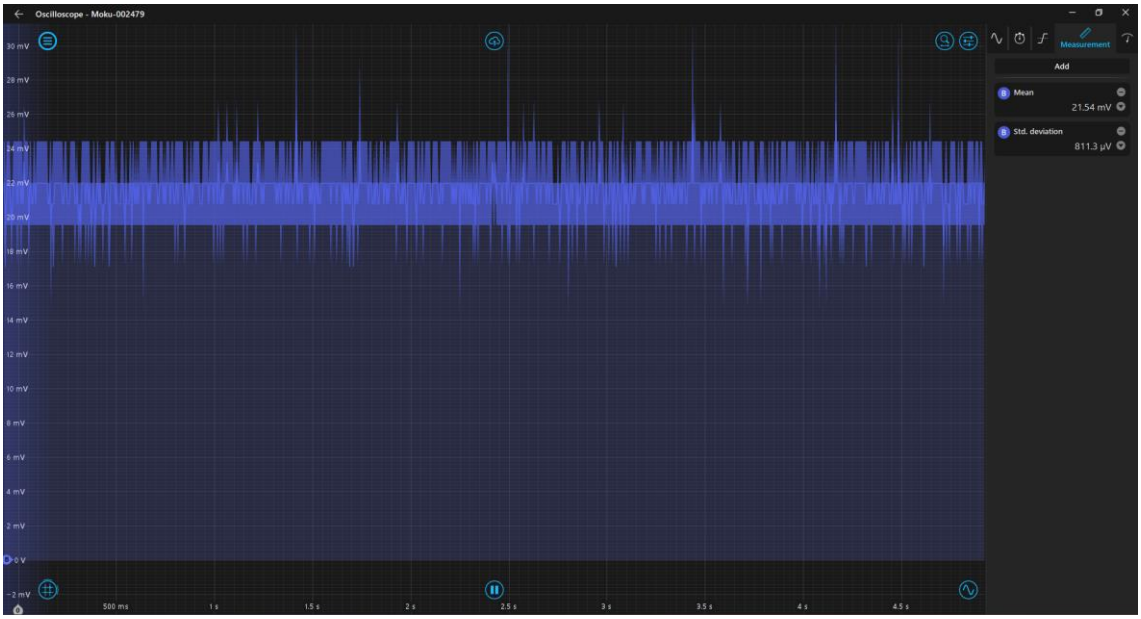


Figura 26. Tensione misurata ai capi del sensore 8x8 in assenza di peso applicato.

Successivamente è stato posizionato il primo peso e, una volta stabilizzati, sono stati registrati i valori di tensione e di deviazione standard (Figura 27).

In particolare, trovo una tensione di 8,2 mV e una deviazione standard di circa 1,2 mV.

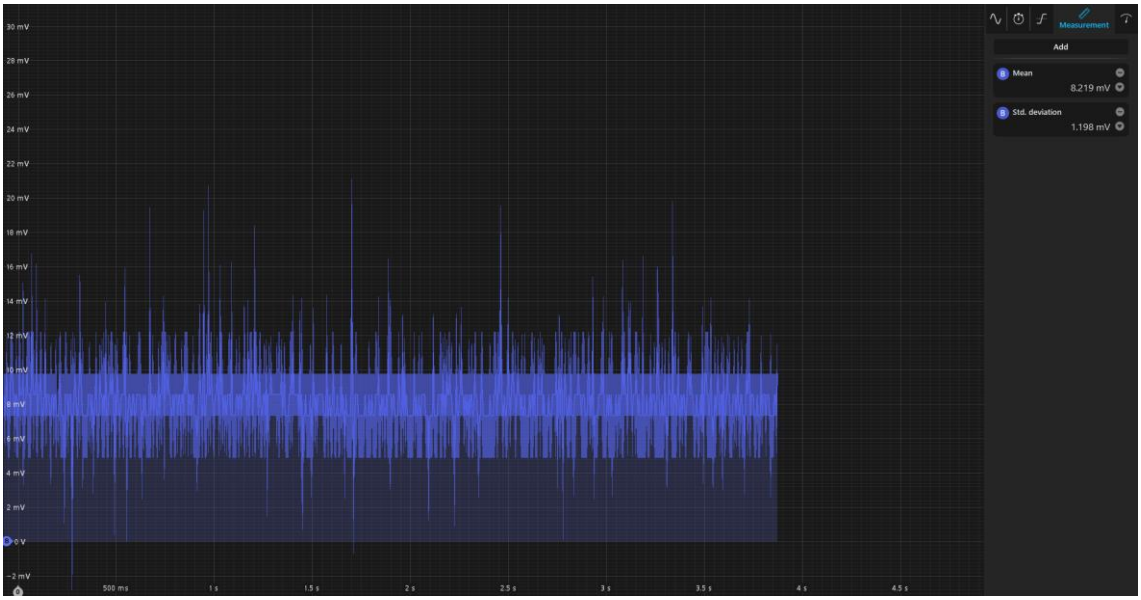


Figura 27. Tensione misurata ai capi del sensore 8x8 a seguito dell'applicazione del primo peso.

In seguito alla misurazione è stato tolto il peso dal sensore ed è stato lasciato scarico per circa dieci minuti in modo tale da farlo ritornare alle condizioni iniziali.

È stato poi appoggiato il secondo peso sul sensore e nuovamente lasciato riposare fino alla stabilizzazione dei valori da misurare, rilevando una tensione di 2,8 mV e una deviazione standard di 1,3 mV (Figura 28).

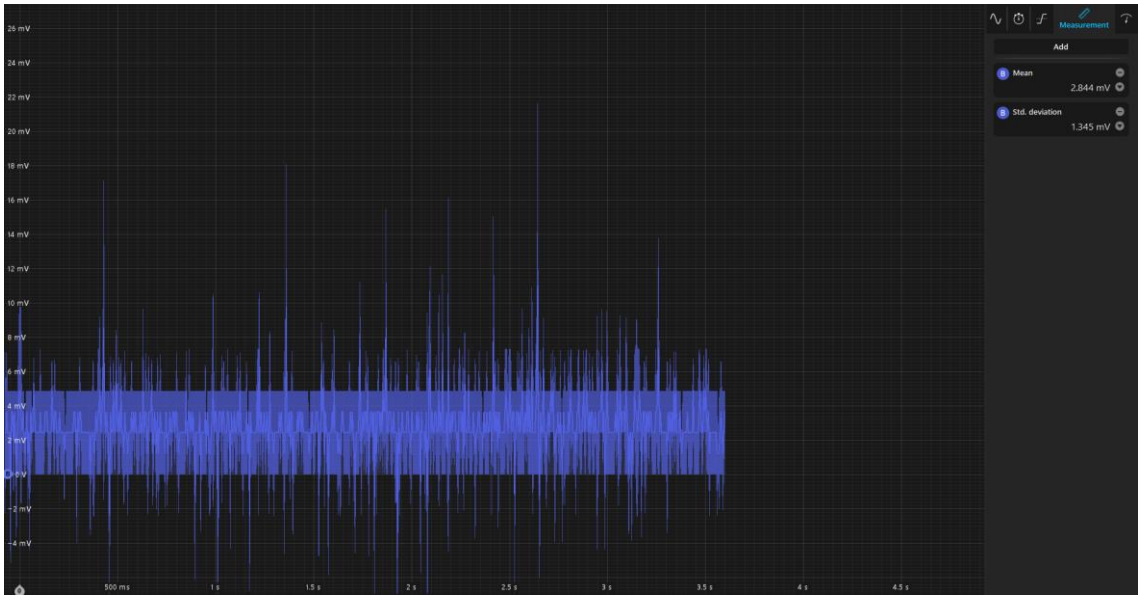


Figura 28. Tensione misurata ai capi del sensore 8x8 a seguito dell'applicazione del secondo peso.

Con lo stesso procedimento sono stati registrati i valori rilevati con il terzo peso, trovando una tensione di 1,3 mV e una deviazione standard di 1,5 mV (Figura 29).

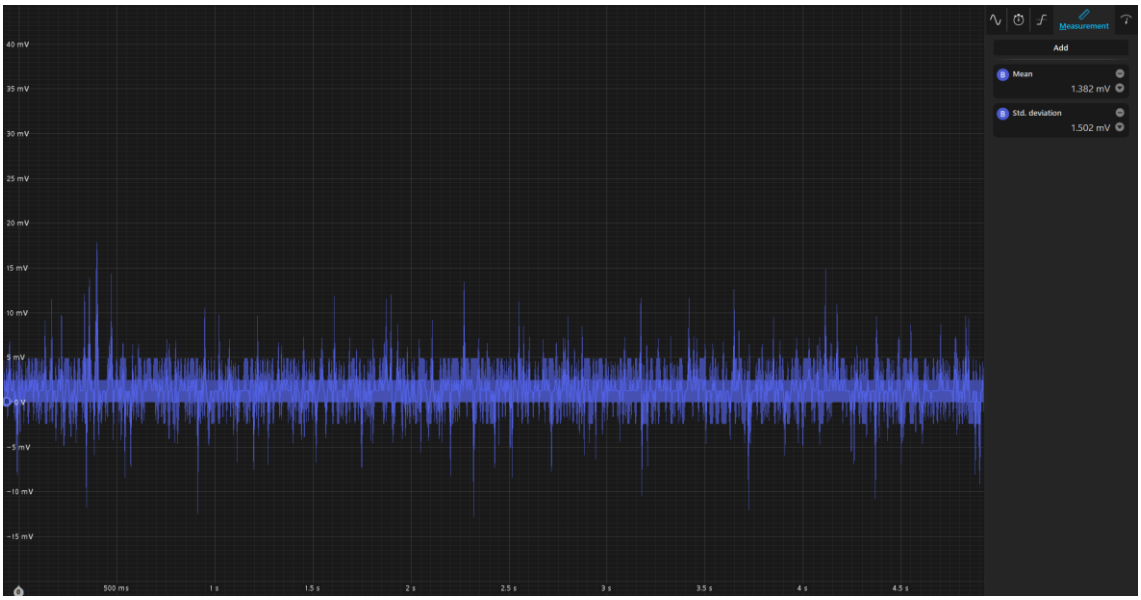


Figura 29. Tensione misurata ai capi del sensore 8x8 a seguito dell'applicazione del terzo peso.

Questo procedimento è stato eseguito altre due volte in modo identico, rispettando sempre un tempo minimo di 10 minuti per far stabilizzare il sensore ad ogni cambio di pressione presente su di esso.

Nella seconda serie di misurazioni sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Peso 1: tensione di 9,0 mV e deviazione standard di 1,2 mV.

Peso 2: tensione di 3,8 mV e deviazione standard di 1,6 mV.

Peso 3: tensione di 2,0 mV e deviazione standard di 1,3 mV.

Nella terza serie di misurazioni sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Peso 1: tensione di 8,8 mV e deviazione standard di 1,5 mV.

Peso 2: tensione di 4,1 mV e deviazione standard di 1,6 mV.

Peso 3: tensione di 1,6 mV e deviazione standard di 1,1 mV.

Attraverso l'utilizzo dei valori di queste tre serie di misurazioni è stata calcolata la tensione media rilevata per tutti e tre i pesi e la deviazione standard campionaria associata.

Le tensioni medie per i tre pesi utilizzati sono rispettivamente:

$$V_1 = \frac{(8{,}2+9{,}0+8{,}8)\ mV}{3} = 8{,}7\ mV$$

$$V_2 = \frac{(2{,}8+3{,}8+4{,}1)\ mV}{3} = 3{,}6\ mV$$

$$V_3 = \frac{(1{,}4+2{,}0+1{,}6)\ mV}{3} = 1{,}7\ mV$$

Le deviazioni standard campionarie sono rispettivamente:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}42\ mV$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V2)^2}{n-1}} = 0{,}68\ mV$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}31\ mV$$

I procedimenti eseguiti fino a questo punto sono stati ripetuti con il sensore 5 x 5 cm^2 ottenendo le misure sotto riportate.

Prima serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 46,9 mV e deviazione standard di 0,9 mV.

Peso 2: tensione di 25.0 mV e deviazione standard di 0,8 mV.

Peso 3: tensione di 15,4 mV e deviazione standard di 0,8 mV.

Seconda serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 51,5 mV e deviazione standard di 1,0 mV.

Peso 2: tensione di 25,8 mV e deviazione standard di 0,7 mV.

Peso 3: tensione di 16,9 mV e deviazione standard di 0,8 mV.

Terza serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 49,3 mV e deviazione standard di 0,9 mV.

Peso 2: tensione di 31,5 mV e deviazione standard di 0,8 mV.

Peso 3: tensione di 15,9 mV e deviazione standard di 0,7 mV.

Di seguito vengono riportati i valori medi di tensione trovati per i rispettivi tre pesi utilizzati e le deviazioni standard campionarie associate.

$$V_1 = \frac{(46{,}9+51{,}5+49{,}3)\ mV}{3} = 49{,}2\ mV$$

$$V_2 = \frac{(25{,}0+25{,}8+31{,}5)\ mV}{3} = 27{,}4\ mV$$

$$V_3 = \frac{(15{,}4+16{,}9+15{,}9)\ mV}{3} = 16{,}1\ mV$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 2{,}30\ mV$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V2)^2}{n-1}} = 3{,}54\ mV$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}76\ mV$$

3.2.2 Misurazioni con resistore fisso da 1 kΩ

Una volta completate tutte le misurazioni con il resistore fisso da 1 MΩ, questo è stato sostituito con uno dal valore di 1 kΩ in modo tale da ripetere il procedimento con il sensore alimentato da una tensione maggiore e vedere se si possono notare differenze di comportamento dovute a questo.

È stato replicato il procedimento descritto nella sottosezione 3.3.1, iniziando con il sensore 8 x 8 cm^2 ed in seguito con il sensore 5 x 5 cm^2. Vengono riportati di seguito i risultati.

Sensore 8 x 8 cm^2.

Prima serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 4,5 V e deviazione standard di 1,7 mV.

Peso 2: tensione di 3,3 V e deviazione standard di 3,7 mV.

Peso 3: tensione di 2,4 V e deviazione standard di 3,3 mV.

Seconda serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 4,8 V e deviazione standard di 1,4 mV.

Peso 2: tensione di 3,0 V e deviazione standard di 2.0 mV.

Peso 3: tensione di 2,4 V e deviazione standard di 3,5 mV.

Terza serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 4,9 V e deviazione standard di 1,4 mV.

Peso 2: tensione di 3,6 V e deviazione standard di 3,8 mV.

Peso 3: tensione di 2,6 V e deviazione standard di 3,0 mV.

Calcolo delle tensioni medie e delle deviazioni standard campionarie:

$$V_1 = \frac{(4{,}5+4{,}8+4{,}9)\ V}{3} = 4{,}7\ V$$

$$V_2 = \frac{(3{,}3+3{,}0+3{,}6)\ V}{3} = 3{,}3\ V$$

$$V_3 = \frac{(2{,}4+2{,}4+2{,}6)\ V}{3} = 2{,}5\ V$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}21\ V$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V2)^2}{n-1}} = 0{,}30\ V$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}12\ V$$

Sensore 5 x 5 cm^2.

Prima serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 8,5 V e deviazione standard di 3,6 mV.

Peso 2: tensione di 5,9 V e deviazione standard di 2,7 mV.

Peso 3: tensione di 5,3 V e deviazione standard di 3,6 mV.

Seconda serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 9,9 V e deviazione standard di 2,3 mV.

Peso 2: tensione di 6,3 V e deviazione standard di 1,2 mV.

Peso 3: tensione di 5,8 V e deviazione standard di 4,0 mV.

Terza serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 8,9 V e deviazione standard di 6,3 mV.

Peso 2: tensione di 6,6 V e deviazione standard di 1,1 mV.

Peso 3: tensione di 6,1 V e deviazione standard di 1,3 mV.

Calcolo delle tensioni medie e delle deviazioni standard campionarie:

$$V_1 = \frac{(8{,}5+9{,}9+8{,}9)\ V}{3} = 9{,}1\ V$$

$$V_2 = \frac{(5{,}9+6{,}3+6{,}6)\ V}{3} = 6{,}3\ V$$

$$V_3 = \frac{(5{,}3+5{,}8+6{,}1)\ V}{3} = 5{,}7\ V$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}72\ V$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V2)^2}{n-1}} = 0{,}35\ V$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}41\ V$$

3.2.3 Misurazioni con resistore fisso da 10 Ω

Viene sostituito nuovamente il resistore fisso, questa volta con uno da 10 Ω andando ad aumentare ulteriormente la tensione di alimentazione del sensore di pressione.

Viene utilizzato di nuovo il procedimento della sottosezione 3.3.1 ottenendo le misurazioni riportate di seguito.

Sensore 8 x 8 cm^2.

Prima serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 15,2 V e deviazione standard di 4,0 mV.

Peso 2: tensione di 14,5 V e deviazione standard di 5,3 mV.

Peso 3: tensione di 13,7 V e deviazione standard di 5,5 mV.

Seconda serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 15,1 V e deviazione standard di 3,8 mV.

Peso 2: tensione di 14,6 V e deviazione standard di 4,3 mV.

Peso 3: tensione di 14,0 V e deviazione standard di 5,2 mV.

Terza serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 15,1 V e deviazione standard di 3,8 mV.

Peso 2: tensione di 14,4 V e deviazione standard di 4,2 mV.

Peso 3: tensione di 14,3 V e deviazione standard di 4,4 mV.

Calcolo delle tensioni medie e delle deviazioni standard campionarie:

$$V_1 = \frac{(15{,}2+15{,}1+15{,}1)\ V}{3} = 15{,}1\ V$$

$$V_2 = \frac{(14{,}5+14{,}6+14{,}4)\ V}{3} = 14{,}5\ V$$

$$V_3 = \frac{(13{,}7+14{,}0+14{,}3)\ V}{3} = 14\ V$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}07\ V$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V2)^2}{n-1}} = 0{,}10\ V$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}30\ V$$

Sensore 5 x 5 cm^2.

Prima serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 15,4 V e deviazione standard di 3,5 mV.

Peso 2: tensione di 15,3 V e deviazione standard di 4,1 mV.

Peso 3: tensione di 15,2 V e deviazione standard di 8,2 mV.

Seconda serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 15,7 V e deviazione standard di 3,6 mV.

Peso 2: tensione di 15,5 V e deviazione standard di 4,1 mV.

Peso 3: tensione di 15,6 V e deviazione standard di 2,9 mV.

Terza serie di misurazioni:

Peso 1: tensione di 15,7 V e deviazione standard di 3,3 mV.

Peso 2: tensione di 15,7 V e deviazione standard di 3,5 mV.

Peso 3: tensione di 15,6 V e deviazione standard di 2,9 mV.

Calcolo delle tensioni medie e delle deviazioni standard campionarie:

$$V_1 = \frac{(15{,}4+15{,}7+15{,}7)\ V}{3} = 15{,}6\ V$$

$$V_2 = \frac{(15{,}3+15{,}5+15{,}7)\ V}{3} = 15{,}5\ V$$

$$V_3 = \frac{(15{,}2+15{,}6+15{,}6)\ V}{3} = 15{,}5\ V$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}17\ V$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V2)^2}{n-1}} = 0{,}20\ V$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(Vi-V1)^2}{n-1}} = 0{,}23\ V$$

Capitolo 4

Analisi dei risultati

4.1 Grafici tensione media – forza applicata

I valori di tensione media calcolati per ogni peso utilizzato e per ognuno dei sensori sono riportati nelle Figure 30, 31, 32, 33, 34 e 35 di seguito riportate.

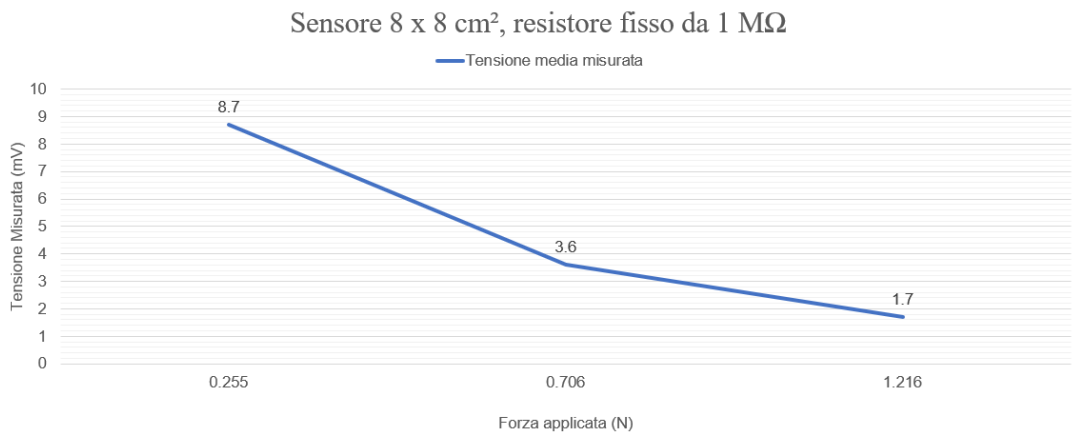


Figura 30. Grafico tensione media misurata – forza applicata.

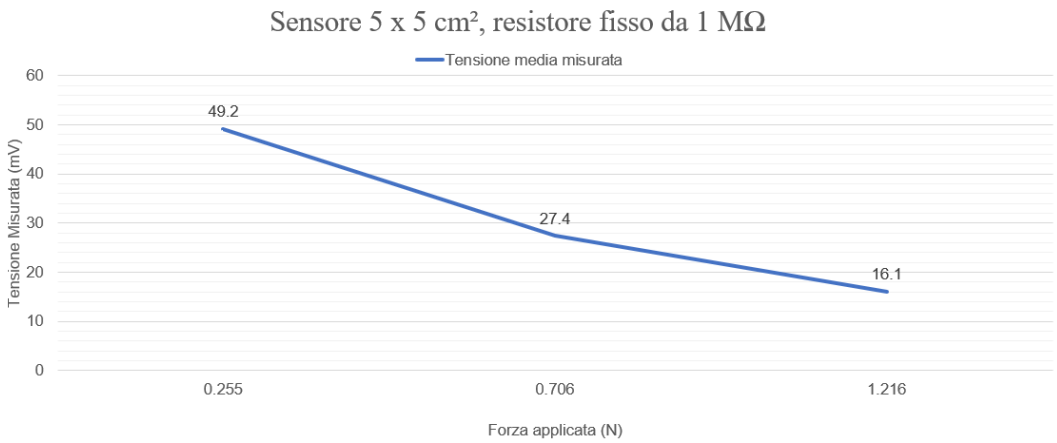


Figura 31. Grafico tensione media misurata – forza applicata.

Nelle Figure 30 e 31 si può osservare chiaramente che, utilizzando un resistore fisso da 1 MΩ, la tensione media misurata diminuisce all'aumentare della pressione per entrambi i sensori. Tuttavia, emerge una differenza: il sensore 5 x 5 cm^2 mostra generalmente una resistenza più elevata rispetto all'altro sensore, risultando in valori di tensione misurati più elevati.

Inoltre, è importante notare che le deviazioni standard calcolate risultano essere le più elevate tra le tre prove effettuate.

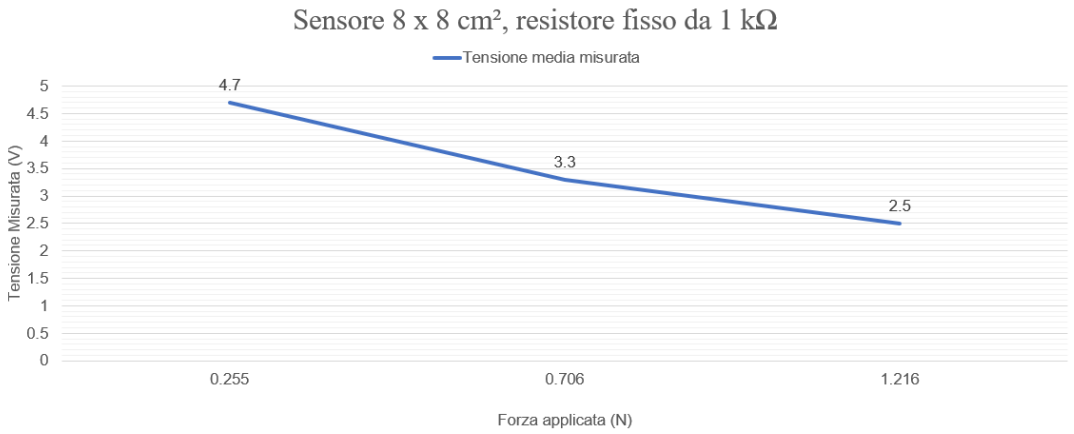


Figura 4 Grafico tensione media misurata – forza applicata.

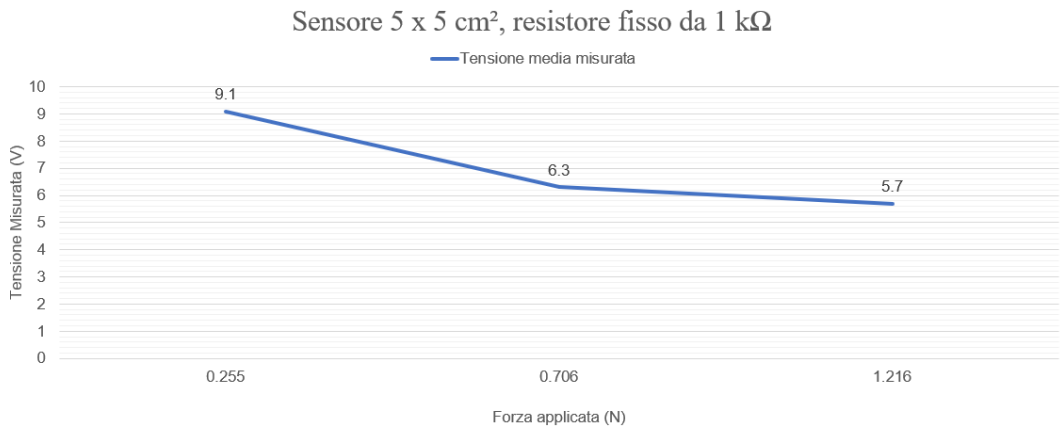


Figura 33. Grafico tensione media misurata – forza applicata.

Anche dalle Figure 32 e 33 emerge chiaramente un andamento decrescente della tensione media misurata al crescere della pressione applicata. Tuttavia, un'analisi dei valori delle deviazioni standard campionarie calcolate rivela che queste sono inferiori rispetto alle prove eseguite con gli altri due resistori fissi.

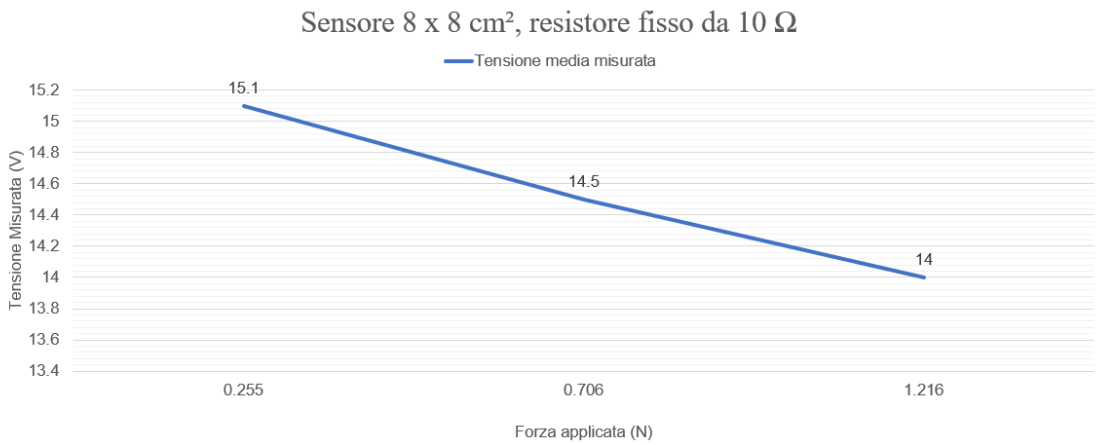


Figura 34. Grafico tensione media misurata – forza applicata.

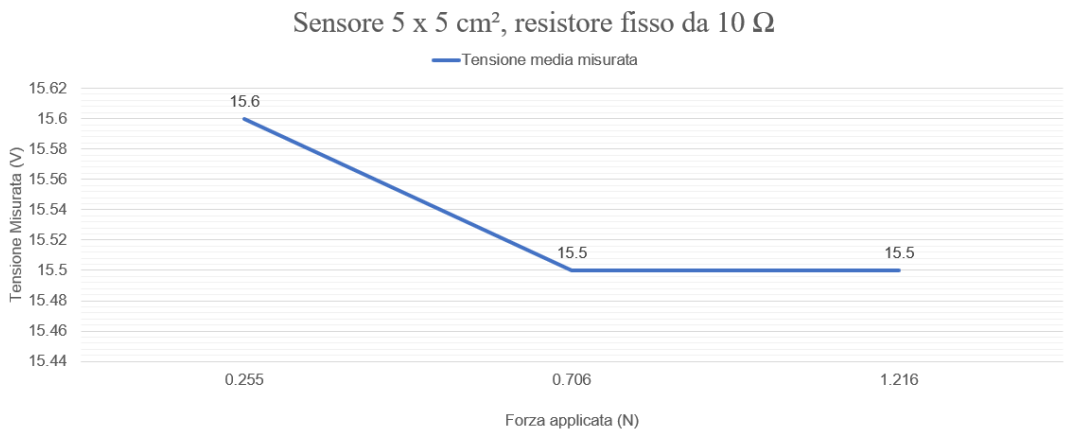


Figura 35. Grafico tensione media misurata – forza applicata.

Anche dalle Figure 34 e 35, riguardanti le prove con resistore da 10 Ω, è evidente una diminuzione della tensione all'aumentare della pressione. Tuttavia, è da notare che, in questo caso, le deviazioni standard campionarie risultano più elevate rispetto al caso precedente.

4.2 Considerazioni finali

Tenendo in conto la formula del partitore di tensione:

$$Vmis = E\frac{Rmis}{Rmis + Rfisso}$$

in tutti i grafici è possibile notare una diminuzione della tensione misurata e, quindi, una diminuzione della resistenza misurata all'aumentare della pressione applicata sul sensore, confermando così ciò che è riportato in letteratura.

È osservabile una particolarità nei grafici ottenuti con l'utilizzo del sensore da 10 Ω: la variazione di tensione all'aumentare della pressione è minima o addirittura non apprezzabile. Questa evidenza suggerisce che il limite di tensione di funzionamento del sensore è stato superato. Tale conclusione emerge confrontando i grafici, poiché si osservano notevoli differenze nella tensione media tra i tre step di pressione applicata. Ciò indica che entrambi i sensori richiedono un'alimentazione a tensione sufficientemente bassa per garantire un corretto funzionamento.

Per quanto riguarda la ripetibilità, le diverse misurazioni mostrano una coerenza notevole rispetto al valore medio rilevato, con una deviazione standard campionaria di pochi punti percentuali.

Per quanto concerne la stabilità, le misurazioni risultano costanti nel tempo soltanto dopo un breve periodo di attesa, di alcuni minuti, in quanto sia il sensore che il panno sottostante richiedono un breve periodo per stabilizzarsi.

È possibile dimostrare, partendo dalla formula del partitore di tensione, che al diminuire della tensione misurata anche la resistenza del sensore scende, a patto che la tensione misurata sia inferiore a quella di alimentazione.

Sviluppo la formula del partitore:

$$Vmis = E\ \frac{Rmis}{Rmis + Rfisso}$$

$$(Rmis + Rfisso)\ Vmis = E * Rmis$$

$$Rmis = \frac{Vmis}{E - Vmis}\ Rfisso$$

Considerando che Rfisso ed E sono costante, li posso indicare rispettivamente come A e B:

$$Rmis = \frac{Vmis}{A - Vmis} B.$$

Ora sostituisco Rmis e Vmis rispettivamente con y e x, ottenendo la funzione graficata in Figura 36:

$$y = \frac{x}{A - x} B$$

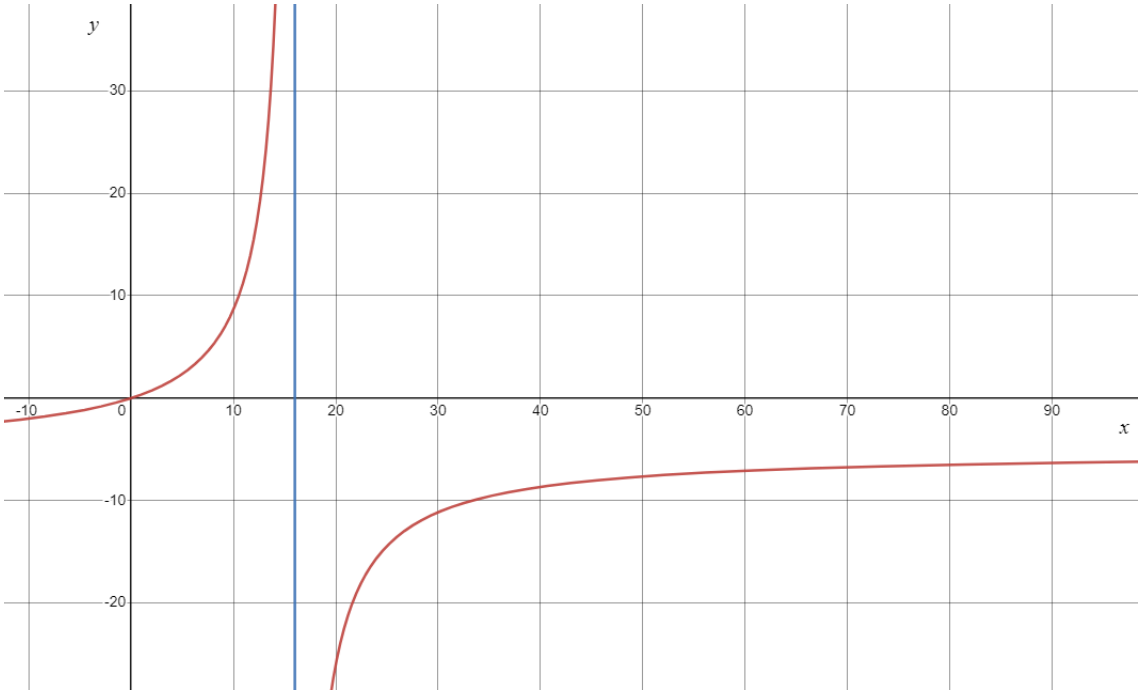


Figura 36. Grafico della relazione tra tensione misurata e resistenza del sensore.

Il grafico presenta un asintoto verticale x = A ed un asintoto orizzontale y = -B.

Questa funzione ha una costante A fissa pari a 16 V e una costante B dipendente dal valore del resistore fisso utilizzato. Tuttavia, indipendentemente dal valore del resistore e fintanto che la tensione misurata è inferiore a 16 V, si dimostra che l'aumento della pressione porta ad una diminuzione della tensione Vmis (x) e, di conseguenza, anche della resistenza Rsens (y) del sensore.

Bibliografia

[1] I. Vehec and L. Livovsky, "Flexible Resistive Sensor Based on Velostat," 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Demanovska Valley, Slovakia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISSE49702.2020.9121009.

[2] Shirley Chauhan, Anis Fatema, Ivin Kuriakose, Aftab M. Hussain, "Efficient Calibration Of Velostat-Based Flexible Pressure Sensor Matrix", 2023 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS) | 978-1-6654-5733-0/23/$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/FLEPS57599.2023.10220429.

[3] Dzedzickis, A.; Sutinys, E.; Bucinskas, V.; Samukaite-Bubniene, U.; Jakstys, B.; Ramanavicius, A.; Morkvenaite-Vilkonciene, I. Polyethylene-Carbon Composite (Velostat®) Based Tactile Sensor. *Polymers* **2020**, *12*, 2905. https://doi.org/10.3390/polym12122905.

[4] Kciuk, M.; Kowalik, Z.; Lo Sciuto, G.; Sławski, S.; Mastrostefano, S. Intelligent Medical Velostat Pressure Sensor Mat Based on Artificial Neural Network and Arduino Embedded System. *Appl. Syst. Innov.* **2023**, *6*, 84. https://doi.org/10.3390/asi6050084.

[5] de Fazio, R.; Perrone, E.; Velázquez, R.; De Vittorio, M.; Visconti, P. Development of a Self-Powered Piezo-Resistive Smart Insole Equipped with Low-Power BLE Connectivity for Remote Gait Monitoring. *Sensors* **2021**, *21*, 4539. https://doi.org/10.3390/s21134539.